

# Datadriven detektering av vanliga fel i industriella processer



---

**Carl-Johan Mellstrand**

**Sumit Shinde**

Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation  
Lund University

## **Abstract**

It is well known that a large number of industrial processes suffer from poor control performance and malfunctioning components. The aim of this thesis has been to examine common types of problems encountered in industries and to automatically detect them by analyzing process data. Some of the proposed methods are developed by us and other published methods are evaluated in this work. The results show that the implemented methods can detect oscillations and thereby many common faults.

## Sammanfattning

Det finns undersökningar som visar att många industriella processer lider av bland annat dålig reglering och komponentfel. Gemensamt för dessa problem är att de leder till minskad lönsamhet. Examensarbetet syftar dels till att undersöka vilka problem som förekommer inom industrin och hur de återspeglas i signaler, dels att utvärdera och utveckla metoder för att med hjälp av processdata automatiskt detektera problemen. Några av dessa metoder har vi själva utvecklat, andra har vi utvärderat. Resultaten visar att implementerade metoder kan detektera oscillationer och därmed många vanliga fel.

## Tillkännagivande

Vi vill tacka våra handledare professor emeritus Gustaf Olsson från IEA samt Jonas Ahnlund och Tord Bergquist på Silent Control tillsammans med vår examinator Gunnar Lindstedt för vägledning och råd under arbetets gång. Dessutom vill vi rikta ett speciellt tack till Tord för hjälp med programmering.

Ett särskilt tack till professor Tore Hägglund, institutionen för Reglerteknik, för att ha tagit sig tid att svara på frågor och ge tips på artiklar och referenser.

Stort tack också till DONG Energy och Elsam Engineering för trevligt bemötande på Studstrupsverket. Vi vill dessutom tacka Vattenfall Värme Norden AB för att vi fått använda data från kraftvärmeverket Idbäcken och AB Fortum Värme tillsammans med Stockholms Stad för de data de har försett oss med från Högdalenverket.

Slutligen vill vi tacka våra studiekamrater och familjer för all hjälp och stöd under studietiden.

Lund den 14 november 2006



Carl-Johan Mellstrand



Sumit Shinde

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund	1
1.2	Problemställning	1
1.3	Målsättning	1
1.4	Översikt över arbetet	2
<b>2</b>	<b>VANLIGA PROBLEM I PROCESSINDUSTRIN</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Regulatorproblem</b>	<b>3</b>
2.1.1	Inställning av regulatorer	3
2.1.2	Aggressiv reglering	4
2.1.3	Defensiv reglering	5
<b>2.2</b>	<b>Komponentfel</b>	<b>6</b>
2.2.1	Kärvande och glappande ventiler	6
2.2.2	Feldimensionerade ventiler	7
<b>3</b>	<b>KÄNDA METODER FÖR DETEKTERING</b>	<b>8</b>
<b>3.1</b>	<b>Stattin och Forsmans metod för oscillationsdetektering</b>	<b>9</b>
3.1.1	Teori	9
3.1.2	Kommentar	10
3.1.3	Implementering	10
<b>3.2</b>	<b>Horchs korskorrelationsmetod</b>	<b>12</b>
3.2.1	Teori	12
3.2.2	Kommentar	14
<b>3.3</b>	<b>Miao och Seborgs detekteringsmetod för dämpad oscillation</b>	<b>15</b>
3.3.1	Teori	15
3.3.2	Kommentar	17
<b>3.4</b>	<b>Hägglunds metod för detektering av defensiv reglering</b>	<b>18</b>
3.4.1	Teori	18
3.4.2	Kommentar	19
<b>3.5</b>	<b>sp-pv-diagram</b>	<b>20</b>
3.5.1	Teori	20
3.5.2	Kommentar	21

<b>4</b>	<b>UTVECKLADE DETEKTERINGSMETODER</b>	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>Detektering av lågfrekventa störningar</b>	<b>22</b>
4.1.1	Bakgrund	22
4.1.2	Beräkning	23
4.1.3	Implementering	24
<b>4.2</b>	<b>Metoder för styrsignalsanalys</b>	<b>25</b>
4.2.1	Strypt styrsignal	25
4.2.2	Styrsignal som ger fullt utslag	27
4.2.3	Orolig styrsignal	27
<b>4.3</b>	<b>Laständringsanalys</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>RESULTAT OCH UTVÄRDERING</b>	<b>30</b>
<b>5.1</b>	<b>Utvärdering av programmet</b>	<b>30</b>
<b>5.2</b>	<b>Resultat från skarpt test</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>DISKUSSION OCH FÖRSLAG TILL FRAMTIDA ARBETE</b>	<b>34</b>
	<b>REFERENSLISTA</b>	<b>35</b>
	<b>APPENDIX A</b>	<b>36</b>

# 1 Inledning

Dagens öppna världsmarknad leder till allt hårdare konkurrens för företagen. Kraven på låga produktionskostnader och hög effektivitet tillsammans med stigande lönsamhetskrav leder till att industrin i allt större utsträckning låter produktionen skötas av maskiner snarare än människor.

## 1.1 Bakgrund

Inom processindustrin har automatiseringen drivits mycket långt. Fördelarna med automatisering av denna typ av industri är flera, bland annat jämnare kvalitet, mindre material- och energiåtgång och högre produktionstakt. Ytterligare en fördel är möjlighet till minskade lönekostnader genom att minska bemanningen. Personalens arbetsuppgifter övergår då till övervakning av produktionen.

Den höga automatiseringsgraden har gjorts möjlig av det stora antalet regulatorer. Emellertid finns det problem med detta. Det är inte ovanligt att det i stora anläggningar finns tusentals regulatorer och flera olika processer att övervaka. Den lilla personalstyrkan står därför inför uppgiften att övervaka en stor mängd signaler utifrån vilka de ska fatta snabba och viktiga beslut. Industrin har därför insett vikten av att även automatisera övervakningen av produktionen.

En form av automatisering i detta område är användandet av automatiska larm i processer, men eftersom även antalet larm ökar i takt med antalet signaler - och därför blir allt svårare för operatörer att bearbeta - har industrin börjat intressera sig för mer sofistikerade övervakningsmetoder. Industrin känner i allt större utsträckning ett behov att automatiskt kunna upptäcka problem i produktionskedjan och eventuellt också kunna diagnostisera dem.

## 1.2 Problemställning

Den generella problemställningen ur industrins perspektiv är; ”finns det metoder för att automatiskt upptäcka problem i industriella processer?”. Denna formulering kommer under arbetets gång bli något snävare.

Examensarbetet har gjorts tillsammans med Silent Control AB. Företaget använder loggade processsignaler för att undersöka möjligheterna att ta bort onödiga larm. I första hand är det enkla metoder som lågpasfilter, hysteres och tidsfördröjningar som föreslås, men ibland är den bakomliggande orsaken av reglerteknisk karaktär. För att kunna erbjuda sina kunder hjälp även med dessa problem vill de utreda om man det genom att undersöka mätdata går att fastställa orsaken och ge förslag på bättre regulatorinställningar. Därmed har den huvudsakliga problemställningen i examensarbetet varit:

*Kan man enbart med hjälp av loggade mätsignaler avgöra om det föreligger dålig reglering alternativt trasiga komponenter eller andra fel?*

## 1.3 Målsättning

Målet med examensarbetet är att utveckla en metod som utifrån analys av mätsignaler från en process ska kunna avgöra om något problem föreligger. Metoden ska kunna detektera de vanligaste problemen som uppstår i en industriell process.

Eftersom processindustrier i allmänhet har ett stort antal regulatorer och därför också en stor mängd mätsignaler som ska analyseras är ambitionen att metoden ska kunna vara så automatisk som möjligt för att vara kommersiellt gångbar. Det är dessutom en fördel om den är beräkningseffektiv för att förkorta analyseringstiden. Emellertid är detta inte ett krav och det kommer därför inte ägnas mycket tid åt att optimera metoden.

Slutligen ska resultaten presenteras på ett så lättförståeligt och pedagogiskt sätt som möjligt. Detta ska uppnås genom att i en graf över mätsignalen markera de områden som med hjälp av den framtagna metoden gett upphov till feldetektering. En annan målsättning har varit att implementera metoden som ett verktyg i Silent Controls redan färdiga programvara för processanalys.

## **1.4 Översikt över arbetet**

En genomgång av vanliga problem i industrin och deras karaktäristik i signaler beskrivs i kapitel 2. För att detektera dessa problem föreslås i kapitel 3 några kända metoder. Kapitlet innehåller också jämförelser mellan de föreslagna metoderna. I kapitel 4 beskrivs några detekteringsmetoder som vi själva utvecklat. Resultat och utvärdering av de implementerade metoderna återfinns i kapitel 5. Rapporten avslutas sedan med diskussion och förslag till fortsatt arbete i kapitel 6.



## 2 Vanliga problem i processindustrin

Det här kapitlet behandlar vanligt förekommande problem i industriella processer. Problemen är uppdelade i dåligt inställda regulatorer samt komponentfel.

### 2.1 Regulatorproblem

Inom industrin används mestadels (ca 95 % (Ender, 1993)) PI- eller PID-regulatorer för att styra processer. Det matematiska uttrycket för en PID-regulators styrsignal är

$$u = K \left( e + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (2.1)$$

där  $e$  motsvarar reglerfelet,  $K$  förstärkningen,  $T_i$  integraltiden och  $T_d$  derivatid. Reglerfelet definieras som börvärde minus ärvärde. För en PI-regulator är  $T_d$  lika med noll. Har man dessutom oändligt lång integraltid får man en P-regulator.

Det finns studier som tyder på att endast en tredjedel av dessa är välinställda, en tredjedel gör varken till eller från och en tredjedel försämrar processen (Bialkowski, 1993). Med bättre inställda regulatorer minskar antalet oönskade produktionsstopp. Kvaliteten hålls jämnare, slitaget på komponenter minskar och antalet onödiga larm reduceras. Allt detta leder till högre lönsamhet. Dessutom får operatörerna en lugnare arbetsmiljö och kan istället styra processen förebyggande.

#### 2.1.1 Inställning av regulatorer

Inom industrin finns inte möjligheten till att använda teori i lika stor utsträckning som i skolbänken. Att ställa upp matematiska modeller av en anläggning för att ställa in regulatorer är väldigt komplext. Det är endast inom vissa kritiska delar av processen som metoden med modellbyggnad tillämpas. För det stora antalet regulatorer i mindre kritiska delar av processen blir inställningar baserade på matematiska modeller onödigt kostsamma och tidskrävande. Industrin söker därför enklare metoder att ställa in sina regulatorer med.

Ett vanligt sätt att ställa in regulatorer är att först justera förstärkningen  $K$  så att systemet blir tillräckligt snabbt. Sedan justeras integraltid och eventuellt också derivatid tills regleringen fungerar tillfredsställande. Det finns metoder utvecklade för att ge stöd till ungefärliga värden på regulatorparametrarna. En översikt över några inställningsmetoder för PID-regulatorer finns i Hägglund (1997).

En sådan metod är den så kallade lambdametoden. Den går ut på att man i manuell drift genererar en stegändring i styrsignalen och sedan mäter systemets svarstid. Utifrån svarstiden kan man sedan räkna fram lämpliga regulatorparametrar (Hidén, 2003).

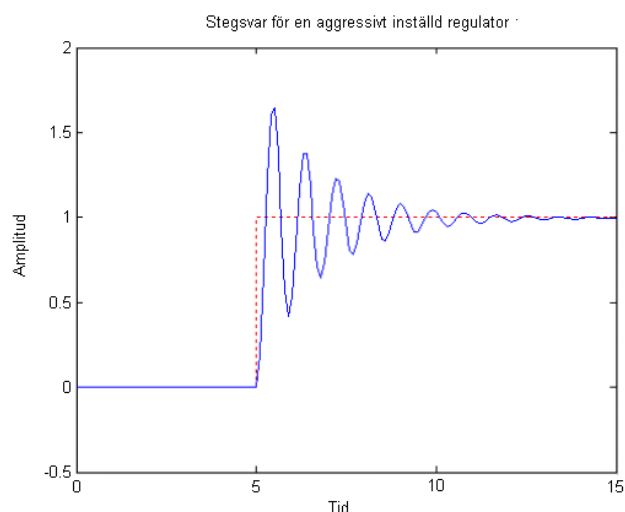
Ziegler och Nichols har utvecklat två andra metoder att ställa in regulatorparametrar. Den ena är precis som lambdametoden en stegvarsmetod, men med något annorlunda tillvägagångssätt. De har dessutom utvecklat en metod som baseras på att först ställa in en P-regulator med så pass hög förstärkning att systemet självsvänger. Med hjälp av den inställda förstärkningen och självsvängningens frekvens beräknas sedan konstanterna  $K$ ,  $T_i$  och  $T_d$  (Hägglund, 2003).

Metoderna för regulatorinställning är avsevärt enklare och snabbare än att räkna på matematiska modeller för processen, men på stora industrier med tusentals regulatorer blir detta ändå väldigt tidskrävande och är i många fall alltför kostsamt för att bli av. Ytterligare nackdelar med metoderna är att de inte kan genomföras under normal drift. Då stegsvar och självsvängning genereras råder inte normala förhållanden.

Även om en regulator är väl intrimmad betyder det inte att den alltid kommer förbli det, eftersom processers parametrar kan ändra sig med tiden på grund av slitage, uppgraderingar av hårdvara, ombyggnationer etcetera. Därför bör regulatorer kontrolleras kontinuerligt. Återigen gör det stora antalet regulatorer att det blir för tidskrävande och kostsamt att kontrollera regulatorerna manuellt. Därför eftersträvas ett automatiserat system.

## 2.1.2 Aggressiv reglering

Aggressiv reglering kännetecknas av snabba svar på förändringar men också av stora och flera över- respektive underslängar som kan liknas vid dåligt dämpad oscillation. Grovt sett innebär det att kretsen har en för hög förstärkning. Ett typiskt stegsvar för en aggressiv regulator åskådliggörs i figur 2.1.



**Figur 2.1** Simulerat stegsvar för en aggressivt inställd regulator. Den streckade kurvan är börvärde och den heldragna mätsignal.

Emellertid kan detta utseende i mätsignaler bero på annat än aggressivt inställda regulatorparametrar vilket tas upp i avsnitt 2.2.1.

Det är inte ovanligt att aggressivt inställda regulatorer åstadkommer självsvängning i processen. Ofta ändrar man parametrarna för att erhålla högre snabbhet, men som så ofta med reglerkretsar är gränsen mellan snabbhet och instabilitet hårfin. Med en aggressivt inställd regulator menas alltså en snabb men på gränsen till instabil regulator.

Nedan nämns två kombinationer av regulatorparametrar som ger upphov till aggressiv reglering.

- För stor proportionaldel, för liten integraldel och ingen derivatadel (alltså en PID-regulator som liknar en ren P-regulator) beter sig aggressivt. Följer man ekvationen för en PID-regulator som är angiven i ekvation 2.1 går det uttrycka på följande sätt; stort  $K$ , stort  $T_i$  och litet eller inget  $T_d$ .
- För stor proportionaldel, för stor integraldel och avsaknad av derivatadel (stort  $K$ , litet  $T_i$  och litet eller inget  $T_d$ ) är ytterligare en kombination som leder till aggressiv reglering.

Hägglund har i sin bok "Praktisk processreglering" (Hägglund, 1997) presenterat en tabell över tumregler för hur regulatorparametrar påverkar snabbhet och stabilitet i reglerkretsen. Tumreglerna åskådliggörs i tabell 2.1.

**Tabell 2.1** Hägglunds tumregler för hur regulatorparametrar påverkar snabbhet och stabilitet i reglerkretsen (Hägglund, 1997).

Parameter	Snabbhet	Stabilitet
$K$ ökar	Ökar	Minskar
$T_i$ ökar	Minskar	Ökar
$T_d$ ökar	Ökar	Ökar

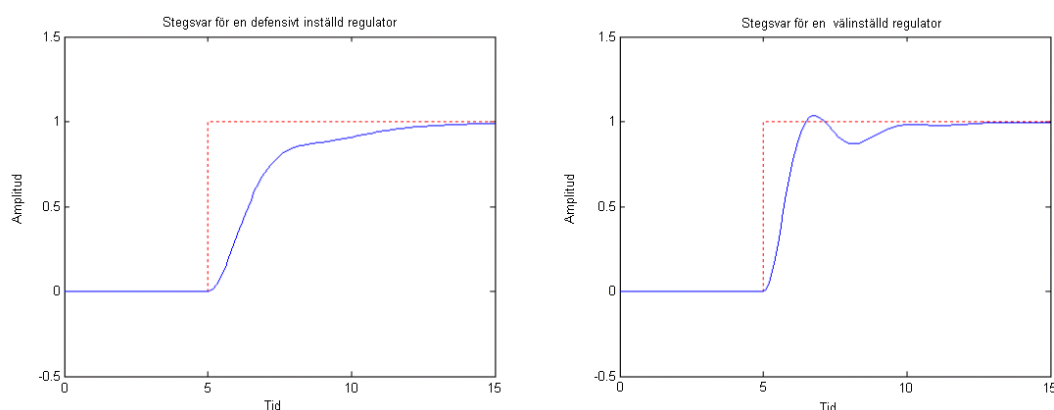
Ur tabellen framgår att införandet av en D-del kan kompensera för aggressivt inställda  $K$  och  $T_i$ . Trots detta är de flesta regulatorer i industrin av PI-typ och inte PID (Åström – Hägglund, 2005). Anledningarna är bland annat att en D-del tillsammans med hög varians på bruset i förhållande till signalstyrkan ger en orolig styrsignal. Ett annat skäl är att operatörer, för att ändra på så få parametrar som möjligt, väljer att inte koppla in D-delen när de ser att PI-regulatorn fungerar tillfredsställande (Hägglund, 2006).

Nackdelarna med aggressiv reglering är flera. Det viktigaste problemet ur lönsamhetssynpunkt är den sämre produktkvaliteten. Enligt Shinskey (1990) är avvikelser från börvärdet kostsamma och grovt räknat proportionella mot avvikelsen.

Ytterligare ett problem är slitage av komponenter (Hägglund, 2006). Ventiler belastas exempelvis onödigt hårt när de måste gå mellan olika ändlägen snabbt för att motverka en laststörning eller dylikt. Slitage på ventiler kan minska livslängden på dem och kan dessutom leda till många andra problem, något som kommer att behandlas närmare i avsnitt 2.2. Andra problem som uppstår med aggressivt inställda regulatorer är att oscillationerna kan generera larm för var gång en översläng överträder en larmgräns.

### 2.1.3 Defensiv reglering

Defensiv reglering är motsatsen till aggressiv, det vill säga konservativt inställda regulatorparametrar. I allmänhet innebär detta låg inverkan av samtliga delar i en regulator, alltså att kretsen har en låg förstärkning. Den ger inte upphov till oscillationer eller liknande fenomen, däremot blir svarstiderna vid börvärdesändringar och laststörningar onödigt långa, figur 2.2.



**Figur 2.2** Grafen till vänster visar stegsvaret för en defensivt inställd regulator vilket kan jämföras med stegsvaret för en välinställd regulator till höger. Båda stegsvaren kommer från en simulerad process. Den streckade kurvan är börvärde och den heldragna mätsignal.

Enligt Hägglund (1999) är de flesta av industrins regulatorer defensivt inställda. En viktig anledning till detta är den minskade bemanningen. Operatörerna är mer inriktade på övervakning och har därför inte tid att optimera processerna. En annan är att man vid komponentfel drar den felaktiga slutsatsen att regulatorn är för aggressivt inställd. Därför minskar man regulatorparametrarnas inverkan istället för att byta ut den trasiga komponenten (Ender, 1999). Alltså låter man den trasiga komponenten sitta kvar och justerar processen till det sämre, istället för att optimera den.

Vi har haft svårt att hitta information och forskning inom detta område vilket får oss att tro att det inom industrin inte fokuseras tillräckligt mycket på detta problem. Vi har endast hittat en artikel som tar upp problemet, (Hägglund, 1999). Anledningen kan vara att följderna av problemet inte är lika uppenbara, själva kurvformen (den vänstra delen av figur 2.2) är svårare att upptäcka än exempelvis de oscillationer som uppstår vid aggressiv reglering.

Emellertid är defensiv reglering ett problem som borde få mer uppmärksamhet. Som nämnts i föregående avsnitt är avvikelser från börvärdet kostsamma. Eftersom svarstiderna i processerna blir långa vid exempelvis laststörningar leder detta till stora avvikelser från börvärdet under onödigt lång tid, vilket i sin tur leder till minskad produktkvalitet och lönsamhet. Detta tillsammans med det faktum att de flesta regulatorer enligt Hägglund (1999) är konservativt inställda, får oss att tro att defensiv reglering är det största reglerproblemet inom industrin - ett stort dolt problem!

## 2.2 Komponentfel

Av de styrdon som används inom industrin är ventilen den mest förekommande. Den är också den absolut vanligaste orsaken till problem i industriella processer (Hägglund, 1997).

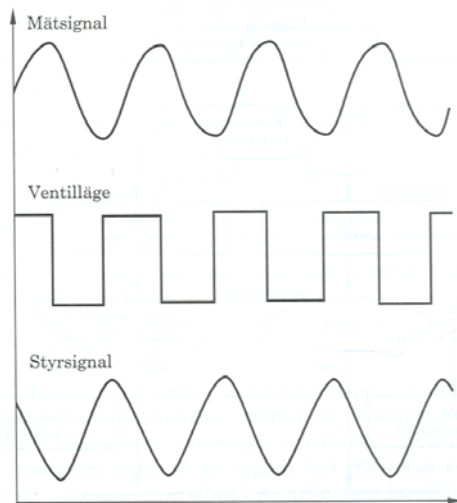
Ventilen har gemensamt med många andra mekaniska objekt att den utsätts för hårt slitage då den hela tiden öppnas och stängs. Slitaget leder till att friktionen ökar och dess prestanda samt livslängd minskar successivt.

Förutom detta slitageproblem finns också problemet med feldimensionerade ventiler som beskrivs i avsnitt 2.2.2.

### 2.2.1 Kärvande och glappande ventiler

Av de PI- eller PID-styrda reglerkretsar inställda med hjälp av lambdametoden eller Ziegler Nichols metoder har så många som var femte ett periodiskt beteende vid stationärt tillstånd. Detta beror i de flesta fall på olinjäriteter i ventiler, främst pneumatiskt styrda. De två vanligaste olinjäriteterna är kärvande (eng. stick-slip) och glappande (eng. deadband hysteresis) ventiler (Ender, 1999).

Hos en kärvande ventil har slitaget lett till att friktionen blivit så hög att dess funktion har försämrats avsevärt. Problemet ter sig enligt följande: Då ventilen är i läget att dess öppning är för liten växer regulatorns integraldel (och därmed styrsignalen) sig allt större (eng. stick). När den når punkten då styrsignalen övervinner den statiska friktionen hoppar ventilen (eng. slip) till ett läge som ligger över börvärdet, alltså öppnar ventilen sig för mycket. Felet blir då det omvända och styrsignalen minskar istället, till dess att den statiska friktionen övervinns och ventilen hoppar till ett läge under börvärdet, öppningen blir alltså för liten igen. Detta ger upphov till att styrsignalen liknar en triangelvåg, ventilens läge en fyrkantsvåg samtidigt som flödet genom ventilen oscillerar. Förloppet åskådliggörs i figur 2.3.



Figur 2.3 Kurvformer vid kärvande ventil (Hägglund, 1997).

Karaktärstiken för en glappande ventil liknar den för en kärvande. Ventilens styrsignal får ett dödband (hysteres) där den kan röra sig utan att något händer med ventilens läge. Grafiskt är detta mycket likt beteendet hos en kärvande ventil.

### 2.2.2 Feldimensionerade ventiler

Underdimensionerade ventiler innebär att regulatorn inte får tillräckligt med utrymme att agera inom för att påverka processen. I en koncentrationstank med inflöde och utflöde kan till exempel en för liten ventil i inflödet leda till att koncentrationen inte ändras tillräckligt mycket hur regulatorn än ställs in. Eftersom regulatorn ändrar sin styrsignal i förhållande till reglerfelet kommer den inom kort att låta styrsignalen ge fullt utslag eftersom reglerfelet kvarstår, regleringen blir därför inte tillräckligt snabb. En styrsignal som ger fullt utslag alltför länge kan tyda på en underdimensionerad ventil. Detta kan också uttryckas som att ventilen ger för liten reglerauktoritet.

Inom industrin installeras ofta onödigt stora ventiler (Åström - Hägglund, 2005). Styrsignalen till en process med överdimensionerad ventil rör sig inom ett relativt litet intervall, små ändringar i styrsignalen ger upphov till stora utslag i mätsignalen. Styrsignalen ligger därför på en låg nivå i stationärt tillstånd. System med för stora ventiler har ofta problem att hålla noggrannheten, eftersom de små ventilrörelserna orsakar stora förändringar. Detta gör att även en väl inställd regulator inte förmår ge tillräckligt bra beteende för systemet.

### 3 Kända metoder för detektering

Här beskrivs fem redan utvecklade metoder för detektering och/eller diagnostisering av vanliga fel i processer.

Metoderna vi valt att beskriva är

- Stattin och Forsmans metod för oscillationsdetektering,
- Horchs korskorrelationsmetod för diagnostisering av oscillation,
- Miao och Seborgs metod för detektering av dåligt dämpad oscillation,
- Hägglunds metod för detektering av defensiv reglering, samt
- metoden med sp-pv-diagram för diagnos av kaskadkopplade regulatorer.

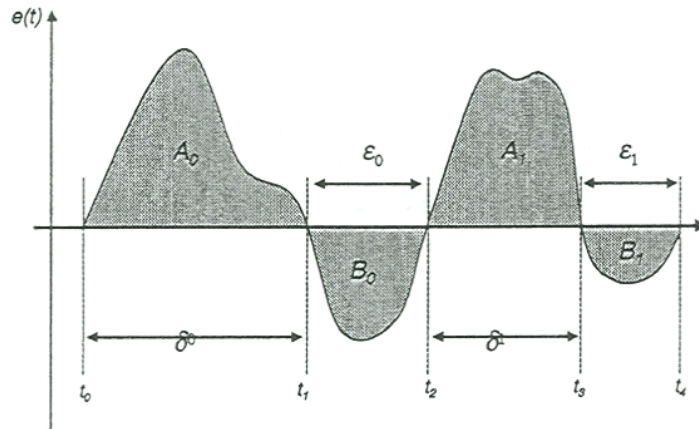
En anledning till att vi valt just dessa metoder är att de inte kräver någon processkänedom utöver mät- och vissa fall bör- eller styrsignal. De tre första metoderna behandlar oscillation och därmed många av de problem som beskrivs i föregående kapitel. Av dessa har Stattin och Forsmans metod implementerats. Hägglunds metod har vi valt för att den detekterar ett unikt problem som vi dessutom anser får för lite uppmärksamhet. Metoden med sp-pv-diagram är en vanligt förekommande metod som dessutom ställer diagnos.

### 3.1 Stattin och Forsmans metod för oscillationsdetektering

Andreas Stattin och Krister Forsman (Forsman - Stattin, 1999) har utvecklat en metod för detektering av oscillation. Den har något modifierad implementerats och utvärderats i examensarbetet. En beskrivning av metoden så som den tolkats utifrån artikeln följer nedan.

#### 3.1.1 Teori

Uppgiften är att kunna detektera oscillationer vilket görs genom att söka likheter mellan areor och tidsintervall i reglerfelet, se figur 3.1.



**Figur 3.1** Grafisk beskrivning av parametrarna i Stattin och Forsmans metod (Forsman - Stattin, 1999).  $A_i$  och  $B_i$  betecknar areor,  $\delta_i$  och  $\varepsilon_i$  tidsintervall och  $t_i$  tidpunkter.

Tiden mellan olika nollgenomgångar hos reglerfelet  $e(t)$  motsvarar tidsintervallen  $\delta_i$  och  $\varepsilon_i$  i figuren ovan. Areorna mellan tidsintervallen betecknas som  $A_i$  (positivt reglerfel) och  $B_i$  (negativt reglerfel). Metoden ska med dessa värden avgöra om kvoten mellan  $\delta_{i+1}$  och  $\delta_i$  ligger mellan sina bestämda gränser och om kvoten mellan  $A_{i+1}$  och  $A_i$  även den ligger inom sina gränser. I de fall då båda kvoterna ligger inom sina respektive gränser markeras detektionen som periodisk ( $h_A = 1$ ), i annat fall som icke-periodisk ( $h_A = 0$ ). Metoden analyserar areorna  $B_i$  och tidsintervallen  $\varepsilon_i$  på samma sätt. Matematiskt betyder detta att

$$\alpha < \frac{A_{i+1}}{A_i} < \frac{1}{\alpha} \quad \cap \quad \gamma < \frac{\delta_{i+1}}{\delta_i} < \frac{1}{\gamma} \quad \Rightarrow \quad h_A(i) = 1 \quad (3.1)$$

samt

$$\alpha < \frac{B_{i+1}}{B_i} < \frac{1}{\alpha} \quad \cap \quad \gamma < \frac{\varepsilon_{i+1}}{\varepsilon_i} < \frac{1}{\gamma} \quad \Rightarrow \quad h_B(i) = 1 \quad (3.2)$$

Gränserna för kvoterna mellan areor och tidsintervall betecknas med  $\alpha$  respektive  $\gamma$  i artikeln och bör enligt Stattin och Forsman ligga mellan 0.5 och 0.7 respektive 0.7 och 0.8. Gränserna som föreslås i artikeln är framtagna empiriskt och baserade på en stor mängd data från ett pappersbruk.

Sista steget i metoden räknar ut andelen sanna periodiska detektioner ur samtliga detektioner. Parametern betecknas  $h$  och är ett mått på hur oscillativt reglerfelet är.

$$h = \frac{\sum_{i=0}^N (h_A(i) + h_B(i))}{N} \quad (3.3)$$

Stattin och Forsman föreslår att en signal med en andel större än 0.4 har oscillativa egenskaper och en andel större än 0.8 är starkt oscillativ.

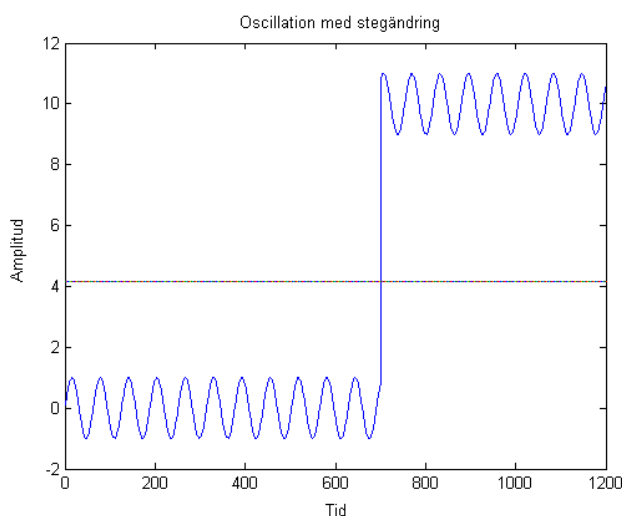
### 3.1.2 Kommentarer

Fördelarna med metoden är att den inte (som flera andra metoder) kräver information om styrsignalen. Den upplevs direkt som intuitiv och kräver inte någon processkännedom utan använder sig enbart av loggade processdata från normal drift. Dessutom är metoden anpassad till analys offline och är inte speciellt beräkningstung.

Bland nackdelarna kan nämnas att metoden är bruskänslig, vilket författarna själva medger. För att beräkna reglerfelet krävs dessutom processens börvärde. Den ställer ingen diagnos utan är endast till för att detektera oscillation, något som dock är det vanligaste tecknet på att någonting är fel.

### 3.1.3 Implementering

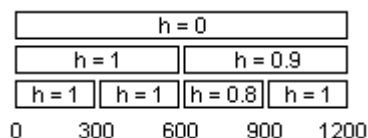
När metoden har implementerats i examensarbetet har en del modifieringar gjorts. Eftersom det förutsatts att det bara funnits tillgång till mätsignal har reglerfelet inte kunnat beräknas, vilket gjort att börvärdet måste skattas. Medelvärde av en mätsignal från en process i stationärt tillstånd kan i många fall duga som en skattning av börvärdet. Normeras signalen därefter genom att subtrahera hela signalen med dess medelvärde kommer eventuella oscillationer leda till att areor över och under noll bildas, precis som i figur 3.1. Problemet med detta tillvägagångssätt är att skattningen blir missvisande då exempelvis en arbetspunktsändring sker. En tillräckligt stor stegändring kan leda till att skattningen antar fel värde, se figur 3.2.



Figur 3.2 Simulerad oscillativ signal med stegändring. Medelvärde är cirka 4.2.



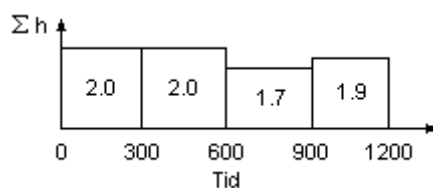
Problemet åtgärdar vi genom att dela upp signalen i mindre tidsintervall. Skattningen blir då säkrare eftersom det är mindre sannolikt att ett steg inträffar i ett litet intervall än i ett större. För att åstadkomma en uppdelning av signalen i hälften så stora intervall och samtidigt tillämpa metoden på varje intervall, kan en rekursiv metod användas. Figur 3.3 visar en rekursiv uppdelning av signalen i figur 3.2 och vilka värden alla tidsintervall skulle kunna tänkas få.



**Figur 3.3** Rekursiv uppdelning av signalen i figur 3.2 med fiktiva  $h$ -värden.

Den implementerade rekursiva metoden har ytterligare fördelar. I vår implementering utgör varje intervall av signalen med ett  $h$ -värde över en viss gräns ett oscillationsobjekt. Antalet objekt hos en signal kan därför tolkas som ett mått på hur stor del av tiden den oscillerar. Om signaler ordnas efter antal oscillationsobjekt kan programmet ur en stor mängd signaler sortera fram de med flest oscillationsobjekt för närmare analys.

Uppdelning av signalen leder dessutom till att tidpunkterna för oscillationerna kan bestämmas. Om tidsintervallen på lägsta nivån utgör definitionsmängden i en graf och summan av alla  $h$  i och ovanför tidsintervallet utgör värdemängden (se figur 3.4), skulle en sådan graf kunna ge en indikation på vilket intervall som har tydligast oscillation.



**Figur 3.4** Summagraf av oscillationsobjekt.

Behandlas mer än en signal åt gången ger denna graf ytterligare möjligheter. En gemensam graf som visar summan av alla signalers enskilda grafer skulle kunna påvisa en eventuell korrelation mellan signalerna i specifika tidsintervall. Korrelation mellan signaler kan bero på att oscillationer i en process fortplantar sig till närliggande processer. För att hitta ursprungsooscillationen kan tidsintervallen ordnas i en lista där de signaler som bidragit med höga värden på  $h$  visas. På så sätt kan uppmärksamhet riktas åt en mindre grupp signaler för att hitta ursprungsooscillationen. Mer om detta problem som vi valt att kalla samoscillation finns i kapitel 6.

## 3.2 Horchs korskorrelationsmetod

Artikeln (Horch, 1999a) beskriver ett sätt att ställa en diagnos om varför en processlinga oscillerar.

### 3.2.1 Teori

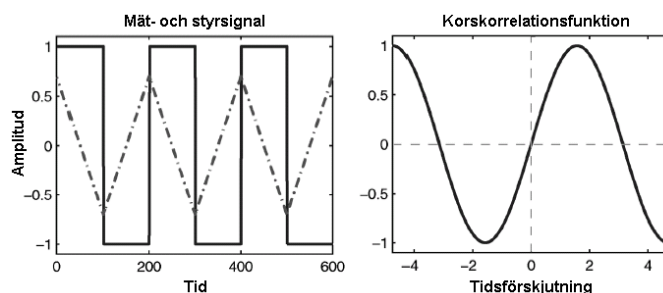
Metoden baseras på att man undersöker korskorrelationen mellan mät- och styrsignal. Enligt Horch är det visat att metoden korrekt diagnostiserar de två enligt honom vanligaste felen i industriella processer, nämligen yttre oscillerande störningar samt statisk friktion i ventiler.

För att metoden ska vara applicerbar måste följande krav vara uppfyllda:

- Processen ska vara styrd med en PI-regulator.
- Signalen ska oscillera med en ”signifikant” amplitud.

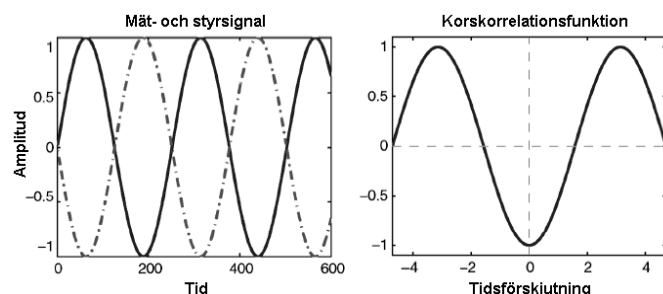
Dessutom skalas processdatan om så att oscillationens periodtid blir  $2\pi$ .

Horch menar att statisk friktion finns om fasskillnaden mellan signalerna är ungefär  $\pi/2$ . Då är korskorrelationsfunktionen en udda funktion<sup>1</sup>. Se figur 3.5.



**Figur 3.5** Statisk friktion i ventil. Mät-signal (heldragen) och styrsignal (streckad) till vänster, korskorrelationsfunktion till höger (Horch, 1999b).

Om orsaken istället är en yttre oscillerande störning, som i figur 3.6, är fasskillnaden ungefär  $\pi$ . I det fallet är korskorrelationsfunktionen en jämn funktion<sup>2</sup>.



**Figur 3.6** Yttre oscillerande störning. Mät-signal (heldragen) och styrsignal (streckad) till vänster, korskorrelationsfunktion till höger (Horch, 1999b).

<sup>1</sup> Udda funktion:  $f(-x)=-f(x)$

<sup>2</sup> Jämn funktion:  $f(-x)=f(x)$

Är de tidigare nämnda kraven uppfyllda utförs metoden genom att en funktion för korskorrelationen mellan mät- och styrsignalen skapas. Funktionen definieras som

$$r_{uy}(\tau) = E\{u(t+\tau)y(t)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T u(t+\tau)y(t)dt. \quad (3.4)$$

Formeln gäller för en oändligt lång kontinuerlig signal. Eftersom signalerna inte är oändligt långa och dessutom tidsdiskreta måste formeln skrivas om och istället implementeras enligt

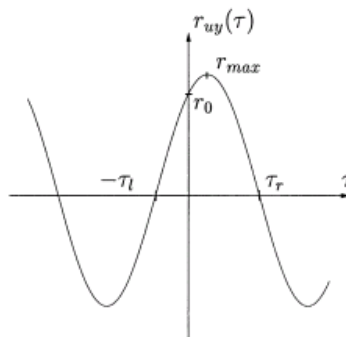
$$r_{uy}(\tau) = \sum_{k=0}^{N-|\tau|-1} u(k)y(k+\tau). \quad (3.5)$$

Funktionen används sedan för att beräkna fasskillnaden med hjälp av variablerna  $\Delta\tau$  och  $\Delta\rho$  vilka definieras som

$$\Delta\tau = \frac{|\tau_l - \tau_r|}{\tau_l + \tau_r} \quad (3.6)$$

$$\Delta\rho = \frac{|r_0 - r_{\max}|}{|r_0 + r_{\max}|}$$

Variablerna illustreras grafiskt i figur 3.7.



**Figur 3.7** Grafisk illustration av variabler i korskorrelationsfunktionen (Horch, 1999b).

Som tidigare nämnts ställs diagnosen ”yttre oscillerande störning” då fasskillnaden är ungefär  $\pi$ . Detta anses föreligga då  $0.0 < \Delta\rho < 0.072$  samt  $0.0 < \Delta\tau < 1/3$ . Statisk friktion i ventil föreligger då  $1/3 < \Delta\rho < 1$  samt  $2/3 < \Delta\tau < 1$ . För övriga fall ställs ingen diagnos.

### 3.2.2 Kommentrar

Horch har utvecklat en metod med fördelarna att den dels är relativt enkel att implementera, dels att dess funktion går att förstå intuitivt. Den kräver endast normala processdata i form av mät- och styr signaler. Ingen processkänedom krävs. Författaren visar med flera exempel skillnaden mellan de olika felen och hur de detekteras.

Vid första anblicken kan Horchs metod uppfattas som beräkningstung. Emellertid är detta inte något stort problem eftersom den appliceras endast i de fall en signifikant oscillation detekteras, vilket skulle kunna göras med metoden som beskrivs i avsnitt 3.1. Dessutom är det inte nödvändigt att beräkna den fullständiga korskorrelationsfunktionen ( $R_{xy}(\tau)$ ,  $0 \leq \tau \leq N$ ), det räcker med att beräkna en del av den ( $R_{xy}(\tau)$ ,  $-\tau_r \leq \tau \leq \tau_r$ ).

Metoden kräver som tidigare nämnts att man först detekterar oscillation. Den är tänkt att fungera som stöd om man vill ställa en diagnos. Eftersom förutsättningarna i examensarbetet har varit att det inte finns tillgång till styr signaler har metoden inte implementerats för en utvärdering.

### 3.3 Miao och Seborgs detekteringsmetod för dämpad oscillation

Miao och Seborg (1999) föreslår en offlinemetod för detektion av dåligt dämpad oscillation som kan tillämpas på enbart mätdata.

#### 3.3.1 Teori

Metoden som tagits fram har som uppgift att detektera dåligt dämpade svängningar. Tillvägagångssättet sker i två steg. I första steget beräknas en autokorrelationsfunktion (ACF, autocorrelation function) till signalen fram. Autokorrelationskoefficienter,  $\rho_k$  beräknas enligt ekvation 3.7.

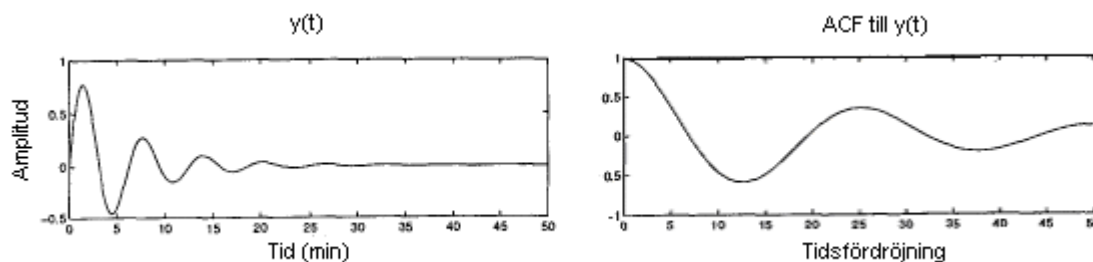
$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (Z_t - m_Z)(Z_{t+k} - m_Z)}{\sum_{t=1}^N (Z_t - m_Z)^2}, \quad (3.7)$$

där  $Z_t$  är värdet vid tiden  $t$  ( $t = 0, 1, 2, \dots$ ),  $N$  står för antal datapunkter och  $m_Z$  är medelvärdet av signalen.

För att bilda Miao och Seborgs ACF behöver man bilda en summa av  $\rho_k$  från ekvation 3.7, som går mellan tidsförskjutningen  $k$  lika med ett till en fjärdedel av antalet datapunkter. Funktionen får då följande utseende.

$$ACF = \sum_{k=1}^{\frac{N}{4}} \rho_k \quad (3.8)$$

En signal som innehåller dämpad oscillation uppvisar ungefär samma beteende i sin autokorrelationsfunktion vilket åskådliggörs i figur 3.8.

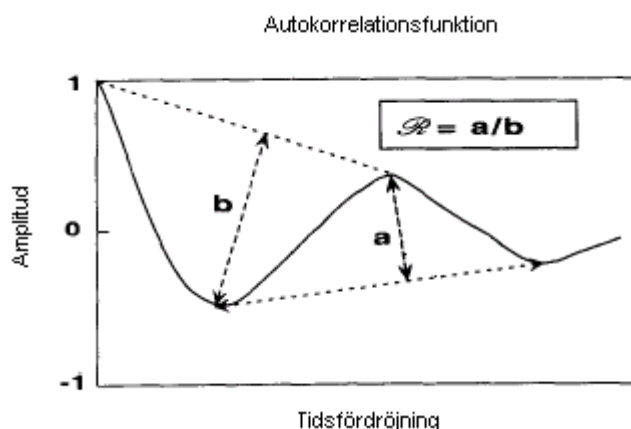


Figur 3.8 En dåligt dämpad svängning  $y(t)$  och dess autokorrelationsfunktion (Miao - Seborg, 1999).

Steg två innebär att en kvot  $\mathcal{R}$  räknas enligt ekvation 3.9.

$$\mathcal{R} = \frac{a}{b}, \quad 0 \leq \mathcal{R} < 1, \quad (3.9)$$

där konstanterna  $a$  och  $b$  är avstånd som utgör normalen till den räta linje som skär två maximipunkter eller två minimipunkter i ACF. Konstanterna är illustrerade i figur 3.9.



**Figur 3.9** Autokorrelationsfunktion till  $y(t)$  med avstånden  $a$  och  $b$  (Miao - Seborg, 1999).

Värdet på  $\mathcal{R}$  avgör om signalen är oscillativ eller inte. Hur stort  $\mathcal{R}$  ska vara för att en signal ska anses som oscillativ är beroende av vilken process det gäller och blir därför upp till var och en att bestämma. I artikeln använder författarna tröskelvärdet 0.5.

För att  $\mathcal{R}$  ska kunna bestämmas krävs minst 1.25 perioder i autokorrelationsfunktionen, detta för att entydigt kunna fastställa förekomsten av två lokala maximipunkter och två lokala minimipunkter. Miao och Seborg har i artikeln bestämt sig för att den maximala tidsfördröjningen i autokorrelationsfunktionen inte får överskrida en fjärdedel av antalet datapunkter. Följaktligen innebär detta att det krävs minst fem perioder av en dämpad oscillation i mätsignalen för att den ska ge upphov till 1.25 perioder i sin autokorrelationsfunktion.

### 3.3.2 Kommentarer

Fördelarna med denna metod, sett ur examensarbetets synpunkt, är att metoden till att börja med är avsedd för offline-bruk. Dessutom krävs ingen processkännedom och det räcker med enbart mätdata för att ställa en diagnos.

En nackdel med metoden är att det är svårt att beräkna värdena  $a$  och  $b$ . Metoden blir dessutom väldigt beräkningstung när signaler med stor datamängd analyseras. I examensarbetet har de flesta signaler som analyserats innehållit minst 200 000 datapunkter. För att bilda ACF för en signal med 200 000 datapunkter krävs så mycket som  $8.75 \cdot 10^9$  beräkningssteg. Beräkningen följer nedan i ekvation 3.10.

$$\sum_{k=1}^{50000} 200000 - k = 8.75 \cdot 10^9 \quad (3.10)$$

Därtill bör tilläggas att varje autokorrrelationskoefficient  $\rho_k$ , i sig innehåller en kvot mellan två stora summor. Även om man skulle dela upp signalen i mindre segment skulle den fortfarande vara beräkningstung.

Problemet med stora signaler är att oscillationer blir svåra att upptäcka i autokorrrelationsfunktionen för hela signalen. Lösningen skulle kunna vara att bara analysera de segment som innehåller laständringar, stegsvar eller arbetspunkts-ändringar. Eventuellt skulle det kunna utvecklas en metod som med hjälp av mätsignal och styrsignal kan detektera dessa typer av arbetspunktsändringar för att sedan låta dessa nya detektioner analyseras av Miao och Seborgs metod.

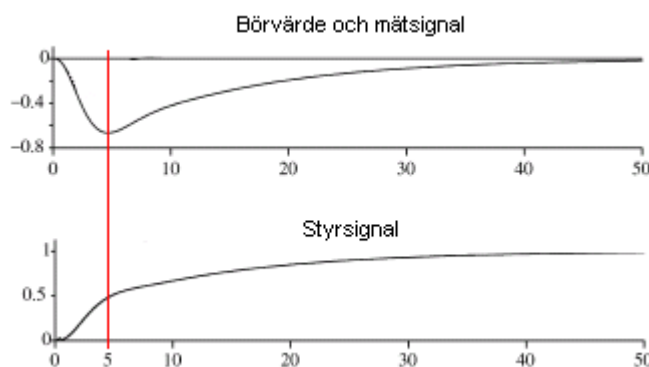
Metoden har, som namnet på artikeln antyder ("...*Excessively Oscillatory*..."), tagits fram för att detektera kraftiga oscillationer i reglerslingor. Metoderna som implementerats i examensarbetet skulle med stor sannolikhet detektera sådana oscillationer ändå.

### 3.4 Hägglunds metod för detektering av defensiv reglering

Avsnitt 2.1.3 gör gällande att defensiv reglering möjligtvis är ett större problem än gängse uppfattning. Hägglund (1999) har utvecklat en metod för att detektera fenomenet. Den kräver ingen djup processkänedom utan bara styr- och mätvärden från processen.

#### 3.4.1 Teori

Vid laststörningar ändrar sig styrsignalen för att anpassa sig till den nya situationen och därmed påverka mätsignalen att åter följa börvärdet. Förloppet ses i figur 3.10. En styrsignals svarsbeteende jämfört med en mätsignals vid en laststörning kan delas upp i två olika skeden. I första skedet (i figuren då  $0 \leq t \leq 5$ ) minskar den ena signalen i amplitud samtidigt som den andra ökar. I det andra skedet ( $5 \leq t \leq 50$ ) minskar eller ökar båda samtidigt.



Figur 3.10 Börvärde, mätsignal och styrsignal vid långsam reglering (Hägglund, 1999).

Den grundläggande idén är att jämföra tiden det tar för det första skedet med tiden i det andra och presentera denna jämförelse i form av ett index. Indexet, som i artikeln kallas för ”The Idle index”, består av en kvot mellan skillnaden av tidsintervallen och summan av dem. För att avgöra hur långa tidsintervallen är kontrolleras tecknet på produkten mellan ökningen i styrsignalen  $u$  respektive mätsignalen  $y$  vid varje samplingsögonblick. Om produkten är negativ ökar signalerna åt olika håll, i fallet då produkten är positiv ökar båda signaler i samma riktning. Det matematiska uttrycket för ”The Idle index” återges i ekvation 3.11.

$$I_i = \frac{t_{pos} - t_{neg}}{t_{pos} + t_{neg}}, \quad (3.11)$$

där  $t_{pos}$  (andra skedet) och  $t_{neg}$  (första skedet) ges av ekvation 3.12. Ökningen i styrsignalen betecknas med  $\Delta u$  och ökningen i mätsignalen med  $\Delta y$ . Samplingstiden anges med  $h$ .



$$t_{pos} = \begin{cases} t_{pos} + h & \text{om } \Delta u \Delta y > 0, \\ t_{pos} & \text{om } \Delta u \Delta y \leq 0, \end{cases} \quad (3.12)$$

$$t_{neg} = \begin{cases} t_{neg} + h & \text{om } \Delta u \Delta y < 0, \\ t_{neg} & \text{om } \Delta u \Delta y \geq 0. \end{cases}$$

Tiden  $t_{pos}$  anger alltså tidsintervallet för det andra skedet och  $t_{neg}$  det första.  $I_i$  antar bara värden intervallet i  $[-1,1]$ . Ett värde nära 1 indikerar en defensiv reglering.

### 3.4.2 Kommentarer

Metoden som Hägglund beskriver är både enkel att förstå och torde inte vara särskilt beräkningstung om den implementeras. Eftersom metoden mäter och jämför derivator är den brus känslig. Hägglund poängterar därför i artikeln vikten av att filtrera signalerna. Den metod han föreslår för att hitta en passande filterkonstant kräver emellertid viss processkänedom men fördelen är att indexet då också kan användas online. Kuehl och Horch (2005) föreslår en alternativ signalbehandling som inte kräver någon processkänedom om indexet ska användas offline.

Metoden kräver steglignande laststörningar. I de fall då en börvärdesändring, långsammare laststörning alternativt brus i stationärt tillstånd triggar metoden, ger den missvisande värden. Hägglund föreslår därför att metoden används tillsammans med en metod för att detektera just stegformade laststörningar, exempelvis Hägglund och Åström (1997).

Eftersom metoden kräver tillgång till styrsignal har den inte kunnat testas i examensarbetet.

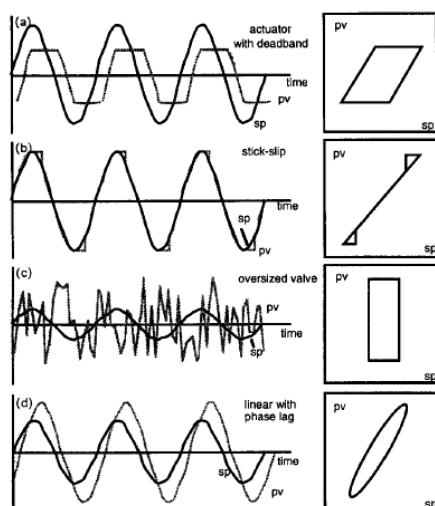
## 3.5 sp-pv-diagram

Till metoden att rita sp-pv-diagram är det svårt att hitta en upphovsman. Den kan snarare beskrivas som en allmän metod. Den tidigaste källan vi hittat är Åström (1991) men metoden används också av McMillan (1995), Thornhill och Hägglund (1997) och Yamashita (2006).

### 3.5.1 Teori

Jämfört med de tidigare beskrivna metoderna skiljer sig denna i det avseende att man inte räknar fram ett värde, utan istället ritar en graf och analyserar den. Metoden går ut på att plotta en process börvärde (eng. setpoint – sp) mot mätvärde (eng. process variable – pv) för att undersöka om det ger något mönster. För att grafen ska säga något krävs att börvärdet ändras kontinuerligt. Alltså måste processen styras kaskadkopplad av en annan process.

Enligt Åström (1991) får plottarna typiska mönster beroende på reglerkretsens tillstånd. Genom att undersöka grafernas utseende kan slutsatser dras om något problem föreligger. Några exempel på typiska utseenden åskådliggörs i figur 3.11.



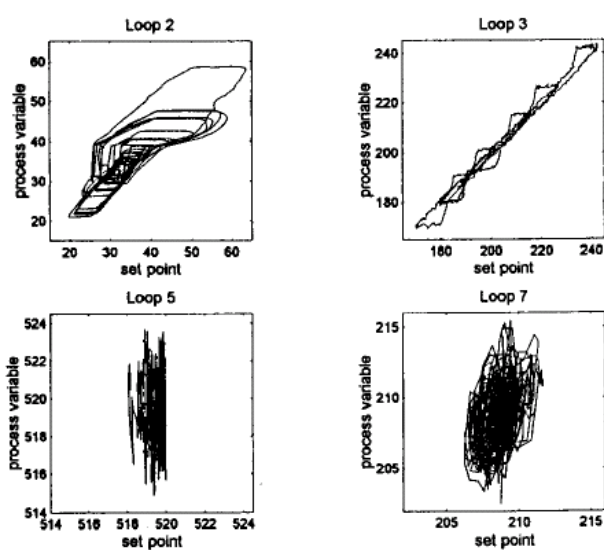
**Figur 3.11** Några exempel på sp-pv-diagram. Vänstra delen visar bör- och mätsignaler som funktion av tiden med respektive sp-pv-diagram till höger (Thornhill – Hägglund, 1997).

De tre översta graferna är för ideala fall och ska belysa karakteristiken för några problem. De bakomliggande orsakerna är styrdon med glapp (a), kärvande ventil (b) och överdimensionerad ventil (c). Den understa grafen ska illustrera ett verkligt fall med linjär reglering. Thornhill och Hägglund (1997) påpekar att tidsfördröjning i systemet ger upphov till en ellips i sp-pv-diagrammet istället för en förväntad rät linje.

### 3.5.2 Kommentar

Metoden är enkel. Har man bara tillgång till processens bör- och mätsignaler kan dessa enkelt plottas mot varandra för analys.

Att implementera metoden för automatisk detektering är emellertid svårt. Den kräver kaskadkopplade kretsar vilket tillsammans med att analysera plottarnas kurvform blir svårt att göra automatiskt. Problemet åskådliggörs i figur 3.12 där exempel på sp-pv diagram över verkliga reglerkretsar illustreras. Vi ser därför metoden som ett komplement till övriga metoder som kan vara bra i vissa specialfall för att ställa diagnoser.



Figur 3.12 Några exempel på sp-pv-diagram från verkliga reglerkretsar (Thornhill – Hägglund, 1997).

## 4 Utvecklade detekteringsmetoder

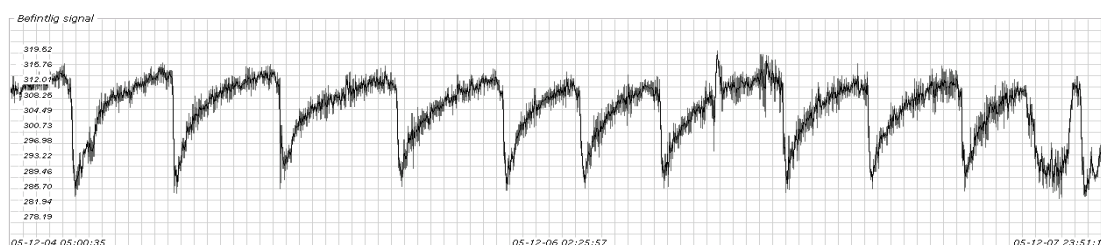
I det här kapitlet beskrivs några metoder vi själva utvecklat för att kunna detektera olika fel i industriella processer.

### 4.1 Detektering av lågfrekventa störningar

Under examensarbetets gång har vi träffat på signaler med lågfrekventa störningar. Deras förekomst har fått oss att utveckla en metod för att detektera dem.

#### 4.1.1 Bakgrund

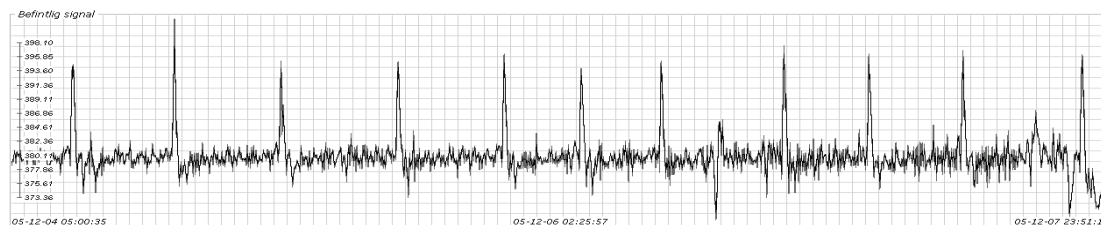
Gemensamt för de signaler vi tar upp i detta avsnitt är att de förutom lågfrekventa störningar (med periodtider upp till åtta timmar) även innehåller överlagrat brus. Ett exempel på en sådan signal visas i figur 4.1.



Figur 4.1 Temperatur ånga efter överhettning I (Data från Fortum).

Problemet med dessa störningar är att vår implementering av Stattin och Forsmans metod inte detekterar dem. Brus leder till nollgenomgångar vars areor och tidsintervall har små likheter vilket bidrar till att sänka värdet på parametern  $h$  och därmed ges ingen detektion.

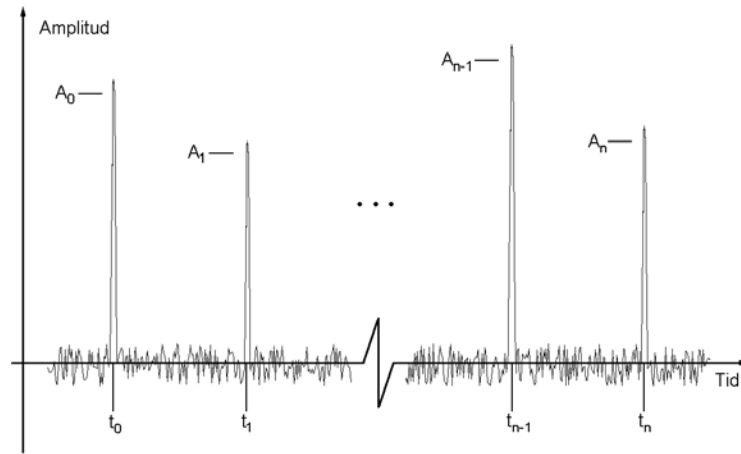
Den utvecklade metoden har visat sig fungera tillfredsställande i de tester som har genomförts. Idén till den nya metoden är följande: Då en signal med högfrekvent beteende högpasfilteras händer i stort sett ingenting. Spikarna i figur 4.2 blir kvar. Högpasfilteras däremot signalen i figur 4.1 kommer den likna signalen i figur 4.2. Det vi får i dessa fall är alltså signaler bestående av brus med återkommande spikar. Metoden går sedan ut på att detektera dessa.



Figur 4.2 Temperatur ånga efter överhettning II (Data från Fortum).

## 4.1.2 Beräkning

I likhet med Stattin och Forsmans metod jämförs tidsintervall mellan spikar men istället för areor jämförs spikarnas amplituder, se figur 4.3. Anses spikarna vara tillräckligt lika ska detektion ges, annars inte. Till sist räknas en kvot fram som anger ett mått på hur lika spikarna är.



Figur 4.3 Grafisk förklaring till parametrar i vår metod.

$A_i$  anger amplitud,  $t_i$  anger tid.  $A_{gr\ddot{a}ns}$  och  $t_{gr\ddot{a}ns}$  anger krav för hur lika amplituder respektive tidsintervall måste vara. Rimliga värden för dessa gränser ligger mellan 0.6 och 0.7. Om amplituder och tider ligger inom sina gränser sätts parametern  $\kappa$  till 1, annars 0.

Matematiskt innebär detta att om

$$A_{gr\ddot{a}ns} < \frac{A_k}{A_{k+1}} < \frac{1}{A_{gr\ddot{a}ns}} \quad \cap \quad t_{gr\ddot{a}ns} < \frac{t_k - t_{k-1}}{t_{k+1} - t_k} < \frac{1}{t_{gr\ddot{a}ns}} \quad (4.1)$$

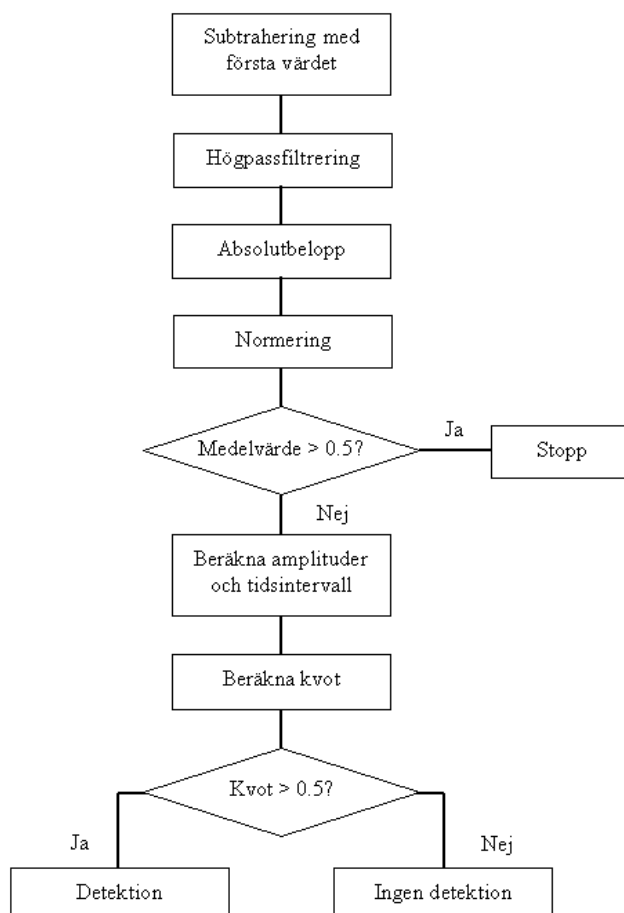
så är  $\kappa = 1$ , annars 0. När alla spikar i signalen undersökts beräknas ett medelvärde av  $\kappa$ . Medelvärdet betecknar vi med  $c$ .

$$c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \kappa_i}{n} \quad (4.2)$$

där  $n$  motsvarar antalet  $\kappa$ . Värdet på  $c$  kommer att variera mellan 0 och 1. Högre värde på  $c$  betyder större likhet mellan spikarna. Vi föreslår en gräns på lägst 0.5 för att signalen ska innehålla periodicitet.

### 4.1.3 Implementering

En beskrivning av implementeringen av vår metod i form av ett flödesschema åskådliggörs i figur 4.4 nedan.



**Figur 4.4** Flödesschema över implementeringen av vår metod.

De första fyra blocken förbehandlar signalen innan de egentliga beräkningarna sker. Inledningsvis subtraheras hela signalen med dess första värde. Detta gör att den startar med värdet noll och på så vis undviks den "branta backe" som uppstår då en signal med högt startvärde högpassfiltreras. Efter filtreringen innehåller den behandlade signalen endast ursprungssignalens högfrekventa information. Absolutbeloppet gör att eventuella negativa spikar blir positiva. (I det här läget liknar signalen i figur 4.1 signalen i figur 4.2.) Normering sker sedan genom att dividera hela signalen med dess högsta värde. På så vis vet vi att samtliga värden i signalen ligger mellan 0 och 1 vilket underlättar kommande beräkningar. För att undvika att utföra beräkningar på signaler som saknar högfrekvent beteende får den normerade signalens medelvärde inte få överstiga 0.5.

## 4.2 Metoder för styrsignalsanalys

Under arbetets gång har vi inte haft tillgång till styrsignaler från verkliga processer i mer än fyra fall. Trots det har vi utvecklat idéer till några metoder för att visa att enbart styrsignaler kan säga mycket om processer. Ett antagande vi gjort i detta kapitel är att de loggade styrsignalerna antar värden mellan 0 % och 100 %.

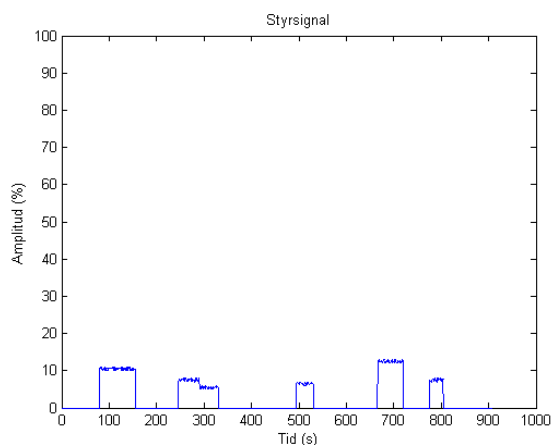
Idealt bör en styrsignal variera inom ett lagom stort område. Den bör dessutom inte ha alltför hög varians. Att styrsignaler avviker från det här beteendet då och då behöver inte innebära problem men om styrsignalen konsekvent avviker från mönstret finns det anledning till oro. Det är inte önskvärt att en styrsignal ger fullt eller nära nog fullt utslag alternativt är strypt eller nära nog strypt under en större del av tiden. I dessa fyra fall ligger regulatorn på gränsen till hur mycket den egentligen kan påverka processen vilket innebär att regulatorns arbetsläge inte är optimerat med processen.

### 4.2.1 Strypt styrsignal

Strypta styrsignaler uppstår då regulatorer inte kan påverka processen i båda riktningarna. Detekteringen av en strypt signal behöver inte vara särskilt avancerad. Här beskrivs tre fall:

- Styrsignalen är strypt en stor del av tiden och variansen är låg (figur 4.5).
- Signalen är strypt en stor del av tiden och variansen är hög (figur 4.6).
- Styrsignalen ligger genomgående på ett lågt värde med låg varians (figur 4.7).

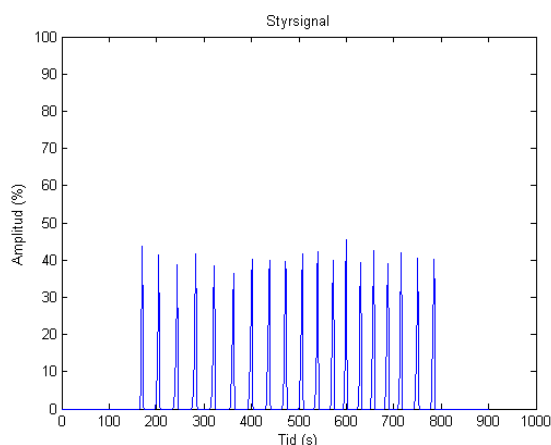
Första fallet kan till exempel förklaras med en regulator som styr en doppvärmare i en tank. Om temperaturen blir för hög vill regulatorn att doppvärmaren ska börja kyla, vilket förstås är omöjligt. Det enda den kan göra är att inte värma, således stryker regulatorn styrsignalen. För att kyla vätskan skulle det behövas en annan anordning, kanske en kaskadkoppling med en annan regulator som reglerar inflödet av kall vätska till tanken. En detektering av en styrsignal av detta slag skulle alltså kunna indikera ett behov av att se över processen.



**Figur 4.5** Graf över en simulerad styrsignal som är strypt en stor del av tiden och vars varians är låg.

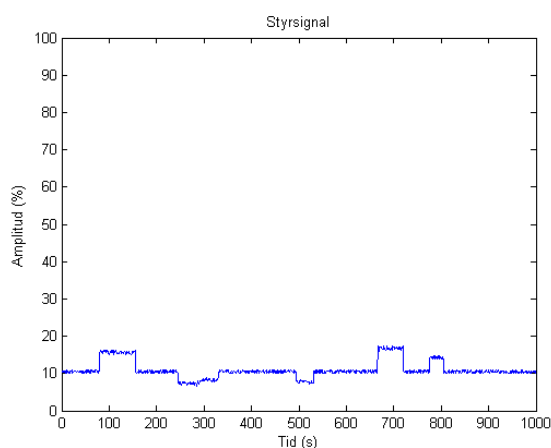
Fall två skulle möjligtvis kunna visa på en olinjär process, till exempel en vätsketank i vilken en pH-reglering görs med hjälp av en basisk vätska för att höja pH-värdet. Regleringen försvaras på grund av den logaritmiska pH-skalan. Även små mängder basisk vätska skulle kunna ändra pH-värdet radikalt och att följa börvärdet blir därför svårt. Då vätskan i tanken blir för basisk strypps

styrsignalen och regulatorn måste vänta tills pH-värdet åter sjunkit. Ett flöde av en sur vätska till tanken kan liksom en basisk vätska ändra pH-värdet radikalt även i små mängder. När pH-värdet sjunkit ändrar regulatorn styrsignalen och ventilen till den basiska vätskan öppnas tills det återigen slår över. Mönstret kan upprepa sig och liknar det i figur 4.6. Detektering av styr signaler som liknar den i figuren kan alltså tyda på avsaknad av kompensering för olinjäritet i regleringen.



**Figur 4.6** Graf över en styrsignal som är strypt en stor del av tiden och vars varians är hög. Styrsignal för pH-nivå i en fällningstank (Data från Fortum).

Tredje fallet är likt beskrivningen av styrsignalen för en överdimensionerad ventil från avsnitt 2.2.2. Styrsignalen ligger på en låg nivå i stationärt tillstånd och rör sig inom ett litet intervall. En detektering av en styrsignal med detta beteende skulle alltså kunna peka på behovet av att byta ut en stor ventil mot en mindre.



**Figur 4.7** Graf över en simulerad styrsignal som ligger genomgående på ett lågt värde och har en låg varians.

En enkel metod för att detektera dessa fall kan vara att beräkna styrsignalens medelvärde (mean), varians (variance) samt andelen strypt signal, d.v.s. andelen nollor (zeroes). Med hjälp av dessa värden görs sedan följande undersökning:



```

if (variance < varianceLimit)
  if (zeroes > zeroesLimit)
    Fall 1 (Se över processen)
  else if (mean < meanLimit)
    Fall 3 (Undersök ventil eller styrdon)
  else
    OK, ingen åtgärd
else if (zeroes > zeroesLimit)
  Fall 2 (Undersök olinjäritet)
else
  OK, ingen åtgärd
end

```

Vilka gränser som ska användas (varianceLimit, zeroesLimit respektive meanLimit) beror på processen och är något man bör testa sig fram till.

#### 4.2.2 Styrsignal som ger fullt utslag

Styr signaler som ger fullt utslag har mycket gemensamt med strypta. Båda förekommer då regulatorn jobbar på gränsen av vad den kan åstadkomma. Återigen bör man ha i åtanke att sällsynta och momentana händelser då styr signalen ger fullt utslag inte nödvändigtvis behöver innebära problem, precis som i fallet med strypt styr signal. Det är alltså när den ger fullt eller nära nog fullt utslag länge som det kan finnas problem. Att styr signalen ger fullt utslag beror på att det styr don som regulatorn vill styra inte är stort eller kraftigt nog för att påverka processen i den utsträckning regulatorn vill. Om till exempel styr donet i fråga är en ventil som släpper igenom ett flöde är den alltså för liten och släpper därför inte igenom tillräckligt mycket tillräckligt snabbt.

Detekteringsmetoden vi föreslår är lik föregående avsnitts metod för fall 3, fast tvärtom. Metoden ska detektera om styr signalens medelvärde är väldigt högt, exempelvis över 80-90 %.

#### 4.2.3 Orolig styr signal

Med orolig styr signal menas en styr signal som har hög varians. Styr signaler bör helst vara lugna i stationärt tillstånd. En ryckig eller orolig styr signal behöver inte alltid leda till en lika ryckig mätsignal men den kan orsaka förslitningar i mekaniska detaljer såsom ventiler.

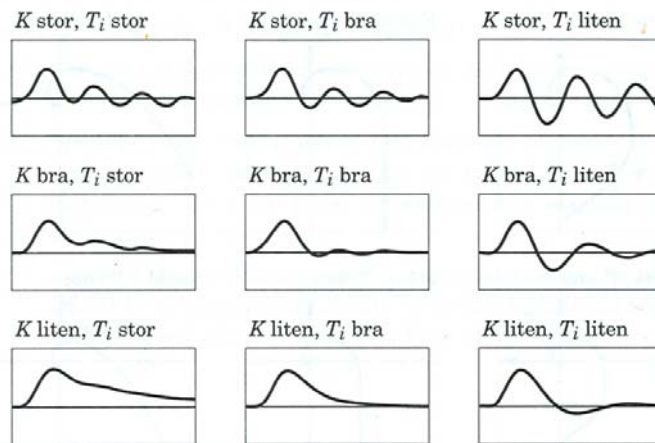
I industriella processer förekommer det brus som kan få en styr signal att bete sig oroligt. För att motverka detta filtreras ofta insignaler till regulatorn med ett lågpasfilter med lämplig brytfrekvens. Dock saknas det ibland filter på ingången till regulatorn eller så är det dåligt anpassat vilket leder till orolig styr signal. D-delen i en PID-regulator kan också ge upphov till något oroligare styr signal, särskilt om insignalen till regulatorn är ofiltrerad. Vid en detektering av en orolig styr signal kan alltså en lösning vara en bättre filtrering av insignalen till en P-/PI-regulator så att slitage på mekaniska komponenter kan minskas.

Ett förslag till en detekteringsmetod för orolig styr signal skulle helt enkelt kunna vara att undersöka om dess varians ligger över en viss gräns.

### 4.3 Laständringsanalys

De tester som gjorts i den här delen av arbetet har haft för avsikt att undersöka om man skulle kunna detektera eventuellt dåligt inställda regulatorparametrar då en laständring eller laststörning sker. Alltså söker vi en metod för att kunna identifiera någon form av fingeravtryck i mätsignalerna som en felinställd parameter i regulatorn ger upphov till.

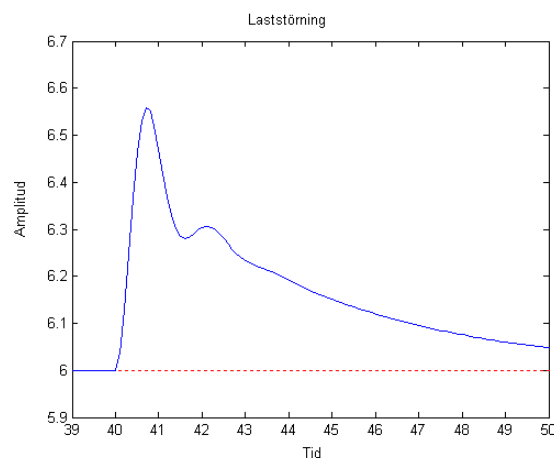
Idén att undersöka just laständringar kommer från Hägglund (1997). På sidan 57 finns ett inställningsschema som visar processens mätsignal då en stegformad laständring sker vid några olika regulatorinställningar för en PI-styrd process. Inställningsschemat ses i figur 4.8.



Figur 4.8 Inställningsschema för PI-regulatorn (Hägglund, 1997).

Vi har velat utreda möjligheterna till att kunna detektera de dåligt dämpade oscillationer som uppstår då  $K$  är stor samtidigt som  $T_i$  är stor, vilket enligt Hägglund (2006) är en vanligt förekommande inställning inom industrin.

För att undersöka detta fenomen genomfördes därför simuleringar i Matlab. Den valda processens överföringsfunktion, brus och andra inställningar återfinns i appendix A. Ett exempel på en signal med detta utseende illustreras i figur 4.9.



Figur 4.9 Simulerad process med dåligt dämpade oscillationer som uppstår då  $K$  är stor samtidigt som  $T_i$  är stor. Mätsignalen är angiven med heldragen linje, börvärdet med streckad.

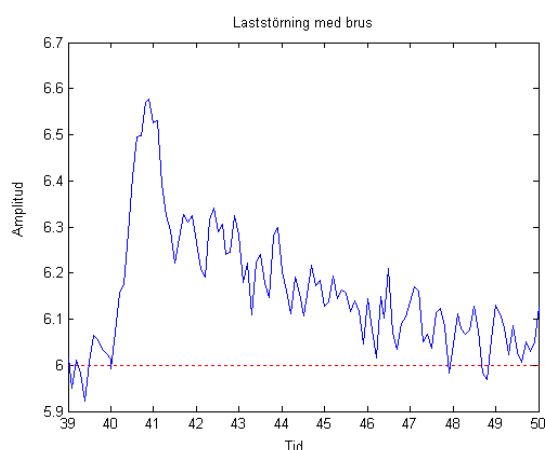
Simuleringsmodellen som använts har haft (ur försökets synpunkt) ideala inställningar, det vill säga att brusnivån är noll, ingen tidsfördröjning förekommer och laststörningen är en stegfunktion. De slutsatser som kan dras av simuleringarna är att då en dämpad oscillation eller en ”knyck” uppstår efter en laststörning bör regulatorinställningarna ses över.

För att underlätta sökandet efter fingeravtrycket vore det lämpligt att först kunna lokalisera laststörningen. Detta skulle kunna göras med hjälp av en jämförelse mellan styrsignalen och mätsignalen. Då laststörningen inträder uppkommer ett stationärt fel som regulatorn försöker motverka. Mät- och styrsignal drivs alltså åt olika håll, vilket skulle kunna detekteras.

Emellertid finns det ett antal problem med att upptäcka den ovan nämnda kurvformen. Det största problemet är att den, trots att det ur detekteringssynpunkt råder ideala förhållanden,

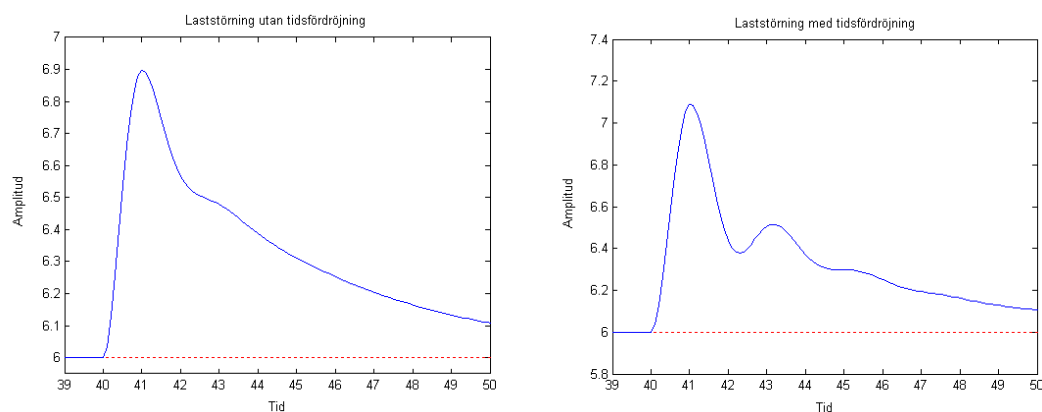
fortfarande är svår att detektera. Beroende på hur bra eller dåligt inställd regulatorn är betar sig styrsignalen olika och därmed påverkas mätsignalen annorlunda. Detta ger upphov till olika antal ”knyckar” eller dämpade oscillationer vilket gör att en generell metod för att detektera problemet är svår att bestämma.

Ändras förhållandena till mer verklighetstroga blir det svårare att urskilja svängningarna. Redan vid låga brusnivåer (vitt brus med varians  $2 \cdot 10^{-4}$ ) blir det svårt att upptäcka den dämpade oscillationen ur mätsignalen, se figur 4.10.



**Figur 4.10** Simulerad process med samma inställningar som i figur 4.9 men med adderat brus. Mätsignalen är angiven med heldragen linje, börvärdet med streckad.

System med tidsfördröjningar kan leda till att förstärka effekten av svängningarna. En, i det ideala fallet, relativt väl inställd regulator kan med en liten tidsfördröjning ge upphov till svängningar som liknar de i figur 4.9, se figur 4.11.



**Figur 4.11** Simulerad process utan tidsfördröjning till vänster, med tidsfördröjning till höger. Mätsignalen är angiven med heldragen linje, börvärdet med streckad.

Är dessutom laststörningen inte ett exakt steg utan en långsammare ändring - såsom ramp eller liknande - påverkas kurvformen i mätsignalen av detta. Sammantaget leder de problem som nämnts till att kurvformen vi söker inte kan beskrivas tillräckligt generellt. Att utveckla en metod för att urskilja dessa är därför en svår uppgift och skulle kräva alltför mycket tid för att vara försvarbart att genomföra inom detta examensarbete.

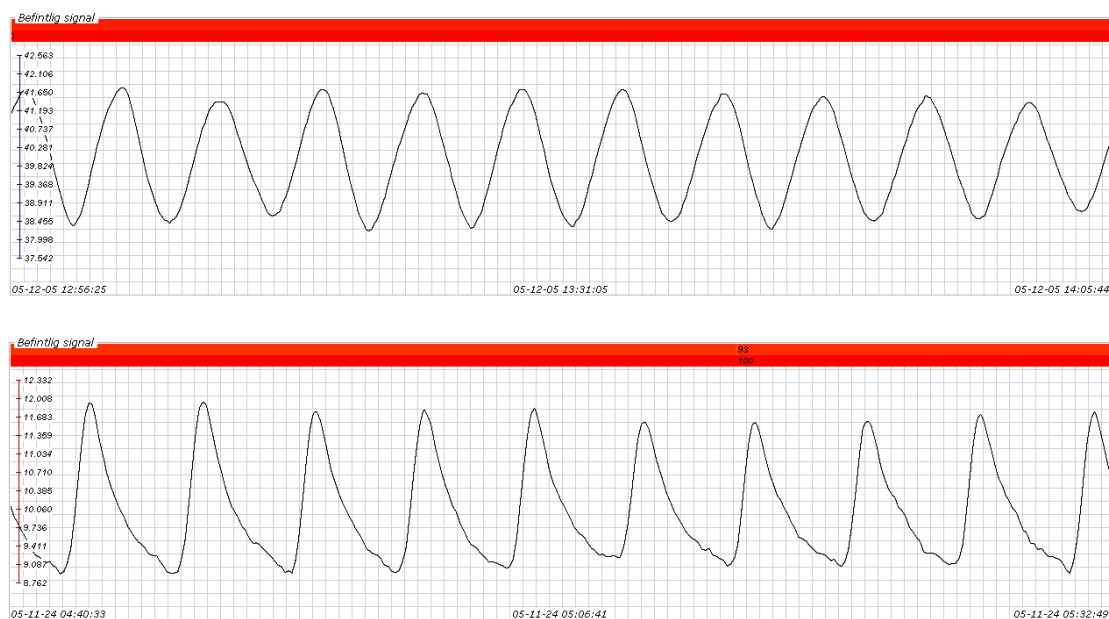
## 5 Resultat och utvärdering

Detta kapitel behandlar resultat från våra egna tester och ett skarpt test från en anläggning vi besökt. Det har visat sig att de målsättningar som sattes upp innan examensarbetet uppnåts vilket det här kapitlet går närmare in på.

### 5.1 Utvärdering av programmet

De utvecklade metoderna har inledningsvis testats och finjusterats med hjälp av Matlab. Senare har metoderna implementerats i Silent Controls programvara. Programvaran består av två olika program, ett för att grafiskt illustrera enskilda signaler (Process Analysis Toolbox) och ett för att visa resultaten från flera signaler i en lista (PAT Batch Viewer). I det grafiska programmet markeras de delar av signalen där oscillation detekteras med två färgade linjer i övre delen av fönstret. Den övre linjen motsvarar vad vår metod detekterat och den undre vad Stattin och Forsmans metod detekterat. Färgen på linjerna går gradvis från gult till rött ju högre värde parametrarna får. Då ingen oscillation detekteras är linjen transparent. Några exempel på vad som detekteras och vad som riskerar att missas följer nedan.

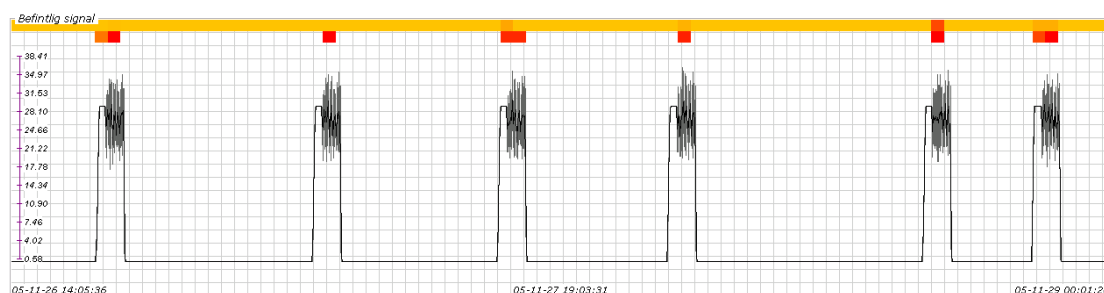
Enligt resonemangen i kapitel 2 leder de flesta problem till olika typer av oscillationer med periodtider av storleksordningen minuter. Två signaler med denna karaktäristik åskådliggörs i figur 5.1.



Figur 5.1 Två olika oscillationer med periodtid på ca fem minuter (Data från Fortum).

Beroende på hur pass sinusoid kurvformen är ger metoderna något varierande värden, dock uteslutande med god marginal över gränsen ( $b$  och/eller  $c \gg 0.5$ ). Av de oscillationer med denna periodtid har vi inte funnit någon signal där detekteringen misslyckats. Eftersom dessa typer av svängningar detekteras uppmärksammas också många av de problem som nämns i kapitel 2.

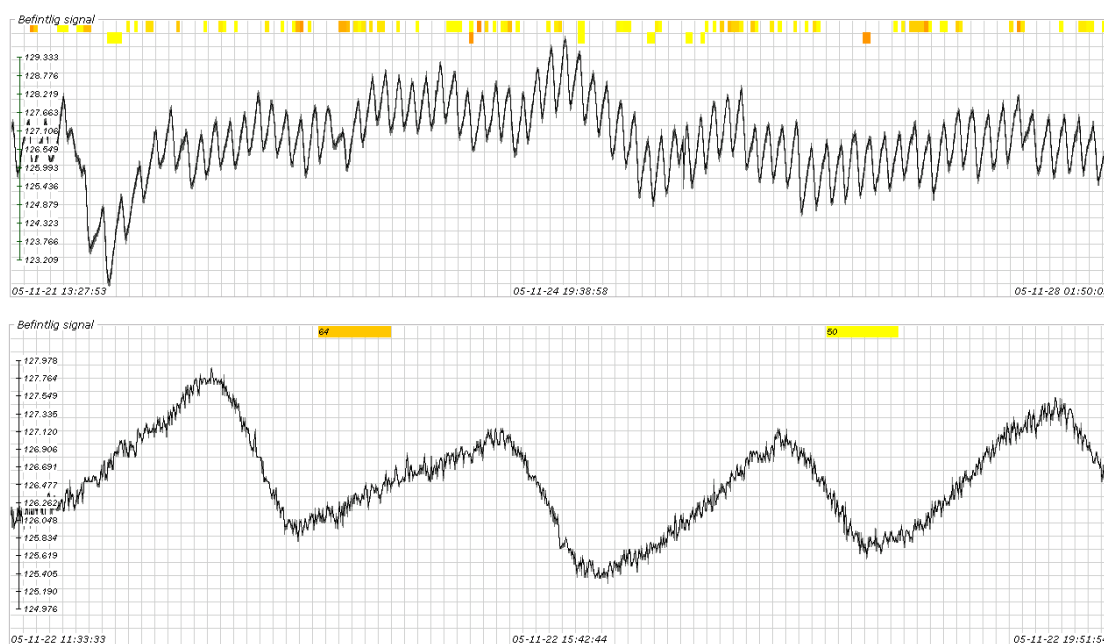
Värt att nämna är att de olika metoderna samverkar. I figur 5.2 visas en signal med lågfrekventa stegändringar med svängningar på topparna.



Figur 5.2 Signal med stegändringar och svängningar (Data från Fortum).

Signalen är ett bra exempel på hur metoderna kan peka ut olika kurvformer. Vår metod (övre linjen) detekterar stegändringarna, medan Stattin och Forsmans metod (undre linjen) är bättre på att detektera svängningarna.

De oscillationer som inte detekterats är främst lågfrekventa sinusoida (periodtid i storleksordningen flera timmar) med brus och ibland också överlagrade på oregelbundna bärvågor. Det tydligaste exemplet vi sett på oscillation som missats visas i figur 5.3.



Figur 5.3 Exempel på svängning som inte detekteras. Periodtid ca två timmar. Undre grafen visar en inzoomad del av den övre (Data från Vattenfall).

Ingen av metoderna ger höga värden någonstans i denna signal. Stattin och Forsmans metod på grund av bruset, vår metod på grund av den sinusoida svängningens låga frekvens.

I inledningen nämns att beräkningseffektivitet inte har varit något krav och därför har det inte ägnats någon tid att optimera metoderna. Emellertid har tester visat att programmet är tämligen beräkningseffektivt. Som exempel kan nämnas att signaler loggade under en månad med tio

sekunders sampeltid (det vill säga ungefär 260 000 sampel), i genomsnitt tog 0.36 s att undersöka vilket får anses som fullt godkänt.

Slutligen har metoderna implementerats och återfinns som ett verktyg i Silent Controls programvara. Detekteringar visas förutom grafiskt också i listform för att kunna sorteras efter storlek på värden, se figur 5.4.

Signal	Beskrivning	#C	#H	maxC	maxH
SSV3-WATCHD	SSV3 OPC_SERVER WATCHDOG	30	50	97.6	100.0
SSV3-CJD00FU	WATCHDOG SIGNAL TIL OPC	30	50	97.6	100.0
SSV3-LDA45CF	FLOW KOLDKONDENSAT RENSN.	35	42	96.3	100.0
SSV3-HCB10FT	TEMP.SODBL.KMOH	38	42	94.1	100.0
SSV3-HCB10CT	TEMP.SODBL.KMOH	40	42	97.3	100.0
SSV3-HCB10CT	TEMP.SODBL.KMOH	39	41	94.4	100.0
SSV3-HQF21CE	STRØM ELFILTER SEKT.P21A5	20	40	93.3	100.0
SSV3-HCB10CP	DAMPTRYK EFTER DAMPVENTIL	27	40	97.3	100.0
SSV3-LDA20CE	STRØM KOLDKRA-PUMPE 2	20	37	91.7	90.0
SSV3-HQF11CE	STRØM ELFILTER SEKT.P11A3	5	33	71.4	100.0
SSV3-HQF11CE	STRØM ELFILTER SEKT.P11A5	16	32	90.0	100.0
SSV3-LBB03AAI	MOH-SIK VENT	3	27	75.0	100.0
SSV3-HQF21CE	STRØM ELFILTER SEKT.P21A3	3	25	75.0	100.0
SSV3-LBG01CFI	HJÆLPEDAMP/ÆNGDE	18	24	96.2	100.0
SSV3-HQF21CE	STRØM ELFILTER SEKT.P21A4	25	21	90.0	100.0
SSV3-QEA10CE	STRØM KOMPRESSOR	13	20	97.6	100.0
SSV3-HQF21CE	STRØM ELFILTER SEKT.P21A6	16	19	90.0	100.0
SSV3-HAJ30FU	LEVEFOR MOH 25.09.1D	7	18	83.3	100.0
SSV3-HCB34FT	TEMP.DRÆNV.LANSESODBL	11	15	81.8	100.0
SSV3-HQF11CE	STRØM ELFILTER SEKT.P11A6	15	13	88.9	100.0
SSV3-HAJ31FU	LEVEFOR MOH 25.09.1J	3	13	66.7	100.0
SSV3-MAA11C1	TEMP.FØR.DYSEVENT.V.	1	11	66.7	100.0
SSV3-HAJ30FU	LEVEFOR MOH 25.09.1E	1	10	75.0	100.0
SSV3-HFE43AA	KM 30 REG.SPJÆLD VARMLUFT	3	10	83.3	100.0
SSV3-LBF01AAI	REG.VENTIL HT-BYPASS	0	10	50.0	100.0
SSV3-BBE05CE	SPÆNDING BBT01 MOD BBE	1	10	71.4	100.0
SSV3-BFE01CE	STRØM TAVLE BFE	11	10	88.9	100.0
SSV3-HFC10CP	DIFF.TR.SP.-PR.LUFT KM10	10	10	85.7	100.0
SSV3-NDD20CT	TEMP.DRÆNPOTTE FJV.V 2	5	10	83.3	100.0
SSV3-LBA51CTI	FRISKDAMPTEMP. HT-TILGANG	2	9	66.7	100.0
SSV3-BBE07CE	STRØM BLOK.TRF BFT01	12	9	88.9	100.0
SSV3-LBB04AAI	MOH-SIK VENT	0	9	50.0	66.7
SSV3-MAH40CE	STRØM VANDK.EJEKTOR P2	6	9	88.9	100.0
SSV3-HCB34CT	TEMP.DRÆNV.LANSESODBL.	10	9	88.9	87.5
SSV3-HTE10CP	DIFF TRYK ØVER POSEFILTER	6	9	90.9	76.1
SSV3-BFE01CE	SKINNESPÆNDING BFE	4	9	75.0	100.0
SSV3-MAA10FT	DAMP TEMP.FØR HT-TURBINE	4	8	66.7	100.0
SSV3-HFE44AA	KM 40 REG.SPJÆLD VARMLUFT	4	8	83.3	100.0

Figur 5.4 Implementerade metoder i Silent Controls BatchViewer. Signalerna är ordnade efter antal oscillationsobjekt för *h*.

## 5.2 Resultat från skarpt test

För att undersöka till vilken nytta programmet kan vara för industrin borde man även diskutera resultaten med processkunniga personer. Mot slutet av examensarbetet gavs tillfälle att testa metoderna på signaler från ett koleldat värmekraftverk i Studstrup på Jylland som ägs av DONG Energy. Verket har ca 170 anställda och levererar maximalt 700 MW elektricitet.

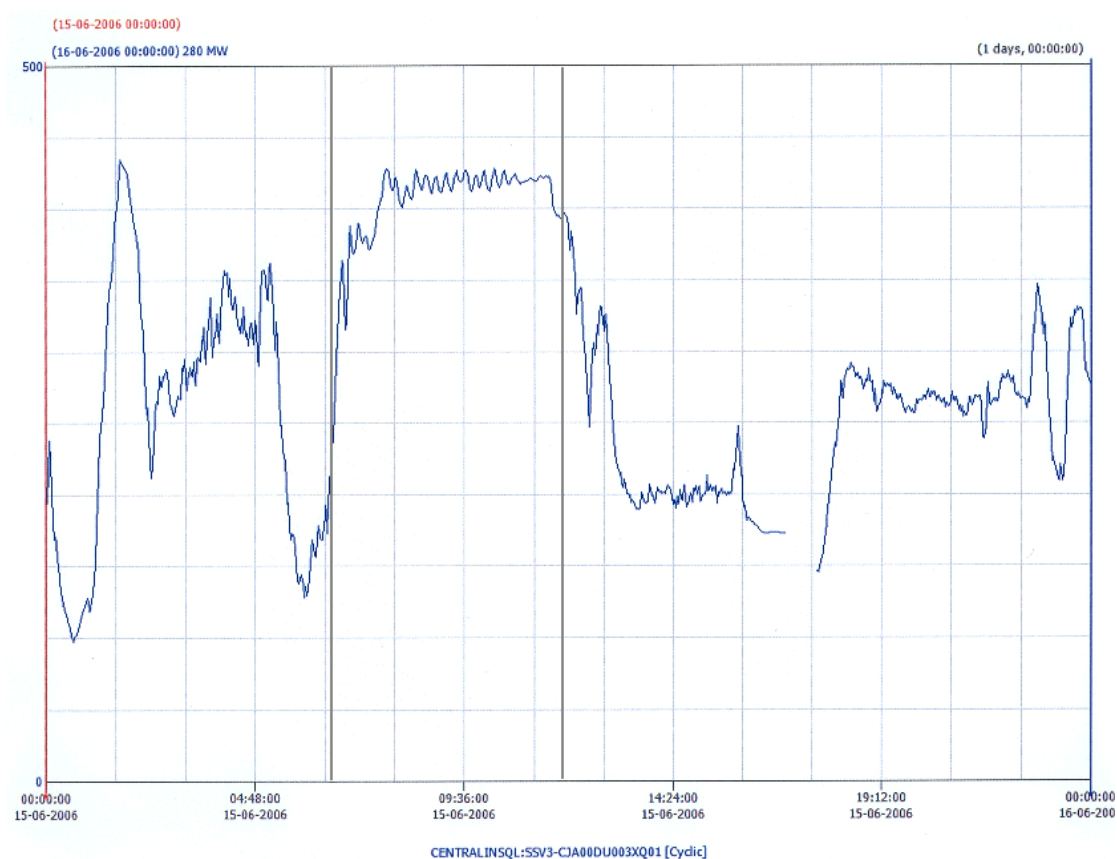
Problemet som värmekraftverket har upplevt är att oscillationer på ungefär 12 MW då och då uppträtt i uteffekten vilket de vill ha hjälp med att hitta orsaken till. Av de drygt 3000 signaler vi fick var vår första uppgift att hitta oscillationen i signalerna och sedan sortera ut dem för närmare analys. Vi visste vid det här laget ingenting om oscillationens natur som till exempel när den inträffade, vad den hade för frekvens och hur länge den kvarstod. Med hjälp av programmet kunde antalet signaler som behövde undersökas närmare i en första analys reduceras till ungefär 40 stycken. Efter en genomgång av dessa 40 signaler visade det sig att ett tiotal av dem innehöll

oscillationer med stora likheter i tid och frekvens vilket gjorde att vi uppfattade dem som extra intressanta. Exempel på tre av signalerna visas i figur 5.5.



Figur 5.5 Tre av de oscillerande signalerna från Studstrupsverket (Data från DONG Energy).

När vi sedan presenterade våra resultat visade det sig att de signaler vi fått fram hade oscillationer som korrelerade med densamma för uteffekten, se figur 5.6.



Figur 5.6 Graf över uteffekten som vi fick under mötet på Studstrupsverket, jämför med figur 5.5.

Besöket på anläggningen markerade starten för ett forskningsprojekt med syfte att finna orsaken till oscillationerna. Förhoppningsvis kan våra resultat leda till att rotorsaken hittas och problemen därmed kan lösas.

## 6 Diskussion och förslag till framtida arbete

I examensarbetet har den största begränsningen varit avsaknad av styrsignaler. Trots denna begränsning går mycket att få fram ur enbart mätvärde. Detektering av olika slag har redan behandlats i arbetet, möjligen skulle någon form av diagnos också kunna ställas. Vad som är frestande att fundera kring är vad som skulle kunna åstadkommas om det dessutom fanns tillgång till styrsignal och börvärde. Om de metoder som beskrivs i kapitel 3 och 4 implementerades i ett gemensamt program skulle säkrare diagnoser kunna ställas. Dessutom skulle metoder för systemidentifiering möjliggöras, vilket kan leda till ytterligare analyser.

Förutom nämnda förslag efterlyser vi en mer omedelbar utveckling och förbättring av de implementerade metoderna. Erfarenheter från Studstrupsverket och dess data uppmärksammar problemet med samoscillation, det vill säga att en reglerkrets börjar oscillera och att oscillationen sedan fortplantar sig till närliggande kretsar. För att hitta rotorsaken till felet skulle en metod som uppger om tidpunkten då en oscillation startar kunna vara till hjälp. Genom att jämföra oscillationers starttider skulle den som startar först och därmed rotorsaken till problemet kunna fastställas. De implementerade metoderna informerar om var i signalen en oscillation finns och ungefär var den startar, men de ger i nuläget ingen exakt tidpunkt för jämförelse.

Det återstår mycket som kan förbättras inom områden som automatisk feldetektering och automatisk diagnostisering. Dessa områden lär knappast bli mindre i framtiden, snarare kommer de växa i både komplexitet och uppmärksamhet inom industrin och forskningen allt eftersom automatiseringen ökar. Den viktigaste insikten vi kommit till i examensarbetet är att i takt med den ökande automatiseringen ökar också behovet av automatisk övervakning och optimering av processer. Automatisk övervakning skulle även kunna användas i förebyggande syfte. Förutom detektering av fel och diagnostisering finns god potential till att detektera exempelvis slitage på komponenter vilket leder till att problem åtgärdas innan de resulterar i eventuella haverier.

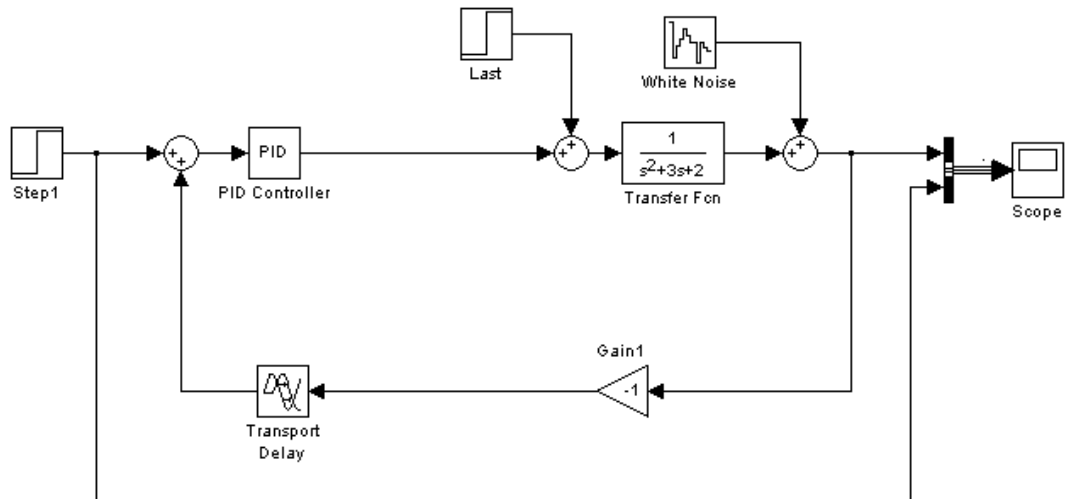


## Referenslista

- Bialkowski, W.L (1993), Dreams versus Reality: A View from Both Sides of the Gap. *Pulp and Paper Canada*, vol. 94, nr. 11.
- Ender, David (1993), Process Control Performances: Not as Good as you Think, *Control Engineering*, September.
- Ender, David (1999), Common cause of control loop cycling. *Control engineering*, vol. 46, nr. 2, s. 78.
- Forsman, Krister - Stattin, Andreas (1999), A new criterion for detecting oscillations in control loops. *European control conference*, Karlsruhe, Tyskland.
- Hidén, Sofia (2003), *Modellering och styrning av en biogasprocess: tillämpning av ADM1-modellen*. JTI-rapport, RKA28.
- Horch, Alexander (1999a), A simple method for oscillation diagnosis in process control loops. *Control applications*, vol. 2, s. 1284-1289.
- Horch, Alexander (1999b), A simple method for detection of stiction in control valves – Analysis and measurement procedures, *Control Engineering Practice*, vol. 7, nr. 10, s. 1221-1231.
- Hägglund, Tore (1997), *Praktisk processreglering*, Studentlitteratur, Lund.
- Hägglund, Tore - Åström, Karl Johan (1997). Supervision of adaptive control algorithms. *IFAC conference on control of industrial systems*. Belfort, Frankrike.
- Hägglund, Tore (1999), Automatic detection of sluggish control loops. *Control Engineering Practice*, vol. 7, nr. 12, s. 1505–1511.
- Hägglund, Tore (2003), *Reglerteknik AK Föreläsningar*, KFS AB, Lund.
- Hägglund, Tore (2006), *Diskussioner våren och sommaren 2006*.
- Kuehl, Peter – Horch, Alexander (2005), Detection of sluggish control loops-experiences and improvements, *Control Engineering Practice*, vol. 13, nr. 8, s.1019-1025.
- McMillan, Gregory K. (1995), Improve control valve response, *Chem. Eng. Prog. (June)*, s. 76-84.
- Miao, Tina – Seborg, Dale E. (1999), Automatic Detection of Excessively Oscillatory Feedback Control Loops. *Control Applications*, vol. 1, s. 359-364.
- Shinskey, F. Greg (1990), How Good Are Our Controllers in Absolute Performance and Robustness?. *Measurement & Control*, 23, sid. 114-120.
- Thornhill, Nina – Hägglund, Tore (1997), Detection and diagnosis of oscillation in control loops, *Control Engineering Practice*, vol. 5, nr. 10, s. 1343-1354.
- Yamashita, Yoshiyuki (2006), An automatic method for detection of valve stiction in process control loops, *Control Engineering Practice*, vol. 14, nr. 5, s. 503-510.
- Åström, Karl Johan (1991), Assessment of achievable performance of simple feedback loops. *Int. J. Adap. Control and Sig. Proc.*, nr. 5, s. 3-19.
- Åström, Karl Johan – Hägglund, Tore (2005), *Advanced PID Control*, ISA, Research Triangle Park, USA.

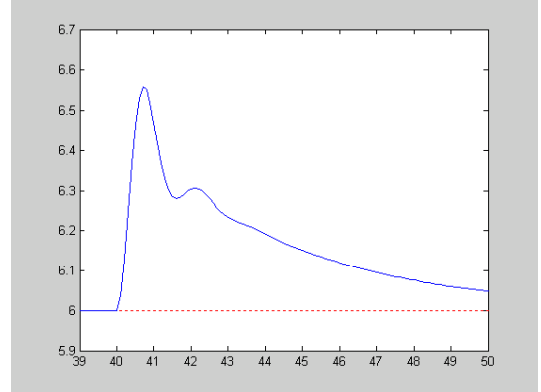
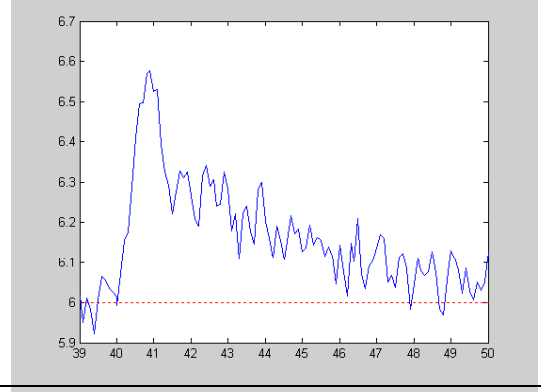
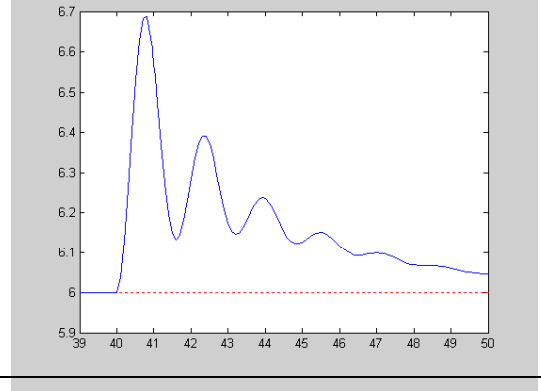
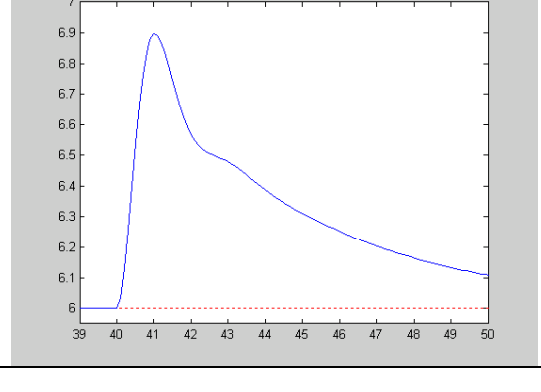
# Appendix A

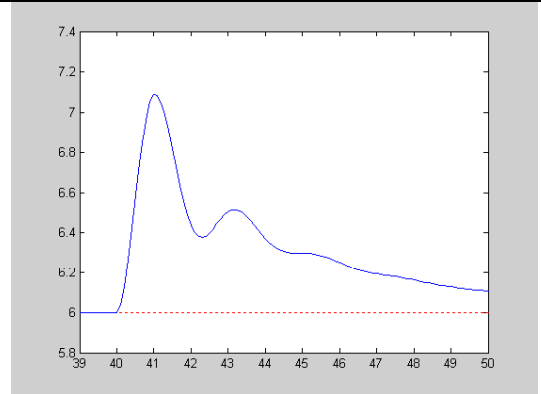
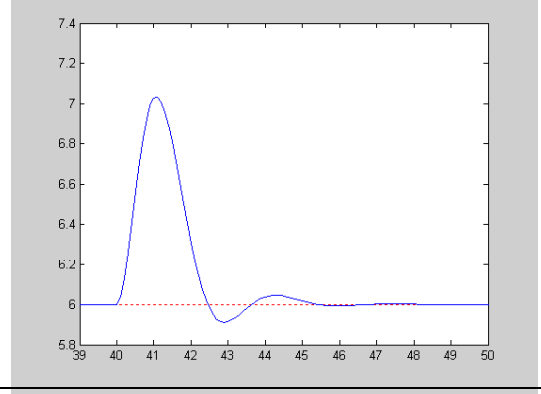
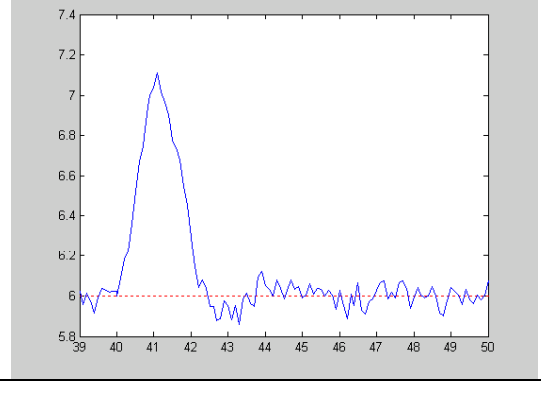
## Simuleringsmodell och grafer



Överföringsfunktionen har i alla simuleringar varit  $\frac{1}{s^2 + 3s + 2}$ .

Resultat med grafer och inställningar följer på nästa sida.

Signal	K	$T_i$	Brusvarians	Tidsfördröjning
	16	4	0	0
	16	4	$2 \cdot 10^{-4}$	0
	16	4	0	0.1 s
	8	4	0	0

Signal	K	$T_i$	Brusvarians	Tidsfördröjning
	8	4	0	0.15 s
	5	0.83	0	0
	5	0.83	$2 \cdot 10^{-4}$	0