

# Institutionen för systemteknik

## Department of Electrical Engineering

**Examensarbete**

### **Modellbaserad diagnostik tillämpad för hydrauliska applikationer**

Examensarbete utfört i Fordonssystem  
vid Tekniska högskolan vid Linköpings universitet  
av

**Sebastian Adén**

LiTH-ISY-EX-13/4687-SE

Linköping 2013



**Linköpings universitet**  
**TEKNISKA HÖGSKOLAN**



# Modellbaserad diagnostik tillämpad för hydrauliska applikationer

Examensarbete utfört i Fordonssystem  
vid Tekniska högskolan vid Linköpings universitet  
av

**Sebastian Adén**

LITH-ISY-EX-13/4687-SE


Handledare: **Emil Larsson**  
ISY, Linköpings universitet

**Johan Gunnarsson**  
Combitech AB

Examinator: **Erik Frisk**  
ISY, Linköpings universitet

Linköping, 7 maj 2013



|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
|   | <b>Avdelning, Institution</b><br>Division, Department<br><br>Fordonssystem<br>Department of Electrical Engineering<br>SE-581 83 Linköping                              |   | <b>Datum</b><br>Date<br><br>2013-05-07  |
|  | <b>Språk</b><br>Language<br><br><input checked="" type="checkbox"/> Svenska/Swedish<br><input type="checkbox"/> Engelska/English<br><br><input type="checkbox"/> _____ | <b>Rapporttyp</b><br>Report category<br><br><input type="checkbox"/> Licentiatavhandling<br><input checked="" type="checkbox"/> Examensarbete<br><input type="checkbox"/> C-uppsats<br><input type="checkbox"/> D-uppsats<br><input type="checkbox"/> Övrig rapport<br><input type="checkbox"/> _____ | <b>ISBN</b><br>_____<br><br><b>ISRN</b><br>LiTH-ISY-EX-13/4687-SE<br><br><b>Serietitel och serienummer</b> <b>ISSN</b><br>Title of series, numbering              _____ |
| <b>URL för elektronisk version</b><br><br><a href="http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-94584">http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-94584</a>  |  |   |   |
| <b>Titel</b> Modellbaserad diagnostik tillämpad för hydrauliska applikationer<br><b>Title</b> Model Based Diagnostics for Hydraulic Applications<br><br><br><b>Författare</b> Sebastian Adén<br><b>Author</b>  |  |   |   |
| <b>Sammanfattning</b><br>Abstract<br><br><p>I en globaliserad värld där produktägare finner sina produkter på alltmer avlägsna platser, ökar behovet av att på ett så ekonomiskt och tidseffektivt sätt som möjligt, utföra reparationer och underhållningsarbeten. Att erbjuda en stark och mer effektiv eftermarknadssupport kan öka företagets konkurrenskraft och framför allt göra dem kostnadseffektiva med avseende på lägre bemanningsstyrka. Ett sätt att underlätta underhållningsarbetet är genom att använda modellbaserad diagnos för att generera underlag vid exempelvis reparationer. Denna rapport undersöker möjligheterna att utifrån en modell av en hydraulisk applikation, utföra autogenererad diagnostik bland annat iform av felträdsanalys. Innehållet i rapporten beskriver även hur modelleringsarbetet har gått till och utveckling av modellens ingående komponenter. Examensarbetet är utfört på Combitech AB, Linköping.</p> |  |   |   |
| <b>Nyckelord</b><br><b>Keywords</b> modellbaserad, diagnos, Rodon, hydraulik   |  |   |   |



## Sammanfattning

I en globaliserad värld där produktägare finner sina produkter på alltmer avlägsna platser, ökar behovet av att på ett så ekonomiskt och tidseffektivt sätt som möjligt, utföra reparationer och underhållningsarbeten. Att erbjuda en stark och mer effektiv eftermarknadssupport kan öka företagets konkurrenskraft och framför allt göra dem kostnadseffektiva med avseende på lägre bemanningsstyrka. Ett sätt att underlätta underhållningsarbetet är genom att använda modellbaserad diagnos för att generera underlag vid exempelvis reparaionsarbeten. Denna rapport undersöker möjligheterna att utifrån en modell av en hydraulisk applikation, utföra autogenererad diagnostik bland annat iform av felträdsanalys. Innehållet i rapporten beskriver även hur modelleringsarbetet har gått till och utveckling av modellens ingående komponenter. Examensarbetet är utfört på Combitech AB, Linköping.





## Tack

Då jag efter ett crescendo av fem månaders examensarbete och ett allt tilltagande behov av glasögon, sitter och skriver detta skriftliga tack till de inblandade. Finer jag det svårt att omfatta samtliga personer som på något sätt bidragit. Men framför allt är det två individer som på ett adekvat vis ska lyftas fram. Den ena är **Johan Gunnarsson**, CTO vid divisionen TIS på Combitech. Jag kommer för alltid vara tacksam för att han gav mig chansen att genomföra detta examensarbete. Den andre personen, som genom särskilda insatser bör omnämnas är **Kenny Stjernström**, mästare diagnos på Combitech. Utan hans kunskaper inom Rodon, hade jag förmodligen fortfarande suttit och grävt i manualer efter lösningen på mina utvecklingsproblem. Därefter följer min handledare Emil Larsson, som alltid tagit sig tid att svara på vadhelst frågor jag kan komma på. Icke att föringa är min examinator Erik Frisk, som har en imponerande förmåga att snabbt sätta sig in i teori. Vidare följer de personer som bistått på det personliga planet. Detta genom finansiering och emotionella värden. Till denna grupp inkluderas hela min familj: mor, far, lillebror, hund och flickvän. Jag sätter dessutom ett stort värde i de bidrag jag fått ifrån min mormor och morfar under min tid som student vid LITH.

*Linköping, Maj Nådens år 2013  
Sebastian Adén*



---

# Innehåll

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Notation</b>  | <b>ix</b> |
| <b>1 Introduktion</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Bakgrund till examensarbetet . . . . .                           | 1         |
| 1.2 Problemformulering . . . . .                                     | 1         |
| 1.3 Relaterad forskning . . . . .                                    | 2         |
| 1.4 Syfte och mål med examensarbetet . . . . .                       | 2         |
| 1.5 Resultaterande bidrag ifrån examensarbetet . . . . .             | 3         |
| <b>2 Metodik</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 Modellbaserad diagnostik . . . . .                               | 5         |
| 2.2 Felmods- och Feleffektsanalys (FMEA) . . . . .                   | 5         |
| 2.3 Felträdsanalys (FTA) . . . . .                                   | 6         |
| 2.4 Beslutsträd (DT) . . . . .                                       | 9         |
| 2.5 Diagnosverktyget Rodon . . . . .                                 | 9         |
| 2.5.1 Diagnos baserad på resonemang . . . . .                        | 10        |
| 2.5.2 Rodons simuleringsrutin . . . . .                              | 10        |
| 2.5.3 Generell komponentutveckling . . . . .                         | 13        |
| <b>3 Systembeskrivning:Volvo L250G</b>                               | <b>15</b> |
| 3.1 VOLVO L250G . . . . .  | 15        |
| 3.1.1 Styrelektronik . . . . .                                       | 18        |
| <b>4 Abstraktion vid modellering</b>                                 | <b>19</b> |
| 4.1 Abstraktionsnivå och krav . . . . .                              | 19        |
| <b>5 Komponentmodellering</b>  | <b>23</b> |
| 5.1 Hydrauliska komponenter modellerade som flödesmotstånd . . . . . | 23        |
| 5.1.1 Tilldelning av felmoder . . . . .                              | 23        |
| 5.2 Resultaterande komponenter . . . . .                             | 24        |
| 5.2.1 Hydraulisk cylinder . . . . .                                  | 24        |
| 5.2.2 Hydraulmaskiner . . . . .                                      | 29        |
| 5.2.3 Flödesreglerande ventiler . . . . .                            | 32        |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.2.4    | Servoventiler . . . . .  | 41        |
| <b>6</b> | <b>Resultat och slutsats</b>   | <b>49</b> |
| 6.1      | Utvidgning av Rodons standardbibliotek . . . . .                                     | 49        |
| 6.1.1    | Slutsats kring modellering av hydraulik i Rodon-miljö . . .                          | 49        |
| 6.1.2    | Slutsats kring tilldelning av komponentfelmoder och modellering av symptom . . . . . | 50        |
| 6.2      | Resultaterande modell av systemet . . . . .  | 50        |
| 6.2.1    | Arbetshydraulik . . . . .  | 50        |
| 6.2.2    | Styreelektronik . . . . .  | 50        |
| 6.3      | Autogenererad Diagnostik . . . . .   | 52        |
| 6.3.1    | Slutsats kring autogenererad diagnostik . . . . .                                    | 52        |
| <b>7</b> | <b>Diskussion</b>  | <b>57</b> |
| 7.1      | Modellering av en hydraulisk applikation . . . . .                                   | 57        |
| 7.2      | Utveckling av komponenter . . . . .  | 57        |
| 7.3      | Resultat i form av beslutsträd . . . . .   | 58        |
| 7.3.1    | Funktioner för att anpassa beslutsträden till användaren .                           | 58        |
| 7.4      | Avslutande kommentarer . . . . .   | 59        |
|          | <b>Litteraturförteckning</b>   | <b>61</b> |

---

# Notation

---

| <b>Nomenklatur</b> | <b>Betydelse</b>                    |
|--------------------|-------------------------------------|
| $A_i$              | Area [ $m^2$ ]                      |
| $q_i$              | Volymflöde [ $m^3/s$ ]              |
| $p_i$              | Tryck [ $Pa$ ]                      |
| $R_i$              | Strömningsmotstånd [ $Pa/(m^3/s)$ ] |
| $C_q$              | Flödeskoefficient [-]               |
| $\rho$             | Densitet [ $kg/m^3$ ]               |
| $D_i$              | Displacement [ $m^3/varv$ ]         |
| $\epsilon$         | Ställtal [-]                        |
| $n$                | Varvtal [ $varv/s$ ]                |
| $\eta_{hm}$        | hydraulmekanisk verkningsgrad [-]   |
| $\eta_{vol}$       | volymetrisk verkningsgrad [-]       |
| $K_{intern}$       | Strömningsmotstånd [ $Pa/(m^3/s)$ ] |

---



# 1

---

## Introduktion

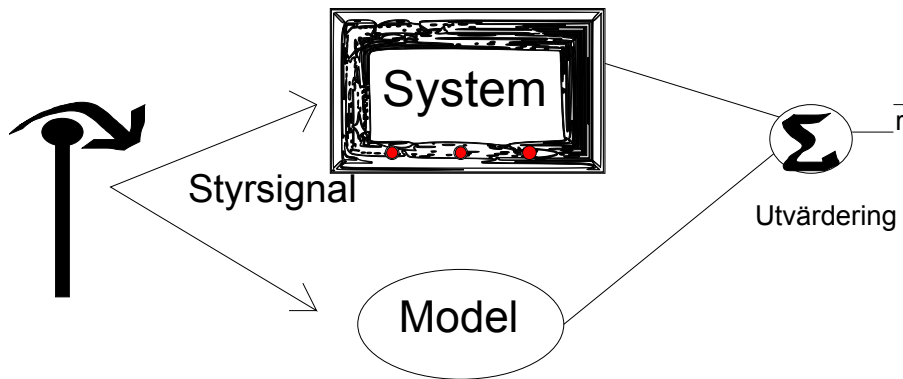
Under introduktionskapitlet presenteras en övergripande bakgrund till varför examensarbetet genomförs, med tillhörande problemformulering. Därefter introduceras läsaren kortfattat i relaterad forskning. Vidare, följer syfte och mål. Kapitlet avslutas med en kort beskrivning kring resultatet av examensarbetet.

### 1.1 Bakgrund till examensarbetet

Combitech utvecklar och marknadsför produkter och tjänster inom modellbaserad diagnostik, detta baserat på sitt eget mjukvaruverktyg, Rodon. I denna mjukvara kan användaren skapa systemmodeller och utifrån dessa generera olika typer av felanalyser såsom Failure-Mode-Effect-Analysis (FMEA) och diagnos i form av Decision Trees (DT). Rodon används idag främst inom bilindustrin, men det är även av intresse att undersöka möjligheterna för diagnostik av hydrauliska applikationer.

### 1.2 Problemformulering

Problemet som ligger till grund för examensarbetet består i att undersöka om det finns några underliggande svårigheter med att diagnostisera just hydrauliksystem med hjälp av Rodon. Dessa svårigheter kan exempelvis bestå av problem med att uttrycka symptom på en form som är kompatibel med Rodon.



Figur 1.1: Illustration av modellbaserad diagnos

### 1.3 Relaterad forskning

Teorin kring *modellbaserad diagnos* är noga utredd i flera vetenskapliga texter exempelvis i en artikel av (Kleer och Williams). I den artikeln utreder även de Kleer och Williams konceptet kring diagnos baserat på komponentmodellens beteendemoder, vilket är av relevans för innehållet i denna rapport. Artklar skrivna kring modellering och diagnos explicit för ämnet hydraulik, återges bland annat av (Garimella och Yao, 2004) och (Garimella och Yao, 2005). Användningsområdet för det diagnosverktyg som presenteras av denna rapport riktar sig främst mot eftermarknadssupport. Vad som finns föreslaget och som används för denna typ av diagnostik är felträds- och FMEA-analyser (kapitel 2).

### 1.4 Syfte och mål med examensarbetet

Från Combitech förväntades examensarbetet resultera i ett standardbibliotek av komponentmodeller med fluidmekanisk karaktär. Combitech eftersträvar att man efter kunds önskemål, kan modellera ett system så pass väl i Rodon att *kunden* känner igen sig. De utvecklade komponenternas utseende och beteende ska vara fackmannamässigt korrekta.





*Figur 1.2: Hjullastaren L250G, används med tillåtelse från VOLVO CE*

## 1.5 Resulterande bidrag ifrån examensarbetet

Examensarbetet har resulterat i ett standardbibliotek av fluidmekaniska komponenter. För att validera de utvecklade komponenternas nominella- och defekta beteende, har dessa används för att generera modellbaserad diagnostik för en VOLVO L250G, figur 1.2. Den diagnostik som presenteras i rapporten, görs i form av guidad diagnostik (kapitel 2.3) och baseras på symptom som VOLVO finner intressanta. Exempelvis långsamt stegsvar i förhållande till referenssignal.



# 2

---

## Metodik

I detta kapitel presenteras Rodon, som är det diagnosverktyg som använts. Dessutom följer en kort redogörelse kring felträds- och feleffektsanalys, då det är på denna form som diagnosuttalande ifrån Rodon presenteras.

### 2.1 Modellbaserad diagnostik

Definitionen av modellbaserad diagnos är: En diagnos baseras på en explicit modell av systemet (Nyberg och Frisk, 2012), där modellen som används i diagnosanalysen kallas för diagnosmodell. Denna modell behöver inte nödvändigtvis beskriva det fysikaliska beteendet, så länge den representerar systemet för nominellt respektive felaktigt beteende. Generellt kan modellbaserad diagnos illustreras av figur 1.1. Dvs en modell av systemets utsignal jämförs med observationer ifrån systemet. Om skillnaden betraktas stor, antas ett systemfel vara närvarande. I detta examensarbete bygger diagnostikprocessen på att mjukvaran (kapitel 2.5) härleder systembeteende baserat på en modell, ner till komponentnivå.

### 2.2 Felmods- och Feleffektsanalys (FMEA)

Felmods- och Feleffektsanalys (FMEA) är en systematisk metod att använda vid konstruktion, för att resulterande produkt ska vara driftsäker. Denna analys innebär att systembeteende utreds för en produkt eller process med avseende på möjliga felmoder. I det allmänna fallet analyseras systemkonsekvensen för aktiverade fel på komponentnivå. FMEA har sina rötter inom den amerikanska flyg- och rymdindustrin och grundlades under 1950 – talet. Idag ingår feleffektsanalys vid standardisering enligt ISO 9001 (Bergman och Klefsjö, 2001). Arbetet utförs

Företaget AB

Bilaga 2.xls  
1:1

## FMEA - FELEFFEKTANALYS

| Risktal                         |  | Felmöjlighet är motsatsen till önskad funktion    |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
|---------------------------------|--|---|---|--|---|---------------------|------|------|------|--------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|--------------|------|------|----|--------------|
| -                               | 100  | 100   | Felorsak måste elimineras för att felet inte ska kunna uppstå |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
| 101                             | - 300  | 301   | Feleffekt är hur felet uppfattas av slutanvändaren/kunden     |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
| 301                             | - 1000   |   |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
| © Frost Konsult                 |  |   |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
| Gör det själv<br>Tändstiftsbyte |  | Utförd av och deltagare<br>Bilägaren              |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
|                                 |  | Detaljnamn<br>Opel Astra 1,6 2000                 |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
|                                 |  | Detaljnummer                                      |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
| Projektleddare<br>Bilägaren     |  | Datum<br>2007-04-27                               |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
|                                 |  | Uppföljningsdatum                                 |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
|                                 |  | Anmärkning<br>Kanske bäst att lämna till verkstad |   |  |   |                     |      |      |      |              |                                   |                    |             |              |      |      |    |              |
| Nr                              | Komponent/<br>operation/<br>huvud-<br>funktion | Funktion  | Felkarakteristik  |  |   | Nuvarande tillstånd |      |      |      |              | Rekommenderade<br>åtgärder        | An-<br>sva-<br>rig | Ut-<br>fört | Efter åtgärd |      |      |    | Risk-<br>tal |
|                                 |  |   | Felmöjlighet  | Feleffekt  | Felorsak  | Kontroll            | Fels | Allv | Uppt | Risk-<br>tal |                                   |                    |             | Fels         | Allv | Uppt |    |              |
| 1                               | Inköp av<br>tändstift                          | Tändstift<br>avsedda för<br>motorn                | Fel artikel   | Dålig motorfunktion                                  | Slarv   |                     | 10   | 5    | 8    | 200          | Ange motortyp vid inköp           | Mont               | OK          | 1            | 5    | 4    | 20 |              |
| 2                               | Demontera<br>tändenhet                         | Åtkomst till<br>tändstift                         | Tändenhet kan ej<br>lösnas                                    | Tändstiftsbytet kan ej<br>genomföras                 | Fel verktyg   |                     | 3    | 8    | 8    | 192          | Käll av verktygsbehov i<br>förväg | Mont               | OK          | 1            | 8    | 4    | 32 |              |
| 3                               |  |   | Tändenhet skadas<br>vid demontering                           | Motorns funktion kan<br>påverkas negativt            | Ovarsamt<br>handhavande                               |                     | 4    | 6    | 8    | 192          | Anskaffa och läs i<br>manual      | Mont               | OK          | 1            | 8    | 4    | 32 |              |
| 4                               | Demontera<br>tändstift                         | Avlägsna gamla<br>tändstift                       | Tändstiften kan ej<br>skruvas loss                            | Tändstiftsbytet kan ej<br>genomföras                 | Fel verktyg   |                     |      | 8    | 8    |              | Käll av verktygsbehov i<br>förväg | Mont               | OK          | 1            | 8    | 4    | 32 |              |
| 5                               | Montera  | Montera nya<br>tändstift                          | Gångar skadas om<br>tändstiften skruvas<br>snett              | Dålig motorfunktion                                  | Otit anslutning av<br>tändstift pga<br>skadade gångar |                     | 3    | 7    | 6    | 126          | Läs i manual                      | Mont               | OK          | 1            | 7    | 4    | 28 |              |
| 6                               |  |   | Dragning av<br>tändstift med för<br>litt moment               | Efter en tid dålig<br>motorfunktion                  | Tändstiften<br>lösnar                                 |                     | 4    | 6    | 8    | 192          | Använd momentnyckel               | Mont               | OK          | 1            | 6    | 4    | 24 |              |
| 7                               |  |   | Dragning av<br>tändstift med för<br>høgt moment               | Svårt att lossa<br>tändstift, risk för<br>gångskador | Ovarsamt<br>handhavande                               |                     | 4    | 6    | 8    | 192          | Använd momentnyckel               | Mont               | OK          | 1            | 6    | 4    | 24 |              |
| 8                               | Montera<br>tändenhet                           | Ansluta<br>tändning                               | Tändstift/tändenhet<br>skadas vid<br>montering                | Dåligt motorfunktion                                 | Ovarsamt<br>handhavande                               |                     | 2    | 6    | 8    | 96           | Läs i manual                      | Mont               | OK          | 1            | 6    | 4    | 24 |              |

Figur 2.1: FMEA-mall, (Frostkonsult, 2013)

generellt sett manuellt, i grupper av kompetent personal. Kompetent i den meningen att gruppen har god produkt/process-kännedom. På detta sätt kan en adekvat feleffektsmall fyllas i enligt figur 2.1.

I figur 2.1, behandlas systemfunktionen *tändstiftsbyte*. Processen för att ta fram en FMEA kan sammanfattas av att på komponentnivå:

- Finna möjliga fel.
- Utreda effekt av fel.
- Om så behövs, åtgärda felorsak.

I en manuellt utförd feleffektsanalys, enligt figur 2.1, har en FMEA-analys realiserats. Detta förfarande kan beskrivas som att konstruktören av analysen, subjektivt poängsatt **felsannolikheten**, **allvarlighetsgraden** och **upptäcktssannolikheten**. Den ansvarige för feleffektsanalysen bedömer alltså dessa parametrar bland annat genom egna erfarenheter. Poängskalorna varierar beroende av vilken FMEA-teori som används. I exempelvis (Bergman och Klefsjö, 2001) återfinns skalan som presenteras i tabell 2.1, 2.2 och 2.3. De poängsatta storheterna vägs samman, genom innebördes multiplikation, till ett **risktal**. Detta risktal påvisar vilka feltyper som bör betraktas som kritiska. Om risktalet för en specifik feltyp anses vara hög (säg 100), vidtas åtgärder för att motverka framtida fel av denna typ.

## 2.3 Felträdsanalys (FTA)

Ett felträd kan per definition betraktas som inversen till en felmod- och feleffektsanalys. Istället för att analysera felmoder på komponentnivå i en produkt

| Felsannolikhet | Innebörd                         |
|----------------|----------------------------------|
| 1              | Osannolikt att fel kan uppträda  |
| 2              | Mycket liten sannolikhet för fel |
| 3-4            | Liten sannolikhet för fel        |
| 5-6            | Viss sannolikhet för fel         |
| 7-8            | Hög sannolikhet för fel          |
| 9-10           | Mycket hög sannolikhet för fel.  |

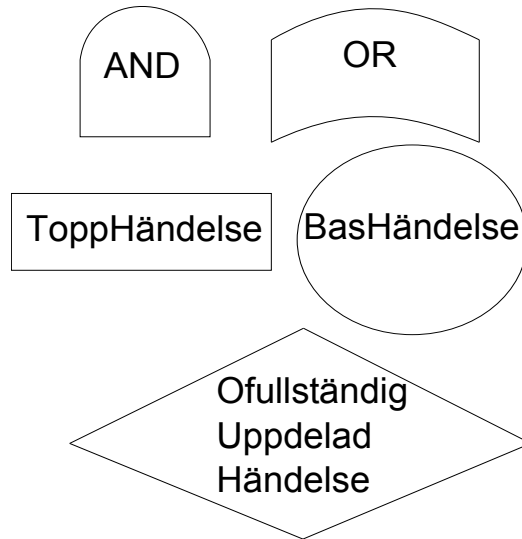
**Tabell 2.1:** felsannolikhet

| Allvarlighetsgrad | Innebörd  |
|-------------------|---|
| 1                 | Ingen inverkan                                    |
| 2                 | Ringa inverkan                                    |
| 3                 | Risk för störning av funktion                     |
| 4                 | Utebliven funktion                                |
| 5                 | Lagkrav eller fel som kan påverka personsäkerhet. |

**Tabell 2.2:** allvarlighetsgrad

| Upptäcktssannolikhet | Innebörd  |
|----------------------|---|
| 1                    | Felet upptäcks säkert   |
| 2                    | Normalt upptäcks felet  |
| 3                    | Sannolikheten (s) för upptäckt, ligger i intervallet $0.995 \leq s \leq 0.95$ |
| 4                    | Sannolikhet (s) för upptäckt, ligger i intervallet $0.9 \leq s < 0.95$        |
| 5                    | Osannolik att felet upptäcks.   |

**Tabell 2.3:** upptäcktssannolikhet



Figur 2.2: Komponenter för konstruktion av felträd

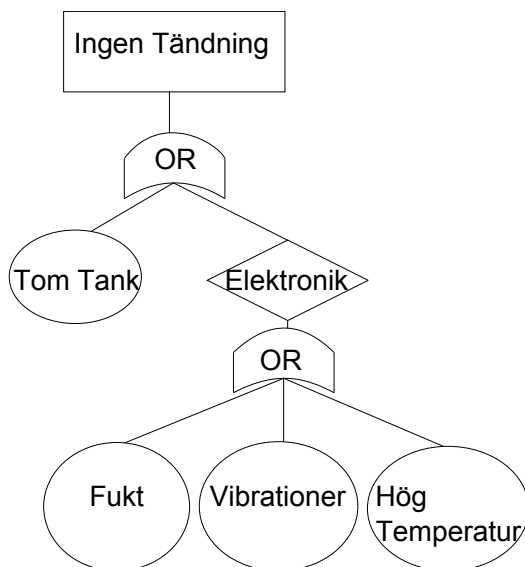
eller process och utreda konsekvensen på systemnivå. Baseras felträd på tänkbara händelser på systemnivå, varefter analysen fortsätter nedåt komponentnivå (bashändelse) med hjälp av logiska händelsediagram. I figur 2.2 presenteras en grafisk framställning av konventionella logikoperander för felträd (Krus, 2012). Konstruktionen av ett felträd börjar generellt med att definiera en funktionsnedsättande topphändelse, därefter specificera vilka fel och villkor som kan förorsaka denna (Krus, 2012). Alternativt kan topphändelsen vara varje händelse där intresse för händelsesannolikhet finns. Målet för ett felträd är att påvisa alla möjliga felmoder som kan förklara uppvisat defekt beteende och på varje nivå av felträdet, dvs förgrening, utröna sannolikheten för att ett specifikt komponentfel inträffar och på vilket sätt de interagerar internt. För att återknyta till ovan teori följer nedan ett exempel (2.1).

### 2.1 Exempel

Låt beteendemoden *ingen tändning* för en bensinmotor betraktas som topphändelse. På en viss abstraktionsnivå kan detta bero av:

- Defekt elektronik, som utvidgat kan bero av höga vibrationer, fukt eller alternativt hög temperatur.
- Tom bränsletank.

Ett genererat felträd kan förslagsvis se ut som figur 2.3



Figur 2.3: Ett genererat felträd för topphändelsen ingen tändning

## 2.4 Beslutsträd (DT)

I detta examensarbete kommer mycket av resultatet vara koncentrerat kring beslutsträd, i Rodon benämns dessa med den engelska översättningen *Decision Tree (DT)*. Dessa träd är väldigt närbesläktade med felträd, åtminstone vad det beträffar strukturen på användargränssnittet. Skillnaden ligger i att för varje förgrening i trädet får trädanvändaren en rekommendation av tester, mätningar etc som denna bör utföra för att isolera grundorsaken till felet (*Guidad diagnostik*), istället för sammanfogning av bashändelser genom logikoperander. Exempelvis, ett logiskt or-block byts ut mot en mätning av spänningsfallet över en komponent. Beroende av spänningsfallets storlek får användaren navigeringsanvisningar genom trädet.

## 2.5 Diagnosverktyget Rodon

Rodon utvecklas och marknadsförs av Combitech. I denna mjukvara kan användaren skapa systemmodeller och utifrån dessa generera olika typer av felanalyser såsom Felmod- och Feleffektsanalys, samt diagnos iform av beslutsträd (DT). Idag finns välutvecklad teori och erfarenhet för hur Rodon bäst ska tillämpas för mekatroniska system, typiskt inom bilindustrin, för att generera FMEA och beslutsträd (DT) som uppfyller kundönskemål. En viktig aspekt är att det diagnostikverktyg som Rodon utgör, ska generera samma kunskap som en manuell utförd FMEA.

### 2.5.1 Diagnos baserad på resonemang

Rodon använder sig av motsägelser för att bestämma diagnoser (Frey och Munker, 2009), i den meningen att Rodon ställer hypoteser kring möjliga grundorsaker för uppvisat beteende. Följaktligen, simulerade värden jämförs med observerade, liksom situationen i figur 1.1. Om modellen på komponentnivå innehåller felmoder används dessa för att konsistentbestämma hypoteserna. Grundtanken med denna arbetsgång är att på systemnivå implementera symptom, ofta baserade på logiska resonemang och genom en simuleringsrutin undersöka vilka komponentfel som är konsistenta med symptomen.

### 2.5.2 Rodons simuleringsrutin

Rodon bygger på det ekvationsbaserade och objektorienterade språket Rodelica. Rodons syntax är närbesläktat med Modelica (Modelica, 2007). Några av Rodons attribut är:

- Gränssnittet mellan komponenter utgörs av flödes- respektive intensitetsvariabler (Ljung och Glad, 2011).
- Rodelica stödjer intervallaritmetik istället för absoluta värden. Denna typ av räknemaskineri motiveras av vad som händer på komponentnivå vid fel. Om en felmod är aktiv, kan man inte i det generella fallet exakt förutsäga intensitets- och flödesvariablerna nya värden. Detta medför att direktpropagering av värden leder till konflikt vid beräkningsrutin. Rodon undgår detta genom sin intervallaritmetik.
- Med mjukvaran kan ett icke-kausalt gränssnitt tillämpas, dvs användaren behöver inte propagera beräkningsordning.
- Simuleringsrutiner kan exekveras med aktiverade felmoder.

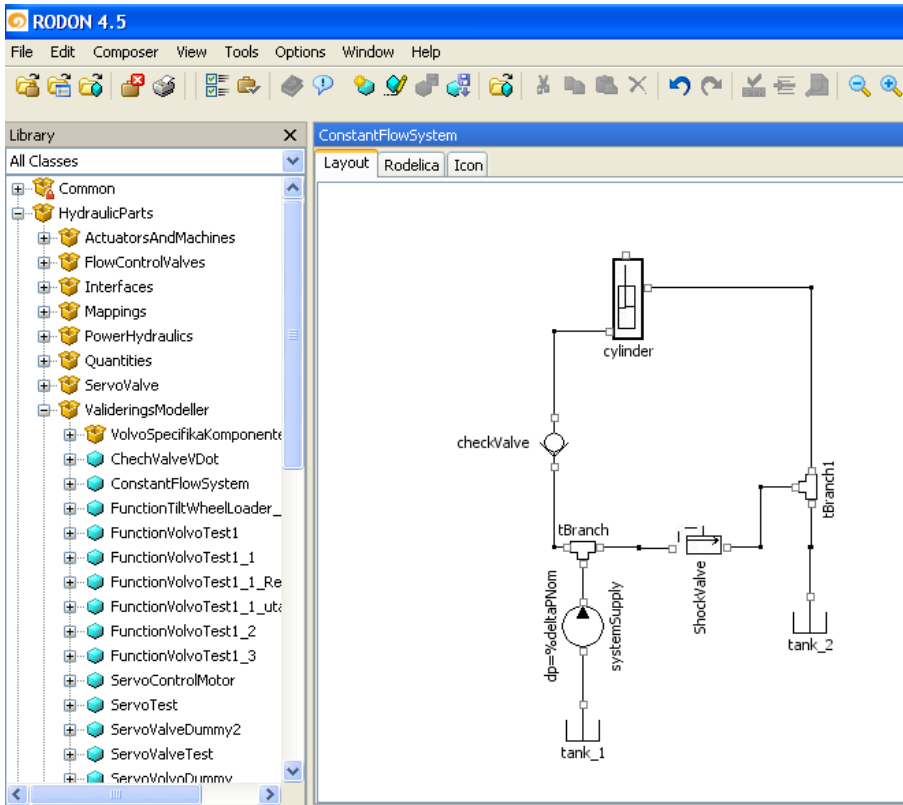
Inom den hydrauliska domänen motsvarar Rodons komponentgränssnitt av: volymflöde respektive tryck. Vidare behöver inte användaren propagera kausalitet, dvs Rodon sköter själv beräkningsgången. Det finns dock fall, där Rodon inte helt klarar av att beräkna samtliga variabler (Kapitel 6) och signalera konflikt vid simuleringsrutinen. En sådan situation kan baseras på att Rodons lösare inte kan propagera kausalitet, alternativt att kausalitet propageras ifrån två riktningar. Notera speciellt att konflikt vid simuleringsrutin innebär att Rodon inte kan beräkna variabelvärde för de begränsningar som tilldelats intervallaritmetiken, inte i den meningen att systemet är defekt.

### Autogenerering av felträd och feleffekts- och felmodsanalyser

Autogenereringsrutinen av beslutsträd eller felträd kan delas in i några huvudsakliga delmoment:

- Modellering i Composer, gränssnittet som visas i figur 2.4.
- Simuleringsrutinen med aktiverade felmoder, utförs under användargränssnittet Analyzer (figur 2.5).



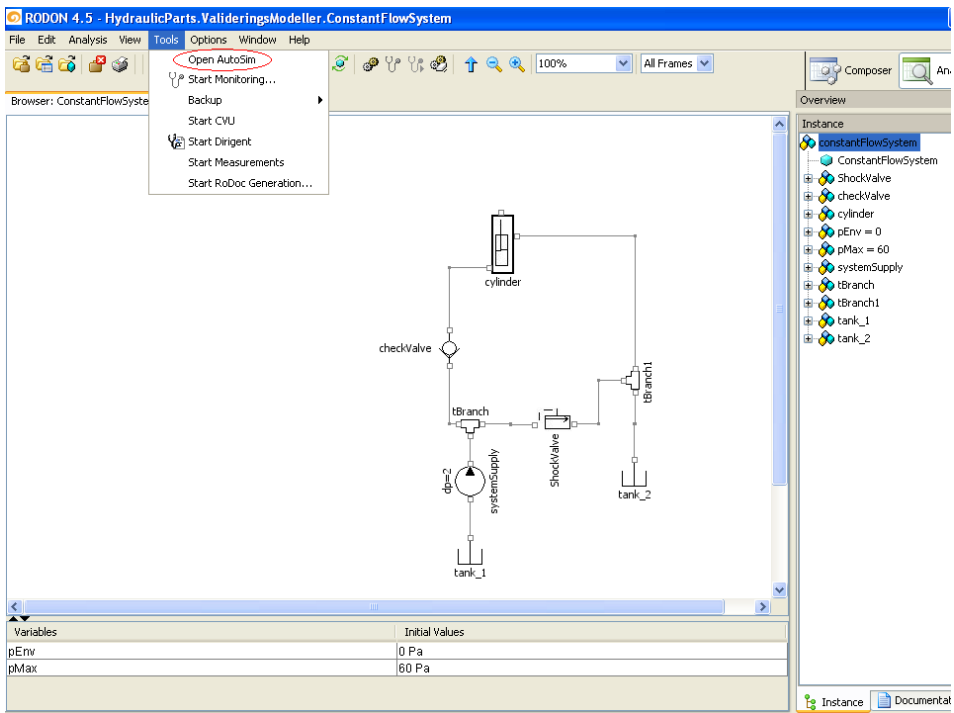


Figur 2.4: Konstantflödessystem, skärmdump ifrån gränssnittet Composer

- Trädgenerering i DtGen eller FMEA under SDBView. Utfallet ifrån DtGen åskådliggörs i kapitel 6.3.

Diagnostikprocessen består av att importera modellen ifrån Composer till Analyzer. I detta gränssnitt utvärderas modellen och undersöks så att allt förhåller sig som tänkt, i den meningen att systemet kan simuleras och användaren kan kontrollera så att modellen genererar korrekta in- och ut signaler. Under detta förfarande kommer konceptet kring intervallaritmetik in. Numeriska värden tilldelas intensitets- och flödesvariablerna, baserat på ekvationerna i modellens komponenter samt definierade gränser för intervalllets storlek.

I Analyzer har användaren dessutom tillgång till vad Rodon kallar AutoSim. Med detta verktyg kan en simuleringsrutin initieras, där effekten av enkel- respektive multipelfel utvärderas. Resultatet sparas i en databas och kan utvärderas under SDBView. Detta är Rodons svar på FMEA. Autosim levererar alltså en databas med information kring systemeffekter iform av värden på komponenternas gränssnittsvariabler. Därmed har *failure-mode-effect-analysis* tolkats genom en sekvens av simuleringar.



Figur 2.5: Konstantflödessystem, skärmdump ifrån gränssnittet Analyzer

Som poängterats tidigare, kan diagnostik i Rodon presenteras i form av beslutsträd. Under simuleringsrutinen utförd av AutoSim, kan användaren definiera vilken utsignal som är intressant att spara i en specifik databas. Ur diagnossynpunkt kan denna utsignal vara ett symptom. AutoSim sparar då alla komponenter som vid simulering av komponentspecifik felmod, resulterar i ett beteende som är konsistent med det definierade symptomet. Om så är fallet, laddas denna databas därefter in i DtGen, där ett beslutsträd genereras.

Ett beslutsträd kan betraktas som slutdestination för diagnostikprocessen i Rodon, alternativt feleffektsanalys i form av en genererad databas under SDBView-gränssnittet. Utifrån dessa ges underlag för guidad diagnostik till slutanvändaren.

### 2.5.3 Generell komponentutveckling

Utveckling av en komponent kan i sin enkelhet delas in i två steg:

1. Beskriv komponenten för nominellt beteende.
2. Beskriv komponenten för defekt beteende.

I någon mening kan förfarandet ses som att en intern FMEA görs för varje komponent. Därav åligger det utvecklaren att ha tillräcklig kunskap kring en komponent, att den kan tilldelas ett adekvat nominellt och defekt beteende. Endast då kan trovärdig diagnostik utförd på systemnivå spåras till effekter av komponentfel.



# 3

---

## Systembeskrivning: Volvo L250G

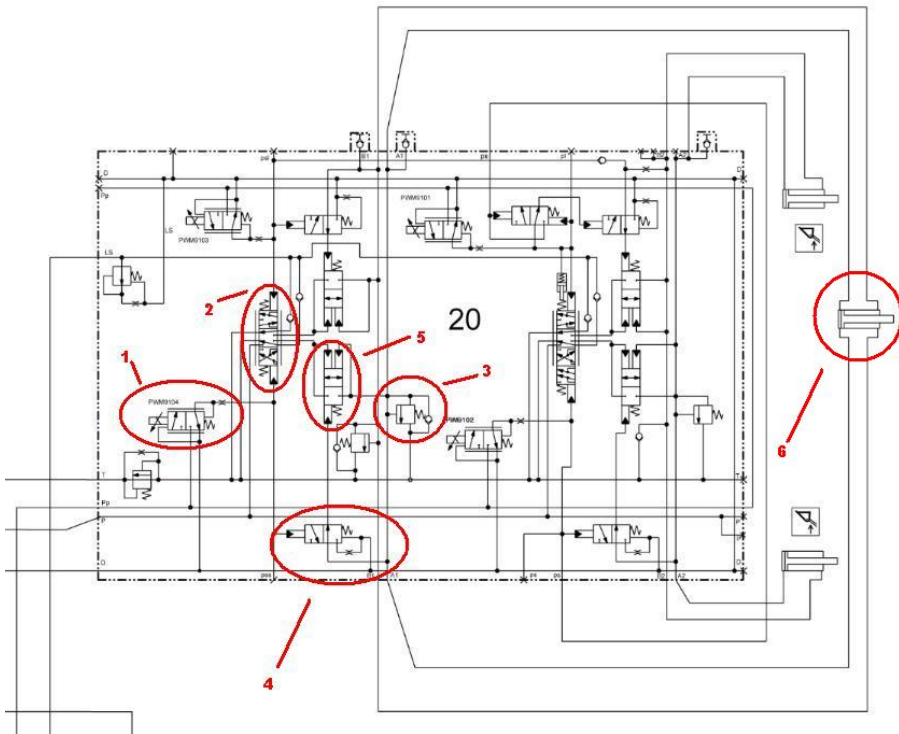
Under detta kapitel presenteras hjullastaren L250G som tillverkas och marknadsförs av VOLVO CE. Syftet med detta kapitel är att läsaren ska få en översiktsbild av hjullastaren, samt insyn i arbetshydrauliken.

### 3.1 VOLVO L250G

Figur 3.1 åskådliggör L250G verkliga representation. En schematisk skiss av dess, för examensarbetet, relevanta hydraulik visas i figur 3.2. För att en läsare utan bakgrund inom hydraulikstudier ska kunna tillgodogöra sig relevant information ifrån figur 3.2, presenteras även en kort redogörelse kring komponenterna i tabell 3.1. För den hydraulikintresserade läsaren rekommenderas exempelvis (Rydberg och Olsson, 1995). Samma litteratur används även som funktionsreferens till tabell 3.1. Märk väl att antalet förklarade komponenter inte överrensstämmer med antalet komponenter i figur 3.2. Detta motiveras av att en viss nivå av systemabstraktion har tillämpats vid modellering och de beskrivna komponenterna räcker för att förklara övergripande systemegenskaper. Detta med avseende på de symptom som modellen är tänkt att diagnostisera.



**Figur 3.1:** Hjullastaren L250G, används med tillåtelse från VOLVO CE



**Figur 3.2:** Den del av arbetshydrauliken i L250G som betraktats i examensarbetet, används med tillåtelse från VOLVO CE

| Komponent                                   | Nummer | Systemfunktion   |
|---|--------|--|
| <b>Servoventil</b> (4 st)                   | 1      | Denna elektriska servoventil styr indirekt huvudflödet genom arbetshydrauliken utifrån en referenssignal, dvs komponenten reglerar ett servotryck proportionellt mot referenssignalen. Kallas även för PWM-ventil.   |
| <b>Riktningventil</b> (2 st)                | 2      | Komponenten fördelar huvudflödet i hydraulsystemet. I detta fall är riktningventilen styrd av ett servotryck.  |
| <b>Shockventil</b> ( <i>åtmistone</i> 3 st) | 3      | Denna komponents funktion kan även identifieras av en tryckbegränsningsventil. Därav <i>åtmistone</i> tre stycken shockventiler och resten kan betraktas som <b>tryckbegränsningsventiler</b> , med olika karaktäristiker. Vid en given referenspunkt, öppnar denna ventil och dränerar övertryck genom direktledning till tank. |
| <b>Pilotventil</b> (4 st)                   | 4      | I detta fall har komponenten två diskreta lägen. Beroende på läge, påverkas tryckuppbyggnaden i lasthållningsventilen. Generellt kan sägas att pilotventiler används för att styra andra hydrauliska komponenter.  |
| <b>Lasthållningsventil</b> (4 st)           | 5      | Denna komponent bör betraktas som säkerhet, då den används för att hindra lasten att falla. Speciellt viktigt att notera i figur 3.2; Lasthållningsventilen styrs med hjälp av pilotventilen.  |

**Tabell 3.1:** Beskrivning av systemkomponenter markerade i figur 3.2

| Komponent                         | Nummer | Systemfunktion   |
|-----------------------------------|--------|--|
| <b>Hydraulisk cylinder (3 st)</b> | 6      | En hydraulisk cylinder konverterar fluidmekanisk energi till mekanisk. Arbetshydrauliken i L250Gs innehåller tre cylindrar; två för att hantera lyft-funktionen, en för att hantera tilt-funktionen. |
| <b>Hydraulpump</b>                |        | Komponenten används för att uppföra ett flöde i hydraulsystemet, dess schemasymbol återfinns dock inte i den avgränsade figur 3.2.   |

*Tabell 3.2: Beskrivning av systemkomponenter markerade i figur 3.2*

### 3.1.1 Styrelektronik

En lantbrukare som felsöker sin traktor, hittar förmodligen ett funktionsnedsättande fel som beror av hydrauliken tämligen fort. Det finns oftast inte så många alternativa felmoder för hydrauliska komponenter. Ofta hittas de av att bara lyssna efter inre läckage (läckage över tätningar i exempelvis cylindrar), alternativt kolla under maskinen och leta efter oljespill (yttre läckage). För att motivera behovet av en modellbaserad diagnostikprocess för hydrauliska applikationer, bör därför också elektroniken betraktas. I detta examensarbete, har det valts att modellera ett styrsystem bestående av:

- ECU (Electronic Control Unit)
- Två potentiometrar, en för vardera funktion: tilt-rörelse och lyft-rörelse
- Logikblock<sup>1</sup>
- Decoder<sup>1</sup>
- Kablage

Detta abstraherade styrsystem fångar de mest elementära egenskaper ett verkligt styrsystem besitter och dess konstruktion kan betraktas som en av Combitechs standardmodeller för sådana objekt. Styrsystemets konstruktion ingår alltså inte i VOLVOs system.

---

<sup>1</sup>Ingår i ECU:n.



# 4

---

## Abstraktion vid modellering

Syftet med detta kapitel är att förmedla grundtanken vid utveckling i Rodon och att behandla abstraktionsnivån av komponentegenskaper.

### 4.1 Abstraktionsnivå och krav

Vid modellering av hydrauliska applikationer ur ett diagnosperspektiv med hjälp av Rodon, är ett av ledorden *abstraktionsnivå*. Givetvis beror detta på typen av fel som önskas diagnostiseras. Allmänt gäller att de fel inom hydraulik som på systemnivå slår igenom, beror oftast på relativt triviala felmoder på komponentnivå. Exempelvis igentäppning, läckage över länkar eller tätningar, kan rimligen generera funktionsnedsättande symptom på systemnivå. Därmed behöver inte komponenterna vara alltför väldetaljerat utformade i den meningen att exempelvis strömningskaraktäristik behöver fångas. Så länge de kan behandla en insignal på ett sådant sätt att en korrekt utsignal levereras med avseende på detaljnivån av symptom, fyller de sin funktion. Anta att komponenten innehåller den interna felmoden *igentäppning*. Korrekt utsignal innebär för detta fall avbrott i hydraulflödet vid aktiv komponentfelmod.

I kapitel 2.5 specificeras vad en Rodon-diagnostikprocess ska medföra. Där återfinns också en av Rodons grundvalar: *samma information som en handarbetad feleffektsanalys*. Detta kan naturligt inskränkas i att, en kvalitetssäkring av de komponenter som utvecklats inom ramen av examensarbetet, kan bara göras av personer som har stor insyn i hydrauliksystemet. Detta innebär att de komponenter som resulterat av examensarbetet, baseras på att de först och främst ska påvisa de symptom som VOLVO önskar guidad diagnostik för. Då det rimligen är produktägaren som på bästa sätt kan bidra med kunskap kring komponenter-

nas systemfunktioner. På grund av detta inses det också att alla komponenter per definition, inte är helt generiska. Dessutom är det på sin plats att förklara innebörden av abstraktion vid modellering. Detta görs inte på grund av några Rodon-specifika svårigheter att modellera med hög noggrannhet, snarare genom resonemanget: Try Simple Things First (TSTF). En komponentmodell är giltig, så länge symptom på systemnivå kan diagnostiseras. Återigen, grundfilosofin inom diagnos med hjälp av Rodon, bygger på att de ingående komponenterna beskrivs både för nominellt- och defekt-beteende. Detta motsvaras av nedan pseudo-kod.

```
a=b+c
b=2
if faultmode=active
    c:=10

else
    c:=1

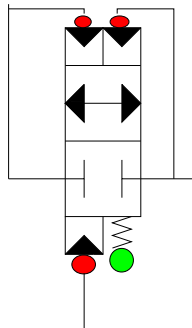
end
```

Genom diskussioner med VOLVO har det framkommit att hydrauliska-felmoder på komponentnivå oftast är av typen:

- Inre läckage, exempelvis mellan cylinderns kammare, figur 4.2.
- Yttre läckage mellan packningar och förgreningar, dvs tryckdränering.
- Igentäppning i hydraulsystem på grund av smuts.

Ovan beskrivna felmoder inträffar med olika stor sannolikhet, för vissa komponenter är sannolikheten nästintill obefintlig att de inträffar. Faktorer som påverkar är exempelvis placering och storlek.

Som tidigare beskrivits under kapitel 2.5 bygger Rodelicas komponentgränssnitt på flödes- och intensitetsvariabler. Inom blocken för defekt- respektive nominellt beteende beskrivs händelseförloppet för dessa variabler. För att hålla diskussionen kring abstraktionsnivå och samtidigt hålla kvar Rodelica-syntax i minnet; presenteras nedan ett exempel som är tänkt att fullborda insikten kring ovan utsagor: abstraktion och gränssnittselement.



*Figur 4.1: Lasthållningsventil extraherad ifrån figur 3.2*

#### 4.1 Exempel

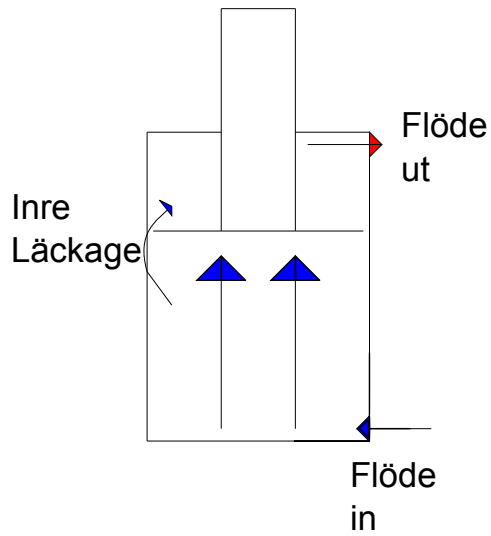
**Lasthållningsventilen** i figur 4.1 är samma som den presenterade i kapitel 3. Vid alla markerade portar i figur 4.1 verkar krafter vid en statisk jämvikt. Om dessutom flödeskraften, baserad på flödet genom ventilen, tas med i kraftjämvikten, kommer lasthållningsventilens karaktäristik propageras av åtminstone fem faktorer:

- 3st areor för tryckportar (rödmarkerade).
- Volymflödet genom komponenten, vilket flödeskraften är proportionell gentemot.
- Fjäderkaraktäristiken (grönmarkerad).

Om det enbart önskas att studera systemegenskaper vid komponentfel (som i fallet för diagnostik med Rodon), är en rimlig ansats följande pseudo-kod:

```
if faultmode=active
    volumeFlow=0
else
    volumeFlow=free
end
```

Allt sammantaget innebär detta att komponentbeteendet för en lasthållningsventil abstraherats till en komponentmodell där nominellt beteende innebär fritt flöde genom komponenten och defekt beteende resulterar i igentäppning, dvs komponentens systemegenskaper baseras på ekvationer för flödesvariabelns beteendemodsbberoende.



**Figur 4.2:** Läckage mellan två kammare i en hydraulisk cylinder

# 5

---

## Komponentmodellering

I detta kapitel presenteras de komponenter som utvecklats under examensarbetets gång. Förutom de komponenter som behövs för att modellera VOLVOs system (tabell (3.1) och (3.2)), så behandlas även resterande komponenter i det standardbibliotek som tillkommit genom examensarbetet.

### 5.1 Hydrauliska komponenter modellerade som flödesmotstånd

Hydraulik används först och främst för att transportera och omvandla energi. Den enda primärt väldefinierade trycknivån i ett fluidmekaniskt system, definieras av tanktryck. Intensitetshöjande element består av komponenter vars struktur modelleras som ett flödesmotstånd. Förtydligat, ökat systemtryck erhålls generellt enbart om systemets komponenter påverkar flödet. Detta får till effekt att varje komponent i ett fluidmekaniskt system, rimligen kommer besitta egenskaper som verkar mer eller mindre tryckuppbyggande på systemnivå.

Ekvationen (5.1) gäller för en generell flödesstrykning, för de komponenter som är utvecklade inom examensarbetet antas förhållandet mellan tryckfall och flöde vara linjärt.

$$q = C_q A \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (5.1)$$

#### 5.1.1 Tilldelning av felmoder

Utvecklingsmetodiken och synsättet på felmoder behandlas allmänt både i delkapitel 2.5.3 och kapitel 4. Ett komponentspecifikt fel i ett generellt hydraulsystem

kommer rimligen påverka volymflödet och systemtrycket. För att utreda hur detta görs krävs en någorlunda stor insyn i komponentens systemegenskaper. I det allmänna fallet antas komponentfelmoder resultera i extremfall av systemegenskaper (fullständig igentäppning etc), detta motiveras av oförmågan att förutse hur komponenten faktiskt kommer uppträda vid fel då den sedan används för att modellera ett specifikt system. Ett vanligt antagande i de utvecklade komponenterna är att läckage leder till total tryckdränering, dvs  $p_{system}$  sätts till noll. Anta att tryckfallet för ett specifikt fel är känt, då komponenten används för att modellera detta system modifieras ekvationen för total tryckdränering till att uppfylla denna kännedom.

## 5.2 Resultierande komponenter

Under detta delkapitel följer en presentation av resulterande komponenters huvudklasser. För att förmedla utvecklingsprocessen av komponenterna lättöverskådligt, är strukturen i rapporten som sådan; definierade ekvationer för nominellt- och defekt beteende presenteras, samt en kort redogörelse kring nivå av abstraktion och motivering för val av felmoder. Därefter följer en Rodelica-framställning.

### 5.2.1 Hydraulisk cylinder

En konventionell cylinder har typiskt två portar, beroende på funktion verkar dessa två som inlopp respektive utlopp. Det är ingen större inskränkning att modellera denna komponent med *inre läckage*, som enda rimlig felmod på komponentnivå. Vidare följer komponentmodellen kapitel 5.1, därmed har även ekvationer för flödesmotstånd implementerats. Motståndet tillåts naturligt bero av komponentens hälsa. Med andra ord, totalt flödesmotstånd ( $R_{tot}$ ) har strukturen av två parallellkopplade motstånd ( $R_{cyl}, R_{leakage}$ ). Där  $R_{cyl}$  representerar internt motstånd, iform av exempelvis friktion.  $R_{leakage}$  identifieras av strypningen i den med kolvstången, parallella hydraulledningen (figur 5.1).

Volymflöde:

$$\frac{q_1}{A_1} = \frac{q_2}{A_2} \quad (5.2)$$

Trycktransformation:

$$p_1 \frac{A_1}{A_2} - p_2 = R_{tot} q_1 \quad (5.3)$$

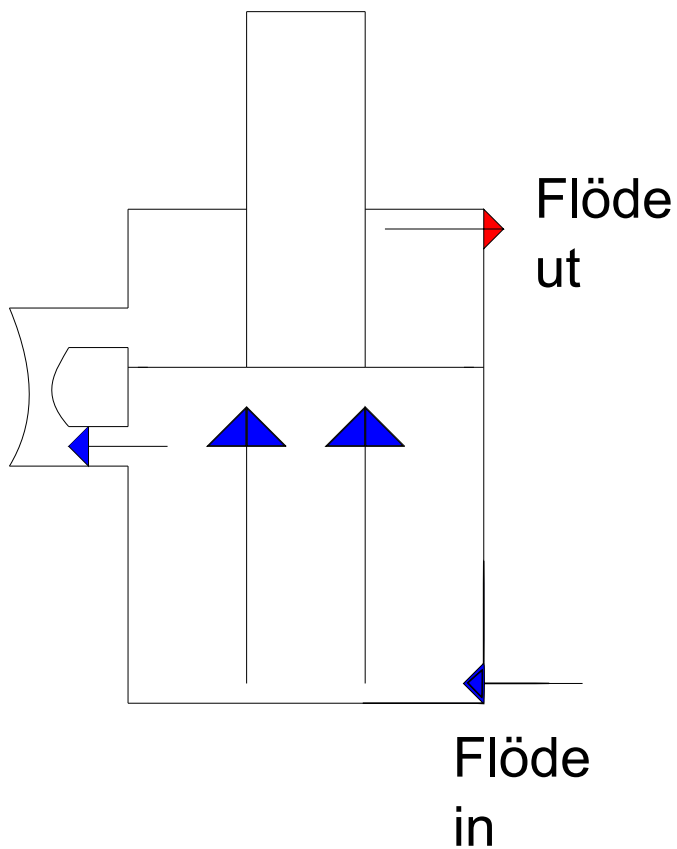
Totalt strömningsmotstånd:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{cyl}} + \frac{1}{R_{leakage}} \quad (5.4)$$

För det **nominella** fallet:

$$R_{tot} \rightarrow R_{cyl} \quad (5.5)$$

Vid **defekt** beteende tilldelas motståndet för inre läckage godtyckligt värde, för-



**Figur 5.1:** Illustration av hur cylinderns inre läckage modelleras i Rodon

utsatt:

$$R_{leakage} > 0 \quad (5.6)$$

Om enbart stationära förlopp betraktas, kan en hydraulisk cylinder på sin enklaste form betraktas som en transformator (ekvation 5.3), dvs då dynamik för tryckuppbyggnaden inte är av intresse. Allt sammantaget resulterar detta i nedan Rodelica-kod.

```

model Cylinder
extends TwoFlange;
connector mechPort=TranslationPortV;

/**Mechanical port*/
mechPort p3;
//=====

FailureMode fm (min=0,max= 1 , mapping="ok, internal_leakage");

/**Define area downstream.*/
parameter Area A1;

/**Define area upstream.*/
parameter Area A2;

/**Define piston area*/
parameter Area A3;

/**Define internal friction*/
parameter Interval Rcylinder;
parameter Interval RIntLeakage;
parameter Interval RnoIntLeakage;

protected
Resistance resistance;
//-----
behavior
//-----

//equation for modelling resistance
if (fm==0)
{
    resistance =
        Rcylinder*RnoIntLeakage/( Rcylinder+RnoIntLeakage);
}
if (fm==1)
{
    resistance =
        Rcylinder*RIntLeakage/( Rcylinder+RIntLeakage);
}

```



```

//condition valid for all states
//continuity equation
p1.Vdot+p2.Vdot+p3.v*A3=0;

//relation between flow and piston velocity
p3.v=p1.Vdot/A1;

//force equilibrium
p1.p*A1 - p2.p*A2 = resistance * p1.Vdot+p3.F;

end Cylinder;

```

Då cylindern instansieras i VOLVOs system diskretiseras kolstångsdynamiken, för att på ett enkelt vis göra utsagor kring cylinderns uppförande på systemnivå. Detta realiseras av att jämföra flödesvariabler mot ett förbestämt tröskelvärde. Förtydligande kring detta görs genom att betrakta några Rodelica-kodradar. Or-satsen är Rodonspecifik och innebär att varje ekvation utvärderas under en simuleringsrutin, med innebörden att endast det intervall som kan gälla för hela systemet exekveras.

```

or {
    No movement
    {p1.Vdot <= posMidLimit; p1.Vdot >= negMidLimit ;
      isMoving:=0;}
    Average speed, positive direction
    {p1.Vdot>.posMidLimit;
      p1.Vdot<= posTopLimit;
      isMoving:=1;}

    Full speed, postive direction
    {p1.Vdot>.posTopLimit;
      isMoving:=2;}

    Average speed, negative direction
    {p1.Vdot <.negMidLimit;
      p1.Vdot >=negTopLimit;
      isMoving:=3;}

    Full speed, negative direction
    {p1.Vdot <.negTopLimit;
      isMoving:=4;}
}

```

## Parametrarna

- posMidLimit
- negMidLimit
- posTopLimit
- negTopLimit

utgör tröskelvärden för att bestämma den diskreta storheten isMoving. På systemnivå kan sedan kunskaper kring isMoving utnyttjas för att formulera symptom. Anta exempelvis att villkoret för att konsistensbestämma symptomet *defekt tilt-funktion* består av: Potentiometersignalen (pMeterTilt) överensstämmer inte med observerade isMoving. Detta motsvaras av nedan pseudo-kod.

```
if
    pMeterTilt != isMoving
then
    tiltFunctionDefect:=1
else
    tiltFunctionDefect:=0
end
```

## 5.2.2 Hydraulmaskiner

Denna klass kan delas upp i två huvudtyper:

- Hydraulpumpar
- Hydraulmotorer

Teorin kring –pumpar och hydraul-motorer är nogga utredd i (Rydberg och Olsson, 1995). En generell form av hydraulmaskiners karaktäristik ges av ekvationerna (5.7), (5.8), (5.9) och (5.10).

Volymflöde, pump:

$$q_p = \epsilon_p D_p n_p \eta_{vol,p} \quad (5.7)$$

Moment på ingående axel, pump:

$$M_{in} = \frac{\epsilon_p D_p}{2\pi} \Delta p \frac{1}{\eta_{vol,p}} \quad (5.8)$$

Volymflöde, motor:

$$q_m = \epsilon_m D_m n_m \frac{1}{\eta_{vol,m}} \quad (5.9)$$

Moment på utgående axel, motor:

$$M_{ut} = \frac{\epsilon_m D_m}{2\pi} \Delta p \eta_{hmm,m} \quad (5.10)$$

För att implementera komponenter med ekvationer enligt (5.7), (5.8), (5.9) och (5.10) i Rodon, är det att föredra en viss omskrivning för att anpassa dels till systemmodellen, dels intervallaritmetiken. Detta motiveras av att pumpen i detta fall betraktas som flödeskälla, men för ett fullständigt mekatroniskt system som en transformator av den mekaniska energin på ingående axel. Dvs i systemmodellen tas ingen hänsyn till förbränningsmotorn och överföring av ett drivande moment till hydraulsystemet. Om så hade varit fallet, hade ekvationerna (5.7), (5.8), (5.9) och (5.10) kunnat implementeras rakt av istället realiserats pumpen av ekvationerna (5.11) och (5.12).

$$p_{Nom} - p_2 = k_{intern} q_1 \quad (5.11)$$

$$q_1 = q_2 \quad (5.12)$$

I ekvation (5.11) utgör parametern  $p_{Nom}$  det nominella maxtrycket, dvs det tryck pumpen uppåddar då inget flöde matas till systemet. Variablerna  $p_2$  och  $p_1$  motsvarar trycket på utloppssidan om komponenten, respektive inloppssidan. Det linjära sambandet mellan systemtryck och volymflöde beskrivs av  $k_{intern}$ . För

pumpmodellens verkliga föregångare är denna produktspecifik, vilket motiverar att för ett generiskt komponentbibliotek sätts denna koefficient till ett godtyckligt värde. Vid ett mekaniskt fel i hydraulpumpens konstruktion kan det tänkas att  $p_{Nom}$  sannolikt bör påverkas, alternativt att yttre påverkan (föroreningar i hydrauloljan) leder till igenkloggning. Dessa felmoder är implementerade i komponentmodellens grundutförande. För VOLVOs system har det framkommit troligt att anta hydraulpumpen som en felfri komponent, detta på grund av

- Om fel sådant att pumpen inte tillförs någon hydraulolja, dvs igentäppning av inlopp; kommer en operatör snabbt hitta ett sådant, då inget flöde till systemet existerar. Mindre igenkloggningar av hydraulsystem existerar sällan pga de höga systemtrycken, möjligtvis kan detta vara en relevant felmod om ett filter ska modelleras.
- Anta fel sådant att pumpen är defekt, exempelvis totalt haveri. Av samma motivering som ovan, kommer en operatör snabbt märka av detta. Förmodligen kommer pumpen låta väldigt mycket också.

Sammanfattningsvis omsätts ekvationerna (5.11) och (5.12) till nedan Rodelica-framställning

```

model PumpSimple
extends TwoFlange;
//=====
/** Failure mode variable */
    FailureMode fm (min=0,max= 1, mapping=FM_OK_BLOCKED);

/**Approximated slope on the machine specific
pressure-against-flow-coefficient*/

    parameter PressureAgainstFlowCoef kIntern =1;

protected
    Pressure pMax = 10;
    VolumeFlowRate pVdotMax;
    Pressure pNom;

//-----
behavior
//-----
// Volume flow balance:
    p1.Vdot + p2.Vdot = 0;
    pNom=p1.p+pMax; //Maximum pressure
if (fm==0)
    (pNom-p2.p)=kIntern * p1.Vdot ;
if (fm==1)
    p1.Vdot=0;    //FailureMode : clogging

```

```
end PumpSimple ;
```

Vad det beträffar hydraulmotorn, betraktas den naturligt som en last. Detta motiverar en modellering likt en strypning (ekvation (5.1)), dvs flödet är proportionellt mot tryckfallet över komponenten. Återigen tas ingen hänsyn till drivlinan, dvs en mekanisk utgående axel. För ett sådant fall skulle motorn representeras av ekvationerna (5.9) och (5.10), istället för (5.13), (5.14) och (5.15).

$$q_1 = q_2 \quad (5.13)$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (5.14)$$

$$\Delta p = k_{intern} q_1 \quad (5.15)$$

Rimliga felmoder för hydraulmotorn kan antas vara

$$q_1 = 0 \quad (5.16)$$

$$\Delta p = 0 \quad (5.17)$$

Ekvation (5.16), är en realisering av att utgående axel har fastnat. Vidare, utgående axel har spruckit realiserar av (5.17) därav inget motstånd, som är entydigt med att tryckfallet  $\Delta p$  över komponenten är satt till noll. Orienteringen av motormodellen saknar betydelse i detta fall, därav behöver ingen hänsyn tas till indexeringens koppling till utlopp respektive inlopp. Motiverat av ovan resonemang representeras hydraulmotorn således av följande Rodelica-kod:

```
model MotorSimple
extends TwoFlange;
//=====

//Pressure loss coefficient: high value
//      result in high pressure drop.
parameter FrictionCoeff kIntern = 1;
/**Failure mode variable*/
FailureMode fm (max = 2, mapping = "ok, blocked, broken");

// -----
behavior
// -----
// Volume flow balance:
//      p1.Vdot + p2.Vdot = 0;

// Definition of pressure drop:
```

```

    deltaP = p1.p - p2.p;

    // Nominal case:
    if (fm == 0)
    {
        deltaP = kIntern * p1.Vdot;
    }

    if (fm == 1)
    { // Constraints for failure mode "blocked":
        p1.Vdot = 0;
    }
    if (fm == 2)
    { // Constraints for failure mode "broken":
        deltaP=0;
    }
end MotorSimple

```

### 5.2.3 Flödesreglerande ventiler

Benämningen *flödesreglerande ventiler* kan härledas ifrån att denna kategori av ventiler har en eller flera egenskaper som på något sätt påverkar flödet i systemet.

#### Pilotventilen

Denna komponent är närmast att betrakta som ett relä, vilket också motiveras av dess schematiska symbol. Om trycket ( $p_1$ ) vid den rödmarkerade porten i figur 5.2 överstiger ett referensvärde som utgörs av den förspända fjädern (grönmarkerad), byter ventilen läge, dvs slår om till figur 5.3.

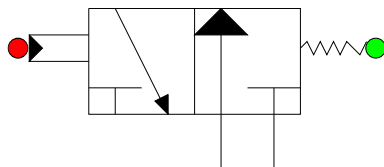
Ekvationer som beskriver förfarandet ges av (5.18) och (5.19). **Nominellt** beteende:

$$p_1 \geq \text{referenceLevel} \quad (5.18)$$

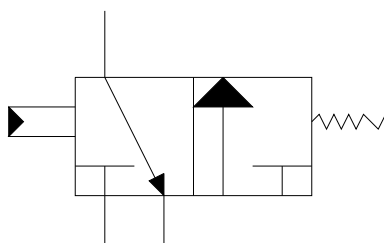
Pilotventil **aktiv** om trycket  $p_1$  överstiger referensnivån, dvs står i läget som visas i figur 5.3

$$p_1 < \text{referenceLevel} \quad (5.19)$$

Pilotventil **inaktiv** om trycket  $p_1$  understiger referensnivån, illustreras av figur 5.2



**Figur 5.2:** Pilotventil i grundutförande enligt 3.2



**Figur 5.3:** Omslagen pilotventil

**Defekt** beteende kan uppkomma exempelvis på grund av föroreningar (smuts) i hydrauloljan, som täpper igen den *rödmarkerade* tryckporten i figur 5.2. Detta har som effekt att pilotventilen förblir **inaktiv** (figur 5.2).

Sammantagningsvis följer en Rodelica-framställning av pilotventilen enligt:

```

/**A model of a pilot valve. Modeled as an relay;
at system pressure of pRef,
the component is activated in the sentence
of flange p2 and p4 are in connection.
Default position connects: p2 and p3*/

model PilotValve
connector Flange=HydFlange;

/**Hydromechanical connectors*/
Flange p1, p2, p3, p4;
//=====

/**Failure mode variable*/ // (Stuck in default position)
FailureMode fm (pm="fm", max=1, mapping="ok,stucked_closed");

Discrete posAct (min = 0, max = 1, mapping="open_direct,
open_crossed");
Discrete posNom (min = 0, max = 1, mapping="open_direct,
open_crossed");

// Declare the referenceLevel.

```

```

parameter Pressure pRef;
//-----
behavior
//-----

p1.Vdot=0;
//Equations for status-propagation of Pilotvalve
or
{
    //Pilotvalve not active
    {p1.p<=pRef;
    posNom=0;
    }
    //Pilotvalve active
    {p1.p>.pRef;
    posNom=1;}
}

//Pilotvalve not active
if (posAct==0)
{
    p2.p=p3.p;
    p2.Vdot+p3.Vdot=0;
    p4.Vdot=0;
}

//Pilotvalve active
if (posAct==1)
{
    p2.p=p4.p;
    p2.Vdot+p4.Vdot=0;
    p3.Vdot=0;
}

if (fm==0)
{
    posAct=posNom;
}

//Pilotvalve stuck in default position
if (fm==1)
    posAct=0;

end PilotValve;

```



### Lasthållningsventil

Lasthållningsventilens systemfunktion omnämns vid flertalet punkter i denna rapport. Bland annat i kapitel 3.1. Dess karraktäristik i Rodon motiveras av exempel 4.1; därav realiserad i ekvationerna (5.20), (5.21) och (5.22).

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (5.20)$$

$$q_1 + q_2 = 0 \quad (5.21)$$

$$\Delta p = k_{intern} q_1 \quad (5.22)$$

Pilotventilens utstyrning i figur 3.2 betraktas i Rodon-framställningen som insignal till ekvation (5.22). Enligt diskussionen i exempel 4.1 i kombination med VOLVOs system, följer att

- Pilotventilen signalerar stängt  $k_{intern} > 0$
- Pilotventilen signalerar öppet  $k_{intern} = 0$

Sammanfattningsvis kan lasthållningsventilen befinna sig i tre tillstånd:

- Stängt
- Öppet
- Halvöppet

Ekvationerna (5.20), (5.21) och (5.22) resulterar i en Rodelica-kod som presenteras nedan

```

model LoadHoldingValve
extends TwoFlange;
//Connector prepared for connection with pilot valve
connector actPos= Discrete;
actPos p3;
//=====
/** Failure mode variable*/
FailureMode fm (max = 1, mapping = "ok, stuckClosed");

Discrete modeNom (min=0, max=1, mapping = "closed , open");
Discrete modeAct (min=0, max=1, mapping = "closed , open");

//user defined parameters
parameter Interval fricNom;
parameter Interval fric2;
parameter Interval fricLeak;
parameter Interval fric1;
//-----
behavior
```

```

//-----
deltaP = p1.p - p2.p;
p2.Vdot + p1.Vdot = 0;
or
{
    {
        p3=0;
        modeNom = 0;
    }
    {
        // behavior of loadholding valve is propagated
        from pilotvalve
        p3> 0;
        modeNom = 1;
    }
}

if (modeAct==0)
{
    p1.Vdot * fric2 = deltaP;
}

// open/free flow , leakage :only very little friction
// resp. pressure drop: and blockage due to pilotValve
// stuck in closed position
if (modeAct==1 & fm==0)
{
    //Nominal behavior
    if(p3==1){
        p1.Vdot * fric1 = deltaP;
    }
    // Leakage over pilotValve
    if(p3==2){
        p1.Vdot * fricLeak = deltaP;
    }
    // PilotValve stuck in closed position
    if(p3==3){
        //only leakage flow over loadholding valve
        p2.Vdot= 0;
    }
}

// nominal case:
if (fm==0)

```

```

    {
        modeAct = modeNom;
    }

    //Loadholding valve stucked in closed position
    if (fm==1)
    {
        p2.Vdot= 0;
    }

end LoadHoldingValve ;

```

### Tryckbegränsningsventil (Shockventil)

Ventilen har till uppgift att se till så att systemtrycket aldrig överstiger ett visst referensvärde. Detta kan jämföras med en styrsignalmättning; oberoende av ett ökat flöde genom hydraulsystemet, kommer inte systemtrycket öka **då** det överstiger en förbestämd referensnivå. Generellt har denna komponent två användningsområden

- Fundamental del i ett konstanttryckssystem (figur 2.4). Intuitivt, för att garantera ett homogent tryck vid varierande flödesnivåer.
- För att skydda systemet (säkerhet), benämns då ofta: Shockventil.

Ekvationerna (5.23), (5.24), (5.25) och (5.26) omsätter dessa systemegenskaper till en form som nästan rakt av kan implementeras i Rodon. Variabeln  $p_1$  motsvarar högtryckssidan, dvs det tryck som tryckregleringen återkopplar till.

$$p_1 = p_{ref} \quad (5.23)$$

$$q_1 = q_2 \quad (5.24)$$

Ekvationerna (5.23) och (5.24) beskriver **nominellt** beteende.

$$p_1 = p_2 \quad (5.25)$$

$$q_1 = q_2 \quad (5.26)$$

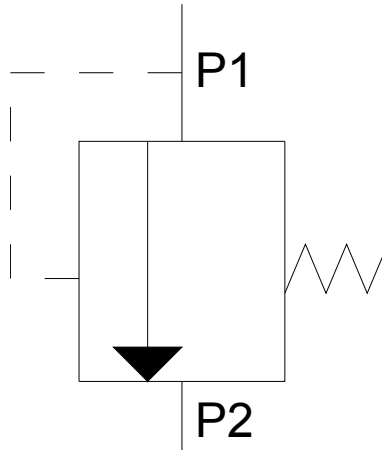
Ekvationerna (5.25) och (5.26) realiserar **defekt** beteende, i den meningen att ventilen alltid är öppen, dvs reglerar inte trycket till en referensnivå.

Sammanfattningsvis resulterar tryckbegränsningsventilen i nedan Rodelica-kod.

```

model PressureReliefValve
connector Flange=HydFlange;
/**Hydromechanical connectors*/
Flange p1;
Flange p2;

```



**Figur 5.4:** Schematisk symbol för en tryckbegränsningsventil

```
//=====
/** Failure mode variable*/
FailureMode fm (min=0, max=1, mapping="ok, stuck_open");

/**Define pressure level for the valve to activate*/
parameter Pressure pRef;
//-----
behavior
//-----

//Constraints valid for all modes
p1.Vdot+p2.Vdot=0;
//Nominal behavior
if (fm==0)
{
    p1.Vdot>=0;
    or{
        {p1.p-p2.p>=0; p1.p = pRef;}
        {p1.p-p2.p>=0; p1.p <. pRef; p1.Vdot=0;}
        {p1.p - p2.p =0;p1.p >. pRef;}
    }
}
//Valve always open
if (fm==1)
{
    p1.Vdot+p2.Vdot=0;
    p1.p=p2.p;
}
```

```

}
end PressureReliefValve ;

```

### Tryckreduceringsventil

Denna flödesreglerande ventil har ett principiellt närbesläktat förfarande med tryckbegränsningsventilen både vad det gäller komponentegenskaper och schematisk symbol. Istället för att låta  $p_1$  definiera systembeteende, som i fallet för tryckbegränsningsventilen, är det nu  $p_2$  som implementeras i ekvation (5.23). För att tydligt skilja på tryckbegränsnings- och tryckreduceringsventilen i ett hydraulschema brukar det vara kutym att markera med streckade linjer i den schematiska symbolen för vilken sida om komponenten som tryckåterkopplingen sker. Därmed markeras om flödesreglering sker på inlopps- eller utloppssida, detta kan ses både i figur 5.4 och figur 5.5.

Ett naturligt val av felmod för denna komponent är att anta *ingen tryckreglering*, dvs ventilen är alltid fullt öppen. På grund av att tryckreduceringsventilen är funktionellt närbesläktad med tryckbegränsningsventilen, är även dess Rodelica-framställning väldigt snarlik. Vilket kan ses nedan:

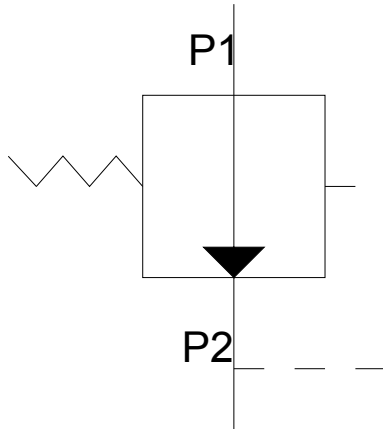
```

model PressureReduceValve
extends TwoFlange;
//=====

/** Failure mode variable*/ //faulty mode, ok=always open
FailureMode fm (min=0,max = 1,mapping="ok,stuck_open");

// Declare the system pressure.
parameter Pressure pRef;
//-----
behavior
//-----
//Constraints valid for all modes
p1.Vdot+p2.Vdot=0;
//Nominal behavior
if (fm==0)
{
    p1.Vdot>=0;
    or{
        //case: flow controlling.
        {p1.p-p2.p>=0; p2.p = pRef;}
        //case: reference pressure cant be reached
        {p1.p-p2.p=0; p2.p <. pRef;}
    }
}
// Failure mode: always open.
if (fm == 1)
{

```

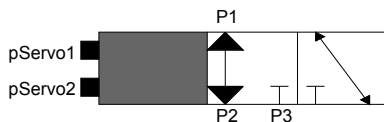


**Figur 5.5:** Schematisk symbol för en tryckreduceringsventil

```

    p1 . Vdot + p2 . Vdot = 0;
    p1 . p = p2 . p;
}
end PressureReduceValve

```



**Figur 5.6:** Schematisk symbol för den servoventil som använts i examensarbetet

## 5.2.4 Servoventiler

Uttömmande diskussioner kring användningsområde och konstruktionen av servoventilen återfinns i (Rydberg och Olsson, 1995). I examensarbetet har det antagits att de mest signifikanta komponentegenskaper utgörs av:

- Komponenten matas med en styrsignal.
- Ventilutstyrningen baseras på styrsignalens storlek. Preciserat, flödet genom ventilen är proportionellt mot styrsignalen.

Betrakta figur 5.6. Den servoventil som utvecklats inom examensarbetets ramar är utrustad med

- Portar för ett elektroniskt- gränssnitt, dvs gränssnitt för styrsignalerna:  $pServo_1$  och  $pServo_2$ .
- Tre portar för styrning av flödet.  $P_2$  och  $P_3$  kopplas till tank respektive servosystem. Port  $P_1$  går till resterande hydraulsystem.

Servoventilens utstyrning är i examensarbetet utformat som en funktion, för att linjärt kombinera trycket ifrån  $p_2$  och  $p_3$ . Beroende på styrsignalens storlek, kommer utställning av ventilen variera enligt villkoret (5.27).

$$p_2 \leq p_1 \leq p_3 \quad (5.27)$$

Servoventilen är byggd på antagandet att den fluidmekaniska-strukturen inte har någon egen felmod kopplad till sig, då den rimligen kan betraktas väldigt driftsäker. De fel som kan uppkomma i servoventilen är troligen kopplad till dess elektronik. Rodelica-framställningen blir således:

```

model ServoValve
replaceable connector Flange=HydFlange;

//Define connectors
/**Hydromechanical connectors*/
Flange p1;
Flange p2;
Flange p3;

/**Elektrical connectors for servocontrol*/
Pin pServo1;

```

```

Pin pServo2;
//=====

/** Internal resistor*/
ResistorOhmic resistorInt (rNom = 1000);

//Maximum voltage drop over resistorInt
parameter Voltage uRef = 10.909;
VoltageDifference vDiff;

//-----
behavior
//-----

//Default: No flow in the servopressure-line.
p1.Vdot=0;
p2.Vdot=0;
p3.Vdot=0;

//Voltage drop over the coil of the servo
vDiff:=pServo1.u-pServo2.u;

//Pressure p1.p is a linear combination of p3.p and p2.p
if(resistorInt.fm == 0)
    p1.p:=(vDiff/uRef)*p3.p + (1-(vDiff/uRef))*p2.p;

//The failure mode are inherited from
the electrical behavioral modes

// valve always connected to tank
if(resistorInt.fm ==1)
    p1.p:=p2.p;

//valve always connected to servopressure
if(resistorInt.fm ==2)
    p1.p:=p3.p;

    connect(pServo1 , resistorInt.p1);
    connect(resistorInt.p2, pServo2);
end ElectricServo;

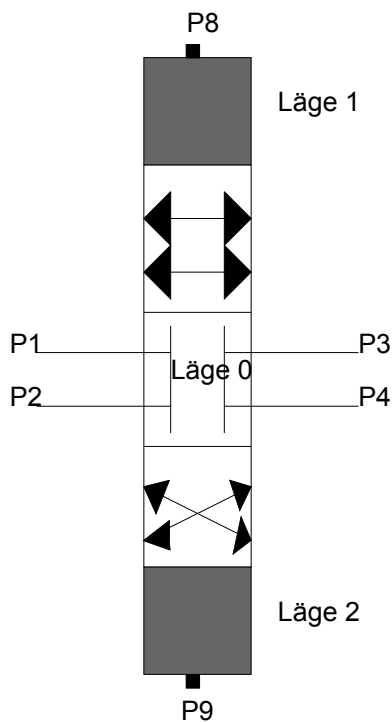
```

### Servostyrd riktningsventil

Den servostyrda riktningsventil (figur 5.7) som utvecklats, är en instansiering av den befintliga riktningsventilen i Rodon. De tillägg som gjorts, innebär att riktningsventilen styrs proportionellt mot tryckdifferensen över flödesportarna  $p_8$  och  $p_9$ . I dess grundutförande kan riktningsventilen placeras i tre diskreta



lägen. Således, leda flödet på tre väldefinierade vis. Ekvationerna (5.28), (5.29) och (5.30) beskriver detta.



**Figur 5.7:** Schematisk symbol för en servostyrd riktningsventil

**Läge 0:**

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = 0 \quad (5.28)$$

**Läge 1:**

$$p_1 = p_3, p_2 = p_4 \quad (5.29)$$

**Läge 2:**

$$p_1 = p_4, p_2 = p_3 \quad (5.30)$$

Den proportionella omstyrningen av riktningssventilens läge innebär för de intermittenta lägena att dessa propagerar en tryckuppbyggnad. Detta motiverar då ekvationerna (5.31), (5.32) och (5.33)

$$\Delta p = p_i - p_j \quad (5.31)$$

$$q_i + q_j = 0 \quad (5.32)$$

$$\Delta p = k_{intern} * q_i \quad (5.33)$$

**Observera** att riktningssventilen har fyra flödesportar. Detta innebär att ekvationerna (5.31), (5.32) och (5.33) är valida för par av portar, dvs anta läge 1; (5.31), (5.32) och (5.33) ska då baseras på  $p_1$  och  $p_3$ , respektive  $p_2$  och  $p_4$ .

Det kan anses rimligt att anta de interna felmoderna:

- Fastna i läge 0
- Fastna i läge 1
- Fastna i läge 2

då komponentmodellen ska identifiera en verklig komponent, vars karaktäristik dels beror på de servostyrda-portarna, dels mekaniska fjädrar som arbetar under stor belastning och kan tänkas haverera på grund av detta. Sammanfattningsvis resulterar detta i följande Rodon-realisering:

```
model ServoContrValve4_3
connector Flange= HydFlange;
```

```
/**Connectors for flow and intensity -variables*/
Flange p1;
Flange p2;
Flange p3;
Flange p4;
```

```
/**Connectors for servopressure*/
Flange p8;
Flange p9;
```

```
//=====

/**Internal frictioncoef*/
FrictionCoeff kValveInternal;

//user defined parameters
parameter Pressure pServoMax;
parameter FrictionCoeff kServo;
parameter PressureDifference epsilon = 0.01;

/**Failure mode variable*/
FailureMode fm(max=3, mapping="ok, stuck_all_flow_interuppted,
stuck_p0_to_p2_and_p1_to_p3, stuck_p0_to_p3_and_p1_to_p2");

/**For the case of valve in a intermediate position,
it is modeled as a throttel and in use
of two pressuredifference-variable*/
PressureDifference deltaP1;
PressureDifference deltaP2;

Discrete posAct (min = 0, max = 2, mapping="closed,
open_direct, open_crossed");
Discrete posNom (min = 0, max = 2, mapping="closed,
open_direct, open_crossed");

//-----
behavior
//-----
p8.Vdot=0;
p9.Vdot=0;

// equation for evaluate if a servopressure is active
if (abs(p8.p -p9.p) <= epsilon)
{
    posNom:=0;
}
if (p8.p- p9.p > epsilon)
{
    posNom:=1;
}

if (p8.p-p9.p < -epsilon)
{
    posNom:=2;
}
}
```

```

if (fm==0)
  { //ok
    posAct = posNom;
    kValveInternal:=
      (1-(min(1, abs(p8.p-p9.p)/pServoMax)))*kServo;
  }
if (fm==1)
  { //stuck_stopped_pos
    posAct = 0;
    kValveInternal:= 0;
  }
if (fm==2)
  { //stuck_opening_pos
    posAct = 1;
    kValveInternal:= 0;
  }
if (fm==3)
  { //stuck_closing_pos
    posAct = 2;
    kValveInternal:= 0;
  }
}

if (posAct==0)
  { //all_flow_interuppted
    p1.Vdot = 0;
    p2.Vdot = 0;
    p3.Vdot = 0;
    p4.Vdot = 0;
  }

if (posAct==1)
  { //p1 and p3 connected
    p1.Vdot + p3.Vdot = 0;
    deltaP1=p3.p-p1.p;
    deltaP1=kValveInternal*p3.Vdot;

    //p2 and p4 connected
    p2.Vdot + p4.Vdot = 0;
    deltaP2=p2.p-p4.p;
    deltaP2=kValveInternal*p2.Vdot;
  }

if (posAct==2)
  { //p1 and p4 connected

```

```
p1.Vdot + p4.Vdot = 0;
deltaP1=p4.p-p1.p;
deltaP1=kValveInternal*p4.Vdot;

//p2 and p3 connected
p2.Vdot + p3.Vdot = 0;
deltaP2=p2.p-p3.p;
deltaP2=kValveInternal*p2.Vdot;

}

end ServoContrValve4_3;
```



# 6

---

## Resultat och slutsats

Detta kapitel presenteras vad som framkommit under arbetets gång, exempelvis svårigheter vid modellering av hydraulik och vad som kan vara av betydelse för fortsatt arbete inom området.

### 6.1 Utvidgning av Rodons standardbibliotek

Examensarbetet har resulterat i ett komponentbibliotek, där komponenternas huvudklasser presenteras under kapitel 5. Samtliga komponenter är så långt som möjligt utvecklade för ett generiskt bruk. Komponenternas felmoder är i dess grundform utvecklade med hänseende på vad som kan antas vara rimligt. Detta innebär att då de instansieras för att användas vid modellering av verkliga system, kan inskränkningar av dessa felmoder komma att ske.

#### 6.1.1 Slutsats kring modellering av hydraulik i Rodon-miljö

Ett problem som varit relevant att lösa för att möjliggöra modelleringsarbetet är att modifiera Rodons definition av minimum-tryck. I ursprungsversionen av Rodon är denna nivå satt till 0 (noll), vilket är rimligt ur en fysikalisk synvinkel. Detta får dock till följd att simuleringsrutinen indikerar konflikt, då intensitetsvariabler antar negativa värden. Dock har det visat sig vara rimligare att definiera trycket som fri variabel och därigenom även anta negativa värden. Genom denna omdefinition betraktas noll-punkten som atmosfärstryck alternativt tanktryck. På detta sätt undgås att simuleringsrutinen signalerar konflikt och vad bättre är; Rodon kan nu även behandla fluida -egenskaper som är kopplade till undertryck.

## 6.1.2 Slutsats kring tilldelning av komponentfelmoder och modellering av symptom

Det har i kapitel 4 beskrivits vilka allmänna felmoder som en komponentmodell bör behandla. Dessa komponentfelmoder kan rimligen betraktas generella, dvs gälla allmänt för ett godtyckligt hydraulsystem. Kapitel 5 behandlar därefter varje komponents specifika beteendemoder. Sammanfattningsvis, processen med att utveckla felmoder för ett generiskt komponentbibliotek i Rodon består av att utreda typiska fel och spjälka upp vilka komponenter som kan inneha dessa. Slutligen, eventuellt modifiera beteendemoder efter behov vid modellering av specifikt system.

I Rodon modelleras villkor för att symptom uppvisas ofta som booleska storheter. Teoretiskt sanna symptom som kan gälla i det studerade systemet kan vara:

- Långsam respons i de hydrauliska cylindrarna vid stegsvar.
- Dålig känslighet i styrsystemets manöverdon (potentiometern) .

Genom att utnyttja villkor baserade på boolesk algebra och kunskap kring utsignal och referenssignal, kan de ovan uppspaltade teoretiska symptomen realiseras i enlighet med vad som beskrivs i kapitel 2.5.2.

## 6.2 Resulterande modell av systemet

I detta delkapitel presenteras Rodon-realiseringsen av systembeskrivningen i kapitel 3.

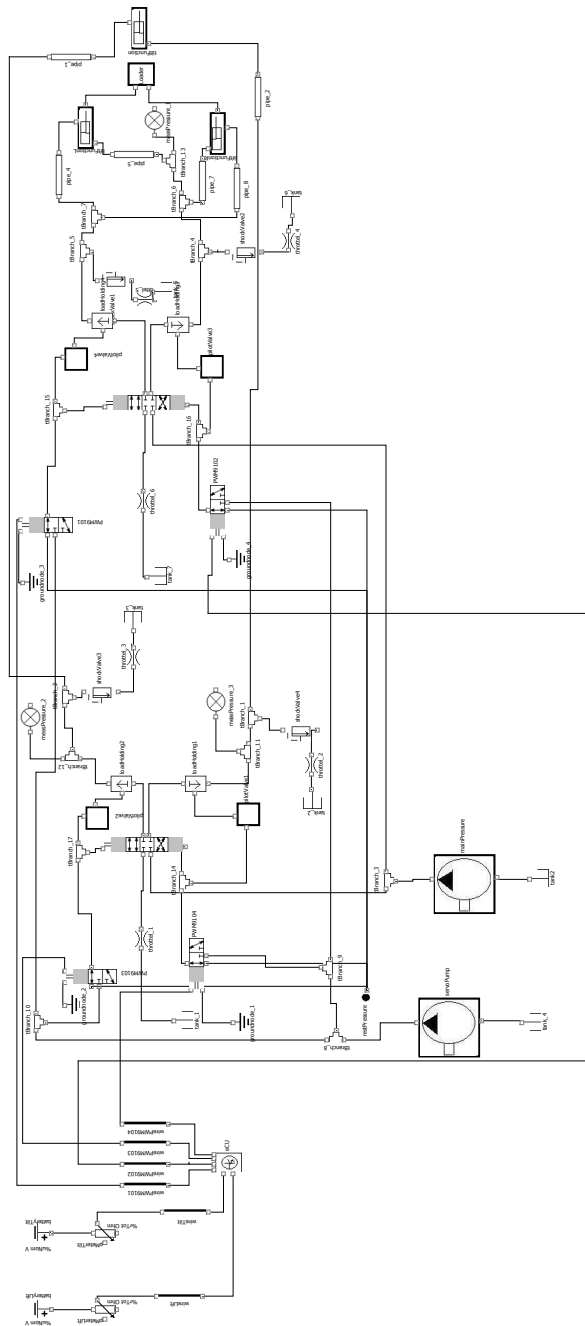
### 6.2.1 Arbetshydraulik

I figur 6.1 åskådliggörs systemet modellerat i Rodon. Vad som bör tilläggas till figur 6.1, är att komponenternas interna felmoder är modifierade efter felmoder som med stor sannolikhet kan uppkomma i dess verkliga föregångare. Detta innebär att inskränkningar av de utvecklade komponenternas felmoder har gjorts, till att omfatta sådana som enligt VOLVO är konstruktionstekniskt sannolika att inträffa. Typiskt innebär detta att felmoder såsom exempelvis igentäppning av hydraulledning till tank, betraktas högst osannolik att inträffa, för att inte säga omöjlig. Genom att exkludera sådana fel, ökar tilliten till de kandidater som presenteras troliga i beslutsträden. Då diagnostiken i Rodon generellt är en grafisk representation av det annars manuella arbetet, innebär detta också att felmoderna kan sättas subjektivt, utan att för den delen inskränka alldeles för mycket på en objektivt autogenererad diagnostik.

### 6.2.2 Styrelektronik

Den styrenhet som implementerats i modellen har ingen direkt koppling till VOLVOs system. Styrsystemet existerar på grund av intresse för att generera feleffektsanalyser, kompatibelt för multipla tekniska domäner. Styrenheten presenteras i figur 6.2. Styrenhetens utgångar, dvs **wirePWM910X** i figur 6.2 utgör gräns-





**Figur 6.1:** Rodon-realiseringen av systemet i kapitel 3

snittet mellan styrelektronik och hydraulik. Utstyrningen av potentiometrarna omvandlas i ECUns logikblock (figur 6.3) till styrsignal för servoventilerna. Vid modelleringen av styrelektronik användes komponenter ur Rodons standardbibliotek. Förutom de fyra elektriska drivarna (*valveDriver910X*) och *logicBlockSimpleVolvo* som utvecklades ad hoc.

## 6.3 Autogenererad Diagnostik

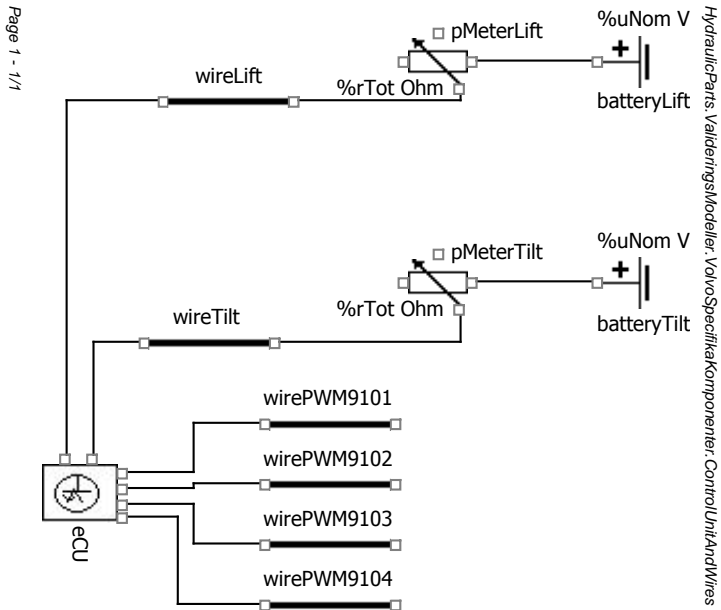
För symptomet *defekt tilt-funktion*, implementeras en symptom-storhet under huvudmodellens (figur 6.1) Rodelica-gränssnitt. Precis enligt beskrivning i 5.2.1. Den resulterande diagnostiken, som presenteras i figur 6.4, sker i form av ett beslutsträd. Detta träd föreslår alla möjliga felmoder som kan förklara beteendet: *tilt-funktionen följer inte den begärda referenshastigheten*. Dessutom föreslår beslutsträdet också vilka åtgärder användaren bör vidta, för att isolera rotorsaken till symptomet. Vid simuleringsrutinen (kapitel 2.5), implementerades villkoret att *endast* simulera enkelfel. Som detta villkor antyder, beräknar Rodon endast de enkelfel som kan härleda det uppvisade symptomet. Anledningen till detta är av rapporttekniska skäl, då multipelfel ofta leder till stora beslutsträd och formatet på rapporten har svårt att täcka dessa.

### 6.3.1 Slutsats kring autogenererad diagnostik

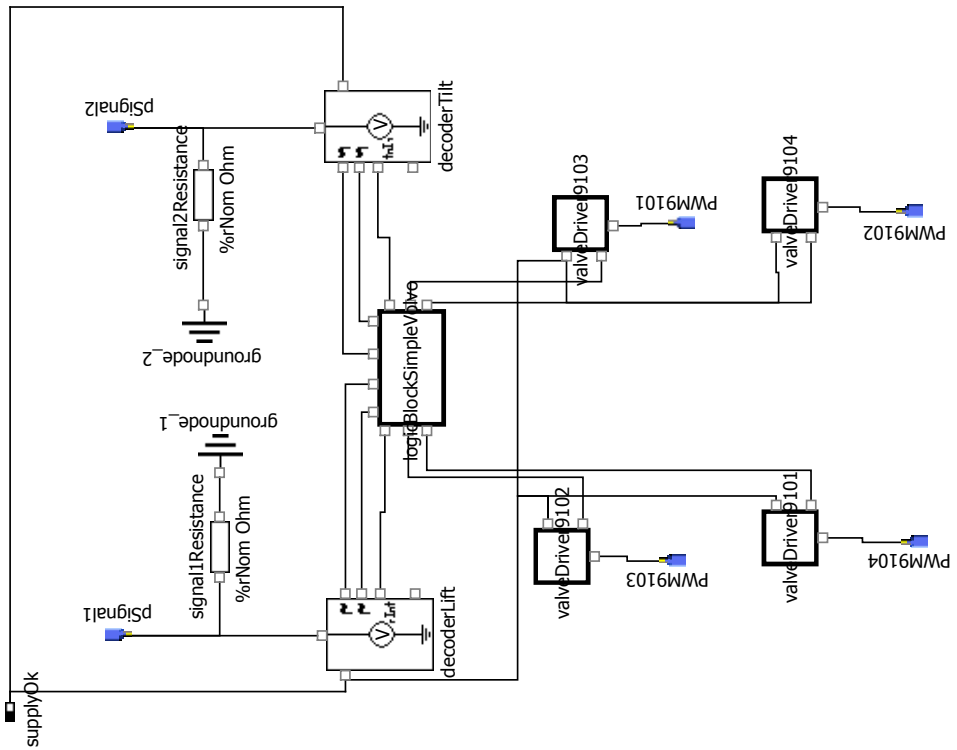
För det symptom som har studerats har beslutsträdet visat att det finns komponentfelmoder som kan förklara funktionsnedsättande beteende. Huruvida denna diagnostik är tillräckligt noggrann för att verka som beslutsunderlag för guidad diagnostik inom industrin, är svårt att avgöra utan en ingående metodikstudie. Därav kan slutsatsen dras att modellen är giltig först då riktigheten i den genererade diagnostiken är fastställd. Vad som dock kan sägas är att

- Rodon lämpar sig väl för utveckling av hydrauliska komponenter, dvs det finns ingenting i modelleringsarbetet som tyder på annat än att Rodon klarar av att fånga godtyckliga komponenters karaktäristik i en hydraulisk domän.
- Rodon kan hitta felmoder som är konsistenta med definierat symptom.

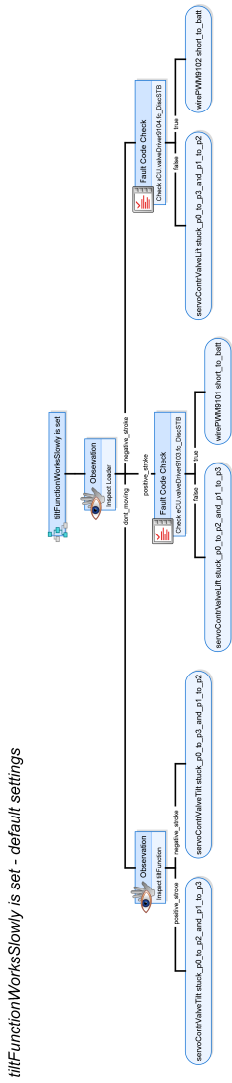
Ovan uppsplattning kan verka trivial, men belyser ändå andemeningen med examensarbetets resultat. Vid uppstart var en av de stora frågorna huruvida symptom skulle kunna definieras i Rodon. Med detta resultat har den frågeställningen besvarats. Symptomet som diagnostiserats är ifrån ett verkligt projekt och mjukvaran kan utan tvekan leverera diagnostik. Sen åligger det applikationsingenjören att ge Rodon de förutsättningar det eftersträvar. I detta ingår till exempel adekvata komponentfelmoder.



Figur 6.2: Rodon-realiseringen av styrsystemet i kapitel 3



**Figur 6.3:** ECUns hårdvara



**Figur 6.4:** Beslutsträd för guidad diagnostik vid symptomet **defekt tilt-funktion**



# 7

---

## Diskussion

Detta kapitel tjänar som en samling avslutande diskussioner kring de olika delmomenten: Modelleringsarbetet, utveckling av komponenter och diagnostiken presenterad av Rodon.

### 7.1 Modellering av en hydraulisk applikation

Modellen som sådan, lämpade sig väl att implementera i Rodon för någon som inte hade stor insyn i mjukvaran ifrån början. Detta motiveras av att de ingående komponenterna inte hade en allt för stor variation, dvs systemet kan modelleras med relativt få komponenter. Modifiering av standardkomponenter var nödvändigt dels med avseende på att systemmodellen ska modelleras ner till minsta utbytbara komponent, dels med avseende på VOLVO-specifika beteendemoder.

### 7.2 Utveckling av komponenter

Samtliga komponentmodeller har utvecklats till att efterlikna linjära flödesmotstånd, med större eller mindre friktionskoefficient. Dessutom ska det hållas i tanken att graden av abstraktion ligger på en nivå, där komponentens interna uppbyggnad inte är av intresse. En komponent avsedd för *on-board diagnostics*, dvs diagnostik utförd under drift av applikation, skulle med fördel ha en djupare detaljnivå. Detta gäller i synnerhet för olinjära system såsom hydrauliska system.

Vidare bör det diskuteras huruvida det är riktigt att anta kännedom kring komponentmodellernas beteendemoder, som är fallet för komponenterna utvecklade av detta examensarbete. Som (Kleer och Williams) poängterar, så använder nyare forskning kring modellbaserad diagnos ett synsätt där enbart korrekt beteende

modelleras och systemet utvärderas enligt principen förklarad under *modellbaserad diagnostik* (kapitel 2). För att motivera kännedom kring komponentens felmoder, faller rapporten tillbaka på att diagnostiken genererad av Rodon ska uppfylla ett annars manuellt arbete. Det bör antas rimligt att Rodons mänskliga föregångare kan förutse felmodens effekt på systemet, därmed är steget inte långt att omsätta detta till Rodelica-kompatibla ekvationer.

## 7.3 Resultat i form av beslutsträd

Som tidigare nämnts i rapporten är det svårt att utvärdera hur beslutsträden kan användas för guidad diagnostik. Därmed föra diskussionen kring Rodons fördelar och nackdelar gentemot en manuellt framtagen feleffektsanalys för det behandlade fallet. Dock kan det föras en diskussion kring skillnader i det generella resultatet och processen att nå det.

En av de enskilt mest tidskrävande delarna av att påbörja modellering med Rodon, består av att utreda systemfunktioner och effekter av fel på komponentnivå. Denna period kan vara ofrånkomlig om applikationen aldrig tidigare modellerats i Rodon och det därmed inte finns systemmodeller med grundfunktioner, alternativt standardbibliotek om teknikområdet är nytt. I jämförelse med beslutsträd formulerade genom manuellt arbete, kan det antas en instuderingsperiod av liknande tidsspann. Combitech har interna siffror som pekar på att Rodon reducerar tiden med 75% för att generera diagnostik kontra manuellt utförda, med en upprättad grundmodell som utgångspunkt. Det kan antas rimligt att samma förhållande även gäller för modellering av hydrauliska applikationer. Vad det beträffar korrektheten och tilliten i beslutsträd genererade av Rodon i förhållande till manuella beslutsträd, baseras Rodon-träden på matematiska samband och kan antas generell uttömmande och därmed korrekta med hög tillit så länge modellen på komponentnivå kan antas riktig. Ett noggrant manuellt utfört beslutsträd kan rimligen också betraktas som uttömmande, men risken är stor att komponentegenskaper förbises om graden av systemkomplexitet är hög.

### 7.3.1 Funktioner för att anpassa beslutsträden till användaren

En av Rodons funktionaliteter som hittills inte berörts i rapporten, är användarens frihet att tilldela beteendemoder en händelsesannolikhet. Detta innebär att om sannolikheten för ett specifikt fel är känd, kan denna användas för att modifiera utseendet av ett beslutsträd. Utfallet blir att tester för att isolera komponenter med hög felsannolikhet utförs tidigt i den guidade diagnostiken. Det kan tänkas att flera av de komponenter som är modellerade att individuellt innehålla felmoder som kan beskriva systemfel, i verkligheten sitter så illa till att hela block av komponenter måste plockas ut för att undersökas. Idealt önskas dessa tester göras efter ett set av något enklare kontroller, exempelvis potentiellt aktiverade felkoder baserade på fel kopplat till styrelektroniken etc.

För systemet i kapitel 3 sitter de båda servostyrda riktningventilerna i samma block. Beslutsträdet (figur 6.4) baseras dock på ett symptom sådant att tester av



dessa komponenter, oundvikligen kommer in tidigt i den guidade diagnostiken. Anledningen till att detta Rodon-attribut inte nämnts beror på att resulterande diagnostik motiveras av kapitel 6.2.1. Dock är det ofrånkomligt att inskränkningar av teoretiskt möjliga felmoder, faktiskt resulterar i en ofulländad autogenererad diagnostik. Det bör därför föreslås att ett uttömmande beslutsträd, ska inkludera ett större antal möjliga beteendemoder och att beslutsträdets interna hieraki baseras på händelsesannolikhet. Detta för att underlätta slutanvändarens felsökning.

## 7.4 Avslutande kommentarer

Genom det arbete som genomförts inom examensarbetet finns det förhoppningar om att arbetet ska fortgå i riktning mot en fulländad metodikstudie, av att använda Rodon inom diagnostikprocesser för hydrauliska applikationer. Den stora utmaningen för modellbaserad diagnostik inom fluidmekaniska system ligger i att systemen har en tendens att vara väldigt olinjära, därutöver dynamiska i den meningen att tryckupbyggnaden är tidsberoende. För att återkoppla till stycke 7.2, ett nästa steg i metodikstudien ligger i att validera giltigheten av systemmodellen som utarbetats av examensarbetet. Däri undersöka rimligheten av att anta linjära modeller och erhålla adekvat diagnostik. Vidare bygger den föreslagna modelleringsmetodiken (kapitel 5) på att isolerar en relativt hög abstraktionsnivå, exempelvis genom att bortse ifrån tidsvariabla egenskaper. Det kan tänkas att en modell med alltför snäv abstraktionsnivå, påverkar möjligheterna att generera diagnostik för godtyckliga symptom. Detta scenario har dock inte upptäckts för L250G-modellen. Avslutningsvis kan det vara av intresse att i ett framtida skede undersöka i vilken mån tidsbesparningar kan göras, med avseende på diagnostik genererad med hjälp av det standardbibliotek som utvecklats av examensarbetet.



---

# Litteraturförteckning

- Bergman, B och Klefsjö, B. *Kvalitet från behov till användning / Bergman, Klefsjö*. Studentlitteratur, Lund, 2001. Cited on pages 5 and 6.
- Frey, Peter Bonus Olle Isaksson Beate och Munker, Burkhard. Rodon- a model-based diagnosis approach for the dx diagnostic competition. In *Proceedings of the 20th International Workshop on Principles of Diagnosis*, 2009(1), 2009. URL [http://www.ida.liu.se/~petbu/publications/downloads/PeterBonus\\_DX2009.pdf](http://www.ida.liu.se/~petbu/publications/downloads/PeterBonus_DX2009.pdf). Cited on page 10.
- Frostkonsult. Fmea-mall. 2013. URL <http://frostkonsult.se/fmeamall.htm>. [Online; tillgänglig; 20-Maj-2013]. Cited on page 6.
- Garimella, P. och Yao, Bin. Model based fault detection of an electro-hydraulic cylinder. I: *American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005*, ss 484–489 vol. 1, 2005. Cited on page 2.
- Garimella, Phanindra och Yao, Bin. Fault detection of an electric-hydraulic cylinder using adaptive robust observers. *2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2004, 2004. URL [https://engineering.purdue.edu/~byao/Papers/IMECE04\\_Fault61718.pdf](https://engineering.purdue.edu/~byao/Papers/IMECE04_Fault61718.pdf). Cited on page 2.
- Kleer, De och Williams, B.C. Diagnosis with behavioral modes. *Artificial Intelligence* 3. Cited on pages 2 and 57.
- Krus, Petter. Engineering design analysis and synthesis. 2012, 2012. URL <https://sites.google.com/site/petterkrus/Home/research-interest/fulltextpapers>. Cited on page 8.
- Ljung, Lennart och Glad, Torkel. *Modellbygge och simulering / Lennart Ljung, Torkel Glad*. Studentlitteratur, 2011. Cited on page 10.
- Modelica, Association. *Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling - Language Specification Version 3.0*. 2007. Cited on page 10.

Nyberg, Mattias och Frisk, Erik. *Model based diagnosis of technical processes / Mattias Nyberg, Erik Frisk*. [Linköping] : [Univ.], cop. 2012, 2012. Cited on page 5.

Rydberg, Karl-Erik och Olsson, Olof. *Kompendium i Hydraulik*. [Linköping] : [Univ.], cop. 2012, 1995. Cited on pages 15, 29, and 41.



## Upphovsrätt

Detta dokument hålls tillgängligt på Internet — eller dess framtida ersättare — under 25 år från publiceringsdatum under förutsättning att inga extraordinära omständigheter uppstår.

Tillgång till dokumentet innebär tillstånd för var och en att läsa, ladda ner, skriva ut enstaka kopior för enskilt bruk och att använda det oförändrat för icke-kommersiell forskning och för undervisning. Överföring av upphovsrätten vid en senare tidpunkt kan inte upphäva detta tillstånd. All annan användning av dokumentet kräver upphovsmannens medgivande. För att garantera äktheten, säkerheten och tillgängligheten finns det lösningar av teknisk och administrativ art.

Upphovsmannens ideella rätt innefattar rätt att bli nämnd som upphovsman i den omfattning som god sed kräver vid användning av dokumentet på ovan beskrivna sätt samt skydd mot att dokumentet ändras eller presenteras i sådan form eller i sådant sammanhang som är kränkande för upphovsmannens litterära eller konstnärliga anseende eller egenart.

För ytterligare information om Linköping University Electronic Press se förlagets hemsida <http://www.ep.liu.se/>

## Copyright

The publishers will keep this document online on the Internet — or its possible replacement — for a period of 25 years from the date of publication barring exceptional circumstances.

The online availability of the document implies a permanent permission for anyone to read, to download, to print out single copies for his/her own use and to use it unchanged for any non-commercial research and educational purpose. Subsequent transfers of copyright cannot revoke this permission. All other uses of the document are conditional on the consent of the copyright owner. The publisher has taken technical and administrative measures to assure authenticity, security and accessibility.

According to intellectual property law the author has the right to be mentioned when his/her work is accessed as described above and to be protected against infringement.

For additional information about the Linköping University Electronic Press and its procedures for publication and for assurance of document integrity, please refer to its www home page: <http://www.ep.liu.se/>