

TSFS06 Diagnos och övervakning, 6hp
Föreläsning 1 - Kursformalia och introduktion

Erik Frisk

Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet
erik.frisk@liu.se

2022-03-29

Examinator & Föreläsningar

Erik Frisk erik.frisk@liu.se

Laborationer & Lektioner

Fatemeh (Shadi) Hashemnyia fatemeh.hashemnyia@liu.se

Arman Mohammadi arman.mohammadi@liu.se

- Lisam - information, inlämningar, ...
- kursens git-repo <https://gitlab.liu.se/vehsys/tsfs06>

❶ Kursformalia

❷ Industriell motivering

❸ Vad är diagnos?

Krama ut så mycket information om felaktigt beteende som möjligt ur observationerna via signalbehandling, matematiska modeller, samt logiskt beslutsfattande.

❹ Skissa på "hur man gör/tänker"

❺ Arkitekturen för diagnossystem

❻ Hur ser designprocessen ut för ett diagnossystem?

- vilken typ av kurs är det här: teori, forskningsfront, praktik/industriell relevans
- flera ämnen: statistik, sannolikhetslära, signalbehandling, reglerteknik, logik

—— Kursformalia ——

- veta varför diagnos används inom olika industriella applikationer.
- veta hur man kan analysera vilka fel i en komplex process som behöver övervakas för att uppnå de övergripande målen.
- från en fallbeskrivning kunna strukturera problemet och ta fram princip och arkitektur för en komplett implementering av ett diagnossystem.
- givet en formell modellbeskrivning kunna välja lämplig matematisk metod för att lösa problemet.
- veta för- och nackdelar med de metoder som ingår i kursen.
- kunna tillämpa matematiska verktyg och metoder från ett brett spektrum av tidigare kurser för att lösa diagnosproblem.
- kunna värdera och verifiera funktionalitet och prestanda hos ett diagnosystem.
- ha en fördjupad och bred teoretisk insikt i ämnet, tillräcklig för att kunna tillgodogöra sig nya forskningsresultat i fältet.

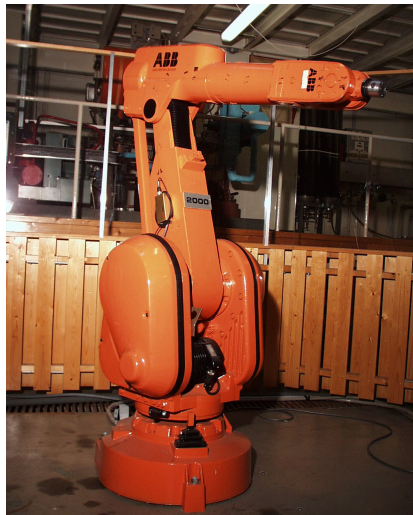
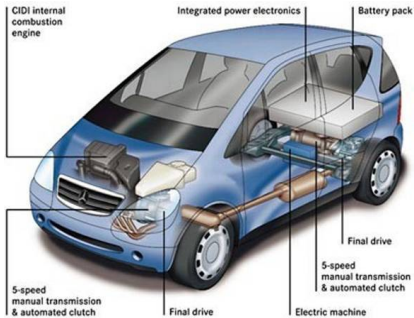
- Fö1: Kursformalia, introduktion till diagnos
- Fö2: Felisolering
- Fö3: Linjär residualgenerering
- Fö4: Detekterbarhet
- Fö5: Design av teststorheter
- Fö6: Tröskling och analys av teststorheter
- Fö7: Olinjär residualgenerering och observatörer
- Fö8: Change Detection
- Fö9: Multipelfelisolering, AI
- Fö10: Sannolikhetsbaserad diagnos
- Fö11: Gästföreläsning + ev. vetenskaplig presentation

- **Kursmaterial:** Kompendium, räknehäfte samt utdrag ur två böcker. Finns även en del hjälpdokument inför laborationer att ladda ned från kurshemsidan.
- **Elektroniska versioner:** Text och lektionskompendium (PDF) kan laddas hem elektroniskt.
- **Föreläsningar.**
- **Lektioner/räkneövningar:** 1 lektionsgrupp
- **Laborationer:** 3 laborationer (3 rapporter).
 - ① Lab 1 - Linjär residualgenerering, inklusive dugga
 - ② Lab 2 - Diagnos av ett bränslesystem
 - ③ Lab 3 - Olinjär residualgenereringAlla rapporter lämnas in elektroniskt via lisam.

- **Examination:**
 - Tenta (U,3,4,5) 4,5hp
 - Labkurs (U,G) 1,5hp (två personer/grupp)

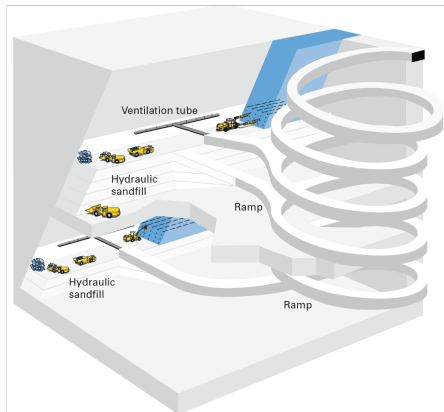
—— Industriell motivering till diagnos ——

Lite industriella motiveringar för diagnos



Lite industriella motiveringar för diagnos

- Autonomi, autonoma gruvor
- Utan förare så försvinner en viktig sensor och hur fordonet används spelar stor roll för livslängden
- Man vill inte att ett fordon blir stående längst ned i en gruvgång
- Metoder för att väga in modeller och data krävs



CM & D Financial Impact

Process Equipment Maintenance costs

■ From a report by DuPont¹...



In many plants, maintenance budget is about 2/3 of annual net profit

Maintenance is today the largest single controllable expenditure in a plant

■ From study by Dow Chemicals²



Cost of unnecessary maintenance about the same size as plant profit

■ From a study by ARC (November 2003)

Asset management activities (checking, troubleshooting, calibration, repairs) are one of the leading time consuming activities. 80% of the survey see it as important /extremely important to reduce it



Maintenance costs represent a huge savings opportunity!

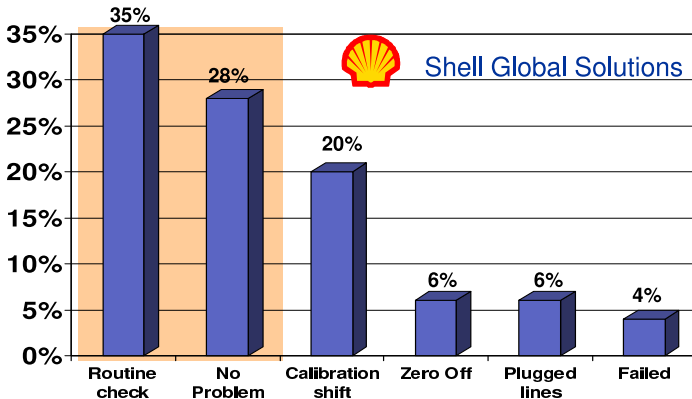
1 3rd. largest Chemical Company worldwide with 27 Billion USD in sales, 81,000 Employees and 12.5% Sales growth in 1 year

2 2nd largest Chemical Company worldwide with 32 Billion USD in sales, 46,000 Employees, and 18% Sales growth in 1 year

Source: Hoovers.com October 21, 2004

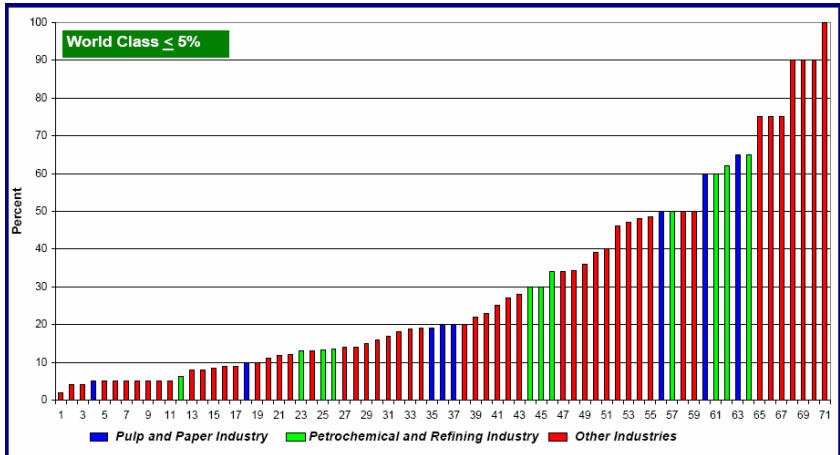
Instruments Preventive Maintenance

Potential for Predictive Maintenance with pressure transmitters



**63% of instrument maintenance labor results in no action taken
= waste of resources**

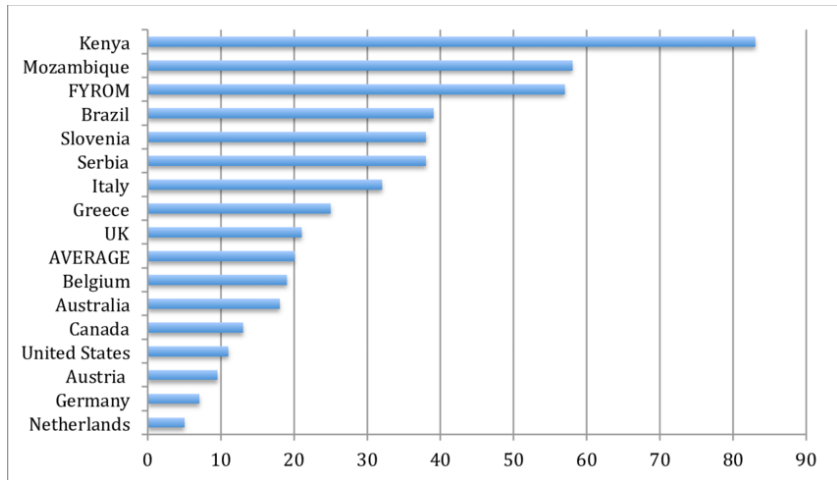
Unplanned maintenance Benchmarks



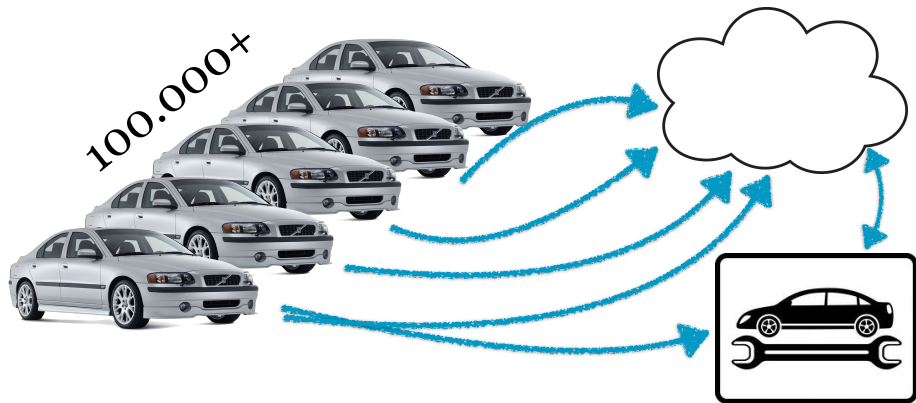
ABB's Consulting Services data source

Miljö – vattenläckage

En stor del av världens dricksvatten går förlorat på grund av vattenläckage



Genom att snabbt lokalisera läckor går det att minska förlusterna, men också minska riskarna för annan skada, exempelvis slukhål.



Varför diagnos i fordon?

Huvudsakliga drivande kraften är emissionsrelaterade lagkrav

- OBD - On-board diagnostics
- OBD/OBD-II Carb (California Air Resource Board)
- <http://www.arb.ca.gov/msprog/obdprog/obdregs.htm>
- EOBD för Europa
- Motsvarande för tunga fordon

Konsekvenser av (kraftig) misständning (misfire) 1/2



bild från <http://www.pawlikautomotive.com/>

Konsekvenser av (kraftig) misständning (misfire) 2/2

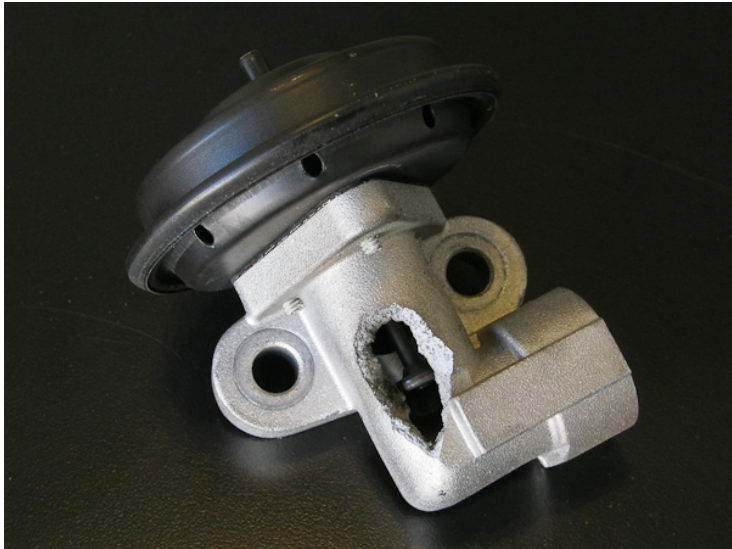
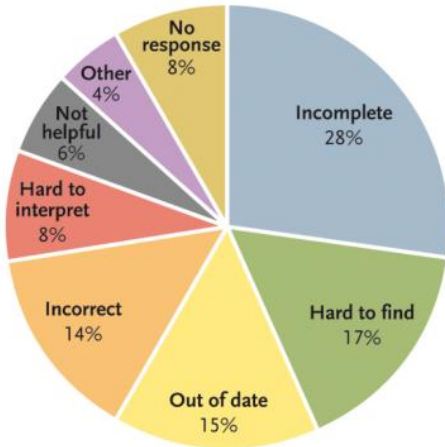
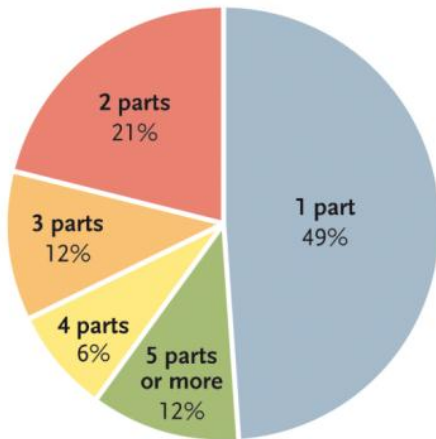


bild från <http://www.pawlikautomotive.com/>

Varför diagnos i fordon?



—— Modellbaserad diagnos - bakgrund ——

Scopus-fråga: fault AND (diagnosis OR detection) (2013)

Quick Search

Your query: TITLE-ABS-KEY(fault AND (diagnosis OR detection)) AND SUBJAREA(mult OR ceng OR CHEM OR comp OR eart OR en

[Analyze results](#) | [Edit](#) | [Save](#) | [Set alert](#) | [Set feed](#) | [View search history](#)

View [secondary documents](#) | Go to results: [22050 Web](#) | [3980 Patent](#)

Search within results

Refine results

Year

<input type="checkbox"/> 2013	(770) >
<input type="checkbox"/> 2012	(4,695) >
<input type="checkbox"/> 2011	(4,647) >
<input type="checkbox"/> 2010	(4,431) >
<input type="checkbox"/> 2009	(4,200) >

[View more](#)

Author Name

<input type="checkbox"/> Reddy, S.M.	(176) >
<input type="checkbox"/> Anon,	(163) >
<input type="checkbox"/> Pomeranz, I.	(151) >
<input type="checkbox"/> Ding, S.X.	(145) >
<input type="checkbox"/> Jiang, B.	(116) >

[View more](#)

Document results: 50,579 | [Show all abstracts](#)

☐ All ☐ Page With selected: [Download](#) | [Export](#) | [Print](#) | [Email](#) | [Create bibliography](#) | [Add](#)

Document title

- ☐ 1 **Application of stochastic resonance and LMD to bearing fault diagnosis**
- [Hitta mer@LiU](#) | [Show abstract](#) | [Related documents](#)
- ☐ 2 **Fault feature extraction for gear crack based on bispectral entropy**
- [Hitta mer@LiU](#) | [Show abstract](#) | [Related documents](#)
- ☐ 3 **Fault detection and signal reconstruction for increasing operational availability of industrial gas turbines**
- [Hitta mer@LiU](#) | [Full Text](#) | [Show abstract](#)
- ☐ 4 **FPGA-based reconfigurable control for switch fault tolerant operation of WECS with DF without redundancy**
- [Hitta mer@LiU](#) | [Show abstract](#) | [Related documents](#)
- ☐ **Dynamic simulation of planetary gear with tooth root crack in ring gear**

Scopus-fråga: fault AND (diagnosis OR detection) (2016)

Scopus Scopus SoVal Ask a librarian Register Login Help Brought to you by Linköping University Library

Search **Alerts** **Lists** **My Scopus**

TITLE-ABS-KEY (fault AND (diagnosis OR detection)) AND SUBAREA (mult OR ceng OR CHEM OR comp OR eart OR ener OR engi OR envl OR mate OR math OR phys) Set feed Edit Save Set alert

71,899 document results View secondary documents View 4409 patent results Analyze search results Sort on: Date Cited by Relevance

Search within results... Export Download View citation overview View Cited by Add to List More... Show all abstracts

Refine Limit to Exclude

Year

- ☐ 2016 (676)
- ☐ 2015 (5,042)
- ☐ 2014 (5,812)
- ☐ 2013 (5,772)
- ☐ 2012 (5,391)

Author Name

- ☐ Ding, S.X. (202)
- ☐ Pomerantz, I. (183)
- ☐ Reddy, S.M. (168)
- ☐ Puig, V. (167)
- ☐ Jiang, B. (165)

Subject Area

- ☐ Engineering (53,760)
- ☐ Computer Science (24,481)
- ☐ Mathematics (7,476)
- ☐ Energy (5,601)
- ☐ Physics and Astronomy (5,587)

Document Type

- ☐ Conference Paper (36,434)
- ☐ Article (30,673)
- ☐ Conference Review (1,867)
- ☐ Review (482)
- ☐ Book Chapter (400)

<input type="checkbox"/> Study and experiment on non-contact voltage sensor suitable for three-phase transmission line	Zhou, Q., He, W., Xiao, D., Li, S., Zhou, K.	2016 Sensors (Switzerland) 16 (1): 40	0 Cited by
Get It LiU Show abstract Related documents		Open Access	
<input type="checkbox"/> Fault detection for switched T-S fuzzy systems in finite frequency domain	He, D., Xi, C., Lu, A.	2016 Advances in Difference Equations	0
Get It LiU		Open Access	
<input type="checkbox"/> A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis	Ghoneim, S.S.M., Taha, I.B.M.	2016 International Journal of Electrical Power and Energy Systems	0
Get It LiU			
<input type="checkbox"/> Low cost microcontroller based fault detector, classifier, zone identifier and locator for transmission lines using wavelet transform and artificial neural network: A hardware co-simulation approach	Koley, E., Kumar, R., Ghosh, S.	2016 International Journal of Electrical Power and Energy Systems	0
Get It LiU			
<input type="checkbox"/> Directional relaying using support vector machine for double circuit transmission lines including cross-country and inter-circuit faults	Swetapadma, A., Yadav, A.	2016 International Journal of Electrical Power and Energy Systems	0
Get It LiU			
<input type="checkbox"/> Data-mining model based adaptive protection scheme to enhance distance relay performance during power swing	Dubey, R., Samantaray, S.R., Panigrahi, B.K., Venkatarao, V.G.	2016 International Journal of Electrical Power and Energy Systems	0
Get It LiU			
<input type="checkbox"/> Power transformers' condition monitoring using neural modeling and the local statistical approach to fault diagnosis	Rigatos, G., Siano, P.	2016 International Journal of Electrical Power and Energy Systems	0
Get It LiU			
<input type="checkbox"/> Hybrid modeling based double-granularity fault detection and diagnosis for quadrotor helicopter	Wang, Y., Jiang, B., Lu, N., Pan, J.	2016 Nonlinear Analysis: Hybrid Systems	0

Scopus-fråga: fault AND (diagnosis OR detection) (2017)

80,684 document results

[View secondary documents](#) [View 46127 patent results](#)

TITLE-ABS-KEY (fault AND (diagnosis OR detection))

[Edit](#) [Save](#) [Set alert](#) [Set feed](#)

Search within results...

Refine results

Limit to

Exclude

Year

☐ 2017

(755) >

☐ 2016

(5,942) >

☐ 2015

(5,689) >

☐ 2014

(5,964) >

☐ 2013

(5,875) >

View more

Author name

☐ Ding, S.X.

(219) >

☐ Puig, V.

(200) >

☐ Pomeranz, I.

(189) >

☐ Jiang, B.

(180) >

View more

Analyze search results

Show all abstracts

Sort on: Date (newest)

☐ All

Export

Download

View citation overview

View Cited by

Add to List

...

	Document title	Authors	Year	Source	Cited by
<input type="checkbox"/> 1	Geomorphic features of surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake in and around the downtown of Kumamoto City, and implications on triggered slip along active faults 2016 Kumamoto earthquake sequence and its impact on earthquake science and hazard assessment Manabu Hashimoto, Martha Savage, Takuya Nishimura and Haruo Honkawa 4. Seismology	Goto, H., Tsutsumi, H., Toda, S., Kumahara, Y.	2017	Earth, Planets and Space 69(1), 26 Open Access	0
View abstract <input type="checkbox"/> New Full Text Related documents					
<input type="checkbox"/> 2	Fault diagnosis and classification of mine motor based on RS and SVM	Ma, X., Zhang, X., Yang, Z.	2017	Studies in Computational Intelligence 672, pp. 17-30	0
View abstract <input type="checkbox"/> New Full Text Related documents					
<input type="checkbox"/> 3	Multi-sensor fusion approach with fault detection and exclusion based on the Kullback-Leibler Divergence: Application on collaborative multi-robot system	Al Hage, J., E. El Najjar, M., Pomorski, D.	2017	Information Fusion 37, pp. 61-76	0
View abstract <input type="checkbox"/> New Full Text Related documents					
<input type="checkbox"/> 4	Stability-based system for bearing fault early detection	Diaz, M., Henriques, P.	2017	Expert Systems with	0

Scopus-fråga: fault AND (diagnosis OR detection) (2019)

97,122 document results

[View secondary documents](#)

[View 553404 patent results](#)

[View 7025 Mendeley Data](#)

TITLE-ABS-KEY (fault AND (diagnosis OR detection))

[Edit](#) [Save](#) [Set alert](#) [Set feed](#)

Search within results...



Refine results

[Limit to](#) [Exclude](#)

Access type

- ☐ Open Access (5,167) >
- ☐ Other (91,955) >

Year

- ☐ 2019 (1,640) >
- ☐ 2018 (7,487) >
- ☐ 2017 (6,981) >
- ☐ 2016 (6,148) >

Analyze search results

[Show all abstracts](#) Sort on: [Date \(newest\)](#)

☐ All [Export](#) [Download](#) [View citation overview](#) [View cited by](#) [Add to List](#) *** [Print](#) [Email](#) [Save](#)

	Document title	Authors	Year	Source	Cited by
<input type="checkbox"/> 1	A critical fault detection analysis & fault time in a UPFC transmission line Open Access	Mishra, S.K., Tripathy, L.N.	2019	Protection and Control of Modern Power Systems 4(1),3	0
	View abstract Full Text Related documents				
<input type="checkbox"/> 2	Critical comparison of methods for fault diagnosis in metabolomics data Open Access	Koeman, M., Engel, J., Jansen, J., Buydens, L.	2019	Scientific Reports 9(1),1123	0
	View abstract Full Text Related documents				

Scopus-fråga: fault AND (diagnosis OR detection) (2020)

106,577 document results

TITLE-ABS-KEY (fault AND (diagnosis OR detection))

Edit Save Set alert Set feed

Search within results...

Refine results

Limit to Exclude

Access type

☐ Open Access (7,749) >
☐ Other (98,828) >

Year

☐ 2020 (1,669) >
☐ 2019 (8,529) >
☐ 2018 (7,550) >
☐ 2017 (7,074) >
☐ 2016 (6,239) >

View more

Author name

☐ Ding, S.X. (299) >
☐ Jiang, B. (285) >
☐ Puig, V. (247) >

Documents Secondary documents Patents

View Mendeley Data (1537)

Analyze search results

Show all abstracts Sort on: Cited by (highest)

☐ All Export Download View citation overview View cited by Add to List

	Document title	Authors	Year	Source	Cited by
<input type="checkbox"/> 1	Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. A survey and some new results	Frank, P.M.	1990	Automatica 26(3), pp. 459-474	2516
	View abstract <input type="button" value="Full Text"/> Related documents				
<input type="checkbox"/> 2	Backpropagation Through Time: What It Does and How to Do It	Werbos, P.J.	1990	Proceedings of the IEEE 78(10), pp. 1550-1560	2004
	View abstract <input type="button" value="Full Text"/> Related documents				
<input type="checkbox"/> 3	A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles	Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., Ouyang, M.	2013	Journal of Power Sources 226, pp. 272-288	1840
	View abstract <input type="button" value="Full Text"/> Related documents				
<input type="checkbox"/> 4	A review of process fault detection and diagnosis part I: Quantitative model-based methods	Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., Kavuri, S.N.	2003	Computers and Chemical Engineering 27(3), pp. 293-311	1746
	View abstract <input type="button" value="Full Text"/> Related documents				

Scopus-fråga: fault AND (diagnosis OR detection) (2022)

128,339 document results

TITLE-ABS-KEY (fault AND (diagnosis OR detection))

Edit Save Set alert

Search within results...

Refine results

Limit to Exclude

Open Access

- ☐ All Open Access (19,179) >
- ☐ Gold (7,681) >
- ☐ Hybrid Gold (779) >
- ☐ Bronze (5,131) >
- ☐ Green (10,072) >

Learn more

Year

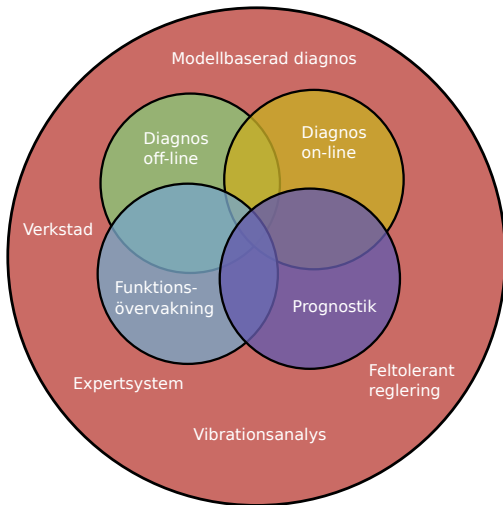
Documents Secondary documents Patents View Mendeley Data (4813)

Analyze search results Show all abstracts Sort on: Date (newest)

☐ All Export Download View citation overview View cited by Add to List ...

	Document title	Authors	Year	Source	Cited by
<input type="checkbox"/> 1	A new protection scheme for PV-wind based DC-ring microgrid by using modified multifractal detrended fluctuation analysis Open Access	Anjaiah, K., Dash, P.K., Sahani, M.	2022	Protection and Control of Modern Power Systems 7(1),8	0
	View abstract <input type="button" value="Full Text"/> Related documents				
<input type="checkbox"/> 2	Feature engineering solution with structured query language analytic functions in detecting electricity frauds using machine learning	Oprea, S.-V., Băra, A.	2022	Scientific Reports 12(1),3257	0

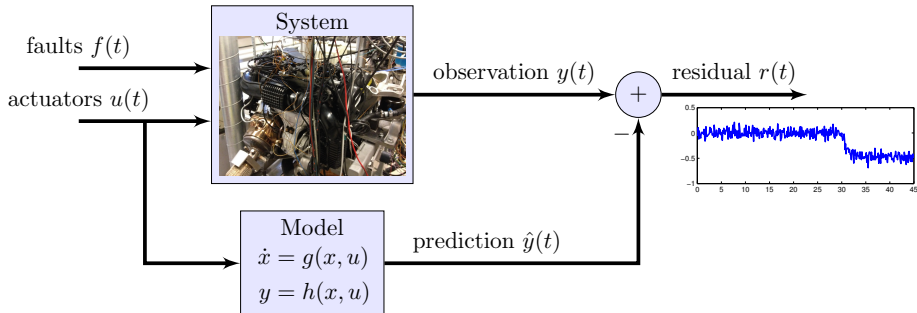
Lite olika perspektiv på diagnos och övervakning



- Flera olika perspektiv/tillämpningar möjliga
- Delvis överlappande
- Man kan tänka sig fler/andra "ringar" och närbesläktade ord
- Här: Främst modellbaserat med kontinuerliga modeller

Generella diagnosprinciper

- Jämför observerat beteende med förväntat beteende
- Traditionellt: bilmekaniker/expert som lyssnar, känner, använder historiska erfarenheter
- Modellbaserad diagnos: fånga dessa egenskaper i en matematisk formulerings för att automatisera diagnostiken



Varför diagnos?

- **Säkerhet** Flyg, kärnkraftverk, ...
- **Miljöskydd** Avgasreningssystem i bilar (lagkrav), kemisk industri, ...
- **Maskinskydd** Hitta fel så tidigt som möjligt innan större skada utvecklats
- **Tillgänglighet och flexibelt underhåll** Undvik oförutsedda avbrott.
Industrirobotar, lastbilar, elkraftverk

Varför nu?

- Lagkrav
- Snabba utvecklingen av datortekniken, processorkraft över till diagnos.
- Konstruktion av system vs. komponenter
- Integrerade system

- Något som ofta görs efteråt, i “mån av tid”, vill man nu göra parallellt med övrig konstruktion.
- Konstruktion för diagnos (ex.vis sensorplacering, val av sensorer etc.)
- En anseelig del av styrsystemskoden kan vara diagnoskod. I till exempel bilsammanhang så är en siffra som ibland nämns 50% av koden i styrenheten diagnosrelaterad.
- Vid utveckling av en produkt så har man normalt mycket kunskap om processen som skulle kunna användas för övervakning. Men hur?

Metodik krävs för att kunna göra detta effektivt.

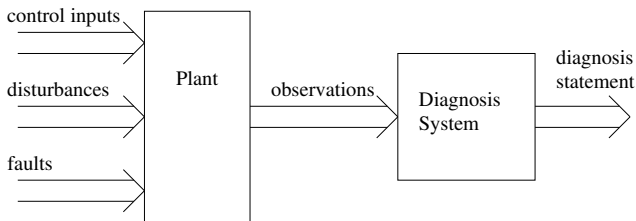
—— Diagnosproblemet ——

- Diagnosproblemet
- Observation
- Mod/fel
- Diagnos
- Diagnossystem

I systemtekniska sammanhang betyder verbet diagnos att automatiskt, och helst under normal drift,

- **detektera** fel, dvs upptäcka att något hänt.
- (ibland)**isolera** fel, dvs peka ut vilken komponent som är trasig.

Diagnosproblemet - Lite mer formellt.



Systemet kan vara i olika **moder**, dvs vara felfri eller ha olika möjliga fel.

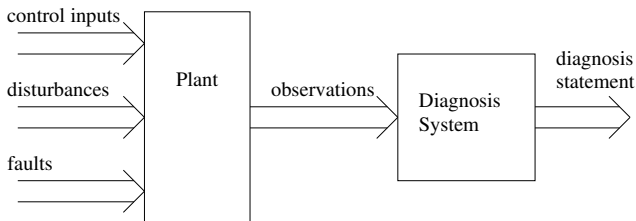
För att avgöra hur systemet "mår" används kända styrsignaler och mätsignaler en så kallad **observation**.

Diagnos

En förklaring, dvs de moder/fel, som stämmer med de observerade signalerna kallas för en **diagnos**.

Ex: Vi observerar att personen är snuvig, då är förkyld en diagnos och allergisk en annan diagnos. Det finns ofta flera möjliga diagnoser.

Diagnosproblemet - Lite mer formellt.



Diagnosproblemet

Givet en observation: Hitta alla diagnoser

$$\text{alla diagnoser} = f(\text{observation})$$

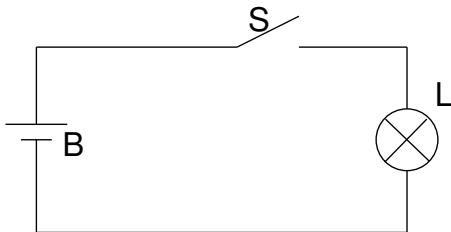
Kontrollerat beslutsfattande: “gissningar” kan vara alltför riskfyllt.

Varianter: hitta de mest sannolika/enklaste diagnoserna.

Ett system som realiserar funktionen f är ett **diagnossystem**.

Genom att inkludera tillräckligt mycket kunskap om systemet i f kan detektion och isolation uppnås.

Exemplifiering av diagnosproblemet



Möjliga fel: Strömbrytaren fastnar i öppet läge, fastnar i stängt läge, och trasig lampa.

Insignal: Önskat läge hos strömbrytaren {öppen, stängd}

Observationer: önskat läge hos strömbrytaren, lyser lampan eller inte

Exemplifiering av diagnosproblemet, forts

önskad sition strömbrytare	po- hos	lamp- observation	diagnoser
öppen		ej tänd	OK, S fastnat öppen, L trasig, S fastnat öppen och L trasig, S fastnat slutet och L trasig"
öppen		tänd	S fastnat slutet
stängd		ej tänd	S fastnat öppen, L trasig, S fastnat öppen och L trasig, S fastnat slutet och L trasig
stängd		tänd	OK, S fastnat slutet

Ovanstående tabell representerar ett enkelt diagnossystem.

$$\text{diagnoser} = f(\text{observationer})$$

Vad blir svaret av: <öppen, ej tänd> samt <stängd, ej tänd>?

Hur gör vi i mer komplicerade fall?

Obs

Bara för att ett system uppför sig normalt så kan vi normalt inte dra slutsatsen: felfritt.

Vanligt att det krävs vissa arbetspunkter/yttre omständigheter för att man ska kunna unikt peka ut vilken komponent som felat.

Kom ihåg, kontrollerat beslutsfattande.

—— Redundans ——

När kan man utföra diagnos?

För att kunna detektera felaktigt beteende krävs extra, ofta kallad redundant (egentligen ej ett bra ord), kunskap.

- Ingenjören jämför sina observationer med sin expertkunskap

För att kunna automatisera diagnos i en dator måste expertkunskapen formaliseras.

Redundans kan tillhandahållas av till exempel:

- Extra hårdvara, exempelvis flera sensorer som mäter samma storhet
- Modeller i form av
 - analytiska/logiska ekvationer, tillståndsautomater, etc.
 - Modeller i form av expertkunskap och erfarenhet

För att inte bara kunna detektera utan också isolera fel så krävs tillräckligt med redundans och också rätt sorts redundans.

“Traditionell” diagnos och modellbaserad diagnos

- hårdvaruredundans
- tröskling av mätsignaler (limit-checking)
- hastighetsbegränsning av fysikaliska storheter (rate-limit)
- ofta olika begränsningar i olika arbetsområden

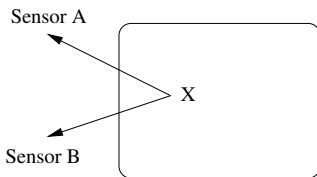
Traditionell diagnos **är** på sätt och vis modellbaserad diagnos. Bara med väldigt enkla modeller.

⇒ för samma diagnosprestanda, modellbaserad diagnos behöver inte nödvändigtvis vara beräkningsmässigt mer krävande eller mer komplext än traditionella ansatser. Men det kan också vara det, allt beroende på situation.

Men, att använda mer avancerade modeller så kan man öka diagnosprestandan: snabbare detektion, mer exakt felisolering, färre falsklarm.

Traditionell diagnos: hårdvaruredundans

Montera två sensorer att mäta samma storhet



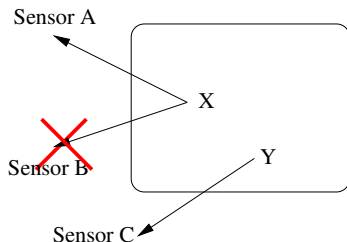
Detektera fel genom att jämföra sensorvärdena

$$r = \text{Sensor A} - \text{Sensor B}$$

- Pålitligt
- Dyrt
- Inte alltid möjligt
- Vilken av sensorerna är det fel på?

Redundans via matematiska modeller: princip

Antag att vi inte har råd med den där extra sensorn



istället har vi

- en sensor C som mäter en annan storhet Y
- en matematisk modell mellan storheterna X och Y

$$X = \text{Modell}(Y)$$

vilket ger möjligheten

$$r = \text{Sensor A} - \text{Modell}(\text{Sensor C})$$

- Enkelt uttryckt: analytisk redundans existerar om vi kan bestämma en storhet på mer än ett sätt.
- Kopplar till överbestämmdhet i modellen

Antag två sensorer mäter en variabel x enligt

$$y_1 = x \quad \wedge \quad y_2 = \sqrt{x}$$

Fel kan upptäckas hos båda givarna genom att testa om relationen

$$y_1 - y_2^2 = 0$$

gäller.

En vanlig typ av reglerteknisk modell är tillståndsformen

$$\begin{aligned}\dot{x} &= g(x, u) \\ y &= h(x)\end{aligned}$$

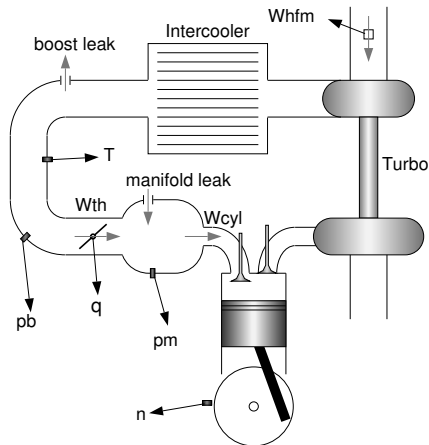
Denna modell har redundans, varför?

Observatörer är ett vanligt sätt att avgöra om y och u är konsistenta med modellen. Detta görs genom att skatta tillståndet x och jämföra y med $h(\hat{x})$, dvs.

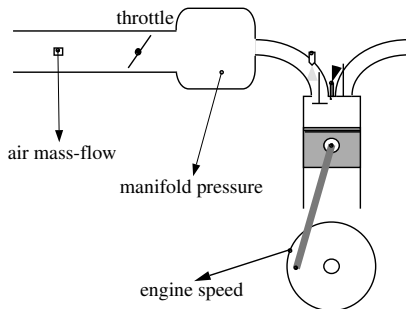
$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= g(\hat{x}, u) + K(y - h(\hat{x})) \\ r &= y - h(\hat{x})\end{aligned}$$

Bra för detektion, men räcker inte rakt av för isolering.

Exempel: Diagnos på en produktionsmotor



Lite olika typer av fel, kräver olika typer av modeller och därmed olika typer av signalbehandling.



Fysikaliska samband mellan fysikaliska storheter ger analytisk redundans.

$$\dot{p} = k(W_{in}(\alpha, p) - W_{ut}(p, n))$$

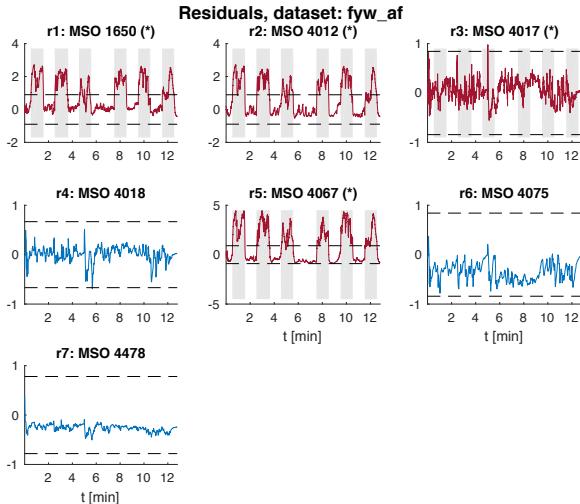
Antag vi mäter de ingående variablerna, $y_p = p$, $y_\alpha = \alpha$ och $y_n = n$.

$$r = \dot{y}_p - k(W_{in}(y_\alpha, y_p) - W_{ut}(y_p, y_n))$$

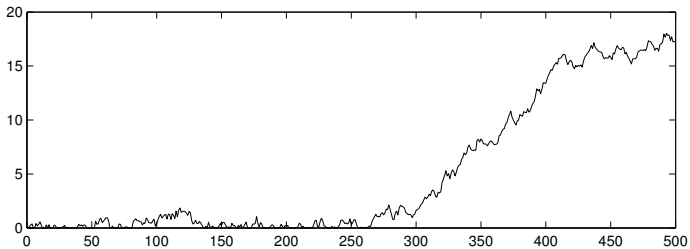
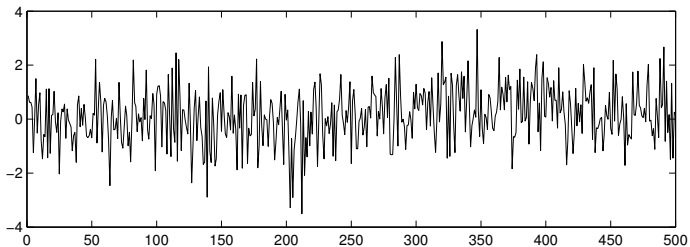
—— Signalbehandling och tröskling ——

Den enklaste principen att detektera är direkt tröskling av residualer.

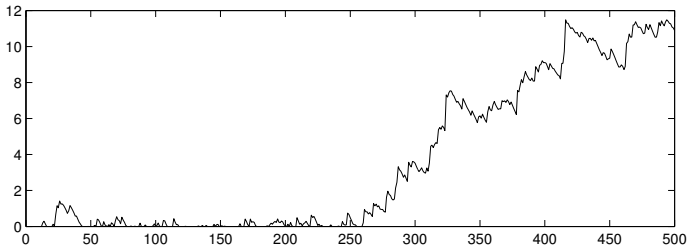
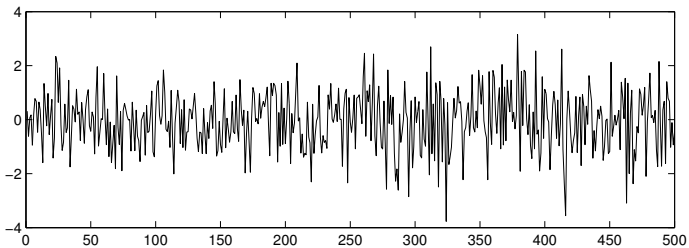
- Ett fel är detekterat när residualen avviker från nominellt värde
- Tröskel; avvägning sannolikhet för falsklarm och missad detektion



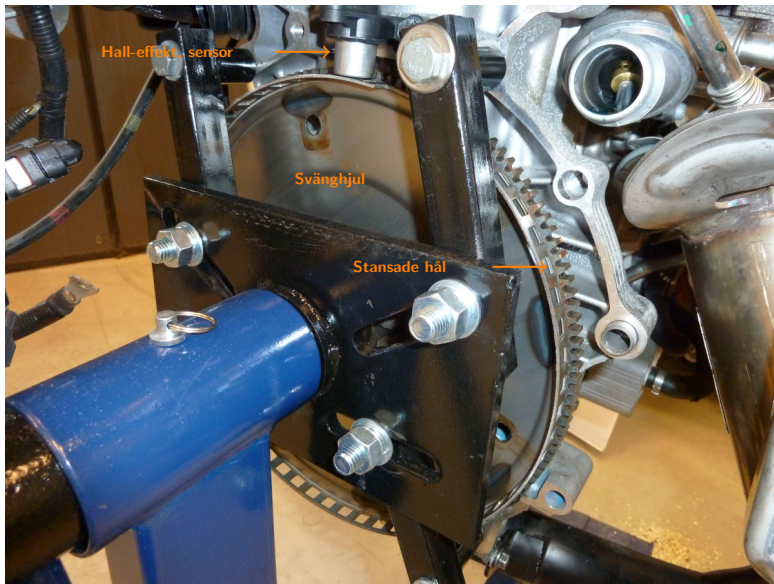
Var byter mätsignalen nivå?



Var byter mätsignalen intensitet/varians?

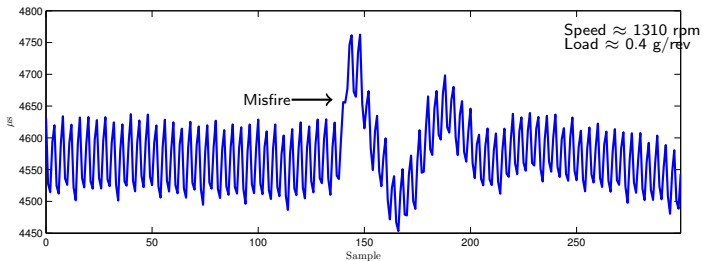


Mätsignal för att detektera misständning(misfire)

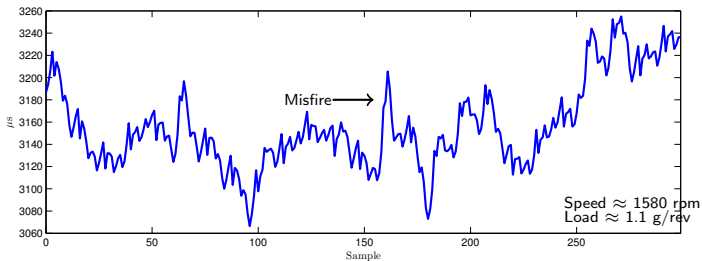


Exempel på misständningar

Varm motor



Kall motor och låg last

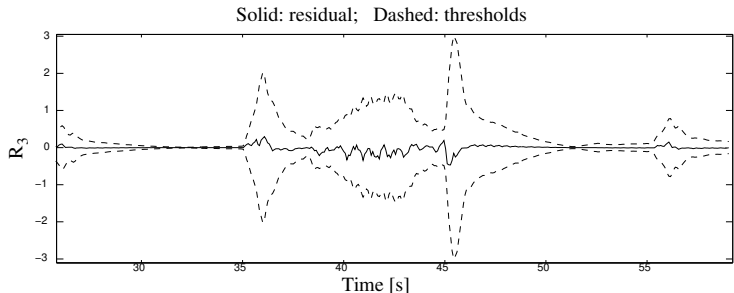


Tröskling av residualer, adaptiva trösklar

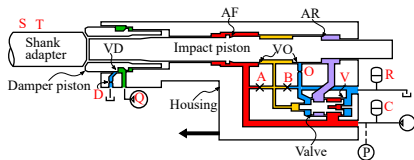
För att avgöra när en residual är skild från 0 behövs en tröskel.

- Perfekt modell $\Rightarrow J = \epsilon > 0$, brus och modellfel ger högre tröskel.
- Konstant/adaptiv tröskel? Tröskelnivå ger avvägning falsklarm/detekteringsförmåga.
- Om man tex. vet att man har bättre modell för statiska förlopp än i dynamiska passager \Rightarrow adaptiv tröskel

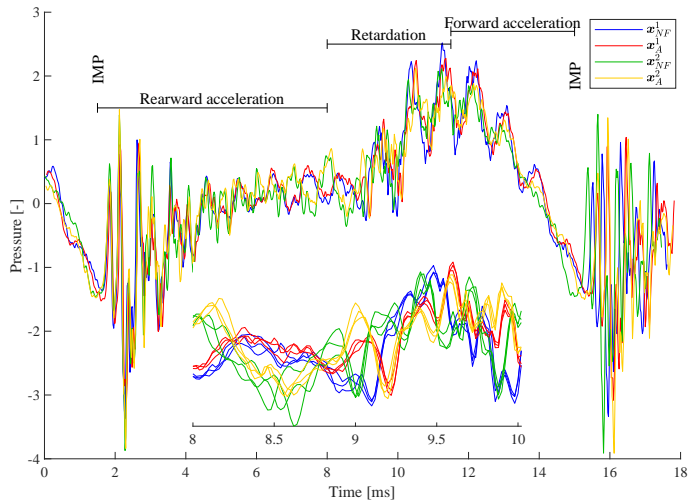
Uppmätta data från en ventil i luftsystemet i Gripen:



Anomalidetektion i borrrigg



Exempel på tryckmätning



—— Felisolering ——

- Hittills har vi bara betraktat detektion
- Hur kan vi isolera felande komponent, dvs. peka ut var i systemet vi misstänker fel
- Finns många metoder, men vi kommer i den här kursen fokusera på en metod från konsistensbaserad diagnos.

Felisolering, trippelredundans

Tre givare mäter samma storhet (trippelredundans):

$$y_1 = x$$

$$y_2 = x$$

$$y_3 = x$$

Tre residualer kan bildas genom parvis jämförelse av givarsignaler:

$$r_1 = y_1 - y_2$$

$$r_2 = y_1 - y_3$$

$$r_3 = y_2 - y_3$$

Alla är 0 då ekvationerna är uppfyllda, dvs. processen uppför sig som förväntat.

De tre residualerna reagerar olika på fel i givarna.

⇒ Isolationsmöjligheter

Låt F_i beteckna fel i givare y_i .

Residualerna

$$r_1 = y_1 - y_2$$

$$r_2 = y_1 - y_3$$

$$r_3 = y_2 - y_3$$

reagerar på felen enligt:

	NF	F_1	F_2	F_3
r_1	0	X	X	0
r_2	0	X	0	X
r_3	0	0	X	X

Test i larmar typiskt då absolutbeloppet av residual r_i är större än en given tröskel: $|r_i| > J_i$

	NF	F_1	F_2	F_3
r_1	0	X	X	0
r_2	0	X	0	X
r_3	0	0	X	X

Antag att test 1 och 2 larmar.

$$|r_1| > J_1 \Rightarrow F_1 \text{ eller } F_2$$

$$|r_2| > J_2 \Rightarrow F_1 \text{ eller } F_3$$

Antag enkelfel.

Slutsatsen i det här fallet blir att den enda möjliga moden är F_1 , dvs F_1 är den enda diagnosen.

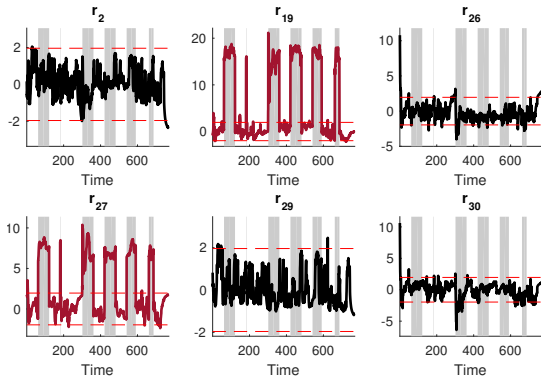
Isoleringsstrategin kan illustreras med en tabell där X på plats i, j betyder att fel j kan påverka residual i .

	NF	F_1	F_2	F_3
r_1	0	X	X	0
r_2	0	X	0	X
r_3	0	0	X	X

Vi drar **ingen slutsats** av att test **inte larmar**. Det kan vara OK men det kan också vara små fel som inte syns i residualerna.

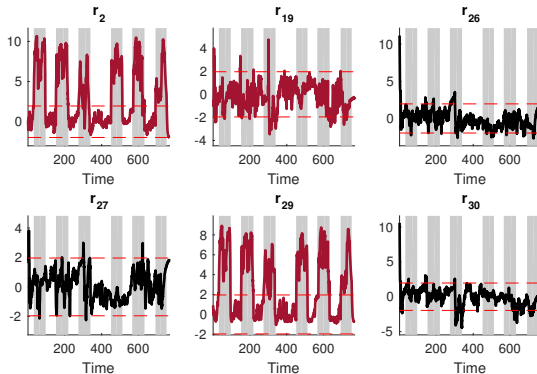
Om t ex test 1 **larmar** är det fel i givare 1 eller 2, dvs $F_1 \vee F_2$.

Felisoleringsexempel – fel i tryckgivare



	f_{WAF}	f_{pim}	f_{pic}	f_{Tic}
r_2	X	X		
r_{19}	X		X	
r_{26}		X		X
r_{27}		X	X	
r_{29}	X			
r_{30}				X

Felisoleringsexempel – fel i massflödesgivare



	f_{WAF}	f_{pim}	f_{pic}	f_{Tic}
r_2	X	X		
r_{19}	X		X	
r_{26}		X		X
r_{27}		X	X	
r_{29}	X			
r_{30}				X

—— Felmodellering ——

För att kunna isolera fel så är det lämpligt att modellera hur en felaktig process fungerar.

Många olika typer av modeller kan tänkas:

- Signaler
- Förändringar i konstanta parametrar
- Abrupta förändringar
- Intermittenta fel

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y_1 = C_1x$$

$$y_2 = C_2x$$

Additivt fel på sensor 1 f_1 och på styrsignalen u betecknas med f_2 blir

$$\dot{x} = Ax + B(u + f_2)$$

$$y_1 = C_1x + f_1$$

$$y_2 = C_2x$$

Här är det viktigt att skilja på **sensorsignalen** och den **variabel** som man vill mäta.

Förändringar i konstanta parametrar

Typiska fel som modelleras på detta sätt: förändringar i fysikaliska konstanter, förstärkningsfel, offsets (tex bias i sensorer), ändringar i varianser,

Exempel: förstärkare

$$y(t) = gu(t) + v(t) \quad v(t) \sim N(0, \sigma^2)$$

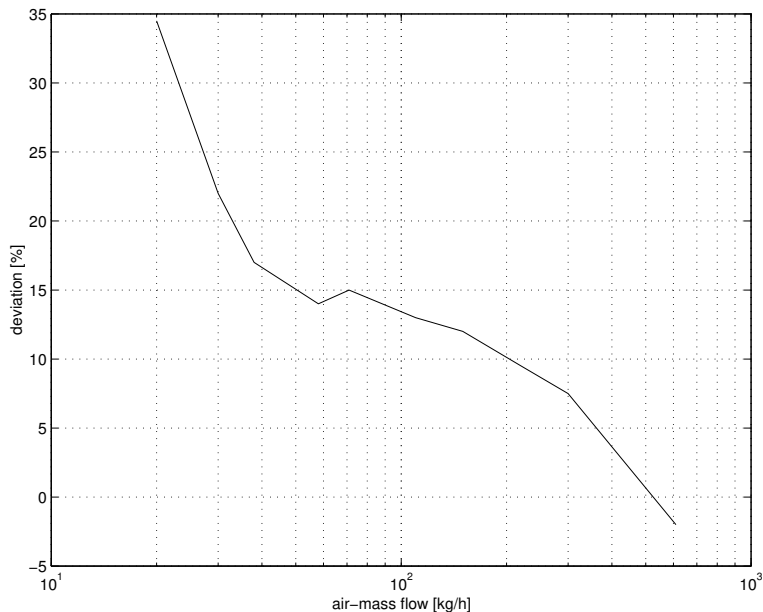
$$g = \begin{cases} 1 & \text{felfritt} \\ c \neq 1 & \text{fel} \end{cases}, \quad \sigma = \begin{cases} 1 & \text{felfritt} \\ c \gg 1 & \text{fel} \end{cases}$$

Roterande massa: (μ friktionskoefficient)

$$J\dot{\omega} = -\mu\omega + M$$

$$\mu = \begin{cases} 1 & \text{felfritt} \\ c \gg 1 & \text{fel} \end{cases}$$

Felaktig massflödesensor i Mercedes E-klass



—— Procedur för design av diagnossystem ——

- ❶ Ta fram krav på vilka fel som måste diagnostiseras. Kan baseras på lagkrav, säkerhetskrav, ... (FMEA)
- ❷ Bygg en modell av processen för det felfria fallet
- ❸ Bygg felmodeller, dvs. utöka modellen för det felfria systemet med modeller för hur de olika felen påverkar systemet.
- ❹ Med hjälp av modellen, konstruera residualer/teststorheter som gör att felen kan detekteras och isoleras. Detta är ett svårt steg och ämnet för den här kursen.
- ❺ Testa systemet i simuleringsmiljö och, om möjligt, i verkligheten.
- ❻ Implementera

Denna kurs behandlar steg 4 (och i viss mån steg 1 och 3). Notera att de andra stegen kan vara minst lika svåra!

Givet: modell för det felfria fallet

- 1 Definiera beteendemoder
- 2 Definiera felmodeller
- 3 Analysera modellredundans
- 4 Skapa residualer/teststorheter
- 5 Bestäm trösklar
- 6 Avgör testens felkänslighet och skapa beslutsstrukturen.

Givet: modell för det felfria fallet

$$x = u$$

$$y_1 = 2x$$

$$y_2 = 4x + 1$$

där u är en känd styrsignal, y_i två kända givaresignaler och x är en okänd variabel.

Det kan bli fel på ställdonet och de två givarna.

Uppgift: Designa ett diagnossystem för enkelfel.

Felfri modell:

$$x = u$$

$$y_1 = 2x$$

$$y_2 = 4x + 1$$

Det kan bli fel på ställdonet och de två givarna.

Inför beteckningar för felfri mod samt för enkelfel

NF: (No-Fault) varken givare eller ställdon är fel

F₁: fel på bara y₁

F₂: fel på bara y₂

F₃: fel på bara u

Design av diagnossystem - definiera felmodeller

Felfri modell:

$$x = u$$

$$y_1 = 2x$$

$$y_2 = 4x + 1$$

Modell med införda additiva felsignaler:

$$x = u + f_3$$

$$y_1 = 2x + f_1$$

$$y_2 = 4x + 1 + f_2$$

Notera:

- u den styrsignal som vi applicerar.
- $u + f_3$ indikerar den faktiska påverkan på systemet.

Beteendemoder:

NF:	No-fault	$f_i = 0$
F ₁ :	fel på bara y_1	$f_1 \neq 0, f_2 = f_3 = 0$
F ₂ :	fel på bara y_2	$f_2 \neq 0, f_1 = f_3 = 0$
F ₃ :	fel på bara u	$f_3 \neq 0, f_1 = f_2 = 0$

Design av diagnossystem - analysera modellredundans

- Sök redundans i modellen för felfritt beteende, dvs då $f_i = 0$.
- Det finns redundans, ty x kan beräknas på fler än ett sätt.

Felfri modell:

$$x = u \quad (1)$$

$$y_1 = 2x \quad (2)$$

$$y_2 = 4x + 1 \quad (3)$$

Eliminering av x ger t ex [konsistensrelationerna](#):

$$(1), (2) \Rightarrow 0 = y_1 - 2u$$

$$(1), (3) \Rightarrow 0 = y_2 - 4u - 1$$

Detta visar att den modellen för felfritt beteende har [statisk redundans](#).

Design av diagnossystem - residualer/teststorheter

Konsistensrelationerna ger residualerna:

$$r_1 = y_1 - 2u$$

$$r_2 = y_2 - 4u - 1$$

Residualernas felkänslighet kan beräknas genom att använda modellen

$$x = u + f_3$$

$$y_1 = 2x + f_1$$

$$y_2 = 4x + 1 + f_2$$

för att eliminera de kända variablerna i residualen som följer:

$$r_1 = y_1 - 2u = (2x + f_1) - 2(x - f_3) = f_1 + 2f_3$$

$$r_2 = y_2 - 4u - 1 = (4x + 1 + f_2) - 4(x - f_3) - 1 = f_2 + 4f_3$$

Detta kallas för den interna formen.

Antag att modellosäkerheter och brus gör att vi larmar om endast om beloppet av residualerna är större än tröskeln $J = 1$, dvs

$$\text{larm}_i = |r_i| > J$$

Beslutsstrukturen blir för residualerna

$$r_1 = f_1 + 2f_3$$

$$r_2 = f_2 + 4f_3$$

blir

	NF	F_1	F_2	F_3
r_1	0	X	0	X
r_2	0	0	X	X

	NF	F_1	F_2	F_3
r_1	0	X	0	X
r_2	0	0	X	X

Om r_1 inte larmar, kan det vara frestande att dra slutsatsen det inte är F_1 eller F_3 , dvs det måste vara NF eller F_2 .

Men detta är ofta ingen bra slutsats

Ex: Om r_1 inte larmar så är vad som helst vara möjligt, t ex fel F_1 :

$$F_1: f_1 = 0.5, f_2 = f_3 = 0$$

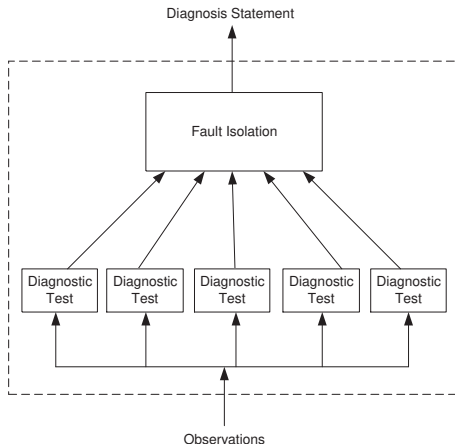
$$\Rightarrow |r_1| = 0.5 < 1$$

$$\Rightarrow \text{inget larm}$$

Beräkna diagnoser givet observationer

Givet en observation:

- 1 Beräkna residualerna r_i
- 2 Beräkna testresultaten genom att tröskla residualerna, $\text{alarm}_i = |r_i| > J_i$
- 3 Använd isoleringslogiken för att beräkna diagnoserna



Hur reagerar vårt diagnossystem på ett injicerat fel?

Antag att vi styr systemet med insignalen $u = 0$ och att vi injicerar ett fel i aktuatoren (F_3) så att $f_3 = 1$.

$$x = u + f_3 = 0 + 1 = 1$$

Givarna visar:

$$y_1 = 2x = 2$$

$$y_2 = 4x + 1 = 5$$

Insignalerna till diagnossystemet blir observationerna:

$$u = 0, y_1 = 2, y_2 = 5$$

Hur reagerar vårt diagnossystem på ett injicerat fel?

Antag att vi styr systemet med insignalen $u = 0$ och att vi injicerar ett fel i aktuatoren (F_3) så att $f_3 = 1$.

Insignalerna till diagnossystemet blir observationerna:

$$u = 0, y_1 = 2, y_2 = 5$$

Det ger residualerna och larmen:

$$|r_1| = |y_1 - 2u| = 2 > 1 \Rightarrow \text{larm}$$

$$|r_2| = |y_2 - 4u - 1| = 4 > 1 \Rightarrow \text{larm}$$

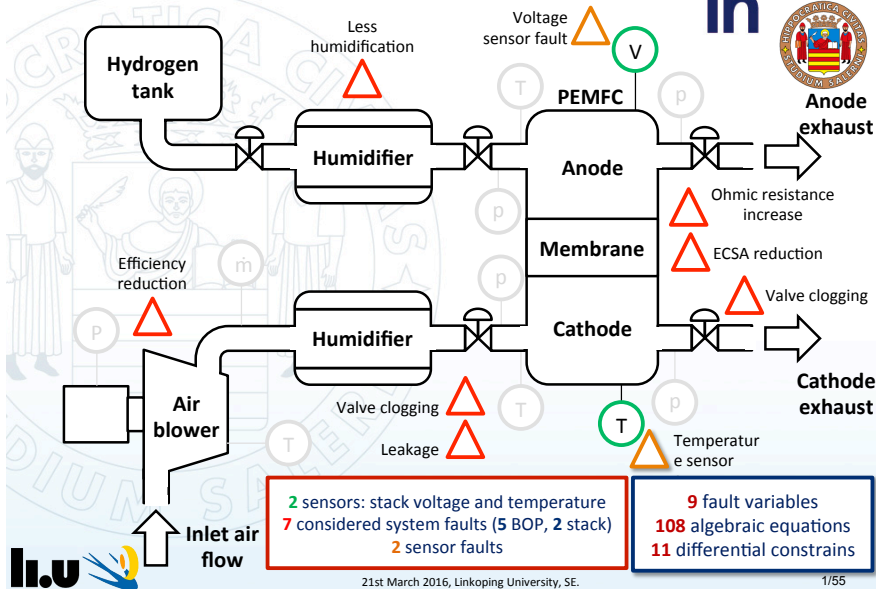
Enligt beslutsstrukturen blir diagnosen:

	NF	F_1	F_2	F_3			utfall	
r_1	0	X	0	X	+	r_1	1	$\Rightarrow F_3$ är enda diagnosen
r_2	0	0	X	X		r_2	1	

Diagnossystemet både detekterar och isolerar felet korrekt.

—— Ett lite större system – bränslecell ——

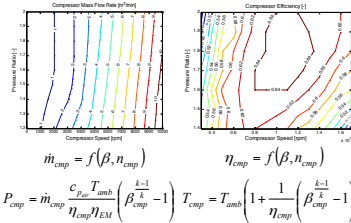
PEM Fuel Cell System



PEMFC system model



Air Blower



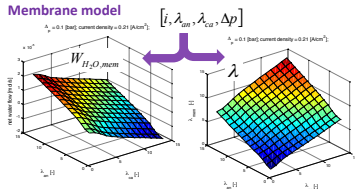
Humidifiers

$$\dot{m}_{H_2O,j}^{inj} = \frac{m_{H_2O,j}^{des}}{\tau_{inj}} \quad m_{H_2O,j}^{des} = \frac{V_j M_{H_2O}}{RT_j} (RH_j^{des} - RH_j)$$

Nozzles

$$W_{y,jm} + \text{const} = \begin{cases} \frac{C_D A_N P_{y,exh}}{\sqrt{R_y T_{y,exh}}} \left(\frac{p_y}{p_{y,exh}} \right)^{\gamma/\gamma-1} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_y}{p_{y,exh}} \right)^{\gamma/\gamma-1} \right]} & \text{for } \frac{p_y}{p_{y,exh}} > \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^{\gamma/\gamma-1} \\ \frac{C_D A_N P_{y,exh}}{\sqrt{R_y T_{y,exh}}} \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma+1/2(\gamma-1)} & \text{for } \frac{p_y}{p_{y,exh}} \leq \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^{\gamma/\gamma-1} \end{cases}$$

Membrane model



Electrochemical model

$$E = -\frac{\Delta \bar{G}_f [T_{fc}]}{2F} + RT_{fc} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad E_{act} = \frac{\bar{R} T_{fc}}{F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad i_0 = i_{p_1}^0 ECSA$$

$$E_{ohm} = \frac{l_{mem}}{\sigma_{mem}} i \quad \sigma_{mem} = (0.005139\lambda - 0.00326) \exp \left(350 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}} \right) \right)$$

$$E_{diff} = \tilde{\omega} T_{jk} i \ln \left(\frac{i_{lim}}{i_{lim} - i} \right) \quad i_{lim} = -\frac{2FD_{O_2N_2} \epsilon_{eff}^{1.5}}{V_{m'tca}} \left(\frac{T_{fc}}{273} \right)^{0.823} \ln(1 - x_{O_2,ca})$$

3 states at cathode side
2 states at anode side
3 states at cathode s.m.
2 states at anode s.m.

Mass balance $i=[O_2, N_2, H_2, H_2O]$

$$\frac{dm_{i,j}}{dt} = \dot{m}_{in,i,j} - \dot{m}_{out,i,j} \pm \dot{m}_{gen/con,i,j}$$

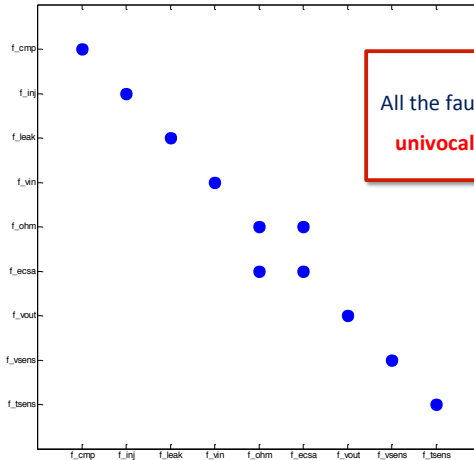
Energy balance 1 state (temperature)

$$K_{FC} \frac{dT_{FC}}{dt} = \dot{E}_{in}(T_{in}) - \dot{E}_{out}(T_{FC}) - VI - Q$$

Isolability Analysis



Isolability matrix for 'PEM Fuel Cell, sensed'



All the faults but the two of the stack can be
univocally isolated with Mixed Causality

- Modellbaserad diagnos är att med hjälp av observationer och en matematisk modell av en process dra slutsatser om eventuella fel som kan finnas i systemet.
- Lite grovt kan man säga; Diagnossystem:

$$\text{alla diagnoser} = f(\text{data})$$

- Ett av målen med den här kursen: "krama" ut så mycket information som möjligt ur modellen och kondensera in i funktionen $f(\cdot)$ ovan.
- Enkelt uttryckt: ett diagnossystem består av ett antal detektorer med specifika egenskaper följt av felisoleringslogik

TSFS06 Diagnos och övervakning, 6hp
Föreläsning 1 - Kursformalia och introduktion

Erik Frisk

Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet
erik.frisk@liu.se

2022-03-29