

# Modellbaserad diagnos av tekniska system

Slutrapport

Erik Frisk

## Projektet och dess resultat

Projektet har studerat grundläggande frågor inom området *modellbaserad diagnos*. Teknisk modellbaserad diagnos kan sägas vara att givet observationer, beräkna vilka komponentfel i en process som är konsistenta med det observerade beteendet och tillgänglig kunskap om den övervakade processen. I projektet så har fokus legat vid det viktiga delsteget att generera felkänsliga signaler, residualer, med vars hjälp diagnossystemet kan dra slutsatser och eventuellt vidta åtgärder. En grundläggande strävan i projektet har varit att utöka de klasser av modeller som på ett systematiskt sätt kan utnyttjas för diagnos.

En intressant klass, som är en naturlig modellklass då moderna objektorienterade modelleringsspråk som exempelvis Modelica används, är så kallade differential-algebraiska modeller. Differential-algebraiska modeller har en rad egenskaper som man ej finner hos de, i reglertekniska sammanhang, mer vanliga ordinära differentialekvationerna. I de två arbetena [J1, J2] har teori och konstruktiva metoder utvecklats för att generera residualer baserat på olinjära differential-algebraiska modeller. En grundläggande egenskap hos olinjära differential-algebraiska ekvationer är att man inte kan förvänta sig att fullständigt analysera dess egenskaper eftersom det kräver fullständig kunskap om lösningarna till de underliggande differential-ekvationerna. Ett sätt att ändå analysera de speciella problem som är relaterade till differential-algebraiska ekvationer är att hitta uttömmande lösningar för en klass av system där det faktiskt går att räkna ut lösningarna. Detta är gjort i [J3] där linjära differential-algebraiska system analyseras på ett grundläggande sätt. Resultaten visar även på en generell designmetod som är användbar för förståelsen hur man bör angripa även olinjära problem.

En grundläggande begränsning för modellbaserade diagnossystem är den osäkerhet som alltid finns i de modeller som diagnossystemet baseras på. I arbetet [J4] tas en metod fram som är optimalt robust mot strukturerad modellosäkerhet.

En långsiktig önskan är att kunna utveckla datorverktyg som kan stödja en ingenjör vid konstruktion och analys av diagnosystem, helst utan krav på djup specialistkompetens inom diagnos. För att detta ska vara möjligt så krävs att verktygen har en hög grad av automation och att modeller kan analyseras snabbt, effektivt, och pålitligt. Inom detta område är så kallade *strukturella metoder* ett användbart verktyg. Inom detta område ger resultaten i [J5] teori och mjukvara som automatiskt kan analysera var man bör placera sensorer i en process för att kunna uppnå en given diagnostiserbarhetsprestanda. Resultaten har visat sig direkt användbara på modeller skrivna i språk som Simulink och Modelica, och programvara har gjorts tillgänglig via <http://www.fs.isy.liu.se/Software/>.

För att komplettera ovanstående nådda resultat, som främst är av teoretisk karaktär, har ett antal studier gjorts där metodik och teori appliceras inom olika motorrelaterade applikationer [J6, J7, J8].

## Examina och befordringar inom projektet

Projektet har bidragit till forskningstid för projektledaren, Erik Frisk, som under projektets gång blivit docent och senare anställts som universitetslektor vid Institutionen för Systemteknik.

Under projektets gång har projektledaren även fungerat som bihandledare för en doktorand Jonas Bitéus som disputerade med avhandlingen "*Fault Isolation in Distributed Embedded Systems*" under 2007 samt huvudhandledare för Erik Höckerdal, som försvarade sin licentiatavhandling "*Observer Design and Model Augmentation for Bias Compensation with Engine Applications*" under 2008.

## Examensarbeten inom projektet

Nedan är en sammanställning över de examensarbeten som genomförts inom ramen för projektet. Listan innehåller de examensarbeten som jag examinerat och/eller handlett vars ämne ansluter till projektets vetenskapliga innehåll.

- "*Testing degradation in a complex vehicle electrical system using Hardware-In-the-Loop*". Johannes Bergkvist (2009).
- "*Model Based Diagnosis of the Intake Manifold Pressure on a Diesel Engine*". Christoffer Bergström, and Gunnar Höckerdal (2009).
- "*Air leakage diagnosis in heavy duty truck engines with EGR and VGT*". Josef Dagsson, Samuel Nissilä Källström (2009).
- "*Model-based Diagnosis of a Satellite Electrical Power System with RODON*". Olle Isaksson (2009).
- "*Fuel Level Estimation for Heavy Vehicles Using a Kalman Filter*". Peter Wallebäck (2008).
- "*Modelling for diagnosis in Modelica - implementation and analysis*". Olof Bäck (2008).
- "*Diagnosis of a Truck Engine using Nonlinear Filtering Techniques*". Fredrik Nilsson (2007).
- "*Structural Algorithms in RODON with a prototype implementation in Java*". Oskar Särholm (2007).
- "*Evaluation of a diagnostic tool for use during system development and operations*". Patrik Sköld, and Daniel Andersson (2007).
- "*Design and Evaluation of an Automatically Generated Diagnosis System*". Joakim Hansen, and Jens Molin (2006).

- ”*Development of Methods for Automatic Design of Residual Generators*”. Carl Svärd, and Henrik Wassén (2006).
- ”*Decision Support System for Fault Isolation of JAS 39 Gripen - Development and Implementation*”. Anders Holmberg, and Per-Erik Eriksson (2006).
- ”*Gas flow observer for a Scania diesel engine with VGT and EGR*”. Andreas Jerhammar, and Erik Höckerdal (2006).
- ”*Distributed Fault Diagnosis for Networked Embedded Systems*”. Dan Hallgren, and Håkan Skog (2005).
- ”*Gas flow observer for Diesel Engines with EGR*”. Fredrik Swartling (2005).
- ”*Structural Algorithms for Diagnostic System Design Using Simulink Models*”. Lars Eriksson (2004).
- ”*Diagnosis System Conceptual Design Utilizing Structural Methods - Applied on a UAV's Fuel System*”. Tobias Axelsson (2004).
- ”*Feldetektering för diagnos med differentialgeometriska metoder - en implementation i Mathematica*”. Anna Önnergren (2004).
- ”*A Comparative Study of Two Structural Methods for Fault Isolability Analysis*”. Linda Rattfält (2004).

## Finansiering

Erik Frisk har delvis finansierats av projektet.

## Samarbete och industriella kontakter

Under projektets gång har samarbete främst förts med Scania, Siemens Industrial Turbomachinery, industripartners inom ett angränsande PFF/VINNOVA-projekt Gröna Bilen 2 (GM Powertrain, BAE/Hägglunds, Volvo Powertrain, Volvo Cars), samt UptimeSolutions (före detta Sörman Information).

Kontakterna med Scania har främst handlat om att studera detektionsproblem samt utveckla felisoleringsalgoritmer för distribuerade styrsystem. Resultat har överförts via ett antal examensarbeten, min handledning av Jonas Bitéus (senare anställd av Scania) vars doktorandprojekt studerade distribuerad diagnos, samt handledning av Erik Höckerdal, industridoktorand på Scania. Arbetet med Jonas Bitéus resulterade även i en patentansökan tillsammans med Scania.

Kontakter med Siemens Industrial Turbomachinery resulterade i en forskningsansökan, som också beviljades, och resulterade i ett pågående doktorandprojekt om modellbaserad övervakning av gasturbiner.

Estimering är ett område som är närbesläktat med feldetektering och i och med att detektionsproblem inom förbränningsmotorer studerats så har samarbete förts tillsammans med Lars Eriksson i CENIIT-projektet ”*Modeling and control of turbocharged combustion engines*”. Det finns också gemensam, pågående, verksamhet med Fredrik Heintz och det nystartade CENIIT-projektet ”*Stream-Based Reasoning Grounded Through Sensing*”.

## Ny forskargrupp

På Fordonssystem har vi en aktiv och produktiv forskningsverksamhet inom modellbaserad diagnos. Gruppen har under projekttiden bestått av ca. 5 doktorander och 4 seniora forskare. CENIIT-anslaget har, speciellt i och med dess längd på 6 år, bidragit till att gruppens verksamhet har kunnat fortskrida och utvecklas.

## Publikationer och patent

Nedan är en förteckning över de vetenskapliga arbeten som publicerats inom projektets ramar. Listan innehåller de publikationer vars ämne ansluter till projektets vetenskapliga innehåll. Utöver publikationerna nedan så har patentansökning (Europa och USA) skickats in tillsammans med Scania.

### *Tidsskriftsartiklar*

- [J1] Erik Frisk and Jan Åslund. Lowering orders of derivatives in non-linear residual generation using realization theory. *Automatica*, 41(10):1799–1807, 2005.
- [J2] Jan Åslund and Erik Frisk. An observer for non-linear differential-algebraic systems. *Automatica*, 42(6):959–965, 2006.
- [J3] Mattias Nyberg and Erik Frisk. Residual generation for fault diagnosis of systems described by linear differential-algebraic equations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(12):1995–2000, 2006.
- [J4] Erik Frisk and Lars Nielsen. Robust residual generation for diagnosis including a reference model for residual behavior. *Automatica*, 42(3):437–445, 2006.
- [J5] Mattias Krysander and Erik Frisk. Sensor placement for fault diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 38(6):1398–1410, 2008.
- [J6] Erik Höckerdal, Erik Frisk, and Lars Eriksson. Observer design and model augmentation for bias compensation with a truck engine application. *Control Engineering Practice*, 17(3):408–417, 2009.
- [J7] Ylva Nilsson, Erik Frisk, and Lars Nielsen. Weak knock characterisation and detection for knock control. *Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(1):107–129, 2009.
- [J8] Mattias Krysander and Erik Frisk. Leakage detection in a fuel evaporative system. *Control Engineering Practice*, 17(11):1273–1279, 2009.
- [J9] Dilek Dustegör, Erik Frisk, Vincent Coquempot, Mattias Krysander, and Marcel Staroswiecki. Structural analysis of fault isolability in the DAMADICS benchmark. *Control Engineering Practice*, 14(6):597–608, 2006.

- [J10] Jan Åslund, Jonas Biteus, Erik Frisk, Mattias Krysander, and Lars Nielsen. Safety analysis of autonomous systems by extended fault tree analysis. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 21(2-3):287–298, 2007.
- [J11] Jonas Biteus, Mattias Nyberg, and Erik Frisk. An algorithm for computing the diagnoses with minimal cardinality in a distributed system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(2):269–276, 2008.
- [J12] Erik Höckerdal, Lars Eriksson, and Erik Frisk. Air mass-flow measurement and estimation in diesel engines equipped with EGR and VGT. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.*, 1(1):393–402, 2008.
- [J13] Erik Frisk, Mattias Krysander, and Jan Åslund. Sensor placement for fault isolation in linear differential-algebraic systems. *Automatica*, 45(2):364–371, 2009.
- [J14] Jonas Biteus, Mattias Nyberg, Erik Frisk, and Jan Åslund. Determining the fault status of a component and its readiness, with a distributed automotive application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(3):363–373, 2009.
- [J15] Mattias Krysander, Fredrik Heintz, Jacob Roll, and Erik Frisk. FlexDx: A reconfigurable diagnosis framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Accepted for publication.

### ***Konferensartiklar***

- [C1] Jan Åslund and Erik Frisk. Structural analysis for fault diagnosis of models with constraints. In *Proceedings of IFAC Safeprocess'09*, pages 384–389, Barcelona, Spain, 2009.
- [C2] Albert Rosich, Erik Frisk, Jan Åslund, Ramon Sarrate, and Fatiha Nejari. Sensor placement for fault diagnosis based on casual computations. In *Proceedings of IFAC Safeprocess'09*, pages 402–407, Barcelona, Spain, 2009.
- [C3] Mattias Krysander, Fredrik Heintz, Jacob Roll, and Erik Frisk. Dynamic test selection for reconfigurable diagnosis. 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico, 2008.
- [C4] Fredrik Heintz, Mattias Krysander, Jacob Roll, and Erik Frisk. FlexDx: A reconfigurable diagnosis framework. 19th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-08), Sydney, Australia, 2008.
- [C5] Erik Höckerdal, Lars Eriksson, and Erik Frisk. Air mass-flow measurement and estimation in diesel engines equipped with EGR and VGT. In *Electronic Engine Controls*, number 2008-01-0992 in SAE Technical paper series SP-2159, SAE World Congress, Detroit, USA, 2008.
- [C6] Esteban R. Gelso, Erik Frisk, and Joaquim Armengol. Robust fault detection using consistency techniques with application to an automotive engine. IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.

- [C7] Erik Frisk and Mattias Krysander. Leakage detection in a fuel evaporative system. IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
- [C8] Erik Höckerdal, Erik Frisk, and Lars Eriksson. Observer design and model augmentation for bias compensation applied to an engine. IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
- [C9] Fredrik Gustafsson, Jan Åslund, Erik Frisk, Mattias Krysander, and Lars Nielsen. On threshold optimization in fault tolerant systems. IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
- [C10] Mattias Krysander, Erik Frisk, and Jan Åslund. Sensor placement for fault isolation in linear differential-algebraic systems. IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
- [C11] Erik Frisk and Mattias Krysander. Sensor placement for maximum fault isolability. 18th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-07), pages 106–113, Nashville, USA, 2007.
- [C12] Erik Frisk, Mattias Krysander, Mattias Nyberg, and Jan Åslund. A toolbox for design of diagnosis systems. In *Proceedings of IFAC Safeprocess'06*, Beijing, China, 2006.
- [C13] Jonas Biteus, Erik Frisk, and Mattias Nyberg. Condensed representation of global diagnoses with minimal cardinality in local diagnoses. 17th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-06), Spain, 2006.
- [C14] Jonas Biteus, Mattias Nyberg, Erik Frisk, and Jan Åslund. Determining a component's fault status and the status' readiness. In *Proceedings of IFAC Safeprocess'06*, Beijing, China, 2006.
- [C15] Per Andersson, Erik Frisk, and Lars Eriksson. Sensor selection for observer feedback in turbocharged spark ignited engines. IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [C16] Ylva Nilsson and Erik Frisk. Detecting knock in spark ignited engines. IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [C17] Erik Frisk and Jan Åslund. An observer for semi-explicit differential-algebraic systems. IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [C18] Jan Åslund and Erik Frisk. Lowering orders of derivatives in non-linear residual generation. IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [C19] Jan Åslund, Jonas Biteus, Erik Frisk, Mattias Krysander, and Lars Nielsen. A systematic inclusion of diagnosis performance in fault tree analysis. IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [C20] Antoine Berton, Erik Frisk, and Mattias Nyberg. Improving diagnosis performances on a truck engine making use of statistical charts. IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, Salerno, Italy, 2004.