

# Reglering av Energisystem

Karl Johan Åström  
Lunds Tekniska Högskola

- ▶ Professor på LTH 1965
- ▶ Lund med omnejd på 60-talet
  - Samarbetespartners: universitetet, företag
  - Ingen forskningspark!!!
  - Företag: Alfa Laval, Sydkraft, Tetrapak
- ▶ Klimatreglering av byggnader - Bo Adamson Arkitektur, Byggforskningsrådet. TourAndersson, Schneider Electric
- ▶ Kraftsystem - Mångårigt samarbete med Sydkraft AB
- ▶ Några resultat
  - 12 PhD, 2 Lic, många exjobb
  - Nya företag startade av forskare i projekten
  - Nytt modelleringspråk Dymola, Modelica
  - Ny internationell organisation - Modelica.org
- ▶ Sture inblandad i många av projekten

# Klimatreglering av byggnader 1968-1978

Samarbete med Prof Bo Adamson arkitektur, stött av Byggforskningsrådet  
Datorstyrning över nätet från LTH

- ▶ Temperaturen i flera kommersiella byggnader i Skåne reglerades från vår dator PDP15
- ▶ Hemslöjdade modem
- ▶ IPCL - Interactive Programming Control Language
- ▶ Enkelt att ändra reglering under drift



Jensen & Åström 1993

Industrisamarbeten

- ▶ Billman-Regulator, Honeywell, Landis&Gyr, Tour& Anderssson  
Consultants: Orrje & Co, Skandiakonsult, Teorells.
- ▶ Kurser, projekt, avhandlingar och xjobb i samarbete med industrin + mycket bra nätverk
- ▶ Carl Olin Elektronik AB Lund, Data General Nova 32 kbyte, 100 AI, 100 DI Lars Jensen lånades ut för produktutveckling IPCL
- ▶ 1975 - 1978 TA acquired Carl Olin (TA later acquired by Schneider)
- ▶ Uppgraderad variant DDC 6 marknadsförs av Schneider sedan 1978

## Långvarigt samarbete med Sydkraft AB 1965 —

- ▶ Långsiktigt samarbete med Sydkraft - Anders Björgerd
- ▶ Många olika problem
  - Kärnkraft, modellering, domnivåregerling
  - Ångpannor modellering, domnivåregerling
  - Vindkraft: Maglarp - United Technology, Sven Erik Mattsson
- ▶ Min första doktorand - Karl Eklund 1965 PhD 1971
  - Unika experiment på Öresundsverket
- ▶ Reglering av domnivå 1985-2003
  - Mångårigt samarbete med Rodney Bell McGuire University Australien
  - Stor nytta av Eklunds mätningar på Öresundsverket
  - Bra modeller är nyckeln
- ▶ 9 doktorsavhandlingar, 2 licavhandling, många examensarbeten
- ▶ Medlem av Sydkrafts forskningsstiftelse 1992-1998, Elforsk 1993-98

Stort tack för mångårigt mycket givande samarbete!!

## Sture

- ▶ Doktorander traditionellt rekryterade bland egna elever
- ▶ En annorlunda doktorand civ. ing. Chalmers ej internrekryterad
- ▶ En suverän medarbetare – “superb citizen”
- ▶ Stark praktisk anknytning - en riktig ingenjör
- ▶ Energisk, noggrann, redig och produktiv
- ▶ Man behöver ej kolla något som Sture gjort
- ▶ LTH, Sydkraft, Gothia Power
- ▶ Industrial Electrical Engineering and Automation (IEA Gustaf!)
- ▶ Impact on Modelica



# Tekn Lic 1972 Docent 1985

A State Space Model of a Multimachine Power System Lindahl Sture TFRT-3037, 1971

Optimal Control of a Multimachine Power System Model Lindahl Sture. TFRT-3043, 1972

Systemteknik Projektarbeten 1972. : Ångpannereglering - Kraftsystem - Produktionsplanering Wittenmark Björn; Lindahl Sture and Sternby, Jan. TFRT-7019, 1972

Identification of Power Generator Dynamics from Normal Operating Data Lindahl, Sture and Ljung, Lennart. TFRT-7018, 1972

A Design Scheme for Incomplete State or Output Feedback with Applications to Boiler and Power System Control Bengtsson, Gunnar and Lindahl, Sture. TFRT-7024, 1972

Optimal Control of a Multimachine Power System Model. Lindahl, Sture. TFRT-3043, 1972

Möte med representanter för Ångpanneföreningen 20 februari och 14 mars 1973 Jensen, Lars; Lindahl, Sture; Ljung, Lennart ; Åström, Karl Johan and Glad, Torkel. TFRT-7053 1973

Estimation of Power Generator Dynamics from Normal Operating Data. Ljung, Lennart and Lindahl, Sture (1973) Technical Reports 7336(C) 1973

Sammanträffande med representanter för kraftindustrin med anledning av projektet 'Koordinerad spännings- och turbinregulator'. Lindahl, Sture TFRT-7058, 1973.

A design scheme for incomplete state or output feedback with applications to boiler and power system control Bengtsson, Gunnar and Lindahl, Sture. Automatica 10(1). p.15-30, 1974.

On the Solution of the Stationary Riccati Equation by Integration : Choice of Steplength Lindahl, Sture. TFRT-3115, 1974.

State Estimation in Power Networks IV : Convergence Results Ljung, Lennart and Lindahl, Sture. TFRT-704, 1974

Convergence properties of a method for state estimation in power systems Ljung, Lennart and Lindahl, Sture. International Journal of Control 22(1) p.113-118, 1975.

[A Non-linear Drum-Boiler Turbine Model. Lindahl, Sture. TFRT-3132, 1976](#)

[Design and Simulation of a Coordinated Drum Boiler-Turbine Controller Lindahl, Sture. TFRT-3143, 1976 \(licential thesis\)](#)

# Sture blir Docent 1985

Docentföreläsning den 22 mars 1985

Frekvensreglering i det Nordiska kraftsystemet

Antagen som oavlönad docent 29 april 1985

A fast tripping protection scheme for EHV transmission lines Lindahl, Sture LU ; Saha, M. and Wikström, K. 9th National Power System Conference (NPSC '96) 1996.

Adaptive Protection of Series Compensated Lines Lindahl, Sture and Wikström, K. Southern African Conference on System Protection. 1996

Problems and Solutions for Microprocessor Protection of Series Compensated Lines Lindahl, Sture LU ; Saha, M. ; Novosel, D. and Phadke, A.G. 6th International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434) 1997

A new Approach to fast Distance Protection with Adaptive Features Lindahl, Sture LU ; Saha, M. and Wikström, G. 6th International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434) 1997

Operational Experience of Load Shedding and new Operational Requirements on Frequency Relays Lindahl, Sture LU ; Runvik, G. and Stranne, G. 6th International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434) 1997

Integration of protection, control and monitoring functions Lindahl, Sture and Zakonjsek, J. 11th International Conference on Power System Protection. 1998

Protection of modern generators Lindahl, Sture. 11th International Conference on Power System Protection, 1998

Powerformer™: A giant Step in Power Plant Engineering Lindahl, Sture LU ; Owman, F. ; Leijon, M. ; Sörqvist, T. ; Parkegren, C. and Karlsson, T. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. 1999

Development and Commissioning of Powerformer™ - A High-Voltage Synchronous Machine Lindahl, Sture LU ; Miller, R. and Parkegren, C. 66th Annual International Conference of Doble Clients 1999

Powerformer™: Transformerless Power Generation Lindahl, Sture LU ; Lima, P.G. ; Karlsson, T. ; Hernnäs, B. ; Parkegren, C. ; Leijon, M. and Owman, F. (1999) SNPTEE '99

High Voltage Cables in a new Class of Generators - Powerformer™ Leijon, M. ; Lindahl, Sture LU and Gertmar, Lars LU. NORDIS '99 1999

Powerformer™ - A High-Voltage Synchronous Machine Lindahl, Sture. 4th National CIGRÉ Conference. 1999

Powerformer for Refurbishment of Hydropower Plants Lindahl, Sture (2000) Waterpower XII Contribution to conference

Electrical Design Considerations in Powerformer™ Lindahl, Sture; Hernnäs, B. ; Hjärne, S. ; Sörqvist, T. ; Tråskman, O. and Parkegren, C. (2000) CEPSI 2000 Contribution to conference › Paper, not in proceeding Mark Powerformer™ - The prototype and beyond Lindahl, Sture LU ; Leijon, M. ; Owman, F. ; Johansson, S. ; Karlsson, T. ; Parkegren, C. and Thorén, S. (2000) IEEE/PES Winter Meeting Contribution to conference

Generators Connected Directly to High Voltage Network Lindahl, Sture LU ; Leijon, M. ; Srivastava, K. ; Berggren, B. and Frankén, B. (2000) 3rd Int. Research and Development Conf. of Central Board of Irrigation and Power Contribution to conference

Powerformer™ - Experiences from the Application of Extruder Solid Dielectric Cables in the Stator Winding of Rotating Machines Lindahl, Sture LU ; Leijon, M. ; Johansson, S. ; Owman, F. ; Alfredsson, S. ; Karlsson, T. ; Parkegren, C. and Thorén, S. (2000) IEEE/PES Winter Meeting

Environmental assessment of Powerformer™ - Model for economic evaluation of emissions to air Lindahl, Sture LU ; Imrell, A.-M. ; Ravemark, D. ; Hellström, B.O. and Owman, F. (2000) 8th Int. Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machines (ISROMAC-8)

Protection of High-Voltage Generators Connected Directly to the Transmission Network Lindahl, G. and Lindahl, Sture (2001) IEEE PSRC

Verification of Governor Response During Normal Operation Lindahl, Sture (2002) IEEE/PES Summer Meeting

Drift av kärnkraftverken i Simpevarp vid onormal spänning och frekvens, Fas 1 Lindahl, Sture and Samuelsson, Olof (2002) In TEIE

rif av kärnkraftverken i Simpevarp vid onormal spänning och frekvens, Fas 2A Lindahl, Sture and Samuelsson, Olof (2002)

Automatic Determination of Parameters in Dynamic Load Models from Normal Operation Data Romero, Ines; Samuelsson, Olof and Lindahl, Sture (2003) 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting 3. p.1375-1378

Influence of normalization in dynamic reactive load models Navarro, I R ; Samuelsson, Olof and Lindahl, Sture (2003) In IEEE Transactions on Power Systems 18(2). p.972-973

Off-line analysis of the load response during large voltage variations Navarro, I ; Lindahl, Sture and Samuelsson, Olof (2004) 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America p.230-235

Reliability of Protection Systems - Operational Experiences 1976-2002 Johannesson, T ; Roos, Fredrik and Lindahl, Sture (2004) 8th International Conference on Development in Power System Protection 1. p.303-306

Distribution System Component Failure Rates and Repair Times - An Overview Roos, Fredrik and Lindahl, Sture (2004) Nordic Distribution and Asset Management Conference

Geomagnetic storm of 29-31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system Pulkkinen, A ; Lindahl, Sture; Viljanen, A and Pirjola, R (2005) In Space Weather: the International Journal of Research and Applications 3(8).

On speed stability Samuelsson, Olof and Lindahl, Sture (2005) In IEEE Transactions on Power Systems 20(2). p.1179-1180

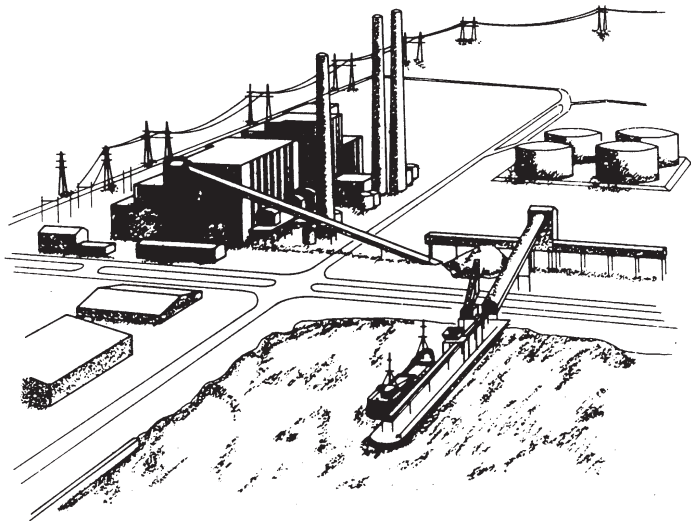
Forsmark 1, 2 och 3; Drift vid onormal spänning och frekvens Lindahl, Sture LU and Hemmingsson, Morten (2005)

Discussion of "definition and classification of power system stability" Samuelsson, Olof and Lindahl, Sture (2006) In IEEE Transactions on Power Systems 21(1). p.446-446

The Storm Gudrun a Seven-Weeks Power Outage in Sweden Johansson, Jonas; Lindahl, Sture ; Samuelsson, Olof and Ottosson, H (2006) Third International Conference on Critical Infrastructures (CRIS2006)

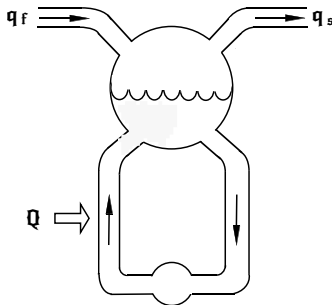


# Öresundsverket - Malmö hamn

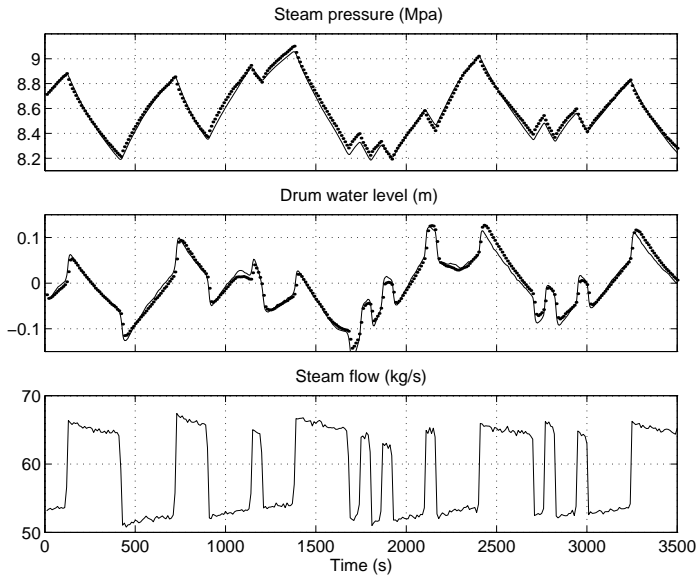


# Varför är ånggeneratorer intressanta?

- ▶ 30% nödstopp av franska kärnreaktorer orsakade av problem med domnivåreglering
- ▶ Också problem för Sydkraft
- ▶ Går bra att studera i konventionella ångpannor
- ▶ Modellbaserad reglering (digital tvilling inbyggd i regulatorn) är lösningen
- ▶ Starka forskningsgrupper i världen
  - Stuttgart Quazza, Welfonder
  - ETH Profos
  - Milano Maffezoni
  - Philadelphia Electric Harry Kwatny
  - The University of Sydney Australia
  - Rodney Bell



# Ändring av ångflödet medelhög last - nollställe i RHP



# Unika experiment av Karl Eklund på Öresundsverket

- ▶ Min första doktorand också från Chalmers
- ▶ Suveränt samarbet med Sydkraft AB
- ▶ Chalmerskompis till Kalle var chef för Öresundsverket!
- ▶ Koppla bort regulatorerna
- ▶ Bra excitation - skaka på alla viktiga variabler
- ▶ Mät alla viktiga variabler
- ▶ Se till att det finns bra manuell övervakning
- ▶ Ibland manuell interaktion bra operatörer
- ▶ Tack för att vi fick göra experimenten!
- ▶ Stort tack till Sydkraft
- ▶ Speciellt stort tack till operatörerna!!

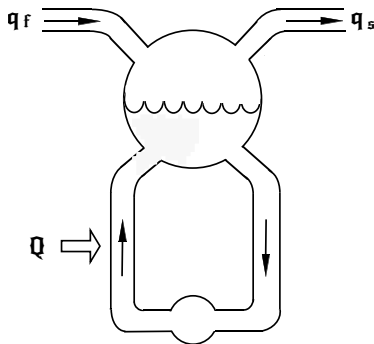
# The Steam Generator

Inputs:

- ▶ Fuel flow
- ▶ Feedwater flow
- ▶ Feedwater temperature
- ▶ Steam flow

Outputs:

- ▶ Drum pressure
- ▶ Drum level
- ▶ Steam quality



Sensible physical approximations

# Typiska Data

Fig. 2

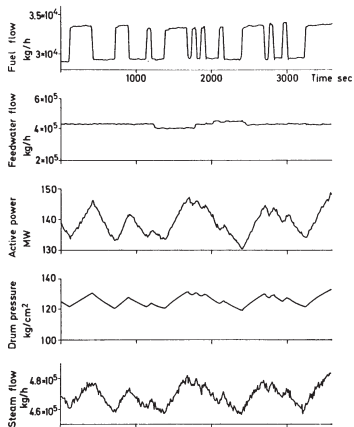
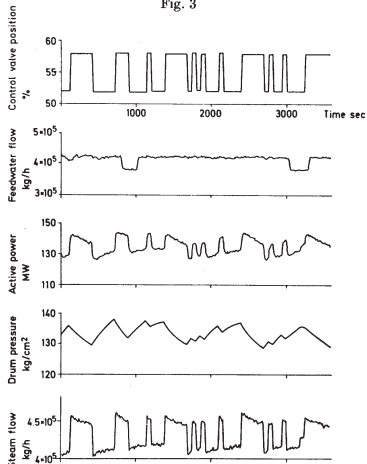


Fig. 3



## Varför fungerar modeller av låg ordning?

- ▶ Processidentifiering indikerar att en modell av ordning 4 räcker
- ▶ Nästan trivitalt i efterhand, med det tog tid att komma på
- ▶ Mycket effektiv värmeöverföring i ång-vatten blandning
- ▶ Antag trycket är lika i alla delsystem som är i kontakt med ånga.
- ▶ Använd trycket som variable
- ▶ Ytterligare tillståndsvariabler för massbalans

# Förenklade Modeller för reglering domnivån

- ▶ Bra modeller kritiska för nivåreglering - fysikbaserade
- ▶ Eklund's modeller visar starkt lastberoende - olinjäritet viktig
- ▶ Systemidentifiering indikerar enkla modeller troligen tillräckliga
- ▶ Långvarigt samarbete med Rodney Bell finansierat av Sydkraft
- ▶ Rodney: Nature does not give away its secrets willingly
- ▶ Resultaten sammanfattade in väl citerad artikel



PERGAMON

Automatica 36 (2000) 363–378



www.elsevier.com/locate/automatica

## Drum-boiler dynamics<sup>☆</sup>

K.J. Åström<sup>a,\*</sup>, R.D. Bell<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Box 118, S-221 00 Lund, Sweden

<sup>b</sup>Department of Computing, School of Mathematics, Physics, Computing and Electronics, Macquarie University, New South Wales 2109, Australia

Received 2 October 1998; revised 7 March 1999; received in final form 9 June 1999

### Abstract

A nonlinear dynamic model for natural circulation drum-boilers is presented. The model describes the complicated dynamics of the drum, downcomer, and riser components. It is derived from first principles, and is characterized by a few physical parameters. A strong effort has been made to strike a balance between fidelity and simplicity. Results from validation of the model against unique plant data are presented. The model describes the behavior of the system over a wide operating range. © 2000 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.



Widely used: 839 citeringar April 2023



# The Model

The state variables are:

- ▶ Drum pressure  $p$
- ▶ Total water volume  $V_{wt}$
- ▶ Steam quality at the riser outlet  $\alpha_r$
- ▶ Volume of steam under the liquid level in the drum  $V_{sd}$ .

Equations:

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s$$

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s$$

$$e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} = Q - \alpha_r h_c q_{dc}$$

$$e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{q_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f,$$

# Parameters

$$e_{11} = q_w - q_s, \quad e_{12} = V_{wt} \frac{\partial q_w}{\partial p} + V_{st} \frac{\partial q_s}{\partial p}, \quad e_{21} = q_w h_w - q_s h_s$$

$$e_{22} = V_{wt} \left( h_w \frac{\partial q_w}{\partial p} + q_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) + V_{st} \left( h_s \frac{\partial q_s}{\partial p} + q_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

$$e_{32} = \left( q_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - \alpha_r h_c \frac{\partial q_w}{\partial p} \right) (1 - \bar{\alpha}_v) V_r + \left( (1 - \alpha_r) h_c \frac{\partial q_s}{\partial p} + q_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \bar{\alpha}_v V_r \\ + (q_s + (q_w - q_s) \alpha_r) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} - V_r + m_r C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

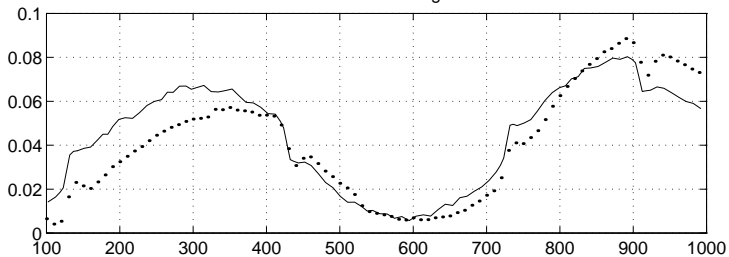
$$e_{33} = ((1 - \alpha_r) q_s + \alpha_r q_w) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$$

$$e_{42} = V_{sd} \frac{\partial q_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c} \left( q_s V_{sd} \frac{\partial h_s}{\partial p} + q_w V_{wd} \frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} - V_{wd} + m_d C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right) \\ + \alpha_r (1 + \beta) V_r \left( \bar{\alpha}_v \frac{\partial q_s}{\partial p} + (1 - \bar{\alpha}_v) \frac{\partial q_w}{\partial p} + (q_s - q_w) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \right)$$

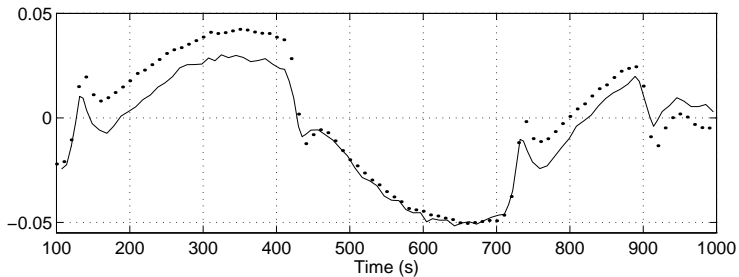
$$e_{43} = \alpha_r (1 + \beta) (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$$

$$e_{44} = q_s.$$

Drum water level at high load



Drum water level at medium load



# Verktyg för Modellbygge

- ▶ Utveckling av bra verktyg kräver bra exempel
- ▶ Stures modell av Öresundsverket: Design and Simulation of a Coordinated Drum Boiler-Turbine Controller. Lic 1976, TFRT-3143. 80 sidor Matlab.
- ▶ Stark drivkraft för bättre verktyg
- ▶ Hilding Elmqvist: A Structured Model Language for Large Continuous Systems. PhD 1978, TFRT-1015 (Dymola)
- ▶ Öresundsverket utmärkt test case för Dymola
- ▶ Stures modell beskrevs på 18 sidor Dymola
- ▶ Toyota första stora användaren för Toyota Prius 1996
- ▶ Modelica a non-proprietary, object-oriented, equation based language for modeling complex physical systems, Lund 1996 - Dynasim + LTH
- ▶ Stor användning inom bil- och energi-industrin
- ▶ Starkt EU stöd mer än 100 MEuro under perioden 2007-2022 för att förbättra språket och biblioteken
- ▶ Jonas Eborn och Hubertus Tummescheit grundar Modelon 2004
- ▶ Dassault Systèmes förvärvar Dynasim 2006



- ▶ Våldigt kul att ha dig på institutionen en tid
- ▶ Tack för att du intresserade dig för det mesta på institutionen även om det låg långt ifrån dina egna projekt
- ▶ Speciellt stort tack för tidiga bidrag till utveckling av Modelica
- ▶ Tack för stöd när du lämnat oss för industrin
- ▶ Lycka till med vad du tar dig till i framtiden!
- ▶ Hoppas att vi får se mer av dig!