

Systeemianalyysin laboratorio, Matematiikan ja
systeemianalyysin laitos

Systeemiteoria ennen ja nyt - systemit muuttuvassa maailmassa

Hans Blomberg - seminaari, 13-14.5.2013, Brändö, Ahvenanmaa

Björn Wahlström ja Martin Ollus (toim.)



Systeemiteoria ennen ja nyt - systeemit muuttuvassa maailmassa

Hans Blomberg - seminaari, 13-14.5.2013, Brändö,
Ahvenanmaa

Björn Wahlström ja Martin Ollus (toim.)

Aalto-yliopiston julkaisusarja
TIEDE + TEKNOLOGIA 6/2014

© Björn Wahlström ja Martin Ollus (toim.)

ISBN 978-952-60-5670-8

ISBN 978-952-60-5669-2 (pdf)

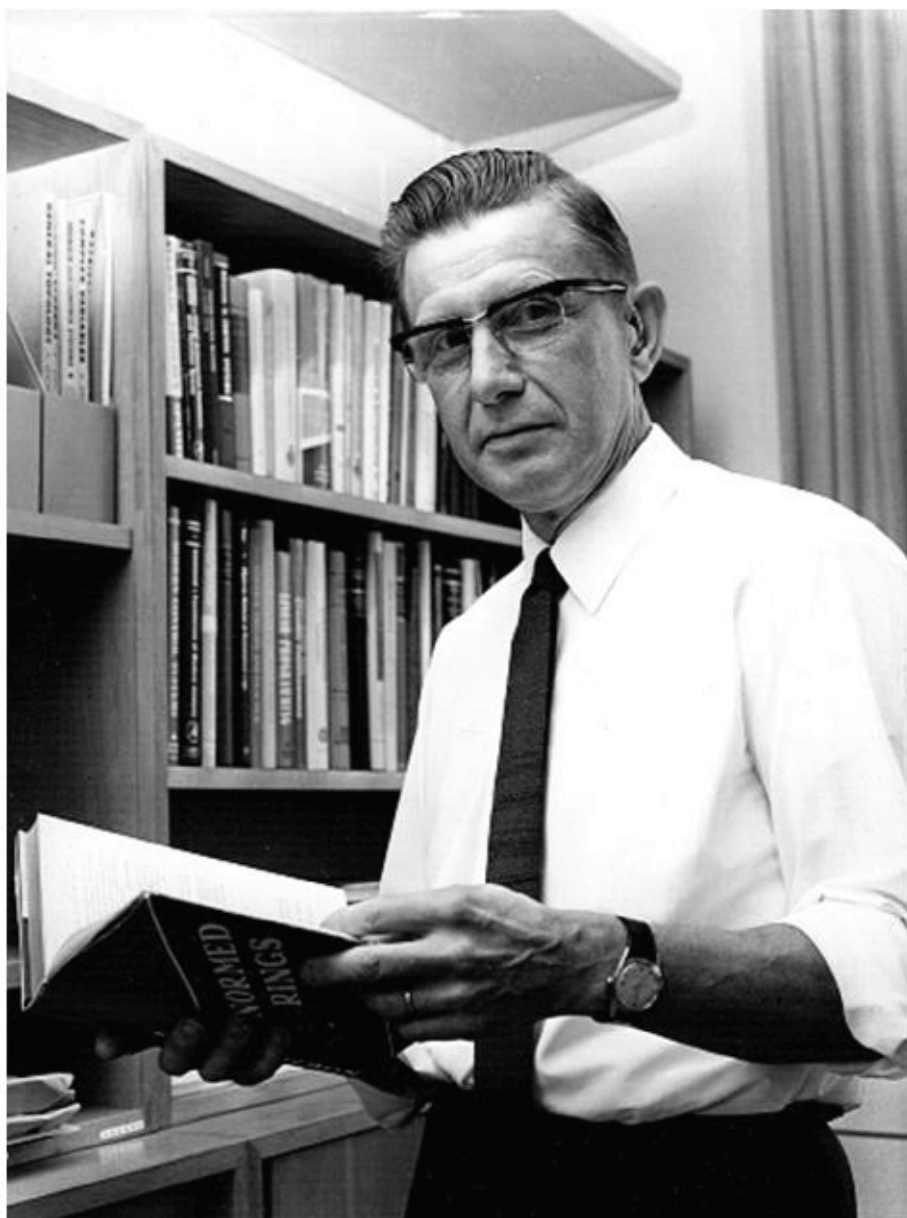
ISSN-L 1799-487X

ISSN 1799-487X (printed)

ISSN 1799-4888 (pdf)

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-5669-2>

Unigrafia Oy
Helsinki 2014



Professori Hans Blomberg

Sisällysluettelo

Martin Ollus ja Björn Wahlström: Johdanto	3
Raimo Ylinen: Systemiteorian professori Hans Blomberg	7
Pentti Lautala, Martin Ollus ja Björn Wahlström: Systemiteoria yksinkertaisesti	14
Aarne Halme, Pentti Lautala, Martin Ollus, Björn Wahlström ja Raimo Ylinen: Systemien teorit, mallit, menetelmät ja sovellukset	25
Jari Hämäläinen, Martin Ollus ja Björn Wahlström: VTT sähköteknillinen laboratorio	40
Raimo Ylinen: Polynomisystemiteoria elämäntyönä	47
Aarne Halme: Teoreetikosta insinööritieteiden harjoittajaksi – mitä systemiteoria on opettanut minulle	57
Raimo P. Hämäläinen ja Esa Saarinen: Systemiäly	65
Jari Hämäläinen: Ennakoiva simulointi laajojen kokonaisuuksien hallinnassa	73
Annikki Mäkelä: Biologinen systemianalyysi metsänhoidon suunnittelussa	81
Risto Sievänen: Skenaarioita Suomen metsien hiilinieluista	88
Kim Pingoud: Ilmastonmuutoksen hillinnän dynamiikka – onko metsäbioenergia ilmastoneutraalia?	94
Andrea Holmberg: Systemiteoriasta ohjelmistotuoteliiketoimintaa	102
Kyösti Tarvainen: Pohjoismaiden väestörakenteiden projektioita	108
Martin Ollus: Systems in Practice – Some Applications of Systems Theory	116
Björn Wahlström: Säkerhetsledning – en systemteknisk tillämpning	133
Martin Ollus och Björn Wahlström: En efterskrift	146
Seminaarin ohjelma	150
Seminaarin osaanottajat	151

Johdanto

Martin Ollus ja Björn Wahlström

Raportin taustat

Tämän raportin taustalla on Etelä-Ranskassa Pyreneitten juurilla huhtikuussa vuonna 2012 vietetty yhteinen ilta. Istuttiin ja muistettiin vanhoja aikoja. Sen yhteydessä joku meistä heitti ajatuksen tavata vanhoja opiskelukavereita. Päädyttiin järjestämään seminaari, johon kutsuttiin Hans Blombergin vanhat assistentit. Seminaarin ensisijainen tarkoitus oli professorimme Hans Blombergin muiston kunnioittaminen. Samalla se oli hänen oppilailleen oiva tilaisuus katsastaa omia uriaan ja näin pohtia systeemiteorian olemusta ja sisältöä.

Raportti perustuu pääosin Brändön seminaarissa pidettyihin esitelmiin sekä seminaarin jälkeen kirjoitettuihin kirjoituksiin, joilla olemme pyrkineet luomaan systeemiteorian menetelmiä ja sovelluksia kuvaavaa kokonaisuutta. Seminaarin esitysten dokumentoinnin lisäksi tämä raportti kuvaa myös kokemuksia ja ajatuksia systeemiteorian olemuksesta suhteessa tieteisiin ja käytännön sovelluksiin. Olemme raporttia toimittaessamme pyrkineet myös siihen, että tieteestä kiinnostuneet maallikot voisivat saada esityksistä jonkin käsityksen systeemiteorian menetelmistä ja sovelluksista.

Kokonaisuutena raportti pyrkii kuvaamaan systeemiteorian olemusta, mitä se on, miten se on kehittynyt ja millainen vaikutus sillä on ollut teollisuudessa ja laajemminkin yhteiskunnassa. Raportti käsittelee pääosin sodan jälkeistä aikaa, jolloin systeemiteoria on pääosin kehittynyt ja sen asema yhteiskunnassa on muodostunut. Luonnollisesti saavutettu asema perustuu myös tieteellisen ja teknisen kehityksen mukanaan tuomiin mahdollistajiin, kuten elektroniikan ja tietokoneiden kehitykseen. Kansainväliset kontaktit ovat myös myötävaikuttaneet kehitykseen. Näitäkin käsitellään myös jossain määrin raportissa. Mahdollistajien lisäksi taloudellisen kehityksen myötä teollisuudessa ja myös julkisella sektorilla on syntynyt uusien ratkaisujen ja palveluiden kysyntää.

Systeemiteorian juuret

Systeemiteoriaa voidaan pitää uutena tieteenalana, jonka juuret ulottuvat säätötekniikkaan, matematiikkaan ja fysiikkaan. Säätötekniikan alkujuurena mainitaan usein höyrykoneiden keksiminen ja kehittäminen 1700-luvun Englannissa. Tunnettu säätösovellus oli höyrykoneen kierrosluvun pitäminen halutulla alueella keskipakovoimaan perustuvan säätäjän avulla. Matematiikan alueella taas oltiin kiinnostuneita erilaisten optimit tehtävien ratkaisuisista, joita myöhemmin sovellettiin optimisäätötehtäviin. Fysiikassa käytettiin differentiaaliyhtälöitä kuvaamaan mekaanisia järjestelmiä. Näillä pystyttiin hyvinkin tarkasti kuvaamaan ja ennustamaan erilaisten mekaanisten järjestelmien käyttäytymistä.

Tultaessa 1900-luvun puolelle sähkö ilmiönä oli jo tunnettu. Sitä ruvettiin soveltamaan monenlaisissa laitteissa. Huomattiin, että ilmiöt piti tuntea ja kuvata koko ajan paremmin, jotta uutta teknologiaa voitaisiin hyödyntää täysmääräisesti. Molemmat maailmansodat johtivat myös ennennäkemättömiin tutkimus- ja kehitysspönistuksiin, jotka suuntautuivat suurten koneiden hallintaan. Tästä säätötekniikka kehittyi insinööritieteenä. Sotien jälkeen useat teoreetikot kartuttivat eri puolilla systeemien käyttäytymisen tietämystä. Erityisesti pitänee mainita Norbert Wiener, joka kirjassaan *Cybernetics* maalaili uutta systeemitiedettä levein pensselein.

Suomessakin kiinnostuttiin säätötekniikkaan ja dynaamisiin järjestelmiin. Hans Blombergin ohella voidaan mainita häntä vanhempi akteemikko Erkki Laurila, joka Teknillisen korkeakoulun fysiikan osastolla opetti säätötekniikkaa muutamalla kurssilla. Hans Blomberg lähestyi säätötekniikka sähkötekniikan puolelta ja hän ryhtyi opettamaan säätötekniikkaa oman professuurinsa osalta. Tämän jälkeen Laurila ohjasi säätötekniikasta kiinnostuneet teknillisen fysiikan opiskelijat Blombergin kursseille. Tämän vaiheen jälkeen myös tämän raportin toimittajat tulivat mukaan aihepiiriin.

Raportin kirjoitukset

Raportti pyrkii antamaan kokonaiskuvan sodanjälkeisestä kehityksestä kirjoittajien henkilökohtaisten kokemusten ja saavutusten kuvauksilla sekä näistä vedetyillä johtopäätöksillä. Kirjoittajien erilaisista kokemuksista johtuen kokonaiskuva on mielestämme kattava jopa kansainvälisessä perspektiivissä.

Raportin ensimmäisessä kirjoituksessa Raimo Ylinen kertoo lyhyesti professori Hans Blombergin elämästä ja urasta. Hänen kirjoituksensa ensimmäisessä liitteessä on lueteltu TKK:n systeemiteorian laboratoriossa ja sitä edeltäneessä säätötekniikan laboratoriossa opiskelleiden tai työskennelleiden henkilöiden systeemiteoriaa ja sen sovellutuksia käsitelleet väitöskirjat. Toisessa liitteessä on luettelu professori Blombergin oppilaat, jotka omilla urillaan ovat edenneet professoreiksi.

Raportin toisessa kirjoituksessa olemme Pentti Lautalan seminaariesitelmän pohjalta yhteisesti pyrkineet kertomaan, miten systeemiteoria pohjautuu sangen yksinkertaisiin käsitteisiin. Tosin teorioita sovellettaessa niitä on muokattava tarkoitukseensa, mutta se tapahtuu useimmiten sovelluksen ehdoilla.

Raportin kolmannessa kirjoituksessa olemme seminaarin jälkeen pyrkineet kuvaamaan miten teorit, mallit, menetelmät ja sovellukset ovat kehittyneet vuosien varrella. Erityisesti kerromme, miten alan saavutukset sekä uudet teorit ja sovellukset ovat näkyneet Teknillisen korkeakoulun systeemiteorian laboratoriossa. Kerromme myös siitä, miten professori Hans Blombergin oppilaat ovat eri opinahjoissa vieneet systeemiteoriaa ja sen sovelluksia eteenpäin.

Raportin neljäs kirjoitus kuvaa professori Blombergin yhteydet Valtion teknilliseen tutkimuslaitokseen (nykyään Teknologian tutkimuskeskus VTT), jossa hän toimi tutkijana

TKK:sta valmistumisensa jälkeen ja jossa hän teki väitöskirjansa. Kirjoituksessa kerrotaan myös lyhyesti miten VTT sähköteknillinen laboratorio on kehittynyt tähän päivään asti.

Raimo Ylinen esittelee kirjoituksessa ”Polynomisysteemiteoria elämäntyönä” omia aktiiviteettejaan. Hän jatkoi professori Blombergin aloittamaa lineaaristen differentiaali- ja differenssisysteemien algebrallisen teorian tutkimusta, usein tiiviissä yhteistyössä Blombergin kanssa.

Tämän jälkeen Arne Halme kuvaa omaa uraansa ja miten hän on siirtynyt omien opinnäytteittensä teorioista monen eri alueen sovelluksiin. Moni professori Blombergin oppilaista on samalla tavalla ryhtynyt soveltamaan saamiaan tietoja eri aloilla systeemien teorian kehittämisen sijaan tai sen rinnalla.

Raportin seitsemännessä kirjoituksessa Raimo Hämäläinen ja Esa Saarinen kuvaavat yhdessä kehittämänsä systeemiälyn käsitettä. Tätä voidaan pitää monessa yhteydessä esille tuotua systeemiajattelukäsitteen yleistykseenä. Kirjoituksen viiteluettelo kuvaa tiiviillä tavalla, miten laajasti systeemiälyä on sovellettu eri sovellusalueilla.

Tämän jälkeen Jari Hämäläinen kertoo, miten systeemitekniikan tärkeä osa-alue, simulointi, tänään nähdään VTT:n sisällä. Mallintaminen ja mallien käyttö systeemien simulointiin ovat merkittäviä lähestymistapoja systeemien ymmärtämiseen sekä hallinnan suunnitteluun.

Kolmen kirjoituksen muodostamassa kokonaisuudessa esitellään systeemiteorian menetelmien käyttöä biologisten järjestelmien tutkimiseen. Annikki Mäkelä kuvaa omassa kirjoituksessaan, miten metsien kasvua voidaan mallintaa ja mihin malleja voidaan käyttää. Risto Sievänen jatkaa tästä omassa kirjoituksessaan hiilidioksidipäästöjen problematiikkaan tuomalla esille, miten metsiä voidaan kuvata hiilinieluinä. Kim Pingoud käsittelee tämän jälkeen ilmastonmuutoksen hillinnän dynamiikkaa pohtimalla, voidaanko bioenergiaa pitää ilmastoneutraalina lämmön ja sähkön tuotannossa. Tämä osio sisältää hyviä esimerkkejä monimutkaisten järjestelmien kuvaamisesta osamalleilla kokonaisuuden ymmärtämisen parantamiseksi.

Omassa kirjoituksessaan Andrea Holmberg kuvaa, miten hän on rakentanut systeemiteorian tietämyksestään liiketoimintaa. Hänen yrityksensä on vuosien varrella kasvanut merkittäväksi kansainvälistä toimintaa harjoittavaksi yritykseksi. Hänen esimerkkiinsä nojaten voidaan yleistää, että systeemiteorian osaamista voidaan hyödyntää myös käytännön liiketoiminnassa.

Kyösti Tarvainen paneutuu kirjoituksessaan väestöennusteisiin ja niiden laatimiseen. Mallien dynamiikka perustuu siihen tosiasiaan, että jokaisen väestöryhmän jäsenet vanhenevat vuosi vuodelta ja jokaisesta ryhmästä poistuu vuosittain määrätty osuus kuoleman kautta. Kirjoituksen tärkeä havainto on, että mallilla saadut tulokset riippuvat aina tehdyistä oletuksista.

Seuraavassa kirjoituksessa Martin Ollus käsittelee laajaa kirjoa niitä käytännön ongelmia, joita hänen urallaan ovat tulleet esille ja joiden ratkaisemiseksi on käytetty systeemiajattelua ja systeemiteorian menetelmiä. Kokemuksensa perusteella hän tuo esille omia havaintojaan systeemien ymmärtämisen tärkeydestä sekä joitakin näkemyksiä alan tulevaisuudesta.

Raportin toiseksi viimeisessä kirjoituksessa Björn Wahlström kuvaa, miten systeemiteorian perusoppeja voidaan valjastaa suurten teknisten järjestelmien turvallisuuden varmistamiseksi. Erityinen haaste on hänen mielestään löytää riittävän hyviä malleja ihmisten ja organisaatioiden käyttäytymisen kuvaamisessa. Tällaiset mallit tulevat pakostakin olemaan ylimalkaisia ja kvalitatiivisia.

Viimeisessä raportin kirjoituksessa Martin Ollus ja Björn Wahlström yrittävät yhdessä kerätä niitä opetuksia, joita seminaarin esityksistä ja tämän raportin kirjoituksista voidaan vetää. Sanoma voidaan esittää lyhyesti – mallit ovat keskeisessä asemassa monimutkaisten järjestelmien ymmärtämisessä. Mallien hyvyys riippuu oleellisesti mallien rakentamisessa käytetyistä oletuksista ja rajoituksista. Mikäli joihinkin reaalimaailman järjestelmiin haluaa vaikuttaa, on aina pohdittava tarkkaan, millainen malli järjestelmästä on rakennettava.

Kirjoittajat

Molempien kirjoittajien esittelyt löytyvät heidän omista kirjoituksistaan muualla tässä julkaisussa.

Systemiteorian professori Hans Blomberg

Raimo Ylinen

Systemiteorialla tarkoitetaan reaali maailman järjestelmien analysointiin ja suunnitteluun käytettävien matemaattisten mallien tutkimusta ja soveltamista. Tavallisimmin sovellukset liittyvät järjestelmien ohjaukseen ja säätöön, joten usein systemiteoriaan liitetään käsite säätöteoria. Käytännön sovelluksien yhteydessä taas käytetään laajempia käsitteitä systeemi- ja säätötekniikka ja näitä taas pidetään nykyisin automaatiotekniikan osa-alueina. Systemiteorian käyttämiä malleja voidaan kuitenkin soveltaa myös ennustustehtäviin tai pelkästään järjestelmän ominaisuuksien tutkimiseen ja tietyt ominaisuudet toteuttavien järjestelmien suunnitteluun. Nämä tehtävät lasketaan nykyisin usein kuuluviksi oppiaineen systemianalyysi alueeseen, joka painottuu lähinnä mallien käyttöön, ei niinkään niiden tutkimukseen. Systemiteoriaa erillisenä oppiaineena on Suomessa opetettu vain Teknillisessä korkeakoulussa professori Hans Blombergin johtamassa systemiteorian laboratoriossa vuosina 1969-85.



Systemiteorian professori Hans Blomberg syntyi Helsingissä 18 joulukuuta 1919. Hänen vanhempansa olivat rakennusmestari Georg Fredrik Blomberg ja Naema Alma Nyström. Hän tuli ylioppilaaksi ruotsalaisesta normaalilyseosta v. 1937 ja diplomi-insinööriksi hän valmistui oivallisesti Teknillisestä Korkeakoulusta v. 1943. Valmistumisensa jälkeen hän toimi koekenttäinsinöörinä Oy Strömberg Ab:llä vv. 1943 -1944 ja tutkimusinsinöörinä Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen sähkötekniillisessä laboratoriossa vv. 1944- 1956.

Tekniikan tohtoriksi Blomberg väitteli v. 1953. Väitöskirjan aiheena oli "Ett känsligt ljusvisarinstrument avsett för integrering av svaga elektriska spänningsimpulser med avseende på tiden." Blomberg opetti Teknillisessä korkeakoulussa vaihtovirtateoriaa vv. 1948 - 1954 ja laati opetusmonisteen "Vaihtovirtateoria". Hän opetti myös teoreettista sähkötekniikkaa ja yleistä sähkötekniikkaa vv. 1953 - 1956.

Hans Blomberg nimitettiin 1.8.1956 lukien teoreettisen sähkötekniikan professorin virkaan ja 23.11.1956 teoreettisen sähkötekniikan vaihtuvaan ruotsinkieliseen professorin virkaan, josta virasta hän jäi täysinpalvelleena eläkkeelle 1.9.1985. . Professori Blomberg oli Teknillisen korkeakoulun sähkötekniillisen osaston johtajana vv. 1959 - 1962. Hän toimi Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen sähkötekniillisen laboratorion päällikkönä vv. 1962 – 1972, sekä sivutoimisesti Tekniska läroverket i Helsingfors oppilaitoksen opettajana vv. 1955 - 1962. Vuosina 1981-85 Blomberg toimi Teknillisen korkeakoulun opetusasioista vastaavana vararehtorina. Suomalaisen Tiedeakatemian jäseneksi Blomberg kutsuttiin vuonna 1974. Hän

oli myös Teknillisten Tieteiden Akatemian ja vastaavan Svenska tekniska vetenskaps-akademien i Finland jäsen.

Kun teoreettisen sähkötekniikan ruotsinkielinen professuuri täytettiin, Hans Blombergille annettiin mahdollisuus valita oma opetusalueensa, koska hän ei nähnyt järkeväksi pelkästään teoreettisen sähkötekniikan ruotsinkielistä rinnakkaisopetusta. Hän valitsi noihin aikoihin varsin uuden tekniikan alan, säätötekniikan, johon hän oli perehtynyt syvällisesti jo väitöskirjatyönsä yhteydessä. Kun 1960-luvulla Suomessa käynnistyi yliopistolaitoksen laajentaminen ja hajauttaminen maakuntiin, niin Tampereelle ja Lappeenrantaan perustettiin Teknillisen korkeakoulun sivukorkeakoulut ja kummassakin aloitettiin säätötekniikan opetus. Samoihin aikoihin myös Teknilliseen korkeakouluun perustettiin varsinainen säätötekniikan oppituoli, johon v. 1969 nimitettiin professori Antti Niemi Oulun yliopistosta ja hänen laboratorionsa nimeksi tuli säätötekniikan laboratorio. Blomberg nimesi tällöin oman laboratorionsa systeemiteorian laboratorioksi.

Opettajana Hans Blomberg oli edelläkävijä. Koska hänen professuurinsa oli ruotsinkielinen, hän katsoi velvollisuudekseen luennoita ruotsiksi ja kirjoitti myös perusteellisen ruotsinkielisen kaksiosaisen luentomonisteen säätötekniikasta. Kuitenkin jo 1960-luvun puolivälissä hän aloitti luentoihin perustuvien opetusmonisteiden kirjoittamisen ja jakamisen opiskelijoille, aluksi ruotsinkielisinä, mutta myöhemmin englanniksi. Myöhemmässä vaiheessa hän katsoi näiden monisteiden täyttävän ruotsinkielisyyden vaatimukset ja luopui ruotsinkielen käytöstä luennoilla.

Yliopistojen demokratisoitua 1970-luvun alussa opetusta pyrittiin siirtämään opiskelijoiden toivomaan suuntaan. Luennot korvattiin seminaareilla, joissa opiskelijoilla oli mielestään paremmat mahdollisuudet osallistua. Valitettavasti hyvin pian kävi selville, ettei tällainen opetusmuoto sovi suomalaisille opiskelijoille, sillä esitelmän pitäjät harjoittivat vain luentomateriaalin sisälukua ja muut istuivat vaitonaisina kuuntelemissa. Esitelmän pitäjistä tuli myös aika pian pulaa, joten opettajat joutuivat kuitenkin pitämään normaaleja luentoja.

Blomberg oli jo 1960-luvun alkupuolella havainnut korkeakoulun antamien matematiikan perustietojen ja -taitojen riittämättömyyden modernin systeemi- ja säätöteorian jatko-opinnoissa ja tutkimuksessa. Tästä syystä laboratorion opettajien ja tutkijoiden seminaareissa opiskeltiin matematiikkaa, joukko-oppia, topologiaa, funktionaalianalyysiä, stokastisia prosesseja jne. Matematiikan opiskelun perusteellisuutta kuvaa hyvin se, että monet systeemi- ja säätöteorian jatko-opiskelijoista ovat pätevöityneet ja päätyneet matematiikan ja sovelletun matematiikan professoreiksi. Seminaareissa luettiin ja tutkittiin kriittisesti myös osanottajien tutkimusraportteja, mikä kehitti heitä tieteellisen tutkimustyön tekemiseen.

Optimisäätöteoria oli 60-luvun lopulla ja vielä 70-luvullakin systeemi- ja säätöteorian keskeinen tutkimusalue sillä tietokonetekniikan kehitys teki mahdolliseksi laajojen dynaamisten järjestelmien optimoinnin. Ensimmäisillä Automaatiopäivillä v. 1966 Blomberg esitti tieteellisen täsmällisen, mutta havainnollisen johdannon optimisäädön ideoihin kirjassessa "Inblick i regleringsteknikens optimeringsidéer"[1]. Tätä käytettiin pitkään myös oppimateriaalina säätötekniikan ja systeemiteorian kursseilla. Opetuksessa ja tutkimuksessa

perehdyttiin dynaamisen optimoinnin perusteorioihin, Bellmanin dynaamiseen ohjelmointiin ja Pontryaginin maksimiperiaatteeseen.

Lineaaristen systeemien algebrallisesta teoriasta eli ”polynomisysteemiteoriasta” oli jo 60-luvulla tullut laboratorion toinen keskeinen tutkimuskohde. Blomberg, Sinervo, Halme ja Ylinen julkaisivat Acta Polytechnicassa v. 1969 yhteenvedon siihenastisista tuloksista [2]. Tätä työtä jatkettiin 70-luvulla tavoitteena kehittää uusia monimuuttujasysteemien analyysi- ja suunnittelumenetelmiä. Systeemimallit määriteltiin matemaattisen täsmällisesti sisäänmeno-ulostuloparien joukkoina ja mallien kuvauksina käytettiin operaattoripolynomeja tai polynomimatriiseja, joiden muokkaamiseen kehitetyt analyysi- ja suunnittelumenetelmät perustuvat. Tutkimuksen tuloksena syntyi menetelmiä monimuuttujasysteemien ohjattavuus- ja tarkkailtavuusanalyysiin, sekä takaisinkytkettyjen monimuuttujasäätimien ja yleistettyjen tilaestimaattoreiden suunnitteluun.

Vaikka polynomisysteemiteorian tutkimuksessa oli 70-luvun alkupuolella saatu huomattavia tuloksia, oli niiden julkaiseminen jäänyt aika vähälle, eikä niitä tunnettu kansainvälisesti kovinkaan hyvin. Tästä syystä päätettiin vuonna 1974 aloittaa tuloksia käsittelevän kirjan kirjoittaminen. Kahdeksan vuotta kestäneen työn tulos, kirja Blomberg-Ylinen: *Algebraic Theory for Multivariable Linear Systems*, ilmestyi Academic Pressin kustantamana vuonna 1983 [3]. Kirja muodosti yhteenvedon lineaaristen systeemien teoriassa tuloksista ja on edelleen täysin ajan tasalla. Vain joitakin pieniä täydennyksiä on tämän jälkeen julkaistu tieteellisissä konferensseissa.

Blombergin aktiivisuutta tänä aikana kuvaa hyvin, että hän ehti polynomisysteemiteorian kehittämisen ja kirjaprojektin lisäksi osallistumaan myös aivan toisen tyyppiin tutkimuksiin. Esimerkiksi tuotannon ja varastojen ohjauksen optimointimenetelmät sekä hierarkkisten systeemien ohjaus olivat tällaisia alueita, joilla syntyi aivan uusia tieteellisiä tuloksia.

Systeemien simulointi on oleellinen osa modernia systeemi- ja säätötekniikkaa. Systeemiteorian laboratorio suoritti yhteistyössä VTT:n kanssa laajoja Loviisan ydinvoimalan simulointitutkimuksia laitoksen automaatio- ja turvajärjestelmien kehittämiseksi.

Hans Blombergin täyttäessä 60 vuotta v. 1979 toimitettiin merkkipäivän kunniaksi Acta Polytechnica Scandinavica sarjaan juhla-julkaisu *Topics in Systems Theory* [4]. Kirjoittajiksi saatiin kansainvälisesti erittäin tunnetut systeemi- ja säätöteoretikot Rudolf E. Kalman, George J. Klir, Jorma Rissanen, Karl J. Åström sekä yhteensä 23 laboratoriossa vuosien mittaan työskennellyttä tutkijaa. Julkaisu antaa hyvän läpileikkauksen systeemiteorian tutkimuksesta maailmalla sekä systeemiteorian laboratorion laajasta ja monipuolisesta kontribuutiosta tällä alueella.

Systeemiteorian laboratorion toiminta päättyi käytännössä, kun Hans Blomberg jäi eläkkeelle. Hänen virkaansa, vaihtuvaan ruotsinkieliseen virkaan nimitettiin pienen välivaiheen jälkeen Hans Andersin. Blomberg jatkoi kuitenkin vielä emeritusprofessorina automaatiotekniikan laboratoriossa ja julkaisi tutkijaryhmänsä kanssa useita tutkimuksia systeemien rakenteellisista ominaisuuksista.

Systemiteorian laboratorion ja sitä edeltäneen säätötekniikan laboratorion toiminta muodosti Suomessa poikkeuksellinen vaiheen systeemi- ja säätöteorian tutkimuksen alalla. Laboratorio tuotti toiminta-aikanaan ja sen välittömänä seurauksena 23 tohtoria (liite 1) ja useita lisensiaatteja ja ainakin 14 laboratoriossa työskennelleistä tutkijoista on nimitetty professorin virkaan, useat matematiikan professoreiksi (liite 2). Laboratorioon saatiin koottua korkeakoulun ja Suomen Akatemian tuella tutkijoiden ”kriittinen massa”, joka taas synnytti hedelmällisiä keskusteluja ja tutkimustuloksiin kohdistuvaa positiivista kritiikkiä. Koska tutkimuksen pääpaino nykyisin näyttää olevan teollisuutta hyödyttävässä, nopeatempoisessa tutkimuksessa, ei vastaavan yksikön syntyminen enää näytä mahdolliselta.

Blombergin tutkimustyön perustana oli täsmällisyys, perusteellisuus ja kaikkien asioiden looginen tarkastelu, jonka ajattelutavan hän pyrki siirtämään myös oppilaisiinsa. Ulkoiselta olemukseltaan ja käytökseltään hän oli oikea tiedemiehen perustyyppi, joka pyrki esittämään asiansa tarkasti ja täsmällisesti, mutta usein myös kuivan brittityyppisen huumorin sävyttämänä. Hän oli menettänyt kuulonsa lapsena sairastetun korvatulehduksen vuoksi toisesta korvasta kokonaan ja toisesta osittain. Vaikka hän käytti kuulokojetta, niin huono kuulo tuotti välillä ongelmia. Lääketieteen kehittyessä hänelle tehtiin leikkaus, jolla saatiin palautettua kuulo toiseenkin korvaan ja tällä oli huomattava merkitys hänen elämänlaadulleen.

Hans Blomberg oli kahdesti naimisissa hänen ensimmäisen vaimonsa kuoltua suhteellisen nuorena v. 1975 ja hänellä on kaksi tytärtä ensimmäisestä avioliitosta. Perheen kesäpaikka Bromarvissa oli hänelle tärkeä rentoutumispaikka, jonne hän rakensi omakotitalon eläkepäiviensä asunnoksi. Siellä hänellä oli hyvin varustettu verstaas, jossa oli puutyökaluja ja puuntyöstökoneita, ja hän valmisti erittäin hienoja puuesineitä. Nuorempana Blomberg kalasti paljon. Blombergit tekivät ympäristöön paljon kävelyretkiä keräten sieniä ja marjoja. Eläkepäivillään he myös matkustelivat mm. Norjaan ja Egyptiin.

Kun Hans Blombergin vaimo kuoli vuonna 1996 ja hänen oman terveytensä oli alkanut heikentyä, hän muutti takaisin Espooseen. Professori Hans Blomberg kuoli 5. marraskuuta 2006 lähes 87 vuotiaana.

Viitteet

[1] Hans Blomberg. Inblick i regleringsteknikens optimeringsidéer. Automaatiopäivät -66, Suomen Sääntöteknillinen Seura, 1966

[2] Hans Blomberg, Jyrki Sinervo, Aarne Halme, Raimo Ylinen. Algebraic methods in systems theory. Acta Polytechnica Scandinavica, Ma19, Helsinki, 1969

[3] Hans Blomberg, Raimo Ylinen. Algebraic Theory for Multivariable Linear Systems. Academic Press, 1983, 360 p.

[4] Aarne Halme, Raimo Hämäläinen, Olli Ristaniemi (Eds.). Topics in Systems Theory. Acta Polytechnica Scandinavica, Ma31, 1979.

Väitöskirjoja systeemiteoriasta

Lista käsittää TKK:n systeemiteorian laboratoriossa ja sitä edeltäneessä säätötekniikan laboratoriossa opiskelleiden tai työskennelleiden henkilöiden systeemiteoriaa ja sen sovellutuksia käsitelleitä väitöskirjoja.

Blomberg, Hans: A sensitive mirror instrument for integration of small electric voltage impulses respect to time. 1953.

Rissanen, Jorma: On the theory of self-adjusting systems designed by use of a functional derivate technique. 1965.

Salovaara (nyk. Ruuth), Sampo: On set theoretical foundations of system theory. A study of state concept. 1967.

Karttunen, Pauli: Dynamic model systems and time optimal position control of the induction machine. 1968.

Segerståhl, Boris: On the computation of density functions of parameters in stochastic systems. 1969.

Halme, Aarne: Polynomial operators for nonlinear systems analysis. 1972.

Golemanov, Ljudmil A.: Systems theoretical approach in the projecting and control of industrial production systems. 1972.

Orava, Jussi: State estimation of polynomial type nonlinear differential systems. 1975.

Hämäläinen, Raimo P.: Optimal controller design by nonlinear and game theoretic methods. 1976.

Kivinen, Jaakko: Hierarchical systems approach applied to planning and control in corporations. 1977.

Hakkala, Lauri: On two-level methods for online coordination of dynamical systems. 1978.

Lautala, Pentti: Some mathematical techniques for the solution of dynamical optimization problems; application to hydro-electric power plant systems. 1978.

Nihtilä, Markku: Deterministic filtering algorithms for non-linear differential systems. 1979.

Ylinen, Raimo: An algebraic theory for analysis and synthesis of time-varying linear differential systems. 1980.

Holmberg, Andrea: A systems engineering approach to biotechnical processes: experiences of modelling, estimation and control methods. 1981.

Ranta, Jukka: On the mathematical modelling of microbial age dynamic and some control aspects of microbial growth processes. 1982.

Hirvonen, Juhani: Two-level solution strategies for constrained optimal control problems. 1982.

Eirola, Timo: A study of the back- and forth shooting method. 1985.

Pingoud, Kim: Hydrologic modelling of infiltration and overland flow in rainfall-runoff processes. 1985.

Kaitala, Veijo: Game theory models of dynamic bargaining and contracting in fisheries management. 1985.

Hämäläinen, Jari: Analysis of left ventricular function by optimization models. 1988.

Mäkelä, Annikki: Models of pine stand development: an eco-physiological systems analysis. 1988.

Sievänen, Risto: Construction and identification of models for tree and stand growth. 1992.

Professoreita Systeemiteorian laboratorista

Eirola, Timo, TKK (nyk. AaltoY) matematiikka

Golemanov, Ljudmil A., STY säätö- ja systeemiteoria VY automaatiotekniikka

Halme, Aarne:, TTKK säätötekniikka, OY säätö- ja systeemitekniikka TKK (nyk. AaltoY), automaatiotekniikka

Hämäläinen, Raimo P., TKK (nyk. AaltoY) sovellettu matematiikka (operaatiotutkimus)

Kaitala, Veijo, JY ekologia ja ympäristöhoito HY populaatioekologia

Lautala, Pentti, TTKK (nyk. TTY) säätötekniikka

Mäkelä Annikki, HY metsänhoitotiede

Ranta, Jukka (Jukka-Pekka), VTT automaatiotekniikka, TKK tuotantotalous

Rickman, Seppo, HY matematiikka

Salminen, Pekka, VTT sähkötekniikka

Salovaara (nyk. Ruuth), Sampo, TKK matematiikka

Segerståhl, Boris, TTKK säätötekniikka, OY säätö- ja systeemitekniikka

Sinervo, Jyrki, LTTK (nyk. LTY) säätötekniikka ja sovellettu elektroniikka

Wahlström, Björn, VTT sähkötekniikka, systeemitekniikka

Ylinen, Raimo, OY automaatiotekniikka

Lyhenteet:	AaltoY	Aalto-yliopisto
	HY	Helsingin yliopisto
	JY	Jyväskylän yliopisto
	LTKK	Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu
	LTY	Lappeenrannan teknillinen yliopisto
	OY	Oulun yliopisto
	STY	Sofian teknillinen korkeakoulu
	TKK	Teknillinen korkeakoulu
	TTKK	Tampereen teknillinen korkeakoulu
	TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
	VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus (nyk. Teknologian tutkimuskeskus VTT)
	VY	Vaasan yliopisto

Systemiteoria yksinkertaisesti¹

Pentti Lautala, Martin Ollus ja Björn Wahlström

Johdanto

Systemiteoriaa mielletään usein teoreettiseksi ja vaikeaksi. Tällä kirjoituksella haluamme nostaa esille systemiteorian muutamia keskeisiä käsitteitä ja näyttää, että perusasiat ovat varsin jokapäiväisiä ja yksinkertaisia. Toinen asia on sitten se tosiseikka, että kun lähestytään jotain konkreettista ongelmaa, joudutaan usein ottamaan mukaan lisää käsitteitä ja menetelmiä.

Mallit ja niiden käyttö

Systemiteorian keskeisin käsite on malli. Tämä lähtee siitä, että tarkastelun kohteelle pitää kehittää tapa sen käyttäytymisen hahmottamiseen ja ymmärtämiseen. Ratkaisu on malli, jota voidaan pitää kaiken tavoitteellisen toiminnan perustana. Konstruktivismin mukaan voimme ajatella ainoastaan käyttämällä kuvia ja näkymiä maailmasta. Nämä ovat siis aina malleja todellisuudesta. Systemiteoria antaa työkalut mallien käyttöön kaikessa suunnittelussa. Siinä panostetaan erityisesti matemaattisten mallirakennelmien kehittämiseen, niiden analysointiin ja tavoitteelliseen synteisiin.

Mallien käyttö ei tietenkään ole systemiteoreetikkojen yksinoikeus. Kuten edellä todettiin, kaikessa ajattelussa käytetään malleja. Esimerkiksi maailmankaikkeudelle ja sen synnylle on innokkaasti kehitetty malleja. Atomimalleja on myös pitkään kehitelty ja kaikelle tältä väliltä. Systemiteoriassa keskitymme kuitenkin mallirakenteisiin, jotka ovat kausaalisia. Pyrimme kuvaamaan, miten erinäiset *syyt* aiheuttavat *seurauksia*. Tämä myös tarkoittaa, että syy aina esiintyy ajassa ennen seurauksia. Puhummekin usein dynaamisista malleista, jotka pyrkivät kuvaamaan todellisten järjestelmien muuttumista ajan funktiona. Näitä malleja voidaan hyödyntää järjestelmien ymmärtämisessä ja hallinnassa.

Esimerkiksi puhuttaessa maailmankaikkeudesta tavoitteena on lähinnä todellisuuden ymmärtäminen. Ilmastomallien suhteen ollaan jo hämärällä alueella, kun kehitettyjä malleja pyritään käyttämään myös ohjausmielessä. Tosi systemiteoreetikko edellyttäisi kuitenkin mallin luotettavan todentamisen ja kelpoistamisen, eikä uskoisi suoraan vajaan mallin antamiin tuloksiin. Usein yksioikoiset tulokset kaatuvat järjestelmän huomioimattomiin sisäisiin ristikkäisvaikutuksiin. Kysymykseksi tällöin nousee aina ja kaikkialla, mikä malli on se oikea malli.

Tähän kysymykseen ei voida antaa muuta vastausta kuin, ettei mitään oikeata mallia ole olemassa. Malli on aina kytketty määrättyyn tarkoitukseen. Tämä tarkoitus voi olla systeemin

¹ Tämä kirjoitus perustuu Pentti Lautalan HB-seminaarissa pitämään esitelmään, jotka muut kirjoittajat ovat kommentoineet ja täydentäneet raportin kirjoittamisprosessin aikana.

käyttäytymisen ymmärtäminen tai sen ohjaaminen siten, että haluttu tavoite toteutuu. Tämä siis tarkoittaa, että systeemille voi aina rakentaa monta erilaista mallia, jotka toimivat lähinnä siinä tarkoituksessa, johon ne on rakennettu. Jos näkökulmaa tai tavoitetta muutetaan, saattaa malli olla täysin käyttökelvoton. Systeemiteoriassa tämä ei ole ongelma. Itse teoria on matemaattisen puhdas. Tehdyt oikeudet ja riittävän täydelliset oletukset takaavat tulosten oikeellisuuden. Vastuu on mallin käyttäjällä.

Malli on aina yksinkertaistus. Tämä on sekä mallin etu että sen haitta. Jos malli kuvaa todellisuutta riittävän hyvin sen rakentamisessa käytetyillä oletuksilla, sitä voidaan pitää hyvänä niin kauan kuin nämä oletukset pitävät paikkansa mallia käytettäessä. Voidaan siis sanoa, että mallilla on aina määrätty toiminta-alue, jossa sitä voidaan käyttää. Mikäli mallia yritetään käyttää tämän toiminta-alueen ulkopuolella, se voi antaa erittäin harhaanjohtavia tuloksia.

Ennen kuin ehdotettua mallia voidaan käyttää johonkin tarkoitukseen, se pitää aina kelpoistaa. On varmistuttava, että se todella riittävän hyvin kuvaa haluttua osaa realimaailmaa nimenomaan syy-seuraus (heräte-vaste) mielessä. Malli on siis ratkaiseva linkki käytäntöön. Jos meillä on hyvä malli, meillä on paljon mahdollisuuksia hyödyntää systeemiteoriaa ja sen tuottamia menetelmiä ratkaisujen etsimisessä systeemien sekä rakenteissa että hallinnassa.

Systemiteorian kolme pääongelmaa

Periaatteellisella tasolla voidaan sanoa, että systeemiteoria keskittyy ratkaisemaan kolme pääongelmaa, *mallintaminen*, *simuloiminen* ja *ohjaaminen* (Kuva 1). Mallintamisessa etsimme jonkin järjestelmän mallia, simuloinnissa käytämme löydettyä mallia järjestelmän käyttäytymisen kuvaamiseen ja ennustamiseen ja ohjaamisessa etsimme sellaista ohjausta, joka saa aikaan sen, että järjestelmä toimii haluamallamme tavalla. Ohjaustehtävän onnistumisen edellytys on, että malli on olemassa ja että tiedämme, miten sitä voidaan käyttää järjestelmän käyttäytymisen arviointiin.



Kuva 1. Systemiteorian kolme ongelmaa

Mielenkiintoinen havainto on tässä, että näin yleisellä tasolla ei ole muita kuin nämä kolme ongelmaa. Tämän näkee siitä, että kolmesta käsitteestä voidaan olettaa kahta tunnetuksi ja kolmatta haettavaksi. Voidaan siis sanoa että kahden ensimmäisen ongelman tehtävä oikeastaan on valmistautuminen ohjaustehtävän ratkaisuun. Tosin voidaan myös ajatella, että haluamme muuttaa tutkittua realimaailman systeemiä huomattuaamme, ettei se toimi halutulla tavalla. Tällöin jo ensimmäisen ja toisen tehtävän ratkaisulla päästään kolmannen tehtävän tavoitteeseen.

Matemaattisesti puhtaimmillaan näin on, mutta käytännössä tavoitetta voi laajentaa. Kuvattujen ongelmien ratkaisemiseen käytettävien mallien kykyä kuvata systeemiä, eli kohdetta, voidaan muokata ja parantaa joko virittämällä malleissa käytettyjä parametreja tai

vaikuttamalla mallien rakenteeseen. Jälkimmäinen on edellistä vaativampi tapa, koska mallien rakenteen muuttaminen vaikuttaa usein syvällisemmin myös käytettävissä oleviin ohjausmenetelmiin.

Mallien käyttöä voidaan myös laajentaa diagnostiikan suuntaan. Jos esim. todellisen järjestelmän vaste poikkeaa mallin antamaan vasteesta samaan syöttösuureeseen, poikkeaman syy saattaa olla häiriö tai vikaantuminen todellisessa järjestelmässä.

Mallintamisen ongelmat

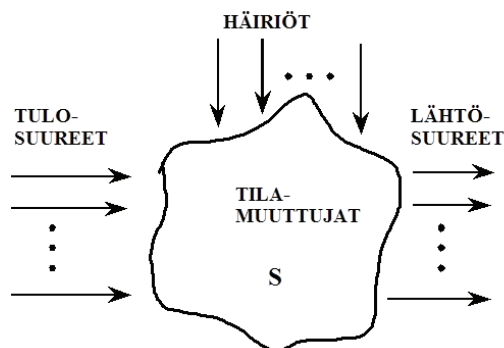
Systeemiteoreettisten ongelmien ratkaisun suunnittelun on siis perustuttava johonkin malliin ollakseen rationaalista. Suunnittelun tulos riippuu käytetystä mallista, joten mallin tulee kuvata riittävän hyvin niitä asioita, joista tulos riippuu. Kohdejärjestelmässä on kuitenkin myös ominaisuuksia, joilla ei ole mitään, tai vain vähän vaikutusta tapauskohtaisen suunnittelun tulokseen. Mallintamisessa on siis oleellista, mitä otetaan mukaan ja mitä jätetään pois. Oleellisten ominaisuuksien jättäminen pois vie pohjan tuloksilta. Jos varmuuden vuoksi otetaan mukaan kaikki mahdollinen, voi mallinnuksesta tulla ikuisuusprojekti tai ongelman monimutkaistuuessa ratkaiseminen saattaa käydä mahdottomaksi.

Malli voi luonteeltaan olla intuitiivinen, kvalitatiivinen, lingvistinen tai matemaattinen. Kaikissa tapauksissa löytyy systeemiteoreettisia menetelmiä, mutta tehokkaimmin teoria ja menetelmät purevat matemaattisiin malleihin.

Jos tavoitteena on ensisijaisesti säädön kehittäminen, hyödyllisissä mallissa tulee olla

- vapaat tulomuuttujat (input)
- häiriömuuttujat
- sidotut lähtömuuttujat
- selkeä näiden välinen kausaalinen riippuvuusmalli

Kuva 2 esittää systeemiteoreettista mallia S, joka sisältää edellä mainitut ominaisuudet. Koska systeemiteoreettinen malli on dynaaminen ja kausaalinen, tarvitaan nykyhetken kuvauksessa tietoa menneisyydestä, eli miten nykytilaan on tultu. Tämä tieto sisältyy tilamuuttujiin, jotka sisältävät järjestelmän aikaisempaa historiaa.



Kuva 2. Systeemiteoreettinen malli

Matemaattisen mallin luomiseen on olemassa kaksi erilaista lähestymistapaa: luonnonlakeihin perustuva ja mittaustietoon perustuva. Käytännössä näitä käytetään toisiaan tukien, mutta on syytä tiedostaa niiden erityispiirteitä. Luonnonlakeihin perustuva malli

- tuottaa periaatteessa globaaleja malleja, joiden kelpoisuus on hyvä
- hyödyntää olemassa olevaa suurta tietokantaa
- tuottaa ”läpinäkyviä” rakenteellisia malleja
- on käytännössä usein vaikea konstruoida
- johtaa yleensä puuttuvan tiedon ongelmaan.

Mittaustietoon perustuva lähestymistapa

- hyödyntää helposti saatavaa mittaustietoa
- on moderni tapa ja käytössä on vahvasti tietokonetuettu kehitysympäristö
- ei vaadi syvällistä ymmärrystä mallinnettavasta kohteesta
- tuottaa helppo- ja monikäyttöisiä malleja
- tuottaa yleensä lokaaleja malleja, joiden kelpoisuus on hyvin rajallinen
- tuottaa mallin, joka kuvaa vain sovitettua mittaustietoa, eli datan hyvyys on ratkaiseva.

Luonnonlakeihin perustuva menetelmä on vanha ja koeteltu. Fysiikan ja kemian lait on kirjattu eksplisiittisten kaavojen muotoon. Ne ovat helposti kaikkien käytettävissä. Teollisuusympäristössä hyvin toimivien dynaamisten mallien konstruointi on kuitenkin osoittautunut yllättävän vaikeaksi. Tietokoneiden tulo tehtäisiin näytti ratkaisevan koko mallinnusongelman. Prosessimittaukset saadaan talteen ja tiedon käsittelykapasiteettia on lähes rajatta käytössä. Periaatteessa ongelma on hyvin yksinkertainen: malli valitaan siten, että se ”selittää” prosessista saadut mittaukset mahdollisimman hyvin. Käytännössä törmätään kuitenkin ainakin kolmeen ongelmaan: mittaustieto ei ole riittävän edustavaa, käytetyn mallin rakenne ei ole sopiva ja käytetty hyvyysmitta soveltuu huonosti. Asia voidaan kärjistä seuraavasti: ellei tee lähtöolettamuksia, mittaukset eivät sisällä riittävästi informaatiota mallin tuottamiseksi. Jos tekee lähtöolettamuksia, malliin saa vastaavat ominaisuudet, mutta osa ominaisuuksista saattaa jäädä piiloon. Mallintamiseen tarvitaan siis asiantuntijaa, joka yhtäältä tuntee mallinnettavaa järjestelmää ja toisaalta mallintamisen metodiikkaa. Mallin on vastattava käyttötarkoitustaan, josta seuraa että mallin kehittäjältä edellytetään kohdeprosessin tuntemusta, tavoitteiden tuntemusta, menetelmäosaamista, asioiden suhteiden tajua ja systeemi- ja säätöteorian kohtuullista osaamista.

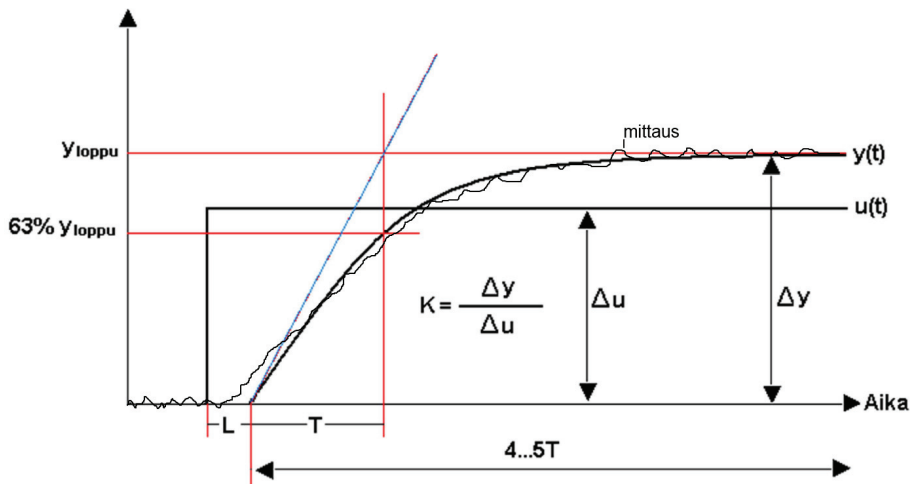
Yksinkertainen kokeellinen malli

Jos mallintamisessa on niin paljon mahdollisuuksia epäonnistua, mistä on syytä lähteä liikkeelle? Yleisohjeena on, että paloitellaan järjestelmä ensin selkeisiin osiin, jotka ovat mahdollisimman yksinkertaisesti riippuvaisia keskenään. Valitaan yksinkertainen malli kuvaamaan kutakin osajärjestelmää ja kootaan niistä kokonaisjärjestelmä. Teollisten järjestelmien kohdalla menetelmä onnistuu yleensä hyvin, koska järjestelmät on monestakin syystä rakennettu osajärjestelmistä.

Yhden tulon ja lähdön tapauksessa voidaan hyvin kuvata monen dynaamisen järjestelmän ominaisuutta yksinkertaisella viiveellisellä aikavakiomallilla. Siirtofunktioesityksessä mallirakenne on muotoa

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts+1}$$

Useimmat teolliset osaprosessit reagoivat askelmaiseen herätteeseen aperioidisesti, jolloin yksinkertaisesta kokeesta (syötetään järjestelmän tulosuureeseen askel), voidaan helposti määrätä mallin kolme parametria (Kuva 3).

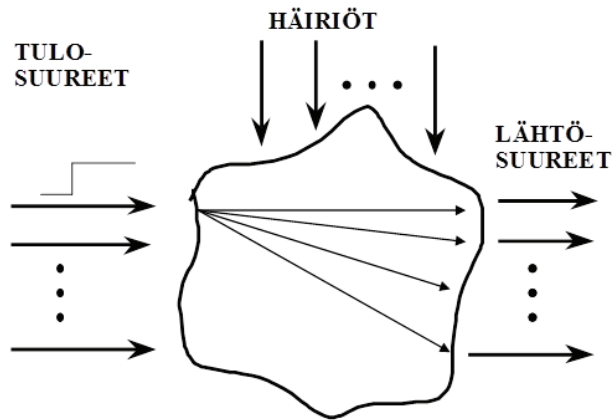


Kuva 3. Mallin luominen askelvastesovituksella

Sovitusvaiheessa mallin selittävyys saattaa joskus näyttää jopa tökerön huonolta. Mutta on osoittautunut, että säädön suunnittelussa tällaisen mallin avulla saadaan usein hyviä tuloksia. Tälle on myös teorian tuki. Osaprosessikohtaisen säädön suunnittelu on myös hyvin suoraviivaista saadun mallin avulla.

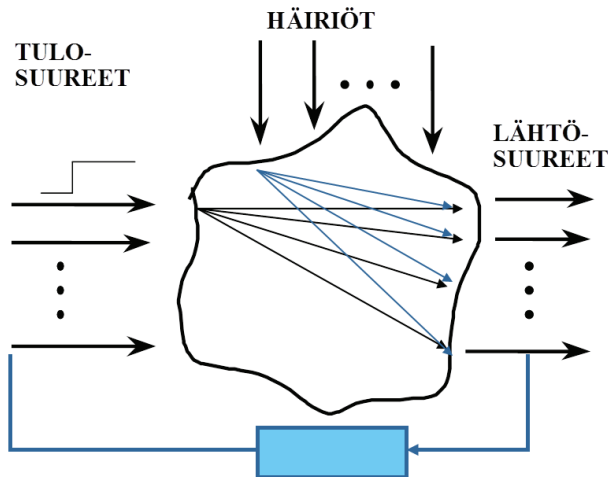
Monimuuttujamallit

Teollisten järjestelmien kohdalla osaprosesseihin jako yleensä onnistuu. Osaprosessiin saattaa silti jäädä useita tulo- ja lähtösuureita ja pidemmälle menevä ositus johtaa liian hankaliin kytkentöihin osaprosessien välille. Periaatteelliseksi monimuuttujamalliksi saadaan kuvan 4 mukainen esitys.



Kuva 4. Monimuuttujamalli. Lähtösuureet riippuvat useasta tulosuureesta.

Monimuuttujamallin kokonaisuus voidaan konstruoida periaatteessa samoin kuin yksinkertaisenkin malli. Mallinnetaan kukin vuorovaikutus erikseen ja summataan ne mallin sisällä. Tämä summaus edellyttää kuitenkin järjestelmän vahvaa lineaarisuutta, mikä todellisessa monimuuttujajärjestelmässä harvoin toteutuu. Lineaarisuus toimintapisteen ympärillä olisi usein riittävää, mutta on varottava suljetun silmukan ongelmaa (Kuva 5). Toimintapisteeseen pakottaminen kokeen aikana sitoo tulo- ja lähtömuuttujia ikuisen silmukkaan, jolloin esimerkiksi silmukassa parhaiten sovittava malli on takaisinkytkennän inverssi.



Kuva 5. Suljetun silmukan vaikutus.

Järjestelmän jakaminen osiin mallinnusta varten vaatii kohteen asiantuntijan ja pakostakin jonkin verran käsityötä. Kun järjestelmistä nykyisin on saatavissa massiivisesti mittausdataa ja ohjelmistoja ja laskentakapasiteettiakin on lähes rajattomasti saatavilla, on erittäin houkuttelevaa lähteä monimuuttujamallinnukseen, jolloin tuloksia voi saada heti. Edellä esitetyn perusteella toiveet loistavista tuloksista ovat heikolla pohjalla.

Ohjausongelman neljä välttämätöntä ehtoa

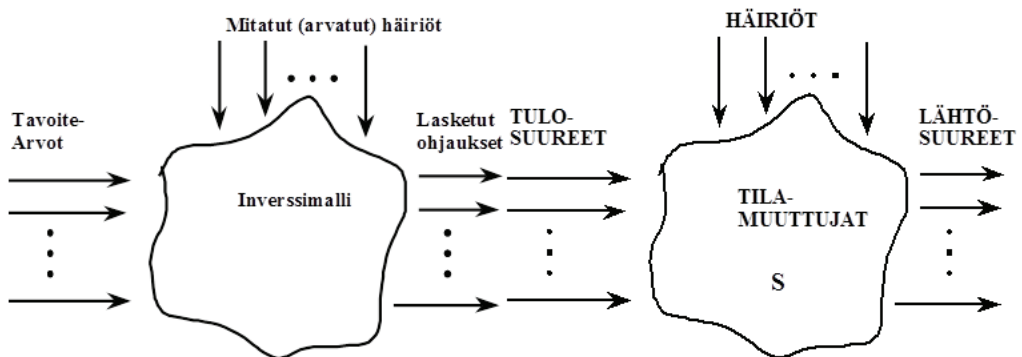
Koska järjestelmien hallinta, pelkistettynä ohjaus ja säätö on systeemiteorian perimmäinen tavoite, voidaan tarkastella tämän tehtävän välttämättömiä ehtoja. Arkikieleen muutettuna on helppo ymmärtää, että

- pitää tietää mitä haluaa, eli on olemassa tavoite kuvan 2 lähtösuureille tai mahdollisille tilasuureille
- pitää tietää missä tilassa järjestelmä on, eli järjestelmä on tarkkailtavissa. Siis mittauksista ja ohjauksista (kuva 2) on voitava päätellä järjestelmän kulloinkin tila
- pitää olla mahdollisuus vaikuttaa järjestelmään halutulla tavalla, eli järjestelmä on ohjattavissa. Tulosuureilla voidaan vaikuttaa järjestelmään halutusti
- pitää tietää miten ohjaustoimenpiteet vaikuttavat, eli järjestelmästä on olemassa malli

Systeemiteorian avulla on kehitetty kattavasti menetelmiä kyseisen ohjausongelman tarkasteluun ja ratkaisemiseen.

Takaisinkytkentä ohjausongelman ratkaisemiseksi

Ideaalisessa ympäristössä, jollainen löytyy selkeimmin avaruudesta, systeemiteoreettinen ohjausongelma on myös käytännössä ratkaistavissa luonnonlakien antamissa rajoissa. 60-luvun avaruusohjelmat tuottivatkin lukuisia sovelluksia, joissa systeemiteoreettiset menetelmät olivat merkittävässä roolissa. Jos tarkastellaan kuvan 2 systeemiä S , jossa kaikki on tunnettua, voidaan ohjausongelma muodollisesti ratkaista systeemin inverssin avulla (kuva 6).



Kuva 6. Inverssi säätimenä

Tämä idea on mielenkiintoinen lähtökohta, mutta valitettavasti luonnonlait estävät sen toteuttamisen. Koska systeemiteoreettinen malli on dynaaminen, ei täydellistä inverssiä ole tässä maailmassa. Tämä on helppo ymmärtää, jos tarkastelee vaikka aikaviivettä, jonka inverssi matemaattisesti on ennustaja, jota puhtaana ei ole mahdollista toteuttaa. Jos kuitenkin toteutetaan kyseistä ideaa niin pitkälle kuin mahdollista, joudutaan tyytymään sellaisiin yksittäisiin hetkiin tulevassa aikahorisontissa, joissa järjestelmän lähdöt ovat haluttuja. Kun tullaan pois avaruudesta, epävarmuus tulee kaikkialla vastaan. Mittaukset, mallit, häiriöt,

kuten myös ohjaustoimenpiteet, sisältävät tuntemattomia komponentteja, joiden vaikutus on huomioitava toteutettavassa ohjausjärjestelmässä. Ratkaisu tähän on takaisinkytkentä, mitä voidaan pitää systeemitheorian samoin kuin koko evoluution eräänä kulmakivenä.

Takaisinkytkennällä pystytään eliminoimaan lähes kaikkien epävarmuuksien haitta-vaikutuksia. Ainoastaan tietyt mittausepävarmuudet vahvistuvat takaisinkytkentää käytettäessä. Teollisuudessa tämä on hyvin tunnistettua, mutta muualla yhteiskunnassa vaikutuksia ei aina hallita. Takaisinkytkentä on ratkaisu, mutta se ei tule ilmaiseksi. Yksinkertainen ohjaustehtävä muuttuu säätötehtäväksi, joka sisältää ikuisen silmukan. Syy ja seuraus sekoittuvat, signaali jää kiertämään kehää. Matemaattisesti ongelma on hallinnassa, mutta yksinkertainen ohjaaminen muuttuu jatkuvaksi korjaamiseksi, huonossa tapauksessa huojumiseksi tai jopa epästabiiliseksi.

Alussa mainittu ohjausratkaisu ja takaisinkytkentä ovat yhdistettynä tuottaneet nykyisin teollisuudessa enenevässä määrin sovelletun säätöratkaisun. Erityisesti monimuuttujatilanteeseen, jossa laajempaa kokonaisuutta pyritään ohjaamaan kokonaisvaltaisesti ja optimoidusti, soveltuu niin kutsuttu *mallipredktiivinen säätö*. Periaate hyödyntää prosessin mallia eksplisiittisesti ja optimoi ohjauksia liukuvaa horisonttia ja takaisinkytkentää käyttäen.

Tapahtumapohjaiset mallit

Tähänastinen teksti on käsitellyt ajan mukaan muuttuvia järjestelmiä, ns. jatkuvia järjestelmiä. Tietokoneiden ja digitaalitekniikan myötä käsiteltävien muuttujien ja suureiden arvot kuitenkin määräytyvät näytteenottohetkien arvojen perusteella. Mallit ja hallintamenetelmät perustuvat kuitenkin siihen, että järjestelmien käyttäytymistä mallinnetaan ja pyritään hallitsemaan jatkuvasti ajan myötä. On kuitenkin systeemejä ja tilanteita, joissa yksittäiset tapahtumat ohjaavat systeemien toimintaa. Toiminta saattaa koostua useista peräkkäisistä ja toisista riippuvista tapahtumista. Jonkinlainen satunnaisprosessi saattaa myös käynnistää yksittäisen prosessin tai kokonaisen tapahtumaketjun. Jokapäiväisessä elämässämme sellaisia tapahtumia esiintyy koko ajan (viestimien yhteydenotot, palvelujen jonottaminen, liikenteessä toimiminen, syntyminen, kuoleminen, jne). Näihin reagoimme yleensä vaistonvaraisesti tai opetetun mallin mukaisesti.

Teknisten järjestelmien ja prosessien yhteydessä tapahtumaohjaus usein vaatii systeemis suunnittelua syntyvien tilanteiden hallintaa varten. Esimerkiksi ison teollisuuslaitoksen ylösajo ja alasajo vaativat kompleksisten tapahtumaketjujen toteutuksia, jotta toiminta onnistuisi. Samoin häiriö- ja vikatilanteiden laukaisema suojaustoiminta rakentuu peräkkäisiin suunniteltuihin toimintoihin. Valmistavassa, eli ns. kappaletavarateollisuudessa tapahtumaohjaus on toiminnan ohjauksen suunnittelun lähtökohta. Toiminta tapahtuu usein erillisissä toimintapisteissä, joiden aktiviteetti käynnistyy, kun käsiteltävä materiaali, esim. työstettävä kappale, saapuu pisteeseen, jonka aktiviteetti myös koostuu peräkkäisistä toiminnoista. Kun pisteen toimintaketju on suoritettu loppuun, käynnistyy siirtyminen seuraavaan kohteeseen, jossa taas sen kohteen toimintaketju käynnistyy. Myös logistiikkaratkaisuihin esiintyy peräkkäisiä toimintoja, joiden alkaminen käynnistyy edellisen toiminnan valmistuttua.

Luonnon esim. luonnonkatastrofit käynnistävät usein peräkkäisiä tapahtumaketjuja, mutta myös vähemmän dramaattiset luonnon tapahtumat voivat johtaa peräkkäisiin toisistaan riippuviin tapahtumiin.

Riippumatta lähtökohdista tapahtumiin reagoiminen tai niiden hallinta edellyttää suunnittelua. Tämä suunnittelu perustuu usein päättelyketjuihin, joiden avulla sopiva operatiivinen toiminta muodostuu eri tilanteissa. Päättelyn pohjaksi tarvitaan malleja, joissa tapahtumien syy- ja seuraussuhteita on mallinnettu. Mallit ovat usein kausaalisia kuvauksia tyyppiä ”if ... then ...”, vaikka ne eivät ole suoraan aikafunktioita, kuten yllä kuvatut dynaamiset mallit. Ne ovat sen sijaan usein loogisia päättelymalleja.

Mallien rakentamisen työkalut

Järjestelmien optimaalinen hallinta on systeemiteoriassakin lopullinen tavoite, mutta ilman soveltuvaa mallia tätä tavoitetta on mahdoton saavuttaa. Asiantuntijaresurssit ovat aina rajalliset ja kustannuksiltaan kasvavat, tietotekniikassa trendi on päinvastainen. Ratkaisun täytyy siis löytyä sieltä. Mallinnustyökaluja on jo kehitetty yli viisikymmentä vuotta. Paljon on myös saatu aikaan. Osaongelmien automatisoinnissa on päästy pitkälle. Eräillä erikois-alueilla, kuten elektroniikkapiirien, signaali- ja mekaniikkajärjestelmien yhteydessä automaattinen mallinnus tuottaa jo hyvin toimivia ratkaisuja. Näissä mallinnus toimii siten, että todellisen järjestelmän rakenteet siirretään suoraan malliin. Eri osien kuvaukset ovat riittävän tarkkoja kokonaisjärjestelmän kuvaamiseen. Myös teollisuuden eri alueille löytyy jo erikoistapauksiin monia lähes automaattisia ratkaisuja, mutta biologisiin ja sosiaalisiin järjestelmiin tällainen automatisointi ei ole vielä ylettänyt.

Mallinnusapuneuvoja on aina käytetty. Pienoismallien käyttö on kautta aikojen ollut laajaa ja tekniikassakin pienoismallien merkitys oli suuri 1950-luvulle asti. Käytettävyys ei kuitenkaan riittänyt useissa tekniikan ongelmissa. Analogiakoneet toivat osittaisen ratkaisun käytettävyysongelmaan, jota parannettiin vielä liittämällä digitaalitekniikkaa mukaan. Tästä syntyi hybridikone. Kalliita ja edelleenkin heikosti yleiskäyttöisiä hybridikoneita käytettiin lähinnä yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa taloudellisesti merkittävässä tutkimushankkeissa. Analogiakoneen nopeus luontaisen rinnakkaisen toimintansa ansiosta oli pitkään ylivoimainen yleiskäyttöisiin tietokoneisiin verrattuna, mutta tietokoneiden nopea kehitys muutti tilanteen 70-luvun alussa.

Simulointimalleja ohjelmoitiin FORTRAN:illa ja nopeus ei ollut enää voittamaton este. Käytettävyys parani yleisten aliohjelmakirjastojen (IMSL, NAQ&al) avulla, mutta vasta scriptipohjaiset ohjelmointikielet (Simmon&al) ja graafisiin lohkoihin (SIMULINK&al) perustuvat ympäristöt nostivat käytettävyuden siedettävälle tasolle. Näillä työkaluilla mallintaminen kuitenkin lähtee matemaattisista yhtälöistä, joten työkalu ei tue mallinnuksen kriittisintä vaihetta: eli kysymystä mistä yhtälöt tulevat. Objektimallinnus kehitettiin täyttämään tämä aukko. Panostus on ollut suurta 80-luvulta lähtien (Dymola, APROS&al) ja käyttökelpoisia tuloksia on saatu, joskin aina kohteeltaan ja tavoitteeltaan rajatussa ympäristössä. Mallinnuksen automatisoinnissa ei siis olla vielä kovin pitkällä.

Mallintamisessa on siis kaksi pääongelmaa, johon ihmisen työpanosta tullaan aina tarvitsemaan. Ensimmäinen on mallin rajaaminen, mitä halutaan ottaa mukaan ja mitä voidaan jättää pois? Toinen ongelma on päättää milloin malli on riittävän hyvä. Onko malli kelpoinen kuvaus siitä realimaailman järjestelmästä, jota haluamme tutkia? Nämä molemmat kysymykset ovatkin johtaneet siihen, että mallintamista on usein pidetty taitolajina eikä tieteenä.

Mallintamisen pääongelma on tasapainon löytäminen tavoitteiden kattavuuden ja mallin yksinkertaisuuden välillä. Jos tavoitellaan mahdollisimman kattavaa mallia, siitä tulee helposti niin monimutkainen, ettei sitä yksinkertaisesti pysty hallitsemaan. Toisaalta jos malli on liian yksinkertainen, sitä ei voida käyttää mihinkään järkevään tarkoitukseen, koska se on täysin triviaali. Tämä voidaan kutsua kompleksisuuden ongelmaksi, joka tulee esille meille jokaiselle, kun haluamme hahmottaa ja ymmärtää ympyröivää maailmaa. Jos omalla toiminnallamme yritämme vaikuttaa maailman menoon, on ehkä nöyrästi muistettava, että hyvä säätäjä ainakin implisiittisesti sisältää säädettävän järjestelmän mallia (Conant, Ashby, 1970).

Yhteenveto

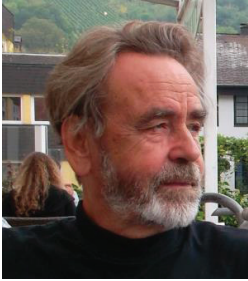
Näemme siis, kuinka tärkeä käsite malli on kaikessa rationaalisessa toiminnassa. Malleilla yritetään ymmärtää, miten maailma toimii. Malleilla yritämme sopeuttaa omaa toimintamme siten, että asetetut tavoitteet täyttyvät mahdollisimman hyvin. Malleilla yritämme rakentaa omia realimaailman järjestelmiämme siten, että ne toimisivat mahdollisimman hyvin. Mallien avulla yritämme rakentaa sellaisia ohjausjärjestelmiä, jotka luonnollisella tavalla varmistavat "hyvää tulevaisuutta".

Ajattelu perustuu malleihin, joten suunnittelu edellyttää malleja. Tavoitteet on mahdollista määrittellä ja ratkaista mallimaailmassa. Tiettyihin tarkoituksiin malleja on jo mahdollista tuottaa lähes automaattisesti, jolloin myös ohjausjärjestelmien suunnittelua voidaan automatisoida. Asiantuntijaa tarvitaan toki edelleen. Itse asiassa vaatimukset tällä puolella vain kasvavat, sillä ratkaisevaa on mallimaailman ja todellisen maailman eroavuudet. Niitä on aina!

Viitteet

Conant R.C., Ashby W.R. (1970). Every good regulator of a system must be a model of that system, *Int. J. Systems Sci.*, vol. 1, No. 2, 89-97.

Kirjoittajat



Pentti Lautala, professori (emeritus), Tampereen teknillinen yliopisto, Systemitekniiikan laitos (Kovapääntie 60, Tampere, pentti.lautala@tut.fi). Hän suoritti diplomi-insinöörin tutkinnon 1968 ja väitteli tekniikan tohtoriksi 1978. Hänen työuransa alkoi TKK:n assistenttina 1968 ja sieltä hän siirtyi Tampereelle opettajaksi 1986. Professuuristaan hän siirtyi eläkkeelle 2008, jonka jälkeen hän on jatkanut TTY:llä osa-aikaisena. Hänen nykyinen pääharrastuksensa on laskettelu alpeilla talvisin. Muina aikoina hän yrittää pitää itsensä ja vaimonsa harrastuksen edellyttämässä kunnossa.

Muiden kirjoittajien kuvat ja tiedot heidän omien esitysten yhteydessä.

Systemien teorit, mallit, menetelmät ja sovellukset

Aarne Halme, Pentti Lautala, Martin Ollus, Björn Wahlström ja Raimo Ylinen

Johdanto

Tässä kirjoituksessa pyrimme lyhyesti kuvaamaan systeemiteorian kehitystä ja vaikutusta erityisesti Suomessa. Esityksen runkona on professori Hans Blombergin aktiviteetit Teknillisessä korkeakoulussa. Kuten tekstissä ilmenee, ala laajeni hyvin nopeasti myös muihin yliopistoihin sekä sovellusten kautta teollisuuteen ja yhteiskunnan muihin alueisiin. Hans Blombergin vaikutus näkyy siinä, että hänen oppilaillaan oli merkittävä osuus tässä prosessissa. Monen toiminta on esitetty heidän osuudessaan käsillä olevassa seminaari-julkaisussa. Toivomme, että julkaisu kokonaisuudessaan valaisee laajemmin systeemiteorian kehitystä, merkitystä ja asemaa yhteiskunnassamme. Seminaarin osallistujien kokemus ja tausta ovat monipuoliset, joten heidän esityksensä täydentävät hyvin tämän kirjoituksen sisältöä.

Olemme jakaneet kirjoituksemme opettajamme professori Hans Blombergin uran mukaan siten, että kuvaamme aluksi sitä maailmaa, josta hän lähti liikkeelle. Sen jälkeen kerromme joistakin hänen työurallaan tapahtuneista kehitysaskelista ja käänteistä. Kolmannessa osassa tarkastelemme aikaa hänen eläkkeelle siirtymisensä jälkeen, jolloin hänen oppilaansa ovat luoneet omia työuriaan. Kirjoituksen lopussa katsomme vielä tulevaisuuteen hahmottamalla joitakin mielestämme mahdollisia ja tärkeitä systeemien teorioiden, menetelmien, työkalujen ja sovellusten kehityspolkuja.

Eräitä lähtökohtia

Systemien teorit

Aikaisena systeemiteorian referenssinä voidaan mainita Ludwig von Bertalanffy, joka otti käyttöön käsitteen "yleinen systeemiteoria" (von Bertalanffy 1968). Vaikka hänen taustansa oli biologiassa, hänen määrittelemänsä teoria loi pohjan dynaamisten vuorovaikutusten kuvaamiseen ja mallintamiseen hyvin monella eri tieteenalalla. Mallien avulla pyrittiin ymmärtämään kohdetta ja käyttämään ymmärtämistä hyväksi. Erityisesti teknisten järjestelmien ja prosessien yhteydessä pyrittiin (ja pyritään edelleen) käyttämään mallien antamaa tietoa hyväksi kohteiden hallinnassa, eli kun pyritään määrittelemään ohjaus- ja hallintatoimenpiteitä. Tästä käyttötarkoituksesta johtuen systeemiteoreettiset mallit ovat luonteeltaan usein dynaamisia. Aika on siis mallien yhtenä muuttujana.

Yleinen systeemiteoria tarkastelee lähinnä järjestelmiä, joille ainakin periaatteessa voidaan muodostaa hyvin jäsenneiltyjä malleja. Valitettavasti reaali maailma sisältää paljon sellaisia

järjestelmiä, joista on saatavissa vain sekalainen joukko monenkirjavaa dataa. Viime vuosikymmeninä tietokoneiden laskentatehon kasvu on mahdollistanut tällaisenkin datan käytön suoraan ilman yksityiskohtaista mallitusvaihetta tai korkeintaan konstruoimalla yksinkertaisia malleja. Esimerkiksi Peter Checkland kiinnostui systeemiteorian soveltamisesta näihin niin kutsuttuihin "pehmeisiin" järjestelmiin (Checkland 1999). Hän korosti erityisesti kvalitatiivista mallintamista, joka luonnollisesti aina on todellisen järjestelmän mallintamisen ensimmäinen askel. Lotfi Zadehin 1960-luvulla kehittämä fuzzy-teoria on toinen esimerkki tarpeesta mallintaa ja hallita prosesseja sääntöpohjaisen tietämyksen kautta täsmällisemmän luonnontieteen lakeihin perustuvan mallinnuksen vaihtoehtona (Zadeh, 1965).

Kybernetiikka

Erityisesti Itä-Euroopassa kehittyvän säätöteorian perustana pidettiin Norbert Wienerin (Wiener 1948) määrittelemää kybernetiikkaa (cybernetics). Yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa säätöä tutkittiin ja sen sovelluksia kehitettiin usein kybernetiikan instituuteissa. Erityisesti Neuvostoliitossa oltiin varsin kiinnostuneita uudesta teoriasta (Gerovitch 2002). Tämä kiinnostus nähtiin myös myöhemmin neuvostoliittolais-suomalaisessa kybernetiikan työryhmässä, joka järjesti monta pienimuotoista tieteellistä kokousta 1970- ja 1980-luvuilla ja joihin moni Hans Blombergin oppilas osallistui.

Säätötekniikka

Säätötekniikan kehityksen kannalta uusia menetelmiä ilmestyi toisen maailmansodan jälkeen. Jo sodan aikana Wiener kehitti neliöllisen kriteerin optimointiin perustuvan säätö- ja ennakkointimenetelmän eli n.s. Wiener-suodattimen. Richard Bellman määritteli dynaamisen optimoinnin (Bellman 1953, Bellman 1957), jonka avulla voitiin laskea optimitrajektorit tietyissä optimitehtävissä. Vuonna 1957 Lev Pontryagin ja hänen oppilaansa löysivät yleisen optimointiongelman ratkaisun, kun he kehittivät n.s. maksimiperiaatteen (Pontryagin et al 1962). Tämä saavutus herätti heti paljon kiinnostusta ja sovellutuksia ainakin avaruusteknologian piirissä (kts. esim. Athans & Falb 1966) ja kiinnostus systeemien ymmärtämiseen ja hallintaan kasvoi (esim. Kalman et al 1969).

Luonnollisesti syntyi kiinnostus soveltaa menetelmiä teollisten prosessien hallintaan, myös Suomessa. Menetelmät perustuivat kohdeprosessien matemaattisiin malleihin, jotka kuvaavat prosesseja riittävän tarkasti, kun taas aikaisemmin yleisesti käytetty PID-säätö ei tarvitse kovin tarkkaa mallia kohteesta. Tästä seurasi siis myös kiinnostus malleihin ja mallintamiseen. Prosessi-identifioinnilla laskettiin prosessien sisäänmenojen ja ulostulojen matemaattista riippuvuutta (Åström & Eykhoff 1971, Eykhoff 1974), jota käytettiin pohjana säädön suunnittelussa ja toteutuksessa. Uusissa säätömenetelmissä käytettiin usein hyväksi laskennallisia n.s. tilaparametreja, joita ei voitu mitata suoraan prosessista. Tämä johti myös kiinnostukseen toisen tyyppisestä identifioinnista, tilaestimoinnista, kuten Kalman-suodattimesta (Kalman 1960, Kalman & Bucy 1961, Ho & Kalman 1965).

Albertinkadun aikaa (1956 – 1970)

Sodan jälkeen tutkimustoiminta kohdistui paljon erilaisten instrumenttien kehitykseen. Hans Blomberg kehitti esimerkiksi väitöskirjassaan herkän instrumentin sähköisen pulssin pinta-alan mittaamiseen (Blomberg 1953). Instrumentissa suoritettiin analoginen integrointi siten, että pyöritettävän kelan massa oli riittävän iso verrattuna pulssin pituuteen.

Väitöstyönsä yhteydessä Blomberg perehtyi säätötekniikkaan, joten saatuaan nimityksen sähkötekniikan osastolle sijoitettuun vaihtuvaan ruotsinkieliseen professuuriin (Teoreettinen sähkötekniikka) hän ryhtyi opettamaan sitä. Kipinä säätötekniikkaan oli tullut akateemikko Laurilalta, joka oli aloittanut instrumenttitekniikan opetuksen Teknillisessä korkeakoulussa. Hän oli toiminut Blombergin väitöskirjan ohjaajana ja kehotti häntä jatkamaan tätä alaa kun hän itse suuntautui ydinvoiman kehittämisen pariin.

Opetus

Säätötekniikan perusopetukseen Blomberg kirjoitti perusteelliset luentomonisteet. Opetuksessaan ja tutkimuksessaan hän innostui nopeasti uusiin ilmestyviin menetelmiin, joita käsiteltiin välittömästi myös säätötekniikan jatkokursseissa. Hän julkaisi jo ensimmäisillä Automaatiopäivillä Pontryagin periaatteeseen nojautuvan esimerkin (Blomberg 1966). Ensimmäinen Blombergin ohjaama Pontryagin periaatteeseen perustuva väitöskirja ilmestyi myös samoihin aikoihin (Karttunen 1968).

Blomberg aloitti myös systemaattisen jatkokoulutuksen lisensiaattiseminaarien muodossa. Säätötekniikan lisensiaattikurssin oppikirjana käytettiin ensin kolmena vuotena Zadeh & Desoer: *Linear System Theory* (Zadeh & Desoer 1963) ja sen jälkeen taas kolmena vuotena massiivista teosta Athans & Falb: *Optimal Control* (Athans & Falb 1966). Kolmas paljon käytetty kirja oli Kalman, Falb & Arbib: *Topics in mathematical system theory*, McGraw-Hill, 1969 (Kalman et al 1969).

Koulutusta täydennettiin laboratorion sisäisillä seminaareilla, joissa opiskeltiin korkeamman matematiikan taitoja. Laboratorion assistentti- ja tuntiopettajakuntaan kuuluivat näihin aikoihin mm. Seppo Rickman, Sampo Ruuth (ent. Salovaara), Jaakko Kivinen, Pekka Salminen, Boris Segerstahl, Jyrki Sinervo, Aarne Halme sekä hieman myöhemmin Björn Wahlström, Raimo Ylinen, Martin Ollus ja Pentti Lautala.

Analoginen ja digitaalinen säätö

Teollisuusprosessien säädöt toteutettiin pitkälle 1960-luvulle asti analogiatekniikalla. Säätimet perustuivat silloin pneumaattisiin, mekaanisiin tai sähköisiin laskentaelementteihin. Tietokoneiden kehittyessä nähtiin niiden mahdollisuudet huomattavasti kehittyneempiin säätökonsepteihin. Tähän tarvittiin uutta teoriaa ja Z-muunnokset tekivät tulonsa digitaalisten säätäjien suunnitteluun samalla tavalla kuin Laplace-muunnosta oli käytetty analogiasäätäjien suunnitteluun.

Uudet menetelmät vaativat laskentakapasiteettia, johon tietokoneiden kehitys vastasi. Ensimmäiset n.s. prosessitietokoneet ilmestyivät markkinoille 1960-luvulla. Esim. IBM 1710 oli prosessin säätöön muunneltu versio tietokoneesta IBM 1620.

Teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan osastolle saatiin vuonna 1967 IBM 1620 tietokone, jota moni korkeakoulun oppilas käytti omassa diplomityössään. Tietokoneita oli luonnollisesti saatu korkeakoululle aikaisemminkin, mutta tämä "säätömiesten oma kone" mahdollisti aivan toisella tavalla käytännön kokemuksia uudella työkalulla. Kone olikin jatkuvassa, usein ympärivuorokautisessa käytössä. Tietokoneen käyttöä tukemaan perustettiin sähköosaston laskentaryhmä, joka sijoitettiin säätötekniikan laboratorioon. Aluksi ryhmän muodostivat Björn Wahlström ja Martin Ollus.

Teollisuusprosessien ohjaus ja säätö

Teollisuudessa kiinnostus säädön tietokonesovelluksiin sekä uusiin menetelmiin oli myös suuri. Suomessa oltiin erityisesti kiinnostunut puunjalostusalueen sovelluksista. Tilanne oli samanlainen Ruotsissa, jossa Karl Johan Åström ja Torsten Bohlin kehittivät tietokonesäätöä paperiradan kosteuden ja neliöpainon säätöön. Mallit identifioitiin uusilla stokastisilla menetelmillä ja ratkaisut implementoitiin Billerudin paperitehtaalla (Åström & Bohlin 1965, Bohlin 1970). Työssään he sovelsivat Z-muunnosta prosessien mallinnukseen ja säätösuunnitteluun.

Samoihin aikoihin myös Juhani Korhonen kehitti kosteuden ja neliöpainon tietokonesäätöä Enso Gutzeitin Kaukopään tehtailla 1965 (Korhonen 2001). Sekä Kaukopäässä että Billerudissa käytettiin tietokonetta IBM 1710.

Ensimmäisen varsinaisen prosessitietokoneen, Digital Equipment Corporationin PDP8, tulo markkinoille synnytti Suomessa muutamia huomattavia tutkimus- ja kehityshankkeita. Nokian teollisuusautomaatio-osastolla ryhdyttiin kehittämään PDP8 tietokoneen ympärille PP6500 prosessiautomaatiojärjestelmää. Systemiteorian laboratorion Raimo Ylinen ja Martin Ollus osallistuivat Juhani Korhosen vetämään paperikoneiden neliöpainon- ja kosteudensäätöprojektiin. Tuloksena oli AUTOPAPER niminen neliöpainon ja kosteuden säätöpaketti. Säätöalgoritmina käytettiin lineaari-kvadraattista säätöä liukuvan horisontin periaatteella ja tilaestimaattorina Kalman-suodatinta. Mallit oli mahdollista identifioida tuotantoajan aikana. Paketti asennettiin hieman yksinkertaistettuna Nokian paperitehtaalle ja täysimittaisena vuonna 1971 Voikkaan paperitehtaalle.

Tietokonesäätöön tarvittiin luonnollisesti mittaustietoa säädettävistä suureista, näissä tapauksissa paperiradan kosteudesta ja neliöpainosta. Eri mittausratkaisujen perusteella amerikkalaiset yritykset Measurex ja Accuray olivat kehittäneet paperiradan yli traversoivia reaaliaikaisia, on-line mittalaitteita, joita voitiin käyttää mittaustiedon saamiseksi (Korhonen 2001, Rouhesmaa 2001). Ensimmäisiä toimituksia oli Suomeen, jossa myös tehtiin tuotekehityksen vaatimia kenttäkokeita.

Toinen merkittävä saavutus puunjalostusteollisuuden automaatio-sovelluksissa oli Aarne Valkaman ja hänen ryhmänsä kehittämä AUTOCOOK niminen sellunkeiton ohjausjärjestelmä (Tuomi 2001). AUTOCOOK oli tuolloin Nokian huipputuote. Samaan aikaan

kehitettiin myös AUTOBLEACH valkaisuun ohjaukseen. Näistä varsinkin AUTOCOOKia asennettiin usealle sellutehtaalle.

Kansainväliset yhteydet

Hans Blomberg korosti aina assistenteilleen kansainvälisten kontaktien tärkeyttä. Tätä tarkoitti myös julkaisujen kirjoittaminen englannin kielellä ja esiintyminen kansainvälisissä foorumeissa. Blombergilla itsellä oli kielen takia erityisen kiinteät kontaktit pohjoismaiseen tiedeyhteisöön.

Suomi liittyi kansainväliseen järjestöön International Federation of Automatic Control (IFAC) vuonna 1959. Muodollinen jäsenorganisaatio oli Suomen Sääteknillinen Seura ry. (myöhemmin Suomen Automaatioseura ry.). IFAC on sen jälkeen ollut tärkeä kansainvälien yhteistyöpartneri sääteknikan ja systeemiteorian aloilla. Suomalaiset tutkijat osallistuivat alusta alkaen hyvin aktiivisesti IFAC:n toimintaan ja ensimmäinen tietokonesäädön konferenssi järjestettiin Suomessa jo 1972. Suomi sai sen jälkeen järjestettäväkseen vuoden 1978 IFAC:n maailmankongressin (Niemi 2001), johon saatiin yli tuhat osaanottajaa. Tämän kolmen vuoden välein järjestettävän kongressin lisäksi suomalainen jäsenseura on järjestänyt useita tiettyihin automaation osa-alueisiin keskittyviä IFAC:n kansainvälisiä konferensseja.

Laboratorion kannalta mielenkiintoinen kehitys lähti liikkeelle 1970-luvun alussa kun käynnistettiin keskusteluja yhteisen systeemanalyysiin erikoistuvan tutkimusinstituutin perustamisesta. Keskustelut johtivat siihen että Neuvostoliitto ja Yhdysvallat yhdessä kymmenen muun maan kanssa allekirjoittivat International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) perustamisasiakirjan. Suomi on ollut IIASAn jäsen vuodesta 1976 ja sen jälkeen moni suomalainen systeemitutkija on vierailut ja työskennellyt siellä.

Otaniemen aikaa (1970 – 1985)

Teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan osasto muutti Otaniemeen vuonna 1969. Samoihin aikoihin korkeakouluun perustettiin varsinainen sääteknikan oppituoli, johon nimitettiin Antti Niemi. Hän siirtyi virkaan Oulun yliopiston säätö- ja systeemitekniikan professuurista. Samalla perustettiin uusi sääteknikan laboratorio. Entisestä sääteknikan laboratoriosta tuli Blombergin johtama systeemiteorian laboratorio.

1960-luvun lopulla käynnistyivät Suomessa yliopistolaitoksen laajentaminen ja hajauttaminen maakuntiin. Tampereelle ja Lappeenrantaan perustettiin Teknillisen korkeakoulun sivu-korkeakoulut. Kummassakin aloitettiin sääteknikan opetus. Tampereella Boris Segerståhl hoiti aluksi professuuria ja vuodesta 1969 lähtien Pauli Karttunen. Boris Segerståhl siirtyi Oulun yliopistoon hoitamaan Antti Niemen jälkeen tyhjäksi jäänyttä säätö- ja systeemitekniikan professuuria. Aarne Halme nimitettiin Tampereelle sääteknikan apulais-professoriksi 1972, mistä virasta hän edelleen siirtyi Oulun yliopiston säätö- ja systeemitekniikan professoriksi 1978, kun Boris Segerståhl nimitettiin Pohjoissuomen tutkimuslaitoksen johtajaksi. Lappeenrannassa sähkötekniikan ja sääteknikan opetuksesta vastasi

apulaisprofessori Jyrki Sinervo, joka hänkin siirtyi virkaan systeemiteoria laboratorion tutkimusryhmästä

1960- ja 1970-lukujen vaihe oli yliopistomaailmassa levotonta aikaa. Joillakin kursseilla opiskelijat pitivät luentolakkoo ja kieltäytyivät tekemästä kotiharjoituksia. Vaadittiin hallinnon uudistusta ja opiskelijoiden pääsyä mukaan hallintoon ja myös opetuksen sisällön suunnitteluun. Kaikesta tästä oli seurauksena sekä hallinnon että tutkinnon uudistus, jonka jälkeen opiskelijoilla oli vapaus valita melkein mitä kursseja tahansa omasta tai muista korkeakouluista.

Hallinnonuudistuksen yhteydessä alkoi myös uuden laitosorganisaation kokeilu. Systeemiteorian laboratorio liittyi matematiikan laitokseen, jonka seurauksena systeemiteoria alkoi saada lisää opiskelijoita Teknillisen fysiikan osaston teknillisen matematiikan opetusohjelmasta.

Opetus

Systeemiteorian sovellukset liittyvät useimmiten säätöongelmien ratkaisuun, joten systeemiteorian ja säätötekniikan kurssien sisältö on pakostakin osittain päällekkäistä. Tästä syystä laboratorioden eriytyessä perustettiin uusi systeemiteorian peruskurssi opettamaan nk. ”modernia säätöteoriaa”. Blombergin opettama säätöteorian jatkokurssi oli sisällöltään niin paljon puhdasta systeemiteoriaa, että se jätettiin ennalleen. Kuitenkin kurssiin jäi päällekkäisyyttä, jota pyrittiin myöhemmin tutkinnonuudistuksen yhteydessä poistamaan siinä kuitenkaan onnistumatta.

Lisensiaattikursseja jatkettiin vanhaan tyyliin vuosittain vaihtuvista aiheista, jotka valittiin yleensä laboratorion tutkimusintressien perusteella. Aiheina olivat mm. automaattiteoria, numeeriset optimointimenetelmät, hierarkkiset järjestelmät, polynomisysteemiteoria, jne. Kuvaavaa tuon ajan hengelle oli, että kun tavanomaisista systeemi- ja säätöteorian erityisalueista poiketen lisensiaattiseminaarin aiheeksi otettiin Yrjö Ahmavaaran yhteiskunta-kybernetiikka, tuli seminaarista yleisömenestys.

Simuloinnista tuli yhä merkittävämpi työkalu menetelmätutkimuksessa. Tästä syystä opetusohjelmaan otettiin alan erikoiskurssi, Björn Wahlströmin vetämä kurssi Jatkuvien järjestelmien simulointi.

Tutkimus

Systeemiteorian laboratorion tutkimus oli suurelta osalta teoreettista tutkimusta ja siihen saatiin suhteellisen hyvin rahoitusta sekä Suomen Akatemialta että yksityisiltä säätiöiltä. Ainoa huomattavampi sovellusprojekti oli yhdyskuntien jäteveden käsittelyn ohjausta tutkiva projekti (YVY-projekti).

Teoriatutkimus lähti systeemien perusominaisuuksien kuten kausaalisuuden, ohjattavuuden, tarkkailtavuuden ja identifioitavuuden määrittelystä aivan logiikan, joukko-opin ja lineaaristen systeemien yhteydessä algebran tasolla. Perustana olivat Sampo Ruuthin ja Boris Segerstählin 60-luvun tutkimukset. Blomberg itse sekä fysiikan puolelta systeemiteoriaan

siirtynyt Jussi Orava olivat hyvin aktiivisia tällä alueella. Stokastiset ja itseoppivat systeemit olivat taas erityisesti Björn Wahlströmin aluetta.

Seuraava askel oli lineaaristen differentiaali- ja differenssisysteemien algebrallinen teoria eli polynomisysteemitheoria, josta tässä raportissa on myös tarkempi kuvaus. Tulokset julkaistiin kirjana Blomberg & Ylinen: Algebraic Theory for Multivariable Linear Systems, joka ilmestyi Academic Pressin kustantamana vuonna 1983 (Blomberg & Ylinen 1983). Perusteoria lähti vakiokertoimisista lineaarisista jatkuvista systeemeistä. Jyrki Sinervo kehitti hyvin samankaltaista rinnakkaista teoriaa aikadiskreeteille systeemeille. Raimo Ylinen taas yleisti teorian aikavarianteille ja jakautuneille systeemeille, Pauli Sipari ohjelmoi analyysi- ja suunnittelumenetelmät tietokoneohjelmaksi, joka helpotti numeerisia tarkasteluja.

Lineaaristen systeemien teoriaa laajennettiin myös epälineaarisiiin systeemeihin. Aarne Halme kehitti perusteorian polynomityyppisille ja analyyttisille epälineaarisille systeemeille ja sovelsi sitä mm. stabiilisuustarkasteluihin. Jussi Orava sovelsi menetelmää optimaaliseen tilaestimointiin (Kalman-suodatukseen). Raimo Hämäläinen taas käsitteli epälineaarista optimisäätöä tällä menetelmällä.

Korkeakoulujen käytettävissä oleva laskentakapasiteetti parani huomattavasti kun opetusministeriö vuonna 1978 hankki niille yhteisen Univac 1108 tietokoneen, jota voitiin ajaa laboratoriossa sijaitsevilta päätteiltä. Käyttöön tulivat myös ensimmäiset graafiset Tektronix päätteet, joilla voitiin kätevästi tulostaa simulointiajajojen tuloksia.

Lisääntynyt laskentateho mahdollisti laajat simuloinnit ja erilaisten dynaamisten optimointitehtävien numeerisen ratkaisemisen. Näin uusiksi tutkimusalueiksi tulivat optimisäätöön ja optimaaliseen estimointiin liittyvät kahden pisteen reuna-arvotehtävät. Jussi Orava kehitti Pentti Lautalan kanssa uuden ratkaisualgoritmin, jota sovellettiin mm. vesivoimalaitosten optimaalisen juoksutuksen laskemiseen. Numeeristen menetelmien kehitystyötä jatkoi Timo Eirola.

Hierarkkisten systeemien ohjaus ja koordinointi oli 70-luvulla maailmalla laajalle levinnyt tutkimusalue. Hans Blomberg itse osallistui merkittävästi tähän tutkimukseen ja kehitti hierarkkisten tuotantojärjestelmien ohjaukseen koordinointi- ja suunnittelumenetelmiä yhdessä Bulgariasta Suomeen siirtyneen Ljudmil Golemanovin kanssa. Jaakko Kivinen taas esitti väitöskirjassaan yrityksen hierarkkisen ohjausmallin. Systeemitheorian laboratoriossa Lauri Hakkala ja Juhani Hirvonen kehittivät uusia numeerisia ratkaisumenetelmiä reaaliaikaisten koordinoititehtävien optimointiin sekä rajoitettujen optimisäätötehtävien ratkaisuun.

Peliteoria ja monitavoiteoptimointi tarjoavat toisenlaisia ratkaisumalleja hajautettujen järjestelmien ohjaukseen. Raimo Hämäläinen kehitti dynaamista peliteoriaa ja sovelsi sitä esimerkiksi fysiologisten järjestelmien mallitukseen ja häiriöllisten optimisäätötehtävien ratkaisuun ja Veijo Kaitala taas ekologisten systeemien mallitukseen ja ohjaukseen. Kyösti Tarvainen tutki myös hierarkkisia systeemejä, mutta keskittyi monitavoiteoptimointimenetelmien kehittämiseen ja soveltamiseen.

Sovelluksia

Vaikka systeemiteorian laboratorion tutkimuksen pääpaino oli teorian ja menetelmien kehittämisessä, tehtiin siellä myös soveltavaa tutkimusta. 70-luvun puolivälin tienoilla laboratoriossa oli käynnissä laaja projekti yhdyskuntien jätevesien puhdistusmenetelmien kehittämiseksi (YVY-projekti). Pääpaino oli biologisten puhdistusprosessien mallituksessa ja säädössä. Työhön osallistuivat systeemiteorian laboratorion ainakin Jukka Ranta, Andrea Holmberg, Raimo P. Hämäläinen, Kim Pingoud, Reijo Rummukainen, Juha Kaila, Veijo Kaitala ja Veijo Lappalainen. Tampereelle siirtynyt Arne Halme oli myös aktiivisesti mukana tämän ryhmän toiminnassa

Tästä työstä kehittyi myös laajempaa biologisiin, ekologisiin ja ympäristösystemeihin liittyvää osaamista. Andrea Holmberg, Jukka Ranta, Annikki Mäkelä ja Risto Sievänen kehittivät bioreaktoreiden mallittamista ja säätöä esimerkiksi hyönteismyrkkujen tuotantoa varten. Tampereella Arne Halme aloitti Pekilo-proteiiniprosessin mallintamisen liittyvän tutkimuksen näistä samoista lähtökohdista. Bioteknisten prosessien mallintamiseen ja ohjaukseen liittyvä osaaminen johti myöhemmin merkittäviin saavutuksiin uusien automaatio- tuotteiden kehittämisessä Rinteknon ja Software Pointin toimesta (bioreaktoreiden tietokone-ohjauksen MFCS-järjestelmä). Laboratorion viimeisen väitöskirjan teki Kim Pingoud vesien suotautumismalleista.

Mallinnus ja simulointi

Loviisan ydinvoimalaitoksen suunnittelutyön käynnistyessä todettiin koko laitoksen simuloinnin olevan tarpeen sen säätökonseptin luomiseksi. Tähän hankittiin vuonna 1970 hybriditietokone EAI690, joka yhdisti sekä analogia- että digitaalitietokoneen hyviä puolia. Analogiakoneella ratkaistiin laitosta ja säätäjiä kuvaavia differentiaaliyhtälöitä ja digitaalikoneella simuloitiin viiveitä sekä ratkaistiin reaktoria ja höyrykehittämiä kuvaavia osittais-differentiaaliyhtälöitä (Wahlström 1975). Hybridikone oli VTT:n omistama mutta se sijoitettiin systeemiteorian laboratorioon, jossa sitä voitiin käyttää harjoitustuihin. Tämä kone oli sitten kovassa käytössä noin viisitoista vuotta ennen kuin konevanhus siirrettiin Jyväskylään tietokonemuseoon. Tämä tutkimustyö johti sittemmin ensin Loviisaan ja myöhemmin Olkiluotoon hankittuihin koulutussimulaattoreihin.

Hybridikoneella mallinnettiin ja tutkittiin ydinvoimalaitosten ohella myös paperinmuodostusta (Koskimies et al 1972) ja suurnosturia (Kärnä, Wahlström 1974). Hybridikoneetta voitiin myös soveltaa lääketieteellisten ilmiöiden kuvaamiseen, kuten kolesterooli-metabolismiin (Kekki et al 1977) ja warfarinin imeytymiseen (Julkenen et al 1976). Jay Forresterin (Forrester 1971b) ja Rooman klubin tutkimukset (Meadows et al 1972) antoivat inspiraation hybridikoneella toteutettuun maailmanmalliin.

Mikroprosessorit automaatiassa

Mikroprosessoreiden kehittäminen 1970-luvulla vaikutti voimakkaasti automaatio- ja säätösovelluksiin. Ensimmäinen kaupallinen digitaalinen hajautettu automaatiojärjestelmä oli Honeywell yhtiön nk. TDC2000-järjestelmä. Suomalainen prosessinohjausjärjestelmien

valmistaja Valmetin Instrumenttitehdas vastasi haasteeseen omalla Damatic-järjestelmällään, jonka ensimmäiset toimitukset installoitiin Suomeen Enso-Gutzeitin Pankakosken tehtaaseen ja Ruotsiin ASSI:n Karlsborgin tehtaaseen vuonna 1979 (Wahlström, 2001). Uudesta suomalaisesta järjestelmästä tuli myyntimenestys.

Mikroprosessoritekniikasta tuli nopeasti vallitseva automaatio- ja säätöratkaisujen toteutus-tekniikka, ensin prosessiteollisuudessa, mutta myöhemmin myös kappaleteollisuuden automaatoratkaisuissa. Toteutukset olivat yleensä hajautettuja, eli keskenään kommunikoivat mikroprosessorit sijaitsivat lähellä ohjattavaa kohdetta. Mikroprosessorit tulivat myös hyvin nopeasti moneen erilaiseen tuotteeseen saamaan niitä toimimaan suhteellisen itsenäisesti, "älykkäästi". Mikroprosessorit ja tietotekniikka sulautuivat kokonaisuuteen ja ruvettiin puhumaan sulautetuista järjestelmistä (embedded systems). Tänä päivänä tällaisia sulautettuja ominaisuuksia on monessa jokapäiväisessä käyttötuotteessamme.

Digitaalisissa automaatoratkaisuissa keskenään kommunikoivat mikroprosessorit suorittavat vaadittavat toiminnot hajautetusti. Esimerkiksi Damatic-järjestelmällä toteutetussa prosessin säätöjärjestelmässä saattoi olla toista sataa prosessoriyksikköä. Tiedonsiirto mikroprosessorien välillä samoin kun mikroprosessorien ja kohdeprosessin välillä muodostui tärkeäksi ja joskus myös pullonkaulaksi. Syntyi tarve ja kiinnostus tutkia ja kehittää ja myös standardoida tiedonvälitystä, eli erilaiset tiedonsiirtoväylät saivat kohtalaisen paljon huomiota. Erityisen kiinnostavaksi nousi kenttäväylä, joka yhdistää järjestelmät prosessien sensoreihin ja toimilaitteisiin. Osallistuminen kenttäväylän kehittämiseen on Suomessa ollut aktiivista ja tuloksellista.

Ajanjakso vuodesta 1985 nykypäivään

Organisaatiomuutoksia

Systemiteorian laboratorion toiminta päättyi käytännössä, kun Hans Blomberg jäi eläkkeelle vuonna 1985. Laboratorion aktiivinen tutkimustoiminta oli jo muutenkin jonkin verran vähentynyt, koska Blomberg toimi opetuksesta vastaavana vararehtorina ja suurin osa 70-luvulla laboratoriossa työskennelleistä oli siirtynyt muihin tehtäviin toisiin yliopistoihin ja tutkimuslaitoksiin, monet VTT:lle, sekä muutamat yrityselämään.

Blombergin seuraajaksi vaihtuvaan ruotsinkieliseen virkaan tuli pienen välivaiheen jälkeen Hans Andersin jonka opetusala oli automaatiotekniikka. Vuonna 1985 perustettiin korkeakouluun myös varsinainen automaatiotekniikan professori, johon nimitettiin Aarne Halme ja vastaava laboratorio nimettiin automaatiotekniikan laboratoriksi. Blomberg jatkoi vielä 90-luvulle emeritus professorina tässä automaatiotekniikan laboratoriossa tutkien Pauli Siparin kanssa systemien rakenteellisia ominaisuuksia.

Teknillisessä korkeakoulussa muutettiin organisaatiota vuoden 1987 alussa ja siirryttiin ns. suurosastoihin ja niiden alaisiin laitoksiin. Uuteen tietotekniikan suurosastoon perustettiin automaatio- ja systemitekniikan laitos, johon siirtyivät sähköosastolla aikaisemmin sijainneet automaatiotekniikan (Aarne Halme) ja säätötekniikan (Antti Niemi, sittemmin systeemi-

tekniikan Heikki Koivo) vastualueet sekä puunjalostusosastolta viestintätekniikan vastuualue (Hannu Saarelma, sittemmin Pirkko Oittinen). Myös ruotsinkielinen automaatiotekniikan professuuri siirrettiin uuteen laitokseen. Uuteen tietotekniikan koulutusohjelmaan tuli myös haara nimeltä automaatio- ja systeemitekniikka.

Vuoden 1997 uudessa organisaatiomuutoksessa suurosastot todettiin yliorganisoitumiseksi. Ne purettiin ja perustettiin suurempi lukumäärä itsenäisiä osastoja, jotka toimivat suoraan rehtorin esikunnan alaisuudessa. Tässä muutoksessa automaatio- ja systeemitekniikan laitos muuttui osastoksi ja se sai oman itsenäisesti hallittavan koulutusohjelman. Vaihtuvan ruotsinkielisen professuurin haltijan siirtyessä eläkkeelle professuuri siirrettiin tuotanto-talouden osastolle ja sen tilalle perustettiin uusi automaation tietotekniikan professuuri, johon kutsuttiin Kari Koskinen VTT:ltä.

Oman koulutusohjelman aloittaminen oli merkittävä vaihe automaatioalan koulutuksessa Suomessa. Samoihin aikoihin TKK:n kanssa myös TTY aloitti oman automaatioalan koulutusohjelman. Oma koulutusohjelma mahdollisti perusopintojen paremman suunnittelun alan omien tarpeiden lähtökohdista. Perinteisesti automaatioalan koulutusta annettiin osana sähkö- tai prosessitekniikan koulutusohjelmia, jolloin peruskoulutus määräytyi paljolti isäntäkoulutusohjelman tarpeista.

Toiminnan laajetessa osastoksi professorikuntaa laajennettiin kahdella uudella professuurilla vuonna 2000. Nämä sijoitettiin automaatiotekniikan (Arto Visala) ja systeemitekniikan (Heikki Hyötyniemi) laboratorioihin.

Vuonna 2007 tehtiin jälleen organisaatiomuutos, jonka yhteydessä otettiin uudelleen käyttöön laajemmat tiedekunnat ja laitokset. Syynä oli opetusministeriön taholta tapahtunut painostus muuttaa yliopistojen hallinto kaikkialla samanlaiseksi uuden yliopistolain myötä. Tässä muutoksessa automaatio- ja systeemitekniikan osastosta viestintätekniikka pois lukien tehtiin automaatio- ja systeemitekniikan (AS-) laitos sähkötekniikan, elektroniikan ja automaation tiedekuntaan. Tätä vaihetta kesti kaksi vuotta, jonka jälkeen Teknillinen korkeakoulu yhdistyi Kauppakorkeakoulun ja Taideteollisen korkeakoulun kanssa Aalto-yliopistoksi. Aalto-yliopisto muutti tiedekunnat korkeakouluiksi, jonka jälkeen automaatio- ja systeemitekniikan laitos kuului Sähkötekniikan korkeakouluun huomattavasti pienentyneenä yksikkönä. Viimeisin organisaatiomuutos vuoden 2014 alussa yhdisti laitoksen elektroniikan ja sähkötekniikan laitokseen sähkötekniikan ja automaatiotekniikan laitokseksi. Vertauskuvallisesti voidaan sanoa, että kehitys joka alkoi Blombergin systeemiteorian laboratoriosta ja kukoisti 40 vuotta, palasi organisaatiomuutosten kiihdyttämänsä takaisin kotipesäänsä.

Automaatiotekniikan kehitys

Jo 1970- luvulla alkanut elektroniikan ja tietotekniikan voimakas kehitys johti aivan uusiin toimintamuotoihin myös automaatiotekniikassa. Henkilökohtaiset mikrotietokoneet (PC:t) ja näiden verkot korvasivat suurelta osalta aikaisemmat keskitetyt suurtietokoneet. Maailmanlaajuiset tietoverkot (Internet), hypertekstijärjestelmät (WWW) ja hakukoneet (esim. Google) toivat tiedon nopeasti käyttäjien saataville. Nopeat laajakaistaiset kaapeli- ja nykyisin myös langattomat maanpäälliset ja satelliittiyhteydet tekevät tiedonsiirrosta lähes reaaliaikaista.

Halvat mobiililaitteet (puhelimet, navigaattorit) mahdollistavat sen, että käyttäjät voivat olla jatkuvasti yhteydessä mihin tahansa vastapuoleen ympäri maapalloa ja liikkumaan tuntemattomassa ympäristössä.

Automaatiosta on tullut kaikkialla läsnä olevaa (ubiikkia). Lähes kaikki koneet ja laitteet sisältävät digitaalista elektroniikkaa ja usein kehittyneitä säätöalgoritmeja. Hyvä esimerkki on Kalman-suodatin, jota ilman ei mikään satelliittinavigointisysteemi toimisi.

Tämä kehitys johti siihen, että perinteisten prosessi- ja energiasektoreiden lisäksi automaatio tuli merkittäväksi osaksi konetekniikan kehitystä ja konetekniikan koulutukseen lisättiin mekatroniikan linja. Koneautomaation alalle luotiin yliopistoihin omia tutkimus- ja koulutusryhmiä. Suomen teollisuuden rakenteen mukaisesti erityisesti sovellukset liikkuvissa työkonseissa, robotiikassa ja kappaletavaraiteollisuuden tuotannossa lähtivät voimakkaasti kasvamaan.

Nokian kasvu 90-luvulla maailman johtavaksi matkapuhelinvalmistajaksi, johti koko elektroniikkatuotantosektorin voimakkaaseen kasvuun ja elektroniikan tuotantoautomaatioon erikoistuneiden yritysten syntyyn. Valitettavasti vuosituhatosen vaihteessa tapahtunut tietotekniikkakuplan puhkeaminen aloitti elektroniikkatuotannon vähittäisen alasajon ja siirtymisen ulkomaille halvempien tuotantokustannusten maihin. Tätä ei pelastanut edes tuotannon automatisointi.

Ensimmäiset sulautetut automaatiojärjestelmät eivät tarvinneet mitään varsinaista käyttöjärjestelmää, vaan ohjelmointi- ja käyttöliittymä toteutettiin ulkopuolisella kehitystuki-järjestelmällä. Vähitellen siirryttiin kuitenkin valmiiden mikrotietokoneiden käyttöön. Mikrotietokoneiden ohjelmistomarkkinoita on hallinnut Microsoft DOS- ja Windows käyttöjärjestelmien. Matkapuhelinvalmistajilla taas on ollut käytössä omat usein valmistaja-kohtaiset järjestelmänsä. Automaatiojärjestelmien ja matkapuhelinten ja puhelinverkkojen kehitystyön yhteydessä 1980-90-luvuilla Suomeen syntyi merkittävä osaaminen tietokoneiden ohjelmoinnissa ja suurten järjestelmien rakentamisessa, jota on hyödynnetty monella tavalla.

Suomalainen ohjelmisto-osaaminen johti myös mielenkiintoiseen suomalaiseen kehitystyöhön, kun Linus Torvalds vuonna 1991 julkaisi ensimmäisen version kehittämästään Linux käyttöjärjestelmästä, joka on mikrotietokoneille sovitettu versio suurtietokoneiden UNIX käyttöjärjestelmästä. Tämä julkaistiin vapaan käyttöluvan periaatteella ja tästä on tullut maailmalla suurmenestys (Weber 2004). Linux on paljon käytetty käyttöjärjestelmä erilaisissa sulautetuissa automaatio-sovelluksissa ja myös nykyisin maailman yleisin nk. älypuhelin käyttöjärjestelmä Android perustuu Linux-ytimeen.

Katse tulevaisuuteen

Tieteellisissä julkaisuissa ja esim. IFAC:in Maailmankongressissa käsiteltyjen aiheiden jakautuma on jo pitkään ollut stabiili. Sen sijaan konferenssipapereiden ja lehtiartikkelien määrä on jatkuvassa kasvussa Aasian tutkijoiden tultua julkaisumarkkinoille. Systeemi- ja säätöteorian voimakas kehitys alkoi jo hiukan ennen meidän aktiiviaikaamme, mutta merkittävimmät uudet teoriat ja tulokset meillä ja muualla syntyivät juuri systeemiteorian

laboratorion elinaikana. Nyt tutkijapiireissä on tapahtunut jo sukupolvenvaihdos mutta välillä näyttää siltä, että uusi sukupolvi ei enää tunne pioneeriaikoina kehitettyjä teorioita ja menetelmiä. Voi olla, että tämä johtuu vain uusien paperien valtavasta määrästä, jota kukaan ei pysty enää hallitsemaan. Todennäköisemmin tilanne johtuu siitä, että mallipohjaisten menetelmien kehityksessä on tultu niin pitkälle kuin toisaalta reaalisten järjestelmien matemaattiset mallitusmenetelmät ja –tarkkuudet ja toisaalta käytettävissä oleva matematiikka antavat myöten.

Tietokoneiden laskentatehon kasvusta toisaalta seuraa, ettei tarvitakaan kovin tarkkoja ja monimutkaisia malleja vaan mallitusepä-tarkkuuden aiheuttamat virheet kompensoidaan nopeilla ohjaustoimenpiteillä. Tästä johtuen myös teoreettisesti vaativien menetelmien tarve voi joissakin tapauksissa vähetä. Ainoana suurena haasteena teorian kehitykselle onkin esitetty menetelmien soveltamista yhä laajempiin ja monimutkaisempiin järjestelmiin. Todennäköinen kehityssuunta näyttäisikin johtavan teoreettisesti hienostuneiden menetelmien korvaamiseen yksinkertaisemmilla menetelmillä ja raa'alla laskentavoimalla.

Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, ettei systeemiteoriaa tai –tekniikkaa tarvita. Valitettavasti asioiden kausaalisuhteita ei pystytä määrittämään pelkän datan perusteella vaan tarvitaan systeemitekniistä jäsentelyä ja mallien rakentamista. Suurten järjestelmien yhteydessä tarvittava vaativa vikadiagnosi taas edellyttää usein hyvinkin yksityiskohtaista mallinnusta. Systeemitekniikka on tullut jäädäkseen. Järjestelmiä pitää katsoa sekä kokonaisuutena että yksityiskohtien kautta.

Tähän oleellisesti liittyvä suuri haaste on, että suurten monimutkaisten systeemien ymmärtäminen ja hallitseminen eivät enää onnistu manuaalisesti vaan tarvitaan erilaisia (usein tietokonepohjaisia) työkaluja niiden sekä suunnitteluun että analysointiin. Toistaiseksi näyttää siltä, että käytettävissä on vain simulointityökaluja, joita voidaan käyttää yritys/erehdys-periaatteella. Periaatteessa työkalujen tulisi sisältää sekä kvalitatiiviseen että kvantitatiiviseen analyysiin ja suunnitteluun soveltuvia menetelmiä.

Jo Rooman klubin keskustelujen yhteydessä puhuttiin (Forrester 1971a) monimutkaisten (esim. sosiaalisten) systeemien intuition vastaisesta käyttäytymisestä (counter intuitive behaviour). Järjestelmien hallinta vaikeutuu ja hallintatoimenpiteet voivat vaikuttaa jopa päinvastaisesti kuin on tarkoitettu, ellei järjestelmää ymmärretä riittävän hyvin. Nykyään monen teollisuusprosessin hallinnassa on teknillisten asioiden lisäksi samanaikaisesti otettava huomioon erilaisia talouteen ja ympäristöön liittyviä sekä inhimillisiä ja kognitiivisia tekijöitä. Tässä monitieteellisessä ja kompleksisessa ympäristössä ilmiöiden dynamiikan ja niiden vuorovaikutuksen ymmärtäminen korostuu entisestään. Eri tieteelliset traditiot ja kohteiden kuvaustapojen erilaisuudet lisäävät haastetta, kun pyritään kokonaisvaltaiseen, holistiseen lähestymistapaan.

Sama huomio pätee myös ajankohtaisten globaalien talousongelmien ratkaisuisissa. Laajojen monella tavalla ristiin kytkettyjen järjestelmien hallinta ei voi onnistua ilman riittävän hyvää tietoa niiden rakenteista ja dynamiikasta. Systeemiteoria ja systeemien tutkimuksen ja kehittämisen tarve ei ole siis lainkaan vähentynyt vaan päinvastoin.

Jos katsoo niitä tieteellisiä ja teknillisiä saavutuksia, jotka ovat syntyneet vuosien varrella, voidaan todeta että tärkeä komponentti on ollut akateemisen tutkimuksen ja teollisuuden tutkimus- ja kehitystoiminnan kiinteä yhteys. On löytynyt kontakteja eri tahojen välillä, joiden kautta esiintyviä ongelmia on pystytty ratkomaan. Systeemitieteen laboratorion kohdalla tämä toteutui paljolti laboratorion ja VTT:n sähkötekniikan laboratorion kiinteään yhteistyön kautta. Valitettavasti yliopistopoliittinen trendi karsastaa tällä hetkellä tiivistä yhteistyötä teollisuuden kanssa, mikä on ollut kansallinen vahvuutemme teollisessa kilpailussa.

On myös ollut tärkeää, että on pystytty muodostamaan innovatiivisia ja motivoituneita tiimejä, joiden innostuneisuus ja halu onnistua on taannut tulosten laadun. Tärkeä lisätekijä on ollut monipuoliset ja hyvät kontaktit kansainvälisiin tutkimusryhmiin ja toimijoihin. Innostuneen ja aktiivisen ilmapiirin säilyminen on myös jatkossa onnistuneen toiminnan edellytys.

Viitteitä

Athans, M. & Falb, P. L. (1966). *Optimal Control*, McGraw Hill, 1966.

Bellman R. E. (1953). *An introduction to the theory of dynamic programming*. RAND Corp. Report 1953.

Bellman R. E. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.

Blomberg H. (1953). Ett känsligt ljusvisarinstrument avsett för integrering av svaga elektriska spänningsspulser med avseende på tiden. VTT: publikation 25, 1953.

Blomberg H. (1966). *Inblick i regleringsteknikens optimeringsidéer*. Automaatiopäivät -66, Suomen sääätöteknillinen seura, Helsinki.

Blomberg, H., Ylinen, R. (1983). *Algebraic Theory for Multivariable Linear Systems*. Academic Press, 1983.

Bohlin, T. (1970). *On the Maximum Likelihood Method of Identification*. IBM Journal of Research and Development, Vol14, Issue 1.

Checkland P. (1999). *Systems thinking, systems practice*, Wiley.

Eykhoff, P. (1974). *System Identification – Parameter and System Estimation*. John Wiley & Sons, New York.

Forrester, J. W. (1971a). *Counterintuitive Behavior of Social Systems*. *Technology Review*, Vol. 73, No. 3, Jan. 1971, pp. 52-68.

Forrester, J. W. (1971b). *World Dynamics*. Wright-Allen Press.

Gerovitch S. (2002). *From newspeak to cyberspeak; a history of Soviet cybernetics*. The MIT Press.

Ho, B., Kalman, R. (1965), Effective construction of linear state-variable models from input-output functions. *Regelungstechnik* 12: 545–548.

Julkunen R., Kekki M., Himberg J., Wahlström B. (1976): Non linear multi compartment model for drug binding by extracellular proteins with an application to warfarin, *Acta Pharmacol. et Toxicol.* 38,.

Kalman, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering* 82 (1): 35–45.

Kalman, R.E. Bucy, R.S. (1961). *New Results in Linear Filtering and Prediction Theory.* Transactions of the ASME. March 1961.

Kalman, R.E., Falb, P.L. Arbib, M.A.(1969). *Topics in mathematical system theory* McGraw-Hill, 1969

Karttunen P. (1968). Dynamic model systems and time optimal position control of the induction machine. *Acta Polytechnica Scandinavica*, El. 17

Kekki M., Miettinen T., Wahlström B. (1977). Measurement of cholesterol synthesis in kinetically defined pools using fecal steroid analysis and double labeling technique in man, *Journal of Lipid Research*.

Korhonen J. (2001). Paperikoneen prosessiohjauksen alkuhämärä 1962-1966. ss.36-41 teoksessa *Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut*.

Koskimies J., Perkinen J., Puolakka H., Schultz E., Wahlström B. (1972). A drainage model for the forming zone of a two-wire former, *Paperi ja Puu*, No.4a.

Kärnä J., Wahlström B. (1974). Simulation of the travelling machinery of a gantry crane on a hybrid computer, *Sähkö-lehti*,.

Meadows, D. H. Meadows, D. L. Randers, J. Behrens, W. W. III. (1972). *The Limits to Growth.* New York: Universe Books. ISBN 0-87663-165-0.

Niemi A. J. (2001). IFACin 7. maailmankongressi Helsingissä 12.-17.6.1978, ss.253-257, teoksessa *Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä, 1960- ja 1970-luvut*.

Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F., (1962). *The Mathematical Theory of Optimal Processes* (Russian; English translation). Interscience 1962.

Rouhesmaa J. (2001). Paperikoneiden on-line laadunohjausjärjestelmät. ss.116-118 teoksessa *Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut*.

Tuomi P. (2001). Numeerinen instrumentointi ja säätö Nokian näkökulmasta. ss 21-28 teoksessa *Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut*.

Wahlström B. (1975). Loviisan ydinvoimalaitokseen liittyvä simulointi. Helsingin teknillinen korkeakoulu, *Systeemiteorian laboratorio*.

Wahlström B. (2001). Damatic – Suomen automaatioteollisuuden voimannäytös, ss.150-154, teoksessa Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä, 1960- ja 1970-luvut, Suomen Automaatioseura ry.

Weber S. (2004). The success of open source. Harvard University Press

Wiener N. (1948). Cybernetics, or Communication and Control in the Animal and the Machine. Cambridge: MIT Press.

Zadeh, L.A., Desoer, C.A. (1963). Linear system theory: The state space approach. McGraw-Hill (New York), 1963.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control 8 (3) 338–353.

Åström, K. Bohlin, T. (1965). Numerical identification of linear dynamic systems from normal operating records. Proc. IFAC Symposium on Self-Adaptive Systems, Teddington, UK.

Åström, K., Eykhoff P. (1971). System identification – A survey. Automatica 7: 123–162.

Yleisteoksia

Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut, Suomen Automaatioseura ry, ISBN 9525183157.

Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; osa 2 – vuoteen 1990, Suomen Automaatioseura ry, ISBN 952518319X.

Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; osa 3 – vuoteen 2003, Suomen Automaatioseura ry, ISBN 952518336X.

Kirjoittajat

Kirjoittajien esittelyt esiintyvät tämän julkaisun muiden esitysten yhteydessä.

VTT sähköteknillinen laboratorio

Jari Hämäläinen, Martin Ollus ja Björn Wahlström

Johdanto

Hans Blomberg oli oman toimensa ohella myös 16.1.1942 perustetun VTT:n sähköteknillisen laboratorion johtaja vuosina 1962-1972. Hän oli jo valmistumisensa jälkeen toiminut saman laboratorion tutkimusinsinööriä ajanjaksona 1.4.1944-31.7.1956. Tuolloin hän teki myös väitöskirjansa, joka ilmestyi VTT:n sarjassa 1953 (Blomberg, 1953). Väitöstyössään hän perehtyi perusteellisesti säätöteoriaan, jota hän sovelsi instrumentin toteutuksessa riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi. Hänen kiinnostuksensa säätö- ja systeemiteoriaan sai todennäköisesti alkunsa tästä työstä

Siteet Teknillisen korkeakoulun (TKK, vuodesta 2010 osa Aalto-yliopistoa) systeemiteorian ja VTT:n sähköteknillisen laboratorion (vuodesta 1970 sähkötekniikan ja vuodesta 1989 sähkö- ja automaatiotekniikan laboratorio) välillä olivat koko Blombergin uran aikana kiinteät. Moni Blombergin oppilas teki diplomityönsä VTT:llä ja Blomberg itsekin oli laboratorion neuvottelukunnan puheenjohtajana vielä vuosina 1981-1984. Laboratorion toimintaa vuoteen 1991 asti on kuvattu tarkemmin viitteessä Wahlström et al. 1992. Vaikka laboratorion toimialan, tekniikan ja ympäristön kehitys ovat vuosien varrella heijastuneet laboratorion toimintaan ja tutkimusaiheisiin, Blombergin rooli näkyy yhä selvästi siinä, että useiden organisaatiomuutosten lomassa systeemitason tarkastelut ja systeemijäätelut ovat muodostuneet merkittäviksi aiheiksi VTT:n toiminnassa.

Ensimmäiset vuodet 1967 asti

VTT:n ensimmäiset vuodet olivat niukkuuden vuosia (Michelsen 1993). Sähkötekniikan laboratorion henkilökunta oli vuoden 1967 lopussa kasvanut kahdeksaksi täyspäiväiseksi henkilöksi. Laboratorioon oli vuonna 1964 palkattu Pekka Salminen, josta vuonna 1973 tuli laboratorion ensimmäinen kokopäiväinen johtaja. Laboratorion toiminta keskittyi siihen asti lähinnä sähkövoimatekniikan mittaus- ja koestustoimintaan. Jakson lopussa alkoi kuitenkin Suomessa näkyä kasvun enteitä.

Kasvuvuodet 1968-1992

Laboratorio muutti vuonna 1969 Albertinkadulta Otaniemeen, joten hyvä yhteys TKK:n systeemiteorian tutkimukseen säilyi. Kun Pekka Jauho aloitti vuonna 1970 VTT:n pääjohtajana, työskenteli laboratoriossa jo 17 henkilöä. Professori Jauho korosti pyrkimystä laajentaa ulkopuolisella rahoituksella tehtävää tutkimus- ja kehitystoimintaa. Laboratorion nimi myös muuttui VTT:n organisaatiorakenteessa sähkötekniikan laboratorioksi.

Jakson ensimmäisten vuosien toiminnassa ydinvoiman tulo Suomeen näkyi selvästi automaatio- ja luotettavuustekniikan tutkimus- ja kehitystehtävissä. Merkittävä tekijä oli ydinvoimalaitosten säätösuunnittelua varten hankittu hybriditietokone. Moni VTT:n automaatio- ja systeemitekniikan aktiviteetti pohjautuu edelleen 70-luvulla käynnistettyihin hankkeisiin. Lisäksi 1970-luvun energiakriisi tuotti erilaisia energiatekniikan selvityksiä ja toimeksiantoja. Vuonna 1977 laboratorion henkilökunta oli kasvanut 60 henkilöön.

Seuraavina vuosina toiminta monipuolistui ja ulkopuoliset toimeksiannot lisääntyivät voimakkaasti. Vuonna 1988 ulkopuolisen rahoituksen osuus oli yli 80%. Tähän myötävaikuttivat pääjohtaja Jauhon määrätietoiset toimenpiteet. Moni suuri toimeksianto oli tässä avainasemassa, mutta myös pienten toimeksiantojen lukumäärä ja koko kasvoi. Vuonna 1983 perustetun Tekesin rahoituksella käynnistyi useita vuosia kestäviä suurhankkeita, joissa laboratorio oli aktiivisesti mukana. Laboratorion toimintaa muuttui myös entistä kansainvälisemmäksi, ensin pohjoismaissa ja sitten myös EU:n rahoituksen myötä Euroopassa. Tänä aikana rakennettiin tehokkaasti kansainvälistä kontaktiverkostoa, jota hyödynnetään vielä tänä päivänäkin.

Pekka Salminen siirtyi vuonna 1984 teollisuuden palvelukseen ja sähkötekniikan laboratorion johtajaksi tuli Björn Wahlström ensin virkaa tekevänä ja vuonna 1985 hänet nimitettiin laboratorijohtajan virkaan.

Jauhon siirtyessä eläkkeelle vuonna 1987 VTT:n uudeksi pääjohtajaksi nimitettiin Markku Mannerkoski. Jakson lopussa näkyi yhä selvemmin, ettei edellisten vuosien kasvu voi jatkua yhtä voimakkaana. Vuonna 1992 laboratorion toimintaa arvioivat Knut Herstad (Norja) ja Thomas H. Moss (Yhdysvallat). Molemmat pitivät laboratoriota toimintakykyisenä ja tehokkaana, mutta korostivat strategisen suunnittelun ja korkeatasoisen tutkimuksen tärkeyttä.

Organisaatiomuutosten aika vuodesta 1993 tähän päivään

VTT:n organisaatiouudistuksessa vuonna 1994 automaation ja siihen välittömästi liittyvien alojen tutkimusta keskitettiin uuteen tutkimusyksikköön VTT Automaatioon, jonka tutkimusaiheita olivat koneiden ja laitteiden sekä tuotanto- ja valmistusjärjestelmien automaatio- ja mittausmekaniikka ja näiden edellyttämät menetelmät, järjestelmät ja muut tekniset ratkaisut sekä anturit ja instrumentit (Hämäläinen, 2009). Kappaletavara-automaatio oli 1990-luvulla saanut merkittävän aseman laboratorion tutkimustoiminnassa uusien ”älykkäiden” valmistusmenetelmien ja tietotekniikan sovellusten voittaessa alaa konepajateollisuudessa. VTT Valmistustekniikassa tutkittiin metalli- ja konepajateollisuuden sekä prosessi- ja voimalaitosteollisuuden tarvitsemää suunnittelu-, valmistus- käyttö- ja turvallisuustekniikkaa. VTT Automaatio ja VTT Valmistustekniikka yhdistettiin vuonna 2002, jolloin syntyi VTT Tuotteet ja tuotanto. VTT:n organisaatio uudistui perusteellisesti 1.1.2006 ja osittain myös 1.1.2009, jonka jälkeen monet sähkötekniikan laboratorion perinteenä aktiivisina säilyneistä automaation tutkimusaiheista jatkuvat systeemitutkimuksen osaamiskeskuksessa vuosina 2006-2013.

Systeemitutkimus VTT:llä vuosina 2006-2013 oli mallintamista sekä malleihin perustuvien analyysien hyödyntämistä monimutkaisten järjestelmien hallinnan, luotettavuuden ja tuottavuuden parantamiseksi. Teollisten järjestelmien parempi hallinta säästää myös energiaa ja ympäristöä. Järjestelmän dynaaminen käyttäytyminen voidaan kuvata matemaattisilla yhtälöillä ja tarkastelun kannalta oleelliset kvalitatiiviset piirteet käsitteellisillä malleilla. Tietokoneissa toimivilla simulointimalleilla voidaan tehdä kokeita, jotka auttavat ymmärtämään järjestelmän toimintaa. Systeemitutkimus edellyttää vahvaa monitieteistä yhteistyötä, sillä sovelluksissa tarvitaan asiantuntemusta matemaattisessa mallintamisessa, prosessien simuloinnissa, simuloinnin tietotekniikassa, automaatiassa, optimoinnissa, stokastisissa järjestelmissä sekä riski- ja luotettavuusanalyyseissä. Kognitiivisen ergonomian tutkimusosaaminen auttaa hallitsemaan käyttäjän ja teknisen järjestelmän muodostamaa kokonaisuutta. Globaalien tuotantoverkostojen lisääntymisen myötä huomio on myös yhä laajemmin kohdistunut yhteistyöverkostojen ymmärtämiseen ja tämän yhteistyön tehokkuuden ja hallinnan edistämiseen, eli on tutkittu ja kehitetty menetelmiä ja työkaluja verkostojen suorituskyvyn mittaamiseen ja parantamiseen.

VTT:n organisaatio uudistui jälleen vuonna 2014 ja tutkijat tutkimusaiheineen jakaantuivat uusiin organisaatioyksiköihin. Blombergin oppilaita oli VTT:llä enää yhden käden sormilla laskettava määrä, mutta systeemistä ajattelua ja suurten kokonaisuuksien hallintaa korostettiin koko VTT:n keskeisenä vahvuutena.

Kehitysuraa, joka vuodesta 1942 on johtanut tämän päivän systeemien tutkimukseen VTT:ssä, voidaan havainnollistaa tarkastelemalla sähkötekniikan laboratorion tutkimusalueita ja -hankkeita sekä niiden suhdetta toisiinsa ja joihinkin ulkoisiin tekijöihin (Kuva). Sääätötekniikan ja systeemiteorian käsitteistöistä ja ongelmien määrittelyistä on johdettu uusia sekä teoreettisia että käytännöllisiä tavoitteita, joita on sitten käsitelty projekteissa ja tutkimusohjelmissa. Mahdollistajana on ollut kuvassa vasemmalla kuvattu tekninen kehitys ja toimintaympäristön asettamina vaatimuksina mm. ylhäällä hahmotellut ympäristötekijät.

Nykypäivästä tulevaisuuteen

Konventionaalisten voimalaitosten, ydinvoimaloiden, sellu- ja paperitehtaiden tai kemian teollisuuden tehtaiden toimintaa kuvaavat simulaattorit kattavat sekä prosessien että automaation toiminnan. Simulaattoreiden avulla koulutetaan prosessinohjaajia, suunnitellaan ja testataan automaatiojärjestelmiä ennen käyttöönottoa ja kehitetään prosesseja. Systeemi-dynaamiset simulointimallit ja optimointimallit tukevat toimintaprosessien suunnittelua ja parantamista, uusien toimintatapojen arviointia sekä henkilöstön koulutusta. Turvallisuuden arvioinnin menetelmiä sovelletaan etenkin ydinvoimaloiden järjestelmiin ja automaatioon ennen niiden käyttöönottoa laitoksilla sekä uusien laitosten että vanhoille tehtävien muutosten yhteydessä. Kognitiivisen ergonomian tutkimus auttaa suunnittelemaan parempia valvomoita ja ohjauskeskuksia sekä arvioimaan ympäristöön sulautettua tietotekniikkaa. Stokastisten järjestelmien analyysien merkitys kasvaa verkottumisen ja tiedonsiirron jatkuvasti lisääntyessä.

Laskentatehon jatkuvan kasvun ja verkottumisen myötä tekniset järjestelmät ja niiden ohjausjärjestelmät muodostuvat yhä monimutkaisemmiksi. Kokonaisuuksien optimoinnin ja järjestelmien osien välisten vuorovaikutusten hallinnan merkitys korostuu niin teollisuudessa kuin jokapäiväisessä elämässä. Semanttisiin malleihin perustuvilla tekniikoilla voidaan yhdistää erilaisia simulaattoreita ja teollisuuden tietosisältöjen hallinnan järjestelmiä sekä mahdollistaa yhä parempi tehdaslaitosten tiedonhallinta laitoksen koko elinkaaren ajan. Turvallisuusautomaation suunnittelun ja arvioinnin avuksi kehitetään uusia mallipohjaisia menetelmiä, joiden avulla voidaan yhä kattavammin tarkastaa järjestelmän vaatimustenmukainen käyttäytyminen. Tulevaisuuden valvomossa hyödynnetään yhä enemmän uusiin vuorovaikutustekniikoihin ja lisätyn todellisuuden menetelmiin perustuvia uudenlaisia operointikonsepteja ja käyttöliittymiä.

Systemiteorian periaatteita ja systeemiajattelua sovelletaan yhä useammin myös muualla kuin perinteisessä teollisuudessa. Globaali yhteistyö ja verkostoituminen johtavat monimutkaisuuteen vuorovaikutusprosesseihin. Samalla myös lisääntyvä huoli ympäristöstä ja luonnonvarojen käytöstä tuo uusia näkökulmia melkein kaikkeen inhimilliseen toimintaan ja kasvattaa hallittavien prosessien monimutkaisuutta. Tässä uudessa ympäristössä toiminnan ja prosessien hallitseminen vaatii syvällistä ymmärtämystä ja malleja. Mallit voivat myös olla kvalitatiivisia tai semanttisia. Hallinta edellyttää mallien lisäksi hallittavien kohteiden luotettavaa havainnointia.

Tekniikan, varsinkin informaatio- ja tietotekniikan, kehitys on tuonut uusia välineitä ja työkaluja tukemaan prosessien hallintaa. Ne ovat kuitenkin usein jääneet pinnallisiksi ja korostavat tietoteknisiä ratkaisuja prosessien ja vuorovaikutusten kustannuksella. Mallinnuksella ymmärretään monessa tapauksessa vain tietorakenteiden ja tietovirtojen staattista kuvaamista. Vähemmälle huomiolle näyttävät jäävän takana olevan tiedon syntymekanismit ja merkitys. Tarvitaan perinteisen mallintamisen laajentamista kuvaamaan eri rajapintojen yli meneviä dynaamisia ilmiöitä:

- monitieteelliset vuorovaikutukset,
- eri hierarkiatasojen väliset vuorovaikutukset,
- vuorovaikutukset organisaatorajojen yli,
- vuorovaikutukset maantieteellisten ja kansallisten rajojen yli.

Systeemiajattelulla on annettavaa monimutkaisten ilmiöiden hallinnan kehittämiseen, erityisesti rajapinnoilla tapahtuvien aktiviteettien selkeyttämiseen ja kokonaisuuden ymmärtämiseen. VTT on tässä usein ollut edelläkävijänä soveltamassa systemiteoriaa ja systeemiajattelua uusilla aloilla ja uusissa sovelluksissa.

Lopuksi

TKK:n systemiteorian tutkimuksen historia on ollut kiinteästi sidoksissa VTT:n sähköteknillisen laboratorion historiaan ja molemmat tutkimus- ja kehitystoiminnan yleisempään kehittymiseen Suomessa. Koko ajan on ollut selvää, että hyvin koulutettu ja idearikas insinöörikunta on menestyvän teollisuuden edellytys. TKK:lla on luonnollisesti ollut päätehtäväänään uusien diplomi-insinöörien koulutus, mutta VTT on usein toiminut jatkumona siten, että nuoret insinöörit ovat kouliintuneet haastavissa tutkimus- ja kehitys-

tehtävissä. Moni insinööri on työskennellyt VTT:llä tutkijana muutaman vuoden ennen siirtymistään teollisuuden palvelukseen. Korkeakoulujen ja tutkimuslaitosten vahva vuorovaikutus teollisuuden ja elinkeinoelämän kanssa on ollut oleellisen tärkeää Suomen selviytymiselle globaaleilla markkinoilla. Systemiteoria laaja-alaisena ja kokonaisuuksiin keskittyvänä alana on merkittävästi myötävaikuttanut kehitykseen. Globalisoituvassa maailmassa systemiteorian merkitys korostuu entisestään.

Viitteitä

Hans Blomberg (1953). Ett känsligt ljusvisarinstrument avsett för integrering av svaga elektriska spänningsimpulser med avseende på tiden, VTT publikation 25 (vrt. kuvat 1 ja 2).

Björn Wahlström, Pentti Haapanen, Hannu Hossi, Tapio Huovinen toim. (1992). Sähkö- ja automaatiotekniikan laboratorio; 50 vuotta toimintaa, ISBN 951-38-4262-2, Libris Oy.

Karl-Erik Michelsen (1993). Valtio, teknologia, tutkimus; VTT ja kansallinen tutkimusjärjestelmän kehitys, ISBN 951-38-4271-1, Painatuskeskus Oy.

Jari Hämäläinen (2009). VTT:n automaation tutkimus 1991-2003. Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä, osa 3 – vuoteen 2003, ISBN 978-952-5183-36-8, Suomen Automaatioseura ry, ss. 45-49.

Kirjoittajat

Kirjoittajien kuvaukset löytyvät heidän omista kirjoituksistaan tässä julkaisussa.

ETT KÄNSLIGT LJUSVISARINSTRUMENT AVSETT FÖR INTEGRERING AV SVAGA ELEKTRISKA SPÄNNINGSIMPULSER MED AVSEENDE PÅ TIDEN

A SENSITIVE MIRROR INSTRUMENT FOR INTEGRATION OF SMALL ELECTRIC VOLTAGE IMPULSES WITH RESPECT TO TIME

(Summary)

HANS BLOMBERG

HELSINGFORS 1953

Kuva 1. Hans Blombergin väitöskirjan kansi.

1. Inledning

Integrering med avseende på tiden av svaga elektriska spänningsimpulser, eller egentligen emk-impulser (emk = elektromotorisk kraft), kommer ifråga främst i samband med mätningar av magnetiskt flöde med tillhjälp av mätspoler. De instrument, som användas för detta ändamål benämnas av denna orsak vanligen (magnetiska) *fluxmetrar*.

Benämningen fluxmeter måste dock anses omfatta alla sådana instrument, som kunna användas för mätning av magnetiskt flöde, alltså även sådana, vid vilka den direkt uppmätta storheten icke är tidsintegralen av en spänning. Å andra sidan är ju ett instrument, som integrerar en spänningsimpuls med avseende på tiden i och för sig ingen fluxmeter – fluxmeter blir instrumentet först då det kombineras med en mätspole. Instrumentet kan som sådant användas även för andra ändamål.

På grund av ovanstående vore det motiverat att införa en speciell benämning på sådana instrument, som mäta tidsintegralen av en tillförd spänningsimpuls. Som lämplig benämning föreslås *voltsekund - meter*, eller förkortat *Vs-meter* (jfr A-meter, V-meter). Önskar man därtill antyda det ungefärliga mätområdet, kan man tillfoga en lämplig förled, såsom t. ex. μ (mikro). Dessa rekommendationer ha följts i föreliggande framställning.

Det mest kända och mest använda instrumentet av denna typ är *Grassots* μ Vs-meter [Gr; Bu1; Bu2; Du], vilken i princip består av ett elektriskt överdämpat vridspoleinstrument med mycket liten riktkonstant.

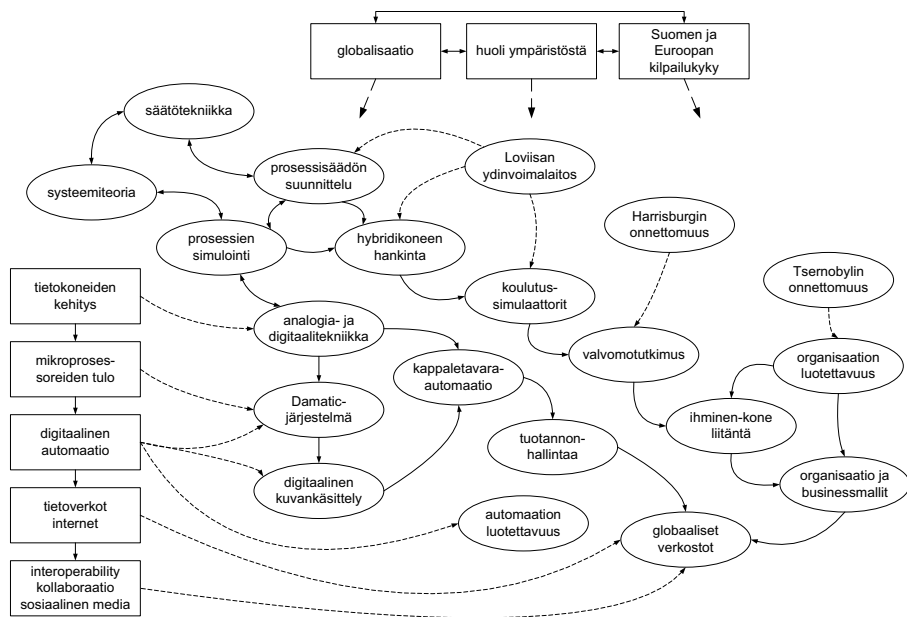
På senare tid ha konstruerats även μ Vs-metrar bestående av kombinationer av vridspoleinstrument och elektronrörsförstärkare [Ed; D; C] samt t.o.m. rena elektronrörsinstrument [Hi].

Trots att det alltså finnes en hel mängd olika typer att tillgå ges det dock fall, där man skulle önska en betydligt större känslighet och även större noggrannhet än som i allmänhet [jfr dock C] har uppnåtts med ovannämnda typer [Bl2, s. 120]. Författaren har därför ansett det motiverat att undersöka med vilka medel en högkänslig μ Vs-meter med god noggrannhet kunde åstadkommas.

Valet av lämplig arbetsprincip har icke varit svårt. Då författaren icke har kunnat finna någon helt ny princip, har valet stått mellan redan tidigare tillämpade grundprinciper. Det visar sig, att man mycket snart stöter på stora svårigheter, om man försöker uppdriva känsligheten hos den enkla Grassot-typen [Bl3]. Även ett rent elektronrörsinstrument med erforderlig känslighet och noggrannhet torde vara svårt att förverkliga. Återstår sålunda principen med en kombination av vridspoleinstrument och elektronrörsförstärkare, vilken princip i själva verket synes erbjuda de bästa möjligheterna till lösning av uppgiften. Undersökningen har därför förts längs denna linje.

Föreliggande avhandling redogör för resultaten av de gjorda undersökningarna och försöken samt för det byggda försöksinstrumentet.

Kuva 2. Hans Blombergin väitöskirjan ensimmainen luku, jossa kirjoittaja kuvaa projektinsa sisältöä.



Kuva 3. Kuvaus sähkötekniikan laboratorion tutkimusalueiden ja hankkeiden liittymisestä toisiinsa sekä toimintaympäristöön. Damatic-järjestelmä oli Valmet Instrumenttitehtaan vuosina 1978-79 kehittämä digitaalinen automaatiojärjestelmä, jonka tuotekehitys-projektissa VTT oli mukana merkittäväällä työpanoksella.

Polynomisysteemiteoria elämäntyönä

Raimo Ylinen

Professori Hans Blombergin tutkimustyö kattoi laaja-alaisesti systeemi- ja säätöteorian eri alueita. Kansainvälisesti merkittävin on lineaaristen differentiaali- ja differenssisysteemien *polynomisysteemiteoria*, jota hän kehitti 1960-luvulta aina vuosituhannen vaihteeseen. Itse olen osallistunut tähän työhön valmistumisestani vuonna 1968 alkaen näihin päiviin asti.

Taustaa

Hans Blombergin johtama systeemiteorian laboratorio syntyi vuonna 1969, kun Teknillisen korkeakoulun sähkötekniikan osastolle perustettiin varsinainen säätötekniikan oppituoli. Tätä ennen Blomberg vastasi säätötekniikan opetuksesta ja laboratoriota kutsuttiin säätötekniikan laboratorioksi.

Laboratoriossa oli jo 60-luvun alkupuolella havaittu korkeakoulun antamien matematiikan tietojen ja taitojen riittämättömyys modernin systeemi- ja säätötekniikan jatko-opintoihin ja tutkimukseen. Tätä puutetta pyrittiin parantamaan laboratorion sisäisillä seminaareilla, joissa opiskeltiin joukko-oppia, algebraa, topologiaa, funktionaalianalyysiä, stokastisia prosesseja jne. Seminaareissa käsiteltiin myös ankan kriittisesti osanottajien tutkimustuloksia. Rinnan sisäisten seminaarien kanssa aloitettiin systemaattiset jatko-opinnot lisensiaattiseminaarien muodossa. Laboratorion assistentti- ja tuntiopettajakuntaan kuuluivat näihin aikoihin mm. Sampo Ruuth (ent. Salovaara), Jaakko Kivinen, Pekka Salminen, Boris Segerstahl, Jyrki Sinervo, Arne Halme sekä hieman myöhemmin Björn Wahlström, allekirjoittanut Raimo Ylinen, Martin Ollus ja Pentti Lautala.

Tutkimuksen ja opetuksen tavoitteena oli käsitellä täsmällisellä ja oikealla tavalla systeemien perusominaisuuksia ja konstruoida näiden pohjalta uusia säätösuunnittelumenetelmiä. Tavoitteeseen pyrittiin käyttämällä matemaattisesti mahdollisimman yksinkertaisia joukko-opillisia ja algebrallisia rakenteita. Tutkimuksessa määriteltiin systeemien perusominaisuudet, kausaalisuus, ohjattavuus, tarkkailtavuus ja identifioitavuus aivan joukko-opillisella ja algebrallisella tasolla. Tarkastelut ulotettiin myös stokastisiin systeemeihin.

Polynomisysteemiteoria

Erityisesti lineaaristen differentiaali- ja differenssisysteemien algebrallisesta teoriasta eli polynomisysteemiteoriasta tuli keskeinen tutkimuskohde. Blombergin tutkimus tästä aihepiiristä oli alkanut jo 1950-luvulla siirtofunktio- ja supistusongelmista sekä yksimuuttujasysteemien mutta varsinkin monimuuttujasysteemien ja systeemien kytkentöjen yhteydessä. Samoihin aikoihin systeemi- ja säätöteoriassa oli otettu käyttöön nk. tilaesitys, joka soveltui erinomaisesti optimiohjaus- ja optimisäätötehtävien määrittelyyn ja ratkaisemiseen. Tilaesityksen käyttö monimuuttujasysteemien ja systeemien kytkentöjen

yhteydessä johtaa kuitenkin usein tarpeettoman laajoihin tilaesityksiin johtuen ylimääräisistä tiloista, jotka paljastuvat vasta tarkkailtavuus- tai ohjattavuusanalyysillä.

Polynomisysteemiteoriassa systeemejä kuvaava lineaarinen differentiaali- tai differenssiyhtälö esitetään differentiaali-, differenssi- tai siirto-operaattorin avulla aikatasossa, esim.

$$\underbrace{(p^2 + 3p + 2)}_{a(p)} y = \underbrace{(p + 1)}_{b(p)} u, \quad py = \frac{dy}{dt} \quad \underbrace{(q + 0, 2)}_{a(q)} y = \underbrace{5}_{b(q)} u, \quad qy(k) = y(k + 1)$$

Yhtälö tai vain sen kerroinpolynomit, kuten esimerkeissä $[(p^2 + 3p + 2) \mid -(p + 1)]$ tai $[(q + 0, 2) \mid -5]$ muodostavat systeemin kuvauksen eli *deskription* ja varsinainen systeemi määritellään yhtälön toteuttavien *input-output-signaaliparien* (u, y) joukkona. Tällöin oleellisen osan määrittelyä muodostaa sopivan *signaaliavaruuden* valinta.

Oleellista teorialle on myös, että alkuarvoja ei kiinnitetä tässä vaiheessa, vaan vasta kun on tarvetta yhtälöiden eksplisiittiseen ratkaisemiseen. Tästä tosin seuraa se haitta, että yhtälöitä *ei voi* esittää ratkaistussa muodossa

$$y = \frac{p + 1}{p^2 + 3p + 2} u = \frac{1}{p + 2} u$$

eli kerroinpolynomeilla *ei voi jakaa*.

Menetelmä sopii erinomaisesti monimuuttujamallien määrittelyyn, koska näissä alkuarvot kytkeytyvät toisiinsa usein monimutkaisella tavalla. Monimuuttujasysteemien deskriptiot koostuvat polynomimatriiseista esimerkiksi seuraavalla tavalla

$$A(p)y = B(p)u \Leftrightarrow \begin{bmatrix} A(p) & : & -B(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} = 0$$

missä $A(p)$ ja $B(p)$ ovat operaattoripolynomeista koostuvia matriiseja sekä u ja y input- ja outputsignaaleista koostuvia vektoreita. Ositettua matriisia $[A(p) \mid -B(p)]$ kutsutaan myös *generaattoriksi*. On helppo nähdä, sama input-output-ratkaisujen joukko voidaan esittää äärettömän monien matriisien avulla, joten deskriptiot eivät ole mitenkään yksikäsitteisiä. Tästä on etuna, että niitä voidaan muokata kulloinkin tarkasteltavana olevan tehtävän kannalta sopivaan muotoon. Tässä on kuitenkin muistettava, ettei polynomilla jakamista sallita. Tämä rajoittaa muokkaukseen käytettävissä olevia operaatioita.

Matemaattista pohjaa teorialle loi Sampo Salovaara (myöh. Ruuth) tilakäsitettä joukko-opillisella tasolla tarkastelevalla väitöskirjallaan [1] ja polynomisysteemiteorian perusteita käsittelevällä raportilla yhdessä Blombergin kanssa [2]. Blomberg, Sinervo, Halme ja Ylinen julkaisivat myös Acta Polytechnicassa 1969 yhteenvedon siihenastisista tuloksista [3]. Perusteoria lähti aluksi differentiaalisysteemeistä mutta Sinervo kehitti hyvin samankaltaista rinnakkaista teoriaa differenssisysteemeille, joka julkaistiin Acta Polytechnicassa 1971 [4].

Ensimmäinen Acta Polytechnica-julkaisu joutui yllättäen tunnetun systeemi- ja säätöteoreetikon hollantilaisen Jan C. Willemsin arvostelemaksi ja hän kuvasi sitä lähinnä ”matemaattiseksi voimisteluksi”. Tämä arvostelu oli oikeutettua ainakin siinä mielessä, että julkaisu ei vielä sisältänyt varsinaisia analyysi- ja suunnittelumenetelmiä. Työtä näiden kehittämiseksi jatkettiin 70-luvulla.

Samansuuntaista kehitystä tapahtui myös muualla maailmalla. Varsinkin Howard Rosenbrock Englannissa, William Wolovich Yhdysvalloissa ja Vladimir Kučera Tsekkoslovakiassa julkaisivat useita lehtiartikkeleita ja oppikirjoja tältä alueelta [5-7]. Oma lähestymistapamme poikkei kuitenkin näistä, koska se lähti matemaattisesti täsmällisestä joukko-opillisesta, sisäänmeno-ulostuloparien joukkoon perustuvasta systeemimallien eli deskriptioiden määrittelystä. Tällaisen systeemimäärittelyn pohjalta oli helppo lähteä kehittämään malleina käytettyjen polynomimatriisien muokkaamiseen perustuvia menetelmiä. Rosenbrock, Wolovich ja Kučera lähtivät suoraan deskriptioista, jolloin näiden muokkauksen vaikutus alkuperäisen systeemin käyttäytymiseen ei ole helposti havaittavissa.

Teoriaa ja tuloksia

Tutkimuksen tuloksena syntyi uusia menetelmiä monimuuttujasysteemien ohjattavuus- ja tarkkailtavuusanalyysiin sekä takaisinkytkettyjen säätimien ja yleistettyjen estimaattoreiden suunnitteluun. Seuraavassa on lyhyt kuvaus näistä. Jotta menetelmien loogisuus ja periaatteellinen yksinkertaisuus kävisi parhaiten ilmi, niin valitettavasti tarvitaan jonkin verran yhtälöitä.

Kaikkien menetelmien perustana on deskriptioiden *ekvivalenssi*, joka tarkoittaa sitä, että *samaa systeemiä* kuvaavat generaattorit ovat keskenään *riviekvivalentteja* eli ne saadaan toisistaan soveltamalla nk. *alkeisrivioperaatioita*. Näitä ovat matriisin rivien vaihto, matriisin rivin kertominen vakiolla ja matriisin rivin summaaminen toiseen riviin polynomilla kerrottuna. Näille on olennaista se, että ne ovat invertoituvia eli alkuperäinen matriisi saadaan takaisin soveltamalla tulokseen taas alkeisrivioperaatioita. Alkeisrivioperaatioita voidaan toteuttaa kertomalla matriisi kyseistä operaatiota vastaavalla muunnosmatriisilla, joka on invertoituva polynomimatriisina eli sen determinantti on nollasta poikkeava vakio. Voidaan myös osoittaa, että jokainen invertoituva polynomimatriisi on esitettävissä peräkkäisinä alkeisrivioperaatioina.

Hieman täsmällisemmin sanottuna tämä tarkoittaa sitä, että jos kahden systeemin $S:n$ ja S_1 generaattorit $\begin{bmatrix} A(p) & \vdots & -B(p) \end{bmatrix}$ ja $\begin{bmatrix} A_1(p) & \vdots & -B_1(p) \end{bmatrix}$ toteuttavat ehdon

$$\begin{bmatrix} A(p) & \vdots & -B(p) \end{bmatrix} = L(p) \begin{bmatrix} A_1(p) & \vdots & -B_1(p) \end{bmatrix}$$

niin pätee

$$S = S_1 \Leftrightarrow \deg(\det L(p)) = 0 \Leftrightarrow \text{generaattorit riviekvivalentit}$$

missä $\deg(\)$ tarkoittaa polynomin astelukua ($\deg(0) = -\infty$) ja $\det(\)$ matriisin determinanttia.

Tämän perusteella voidaan systeemille määrittellä yksikäsitteisiä nk. *kanonisia deskriptioita* kuten kanoninen yläkolmiomuoto (CUT) ja kanoninen riviredusoitu muoto (CRP). Näitä tarvitaan kun systeemiä *identifoidaan* tai *realisoidaan* eli muodostetaan sille mallia joko havaitun tai toivotun input-output käyttäytymisen perusteella

Vastaavasti voidaan analysoida systeemin *ohjattavuutta* eli sitä kuinka eri input-muuttujilla on vaikutusta output-muuttujiin. Jos systeemin S generaattori saatetaan muotoon

$$\begin{bmatrix} A(p) & \vdots & -B(p) \end{bmatrix} = L(p) \begin{bmatrix} A_1(p) & \vdots & -B_1(p) \end{bmatrix}$$

niin pätee

$$\deg(\det L(p)) > 0 \Rightarrow S \text{ ei täydellisesti ohjattava}$$

$L(p)$ voidaan konstruoida soveltamalla suoraviivaisesti nk. *alkeissarakeoperaatioita*, jotka vastaavat alkeisrivioperaatioita mutta ne kohdistetaan sarakkeisiin.

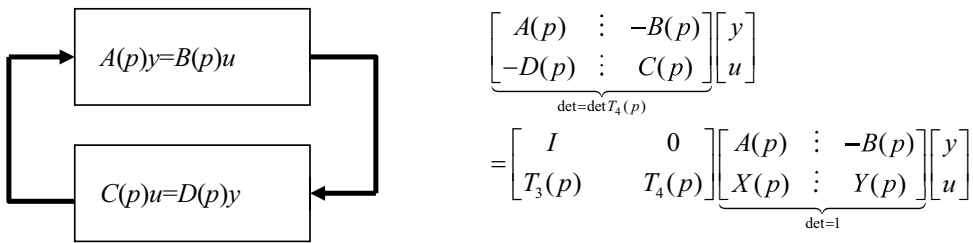
Systeemien kytkennän *tarkkailtavuus* eli se ovatko kytkennän sisäiset muuttujat mitattavissa kytkennän ulkoisten mitattujen muuttujien perusteella voidaan tutkia viemällä kokonaissysteemin S generaattori alkeisrivioperaatioilla yläkolmiomuotoon

$$\begin{bmatrix} A_1(p) & \vdots & A_2(p) \\ A_3(p) & \vdots & A_4(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1(p) \\ B_2(p) \end{bmatrix} u \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \tilde{A}_1(p) & \vdots & \tilde{A}_2(p) \\ 0 & \vdots & \tilde{A}_4(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1(p) \\ \tilde{B}_2(p) \end{bmatrix} u$$

Tällöin pätee

$$\deg(\det \tilde{A}_1(p)) > 0 \Rightarrow S \text{ (tai } y_1 \text{) ei tarkkailtava}$$

Takaisinkytketyn monimuuttujasäätimen suunnitteluun on johdettu kaava (kuva 1)



Kuva 1. Monimuuttujasäätö

jossa oletetaan, että systeemi on ohjattava. Suunnittelu voidaan suorittaa algoritmilla, joka perustuu sekä alkeissarake- että alkeisrivioperaatioiden käyttöön. Alkeissarakeoperaatioilla konstruoidaan ensin matriisit $X(p)$ ja $Y(p)$ niin, että niitä vastaava ensimmäinen ehdokas kokonaissysteemin generaattoriksi on invertoitava. Tämän jälkeen sovelletaan matriiseja $T_3(p)$ ja $T_4(p)$ vastaavia rivioperaatioita niin, että kokonaissysteemille saadaan haluttu käyttäytyminen. Esimerkiksi, kun säädettävä systeemi on

$$\underbrace{\begin{bmatrix} p+1 & 0 \\ -(p+1) & p+2 \end{bmatrix}}_{A(p)} \underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B(p)} u$$

niin saadaan

$$X(p) = \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad Y(p) = 0$$

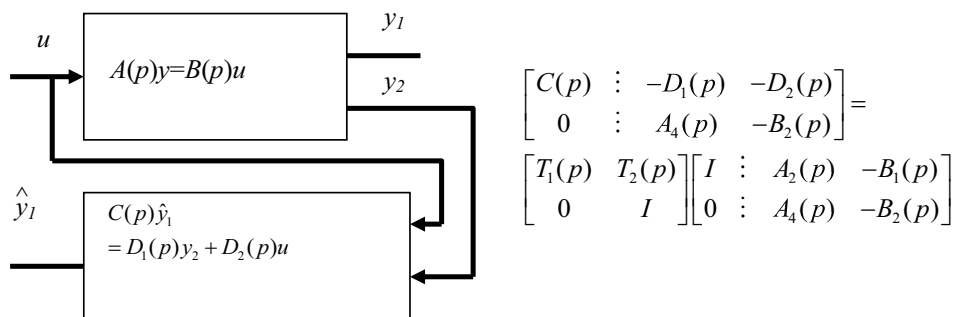
ja valitsemalla

$$T_3(p) = \begin{bmatrix} -1 & p+2 \end{bmatrix}, \quad T_4(p) = (p+2)^2$$

saadaan säädin

$$u = -y_1$$

Yleistettyjen tilaestimaattoreiden eli sisäisten muuttujien estimaattoreiden suunnitteluun (kuva 2) taas pätee kaava



Kuva 2. Yleistetty tilaestimaattori

Tällöin estimointivirheelle saadaan malli

Tässä
$$T_1(p)(y_1 - \hat{y}_1) = 0$$

$$\begin{bmatrix} I & : & A_2(p) \\ 0 & : & A_4(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1(p) \\ B_2(p) \end{bmatrix} u$$

on jo valmiiksi yläkolmiomuotoon saatettu tarkkailtavan kytkennän kokonaissysteemin malli. Estimaattorille saadaan haluttu dynamiikka käyttämällä sopivia rivioperaatioita $T_1(p)$ ja $T_2(p)$.

Esimerkiksi, kun systeemiä kuvaava yhtälö on

$$\begin{bmatrix} 1 & -(p+1) \\ 0 & (p+1)(p+2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ p+1 \end{bmatrix} u$$

niin valitsemalla

$$T_1(p) = p+2, T_2(p) = 1$$

saadaan nk. avoin tarkkailija

$$(p+2)\hat{y}_1 = (p+1)u$$

joka ei käytä hyväkseen output-mittausta vaan pelkästään systeemin mallia. Tällainen on herkkä mallitusvirheille, joten yleensä tarvitaan takaisinkytkettyjä estimaattoreita, joita saadaan varioimalla matriiseja $T_1(p)$ ja $T_2(p)$.

Kirja

Vaikka polynomisysteemitteorian tutkimuksessa oli 70-luvun alkupuolella saatu huomattavia tuloksia, oli niiden julkaiseminen jäänyt aika vähälle, eikä meitä tunnettu maailmalla kovinkaan hyvin. Tästä syystä Blomberg kutsui koolle kaikki työhön osallistuneet pohtimaan polynomisysteemitteoriaa käsittelevän kirjan julkaisemista. Koska minua lukuun ottamatta muut olivat jo siirtyneet professorin virkoihin toisiin korkeakouluihin, jäi päätökseksi, että ryhdyimme kirjoitustyöhön kahdestaan Blombergin kanssa. Työ aloitettiin vuonna 1974 ja se kesti kaikkine tarkistus- ja korjausvaiheineen lähes kahdeksan vuotta. Kirja Blomberg-Ylinen: Algebraic Theory for Multivariable Linear Systems ilmestyi Academic Pressin kustantamana vuonna 1983 [8]. Tässä vaiheessa olin jo 1980 siirtynyt pois systeemitteorian laboratorion VTT:n sähkötekniikan laboratorioon.

Kirja muodosti yhteenvedon polynomisysteemitieteessä siihen mennessä saavutetuista tuloksista ja on edelleen täysin ajan tasalla. Aluksi kirjaa myytiin kohtalaisesti, mutta myöhemmin vuotuiset tekijänpalkkiot olivat niin pieniä, ettei shekkejä kannattanut lunastaa, koska kulut olivat suuremmat kuin palkkiosumma. Painos on kuitenkin myyty ilmeisesti loppuun, koska vuosikausiin kirjaa ei ole näkynyt myyntiesitteissä.

Behaviorismi

Jan C. Willems arvosteli taas kirjan ja tällä kertaa se sai huomattavasti paremman arvostelun. Jo hiukan ennen hän alkoi kutsua systeemiämme eli input-output-parien joukkoa systeemin ”käyttäytymiseksi” (behavior) ja generaattoriamme taas systeemiksi ja näin hän ”perusti” *behavioristisen systeemitieteen*, joka on saanut oman pienen koulukuntansa [9].

Behavioristinen systeemitiede on kuitenkin selvästi tunnetumpi kuin meidän teorianne ja monet tutkijat ovat ihmetelleet, miksi emme vaatineet itsellemme ”tekijänoikeutta” näihin teorioihin. Käytännössähan asialla ei ole muuta merkitystä kuin mahdollinen kunnia ja maine tutkijapiireissä. Olen tavannut Willemsin konferensseissa useamman kerran ja keskustellut hänen kanssaan joistakin tutkimukseen liittyvistä probleemeista, mutta tästä terminologisesta kysymyksestä emme ole puhuneet. Nyt tämä ei enää ole mahdollista sillä syksyllä 2013 saimme suruviestin hänen kuolemastaan.

Täydennyksiä

Joitakin pieniä täydennyksiä on tämän jälkeen julkaistu lähinnä konferensseissa. Pauli Sipari ohjelmoi analyysi ja suunnittelumenetelmät tietokoneohjelmaksi, joka helpotti numeerisia tarkasteluja. Pauli Sipari kehitti suunnitteluohjelmiston ja tässä yhteydessä korostui *symbolisen laskennan* tarve, ts. numeerisen laskennan pyörästysvirheet hävittävät tiedon aidosti yhtä suurista suureista .

Ongelmaa yritettiin ratkaista käyttämällä nk. *rakenteellisia ominaisuuksia* numeerisen laskennan tukena. Sipari julkaisi Blombergin kanssa aiheesta kolmen lehtiartikkelin sarjan [10]. Hans Blombergin *viimeinen julkaistu tutkimus*kin vuonna 1995 liittyi suurten järjestelmien *rakenteelliseen mallittamiseen* lähtien nk. *descriptor* esityksestä [11].

Itse olen johtanut ja esittänyt konferensseissa mm. polynomisysteemien *separaatioperiaatteen*, jolla output-takaisinkytkentä voidaan jakaa *yleistetyn tilan* tarkkailijaksi ja tällä estimoidun tilan takaisinkytkennäksi [12]. Vastaavaa menettelyä olen soveltanut *vikasietoiseen säätöön*, jossa estimoitava signaali on tuntematon input [13].

Yleistyksiä

Rinnan kirjan kirjoittamisen kanssa yleistin teoriaa vakiokertoimisista malleista aikavariantteihin ja operaattorikertoimisiin malleihin. Lisensiaattityö yleisestä teoriasta valmistui 1975 [14] ja väitöskirja aikavarianteista differentiaalisysteemeistä 1980 [15].

Aikavariantti differentiaalisysteemi on esimerkiksi muotoa

$$(p^2 + a_1(t)p + a_0(t))y = (b_1(t)p + b_0(t))u, \quad p = \frac{d}{dt}$$

ja aikavariantti differenssisysteemi

$$(q^2 + a_1(k)q + a_0(k))y = (b_1(k)q + b_0(k))u, \quad (qy)(k) = y(k+1)$$

Ongelmana näissä on se, että kerroinpolynomien kertolasku ei ole kommutatiivinen, koska

$$pa(t) = a(t)p + a^{(1)}$$

$$qa(k) = a(k+1)q$$

Tämä vaikeuttaa huomattavasti matriisien muokkaamista. Toinen vielä vakavampi ongelma aiheutuu siitä, että kertoimet $a(t)$ (tai $a(k)$) eivät ole yleensä pisteittäin inverttoituvia, jolloin ei voida soveltaa nk. jakoalgoritmia. Tätä tarvitaan välttämättä matriisien muokkaamisessa, joten kertoimien käyttäytymistä joudutaan rajoittamaan sopiviin funktioluokkiin. Toinen mahdollisuus on laajentaa signaaliavaruutta rationaalifunktioihin, jolloin ne kaikki eivät ole enää realisoituvia. Mallia käytettäessä on tällöin pidettävä huoli siitä, että reaaliset input-signaalit tuottavat reaalisia output-signaaleja

Aikavarianteille systeemeille olen Kai Zengerin kanssa kehittänyt napojen sijoitteluun perustuvaa tilatakaisinkytkettyä säätöä. Tässä yhteydessä olemme tutkineet erityisesti aikavarianttien systeemien napojen käsittelyä, joka on huomattavasti monimutkaisempi kuin aikainvariantissa tapauksessa [16]. Määrittely on periaatteessa samanlainen kuin aikainvariantissa tapauksessa eli perustuu ominaisuuteen

$$(p - a(t))y = 0 \Leftrightarrow y(t) = Ce^{\int a(t) dt}$$

mutta jo toisen kertaluvun systeemeille tilanne mutkistuu sillä

$$p^2 e^{\int a(t) dt} = (a(t)^2 + \frac{da}{dt}(t))e^{\int a(t) dt}$$

Tästä johtuen systeemin karakteristisesta yhtälöstä tulee differentiaaliyhtälö, jonka ratkaisut ovat systeemin napoja.

Toisena sovelluksena on Nikolai Vatanski tutkinut väitöskirjassaan (2011) säätöä verkon yli, jolloin säätöpiirissä on aikavariantteja diskreettejä viiveitä [17]. Epälineaariset systeemit voidaan palauttaa aikavarianteiksi vapauttamalla epälinearisuutta aiheuttavat takaisinkytkennät. Tällöin säätösuunnittelu voidaan tehdä aikavariantteja menetelmiä käyttäen ja lopullinen tulos saadaan sulkemalla takaisinkytkennät [18].

Lisensiaattityöni jatkoksi kehitin myöhemmin myös jakautuneille systeemeille eli nD-systeemeille analyysi- ja säätömenetelmiä, joita Jari Hätönen sovelsi väitöskirjassaan (2003) [19]. Jakautunut differentiaalisysteemi on esimerkiksi muotoa

$$(p_t + a_0 p_x^2)y = b_0 u, \quad p_t = \frac{\partial}{\partial t}, \quad p_x = \frac{\partial}{\partial x}$$

Ongelma tässä on, että tarvitaan polynomeja, joiden kertoimet ovat toisen operaattorin polynomeja. Tällöin kertoimilla ei voi jakaa ellei sovelleta sopivia *nollattuja reumaheitoja* eli rajoiteta signaaliavaruutta sopivasti. Tämä taas vaikeuttaa matriisien muokkausta.

Vaihtoehtoisesti voidaan taas laajentaa signaaliavaruutta rationaalilausekkeisiin, joissa nimittäjinä on operaattoripolynomeja.

Viime aikoina olen askarrellut kvanttimekaniikan ja mm. Schrödingerin yhtälön

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}(x, t) + V(x, t) \Psi(x, t) - i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}(x, t) = 0$$

$$\left(\frac{-\hbar^2}{2m} p_x^2 + V(x, t) - i\hbar p_t \right) \Psi = 0$$

parissa. Tämä on sekä aika- että paikkavariantti jakautunut differentiaalisysteemi.

Kirjallisuudessa esitetään yleisesti, että Schrödingerin yhtälö voidaan johtaa tulkitsemalla energiatase $\frac{p^2}{2m} + V(x, t) = E$

differentiaalisysteemin karakteristiseksi yhtälöksi ja

$$\Psi(x, t) = C e^{i(px - Et)/\hbar}$$

vastaavaksi ominaisfunktioiksi.

Kuitenkin sijoittamalla tämä Schrödingerin yhtälöön ja ottamalla huomioon, että p tai E tai molemmat voivat olla t :n ja/tai x :n funktioita, huomataan, että yhtälö toteutuu vain kun p ja E ovat vakioita. Itse asiassa e.m. Ψ :n vaihenopeus ei toteuta edes de Broglien yhtälöä

$$\frac{dx}{dt} = \frac{E}{p}$$

muussa kuin vakiotapauksessa.

Itse yhtälö on virheellisesti yleistetty vakiopotentialitapauksesta. Itse asiassa näyttää siltä, että koko yhtälö on tarpeeton, koska haluttu ratkaisu on jo tiedossa! Esimerkiksi hieman yksinkertaisemmassa tapauksessa $V(x, t) = V(x)$ täydelliset ratkaisut voidaan kirjoittaa muotoon

$$\Psi(x, t) = \int_0^\infty \left[C_1(E) e^{i \int_0^x p(x) dx - Et/\hbar} + C_2(E) e^{i \int_0^x -p(x) dx - Et/\hbar} \right] dE$$

joka toteuttaa vaihenopeusehdon mutta ei siis itse Schrödingerin yhtälöä.

Yhteenveto

Polynomisysteemit ja tilaesitykset ovat periaatteessa ”tarkkoja” systeemimalleja, jos fyysikaalisten systeemien matemaattisista malleista yleensä voidaan näin sanoa. Näin ollen ne soveltuvat hyvin rakenteelliseen analyysiin. Tämä vaatii kuitenkin laskentamenetelmiltä suurta tarkkuutta tai suorastaan symbolista laskentaa. Säätösuunnittelu näillä malleilla on lähinnä napojen sijoittelua joko suoraan tai LQ tekniikalla.

Ennen näitä kehitetyt approksimatiiviset ja myöhemmät taajuustason optimointiin perustuvat graafiset menetelmät ovat usein havainnollisempia mutta vaativat myös raskasta laskentaa.

Interaktiiviset suunnittelutyökalut (Matlab jne.) ovat kuitenkin mahdollistaneet näiden rinnakkaisen käytön. Matlabin Toolboxeista löytyy työkaluja sekä polynomisysteemitheorian, tilasäädön että taajuustason menetelmien soveltamiseen. Varsinaisessa prosessinsäädössä ei ole kuitenkaan tapahtunut enää teoriakehitystä vaan jo 1960-luvulta peräisin oleva MPC on kasvaneen laskentatehon myötä vallannut markkinat.

Aikavarianttien ja jakautuneiden systeemien teoriaa ja menetelmiä tarvitaan tehtäviin, joissa aikainvariantit menetelmät eivät tarkkuudeltaan riitä, mutta varsinkin näiden soveltaminen on pitkälti taitoa ja kärsivällisyyttä vaativaa käsityötä. Polynomisysteemitheoria on kuitenkin valitettavasti jäänyt hieman pois muodista ja kaiken kaikkiaan maailmassa on tällä alueella varsin pieni joukko teoriaan suuntautuneita tutkijoita.

Viitteet

- [1] Salovaara, S., On set theoretical foundations of systems theory. Acta Polytechnica Scandinavica, Ma 15, Helsinki, 1967.
- [2] Blomberg, H. and Salovaara, S., On the algebraic theory of ordinary linear time-invariant differential systems. Finland's Institute of Technology, Scientific Researches No. 27, Helsinki 1968.
- [3] Blomberg, H., Sinervo, J., Halme, A. and Ylinen, R., Algebraic methods in systems theory. Acta Polytechnica Scandinavica, Ma19, Helsinki, 1969.
- [4] Sinervo, J. and Blomberg, H., Algebraic theory for ordinary time-invariant difference systems. Acta Polytechnica Scandinavica, Ma 21, Helsinki, 1971.
- [5] Rosenbrock, H.H., State Space and Multivariable Theory. Nelson, 1970
- [6] Wolovich, W.A., Linear Multivariable Systems. Springer, 1974.
- [7] Kučera, V., Discrete Linear Control; The Polynomial Equation Approach. Wiley, 1979
- [8] Blomberg, H. and Ylinen, R., Algebraic Theory for Multivariable Linear Systems. Academic Press, 1983.
- [9] Willems, J.C., From time series to linear systems, Part 1-3, Automatica 22-23, 1986-1987.
- [10] Sipari, P. and Blomberg, H., Structured system models, Part 1-3, International Journal of Systems Science, Volume 22, Issue 6, 1991.
- [11] Blomberg, H., Ylinen, R., Descriptor representation of linear constant systems - impulse modes and critical interconnection constraints. Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory, Report 101, 1995.
- [12] Ylinen, R., A separation theorem for polynomial feedback systems. 3rd IFAC Robust Control Design (ROCOND 2000), Prague, Czech Republic, 2000.

- [13] Ylinen, R., Observer based FDI/FTC. 1st Workshop on Networked Control System and Fault Tolerant Control. Ajaccio, France, 2005.
- [14] Ylinen, R., On the algebraic theory of linear differential and difference systems with time-varying or operator coefficients. Helsinki University of Technology, Systems Theory Laboratory, B23, 1975.
- [15] Ylinen, R., An algebraic theory for analysis and synthesis of time-varying linear differential systems. Acta Polytechnica Scandinavica, Ma32, 1980.
- [16] Zenger, K. and Ylinen, R., Pole Placement of Time-Varying State Space Representations. 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC'05), Seville, Spain, 2005.
- [17] Vatanski, N., Networked control with delay measurement and estimation. Aalto University, Doctoral Dissertations, No 100, 2011.
- [18] Ylinen, R., Application of polynomial systems theory to nonlinear systems. 16th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Prague, Czech Republic, Elsevier Science, IFAC, 2005.
- [19] Hätönen, J., Issues of algebra and optimality in Iterative Learning Control. Acta Universitatis Ouluensis. Series C. Technica, No 205, 2004.

Kirjoittajasta



Raimo Ylinen (raimo.ylinen@aalto.fi) syntyi Mäntässä 8.4.1943. Hän suoritti diplomi-insinöörin tutkinnon 1968 pääaineina säätötekniikka ja sähkölaitokset, tekniikan lisensiaatin tutkinnon 1976 pääaineina systeemiteoria ja matematiikka sekä väitteli tekniikan tohtoriksi 1980, kaikki Teknillisen korkeakoulun sähkötekniillisellä osastolla. Diplomi-työ käsitteli Kalman suodatinta, lisensiaatintyö aikavarianttien ja operaattoriparametristen lineaaristen differentiaali- ja differenssi-järjestelmien algebrallista teoriaa ja väitöskirja syvensi tätä differentiaali-järjestelmien osalta. Raimo Ylinen toimi Teknillisen korkeakoulun systeemiteorian laboratoriossa vuosina 1967-79 assistenttina, vs laboratorio-insinöörinä sekä systeemiteorian vs professorina. Vuosina 1980-86 hän työskenteli Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) sähkölaboratorion automaatiotekniikan jaostossa erikoistutkijana. Hän palasi 1986 takaisin Teknilliseen korkeakouluun säätötekniikan laboratorioon, jossa hän toimi vuoteen 1996 yliassistenttina ja vs apulaisprofessorina lukuun ottamatta aikaa 1987-90, jolloin hän oli Suomen Akatemian vanhempana tutkijana. Vuonna 1996 hänet nimitettiin Oulun yliopiston prosessitekniikan osastolle automaatiotekniikan professorin virkaan, josta hän jäi emeritukseksi 2003. Vuoden 2003 jälkeen hän on toiminut vielä osa-aikaisena johtavana tutkijana Teknillisen korkeakoulun (nykyisen Aalto-yliopiston) kemian tekniikan osastolla prosessien ohjauksen ja hallinnan laboratoriossa.

Teoreetikosta insinööritieteiden harjoittajaksi – mitä systeemiteoria on opettanut minulle

Aarne Halme

Johdanto

Omaa uraa taaksepäin katsoessa monet asiat pelkistyvät ja yksinkertaistuvat. Minulla on ollut harvinainen tilaisuus seurata sekä oman alani, että yliopistojärjestelmän kehitystä 39-vuotisen professoriuran aikana. Oma alani on laajasti ymmärrettynä automaatio, sen tekniikka ja teoriaa, joka nojautuu vahvasti systeemijatteluun. Lukijalle, joka ei välttämättä hahmota mitä tällä tarkoitan, voisin aluksi täsmentää systeemijattelun käsitettä. Tekniset ja monet muutkin järjestelmät muodostuvat osista ja niiden yhteenliittymistä. Järjestelmien toimintoja voidaan tarkastella monella tasolla lähtien yksittäisten osien ja komponenttien toimintoista päätyen koko järjestelmän toimintaan. Teknisissä järjestelmissä osien ja komponenttien toimintaa voidaan usein selittää tai mallintaa tunnettuja fysiikan tai kemian lakeja käyttäen, muissa järjestelmissä käyttäen asianomaisen tieteenalan kehittämiä lainalaisuuksia. Järjestelmätasolla tarkastelu on usein toimintojen logiikkaan nojaavaa ja niiden selittämisessä systeemijattelu on avainasemassa. Usein fysikaalisesti eri tavoin rakentuvista järjestelmistä löytyy järjestelmätasolla paljon yhteisiä piirteitä, joita voidaan hyödyntää niiden suunnittelussa ja käytössä. Insinööritieteissä järjestelmiä tutkitaan ja kehitetään kaikilla tasoilla. Automaatiossa toimintojen ymmärtäminen järjestelmätasolla on tärkeää siksi, että sen avulla pyritään yleensä hallitsemaan koko järjestelmän toimintoja. Systeemiteoria, jonka kehitys lähti liikkeelle sääteorianä jo 1930-luvulla, on teoria, jonka avulla järjestelmätason ilmiöitä halutaan selittää matemaattisesti. Oleellinen piirre systeemiteoriassa on sen kyky selittää dynaamisia ilmiöitä, jotka ovat tärkeitä järjestelmien ajan mukana muuttuvaa käyttäytymistä kuvattaessa.

Urani alussa olin vahvasti teoreetikko, jolle systeemiteorian tieteellinen kehittäminen oli pääasia. Insinööritieteissä kuitenkin teorioilla on vahvasti välineellinen arvo. Ne eivät sellaisenaan johda haluttuihin ratkaisuihin. Ongelmien perustat tulee ymmärtää loogisesti ”insinöörijattelun” kautta ennenkuin niitä on syytä lähteä ratkomaan teorioita hyväksi käyttämällä. Tämän asian oivaltaminen siirsi tieteellisen toiminnan painopisteeni vähitellen lähemmäksi käytännön ongelmien kautta tapahtuvaa lähestymistä. Tämän seurauksena on kuitenkin syntynyt se yllättävä havainto, että tämä insinööritieteellinen lähestymistapa ei välttämättä ole kaikilla tahoilla tieteessä tunnettua tai hyväksyttyä. Edelleen tästä on ollut seurauksena, että olen joutunut pohtimaan insinööritieteellisen näkökulman syvempää olemusta ja myös vertaamaan sitä muihin tieteenaloihin. Yllättävästi olen löytänyt mielenkiintoista pohdittavaa. Uskoisin sillä olevan laajempaakin merkitystä tieteessä käytävään keskusteluun, jonka aallot käyvät tällä hetkellä korkeina resurssiongelmiä ratkottaessa ja yhteisiä pelisääntöjä haettaessa. Tässä kuten monessa muussakin asiassa on

yhteisesti ymmärrettyjen käsitteiden luominen tärkeää, jotta keskustelijat eivät puhuisi toistensa ohi. Perustavaa laatua olevat käsitteet, joista ei pitäisi puhua ilman tarkempaa määrittelyä, ovat *perustutkimus* ja *soveltava tutkimus*. Julkisessa keskustelussa näitä pidetään usein itsestään selvyyksinä, mistä johtuen niiden tulkinnassa tehdään usein pahoja virheitä. Käsitteiden tarkempi analyysi on ollut yksi sytyke tälle kirjoitukselle, jossa myös pohditaan insinööritieteiden syvempää olemusta kirjoittajan omista lähtökohdista.

Tieteen jako perus- ja soveltavaan tutkimukseen

Tieteessä puhutaan paljon *perustutkimuksesta* ja *soveltavasta tutkimuksesta* yleiskäsitteinä ja riidellään niiden olemassaolon oikeutuksesta. Lähemmin tarkasteltuna nämä käsitteet ovat täysin onttoja ja niitä on vaikea edes määritellä yleisellä tasolla. Parempi lähtökohta on jaottelu aluksi *analyttisiin* ja *synteettisiin* tieteisiin niiden perusluonteen eli tutkimuskysymysten motivoinnin mukaisesti.

Analyttisiin tieteisiin voidaan lukea luonnontieteet, suuri osa lääke-, yhteiskunta-, talous- ja humanistisia tieteitä. Tavoitteena on täydentää tunnettua maailmankuvaa tai selittää olevaista aiempaa paremmin. Tavoitteen motiivina on ihmislajin uteliaisuus ja tiedon jano ("uteliais-apina"). Esimerkiksi:

- Selvyyden saaminen siihen kysymykseen minkälainen oli dinosaurusten seksielämä ja kuinka ne parittelivat on hyvin perusteltu tutkimusaihe luonnontieteelliselle tutkimukselle (Scientific America, March 2013)
- Kuinka galakseissa mahdollisesti olevat mustat aukot syntyvät ja käyttäytyvät on keskeisiä kysymyksiä nykyisessä tähtitieteessä.

Synteettisiä tieteitä ovat insinööritieteet (tekniset tieteet), kliininen lääketiede, osa yhteiskunta- ja taloustieteitä ja monet muut tieteet, joiden tavoitteena on luoda uutta maailmaa, teknologioita, tuotteita, infrastruktuureita tai tuotantoprosesseja, parantaa ihmisten sairauksia tai kehittää heille uusia apuneuvoja, ohjata yhteiskunnallista tai taloudellista kehitystä. Myös matematiikka voidaan luonteensa vuoksi lukea synteettisiin tieteisiin, koska siinä luodaan uusia rakenteita eikä se sinänsä selitä olevaista. Tavoitteen motiivina ovat ihmislajin konkreettiset tarpeet säilyä ja kehittyä yhä kyvykkäämmäksi "teknologia-apinaksi".

Esimerkiksi:

- Miten kehittää uusi laite, joka tuottaa sähköä kemiallisesti sidotusta energiasta ilman pyöriä koneita?
- Kuinka rakennetaan ihmismäisesti käyttäytyvä robotti palvelutehtäviin, jotka eivät enää kelpaa ihmisille?

Miten käsitteitä pitäisi sitten käyttää? Perus- ja soveltava tutkimus ovat mielekkäitä käsitteitä ainoastaan kun ne ensin liitetään po. tieteenalaan, jonka analyttinen tai synteettinen luonne ensin tunnustetaan. Voidaan puhua esimerkiksi luonnontieteiden perus- ja soveltavasta tutkimuksesta. Fysiikassa kvanttifysiikan tutkimus on perustutkimusta, mutta materiaali-tutkimus on paljolti soveltavaa tutkimusta. Samoin voidaan puhua insinööritieteiden perus- ja soveltavasta tutkimuksesta. Esimerkiksi bioteknologiassa tuottavan mikrobin ominaisuuksien

karakterisointi on perustutkimusta, mutta sen geneettinen modifiointi tuotantotarkoitukseen soveltavaa tutkimusta.

Mikä on sitten yleisesti ottaen perus- ja soveltavan tutkimuksen käsitteiden ero? Raja on häilyvä, mutta ehkä seuraava erottelu voidaan tehdä. Kullakin tieteenalalla, kun ensin on hyväksytty sen kuuluminen analyttiseen tai synteettiseen perusjoukkoon, perustutkimusta on tutkimus, jossa kehitetään menetelmiä tai kerätään perustietoa pääkysymyksen ratkaisua varten. Pääkysymys tunnistetaan, mutta sen ratkaisua ei välttämättä vielä haeta. Soveltavaa tutkimusta on tutkimus, jossa päähuomio on pääkysymyksen ratkaisussa. Alan perustutkimuksen tietoja käytetään hyväksi. Voiko biologiksi itsensä tunnistava perhostutkija tehdä kumpaakin tutkimusta? Kyllä voi. Tutkiessaan perhosten lajijominaisuuksia hän tekee perustutkimusta. Kun hän selvittää esimerkiksi ilmastomuutoksen vaikutuksia jo hyvin tunnetun perhoslajin esiintymiseen, kyseessä on alan soveltava tutkimus. Samoin on helppo mieltää se, että taloustieteilijä tekee perustutkimusta silloin kun hän tutkii talouden yleisiä lainalaisuuksia, mutta laatiessaan ennustemalleja Suomen taloustilanteen kehityksestä hän tekee alansa soveltavaa tutkimusta.

Vääriä mielikuvia insinööritieteistä

Tieteistä keskusteltaessa insinööritieteet ovat usein lapsipuolen asemassa, koska ne ovat verraten nuoria ja niistä on vallalla paljon vääriä mielikuvia. Tätä vielä hämärtää yleisessä kielenkäytössä paljon käytetty sanonta ”tiede ja teknologia”, jossa teknologia erotetaan tieteestä sekä usein harhaisesti samaistetaan insinööritieteiden kanssa. Esimerkiksi seuraavia väittämiä kuulee esitettävän:

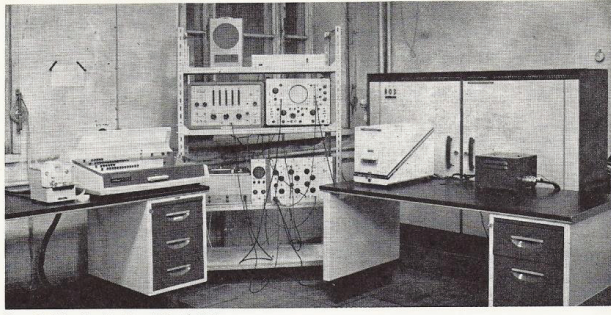
- insinööritieteet ovat luonnontieteiden ja matematiikan soveltamista ja tässä mielessä soveltavaa tutkimusta
- insinööritieteissä ei voi tehdä perustutkimusta
- insinööritieteissä keksinnöllisyys ja innovaatiot ovat lähtökohtia
- insinööritieteet eivät ole oikeita tieteenaloja, koska eivät julkaise *Nature*ssa tai *Science*ssa.
- insinööritieteitä ovat ne tieteenalat, joita opetetaan ja tutkitaan teknillisissä korkeakouluissa.

Insinööritieteissä perustutkimuksella ei tarkoiteta luonnontieteitä tai matematiikkaa, vaan sellaista alan tutkimusta, joka luo perustaa edetä kohti synteettistä päämäärää eli sovellusta tuotteissa, suunnittelumenetelmissä tai tuotantoprosesseissa. *Systemiteoria* on insinööritieteissä tietyn osa-alueen perustutkimusta. Sitä voidaan soveltaa myös muilla tieteenaloilla, kuten taloustieteissä ja biologiassa. Sen tavoitteena on selittää järjestelmien käyttäytymisen yleisiä lainalaisuuksia erityisesti aikaan sidotusti eli dynaamisesti.

Oma kehitykseni ja systeemiteorian merkitys siinä

Diplomityöni tein professori Hans Blombergin säätötekniikan sittemmin systeemiteorian laboratoriossa Teknillisessä korkeakoulussa 1966. Jatkoisin assistenttina ja Akatemian nuorempana tutkijana laboratorion tutkimusryhmässä, joka teki uraa uurtavaa tutkimustyötä

usealla systeemiteorian osa-alueella. Itseäni kiinnosti epälineaaristen dynaamisten järjestelmien teoria. Vaikutteet väitöskirjaan tulivat Norbert Wienerin 1950-luvulla MIT:ssä käynnistämältä tutkimusryhmältä, joka tutki lineaarisen teorian laajennusta Volterran funktionaalien avulla. Suurin vaikuttaja oli kuitenkin valtava kiinnostus matematiikkaan. Toimivien tietokoneiden aikakausi alkoi samoihin aikoihin opintojeni kanssa ja myös se vaikutti vahvasti suuntautumiseeni. Kuvassa TKK:n laskentakeskuksen Elliot 803-tietokone, jolla tein elektroniikan ns. pitkän harjoitustyöni, joka johti ensimmäiseen julkaisuunikin lääketieteellisessä konferenssissa Tukholmassa. Tein tietokoneen avulla analyysejä kaneista mitatuista hermopulsseista ystäväni Juhani Hyvärisen fysiologian alan väitöskirjaan.



Kuva 1. Elliot 803-tietokone TKK:n Hietalahdentorin päärakennuksen kellarissa. Hermoimpulssien analoginen mittausjärjestelmä on tietokoneen takana omassa rakissa. Tietokone otettiin käyttöön 1960-luvun alussa.

Kuulun siis siihen onnelliseen sukupolveen, joka saattoi koko opiskeluaikansa käyttää toimivia tietokoneita ja saada tätä kautta alusta alkaen kiinteän suhteen tähän avainteknologiaan. Ennen opiskeluaikaa en tiennyt tietokoneista mitään. Väitöskirjani oli melkein puhdasta matematiikkaa. Siinä kehitettyä teoriaa polynomityyppisten operaattoreiden invertoinnista Banach-avaruuksien välillä sovelsin vaihtelevalla menestyksellä erilaisiin kohteisiin epälineaaristen säätö- ja suodatinalgoritmien kehityksessä. Samalla kuitenkin suhtautumiseni käytännön insinööriongelmiin alkoi muuttua. Teoria on hyvä työkalu, mutta se tulee valita ongelman mukaan eikä päinvastoin.

Teorian osaajasta ongelmaratkaisijaksi ja lopulta insinöörityöteorian harjoittajaksi

Systeemi- ja säätöteoria antaa vahvan matemaattisen taustan ymmärtää dynaamista maailmaa ja sen ilmiöiden ohjausta. Se ei kuitenkaan pysty korvaamaan insinöörijärkeilyä, jonka perusteella ymmärretään teknisten järjestelmien toiminnallisuus. Toiminnallisuuden ymmärtäminen on avain synteettiseen ajatteluun, joka on puolestaan avain insinöörityöteoriaan. Biologiset prosessit suuntasivat oman ajatteluni käytännön maailman jo väitöskirjatyöni aikana. 1960-luvun lopulla ja -70-luvun alussa tietoisuus vesistöjen tilan huonontumisesta alkoi herätä ja jätevesien biologista puhdistusta kehitettiin voimakkaasti. Tämän myötä myös puhdistusprosessien automaatio ja ohjaus alkoi kiinnostaa. Ensimmäiset Systeemiteorian laboratoriossa käytäntöön liittyvät sovellutukset alkoivat 1960-luvun lopulla ja ne liittyivät Akatemian laajaan tutkimusohjelmaan, jossa mallinnettiin kunnallisia viemärijärjestelmiä ja jätevesien biologisia puhdistusprosesseja. 1970-luvun puolella välissä energiakriisin jälkeen mikrobiologinen proteiinin tuotanto oli suuren kiinnostuksen kohteena ympäri maailmaa.

Tähän boomiin Suomessa kehitettiin Pekilo-prosessi, joka automatisoitiin tietokone-ohjauksella. Tähän projektiin minulla oli tilaisuus osallistua siirryttyäni 1972 Tampereen teknillisen korkeakoulun apulaisprofessoriksi ja kuusi vuotta myöhemmin professoriksi Oulun yliopistoon. Yhdessä Tampellan ja Rinteknon kanssa kehitimme ja toteutimme tietokone-ohjauksen tehdasmittakaavaiselle Pekilo-prosessille, jossa tuotettiin mikrobipohjaista proteiinia rehuseoksiin. Molemmissa näissä tutkimuksissa prosessien matemaattisella mallintamisella ja sitä kautta niiden toiminnallisuuden paremmalla ymmärtämisellä oli keskeinen merkitys ohjauksen ja automaation onnistumisessa. Erityisesti Pekilo-prosessin kohdalla mallintamisella oli myös suuri merkitys reaktoreiden suunnittelussa, koska vastaavan kokoluokan bioreaktoreita ei ollut koskaan aikaisemmin rakennettu. Oleellinen ongelma, joka mallien avulla lopulta onnellisesti ratkesi, oli hapen siirron merkitys reaktoreiden toiminnassa.

Pekilo-prosessi herätti aikanaan maailmanlaajuisia kiinnostusta. Sen automaatiojärjestelmässä oli tiettävästi maailman ensimmäinen fermentointiprosessin tietokoneohjaus. Se oli teknologiaharppaus, jota ei ollut aikaisemmin tehty tehdasmittakaavassa. Tutkimusryhmämme pääsi ratkomaan muutamia keskeisiä kysymyksiä sen ohjaamisessa ja rakentamaan yhden maailman ensimmäisiä tietokonejärjestelmiä tämänkaltaisille prosesseille. Projektin aloittamispäätös lienee ollut vahinko, koska ei voitu ymmärtää kuinka vaikea sen toteuttaminen oli. Sisulla se saatiin loppuun – vastaava “strategia” lienee monen muunkin suomalaisen kehityshankkeen takana. Vaikka prosessista ei tullut kaupallista menestystä, niin siihen kehitetty tietokoneohjaus jäi elämään ja löysi markkinoita.

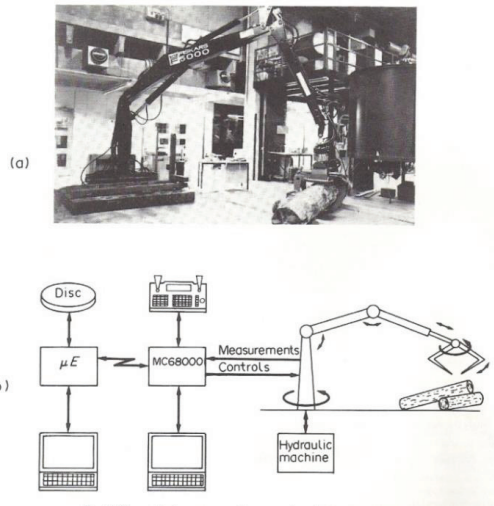
Oulun yliopistoon siirryttyäni 1977 tutkimus suuntautui yhä enemmän ongelmalähtöisen sovelletun insinööritieteen suuntaan, keskittyen aluksi prosessiautomaatioon. Prosessi-automaatiossa tapahtui 1970-80 lukujen vaihteessa merkittävä teknologiamurros kun siirryttiin hyvin nopeassa aikataulussa täysin digitaalisiin automaatiojärjestelmiin. Tutkimusryhmämme osallistui Valmet Oy:n Damatic (Classic) järjestelmän kehitystyöhön, joka oli aikansa mittavimpia IT-hankkeita Suomessa.

Yksi suurista haasteita 1980-luvulla oli kappaletavateollisuuden – lähinnä konepajojen – tuotantojärjestelmien – automaation uudistaminen. Siirtyminen solutyypisiin tuotantojärjestelmiin ja JOT-tuotantofilosofiaan tapahtui Suomessa hieman jälkijättöisesti, mutta lopulta varsin onnistuneesti. Onnistumista tuki hienosti vastaperustetun TEKES:n yksi ensimmäisistä teknologiaohjelmista (kappaletavara-automaatio 1985-88), jonka vastaavana johtajana toimin.



Kuva 2. Jämsänkosken Pekilotehdas tuotti kuvan mukaista rihmastomaista mikrosientä *Pecilomyces Variote*, jonka proteiinipitoisuus oli korkea.

Kiinnostukseni konetekniikkaan ja koneiden automaatioon – robotiikkaan – heräsi mainitun TEKES:n teknologia-hankkeen myötä. Oulun Yliopiston laboratoriossani käynnistettiin vuorovaikutteisen robotiikan tutkimus-hankkeiden sarja, joka jatkui vielä takaisin TKK:hon siirryttyäni 1986. Tutkimus oli silloin etujassa ja soti robottien käytön yleistä filosofiaa vastaan – nykyään se on yksi tutkituimpia aiheita robotiikassa. Tutkimamme robotit olivat silloin myös erikoisia kuten vieressä oleva kuva osoittaa.



Kuva 3. Metsätraktorin tukkinosturi, jota robotoitiin ja ohjattiin interaktiivisesti laserosoittimen avulla.

1980-luvun puolen välin jälkeen kiinnostus lisäarvon tuomiseen koneenrakennuksen tuotteisiin automaation keinoin kasvoi voimakkaasti. Liikkuvat työkonet olivat se osa-alue, johon kiinnostus Suomessa luontevasti kohdistui vahvan ja kasvavan yrityssektorin myötä. TEKES ja yritykset panostivat voimakkaasti tälle alueelle. Samoin EU:n ESPRIT II ohjelmassa käynnistettiin yksi ohjelman laajimmista hankkeista, PANORAMA, tutkimaan ja kehittämään tätä aluetta. Seurauksena oli, että alaa koskeva tutkimus ja osaaminen Suomessa ottivat huomattavan harppauksen eteenpäin. Kävelemällä liikkuva metsäkone ja automaattiset kaivoskoneet herättivät silloin runsaasti huomiota maailmalla. Alla olevassa kuvassa on prototyyppisiä mainituista hankkeista.

Tutkimus jatkui erilaisten robottien parissa 1990-luvulla ja 2000-luvun alussa. Vuonna 2006 sain johdettavakseni Akatemian Älykkäiden koneiden huippututkimusyksikön GIM (Generic Intelligent Machines). Yksikkö tutkii ja kehittää seuraavan sukupolven älykkäiden liikkuvien työkonoiden ja robottien teknologiaa pyrkien kansainväliselle huipulle ja samalla tukemaan kansallista alan teollisuutta. Ala on Suomen teknologiateollisuuden uuden keskeisiä vientisektoreita. Sen piirissä on useita yrityksiä, jotka ovat alallaan maailman markkina-johtajia. Sen tärkeimpiä kilpailutekijöitä on



Kuva 4. Kävelevän koneen ja PANORAMA-projektin

tietotekniikan ja automaation sulautuminen tuotteisiin niiden keskeiseksi osaksi. Ala tarjoaa myös mahdollisuuksia volyymituotteille ns. palvelurobotiikka-konseptin muodossa. Vieressä oleva kuva havainnollistaa tuotteiden ja mahdollisuuksien kirjoa.



Kuva 5. Palvelurobotiikan esimerkkejä.

Onko alkuaikojen innostus systeemiteoriaan pysynyt mukana?

Systemiteoria on edelleen merkittävässä roolissa tutkimuksessa ja opetuksessa, mutta ei samalla tavalla kuin urani alkuaikoina. Insinööritieteen harjoittajana näen nyt siihen kuuluvan synteettisen eli uutta tekniikkaa luovan tavoitteen tärkeimpänä motiivinani. Aiemmin kunnolla opiskeltu matemaattinen teoria antaa kuitenkin hyvän selkänajan. Systeemiteorian merkitys on ajatuksia selkeyttävä. Koska se ei ole teknologiasidonnaista, myös geneerinen ulottuvuus erityyppisten järjestelmien analyysissä on tärkeä ulottuvuus. On tärkeää mieltää dynamiikan lainalaisuudet, jotka pätevät yhtä hyvin kemiallisissa prosesseissa kuin mekaanisissa ja sähköisissä järjestelmissä. Tällaisia ovat mm. järjestelmien stabiilisuus, aikavasteiden lainalaisuudet, ennakointi mallien avulla, suureiden estimointi analyttistä redundanssia hyväksi käyttäen jne.

Lopuksi huolestuneita ajatuksia tekniikan tutkimuksen ja opetuksen nykytilasta

Aalto-yliopisto on TKK:n manttelin perijä – niin sanotaan. Monessa suhteessa sen tavoitteet ja arvot ovat kuitenkin toiset kuin TKK:n. Siinä missä TKK korosti korkeatasoista insinöörikoulutusta ja yhteistyötä yritysten kanssa Aalto korostaa kansainvälistymistä ja kansainvälisen tutkimustiedon tuottamista. Käytännössä tämä merkitsee yhteistyön kaventumista yrityselämän kanssa ja insinööritieteiden painottumista pelkkään kansainvälisen tason perustutkimukseen. Tähän liittyy mahdollisesti se yleisesti esiintyvä harha, jonka mukaan perustutkimuksen ja soveltavan tutkimuksen tulisi seurata toisiaan sarjassa. Hyvä perustutkimus tuottaa hyvää soveltavaa tutkimusta, jolla on hyödyllisiä tuloksia – näin sanotaan. Asia ei kuitenkaan ole näin yksinkertaista. Monella synteettisellä tieteenalalla ja varsinkin insinööritieteissä rinnakkaisuus on se oikeampi tapa lähestyä asioita. Oikeiden ongelmien tiedostaminen on tärkeää silloin kun kehitetään menetelmiä ja teorioita

perustutkimuksessa, jotta niillä olisi hyvän työkalun ominaisuudet jatkossa. Teknillinen korkeakoulun vahvuus on ollut tämän asiantilan oikea ymmärtäminen. On aika herätä, jos Teknillinen korkeakoulun rooli yhteiskunnassa halutaan säilyttää!

Yliopistoudistuksen myötä on jälleen siirrytty kokeilemaan uusia tapoja hallinnoida yliopistoja ja arvioida tutkimusta, koulutusta ja niiden merkitystä yhteiskunnalle. Tavoitteena on pääsy maailman parhaiden yliopistojen joukkoon maailman pienimmillä budjeteilla. Aalto-yliopistossa on omaksuttu amerikkalainen hallintorakenne, jota on terästetty Nokialaisella henkilöstöhallinnolla. Tämä merkitsee jatkuvia YT-neuvotteluita ja tutkimusryhmien asettamista tenure-track "slotien" sanelemaan standardimuotteihin. Suorituksia halutaan myös mitata entistä enemmän. Mittaamisesta erilaisilla indekseillä on tullut tapa, jolla pyritään objektiivisesti erottamaan hyvä ja tärkeä tutkimus ja sitä tekevät henkilöt vähemmän hyvistä ja vähemmän tärkeästä tutkimuksesta. Aalto-yliopistossa päivän sana on h-indeksi (Scopus, Web of Science). Professoriksi ei voida nimittää, jos $h < 8$. Jos on Suomen kansalainen, tilanne on myös hyvin vaikea, koska yliopiston henkilökunnalle asettama 30% tavoitteellinen ulkomaalaiskiintiö ei tästä parane. Mittaaminen on sinänsä hyvä, mutta löytyykö insinööritieteille sellaiset mittarit, jotka ottavat huomioon sen kokonaisuuden, joka muodostuu välttämättömästä elävästä vuorovaikutuksesta teollisuuden ja elinkeinoelämän kanssa?

Kirjoittajasta



Arne Halme (arne.halme@aalto.fi) syntyi 29 toukokuuta 1943 Helsingissä. Hän suoritti diplomi-insinöörin tutkinnon Teknillisessä korkeakoulun sähkötekniikan osastossa säätötekniikka pääaineena 1966 ja väitteli tohtoriksi systeemiteoriasta 1972. Diplomi-insinööriksi valmistumisensa jälkeen hän toimi aluksi assistenttina ja Suomen Akatemian nuorempana tutkijana Systeemiteorian laboratoriossa. Vuonna 1972 hän siirtyi säätötekniikan apulaisprofessoriksi Tampereen teknilliseen korkeakouluun ja sieltä edelleen Oulun Yliopistoon säätö- ja systeemitekniikan professoriksi 1977. Vuodesta 1986 hän on toiminut automaatiotekniikan professorina Teknillisessä korkeakoulussa ja sittemmin Aalto yliopistossa emeritus professorina. Vuosina 1988 ja 1992 hän toimi vierailevana tutkijana Japanissa MEL-tutkimuslaitoksessa. Vuodesta 2008 hän on johtanut Suomen Akatemian "Älykkäät koneet"-nimistä huippututkimusyksikköä. Hänen johdettavanaan on ollut useita kansallisia ja kansainvälisiä tutkimushankkeita. Hän on myös toiminut aktiivisesti automaatioalan kansainvälisessä kattojärjestössä IFAC:ssa. Julkaisuja on kertynyt noin 250 tieteellistä artikkelia systeemiteorian ja automaation aloilta sekä myös biotekniikasta, joka on ollut tieteellisenä sivuharrastuksena vuosien varrella.

Systemiäly²

Raimo P. Hämäläinen ja Esa Saarinen

Johdanto

Systemiäly on perusta, jolle systemiteorian mallintaminen perustuu erityisesti silloin, kun kohteena on sosiaaliset systemit ja organisaatiot. Systemitutkimuksen perinteinen ulkoinen näkökulma ei mielestämme kuitenkaan riitä, vaan tarvitaan systemin sisältä avautuvaa näkökulmaa, jota kutsumme systemiälyksi.

Tavoitteena on kehittää käsitteistöä, joka synnyttää muutosta ja jäsentää muutosta – tavalla, joka yhdistää toisiinsa käytännöllisiin tuloksiin tähtäävän insinööriajattelun, humanistis-eksistentiaalisen hyvän elämän filosofian, positiivisen psykologian ja positiivisen organisaatiotutkimuksen perusoivallukset sekä terveen järjen tavalla, joka toimii.

Kuinka systemiälykkäitä olemme? Kuinka systemiälykkäitä voisimme olla? Kuinka tärkeää on lisätä älykkyyttään kokonaisuuksien keskellä ja käsittää, mistä kokonaisuuksissa toimiminen merkittävästi muodostuu? Kuinka tärkeää on käsittää muutoksen monesti kätkeytyä logiikka, mahdollisuudet ja ne piilotehtävät, joihin vaikuttamalla asiat voisivat toteutua aikaisempaa paremmin?

Kun aloimme käyttää ”systemiäly” sanaa seminaarissamme syksyllä 2002, avautui virta, jonka vuolaus on yllättänyt mukana olleet monitaustaiset tutkijat, opiskelijat, käytännön yritysjohtajat, pedagogit, taiteilijat ja muut toimijat. ”Systemiäly” osoittautui nopeasti käsitteeksi, joka on tavattoman heuristinen, intuitiivinen, ryhmädynaamisesti innostava ja tutkimuksellisesti sytyttävä. Käsite antoi mahdollisuuden tarkastella hedelmällisesti suurta joukkoa toisiinsa näennäisesti liittymättömiä teemoja. Se loi tilaisuuden yhdistää oivalluksia läpi erilaisten kokemus- ja tutkimustraditioiden antaen samalla tilaa myös esiteoreettiselle elämäkokemukselle. Käsite energisoi ja alkoi toimia: se antoi mahdollisuuden katsoa uusin silmin tuttuja teemoja ja ongelmakenttiä – intuitiivisesti, jäntevästi ja omakohtaisesti.

Systemiällyn käsitteen intuitiivisuus on sen erittäin vahva tunnusmerkki. Monella inhimillisen kokemuksen alueella ja tutkimuskentällä on todettu, että vallitsevat ajattelumallit tuloksia synnyttäessään samalla rikkovat jotain. Kokonaisymmärrys olennaisista ilmiöistä jää usein puuttumaan tarkastelun upotessa yksityiskohtiin. Tarvitsemme otetta ja asennetta, joka ylittää vallitsevat eristävän, reduktionistisen, fragmentoivan, dikotomisen, esineellistävän ja objektivoivan ajatteluperinteen paradigmat³.

² Artikkelin perustuu johdantoteksteihin teoksissa: R. P. Hämäläinen, E. Saarinen (toim.): Systemiäly 2005, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports, B25, May 2005.

R. P. Hämäläinen, E. Saarinen (toim.): Systemiäly 2006, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports, B26, June 2006.

³ Vrt. esim. David Bohm. 1996. On Dialogue ja Thought as a System, Eds. by Lee Nichol Routledge, Peter M. Senge. 1990. The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization, Doubleday.

Systeemiälyviitekehys nousee useasta eri suunnasta. Siihen sisältyy monia keskeisiä yhtymäkohtia oman aikamme eräiden tärkeimpien älyllisten kehityssuuntausten kanssa. Kysymyksessä on synteettinen hanke, jonka pyrkimyksenä on yhdistää teoria ja käytäntö, tekeminen ja ajattelu, yksilö ja yhteisö, realiteetti ja mahdollisuus. Tavoitteena on osoittaa, avata ja rakentaa yhteyksiä sekä mahdollistaa inhimillinen kasvu. Relevantteja taustoja ovat erityisesti:

1. Toimintatutkimus, joka hahmottaa inhimillistä toimintaa sisältä käsin ja samalla kun se tapahtuu⁴.
2. Onnellisuustutkimus ja positiivinen psykologia, joka tutkii inhimillisen kukoistuksen reunaehtoja ja toteutumistapoja psykologiatieteen lähtökohdista, mukaan lukien ihmisuskaisen humanistisen ihmiskäsityksen perustalle rakentuvat lähestymistavat⁵.
3. Positiivinen organisaatiotutkimus, joka fokusoii positiivisen poikkeaman mahdollisuuteen yhteistoiminnassa ja organisaatioissa, mukaan lukien oppivan organisaation tutkimuksen perusoivallukset⁶.
4. Systeemiajattelu, joka haluaa hahmottaa ja mallintaa systeemisiä rakenteita⁷.
5. Sokraattisen filosofian perinne, joka tähdentää elettyä elämää ja sen rikastamista filosofian perusteena⁸.
6. Gardnerilainen moniälykkyyssnäkemys ja siihen liittyvä tutkimusperinne⁹.
7. Luovuustutkimus¹⁰.
8. Kaoottisten ja kompleksisten ympäristöjen soveltava tutkimus¹¹.

Systeemiälyä on kuvattu, eritelty ja sovellettu mm. ympäristötutkimuksessa, dialogiympäristöissä, pedagogiikassa, luovuustutkimuksessa, organisaatiotutkimuksessa ja hyvän elämän filosofiassa. Edelleen näkökulmaa on sovellettu mm. Sun Tzun sotastrategioiden tarkasteluun, oikeuskäytäntöihin, perhe-elämän dynamiikkaan, työnohjauksen analyysiin, palkitsemisjärjestelmiin, yrityskauppojen analyysiin ja Goldbrattin constraints-teoriaan (kts. kirjallisuusviitteet).

⁴ Ks. esim. Peter Reason & Hilary Bradbury (eds.). 2001. Handbook of Action Research, Sage.

⁵ Ks. esim. C.R. Snyder & Shane J. Lopez (eds.). 2002. Handbook of Positive Psychology, Oxford University Press.

⁶ Ks. esim. Kim S. Cameron, Jane E. Dutton & Robert E. Quinn (eds.). 2003. Positive Organizational Scholarship, Berrett-Koehler Publishers.

⁷ C. West Churchman. 1979. The Systems Approach and Its Enemies, Basic Books Inc. Peter M. Senge. 1990. The Fifth Discipline, Doubleday/Currency. Peter M. Senge. 1994. The Fifth Discipline Fieldbook, Doubleday/Currency. Michael C. Jackson. 2003. Systems Thinking: Creative Holism for Managers, John Wiley & Sons, Ltd.

⁸ Tätä näkökulmaa on erityisen arvokkaasti tähdentänyt Pierre Hadot. 2002. What is Ancient Philosophy?, Harvard University Press.

⁹ Howard Gardner. 1983. Frames of Mind, Basic Books; Howard Gardner. 1993. Multiple Intelligences, Basic Books.

¹⁰ Erinomaisia lähtökohtia tarjoaa Karl H. Pfenninger & Valerie R. Shubik (eds.). 2001. The Origins of Creativity, Oxford University Press.

¹¹ Ks. esim. Robert Axelrod. 1997. The Complexity of Cooperation, Princeton University Press; Ralph Stacey. 2003. Complexity and Group Processes, Brunner-Routledge; Malcolm Gladwell. 2000. The Tipping Point, Little, Brown and Co; Robert Jervis. 1997. System Effects: Complexity in Political and Social Life, Princeton University Press.

Systeemiälyn taustat

Peter Sengen Fifth Discipline (1990) on tärkein yksittäinen innoite systeemiäly-hankeellemme¹². Sengen moniulotteinen ja vaikutusvaltainen teos on kokonaisvaltaisen organisaatioajattelun kärkiteos. Kirja tuo ”oppivan organisaation” ja systeemisen ajattelun osaksi organisaatiotutkimusta ja käytännön johtamistyötä sivuuttamattomalla tavalla.

Mutta Sengen systeemiajattelua, ja samalla Fifth Discipline-teoksen ja sen jatkoteoksen ajatusmaailmaa¹³, on täydennettävä käytännöllisellä, henkilökohtaisella ja syväinhimillisellä voimavektorilla. Tarvitaan kuvaus ja teoria systeemiajattelua ilmentävistä käytännöistä enemmänkin kuin jatkotutkimuksia systeemiajattelusta ja ”systeemisistä arkkityypeistä” (mitään näistä vähättelemättä). Ajattelu on tärkeää, mutta vielä tärkeämpää on käytäntö. Tarvitaan valotusta siihen, miten inhimillinen toiminta voi olla systeemissä mielessä toiminnallisesti järkevää ja kontekstuaalisesti tarkoituksenmukaista sielläkin missä se ei ole eksplisiittistä, tietoista tai edes käsitteellistä. Tämä on systeemiälytutkimuksen ja systeemiälyhankkeemme teema. Pyrkimyksenä on hahmottaa taitoa, kykyä ja taipumusta – älykkyyttä – joka usein toimii tietoista ajatusta nopeammin, situationaalisesti ja ehkä vaistomaisesti, osana käytännöllistä järkeämme, harkintakykyämme ja tilannetajuamme.

Puheena on kokonaisuuksiin kytkeytyvä toimintataito, vuorovaikutuskykyihimme liittyvä erinomaisuus, jonka uskomme olevan syvällisesti osa ihmisen evolutionaarista onnistumisvälineistöä.

Ihminen on, me perustavasti uskomme, systeemiälykäs olento.

Olemme määritelleet systeemiällyn kyvykkyytensä hahmottaa vuorovaikutuksellisia takaisinkytkentöjä sisältäviä kokonaisuuksia tarkoituksenmukaisesti ja luovasti¹⁴. Systeemiälykäs henkilö osaa toimia älykkäästi, järkevästi ja tarkoituksenmukaisesti monimutkaisissa systeemirakenteissa. Kokonaisuus muovaa häntä ja hän osaltaan muovaa kokonaisuutta – usein intuitiivisesti ja vaistomaisesti, osana omaa ”kokemusajatteluaan”¹⁵, osana ihmisenä olemistaan, osana eksistentiaalisia strategioitaan. Systeemiälykäs toiminta nousee käsillä olevasta tilanteesta ja ilmentää heideggerilaista ”maailmassa-olemista”, jossa maailma on ”käsillä” eikä vain ”esillä”. Olennaista systeemiällylle on nykyhetkisyys ja prosessuaalinen osallistuvuus erotuksena prosessin tarkkailu, intellektuaalinen reflektio tai käsitteellistävä objektivointi. Systeemiäly on toiminnallisessa tilanteessa ilmenevää käytännön älykkyyttä, jossa tuntuma, taju ja kokonaisvaikutusten hahmotus ovat avainasemassa.

¹² Peter M. Senge. 1990. *The Fifth Discipline. The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday.

¹³ Peter M. Senge, Art Kleiner, Charlotte Roberts, Richard B. Ross and Bryan J. Smith. 1994. *The Fifth Discipline Fieldbook*. Doubleday.

¹⁴ Esipuheet teoksissa *Systeemiäly!*. 2003. T. Bäckström, V. Brummer, T. Kling ja P. Siitonen (toim.), Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports B23; *Systeemiäly: Näkökulmia vuorovaikutukseen ja kokonaisuuksien hallintaan*. 2004. R. P. Hämäläinen ja E. Saarinen (toim.), Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports B24; *Systems Intelligence: Discovering a Hidden Competence in Human Action and Organisational Life*. 2004. R. P. Hämäläinen and E. Saarinen (Eds.), Systems Analysis Laboratory Research Reports A28.

¹⁵ ”Experienced thinking”, siinä merkityksessä, missä sitä käyttää Vera John-Steiner. 1997. *Notebooks of the Mind*. 2nd edition, Oxford University Press.

Erityisen olennainen piirre systeemiälyhahmotuksessa on se vaikuttavuuksien avaruus, joka eri toimijoista virittyy vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja kertausvaikutusten kautta. Systeemiäly on aktiivista, toiminnallista yleistajua ja herkkyyttä inhimillisten systeemien muodostamisissa kokonaisuuksissa. Missä moni eri toimija yhdessä ja toisiinsa vaikuttaen määrää tapahtumien kulun, siellä systeemiäly toimii tekijänä, jota kokonaisuonnistuminen edellyttää.

Uskomme, että ihminen on valtavasti systeemisempi olento kuin tähän asti usein on tiedostettu.

Systeemisyyden tunnusmerkkejä ovat

- a) Lineaaristen kausaalisuhteiden väistyminen takaisinkytkentöjen ja keskinäistä vaikuttavuutta ilmentävien vuorovaikutussuhteiden hyväksi;
- b) Kokonaisuudessa ilmenevät emergentit ominaisuudet, joita ei voida luontevasti ymmärtää tai palauttaa kokonaisuuden osien ominaisuuksiin;
- c) Kokonaisuuden ohjausvaikutus yksittäisiin toimijoihin nähden;
- d) Vapaan valinnan, tahdon, spontaanisuuden, luovuuden ja itseohjautuvuuden tyyppisten perustavasti inhimillisten määreiden väistyminen kokonaisuuden hyväksi.

Periaate (d) on inhimillisissä systeemeissä erityisen tähdellinen. Tässä ei ole mahdollista sukeltaa vapaata valintaa, tahtoa tai itseohjautuvuutta koskevaan yksityiskohdissaan monimutkaiseen ongelmatiikkaan. Haluamme kuitenkin viitata siihen intuitiivisesti tärkeään seikkaan, että yksilön kannalta systeemisyyden ilmenee hänen oman vapaan valintansa kaventumisena ja toimintatilansa rajautumisena systeemin sallimiin puitteisiin. Systeemi päättää todella tärkeät asiat ja yksilöllä ei näytä olevan muuttaa mahdollisuutta kuin toteuttaa omaa rooliaan annetun systeemin puitteissa. Pienikin poikkeama olemassa olevista käytännöistä töissä tai parisuhteissa voi olla yksilölle käytännössä miltei mahdoton toteuttaa, koska systeemi määrää mikrokäytöstenkin osalta, mitä tulee tehdä.

Useimpien ihmisten on erittäin vaikea esimerkiksi tervehtiä ympärillään olevia ihmisiä ennen luentotilaisuuden alkua, koska se ei kuulu systeemiin. Voi olla yllättävän vaikea sanoa ”kiitos” työkaverille, jos kulttuuri on karskin maskuliininen ja yleishokema on, että ”tekijä tietää arvonsa”. Mikromuutos on makromuutos, kun se asettuu poikkiteloin johonkin systeemin oletettuun käskymääreeseen nähden.

Ihminen arvioi ympäristöään systeemisenä rakenteena. Mikä on sallittua ja mikä ei? Mitä kuuluu tehdä, mitä ainakaan ei? Mikä voisi aiheuttaa paheksuntaa ja häpeää? Miten kovaa tulee puhua tai mitä ei saa puhua? Mihin tulee istua ja mihin ei? Mikrokäytös heijastelee valinnan avaruutta, jonka puolestaan määrittelee subjektin systeemistä kehystä koskeva tulkinta.

Tässä asetelmassa keskeistä on, että

1. yksilön tulkinta vallitsevasta systeemistä voi olla virheellinen, osittainen tai puutteellinen;

2. mukauttaessaan mikrokäytöksensä vallitsevaan systeemiin sellaisena kuin hän sen kuvittelee, yksilö alkaa edustaa systeemiä sen toisille toimijoille;
3. vahvistuessaan eri toimijoista käsin systeemi saa voimaa, jota yksilön on vaikea vastustaa tai kyseenalaistaa, koska niin monet näyttävät olevan sen takana;
4. syntyy itse itseään vahvistava ja ylläpitämä systeemi, jota näennäisesti eri toimijat kannattavat, vaikka todellisuudessa se ei ehkä tyydytä ketään.

Systeemiällyn optimismi lähtee liikkeelle kohdasta (4) yhdessä tiettyjen ihmisolemista koskevien olettamien kanssa. Nämä humanistis-positiivista ihmiskäsitystä edustavat perusnäkemykset sanovat, että useimmat ihmiset haluaisivat ottaa toisensa huomioon enemmän kuin nyt tekevät; että useimmat preferoivat hyväntahtoisuutta, ystävällisyyttä, reiluuutta, altruismia ja elämänuskoa yli itsekkyyden, ahneuden ja manipulaation. Edustamamme humanistis-positiivinen ihmiskäsitys sanoo, että useimmat ihmiset ovat luonnostaan yhteistyöhaluisia ja –kykyisiä ja että useimmat preferoivat elämää, jossa hyveet kuten toisten kunnioitus, hyväksyntä, huolenpito ja kannustavuus muodostavat käytännön elämän perustan¹⁶. Se, että näin ei tapahdu on käsityksemme mukaan pitkälti seurausta systeemirakenteista, jotka saavat ihmiset käyttäytymään varsinaista olemustaan vastaan tai sen sivuuttaen – koska olettavat systeemin edellyttävän tätä. Systeemiälytutkimus, tästä näkökulmasta, on elintärkeää hyvän elämän projektin kannalta.

Senge tähdentää, että ”rakenteet synnyttävät käyttäytymistä”. Väitteenä siis on, että systeemisyys ilmenee yksilöön nähden usein ylivoimaisena voimana, joka saa yksilön toimimaan toisin kuin hän vapaassa tilanteessa olisi halunnut tai järkevää olisi ollut. Omasta puolestamme haluamme tähdentää, että samalla kun systeemit synnyttävät käyttäytymistä, käyttäytymisellä on kykyä synnyttää rakenteita. Tämä systeemisten väliintulojen mahdollisuus on ratkaiseva luovuuskysymys, johon tulee paneutua sekä tuotannollisista, käytännöllisistä että eettisistä syistä.

Systeemiäly ei ole vain kykyä lukea olemassa olevia systeemeitä ja toimia älykkäästi niiden sisällä. Varsinainen kysymys koskee sitä, miten systeemejä voidaan muuttaa? Mikä on se kenties pieni mutta ratkaiseva väliintulo, sysäys tai esimerkki, joka toisten toimijoiden kautta äkisti alkaakin monistua, voimistua ja aikaansaa epälineaarisen vyörymän, kehityksen

¹⁶ Näiltä osin systeemiälyhanke ilmentää samansuuntaista kiinnostusta inhimilliseen potentiaaliin, mistä Howard Gardnerin uraauurtavissa tutkimuksissa on ollut kysymys. Ks. esim. Gardner 1983, *Frames of Mind*, Basic Books; *Creating Minds*, Basic Books.

Toinen oman lähestymistapamme kanssa samansuuntainen tutkimussuunta on ”positiivinen organisaatio-tutkimus” ja ”positiivinen psykologia”. Molemmat käsitteet ovat nousemassa vahvasti esiin ihmistutkimuksessa, kehitys jota tervehdimme innostuksella. Nimikkeiden ”Positiivinen organisaatiotutkimus” ja ”Positiivinen psykologia” historia on kuitenkin tavattoman lyhyt: kysymyksessä on viime vuosien läpimurto. Ks. Kim. S. Cameron, Jane E. Dutton and Robert E. Quinn (Eds.). 2003. *Positive Organizational Scholarship. Foundations of a New Discipline*, Berrett-Koehler Publishers; C.R. Snyder and Shane J. Lopez (Eds.). 2002. *Handbook of Positive Psychology*, Oxford University Press. Positiivisen psykologian avainhenkilö on Martin Seligman, joka otti käsitteen käyttöön vuoden 1998 linjapuheessaan. Sanomattakin on selvää, että humanistis -ihmisuskoksen lähestymistavan juuret ihmistutkimuksessa ja filosofiassa ulottuvat läpi vuosisatojen antiikin alkuperäisiin tematisointeihin, mutta kuluneen noin 100 vuoden aikana painopiste on ollut toisaalla – dramaattisen yksipuolistavin seurauksin.

epäjatkuvuuskohdan ja ”perhosvaikutuksen” kaaosteorian mielessä? Systeemiälyä koskeva tutkimustyö sisältää tässä kohdin valistuksellisen pyrkimyksen, koska uskomme, että interventioiden logiikka on pitkälle assosiativista ja että näin ollen yhden alueen oivallukset voivat sopivasti muunneltuina siirtyä toisaalle ja synnyttää massiivisen kokonaisvaikutuksen.

Systeemiälytutkimukseen sisältyy useita paradigmahaasteita, joista tässä viittamme kahteen. Kysymyksessä ei selvästikään ole vain yhden älykkyyden tyyppin gardnerilainen kartoitus¹⁷. Siis miten systeemiäly tulisi asemoida olemassa olevaan älykkyydetutkimukseen?

Tieteellisen lähestytävän kannalta hankala paradigmatekijä systeemiälyteoriassa on, että se kurottautuu sitä kohti, mitä ei voida tietää. Systeemiällyn episteeminen haastavuus kytkeytyy erityisesti seuraaviin kysymyksiin:

1. Systeemit eivät ole olemassa absoluuttisina, vaan aina suhteessa johonkin hahmotukseen. Siis suhteessa mihin systeemiin systeemiäly on älykästä?
2. Useimmissa tapauksissa inhimillisesti relevantit systeemit koskevat tulevaisuutta, jota koskeva tietämys on väistämättä osittaista. Jos systeemiäly on tarkoituksenmukaista toimimista suhteessa toivottuun tulevaisuuteen missä mitassa kyse on ”älystä”, erotuksena onnistunut arvaus, onnekas sattuma jne.? Kurottautuessaan kohti tulevaa, eikö systeemiäly astu tosiasioiden ja tiedettävän ulkopuolelle - ulos alueelta, missä äly toimii?

Vastauksemme näihin kysymyksiin nousee siitä näkemyksestä, että jokaisen ihmisen on kaiken aikaa pakko tehdä valintoja. Jokaisen on tehtävä valintoja, vaikka hän tietää, että valtaosaa tosiasioista ei tiedetä eikä ehkä voidakaan tietää. Emme tiedä niiden systeemien laajuutta emmekä alaa, missä toimimme; emme voi varmasti tietää, operoimmeko oikealla abstraktion asteella tai systeemikehikossa, mikä tuottaa parhaat tulokset. Silti yksi toiminta voi olla älykkäämpää kuin toinen – esimerkiksi työelämän, liike-elämän, parisuhde-dynamiikan tai vaikkapa lastenkasvatuksen inhimillisesti olennaisissa systeemeissä.

Tässä kohdassa systeemiälyhankkeemme astuu sitä tietä, minkä tärkeyteen Robert Louis Flood viittaa kirjansa *Rethinking the Fifth Discipline* (1999) alaotsikossa: ”Oppiminen tietämättömyyden alueella”¹⁸. Ihmisen on käytännön elämässä jatkuvasti pakko toimia. Jokainen vaikuttaa joka hetki johonkin, toimien jollakin tavoilla eikä muilla. Valinnan pakko, oli tietoa tai ei: tämän inhimillisen toiminnallisen todellisuuden perustosiasian ihmistutkimus ja organisaatioajattelu usein unohtaa ja abstrahoi pois. Systeemiäly ottaa sen keskiöön – pyrkien hahmottamaan toiminnassa ilmenevää systeemistä älykkyyttä oli tietoa tai ei.

¹⁷ Howard Gardner. 1983. *Frames of Mind. The Theory of Multiple Intelligences*, Basic Books.

¹⁸ Robert Louis Flood. 1999. *Rethinking the Fifth Discipline. Learning within the Unknowable*, Routledge. Ks. myös Floodin kirjoitusta ”The Relationship of ‘Systems Thinking’ to Action Research”, in *Handbook of Action Research*. 2001. Peter Reason and Hilary Bradbury (Eds.), Sage.

Viitteitä

Hämäläinen R.P., Luoma J., Saarinen., 2012. On the Importance of Behavioral Operational Research: The Case of Understanding and Communicating about Dynamic Systems European Journal of Operational Research, Vol 228, Issue 3, pp. 623-634.

Hämäläinen R.P., Saarinen E., (eds.) 2010. Essays on Systems Intelligence, Aalto University School of Science and Technology, Systems Analysis Laboratory.

Hämäläinen R.P., Saarinen E., 2008. Systems Intelligence - The Way Forward? A Note on Ackoff's "Why Few Organizations Adopt Systems Thinking" Systems Research and Behavioral Science, Vol. 25, No. 6, pp. 821-825.

Hämäläinen R.P., Saarinen E., (eds.), 2008. Systems Intelligence - A New Lens on Human Engagement and Action Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory, August, 2008.

Hämäläinen R.P., Saarinen E., (eds.), 2007. Systems Intelligence in Leadership and Everyday Life, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory.

Hämäläinen R.P., Saarinen E., (toim.), 2006. Systeemiäly 2006, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports, B26.

Hämäläinen R.P., Saarinen E., (toim.), 2005. Systeemiäly 2005, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports, B25.

Hämäläinen R.P., Saarinen, E., (toim.), 2004. Systeemiäly - Näkökulmia vuorovaikutukseen ja kokonaisuuksien hallintaan, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports, B24.

Hämäläinen R.P., Saarinen E., (eds.), 2004. Systems Intelligence - Discovering a hidden competence in human action and organizational life, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports, A88.

Jones R., Corner J., 2012. Stages and Dimensions of Systems Intelligence: Systems Research and Behavioral Science, Vol. 29, p 30-45.

Luoma J., Hämäläinen R.P., Saarinen E., 2011. Acting with systems intelligence: Integrating complex responsive processes with the systems perspective, 2011. The Journal of the Operational Research Society, 62, p 3-11.

Martela F., Saarinen E., 2013. The Systems Metaphor in Therapy Discourse: Introducing Systems Intelligence, Psychoanalytic Dialogues, 23, p 79-100.

Viitteitä ladattavissa Systeemiällyn tutkimusryhmän kotisivulta: <http://systeemiaily.aalto.fi/>

Kirjoittajista



Raimo P. Hämäläinen (Systeemianalyysin laboratorio, Aalto-yliopisto, raimo.hamalainen@aalto.fi, syntynyt 7.7.1948 Helsingissä) teki diplomityönsä Teknillisen korkeakoulun Teknillisen fysiikan osastolla vuonna 1972 aiheena ”Ihmisen hengityksen säätömalli”. Jatko-opintojaan hän teki prof. Hans Blombergin johtamassa TKK:n Systeemiteorian laboratoriossa prof. Aarne Halmeen ohjauksessa ja väitteli v. 1976 aiheena ”Optimal controller design by nonlinear and game theoretic methods”. Hän toimi Vaasan kauppakorkeakoulun talousmatematiikan professorina 1979-1981 ja tuli nimitetyksi sovelletun matematiikan professoriksi TKK:lle v. 1981. Tässä virassaan hän on perustanut Systeemianalyysin laboratorion, jonka opetus ja tutkimusalana on systeemi- ja operaatiotutkimus.



Esa Saarinen (Tuotantotalouden laitos, Aalto-yliopisto, esa.saarinen@aalto.fi, syntynyt 27.7.1953 Helsingissä). Opiskellut Helsingin yliopistossa pääaineenaan teoreettinen filosofia. Väitellyt vuonna 1977 aiheena ”Backwards-Looking Operators in Intensional Logic and in Natural Language” aihe sijoittuu analyyttisen filosofian alaan. Hän toimi tutkijaprofessori Jaakko Hintikan tutkimusassistenttina v. 1975-1979 ja on opettanut Helsingin yliopistossa filosofiaa vt.professorina 1982, 1992-1993. Hän aloitti v. 2001 Teknillisen korkeakoulun Systeemianalyysin laboratoriossa vt. professorina ja v. 2002 hänet kutsuttiin systeemitieteiden professoriksi, opetusalananaan soveltava filosofia ja luova ongelmanratkaisu. Vuonna 2006 professuuri siirtyi Tuotantotalouden laitokselle, Työpsykologian ja johtamisen laboratorioon.

Ennakoiva simulointi laajojen kokonaisuuksien hallinnassa

Jari Hämäläinen

Johdanto

Päätöksiä tehtäessä on tärkeää arvioida eri päätösvaihtoehtojen seurauksia. Jos aikaa ja tietoa on riittävästi, voidaan simuloimalla eli matemaattisella mallilla kokeilemalla arvioida seurauksia usein hyvinkin tarkasti ja aina ainakin näppituntumaa paremmin.

Teollisuuden prosesseista saadaan tosiaikaista tietoa automaatio- ja tietojärjestelmiin kytketyistä mittalaitteista. Simulointeja tehdään tietokoneisiin ohjelmoiduilla malleilla. Prosessien automaatioasteen nouseminen ja tietokoneiden laskentatehon kasvu ovat tehneet mahdolliseksi yhä laajempien kokonaisuuksien toiminnan ennakoinnin päätöstilanteissa ja jopa päätöksenteon luovuttamisen optimoiville tietokoneohjelmille.

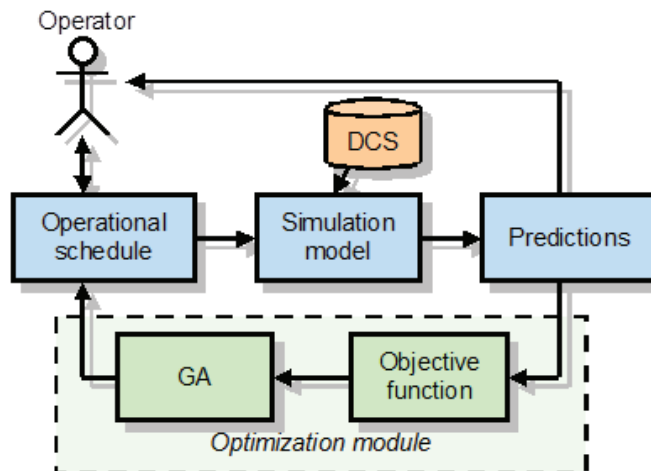
Automaatio- eli prosessinohjausjärjestelmä huolehtii mittauksista ja prosessin säädöistä – esimerkiksi, että säiliö täytetään annettuun tilavuuteen ja reaktion aikana panos pidetään annetussa asetusarvon mukaisessa lämpötilassa. Monet jaksottaiset peräkkäiset toimenpiteet voidaan myös hoitaa automaattisesti – esimerkiksi täytetään valittuun säiliöön annetut aineet tai lämmitetään panos määrätyn lämpötilaprofiilin mukaisesti annetussa ajassa.

Automaattisella säädöllä ja ohjauksella hallitaan yhä suurempia prosesseja ja järjestelmiä tai niiden osia. Suurten kokonaisuuksien ohjauksessa päätösvaihtoehtoja on useita ja toisaalta päätökset ovat monimutkaisia. Perussäätöratkaisussa riittää osata säätää vaikkapa huoneen lämpötila mitatussa kohdassa halutuksi pitämällä sopivasti patteria päällä termostaattiin valittujen asetusarvojen avulla. Koko tuotantolinjan tai jopa tehtaan toiminnan ohjauksessa täytyy huomioida monia hyvin erityyppisiä tekijöitä sekä varautua häiriöitä aiheuttaviin vikaantumisiin. Tällöin tarvitaan ihmistä vähintäänkin valvomaan, että automaatio toimii suunnitellusti ja häiriöttä. Pitkälle automatisoiduissa prosesseissa mitataan kaikkia mitattavissa olevia tekijöitä, joiden ajatellaan olevan merkityksellisiä optimaaliselle toiminnalle. Ihmisellä on kuitenkin aina tietoa, jota järjestelmällä ei ole ja joka on hyödyllistä etenkin toimintaympäristöstä aiheutuissa poikkeustilanteissa: vaikkapa lumipyryn aiheuttama liikennekaos voi viivästyttää vähiin käyneen raaka-aineen toimitusta, jolloin kannattaa vähän hidastaa tuotantoa, ettei tarvitse ajaa prosessia alas. Alasajo aiheuttaa tuotantokatkon, jossa tuotantoa menetetään enemmän kuin lyhytaikaisessa tuotannon hallitussa pienentämisessä.

Tässä kirjoituksessa kuvataan ennakoivan simuloinnin ja optimoinnin periaate laajojen kokonaisuuksien hallinnassa. Esimerkkinä toteutuksesta esitellään päivittäiseen käyttöön otettu laajan panostyyppisen prosessin hallinnan sovellus.

Tehtävän määrittely

Kuva 1 havainnollistaa ennakoivan simuloinnin periaatetta teollisuusprosessin hallinnassa. Prosessinohjaaja ("operator") syöttää sovelluskohtaisen käyttöliittymän kautta ajo-suunnitelman ("operational schedule"), joka on simulointimallin ohjaus. Mallin tilamuuttujien alkutila luetaan automaattisesti tehtaan ohjaus- ja tietojärjestelmistä ("DCS"). Kun alkutila ja ohjaus tunnetaan, voidaan simuloida ennuste annetulle ajanjaksolle ("predictions").



Kuva 1. Ennakoiva simulointi ja optimointi prosessien hallinnassa.

Myöhemmin kuvatussa sovelluksessa käyttäjä syöttää ajo- ja ajoitus suunnitelman, käynnistää simuloinnin ja tarkastelee tuloksia. Mallin alkutila määritetään automaattisesti prosessimittauksia hyödyntäen. Simulointi ennustaa prosessin tulevan tilan ajosuunnitelman kattamalta ajanjaksolta. Käyttäjää voi tehdä erilaisilla ajosuunnitelmissa "what-if" -tarkasteluja ja suunnitella prosessin hyvän toiminnan sekä ennakoita mahdollisia tulevia ongelmatilanteita. Jatkuvasti ylläpidettävä suunnitelma päivittyy ajan mukana ja yllättävät poikkeus tilanteet otetaan huomioon uusien mittausten tullessa saataville. Sovellusta käytetään lähinnä valvomossa, mutta se toimii tehtaan intranetissä, joten useat käyttäjät voivat samanaikaisesti arvioida tuotannon ennakoitua tilaa ja myös tarvittaessa muuttaa ajosuunnitelmaa.

Ajosuunnitelma on myös mahdollista optimoida automaattisesti (Hämäläinen & Parviainen, 2001). Ajosuunnitelman tuottaman ennusteen hyvyttä voidaan kuvata kohdefunktiolla, jonka arvo on sitä pienempi tai suurempi, mitä paremmin prosessi toimisi ("objective function", kuva 1). Koska mallinnettavat prosessit tyypillisesti sisältävät sekä panostyyppejä että jatkuvia osaprosesseja, simulointimalli on matemaattiselta muodoltaan ns. hybridimalli, jossa tilakoneen jokaista tilaa (reaktio käynnissä, säiliö täyttyy, laite huollossa, jne.) vastaa dynaaminen järjestelmä. Tehtävä voidaan matemaattisesti esittää yleistettynä optimiohjaustehtävänä. Kuvan 1 tapauksessa optimiohjaustehtävän ratkaisemisessa hyödynnetään suoraan prosessin yksityiskohtaista simulointimallia ja heuristista optimointimenetelmää (geneettinen algoritmi, "GA"). Algoritmi muodostaa joukon ratkaisuja ja parantaa niitä yhdistelemällä ja

muuntelemalla parhaita ratkaisuja ennalta määritellyn algoritmin mukaisesti. Prosessien optimointiin ja aikataulutukseen käytetään myös monia muita optimointimenetelmiä.

Esimerkkisovellus – titaanidioksidin tuotanto

Tuotannon strategisella suunnittelulla tarkoitetaan yleensä vuositason suunnittelua. Vastaavasti taktisen suunnittelun aikahorisontti on viikoista kuukausiin ja operatiivisen muutamista päivistä viikkoon. Operatiivinen tuotannonohjaus tai ajosuunnittelu sisältää toimintojen yksityiskohtaisen tunti- tai jopa minuuttitasoisen ajoituksen.

Laajojen panosprosessien hallinnassa prosessinohjaajan keskeinen tehtävä on ajosuunnitelman laadinta ja ylläpitäminen (Hämäläinen & al., 1999 ja 2000). Tuotantosuunnitelman mukainen yksityiskohtainen ajosuunnitelma on perinteisesti perustunut tuotantohenkilöstön kokemukseen. Tuotevaihtojen, tuotantosuunnitelman muutosten ja prosessihäiriöiden yhteydessä uuden ajosuunnitelman laatiminen on vaativa tehtävä ja vaatii useiden – jopa kymmenien – prosessin operaatioiden ennakoimista. Epäonnistunut suunnitelma voi aiheuttaa tuotantopanosten menetyksiä, tuotantokatkoja ja toisaalta hyvä suunnitelma takaa, että koko tuotantokapasiteetti on tehokkaassa käytössä ja toimii myös ympäristöä säästäten.

Silloisen Kemira Pigments Oy:n Porin tehtailla otettiin keväällä 2005 käyttöön uusi VTT:n toteuttama ennakoivaan simulointiin perustuva tuotannon ohjauksen järjestelmä (Ranta & al., 2005; kuvat ja tekstin osat julkaistu Suomen Automaatioseura ry:n luvalla). Porin tehtailla valmistetaan titaanidioksidia (TiO_2) sulfaattiprosessilla. Prosessi sisältää kymmeniä vaiheita ja sen kulku on esitetty kuvassa 2. Tehtailla on neljä rinnakkaista tuotantolinjaa, jotka ovat kapasiteetiltaan erisuuruisia ja niiden välillä on mahdollista suorittaa jonkin verran ristiinajoa. Kullakin tuotantolinjalla voi lisäksi olla useita laitteita rinnakkain, esimerkiksi saostimia tai suodattimia. Tuotannonohjauksen tarkoituksena on saada tuotantojärjestelmä toimimaan kokonaisuutena mahdollisimman tehokkaasti ja taloudellisesti eli on huolehdittava myynnin, valmistuksen ja tilausten muodostamasta kokonaisuudesta. Kaikkien kolmen toiminnon tulisi olla tasapainossa keskenään niin tuotteiden ja raaka-aineiden määrän ja laadun kuin valmistuksen, logistiikan ja taloudellisten rajoitteiden osalta. Erilaisten rajoitteiden lisäksi tehtävää vaikeuttavat toimintojen väliset pitkät viiveet.

Tarkasteltava valmistuksen osa kattaa sulfaattiprosessin vaiheet prosessiliuoksen haihdutuksesta kalsinointiin (kuva 2). Kokonaiskesto prosessin eri vaiheilla tällä välillä on noin vuorokausi. Kaikki neljä tuotantolinjaa ovat mukana tarkastelussa. Kokonaisuuteen liittyy myös anataasikiderakenteisen titaanin tuotantolinja, joka käyttää muiden tuotantolinjojen laitteistoa, mutta käytännössä toimii erillisenä. Tarkasteltavassa osassa on yli 100 yksikköprosessia kuten säiliötä, saostinta tai pesuallasta.

Taloudellisista syistä valmistuksen pullonkaula pyritään saamaan kalsinointiuneille. Toisaalta saostuksen laatu kärsii ja panoksia voidaan jopa menettää, mikäli saostinta ei saada tyhjennettyä riittävän nopeasti panoksen valmistuttua. Välivarastoja eri vaiheiden välillä ei juuri ole. Saostuksen tuotantonopeuden on siis oltava riittävä tyydyttämään kalsinointiunein

syöttötavoite, mutta riittävän pieni, etteivät säiliöt täyty niin, ettei saostuspanoksia päästä pudottamaan riittävän nopeasti. Pitkä viive saostuksen ja kalsinointiuunien syötön välillä vaikeuttaa sopivan saostuksen tuotantonopeuden valintaa erityisesti kalsinointiuunien syöttönopeutta muutettaessa tai sen muuttuessa esimerkiksi häiriön seurauksena. Toisaalta saostimilla tapahtuva häiriö voi vaatia kalsinointiuunin syöttönopeuden pienentämisen, jotta vältetään tuotantokatko kalsinoinnissa. Saostuksen ja kalsinointiuunien syötön välillä olevat esi- ja jälkipesu aiheuttavat sekä viiveen että kapasiteettirajoituksen, jotka tulee huomioida saostuksen tuotantonopeutta muutettaessa.

Mallinnettava prosessi on jaettu osaprosesseihin, joiden mallit on yhdistetty kokonaisuudeksi. Mallinnetut prosessivaiheet ovat lähinnä välivarastoina toimivia säiliöitä ja panosprosesseja, jotka ottavat edellisestä prosessivaiheesta sopivan kokoisen tuotemäärän, suorittavat sille käsittelyn ja siirtävät seuraavaan vaiheeseen. Pääosin tarkastellaan virtauksia, ainemääriä ja konsentraatioita. Prosessi sisältää sekä panostyyppisiä että jatkuvia osaprosesseja ja malli on matemaattiselta muodoltaan edellä kuvattu hybridimalli.

Järjestelmän avulla voidaan simuloimalla kokeilla erilaisia ajosuunnitelmia ja nähdä niiden vaikutus tuotantoprosessiin. Ennusteiden perusteella valitaan kulloiseenkin tilanteeseen sopivin ajosuunnitelma. Järjestelmä toimii tehtaan intranetissä ja simuloinnin alkutilaa varten tarvittavat tiedot kerätään automaattisesti tehtaan automaatio- ja tietojärjestelmistä. Ajosuunnitelma ja ennusteet päivitetään sekä tarkistetaan kerran vuorokaudessa ja ne kattavat tulevan seitsemän vuorokauden mittaisen ajanjakson.

Titaanidioksidiprosessin kesto on varsin pitkä, noin 12 päivää alusta loppuun. Ajoittain syntyy tilanteita, joissa joudutaan ottamaan laitteita huoltoon tuotantolinjoista lyhyelläkin varoitusajalla. Ongelmana on tällöin päättää, paljonko ja koska valmistusta tulee rajoittaa ja koska sitä voidaan taas kiihdyttää. Uhkana on esimerkiksi se, että tuotantolinjalta loppuu liete tai toisaalta se, että välituotteet ruuhkaantuvat.

Kuvassa 3 on esitetty tapaus, jossa saostuksessa joudutaan laskemaan kapasiteetti puoleen ajanhetkellä 24 h seuraavaksi 72 tunniksi. Saostuskapasiteetin pienentymisen seurauksena esipesun syöttösäiliöön tulee vähemmän lietettä aikavälillä 24 – 96 h. Nominaalitapauksessa, jossa korjaavia toimenpiteitä ei tehdä, säiliöt tyhjenevät ja noin ajanhetkellä 80 h kalsinointiuunin syöttö katkeaa sen syöttösäiliön tyhjennyttyä. Korjatussa suunnitelmassa esi- ja jälkipesujen ajonopeutta pienennetään ja kalsinointiuunin syöttönopeutta lasketaan neljänneksellä aikavälillä 36 – 120 h. Tällöin syöttösäiliöt eivät pääse tyhjenemään ja niissä säilyy pieni lietereservi. Kalsinoinnin syöttösäiliössä olleen liuoksen turvin kalsinointiuunin syöttö saadaan pidettyä suhteellisen tasaisena eikä sitä tarvitse laskea kuin puolella siitä, mitä saostuksen tuotanto pieneminen edellyttäisi.

Järjestelmällä on sen käytön aikana jatkuvasti ennakoitu voidaanko annettu tuotantotavoite saavuttaa vallitsevassa tilanteessa. Käytön aikana on havaittu uhkaavia tuotantokatkoja, jotka on voitu välttää ajosuunnitelmaa muuttamalla.

Yhteenveto

Tuotannonohjauksen tehokkuuteen kohdistuvat vaatimukset lisääntyvät jatkuvasti. Kasvaneet tuotevalikoimat ja samalla lyhentyneet tuotteiden elinkaaret vaativat tuotannolta ja sen suunnittelulta joustavuutta. Varastot pyritään minimoimaan, jolloin sekä raaka-ainetarpeet että tuotteiden valmistuminen on kyettävä ennustamaan riittävällä tarkkuudella. Toisaalta on pystyttävä reagoimaan nopeasti sekä sopeuttamaan toiminnot ja suunnitelmat vastaamaan muuttuvia olosuhteita, joita voivat olla tuotannossa tai raaka-ainetoimituksissa esiintyvät poikkeustilanteet tai esimerkiksi kiireellinen tilaus.

Yrityksissä on toteutettu tuotannon optimoimiseksi ja tehostamiseksi hyvinkin edistyksellisiä järjestelmiä. Useiden tieteen eturintaman tuloksiin perustuvien järjestelmien kehittämiseen on käytetty julkista rahoitusta, jolloin tekninen perusratkaisu myös on julkaistu. Monet sovellukset on kuitenkin toteutettu yksinomaan yritysten rahoituksella jo toteutushetkellä julkista tietoa sekä yrityksen omaa tai usein alihankintana ostettua osaamista hyödyntäen, jolloin toteutus on luottamuksellinen ja usein vain pienen piirin tiedossa myös yrityksen sisällä. Siten ei voida sanoa, ovatko tässä esityksessä ja sen viitteissä kuvatut sovellukset ensimmäiset Suomessa käyttöön otetut ennakoivaan simulointiin perustuvat laajojen teollisuusprosessien ohjausta avustavat järjestelmät, mutta ne ovat joka tapauksessa olleet ensimmäisten joukossa. Kuvatunlaisten järjestelmien kehittäminen on vaatinut 1990-luvun loppupuolen mittapuun mukaan edistyksellisiä automaatio- ja tietojärjestelmiä sekä suurta laskentatehoa. Molemmat perusedellytykset ovat 2000-luvulla kehittyneet entisestään, joten yhä laajempien järjestelmien tosiaikainen ennakoiva simulointi on mahdollista.

Viitteet

Hämäläinen J.J., I. Järvimäki, R. Weiss, S. Ekbom, T. Jyrkkä ja J. Dahl. Jälkikäsitteilyprosessin ennakoiva ajosuunnittelu ja ohjaus. Automaatio 99, Helsinki, Suomen Automaatioseura ry, 1999, pp. 184-189.

Hämäläinen J.J., I. Järvimäki, R. Weiss, J. Dahl and S. Ekbom. Predictive planning and control of a downstream process. In Pre-Prints ADCHEM 2000 International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, Pisa, Italy - June 14-16, 2000. International Federation of Automatic Control (IFAC), 2000, pp. 581-586

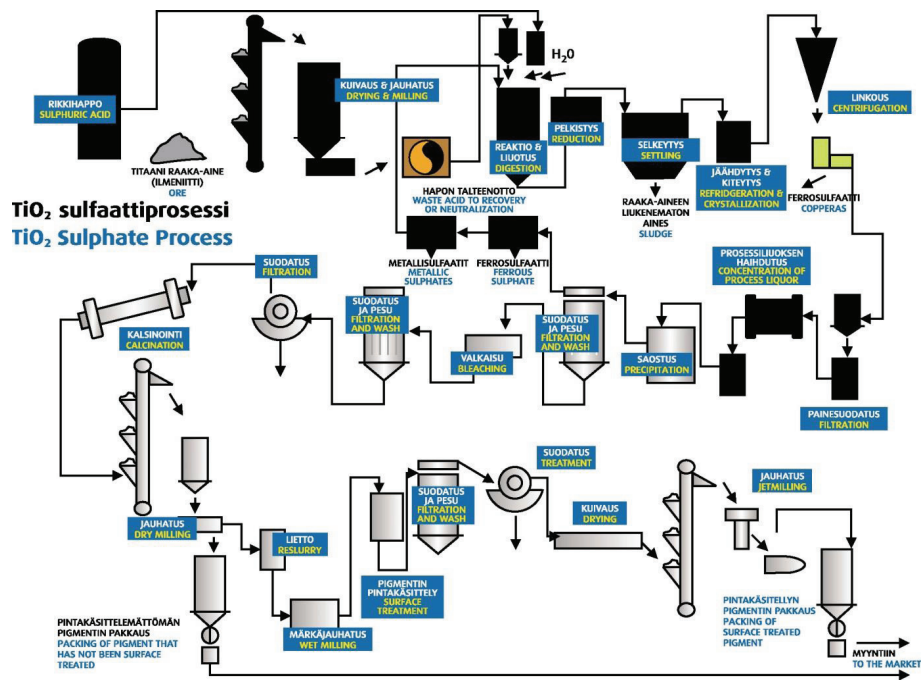
Hämäläinen J.J. and O. Parviainen. Optimal control of large-scale batch production by evolutionary computation, In Pre-Prints 6th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems (DYCOPS-6), Chejudo island, Korea, June 4-6, 2001. International Federation of Automatic Control (IFAC), 2001, pp. 632-637

Ranta J., J. Valkonen, T. Tamminen, J. Laitinen, I. Harju ja J.J. Hämäläinen. Ennakoiva simulointi titaanidioksidin tuotannon ohjauksessa. Automaatio 05, Helsinki, Suomen Automaatioseura ry, 2005, pp. 43-48.

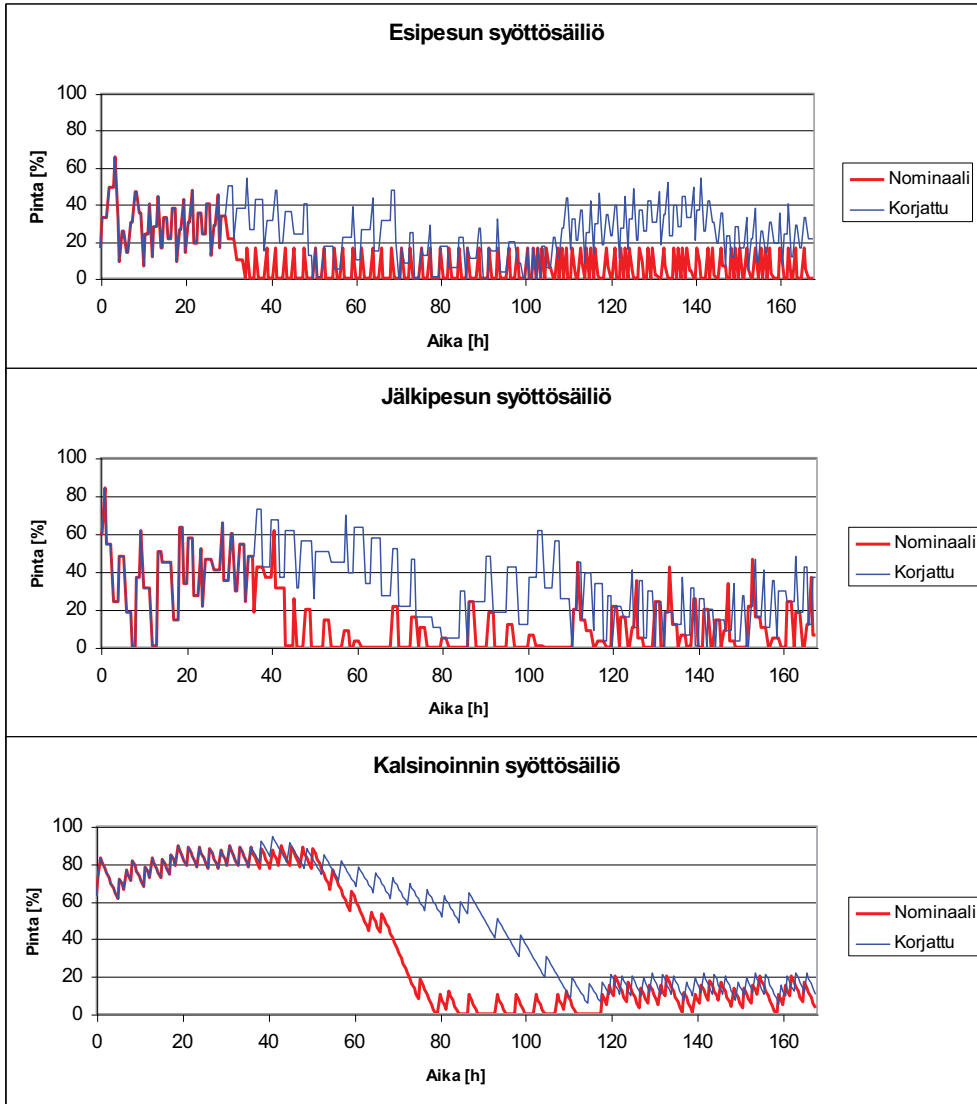
Kirjoittajasta



Jari Hämäläinen (VTT, PL 1000, 02044 VTT, jari.hamalainen@vtt.fi) started his research career as a research trainee in 1980 in the Systems Theory Laboratory at the Helsinki University of Technology Dr. Hämäläinen held research positions of the university and the Academy of Finland. In 1988 he joined VTT Technical Research centre of Finland and acted as a senior research scientist and also as a manager of many joint projects with partners from several research institutes and dozens of industrial companies. Since 1994 he has also been a docent of systems analysis at the Aalto University. After working as a research group leader he led the Systems Research Centre at VTT eight years from its start in 2006 until 2013. The research activities of the centre included mathematical modelling and process simulation in general, system dynamics and optimisation, development of simulation technologies, risk and reliability analysis, analysis of stochastic systems, verification of safety critical automation, and human factors engineering. The dozens of on-going projects each year dealt with mathematical and conceptual models, model-based analyses, simulation, and simulation software for better control, reliability and productivity of complex industrial systems. From 2014 Dr. Hämäläinen has acted as a research programme director and also been responsible of large scale process simulation software at VTT.



Kuva 2. TiO₂ sulfaattiprosessi.



Kuva 3. Esimerkki tilapäisen kapasiteetin muutoksen hallinnasta.

Biologinen systeemanalyysi metsänhoidon suunnittelussa

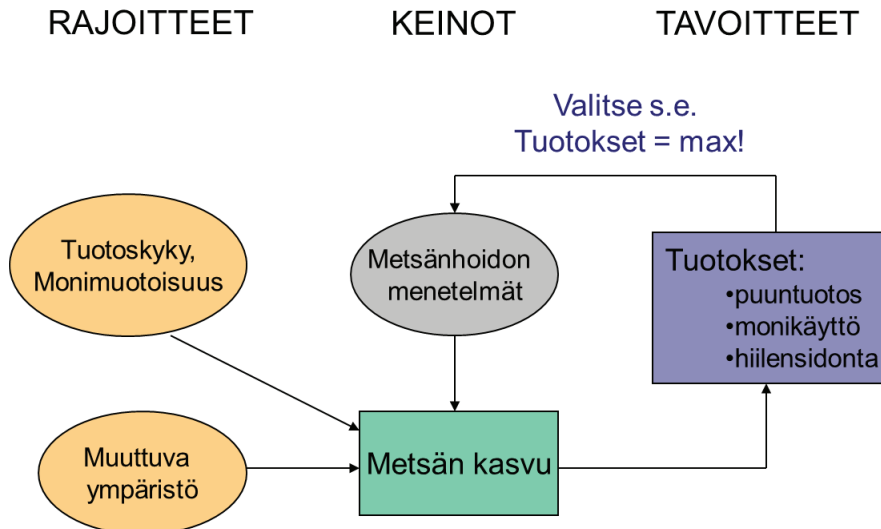
Annikki Mäkelä

Metsänhoidon optimointiongelma muuttuvassa ympäristössä

Metsänhoidolla tarkoitetaan kaikkia metsien kasvua ja kehitystä ohjaavia toimenpiteitä, jotka edistävät asetettujen taloudellisten tai muiden tavoitteiden toteutumista. Metsänhoitotiede pyrkii selvittämään, mitkä menetelmät toteuttavat asetettuja tavoitteita parhaalla mahdollisella tavalla, sekä tarvittaessa kehittämään uusia menetelmiä. Siksi metsänhoitotoimien suunnittelu voidaan nähdä optimointitehtävänä, jossa metsänhoitomenetelmät valitaan maksimoimalla tavoitteiden mukaiset tuotokset, kun rajoitteena on metsikön kasvun biologia ja muita, esimerkiksi kasvupaikan asettamia vaatimuksia.

Metsänhoidon tavoitteet ovat aina olleet monipuolisia ja korostaneet paitsi taloudellista tuottavuutta myös metsien käytön kestävyyttä ja luonnon virkistysarvoja (Leikola 1996). Globalimuutoksen luomat uhat ovat johtaneet luontoarvojen painottumiseen entisestään, ja metsänhoidon tavoitteita ohjataan nyt myös kansainvälisillä sopimuksilla. Kestävään metsänhoitoon kuuluu paitsi puuntuotoskyvyn säilyttäminen myös metsien lajiston monimuotoisuuden ja yhteiskunnallisen kestävyuden vaaliminen. Ympäristön muutos vaikuttaa kaikkiin metsäekosysteemin osiin, mutta metsät voivat toimia myös puskureina ilmastonmuutosta vastaan sitomalla itseensä lisää hiiltä ja muuttamalla takaisinsäteilyä ilmakehässä (Kuva 1).

Jotta optimointitehtävä voitaisiin ratkaista, on (1) pystyttävä vertaamaan toisiinsa yhteismitattomia tavoitteita, ja (2) metsien kasvun biologiaa on ymmärrettävä niin hyvin, että pystytään ennustamaan metsän kehitystä ja mahdollisten toimenpiteiden vaikutuksia siihen myös muuttuvassa ympäristössä.



Kuva 1. Metsänhoidon suunnittelun optimointitehtävä.

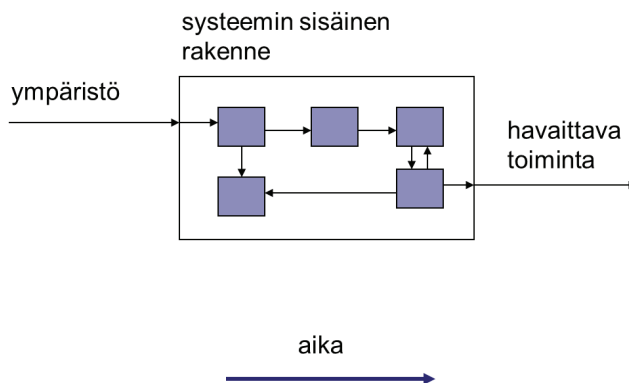
Olen kehittänyt metsien kasvun ja tuotoksen biologiaan perustuvia malleja systeemiteorian ja –analyysin menetelmin Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksella aina diplomityöstäni (1980) alkaen, vuodesta 2005 metsänhoitotieteen professorin toimessa. Nykyisin HY:ssä kehitettyjä kasvumalleja sovelletaan muun muassa, kun ennustetaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia puuston kasvuun ja tuotokseen (Mäkelä ym. 2008, Härkönen ym. 2011, Peltoniemi ym. 2012), kun tutkitaan metsänhoidon roolia ilmastonmuutoksen hillinnässä (Mäkipää ym. 2009), ja kun optimoidaan metsän käsittelyiden ajoittumista ja voimakkuutta tavoitteena joko pelkkä puuntuotos (Hyytiäinen ym. 2004, Niinimäki ym. 2012) tai lisäksi hiilen sidonnan maksimointi (Niinimäki ym. 2013). Seuraavassa kuvataan joitakin metsäekosysteemin mallituksen keskeisiä kysymyksiä.

Metsä dynaamisena systeeminä

Dynaamisten systeemien teoria ja systeemianalyysi on kehitetty monimutkaisten, ajassa muuttuvien järjestelmien tutkimukseen ja niiden toiminnan ennustamiseen. Systeemianalyysi soveltuu metsäekosysteemin eri ilmiöiden tutkimiseen ja juuri kokonaiskuvan hahmottamiseen. Sitä on menetelmänä sovellettu jo 1970-luvulta lähtien erityisesti metsien tuotosekologiassa, ja viime vuosina on ilmestynyt tutkimuksia myös metsänhoidon suunnittelusta biologisten systeemimallien avulla. Myös edellä kuvatun metsänhoidon optimointiongelman tarkempi määrittely ja ratkaiseminen on tyypillistä systeemianalyysia. Esitän seuraavaksi ensin biologisen systeemianalyysin yleisiä periaatteita, sitten tarkastelen joitakin esimerkkejä sen sovelluksista metsäekologiaan ja metsänhoidon suunnitteluun.

Systeemimallissa ilmiö jaetaan osailmiöihin ja niiden välisiin kytkentöihin, ja kuvataan myös järjestelmän kytkennät ympäristöönsä (Kuva 2). Matemaattisesti malli kuvataan usein differentiaaliyhtälöryhmänä. Sen avulla voidaan tutkia järjestelmän sisäisestä dynamiikasta seuraavaa tyypillistä käyttäytymistä sekä järjestelmän vasteita ympäristölle, esimerkiksi

säätäjöille ja metsänhoitotoimille. Systeemimalli on luonteeltaan kausaalinen: se matkii todellisuuden syy-seuraussuhteita ja niistä johtuvaa, ajassa muuttuvaa toimintaa.



Kuva 2. Dynaaminen systeemi

Tuotosekologiset systeemimallit nojaavat suurelta osalta yleisiin fysikaalisiin lakeihin ja kasvien toiminnasta tehtyihin mittauksiin. Biologiset järjestelmät eroavat kuitenkin olennaisesti fysikaalisista kahdessa kohdassa. Ensinnäkin metsäekosysteemi on luonteeltaan monitasoinen, hierarkkinen, sekä ajan että paikan suhteen. Peruselintoiminnat tapahtuvat toimivassa solukossa, esimerkiksi lehdissä, ja riippuvat paikallisen ympäristön muutoksista vain sekuntien aikaviiveellä. Näin syntyvät aineet, esimerkiksi yhteyttämistuotteet, jakautuvat koko puun elintoimintoihin ja kasvuun kasvukauden aikana. Vuosien kuluessa puut kasvavat ja muuttavat samalla toistensa ympäristöä. Muuttunut ympäristö muuttaa peruselintoimintojen nopeuksia, mutta saa aikaan myös muutoksia kasvun jakautumisessa ja edelleen siinä, miten koko puu ohjaa peruselintoimintojaan.

Toinen biologisten järjestelmien erityispiirre on kasvien kyky mukautua vallitseviin olosuhteisiin tavalla, joka edistää niiden henkiinjäämistä kilpailutilanteessa. Eri latvuserrosten puut eivät esimerkiksi reagoi säteilyyn samalla tavalla, vaan varjossa kehittyneet lehdet hyödyntävät parhaiten voimakkuudeltaan pientä ja valossa kehittyneet lehdet suurta säteilyä. Myös yhteytyksessä sidottu hiili käytetään kasvuun eri tavalla riippuen kilpailuasemasta (Mäkelä 1986). Alisteiset, varjostetut puut panostavat suhteessa enemmän pituuskasvuun jotta selviytyisivät. Siksi ne ovat yleensä solakoita ja pienilatavaisia. Valtapuut puolestaan voivat kasvattaa suuren ja oksikkaan latvuksen jolla sitovat entistä enemmän hiiltä ja järeytyvät nopeasti. Olennaista onkin tunnistaa, mitkä puiden ominaisuudet ovat pysyviä ja mitkä mukautuvat ympäristöolosuhteiden muutoksiin. Pysyvien ominaisuuksien tunnistaminen tapahtuu kokeellisesti mutta myös teorioihin, erityisesti evoluutioteoriaan tukeutuen (Mäkelä ja Sievänen 1992, Dewar ym. 2009, Valentine ja Mäkelä 2012).

Biologiset systeemimallit metsäntutkimuksessa

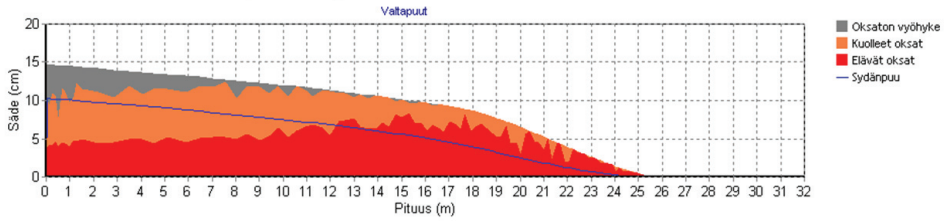
Biologiset systeemimallit kuvaavat yleensä jotakin edellä esitellyn hierarkian osa-alueita. Ns. ekofysiologiset mallit kuvaavat lehtien tai hienojuurten aineenvaihdunnan nopeita vasteita

ympäristötekijöiden muutoksiin kasvukauden aikana. Esimerkiksi yhteyttämistä kuvaavat mallit perustuvat tarkkoihin mittauksiin ympäristötekijöiden ja kaasunvaihdon kulusta versossa. Laskennallisesti toiminnot yleistetään koskemaan koko kasvustoa ja pidempiä ajanjaksoja. Tähän tarvitaan kasvuston ulkopuolelta mitattuja tietoja ympäristömuuttujista, joille lasketaan mallin avulla kasvuston sisäiset jakaumat. Näin saadaan metsikön kaasunvaihtoa koskeva ennuste, esimerkiksi päivittäisen yhteyttämistuotoksen kehitys vuoden aikana (Mäkelä ym. 2008). Viime vuosina käyttöön otettujen koko metsikön hiilensidonnan mittausten menetelmien – ns. eddy-kovarianssimittausten – avulla ennusteita on voitu testata ja on osoittautunut, että monet ekofysiologiset mallit toimivat tosiaan niin hyvin, että niiden tuloksia voidaan soveltaa laajemminkin esimerkiksi juuri metsiköiden hiilensidonnan ennusteisiin (esim. *Tree Physiology* 25(7) 2005).

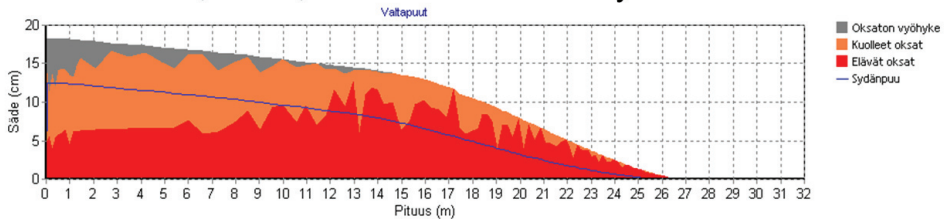
Puiden peruselintoimintojen vasteet ympäristölle ovat välttämätön lähtökohta, kun pyritään ymmärtämään muuttuvan ympäristön vaikutuksia metsiin. Tämä ei kuitenkaan riitä, koska vasteet voivat mukautua uuteen ympäristöön pitkän ajan kuluessa. Lopullinen vaste ei siksi välttämättä ole sama kuin lyhytaikaisten kokeiden perusteella luulisi. Pitkän ajan kuluessa voi myös tapahtua palautumattomia muutoksia metsäekosysteemin tilassa, esimerkiksi ravinnevaroissa. Yksi keskeisiä tutkimuskysymyksiä on, miten hiilensidonnan, ravinteidenoton ja vedenkäytön välinen tasapaino muuttuu pitkän ajan kuluessa erilaisissa metsäekosysteemeissä. Näihin kysymyksiin ei ole vielä löytynyt tyydyttäviä vastauksia. Systemianalyttiset mallit ovat kuitenkin osoittautuneet korvaamattomiksi työvälineiksi vastauksia etsittäessä. Ne auttavat hallitsemaan useita rakennetasoja ja toimintoja samanaikaisesti, mahdollistavat erilaisten oletusten vertailun ja auttavat syy-seurausketjujen erittelyssä (esim. Kirschbaum 2005, Valentine ja Mäkelä 2012). Biologisten systeemimallien tähän asti tärkein merkitys onkin ollut juuri siinä tieteellisessä tutkimuksessa, jonka perusteella nyt ymmärrämme enemmän metsäekosysteemin toiminnasta muuttuvassa ympäristössä.

Metsänhoidon suunnittelijoita kiinnostaa erityisesti se, miten eri metsänkäsittelyketjut vaikuttavat puuston määrään, kokojakaamaan ja runkojen laatuun metsikön kiertoaikana. Kokojakauma ja laatu heijastuvat suoraan runkojen hinnoitteluun ja soveltuvuuteen eri käyttötarkoituksiin. Biologisilla systeemimalleilla on kuvattu myös näitä ilmiöitä. Tutkimusryhmässäni on kehitetty puiden elintoimintoihin perustuva malli, jonka avulla voidaan ennustaa paitsi tuotosta ja kasvua, myös puiden sisäisen oksikkuuden ja runkomuodon kehitystä erilaisissa käsittelyissä (Mäkelä ym. 2000). Malli antaa todenmukaisia tuloksia siitä, miten eri käsittelyissä tuoreoksa- kuivaoksa- ja oksattomat vyöhykkeet ovat jakautuneet runkojen sisälle (Kuva 3).

Luontainen, tiheä, harventamaton



Istutettu, harva, harvennuksin käsitelty



Kuva 3. Puiden erilaistuminen metsänkasvatuksessa. (Mäkelä ym. 2000).

Tällaisten runkolaskelmien avulla voidaan määrittää hyvinkin tarkkaan runkojen taloudellinen arvo. Siksi mallia on voitu hyödyntää metsänhoidon suunnittelussa, kun tavoitteeksi asetettu metsänomistajan saaman taloudellisen tuloksen maksimointi. Professori Olli Tahvosen johtamassa tutkimuksessa on selvitetty, millä tavalla tässä tilanteessa metsiköitä tulee harventaa ja minkälaisia kiertoaikoja käyttää (Hyttiäinen ym. 2004). Tutkimukset etsivät parasta ratkaisua kaikkien ajateltavissa olevien harvennustapojen joukosta. Koska aiempia mittaustietoja eri kokoisten puiden kasvusta eri tavoin harvennetuissa metsissä on olemassa vain pienestä joukosta harvennustapoja, tutkimus joutui välttämättä oletamaan, että malli soveltuu myös tapauksiin, joista ei ole aikaisempia kokeellisia havaintoja. Parhaaksi ratkaisuksi osoittautui epätavallinen harvennusohjelma, josta ei ole juurikaan aiempaa kokemusta. On selvää, että tuloksia on kokeellisesti arvioitava, ennen kuin niitä voidaan siirtää käytännön toimintaan. Esimerkki osoittaa kuitenkin selvästi, että metsänhoidon suunnittelussa on suurta hyötyä välineistä, jotka perustuvat yleiseen tietoon ilmiöistä ja niiden dynamiikasta, eivät pelkästään rajallisiin kokeellisiin havaintoihin.

Yhteenveto

Koska metsä on monitasoinen, dynaaminen, itsesäätelvä järjestelmä, sen ilmiöitä voidaan hyvin jäsentää juuri systeemianalyysin avulla. Siksi matematiikan ja systeemianalyysin perusopinnot kuuluvatkin nykyisin kaikkien metsäekologian opiskelijoiden ohjelmaan, ja valinnaisia syventäviä opintoja on tarjolla eri kurssien yhteydessä. Tämä osaltaan edistää sitä, että tulevaisuuden metsäntutkijoilla on käytössä monipuolisia menetelmällisiä työkaluja, jotka jäsentävät ajattelua ja auttavat ymmärtämään, mikä on metsäekosysteemin ja metsänhoidon kannalta olennaista biologisia ilmiöitä koskevissa tuloksissa.

Viitteet

- Dewar R.C., Franklin O., Mäkelä A., McMurtrie R.E., Valentine H.T. 2009. Optimal function explains forest responses to global change. *Bioscience* 59:127-139.
- Hyytiäinen K., Kokkila T., Mäkelä A., Tahvonen O. and Taipale J. 2004. Connecting process-based forest growth model to stand-level economic optimization. *Canadian Journal of Forest Research* 34:2060-2073
- Härkönen, S., Lehtonen, A., Eerikäinen, K., Peltoniemi, M., Mäkelä, A. 2011. Estimating carbon fluxes for large regions in Finland based on process-based modeling, NFI data and Landsat satellite images. *Forest Ecology and Management* 262:2364-2377
- Kirschbaum M.U. F. 2005. A modeling analysis of the interaction between forest age and forest responsiveness to increasing CO₂ concentrations. *Tree Physiology* 25(7): 953-963.
- Leikola, M. 1996. Mitä on hyvä metsänhoito? *Folia Forestalia* 1996(1):57-62.
- Mäkelä, A. (1986). Implications of the pipe model theory on dry matter partitioning and height growth in trees. *Journal of Theoretical Biology* 123, 103-120.
- Mäkelä, A. and Sievänen, R. (1992). Height growth strategies in open-grown trees. *Journal of Theoretical Biology* 159, 443-467.
- Mäkelä, A., Mäkinen, H., Vanninen, P., Hynynen, J., Kantola, A. ja Mielikäinen K. 2000. Männiköiden tuotoksen ja laadun ennustaminen. (Prediction of growth and quality in pine stands. In Finnish) *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 794. 89 s.
- Mäkelä A., Pulkkinen M., Kolari P., Lagergren F., Berbigier B., Lindroth A., Loustau D., Nikinmaa E., Vesala T., Hari P. 2008. Developing an empirical model of stand GPP with the LUE approach: analysis of eddy covariance data at five contrasting conifer sites in Europe. *Global Change Biology* 14: 98- 108.
- Mäkipää R., Linkosalo T., Niinimäki S., Komarov A., Bykhovets S., Tahvonen O. and Mäkelä A. 2011. How forest management and climate change affect the carbon sequestration of a Norway spruce stand. *Journal of Forest Planning* 16:107-120
- Niinimäki S., Tahvonen O., Mäkelä A. 2012. Applying a process-based model in Norway spruce management. *Forest Ecology and Management* 265:102-115.
- Niinimäki S., Tahvonen O, Mäkelä A. and Linkosalo T. 2013. On the economics of Norway spruce stands and carbon storage. *Canadian Journal of Forest Research* 7: 637-648.
- Peltoniemi M., Pulkkinen M., Kolari, P., Duursma, R., Montagnani, L., Wharton, S., Lagergren, F., Takagi, K., Verbeeck, H., Christensen, T., Vesala, T., Falk, M., Loustau, D., Mäkelä, A. 2012. Does canopy mean N concentration explain differences in light use efficiencies of canopies in 14 contrasting forest sites? *Tree Physiology*, 32(2): 200-218

Valentine H.T, Mäkelä, A. 2012. Modeling forest stand dynamics from optimal balances of carbon and nitrogen. *New Phytologist*. 194: 961–971

Kirjoittajasta



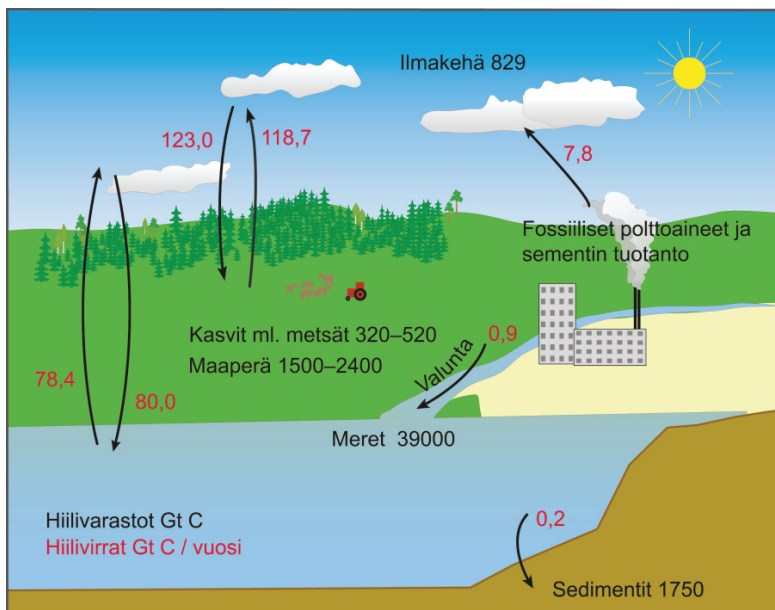
Annikki Mäkelä (HY, Metsätieteiden laitos, annikki.makela@helsinki.fi) oli prof. Hans Blombergin oppilaana 1970-luvun lopulla. Hän valmistui diplomi-insinööriksi vuonna 1980 teknillisen fysiikan osastolta pääaineenaan systeemiteoria. Diplomityönsä hän teki metsän kasvun ekologisesta mallituksesta systeemiteorian menetelmin, ja aiheesta syntyi myös systeemiteorian liseniaattityö 1982. Mäkelä työskenteli jonkin aikaa assistenttina systeemiteorian laboratoriossa, mutta siirtyi sitten Helsingin yliopiston metsänhoitotieteen laitokselle, jossa suoritti opintoja ja väitteli metsäekologian alalta 1988. Hän on toiminut erilaisissa Suomen Akatemian tutkimustehtävissä assistentista vanhemmaksi tutkijaksi ja mm. tutkijana IIASA:n Hapan Sade –projektissa. Vuodesta 2005 Mäkelä on toiminut HY:n metsätieteiden laitoksella metsänhoitotieteen professorin tehtävässä. Hänen tutkimusryhmänsä on soveltanut systeemiteorian menetelmiä kuten dynaamisia malleja ja dynaamista optimointia erilaisiin ekologisiin tutkimuskysymyksiin ja myös edistänyt näihin liittyvien matemaattisten menetelmien opetusta metsätieteiden laitoksella.

Skenaarioita Suomen metsien hiilinieluista

Risto Sievänen

Tausta

Metsät ovat merkittävä tekijä maapallon ilmkehän hiilivirroissa, kuva 1. Ne sitovat kasvuunsa joka vuosi noin 50 prosenttia fossiilisten polttoaineiden ja sementin tuotannosta tulevista hiilipäästöistä (Pan et al. 2011, kuva 1). Metsät vaikuttavat siis selvästi tärkeimmän kasvihuonekaasun, hiilidioksidin, globaaliin dynamiikkaan. Sen takia ne voivat olla merkittävä tekijä etsittäessä keinoja hillitä maapallon ilmkehän hiilidioksidipitoisuuden nousua. Tämä on huomattu ilmastopimuksia laadittaessa ja metsien kasvihuonekaasutaseet ovat mukana sääntelyssä, Kioton pöytäkirjan sanoin:



Kuva 1. Globaaleja hiilivarastoja (musta teksti) ja tärkeimpiä virtoja (punainen teksti) kaudella 2000–2009 (Climate Change 2013).

“The net changes in greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks resulting from direct human-induced land-use change and forestry activities, limited to afforestation, reforestation and deforestation since 1990, measured as verifiable changes in carbon stocks in each commitment period, shall be used to meet the commitments ...” (Artikla 3.3)

ja

“... additional human-induced activities related to changes in greenhouse gas emissions by sources and removals by sinks in the agricultural soils and the land-use change and forestry categories shall be added to, or subtracted from, the assigned amounts for Parties ...” (Artikla 3.4)

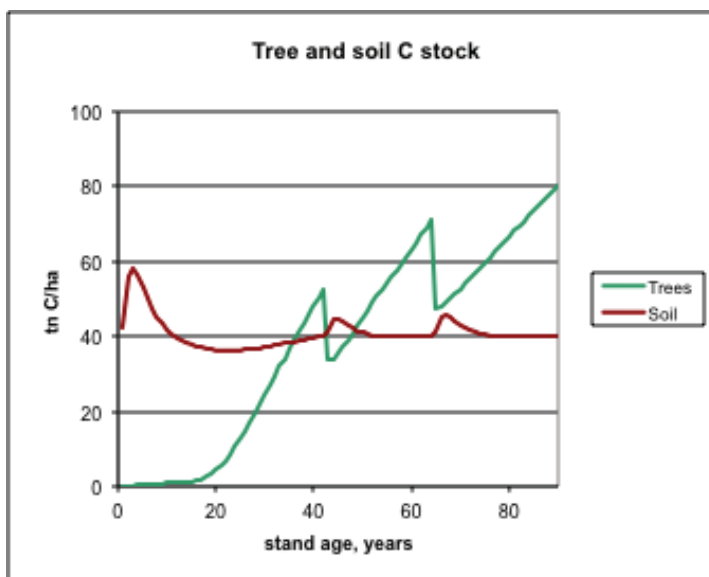
Suomi kuuluu boreaaliseen metsävyöhykkeeseen, joka Euraasian ja Amerikan mantereiden pohjoisosissa muodostaa merkittävän osan, 51 % metsien globaalista nettonielusta 1,1 Gt C / vuosi (Pan et al. 2011). Suomessa nuo Kioton protokollan mainitsevat metsien hiilivarastojen muutokset ja niihin liittyvät virrat ovat merkittäviä energiankäytöstä ja muista toimista tuleviin kasvihuonekaasupäästöihin verrattuna. Metsien nettonielu oli vuonna 2011 36 Mt CO₂, joka on yli puolet Kioton pöytäkirjan 1. sitoumuskauden 2008-2012 sallitusta päästötasosta 71 Mt CO₂/vuosi. Osan metsien nielusta voi lukea hyväksi Kioton pöytäkirjan päästörajan tavoiteltaessa. Metsänielun käyttöä on kuitenkin rajoitettu niin, että Suomen hyöty siitä on Kioton 1. sitoumuskaudella noin 3,5 Mt CO₂/vuosi. Toisen sitoumuskauden 2013-2020 tarkemmat laskentasäännöt ovat vielä auki mutta metsät tulevat olemaan edelleenkin mukana.

Metsien hiilinielujen kehityksen ennustamista on tehty eri tarkoituksiin jo kauan Suomessa. Tarkoituksiperät ovat vaihdelleet luonnontieteellisestä kiinnostuksesta (Matala ym. 2009) ilmastopolitiikan tarpeisiin (Sievänen et al. 2007), on myös arvioitu erilaisten metsiin kohdistuvien toimien, kuten bioenergian korjuu, nettovaikutuksia kansalliseen kasvihuonekaasutaseeseen (Kallio ym. 2013).

Metsikön hiilidynamiikka

Metsän hiilivarat ovat elävässä puustossa ja kasveissa sekä kuolleessa orgaanisessa aineessa. Kuollut orgaaninen aine on nimensä mukaisesti eri asteisissa hajoamisen tiloissa olevia puiden ja muiden kasvien jäänteitä (kuolleet puut, maahan varisseet oksat ja lehdet jne.). Maassa olevaa kuolleen orgaaniseen aineeseen hiiltä kutsutaan maaperän hiilivarastoksi.

Puuston kehitys ajaa näiden kahden metsän hiilivaraston (puut ja kuollut orgaaninen aine) yksinkertaista dynamiikkaa, kuva 2. Puustosta syntyy kariketta, joka on syöte orgaaniseen aineeseen varastoon. Orgaaninen aine hajoaa nopeasti ottaen eksponentiaalisesti, hajoamisnopeus riippuu metsikön lämpötila- ja kosteusoloista.



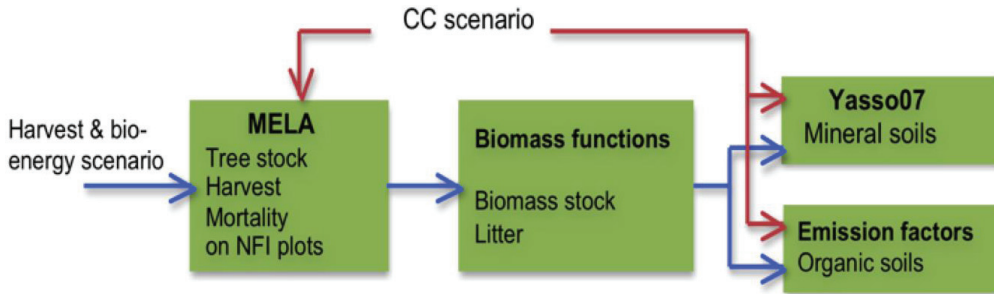
Kuva 2. Periaatekuva metsikön (mäntymetsä Etelä-Suomessa) puiden (vihreä viiva) ja kuolleen orgaanisen aineen hiilen (punainen viiva) varastojen kehityksestä päätehakkuun jälkeen kun metsikköä on harvennuttu iällä 40 ja 60 vuotta. Kuolleen orgaanisen aineen varaston kasvu alussa johtuu päätehakkuun hakkuutähteistä.

Metsien hiilidynamiikka ja skenaariot

Metsäalueiden hiilitasetta ennustettaessa on otettava huomioon, että niillä metsät koostuvat metsiköistä, jotka ovat eri kehitysvaiheissa ja joita voidaan käsitellä erilaisin tavoittein. Tällaisiin tarpeisiin on tehty metsätalouden suunnitteluohjelmistoja, joiden avulla ratkaistaan eri metsiköihin eri aikoina kohdistettavat toimenpiteet annetuilla rajoituksilla. Kasvumallin avulla ennustetaan metsiköiden puuston kehitys toimenpiteiden välillä.

Suomessa tähän on käytetty metsätalouden analyysi- ja suunnitteluohjelmistoa MELA (Redsven ym. 2013). MELA käyttää lähtötietoina valtakunnan metsien inventoinnin puustomittauksia. Se generoi suuren määrän toimenpide- ja kehitysvaihtoehtoja eri ajanhetkinä (5 vuoden välein) jokaiselle metsiköille. Optimaaliset toimenpiteet ratkaistaan lineaarisen ohjelmoinnin ongelmana. Optimointikriteeri on yleensä nettotulojen nykyarvo, rajoituksina ovat mm. eri puutavaralajien ja myös energiapuun hakkuumäärät eri aikoina. Rajoituksena on myös vaatimus, että tämän hetken toimenpiteiden vuoksi hakkuumahdollisuudet eivät laske tulevaisuudessa (ns. kestävyysvaatimus). Lisäksi on joukko muun muassa metsien käsittelyyn liittyviä (mm. luonnonsuojelu, rajoitetun metsätalouden mahdollisuus) rajoituksia.

Hiiliskenaarioita (Sievänen ym. 2013, Kallio ym. 2013) varten MELA:an kytkettiin arviot tulevasta puun ja energiapuun kysynnästä sekä komponentit hiilitaseiden laskemiseksi (kuva 3). MELA:n kasvumalleissa vuoden keskilämpötila ja ilman hiilidioksidipitoisuus vaikuttaa puiden kasvunopeuteen.



Kuva 3. Metsien hiilitaseen laskentajärjestelmän komponentit ja syöttötiedot. MELA tuotti arvion puuston määrästä, biomassafunktioiden avulla arvioitiin puuston hiilimäärä sekä kuolleen orgaanisen aineen (litter) syöte maaperään. Kuolleen orgaanisen aineen varastomuutokset laskettiin Yasso07 mallilla (Tuomi ym. 2011) kivennäismaille ja ns. emissiokertoimien (Sievänen ym. 2013) avulla turvemaille.

Puun- ja energiapuun kysynnän skenaariot (Taulukko 1) pohjautuivat metsäteollisuuden ennakoituun kehitykseen sekä energiapolitiikan linjauksiin (Sievänen ym. 2012). Lisäksi tarkasteltiin suurinta mahdollista puun käyttöä ”Suurin kestävä” skenaariossa. Vuoden keskilämpötila, sadanta ja ilman hiilidioksidipitoisuus olivat IPCC:n A1B-skenaariion (Jylhä ym. 2009) mukaiset.

Taulukko 1. Puun käyttö kolmessa skenaariossa vuonna 2020.

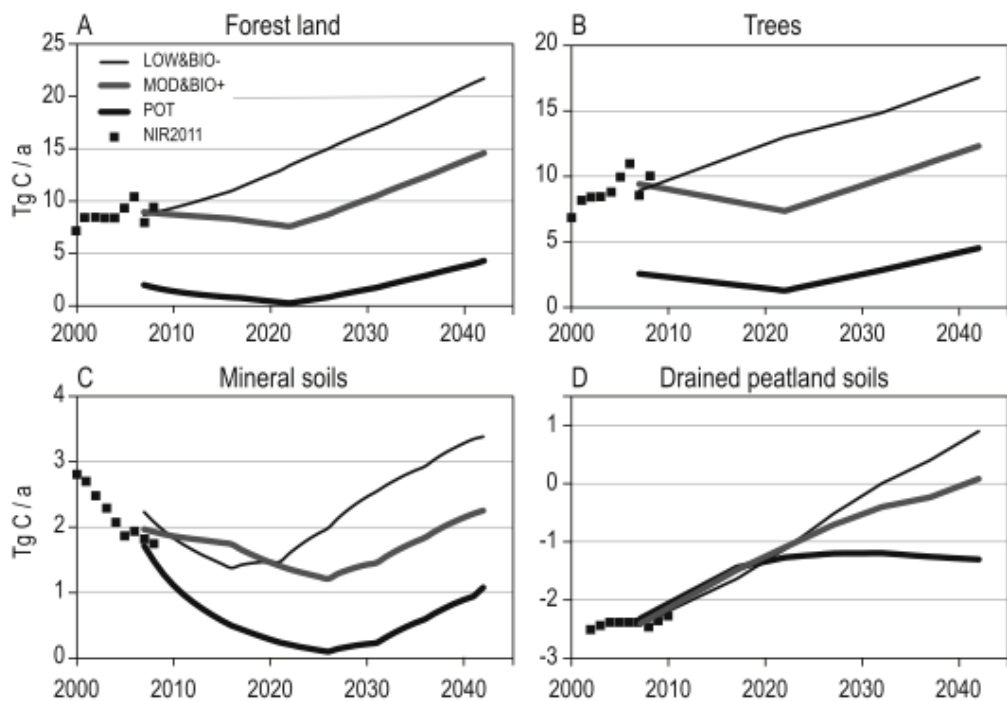
Puunkäytöskenaario	Ainespuuhakkuut v. 2020 milj. m ³	Energiapuun käyttö v. 2020 milj. m ³
Alhainen (LOW&BIO-) ^a	43,6	18,0
Maltillinen (MOD&BIO+) ^a	56,6	25,5
Suurin kestävä (POT) ^a	74,8	24,0

^a Viittaa kuvan 4 merkintöihin

Simulointien mukaan (kuva 4) nykyoloissa ja tulevaisuudessa metsiemme hiilitase on selvästi positiivinen, eli metsät sitovat kasvavaan puustoon ilmakehästä hiilidioksidia enemmän kuin sitä vapautuu hajotuksen ja metsien käytön seurauksena. Metsien hiilen sidonta kattaa keskimäärin noin 40 % Suomen nykyisistä vuotuisista kasvihuonekaasupäästöistä.

Koko metsän hiilivarastot seuraavat jokseenkin kiinteästi puiden hiilivaraston muutoksia. Maaperän hiilivarasto seuraa viiveellä puuston kehitystä. Kivennäismaiden maaperän nielu vähenee alussa kaikissa skenaarioissa koska maaperässä on vanhaa 1990-luvun lopun hakkuiden tuottamasta korkeasta karikemäärästä periytyvää varastoa, joka hajoaa. Tämä nielu kääntyy 10–20 vuodessa kasvuun, koska lisääntyvä puusto tuottaa yhä enemmän kariketta

Lähempänä nykyistä metsien käyttöastetta olevissa vaihtoehdoissa hiilinielu jopa kasvaa edelleen, vaikka puuta käytetäänkin energianlähteenä. Ilmastonmuutos kasvattaa metsien hiilinielua, koska puiden kasvu ja kariketuotos lisääntyvät enemmän kuin karikkeen hajotus.



Kuva 4. Hiilen nielut (positiiviset arvot) ja lähteet (negatiiviset arvot) metsien puustossa (B), kivennäismaiden (C) ja turvemaiden (D) maaperässä taulukon 1 mukaisissa skenaarioissa. Osakuvassa A (Forest land) on puusto ja maaperä yhteenlaskettuina. Mustat neliöt ovat kasvihuonekaasuraportoinnissa vuonna 2011 lasketut arvot.

Viitteet

Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report.

Jylhä, K.; Ruosteenoja, K.; Räisänen, J.; Venäläinen, A.; Tuomenvirta, H.; Ruokolainen, L.; Saku, S. & Seitola, 2009. T. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen loppuraportti. Ilmatieteen laitos, Raportteja No. 2009: 4.

Kallio, A.M.I., Salminen, O. & Sievänen, R. 2013. Sequester or substitute - Consequences of increased production of wood based energy on the carbon balance in Finland. *Journal of Forest Economics* 19: 402–415 DOI: 10.1016/j.jfe.2013.05.001

Matala J, Kärkkäinen L, Härkönen K, Kellomäki S, Nuutinen T 2009. Carbon sequestration in the growing stock of trees in Finland under different cutting and climate scenarios. *Eur J For Res* 128:493–504

Pan, Y. et al. 2011 A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* 333, 988-993. DOI: 10.1126/science.1201609.

Redsven, V., Hirvelä, H., Härkönen, K., Salminen, O., Siitonen, M. 2013. MELA2012 Reference Manual (2nd edition). The Finnish Forest Research Institute. 666 p. ISBN: 978-951-40-2451-1

Sievänen, R., Kareinen, T., Hirvelä, H. & Ilvesniemi, H. 2007. Hakkuumahdollisuusarvioihin perustuvat metsien kasviuonekaasutaseet. Metsätieteen aikakauskirja 4/2007: 329-339.

Sievänen, R., Lehtonen, A., Ojanen, P. & Salminen, O. 2012. Metsien hiilitaseet. Julkaisussa: Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T. (toim.). Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 240: 197-204.
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm>

Sievänen, R., Salminen, O., Lehtonen, A., Ojanen, P., Liski, J., Ruosteenoja, K. & Tuomi, M. 2013. Carbon stock changes of forest land in Finland under different levels of wood use and climate change. *Annals of Forest Science*. DOI: 10.1007/s13595-013-0295-7

Tuomi M, Laiho R, Repo A, Liski J (2011) Wood decomposition model for boreal forests. *Ecol Modell* 222:709–718.

Kirjoittajasta



Risto Sievänen (risto.sievanen@metla.fi) syntyi 4.1.1953 Enossa, Pohjois-Karjalassa. Hän valmistui diplomi-insinööriksi vuonna 1978 Teknillisen fysiikan osastolta Systemiteoria pääaineena. Hän harjoitti jatko-opintoja Systemiteorian laboratoriossa, liseniaattityö valmistui vuonna 1983 ja väitöskirja ”Construction and identification of models for tree and stand growth” vuonna 1992 Automaatio-tekniikan laboratoriossa Arne Halmeen johdolla. Hän on työskennellyt vuodesta 1981 Metsäntutkimuslaitoksessa. Tutkimukset ovat kohdistuneet puiden kasvun dynamiikkaan ja hiilen kiertoon yksilötasolta valtakunnan mittakaavaan. Hän toiminut tutkimusohjelman koordinaattorina ja työskennellyt vierailevana tutkijana Yhdysvalloissa, Saksassa ja Ranskassa.

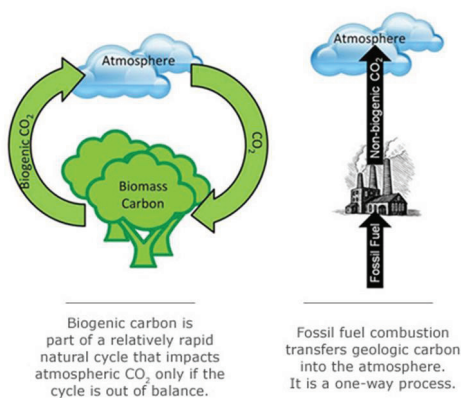
Ilmastonmuutoksen hillinnän dynamiikka – onko metsäbioenergia ilmastoneutraalia?

Kim Pingoud

Tässä artikkelissa esitetään Sieväsen artikkelista edellä, raportista (Sievänen ym. 2012) ja julkaisusta (Sievänen ym. 2013) poikkeava näkökulma metsäbioenergian päästö- ja ilmasto-neutraaliuteen tarkastelemalla bioenergian lisäämisen marginaalisia vaikutuksia ilmakehän hiilitaseeseen. Millainen on trade-off metsän hiilinielujen ja metsäbioenergian lisäämisen välillä Suomen metsissä? Heikentääkö metsäbiomassan lisäkorjuu hiilinielua, jolloin bioenergia ei ilmakehän kannalta enää ole hiilineutraalia ainakaan lyhyemmällä aikavälillä? Asia liittyy metsien hiilivarastojen dynamiikkaan sekä hiilenkierron aikavakioihin. Mitkä ovat *kokonaisvaikutukset päästöihin*, mikäli tarkastelussa otetaan lisäksi huomioon bioenergialla mahdollisesti korvattava fossiilinen energia? Lisäksi tarkastellaan hakkuutähteiden energiakäytön *ilmastovaikutuksia* suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin käyttäen lähtötietoina Revon ym. (2010) esittämiä arvioita oksa- ja kantobiomassan hajoamisnopeudesta hakkuualoilla.

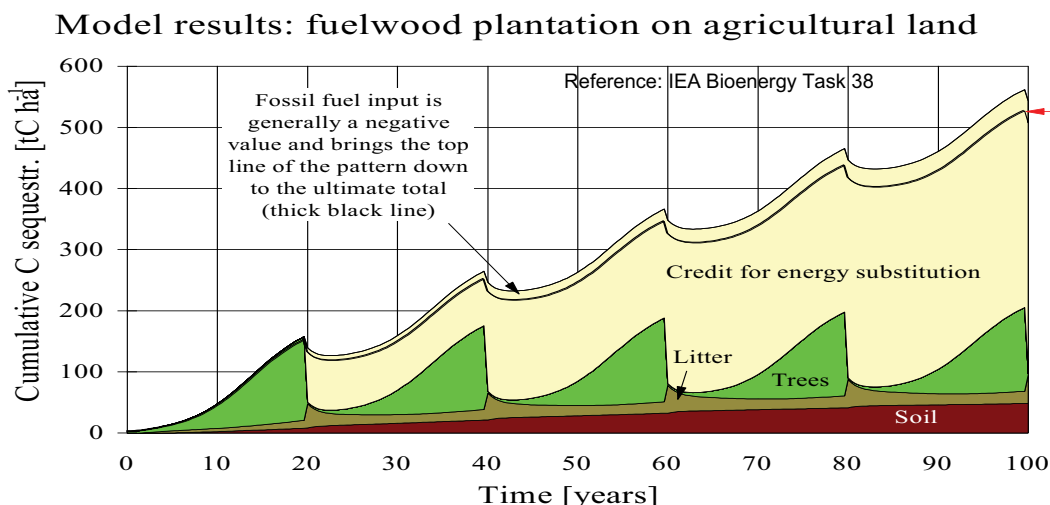
Geneerinen näkemys bioenergian hiilineutraaliudesta

Bioenergian hiilineutraaliutta perustellaan hiilen suljetulla kierrolla: biomassan poltossa vapautuva hiili on yhteyttämisprosessilla sidottu ilmakehästä (kuva 1) ja siten se ei nettomääräisesti lisää ilmakehän hiilimäärää. Fossiilisten polttoaineiden käyttö taas tuottaa 'uutta' hiiltä ilmakehään pysyvistä, vuosimiljoonien aikana kertyneistä geologisista hiilivarastoista.



Kuva 1. Bioenergian ja fossiilisten polttoaineiden vaikutus ilmakehän hiilitaseeseen.

Bioenergialla saavutettavia päästönvähennyksiä voidaan myös arvioida suhteessa fossiilista polttoainetta käyttävään energiajärjestelmään. Kuvan 2 geneerinen esimerkki havainnollistaa lyhytkiertoisien energiapuuviljelmien vaikutusta hiilitaseeseen. Maatalousmaalle perustettu metsikkö sitoo aluksi hiiltä. Kun puu korjataan ja käytetään bioenergiaksi, hiilivarasto romahtaa eli aiheuttaa päästön ilmakehään. Lisäksi puun korjuussa ja kuljetuksissa käytetään fossiilisia polttoaineita, mistä aiheutuu pienhkö tiputus fossiilisiin hiilivarastoihin. Kun tätä prosessia kuitenkin verrataan fossiilisen polttoaineen käyttöön bioenergian asemasta, saavutetaan jokaisella kierrolla kumuloituva päästösäästö suhteessa fossiiliseen polttoaineeseen (punaisella nuolella merkitty käyrä). Kuviossa on oletettu, että puupolttoaineen sisältämällä biogeenisen hiilen tonnilla ei pystytä täysimääräisesti korvaamaan yhtä fossiilisen polttoaineen hiilitonnia (korvauskertoimen eli displacement factor $DF < 1$). Tämä johtuu biomassan fossiilisia polttoaineita suuremmasta päästökertoimesta suhteessa energiasisältöön.



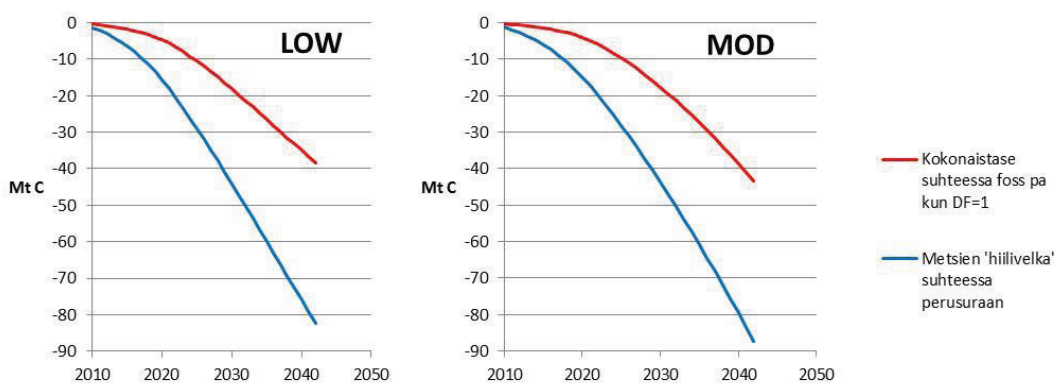
Kuva 2. Geneerinen esimerkki puun lyhytkiertoviljelmään perustuvan bioenergian päästönvähennyksistä suhteessa fossiiliseen polttoaineeseen.

Hakkuutähteiden ja harvennuspuun lisäkäytön skenaariot ja vaikutukset Suomen hiilidioksidipäästöjen taseeseen

Päästöjen vähentämisen kannalta on olennaista arvioida, miten biomassan käytön muutokset *suhteessa* nykytilaan vaikuttavat ilmakehän hiilitaseeseen. Relevanttia on tällöin tarkastella bioenergiaskenaarioiden *marginaalivaikutuksia* suhteessa perusuriin. Esimerkkinä käytetään Sieväsen edellä ja julkaisussa (Sievänen ym. 2012) esitettyjä makro- eli valtakunnan tason skenaarioita. Perusurina seuraavassa ovat Suomen metsien alhaisemman (LOW) ja maltillisen (MOD) ainespuun käytön skenaariot yhdistettynä alhaisemman energiapuun käytön skenaarioon (BIO-), jossa hakkuutähte- ja harvennuspuun käyttö kasvaa vajaasta 9 Mm^3 vuodessa arvoon 18 Mm^3 vuodessa vuoteen 2020 mennessä tasaantuen sen jälkeen. Mikä on

vaikutus nettopäästöihin, jos BIO- -skenaarion asemasta valitaan BIO+ -skenaario, jossa energiapuun käyttö kasvaa 25,5 Mm³ vuodessa samassa ajassa? Sieväsen ym. (2012) laskelmissa Suomen metsien kokonaishiilivarasto (ml. kuollut puu ja maaperän hiili) kasvaa kaikissa edellä mainituissa skenaarioissa, siis riippumatta puun korjuun lisäyksistä. Metsät siis toimivat hiilinieluna eli niitä voidaan pitää vähintään ilmastoneutraalina.

Kun näkökulmaa muutetaan, muuttuvat myös johtopäätökset (kuva 3). Energiapuun käytön lisäys (BIO- → BIO+) pienentää metsien hiilinielua enemmän kuin puuenergialla voitaisiin edes parhaimmillaan korvata fossiilisten polttoaineiden päästöjä. Kokonaishiilivarastot siis pienenevät eli nettopäästöt lisääntyvät tarkasteltavalla runsaan 30 vuoden ajanjaksolla enemmän kuin fossiilisia polttoaineita käytettäessä, eli päästöt ilmakehään kasvavat suhteessa perusuriin. Tilanne tässä erikoistapauksessa on täysin vastakkainen geneeriseen tapaukseen (kuva 2) verrattuna.



Kuva 3. Hakkuutähteen ja harvennuspuun korjuun lisäyksestä (BIO- → BIO+) syntyvä Suomen metsien 'hiilivelka' suhteessa perusuriin (LOW&BIO- ja MOD&BIO-) sekä kokonaistase, mikäli bioenergialla voitaisiin täysimääräisesti (DF=1) korvata fossiilista polttoainetta. Laskelmat marginaalivaikutuksista perustuvat julkaisussa Sievänen ym. (2012) esitettyihin lukuihin.

Miksi metsien biomassavaraston marginaalinen vähennys on suurempi kuin mitä biomassan lisäkorjuussa saadaan talteen (kokonaistaseiden negatiivisuus kuvassa 3)? Yksi selitys tälle on hyvässä kasvuvaiheessa olevan harvennuspuun korjuu energiaksi: perusurassa harvennuspuu jatkaa hiilensitomista, kun se BIO+ -skenaariossa päättyy poltossa heti ilmakehään. Hiilivelkaa kasvattavat myös ne hakkuutähteet, jotka perusurassa jäävät hakkuualalle hajoamaan, mutta poltettaessa muuttuvat välittömiksi päästöiksi. Leimallista borealisille metsille ovat niiden pitkät aikavakiot. Tämä pätee niin metsien kiertoaikoihin kuin kuolleen puun hitaaseen hajoamiseen.

Kumpi näkökulma on sitten oikeampi kuvaamaan metsäbioenergian ilmastovaikutuksia ja miten tämä liittyy ilmastopolitiikkaan? Kioton ilmastopimuksen toisella velvoitekaudella (2013–2020) metsien hiilitaseen laskennassa on siirrytty ns. vertailutasomenetelmään. Jokaiselle velvoitteisiin sitoutuneelle valtiolle on ilmastoneuvotteluissa sovittu hiilinielujen vertailutaso kuluvalle velvoitekaudelle. Mikäli metsien hiilinielu on vertailutasoa korkeampi, saa valtio kevennyttä velvoitteisiinsa, mikäli alhaisempi, syntyy tästä lisärasite. Siten nielujen

ylläpitäminen ja lisääminen kilpailee päästörajoituskeinona metsäbiomassan käytön lisäämisen kanssa. Nieluhyvitykselle on kuitenkin sovittu kattoluku siten, että valtion saama vuotuinen hyvitys voi olla korkeintaan 3,5 prosenttia kyseisen valtion vuoden 1990 hiilidioksidipäästöistä. Suomen tapauksessa todellinen nielu todennäköisesti ylittää kattoluvun kaikissa edellä mainituissa metsäskenaarioissa, jolloin laskentasääntö ei aiheuta metsäbioenergian lisäkäyttöä hillitsevää ohjausvaikutusta.

Trade-off päästöjen ja nielujen välillä voi muuttua entistä tärkeämmäksi, mikäli hiilinielujen roolia ilmastopolitiikassa kasvatetaan. Syynä mahdollisiin politiikkamuutoksiin ovat ilmakehään päästetyin hiilidioksidin hidaskuostuminen ilmakehästä eli prosessin suuret aikavakiot sekä se, että globaali kasvihuonekaasupäästöjen rajoittaminen on dramaattisesti viivästynyt. Mikäli pyritään estämään ilmaston nopea lämpeneminen eli yli 2°C astetta vuoteen 2100 mennessä, joudutaan väistämättä käyttämään apuna joko metsä- ja maaekosysteemien nieluja tai keinotekoisia hiilidioksidin varastointia (Carbon Capture and Storage, CCS), jonka todellinen potentiaali on vielä varsin epävarma. Vaikka metsien hiilinielut kyllästyvät eivätkä ne voi toimia pysyvänä ratkaisuna ilmasto-ongelmaan, ne ovat kuitenkin dynaamisia puskureita, joilla ostetaan aikaa energijärjestelmän muuttamiseksi hiilineutraaliin suuntaan. Toisaalta ei tietysti ole järkevää ajaa metsiä tilaan, jossa uusiutuvaa biomassaresurssia ei lainkaan hyödynnetä ja joka samalla johtaa alaan liittyvän osaamisen ja infrastruktuurin rappeutumiseen. Pitkän aikavälin ilmastopolitiikassa metsät ovat tärkeä uusiutuvien materiaalien ja energian lähde.

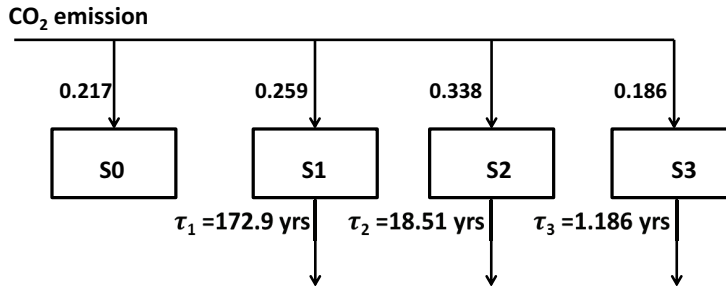
Ilmakehän hiilidynamiikan huomioiminen – hakkuutähteiden energiakäytön ilmastovaikutus

Hiilivelan *lämmitys*vaikutuksen arvioimiseksi on biomassavarastojen hiilidynamiikan (päästötaseen) lisäksi otettava huomioon hiilidioksidin dynamiikka ilmakehässä.

Hiilidioksidin kierron kuvaamiseksi ilmakehän, valtamerien ja maaekosysteemien välillä kehitetään yhä mutkikkaampia rakennelmalleja, jotka perustuvat geofysikaalisten ja -kemiallisten prosessien yksityiskohtaiseen mallintamiseen. Yksi tällainen on Bern2.5CC -malli (Joos et al. 2001). Koska rakennelmallit ovat laskennallisesti raskaita, on päästöskenaarioiden vertailussa syntynyt tarve yksinkertaisempiin työkaluihin. IPCC:n arviointiraporteissa käytetään yleisesti pulssivastemallia, joka on estimoitu Bernin 2.5CC-mallista olettamalla CO₂-taustakonsentraatioksi 378 ppm. Tässä mallissa yksikköpäästöpulssin vaste ilmakehässä on ajan t funktiona seuraava (IPCC 2007, s. 213):

$$= a_0 + \sum_{i=1}^3 (a_i * e^{-t/\tau_i})$$

missä $a_0 = 0.217$, $a_1 = 0.259$, $a_2 = 0.338$, $a_3 = 0.186$, ja aikavakiot $\tau_1 = 172.9$ vuotta, $\tau_2 = 18.51$ vuotta ja $\tau_3 = 1.186$ vuotta. Pulssivastemalli voidaan esittää yksinkertaisena lineaarisena dynaamisena säiliömallina (kuva 4).



First-order decay, time constants τ_1 , τ_2 and τ_3

Additional concentration in the atmosphere $S = S_0 + S_1 + S_2 + S_3$

Kuva 4. Yksinkertaistettu malli hiilidioksidin päästöpulssin poistumiselle ilmakehästä. Varasto $S = S_0 + S_1 + S_2 + S_3$ kuvaa päästöpulssista ilmakehään aiheutunutta konsentraatiolisää ajan funktiona.

Pulssivasteaprosimaatiossa runsas viidesosa päästöstä jää pysyvästi ilmakehään ja neljänneksellä on lähes 200 vuoden aikavakio poistumiselle ilmakehästä.

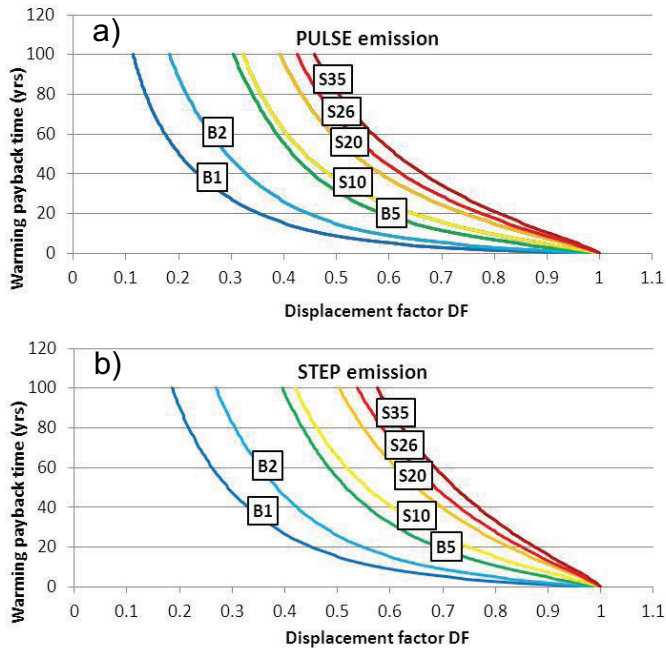
Säteilypakotteen RF oletetaan riippuvan logaritmisesti CO_2 -konsentraatiosta:

$$\text{RF}(\text{CO}_2) = 5.35 \text{ W m}^{-2} \left(\ln \frac{\text{CO}_2(t)}{\text{CO}_2(t_0)} \right)$$

CO_2 :n taustapitoisuudeksi vuonna 1850 on oletettu 278 ppm $_{\text{CO}_2}$. Kaikkien kasvihuonekaasujen pitoisuuden on oletettu kehittyvän siten, että 2°C pitoisuuksien stabilointitavoite 450 ppm $_{\text{eq}}$ saavutetaan vuonna 2100 ja että pelkän CO_2 :n pitoisuus olisi tällöin 415 ppm $_{\text{CO}_2}$. Päästöpulssin lämmitysvaikutusta kuvaa säteilypakotelisän ΔRF integraali, kumulatiivinen säteilypakote.

Seuraavassa esitellään tuloksia mikrotason tarkastelusta koskien hakkuutähteiden (oksien ja kantojen) energiakäytön ilmastovaikutuksia (Pingoud ym. 2012). Laskelmat tehtiin käyttäen Revon ym. (2010) arvioita tähdebiomassan hajoamisnopeudesta hakkuualoilla. Perusraksi on valittu normaali kiertometsätalous, jossa ainespuu korjataan päätehakkuussa talteen oksien ja kantojen jäädessä hakkuualalle lahoamaan. Päästöpulssi suhteessa perusuraan syntyy silloin, kun tähteitä käytetään energiantuotantoon. Tällöin tähteiden hiili vapautuu välittömästi ilmakehään ja syntyy hiilivelka suhteessa tähteiden lahoamiseen metsässä perusralla. Mitä nopeammin tähteet hajoavat, sitä pienempi on hiilivelka. Lajoamisnopeus riippuu hakkuutähteiden merkittävästä halkaisijasta (Repo ym. 2010) oksabiomassan hajoamisen ollessa nopeampaa kuin kantojen.

Hiilivelan aiheuttamaa tilapäistä lämmitysvaikutusta voidaan verrata fossiilisten polttoaineiden lämmitysvaikutukseen (kuva 5), kaikki laskettuina pulssivastemallilla.



Kuva 5. Lämmitysvaikutuksen takaisinmaksuaika korvauskertoimen DF funktiona oksa- ja kantobiomassan a) hetkelliselle käytölle bioenergiana (impulssi) ja b) jatkuvalla käytölle bioenergiana (askelfunktio). Tarkasteltavat biomassaosiot ovat merkittävän halkaisijan mukaan ryhmiteltyinä: oksat (branches (B) 1 cm, 2 cm, 5 cm) sekä kannot (stumps (S) 10 cm, 20 cm, 26 cm, 35 cm). DF= 0,9 vastaa karkeasti biomassan suoran polton vertaamista kivihiileen ja DF=0,5 maakaasuun.

Koska fossiilisten polttoaineiden ominaispäästöt (eli polton välittömät, savupiipusta mitatut päästöt tuotettua energiayksikköä kohti) ovat pienemmät kuin bioenergian, hakkuutähde-energian kumulatiivinen säteilypakote eli lämmitysvaikutus on alussa suurempi kuin fossiilisten polttoaineiden. Hiilivelan pienentyessä ajan funktiona, muuttuu bioenergia fossiilista polttoainetta paremmaksi ilmaston kannalta. Kuvassa 5 on arvioitu korvauskertoimen DF funktiona lämmitysvaikutuksen takaisinmaksuaikaa eli aikaväliä, jonka jälkeen bioenergia on ilmastollisesti edullisempi vaihtoehto. Biomassaosiot, jotka luonnossa lahoaisivat ilmakehään hitaasti, ovat bioenergiakattiloissa poltettuina ilmastovaikutuksiltaan huonompia kuin fossiilinen maakaasu – jopa 100 vuoden aikaperspektiivillä arvioituna. Mikäli hakkuutähteet jalostettaisiin biodieseliksi ja niitä verrattaisiin fossiiliseen dieselpolttoaineeseen, olisi takaisinmaksuaika tätäkin pitempi. Laskelmat osoittavat myös, että lämmitysvaikutuksen takaisinmaksuaika on pitempi kuin hiilivelan takaisinmaksuaika (Pingoud ym. 2012), mikä johtuu hiilidioksidipulssin hitaasta poistumisesta ilmakehästä.

Kasvihuonekaasutase ei ole ainoa metsäbioenergian ilmastovaikutustekijä. Biomassan hyödyntämisellä saattaa olla vaikutuksia metsien albedoon (valon heijastuskykyyn) ja metsä-aerosolien muodostumiseen. Bioenergian käyttö voi myös lisätä hiukkaspäästöjä kuten mustaa hiiltä, jolla on ilmastoa lämmittävä vaikutus.

Päästö- ja ilmastovaikutusten arvioinnin kannalta ratkaisevaa on itse perusuran valinta, joka ei suinkaan ole itsestään selvä asia ja joka voi johtaa jopa vastakkaisiin johtopäätöksiin. Myös tarkasteltava aikajänne on olennainen tekijä: tähdätäänkö lyhyen aikavälin kenties välttämättömienkin ilmastotavoitteiden saavuttamiseen vai siihen, että biomassaa käytetään kestävästi yhtenä uusiutuvana energiamuotona ja materiaaliresurssina. Perusuran ja aikahorisontin valinta on myös ilmastopolitiikkaa, johon ei löydy yksiselitteistä tieteellistä vastausta.

Viitteet

IPCC, 2007. Solomon, S. ym. (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.

Joos, F., Prentice, I.C., Sitch, S. ym. 2001. Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emission scenarios. *Global Biogeochemical Cycles* 15(4):891–907.

Pingoud, K., Ekholm, T. & Savolainen, I. 2012. Global warming potential factors and warming payback time as climate indicators of forest biomass use. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17: 369–386. Springer. DOI: 10.1007/s11027-011-9331-9

Repo, A., Tuomi, M. & Liski, J. 2010. Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. *GCB Bioenergy* 3(2):107–115. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2010.01065.x

Sievänen, R., Lehtonen, A., Ojanen, P. & Salminen, O. 2012. Metsien hiilitaseet. Julkaisussa: Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T. (toim.). *Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 240: 197-204.
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm>

Sievänen, R., Salminen, O., Lehtonen, A., Ojanen, P., Liski, J., Ruosteenoja, K. & Tuomi, M. 2013. Carbon stock changes of forest land in Finland under different levels of wood use and climate change. *Annals of Forest Science*. DOI: 10.1007/s13595-013-0295-7

Kirjoittajasta



Kim Pingoud (VTT, kim.pingoud@vtt.fi) on syntynyt vuonna 1951 Helsingissä. Hän suoritti Teknillisen korkeakoulun systeemiteorian laboratoriossa diplomi-insinööritutkinnon vuonna 1975 ja tekniikan liseniaatin tutkinnon vuonna 1978. Hydrologisia malleja käsitelleen väitöskirjansa hän julkaisi vuonna 1985 Teknillisen korkeakoulun systeemianalyysilaboratoriossa. Pingoud toimii johtavana tutkijana VTT:ssä tutkimusalueenaan ilmastonmuutoksen hillintäkeinot. Hänellä on pitkä kokemus metsäsektorin kasvihuonekaasutaseiden laskentamenetelmien kehittämistä sekä ilmastonmuutoksen hillintäkeinojen arvioinnista sisältäen mm. bioenergian ja puun käytön materiaaleina. Pingoud on ollut johtokirjoittajana useissa Hallitustenvälisen ilmastopaneelin (IPCC) ohjeistoissa, joissa on kuvattu Ilmastopöytäkirjan (UNFCCC) mukaisten kansallisten päästöinventarioiden laskentamenetelmät, sekä IPCC:n uusiutuvia energiamuotoja käsittelevässä erikoisraportissa.

Systeemiteoriasta ohjelmistotuoteliiketoimintaa

Andrea Holmberg

Systeemiteoriaa pääaineena opiskelevia oli vuonna 1972-73 viitisentoista opiskelijaa ja luennot olivat seminaarimuotoisia. Luennolla syntyi kerran keskustelua siitä minkälaiseen työhön systeemiteoriaa opiskelleet olivat sijoittuneet. Muistan, että professori Blomberg mietittyään hieman totesi: ”Heistä on tullut professoreita”. Näin tilanne oli varmasti silloin. Jatkossakin monet systeemiteorian laboratorion valmistuneet jatkoivat tutkijan uralla. Ja monet meistä loivat poikkitieteellistä uraa soveltamalla systeemitekniisiä menetelmiä jollain erikoisalalla. Yksi näistä erikoisaloista liittyi biotekniikkaan. Systeemiteorian laboratorioon kehittyikin 1970-80 luvulla tutkimusryhmä, joka tutki systeemiteorian soveltamista biotekniisiin ja biologisiin tuotantoprosesseihin. Itse kuuluiin tähän tutkijaryhmään vuosina 1974-82, josta siirryin yrityselämään toteuttamaan tietojärjestelmiä, joilla hallitaan mainitunlaisia sovelluksia.

Bioteknisten prosessien systeemitekniikka

Suomeen oli 1980-luvun alkuun mennessä kehittynyt korkeatasoinen ja kansainvälisesti arvostettu tietotaito bioteknisten prosessien dynamiikasta. Tästä suhteellisen kapeasta erikoisalasta tuli systeemiteorian eräs tärkeä sovellusalue perinteisten puunjalostus- ja kaivosteollisuus- sekä voimalasovellusten rinnalla. Siemenet tähän oli kylvetty jo 1970-luvulla, kun Suomen Akatemia oli valinnut biotekniikan erääksi painopistealaksi ja alkoi rahoittaa alan tutkimusta. Myös ympäristötutkimuksen tärkeyteen alettiin kiinnittää huomiota ja se sai osakseen julkista rahoitusta. Teollisessa mittakaavassa jo 1970-luvulla toimineella Pekilo-prosessilla oli myös tärkeä vaikutus bioautomaatioalan kehitykseen Suomessa.

Pekiloprosessi oli Suomessa kehitetty ja patentoitu menetelmä, jolla fermentoimalla tuotettiin rehuksi tarkoitettua proteiinia sulfiittijäteliemestä, *Paecilomyces Varioti*-nimisellä mikro-organismilla. 1970-luvulla prosessit pyörivät tuotantomittakaavassa Yhtyneiden Paperitehtaiden tehtaalla Jämsänkoskella ja Serlachiuksen tehtaalla Mäntässä. Pekilo-prosessin kannattavuus perustui siihen, että se proteiinituotannon ohella toimi sulfiittiselluprosessin tuottaman jäteliemen biologisena puhdistusmenetelmänä. Pekiloprosessin käyttö loppui kun sulfiittisellun tuotanto 1980-luvulla loppui. Pekiloprosessin automatisointi perustui professori Aarne Halmeen johtaman tutkimusryhmän työhön johon käytettiin dynaamista mallittamista, simulointia, optimointia ja ohjausta.

Bioteknisten tuotantoprosessien ohella myös biologiset jätevedenpuhdistusmenetelmät olivat systeemitutkimuksen kohteena 1970- ja 1980-luvulla. Biologisista jätevedenpuhdistus-

prosesseista muodostui Pekilo-prosessin ohella toinen tärkeä bioautomaatiotutkimuksen sovellusala.

TKK:n systeemiteorian laboratoriossa oli vuosina 1975-1980 käynnissä laajamittainen hanke, jossa selvitettiin yhdyskuntajätevesien biologisten puhdistusprosessien dynamiikkaa ja säätöä. Lahden Kariniemen ja Tampereen Viinikanlahden jätevedenpuhdistamoilla sekä Suomenojan puhdistamon koeasemalla tehtiin suuren mittakaavan kokeita. Tutkimusryhmää johti systeemiteorian laboratorion osalta Jukka Ranta.

1980-luvulla aloitteellisuus tutkittavien prosessien osalta siirtyi vähitellen systeemi- ja säätötekniikan tutkijoilta biotekniikan alan tutkijoille, teollisuudelle sekä ohjelmisto-kehittäjille.

Biotyöasema

Vuonna 1988 TEKES käynnisti Bioteknologian kehittämisohjelman, jonka eräänä osa-alueena oli biotekninen tuotantotekniikka. Tästä syntyi Bioteknisten prosessien tutkimus- ja kehitysoasema -projekti, jonka tavoitteena oli kehittää ohjelmisto, ns. biotyöasema, jolla monipuolisesti voitaisiin hallita bioteknisten prosessien kehityksessä syntynyttä informaatiota. Ajatuksena oli tietynlainen "laboratoriosta tuotantoon" -konsepti, jonka avulla voitaisiin nopeuttaa bioteknisten prosessien tuotekehitysvaihetta tarjoamalla informaatiotekniset apuneuvot tehokkaalle koesuunnittelulle ja koetulosten analysointiin.

Projektin toteutuksesta vastasi TKK:n automaatiotekniikan laboratorio, professori Aarne Halmeen johdolla, kiinteässä yhteistyössä tulevien käyttäjien kanssa. Niitä edustivat Alko Oy Ab, Genesis Oy, Suomen Sokeri Oy / Cultor Oy, Kemira Oy, Valio sekä VTT/BIO. Provivo Oy (myöhemmin Whitelake Software Point Oy) oli mukana projektissa tulosten mahdollisena tuotteistajana. Kesäkuussa 1990 allekirjoitettiin sopimus, jonka mukaan projektissa kehitetyn ohjelmiston omistusoikeus siirtyi TKK:lta Provivo Oy:lle.

Mitä tutkittiin ja miksi?

Mikä sitten sai tutkijat vuodesta toiseen laatimaan matemaattisia malleja bioteknisille prosesseille? Mallit poikkesivat toisistaan vain vähän, ja tehtyjä hypoteeseja pystyttiin kokeellisesti ja biologisesti verifioimaan vain harvoin johtuen rajallisista mahdollisuuksista kerätä prosesseista reaaliaikaista mittausdataa tärkeimmistä prosessiparametreista. Tämä johtui vaikeuksista kehittää sopivaa instrumentointia. Biotekniset kasvatusprosessit edellyttävät täysin aseptista ympäristöä hermeettisesti suljetuissa astioissa, eikä antureiden puhdistaminen tai kalibrointi kesken käynnissä olevaa panosta ole mahdollista. Tämän vuoksi prosessien tilaa joudutaan seuraamaan epäsuorien parametrien avulla, kuten happi- ja hiilidioksiditaseesta ja pH:sta. Tämä teki erilaisten estimointialgoritmien käytön mielenkiintoiseksi. Toinen tekijä oli bioteknisten kasvuprosessien eksponentiaalisuus, joka teki niitä kuvaavista matemaattisista malleista epälineaarisia. Se taas toi uusia sovellusalueita

systemitutkijoille, jotka siihen aikaan hakivat haasteita jo hyvin hallinnassa olevan lineaarisen mallimaailman ulkopuolelta.

On myös muistettava, että vielä 1970-luvulla ja 1980-luvun alussa, ennen PC:n aikakautta, epälineaaristen differentiaaliyhtälömallien parametrien estimointi ja varsinkin simulointi oli hyvin työlästä.. TKK:n laskentakeskukseen toimitettiin illalla nippu reikäkortteja. Jos kaikki oli mennyt hyvin (eikä lävistyksessä sattunut esimerkiksi painovirheitä) seuraavana aamuna oli tulosliuska, jossa oli simulointitulokset muutamalle parametrikombinaatiolle. Käyrät piirrettiin tästä millimetripaperille ja julkaisukelpoiset tulokset vietiin sen jälkeen piirtäjälle puhtaaksi piirrettäväksi.

Alan ensimmäiset väitöskirjat Suomessa syntyivät 1980-luvun alussa, jolloin Markku Nihtilä, Jukka Ranta ja allekirjoittanut väittelivät systeemi- ja säätötekniikan laboratorioissa.

Ohjelmistoliiketoiminta

MFCS (Multi Fermentor Control System)

Tutkimus- ja tuotekehityshankkeiden menestyksen eräs arvointiperuste on keksintöjen ja menetelmien perusteella syntyneiden kaupallisten sovellusten onnistuminen. Tämä on kuitenkin usein arvioitavissa vastaa vuosien kuluttua.

Nyt vuonna 2013 on merkityksellistä todeta, että jo v. 1975 alkaneesta suomalaisesta bioautomaatioinnovaatiosta on syntynyt kansainvälinen ohjelmistotuote – MFCS (Multi Fermentor Control System), jota edelleen myydään alkuperäisellä nimellä ja alkuperäiseen tarkoitukseen ja josta sen nykyinen toimittaja Sartorius, toteaa sen olevan teollisuusstandardi.

MFCS:n prototyyppi PFCS (Pilot Fermentor Control System) kehitettiin VTT:n pilot fermentorin yhteyteen. Tällä 48 kB:n keskusmuistilla varustetulla Strömbergin Nova-tietokoneella ohjattiin mainittua pilottia aina 1980-luvun keskivaiheelle asti.

Suomalainen insinööritoimisto Rintekno Oy tuotteisti 1970-luvulla MFCS-järjestelmän, käyttäen DECin RSX-11M-käyttöjärjestelmällä varustettuja PDP-11-sarjan tietokoneita. Järjestelmä oli hierarkkinen ja liittyminen prosessiin mukaan lukien perussäädöt, toteutettiin mikroprosessoripohjaisilla järjestelmillä. Prosessin liittämiseen käytettiin muun muassa Outokummun Proscon-, Honeywellin TDC 2000- ja Beckmanin MV 8000-järjestelmiä. Järjestelmästä tuli nopeasti merkittävä vientituote; asiakkaita tuli tunnettuja kansainvälisiä biotekniikan tuotantoyrityksiä, kuten Miles Laboratories USA:ssa, Farmitalia Carlo Erba Italiassa sekä Bayer Saksassa.

Tuotteen suunnittelusta ja kehityksestä vastasivat Rinteknossa Arto Meskanen, Matti Tiainen, Juhani Jokela sekä Raimo Oinas, joka on osallistunut tuotteen suunnitteluun ja kehitykseen vielä 1990-luvulla. Ainutlaatuista MFCS-järjestelmässä oli sen ominaisuus ohjata ja seurata samanaikaisesti useita asynkronisesti käynnistettyjä panosprosesseja sekä tallentaa kaikki kerätyt tiedot myöhemmää analysointia varten. Tämä poikkesi sen ajan jatkuvatoimisten prosessitietokonejärjestelmien toimintatavasta. Vasta 1990-luvulla panosprosessien

erikoisluonteeseen alettiin yleisemmin kiinnittää huomiota, ja Suomen Automaatioseuraan perustettiin panosautomaatiojaos.

Vuonna 1986 Rintekno Oy myi MFCS-järjestelmän tuoteoikeudet saksalaiselle fermentori-valmistajalle B Braun Melsungen (nykyään Sartorius). Rintekno ja B Braun Melsungen kehittivät sen jälkeen yhdessä PC-pohjaisen version MFCS:tä TurboPascalilla. Raimo Oinas toimi tämänkin projektin pääarkkitehtina.

Kun B Braun Biotech vuonna 1994 päätti kehittää Windows-pohjaisen version MFCS:tä, kehitystyö tilattiin jälleen Suomesta, tällä kertaa Software Point Oy:ltä, jonka tekniseksi johtajaksi Raimo Oinas oli siirtynyt. B Braun siirtyi myöhemmin Sartoriukselle, joka nykyään toimittaa MFCS:ää.

MFCS-järjestelmää on myyty yli 6000 lisenssiä ympäri maailmaa. Yksi järjestelmä ohjaa keskimäärin 3-4 fermentoria joten tänään yli 20 000 laitetta ohjataan suomalaiskeksinnöllä MFCS. Käyttöliittymä ja toteutustekniikka perustuvat uusimpaan teknologiaan, mutta toiminnallisuus on edelleen tunnistettavissa ensimmäisestä järjestelmästä.

MFCS:n tarinaa voidaan pitää tyypillisenä esimerkkinä onnistuneesta tuoteideasta, jonka hedelmät poimitaan jossain muualla ja suomalaisille kehittäjille jää kunnia ja kädenpuristus. Tuotteen elinkaaren alkuvaiheissa automaatioitoimitukset olivat yksilöllisiä ja lähinnä rinnastettavissa projektivientiin, jolloin markkinointia ja myyntiä voitiin vielä kannattavasti hoitaa Suomesta. Siirryttäessä PC-ympäristöön, ohjelmistotuotteiden hinnat laskivat huomattavasti, jolloin kannattavan liiketoiminnan edellytyksenä oli maailmanlaajuiset markkinat ja hyvä, kattava jälleenmyyntiverkosto.

Whitelake Software Point Oy (Software Point)

Väiteltäessäni tekniikan tohtoriksi vuonna 1981 minulle tarjoutui harvinainen mahdollisuus siirtyä yrityselämään tehtäviin, joissa pystyin hyödyntämään tutkimusuralla ja väitöskirjatyössäni syntynyttä osaamista ja tietotaitoa. Siirryin Rintekno Oy:lle MFCS:n tuotepäälliköksi ja osallistuin tässä roolissa tuotteen edelleen kehittämiseen ja kaupallistamiseen.

Vuonna 1987 perustin muutaman kollegan kanssa Provivo Oy:n, jonka tarkoituksena oli biotekniikan hyödyntäminen ja kaupallistaminen. Provivon ensimmäinen projekti liittyi Helsingin Tiedepuiston suunnitteluun ja konseptointiin.

Provivo osallistui Biotyöasemaprojektiin, ja yritykseen syntyi 5-hengen bioautomaatioryhmä.

Whitelake Software Point Oy, syntyi Provivo Oy:n bioautomaatioryhmän management buy-outina vuonna 1992. Perustin Software Pointin yhdessä pitkäaikaisten työtovereitteni Raimo Oinaan ja Marjut Pokkisen kanssa.

Software Point tuotteisti TEKESin biotekniikan tutkimusohjelmassa 1988-1991 kehitettyä Biotyöasemaa nimellä BioBOSS. Ohjelmisto julkistettiin IFACin Biotekniikan Symposiumissa Coloradossa 1992 ja se herätti runsaasti huomiota. Ohjelmistosta myytiin kymmenkunta lisenssiä vuosina 1992-1993 myös Japaniin ja Yhdysvaltoihin. BioBOSSin

toimintaideat, jotka siis syntyivät tutkimushankkeessa, olivat aikaansa edellä. Tänäkin markkinoille on syntynyt runsas valikoima kaupallisia niin sanottuja ELN-järjestelmiä (Electronic Lab Notebook), joita käytetään bio- ja lääkeyritysten tuotekehitystyössä.

Software Point osallistui myös Raimo Oinaan johdolla MFCS:n Windows version kehittämiseen 1990-luvulla.

1990-luvun laman myötä Suomesta loppuivat panostukset biotekniikan tutkimukseen lähes kokonaan. Kotimarkkinoiden kadotessa biotekniikan osalta, Software Point päätti laajentaa toimintaansa bioteknisten prosessien tiedonhallinnasta laboratorioalan tiedonhallintaan. BioBOSS-tuotteen kehitys sai väistyä. Yritys päätti keskittyä kaikille laboratorioille soveltuviin LIMS-järjestelmiin (Laboratory Information Management System).

Erikoistuminen LIMS:iin 1990-luvun alussa osoittautui oikeaksi päätökseksi. LIMS-järjestelmät ovat tärkeitä laboratorioille niiden laatu- ja tietojärjestelmien tukena ja laman aikana monella yrityksellä oli vihdoin aikaa keskittyä laatu- ja tietojärjestelmiensä kehittämiseen ja tietojärjestelmiensä uusimiseen. Tähän aikaan siirryttiin yleisesti PC-pohjaisiin ratkaisuihin aiemmista keskitetyistä järjestelmistä. IT-sovellusten tuotteistaminen laski hintoja ja teki toimitusprojekteista hallittavampia.

Software Point on 22 toimintavuotensa aikana kasvanut sekä orgaanisesti, että yrityskaupoilla. Yritys on Pohjoismaiden johtava laboratorioiden tiedonhallintaohjelmistojen toimittaja. Aluksi asiakkaat olivat teollisuuden laadunvarmistuslaboratoriosta sekä palvelulaboratorioista. Nykyään toiminta on laajentunut myös sairaalalaboratorioihin.

Yhteenveto Software Pointin toiminnasta

- Perustettu 1992
- 100 % fokusoitunut LIMS:iin ja Laboratory Intelligence:iin
- LIMS-toimituksia yli 500 laboratorioon Pohjois-Euroopassa
- Asiakkaina mm sairaala-, lääke-, elintarvike-, teräs-, petrokemia sekä palvelulaboratoriot
- Huhtikuun 1, 2011 lähtien Software Point kuuluu globaaliin LABVANTAGE ryhmään, joka on yksi alan johtavia yrityksiä maailmanlaajuisesti
- Pohjoismaainen yritys, toimistoja Espoossa (pääkonttori), Tukholmassa, Lundissa, Linköpingissä ja Osllossa
- Yli 100 asiantuntijaa (IT-kemistejä), enemmistöllä DI- tai muu akateeminen tutkinto
- Liikevaihto v 2013 noin 13 miljoonaa euroa

Mitä hyötyä systeemiteoria on tuonut matkan varrella?

Ohjelmistoliiketoiminnan kehittäminen koostuu luonnollisesti monesta sellaisestakin osa-alueesta, joita systeemiteorian korkeakoulututkija joutuu hankkimaan muualta. Nämä liittyvät taloushallintaan, markkinointiin, myyntiin, henkilöstöhallintaan ja tuotteistamiseen. Systeemitekniikasta ja tutkimusmenetelmien soveltamisesta sekä systeemiajattelusta on kuitenkin ollut varsin paljon hyötyä käytännössä. Näistä mainittakoon

- Tilastollinen koesuunnittelu

- Monimuuttuja SPC (statistical process control)
- SPC:n soveltaminen laboratoriotuloksiin
- Mittausepävarmuudet, laadunvarmistus
- Electronic laboratory notebook (ELN), Bioworkstation oli esiate tälle.
- Prosessiteollisuuden erityistarpeiden ymmärtäminen

Vuosien varrella on kehittynyt kriittinen suhtautuminen teknologialähtöiseen tuotekehitykseen ja sen tosiasian ymmärtäminen, että asiakasnäkökulma aina on ensisijainen. Systemiajattelusta on hyötyä monenlaisessa ongelmanratkaisussa. Software Point on säilyttänyt kosketuspinnan Teknilliseen korkeakouluun ja Aalto yliopistoon lähinnä opiskelijoiden ja opinnäytetöiden kautta. Yrityksessä on tehty kymmenkunta diplomityötä.

Kirjoittajasta



Andrea Holmberg (andrea.holmberg@softwarepoint.com) on syntynyt Helsingissä 23.8.1949. Hän valmistui diplomi-insinööriksi Teknillisen korkeakoulun sähkötekniliseltä osastolta pääaineenaan systeemiteoria vuonna 1974. Hänen diplomityönsä käsitteli jatkuvatoimisen fermentointiprosessin mallittamista, optimointia ja ohjausta. Holmberg toimi TKK:n systeemiteorian laboratoriossa opetusassistenttina sekä Suomen Akatemian tutkimusassistenttina vuosina 1974-1982. Vuonna 1977 hän valmistui tekniikan lisensiaatiksi ja vuonna 1981 hän väitteli tekniikan tohtoriksi.

Väitelttyään Holmberg siirtyi Rintekno Oy:hyn MFCS-järjestelmän tuotepäälliköksi ja myöhemmin biotekniikan projektijohtajaksi. Vuonna 1987 hän oli mukana perustamassa Provivo Oy:n ja toimi sen tuotekehitysjohtajana vuosina 1987-92. Tänä aikana hän toimi Helsingin yliopiston Biotekniikan Instituutin suunnittelutyöryhmän sihteerinä sekä Helsingin Tiedepuistoprojektin suunnittelutehtävissä.

Vuodesta 1992 lähtien hän on toiminut Whitelake Software Point Oy:n toimitusjohtajana ja hallituksen jäsenenä ja vuodesta 2001 Software Point-konsernin johtajana.

1979-80 Holmberg toimi vierailevana tutkijana ja luennoitsijana Chalmersin teknillisen korkeakoulun säätötekniikan laitoksella Göteborgissa. 1982 hänet nimitettiin systeemi- ja automaatiotekniikan dosentiksi Teknillisessä korkeakoulussa.

Holmberg toimi Suomen IIASA-toimikunnassa 1995 - 97, Teknillisen korkeakoulun tiede-neuvostossa 2003-2010. Hänet kutsuttiin Svenska Tekniska Vetenskapsakademien i Finland jäseneksi 1992 ja toimi sen hallituksessa 2004 - 11 ja varapuheenjohtajana 2009 - 11. TAF:in elinkeinoneuvoston jäsen 2011 -.

Pohjoismaiden väestörakenteiden projektioita

Kyösti Tarvainen

Johdanto

Systeemianalyysin matemaattisia menetelmiä on alun perin kehitelty tekniikan sovellutuksiin, joissa yleensä on käytettävissä tarkkoja luonnontieteisiin perustuvia matemaattisia malleja. Mutta systeemianalyysi on nähty hyödylliseksi myös yhteiskunnallisissa sovellutuksissa, joissa ei ole tarkkoja malleja tai joissa on epävarmuutta mallin parametrien suhteen.

Yksi yhteiskunnallinen sovellusala ovat väestöennusteet. Tilastokeskukset tekevät ennusteita, jotka koskevat rekisteröityjä numerotietoja, mutta väestörakenteita voidaan tarkastella myös sellaisten ryhmien suhteen, joista ei ole rekisteröityjä tietoja tai jotka eivät ole tarkkarajaisia. Väestöryhmien lukumäärien lisäksi voidaan tarkastella, miten erilaiset yhteiskunnalliset asiat kehittyvät väestörakenteen muuttuessa.

Esimerkiksi kansainvälisessä systeemianalyysin instituutissa IIASA:ssa on väestömalleja kehittävä projekti *Age and Cohort Change*, joka tarkastelee monipuolisesti väestörakenteiden muutoksia. Sen yhdessä osaprojektissa on tutkittu uskonnollisuuden kehittymistä Euroopassa (Kaufman et al. 2012). Uskonnollisuuden nykyistä määrää ja sen muutostrendejä eri väestöryhmissä on arvioitu 30 vuoden aikana Euroopassa tehtyjen kyselyjen perusteella. Ottaen huomioon nämä lähtötiedot, maahanmuutto ja eri ryhmien koon kehitys tutkimus päättyi siihen tulokseen, että nykytrendistä huolimatta uskonnollisuus Euroopassa lisääntyy tällä vuosisadalla.

Toisessa osaprojektissa tarkastellaan huoltosuhdeasioihin liittyen väestön vanhenemisen vaikutuksia ihmisten fyysisiin ja kognitiivisiin taitoihin. Skirbekk et al. (2013) totesivat, että jos kognitiivisten kykyjen oletetaan edelleen paranevan ikäluokasta toiseen (ns. Flynnin efekti), niin väestön vanhenemisesta ja kunkin yksilön kognitiivisten taitojen heikkenemisestä huolimatta Englannin koko väestön keskimääräiset kognitiiviset kyvyt paranisivat tarkastellun aikavälin loppuun, vuoteen 2042 asti.

Seuraavassa tarkastellaan väestömallien matemaattisia perusteita, muutamia pohjoismaisia esimerkkejä (Islanti ei ole mukana) ja sitä, miksi väestömuutokset voivat tapahtua yllättävän nopeasti. Tässä kirjoituksessa käytetään monessa kohtaa sanaa ”ennuste”, vaikkakin asiallisempi termi on ”projektio”, sillä väestöennusteissa projisoidaan nykykehitys tulevaisuuteen eli tarkastellaan, mitä tapahtuu jos nykyinen kehitys jatkuu. Väestön kehitykseen liittyy biologisista syistä melko voimakasta determinismia, mutta luonnollisesti voi tapahtua hitaita sosiaalisia muutoksia, merkittäviä politiikan muutoksia, ennalta arvaamattomia tapahtumia. Eräitä selviä väestöprojektioiden epävarmuustekijöitä käsitellään jäljempänä.

Väestömallien matemaattiset perusteet

Väestömalleissa väestö yleensä jaetaan ikäluokkiin, jolloin esimerkiksi joka vuoden alussa tarkastellaan väestöryhmittäin, kuinka moni on 0-vuotias, 1-vuotias, 2-vuotias, jne. Matemaattisen mallin runko on erittäin yksinkertainen. Esimerkiksi jos jonkin vuoden alussa meillä on jossain väestöryhmässä tuhat 50-vuotiasta henkilöä, niin vuoden kuluttua 51-vuotiaita on muuten sama määrä, mutta siitä täytyy vähentää kuolleiden määrä ja lisätä maahanmuuttajien nettomäärä eli nettomuutto (maahan tulleet miinus maasta lähteneet). Kyseessä on ns. kohortti-komponenttimalli (Samuel Preston et al., 2001).

Tilastokeskukset ovat keränneet tietoja, kuinka monta prosenttia 50-vuotiaista ja muista ikäluokista kuolee vuoden aikana. On myös kertynyt tietoa siitä, miten eri ikäluokissa kuolleisuus on laskenut viime vuosikymmenten kuluessa ja nämä trendit on tapana ekstrapoloida tulevaisuuteen, vaikka aivan varmaa eliniän jatkuva pidentyminen ei ole. Ekstrapolointi voidaan tehdä regressioanalyysin avulla ja se voidaan tarkistaa katsomalla, että keskimääräisen eliniän kasvu jatkuu nykyistä rataa (Statistics Sweden, 2012). Kuolleisuusennusteiden epävarmuus vaikuttaa vanhusten määrään, mutta ei paljon eri väestöryhmien suhteellisiin osuuksiin.

Eniten epävarmuutta on maahanmuuton suhteen. Kaikissa Pohjoismaissa nettomuutossa on ollut kasvava trendi viime vuosikymmeninä, mutta Pohjoismaiden tilastokeskukset ovat konservatiivisia ennusteissaan. Suomen tilastokeskuksen vuoteen 2060 ulottuvassa väestöennusteessa (Tilastokeskus, 2012) on oletettu, että tulevaisuudessa nettomuutto olisi sama kuin vuonna 2011 eli 17 000 henkilöä. Ruotsin tilastokeskuksen (Statistics Sweden, 2012), Norjan tilastokeskuksen (Brunborg et al., 2012), ja Tanskan tilastokeskuksen (Tønnessen et al., 2012) väestöennusteissa (jotka ulottuvat vuoteen 2100 tai 2110) on oletettu, että nettomuutto tulee vähenemään. Vuoden 2030 jälkeen nettomuuton on oletettu olevan Ruotsissa 19 000 (nykyisin noin 45 000), Norjassa 10 000 (nykyisin noin 47 000), Tanskassa 8 000 (nykyisin noin 23 000).

Täsmällisiä perusteluita näille arvioille ei luonnollisesti voi esittää. Matemaattisesti kyse on aikasarjoihin liittyvästä ennustamistehtävästä, joka tulee esiin monissa systeemianalyysin sovellutuksissa ja jolle on esitetty erilaisia menetelmiä. Edellä tuli esiin, miten kuolleisuuden kohdalla voidaan käyttää regressioanalyysia. Nettomuuttoon tätä menettelyä ei voi soveltaa, koska se johtaisi mahdottoman suuriin määriin pidemmällä aikavälillä.

Suomen tilastokeskuksen valitsema tapa olettaa nykytilanteen jatkuvan on menettely, jota on käytetty ennusteissa, kun ei ole varmaa tietoa suunnan muutoksesta ja nähdään, että aikasarja ei voi kauan jatkaa nykyistä trendiään. Norjan tapauksessa suunnan muutos on todennäköinen, koska nykyinen korkea nettomuutto johtuu paljolti eurooppalaisista työntekijöistä, joita öljylöytöjen vauhdittama talous on palkannut. Norjan väestöennustetta varten on kerätty tilastoa siitä, kuinka monta prosenttia eri maista tulleista maahanmuuttajista muuttaa myöhemmin pois Norjasta, ja eurooppalaisilla paluumuutto on yleisintä.

Norjassa on tehty yksityiskohtaiset matemaattiset ennustemallit maastamuutolle ja maahanmuutolle. (Brunborg et al., 2012). Maastamuuton tapauksessa on kerätty tietoja

poismuuton todennäköisyyksistä ottaen huomioon mistä maaryhmästä henkilö on tullut, maahanmuuton syy, maassaolon pituus, ikä ja sukupuoli. Tällaista tilannetta voidaan mallittaa Markovin matriisien avulla. Maaryhmiä on kolme: länsimaat, Itä-Euroopan EU-maat ja muut maat.

Norjan maahanmuuttomallissa on käytetty hyväksi aiempaan dataan sovitettua Box-Jenkins -mallia, jossa on ekonometrinen osa, mutta myös maahanmuuttajien määrän vaikutus lisämuuttoon huomioidaan. Identifioituun malliin syötetään sitten arvioita talouden kehityksestä tällä vuosisadalla, mikä sisältää luonnollisesti paljon epävarmuutta.

Ruotsin tapauksessa vastaavanlaista suunnanmuutosta kuin Norjalle ei ole näköpiirissä, ja on esitetty edellä mainittua ennustetta korkeampia arvioita nettomuuton määrästä. Maahanmuuton rajoitusta ehdottaneille poliitikoille Ruotsin hallitus on vastannut, että se ei ole mahdollista kansainvälisten sopimusten takia. Muutama vuoteen Ruotsissa ei myöskään ole ollut ns. työvoiman saatavuusharkintaa EU:n ulkopuolelta tuleville työntekijöille.

Joka tapauksessa yleinen arvio on, että Pohjoismaat ovat tulevaisuudessakin – kylmästä ilmastostaan huolimatta – puoleensavetäviä maahanmuuton kohteita esimerkiksi palkkatason, sosiaaliturvan, sairaanhoidon ja lasten koulutusmahdollisuuksien vuoksi. Pohjoismaista on tullut suosittu maahanmuuton kohde, aivan niin kuin USA on ollut jo muutaman vuosisadan ajan. Erään gallupin mukaan 200 miljoonaa ei-eurooppalaista haluaisi muuttaa Eurooppaan.

Maahanmuuttajataustaisen väestön osuudella on taipumus kasvaa, kun maassa jo asuvat tukevat uusien, omiin etnisiin ryhmiinsä kuuluvien muuttoa. Maahanmuuttajille tulee huomattava määrä puolisoita ulkomailta. Esimerkiksi vuonna 2012 Ruotsiin tuli ulkomailta puolisoita ja muita sukulaisia noin 41 000, joista 19 000 oli uusia puolisoita (Migrationsverket, 2012).

Monille yhteisöllisistä kulttuureista tulleille maahanmuuttajille muodostuu ns. transnasionaalinen identiteetti, jolloin puoliso tulee melko usein taustamaasta. Kun maahanmuuttajataustaisten henkilöiden määrä kasvaa, myös ulkomaisten puolisoitten määrä pyrkii kasvamaan. Näin muodostuu positiivinen takaisinkytkentä. Se on uusi piirre klassisille väestömalleille, mutta voidaan ottaa huomioon. Siitä, kuinka monta prosenttia kustakin maahanmuuttajaryhmästä saa puolison ulkomailta, on kerätty tietoja tai prosenttiosuudet voi karkeasti identifioida väestötiedoista.

Ikäluokkien kohdalla erikoistapaus ovat 0-vuotiaat, joiden määrän muutos muodostuu maahanmuuttajien lisäksi vuoden aikana syntyneistä vauvoista. On kerätty tilastotietoa siitä, kuinka monta prosenttia esimerkiksi 30-vuotiaista ja muiden ikäluokkien naisista synnyttää lapsen vuoden aikana. Pohjoismaiden tilastokeskukset olettavat ennusteissaan, että kanta-väestön nykyiset syntyvyysasteet pätevät tulevaisuudessakin. Maahanmuuttajataustaisten kohdalla syntyvyyden kehitystä voidaan arvioida niiden maiden (esimerkiksi Britannian) tilastojen avulla, joihin on ollut Pohjoismaita pidempään maahanmuuttoa. Mutta jonkin verran on epävarmuutta eräistä köyhistä maista tulevien naisten hedelmällisyyden kehittymisen suhteen: lähtömaiden korkea syntyvyys on laskusuunnassa, mutta ei ole varmuutta, mihin se

tulevaisuudessa asettuu. Tulevaa kehitystä voidaan arvioida epälineaarisen regressioanalyysin avulla.

Väestöryhmistä

Väestön koostumuksen kehitystä esimerkiksi etnisyyden ja uskontojen suhteen on systemaattisesti seurattu ns. anglo-maiden (Britannia, USA, Kanada, Australia, Uusi Seelanti) väestölaskennoissa. Näissä maissa jokainen itse ilmoittaa annettujen valintamahdollisuuksien puitteissa, mihin etniseen, rodulliseen, uskonnolliseen tai muuhun ryhmään samaistuu; kyseltävät asiat tosin vaihtelevat maittain. Myös erilaisia sekaryhmiä on valittavana.

Muissa maissa väestörakenteen muutoksista ei saada tällaista suoraa tietoa, vaan käytetään esimerkiksi gallupeja ja muita arviointitapoja. Suomessa ja Venäjällä erikoisuutena on se, että äidinkieli rekisteröidään, minkä perusteella voidaan arvioida esimerkiksi väestön etnistä rakennetta.

Äidinkielen rekisteröinnin johdosta Helsingin, Espoon ja Vantaan kaupungit ovat voineet laatia ennusteen siitä, miten eri äidinkieliä puhuvien henkilöiden määrä kehittyy vuosina 2013–2030 näissä kaupungeissa ja Helsingin seudulla (Helsingin kaupungin tietokeskus, 2012).

Väestöryhmien projektioita vuosiksi 2061 ja 2100

Nykyisin Pohjoismaiden tilastoissa maahanmuuttajataustaisiksi määritellään henkilöt, jotka ovat syntyneet ulkomailla tai joiden molemmat vanhemmat ovat syntyneet ulkomailla. Tämän määrittelyn mukaisesti maahanmuuttajataustaisten henkilöiden osuudet vuonna 2010 olivat seuraavat: Suomi 4,8 %, Ruotsi 19 %, Norja 11 %, Tanska 9,8 %. Pohjoismaiden tilastoissa muut kuin maahanmuuttajataustaiset ovat suomalais-, ruotsalais-, norjalais- tai tanskalais-taustaisia tai esimerkiksi Suomen kohdalla ”suomalaista syntyperää”.

Tämä maahanmuuttajataustaisten henkilöiden määritelmä toimii Suomessa hyvin vielä useita vuosia, mutta pidemmän päälle se ei kuvasta hyvin demografista tilannetta. Norjassa, Ruotsissa ja Tanskassa on jo ollut keskustelua tämän määritelmän käyttökelpoisuudesta, koska osa kolmannen polven maahanmuuttajista identifioituu vahvasti lähtömaista peräisin oleviin kulttuureihin. Määritelmää on arvosteltu myös sillä perusteella, että jos maahanmuutto loppuisi, kaikki maan asukkaat olisivat muutamien vuosikymmenten jälkeen samaa, kansallista alkuperää. Yhtenä parannusmahdollisuutena Norjan tilastokeskuksessa on tehnyt monia yhdistelmiä sisältävä tilasto, jossa on otettu huomioon kolmessa sukupolvessa, onko henkilö syntynyt Norjassa vai ulkomailla.

Pohjoismaiden tilastokeskusten nykyisistä määritelmistä poiketen Eurostatin projektioissa (Lanzieri, 2000) kolmatta ja korkeampia maahanmuuttajapolvia on edelleen pidetty maahanmuuttajataustaisina. Väestö on siten jaettu kahteen erilliseen väestöryhmään ja maahanmuuttajataustaisen väestön assimiloitumista kantaväestöön esimerkiksi avioliittojen kautta ei ole huomioitu. Eurostatin lähestymistavassa kantaväestön suhteellinen osuus siten itse asiassa

mittaa historiallisen kantaväestön geenien suhteellista osuutta. Eurostatin ennusteen mukaan Suomen maahanmuuttajataustaisen väestön osuus vuonna 2061 on 20 %.

Huomattakoon, mihin jo edellä viitattiin, että Eurostatin kaltaiset ennusteet tarkastelevat väestöä geneettisesti ja etnisesti, ei kulttuurisesti. Sen tarkastelu, millaisia kulttuurisia eroja on ja mikä niiden mahdollinen negatiivinen tai positiivinen merkitys on, jää henkilökohtaisten arvioiden varaan. Paljon eroja nähdään myös eri maahanmuuttajaryhmien välillä. Norjan ja Tanskan tilastokeskusten käyttämä jako länsimaisiin, ja ei-länsimaisiin maahanmuuttajiin antaa yhden mahdollisen näkökulman. Ruotsin tilastokeskus käyttää maaryhmäjoissaan YK:n inhimillisen kehityksen indeksiä HDI (Human Development Index).

Eurostatin mallia voi kehittää ottamalla huomioon, että osa maahanmuuttajataustaisista assimiloituu kantaväestöön avioliittojen kautta yhden tai useamman sukupolven kuluessa. Iso-Britannian ja USA:n väestölaskentojen perusteella, joissa ihmisten identifioitumista eri ryhmiin voidaan seurata, assimiloituminen on suhteellisen vähäistä. Ruotsin tilastokeskuksen avioliittoja koskevista tiedoista voi arvioida, että Ruotsissa noin 5 % kantaruotsalaisista avioituu maahanmuuttajataustaisen henkilön kanssa. Voimme käyttää tätä prosenttilukua likiarvona kaikille Pohjoismaille ja huomioida se matemaattisessa mallissa siten, että vuosittain uusista maahanmuuttajista kantaväestöön siirtyy määrä, joka on 5 prosenttia kantaväestön ikäluokan suuruudesta.

Ottaen huomioon assimiloitumisen ja käyttäen edellä mainittuja tilastokeskusten arvioita nettomuutosta, saamme vuoden 2100 maahanmuuttajataustaisen väestön osuudeksi seuraavat arviot: Suomi 30 %, Ruotsi 43 %, Norja 34 %, Tanska 26 %. Coleman (2006, s. 416) arvioi, että vuonna 2100 Ruotsin maahanmuuttajataustaisen väestön määrä voisi olla yli 50 %, minkä poikkeaminen mainitusta 43 %:sta aiheutuu lähinnä oletettujen nettomuuttojen erosta.

Pääpiirteissään kaikkien Pohjoismaiden väestökehitys on varsin samanlaista. Suomi tulee maahanmuuttajaväestön suhteellisessa määrässä noin 40 vuotta Ruotsin perässä.

Matemaattisten mallien avulla on helppo tarkastella erilaisia skenaarioita. Esimerkiksi voidaan tutkia, miten tilanne kehittyä, jos nykyisen suuruinen nettomuutto jatkuisi. Maahanmuuttajataustainen väestö voidaan myös helposti jakaa Tanskan ja Norjan tilastokeskusten tavalla länsimaalaisiin ja ei-länsimaalaisiin. Matemaattisen mallin avulla voidaan tehdä helposti myös herkkyysanalyysi sen suhteen, miten eri lähtötiedot ja olettamukset vaikuttavat ennusteisiin. Tällöin nähdään, että nettomuutto on ratkaisevin tekijä.

Kvalitatiivisia tarkasteluita

Systeemiä mallinnettaessa on aina hyvä olla näkemys sen keskeisistä vaikutussuhteista. Väestömallien kohdalla voidaan tällöin ymmärtää, miksi yllättävän nopeat muutokset ovat mahdollisia, vaikka nettomuuton määrä on pieni koko väestöön nähden.

Selitys on se, että tulee verrata nettomuuttoa syntyvien lukumäärään. Kunkin väestöryhmän uusien jäsenten määrään riippuu kahdesta tekijästä: syntyneistä ja maahanmuuttajista.

Tarkastellaan esimerkkinä maahanmuuttoa Ruotsiin vuonna 2009. Nettomuutto oli 63 000 henkilöä, joka on pieni määrä silloiseen noin 9 400 000 asukkaaseen verrattuna. Mutta tilanne näyttää toisenlaiselta, kun nettomuutto suhteutetaan syntyneisiin. Kantaruotsalaisille äideille syntyi noin 86 000 lasta ja maahanmuuttajataustaisille noin 26 000. Siten uusien maahanmuuttajataustaisten henkilöiden lukumäärä oli yhteensä 89 000 (= 63 000 + 26 000), mikä lisäys oli – ei ainoastaan prosentuaalisesti – vaan jopa absoluuttisesti suurempi kuin uusien kantaruotsalaisten lukumäärä 86 000. Jos tämä tilanne jatkuisi sata vuotta jokaisen uuden ikäluokan kohdalla, niin ilman väestömallien tietokoneajojakin on ilmeistä, että etniset ruotsalaiset jäisivät vähemmistöksi noin sadassa vuodessa.

Maahanmuuttajataustaisen väestön keskimääräinen syntyvyys on lähellä kantaväestön syntyvyyttä. Siten jos uutta maahanmuuttoa ei olisi, maahanmuuttajaväestön osuus pysyisi suunnilleen vakiona tai voisi vähentyä assimilaation johdosta. Mutta koska maahanmuuttoa on paljon syntyneisiin nähden, maahanmuuttajataustaisen väestön osuus kasvaa. Tällainen vuodesta toiseen jatkuva suuri maahanmuutto (myös Euroopan ulkopuolelta) on historiallisesti uusi asia Pohjoismaissa ja sen suuruus ylittää huomattavasti sellaisen assimilaation laajuuden, joka perinteisesti – niin kuninkaallisten kuin kansan parissa – on tapahtunut avioliittojen kautta.

Ruotsin vuoden 2009 esimerkissä nettomuutto on 56 % syntyneiden määrästä. Tämä on huomattavasti suurempi luku kuin siirtolaisten maassa USA:ssa, jossa vastaava prosenttiluku vuonna 2012 oli 25 %. Tämä Yhdysvaltojen prosenttiluku ylitetään nykyisin kaikissa Pohjoismaissa.

Yhdysvallat toimii selkeänä vertailukohtena väestölaskentansa ansiosta. Vuoteen 1965 asti USA:han saivat muuttaa lähinnä vain eurooppalaistaustaiset henkilöt. Mutta kun rajoitukset poistettiin, valtaosa maahanmuuttajista alkoi olla ei-eurooppalaisperäisiä. Tämä näkyy siinä, että USA:n tilastokeskuksen mukaan vuonna 2012 syntyneistä alle 50 % oli valkoihoisia ei-latinoita. Tilastokeskus ennustaa, että tämän etnisen ryhmän osuus koko väestössä laskee alle 50 prosentin vuonna 2042.

Viitteitä

Brunborg, H., I. Texmon og M. Tønnessen (2012). Befolkningsframskrivninger 2012-2100: Resultater. Økonomiske analyser 4/2012.

<http://www.ssb.no/emner/08/05/10/oa/201204/oa2012-4.pdf> (samassa lehdessä on tätä ennen kaksi artikkelia mallin oletuksista).

Coleman, D. (2006). Immigration and Ethnic Change in Low-Fertility Countries: A third Demographic Transition. *Population and Development Review* 32(3):401-446.

http://www.spsw.ox.ac.uk/fileadmin/documents/pdf/WP33_Third_Demographic_Transition.pdf

Hansen, M.F. and P. Stephensen 2011. Danmarks fremtidige befolkning, befolkningsfremskrivning 2011. <http://www.dreammodel.dk/pdf/Befolkning2011.pdf>

Helsingin kaupungin tietokeskus, 2012. Helsingin seudun vieraskielisen väestön ennuste 2013-2030. Tilastoja 2012:31.

http://www.hel.fi/hel2/tietokeskus/julkaisut/pdf/13_02_11_Tilastoja_5_Vuori.pdf

Kaufmann, E, A. Goujon, V. Skirbekk 2012. The end of secularization in Europe?: A socio-demographic perspective. *Sociology of Religion*, 73(1):69-91.

Lanzieri, G, 2011. Fewer, older and multicultural? Projections of the EU populations by foreign/national background. Eurostat, European commission.

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product_details/publication?p_product_code=KS-RA-11-019

Preston, S., P. Heuveline, M. Guillot (2001). *Demography: Measuring and Modeling Population Processes: Measuring and Modelling Population Processes*. Blackwell.

Migrationsverket, 2012. Beviljade uppehållstillstånd och registrerade uppehållsrätter, första och andra instans. Förstagångstillstånd. Helåret 2012.

<http://www.migrationsverket.se/download/18.43648b4513b902d42692f60/Beviljade+uppeh%C3%A5llstillst%C3%A5nd+och+registrerade+uppeh%C3%A5llsr%C3%A4tter+2012.pdf>

Statistics Sweden 2012. Sveriges framtida befolkning 2012:2. Demografiska rapporter 2012:2.

http://www.scb.se/statistik/_publikationer/BE0401_2012I60_BR_BE51BR1202.pdf (tässä raportissa tarkastellaan vuosia 2012-2060; ennusteet ja oletukset vuoteen 2110 asti löytyvät Ruotsin tilastokeskuksen <http://www.scb.se/> tiedostoista.)

Skirbekk V, M. Stonawski, E. Bonsang, UM Staudinger 2013. The Flynn effect and population aging. *Intelligence*, 41(3):169-177, May-June 2013.

Tilastokeskus, 2012. Väestöennuste 2012-2060.

http://tilastokeskus.fi/til/vaenn/2012/vaenn_2012_2012-09-28_fi.pdf

Kirjoittajasta



Kyösti Tarvainen (Pitkämäentie 24 D, 00670 Helsinki, kyosti.tarvainen@gmail.com) syntyi 14.12.1947 Helsingissä. Hän suoritti vuonna 1974 diplomi-insinöörin tutkinnon Teknillisessä korkeakoulussa teknillisen fysiikan osaston matematiikkalinjalla. Diplomityö käsitteli paperikoneeseen liittyvää matemaattista mallia. Vuonna 1978 valmistui tekniikan lisensiaatin tutkinto, jonka numeerista optimointia koskenut opinnäyte tehtiin Systeemiteorian laboratoriossa. Systeemiteorian assistenttina hän oli toiminut vuodesta 1972 lähtien. Vuosina 1978-1981 hän työskenteli assistenttina ja tutkijana Case Western Reserve Universityn systeemianalyysin ja tietotekniikan osastolla suorittaen PhD-tutkinnon, jonka työ koski monitavoitteista optimointia energian varastointijärjestelmissä.

Vuosina 1982-1988 työ Suomen Akatemian tutkijana Systeemianalyysin laboratoriossa oli perustutkimusta hierarkkisessa monitavoitteisessa optimoinnissa. Vuosien 1988-1996 työskentely Rolf Nevalinna-instituutissa liittyi matemaattiseen mallinnukseen erilaisissa teollisuusmatematiikan projekteissa. Vuosina 1997-2012 hän opetti matematiikkaa insinööriopiskelijoille, viimeiseksi yliopettajana Metropolia ammattikorkeakoulussa.

Systems in Practice – Some Applications of Systems Theory

Martin Ollus

Introduction

This paper contains some reflections on the personal experience of applying Systems Theory and systems thinking in different areas. The text describes activities, in which I have been involved during my professional career. The activities include applications and solutions for both technical and organizational - including managerial - improvements. The time span covers an era from late 1960's to early 2010's. Although, Systems Theory today refers to many different kinds of systems, this presentation mainly focuses on applications in industrial or business environments.

The presentation aims to connect the described applications to their context considering three dimensions: (1) advances in the theory and methodology, (2) development of enabling technologies, especially information and communication technology (ICT), and (3) needs and expectations in the environment. Naturally, these dimensions are interdependent. For instance, the globalization has had an increasing impact on needs and expectations during recent years. Simultaneously, advances in ICT have been an important enabler and driver for globalization. The enablers also contribute significantly to the appearance of new possibilities, which again generate new expectations and needs on the markets.

In the applications described in this paper, Systems Theory is used to understand the systems and their behaviour. Consequently, models of the real systems and their environment play an important role. The paper describes applications, where the understanding of the reality is used for some specific purposes, like control of the behaviour of the modelled system or for anticipation of its future behaviour.

The paper starts by presenting some of my personal activities roughly in a chronological order and in the context of the environment and advances in theory and technology. The relation to the context is further discussed in a summary chapter. At the end, I try to generalize my experiences by discussing personal lessons learned. I present some opinions about different issues and I also try to give some hints for further research.

Early applications of Systems Theory

Computer control in pulp and paper production

In the 60's, computers were introduced to control paper machines. One of the first aims was to continuously maintain the quality of the product at the wanted level, within predefined

tolerances. The basis weight and moisture of the paper are some main parameters describing the quality of the paper. Consequently, the control of these features was one of the objectives for the application of computer control in the paper industry. A well-known early application for control of these features was developed by Karl Johan Åström and Torsten Bohlin and implemented in Billerud in Sweden (Åström & Bohlin 1965, Bohlin 1970).

In Finland, Juhani Korhonen applied computer control of the basis weight and moisture of the paper at the Kaukopää Mill of Enso Gutzeit in 1965 (Korhonen 2001, Tuomi 2001). Both in Billerud and Kaukopää applications, the IBM 1710 computer was used.

Naturally, control applications require knowledge about the features to be controlled, they must be measured. During the second half of the 1960's, fast, on-line technology for measuring paper quality from the web appeared on the markets. The two main providers of the equipment were Measurex and Accuray (Rouhesmaa 2001). Some of the first systems on the markets were delivered to Finland.

Personal early activities

My thesis for graduation from the Technical University dealt with the identification of models for a pulp mill. I calculated models for the impulse response based on measured data. The work was performed using the computer IBM 1620 at the university, the same computer model as used in the early paper control applications.

During the period 1969 -1971, Raimo Ylinen (another contributor to this report) and I developed control algorithms for on-line control of the basis weight and moisture of the web in paper production. The work was done for Nokia Electronics and our supervisor was Juhani Korhonen, who at that time led the development of computer applications in the pulp and paper industry in the company. We eagerly studied new methods and recent applications both for identification of process models and for control applications. As a result, a control package, called AUTOPAPER, was developed and installed at two different paper mills, Voikkaa Mill in Kuusankoski and Nokia Mill in Nokia. The implementation was made on a PDP 8 computer, which was one of the first minicomputers on the market. We calculated most of the models using the least-square estimation (Luenberger, 1969). For the control, we developed optimization algorithms with a moving horizon. For state estimation, we applied the Kalman filter approach (Kalman 1960).

Some nuclear power applications and their impact

The construction of the first Finnish nuclear power plant (Loviisa 1) started in 1971 and it was taken into operation in 1977 (Vuorinen 1975). As the capacity of the plant was planned to be ca 30% of the total power in the Finnish grid, there were concerns about its impact on the stability and the control of the grid (Haapanen & Winter 1975). To study the dynamics and the interactions between the plant and the grid, fairly large activities, led by VTT, were initiated in the late 60's. Much of the studies were based on simulation with models of both the plant and the grid. At that time, the capacity of digital computers was not good enough to

fulfil the requirements for real-time simulation. Consequently, a hybrid computer, using both analog and digital computing, was acquired for the purpose (Winter 2001).



The hybrid computer at VTT

As a part of the safety of the plant, the training of the operators for the plant gave reasons for concern. At an early stage it was decided to use simulators for training the operators. I moved to VTT in 1972 to participate in the acquisition of a training simulator. After an offering process, Nokia was chosen to deliver the full scope training simulator. I participated in the specification of the requirements and the acceptance procedures of the simulator, including the acceptance tests, within the frame of a contract between VTT and Imatran Voima, the utility company and receiver of the simulator. Later, the scope was extended to the creation of training programmes for the control room operators (Salminen et al. 1974, Heimburger & Ollus, 1975).

The activities around the nuclear power program in Finland have had a great importance in generating new research and business e.g. at VTT. Simulation technology became an important R&D area, from which international business has been generated (<http://www.apros.fi/en/>). The work related to operator training also initiated research in the operators' work environment. Much of the present man/machine and organizational research at VTT has its roots there. Also many of the process automation activities at VTT can be considered to be a continuation of work started in relation to the nuclear programme.

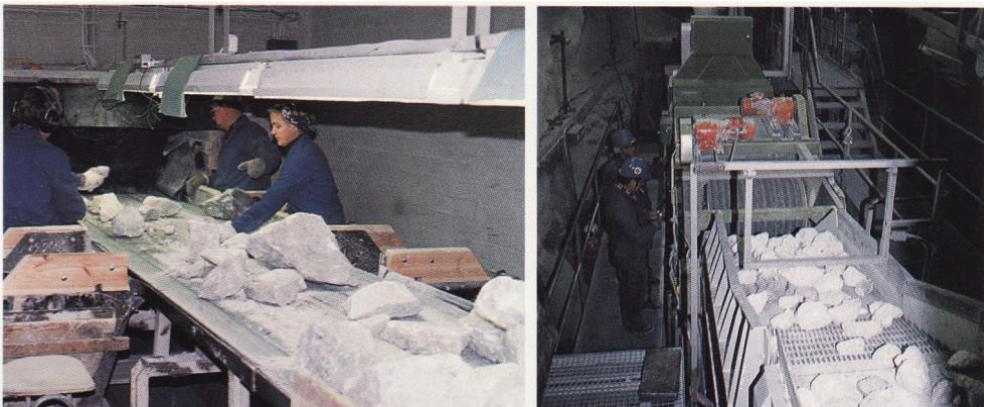
Microprocessors in automation

Intel introduced the first 4-bit microprocessor in 1971 and a process with an enormous impact in the whole society started. Personally, I became involved in the process at a quite early stage. In the following sections, two early development efforts are described together with an assessment of their later impact. Although the appearance of the new hardware had dramatic consequences, the real impact was not in the hardware itself, but in the possibilities for new applications and the ability to realize new solutions for both existing and even new problems.

Seeing and learning sorter

In the mid-70's, VTT got a contract for the development of a system for sorting ore based on latest technological achievements. In the first applications, rocks containing limestone were separated from side stones based on analyses of the image of the ore. The image was captured by one of the first digital semiconductor imaging cameras on the market. From the captured images, individual rocks and their positions on a running conveyor belt were identified. Important features characterizing the quality were extracted and used to recognize whether a piece of rock contained enough limestone or not. Based on the recognition, the side stones were separated mechanically. The sorter had a high capacity. It could sort tons of ore in a few minutes (Mäenpää et al. 1982). The solutions were patented and the patents were later sold to a Canadian/Australian company.

In the realization of the sorter, the new microprocessor technology was used. The first system consisted of 32 independent microcontrollers (Intel 8048) connected to a common communication bus and classifying the rocks in parallel. To achieve the needed capacity, the feature extraction was performed by hard-wired electronics.



The manual sorting of ore (left) could be replaced by the sorter

The sorter had a learning capability. It formed prototype vectors with features characterizing both the limestone and the side stones during a learning phase. During the sorting, the system calculated the distance to the prototype vectors for the actual feature vectors of each rock. A rock was classified based on this distance.

The development of the sorter was the very first microprocessor control application in our research group and it was also our first work on image processing. In both areas, the research activities grew fast. However, we tried to keep our applications in the automation domain. Images were considered as measurement inputs for automation purposes and the microprocessors were efficient enablers for the realization of new solutions, e.g. control.

Digital process automation

In the 1970's, electronic instrumentation systems had largely replaced the previous pneumatic applications. E.g. in the Loviisa nuclear power plants, the operations were performed using modular analog electronic instrumentation. The Finnish company Valmet introduced a similar own modular system on the markets in 1975. The same year, Honeywell introduced its microprocessor based distributed digital automation system TDC 2000, which took over the markets for instrumentation systems. As a consequence, Valmet started to develop an own digital system, which got the name Damatic. VTT was deeply involved in the development project, which was considered to be the second biggest software project so far in Finland. In the development project, some of the strengths of VTT were experiences in:



A Damatic control room

- Distributed real-time microprocessor applications from the sorter project
- Analog process automation from the Loviisa nuclear power activities
- Real-time simulation
- Interfaces between analog and digital technology

The development project was very intensive and the first application was delivered to the Pankakoski paper mill in 1979. The first application contained 101 microprocessor units connected to a communication bus. During the development phase, also a second system was sold to Sweden. The system was very successful and remained in production for almost 20 years (Rouhesmaa 2003). Due to the Damatic system, Valmet became the leading provider of automation systems for the pulp and paper industry, but their systems were used in almost all sectors of the process industry.

The system performed all functions of the previous analog (electronic or pneumatic) systems. However, the digital realization enabled a more flexible configuration for different applications. Also the operation from a control room equipped with a few monitors and keyboards allowed a more convenient use than the previous hard-wired systems, in which every single control loop had its own operation point. In addition, the connection to upper level systems (process computers, production management) was simpler due to the digital technology. These features seem to be some of the reasons to the very good response and fast penetration on the markets. The system used concepts and functionalities from the previous analog solutions, which were well known by the industrial community. Also the user interfaces to different activities (planning, operation, maintenance) were realized in an easily understandable manner and were easy to use.

The Damatic system was realized with technology available at late 1970's. A continuous concern in the development project was the computing power, both the speed of the processors and the memory sizes. The basic unit called (process station) could handle 16 control loops using one microprocessor and a working RAM-memory of 128k. The program memory EPROM was 4M. To cope with the needed features, own fast algorithms had to be developed for several different purposes. Also the packing and allocation of data was a continuous concern. To handle all the needed actions, an own, quite simple synchronous operative system was developed (Wahlström et al. 1983). To cope with the real-time requirements, many special solutions had to be developed, e.g. own special fast algorithms for floating operations (multiplication, division, etc.) were used in the system.

In addition to the commercial success for Valmet, the Damatic project had a major impact also at VTT, where over 20% of the project development work was done (Wahlström 2001). VTT had the main responsibility for the development of the following parts:

- Operative system
- Communications principles
- Functional blocks (process application software)
- Motor and valve control (sequence control and logic)
- Application configuration system
- Control room

In many cases, the work consisted of definitions and specifications of the functionality, but sometimes also concrete software coding was done at VTT.

Towards factory automation

Advances in manufacturing automation

During the 1980's, information technology entered into the manufacturing area. Light microprocessor based CAD systems (e.g. AutoCAD) replaced previous large and expensive systems. The new technology also penetrated into the factories. Numerically controlled machines became affordable on the shop-floor, so also industrial robots. Different manufacturing functions (material handling, machining, etc.) were integrated in so called Flexible Manufacturing Systems (FMS). To cope with these trends, the concept of Computer Integrated Manufacturing (CIM) was introduced to describe an approach using computers to control the whole production process. The new technology achieved a large interest also in Finland (Ranta et al, 1988). The interest was mainly in implementing and using the technology, but also providers of automation solutions appeared. With our own background in using latest information technology for automation purposes, we started to contribute to the research in the area. One main interest was in the concept "flexibility". What were the dimensions of flexibility and what was its economic impact and especially on the restructuring of the Finnish industry? One special interest was to understand the shift from a heavy industry, with bulk products, towards production of more customer specific products (Ranta et al. 1988).

Expansion of the application domains

Together with the new applications in the manufacturing domain, the impact also increased. It was not only restricted to the production processes. The applications of the new information technology increasingly impact on business, working environment, and many other activities and processes in the society. An increasing interest in understanding the importance of these trends appeared. One result of this interest was a large international programme called TES (Technology, Economy, Society) initiated by the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Vienna in order to study the interactions between these three disciplines.

One project in the TES-programme was the so called CIM-project, in which many aspects of the advances in manufacturing were studied. The project also established a data-base containing the main information about most flexible manufacturing systems in the world at that time. Jukka Ranta from VTT was project manager for the CIM project for several years. In Finland, SITRA (The Finnish Innovation Fund) funded a national TES program working closely with the project at IIASA. I became the leader of this program, which studied the impact of the new manufacturing paradigm on the Finnish industry. Both concrete development activities in companies and organizations, but also more basic research, were done. Also the challenges for regional development were studied. To enhance awareness and to disseminate information about activities and achievements in the area, the program arranged seminars and other events. The interactions and the dynamics in the studied areas were summarized in the final report (Ollus et al. 1990).

In addition to the concrete results, the TES program created a large contact network both domestically and internationally. It also formed the basis for later research on manufacturing networks and global production. The work on understanding flexibility also created an activity to apply the ideas in a traditional bulk production. A project studying the possibilities for flexible and efficient customer orientation in paper production was initiated. The outcome of the work stressed the need to rethink the production from an overall, holistic perspective. Especially in the production planning and production management, possibilities for improvement were identified (Ranta et al. 1992).

As a result of these activities, our group at VTT got a world-wide network of contacts and become recognized as a relevant player in the field.

Intelligent Manufacturing

Applications of information technology and CIM technology enabled new and “intelligent” manufacturing solutions. In 1989, Professor Hiroyuki Yoshikawa, then President of the University of Tokyo suggested global research collaboration about these issues. His vision was “global industrial cooperation and technology sharing in cooperative projects for the benefit of mankind”. Based on his initiative, a collaborative, industry-lead research programme, Intelligent Manufacturing Systems – IMS, started in 1995 with the aim to develop the next generation of manufacturing and processing technologies through multi-lateral collaboration (www.ims.org).

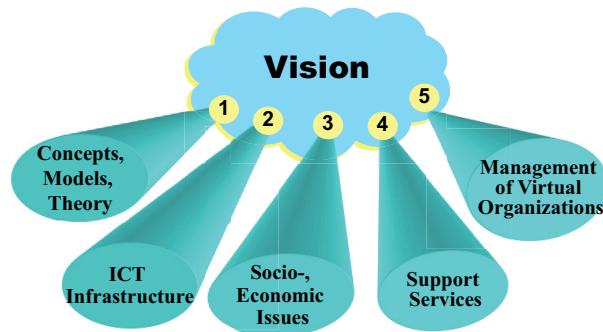
From the start of the IMS-activity, Finland and VTT were very active. I participated in two of the first seven projects and later on in one further project. All projects were supported by TEKES (The Finnish Funding Agency for Innovation). The projects had industrial and research partners from several European countries, US, Japan, Australia and Canada. In these projects, we studied some of the foundations for collaborative manufacturing. Solutions were developed and demonstrated together with global manufacturing companies (Karvonen et al, 2003):

- Globally integrated manufacturing across time and space
- Business processes of the future.
- New paradigms, models and methods for global manufacturing:
- Product life-cycle & extended enterprise management
- Post mass production paradigm
- Knowledge systematization and knowledge deployment: soft artefacts, and virtual manufacturing
- Generic reference architecture for extended and virtual manufacturing enterprises
- Guidelines and handbooks for virtual manufacturing enterprises

Global networks

Production networks

The IMS projects introduced issues and problems related to global manufacturing and production in networks, which were not well understood. Without good understanding of the processes, their management cannot either be efficient. Around the world, an interest in network management appeared. Starting from year 2000, our research group participated together with several different partners in ca 10 international research projects dealing with issues related to the management of networked manufacturing. We also analysed previous and ongoing research in the area of networked and virtual organizations. Significant



Research focuses for collaborative networks

activities were identified in three main areas (Camarinha-Matos et al. 2004, Camarinha-Matos et al. 2005): concepts and models, infrastructures, and implementation issues. However, the research was very much focussed on the information exchange between partners and on collaborative IT-platforms. A deeper understanding of the collaboration itself was found to be necessary. Five research areas related to collaboration in networks were identified and suggested to be in focus for future research (see figure):

- Theoretical foundation
- Infrastructure
- Socio- economic considerations
- Services to support networking
- Management of networked activities

Methods and tools for networking

In line with the research focuses defined above, a European research project (ECOLEAD - European Collaborative networked Organizations LEADership initiative; 2004 - 2008) was initiated to contribute to the development of approaches for a variety of aspects on networking and collaboration. It aimed “to create the necessary strong foundations and mechanisms for establishing advanced collaborative and network-based industry society in Europe”. I became the project manager of this project. In addition to a theoretical frame-work and a reference architecture for collaborative networks, the project developed solutions for different aspects on the management of networks and collaboration in networks. All solutions were demonstrated and evaluated in industrial networks, where the project partners were involved (Camarinha-Matos et al, 2008). The solutions were related to the following issues:

- Models of collaboration in networks of organizations
- Management systems for breeding environments, replicable to a large variety of sectors
- Coordination principles for Virtual Organizations, adapted to emerging behavior in complex networks
- Generic and invisible infrastructure and re-utilizable service toolbox, based on interoperability standardization

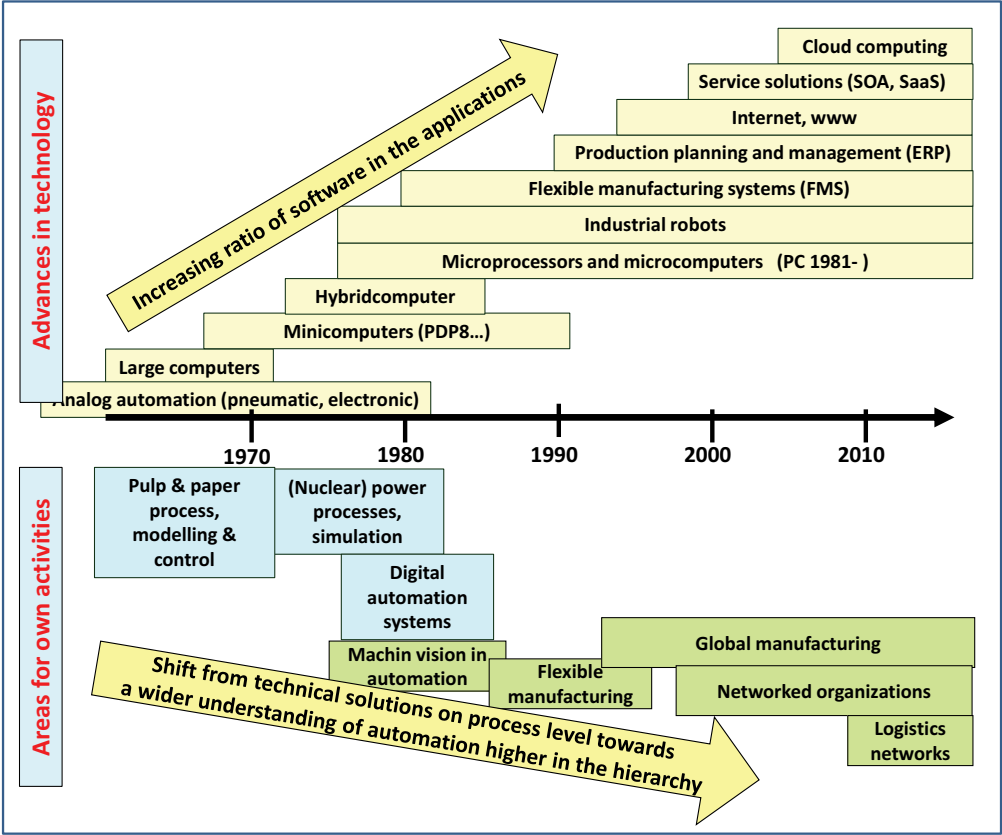
Many of the solutions were IT based support tools for the management of issues like:

- Trust assessment and maintenance
- Competence management
- Task specific collaboration partner search
- Real-time monitoring and management of collaboration performance
- Virtual organizations management
- Inheritance of experience and knowledge

Although many of the solutions were developed for industrial applications, they have also been adopted to other types of networked organizations. Also the logistics domain has many features, where the solutions can be applied.

Summary of activities

In the text above, I have tried to describe some of my activities on six decades. In all cases, aspects of systems theory and systems thinking have been applied. Usually, new advances in theory or technology have been used and the progresses have also enabled solutions, which have not earlier been possible, which may have created emerging expectations and needs among users and on the markets.



Own activities in relation to time and technical development.

The figure illustrates some features of my activities in relation to general trends and development. Above the time line, some main advances in the technology are mentioned and under the time line, some of my activities are given. The technological advancements have been very fast, especially the ICT development. This has implied that automation applications have been increasingly realized using software. In parallel, the new communication technology has enabled networking and global operations worldwide. Both trends can also be seen in the applications. From the mid-80's, most of my own activities were concentrated to networking and manufacturing related operations on a global level. At the same time, the focus on the activities moved from technical automation applications on the process level towards a broader interpretation of automation, which includes human and business aspects,

i.e. towards management of organizations and business. Naturally, this change in focus also meant interest in operations on a higher hierarchical level in the organizations.

Conclusions and lessons learned

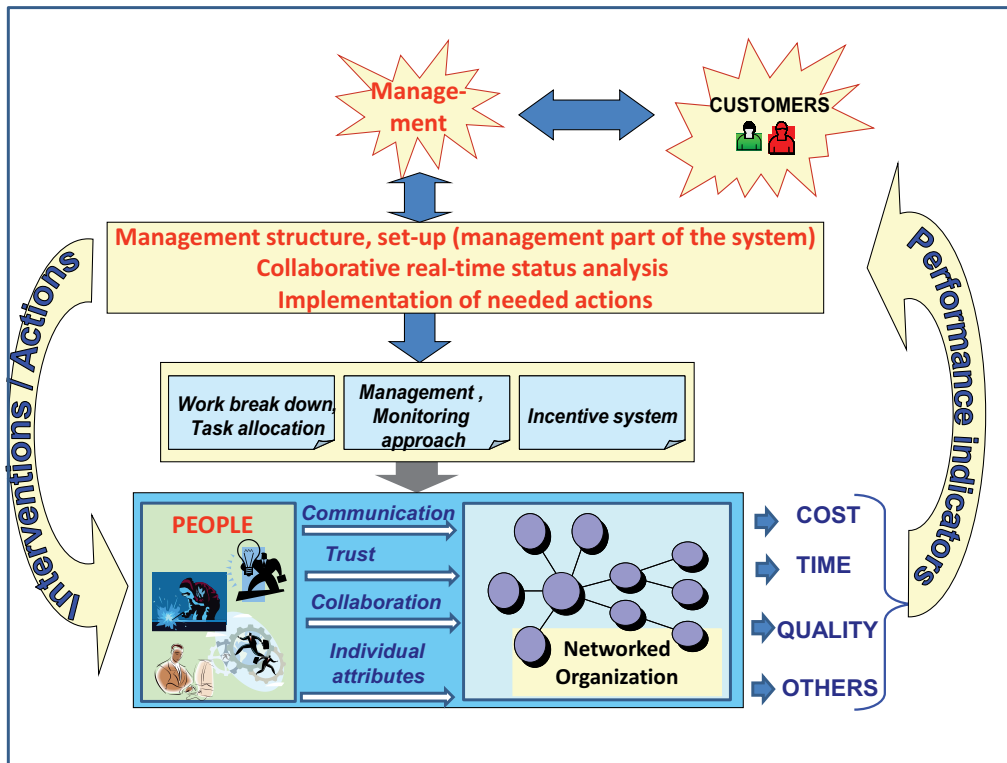
In this section, some personal experiences from the activities are listed. Some open issues or future research needs are mentioned. I have tried to apply systems thinking to understand causes and consequences and to make some conclusions and also preferences about possible development paths.

Modelling

As all actions require understanding of the object for the actions, models are needed to describe the behaviour of the object. The more complex the object is, the more complex are also the models. They may cover several levels from social and organizational models, including individuals, to concrete models of single technical equipment. In addition, they can be dynamic or static and they may be time- or event-driven. In many cases, several interacting modelling approaches may be used simultaneously. This interrelationship between modelling approaches seems to be an interesting and difficult issue for further research and development, as many disciplines and scientific cultures are involved.

Networking and collaborative processes

In collaborative activities and networking, the focus for automation includes both “soft” dimensions (human, organizational, etc.) and hard technical ones. The integration of the actions in modelling and management actions is a challenge. Information technology has provided means to realize new solutions and to achieve new objectives. Solutions like collaborative innovation, living labs, and similar are today quite popular and they are supported by new Internet solutions, like cloud computing, service oriented architectures, etc., but these activities also create challenges, which may not be easy to handle. Such are e.g. the management and the protection of intellectual properties and privacy in collaborative networking activities.

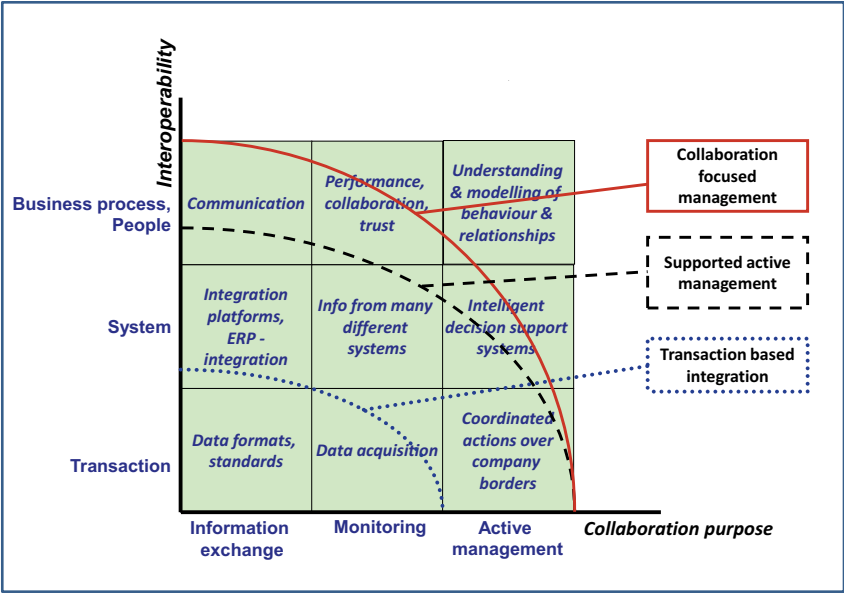


Collaboration is about dealing with people

So far, technical issues have been stressed in research and development in the collaborative networking area. The application of social media seems to be considered as a solution to many needs and requirements. The understanding and modelling of the processes have often been omitted. However, collaborative activities usually require an atmosphere of trust, where many actions are performed despite of risks and relying on incomplete information. Collaborative actions are introduced via the involved people. Their communication and collaboration abilities impact together with their mutual trust on the performance in fulfilling e.g. the customers' needs (Ollus et al, 2009). These issues are illustrated in the model presented in the figure. It aims to be relevant for a large scope of networking. It can be applied to industrial activities producing concrete physical products, but also to collaboration producing intangible intellectual outputs, like collaboration in research networks. From a system approach, the basic questions are the same ones: how to efficiently achieve the expected outcome? The performance indicators monitor the performance of the networking and the fulfilment of the expectations. This performance largely depends on networking partners' ability to communicate and collaborate and on their mutual trust. Management actions and interventions aim at impacting on these intangible human assets. The main challenge is to relate these ones to the performance measures (cost, time, etc.), i.e. to create some kind of model.

Interoperability

Interoperability has been in the background for many of the cases described in this paper. In technical solutions, interoperability usually means the ability of systems (or sub-systems) to work together, e.g. to inter-operate. The focus is then on the functionality of the interfaces. Together with digital automation solutions, the need of interoperability between systems became important. Mostly, the focus was on technical information exchange between the entities. Several standards supporting the exchange were presented claiming that they would be the “final” solution for interoperability (e.g. CAMAC, MAP, Field-bus, EDI, XML, Rosettanet). Recently, interoperability has been in focus related to activities and collaboration in networks. Different software solutions and social media seem to have taken the role of offering the solutions for interoperability. Also the “Future Internet” and “Internet of Things” are considered to provide new bases for interoperability. Their role is important and better technical support for interoperability is increasingly appearing.



Relation between collaboration purposes and interoperability levels

The transfer and presentation of information are necessary basics for interoperability. However, the main interoperability challenge relates to the interoperability between organizations and other entities (social, legal, etc.) expanding the scope of interoperability. The different aspects of interoperability are illustrated in the model in the figure. In many cases, collaboration among organizations still focuses on the exchange of information between partners and the level of interaction is transaction based. Further enhancement of the collaboration results in system integration and solutions for interoperability between different IT systems.

Increased networking and collaboration put further requirements on the participating entities. They should efficiently operate despite of different environments, cultures, motivations, and

operational procedures. The interoperability requirements move from transactions towards business processes and people as is illustrated in the figure, where also the collaboration level is given (Ollus et al, 2009). Simultaneously, the interoperability needs move from information exchange and monitoring needs to support for active management. The development goes from the lower left corner towards the upper right one. Operations in this right upper corner require strong modelling efforts and involvement of several different disciplines. This area also needs understanding and new concepts in the area of “collaboration focused management”.

Product vs process

In most cases in this paper, systems approaches have been applied on processes and their management. Usually, the aim has been to make the processes more efficient with respect to some expectations. However, the aim of the process is to give an output, a “product”. If the product does not fulfil its expectations, the efficiency of its production is almost irrelevant. Naturally, there are interactions between the product success and the processes producing it.

Systems theory applications could increasingly be applied on products and features making them more attractive. In this respect, also different kinds of services are considered as products, including services embedded in or attached to physical products. Interesting issues for further studies are the concept and features of combined physical and service products. These and other knowledge intensive products seem to have an increasing importance in the future. From a business point of view, also new value propositions for service and other immaterial products need to be developed.

In the present economic environment, the discussion on products vs processes could also be extended to a more general level. Cuttings and reductions of activities cannot create new wealth, especially if the products produced e.g. in Europe do not well enough fulfil the expectations on the markets. Today, too much emphasis seems to be given at the enhancement of old processes and very little at innovation and development of new attractive products and services.

Research

All work described in this paper has been performed in research environments. Also in research, the product has to be in the centre. The product for a research organization must be high quality research and development work. All other activities should support this high quality work. Naturally, the differences between physical products and research as a product have to be taken into account. For instance, marketing of research consists of discussions and agreements between highly specialized persons. Marketing organizations can give very little contributions in this respect.

Also the process for producing research differs from e.g. a manufacturing process. Research relies much on collaboration, where working habits are almost as many as participants. Enthusiasm and commitment are the main drivers and they are necessary requirements for success. The key question and management challenge are how to maintain and enhance these

two. My understanding is that the best means is a trustful and free atmosphere. Strict procedures and formal processes seem to reduce both enthusiasm and commitment and consequently also the quality of the work. Naturally, an infrastructure with support functions is necessary, but the support should be subordinated to the research, not vice versa.

In creative organizations, knowledge is distributed to all levels. It is not only on the top, nor is it only on the grassroots level. The efficient utilization of the whole cumulative knowledge of the organization is a large challenge, but it is also a key to success.

Knowledge

In our and other countries with relative high cost levels, the success for the country must rely on deep real knowledge and the ability to use it in new and challenging forms. Proclamations are not knowledge. Nor are unrealistic objectives and goals without clear connections to reality.

In a turbulent, rapidly changing world, the foundation for our understanding consists of basic principles, which do not change, like mathematics, physics, and other sciences. These ones are invariant assets in a rapidly changing environment. Specific technologies and popular applications come and disappear after some time. As we never know the future, a wide knowledge base is a necessary condition for building the future, although it is not always a sufficient condition. In the basic education, good comprehensive all-round education seems to be preferable compared to narrow specialization, especially for a small country.

References

Bohlin, T., 1970, *On the Maximum Likelihood Method of Identification*, IBM Journal of Research and Development, Vol14, Issue 1.

Camarinha-Matos L., Afsarmanesh H., Loeh H., Sturm F., Ollus M., 2004, *A strategic roadmap for advanced virtual organizations*. In Collaborative Networked Organizations: A research Agenda for Emerging Business Models, Kluwer Academic Publishers.

Camarinha-Matos L., Afsarmanesh H., Ollus M., 2005, *Virtual Organizations – Systems and Practices*, Springer. ISBN 0-387-2355-0.

Camarinha-Matos L., Afsarmanesh H., Ollus M. (Eds.), 2008, *Methods and Tools for Collaborative Networked Organizations*, Springer, ISBN 978-0-387-79424-2.

Haapanen P., Winter M., 1975, *Kokemuksia Loviisa I:n pääsääntöjärjestelmän suunnittelusta*. In Proceedings of Automaatiopäivät 1975, Finnish Society of Automatic Control.

Heimburger H., Ollus M., 1975, *Simulaattorit prosessien henkilökunnan koulutuksessa*. In Proceedings of Automaatiopäivät 1975, Finnish Society of Automatic Control.

Kalman, R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering* 82 (1): 35–45.

Karvonen L., van den Berg R., Bernus P., Fukuda Y., Hannus M., Hartel I., Vesterager J., 2003, *Global Engineering and Manufacturing in Enterprise Networks. GLOBEMEN. VTT Symposium 224*. ISBN 951-38-5739-5; 951-38-6275-5.

Korhonen J., 2001, *Paperikoneen prosessiohjauksen alkuhämärä 1962 – 1966*. In Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut, Finnish Society of Automation, publication nro 23.

Luenberger D. G., 1969, *Optimization by Vector Space Methods*. John Wiley & sons.

Mäenpää I., Malinen P., Ollus M., Saukkonen E., Wahlström B., Uotila E., 1982, *A Computer System for On-line Sorting Based on Visual Images*. Proceedings of the 6th International Conference on Automated Inspection and Product Control, Birmingham, U.K. 27-29 April 1982, s 145-152.

Ollus M., Lovio R., Mieskonen J., Vuorinen P., Karko J., Vuori ., Ylä-Anttila P., 1990, *Joustava tuotanto ja verkostotalous - tekniikan, talouden ja yhteiskunnan vuorovaikutus 1990-luvulla*. SITRA 109. Helsinki.

Ollus M., Jansson K., Karvonen I., Uoti M., Riikonen H., 2009, *On Services for Collaborative Project Management*. In Leveraging Knowledge for Innovation in Collaborative Networks: 10th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2009, Thessaloniki, Springer.

Ranta J., Koskinen K., Ollus M., 1988, *Flexible production automation and computer integrated manufacturing: recent trends in Finland*. Comput. Ind. Vol. 11 (1988), 53 - 76

Ranta J., Ollus M., Leppänen A., 1992, *Information technology and structural change in the paper and pulp industry*. Computers in Industry Vol. 20, 255 – 269.

Rouhesmaa J., 2001, *Paperikoneiden on-line laadunohjauksjärjestelmät*. In Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut, Finnish Society of Automation, publication nro 23.

Rouhesmaa J., 2003, *Damaticin tie Pankakoskelta Amerikkaan*. In Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; osa 2 vuoteen 1990, Finnish Society of Automation, publication nro 25.

Salminen P., Ollus M., Wahlström B., Winter M., 1974. *Preliminary specifications for a training simulator for a PWR nuclear power plant*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, sähkötekniikan laboratorio, tiedonanto 5. ISBN 951-38-0094-6.

Talvio P., 2001, *Automaation kehitys massa- ja paperiteollisuudessa vuoteen 1970 mennessä*. In Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut, Finnish Society of Automation, publication nro 23.

Vuorinen A., 1975, *Loviisan ydinvoimalaitoksen instrumentointi*. In Proceedings of Automaatiopäivät 1975, Finnish Society of Automatic Control.

Wahlström B., Juusela A., Ollus M., Närväinen P., Lehmus I., Lönnqvist P., 1983, *A Distributed Control System and its Application to a Board Mill*. Automatica, vol 19 No 1, 1983, s. 1-14.

Wahlström B., 2001, *DAMATIC – Suomen automaatioteollisuuden voimannäyte*. In Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut, Finnish Society of Automation, publication nro 23, ISBN 952-5183-15-7.

Winter M., 2001, *Ydinvoimalaitosten automaatio ja simulaattorit*. In Teollisuusautomaation vuosikymmeniltä; 1960- ja 1970-luvut, Finnish Society of Automation, publication nro 23, ISBN 952-5183-15-7.

Åström, K. and Bohlin, T. 1965, *Numerical identification of linear dynamicsystems from normal operating records*, Proc. IFAC Symposium on Self-Adaptive Systems, Teddington, UK.

Åström, K. and Eykhoff, P. 1971, System identification – A survey. Automatica 7: 123–162.

About the author



Martin Ollus (martin@ollus.net, Solskivan 7 B 4, 02210 Esbo, Finland) was born on November 9, 1944. He graduated in control engineering from the Helsinki University of Technology (HUT) in 1969. During the period 1969 – 1972, he was a research assistant at HUT developing computer control application for Nokia Electronics. He was with the Technical Research Centre of Finland (VTT) since 1972. He has about 15 years' experience of different management positions at VTT. He was project manager and main researcher in large national and international research projects. He was project manager of the Finnish national research programme on "Technology, Economy and Society" (1987-1990), which was a national programme collaborating with the similar programme run by the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) in Vienna. Other projects he has managed have been dealing with the management of networking companies, new manufacturing paradigms and interaction between different disciplines. He was involved in the IMS (Intelligent Manufacturing Systems) initiative 1992 – 2004 both as project coordinator and technical coordinator. He has had similar positions in ca 10 other European research projects. Martin Ollus has had a main role in the product development of automation solutions e.g. image processing for control purposes, microprocessor-based distributed automation in process industries, flexible paper making, automation of concrete casting, and automated systems for heavy material handling in a foundry. Most of the innovations have been reported in international journals or conferences. He has been the writer or co-writer of 8 books and has published over 120 papers in journals and conferences. Martin Ollus retired from VTT in 2012.

Säkerhetsledning – en systemteknisk tillämpning

Björn Wahlström

Introduktion

Hur kan man styra ett komplicerat system på ett säkert sätt? Den frågan dyker upp i många sammanhang och kan få många svar inom ett område som brukar kallas säkerhetsvetenskap (safety science). De rekommendationer som man vanligen brukar få är att man skall göra en *riskanalys*, man skall bygga upp ett *säkerhetsledningssystem* och man skall se till att den organisation som opererar det komplicerade systemet är en *lärande organisation*. Alla dessa rekommendationer brukar ofta kastas fram, utan att man närmare funderar på hur man i praktiken skall se på styrproblemet. En del forskare har dock i säkerhetssammanhang lyft fram något som man kan kalla *kontrollmetaforen* och som kan tolkas att säkerhetsledning kan behandlas som ett styrproblem (Rasmussen, Svedung, 2000). Jag skall för att illustrera detta här i stora drag gå igenom några av de komponenter som man måste se på närmare för att ge svar på den ovan ställda frågan.

Vad menar man med säkerhetsledning?

När man ser på begreppet säkerhetsledning består det av två ord *säkerhet* och *ledning* som bildar utgångspunkten för vad man försöker göra. Med säkerhet menar man i dagligt tal att man inte behöver vara orolig för olika hot som kan drabba en. Man behöver t.ex. inte vara rädd för vilda djur när man går på en gata i en stad. Däremot kan man istället vara orolig för att bli påkörd av en bil. Man kan visserligen påverka risken att bli påkörd t.ex. genom att alltid använda skyddsväg och aldrig gå mot rött ljus när man går över en gata. Man kan således inse att det går att påverka sin riskbild genom olika åtgärder. Man talar således om risker när man menar hot, som kan drabba en och om säkerhet när man genom olika motåtgärder har lyckats göra riskerna tillräckligt små.

Med begreppet ledning, menar man att leda en grupp av människor eller en organisation så att vissa mål uppfylls. Leda och styra är således ekvivalenta begrepp åtminstone då objektet för det som vi försöker styra är människor eller en organisation. När man ser på vad som har skrivits om hur man kan och bör leda organisationer, så kommer man till ett mycket stort område som brukar kallas ledningsvetenskap (management science). Om man sedan ser på vad man inom ledningsvetenskap talar om så är det en blandning av psykologi, ekonomi, sociologi och systemvetenskap, som tillämpas på olika sätt.

Säkerhetsledning har således med risker att göra och hur man bör styra organisationer för att riskerna skall minimeras. När man ser på ett komplicerat system, t.ex. en industrianläggning, ett trafikflygplan eller ett stort fartyg, så kan man skilja mellan risker som uppstår på grund av

att den tekniska delen av systemet felfungerar och de risker som uppstår av att systemet drivs på ett felaktigt sätt. Detta betyder att man skiljer mellan fel i systemet självt och fel som uppstår när man använder systemet. Detta kunde då med en analogi tolkas så att i ena fallet handlar det om en bil som är säker och i det andra fallet om att köra bilen på ett säkert sätt.

När ett nytt system konstrueras behöver man således något slag av system som ser till att konstruktionsprocessen styrs på ett sådant sätt att resultatet, dvs. industrianläggningen, flygplanet eller fartyget, uppfyller de säkerhetskrav som gäller. På samma sätt behöver man för driftprocessen ett annat system som ser till att systemet drivs och underhålls på ett säkert sätt. I båda fallen brukar man tala om ett system för säkerhetsledning, som gör att arbetsprocesser, aktiviteter och uppgifter genomförs på ett sätt som gör att systemet är säkert och att det hanteras på ett säkert sätt. Säkerhetsledning har alltså att göra med hur man styr organisationer och människor så att de sin tur genomför sina uppgifter så att systemet de konstruerar eller opererar inte förorsakar fara.

Säkerhetsledningens komponenter

Vad skall man då kräva att ett system för säkerhetsledning skall innehålla? Först och främst måste man ha en aktivitet som identifierar de *hot* mot säkerheten som en industrianläggning, ett flygplan eller ett fartyg kan utsättas för. Det betyder att man i konstruktionsprocessen identifierar vad som av olika orsaker kan gå fel och vad som då kan inträffa. Det kan t.ex. bli fel på elförsörjningen till viktiga komponenter i systemet, vilket då kan få olika konsekvenser. Man kan då i konstruktionsprocessen *avlägsna* möjligheterna till fel, *hindra* att de uppstår eller *lindra* deras konsekvenser. Detta betyder att man först måste göra en *riskanalys* som identifierar möjliga fel och hur ofta de kan väntas inträffa och sedan ändrar konstruktionen på så sätt att risken kan anses tillräckligt liten.

På samma sätt kan man för systemets driftsfas försöka identifiera vad som kan gå fel, för att sedan vidta åtgärder för hindra att felet uppstår, göra felet mera sällsynta eller lindra de konsekvenser de kan få. För att hindra fel att uppstå kan man t.ex. genom förebyggande underhåll byta komponenter redan innan de går sönder, för att göra felet mera sällsynta kan man använda komponenter med högre kvalitet och för att lindra konsekvenserna av ett fel kan driftpersonalen företa olika motåtgärder. För att göra en riskanalys måste man känna sitt system, så att man vet vilka hot som finns och hur de kan motverkas. Detta betyder i systemtekniskt språkbruk att man har en modell som på ett rimligt sätt avbildar den verklighet man försöker styra.

En konstruktionsprocess kan aldrig vara fullständig i den meningen att inga brister i systemets konstruktion mera finns när det tas i drift. Bristerna kan förorsakas av förbiseende eller okunskap hos konstruktörerna, som gör att någon farlig situation inte identifierats eller åtgärdats på ett riktigt sätt. Man kan således vänta sig att driftpersonalen åtminstone någon gång ställs inför en hotfull situation, som är svår att hantera på ett adekvat sätt. Man kan också tänka sig att problem uppstår för att de instruktioner som driftpersonalen har inte är ändamålsenliga. Detta betyder att ett system för säkerhetsledning måste ha aktiviteter som samlar de *erfarenheter* man får under driften och analysera dem för att identifiera möjliga

brister. För att undvika framtida problem bör man sedan göra *ändringar* som avlägsnar bristerna i systemet eller instruktionerna.

Ett system för säkerhetsledning bör dels innehålla de *krav* man ställer på processer, aktiviteter och uppgifter och dels de *instruktioner* som säkrar att processerna, aktiviteterna och uppgifterna utförs på ett riktigt sätt. Det inte räcker emellertid inte med att en instruktion finns, utan man måste också på något vis säkerställa att den är riktig och att den faktiskt följs. För att säkerställa att den är riktig kan man använda sig av något slag av *simulator*, mot vilken man testar sina instruktioner. Då måste man visserligen först säkerställa att simulatormen ger en riktig beskrivning av hur systemet uppför sig i olika situationer. För att säkerställa att drift- och underhållspersonal följer de instruktioner som definierats kan man göra en jämförelse mellan instruktionerna och hur arbeten görs i verkligheten, dvs. man gör en *auditering* av arbetsprocesserna.

När det gäller verksamheter där säkerheten är en kritisk faktor, är det vanligt att samhället inrättar en *myndighet* som får uppgiften dels att ställa krav på verksamheten och dels att övervaka att kraven är uppfyllda (Wahlström, 2007). Myndighetstillsynen kan för organisationen ses som ett yttre av samhällets upprätthållet system, som på samma sätt som organisationens eget system för säkerhetsledning strävar efter en hög säkerhet. Säkerhetsledningen och de dokument som beskriver hur säkerhetsledningen realiserats kan ses som styrsystem som implementerar målet säkerhet. Jag skall därför nedanför mera i detalj granska de förutsättningar som måste gälla för att en styrning skall fungera.

Systemteknikens tre problem

På en mycket generell nivå kan man tala om ett system S , som styrs av en ingång u och som genererar en utgång y . Man kan då särskilja mellan systemteknikens tre problem (Wahlström, 1994). För det första har man en mängd ingångs- utgångspar (u_i, y_i) för $i \in \{1, \dots, N\}$ och man söker en modell M , som på bästa sätt avbildar systemet S . Man kan säga att detta problem är att *modellera* systemet S . För det andra har man en ingång x_j och en modell M av systemet S och man söker ett sätt att beräkna den utgång y_j , som systemet väntas ge när ingången x_j appliceras. Man kan säga att detta problem är att *simulera* systemet S . För det tredje har man en önskad utgång y_k och en modell M av systemet S och man söker ett sätt att beräkna den ingång x_k man skall applicera för att systemets utgång skall vara så nära y_k som möjligt, dvs. man söker ett sätt att *styra* systemet. Detta är det egentliga styrproblemet och vi kan se att det tredje problemet förutsätter att vi lyckats lösa de två första.

En komplikation av modelleringsproblemet är att vi måste ta hänsyn till det *tillstånd* systemet befinner sig i när vi applicerar en styrning. Med tillstånd menar vi en storhet som integrerar allt som tidigare har hänt systemet fram till en tidpunkt $t=0$, så att man kan tala om ett begynnelsestillstånd $x_0 \in X$, som tillsammans med en styrning $u(t)$ för $t \in (0, T]$ genererar en entydig trajektorie $x(x_0, u(t))$ i tillståndsrummet X . Varje deltrajektorie $x(x_\tau, u(t))$ för $0 < \tau < T$ och $t \in (\tau, T]$ är då också en del av denna trajektorie. Ett exempel är att se på en bil som kör på en väg. Tillståndet för bilen kan karakteriseras av den väg den kört och den hastighet den har.

Styrningen som påverkar tillståndet är trycket på gasen eller på bromsen, som bestämmer den momentana hastigheten och som i sin tur bestämmer den väg som tillryggalagts.

Bilexemplet visar på att vi förenklar det verkliga systemet, bilen, så att vi endast är intresserade av bilens tillryggalagda väg och momentana hastighet. I verkligheten har bilen naturligtvis betydligt flera tillstånd som kan karakteriseras av ålder, märke, kondition etc. För att mera noggrant förstå hur en bil rör sig längs en väg, bör man även ta med tillståndet hos föraren och vägen. Det att man begränsar sig till bara hastighet och väg, betyder då att man för tillfället inte är intresserad av de andra tillståndskomponenterna. Syftet med modellen förmedlar alltså det tillstånd vi är intresserade av.

Tillståndsbegreppet är i säkerhetssammanhang viktigt, eftersom man kan tänka sig en uppdelning av tillståndsrummet i tre icke överlappande delar, dvs. $\mathbf{X} = \mathbf{X}_d \cup \mathbf{X}_o \cup \mathbf{X}_g$, där \mathbf{X}_d är tillstånd som kan karakteriseras som osäkra (dåliga), \mathbf{X}_g är tillstånd som kan anses säkra (goda) och \mathbf{X}_o är tillstånd som inte tillhör någon av de tidigare mängderna (oavgörbara). Man kan då tala om säkerhetsledningens två problem, antingen är systemet i den säkra regionen och man vill hålla det där eller så har det kommit i den osäkra eller oavgörbara regionen och man vill komma tillbaka till den säkra regionen. De två problemen kan formuleras på följande sätt, 1) $\mathbf{x}_\tau \in \mathbf{X}_g$ och man söker sådana styrningar $\mathbf{u} \in U_g(\mathbf{x}_\tau)$ så att trajektorien $\mathbf{x}(\mathbf{x}_\tau, \mathbf{u}(t))$ håller sig inom \mathbf{X}_g och 2) $\mathbf{x}_\tau \in \mathbf{X}_d \cup \mathbf{X}_o$ och man söker sådana styrningar $\mathbf{u} \in U_g(\mathbf{x}_\tau)$ så att trajektorien $\mathbf{x}(\mathbf{x}_\tau, \mathbf{u}(t))$ så snart som möjligt återförs till \mathbf{X}_g . Man ser att det skulle vara värdefullt att på något vis kunna karakterisera de tre delarna av tillståndsrummet \mathbf{X} .

Beslut och styrning

Det kan i det här sammanhanget vara på sin plats att i korthet reda ut skillnaden mellan enskilda beslut och styrningen av en process. Ett enskilt beslut kan ses som ett slag av optimering. Man har ett antal alternativ $A = \{a_1, \dots, a_m\}$, som man skall välja mellan och man gör en bedömning $B = \{b_1, \dots, b_m\}$, av vad de kommer att leda till i form av nytta för beslutsfattaren. En rationell beslutsfattare väntas då välja det beslut/beslutsalternativ a_k , som har egenskapen $b_k \geq b_i$ för alla $b_i \in \{1, \dots, m\}$. En komplikation är här att beslutsfattaren kanske inte känner den väntade nyttan för alla beslutsalternativ. Beslutsfattaren kan då ge sig tid att närmare reda ut vad de olika beslutsalternativen kan väntas leda till och vad då nyttan av utfallet kan vara. Tyvärr kan en sådan strategi ofta leda till beslutsförlamning snarare än till optimala beslut.

Beslutsfattare måste alltså i en situation välja ett beslut som är tillräckligt bra hellre än att försöka hitta det bästa beslutet. Här har forskning visat att människan verkar ha två olika beslutssystem, ett som gör besluten snabbt, men som ibland kan ta fel och ett annat som gör noggranna avvägningar, men som fungerar långsamt. Detta betyder att man måste skilja mellan beslut som kan göras med god tid och beslut som görs i realtid, dvs. sådana där situationen förändras kontinuerligt. Praktiskt betyder detta att man för realtidsbeslut måste vara väl förberedd t.ex. genom långvarig träning eller genom att använda detaljerade instruktioner. Beslut som görs med det långsamma och eftertänksamma systemet kan då

användas för att se till att det finns metoder och verktyg, som säkerställer att tillräckligt bra realtidsbeslut kan göras.

När man talar om styrning menar man vanligen till varandra kopplade beslut som sker i realtid. En form av styrning är visserligen att man vid olika närliggande tidpunkter gör justeringar så att det styrda systemet anpassar sig till den för handen varande situationen. I bilexemplet kan man säga att realtidsbeslut eller styrning sker då man vrider på ratt och trycker på gas eller broms och att den långsamma men eftertänksamma typen av beslut t.ex. görs då man bestämmer vilket bilmärke man vill köpa.

Fyra nödvändiga villkor för att styra

Vi har nu kommit så långt att vi kan tala om nödvändiga villkor för att styrproblemet skall vara möjligt att lösa (Zadeh, Desoer, 1963). Om inte de nödvändiga villkoren är uppfyllda, så måste man gå tillbaka antingen till sin modell eller till de mål man vill uppnå. Det första villkoret, som egentligen är uppenbart, är att man vet vad man vill. Om man inte har ett mål som man vill uppnå med sin styrning, så kan resultatet knappast bli bra. Alltså det första villkoret är att man har definierat en *målfunktion*. Målfunktionen kan konstrueras på många olika sätt. Ett sätt är att röra sig från A till B på snabbaste tid, ett annat kan vara att en sådan förflyttningen skall ske med en så liten ansträngning som möjligt.

Ett andra krav är att man har en rimligt riktig *modell* av det system man önskar styra. Om man inte har den ringaste uppfattning om hur systemet reagerar för olika input, kan man knappast nå sina mål. En systemmodell behöver inte vara speciellt raffinerad, men huvudsaken är att den med de valda begränsningarna speglar systemets beteende på ett riktigt sätt. Den modell man söker kan hittas på många olika sätt. Ett sätt är att använda sig av olika orsak-verkan förklaringar, som finns tillgängliga för olika situationer. Forskare menar t.ex. att den tidiga människan använde sig av berättelser (narratives) för att förstå sin omvärld och för att i den agera på ett ändamålsenligt sätt.

Ett tredje krav på en framgångsrik lösning på ett styrproblem är att systemet man vill styra är *observerbart*. Detta krav har egentligen att göra med den modell man använder för sitt system och de tillståndskomponenter man är intresserad. Observerbarhet betyder att man kan följa med hur systemets tillstånd ändras med tid, så att man kan ställning till de styråtgärder som behövs i den för handen varande situationen.

Det sista kravet för en framgångsrik lösning på ett styrproblem är att systemet man vill styra är *styrbart*. Detta kanske kan ses som en tautologi, men så är det inte. För att ett system skall vara styrbart, så måste vi ha möjligheter att påverka systemets tillstånd i en önskad riktning. I bilexemplet är det uppenbart att vi har det. Vi kan med gas och broms välja den hastighet med vilken bilen rör sig, vilket gör att vi kan styra både hastighet och väg. Nedanför skall jag kort diskutera begreppet säkerhetskultur, som på senaste tid använts mycket i säkerhets-sammanhang. Problemet här är att säkerhetskultur är en modell som knappast kan anses varken observerbar eller styrbar.

Modellerings problem

När man bygger en modell av ett system så är det vad man är intresserad av, som ger den första avgränsningen av modellen. Man gör då först en åtskillnad mellan system och omgivning. Denna avgränsning är i många avseende godtycklig, men man brukar ofta försöka göra den på så sätt att systemets interaktion med omgivningen är så liten som möjligt. Nästa steg i att bygga en modell att lyfta fram de detaljer av systemet man är speciellt intresserad av att undersöka. Detta sker vanligen så att man väljer de tillståndskomponenter man är intresserad av och lämnar bort alla andra. Om man t.ex. vill bygga en modell av ett flygplan, så är man kanske intresserad av hur det rör sig i rummet, vilket då betyder att man behöver sex rumskoordinater ($x, y, z, \phi, \varphi, \psi$) med avseende på vilka man ser hur väg och hastighet förändras beroende av de krafter som påverkar flygplanet. Detta ger en betydligt mera komplicerad modell än bilexemplet ovan, men lämnar också här mycket av det verkliga systemet obeaktat.

En modell är alltid en förenkling av verkligheten och man kan säga att förenklingen är modellens både styrka och svaghet. Modellen gör att man kan koncentrera sig på det man önskar studera och lämna bort allt det andra. Modellen bör dock vara tillräckligt komplicerad för att inte vara trivial, men inte så komplicerad att den blir ohanterlig. Viktigt med en modell är att man är medveten om när de förenklingar man har gjort inte mera kan anses giltiga.

Modellen är en nödvändig komponent för att man skall kunna lösa styrproblemet. I och med att man har valt bort flera av systemets tillståndsvariabler i sin modell, så betyder det att man begränsar sig till att styra de tillståndsvariabler man har i sin modell. Modellen skall således vara både observerbar och styrbar för att den skall vara användbar. Om den inte är det får man välja sin modell på något annat sätt. Ett sätt att få en hanterbar modell, är att bestämma sig för om man vill modellera antingen en systemhelhet på ett övergripande sätt eller gå ner i mindre delar av systemet för att få en större detaljrikedom.

Speciellt när man vill studera säkerhetsledning inser man att inte alla aktiviteter i och kring en industriprocess, ett flygplan och ett stort fartyg är lika viktiga för säkerheten. Detta faktum har adresserats med principen om *ett anpassat förhållande till säkerheten*, som i all enkelhet betyder att man skall sätta mera resurser på det som är viktigt för säkerheten än man sätter på det som är mindre viktigt. I praktiken betyder detta att man måste ha en god uppfattning om vilka händelsekedjor och styrningar som är viktiga för säkerheten. Denna uppfattning tas fram i en *riskanalys* där man går igenom händelsekedjor som kan representera hot mot säkerheten, så att man kan installera styråtgärder som gör att hoten kan undvikas. Riskanalysen kan ses som en modell av hur systemet uppför sig i vissa väl definierade situationer.

Systemet vi försöker styra

Om vi nu antar att systemet vi försöker styra är en stor industrianläggning, ett trafikflygplan eller ett stort fartyg inser man genast att systemet har många mycket olika komponenter. Inom säkerhetsvetenskaperna skiljer man ofta mellan delsystemen *människa, teknik* och *organisation* (MTO). Tyvärr är också denna uppdelning alltför grov för att man skall kunna

ge konkreta förslag för hur systemen skall konstrueras och drivas. Om man t.ex. ser på trafikflygplanet, så är det beroende av flera olika organisationer, som alla agerar med sina egna uppgifter och system, för att flygplanet skall kunna genomföra en säker flygning från en stad till en annan. Ett trafikflygplan byggs upp i flera olika konstruktionsprocesser där flygplanets delsystem (flygkropp, motorer, kommunikationsutrustning, etc.) konstrueras. Driftprocessen kommer i sin tur att behöva olika delsystem såsom piloter, flygledning, flygfält, underhåll, osv.

Så länge man begränsar styrproblemet till det tekniska systemen, så har man av tradition goda metoder och verktyg för att bygga sina modeller. När man i stället är intresserad av hur människor i en organisation hanterar styrproblemet blir det betydligt svårare. Visserligen kan man kan ibland begränsa sig till gränssnittet M-T och då tala om ergonomi och de krav man kan ställa på ett tekniskt system för att det skall vara hanterbart. Ett steg svårare blir det när man vill ta med O-systemet och gränssnitten T-O och O-M. För gränssnittet T-O kan en ansats vara att t.ex. ställa krav på att organisationen har funktioner för drift, underhåll, teknikstöd och säkerhetsledning, som alla har de resurser som behövs för det arbete de gör. En liknande ansats kunde vara att för gränssnittet O-M t.ex. kräva att organisationen skall ha ett ledningssystem som beskriver ansvar och befogenheter och den utbildning personer i olika befattningar skall ha.

En ytterligare komplikation är att människorna i en organisation kontinuerligt måste kommunicera med varandra och med det tekniska systemet. Detta kan ske i tal och skrift och det kan ske elektroniskt från kontor eller kontrollrum. När man studerat olyckor visar det sig nämligen ofta att nödvändig information inte har nått fram till de personer som gör beslut i kritiska situationer. Detta anser vi att kan beaktas med att man till MTO-modellen fogar en fjärde komponent *information* (Rollenhagen, 2005). Detta gäller i synnerhet styrsystemen, eftersom tillståndsinformation alltid måste förmedlas från det ställe där den samlas till kontrollalgoritmer och styrelementen. När man ser på I-systemet kan man tänka sig ett tillstånd bildat av den information som samlas in i olika media och de sök-algoritmer som finns för att hitta relevant information.

Tillgängliga styrmetoder

Vart och ett av de fyra MTOI-systemen har sina egna interna styrningar, som måste fungera för att säkerheten skall kunna tillfredsställas. Dessutom måste det finnas styrningar i gränssnitten mellan de fyra systemen. Om man t.ex. ser på T-systemet så har man vanligen ett övergripande styrsystem som sköter koordineringen av olika tekniska delsystem, som sedan vart och ett har sina egna styrsystem. Bland dem finns också de skyddssystem, som har till uppgift upptäcka att en förflyttning till ett osäkert tillstånd har skett och som då initierar en lämplig motåtgärd. På flygplan kan t.ex. ett sådant system vara att sänka nosen och dra på mera gas om läge och hastighet på planet indikerar en fara för stallning. Man brukar också använda så kallade förreglingar som i vissa situationer hindrar kontrollrumsoperatörerna att göra ingrepp som kan innebära risk.

För M-systemet får man tillämpa helt andra styrningar. Man kan använda sig av befallningar eller instruktioner, men här ställs man inför ett problem. För att en befallning skall bli utförd krävs en chef–medarbetar relation. Detta innebär ett slags kontrakt där en person underställer sig en annan mot något slag av ersättning. Här behövs alltså modeller av sociala relationer för att på ett riktigt sätt kunna representera de styrningar som sker i systemet. M-systemet styrs också av instruktioner på många olika nivåer ända från samhällets lagar och förordningar till enkla handlingsinstruktioner och checklistor. Man inser också att det inte räcker med att bara ersätta en gammal instruktion med en ny för att en uppgift skall utföras på ett nytt sätt.

När man ser på hur styrningar exekveras i O-systemet får man igen ta in nya begrepp. För det första har man att göra med ansvar och befogenheter, vilket betyder att man får skilja mellan olika grupper av personer och de uppgifter de utför. Man måste således modellera organisationsstrukturen för att se vilka arbeten olika grupper ansvarar för och vilka befogenheter de har i kritiska situationer. Man brukar förutsätta att organisationen som driver ett system har ett odelbart ansvar för säkerheten, vilket då uppfattas som att den högsta chefen i organisationen fortfarande bär ansvaret, trots att hon eller han har delegerat uppgifter åt sina underordnade. Detta ansvar betyder i princip också att organisationen, dvs. den högsta chefen, ansvarar för att organisationens medlemmar är kunniga och motiverade, samt har alla nödvändiga verktyg och metoder för att utföra sitt arbete. Man brukar ofta säga att en säkerhetsorienterad organisation skall vara en lärande organisation (Wahlström, 2011).

För I-systemets interna styrningar är det en fråga om hur man på lämpligt sätt kan säkra att i de data som samlas är riktiga och hur denna datamängd sedan skall integreras för att ge relevant information åt viktiga styrsystem. I gränssnittet I-M är det igen viktigt att se till att information som behövs i en speciell situation är lätt att hitta.

Ett vanligt sätt att sköta informationsinsamling och -hantering är att definiera ett antal nivåer där en informationsförädling sker när man från en lägre nivå flyttar sig till en högre. På den lägsta nivån har man då enkla mätningar som förmedlar värdet på någon tillståndskomponent. Detta kan ske t.ex. till en operatör via ett visarinstrument eller till en automatisk krets som alarmerar om ett gränsvärde överskrids. På en högre nivå kombineras information från flera olika delsystem och givare, så att förädlad information kan ges vidare. På den högsta informationsnivån kombineras både kvalitativ och kvantitativ information för att stöda operatörer och ledning i deras beslutsfattande.

Säkerhetsledningens styrproblem

Om vi ser på säkerhetsledningen styrproblem kan man skilja mellan uppgiften att dels försöka identifiera brister i det styrda systemet och korrigera dem och dels att värdera effektiviteten av säkerhetsledningens egna uppgifter. När det gäller att identifiera brister i själva systemet får man inbegripa alla delar av MTOI-systemet och deras styrningar. De aktiviteter som då ingår är som tidigare nämnts riskanalys, erfarenhetsåterföring och ändringshantering. Riskanalysen används huvudsakligen för att se om nykonstruktioner eller ändringar är tillräckligt bra. Erfarenhetsåterföringen används under driften av systemet för att identifiera kvarblivna brister i de system man opererar. Ändringshanteringen syftar i sin tur på att sluta återkopplingen från

erfarenheter till bestående förbättringar i systemen. Här är det speciellt viktigt att en tillräckligt noggrann analys görs så att inte en ändring skapar nya problem.

För att utvärdera säkerhetsledningens effektivitet, kan man granska dessa tre aktiviteter. För en bedömning av riskanalysens effektivitet kan man utgå från den kvalitativa modelleringen av de händelsesekvenser man analyserat. Kan man anse att riskanalysen är täckande, riktig och konsistent? För att den skall vara det bör den ha både bredd och djup, dvs. dels täcka in alla de system som kan ha en påverkan på säkerheten och dels gå ner tillräckligt i detaljer. För den kvantitativa delen av riskanalysen, så bör denna göra en riktig uppskattning av frekvensen av de händelser man väntar sig att skall kunna inträffa och allvarligheten av de konsekvenser man kan vänta sig av olika initierande händelser.

För att utvärdera effektiviteten av erfarenhetsåterföringen kan man se på vilka händelser som tas upp för en mera noggrann analys. Är de för många, så kanske man inte orkar genomföra analysen med den detaljrikedom som skulle behövas, men är de för få kanske man missar viktig information. En händelseanalys börjar med att man etablerar en beskrivning av vad som har hänt. I nästa skede av analysen frågar man *varför* i flera led. Varför fungerade inte de skydd som borde ha funnits, varför reagerade inte operatörerna, varför var instruktionen felaktig osv? Viktig här är att förstå att det egentligen inte finns något absolut kriterium för var man skall stanna i sin analys. Då svaren har etablerats så går det vanligen att urskilja ett mönster, man kan t.ex. identifiera tekniska system som har felfungerat, styrsystem som inte fungerat som det var tänkt eller felaktiga och uteblivna ingripanden. I det sista steget kan man sedan närma sig frågan om vad som borde ändras för att inte samma händelse skall inträffa på nytt.

Förslag till ändringar i något av MTOI-systemen förs över till ändringshanteringen. En effektiv ändringshantering börjar vanligen med att man samlar ihop relaterade förslag för att se om de pekar mot gemensamma underliggande brister som borde korrigeras. Då går det kanske att med ett helhetsgrepp lösa flera problem samtidigt. Nästa steg är att utarbeta ett preliminärt lösningsförslag, som sedan kan analyseras mera i detalj. I och med att en detaljerad konstruktion har tagits fram, kan man detaljplanera hur den skall införas. En ändring av tekniska delsystem kräver vanligen att de tas ur drift medan ändringen görs och sedan testas efter att ändringen har gjorts. En ändring av organisationen kan kräva t.ex. att befattningsbeskrivningar ses över och att specifika utbildningsinsatser genomförs.

Styrning av säkerhetskultur

Säkerhetskultur fördes in i säkerhetsvetenskapen efter olyckan i Tjernobyli 1986 (IAEA, 1991). Begreppet väckte omedelbar entusiasm och många projekt startades för att definiera vad man menar med säkerhetskultur. Om man idag från den akademiska diskussionen försöker ta till sig vad man har hänt under det kvartssekel som gått, kan man konstatera att det knappast finns konsensus i hur begreppet bör tolkas. Om man sedan ser hur industrin (t.ex. kärnkraft, flyg, sjöfart) tagit till sig begreppet kan man konstatera att alla anser att säkerhetskultur är viktig och att man bör anstränga sig för att upprätthålla en god säkerhetskultur. Man har också utvecklat olika frågescheman, med vilka man försöker göra mätningar av säkerhets-

kulturen. Man har gjort statistiska analyser av resultaten och har den vägen identifierat ett antal faktorer som kan karakterisera god säkerhetskultur. Också säkerhetsmyndigheterna i en del länder reagerar ibland med påpekandet "dålig säkerhetskultur" i de granskningar som görs.

I diskussionen om säkerhetskultur har man sällan eller aldrig gjort någon djupgående analys av styrbarhetsproblematiken. Om man vill använda säkerhetskultur som en modell för att styra säkerhet borde man ha något slag av relation mellan säkerhetskultur och den säkerhetsprestation som ett system förmår prestera. Redan på denna nivå finns det stora svårigheter. Här kommer bl.a. akademikernas oförmåga in att komma överens om vilka komponenter som skall räknas in i begreppet säkerhetskultur och vad som behövs för att en säkerhetskultur skall kunna anses god.

Man kan visserligen tänka sig att man försöker styra mot en god säkerhetskultur som ett värde i sig självt, men då bör man fortfarande ha en idé om hur man kan påverka säkerhetskulturen och hur man kan observera resultaten. En ansats till tillstånd kunde vara att man ser på de begrepp man vanligen brukar associera med säkerhetskultur, dvs. attityder, beteenden, föreställningar och värden. Dessa begrepp går dock inte att använda direkt, eftersom de måste sättas i relation till varandra och till händelser, objekt och situationer. En annan svårighet är att man för att kunna tala om en säkerhetskultur hos en organisation måste göra något slag av integrering över organisationens medlemmar. Hur skall denna göras, lika över alla, i förhållande till säkerhetsrelaterade uppgifter personerna gör eller på något annat sätt? Nästa fråga är vad man sedan kan göra för att påverka säkerhetskulturen. Det vanliga är att föreslå något slag av uppryckningsprojekt, som då predikar vikten av säkerhet och illustrerar med bilder av hur illa det kan gå. Här kunde man kanske tala om metoderna, skrämman, hota och muta, men det är tvivelaktigt om sådana metoder kan användas i detta sammanhang.

Vi ser alltså att kraven på modell, observerbarhet och styrbarhet blir svåra att uppfylla för begreppet säkerhetskultur. Hur är det då med en målfunktion? För att konstruera en målfunktion är det kanske tillräckligt om man kan anta att ett antal utbildade specialister gör intervjuer och observationer och den vägen gör en subjektiv bedömning av säkerhetskulturen på någon lämpligt vald skala. Här uppstår det två svårigheter. Den ena svårigheten är att en kännedom om experternas bedömningsgrunder kan antas påverka de mätresultat man får. Den andra svårigheten uppstår om bedömningsgrunderna inte är kända, för att detta kan göra det enkelt för de bedömda att förklara dåliga resultat med att experterna inte har förstått de svar de har fått och de situationer de observerat.

I och med att det uppstår problem i att försöka styra säkerhet genom säkerhetskultur eller att styra säkerhetskultur som ett inneboende värde, kan man fråga på vilket sätt begreppet säkerhetskultur kunde vara användbart. Min uppfattning är att det skulle vara fel att helt döma ut begreppet, eftersom det har rönt ett stort intresse och har blivit väletablerat. En möjlighet kunde vara att i gruppdiskussioner om säkerhet använda säkerhetskultur som ett samlande begrepp på mycket som kan gå rätt eller fel. Genom att var och en i diskussionen definierar hur hon eller han förstår begreppet och illustrerar med situationer där man kan se exempel på god eller dålig säkerhetskultur, så lyckas man ofta stimulera till upplysande diskussioner, som bl.a. förmedlar en insikt i hur envar på sitt sätt bidrar till en god säkerhet.

Några kvarvarande problem

När man ser på de begränsning som innefattas i ett ledningssystem, kan man se att kanske den största svårigheten uppstår i att modellera sitt system. Det är många komponenter som på något vis kan påverka hur en händelsekedja kommer att utveckla sig. Vilka bör man ta med och vilka kan man lämna bort? Det är inte heller sagt att man känner alla de påverkansmekanismer som kan uppträda och hur de påverkar i olika situationer. Speciellt när man försöker modellera människor och organisationer är det inte ens sagt att det finns någon vedertagen teori för hur interaktioner på en mikronivå genererar beteenden på en makronivå. Allt detta gör att varje modell av helheten måste bli mycket grov.

Till detta kommer några resultat från matematiskt teori, som bl.a. visar att ett instruktions-system aldrig kan bli fullständigt och att man aldrig a priori kan säga om ett visst system kommer att nå ett visst tillstånd eller inte. Vidare vet man att vissa olinjära system uppvisar ett kaotiskt beteende, vilket gör att en förutsägelse om deras framtida beteende endast kan var giltigt för en mycket kort tid. Allt detta visar att det också i deterministiska system finns osäkerheter, som är svåra att hantera (Wahlström, Rollenhagen, 2012).

För att få en riskbedömning bör man kunna ge sannolikhetsbedömningar av hur ofta ett identifierat hot kan väntas bli realiserat. För att kunna ge en sådan borde man ha en modell av fördelningsfunktionen. Här har normalfördelningen använts flitigt, vilket är motiverat i många fall. Studier av bl.a. finansmarknader har emellertid demonstrerat att en normalfördelning kan ge mycket stora underskattningar av osannolika händelser. Till detta tillkommer dessutom svårigheten att empiriskt bestämma en sannolikhetsfördelning. Man kanske aldrig kan få en tillräckligt lång observationsperiod för att man med ett visst mått av säkerhet skall kunna säga något om sannolikhetsfördelningen.

När man ser på dessa problem kan man inte frigöra sig från uppfattningen att det bland lekmän och varför inte också bland specialister, ofta finns en alltför stor övertro till riktigheten av de modeller man använder. Det är ofta också så att en mycket detaljerad modellering av det tekniska systemet inte försvarar sin plats i en bedömning av helhetsrisker, om man inte har en i stort sett lika god modell av de människor och de organisationer som hanterar det tekniska systemet. I detta sammanhang har begreppet resilience engineering förts fram som ett komplement till klassisk säkerhetsteknik. I begreppet ingår tanken, att man i systemen skall bygga in en bättre återhämtningsförmåga, så att systemens olika delar lättare kan kompensera för störningar och normal variabilitet som alltid uppträder.

Slutsatser

Till slut vill jag föra fram några synpunkter jag tycker blir uppenbara, när man försöker tillämpa kontrollmetaforen på begreppet säkerhetsledning. Först och främst det att man kan identifiera sitt problem (modellering, simulering, styrning) är redan till en stor hjälp. Vill man med sin modell bara förstå och beskriva eller vill man också ha den som hjälp för att styra sitt system? Om man vill styra så är det tillrådligt att gå igenom de fyra nödvändiga villkoren för en framgångsrik styrning. Om något av villkoren inte är uppfyllda, så bör man försöka ändra

på sin modell. Sedan är också tanken att särskilja mellan de fyra olika MTOI-systemen värd att uppmärksamma, eftersom systemen är mycket olika till sin karaktär och därför kräver olika typer av modeller och styrningar. Idén att begränsa sin modell till det man för ögonblicket är intresserad av, kan också vara till stor hjälp när man försöker hitta något som är hanterbart, men i alla fall kan ge vettiga svar på de frågor man vill ställa. Till sist tror jag att tanken om tre distinkta regioner i systemets tillståndsrum kan vara till stor hjälp när det gäller att skapa styralgoritmer som förmår hålla systemen inom regionen av säkra tillstånd.

När man ser styrning av säkerhet mera generellt, så tror jag att det är viktigt att inse att det alltid kommer att finnas brister i vår förståelse av system och omvärld. Detta har också förts fram inom ett koncept som kallas resilience engineering (Hollnagel et al., 2006). Vi skall naturligtvis försöka modellera våra system så bra som möjligt, men vi måste alltid vara beredda på överraskningar av sådant som vi inte visste. Samtidigt måste vi ha en förmåga att ta till oss de erfarenheter som kan samlas både från det egna systemet och från andra liknande system. Detta betyder bl.a. en öppenhet för intryck från omvärlden. Eftersom det verkar finnas en övertro på vår förmåga att ge förutsägelser när det gäller risk, så kan det vara på sin plats att åtminstone de som arbetar inom området säkerhet undviker att komma med alltför självsäkra påståenden av typen "systemen är absolut säkra" eller "vi har tänkt på allt".

För att kunna argumentera för att använda ett system som för med sig risker, bör man kunna argumentera för att samhällets helhetsnytta är betydligt större än det riskbidrag som systemet ger. För att kunna göra detta måste man kunna ge något slag av kvantitativ riskbedömning, som är försvarbar även i det fall att en olycka har hänt. Här får man t.ex. argumentera för att ett modernt samhälle förutsätter att vissa tjänster såsom kraftförsörjning och transporter fungerar, vilket då betyder att man kan tolerera olyckor och tillbud under förutsättning att de sker tillräckligt sällan. Om vi lyckas ta till oss de erfarenheter som hela tiden skapas i världen, borde det med nuvarande kommunikationer vara möjligt att bygga upp de lärande system, som många inom området säkerhetsteknik frågar efter (Rollenhagen, Wahlström, 2013).

Referenser

Hollnagel E., Woods D.D., Leveson N., 2006. Resilience engineering: Concepts and precepts, Ashgate.

IAEA, 1991. Safety Culture, INSAG-4, International Atomic Energy Agency, Vienna.

Rasmussen J., Svedung I., 2000. Proactive risk management in a dynamic society, Swedish Rescue Services Agency, Karlstad, Sweden.

Rollenhagen, C. 2005. Säkerhetskultur, RX Media, Stockholm.

Rollenhagen, C., Wahlström, B. (2013). Ledning av säkerhetskritiska organisationer, en introduktion, Studentlitteratur AB, Lund.

Wahlström B., 1994. Models, modelling and modellers; an application to risk analysis, European Journal of Operations Research (EJOR), Vol.75, Issue 2.

Wahlström B., 2007. Reflections on regulatory oversight of nuclear power plants, Int.J.Nuclear Law, 1, No. 4.

Wahlström B., 2011. Organisational learning – reflections from the nuclear industry, Safety Science 49, 65–74.

Wahlström, B., Rollenhagen, C. Safety management – A multi-level control problem. Safety Sci. (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.06.002>.

Zadeh L., Desoer C., 1963. Linear systems theory, McGraw Hill, New York.

Om författaren



Björn Wahlström (Djurholmsvägen 2, 22920 Brändö, bjorn@bewas.fi) föddes den 22 april 1944 i Jakobstad, Finland. Han avlade sin diplomingenjörsexamen vid Tekniska högskolan i Helsingfors 1967 med regleringsteknik som huvudämne. Han fortsatte sina studier vid samma högskola och avlade 1971 sin licentiatexamen med systemteori som huvudämne och matematik som biämne. Björn anställdes vid Statens tekniska forskningscentral (VTT) 1971. År 1985 utnämndes han till professor och laboratoriechef för VTTs elektrotekniska laboratorium.

Under åren 1989-91 var Björn tjänstledig från VTT för att arbeta på International Institute for Applied Systems Analysis i Laxenburg utanför Wien i Österrike. Från 1994 fram till sin pensionering i januari 2008 innehade han en forskningsprofessur i systemteknik på VTT. Under sin yrkeskarriär har Björn deltagit i flera arbetsgrupper inom IAEA och OECD/NEA. Han var koordinator för EU-projekten ORFA och LearnSafe, som under åren 1998–2004 undersökte inverkan av ledning och organisation på kärnkraftens säkerhet. Han har skrivit mer än 300 artiklar inom områdena systemteknik, simulering, kontrollsystem, kärnkraft, kontrollrumsplanering, MTO-frågor, organisation och ledning, riskanalys samt teknologiplanering och innovationsprocesser. Efter sin pensionering utför Björn konsultuppdrag genom sin egen firma Oy Bewas Ab.

En efterskrift

Martin Ollus och Björn Wahlström

Inledning

Vårt projekt, som fick sin början efter påsken 2012 i Saint-Jean-Pla-de-Corts, Frankrike, har nu förts till sitt slut. Det har varit givande trots att det drog ut längre i tid än vi hade väntat. Vi vill med en kort efterskrift avsluta rapporten med några personliga reflektioner, som dels grundar sig på diskussioner under projektets gång, och dels på den erfarenhet vi samlat i vår aktiva yrkesverksamhet. Vi reflekterar över hur systemteorins teorier, modeller, metoder och verktyg kan ställas i samhällets tjänst. Eftersom systemteorin baserar sig på beskrivningar av verkligheten, diskuterar vi speciellt problematik i anslutning till modellering. Vi hävdar inte, att våra reflektioner skulle vara allmängiltiga, utan vi vill framhålla, att vi själva står för våra åsikter, men att de gärna får användas för att initiera en senare och djupare diskussion.

Om modeller

Modeller av en verklighet är systemteorins mest centrala koncept. Genom att bygga en modell kan man använda den som ett surrogat för verkligheten och som man kan experimentera med på olika sätt. Man kan också säga, att modeller utgör basen för en förståelse av den omvärld vi lever i. Det som kanske skiljer systemteorin mest från ett vardagligt funderande, hur olika förhållanden påverkar varandra, är att man använder formella metoder för att beskriva verkligheten. Man kan då välja ut det, som man är intresserad av och koncentrera sig på detta. I och med att modellen ges en formell struktur, kan man så att säga översätta skeenden i verkligheten till modellens simulerade verklighet och ge generaliserbara resultat för den situation man undersöker. Principen att bygga modeller har blivit en generell metod för många vetenskapsområden och modellerna, som används har också blivit allt mera raffinerade. Modellerna varierar också från generella (t.ex. semantiska) modeller till ingående detaljrika (ofta matematiska) modeller.

När man börjar bygga en modell av ett verkligt system, är det några svårigheter man måste klara av. För det första skall man komma ihåg, att det oftast är en helhet man försöker komma åt. Det betyder att man måste samla information om många olika förhållanden av allt det som kan påverka det man vill studera. Detta kan betyda svårigheter bl.a. med tillgång till olika typer av information och storleksförhållanden, när man sätter igång med sitt projekt. Samtidigt måste man i ett tidigt skede också inse att man måste begränsa sitt projekt, så att det inte blir ohanterligt. Detta betyder att man på någon nivå bestämmer sig för att ta med bara de förhållanden, som har den största påverkan på de fenomen man studerar. I detta ligger visserligen en fara att man lämnar bort något som är viktigt, eftersom det ofta händer att en liten påverkan någonstans genom olika typer av kopplingar sist och slutligen kan få en stor inverkan på resultaten.

Från början är det svårt att veta hur man skall begränsa en modell, om man inte känner det verkliga systemet mycket bra, men en första modell som småningom byggs ut är en utmärkt metod att lära sig förstå sitt system. En annan metod är att se på systemet som sammansatt av många delsystem, som man i sin tur försöker förstå och modellera. Genom att iterativt röra sig mellan helhet och detaljer kan man ofta bygga upp en god insikt i hur det verkliga systemet fungerar i olika situationer. Här är det dock viktigt att hålla gränssnitten klara och enkla, så att alla delmodeller man använder i så stor utsträckning som möjligt kan valideras mot en verklighet.

En princip när man bygger modeller är att bestämma sig för vilken nivå man vill undersöka sitt system. Nivån bestäms naturligtvis av ändamålet med modellen, d.v.s. vilka frågor vill man ha svar på genom att använda modellen. Ofta är man intresserad av något slag av mellannivå (meso), som kan användas till att dra slutsatser om hur det verkliga systemet fungerar på en övergripande nivå (makro). I modellen kommer man då att beskriva hur systemet fungerar som resultatet av interaktioner under mellannivån (mikro). Dessa tre nivåer, makro, meso och mikro, i modelleringsarbetet går ofta igen för varje enskild modell och den kan sedan i sin tur användas för att skapa modeller på olika nivåer av den verklighet man undersöker. Allt detta betyder att den som bygger en modell, själv måste bestämma sig för hur gränserna i modellen skall definieras och detta har i sin tur lett till att man ofta ser modellskapandet som en konst och inte som en vetenskap.

Modellers begränsningar

Den teknik som utvecklats för att modellera verkligheten på ett sådant sätt att man kan förlita sig på fysikaliska lagbundenheter har varit en lång rad av framgångar. Man har kunnat visa, att verkligheten faktiskt uppför sig som de modeller man har, under förutsättningen att modellens antagande kan visas gälla. Här argumenterar vi för att en systemsyn behövs, där man identifierar interaktioner och återkopplingar mellan olika system så att man skapar en förståelse för helheten (Senge, 2006).

Trots att vi menar att systemtänkandet har nått många framgångar, så måste man alltid komma ihåg de begränsningar, som är förknippade med varje modell. En modell utgör en förenklad beskrivning av den verklighet man modellerar. Detta betyder att den endast kan användas i ett område, där modellens grundantaganden gäller. Om man förflyttar sig utanför detta område, är modellen ofta värdelös.

En annan svårighet är att hitta en modell, som varken är trivial eller alltför komplex. En trivial modell kan inte ge något annat än triviala förutsägelser om hur en verklighet kommer att fungera. En alltför komplex modell har antagligen alltför många parametrar, som inte går att bestämma på ett entydigt sätt och den blir då ohanterlig.

I allmänhet kan man också se en övertro på de resultat en modell ger. Det är mycket lätt att glömma viktiga återkopplingar, som ligger utanför modellens beskrivningsförmåga och då finns det stora risker för att den inte speglar verkligheten på ett korrekt sätt. Speciellt viktigt

är det här att inse, att olinjära samband och de modeller man valt för att avbilda slumpmässiga skeenden kan föra med sig att de resultat man erhåller blir kvalitativt felaktiga (Taleb 2012).

En sista svårighet uppstår, då man försöker modellera människor och organisationer. Man kan inte på samma sätt använda sig av lagbundenheter, som man gör när man modellerar fysikaliska system. Modeller, som involverar grupper av människor och deras beteenden, måste därför ofta ses med en viss skepsis. Det betyder ändå inte, att sådana modeller inte behövs. Världen står inför stora utmaningar, som behöver åtgärdas. Vi har t.ex. globala ekologiska och ekonomiska problem att lösa. För att finna acceptabla lösningar till problem, måste man ha en insikt om mekanismer för orsak och verkan. Alla aktörer har också någon uppfattning om förhållandet och använder den som bas för sitt beslutsfattande om t.ex. interventioner. Uppfattningen är säkert inte alltid så systematiskt uppbyggd. För ändamålet är beskrivningar (modeller) av verkligheten, som grundar sig på en systematisk analys av kopplingsmekanismer säkert mera användbara än t.ex. intuitiva uppfattningar. Modellerna kan naturligtvis inte vara detaljrika, eftersom de ofta beskriver ett stort antal fenomen och grundar sig på en samling av olika vetenskapliga discipliner och kan bestå av flera modelleringsnivåer och –tekniker.

En väg framåt

De femtio år av teknisk utveckling, som vi har överbryggat i rapporten är anmärkningsvärd. Idag har man en möjlighet att modellera många naturfenomen på ett sätt, som föreföll fullständigt omöjligt, då vi påbörjade våra studier på Tekniska högskolan i början av 1960-talet. Med bakgrunden av denna historia kan man anta att utvecklingen kommer att fortsätta åtminstone i något årtionde, men vad som sedan kommer att hända är svårare att se.

När det sedan kommer till mänsklighetens förmåga att lösa de problem (Jackson, 2009), som vi nu ställs inför när, det gäller att anpassa en växande befolkning på jorden till de krav på hållbarhet, som behövs för att undvika ett ekologiskt sammanbrott, så tror vi att en systemsyn behövs och att systemteorin kan hjälpa till med metoder och verktyg för att göra resan möjlig. Vi måste observera vår omgivning, vi måste analysera det vi ser för att förstå hur allting hänger ihop och vilken kausaliteten är i de fenomen vi registrerar. På basen av det måste vi agera för att skapa en värld, som vi tror att våra barn och barnbarn samt även följande generationer kan leva i.

Tack

Framför allt är vi tacksamma för det vi fått via vår professor Hans Blomberg. Hans egen verksamhet samt den anda vi kände i laboratoriet för systemteori har varit den grund, som vi byggt våra professionella karriärer på. Hans var säkert inte medveten om hur stor betydelse ett systemteoretiskt tänkesätt, som vi fick i hans laboratorium, gav oss som grund för all fortsatt verksamhet.

Vi har under årens lopp samarbetat med en stor mängd kollegor runt om i världen. Alla har på sitt sätt bidragit till den intressanta och lärorika vandring vi beskrivit i våra bidrag till den här rapporten. Utan att nämna någon enskild person vill vi tacka alla.

Seminariet i Brändö samt den här rapporten hade inte kommit till utan deltagarnas intresse, deras aktivitet under seminariet samt bidrag med texterna i rapporten. Det är också ett värdefullt uttryck för uppskattningen av vår professor. Tack.

Vi vill också tacka Svenska tekniska vetenskapsakademien i Finland (STV) för ekonomiskt stöd till arrangemangen för seminariet.

Referenser

Jackson, T. (2009). Prosperity without growth; economics for a finite planet, Earthscan.

Senge, P. (2006). The fifth discipline; the art and practice of the learning organisation, Random House.

Taleb, N.N. (2012). Antifragile; things that gain from disorder, Penguin Books.

Författarna

De båda författarnas personliga data finns i samband med deras egna artiklar i denna publikation

Seminaarin ohjelma

Maanantai 13 toukokuuta 2013

12.05 *Saapuminen Åvaan, Brändö*

12.30 *Lounas*

13.30 – **Pentti Lautala:** Systeemitheoria ja malli, tavoitteellisen toiminnan perusta

18.00

Aarne Halme: Teoreetikosta insinööritieteiden harjoittajaksi - mitä systeemitheoria on opettanut minulle

Juhani Hirvonen: Mitä ihmettä systeemitheoretikko tekee VTT:llä?

Jari Hämäläinen: Systeemien simulointia ja optimointia VTT:llä

Raimo Hämäläinen: Systeemiajattelusta systeemiälyyn

Raimo Ylinen: Polynomisysteemitheoria elämäntyönä

18.30 – *Sauna*

20.00 – *Päivällinen*

Tiistai 14 toukokuuta 2013

9.00 – **Annikki Mäkelä:** Dynamiikkaa ja optimointia metsän kasvussa ja

12.30 kasvatuksessa

Risto Sievänen: Skenaarioita metsien hiilinieluista

Kim Pingoud: Ilmastonmuutoksen hillinnän dynamiikka – onko bioenergia ilmastoneutraalia?

Eero Tamminen: Sähkön hinnan ennustaminen Pohjoismaiden markkinoilla

Kyösti Tarvainen: Pohjoismaiden väestörakenteiden projektioita

12.30 – *Lounas*

13.30 – **Lars-Erik Häll:** Regulatorer, datorer och simulering – 35 år I&C i Olkiluoto

15.30

Martin Ollus: Systemteori på många nivåer – Erfarenheter från både tekniska och icke tekniska tillämpningar

Andrea Holmberg: Systeemitheoriasta liiketoimintaa

Björn Wahlström: Säkerhetsledning – en systemteknisk tillämpning

15.30 – Keskustelu

16.15 *Seminaarin päättäminen*

Seminaarin osaanottajat



Vasemmalta oikealle seisovat Eero Tamminen, Kim Pingoud, Kyösti Tarvainen, Björn Wahlström, Jari Hämäläinen, Juhani Hirvonen, Andrea Holmberg, Lars-Erik Häll, Aarne Halme, Heikki Ihantola, Risto Sievänen, Martin Ollus, Raimo Ylinen Annikki Mäkelä, Pentti Lautala ja Raimo Hämäläinen. Näiden lisäksi osallistui Carl-Fredrik Geust ja seuralaiset Liisa Halme, Eija Lautala, Immi Ollus, Christel Westerholm-Tamminen ja Barbro Wahlström.

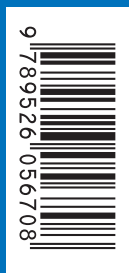




Säätötekniikan ja systeemiteorian opetus käynnistyi Teknillisessä korkeakoulussa 1950- ja 1960-lukujen taitteessa akateemikko Erkki Laurilan ja professori Hans Blombergin toimesta. Alalle kehittyi vilkasta toimintaa, jolla oli Suomessa kauaskantoisia vaikutuksia niin akateemisessa maailmassa kuin elinkeinoelämässäkin. Professori Blombergin johtama Systeemiteorian laboratorio oli yksi keskeisistä yksiköistä Suomessa ja se toimi TKK:n sähkötekniillisellä osastolla ja oli loppuvuosina osa myös TKK:n Yleisen osaston matematiikan laitosta tarjoten systeemiteoriaa yhtenä laitoksen pääaineena.

Tämä kirja kuvaa Systeemiteorian laboratorion vaihteita sekä professori Blombergin ja hänen oppilaittensa vaikutusta alan kehittymiseen Suomessa.

Kannen kuva esittää laitetta, jonka professori Hans Blomberg suunnitteli ja toteutti väitöskirjatyössään.



ISBN 978-952-60-5670-8
 ISBN 978-952-60-5669-2 (pdf)
 ISSN-L 1799-487X
 ISSN 1799-487X
 ISSN 1799-4888 (pdf)

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
 Systeemianalyysin laboratorio, Matematiikan ja
 systeemianalyysin laitos

**KAUPPA +
 TALOUS**

**TAIDE +
 MUOTOILU +
 ARKKITEHTUURI**

**TIEDE +
 TEKNOLOGIA**

CROSSOVER

**DOCTORAL
 DISSERTATIONS**