



TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institute of Automation and Control

Kehittyneet säätömenetelmät voimalaitossovelluksissa

Energiatekniikan automaatio
TKK 2007

Yrjö Majanne TTY/ACI

SISÄLTÖ

- Säättötarpeet
- Perinteiset menetelmät vs. kehittyneet menetelmät
- Kehittyneiden menetelmien perusteet
- Joitain sovelluksia



MIKSI VOIMALAITOKSIA ON KYETTÄVÄ SÄÄTÄMÄÄN ENTISTÄ PAREMMIN ?

- **ENERGIATUOTANNON TEHOKKUUDEN JA JOUSTAVUUDEN VAATIMUKSET**

- AVAUTUNEET SÄHKÖMARKKINAT EDELLYTTÄVÄT VOIMALAITOKSILTA MUKAUTUMISTA HETKELLISIIN KUORMAN MUUTOKSIIN
- ENERGIAA ON KYETTÄVÄ TUOTTAMAAN PAREMMALLA HYÖTYSUHTEELLA
- TUOTETUN ENERGIAN HINTA JA TEHON MUUTOKSEN MARGINAALIKUSTANNUKSET TIEDETTÄVÄ MAHDOLLISIMMAN TARKASTI



MIKSI VOIMALAITOKSIA ON KYETTÄVÄ SÄÄTÄMÄÄN ENTISTÄ PAREMMIN ?

- **YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET**

- SÄÄTÄMÄTTÖMÄN ENERGIANTUOTANNON MÄÄRÄN KASVU SÄHKÖVERKOSSA (TUULIVOIMA)
- KÄYTTÖLUPAEHDOISSA MÄÄRÄTTYJEN PÄÄSTÖRAJOJEN NOUDATTAMINEN
- PÄÄSTÖKAUPPA
- HYVÄ PALAMISEN HALLINTA -> VÄHÄN PÄÄSTÖJÄ

- **PROSESSIKEHITYS**

- UUDEN SUKUPOLVEN "KETTERÄT" KATTILAT
- KUORMANMUUTOSNOPEUDET KASVAVAT MUTTA PROSESSI TULEE VAIKEAMMIN HALLITTAVAKSI
- MONIPOLTTOAINEKÄYTTÖ JA "HUONOT" POLTTOAINEET



PID-SÄÄTÖ VS. SÄÄDÖN VAATIMUKSET

- **VAKIOPARAMETRISEN PID-SÄÄDÖN OMINAISUUKSIA:**
 - LINEAARISUUS
 - KOOSTUU ERILLISISTÄ ITSENÄISESTI TOIMIVISTA SÄÄTÖPIIREISTÄ (SISO)
 - JOKAPAIKAN SÄÄTÖMENETELMÄ, JOLLA PÄÄSTÄÄN USEIMMISSA SOVELLUKSISSA VÄLTÄVÄÄN LOPPUTULOKSEEN KOHTUULLISELLA TYÖMÄÄRÄLLÄ (SUUNNITTELU + KÄYTTÖNOTTO)
- **VOIMALAITOSPROSESSIN OMINAISUUKSIA**
 - EPÄLINEAARINEN (LÄMMÖNSIIRTO, AIKAVAKIOT, EPÄSYMMETRINEN DYNAMIIKKA, ...)
 - AIKAVARIANTTI (LIKAANTUMINEN, POLTTOAINEEN OMINAISUUDET, ...)
 - SISÄLTÄÄ EI-MINIMIVAIHEISTA DYNAMIIKKA (LIERIÖN PINTA)
 - MONIMUUTTUJAJÄRJESTELMÄ, MISSÄ PROSESSISUUREIDEN VÄLILLÄ VOIMAKKAITA RISTIKKÄISVAIKUTUKSIA



PID-SÄÄTÖ VS. SÄÄDÖN VAATIMUKSET

- **VOIMALAITOSPROSESSIN SÄÄTÄMINEN VAKIOPARAMETRISILLA PID-SÄÄTÖPIIREILLÄ**
 - LINEAARINEN SÄÄTÄJÄ ⚡ EPÄLINEAARINEN PROSESSI
 - SÄÄDÖN KÄYTTÖKELPOINEN TOIMINTA-ALUE KAPEA
 - SÄÄTÖ VIRITETTÄVÄ RAUHALLISEKSI, JOTTA VÄLTYYTÄÄN STABIILISUUSONGELMILTA
 - PROSESSIN TOIMINTAPISTEEN MUUTOKSET AJETTAVA USEIN MANUAALISESTI
 - SKALAARISÄÄTÖ ⚡ MONIMUUTTUJAPROSESSI
 - PROSESSIN RISTIKKÄISVAIKUTUKSET HÄIRITSEVÄT SÄÄDETYN PROSESSIN TOIMINTAA AIHEUTTAEN VÄRÄHELYITÄ (VIRITYSONGELMIA)
- **JOHTOPÄÄTÖS:**
VOIMALAITOSPROSESSIN KASVANEIDEN SÄÄDETTÄVYYSSVAATIMUSTEN JOHDOSTA PID-POHJAINEN SKALAARISÄÄTÖ EI RIITÄ, VAAN TARVIKSI MONIPUOLISEMPIA, NS. KEHITYNEITÄ SÄÄTÖMENETELMIÄ



KEHITTYNEITÄ SÄÄTÖMENETELMIÄ

OPTIMISÄÄTÖ
ADAPTIIVINEN SÄÄTÖ
MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ
SUMEA SÄÄTÖ
NEUROVERKOT
ROBUSTI SÄÄTÖ

- MENETELMIEN SOVELTAMINEN
 - TARVITAAN PROSESSISTA MALLI
 - VANKKA PROSESSITUNTEMUS
 - HALLITTAVA MALLINNUSMENETELMÄT JA TYÖKALUT
 - RIITTÄVÄSTI PROSESSIMITTAUKSIA
 - TARVITAAN MODERNI AUTOMAATIOJÄRJESTELMÄ
 - LASKENTATEHOA
 - SOVELLUSTYÖKALUT JA -OHJELMISTOPAKETIT



OPTIMISÄÄTÖ

OPTIMISÄÄDÖSSÄ ETSITÄÄN LINEAARISELLE JÄRJESTELMÄLLE

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

SÄÄTÖLAKI, JOKA MINIMOI KUSTANNUSFUNKTION J

$$J = \sum_{j=1}^n S_j \tilde{J} + \sum_{j=1}^n Q_j J + \sum_{j=1}^n R_j \bar{J}$$

MISSÄ

\tilde{J} = säädön loppuvirheen kustannus

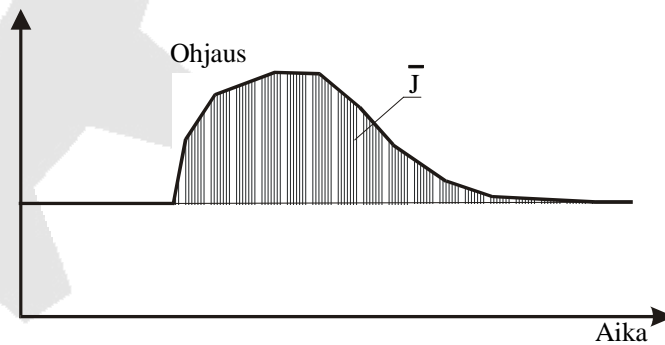
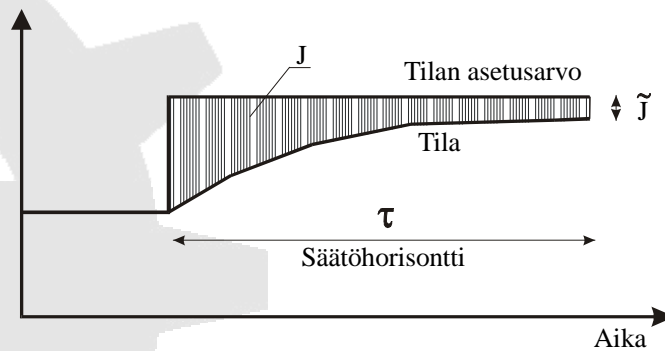
J = säätövirheen aikaintegraali säätöhorisontissa

\bar{J} = ohjaukustannus

n = optimoitavien tilojen lukumäärä



OPTIMISÄÄTÖ

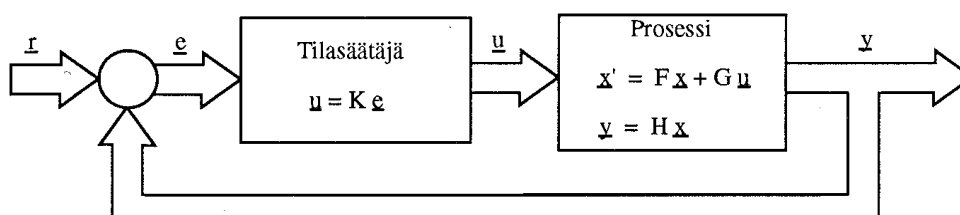


OPTIMISÄÄTÖ

- KUSTANNUSFUNKTION J MINIMOIVA OHJAUSSTRATEGIA ON NS. **TILATAKAISINKYTKENTÄ**

$$u(t) = K(t)x(t)$$

- OPTIMAALISEN TILASÄÄTÄJÄN MUODOSTAVA MATRIISI K SAADAAN RATKAISTUKSI ns. **RICCATIN YHTÄLÖN** AVULLA



OPTIMISÄÄDÖN OMINAISUUKSIA

- **SOVELLUKSENA YLEENSÄ NS. YLEMMÄN TASON OPTIMOINTI**
 - LASKEE TOIMINTAPISTEEN ASETUSARVOT PERUSSÄÄTÖTASOLLE
- **PERUSTUU PROSESSIMALLIIN**
- **SOVELTUU PROSESSEILLE, JOISSA ON VOIMAKKAAT RISTIKKÄISVAIKUTUKSET, USEITA MITTAUKSIA JA OHJAUKSIA (VAPAASTEITA)**
- **VAATIMUKSENA MITTAUSTEN LUOTETTAVUUS JA TOIMINTAVARMUUS**
- **SOVELTUU TÄSSÄ MUODOSSA LINEAARISTEN ONGELMIEN RATKAISUUN**
 - VOIMAKKAASTI EPÄLINEAARISISSA PROSESSEISSA PROSESSIN KÄYTTÄYTYMINEN MALLINNETTAVA ERI TOIMINTAPISTEISSÄ
- **EI SOVELLU PROSESSEILLE, JOIHIN TEHDÄÄN USEIN MUUTOKSIA TAI JOIDEN TOIMINTAVAATIMUKSIA MUUTETAAN**
 - SOVELLUKSEN YLLÄPITO, MALLINNUS YMS

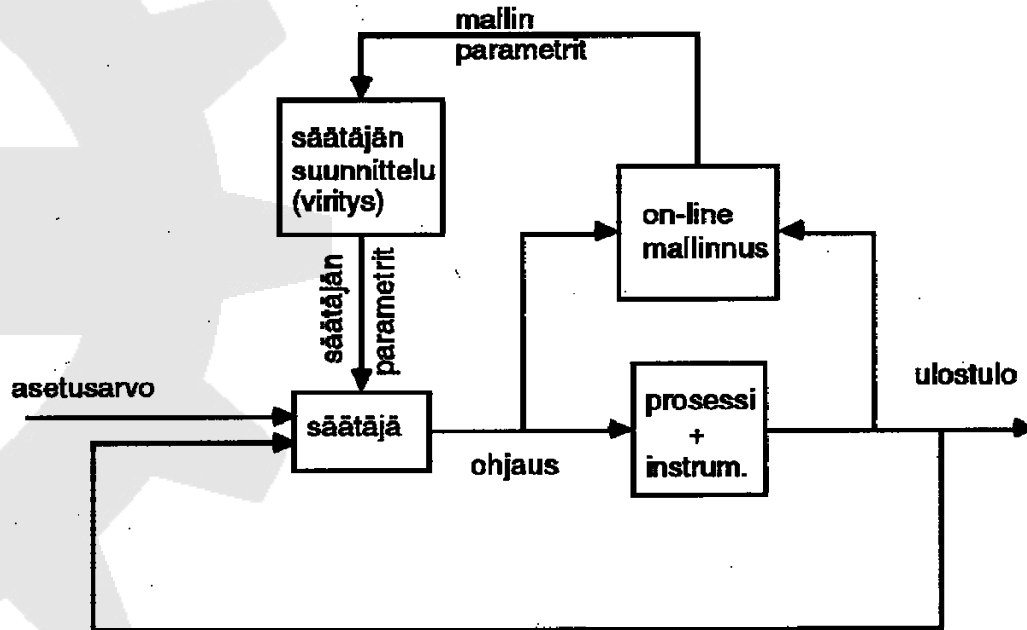


ADAPTIIVINEN SÄÄTÖ

- **TARVITAAN VOIMAKKAASTI EPÄLINEAARISTEN PROSESSIEN SÄÄDÖSSÄ (LINEAARINEN SÄÄTÖ VS. EPÄLIN. PROSESSI)**
- **MENETELMÄLLÄ VOIDAAN TARKOITTA A MM. SEURAAVIA MENETELMIÄ:**
 - SÄÄTÄJÄN PARAMETRIEN TAULUKOINTI
 - VALITAAN SÄÄTÄJÄLLE PARAMETRIT TAULUKOSTA PROSESSIN TOIMINTAPISTEEN PERUSTEELLA
 - ITSEVIRITTYVÄ SÄÄTÄJÄ
 - PROSESSIN ON-LINE MALLINNUS JA SÄÄTÄJÄN PARAMETRIEN LASKENTA MALLIN PERUSTEELLA
 - AUTOTUNERIT
 - ERIKSEEN SUORITETTAVA SÄÄTÄJÄN AUTOMAATTINEN VIRITYSTOIMINTA



ADAPTIIVINEN SÄÄTÖ

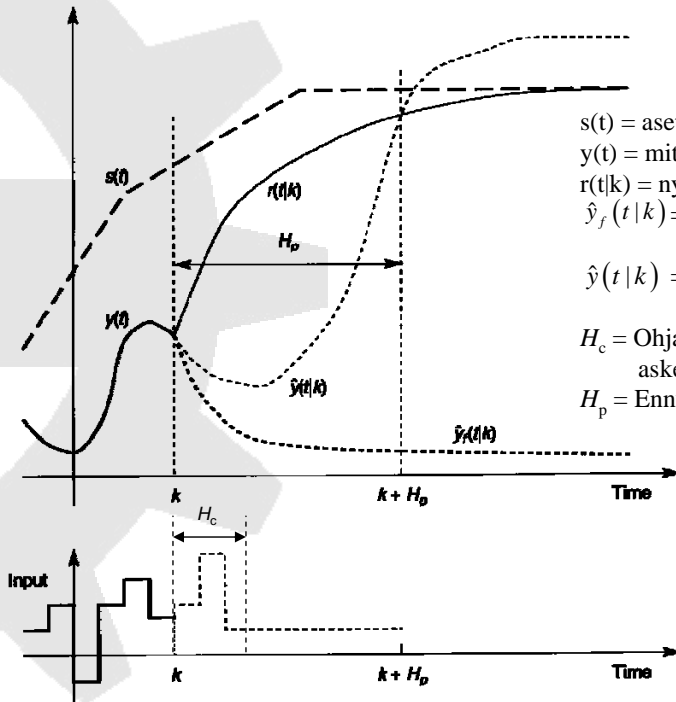


MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ

- SÄÄTÖALGORITMIA SANOTAAN ENNUSTAVAKSI ELI PREDIKTIIVISEKSI, JOS OHJAUSTEN LASKENTA PERUSTUU JÄRJESTELMÄN MALLIN AVULLA ENNUSTETUN JA JÄRJESTELMÄN HALUTUN KÄYTTÄYTYMISEN VÄLISEN EROTUKSEN MINIMOINTIIN



MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ



$s(t)$ = asetusrvo hetkellä t
 $y(t)$ = mittaus hetkellä t
 $r(t|k)$ = nykyhetkestä k eteenpäin laskettu tavoitetraktori
 $\hat{y}_f(t|k)$ = prosessin ennustettu vaste ajanhetkeen k mennessä tehdyillä ohjauksilla (vapaavaste)
 $\hat{y}(t|k)$ = prosessin ennustettu vaste ajanhetkeen $k+H_c$ mennessä tehdyillä ohjauksilla
 H_c = Ohjaushorisontti (käytettävissä oleva ohjaukskeleiden lukumäärä)
 H_p = Ennustehorisontti

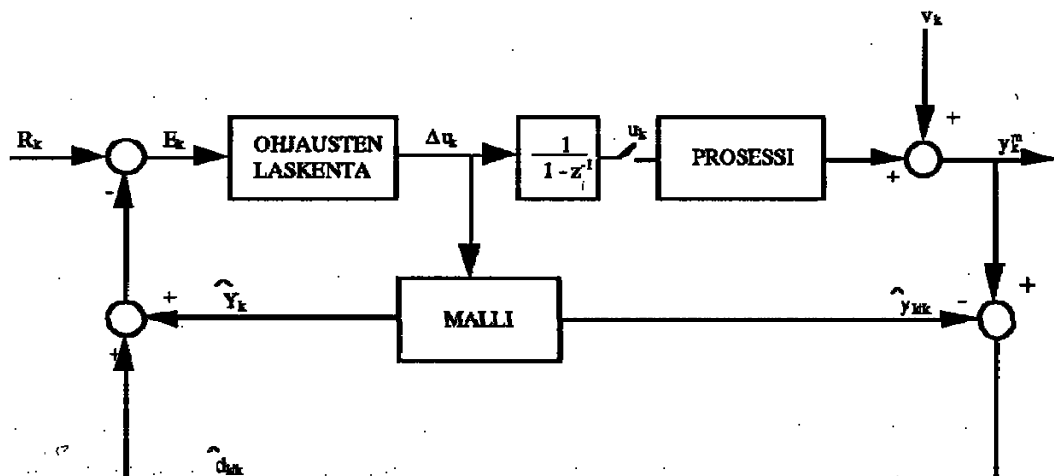
Figure 1.4 Predictive control: the basic idea.



MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ

- **MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÄJÄ HYÖDYNTÄÄ MYÖTÄKYTKENNÄN PERIAATETTA (IMC RAKENNE):**

- SÄÄTÄJÄ SISÄLTÄÄ JÄRJESTELMÄN DYNAMIIKAN JA LASKEE OPTIMAALISET OHJAUKSET KÄYTTÄMÄLLÄ TUNNETTUA MALLIA
- JOS MALLI ON "TÄYDELLINEN", TOIMII PELKKÄNÄ MYÖTÄKYTKETTYNÄ SÄÄTÄJÄNÄ
- KUN $d \neq 0$ SÄÄTÄJÄN TOIMINNASSA YHDISTYVÄT TAKAISINKYTKENTÄ JA MYÖTÄKYTKENTÄ



MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ

MPC ON AINOA SÄÄTÖMENETELMÄ, JOKA PYSTYY AKTIIVISESTI HUOMIOIMAAN RAJOITUKSET PROSESSIN SÄÄDÖSSÄ

- Prosessien optimaalinen toimintapiste löytyy yleensä toimittaessa jotain rajoitusta vasten.
 - Rajoitukset liittyvät usein suoriin kustannuksiin, kuten energiakustannuksiin
- Ohjauksiin liittyy aina rajoituksia
 - Kapasiteetti
 - Nopeus
- Prosessin tiloihin liittyviä rajoituksia
 - Lopputuotteen laatu
 - Käyttötalous (energia, raakaineet)
 - Tuotantokapasiteetti
 - Turvallisuus



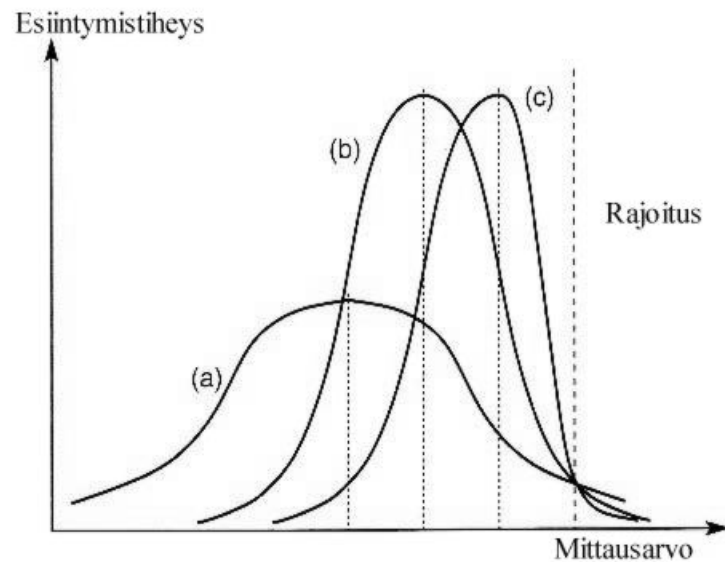
MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ

- Joitain esimerkkejä
 - Puskurisäiliöiden käyttö kuormitushäiriöiden stabiloinnissa
 - Ei asetusarvosäätöä, vaan pinnankorkeus säiliössä saa vaihdella ylä- ja alarajojen välissä
 - Toimilaitteen toiminta-alueen fyysiset rajat
 - Ohjauksen saturoituminen -> windup



MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ

- Lineaarinen säädin -> epälineaarinen käyttäytyminen ?
 - Aikaansaadaan rajoituksilla



AMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Institute of Automation and Control

PREDIKTIIVISEN SÄÄDÖN OMINAISUUKSIA

- SOVELTUU PROSESSEILLE, JOISSA ON
 - OHJAUS- JA SÄÄTÖSUUREIDEN SEKÄ TILOJEN RAJOITUKSIA
 - MITATTAVIA HÄIRIÖITÄ (MYÖTÄKYTKENTÄ)
 - PITKIÄ VIIVEITÄ
 - RIITTÄVÄSTI VAPAUSASTEITA, JOTTA OPTIMOINTI MIELEKÄSTÄ
- SOVELLUSTA VAIKEUTTAVIA TEKIJÖITÄ
 - KOHDEPROSESSI VOIMAKKAASTI EPÄLINEAARINEN
 - PROSESSI VAIKEASTI MALLINNETTAVISSA
 - PROSESSIN VIIVERAKENNE TUNTEMATON TAI MUUTTUVAT VIIVEET
 - VAATII SOVELLUSALUSTALTA PALJON LASKENTATEHOA



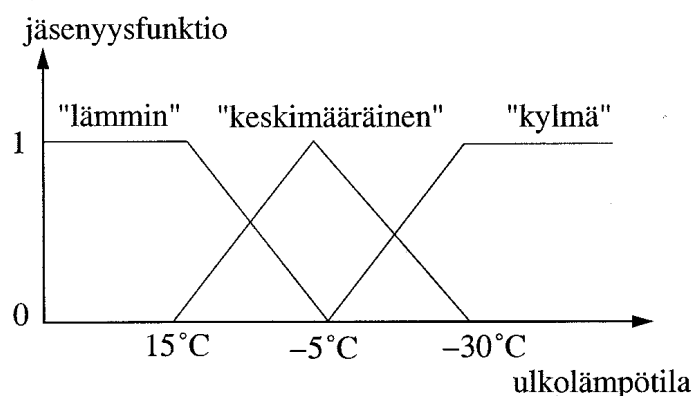
SUMEA SÄÄTÖ

- SUMEAN SÄÄDÖN PERUSAJATUS ON HYÖDYNTÄÄ PROSESSIN TOIMINTAAN LIITTYVÄ HEURISTINEN TIETO ESIM. MALLINTAMALLA KOKENEEN OPERAATTORIN PÄÄTTELY AJOTILANTEESSA
- MENETELMÄN KESKEISIÄ PIIRTEITÄ OVAT
 - SÄÄTÖALGORITMI PERUSTUU SUMEAAAN JOUKKO-OPPIIN
 - PROSESSIN OHJAAJAN ASiantuntemuksen MALLINTAMINEN SUMEAN LOGIIKAN KÄSITTEIN
 - SÄÄNTÖPOHJAISUUS
 - SUMEAAAN LOGIIKKAAN PERUSTUVA PÄÄTTELYMEKANISMI



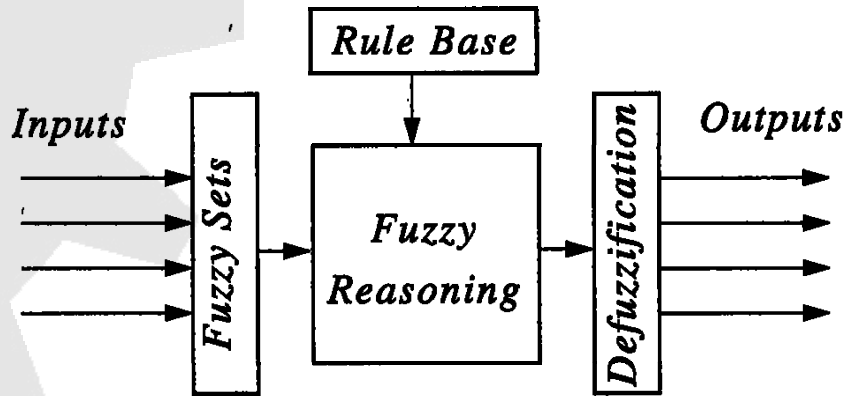
SUMEA SÄÄTÖ

- SOVELLUSALUEEN TIETÄMYS ESITETÄÄN HEURISTISINA SÄÄNTÖINÄ, ESIM.
 - JOS** ULKONA KYLMÄ **NIIN** KÄYTÄ SUURTA LÄMMITYSTEHOA
 - JOS** ULKONA LÄMMINTÄ **NIIN** KÄYTÄ PIENTÄ LÄMMITYSTEHOA
 - JOS** ULKONA KESKIMÄÄRÄISTÄ **NIIN** KÄYTÄ KESKIM. LÄMMITYSTEHOA
- SÄÄNNÖT SIDOTAAN REAALIMAAILMAAN (ESIM. MITTAUKSIIN) JÄSENYYSFUNKTIOILLA



SUMEA SÄÄTÖ

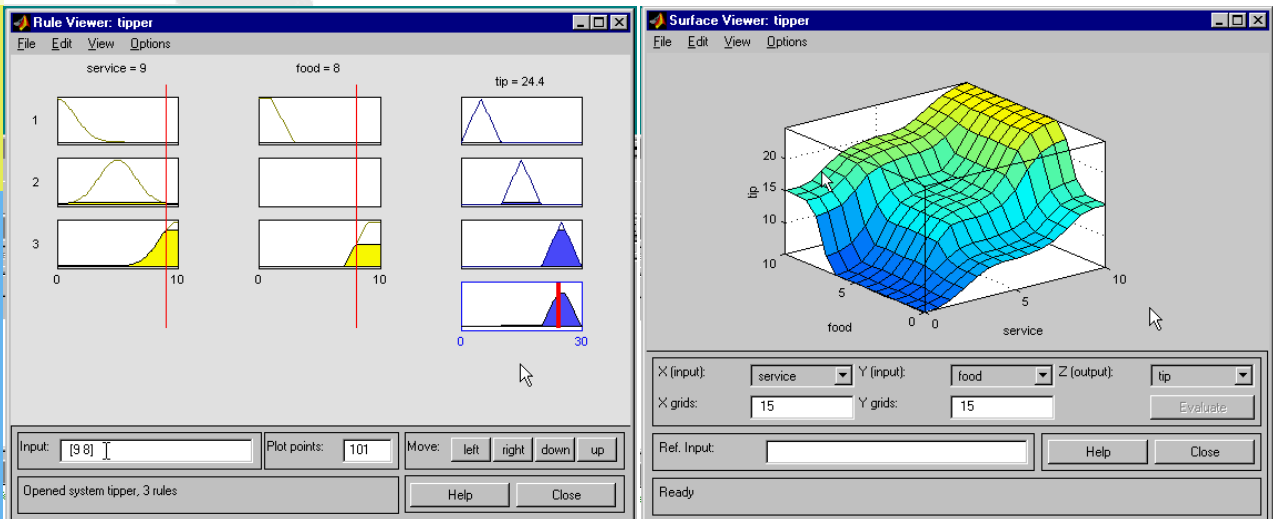
- VARSINAINEN PÄÄTTELY TEHDÄÄN SUMEILLA RELAATIOILLA (MONIARVOLOGIIKKA)
- JÄRJESTELMÄN REAALIARVOINEN ULOSTULO SAADAAN JOLLAIN SELKEYTYSMENETELMÄLLÄ



SUMEA SÄÄTÖ

SUMEA PÄÄTTELY FUNKTIONA

- SUMEA PÄÄTTELY TUOTTAA YKSIKÄSITTEISEN VAKIOPARAMETRISEN KUVAUKSEN INPUT-SUUREISTA, SIIS FUNKTION (TARVITTAESSA EPÄLINEAARISEN).



SUMEAN SÄÄDÖN OMINAISUUKSIA

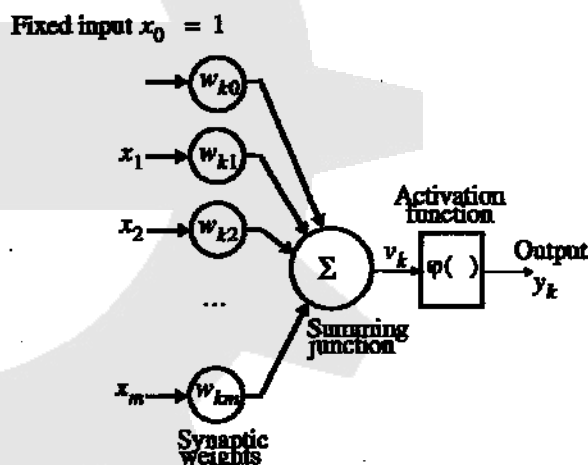
- SUMEAN SÄÄDÖN SOVELTAMISTA PUOLTAVIA TEKIJÖITÄ
 - PROSESSIN MALLINTAMINEN PERINTEISIN MENETELMIN VAIKEAA
 - KÄYTETTÄVISSÄ VÄHÄN MITTAUKSIA, OSA ESIM. LAB.ANALYYSIJÄ
 - SÄÄTÖ LUONTEELTAAN ENEMMÄN TOIMINTAPISTESÄÄTÖÄ KUIN STABILOIVAA
 - SÄÄDETTÄVÄ PROSESSI VOIMAKKAASTI EPÄLINEAARINEN
 - PROSESSIN TOIMINNASTA OLEMASSA HEURISTISTA TIETOA

- SUMEAAAN SÄÄTÖÖN LIITTYVIÄ ONGELMIA
 - TOIMINNAN PERUSTEENA OLEVAN SÄÄNTÖKANNAN TESTAAMINEN VAIKEAA
 - KARKEA VIRITYS JA KÄYTTÖÖNOTTO NOPEAA, MUTTA HIENOVIRITYS TYÖLÄSTÄ JOHTUEN SOVELTUVAN TEORIAN PUUTTEESTA

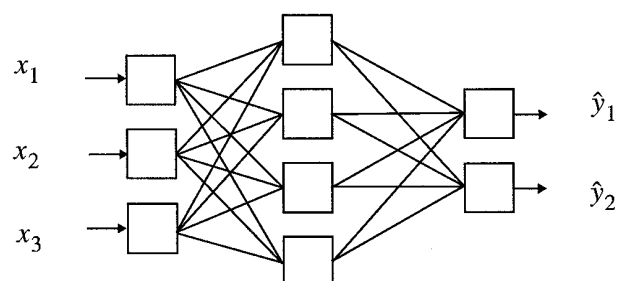


NEUROVERKOT

YKSINKERTAINEN NEURONIN MALLI



MONIKERROKSIINEN PERCEPTRON (MLP)



NEUROVERKOT

MONIKERROKSIINEN PERCEPTRON VERKKO

- YLEISIN NEURAALIVERKKOTYYPPI
- OPETETAAN ESIMERKEILLÄ, OHJATTU OPETUS
- MUODOSTAA EPÄLINEAARISEN KUVAUKSEN SISÄÄN MENON JA ULOSTULON VÄLILLE (BLACK BOX MALLI, JONKA PARAMETREILLA EI OLE FYSIKAALISIA VÄSTINEITA)

SOVELLUKSIA

- MALLINTAMINEN JA IDENTIFIOINTI
- ENNUSTAJAN SUUNNITTELU JA ON-LINE TOTEUTUS (PREDIKTORI, SOFT SENSOR)
- EPÄLINEAARINEN NEURAALIVERKKOSÄÄTÄJÄ
- MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ, NEURAALIVERKKO PROSESSIMALLINA



ROBUSTI SÄÄTÖ

- SÄÄTÄJÄN SUUNNITTELU SITEN, ETTÄ SUUNNITTELUUN LÄHTÖKOHTANA OLEVAN MALLIN EPÄTARKKUUDEN VAIKUTUS SÄÄDÖN LOPPUTULOKSEEN PYRITÄÄN HUOMIOIMAAN MAHDOLLISIMMAN HYVIN (WORST CASE ANALYSIS)
- VOIDAAN SOVELTAA SEKÄ PID-SÄÄTÄJÄN VIRITYKSESSÄ ETTÄ MUUN TYYPPISTEN SÄÄTÖALGORITMIEN SUUNNITTELUSSA
- MENETELMIÄ MM.
 - H_{∞}
 - ROBUSTI LINEAARINEN NELIÖLLINEN SÄÄTÖ (ROBUST LQ CONTROL)



KEHITTYNEIDEN SÄÄTÖMENETELMIEN SOVELLUSKOHTEITA VOIMALAITOSPROSESSISSA

VOIMALAITOSKATTILAN PÄÄSÄÄTÖKOHTEET

- **PÄÄSÄÄTÖ**
 - HÖYRYN PAINE
 - HÖYRYN MÄÄRÄ
 - SÄHKÖTEHO
 - LÄMPÖTEHO
- **POLTTOAINETEHO**
 - POLTTOAINEMÄÄRÄ
 - PALAMISILMAMÄÄRÄ
- **SYÖTTÖVESIMÄÄRÄ**
 - LIERIÖN PINTA (LIERIÖKATTILA)
 - TULISTUS-HÖYRYSTYSSUHDE (LÄPIVIRTAUSKATTILA)
- **HÖYRYN LÄMPÖTILA**
 - JÄÄHDYTYSVESIMÄÄRÄT ERI TULISTUSASTEISSA



KEHITTYNEIDEN SÄÄTÖMENETELMIEN SOVELLUSKOHTEITA VOIMALAITOSPROSESSISSA

OPTIMISÄÄTÖ

- **MONIMUUTTUJAMENETELMÄ, JOKA SOVELTUU PROSESSEILLE, JOISSA ON VOIMAKKAAT RISTIKKÄISVAIKUTUKSET, USEITA MITTAUKSIA JA OHJAUKSIA**
 - ONGELMIA: EPÄLINEAARISUUDET, MALLIN EPÄTARKKUUS, MITTAUSTEN RIITTÄMÄTTÖMYYS JA EPÄLUOTETTAVUUS
- **SOVELLUSKOHTEITA**
 - TUOREHÖYRYN LÄMPÖTILASÄÄTÖ MONIVAIHEISESSA TULISTUKSESSA
 - MONIPOLTTOAINEKATTILAN POLTTOAINEKUSTANNUSTEN MINIMOINTI



KEHITTYNEIDEN SÄÄTÖMENETELMIEN SOVELLUSKOHTEITA VOIMALAITOSPROSESSISSA

PREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ

- OPTIMAALISEN OHJAUKSEN TUOTTAVA MONIMUUTTUJAMENETELMÄ, JOKA SOVELTUU PROSESSEILLE, JOISSA ESIINTYY OHJAUS- JA SÄÄTÖSUUREIDEN SEKÄ TILOJEN RAJOITUKSIA SEKÄ VIIVEITÄ
 - ONGELMIA: PROSESSIN MALLINNUS, LASKENTATEHON TARVE,
- SOVELLUSKOHTEITA
 - HÖYRYN PAINESÄÄTÖ + LIERIÖN PINTA
 - KATTILAN TEHON JA SAVUKAASUN O₂-PITOISUUDEN SÄÄTÖ (ILMAKERROIN)
 - HÖYRYVERKON PAINESÄÄTÖ
 - TUOREHÖYRYN LÄMPÖTILASÄÄTÖ
 - PREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ + DIAGNOSTIIKKA => VIKASIIETÖINEN SÄÄTÖ



KEHITTYNEIDEN SÄÄTÖMENETELMIEN SOVELLUSKOHTEITA VOIMALAITOSPROSESSISSA

SUMEA SÄÄTÖ

- SOVELTUU PROSESSEILLE, JOILLA SEURAAVIA OMINAISUUKSIA
 - EPÄLINEAARINEN
 - PERINTEISIN MENETELMIN VAIKEASTI MALLINNETTAVA
 - KÄYTÖSSÄ VÄHÄN MITTAUKSIA, JOISTA OSA ESIM. LAB.ANALYYSIJÄ
 - PROSESSIN TOIMINNASTA HEURISTISIA OPEROINTIMALLEJA
- SÄÄDÖN OMINAISUUKSIA
 - SÄÄNTÖPOHJAISEN VIRITYKSEN TAKIA HELPPO SOVELTAA MONIMUTKAISIINKIN KOHTEISIIN
 - TOIMIVA JÄRJESTELMÄ SAADAAN NOPEASTI (KARKEA VIRITYS)
 - TEHOKKAITA JA HELPPOKÄYTTÖISIÄ TYÖKALUJA, PALJON SOVELLUKSIA
 - PARHAIMMILLAAN PIENIDIMENSIOISISSA SOVELLUKSISSA (1 – 3 INPUT-SUURETTA)
 - HIENOVIRITYS ON ONGELMALLINEN
 - SUUREN SÄÄNTÖKANNAN VIRITYS JA TESTAUS HANKALAA



KEHITTYNEIDEN SÄÄTÖMENETELMIEN SOVELLUSKOhteITA VOIMALAITOSPROSESSISSA

• SOVELLUSKOhteITA

- PALAMISEN HALLINTA BIOPOLTTOAINEKATTILOISSA
 - POLTTOAINEEN LAADUSTA AIHEUTUVIEN HÄIRIÖIDEN KOMPENSOINTI
- TUOREHÖYRYN PAINESÄÄTÖ JÄTEPOLTTOAINETTA KÄYTTÄVÄSSÄ MONIPOLTTOAINEKATTILASSA
- HÖYRYNTASAUJÄRJESTELMÄN HÖYRYAKUN SÄÄTÖ
 - TOIMINTAMOODI RIIPPUVAINEN HÄIRIÖN SUURUUDESTA JA VAIHEESTA
- KERROSLEIJUKATTILAN PETIIN VARASTOITUNEEN POLTTOAINEMÄÄRÄN ESTIMOINTI
- TULIPESÄN LÄMPÖTILOJEN JA SAVUKAASUN JÄÄNNÖSHAPPIPITOISUUDEN SÄÄTÖ ILMOJEN JAOLLA



KEHITTYNEIDEN SÄÄTÖMENETELMIEN SOVELLUSKOhteITA VOIMALAITOSPROSESSISSA

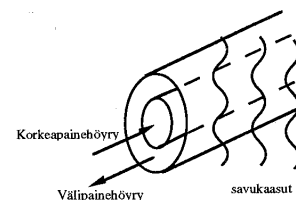
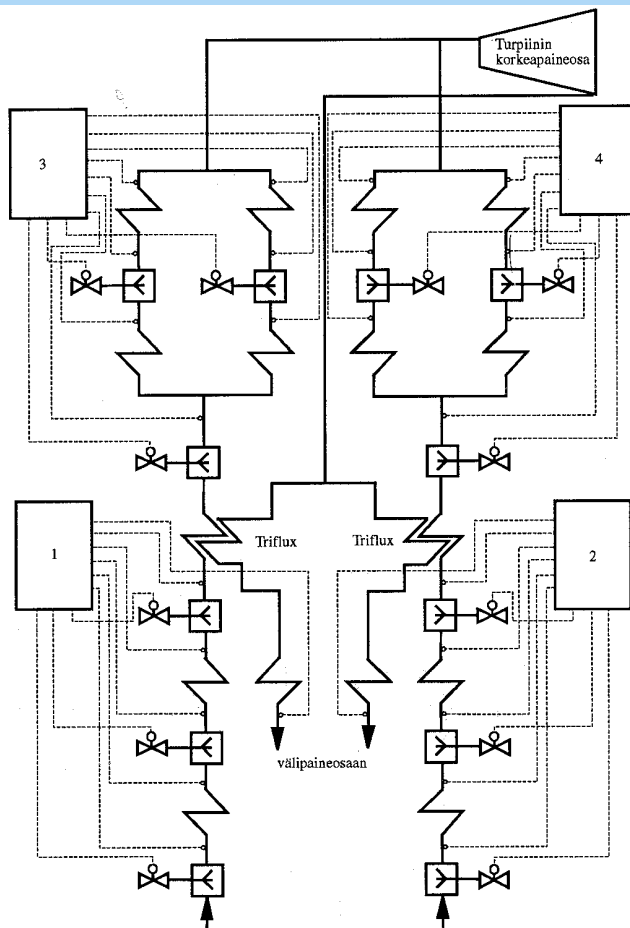
NEUROVERKOT

- KÄYTETÄÄN SEURAAVANLAISISSA TEHTÄVISSÄ:
 - PROSESSIEN MALLINTAMINEN JA IDENTIFIOINTI (MYÖS EPÄLINEAARISET)
 - ENNUSTAJAN SUUNNITTELU JA ON-LINE TOTEUTUS (PREDIKTORI, SOFT SENSOR)
 - EPÄLINEAARINEN NEUROVERKKOSÄÄTÄJÄ
 - MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ, NEURAALIVERKKO PROSESSIMALLINA
- SOVELLUSKOhteITA
 - PALAMISPROSESSIN OPTIMOINTI (HYÖTYSUHDE + PÄÄSTÖT)
 - HÖYRYN PAINEN JA LÄMPÖTILAN (TUOREHÖYRY + VÄLITULISTETTU HÖYRY) PREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ KÄYTTÄEN ADAPTOITUVAA NEURO-VERKKOMALLIA



SOVELLUSESIMERKKEJÄ TUOREHÖYRYN LÄMPÖTILAN OPTIMISÄÄTÖ [1]

- SOVELLUSKOHDE 400 MW:N SULZER-TYYPPINEN KIVIHIILEN NURKKAPOLTTOKATTILA
- SÄÄDÖN TAVOITTEENA ON PITÄÄ TUOREHÖYRYN JA VÄLITULISTETUN HÖYRYN LÄMPÖTILAT MAHDOLLISIMMAN TASAISINA JA LÄHELLÄ ASETUSARVOJAAN

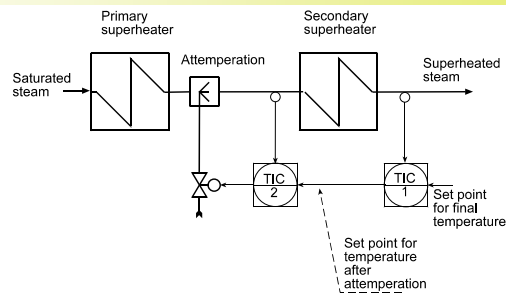


Triflux-lämmönvaihtimen periaatteellinen rakenne.

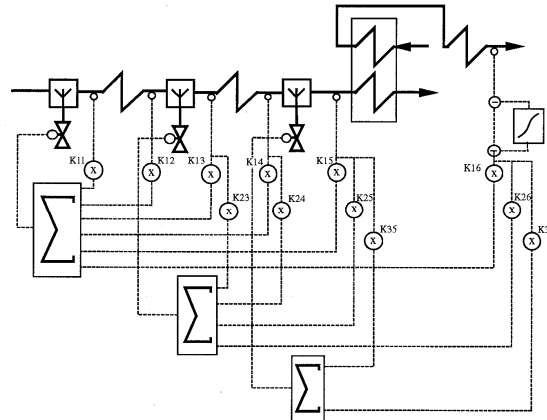


SOVELLUSESIMERKKEJÄ TUOREHÖYRYN LÄMPÖTILAN OPTIMISÄÄTÖ [1]

- PERINTEINEN TULISTETUN HÖYRYN LÄMPÖTILASÄÄTÖ



- MONIMUUTTUJAOPTIMISÄÄTÖÖN PERUSTUVA LÄMPÖTILASÄÄTÖ



TECHNOLOGY

Institute of Automation and Control

SOVELLUSESIMERKKEJÄ TUOREHÖYRYN LÄMPÖTILAN OPTIMISÄÄTÖ [1]

SÄÄTÖTULOS

- TUOREHÖYRYN KESKIMÄÄRÄINEN LÄMPÖTILAVAIHTELU PIENENI $4.7^{\circ}\text{C} \rightarrow 2.2^{\circ}\text{C}$
- VÄLITULISTETUN HÖYRYN KESKIMÄÄRÄINEN LÄMPÖTILAVAIHTELU PIENENI $8.3^{\circ}\text{C} \rightarrow 6.1^{\circ}\text{C}$
- SÄÄSTÖ n. 30 000 €/VUOSI PARANTUNEEN HYÖTYSUHTEEN MUODOSSA



SOVELLUSESIMERKKEJÄ

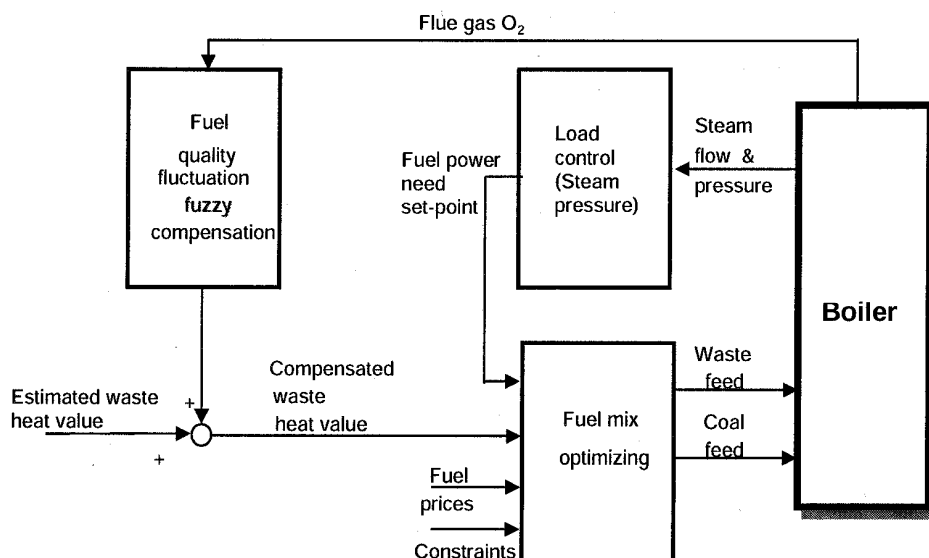
MONIPOLTTOAINEKATTILAN POLTTOAINESYÖTÖN OPTIMOINTI [2]

- SOVELLUSKOHDE ON 150 MW_{th} KIERTOLEIJUKATTILA, JOSSA POLTTOAINEENA KÄYTETÄÄN OMINAISUUKSILTAAN VAIHTELEVAA JÄTEPOHJAISTA POLTTOAINETTA SEKÄ TUKIPOLTTOAINEENA KIVIHIILTÄ
- SOVELLUKSEN TAVOITTEENA MINIMOIDA KATTILAN POLTTOAINEKUSTANNUKSET ETSIMÄLLÄ ERI POLTTOAINEIDEN SYÖTÖLLE ASETUSARVOT, JOILLA SAADAAN TUOTETTUA VAADITAVA TEHO MINIMIKUSTANNUKSIIN.
- JÄRJESTELMÄÄN ON LIITETTY HAPENKULUTUKSEEN PERUSTUVA JÄTEPOLTTOAINEEN LÄMPÖARVON REALIAIKANEN ESTIMOINTI



SOVELLUSESIMERKKEJÄ

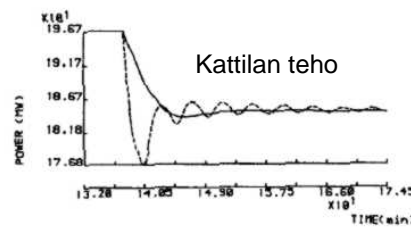
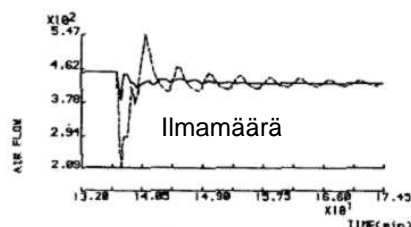
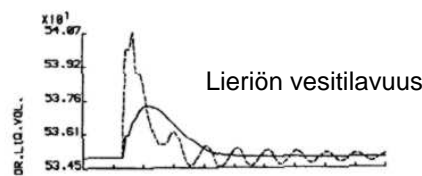
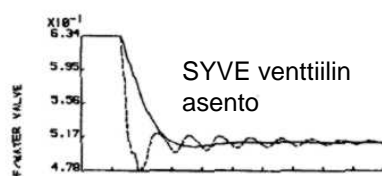
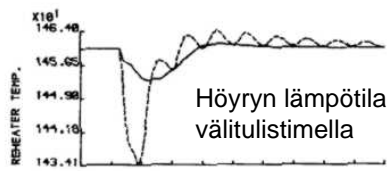
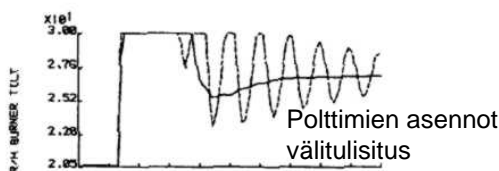
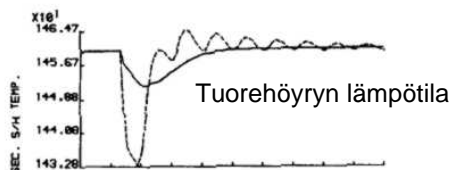
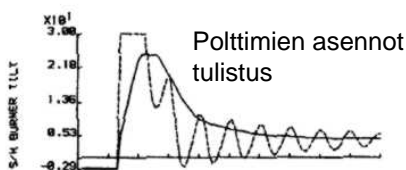
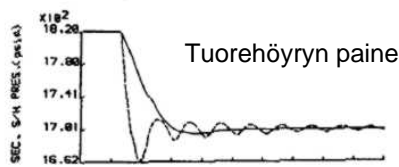
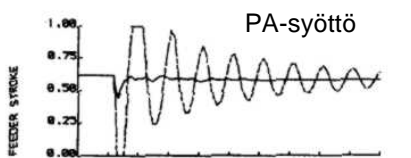
MONIPOLTTOAINEKATTILAN POLTTOAINESYÖTÖN OPTIMOINTI [2]



SOVELLUSESIMERKKEJÄ

LIERIÖKATTILAN PREDIKTIIVINEN HÖYRYNPAINESÄÄTÖ [3]

- SOVELLUSKOHDE 200 MW HIILIPÖLYKATTILA
- TUOREHÖYRYN JA VÄLITULISTETUN HÖYRYN LÄMPÖTILAT JA LIERIÖN PINTA SÄÄDETÄÄN PERINTEISESTI PI-SÄÄTIMILLÄ, HÖYRYN PAINEN (KATTILAN TEHO) PREDIKTIIVISELLÄ SÄÄTÄJÄLLÄ
- SÄÄTÄJÄSSÄ HYÖDYNNETÄÄN ADAPTIIVISTA LINEAARISTA AIKASARJAMALLIA (CARIMA), JOKA KUVAAN POLTTOAINEEN SYÖTÖN JA HÖYRYN PAINEEEN VÄLISTÄ DYNAMIIKKAA.
- MALLIN PARAMETRIT ADAPTOITUVAT PROSESSIN TOIMINTAPISTEEN MUKAAN => EPÄLINEAARISEN PROSESSIN SÄÄTÖ



Kattilan paineen pudotus

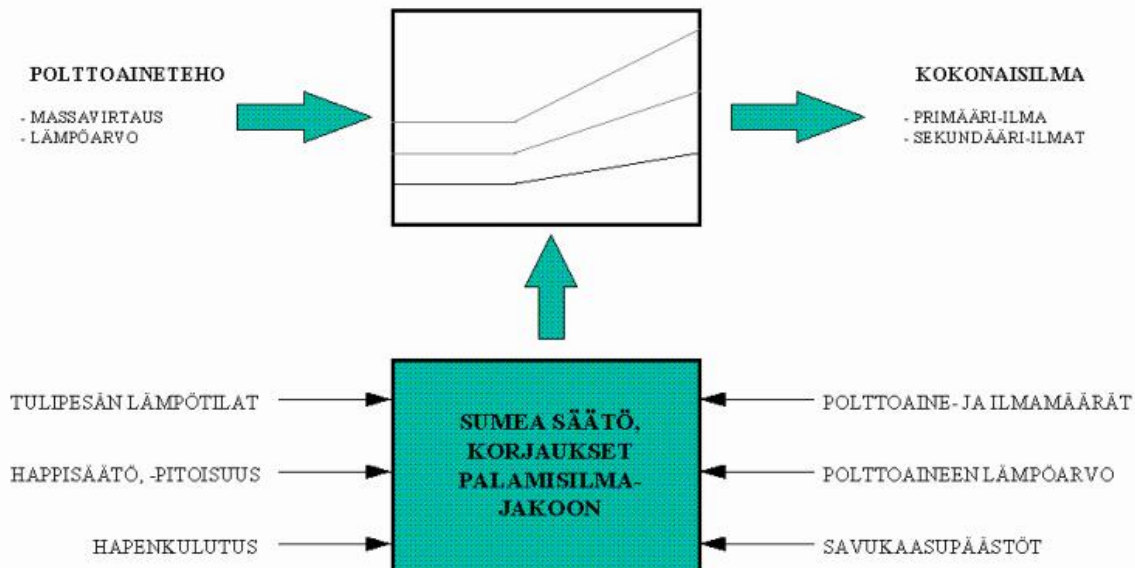
MPC = ———

PID =
.....

SOVELLUSESIMERKKEJÄ

LEIJUKATTILAN PALAMISEN HALLINTA SUMEAN SÄÄDÖN AVULLA [4]

PALAMISEN HALLINTA LEIJUKATTILASSA - PALAMISILMOJEN JAKO



SOVELLUSESIMERKKEJÄ

LEIJUKATTILAN PALAMISEN HALLINTA SUMEAN SÄÄDÖN AVULLA [4]

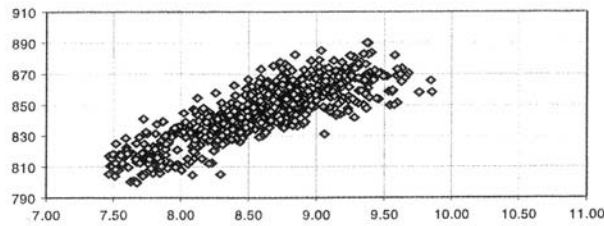
- KOKONAISILMAMÄÄRÄ LASKETAAN VAPAUTUNEEN POLTTOAINETEHON PERUSTEELLA JA O₂-KORJAUSSÄÄTÖ TOTEUTETTU SUMEALLA LOGIIKALLA
- JÄÄNNÖSHAPPITASON OPTIMOINTI SUMEALLA CO/O₂-SÄÄDÖLLÄ
- TULIPESÄN LÄMPÖTILOJEN (PETI, JÄLKIPALOTILA, SYKLONI) SÄÄTÖ ILMOJEN JAON SUMEALLA SÄÄDÖLLÄ
- NO_x JA SO₂-PÄÄSTÖJEN MINIMOINTI SUMEALLA ILMOJEN JAON SÄÄDÖLLÄ



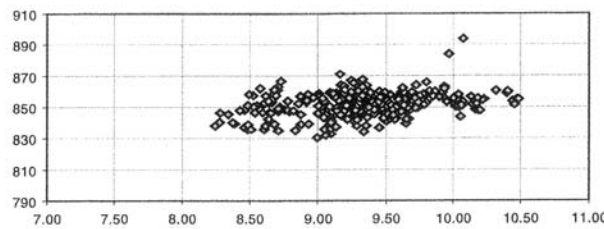
SOVELLUSESIMERKKEJÄ

LEIJUKATTILAN PALAMISEN HALLINTA SUMEAN SÄÄDÖN AVULLA [4]

Leijukattilan ylemmän tason säädöt



Ilman sumeaa säätöä

pedin lämpötilä
810 - 890°Cpolttoaineen lämpötilä
7.0 - 11.0 MJ/kg

Sumealla säädöllä

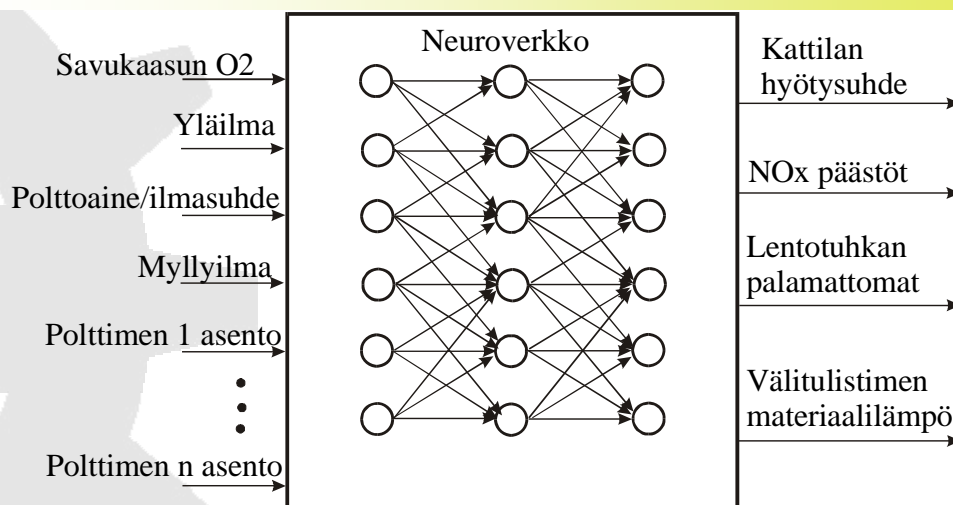
pedin lämpötilä
830 - 870°Cpolttoaineen lämpöarvo
7.0 - 11.0 MJ/kg

Säädön avulla eroon polttoaineen laadun aiheuttamasta petin lämpötilan vaihtelusta.

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Institute of Automation and Control

SOVELLUSESIMERKKEJÄ

NEUROVERKKOMALLIIN PERUSTUVA PALAMISPROSESSIN OPTIMOINTI [5]



ASETUSARVOJEN OPTIMOINTI KAIKILLE TAI VALITUILLE
PALAMISPROSESSIA OHJAAVILLE SÄÄTÖPIIREILLE

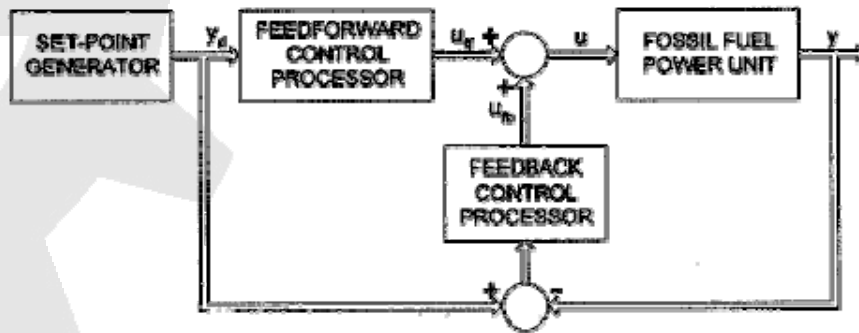
"WHAT IF" SIMULOINTI

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Institute of Automation and Control

SOVELLUSESIMERKKEJÄ

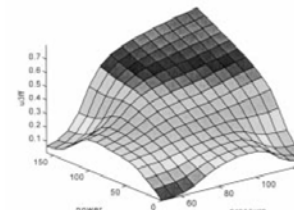
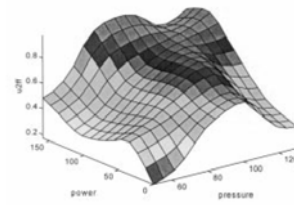
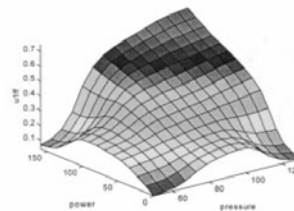
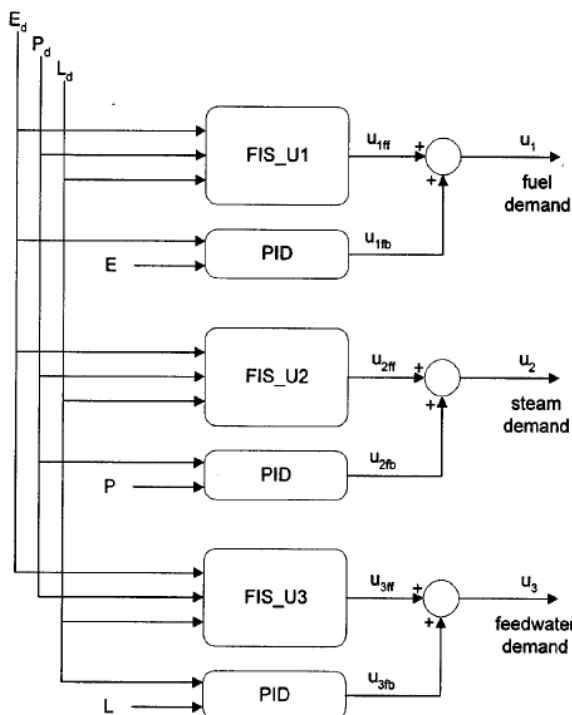
MYÖTÄKYTKETTY SUMEA TOIMINTAPISTESÄÄTÖ [6]

- SUMEALLA LOGIIKALLA TOTEUTETTU KOORDINOIVA TOIMINTAPISTESÄÄTÖ
- LAAJA TOIMINTA-ALUE VERRATTUNA PERINTEISIIN SÄÄTÖRATKAISUIHIN
 - HUOMIOI PROSESSIN DYNAMIIKAN VAIHTELUN ERI TOIMINTAPISTEISSÄ (EPÄLINEAARISUUS)



SOVELLUSESIMERKKEJÄ

MYÖTÄKYTKETTY SUMEA TOIMINTAPISTESÄÄTÖ [6]

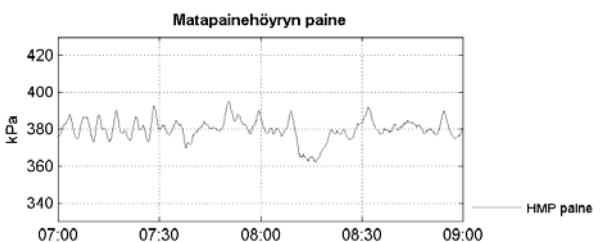
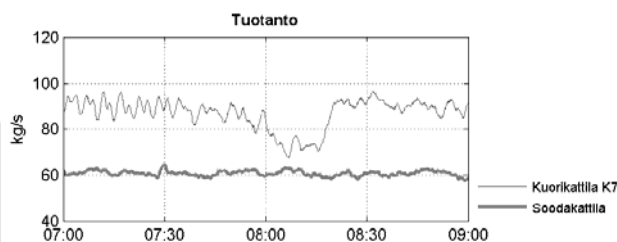
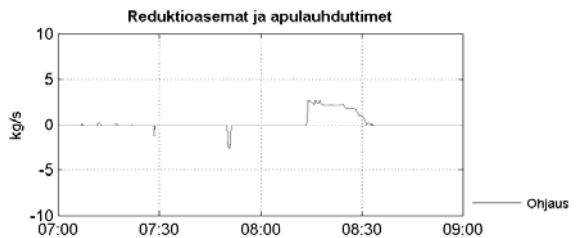
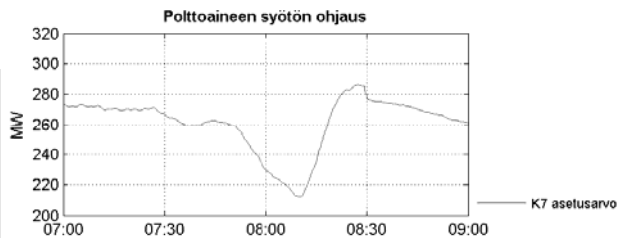
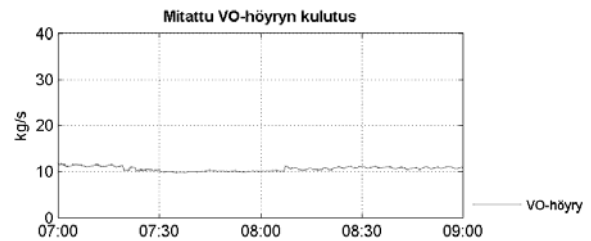
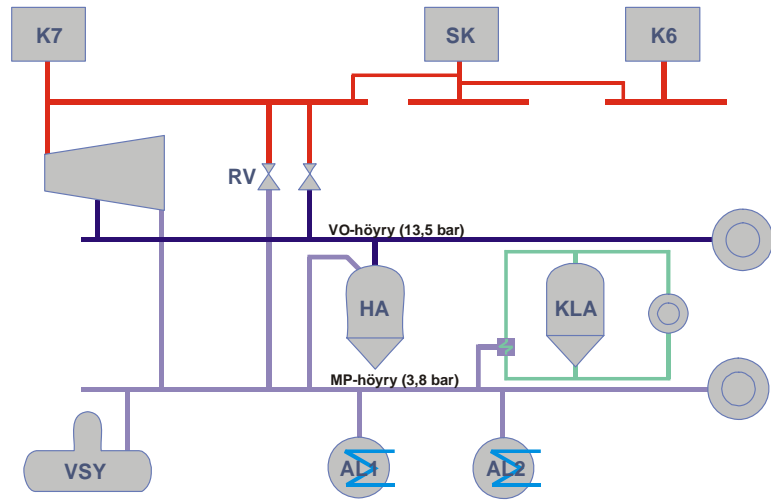


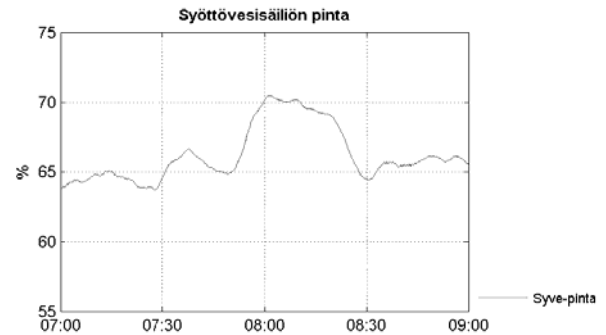
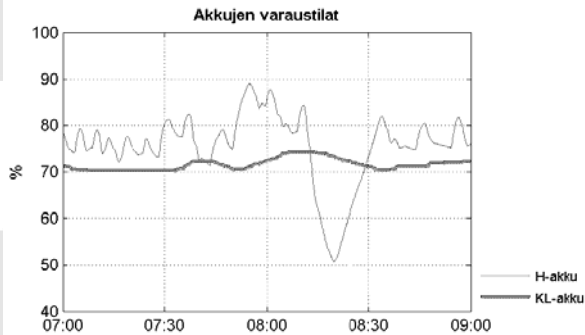
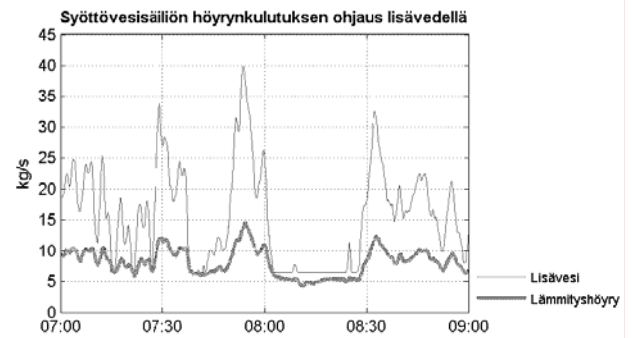
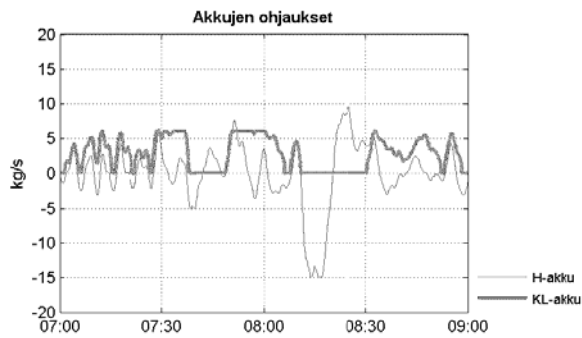
SOVELLUSESIMERKKEJÄ

HÖYRYVERKON HALLINTA MALLIPREDIKTIIVISELLÄ SÄÄTÄJÄLLÄ [7]

MPC-säätimen ohjaamat komponentit

- Höryakku, HA
- Kaukolämpöakku, KLA
- kuorikattilan K7 kiinteän polttoaineen teho
- Syöttövesisäiliön VSY lisävesimäärä
- Apulauhduttimet, AL1, AL2
- Reduktioasemat, RV





SOVELLUSESIMERKKEJÄ

HÖYRYVERKON HALLINTA MALLIPREDIKTIIVISELLÄ SÄÄTÄJÄLLÄ [7]

- Tasauskomponenttien ja tuotannon säätöliikkeet ovat keskenään koordinoituja.
- Kattilan tehon muutokset ovat suhteellisen hitaita ja polttoainetehon ohjaus seuraa kulutuksen ja tasauskomponenttien varaustilan yhdistelmää hivenen jälkimmäistä painottaen.
- Tasauskomponentit vastaavat nopeasta paineen säädöstä
 - painotus jakautuu suhteellisen tasan höyryakun, kaukolämpöakun ja syöttövesisäiliön kesken mikäli varaustilat ovat lähellä asetusarvojaan



SOVELLUSESIMERKKEJÄ

HÖYRYVERKON HALLINTA MALLIPREDIKTIIVISELLÄ SÄÄTÄJÄLLÄ [7]

- Aikaisempaan säätöön verrattuna parempi paineen säätötulos pienemmällä höyryakun käytöllä ja siten aiempaa taloudellisemmin
- Kaikkia komponentteja voidaan hyödyntää rinnan paineen säädössä
 - epätaloudellinen reduktioiden käyttö vähenee (turbiinin ohitus)
 - apulauhduttimien tai öljypolton käyttö paineen tuennassa vähenee
- Höyryverkon hallintasäätö ajaa kuorikattilaa tasaisemmalla teholla kuin aiemmin
 - suotuista vaikutus kattilan päästöihin ja elinkaareen.
- Kattilan ja tasaajien koordinoitulla ja yhtäaikaisella käytöllä saavutetaan aiempaa parempi painestabiilius.
- Aikaisempaa suuremmat kuormituksen muutokset voidaan hoitaa automaattisesti säädöillä, jolloin operaattorit voivat keskittyä tärkeimpiin tehtäviin.



LÄHTEET

1. Leppäkoski J., Kurki J.: Tilasäätäjän suunnittelu ja käyttöönotto Naantalinvuimalaitoksella. Loppuraportti. Imatran Voima Oy, Vantaa 1991
2. Karppanen E.: Advanced Control of an Industrial Circulating Fluidized Bed Boiler Using Fuzzy Logic. Acta Universitatis Ouluensis, Technica 145. Oulu 2000
3. Hogg B.W., El-Rabaie N.M.: Generalized Predictive Control of Steam Pressure in a Drum Boiler. *IEEE Transac. on Energy Conversion*, Vol 5, No 3, September 1990
4. Pyykkö J., Uddfolk J.: Leijukattilan palamisen hallinta sumean säädön avulla. Automaatiopäivät 1997.
5. Mäkilä J., Jalkanen J.P.: Neural Network Combustion Optimizer in Naantali Power Plant. Fortum Engineering Ltd. Finland.
6. Garduno-Ramirez, R., Lee K.Y.: Wide Range Operation of Power Unit via Feedforward Fuzzy Control. *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol 15, No 4, pp 421 – 426
7. Joronen, T., Kovacs, J. Majanne, Y. (Toim.). Voimalaitosautomaatio. SAS julkaisusarja nro 33. Suomen Automaatioseura, Helsinki 2007. ss. 255-263.

