

SÄÄTÖTEKNIIKAN LABORATORIO

Mallipredikttiivinen säätö

Jani Posio

Raportti B No 39, Marraskuu 2002

Malliprediktiivinen säätö

Jani Posio

Oulun yliopisto, Säätötekniikan laboratorio

Tiivistelmä: Tässä kirjallisuustyössä on tarkasteltu malliprediktiivistä säätöä, sen peruskäsitteitä ja toimintaa. Aluksi tehdään lyhyt katsaus malliprediktiivisen säädön historiaan. Seuraavissa kappaleissa perehdytään malliprediktiivisen säätöalgoritmin toimintaan. Myös eri ennustusmalleja tarkastellaan niiden soveltuvuuden kannalta. Lopuksi tarkastellaan malliprediktiivisen säädön soveltamista käytäntöön ja sovellusprosessin yhteydessä huomioitavia seikkoja. Käytäntöön soveltamista valaistaan myös esimerkkitaipauksen avulla.

Käsite malliprediktiivinen säätö on jo vuosikymmeniä tunnettu säätötekniikassa, mutta vasta viime vuosikymmenen aikana tapahtunut teorian ja tietotekniikan kehittyminen on mahdollistanut sen tehokkaan käytäntöön soveltamisen. Malliprediktiivistä säätöä on tavallisesti sovellettu vaikean dynamiikan monimuuttujaprosesseihin. Optimaalisen ohjauksen rekursiivinen laskenta prosessin fyysiset rajoitukset huomioon ottaen on eräs tärkeimpiä syitä malliprediktiivisen säädön suosioon. Toistaiseksi suurin osa teollisuuden sovelluksista perustuu empiirisiin lineaarisiin prosessimalleihin niiden ymmärrettävyyden ja kehityksen helppouden vuoksi. Epälineaarisiin malleihin perustuvat malliprediktiiviset säätimet ovat myös selvästi lisääntyneet viime aikoina.

Malliprediktiivisen säädön soveltamisessa kriittisin ja aikaa vievin vaihe on ehdottomasti systeemin dynamiikkaa kuvaavan ennustusmallin kehittäminen. Viritysparametreja malliprediktiivisessä säätimessä on enemmän kuin perinteisissä säätimissä. Tärkeimpiä niistä ovat ennustus- ja säätöhorisontti sekä erosuureen ja ohjausmuutoksen painotuskertoimet.

Lineaarisiin malleihin perustuva MPC-säätö on jo varsin kehittyneellä asteella niin teoriansa kuin sovellettavuutensa puolesta. Suurimmat selvittämättömät ongelmat liittyvät robustisuuden arviointiin ja mallin suhteen esiintyvän epävarmuuden toteamiseen. Epälineaarisiin malleihin perustuva MPC-säätö on huomattavasti lineaarista vastinettaan vähemmän tutkittu alue. Teorian puutteen ei kuitenkaan katsota olevan esteenä epälineaarisen MPC-säädön kehityskululle. Suurimmat haasteet tulevaisuudelle asettavat tehokkaampien mallinnusmenetelmien kehittäminen, raskaan online-laskennan hallinta ja MPC-säädön eri suunnitteluvaiheiden systemointi ja integrointi.

Hakusanat: malliprediktiivinen säätö, optimointi, dynaamiset prosessimallit.

ISBN 951-42-6887-3
ISSN 1238-9404
ISBN 951-42-7544-6 (PDF)

Oulun yliopisto
Säätötekniikan laboratorio
PL 4300
FIN-90014 OULUN YLIOPISTO

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	1
2	MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ.....	2
2.1	Lyhyt katsaus malliprediktiivisen säädön historiaan.....	2
2.2	Malliprediktiivisen säätöalgoritmin toiminta.....	3
2.3	Prosessimallit ja ennustaminen	6
2.3.1	Lineaariset prosessimallit.....	7
2.3.2	Epälineaariset prosessimallit	7
2.4	Avoimen piirin tavoite ja suljetun piirin käyttäytyminen	9
3	MPC KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSENA	10
3.1	Sovelluskohteet	10
3.2	Säädön suunnittelu ja viritys	11
3.2.1	Tärkeimmät viritysparametrit	12
3.3	Sovellusesimerkki.....	13
3.3.1	Suunnittelun kulku.....	13
4	YHTEENVETO.....	16
	LÄHDELUETTELO.....	18

1 JOHDANTO

Mallipredktiivinen säätö (MPC, Model Predictive Control) perustuu 60-luvun optimaalisten säätöongelmien pohjalta syntyneisiin ideoihin. Käsite mallipredktiivinen säätö viittaa mallipohjaisiin säätöalgoritmeihin, joissa suorituskkyfunktioita optimoimalla pyritään haluttuun säätötavoitteeseen. Kun lisäksi saman säätökonseptin yhteyteen on integroitu toiminta systeemin sisään- ja ulostulomuuttujien rajoituksia kunnioittaen, ei ole yllättävää, että MPC-säätö on saavuttanut nykyisen suosionsa haastavien kohdejärjestelmien säätöjärjestelmänä./13, 21/ Muun muassa seuraavia seikkoja on perinteisesti pidetty syynä MPC-säädön suureen suosioon /9/:

- Prosessin rajoitukset voidaan sisällyttää suoraan jokaisella näytteenottokerralla suoritettavaan online-optimointiin.
- Säätöjärjestelmän kyky käsitellä monimuuttujasysteemiä.
- Säätöjärjestelmän muuttuva rakenne häiriötilanteessa.

Jo ensimmäisistä 70- ja 80-lukujen taitteessa julkaistuista MPC-sovelluksista lähtien mallipredktiivisen säädön ja sen ongelmien tutkimustyö on ollut aktiivista. MPC-säätimen kehityksen alkutaipaleen tutkimustyö keskittyi lähinnä säätimen toiminnan ymmärtämiseen, kun taas viimeaikainen tutkimus on keskittynyt enemmän säätimen stabiilisuuden ja robustisuuden tutkintaan. /22, 37/ Nykyisessä muodossaan lineaarisen MPC-säädön teoria on jo varsin kehittyneellä asteella. Tällä hetkellä suurimmat haasteet tutkimukselle ja teollisuuden sovelluksille asettaa epälineaarisiiin prosessimalleihin perustuva MPC-säädin. Satoja uusia tutkimustuloksia ja sovelluskohteita on raportoitu kirjallisuudessa viime vuosina. /22, 28/

Yleisesti mallipredktiivisiä säätöratkaisuja on käytetty lähinnä öljy- ja petrokemianteollisuudessa, mutta viime vuosina sovellusten laajenemissuuntana ovat olleet selvästi perinteisemmät teollisuuden alat, kuten paperi- ja kemianteollisuus. Suuntana ovat siis olleet niin tutkimuksessa kuin teollisuudessakin epälineaarisemmat toiminta-alueet ja niihin liittyvät ongelmat. /17, 22/

Tässä raportissa tutustutaan mallipredktiivisen säädön perusideoihin, toteutusmahdollisuuksiin ja lyhyesti niiden soveltamiseen käytännössä. Tarkastelu ei ole matemaattispainotteista, vaan keskittyy enemmän selkeään toiminnalliseen arviointiin ja kuvaukseen. Mallipredktiivisen säätökonseptin kehyksiin voidaan sisällyttää varsin laaja-alaisesti säätö- ja systeemitekniikan aiheita aina systeemien mallintamisesta optimointi- ja stabiilisuusteorioihin. MPC-teknologian teoreettisia ja käytännön aiheita on tarkasteltu useissa kattavissa artikkeleissa. Lähteissä /26, 27/ Qin ja Badgwell tekevät hyvän yhteenvedon MPC-teknologian historiasta ja katsauksen suosituimpien laitetoimittajien teollisuussovelluksiin. Rawlings puolestaan tekee yhteenvedon MPC-algoritmin teoreettisista ominaisuuksista lähteessä /28/. Morari ja Lee tekevät kattavan katsauksen MPC-teknologian menneisyyteen, nykytilaan ja tulevaisuuteen lähteessä /22/.

2 MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄTÖ

2.1 Lyhyt katsaus malliprediktiivisen säädön historiaan

Malliprediktiivisellä säädöllä on varsin pitkä historiallinen tausta. Ensimmäiset ideat MPC-säätöstrategiasta tulivat esille jo 1960-luvulla, kun Marcus ja Lee /18/, viittasivat 1967 julkaistussa optimaalista säätöä koskevassa kirjassaan malliprediktiivisen säädön yleisiin periaatteisiin. Lisäksi optimaalisen säädön ongelmissa, optimaalisten ongelmien luonnehdinnalla (välttämättömät ja riittävät olosuhteet optimaalisuudelle), optimaalisesti säädettyjen systeemien Lyapunov stabiilisuudella, optimaalisen takaisinkytkennän laskevilla säätimillä sekä optimaalisilla avoimen piirin säätimillä ja näihin aihepiireihin liittyvillä tutkimuksilla ja julkaisuilla on ollut ilmiselvä merkitys MPC-säädön kehityskulussa. /21/

Omaksi kehityssuunnakseen MPC ajautui teollisuuden tarpeiden ajamana. Ensimmäiset malliprediktiivisen säädön kannattajat etenivät kehitystyössään varsin itsenäisesti keskittyen teollisuuden tarpeisiin ja huoliin. Teollisuusprosesseissa varsin usein vaatimuksina esiintyvät erilaiset fysikaaliset ja taloudelliset rajoitukset oli hyödyllistä saada integroitua säädön yhteyteen. Näitä vaatimuksia oli kuitenkin mahdotonta sisällyttää muiden perinteisten mallipohjaisten säätöalgoritmien kuten esimerkiksi LQG-säädön (Linear Quadratic Gaussian) puitteisiin. Monet teollisuudessa esiintyvät monimuuttujaongelmat toimintarajoituksineen olivat juuri niitä ongelmia, jotka motivoivat MPC-säätimen kehitystyöhön. Ensimmäisten MPC sovellusten voidaankin sanoa syntyneen teollisuuden omien sisäisten kehitystarpeiden ajamina. /21, 27/

Mielenkiinto MPC-tekniikkaa kohtaan kasvoi yleisesti ensimmäisten virallisten malliprediktiivistä säätöä koskevien julkaisujen myötä 70- ja 80 lukujen taitteessa. Ensimmäisen sukupolven versiot malliprediktiivisestä säädöstä olivat Richaletin /29/ (1978) ehdottama IDCOM (Identification and Command) algoritmi ja Cutlerin ja Ramakerin /7/ (1980) esittelemä DMC (Dynamic Matrix Control) algoritmi. Nämä ensimmäisen MPC sukupolven säätimet käyttivät prosessimalleinaan impulssi- ja askelvastemalleja lähinnä niiden helpon ymmärrettävyyden ja identifioitavuuden vuoksi. DMC-algoritmissa optimaaliset ohjaukset laskettiin pienimmän neliösumman ongelman ratkaisuna, kun vastaavasti IDCOM-algoritmissa ohjaukset laskettiin käyttämällä heuristista iteratiivista algoritmia. Kuitenkin selvä heikkous ensimmäisen sukupolven MPC säätimissä oli lähtörajoitusten tilapäinen hallinta. /21, 27, 28/

Vuonna 1986 Garcian ja Morshedin /13/ esittelemä QDMC-säätöalgoritmin (Quadratic Dynamic Matrix Control) voidaan sanoa edustaneen toista MPC sukupolvea, jossa rajoitettu avoimen piirin optimointiongelma ratkaistiin neliöllistä optimointialgoritmia hyväksikäyttäen. Tällä kertaa rajoitukset tulo- ja lähtömuuttujille esitettiin lineaarisina epäyhtälöinä ja myös tilapäinen lähtörajoitusten rikkominen sallittiin tulomuuttujan saturoituessa. /27/

Kolmannen sukupolven malliprediktiivisille säätimille oli ominaista aikaisempaa parempi rajoitusten hallinta ja häiriösietoisuus. Rajoituksia voitiin tiukentaa, löysätä tai rankata tarpeen mukaisesti. Säätimiin oli myös kehitetty menetelmiä toipua ei-

käyvien ratkaisujen tilanteesta. /21, 27/ Kolmannen sukupolven MPC-säätimet esiteltiin yli vuosikymmen sitten, joten nykyiset MPC-säätimet ovat edelleen kehittyneet niin teoriansa kuin käytännön teknologiansa puolesta. /27/

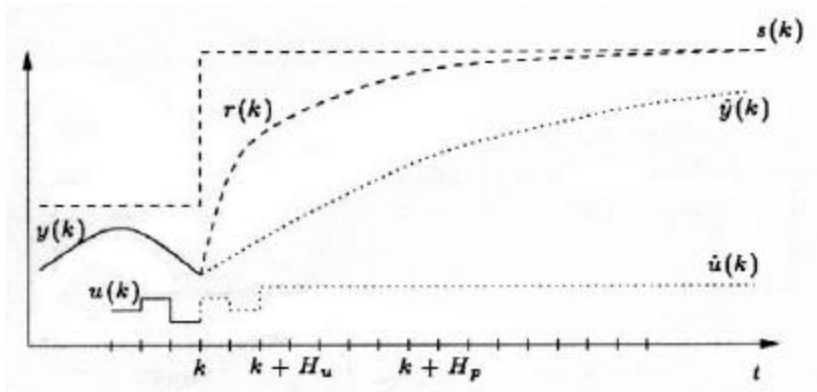
Teollisuuden MPC-sovellusten kehittäjät eivät varsinaisesti osoittaneet kehittämiensä systeemien stabiilisuutta teoreettisesti, mutta olivat ilmiselvästi tietoisia sen tärkeydestä. Teollisuuden panostuksen tuloksena syntyneet MPC sovellukset toimivat kuitenkin herätteinä teoreetikoille eri puolilla maailmaa. /27/ MPC onkin säilyttänyt asemansa vireänä tutkimusalana aina ensimmäisten sovellusten julkaisemisesta lähtien. Sen on katsottu olevan erittäin monimuotoinen ja eloisa tutkimusala, jossa teorian on nähty tukevan käytäntöä suoranaemmin kuin useimmilla muilla säätötekniikan tutkimusalueilla. /22/

2.2 Malliprediktiivisen säätöalgoritmin toiminta

MPC-säätö kuuluu mallipohjaisten säätimien luokkaan, jossa lasketaan tulevaisuuden säätötoimenpiteet minimoimalla suorituskyvyn tavoitefunktiota tietyn ennustushorisonnin yli. Lyhyesti esitettynä säätölaskenta toteutetaan seuraavan kolmen toimenpiteen tuloksena. /10, 15/:

1. Mallin käyttö säädetyssä prosessin tulevaisuuden lähtömuuttujien $y(k + i)$, $i = 1, \dots, H_p$, ennustamisessa tulevaisuuden diskreetteinä ajanhetkinä ennustushorisonnin H_p yli.
2. Tulevaisuuden ohjaussekvenssin $u(k + i)$, $i = 0, \dots, H_u - 1$, laskenta säätöhorisonnin H_u yli minimoimalla annettu tavoitefunktio J rajoitusten puitteissa siten, että ennustettu prosessin lähtösuure on mahdollisimman lähellä haluttua referenssisignaalia $r(k)$.
3. Väistyvän horisonnin strategia, jossa ainoastaan tavoitefunktion minimointiproseduurista saadun ohjaussekvenssin ensimmäinen ohjausarvo implementoidaan prosessin ohjaukseen ja horisontteja liu'utetaan tulevien tapahtumien suuntaan ja optimointi toistetaan päivitettyillä tiedoilla seuraavalla näytteenotokerralla.

1. ja 2. kohdan toiminta voidaan käsittää avoimen piirin ohjaustoimintana, kun taas 3. kohdassa suoritettu laskennan uusinta, ohjaussekvenssin ensimmäisen arvon implementointi systeemin ohjaukseen ja loppujen arvojen hylkääminen sulkee kyseisen piirin. /10/ Kyseinen väistyvän horisonnin toiminta on esitetty Kuvassa 1, jossa on nähtävissä ennustushorisontti H_p , säätöhorisontti H_u ja säädön tavoitteen referenssisignaali $r(k)$. Aikatasossa väistyvän horisonnin esitys jakaa tapahtumat menneisiin ja tulevaisuuden tapahtumiin. Perinteiset säätöalgoritmit hyödyntävät ainoastaan Kuvan 1 osoittaman aika-alueen vasemmanpuoleisesta eli jo tapahtuneesta toiminnasta saatavaa tietoutta, kun MPC-säädin puolestaan käyttää hyväkseen sekä menneisyyden että tulevaisuuden tietoja. /15/



Kuva 1. MPC-säädön komponentit väistyvän horisontin esityksessä /15/.

Malliprediktiivisen säätimen neljä peruskomponenttia ovat siis dynaaminen ennustusmalli, tavoite, rajoitukset sekä optimointialgoritmi. Yleensä suunnitteluvaiheessa oletetaan, että ennustukseen tarvittava prosessimalli on saatavilla. Rajoitukset ja tavoitteet määritellään prosessin luonteen perusteella. /33, 28/

Ennustetut lähtöarvot, merkittynä $y(k+i)$, kun $i = 1, \dots, H_p$, kuvataan hetkellä k olevan prosessin tilan (esitettyinä kokoelmana menneitä tulo ja lähtösuureita) ja tulevaisuuden ohjausarvojen $u(k+i)$, $i = 0, \dots, H_u - 1$, funktiona. Jos H_u valitaan siten, että $H_u < H_p$, niin ohjausarvoja manipuloidaan ainoastaan säätöhorisontin pituisella ajanjaksolla ja säätöhorisontin jälkeen ohjaus pysyy vakiona, eli $u(k+i) = u(k+H_u-1)$, kun $i = H_u, \dots, H_p - 1$. /15/

Tulevaisuuden ohjaussekvenssi $u(k+i)$, kun $i = 1, \dots, H_u - 1$, lasketaan optimoimalla annettu kustannusfunktio rajoitusten puitteissa. Useimmiten käytetyt kriteerifunktiot ovat muunnelmia seuraavasta neliöllisestä funktiosta /15/:

$$J = \sum_{i=1}^{H_p} \alpha_i (r(k+i) - y(k+i))^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \beta_i \Delta u(k+i)^2 \quad (1)$$

missä,

r on referenssivektori,

y on mallin laskema prosessin lähtösuure,

Δu on tulevaisuuden ohjausmuutos,

a on neliöllisen virheen painotuskerroinvektori,

β on neliöllisen ohjausmuutoksen painotuskerroinvektori,

H_p on ennustushorisontti ja

H_u on säätöhorisontti.

Yhtälön (1) ensimmäinen termi selittää minimoimisen kohteena olevaa ennustuksen neliöllistä poikkeavuutta referenssistä, kun taas toinen termi edustaa säätövaikutuksen painottamista. Jälkimmäinen termi voidaan myös ilmaista käyttämällä absoluuttiohjausta u tai jotain muuta u :n suodatettua muotoa, ongelmasta riippuen. Vektorit a ja β määrittelevät ennustusvirheen ja säätötoimenpiteiden painotukset suhteutettuna toisiinsa ja ennustusaskeleeseen. /15/

Kuten jo edellä mainittiin tavoitefunktion minimointi tapahtuu rajoitusten alaisena. Tavallisimmat malliprediktiiivissä säädössä käytetyt rajoitukset ovat tulo- ja lähtösuureiden rajoituksia sekä ohjauksen muutosnopeuden rajoituksia. Yleensä yhtälön (1) mukainen optimointiongelma ratkaistaan seuraavien epäyhtälörajoitusten (2), (3) ja (4) ollessa voimassa /27/:

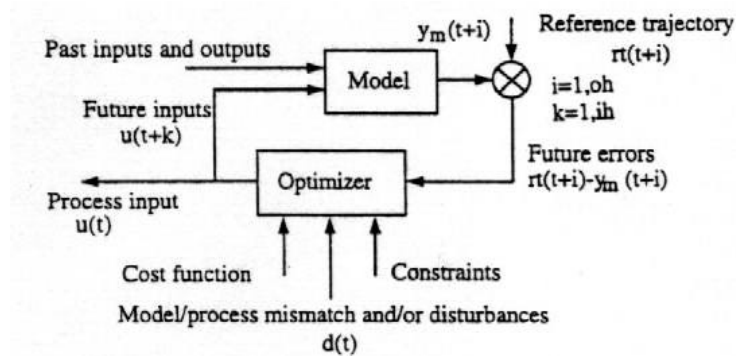
$$u_{\max} = u(k + i - 1) = u_{\min}, i = 1, \dots, H_u; \text{ Ohjauksen rajoitukset,} \quad (2)$$

$$\Delta u_{\max} = \Delta u(k + i - 1) = -\Delta u_{\max}, i = 1, \dots, H_u; \text{ Muutosnopeuden rajoitukset,} \quad (3)$$

$$y_{\max} = y(k + i) = y_{\min}, i = 1, \dots, p; \text{ Lähtösuureen eli laatumuuttujan rajoitukset.} \quad (4)$$

Ylläoleva MPC-säädön muotoilu johtaa siis neliölliseen optimointiongelmaan lineaarisin epäyhtälörajoituksin. Optimointiongelma ratkaistaan jokaisella näytteenotokerralla säätösignaalin muutoksen $\Delta u(k + i)$, kun $i = 0, \dots, H_u - 1$, suhteen. Optimointiongelman ratkaisun tuloksena saadusta ohjausekvenssistä ainoastaan ensimmäinen sekvenssin arvo $u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k)$ implementoidaan prosessin ohjaamiseksi. Seuraavalla näytteenottohetkellä prosessin lähtösuure $y(k + 1)$ on saatavilla ja ennustaminen ja optimointi toistetaan päivitettyillä arvoilla väistyvän horisontin periaatteen mukaisesti. Säätötoimenpide $u(k + 1)$ laskettuna hetkellä $(k + 1)$ on yleisesti eroava vastaavasta hetkellä k lasketusta säätötoimenpiteestä niin kauan kuin päivitettyä tietoa prosessin tilasta on saatavilla. /15/

Kuvassa 2 on esitetty MPC-säätimen perustoiminta lohkokaaavana. Samat muuttujat ja algoritmin laskentavaiheet kuin edellisissä kappaleissa voidaan selkeästi havaita kaavion kiertokulusta. /31/



Kuva 3. MPC-algoritmin lohkokaavio /31/.

MPC-säätö tarjoaa siis yleisen kehyksen esittää säätöongelma aikatasossa. Samaan yhteyteen voidaan integroida ominaisuuksia optimaalisesta ja stokastisesta säädöstä sekä aikaviiveellisten ja monimuuttujaisien prosessien säädöstä. Säätökonsepti ei ole rajoitettu erityiseen systeemin kuvaustapaan, mutta laskenta ja implementointi riippuvat käytetyn systeemin mallista. Tulo- ja lähtömuuttujien rajoitusten sisällyttäminen on käsitteellisesti yksinkertaista ja niitä voidaan systemaattisesti tarkastella suunnittelun ja implementoinnin aikana. /21, 27/

2.3 Prosessimallit ja ennustaminen

Malliprediktiivisen säätimen ydin muodostuu prosessimallista. Periaatteessa mitä tahansa prosessimallia, joka on kykenevä ennustamaan tulevaisuuden lähtösuureita perustuen tulevaisuuden tulosuureisiin ja laskentahetken lähtöarvoihin, voidaan käyttää. Kuitenkin käytettävän mallirakenteen valintaan vaikuttavat monet seikat ja lopullinen valittu mallirakenne on kompromissi prosessin ominaisuuksista ja säätötavoitteista. /3/ Valitun prosessimallin matemaattinen muoto määrittelee MPC algoritmin kattavuuden ja täten myös ennustuksen luotettavuuden prosessin eri toimintapisteissä /27/. Voidaankin sanoa, että malliprediktiivisen säätimen suljetun piirin suorituskyky on suorassa yhteydessä mallin kykyyn kuvata säädettävän systeemin dynamiikkaa /4/.

Toimivan mallin kehittäminen on ehdottomasti kriittisin ja aikaa vievin osa malliprediktiivisen säädön suunnittelussa /12, 38/. On arvioitu, että tyypillisessä implementointiprojektissa mallintaminen voi viedä jopa 90 % kokonaisajasta ja kustannuksista /2/. Luultavasti on turvallista väittää, että nykyiset MPC sovellukset ovat eräs suurimpia identifioinnin sovellettualueita /27/. Suurimmat ongelmat malliprediktiivisen säädön käytännön sovellettavuuden kannalta liittyvätkin juuri mallinnukseen ja siihen liittyvien komponenttien kuten testisignaalien, identifiointialgoritmien ja mallin validointimenetelmien valintaan. Viime aikoina tutkijat ovat keskittäneet voimavarojensa näiden kokeellisen mallinnuksen osa-alueiden kehittämiseen. /22/ Valitettavasti teollisuuden säätöinsinöörit eivät toistaiseksi ole vielä hyödyntäneet moderneimpia identifiointimenetelmiä riittävän tehokkaasti /3, 38/.

Toisenlaisen näkökannan ennustusmallien kehitystyöhön ovat tuoneet yhä kiristyvät ajalliset ja taloudelliset toiminnan rajoitukset. Näiden rajoitusten puitteissa esimerkiksi monimuuttujaprosessien vaatimat useat koeajosarjat prosessin eri toimintapisteissä on nähty turhina resurssien ja ajan tuhlauksena. Ratkaisuksi kyseiseen tilanteeseen on ehdotettu teoreettisten mallien käyttöä perustuen systeemien fysikaalisiin ominaisuuksiin. Tietenkin tällöin vaatimuksena on riittävän yksityiskohtainen tieto mallinnettavan systeemin fysikaalisista ominaisuuksista. Teoreettisilla malleilla kuvattavissa olevia ominaisuuksia voivat olla systeemissä esiintyvät hitaan dynamiikan ilmiöt kuten esimerkiksi materian siirtyminen, viipymäaika, lämpeneminen ja kylmeneminen. Kirjallisuudessa on myös useita esimerkkejä erilaisista hybridimallien, eli yhdistetyn teoreettisen ja kokeellisen mallien käytöstä systeemin dynamiikan ennustamisessa. /3, 16, 22, 28/

Teoreettisten ja kokeellisten mallien sovellettavuutta arvioitaessa teoreettiset mallit ovat aproksimointitarkkuudeltaan ja fysikaaliselta tulkinnaltaan parempia verrattuna kokeellisiin malleihin. Toisaalta kokeellisten mallien soveltuvuus säätöön sekä kehityksen helpous ovat parempia verrattuna teoreettisiin malleihin. /36/

Aina näihin päiviin asti ennustuksessa käytetyt prosessimallit ovat olleet kokeellisia lineaarisia malleja, mutta yhä kovemmat vaatimukset ennustustarkkuudelle ja sitä myöten säätötulokselle ovat edesauttaneet erilaisten epälineaaristen prosessimallien soveltamista /28/. Seuraavissa luvuissa käsitellään molempien, niin lineaaristen kuin epälineaaristen mallien, käyttöä malliprediktiivisten säädön yhteydessä.

2.3.1 Lineaariset prosessimallit

Malliprediktiivisen säädön teollisuuden sovellukset ovat tavallisesti perustuneet lineaarisiin dynaamisiin prosessimalleihin vaikkakin useimmat prosessit ovat epälineaarisia. Syynä lineaaristen mallien suosioon teollisuusympäristössä on ollut runsas kaupallisten ohjelmien tarjonta suoraan datasta tehtävään lineaaristen dynaamisten prosessimallien määrittämiseen. /25/

Lineaaristen mallien käyttö ennustusmallina on perusteltua, jos prosessi toimii vain yhdessä toimintapisteessä ja päätarkoituksena on häiriöiden kompensointi. Yksinkertaisia kokeellisia tulo- ja lähtömuuttujien suhdetta kuvaavia askel- tai impulssivastemalleja käytettäessä oletetaan prosessin olevan stabiili. Niin kauan kuin tarkastelujaksot ovat lyhyitä ja prosessi ei ajaudu kovin kauas lineaarisointipisteestä lineaarinen malli on yleensä riittävä dynamiikan kuvaamiseen. /5, 25, 28/

Tutkimuskirjallisuudessa puolestaan säädettävän systeemin kuvaaminen lineaarisena tilaesityksenä on hyvin yleistä. Tilamallin soveltamisella malliprediktiiviseen säätimeen saavutetaan useita etuja. Tilamalli on muun muassa helppo yleistää monimuuttujasysteemeille ja sillä on helppo suorittaa suljetun piirin analysointi ja online laskenta. /28/ Tilamallia on myös viime vuosina käytetty malliprediktiivisen säädön teollisuussovelluksissa. Käytännön sovelluksissa tilamallin vahvuudeksi on mainittu sen riippumattomuus säätimen näytevälillä ja prosessin aikavakioista. Askelvastemallista poiketen näyteväli voi olla hyvin pieni suhteessa prosessin aikavakioihin. Myös aikavakioiden vaihteluvälit voivat olla suuria. Erääksi ongelmaksi tilamallin kohdalla voi muodostua prosessin kuollut aika, joka voi luoda huomattavan määrän ylimääräisiä tiloja. /34/ Muita suosittuja teollisuuden käyttämiä lineaarisia prosessimalleja ovat olleet muun muassa impulssivaste-, askelvaste-, Laplace- ja ARX-mallit. Mittausdatasta identifioitavat black-box-mallit näyttävät toistaiseksi säilyttäneen suosionsa ainakin teollisuuden sovelluksissa. /27/

Lähtökohtana lineaaristen mallien käytölle tulisi aina olla sen riittävyys kuvaamaan prosessin dynamiikkaa riittävän laajasti. Jos prosessi on vain lievästi epälineaarinen, mahdollisella epälineaarisen mallin käytöllä ei saavuteta merkittävää parannusta ennustustarkkuuteen verrattuna vastaavaan lineaarisella mallilla tehtyyn ennustukseen. Systeemin epälineaarisuuden tason arviointi onkin eräs vaikeimmista tehtävistä oikeaa mallia rakennettaessa. /28/

2.3.2 Epälineaariset prosessimallit

Monet systeemit ovat luonnostaan epälineaarisia. Tämä seikka, yhdessä korkeampien tuotteen laatumäärittelyjen ja kasvavien tuottavuusvaatimusten sekä tiukempien ympäristösäännösten ja taloudellisten näkökulmien kanssa vaatii systeemin operoimista lähempänä luvallisen operointialueen rajoja. /1/ Kyseisissä tapauksissa, lineaariset mallit ovat usein riittämättömiä kuvaamaan prosessin dynamiikkaa, joten ainoaksi vaihtoehdoksi jää epälineaaristen mallien käyttö. /11/

Tarve epälineaaristen mallien käyttöön malliprediktiivisessä säädössä on yleisesti tunnustettu tosiasia. Monet tutkijat ja kaupalliset yritykset ovat kehittäneet epälineaarisia malleja eri tekniikoita käyttäen, sisältäen sekä teoreettisia että empiirisiä lähestymistapoja. /22, 26, 28/ Vaikka useita lähestymistapoja ongelmaan on

kehitetty, useimmat niistä eivät ole olleet käytännöllisiä laaja-alaiseen teollisuuskäyttöön. Esimerkiksi teoreettisiin mallinnustekniikoihin perustuvat epälineaariset mallit ovat kalliita kehittää ja vaikeita ylläpitää. Lisäksi ne ovat usein myös prosessi- ja operointikohtaisia, joten niitä voidaan soveltaa vain rajoitettuun määrään prosesseja. /16, 22/

Perustavaa laatua olevat ongelmat liittyvät siis dynaamisen epälineaarisen mallin kehittämiseen MPC-säätöä varten. Laajasta tutkimustyöstä huolimatta systemaattista lähestymistapaa epälineaaristen systeemien identifioimiseen koedatasta MPC-säätöä varten ei ole pystytty kehittämään. /26/ Kyvyttömyys rakentaa epälineaarinen malli luotettavalla ja johdonmukaisella tavalla on eräs tärkein syy, miksi epälineaarilla MPC-säätimellä on ollut niin paljon vähemmän vaikutusta teollisuuden MPC-sovelluksissa /19/.

Epälineaariseksi ennustusmalleiksi on tarjolla useita eri malleja, kuten esimerkiksi teoriittisista malleista differentiaaliyhtälöt, differentiaaliset algebralliset yhtälöt, diskreettiaikaiset algebralliset yhtälöt sekä kokeellisista malleista Wiener-, Hammerstein-mallit, polynomiset ARMAX-mallit, Volterra-mallit, neuroverkot ja sumeat mallit. Suosituimpia malleja näyttävät kirjallisuuden perusteella olevan empiirisesti määritetyt neuroverkkomallit, mutta myös muista mainituista malleista on olemassa lukuisia esimerkksiovelluksia. Teoreettisia tuloksia eri mallien käytöstä on käsitelty kirjallisuudessa huomattavan paljon, käytännön sovellukset ovat kuitenkin harvinaisempia. /16, 22, 26/

Eräs toistaiseksi vielä varsin vähän tutkittu epälineaarinen ennustusmalli on empiirisen ja kokeellisen mallintamisen yhdistävä hybridimalli. Tämä malli mahdollistaa molempien mallinnustapojen etujen hyödyntämisen. Yleinen hybridimallin muodostamismenetelmä on käyttää empiiristä mallia teoreettisen mallin tuntemattomien toimintojen estimoinnissa, kuten esimerkiksi reaktionopeuksien estimoinnissa kemiallisen reaktorimallin tapauksessa. Toinen mahdollinen sovellustapa on ollut teoreettisen mallin käyttö prosessin perusluonnehdintaan ja tämän kuvauksen tarkennus tai korjaus epälineaarisen empiirisen mallin avulla. Hybridimallit voivat näytellä tärkeää roolia tulevaisuuden malliprediktivisissä säätimissä. /16/

Epälineaarisiin malleihin perustuvat malliprediktiviset säätimet ovat vastaavaa lineaarista versiota huomattavasti vähemmän tutkittu alue. Epälineaarinen malli luo olemassaolollaan epälineaarisen optimointiongelman malliprediktivisen säädön yhteyteen. Nämä ei-konveksiset optimointiongelmat sisältävät niin teoreettisia kuin laskennallisiakin ongelmia. Eräs tutkimuksen tämän hetken tavoitteista onkin määrittää helpommin ratkaistava on-line optimointi epälineaarille systeemeille. Teoreettiset esteet eivät kuitenkaan luultavasti tule estämään epälineaarisiin malleihin perustuvan malliprediktivisen säätimen kehityskulkua. Kuitenkin levittäytyäkseen karuun teollisuusympäristöön täytyy epälineaarisen MPC-säätimen tulla nykyistä luotettavammaksi, ennustettavaksi olevaksi, tehokkaammaksi ja robustiseksi on-line häiriöitä vastaan. /22, 28/

2.4 Avoimen piirin tavoite ja suljetun piirin käyttäytyminen

Malliprediktiivinen säätö on optimointiin perustuva säätölaki, ja suorituskyvyn mittana on lähes aina neliöllinen kustannus. Valittaessa säätöhorisontti äärettömäksi ja poistamalla rajoitukset saadaan uuteen tasapainopisteeseen systeemin ajava optimaalisen säätösekvenssin ratkaisu laskettua lineaarisella neliöllisellä säätimellä (LQ). Rajoitukset huomioitaessa analyttistä ratkaisua ongelmaan ei voida löytää. Kuitenkin malliprediktiivinen säätölaskenta tapahtuu rajoitusten ja äärellisen ennustushorisontin ollessa voimassa. Juuri äärellisen ennustushorisontin ja rajoitusten käyttö mahdollistaa ongelman ratkaisun on-line ja myös erottaa malliprediktiivisen säädön muista perinteisistä säätöalgoritmeista, joissa tavallisesti käytetään ennalta laskettua säätölakia. Toisaalta äärellisen ennustushorisontin ja rajoitusten käyttö aiheuttaa ongelmia systeemin stabiilisuustarkasteluun perinteisen suljetun piirin säätölain puuttuessa. /20, 22/

Malliprediktiivisessä säädössä suljetun piirin käyttäytyminen muodostuu rekursiivisen optimointiongelman ratkaisuna jokaisella näytteenottohetkellä. Toisin sanoen varsinaista säätölakia ei voida esittää suljetussa muodossa. Äärellisen horisontin tapauksessa avoimen piirin tavoite ja toteutunut suljetun piirin käyttäytyminen voidaan siis selvästi erottaa toisistaan. Voidaan havaita selkeä ero systeemin ohjaukseen implementoiduista ohjauksista muodostuneen ohjausekvenssin ja tietyllä näytteenottohetkellä lasketun ohjausekvenssin välillä. Tämä säätöalgoritmin ominaisuus aiheuttaa ristiriitaisuutta stabilointiongelman ja rajoitusten täyttymisen välille. Rajoituksia kunnioittava toiminta ei välttämättä johda haluttuun suljetun piirin käyttäytymiseen, eli toiminta, joka minimoisi avoimen piirin ratkaisun vastaavasti ajaisi suljetun piirin tuloksen ulos käyvältä alueelta. Äkillinen häiriö voi ajaa prosessin normaalin toiminta-alueen ulkopuolelle, josta toipuminen ei onnistu tulo- ja lähtömuuttujien rajoituksia noudattaen. Vaihtoehdoksi jää yleensä tulomuuttujan saturoituessa lähtörajoitusten tilapäinen rikkominen käyvän ratkaisun löytämiseksi. /8, 22/

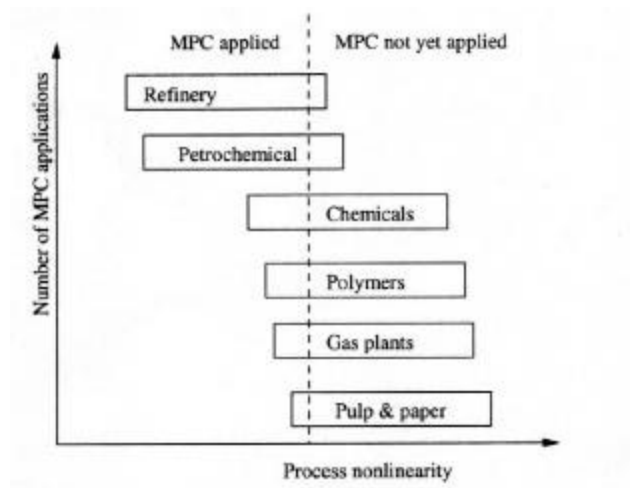
MPC-säätöä sovellettaessa seuraavaa kolmea algoritmin ominaisuutta olisi syytä tarkastella sovelluskohtaisesti. Ensimmäinen selvitettävä asia onkin arvioida milloin optimointiongelma tuottaa käyvän säätötoimenpiteen, joka voidaan implementoida prosessin ohjaukseen. Toisena ongelmana on sellaisen ohjausekvenssin laskeminen, jonka implementoinnilla suljetun piirin käyttäytyminen säilyy stabiilina. Kolmas teoreettinen ongelma on selvittää, että minkälainen suljetun piirin suorituskyky saavutetaan sarjasta toistettuja avoimen piirin optimaalisia säätöongelmia. Lukuisat teoreettiset tutkimukset liittyvät juuri näihin ongelmiin. /22/ Stabiilisuusongelmaan liittyvä hyvä yleiskatsaus löytyy lähteestä /21/.

3 MPC KÄYTÄNNÖN SOVELLUKSENA

Tietokoneiden laskentatehon eksponentiaalinen kasvu viime vuosina, yhdessä tehokkaampien optimointialgoritmien kehityksen ja mallinnusmenetelmien kanssa on avannut uusia mahdollisuuksia MPC-säätimen käytäntöön soveltamiselle. MPC-säädön käytännön sovelluksista on saatu kokemuksia jo kahdelta menneeltä vuosikymmeneltä. Aikaisemmillä onnistuneilla implementoinneilla onkin ollut suuri merkitys MPC evoluutiossa. Useista onnistuneista implementoinneista saatu arvokas kokemus on viitoittanut MPC-säädön tietä yhä haastavimpiin sovelluskohteisiin. /12, 32/

3.1 Sovelluskohteet

Käytännön sovellukset ovat viime vuosina kohdistuneet yhä epälinearisempiin systeemeihin, kuten paperi- ja kemianteollisuuden prosesseihin /17/. Sovelluskohteina on myös raportoitu olevan yhä enemmän nopeamman dynamiikan prosesseja tietokoneiden laskentatehon kasvettua /15, 32/. Kuvassa 3 on esitetty MPC-sovellusten jakauma suhteessa prosessin epälinearisuuteen /26/. Vuonna 1999 MPC-sovelluksia raportoitiin olevan maailmanlaajuisesti yli 4600, kun vastaava määrä vuonna 1995 oli noin 2200. /17/ Epälineaarisia MPC-sovelluksia oli vuonna 1998 lähteessä /26/ mainittujen laitetoimittajien taholta raportoitu olevan noin 86 sovellusta /26/.

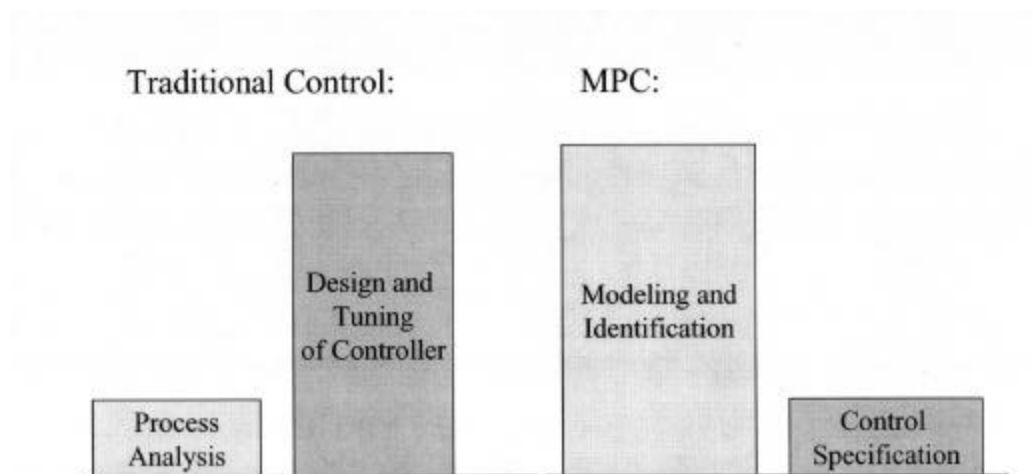


Kuva 3. MPC-sovellusten jakauma suhteessa sovellusprosessien epälinearisuuteen /26/.

Yhteisinä piirteinä sovelluskohteina oleville prosesseille ovat yleensä prosessin pitkät viiveet ja aikavakiot tai muuten hankala dynamiikka, monimuuttujaisuus, ristikkäisvaikutukset, häiriöt sekä halu ohjata prosessia optimaaliset rajoitukset huomioon ottaen /6, 14, 22, 26/.

3.2 Säädön suunnittelu ja viritys

MPC-säädön suunnittelussa selvästi aikaa vievin osuus on ennustamisessa käytettävän prosessimallin muodostaminen. Varsinainen säätimen viritys on huomattavasti vähemmän aikaa vaativa toimenpide kuin esimerkiksi perinteisten säätimien tapauksissa. Kuvassa 4 on hahmotettu MPC-säädön toteutusvaiheiden kapasiteetin tarvetta verrattuna perinteisen säätimen vastaaviin tarpeisiin. Kuvasta 4 voidaan nähdä, että MPC-säädön tapauksessa valtaosa resursseista kuluu mallinnukseen ja identifiointiin. /17/



Kuva 4. MPC-säädön toteutusresurssien jakautuminen eri suunnitteluvaiheiden kesken verrattuna perinteiseen säätösuunnitteluun /17/.

MPC-säädön suunnittelu- ja toteutuskäytäntö etenee yleisesti esitettynä seuraavasti /17/:

1. Valitusta säätökohteesta rajoitetaan ongelma ja määritetään asiaan kuuluvat ohjaus-, analyysi ja häiriösuureet ongelmakohtaisesti.
2. Suoritetaan tehdaskokeet valituilla tulomuuttujilla ja talletetaan analyysisuureiden vasteista saadut koetulokset.
3. Muodostetaan dynaaminen prosessimalli koedatan perusteella käyttäen apuna jotain identifiointityökalua.
4. Konfiguroidaan MPC-säädin ja syötetään alkuarvot viritysparametreille.
5. Testataan säädin off-line suljetun piirin simulaatiolla ja varmistetaan säätimen riittävä suorituskyky.
6. Ladataan konfiguroitu säädin lopulliseen kohteeseensa ja testataan mallin ennustuskykyä avoimella piirillä.
7. Käyttöön otetaan säädin ja toistetaan viritys tarvittaessa.

Useassa lähteessä on mainittu, että MPC säätöstrategian suunnittelu on säädön onnistumisen kannalta tärkeämmässä roolissa kuin itse MPC-algoritmin suorituskyky. Tässä tapauksessa säätöstrategian suunnittelulla tarkoitetaan säätötavoitteiden määrittelyä, säätötekniikan valintaa (MPC vai SISO-rakenne), ja säädön muuttujien valintaa. /34/

3.2.1 Tärkeimmät viritysparametrit

MPC-säätimen virittämiseen voidaan käyttää useampia parametrejä kuin perinteisen PID-säätimen virittämiseen. Horisontteja on, riippuen MPC-algoritmista, kolme tai kaksi kappaletta eli ennustus- ja säätöhorisontti sekä GPC-säätimen (generalized predictive control) yhteydessä esiintyvä minimihorisontti /6/. Muita tyypillisiä viritysparametreja ovat ohjauksen ja erosuureen painotuskertoimet. /33/

Minimihorisontti valitaan yleensä yhtäsuureksi kuin prosessin viive. Ennustushorisontti täytyy valita suuremmaksi tai yhtä suureksi kuin viive. Ennustushorisontin avulla valitaan kuinka pitkälle tulevaisuuteen prosessia halutaan tarkastella. Luonnollisesti suuri ennustushorisontti lisää tarvittavaa laskenta-aikaa ja -kuormitusta. /33/

Säätöhorisontin pituudella määritellään, kuinka monella ohjausmuutoksella päästään haluttuun prosessin lähtömuuttujan arvoon. Pienellä säätöhorisontilla säädin tekee suuria ohjauksen muutoksia, jotta erosuure pienenee nopeasti. Valittaessa suuri säätöhorisontti, yhdellä säätösyklillä tehtävät ohjausmuutokset ovat pienempiä. Luonnollisesti myös säätöhorisontin kasvattaminen lisää säätimen alustamiseen tarvittavaa aikaa. Useimmiten päätös säätöhorisontin pituudesta on tehtävä suorituskyvyn ja laskentakuormituksen kompromissina. /33, 35/

Erosuureen painokertoimella voidaan painottaa tulevia erosuureita halutulla tavalla. Painotukseen on nykyään olemassa monia eri tapoja. Eräs tapa on käyttää aikamuuttuvaa painotusta tai parametrisoida painokerroin operointialueen funktiona. /35, 37/ Ohjauksen painokertoimella voidaan painottaa tulevia ohjauksen muutoksia. Yleisesti virityksessä haetaan sopiva painokertoimien suhde halutun säädön suorituskyvyn saavuttamiseksi. /35/

Horisonttien käyttöä tarkempaan säätimen viritykseen ei yleensä suositella, koska systeemin käyttäytyminen on varsin herkkä horisonttien muutoksille. Yleensä viritys suoritetaan hakemalla oikeat suhteet ohjauksen ja virhetermin painokertoimille. /22/ Viritysproseduuri perustuu yksinkertaisesti säätimen suorituskyvyn tarkkailuun ja viritysparametrien muunteluun tarpeen mukaisesti. Ongelmana virityksessä on, että useimmiten se täytyy suorittaa off-line simulointina. /37/

Epälineaarisen MPC-säätimen tärkeimpinä viritysparametreinä on mainittu näyteenottoväli, säätöhorisontti, ennustushorisontti ja tavoitefunktion komponenttien, eli ohjaus- ja virhetermien painomatriisit. Epälineaarisen MPC-säätimen rajoituksena on, että viritysparametrien vaikutusta suljetun piirin käyttäytymiseen on vaikea arvioida etukäteen. Suljetun piirin stabiilisuus tietyillä viritysparametrien valinnoilla voidaan teorian mukaan taata ainoastaan, jos ennustushorisontti on ääretön tai lopputilan räjähdys on asetettu. /22, 31/

Epälineaarisen MPC-säädön tapauksessa näyteenottoväli on valittava suljetun piirin suorituskyvyn ja on-line laskennan kompromissina. Pieni näyteenväli parantaa suorituskykyä, mutta vastaavasti pidempää ennustushorisonttia on käytettävä tarkan prosessidynamiikan määrittämiseksi. Suuren näyteenottovälin tapauksessa tilanne on päinvastainen. Näyteenottoväli ja sallittu mallinnusvirhe ovat käänteisesti verrannollisia. Mallinnusvirheen kasvaessa tarvitaan prosessimittauksia yhä

tiheimmin indikoimaan epästabiliin tilaan ajautumista. Horisonttien valinta tapahtuu samoin periaattein kuin lineaarisessa tapauksessa. Lopullinen parametrien hienoviritys tehdään yleensä simulointia hyväksikäyttäen. /16/

3.3 Sovellusesimerkki

Seuraavissa kappaleissa esitetään lyhyesti julkaisuista /30, 31/ referoitu MPC-säädön sovellusesimerkki jatkuvatoimisen kiteytysprosessin säädössä. Tavoitteena on antaa lukijalle kuva MPC-säädön soveltamisesta vaadittavista työvaiheista ja tarvittavista resursseista sekä eteentulevista mahdollisista ongelmista. /30, 31/

Kiteyttäminen on eräs vanhimpia kemian tekniikan prosesseja. Kiteytysprosessin säädön ensisijaisena tavoitteena on kiteen laadun, kidekoon tasaisuuden ja kiteen puhtauden varmistaminen. Kiteytysprosessi on monimuuttujaongelma, jonka sisäntulojen välillä vaikuttaa merkittäviä vuorovaikutuksia. Systemin dynamiikka sisältää puhdasta kulkuakaviivettä, ei-minimivaiheista käyttäytymistä sekä tasapainotilan ja dynaamisen tilan epälineaarisuutta, eli juuri niitä ongelmia joiden ratkaisuun MPC-säätöä on tavallisesti sovellettu. Aikaisemmissa säätökokeiluissa PID-säätimet ovat osoittautuneet suorituskyvyltään varsin heikoiksi kiteytysprosessin säädössä. /30, 31/

3.3.1 Suunnittelun kulku

Säädön suunnittelu jakaantui kahteen eri osioon, jossa ensimmäisessä kehitettiin lineaarinen ja epälineaarinen malli kiteytysprosessin malliprediktivista säätöä varten. Toinen osio keskittyi kehitettyjen mallien käyttöön kiteytysprosessin MPC-säädössä. /30, 31/

Aluksi eri mallivaihtoehtoja ja aikaisempia tutkimustuloksia vertailtiin oikean mallityypin valitsemiseksi. Aikaisemmin kehitetyt teoreettiset kiteytysprosessia kuvaavat mallit päätettiin hylätä niiden vaatiman suhteellisen suuren laskenta-ajan ja epätarkkuuden vuoksi. Sopiva neuroverkko tyyppi valittiin simuloimalla eri rakenteisia neuroverkkoja. Simuloinneissa parhaimman ennustustarkkuuden ja laskentanopeuden tuottava neuroverkko valittiin käytettäväksi kiteytysprosessin säädössä. Linearisena mallina päädyttiin käyttämään aikaisemmissa tutkimuksissa kehitettyä ARX-mallia ja vastaavana epälineaarisen dynamiikan kuvaustapana käytettiin edellä mainittujen simulointien perusteella valittua eteenpäin kytkettyä neuroverkkoa. Näin pystyttiin vertailemaan lineaarisen ja epälineaarisen mallin ennustuskykyä. /30, 31/

Kiteytysprosessissa säätökohteena olevia lähtömuuttujia ei voida mitata suoraan, vaan joudutaan käyttämään sekundäärisiä mittauksia. Sekundääriset muuttujat valittiin yli vuoden kestäneiden pilot- ja laboratoriokoejaksojen perusteella. Ainoastaan kiteytyksen tuotantonopeus voitiin määrittää suoralla mittauksella. Myös tiettyjä oletuksia muuttujille ja ympäröiville olosuhteille tehtiin suunnittelun yksinkertaistamiseksi. /30, 31/

Mallien parametrit laskettiin tasapainotilan käyttäytymisen ja askelkokeiden tulosten perusteella. Tulomuuttujien vaikutukset lähtömuuttujiin saatiin määritettyä

muuttamalla kutakin tulomuuttujaa kerrallaan kolmen simulointikokeen aikana jokaisen kestäessä noin 13 tuntia. Tulokset osoittivat systeemin dynamiikan ominaispiirteiden muodostuvan epälineaarisuudesta, ei-minimivaiheisuudesta, kuolleesta ajasta ja ristikkäisvaikutuksista tulo- ja lähtömuuttujien välillä. Identifiointi suoritettiin normaalin käytännön mukaisesti sovittamalla malli saatuun dataan ja validoimalla mallia. Mallinnuksen tuloksena saatiin identifioitua prosessin tasapainotilassa kohtuullisen hyvin toimiva lineaarinen ja epälineaarinen malli. Lineaarinen mallin tasapainotilan ennustusvirhe oli kuitenkin epälineaarista mallia suurempi kuten voitiin odottaa kiteytysprosessin epälineaarisuuden perusteella. /30, 31/

Mallinnuksen tuloksena saatu lineaarinen malli oli varsin yksinkertainen. Yksinkertaisuudesta johtuen myös sen ennustuskyky osoittautui vain kohtalaiseksi verrattuna monimutkaisemman epälineaariseen mallin ennustuskykyyn. Kuitenkin huomattiin, että mallin laadinnassa ei saisi kiinnittää liikaa huomiota pelkkään mallinnustarkkuuteen, vaan myös mallin soveltuvuuteen säädön suunnittelussa. /30, 31/

Kehitettyjä malleja sovellettiin MPC-säätimeen. Syyt, joiden perusteella MPC-säädin valintaan kiteytysprosessin säätimeksi olivat sen suorituskykyominaisuudet, stabiilisuus, implementoinnin kustannukset ja helppous, ylläpidettävyys sekä läpinäkyvyys operoijille. /30, 31/

Kiteytysprosessia säädettiin sekä lineaarisella että epälinearisella mallilla varustetulla MPC-säätimellä. Molemmissa tapauksissa käytettiin samaa optimihakumenetelmää tulosten vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi. Tulokset osoittavat, että epälineaarinen MPC-säädin oli suorituskyvyltään vastaavaa lineaarista MPC-säädintä parempi. Prosessin dynamiikkaa ei selvästi ollut riittävän tarkasti kuvattu lineaarisen mallin tapauksessa, joten säädön suorituskyky jäi puutteelliseksi näinkin epälineaarisen prosessin ollessa kyseessä. /30, 31/

Säätimen viritysvaiheessa selvisi, että systemaattiselle virityskäytännölle olisi tarvetta. Nykyisessä käytännössään virittäminen yleensä tapahtuu iteratiivisesti kokeilemalla eri viritysparameyryhdistelmiä. Viritysparameyrien valinnalla vaikutetaan sekä optimointiongelman ratkeavuuteen että säädön suorituskykyyn ja systeemin stabiilisuuteen. Kyseisen MPC-algoritmin tapauksessa viritysparameyreiksi luokiteltiin ennustushorisontti (ih), säätöhorisontti (oh), ennustusvirheen ja ohjausmuutoksen painokertoimet (P_y ja P_w), asetusravotrajektorin suodatusvakio (a), ohjauksen suodatusvakio (β) ja lähtömuuttujan muutosnopeuden rajoitukset (?y). Näiden parametrien vaikutuksia pyrittiin selvittämään kokeilujaksojen yhteydessä. /30, 31/

Kyseisillä viritysparameyreilla näytti olevan monenlaisia vaikutuksia säädön suorituskykyyn. Säätöhorisontin pituudella voitiin tarvittaessa pehmentää lähtömuuttujan ja manipuloitujen muuttujien käyttäytymistä. Toisaalta säätöhorisontin pidennys vaikutti ratkaisevasti laskenta-aikaan. Ennustushorisontin sopivalla valinnalla voitiin stabiloida yleistä säädön käyttäytymistä. Valitsemalla suuri säätöhorisontti laskentakuorma kasvoi. Yleensä ennustushorisontti on ensimmäisenä valittava viritysparameyri ja tavallisesti peukalosääntönä on asettaa se saman suuruiseksi kuin askelvasteen asettumisaika. Ennustusvirheen painokertoimella voitiin

valita, mitä ulostuloa kulloinkin painotetaan, joten sen vaikutus näkyi painotettavan lähtömuuttujan säätötuloksen parantumisena. Ohjausmuutoksen painotuskertoimen oikealla valinnalla voitiin merkittävästi vähentää säätösuureen ylityksiä ja tulomuuttujien ristikkäisvaikutuksia. Suodatinparametrien valinnoilla voitiin pehmentää tulo- ja lähtömuuttujien vasteita äkkinäisissä muutostilanteissa. Lähtömuuttujan muutosnopeuden rajoituksilla voitiin lisätä laskenta-aikaa tai hidastaa säädön vasteita. /30, 31/

Suurin työmäärä malliprediktiiivisen säädön suunnittelussa näytti siis olevan, kuten jo aikaisemminkin tuli ilmi, ennustusmallin kehittämisessä. Lopullinen päätös MPC-säädön soveltamisen kannattavuudesta jää kuitenkin aina viime kädessä hankkeen rahoittajan ja suunnittelijoiden päätettäväksi. Vanhoja kohdeprosessin säätösuunnittelun tuloksia kuten PID-säädön parametrejä voidaan myös hyödyntää eri tavoin MPC-säädön suunnittelussa. /30, 31/ Pahimmat MPC-säädön pullonkaulat ovat riittävän tarkan mallin laatiminen ja luotettavien prosessimittausten takaaminen /17/.

4 YHTEENVETO

Kahden vuosikymmenen ajan MPC-säätöä on onnistuneesti sovellettu useisiin hankalan dynamiikan monimuuttujaprosesseihin. Öljynjalostusteollisuudesta esiintyvien ongelmien pohjalta alkunsa saaneena säätöjärjestelmänä sen sovelluskohteet ovat ajan kuluessa muuttuneet yhä haastavimmiksi ja epälinearisemmiksi. Alkuaikoina ennustamisessa käytetyt lineaariset prosessimallit ovat hiljalleen väistymässä paremman ennustustuloksen antavien epälineaaristen prosessimallien tieltä.

Malliprediktivisessä säädössä prosessin dynamiikkaa pyritään ennustamaan dynaamisen prosessimallin avulla tietyn mittaiselle tulevaisuuden ajanjaksolle. Säätötavoitteeseen pyritään pääsemään laskemalla optimaalinen ohjaussekvenssi minimoimalla neliölliset ennustusvirhe- ja ohjauskomponentit sisältävä tavoitefunktio. Optimointi on näytteenottovälein toistuva tapahtuma, jonka kertatuloksena saadusta optimaalisesta ohjaussekvenssistä implementoidaan vain ensimmäinen ohjaustoimenpide prosessin ohjaamiseksi. Näin lopullinen implementoitu ohjaussekvenssi eroaa huomattavasti kullakin näytteenottokerralla lasketusta ohjaussekvenssistä. Tämän seikan ympärille nivoutuvat useimmat malliprediktivisen säädön suljetun piirin käyttäytymisen ongelmat.

MPC-säädin jaetaan lineaariseen ja epälineaariseen säädintyyppiin siinä ennustamiseen käytetyn prosessimallin perusteella. Lineaariin malleihin perustuva MPC-säätö on jo varsin kehittyneellä asteella niin teorian kuin sovellettavuutensa puolesta. Suurimmat selvittämättömät ongelmat liittyvät robustisuuden arviointiin ja mallin suhteen esiintyvän epävarmuuden toteamiseen. Epälineaariin malleihin perustuva MPC-säätö on huomattavasti lineaarista vastinettaan vähemmän tutkittu alue. Ei-konveksit optimointiongelmat sisältävät niin teoreettisia kuin laskennallisiakin ongelmia. Useita eri vaihtoehtoja epälineaaristen mallien muodostamiseksi on jo olemassa. Suurimmat ongelmat liittyvät epälineaaristen mallien systemaattisten identifiointimenetelmien kehittämiseen. Suljetun piirin stabiilisuudesta on olemassa paljon teoreettista tutkimustietoa, vain käytännön tarkastelu puuttuu. Teorian puutteen ei kuitenkaan katsota olevan esteenä epälineaarisen MPC-säädön kehityskululle.

Raportoitujen MPC-sovellusten lukumäärä on kasvanut eksponentiaalisesti viimeisen vuosikymmenen aikana lähinnä kehittyneen teorian ja tietokoneiden laskentakapasiteetin seurauksena. Epälineaariset sovellukset ovat kuitenkin edelleen selvänä vähemmistönä kaikkien raportoitujen MPC-sovellusten joukossa. Suurin osa teollisuuden MPC-sovelluksissa käytetyistä prosessimalleista ovat tehdaskokeiden pohjalta kehitettyjä empiirisiä malleja. Kuitenkin selvä suuntaus sovelluskohteissa on epälinearisempia ja nopeamman dynamiikan prosesseja kohti.

MPC-säädön implementointiprosessi muodostuu prosessikokeista, ennustusmallin identifioimisesta sekä säätimen konfiguroinnista, testauksesta ja virittämisestä. MPC-säädön suunnittelussa suurin työ tehdään säädön suorituskyvyn kannalta kriittisimpien komponenttien eli prosessimallien kehittämiseksi. Säädön viritysparemetrejä MPC-säätimessä on enemmän kuin esimerkiksi perinteisessä PID-säätimessä. Yleisimmät viritysparemetrit ovat ennustus- ja säätöhorisontit sekä ohjauksen ja erosuureen

painokertoimet. Itse viritystapahtuma vaatii vähemmän resursseja kuin tavanomaisen säätimen viritys.

MPC-säätö asettaa monia haasteita tulevaisuudelle. Monet sen ongelmista ovat periaatteessa mallinnukseen liittyviä ongelmia. Eräs haaste on tehokkaiden identifiointimenetelmien kehittäminen. Toisena säätimen suorituskyvyn kannalta haastavana tekijänä on raskaan on-line laskennan hallinta. Myös suunnittelun systemointi ja eri suunnitteluvaiheiden integrointi tarjoaa monia mielenkiintoisia haasteita. Teollisuuteen soveltamisen kannalta MPC-säädön pitkän ajan ylläpito on luotava riittävän helpoksi, säädin on saatava robustiksi sekä ennustettavissa olevaksi. MPC-säädössä ei voida puhua yksittäisestä säätöstrategiasta vaan koko joukosta yleisten ideoiden ympärille kehitetyistä säätömenetelmistä. Juuri tämä ongelmakentän laaja-alaisuus tarjoaa monia mielenkiintoisia tutkimusaiheita tulevaisuudessa.

LÄHDELUETTELO

1. Allgöwer, F. and Findeisen, R. An Introduction to Nonlinear Model Predictive Control. 21 st Benelux Meeting on Systems and Control, Veldhoven, Netherland, March 19-21, 2002. pp. 1-23.
2. Andersen, H.W., and Kummel, M. Evaluating estimation of gain directionally – Part 2: a case study of binary distillation. *Journal of Process Control*, 2(1992)2, pp. 67–86.
3. Backx, T.C. Model Requirements for Next Generation Integrated MPC and Dynamic Optimization. *AIChE Symposium Series*, 326(98), pp. 43-54.
4. Badgwell, T.A., and Muske, K.R. Disturbance model design for linear model predictive control. *Proceedings of the American Control Conference*. Anchorage, AK, Volume 2, May 8–10, 2002, pp. 1621-1626.
5. Bartlett, R.A., Biegler, L.T., Backstrom, J., and Gopal, V. Quadratic program algorithms for large-scale model predictive control. *Journal of Process Control*, 12(2002), pp. 775–795.
6. Bitmead, R.R., Gevers, M., and Wertz, V. *Adaptive Optimal Control: The Thinking Man’s GPC*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990, 244 p.
7. Cutler, C.R., and Ramaker, B.L. Dynamic Matrix Control – a computer control algorithm. *Proceedings of the Joint Automatic Control Conference*, San Francisco, CA, paper WP5-B, 1980.
8. Dai, L. A systematic method to handle unfeasibility in constrained predictive control. *Proceedings. ICII 2001, Beijing, Volume 3, 2001*, pp. 227 – 231.
9. De Oliveira, S.L. and Morari, M. Robust Model Predictive Control for Nonlinear Systems *Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control*. Lake Buena Vista, FL, Volume 4, December 1994, pp. 3561 -3566.
10. Demircioglu, H. and Karasu, E. Generalized predictive control: A practical application and comparison of discrete- and continuous-time versions. *IEEE Control Systems Magazine*, 20(2000)5, pp. 36-47.
11. Findeisen, R., Allgöwer, F., Diehl, M., Bock, G., Schlöder, J.P., and Nagy, Z. Efficient nonlinear model predictive control. *AIChE Symposium Series*, 326(98), pp. 374 – 378.
12. Foss, B.A., Lohmann B. and Marquardt, W. A field study of the industrial modeling process. *Journal of Process Control* 8(1998)5, pp. 325-337.
13. Garcia, C.E., and Morshedi, A.M. Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC), *Chemical Engineering Communications*, 46(1986), pp. 73-87.

14. Garcia, C.E., Prett, D.M. and Morari, M. Model Predictive Control: Theory and Practice – a Survey. *Automatica*, 25(1989)3, pp. 335–348.
15. Henriksson, D., Cervin, A., Åkesson, J., and Årzen, K-E. Feedback Scheduling of Model Predictive Controllers. 8th IEEE RealTime and Embedded Technology and Applications Symposium, San Jose, CA, September 2002.
16. Henson, M.A. Nonlinear model predictive control: current status and future directions. *Computers Chemical Engineering* 23(1998), pp. 187 – 202.
17. <http://dot.che.gatech.edu/information/research/issicl/che6400/files/lecture/Lecture1.pdf> (24.10.2002)
18. Lee, E.B. and Markus, L. *Foundations of Optimal Control Theory*. The SIAM Series in Applied Mathematics. John Wiley & Sons, 1968, 576 p.
19. Lee, J. Modeling and identification for nonlinear model predictive control: requirements: current status and future research. In Allgöwer, F., Zheng, A., (editors): *International Symposium on Nonlinear Model Predictive Control: Assessment and Future Directions*, Ascona, Switzerland, 1998, pp. 91-107.
20. Löfberg, J. *Linear model predictive control: Stability and robustness*. D.Sc thesis No. 866, Linköping Institute of Technology, 2001, 84 p.
21. Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V. and Scokaert, P.O.M. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(2000), pp. 789-814.
22. Morari, M., and Lee, J.H. Model Predictive Control: past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, 23(1999), pp. 667-682.
23. Nikolaou, M. Model Predictive Controllers: A Critical Synthesis of Theory and Industrial Needs. In Bischoff, K.B., Chakraborty, A., Denn, M.M., Peppas, N. Seinfeld, J.H., Stephanopoulos, G., Wei, J., and Ying, J., (editors): *Advances in Chemical Engineering Series*, Academic Press, 2001, pp. 132-199.
24. Pearson, R.K. Selecting nonlinear model structures for computer control. *Journal of Process Control*, 13(2003), pp. 1–26.
25. Piche, S., Sayyar-Rodsari, B., Johnsson, D. and Gerules, M. Nonlinear Model Predictive Control Using Neural Networks, *IEEE Control Systems Magazine* , 20(2000)3, pp. 53–62.
26. Qin, S.J. and Badgwell, T.A. An Overview of Nonlinear Model Predictive Control Applications. In Allgöwer, F., Zheng, A., (editors): *International Symposium on Nonlinear Model Predictive Control: Assessment and Future Directions*, Ascona, Switzerland, 1998. pp. 128-145.
27. Qin, S.J. and Badgwell, T.A. An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology. In Kantor, J., Garcia, G., Carnahan, B., (editors): *Chemical Process Control V*, Tahoe City, CA, 1997, pp. 232–256.

28. Rawlings, J.B. Tutorial: Model Predictive Control Technology. *IEEE Control System Magazine*, 20(2000)3, pp. 38–52.
29. Richalet, J., Rault, A., Testud, J.L. and Papon, J. Model predictive heuristic control: applications to an industrial process, *Automatica*, 14(1978)5, pp. 413-428.
30. Rohani, S., Haeri, M. and Wood, H.C. Modeling and control of a continuous crystallization process: Part 1. Linear and non-linear modeling. *Computers and Chemical Engineering* 23(1999), pp. 263-277.
31. Rohani, S., Haeri, M. and Wood, H.C. Modeling and control of a continuous crystallization process: Part 2. Model predictive control. *Computers and Chemical Engineering* 23(1999), pp. 279-286.
32. Sayyar-Rodsari, B. Nonlinear and Hybrid modeling, Simulation, and Control: Current Technology and Future Views at Pavilion Technologies. *Proceedings of the 2001 American Control Conference, Arlington, VA, Volume 2, June 25-27, 2001*, pp. 1706-1707.
33. Soeterboek, R. *Predictive Control: A Unified Approach*. Prentice Hall, 1992, 352 p.
34. Vogel, E.F. and Downs, J.J. Industrial Experience with State-Space Model Predictive Control. *AIChE Symposium Series*, 326(98), pp. 438–432.
35. Välikkilä, J. Yleinen ennustava säädin savukaasun happipitoisuuden säädössä. *Diplomityö, Oulun Yliopisto, 2002*, 79 p.
36. Xiong, Q. and Jutan, A. Grey-box modeling and control of chemical processes. *Chemical Engineering Science*, 57(2002), pp. 1027–1039.
37. Young, R.E., Bartusiak, R.D., and Fontaine, R.W. Evolution of an Industrial Nonlinear Model Predictive Controller, *AIChE Symposium Series* 326 (98), pp. 342–351.
38. Zhu, Y. and Butoyi, F. Case studies on closed-loop identification for MPC. *Control Engineering Practice*, 10(2002), pp. 403 – 417.

ISSN 1238-9404
Oulun yliopisto
Säätötekniikan laboratorio – Sarja B
Toimittaja: Leena Yliniemi

1. **Yliniemi L & Koskinen J**, Rumpukuivaimen sumea säätö. Joulukuu 1995. 17 s. 6 liitettä. SBN 951-42-4301-3.
2. **Leiviskä K, Rauma T, Ahola T, Juuso E, Myllyneva J & Alahuhta P**, Sumea mallintaminen, viritys ja säätö. Tammikuu 1996. 44 s. 951-42-4348-X.
3. **Altavilla M, Koskinen J & Yliniemi L**, Rumpukuivaimen säätö neuroverkolla. Tammikuu 1996. 12 s. ISBN 951-42-4373-0.
4. **Myllyneva J, Leiviskä K, Heikkinen M, Kortelainen J & Komulainen K**, Sumean säädön käyttömahdollisuudet hiertämön ohjauksessa. Huhtikuu 1997. 52 s. ISBN 951-42-4647-0.
5. **Leiviskä K & Heikkinen M**, TMP -prosessin mallintaminen ja mallipohjainen säätö. Huhtikuu 1997. 68 s. ISBN 951-42-4646-2.
6. **Jaako J**, Nopeusyhtälön parametrien sovittaminen. Huhtikuu 1998. 25 s. ISBN 951-42-4961-5.
7. **Myllyneva J, Kortelainen J, Latva-Käyrä K, Nystedt H & Leiviskä K**, Hiertämön laatusäädöt. Syyskuu 1998. ISBN 951-42-5023-0.
8. **Lähteenmäki M & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: perusteet ja menetelmät. Lokakuu 1998. ISBN 951-42-5064-8.
9. **Tervahartiala P & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: ohjelmistovertilu. Elokuu 1999. ISBN 951-42-5343-4.
10. **Jaako J**, Eräitä optimointitehtäviä. Syyskuu 1999. 39 s. ISBN 951-42-5352-3.
11. **Jaako J**, Yksinkertaisia prosessimalleja. Syyskuu 1999. 73 s. ISBN 951-42-5353-1.
12. **Jaako J**, MATLAB-ohjelman käyttö eräissä prosessiteknisissä laskuissa. Syyskuu 1999. 61 s. ISBN 951-42-5354-X.
13. **Jaako J**, Säätötekniikan laboratorion opetuskokeiluja I – Portfoliomuotoisen kurssin toteutus ja tulokset. Helmikuu 2000. 28 s. ISBN 951-42-5544-5.
14. **Ahola T, Ruuska J, Juuso E & Leiviskä K**, Paperikoneen katkoherkkyyssindikaattori. Helmikuu 2000. 33 s. ISBN 951-42-5563-1.
15. **Ylikunnari J**, InTouch valvomo-ohjelmiston implementointi lämmönsiirron identifiointiprosessiin (PS II:n harjoitustyövälineistö). Maaliskuu 2000. ISBN 951-42-5568-2.
16. **Mäki T & Juuso E**, Tapahtumapohjainen sumea lingvistinen yhtälöjärjestelmä lääkevalmisteiden koostumusten ja valmistusprosessien tutkimuksessa. Kesäkuu 2000. ISBN 951-42-5678-6.
17. **Jaako J**, Säätötekniikan laboratorion opetuskokeiluja II – Apuopettaja opettajan apuna. Elokuu 2000. 22 s. ISBN 951-42-5742-1.
18. **Sivonen J**, Johdatus säätötekniikkaan, opetuslaitteiston suunnittelu ja toteutus. Syyskuu 2000. 20 s. ISBN 951-42-5795-2.
19. **Mutka P**, Neuraalilaskenta ja epälineaarinen dynamiikka komponenttien kulutus- ja myyntiennusteiden laatimisessa. Joulukuu 2000. 41 s. ISBN 951-42-5873-8.
20. **Komulainen K & Juuso E**, Vikatietojen hyödyntäminen funktionaalisessa testauksessa. Joulukuu 2000. 22 s. ISBN 951-42-5874-6.
21. **Ikäheimonen J, Juuso E, Leiviskä K & Murtovaara S**, Sulfaatisellun menetelmät, keiton ohjaus ja massan pesu. Joulukuu 2000. 48 s. ISBN 951-42-5875-4.
22. **Ikäheimonen J, Juuso E, Leiviskä K, Murtovaara S & Sutinen R**, Keittolipeä- ja massa-analyysi sellun keitossa ja pesussa. Joulukuu 2000. 35 s. ISBN 951-42-5876-2.

25. **Rahikka L & Juuso E**, Sulfaatisellun eräkeittoprosessin jatkuvatoiminen analysointi. Joulukuu 2000. 36 s. ISBN 951-42-5879-7.
26. **Pirttimaa M & Leiviskä K**, Tilastollinen prosessinohjaus: Pastapainoprosessin tehdaskokeet. Joulukuu 2000. ISBN 951-42-5884-3.
27. **Jaako J & Nelo S**, Prosessi- ja ympäristötekniikan opetuksen tulevaisuuden haasteita. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5889-4.
28. **Näsi J, Isokangas A & Juuso E**, Klusterointi kuorimon puuhäviöiden mallintamisessa. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5894-0.
29. **Mäki T & Juuso E**, Lingvistinen yhtälöjärjestelmä lääkevalmisteiden rakeistusprosessin dynaamisessa simuloinnissa. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5895-9.

31. **Joensuu P**, Vikadiagnostiikka sulatuksen laadunohjauksessa: Syherön syntyminen ja siihen vaikuttavat tekijät. Tammikuu 2001. ISBN 951-42-5893-2.
32. **Ikäheimonen J., Leiviskä K. & Ruuska J.**, Jatketiilen tukkeentumisen mallintaminen neuroverkoilla. Helmikuu 2001. ISBN 951-42-5906-8.
33. **Ikäheimonen J., Leiviskä K. & Ruuska J.**, Sulkutangon asennon ja valunopeuden käyttö jatketiilen tukkeentumisen ennustamisessa. Maaliskuu 2001. ISBN 951-42-5946-7.
34. **Ruuska J. & Leiviskä K.**, LD-KG-konvertterin lämpötilamalli. Toukokuu 2001. ISBN 951-42-6411-8.
35. **Ainali I., Juuso E. & Sorsa A.**, Vesikemikaalien annostelutyökalun kehittäminen: Flotaation perusteet, koejaksot ja mallinnus. Marraskuu 2001. ISBN 951-42-6589-0
36. **Näsi J. & Sorsa A.**, Jatkuvatoimisen liuospuhdistuksen pilot-prosessin mallinnus ja prosessikehitys. Helmikuu 2002. ISBN 951-42-6626-9.
37. **Ikäheimonen J. & Leiviskä K.** Syherödatan analysointi histogrammeja käyttäen. Maaliskuu 2002. ISBN 951-42-6678-1.
38. **Ikäheimonen J. & Leiviskä K.** Neuroverkot ja lingvistiset yhtälöt jatketiilen tukkeuman ennustuksessa. Huhtikuu 2002. ISBN 951-42-6700-1.
39. **Posio J.**, Malliprediktiiivinen säätö. Marraskuu 2002. ISBN 951-42-6887-3.

ISSN 1238-9404

Säätötekniikan laboratorio – sarja B