


Tekijät

DI Timo Harju
TkL Arto Marttinen

Säätötekniikan koulutusmateriaali
















Toteutettu Automaatiosäätön tuella.
Maaliskuu 2000

Sisällysluettelo

- Etusivu
- Sisällysluettelo
- Säätöpiirin virityksen perusteet
- Esipuhe
- Johdanto - säädön tarkoitus ja tavoitteet
- ☐ Säätöpiiri
 - ☐ Säätöpiirin komponentit
 - Säätöpiiri
 - Prosessi ja sen malli
 - Toimilaitteet
 - Mittaus ja suodatus
 - Säädin
 - Häiriöt
 - ☐ Säätöventtiili toimilaitteena
 - Yleistä
 - Toimintaperiaate
 - Toimilaitteongelmat
 - Venttiilin ominaisuudet
 - ☐ Säätöpiirin peruskytkenät
 - Takaisinkytkentä
 - Kaskadikytkenä
 - Myötäkytkentä
 - Suhdesäätö
 - Muita säätökytkentöjä
- ☐ Ohjauksen taso
 - Ohjauksen tasot
- Tehtävä

- [-] [📁] Esimerkkejä teollisuusprosesseista
 - [-] [📁] Yksikköprosesseja
 - [📄] Virtaus- ja paine
 - [📄] Pinnankorkeus
 - [📄] Lämpötila
 - [📄] Sakeus
 - [-] [📁] Osaprosesseja
 - [📄] Sekoitus- ja konesäiliö
 - [📄] Perälaatikko
 - [📄] Tislaus
 - [📄] Syöttöveden säätö
- [📄] Tehtävä
- [-] [📁] PID-säätimen toiminta ja rakenne
 - [-] [📁] PID-säätimen toiminnan periaatteet
 - [📄] PID-säätimen toiminta
 - [📄] P-säätö
 - [📄] Integroiva säätö
 - [📄] Derivoiva säätö
 - [-] [📁] Viritysparametrien merkitys
 - [📄] Vahvistus
 - [📄] Integrointi-aika
 - [📄] Derivointiaika
 - [📄] Derivoinnin suodatus
 - [📄] Viritysparametrien yhteisvaikutus säätimen lähtöön

- [-] Toteutustavat ja rakenteet
 - [-] Tietokonesäätö
 - Säätövälin vaikutus
 - Nopeus- ja asentoalgoritmit
 - AntiWindUp
 - [-] Rakenteelliset erot
 - Ideaalirakenne
 - Sarjarakenne
 - Rinnakkaisrakenne
 - Rakenteen merkitys
 - Ominaisuudet
 - Tehtävä 1
 - Tehtävä 2
- [-] PID-säädin automaatiojärjestelmissä
 - Damatic XD
 - Damatic Classic
 - Alcont 3000
 - Alcont 1
 - Parametrien vastaavuus järjestelmien välillä
 - Tehtävä 1
 - Tehtävä 2
- [-] V erityksessä käytetyt prosessikokeet ja prosessimallit
 - [+] Yksinkertaiset prosessimallit
 - [+] Tyypilliset prosessikokeet
 - [+] Prosessikokeen suunnittelu ja toteutus

- [-]  PID-säädön viritys
 - [-]  Viritys osana säätösuunnittelua
 -  Tavoitteet
 -  Säättöongelman ratkaisuvaiheet
 -  Säättöpiirin vaatimukset
 - [-]  PID-säätimen virittämisen ongelmat
 -  Virittämisen ongelmat
 -  Yleistä viritysmenetelmistä
 -  Käytännön näkökulma virittämiseen
-  Yhteenveto
-  Lähteet ja lisälukemista
-  LIITE Säättötekniikan matematiikkaa
-  Merkinnät ja lyhenteet

Säätöpiirin virityksen perusteet

Tekijät

DI Timo Harju
TkL Arto Marttinen

Yhteystiedot

Control CAD

Tekniikantie 12, 02150 ESPOO
Puh. (09) 2517 2311, Fax (09) 2517 2313

Sähköposti: control.cad@ccad.fi
Internet: www.ccad.fi

Tämä teos on toteutettu Automaatiosäätön tuella.

Kaikki oikeudet pidätetään. Tämän julkaisun tai sen osan jäljentäminen ilman tekijöiden kirjallista lupaa painamalla, monistamalla, äänittämällä tai muulla tavoin on tekijänoikeuslain mukaisesti kielletty. Kaikki mahdollinen on tehty kirjan tietojen oikeellisuuden varmistamiseksi. Tekijät eivät vastaa kirjan tarkkuudesta ja kattavuudesta eikä niistä aiheutuneista seurauksista.

Esipuhe

Tämä teos on tarkoitettu teollisuuden säätöpiirien virityksen oppaaksi. Sisältö käsittelee lähinnä erityyppisiä prosesseja ja niiden malleja, perussäätöpiirien käytännön viritystä, PID-säätimien rakennetta ja prosessikokeen suoritusta. Perusviritystä varten on nykyisin olemassa valmiita työkaluohjelmistoja, jotka helpottavat huomattavasti jokapäiväistä viritystyötä. Näitä ohjelmistoja käytettäessä täytyy kuitenkin tuntea myös virittämisen taustalla olevat perusteet. Tässä yhteydessä työkaluohjelmistoista esitetään TuneUp ja ExperTune, mutta samat virittämisen peruseriaatteet ovat kaikissa tämäntyyppisissä ohjelmistoissa.

Tämä materiaali on tarkoitettu prosessiteollisuuden käyttö- ja ylläpitotehtävissä oleville, ja osaltaan materiaali täydentää myös teknisen alan opetusta. Lisäksi opas soveltuu säätötekniikan kertauksena niille henkilöille, jotka eivät enää ole säännöllisesti tekemisissä PID-säätimien ja säätötekniikan kanssa. Valitut esimerkit ovat prosessiteollisuudesta. Materiaali koostuu hyväksi havaitusta kirjallisuudesta lisättynä käytännön kokemuksilla säätöpiirien virityksestä ja viritystyökalujen kehityksestä. Lisäksi materiaalia on käytetty teollisuuden automaatioinsinöörien ja -asentajien säätöpiirien virityksen koulutuksessa.

Tässä yhteydessä käydään läpi tyypillisimpiä tilanteita, joihin säätöpiirien virittäjät saattavat törmätä. Tämän takia on mahdollista käsitellä vain yleisimmät esimerkkiprosessit, toimilaitteet, työkalut, ongelmat jne., joiden avulla virittäjä pärjää useimmissa tapauksissa. Esimerkit luovat pohjan soveltaa opittuja tietoja myös tilanteissa, joita tässä yhteydessä ei ole mahdollista esitellä.

Säätötekniikka esitetään usein matematiikan menetelmin. Tämän materiaalin kunnianhimoisena tavoitteena on kertoa peruseriaatteet ilman että lukijalta vaaditaan merkittäviä esitietoja säätötekniikasta tai siihen liittyvästä matematiikasta. Periaatteessq derivointia ja integrointia vaikeampaa matematiikkaa ei edellytetä, ja lukiomatematiikka tai vastaavat tiedot ovat hyvä pohja asioiden omaksumiseen. Monimutkaisemmat matemaattiset muunnokset on lyhyesti esitelty liitteessä. Automaatiojärjestelmien ja automaation peruskäsitteiden tuntemusta on hyvä olla.

Prosessituntemus, säädettävän kohteen tunteminen, on keskeisessä asemassa myös säätötekniikassa. Teos käsittelee säätötekniikan teoriaa niin vähän kuin se on virittämisen kannalta tarpeellista. Tämän takia useat teoreettisesti vaikeat asiat on esitetty hyvin lyhyesti, lähinnä vain mainiten asioista. Toisaalta tämä maininta on tarpeen, jos lukija haluaa laajentaa tietojaan lukemalla tyypillisiä säätötekniikan oppikirjoja, jotka perustuvat pitkälle matemaattisten menetelmien hyväksikäytölle. Täten tarkoitus ei ole korvata perinteisiä säätötekniikan oppikirjoja, vaan tarjota teorian sijasta valmiita toimintaohjeita käytännön teollisuustyön suorittamiseksi ja olemassaolevien säätömenetelmien ylläpitoon.

Ennenkuin päästään säätöpiiriin viritykseen, täytyy tutkia sekä PID-säädintä että säädettävää kohdetta. Jotta kohteena olevasta prosessista saadaan tietokoneen ymmärtämä malli, täytyy prosessikokeesta saadusta mittausdatasta tehdä viritykseen, analyysiin ja simulointiin soveltuva malli. Näitä varten tässä julkaisussa on omat lukunsa. Koko säätöpiiriin toiminnan tarkasteluun päästään vasta kun säätöpiiriin komponentit ovat tuttuja.

Luvussa "Johdanto - säädön tarkoitus ja tavoitteet" tarkastellaan säädön tarkoitusta ja tavoitteita johdannonomaisesti. Samassa yhteydessä määritellään joitain käsitteitä, tarkastellaan säätötekniikan historiaa, nykyisiä viritystyökaluja sekä automaatioalan tulevaisuuden suuntauksia. Luvussa "Säätöpiiri"

tarkastellaan säätöpiirin komponentteja ja peruskytkeitä. Toimilaitteista käsitellään säätöventtiiliä, jonka toiminta kiinteästi liittyy säätöpiirin virittämiseen ja suorituskäyttöön. Erilaiset säätöpiirien kytkevät esitellään lähinnä virittämisen näkökulmasta. Luvussa "Esimerkkejä teollisuusprosesseista" on esitelty yleisimpiä yksikköprosesseja ja muutamia prosessiteollisuuden esimerkkejä osaprosesseista. Luvussa "PID-säätimen toiminta ja rakenne" käsitellään yleisesti PID-säätimen rakennetta, toimintaa ja viritysparametrien merkitystä. Säätimen toteutustapojen yhteydessä esitellään tietokonesäätöön liittyviä asioita, esimerkiksi näytteenoton merkitystä ja digitaalista PI-säädintä. Luvussa "PID-säätimen automaatiojärjestelmässä" tutkitaan PID-säädintä automaatiojärjestelmässä, käytettyjä signaaleja ja PID-parametrien riippuvuutta käytetystä automaatiojärjestelmästä. Esimerkkeinä ovat kaksi Suomessa yleisesti käytettyä automaatiojärjestelmää, Damatic ja Alcont.

Luvussa "Virityksessä käytetyt prosessikokeet ja -mallit" aiheena ovat prosessia kuvaavat mallit sekä prosessikokeet, joista saadusta mittausdatasta pystytään tekemään viritykseen soveltuva matemaattinen malli kohdeprosessista. Tarkoituksena on motivoida mallien käytön tarpeellisuutta, ja ymmärtää kuinka teollisuusprosessit käyttäytyvät ohjausmuutoksiin. Säätimen viritys perustuu malliin, jonka hyvyys ratkaisee viritysparametrien käyttökelpoisuuden. Prosessikokeen suoritus ja tulosten tulkinta ovatkin erittäin säätimen virittämisen kriittisimmistä vaiheista käytettäessä viritysohjelmistoja. Luvussa "PID-säädön viritys" käsitellään PID-säätimen viritystä yleisesti sekä erittäin yksinkertaisia viritysmenetelmiä. Tarkoituksena on tuoda käytännön näkökulma virittämisen vaikeuksiin. Ainoastaan yksi viritysmenetelmä (Lambda-menetelmä) käydään tarkemmin läpi. Säätötuloksen ja säätöpiirin suorituskäytön analysointi ovat omissa luvuissaan, samoin viritysohjelmistojen lyhyet käyttöohjeet. Viimeisessä luvussa on yhteenveto. Lisäksi lopussa on kirjallisuusviiteluettelo ja lyhyt säätötekniikan matematiikan liite sekä merkinnät.

Tämän materiaalin valmistamiseen tekijät ovat saaneet taloudellista tukea Automaatiosäätiöltä. Kiitokset Pasi Heikkiselle ja Mats Frimanille hyvistä huomioista ja ajatuksista. Sisällön ja rakenteen puolesta arvokkaita teollisuuden näkemyksiä on saatu Teppo Mattssonilta ja Matti Puonnakselta. Tekovaiheessa saadut huomiot Jukka Lieslehdolta, Terho Jussilalta ja Jukka Seppäselältä on otettu ilolla vastaan. Teoksen WWW-version simulointiappletit ovat Marika Arkiman tekemiä. Kaikki kommentit tästä materiaalista ja sen kehittämisestä ovat edelleenkin tervetulleita. Säätötekniikan perusperiaatteenhan mukaan tärkeintä on reagoida oikean suuntaisesti saatuun palautteeseen.

Maaliskuussa 2000

Timo Harju

Arto Marttinen

Control CAD Oy

Johdanto - säädön tarkoitus ja tavoitteet

Prosessilla tarkoitetaan monimutkaista järjestelmää, jossa esiintyy sekä mekaanisia että sähköisiä ilmiöitä, sisältäen niin esim. nesteiden, kiinteän aineen kuin kaasujen virtausta, lämmön siirtymistä, kemiallisia reaktioita jne. Tyypillisiä prosesseja ovat esim. paperikone, tislauskolonni tai voimalaitos. Prosessit voidaan jakaa pienempiin osiin, *osaprosesseihin*, jotka ovat itsekin prosesseja, esimerkiksi paperikoneen perälaatikko. Osaprosessissa taas voi olla *säätöpiirejä*, joita tässä yhteydessä lähinnä tarkastellaan. *Instrumentoinnilla* tarkoitetaan niitä mittalaitteita, säätimiä ja toimilaitteita, joita käytetään prosessin säädön toteutukseen ja sen toiminnan valvontaan. Prosessin säädössä keskeisenä käsitteenä on *prosessidynamiikka*, jolla tarkoitetaan prosessin tulon muutoksen vaikutuksen etenemistä prosessissa ajan mukana.

Kaikki teolliset prosessit tarvitsevat säätöä ja ohjausta ainakin jossain määrin säätö voi olla operaattorin tekemiä manuaalisia ohjaustoimenpiteitä tai automaattista säätimen tekemää säätöä. *Ohjaus* tarkoittaa, että järjestelmälle annetaan ennalta määrätty ohjaussignaali ilman että tiedetään prosessin todellista (mitattua) arvoa. Automaattinen *säätö* tarkoittaa sitä, että ohjaussignaali perustuu prosessimittauksesta saatuun informaatioon. Takaisinkytkentä prosessista on oleellisista säätötekniikassa. Takaisinkytkentä on aina hieman viivästynyt prosessin viiveiden ja hitauksien seurauksesta, ja tämä aiheuttaa ongelmia säätimen sopivien viritysparametrien löytämiseen. Säätöjärjestelmien käytön luonnollinen syy on ulkopuolisten häiriöiden vaikutuksen eliminointi. Ulkopuolisilla häiriöillä tarkoitetaan ulkoisten olosuhteiden muutoksen *tai* toisten säätöpiirien vaikutusta tarkasteltavaan säätösuureeseen. Säätöjärjestelmä toimii automaattisesti, mutta se vaatii huolellista suunnittelua ja säätimien viritämistä ja siten enemmän työpanosta kuin pelkkä ohjausjärjestelmä.

Tarkastellaan esimerkkinä asuinhuoneiston lämpötilan säätöä sähköpatterin avulla. Tarkasteltava esimerkki perustuu lämmönsiirtoon ja säädön tavoitteena on pitää lämpötila huoneessa miellyttävänä asukkaiden kannalta. Säätötekniikan kannalta meillä on useitakin tapoja ratkaista tämä ongelma: a) pidetään lämmitysteho vakiona, jolloin toteutus on helppo mutta talvella lämpötila saattaa olla liian alhainen ja kesällä vastaavasti liian korkea, b) muutetaan lämmitystehoa kalenterin mukaan, jolloin kesän ja talven erot tulevat suunnilleen otettua huomioon, mutta hetkelliset erot ulkolämpötilassa vaikuttavat haittaavasti sisälämpötilaan, c) ohjataan lämmitystehoa ulkolämpötilan mukaan, mutta näin ei pystytä vielä reagoimaan esim. auringon suoraan paisteeseen tai tuuletuksen vaikutuksiin, d) säädetään lämmitystehoa sisätilan lämpötilan mukaan tai e) yhdistetään c) ja d) kohdat niinkuin nykyisissä pientaloissa tehdään.

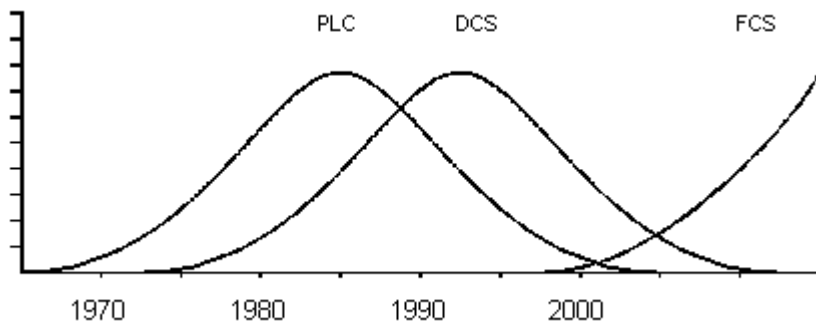
Prosessilla tarkoitetaan myös säädön kohdetta. Säädön tavoitteena on saada tietty mitattava tai laskennallinen prosessin suure seuraamaan mahdollisimman tarkkaan *asetusarvoa*. Jos asetusarvo pysyy enimmäkseen vakiona ja vain harvoin tehdään (askelmaisia) tasonmuutoksia, voidaan puhua *vakioasetusarvon säädöstä* (regulointi). Asetusarvon muutokset liittyvät usein suoraan tuotantotason muutoksiin. Uusi prosessin toimintapiste tulisi saavuttaa mahdollisimman nopeasti kuitenkin ilman suuria ylityksiä. Tällöin säätöpiirin tärkeimmäksi tehtäväksi jää häiriöiden vaikutusten poistaminen.

Jos asetusarvo muuttuu ajan mukana (esim. panosprosessit), voidaan silloin puhua *seurantasäädöstä* tai mekaanisten laitteiden suureiden (asento, nopeus, voima) yhteydessä *servosäädöstä*. Asetusarvo siis muuttuu jatkuvasti esim. jonkin ennalta määrätyn (etukäteen lasketun) asetusarvoprofiilin mukaisesti tai mittaussignaalin tulee seurata toisen säätimen ohjausta (ns. kaskadikytkentä). Yleisesti sanottuna säätöjärjestelmä tulisi suunnitella niin,

että tyypillisimmät asetusarvon muutostilanteet ja yleisimmät häiriötyypit on otettu huomioon suunnittelussa.

Prosessin säädettävät suureet ovat yhä riippuvaisempia toisistaan. Sanotaan, että prosessit integroituvat toiminnallisessa mielessä. Koska suureet muuttuvat enemmän ja enemmän toisistaan riippuvaisimmiksi, voi pieninkin häiriötilanteen vaikutukset levitä laajalle eri prosessin vaiheisiin. Siksi prosessien ohjaus ja säätö sekä automaatio yleensä ovat yhä keskeisemmässä asemassa tuotannon hallinnassa.

Nykyään säätötekniikan tehtävät hoidetaan usein keskitetysti prosessinohjausjärjestelmän avulla. Ohjausjärjestelmä eli automaatiojärjestelmä tekee haluttaessa itsenäisesti sille annetut tehtävät ja pitää käyttökäytön tietoisena prosessitapahtumista hälytyksillä, ilmoituksilla ja raporteilla. Automaatiojärjestelmän tehtävänä on kerätä ja käsitellä prosessista ja toimilaitteilta saadut mittaus- ja tilatiedot, valvoa ja ohjata prosessia, hoitaa lukitukset, sekvenssiohjaukset sekä reseptiohjaukset, kerätä historiatietoa ja näyttää sitä trendinäytöillä, tukea valvomotilan laitteita ja hoitaa raportoinnin. Prosessien toiminnallisen yhdistymisen lisäksi myös prosessien ohjaus- ja hallintajärjestelmät ovat integroituneet uusien, monipuolisten väyläratkaisujen myötä (kuten kenttäväylä). Yksittäisen säätöpiirin toimenkuvaan ollaan liittämässä "älykkäitä" toimintoja, jotka huolehtivat niin säätimen virityksestä kuin automaattisesta prosessin ja toimilaitteiden kunnonvalvonnasta. Prosessin hallinnan kannalta tämä johtaa siihen, että yksittäiseen säätöpiiriin vaikuttavien suureiden määrä kasvaa moninkertaiseksi. Samalla kasvavat myös vaatimukset säätöpiirin toiminnalle. Kun äly siirtyy lähemmäksi prosessia, muuttuu automaatiojärjestelmän tehtävä yhä enemmän kohti prosessitiedon esittämistä, tuotannonohjausta, vikadiagnostiikkaa, kunnossapitoa ja kunnonvalvontaa. Logiikkapohjaiset (PLC) järjestelmät sekä hajautetut automaatiojärjestelmät (DCS) ovat pikkuhiljaa siirtymässä kohti kenttäväylätekniikkaan (FCS) perustuvia ratkaisuja (Kuva 1). Kenttäväyläpohjaiset järjestelmät eivät sinällään ole uusi idea, sillä ne perustuvat hajautettuun tiedonkäsittelyyn ja digitaalisuuteen.



Kuva 1. Automaatiojärjestelmäarkkitehtuurien elinkaarien kehitys ja tulevaisuus

Säätöpiirin toiminnan kannalta on oleellista, että kaikki piirin elementit (säädin, ohjaava toimilaite, prosessi normaalissa toimintaolosuhteissa sekä mittausanturi ja -lähetin) toimivat mahdollisimman hyvin. On aina muistettava, että pelkällä säätöpiirin virityksellä ei pystytä poistamaan laitevioista, väärästä suunnittelusta tms. johtuvia ongelmia. Ennenkuin säätöpiiri kannattaa virittää, on varmistuttava että kaikki sen komponentit ovat kunnossa.

Vaikka ensimmäisiä virtauksen säätösovelluksia on Kreikasta jo 300 eKr., ensimmäisenä teollisena säätölaitteena mainitaan usein James Wattin

höyrykoneen nopeudensäädin vuodelta 1769. Tämän vuosisadan alkupuoliskon aikana Yhdysvalloissa takaisinkytkennän sovellukset liittyivät puhelinjärjestelmiin ja sähköisiin vahvistimiin, esimerkiksi Boden, Nyquistin ja Nicholsin tekemä työ. Samaan aikaan silloisessa Neuvostoliitossa keskityttiin säätötekniikan teorian kehittämiseen. Sodan aikana sovellusalueet liittyivät luonnollisesti esim. tutkajärjestelmiin ja automaattipilotteihin. Tuohon aikaan työ perustui pitkälle yritykseen ja erehdykseen, mutta 1940 luvulla myös matemaattiset ja analyttiset menetelmät kehittyivät. Avaruusohjelmien myötä vaatimukset kasvoivat kohti monimutkaisia, optimaalisia ja erittäin tarkkoja säätöjärjestelmiä. 1980 luvulta lähtien säätötekniikan toteutus on perustunut pitkälle digitaalitekniikan hyväksikäyttöön, joka mahdollisti kasvaneen laskentakapasiteetin myötä ratkaisuja, jotka eivät aikaisemmin olleet toteutettavissa. 1990 luvulla säätötekniikkaan on tullut mm. sumea logiikka ja neuroverkot.

Teollisissa sovelluksissa säätimiksi lähes poikkeuksetta valitaan *PID-säädin*, jonka yksinkertainen rakenne mahdollistaa edullisen ja helposti hallittavan toteutuksen ja ylläpidon. Huolimatta säätöteorian voimakkaan kehityksen mukanaan tuomien uusien säädinmahdollisuuksien tulvasta PID-säädin ei ole menettänyt asemaansa. Uudet teoreettiset menetelmät ovat osaltaan edistäneet PID-säätimen kehitystä tuomalla uusia keinoja säätöpiirin viritykseen ja analyysiin. Useimmat teollisten PID-säätimien tai säätöjärjestelmien valmistajat tarjoavat jo automaattisesti virittyviä (*self-tuner*) tai viritettäviä (*auto-tuner*) säätimiä. Markkinoilla olevia viritystyökaluohjelmistoja ovat mm. TuneUp, ExperTune, ProTuner, AdvaControl Loop Tuner, Intune ja WinTune.

Säätöpiirin viritykseen on Zieglerin ja Nicholsin (1942) vityssääntöjen jälkeen kehitetty lukuisa joukko erilaisia vitysmenetelmiä, joista osa perustuu enemmän tai vähemmän kokeellisiin sääntöihin (esim. Cohen-Coon, Foxboron Exact) tai jopa sumean logiikan sääntöihin, osa erilaisten tunnuslukujen optimointeihin (esim. ISE, IAE), osa prosessin matemaattisen mallin suoraan hyödyntämiseen (esim. IMC, Lambda). Eri menetelmien vertailu yksikäsitteisesti on vaikeaa. Itse asiassa jo säädön hyvyyden määrittelyssä törmätään vaikeuksiin. Zieglerin ja Nicholsin mukainen vityks esimerkiksi johtaa asetusarvon muutostilanteessa tyypillisesti 20% - 30% ylitykseen, mikä aiemmin epätarkkojen (välitys, kuiva kitka jne.) toimilaitteiden aikana oli usein välttämätöntä jotta säätöpiirin asentovirhe saataisiin pienemmäksi. Nykyään tämä ei enää ole tarpeellista eikä suotavaa.

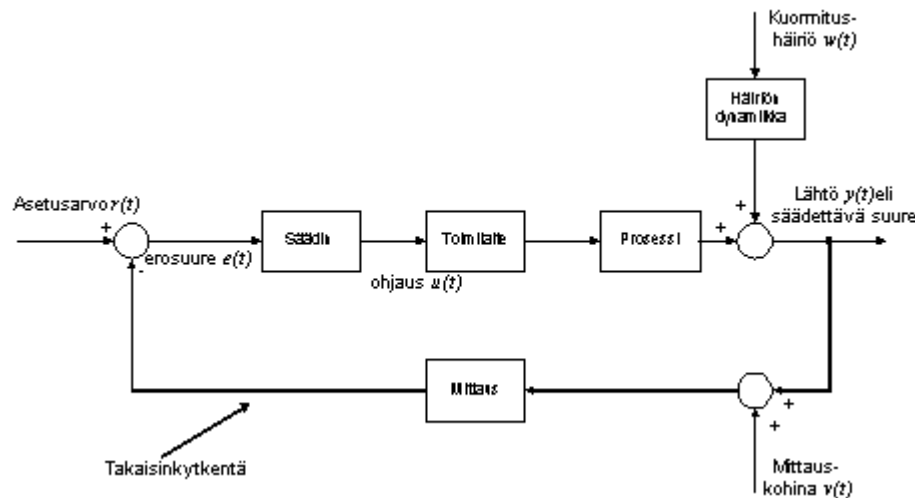
Säätöpiirin automaattinen vityks tehdään yleensä johonkin tiettyyn toimintapisteeseen (auto-tuning) operaattorin määräämänä hetkenä tai, jos toimintapiste vaihtelee, automaattisesti aina tarvittaessa tai jatkuvasti (self-tuning). Kaupalliset säätöpiirin vityks ja analyysiin tarkoitetut järjestelmät (olivat ne sitten yksittäiseen säätimeen liittyviä tai erillisiä ohjelmistoja) eivät vielä ole kykeneviä täysin itsenäiseen toimintaan, erityisesti jos kohdeprosessin ominaisuuksia ei ole mitenkään rajattu. Vityks työkalut perustuvat lähes poikkeuksetta tiettyjen etukäteen määrätyn mallirakenteen parametrien etsimiseen tai joihinkin prosessin vasteen tunnuslukuihin. Saatujen tietojen perusteella säätimen vityksparametrit lasketaan jonkun vityksrutiinin avulla. Useimmat (säätimen ulkopuolella toimivat) vityks työkalut sisältävät lisäksi säätöpiirin toimintaan liittyviä analyysityökaluja ja/tai simulointivälineitä. Teollisissa sovelluksissa tämänkaltaisten työkalujen käyttöliittymän on kyettävä sopeutumaan eri tasoisten käyttäjien vaatimuksiin peruskäyttäjän toiminnot ovat helposti toteutettavissa mutta asiantuntijakäyttäjällekin on tarjottava mahdollisuuksia. Lisäksi prosessiliittynyt automaatiojärjestelmän suuntaan on tärkeä kuinka mittausliittynyt tehdään ja kuinka säätimen parametrit voidaan siirtää sovellukseen. Asiaa helpottaa merkittävästi, jos työkalu on suoraan rakennettu ohjausjärjestelmän yhteyteen tai se on siihen helposti liitettävissä. On kuitenkin aina muistettava, että kyseessä ovat vityks työkalut, ja lopullisen ratkaisun parametreista tekee aina käyttäjä.

Säätöpiiri

Säätöpiirin komponentit

Säätöpiiri

Säätöpiiri koostuu säädettävästä prosessista toimilaitteineen, mittausanturista ja -lähettimestä sekä säätimestä. Säädin antaa ohjauksen toimilaitteelle tyypillisesti analogiamuotoisena (standardi) virtaviestinä (4-20 mA) tulevaisuudessa kenttäväylän myötä digitaalisena viestinä. Toimilaitte (hydraulinen, pneumaattinen, mekaaninen, sähköinen) vaikuttaa prosessin suureisiin (lämpötilaan, pinnankorkeuteen, pyörimisnopeuteen, pitoisuuteen, paineeseen, jännitteeseen jne.), usein vielä samanaikaisesti moneen eri suureeseen. Säädettävä suure mitataan (oloarvo) ja mittausviesti kytetään takaisin säätimelle, missä sitä verrataan käyttäjän tai jonkin muun säätimen antamaan asetusrvoon. Säädin laskee eroisuureen perusteella ohjauksen toimilaitteelle. Todellisiin järjestelmiin liittyy myös häiriöitä esim. *mittauskohinaa* ja *kuormitushäiriöitä*. Käytettyjä signaaleja merkitään usein seuraavasti: asetusrvo r , erosuure e , ohjaus u , säädettävä suure y jne. Tässä materiaalissa käytetään seuraavan kuvan mukaisia kirjainlyhenteitä.

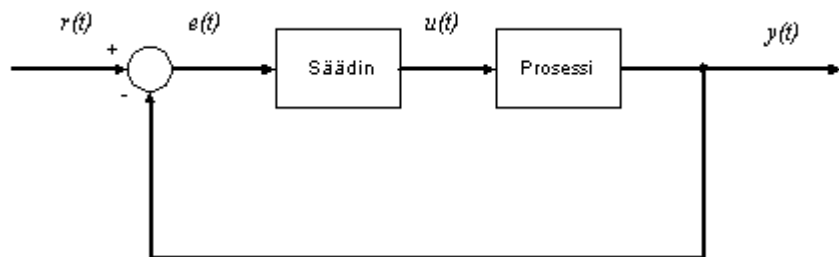


Kuva 1. Säätöpiirin peruskomponentit

Säätötekniikka perustuu takaisinkytkentään, jossa säädin käyttää prosessinohjaukseen mittaustietoa systeemin käyttäytymisestä. Takaisinkytkennällä pyritään juuri eliminoimaan eri häiriöiden vaikutus. Lukuisista hyvistä ominaisuuksista huolimatta takaisinkytkennällä on myös haittapuolensa. Niistä merkittävin on mahdollisuus *epästabiiliin* käyttäytymiseen, millä tarkoitetaan sitä, että ohjaus alkaakin vahvistaa piirissä koko ajan kasvavaa värähtelyä, kunnes se karkaa kokonaan käsistä. Säätöpiiri on *suljettu*, kun säädin on automaattiohjauksella eli takaisinkytkentätietoa käytetään hyväksi. *Avoimeksi* systeemiksi kutsutaan järjestelmää, jossa säädin on käsiohjauksella, eli takaisinkytkentälänkki ei ole käytössä.

Järjestelmien pelkistettynä esityksenä käytetään lohkokaaavioesitystä (Kuva 1), jossa ollaan kiinnostuneita signaaleista, ei niinkään prosessin fyysisestä rakenteesta. Lohkoon tulevaa signaalia kutsutaan *tuloksi* (input), ja lohkoa lähtevää signaalia *lähdeksi* (output). Esimerkiksi säätimen lähtö (eli ohjaus) on tulona toimilaitteelle.

Säädön suunnittelussa toimilaite mielletään usein prosessiin kuuluvaksi, joskus myös mitta-anturi (Kuva 2). Tässä muodossa myös viritystyökalut tarkastelevat prosesseja.



Kuva 2. Yksinkertaistettu takaisinkytketyn säätöpiirin lohkoavaio

Prosessi ja sen malli

Jotta säädettävä suure saadaan käyttäytymään halutulla tavalla erilaisissa asetusarvon ja kuormitushäiriöiden muutostilanteissa, on prosessin käyttäytyminen tunnettava. Toisin sanoen meillä täytyy olla jonkinlainen kuvaus järjestelmästä, (matemaattinen) malli prosessista. Usein toimilaite ja mittausanturi ajatellaan sisältyvän prosessiin. Tämä edellyttää, että komponentit ovat huomattavasti itse prosessia nopeampia jotta niiden olemassaolo voidaan "unohtaa."

Mallintaminen tiivistää ja organisoii ilmiön tai järjestelmän tietoa siten, että mallien käyttäjä voi hahmottaa esikuvan ominaisuuksia, havainnoida säännönmukaisuuksia ja ennakoida esikuvan (todellisen järjestelmän) käyttäytymistä. Malli on siis kommunikointiväline, tapa esittää haluttu tieto, keino ihmiselle käsitellä prosessia.

Mallit muodostetaan kahden tai useamman signaalin välille, esimerkiksi tarkasteltaessa prosessimallia tutkitaan käyttäytymistä ohjaus- ja mittaussuureen välillä. Lyhyesti sanottuna prosessien käyttäytyminen voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Prosessi voi reagoida askelmaiseen ohjausmuutokseen siten, että prosessin arvo siirtyy hitaasti uuteen loppuarvoon. Toinen tyyppi asettuu loppuarvoon värähtelyjen jälkeen. Kolmas prosessityyppi on sellainen, että prosessi ei tasaannu mihinkään loppuarvoon vaan jatkaa suoraviivaisesti kasvamista/vähentymistä. Kerätessä dataa automaatiojärjestelmistä käytössä on usein vain säätimen lähtö sekä säädettävä mittaussuure. Näin sekä toimilaite että mittausanturi tulevat huomioiduksi em. signaalien välisessä mallissa.

Toimilaitteet

Toimilaitteet muuttavat säätimen antamaa ohjausta niin, että ohjauksen vaikutus siirtyy toimielimeen ja lopulta haluttu vaikutus näkyy säädettävässä suuressa. Toimilaitetta voidaan siis ajatella tehon vahvistajaksi. Toimilaitteita ovat esim. pumput, sähkömoottorikäytöt, säätöventtiilit, kuljettimet, pneumaattiset ja hydrauliset sylinterit jne. Myöhemmin rajoitetaan tarkastelemaan ainoastaan säätöventtiiliä esimerkkinä yhdestä toimilaitteesta.

Mittaus ja suodatus

Mittaustekniikka on keskeisessä asemassa säätötekniikassa. Mittaussuureta, jota ei pystytä mittaamaan (tai laskemaan), ei myöskään pystytä säätämään. Mittausanturi ja suodatus aiheuttavat säätöpiiriin hitautta ja viivettä, jotka nopeiden säätöpiirien yhteydessä saattavat tulla suorituskykyä rajoittaviksi tekijöiksi. Suodatusta kuitenkin tarvitaan aina, jotta mittaussignaaleihin liittyvä kohina saadaan poistetuksi.

Tässä yhteydessä ei käsitellä olleenkaan eri suureiden mittaustapoja ja niihin liittyviä ongelmia, vaan oletetaan että käytössä on riittävän tarkka ja nopea mittaus. Säädön lopputulos ei voi olla parempi kuin mittauksen suorituskyky edellyttää. Käytännössä säädön vaikeudet palautuvat monesti mittaustekniikan ongelmiin.

Säädin

Tässä yhteydessä säätimen rakenne on jo valittu, puhutaan ns. PID-säätimestä. Säättösuunnittelun tehtäväksi jää sekä oikean säädinyhdistelmän valinta (PI, P, PD, PID) sekä sen vitysparametrien valinta. PID-säätimen perusteet esitellään omassa luvussa. Muita käytettyjä säädinrakenteita ovat mm. mallipohjaiset-, adaptiiviset- (= oppivat), ennustavat-, monimuuttuja- ja sumeat säätimet.

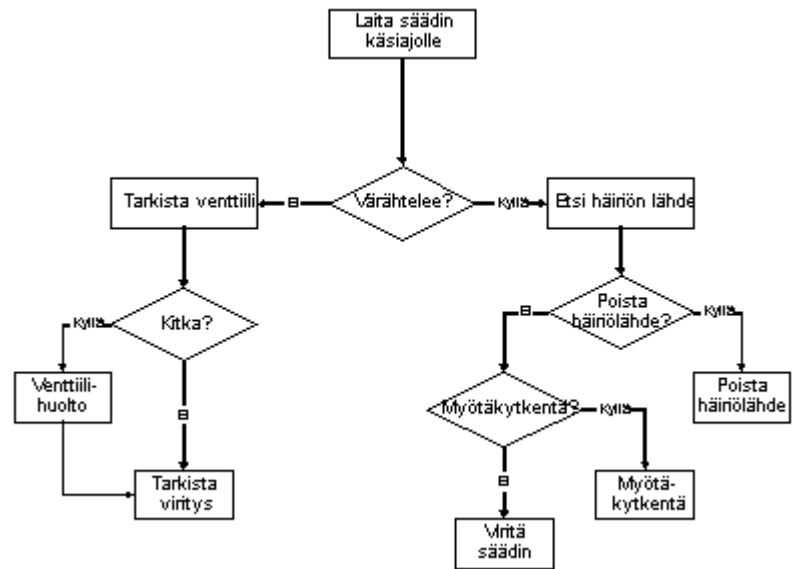
Häiriöt

Häiriöitä ovat mm. mittauskohina ja kuormitushäiriöt. Kuormitushäiriöt ovat usein askelmaisia tai jaksollisia, kohina satunnaista. Häiriöitä ovat esimerkiksi satunnaiset sykkivät painevaihtelut, aallot nesteen pinnankorkeudessa, turbulenssi putkistovirtauksissa sekä sähköiset häiriöt mittausantureissa. Prosessin ristikkäisvaikutuksista johtuen myös muiden säätöpiirien vaikutukset ovat häiriöitä tarkasteltavalle piirille. Mitä nopeammaksi (stabiilit) piirit on viritetty eli mitä suurempaa vahvistusta käytetään sitä merkityksellisemmäksi tulevat ristikkäisvaikutukset.

Säätöpiirin lohkokaaviossa häiriön summauspiste on piirretty prosessin jälkeen. Joskus häiriön summautumispiste piirretään ennen prosessia eli säätimen lähtöön. Simuloinneissa tätä käytetään yleisesti, jos häiriön mallia (dynamiikkaa) ei tunneta. Tällöin oletetaan, että häiriön vaikutus säädettävään suureeseen on samantyyppinen kuin ohjaussuureen vaikutus. Joissain tapauksissa näin on todellisuudessakin. Esimerkiksi pinnankorkeuden yhteydessä muutos tulovirtauksessa (= häiriö) saa aikaan samanlaisen pinnankorkeuden käyttäytymisen kuin ohjauksen (= lähtövirtauksen) muuttaminen.

Säätöpiirin värähtely voi aiheutua kyseisestä säätöpiiristä tai ulkopuolisesta lähteestä (Kuva 1). Värähtelyn syy voidaan selvittää, kun säädin laitetaan käsiajolle. Mikäli värähtely jatkuu vaikka säädin on käsiajolla, täytyy värähtelyn tulla jostain ulkopuolisesta häiriölähteestä. Jos häiriölähdettä ei pystytä poistamaan esimerkiksi toisen piirin virityksellä tai prosessiteknisin laittein, kannattaa tutkia mahdollisuutta myötäkytkennän käytölle. Muussa tapauksessa ainoana vaihtoehtona on pyrkiä virittämään säädin uudelleen niin, että se mahdollisuuksiensa mukaan poistaa häiriöiden vaikutukset.

Mikäli taas säätöpiirin värähtely loppuu kun säädin on laitettu käsiajolle, on selvää että kyseinen piiri itse aiheuttaa värähtelyn. Tähän syynä voi olla joko huono viritys tai toimilaittevika. Ensimmäisessä tapauksessa auttaa uudelleen viritys, jälkimmäisessä taas tarvitaan toimilaitteen huoltoa. Luonnollisesti toimilaittehuollon jälkeen tulee tarkistaa prosessisäätimen viritys. Pelkkä toimilaittehuolto tuo parannusta säädön toimintaan, jos toimilaitte on ollut erittäin huonossa kunnossa, tai jos säätöpiiri on arvioitu tärkeäksi, jolloin sen toimintaa on seurattu jatkuvasti. Useissa tapauksissa toimilaitteinvestoinnin hyöty tulee esille kun samassa yhteydessä tarkistetaan myös säätimen viritys.



Kuva 1. Häiriöiden löytäminen ja suositeltavat toimenpiteet

Säätöventtiili toimilaitteena

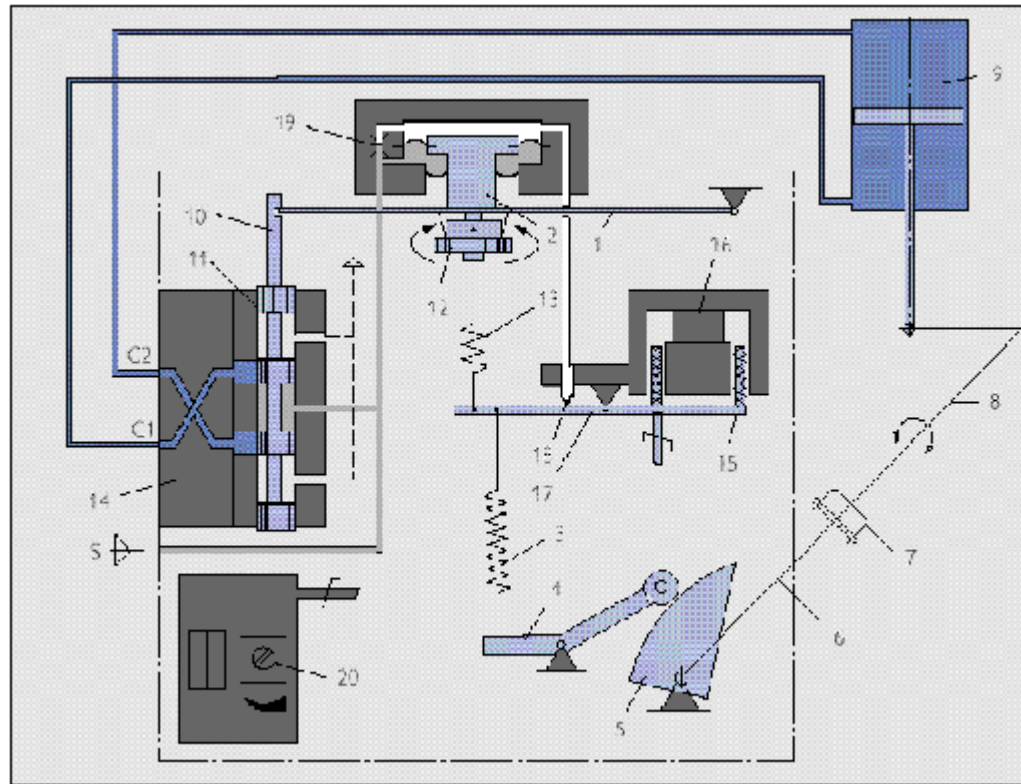
Yleistä

Toimilaitteyhdistelmä on keskeisenä tekijänä säätöpiirin suorituskyvyssä, sillä esimerkiksi amerikkalaisten tutkimusten mukaan jopa 30% säätöpiirin ongelmista johtuvat toimilaitteivioista (asennoitin / toimilaitte / venttiili). Eräässä säätöventtiilien kunnonarviointiprojektissa havaittiin, että ongelmia aiheutti venttiili 10%, toimilaitte 10% ja asennoitin 80% tapauksista.

Suurin osa Suomen sellu- ja paperiteollisuuden säätöventtiileistä on *sähköpneumaattisia*. Sähköpneumaattisen venttiilin toimintaa ohjaa asennoitin, jolle annetaan sähköisenä viestinä (4...20 mA) haluttu venttiilin asento. Asennoitin on itsessään asennonsäädin venttiilin sisällä, jonka mittaus on venttiilin asento. Asennoitin ohjaa paineilmaa, joka kulkeutuu männän eri puolille (liikesuunnasta riippuen) aiheuttaen halutun liikkeen toimilaitteessa.

Toimintaperiaate

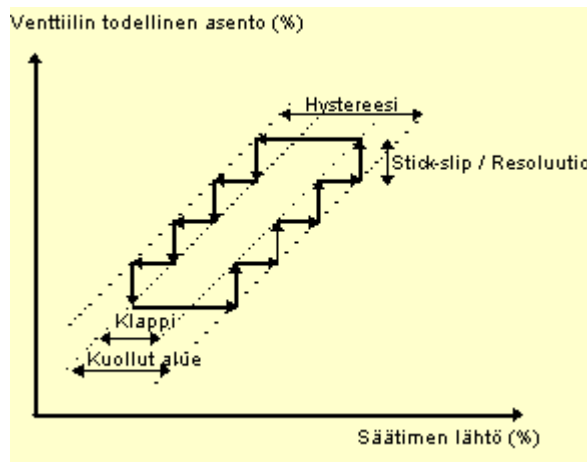
Sähköpneumaattisen asennoittimen toimintaa voidaan kuvata seuraavasti (Kuva 1). Kestomagneetin (16) magneettikenttään sijoitettu kela (15) aiheuttaa kelan vivussa (17) ohjausviestiin verrannollisen momentin. Takaisinkytkentäjousi (3) aiheuttaa kelan vivulle (17) vastamomentin, joka on suhteessa toimilaitteen akselin kääntökulmaan. Kääntymä välitetään kytkimen (7), akselin (6), ohjauslevyn (5) ja vivun (4) kautta takaisinkytkentäjousen (3) alapäähän. Suutin (18) tunnustelee kelan vivun (17) tasapainotilaa. Ohjausviestin kasvaessa kelan vipu (17) lähenee suutinta, suutinpaine kasvaa ja kalvomäntä (2), palkki (1) ja luisti (10) liikkuvat alaspäin. Luistiyksikkö (10, 11) ohjaa nyt syöttöpaineen toimilaitteen männän yläpuolelle ja männän alapuolelta purkautuvan ilman poistoaukkoon. Paine-eron vaikutuksesta männän voima voittaa kitkavoiman ja dynaamiset momentit, ja mäntä kääntää toimilaitteen akselireiän tarkasti uutta viestiä vastaavaan asentoon. Kelan vivun (17) momentit ovat tällöin tasapainossa. Jousi (13) aiheuttaa negatiivisen takaisinkytkennän ensimmäisen (suutin 18, etukuristin 19 ja kalvomäntä 2) ja toisen (luistiyksikkö 10, 11 ja toimilaite 9) vahvistinasteen välillä. Muuttamalla jousen (13) alapään kiinnityskohtaa kelan vivulla (17) voidaan asennoittimen dynamiikka sovittaa käytettävän toimilaitteeseen mukaan. Differentiaalikalvot kompensoivat tehokkaasti syöttöpaineen vaihtelujen vaikutuksen. Nollasäätö tapahtuu sormipyörällä (12), aluesäätö potentiometrillä (20). Usein juuri luistiventtiili aiheuttaa ongelmia asennoittimen toiminnassa, esimerkiksi likaisen instrumentointi-ilman seurauksena. Asennoittimet huolletaan yleensä vain tehtaan pidemmissä seisakeissa. Toimilaitteeseen tarvitaan tietty paine-ero venttiilin karan liikuttamiseksi, koska paineilma on kokoonpuristuvaa ja toimilaitteessa sekä venttiilissä on kitkaa. Venttiilin alkaessa liikkua se ottaa vähintään tietyn kokoisen askeleen, joka aiheuttaa takaisinkytketyn säädön kannalta ongelmallisia piirteitä. Tämä johtuu lepokitkan ja liikekitkan erosta.



Kuva 1. Sähköpneumaattisen asennoittimen toimintaperiaate

Toimilaiteongelmat

Tärkeimmät säätöventtiilin epälineaarisuudet on kuvattu seuraavassa kuvassa. Epälineaarisuudella tarkoitetaan sellaista käyttäytymistä, joka ei ole suoraviivaista, suoraan verrannollista. Nämä epälineaarisuudet heikentävät säätöpiirin toimintaa, erityisesti jos kohinataso on alhainen (Kuva 1). Kuollut alue on yleensä huomattavasti suurempi kuin stick-slip -askel, ja venttiilin todellinen asento riippuu siitä, kumpaan suuntaan venttiili on viimeksi liikkunut. Säätöventtiilin pienin mahdollinen askel on tyypillisesti 0,3 - 0,5% venttiilin toiminta-alueesta. Myös venttiilin väärä mitoitus huonontaa säätötulosta, sillä toiminta-alueen reunoilla (lähes kiinni/auki) venttiili toimii huonommin kuin toiminta-alueen keskellä. Kuollut alue ja stick-slip -askel aiheuttavat rajoitettua värähtelyä I-termin sisältävissä säätöpiireissä. Virittämällä voidaan poistaa tai vähentää I-osan vaikutusta, mutta tällä tavalla reagoidaan seurauksiin, ei itse ongelman syyhyn. Venttiilin epäideaalisuudet huomioon ottavassa virityksessä pyritään suureen vahvistukseen. Prosessisäätimen viritystä muuttamalla ei voida poistaa venttiilin stick-slip -ilmiötä. Itseasiassa joissain tapauksissa on vaikea erottaa huonon säätimen virituksen ja venttiilin epälineaarisuuksien aiheuttamat ongelmat, sillä yleensä kysymys on näiden molempien asioiden yhteisvaikutuksesta. Toisaalta kuollut alue ja stick-slip saattavat jäädä kokonaan huomaamatta, jos prosessin kohinataso on suuri.

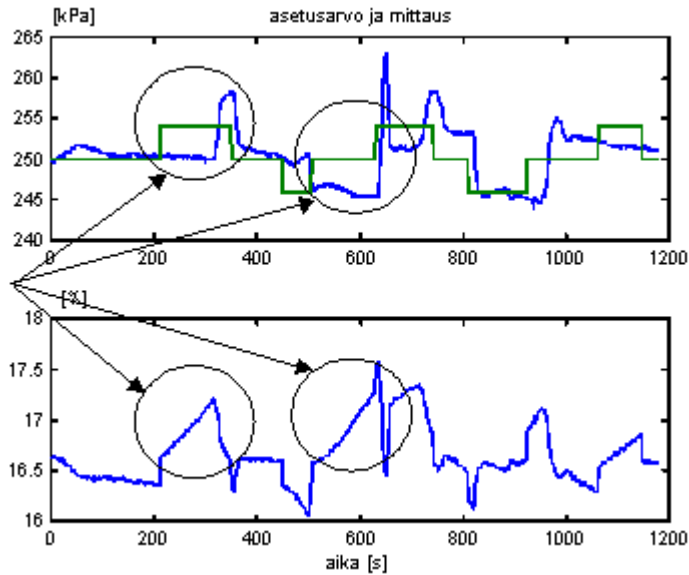


Kuva 1. Säätöventtiilin epäideaalisuudet

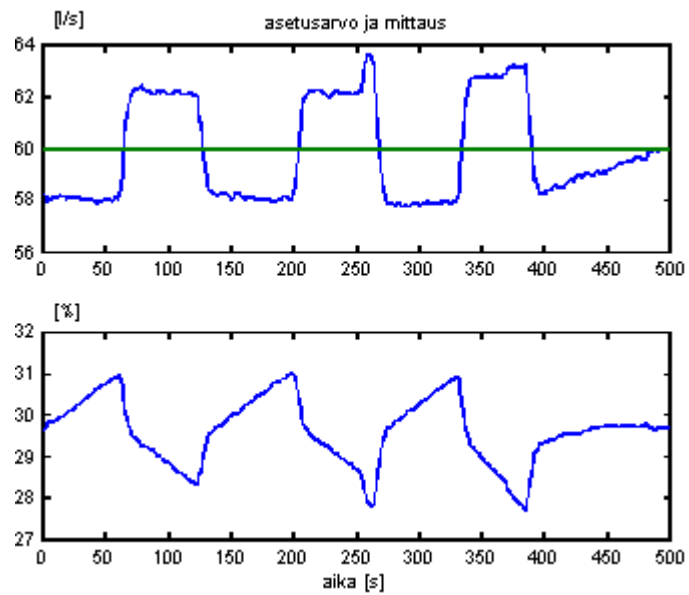
Tarkastellaan erästä perälaatikon syöttöilman paineensäätöpiiriä (Kuva 2). Kyseessä on prosessikoe, jossa asetuservoa on muutettu askelmaisesti ylös- ja alaspäin. Ensimmäisen asetuservon muutoksen yhteydessä havaitaan selvästi toimilaitteevika. Kun asetuservoa nostetaan (n. 210 sekunnin kohdalla), säätimen ohjaus alkaa kasvaa. Prosessi ei kuitenkaan reagoi mitenkään kasvavaan ohjaussignaaliin, kunnes paine äkkiä kasvaa n. 350 sekunnin kohdalla. Samanlainen ilmiö näkyy myös esim. 500 - 630 sekunnin kohdalla. Kyseisessä tapauksessa epäiltiin toimilaitteevikaa, joka sai aikaan venttiilin liikkeen pykälittäin, lisäksi venttiili oli ylimitoitettu.

Normaalissa tilanteessa tämäntyyppinen toimilaitteevika on usein helppo havaita (Kuva 3). Signaaleista havaitaan, että ohjaus on muodoltaan

sahalaitakuviota kun taas mittaussignaali on kantiaaltotyyppinen. Mittaus on aluksi asetusarvon alapuolella, ja säädin kasvattaa ohjausta. Tässä tilanteessa itse toimilaite ei kuitenkaan ole vielä liikkunut, joten virtaus (ja erosuure) pysyvät vakioina. Paine-eron kasvaessa riittävän suureksi, saavutetaan riittävä voima kitkojen voittamiseksi. Nyt toimilaite liikahtaa uuteen asentoon (n. 60 sekunnin kohdalla), joka saa virtauksen muuttumaan uuteen arvoon, tällä kertaa asetusarvon yli. Säädin alkaa taas pienentämään ohjausta, kunnes sama tilanne toistuu. Näin muodostuu tyypillinen PI-säätimen ja takeltaen liikkuvan toimilaitteen aiheuttama käyttäytyminen ohjaus- ja mittaussignaaleissa.



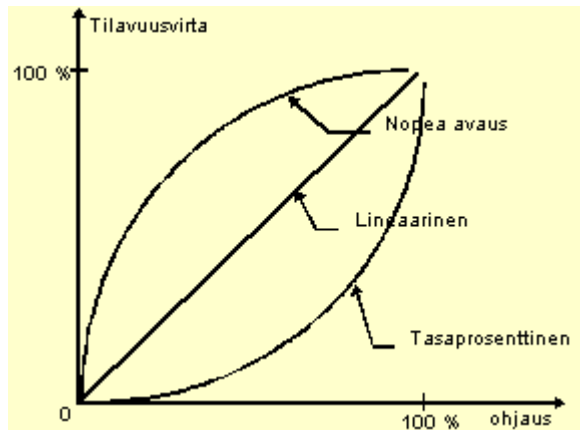
Kuva 2. Erään perälaatikon paineensyöttöpiirin toiminta. Yläkuvassa asetusarvo ja säädettävä suure, alakuvassa ohjaussignaali. Mittausdatasta on havaittavissa toimilaittevika



Kuva 3. Valkoliipeän virtauspiiri. Yläkuvassa asetuservo ja säädettävä suure, alakuvassa ohjaussignaali. Toimilaitteviasta kertoo se, että mittaussignaali on kantiaaltomaista ja ohjaussignaali vastaavasti sahalaitaista

Venttiilin ominaisuudet

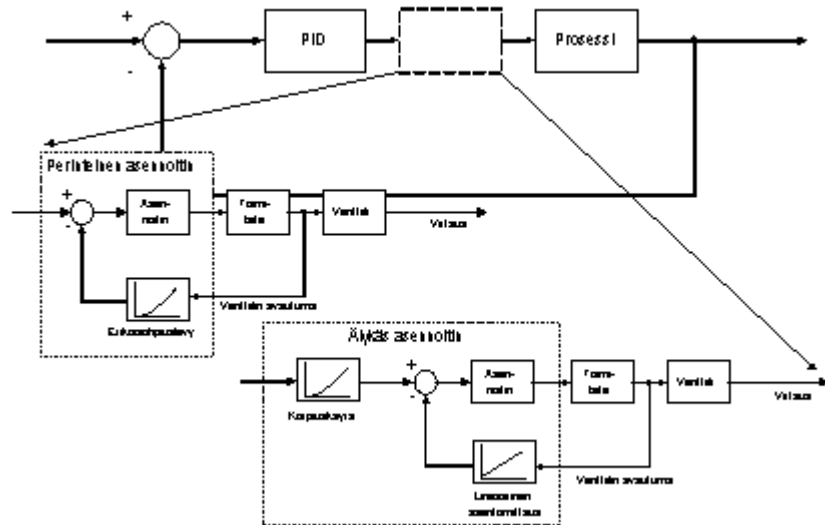
Venttiilien sisäiset ominaiskäyrät ovat lineaarinen, tasaprosenttinen ja pika-avaustyyppinen (Kuva 1). Nämä ominaiskäyrät kuvaavat venttiilin suhteellisen kapasiteetikertoimen riippuvuutta venttiilin suhteellisesta avaumasta, kun paine-ero venttiilin yli on vakio. Säädon kannalta asennetun venttiilin ominaiskäyrä on se, joka kuvaa venttiilin läpi menevää suhteellisen tilavuusvirran riippuvuutta suhteellisesta avaumasta, kun venttiili on asennettu prosessiputkistoon. Nyt paine-ero venttiilin yli ei enää ole vakio. Tilavuusvirran säädon kannalta tärkeintä on venttiilin ominaiskäyrä. Venttiili tulisi mitoittaa niin, että venttiilin ominaiskäyrä on suoraviivainen koko säätöalueella. Suurin osa prosessisäätimistä viritetään edellyttäen, että prosessi käyttäytyy suoraviivaisesti (= *lineaarisesti*) koko säätöalueella.



Kuva 1. Erilaisten venttiilin sisäisten ominaiskäyrien vaikutus

Vaikuttamalla venttiilin sisäiseen dynamiikkaan pystyvät uudet digitaaliset asennoittimet parantamaan säätötulosta. Säätoventtiilin ominaiskäyrää voidaan korjata sellaiseksi, että säätöventtiili käyttäytyy lineaarisesti (Kuva 2). Lineaarinen asennetun venttiilin ominaiskäyrä helpottaa prosessisäätimen (PID) viritystä. Perinteisissä asennoittimissa on käytetty muotoiltua erikoisohjauslevyä, jolla venttiilin epälineaarisuus on korjattu. Tämä kuitenkin tarkoittaa, että asennoittimen mittaus (eli venttiilin avautuma) on ollut epälineaarinen. Uusissa digitaalisissa, älykkäissä asennoittimissa epälineaarisuuden korjaus on tehty muokkaamalla asennoittimen asetusarvoa ohjelmallisesti. Nyt venttiilin avautuman mittaus on lineaarinen.

Tiukentamalla asennoittimen viritystä pystytään esim. kuollutta aluetta pienentämään. Asennoitin on asentosäädin, ja uusista asennoittimista saadaan mittaustietona venttiilin karan asento. Vertaamalla tätä ohjaussignaaliin pystytään monia toimilaittevikoja päättelemään, osin jopa automaattisesti. Uutta venttiiliä ja erityisesti asennoitinta käyttöönotettaessa kannattaa olla tarkkana prosessisäätimen virituksen kanssa. Uusi "ärhäkämpä" asennoittimen viritys saattaa aiheuttaa ylimääräistä levottomuutta piiriin, jos venttiili on aikaisemmin ollut lähes jumissa ja jos prosessisäätimen viritystä ei samassa yhteydessä tarkasteta. Näin venttiilihuolto ja säätöpiirin viritys kulkevat käsi kädessä.



Kuva 2. Venttiilin ominaiskäyrän linearisointi perinteisellä ja älykkäällä asennoittimella

Venttiilin viiveeseen vaikuttavat mm. viimeinen asento, operointisuunta, avautumiskulma, paine-ero venttiilin yli, asennoitin jne. eli moni eri tekijä. Usein rajoittavana tekijänä on riittämätön paineensyöttö tai alimitoitettut paineilmaletkut. Joitakin tavoitteita hyvälle säätöventtiilille voidaan antaa seuraavan taulukon mukaan (Taulukko 1). Venttiilin väärästä mitoituksesta tulee monesti ongelmia myös säätöpiirin viritykseen. Säätvirhe virtauksen säädössä muodostuu säätimen mekaanisesta säätötarkkuudesta (esim. välily, heikko asennoitin) sekä asennetun venttiilin vahvistuksesta. Ylimitoidetulla venttiilillä on korkeampi asennetun venttiilin vahvistus ja siten suurempi säätövirhe. Samalla vaaditaan suurempi toimilaite, joka merkitsee korkeampaa hintaa ja hitaampaa vastetta.

Ylimitoidetulla venttiilillä vaaditaan pienempi avautumiskulmamuuutos jotta saadaan sama virtausmuutos kuin oikeinmitoitettulla venttiilillä. Samalla ovat siis säätimen ohjausmuutokset pienempiä, josta seuraa että asennoittimen luisti siirtyy vähemmän. Nyt tarvittavan paine-eron syntyminen männän yli kestää kauemmin. Tämä ilmiö on havaittavissa erityisesti kun liikutaan erittäin pienillä muutoksilla (myös rampeilla) tai kun liikutaan kuolleen alueen lähetyillä. Jos venttiili on liian suuri toimilaitteeseen nähden, aiheutuu tästä suurempien kitkojen seurauksena korkeampi kuormitusaste, joka kasvattaa kuollutta aluetta ja sen seurauksena viive kasvaa edelleen.

Jos venttiilin koon kasvattamisen takia myös toimilaitteen kokoa kasvatetaan, joudutaan kuitenkin usein tyytymään edelleen samankokoiseen asennoittimeen (erilaisia asennoittimia on vähemmän tarjolla kuin toimilaitteita). Suuremmat venttiilin hitausvoimatkin luonnollisesti tuovat lisää hitautta toimilaitteepaketille. Näin periaatteessa ylimitoidetulla venttiilillä on säätöpiiriin suorituskykyä ja nopeutta heikentäviä seurauksia. Nopeat säätöpiirit, kuten virtaus ja painepiirit, ovat kriittisiä venttiilin viiveelle ja nopeudelle, sen sijaan hitaammat prosessit kuten esim. pinnankorkeus ovat kriittisempiä kuolleelle alueelle.

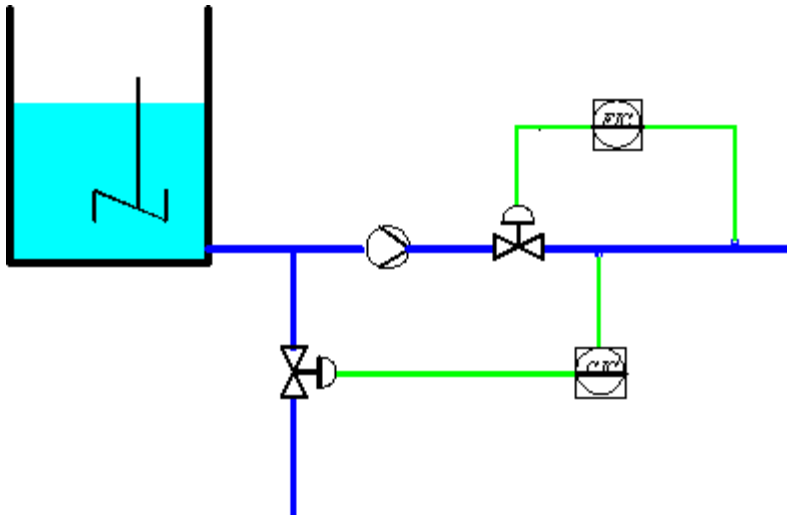
	<i>Venttiilin ominaisuus</i>	<i>Päävaikutus</i>	<i>Tavoite</i>
<i>Mitoitus</i>	Kapasiteettikerroin C_v	Prosessin vahvistus	1
<i>Lineaarisuus</i>	Venttiilin ominaiskäyrä	Prosessin vahvistus	vakio kuormasta riippumatta
<i>Tarkkuus</i> <i>Voima</i>	Toimilaite, asennus, asennoitin, instrumentointi, venttiilin kitkat	Hystereesi Takeltelu Asennoittimen ylitys Viive Prosessin vahvistus Epätarkkuus	< 1 % < 1 % < 20 % hyvin pieni lähes vakio < 1 %

Taulukko 1. Venttiilin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä

Säätöpiirin peruskytkennät

Takaisinkytkentä

Tarkastellaan esimerkkinä sekoitusprosessia (esim. sakeuden säätö), jossa kaksi nestettä sekoitetaan pumpun imupuolella (Kuva 1). Ongelmia tässä prosessissa aiheuttavat säiliön sakeusvaihtelut, muuttuvat kulkuajaviiveet, virtausmäärien vaihtelut, laimennusveden painenvaihtelut, mittausepätaarkkuudet ja kaikki prosessilaitteiden epäideaalisuudet. Perustakaisinkytkennässä yhdellä ohjaussuureella säädetään yhtä mittaussuuretta. Esimerkissä (Kuva 1) sakeudensäätö ja virtaussäätö on siis toteutettu kahdella erillisellä säätimellä. Kyseessä on siis yksinkertainen takaisinkytkentä. Takaisinkytkentä on yksinkertainen ja kohtuullisen helppo virittää. Säätovirhettä pyritään poistamaan säätövirheellä (erosuure on tulosignaali säätimelle), joten suorituskyky ei välttämättä ole paras mahdollinen. Takaisinkytkentä toisaalta poistaa säätövirheet riippumatta siitä, mikä ne on aiheuttanut.



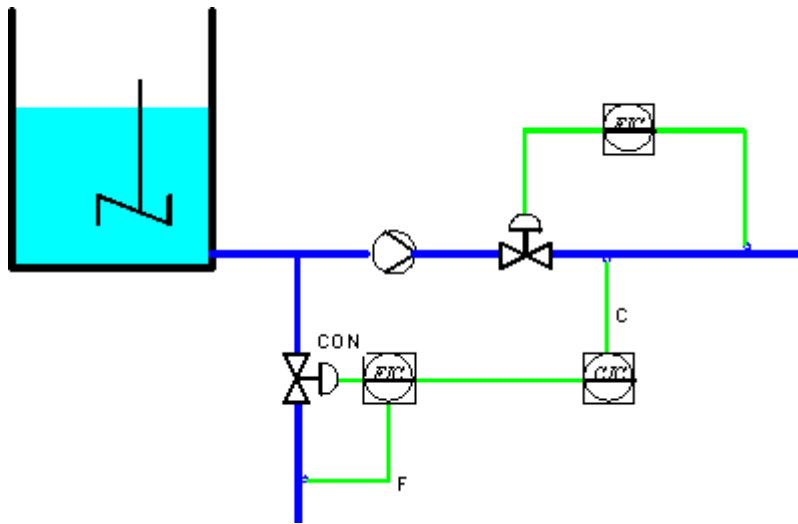
Kuva 1. Kaksi takaisinkytketty säätöpiiriä: virtaussäätö FIC ja sakeussäätö CIC

Kaskadikytkenä

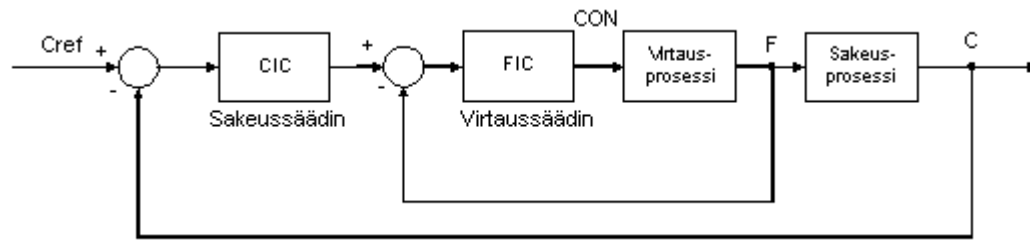
Kaskadikytkenässä on useita ohjaussuureita ja yksi säädettävä suure (Kuva 1), siis varsinaisen suureen ohjaus säädetään toisen suureen kautta. Säättöä pystytään nopeuttamaan, kun varsinaisen säätimen lisäksi käytetään apusäätäjää, joka reagoi nopeammin ohjausmuutoksiin. Kaskadipiiri siis muodostuu sisäkkäisistä säätösilmukoista (Kuva 2). Ulommaista säädintä kutsutaan *yläsäätimeksi* (isäntäsäädin, pääsäädin), ja apusäädin on *aläsäädin* (renkisäädin). Pääsäätimen ohjaus kytketään apusäätimen asetusarvoon eli apusäätimen toimintatila on *remote*. Tarkasteltaessa esim. Alcont 3000 - toteutusta (Kuva 3) havaitaan helposti tarvittavat mittaus- ja ohjaussuureet: sakeuden asetusarvon (C_{ref}) lisäksi tarvitaan sekä sakeus- (C) että virtausmittaus (F), ja ohjaus (CON) on kytketty laimennusvesiventtiilille. Kaskadikytkenässä tavallaan poistetaan ne häiriöt jotka vaikuttavat sisempään piiriin jo ennenkuin ne ehtivät vaikuttaa prosessiin. Osa säätöpiirin viiveestä jää sisäisen piirin "ulkopuolelle", ja näinollen mahdollistaa merkittävän säädön nopeuttamisen. Samoin massa- ja energiavirtauksia voidaan ohjata tarkkaan.

Apusäädin on joskus pelkkä P-säädin, jonka virittäminen on helppoa. Kaskadipiirin apusäätimeltä ei välttämättä edes tarvita suurta tarkkuutta, kunhan se vain reagoi riittävän nopeasti pääsäätäjän antamiin asetusarvomuuksiin. Esimerkiksi tasavirtasähkömoottorikäyttöjen perinteinen säätöratkaisu muodostuu kolmesta sisäkkäisestä säätimestä, asennon-, nopeuden ja virransäätimistä.

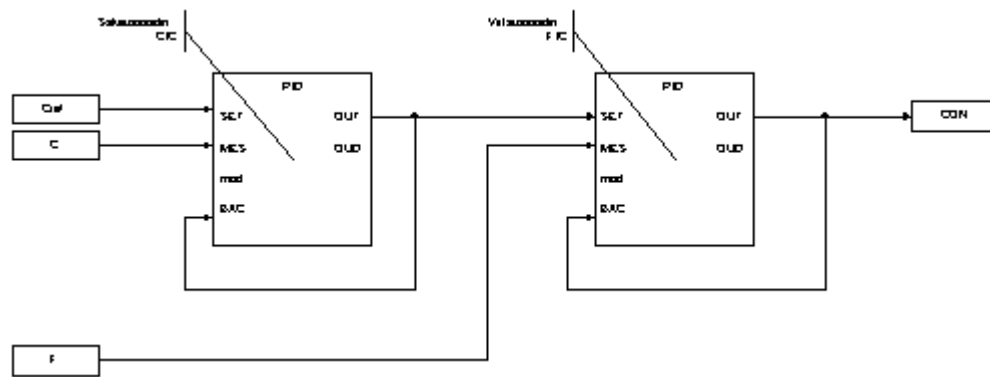
Kaskadipiirien yhteydessä aläsäädin saa siis asetusarvonsa yläsäätimen ohjauksesta, eli aläsäätimen asetusarvo on jatkuvasti muuttuva suure. Kaskadipiirien virityksessä molemmat säätimet voidaan virittää erikseen, kuitenkin niin että aluksi viritetään aläsäädin, ja tämän jälkeen viritetään yläsäädin (4...5 kertaa hitaammaksi kuin aläsäädin).



Kuva 1. Kaskadikytkenä, jossa laimennusveden virtauspiiri toimii apusäätimenä sakeudensäätöpiirille

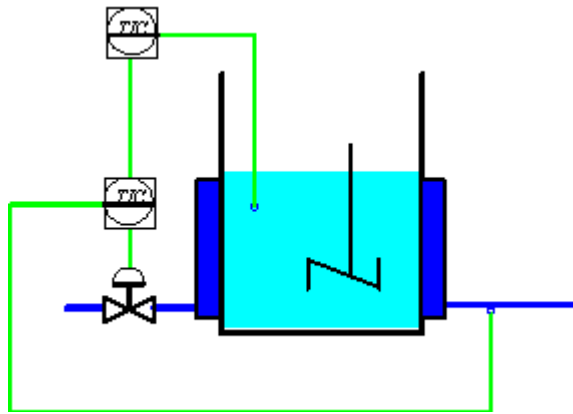


Kuva 2. Kaskadikytkentä esitettyinä lohkokkaaviona



Kuva 3. Kaskadikytkennän toteutus Alcont 3000 -automaatiojärjestelmässä

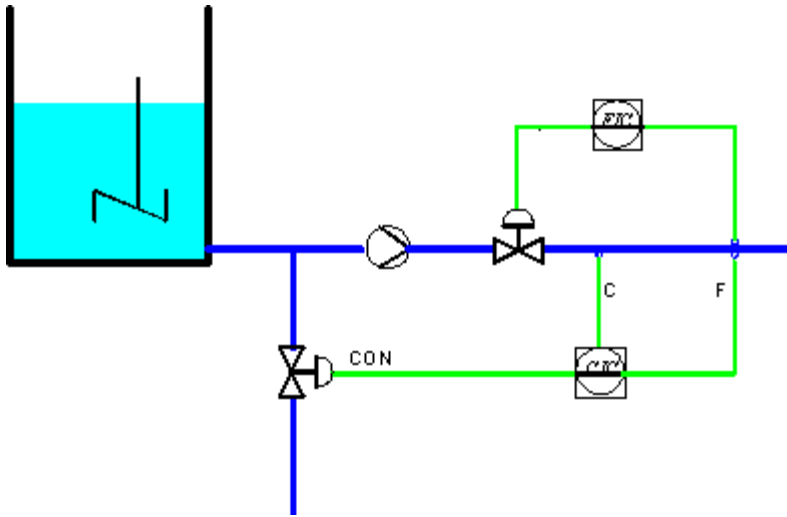
Tarkastellaan vielä esimerkkiä (Kuva 4) reaktorin lämpötilan säädöstä. Tämä on verraten tavallinen kaskadikytkennän sovellusesimerkki, jossa käytetään kahta lämpötilan säädintä. Reaktorin lämpötilaa säädetään siis jäähdytysveden poistolämpötilan kautta. Tällä rakenteella on mahdollista nopeuttaa säätöä, sillä häiriöt näkyvät nopeasti jäähdytysveden lämpötilan muutoksina, ja niiden vaikutus pystytään poistamaan nopeasti.



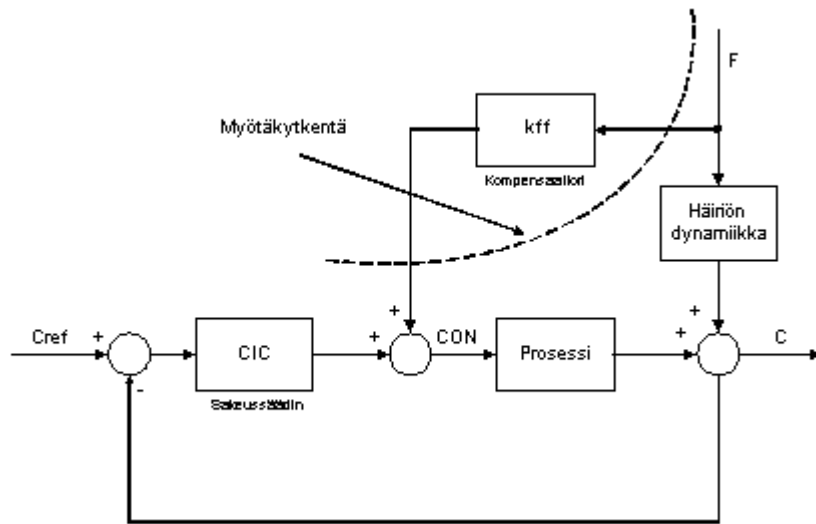
Kuva 4. Esimerkki kaskadikytkennän käytöstä reaktorin lämpötilan säädössä

Myötäkytkentä

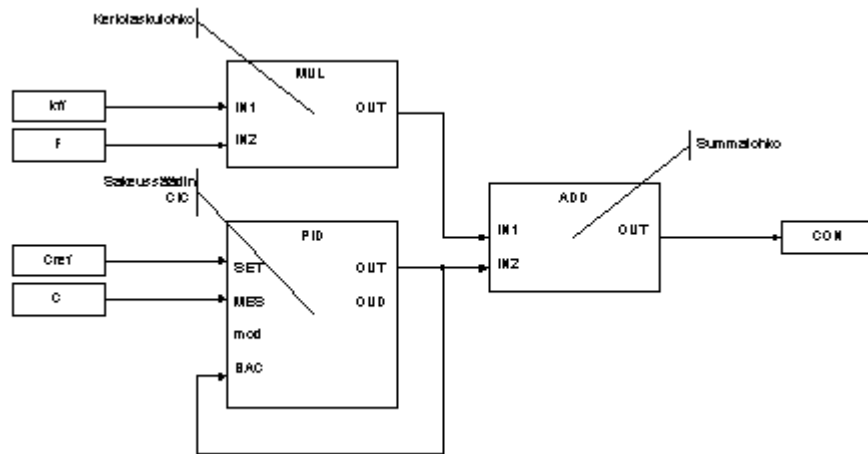
Jos prosessin kuormitushäiriö voidaan mitata ja jos käytössä on soveltuva ohjaussuure, voidaan toimilaitteen ohjaukseen summata *myötäkytkentä*. Tarkka kompensointi edellyttää, että viive ohjauksen ja säädettävän suureen välillä on pienempi tai yhtäsuuri kuin häiriön ja säädettävän suureen välinen viive. Myötäkytkentä tekee korjauksen ohjaussuureeseen jo ennenkuin häiriön vaikutus näkyy säädettävässä suureessa. Myötäkytkennän käyttö ei muuta takaisinkytketyn säätimen viritystä eikä se aiheuta esimerkiksi epästabiilisuutta. Oikein mitoitetulla ja valitulla myötäkytkennällä pystytään vähentämään mitattavien häiriöiden vaikutuksia. Kun häiriöiden vaikutus on pienennetty, on tietenkin mahdollista virittää varsinainen säädin uudelleen. Kun myötäkytkentää käytetään yhdessä normaalin takaisinkytkennän kanssa, tällöin myötäkytkentä tekee suurimman osan työstä ja takaisinkytkentä toimii vain apuna (Kuva 1, Kuva 2).



Kuva 1. Myötäkytkentä. Sakeussäätimen ohjaukseen summataan termi, joka riippuu massavirtauksen muutoksista



Kuva 2. Myötäkkykentä esitettyä lohkokaaaviolla



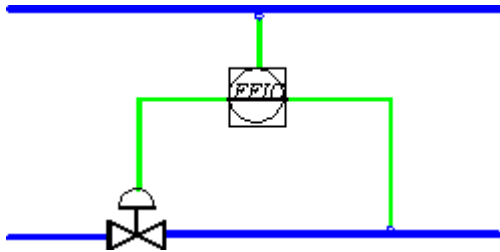
Kuva 3. Myötäkkykentän toteutus Alcont 3000 automaatiojärjestelmässä

Monessa tapauksessa myötäkkykentä toteutetaan (yksinkertaisimmillaan) tavallisella vakioarvoisella kompensattorilla eli pelkällä vahvistuksella. Tämä

ei kuitenkaan aina ole riittävä. Kompensaattorilla tarkoitetaan automaatiojärjestelmässä olevaa lohkoa, joka häiriösuureen mittauksen perusteella laskee lisätermin varsinaisen säätimen ohjaukseen *summattavaksi* (Kuva 3). Yksinkertaisimmillaan kompensattori on siis pelkkä vahvistuskerroin, kuten Damatic XD järjestelmän k_{ff} parametri. Mikäli häiriön vaikutus tunnetaan tarkemmin, voidaan kompensattorina käyttää myös monimutkaisempia automaatiojärjestelmän toimilohkoja ja -laskentaa. Yksinkertaiset yksikkösäätimet yleensä sisältävät myös ainakin myötäkylmäkanavan ja siihen liittyvän vahvistusermin, esim. Damatrol yksikkösäätimen K_n vahvistus ja A_n tulo. Myötäkylmän virittämistä käsitellään myöhemmin.

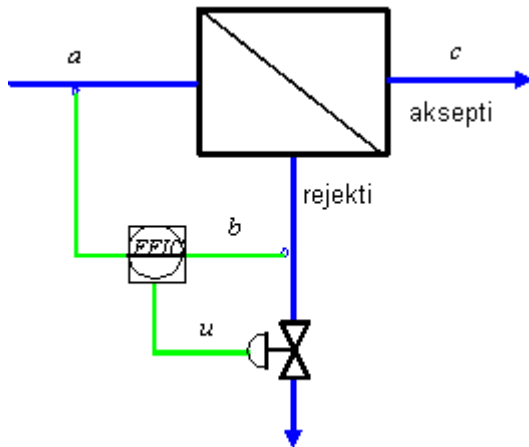
Suhdesäätö

Suhdesäätö on tyypillinen monissa annostelu- ja sekoitusprosesseissa. Päämääränä tässä säätötavassa on ylläpitää kahden tai useamman prosessimuuttujan välillä tietty suhde (Kuva 1). Tilanne on niin tyypillinen prosessiteollisuudessa, että tätä säätötapaa on syytä tarkastella omana peruskäytännään. Virittämisen kannalta säätötavassa ei ole mitään erityistä. Jos suhdesäätö on kaskadikytkennän apusäätimenä, sitä koskevat kaskadikytkennän virittämisestä annetut ohjeet.

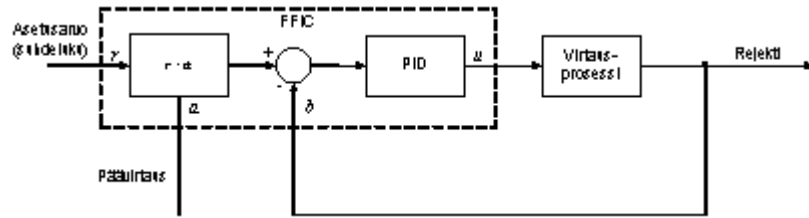


Kuva 1. Suhdesäätö kahden virtauksen välillä

Tarkastellaan sellu- ja paperiteollisuuden esimerkkinä lajitinta, jossa päävirtauksesta (a) erotetaan rejekti (b) ja aksepti (c), (Kuva 2) ja (Kuva 3). Rejektivirtaus seuraa päävirtausta tietyllä suhteella (r), jota voidaan pitää suhdesäätimen asetusarvona.



Kuva 2. PI-kaavio lajitTIMEN suhdesäädöstä



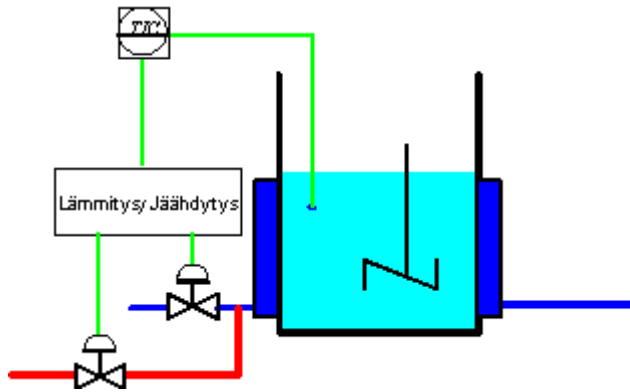
Kuva 3. Edellisen lajitin esimerkin suhdessäädin lohkokkaaviona

Toisena sellu- ja paperiteollisuuden esimerkkinä suhdessäädöstä on konesäiliön yhteydessä olevan sekoitussäiliön annostelulinjat. Oleellista on juuri se, että sellun, painehiokkeen, TMP:n, hylyn ja värillisen hylyn suhteet ovat oikein. Tämä hoidetaan suhdessäädön avulla niin, että näiden virtauksien keskinäiset suhteet ovat kullekin paperilajille oikeat. Sama ajatus voidaan toteuttaa myös taselaskentaa käyttäen, jolloin virtausmittausten lisäksi käytetään myös sakeusmittauksia, jolloin tunnetaan todelliset massamäärät, ei ainoastaan virtausmäärät.

Välttämättä suhdeluvun ei tarvitse olla vakio, vaan se voi muuttua esim. ajettavan lajin mukaan tai erillisen mittauksen perusteella. Esimerkki jälkimmäisestä tavasta on vaikkapa ilman ja polttoaineen sekoitus voimalaitosympäristössä. Virtauksen säätöpiiri (FFIC) syöttää ilmaa kattilaan polttoainevirtauksen mukaisessa suhteessa, joka saadaan jäännöshappimittauksen perusteella pitoisuuden säätimen (QIC) ohjauksesta.

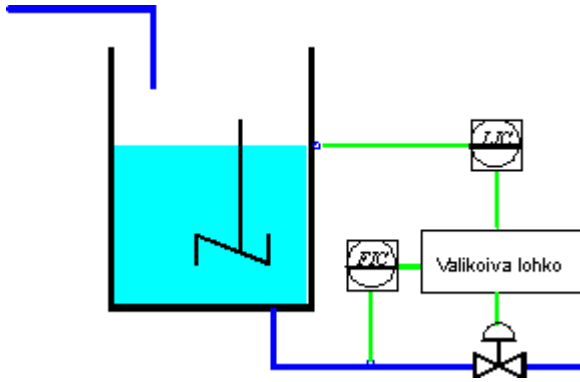
Muita säätökytkentöjä

Säätöratkaisuja on luonnollisesti useita muitakin kuin tässä esitetyt. Usein yhtä säädintä kohti on useampi toimilaitte, kuten seuraavassa reaktorin lämpötilan säätöesimerkissä (Kuva 1). Esimerkissä lämmitykselle ja jäähdytykselle on olemassa omat toimilaitteensa. Perussäätöjen virityksen kannalta tapauksen tekee ongelmalliseksi se, että prosessi käyttäytyy erilailla lämmityksen ja jäähdytyksen aikana (esim. erilaiset venttiilit). Tutkittaessa prosessia vain automaatiojärjestelmän signaalien avulla (mittaus, ohjaus, asetusarvo), ei aina pystytä päättelemään prosessin ajotilannetta. Tämä on kuitenkin otettava selville, jotta voidaan varmistua virityksen oikeasta toiminnasta myös prosessin toisentyypin ajotilanteen aikana.



Kuva 1. Kaksipuoleinen säätöratkaisu, jossa yhdellä säätimellä on kaksi toimilaitetta

Tilanne toisinpäin on tapauksessa, jossa yhtä toimilaitetta käyttää useampi säädin. Seuraavassa esimerkissä (Kuva 2) virtaus- ja pinnankorkeuden säätimien ohjauksista valitaan suurempi toimilaitteelle. Näin saadaan toteutettua suojaustoimenpide, jossa säätöratkaisu estää pinnankorkeuden raja-arvojen ylittymisen. Normaleissa prosessiolosuhteissa saadaan taas tasainen lähtövirtaus säiliöstä. Virittämisen kannalta tässä rakenteessa ei ole mitään muuta erikoista kuin sopivan viritysjankohdan löytäminen, jossa toinen (harvinaisempi) ajotapa on käytössä.

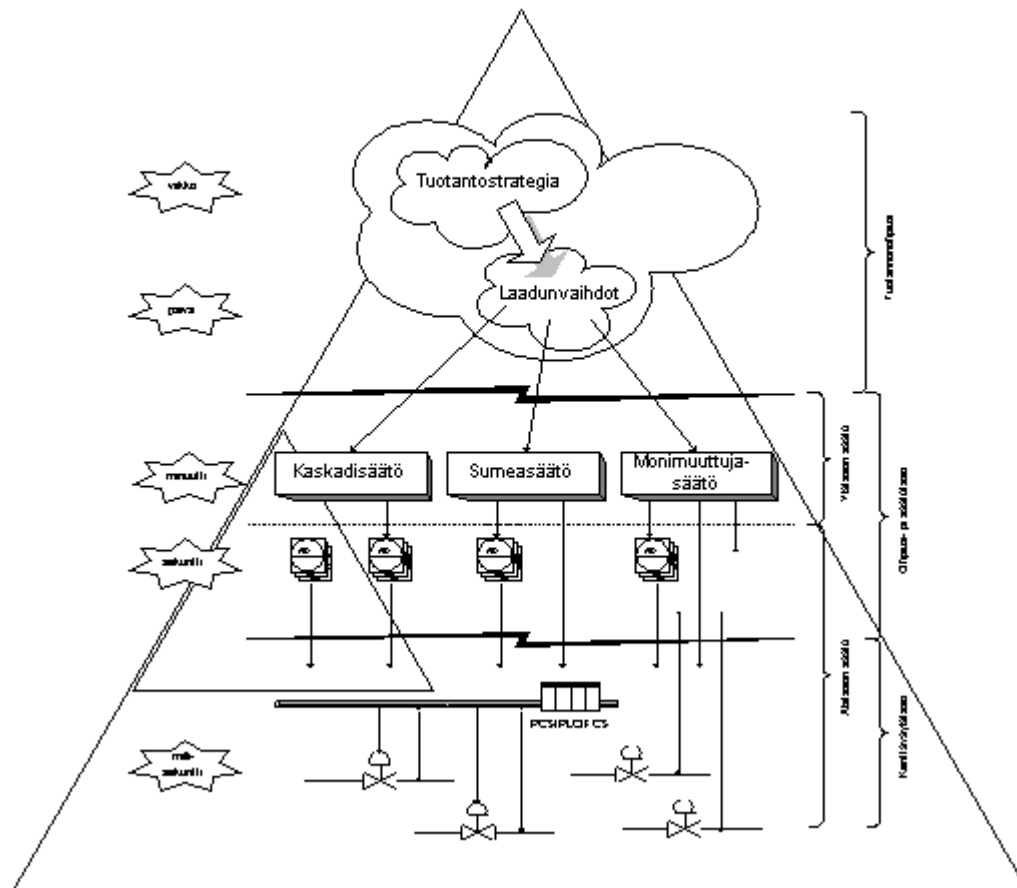


Kuva 2. Valikoiva säätö, jossa kahden säätimen ohjauksesta valitaan suurempi

Ohjauksen tasot

Ohjauksen tasot

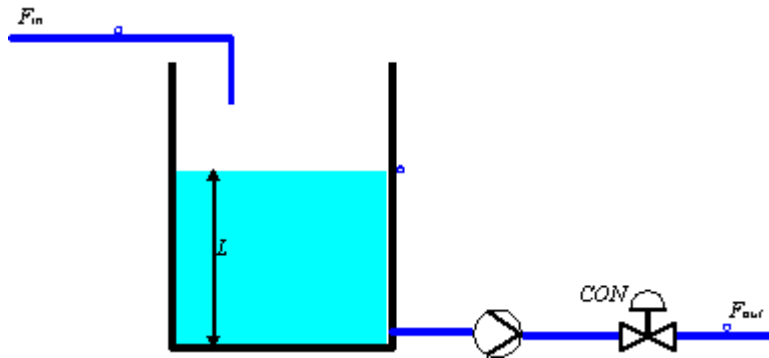
Eri ohjauksen tasoilla on luonnollisesti erilaiset tehtävät ja päämäärät sekä suoritusvälit. Ohjaukset tasot voidaan jakaa tuotannonohjauksen, ohjaus- ja säätötason sekä kenttäväylätason ohjauksiin. Ylimmällä tasolla ovat tuotannonohjausstrategiat, joiden tarkoituksena on optimoida teollisen yksikön taloudellinen tuotto tilauksien ja markkinaodotuksien mukaan. Tuotantostrategiat suunnitellaan esimerkiksi kuukausittain tai viikoittain ja ne määräävät laadunvaihtojen tapahtumahetket. Laadunvaihtomekanismit määräävät asetusarvot ylätason säätimille, joiden suoritusvälit ovat tyypillisesti minuutti- tai sekuntitasolla. Ylätason säätimenä voi olla yksinkertaisimillaan kaskadikytkennän yläsäädin (PID), tai jokin monimutkaisempi säätöstrategia kuten monimuuttujasäädin, sumeasäädin jne. Alatason säätimet ovat tyypillisimmillään PID-säätimiä. Alimmalla tasolla, kenttäväylätasolla, säätöväli voi olla parhaimmillaan millisekuntiluokkaa. Automaatiojärjestelmien yhteydessä toimivat viritystyökaluohjelmistot toimivat ohjaus- ja säätötasolla. Perussäätöjen virituksen yhteydessä täytyy tuntee sekä kenttäväylätason että ylemmän tason (säätötehtävien) toiminta. Monimutkaisemmat ohjausstrategiat perustuvat aina alemman tason säätöjen toiminnan hyvyyteen. Näin ollen kentällä olevat säädöt ja toimilaitteet luovat perustan ohjaus- ja säätötason toiminnalle, joka taas on perustana ylätason säätöjen onnistumiselle. Näin automaatiojärjestelmissä olevat perussäätöpiirit ovat itseasiassa merkittävässä asemassa kokonaisuuden toiminnan kannalta. Ohjaustasojen jakoa voidaan kuvata seuraavalla piirroksella (Kuva 1).



Kuva 1. Ohjauksen eri tasot ja niiden tyypilliset suoritusvälit

Tehtävä

Piirrä pinnankorkeuden säätöratkaisu, jossa on käytössä takaisinkytkennän lisäksi *sekä* kaskadi *että* myötäkytkentä, kun tuleva- ja lähtevä virtaus mitataan. Piirrä sekä PI-kaavio, lohkokaavio että Alcont 3000 -toteutus. Käytä kaikissa kuvissa samoja nimiä, esim. F_{in} , F_{out} , CON , L , L_{ref} jne. Mitä etuja kyseisestä säätöratkaisusta saavutetaan? Onko pinnankorkeus hyvä esimerkki?



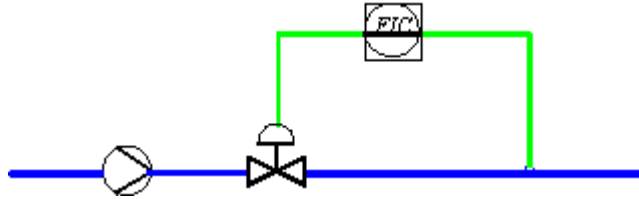
Esimerkkejä teollisuusprosesseista

Yksikköprosesseja

Virtaus- ja paine

Virtaus- ja painesäädöt ovat hyvin nopeita. Prosessihäiriöt vaikuttavat muuttamalla säätöventtiilin yli olevaa paine-eroa, jolloin virtaus muuttuu. Virtauksen säädössä neste- tai höyrylinjan venttiiliä liikutetaan mitatun virtauksen perusteella (Kuva 1). Teoreettisesti ajateltuna virtauksen säädössä on putki, joka on täynnä kokoonpuristumatonta ainetta. Kun venttiilin asentoa muutetaan, näkyy muutoksen vaikutus heti virtauksessa. Näinollen kaikki kompensoitava hitaus tulee mittausanturista ja suodatuksesta, toimilaitteesta ja säädettävän massan hitaudesta. Höyryvirtausten säädössä tulee huomioida väliaineen kokoonpuristuvuus, jolloin virtausputken tilavuus tulee ottaa huomioon. Virtausmittausta suodatetaan kohinan vuoksi alipäästösuodatuksella. Suodatus tapahtuu joko mittauslähettimessä tai automaatiojärjestelmän tulokorteilla. Mikäli virtausmittausta suodatetaan liikaa, saatetaan menettää oleellista informaatiota nopeista virtauksen muutoksista. Toisaalta liian pienen suodatuksen johdosta prosessikohina saa yhdessä säätimen kanssa venttiilin värähtelemään. Virtauksen säädöt ovat usein osana suhde- ja kaskadisäätöjä, joissa ne joutuvat vastaamaan sekä asetusrvomutuksiin että kuormitushäiriöihin.

Pitkissä putkilinjoissa myös massan hitaus saattaa näkyä prosessin dynamiikassa. Toimilaitteena käytetään yleisimmin kierrosnopeussäätöistä pumppua tai venttiiliä. Venttiilin nopeudella ei usein ole merkitystä, koska se on pienillä muutoksilla nopeampi kuin suodatettu virtausmittaus. Sen sijaan venttiilin muut epäideaalisuudet saattavat aiheuttaa suuriakin ongelmia säädön kannalta. Kierrosnopeussäätöiset pumput ovat kuitenkin tarkempia ja kalliimpia toimilaitteita. Jotta kierroslukusäätöinen pumppu toimisi turvallisesti laajalla toimialueella, on se usein rampituksilla tehty myös hitaaksi. Tässä mielessä venttiili toimilaitteena on nopeampi.



Kuva 1. Virtaussäätöpiiri

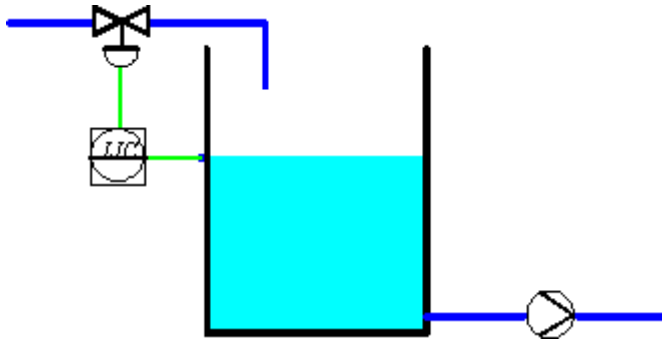
Paineensäädöt voidaan myös ryhmitellä väliaineen perusteella, käytännössä neste- ja höyrynpainesäätöihin. Höyryn säädöissä väliaine on kokoonpuristuva, kun taas nesteen paineen säätö muistuttaa paljon virtaussäätöä, ja toiminta sekä viritysperiaatteet ovat samat. Paineen mittausta on kuitenkin yleensä kohinainen, mikä hankaloittaa säätimen viritystä.

Pinnankorkeus

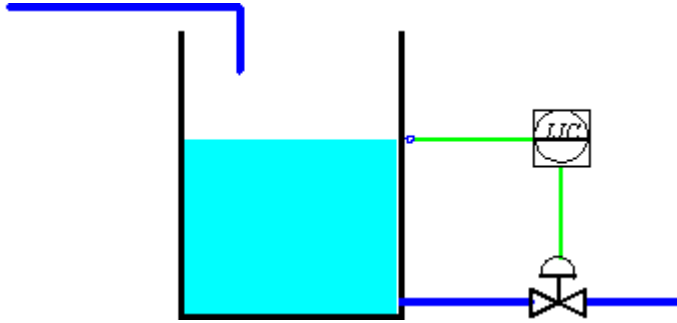
Pinnankorkeuden sovellutuksia löytyy prosessiteollisuudesta useista eri paikoista, kiehuttimista, lauhduttimista, syöttösäiliöistä jne. Säiliöitä käytetään prosessiteollisuudessa usein tasaussäiliöiden ominaisuudessa. Sen tarkoituksena on poistaa virtauksissa esiintyviä vaihteluita. Pinnankorkeuden säätö voidaan jakaa seuraaviin tapauksiin:

1. Lähtövirtauksesta huolehtii vakionopeudella pyörivä pumppu ja pinnankorkeutta säädetään tulevaa virtausta rajoittamalla (Kuva 1)
2. Pinnankorkeutta säädetään lähtövirtauksella, ja säiliöön tuleva virtaus on vakio
3. Poistopuolella ei ole vakiovirtausta (= pumppua), vaan nesteen oma massa saa aikaan lähtövirtauksen (Kuva 2). Tämä on harvinaisin tapa
4. Ylijuoksut.

Näillä kytkennöillä on merkittävä ero. Kun poisto/lähtöpuolella on pumppu tai virtauksen säätöpiiri, muutos tulo/lähtövirtauksessa saa säiliön ajautumaan suoraviivaisesti joko tyhjäksi tai täyteen. Tämän tyyppistä käyttäytymistä kutsutaan *integroivaksi* piiriksi, asiaa käsitellään prosessimallien yhteydessä. Tämä on niin tyypillinen tilanne, että lähes kaikkia pinnankorkeuden säätöpiirejä voidaan oletusarvoisesti luokitella näin.



Kuva 1. Pinnansäätöesimerkki, jossa säiliön ulostulovirtaus on vakio ja pinnankorkeutta säädetään tulovirtauksella



Kuva 2. Pinnankorkeuden säätöjärjestelmä, jossa poistovirtausta säädetään

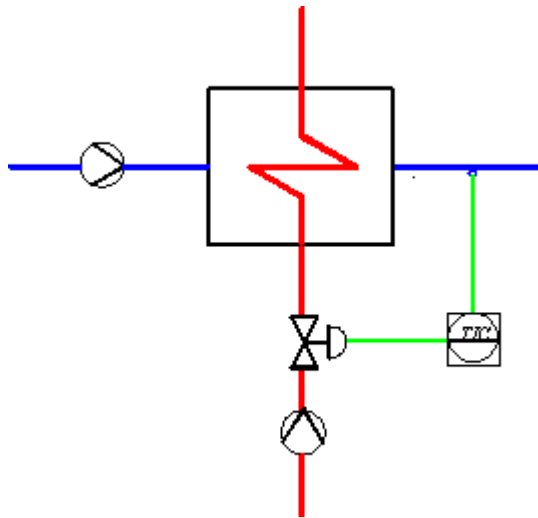
Pinnansäätö voidaan toteuttaa myös kahdella venttiilillä: ensimmäinen lisää säiliöön tulevaa virtausta ja toinen poistovirtausta. Näillä on yhteinen säädin, joka aukaisee jompaa kumpaa venttiiliä riippuen lähdöstään. Kahta toimilaitetta tarvitaan, jos pinta voi muuttua paljon lyhyessä ajassa ja yhdellä venttiilillä ei saada riittävää vaikutusta. Tyypillisesti säätimen lähdön keskivaiheen arvoilla venttiilejä pidetään yhtä aikaa auki.

Mittauksen suodatus yms. viiveet ovat usein merkityksettömiä itse säiliön dynamiikkaan verrattuna. Sen sijaan toimilaitteen epäideaalisuudet vaikuttavat voimakkaasti pintasäädön toimintaan. Tätä käsitellään venttiilin yhteydessä.

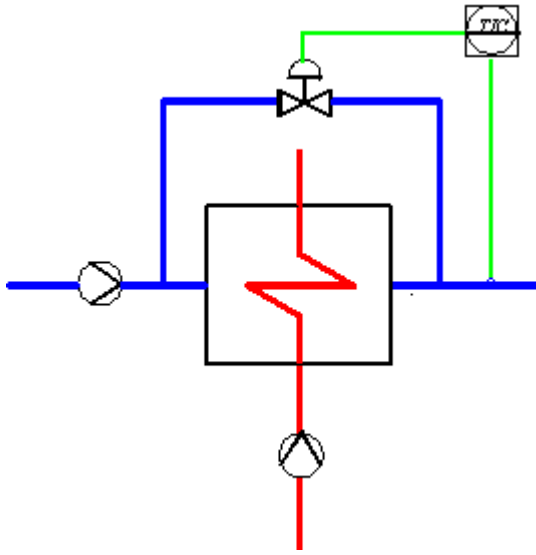
Tehdasoloissa pinnankorkeuden säädin viritetään usein toimintapisteeseen, joka vastaa 60-80% säiliön tilavuudesta. Säiliötä käytetään toisinaan puskuroimaan virtausvaihteluita. Tällöin on tärkeää, ettei piiriä viritetä liian nopeaksi. Nopea viritys saa ohjausvirtaukseen voimakkaita muutoksia, jolloin säiliö ei enää toteuta alkuperäistä tehtäväänsä eli tulohäiriöiden vaimentamista. Kannattaa aina varmistua siitä, että tulovirtauksien säätöpiirit ovat kunnossa. Rauhoittamalla niiden toimintaa helpottuu pinnankorkeuden säätimen tehtävä heti.

Lämpötila

Lämmitys voidaan toteuttaa monella tavalla, esim. suoralla höyrylämmityksellä (kuivausosa) tai suoralla ruiskutuksella aineeseen. Jäähdytys voidaan toteuttaa esim. ruiskuttamalla vettä (voimalaitoksissa). Monet lämpötilansäädöt ovat varsin tärkeitä, kuten prosessiuunien, höyrykattiloiden ja kemiallisten reaktoreiden lämpötilansäädöt. Lämpötilan säädöissä käytetään usein lämmönvaihdinta, jossa siirretään lämpöenergiaa väliaineesta toiseen. Lämmitettävä/jäähdytettävä aine on usein nestettä ja väliaineena käytetään yleisemmin höyry/nestevirtausta tai sähkövastuksia riippuen siitä halutaanko ainetta lämmittää vai jäähdyttää. Yleisimmin säätö tapahtuu mittaamalla lämmitettävän/jäähdytettävän aineen lämpötila vaihtimen poistoyhteen läheltä ja kuristamalla vaihtimeen menevää lämmitys/jäähdytysvirtausta (Kuva 1). Toinen tapa on säätää nesteen ohivirtausta (Kuva 2).



Kuva 1. Lämpötilan säätö lämmönvaihtimella höyryvirtausta säätämällä



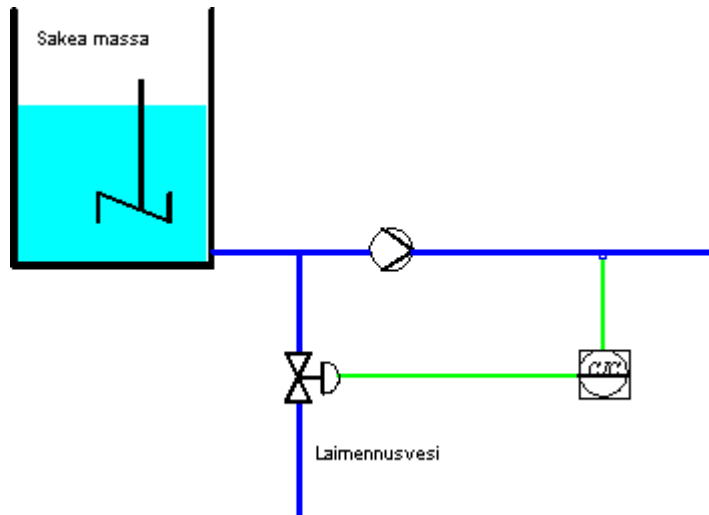
Kuva 2. Lämpötilan säätö lämmönvaihtimella nesteen ohivirtausta säätämällä

Lämmönvaihtimen dynamiikan kannalta tärkeimmät rakenteelliset tekijät ovat laitteeseen liittyvät lämmönsiirtokerroimet ja laitteen massa. Lämmönsiirtokerroin riippuu mm. aineiden virtausnopeuksista ja ominaislämpökapasiteetista sekä lämmönvaihtimen sisäpinnan muodoista. Kun lämmönvaihdin vanhenee ja kuluu, sen lämmönsiirtokerroin muuttuu. Lämmönvaihtimen säädössä prosessin hitaus ja viiveellisyys aiheuttavat yleensä ongelmia. Usein vaihtimessa on niin paljon lämmitettävää massaa, että kestää kauan ennen kuin aineen lämpötilanmuutokset näkyvät mittauksessa. Pelkällä takaisinkytketyllä PID-säädöllä on vaikea kompensoida pitkien viiveiden vaikutusta.

Sakeus

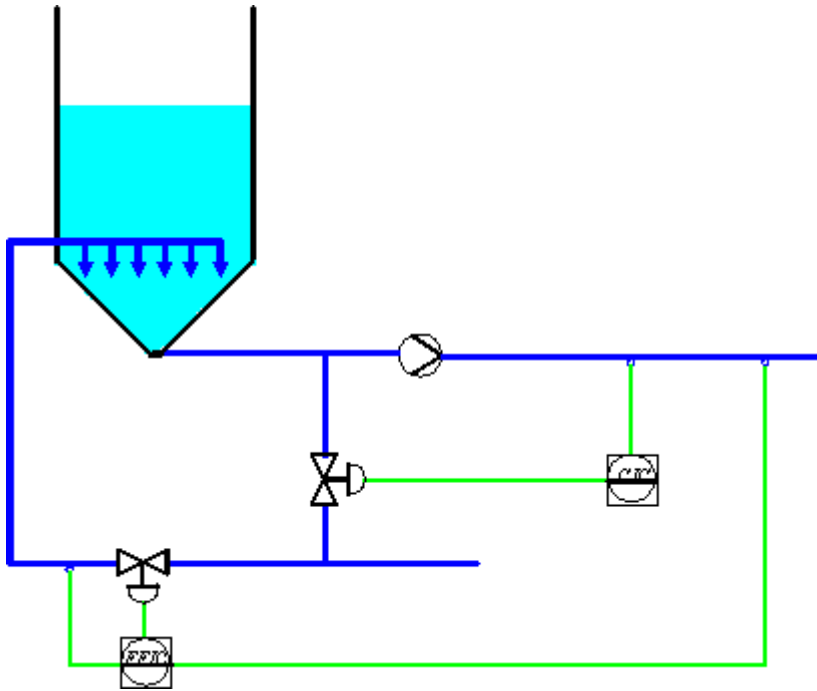
Sakeudella tarkoitetaan yleensä sellu- ja paperiteollisuudessa sellun kuitupitoisuutta, eli sakeus voidaan määritellä massasulpun kuiva-aineen painon prosenttiosuudeksi sulpun kokonaispainosta. Tässä yhteydessä tarkastellaan sakeussäätöä pelkkänä laimennuksena eli yksinkertaisena sekoitusprosessina (Kuva 1). Tässä esitetyt perusperiaatteet soveltuvat useisiin muihinkin samantyyppisiin sekoitusprosesseihin. Laimennettavan massan putkilinjaan tulee sekoituspumpun imupuolelle laimennusvesiyhde, jonka virtausta muutetaan pumpun poistopuolelle sijoitetun sakeusmittauksen perusteella. Ongelmia säädössä aiheuttaa se, että sulpun kulkuaikaviive sekoituksesta mittalaitteelle on yleensä melko pitkä. Tämä johtuu taas siitä, että sakeusanturia ei voida sijoittaa heti pumpun jälkeen vaan tietty välimatka vaaditaan virtauksen tasoittumiseksi. Lisäksi viive ja laimennuksen vahvistus riippuvat massan virtausnopeudesta. Laimennuksen vahvistus on kääntäen verrannollinen massan virtausnopeuteen.

Oletetaan että massalinjan virtaus on 10 l/s. Jos laimennuslinjaan tehdään litra/s muutos saadaan selville vahvistus laimennuksesta sakeuteen. Sen sijaan massalinjan virtauksen ollessa 100 l/s, ei enää yhden litran muutos laimennuslinjassa aiheutakaan kuin kymmenesosan muutoksen sakeuteen. Massalinjan virtauksen kymmenkertaistaminen siis pudottaa vahvistuksen kymmenenteenosaan. Jos säädin on viritetty nopeaksi suurilla virtauksilla ja samoja viritysparametrejä käytetään pienemmän virtauksen kanssa, niin kasvaneen viiveen ja vahvistuksen takia säätö voi alkaa värähdellä voimakkaasti. Säädin on siis viritettävä hitaimman halutun virtausnopeuden mukaan.



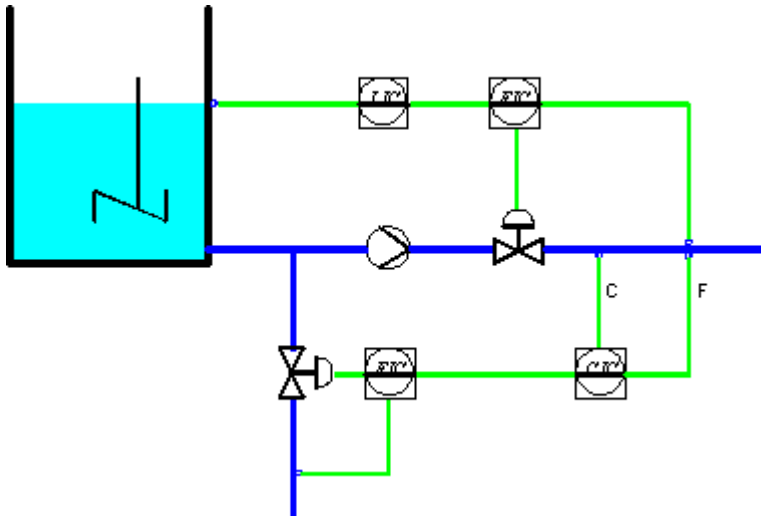
Kuva 1. Sakeussäätö

Sakeussäädöt ovat usein hyvin sekoitettujen säiliöiden jälkeen, jolloin tulosakeudessa ei ole kovin nopeaa vaihtelua. Toisin on säiliöissä, joissa käytetään erillistä esilaimennusta. Tämä esilaimennus toteutetaan usein erillisellä virtauksen suhdessä säätöpiirillä (Kuva 2).



Kuva 2. Sakeussäätöesimerkki, jossa pohjalaimennus aiheuttaa tulosakeuteen muutoksia

Laimennusveden paineessa tapahtuvat vaihtelut näkyvät suoraan sakeudessa. Tämän takia tulisi ensin virittää laimennusveden painesäätö, ja vasta sen jälkeen tarkastella sakeussäätöä. Näin yksi ulkopuolinen häiriölähte saadaan poistettua, tai sen vaikutusta ainakin pienennettyä. Sakeusmittaus on herkkä monien suureiden vaihteluille. Esimerkiksi pienillä sakeuksilla lämpötilan vaihtelu häiritsee mittausta merkittävästi. Virtausnopeus vaikuttaa eritoten lapa-anturin toimintaan, ja massan seassa oleva ilma saattaa vääristää tulosta. Lapa-anturi joudutaan usein sijoittamaan kauas pumpusta. Sakeussäätöön voidaan hyvin soveltaa joka kaskadi- tai myötäkitykentää, tai yhdistää molemmat ratkaisut (Kuva 3). Joissain tapauksissa massalinjan virtausmäärä riippuu säiliön pinnankorkeuden säätimestä (kaskadikitykentä).

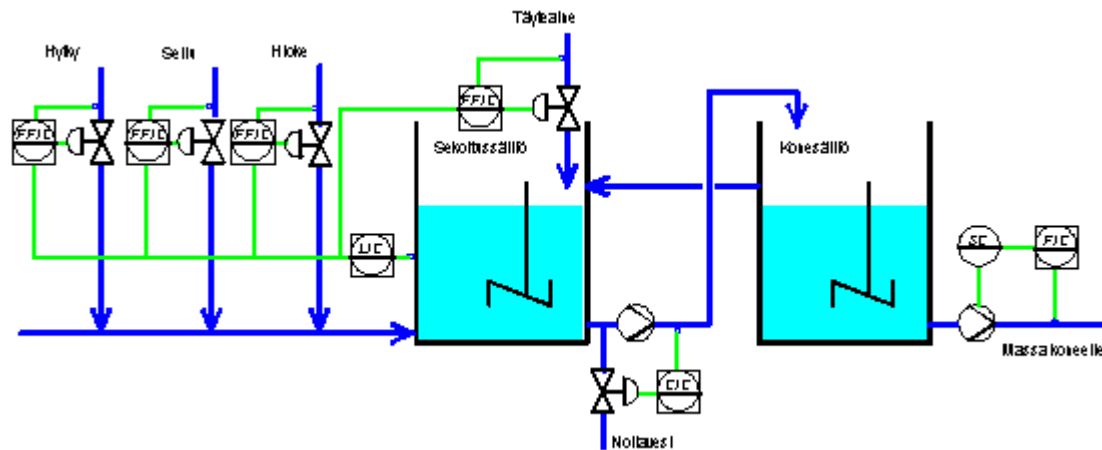


Kuva 3. Sakeussäätöratkaisu, jossa käytetään sekä kaskadikytkentää että myötäkytkentää. Lisäksi massan virtaussäätö saa asetusarvonsa säiliön pinnankorkeuden säätimeltä

Osaprosesseja

Sekoitus- ja konesäiliö

Sekoitus- ja konesäiliöesimerkki (Kuva 1) sisältää niin sakeudensäätopiirin laimennusvesiventtiilillä, neliömassan säädön kierrosnopeussäätöisellä pumpulla kuin esimerkin kaskadi- ja suhdessäädöstä. Sekoitus- ja konesäiliön välinen sakeudensäätö tapahtuu käyttämällä nollavettä laimennusvetenä. Nyt massan virtausnopeus pysyy samana koko ajan vakiovirtauksesta johtuen ja osa sakeussäädölle tyypillisistä ongelmista on saatu poistettua prosessiteknisin keinoin. Koneelle menevän massan neliöpainoa säädetään pumpun pyörimisnopeuden avulla. Sekoitussäiliön pinnankorkeutta säädetään tulevien massavirtausten avulla, eli kyseessä on kaskadikytkenä. Virtausten keskinäiset suhteet ovat tärkeitä, joten käytössä on myös suhdessäätö. Sekoitussäiliöön annostellaan massalinjoilta tuleva massa sakeussäädettynä ja oikeassa suhteessa. Eri massojen suhteet annetaan lajikohtaisesti. Sekoitussäiliön pinnansäätö toimii yläsäätönä kaskadikytkenässä, jolla se antaa asetusrvon sekoitussäiliöön tulevan virtauksen kokonaismäärälle. Suhdesäätimet on viritettävä aina samanaikaisesti, jotta sekoitussäiliöstä lähtevä massa pysyisi tasalaatuisena. Yleinen ohje siis on, että suhdessäätimet viritetään suorituskvyylyltään samantasoisiksi, jotta suhde säilyy samana kokonaisvirtauksen asetusrvosta huolimatta.



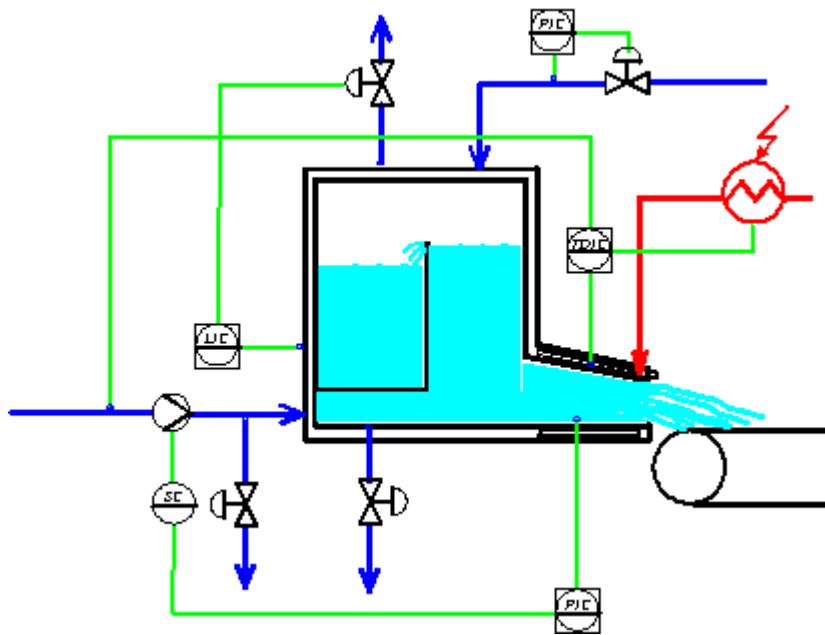
Kuva 1. Sekoitus- ja konesäiliön säätökytkentäesimerkit

Perälaatikko

Perälaatikon (Kuva 1) tehtävänä paperikoneessa on paperimassan tasainen ja oikeassa nopeudessa tapahtuva levittäminen viiralle. Perälaatikon vaimennusosalla pyritään eliminoimaan mahdollisia vaihteluita massan syötössä. Vaimennusosaan syötetään ilmaa instrumentti-ilmaverkosta paineenalentimen avulla. Vaimennusosalta poistetaan massaa ylijuksun avulla viirakaivoon. Ylijuksun määrä säädetään aseteltavan venttiilin mukaan. Perälaatikon pinta säädetään poistamalla ilmaa venttiilillä vaimennusosasta ylijuksun pinnan vaihteluiden mukaan. Syöttöilman paineessa tapahtuvat muutokset näkyvät heti myös pinnankorkeudessa, joten syöttöilman säätöpiiri kannattaa virittää ensimmäisenä.

Perälaatikossa olevan massan haluttu painetaso määräytyy viiran nopeudesta. Viiran nopeus määrää halutun massasuihkun nopeuden, josta seuraa tarvittava perälaatikon paineen asetusarvo. Perälaatikon painetta voidaan säätää peränsyöttöpumpun kierrosluvun avulla.

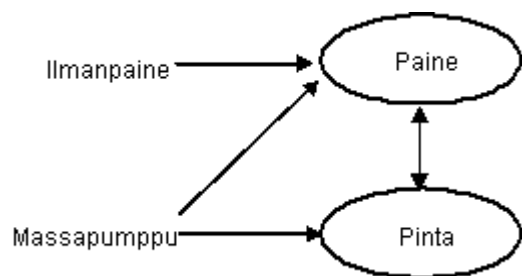
Perälaatikon lämpötila vakioidaan kierrättämällä ylä- ja alahuulikartiassa lämmitysvettä erillisellä pumpulla. Veden lämpötila säädetään sähkövastuksen avulla vastaamaan perälaatikkoon syötettävän massan lämpötilaa.



Kuva 1. Perälaatikon tärkeimmät säädöt

Massapumpulla tehtävä paineensäätö vaikuttaa niin pinnankorkeuteen kuin paineeseen. Poistoilman säätö vaikuttaa säiliön kokonaispaineen kautta

pinnankorkeuteen. Merkittävimmät vaikutussuhteen kahden ohjaussuureen ja kahden säädettävän suureen välille voidaan kuvata seuraavalla kuvalla (Kuva 2).



Kuva 2. Perälaatikon ohjaussuureiden vaikutus säädettäviin suureisiin

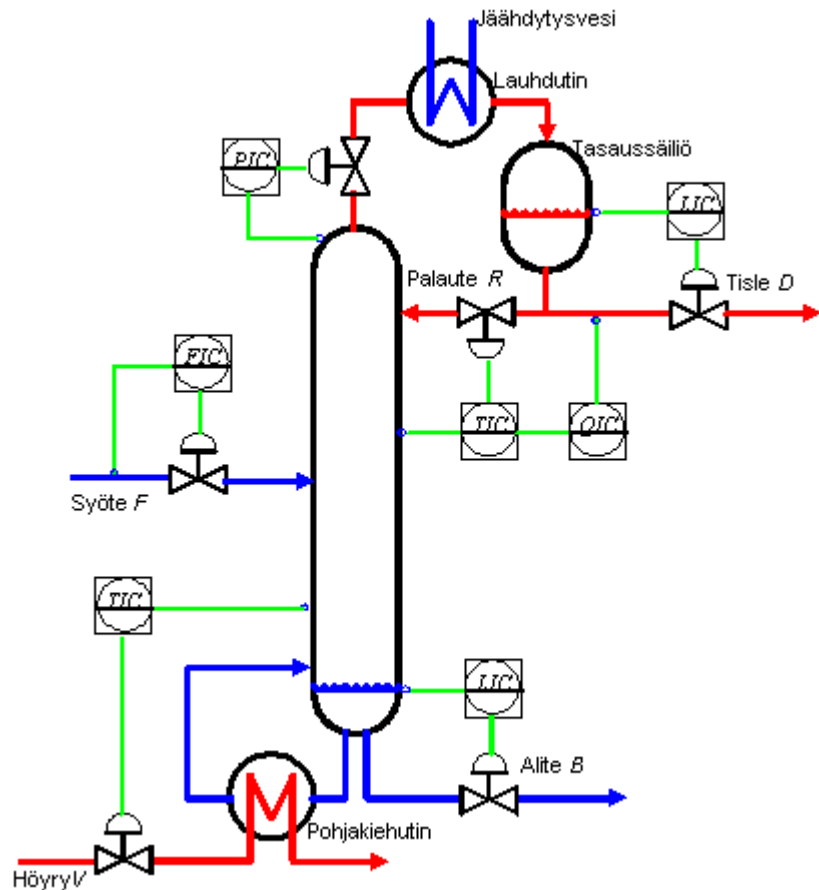
Perälaatikko on klassinen esimerkki, jossa kahdella ohjaussuureella on voimakkaita ristikkäisvaikutuksia. Nyt tavallaan nämä kaksi säädintä joutuvat taistelemaan toisiaan vastaan. Yksinkertaisimmillaan ongelma käsitellään niin, että tärkeämpi piiri (paine) viritetään halutuksi, ja toisen piirin annetaan heilua enemmän.

Tislaus

Tislaus on merkittävä osaprosessi kemianteollisuudessa ja öljynjalostuksessa. Kemiallisesta reaktorista saatava kemikaali ei ole aina täysin puhdasta, vaan sitä joudutaan puhdistamaan tislaamalla. Tislaus kuluttaa paljon energiaa, sillä jopa 40% kemianlaitoksen energiankulutuksesta saattaa mennä tislaukseen. Säädön parantamisella voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä energiankulutuksessa. Tislaus perustuu eri aineiden erilaisiin kiehumislämpötiloihin. Tislauskolonnissa eri tasoilta (eri lämpötilat) saadaan poistettua eri tuotteita, näin esim. öljynjalostuksessa.

Tislaus on tyypillinen monimuuttujaprosessi, jossa on useita tulo- ja lähtösuureita. Tyypillisesti tislauskolonnin säädössä on neljä säätöventtiiliä: pohjakiehuttimen höyryvirtaus V , tislevirtaus D , alitevirtaus B ja palautevirtaus R (Kuva 1). Näillä yritetään säätää neljää suuretta: lopputuotteen pitoisuutta, alitteen pitoisuutta, tasaussäiliön pinnankorkeutta ja kolonnin pohjan pinnankorkeutta. Esimerkissä säädetään lisäksi syötevirtausta F ja kolonnin painetta. Yksinkertaisemmassa säätöratkaisussa neljä ohjaussuuretta ja neljä säädettävää suuretta laitetaan pareiksi, jolloin yhdellä ohjaussuureella säädetään vain yhtä laatusuuretta. Ongelmia tässä säätötavassa aiheuttavat suureiden keskinäiset riippuvuussuhteet.

Tislauskolonnin lopputuotteen (tisleen) pitoisuuden arvioimiseksi on periaatteessa kaksi tapaa: suora pitoisuusmittaus tai epäsuora mittaus lämpötilan kautta. Suorassa pitoisuudenmittauksessa käytetään kromatografia-analysaattoria, jonka haittapuolena on pitkät viiveet ja näytteenottovälit. Lämpötilanturit ovat nopeita, mutta ne eivät aina anna yhtä luotettavaa arviota pitoisuudesta. Yleinen säätötapa on kaskadikytkentä (Kuva 1), jossa on yhdistetty lämpötilamittauksen nopeus ja pitoisuusmittauksen tarkkuus. Tässä kytkennässä pitoisuuden säätöpiiri (QIC) antaa asetusarvon lämpötilan säätöpiirille (TIC). Pitoisuuden säätöpiirin säätöväli on tyypillisesti useita minutteja tai tunteja, kun taas lämpötilan säätöväli on tyypillisesti muutamia sekunteja.



Kuva 1. Tislauskolonni

Lopputuotteen laatuun vaikuttavat palautevirtaus R ja pohjakiehuttimen höyryvirtaus V . Kolonnin huipun pitoisuuteen vaikuttaa erityisesti palautevirtaus, ja vastaavasti alitteen pitoisuuteen vaikuttaa pohjakiehuttimen höyryvirtaus. Näin on luonnollista valita alitteen pitoisuuden ohjaussuureksi höyryvirtaus ja huipun pitoisuuden ohjaussuureksi palautevirtaus. Valitettavasti molemmat ohjaussuureet vaikuttavat koko kolonnin toimintaan, joka rajoittaa säädön nopeutta. Tämä puolestaan edellyttää riittävän rauhallisia säätimien virityksiä. Mikäli jompikumpi komponenteista (tisla tai palaute) on huomattavasti arvokkaampaa kuin toinen, voidaan ainoastaan tämän komponentin pitoisuutta säätää, esimerkiksi säädetään ainoastaan palautevirtauksella huipun pitoisuutta ja annetaan pohjakiehuttimelle manuaalinen höyryvirtaus.

Muita säätöratkaisuja on useita, esimerkiksi tasaussäiliön pinnankorkeutta voidaan säätää palautevirtauksella tai pohjan pitoisuutta voidaan säätää alitevirtauksella. Edellä olleessa kuvassa on nähtävillä vain yksi esimerkki.

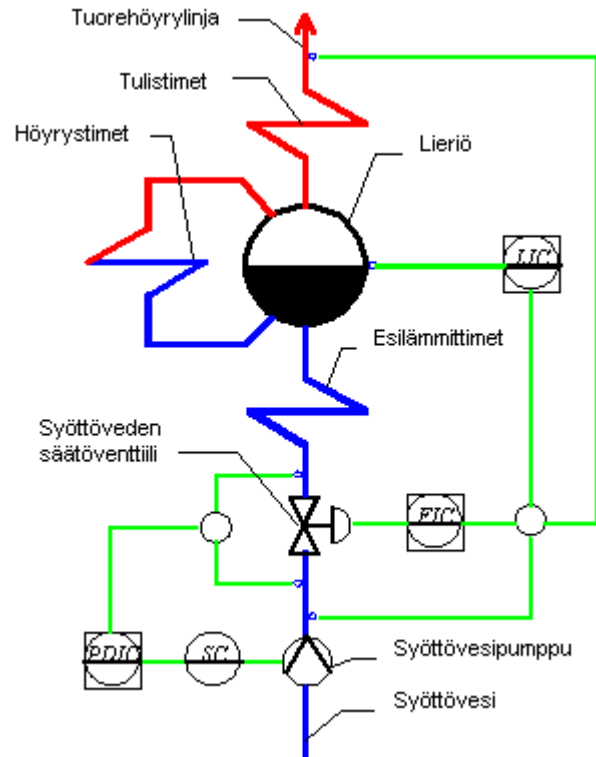
Syöttöveden säätö

Lieriökattilan eräänä pääsäätönä on kattilaan syötetyn veden säätö. Tämän tarkoituksena on varmistaa, että kattilassa on aina vettä ja että sitä syötetään höyrynkulutuksen tarpeen mukaan. Lieriökattiloiden syöttöveden säädön tavoitteena on pitää lieriön pinnankorkeus sovitussa rajoissa. Jos pinnankorkeus laskee liian alas, seurauksena on lieriön kuivuminen. Jos taas pinnankorkeus on liian korkea, seurauksena voi olla veden joutuminen tulistimiin. Lisäksi pinnankorkeuden ylärajalukitus pysäyttää syöttövesipumpun, jottei vesi pääse tulistimiin. Syöttöveden säätö yksinomaan pinnankorkeuden mukaan ei kuitenkaan ole näin yksinkertaista. Jos esimerkiksi höyrynkulutus kasvaa äkillisesti, höyryn paine laskee, jonka seurauksena osa vedestä höyrystyy lieriössä ja höyrykuplien osuus kasvaa, joka taas näkyy lieriön pinnankorkeuden kasvuna. Jos syöttöveden määrä säädettäisiin suoraan pinnankorkeuden mukaan, säätö toimisi väärään suuntaan em. tilanteessa. Samankaltainen tilanne päinvastaiseen suuntaan syntyy, kun kattilaan syötetään kylmempää vettä, joka jäähdyttää kattilavettä. Nyt kylmän veden suuremmasta tiheydestä johtuen lieriön pinnankorkeus laskisi. Tässäkin tilanteessa säätö toimisi väärään suuntaan, jos se perustuisi yksinomaan pelkkään pinnankorkeuden mittaukseen. Syöttöveden säädön ongelmat johtuvat kattilan kuorman ja höyrystyksen muutoksista.

Edellämainittujen ongelmien johdosta syöttöveden säätö toteutetaan useinmiten ns. *kolmipistekaskadisäätönä*. Eri säätötavat soveltuvat erikokoisille kattiloille tai säätötapa voidaan valita syöttövesivirtauksen määrän mukaisesti. Syöttöveden säätöön käytetään eri toimintapisteissä seuraavia säätötapoja:

1. *Yksipistesäädössä* ainoastaan lieriön pinnankorkeus mitataan ja pinnankorkeudensäädin ohjaa suoraan syöttövesiventtiiliä. Säädön hyvyydelle ei voida antaa suuriakaan vaatimuksia ja tämä säätötapa on tarkoituksenmukaista vain pienille kattiloille tai kun syöttövesivirtaus on pieni sekä kattilan ylösajotilanteissa.
2. Syöttövesivirtauksen kasvaessa pinnankorkeuden säätimen ohjaus menee kaskadikytkennän alasäätimen (= syöttövesivirtaussäädin) asetusarvoksi, eli lieriön pinnankorkeuden lisäksi käytetään myös syöttövesimäärän mittausta. Tätä säätötapaa kutsutaan *kaksipistesäädöksi*, joka kytkeytyy päälle syöttövesivirtauksen määrän kasvaessa.
3. Kun höyrymäärä edelleen kasvaa, kytkeytyy päälle *kolmipistesäätö*, jossa on mukana myös lieriöstä lähtevä höyryvirtaus. Tässä säätötavassa höyrynkulutus ohjaa suoraan syöttövesivirtausta lieriöön. Höyrymäärän mittauksen lisäksi voidaan laskea polttoainemäärän mukaan teoreettinen höyrymäärä ja verrata laskennallista ja mitattua höyrymäärää. Tätä käytetään esim. häiriötilanteissa, jotta säätö ei ajaisi vesivirtausta nolleen vaan se ottaa huomioon kattilan tehoa vastaavan vesimäärän.

Kolmipistesäädössä (Kuva 1) on kaksi viritettävää PI-säädintä. Virtaussäädin tulee viritellä suhteellisen nopeaksi, jotta höyryvirtauksen ja syöttövesivirtauksen välinen poikkeama saadaan nolllaksi. Pinnankorkeuden säädin tulee viritellä siten, että lieriön pinnankorkeuden nopeat muutokset eivät vaikuta itse syöttöveden säätöön. Pinnankorkeuden säätimen tulee kuitenkin huolehtia siitä, että hitaammat pinnankorkeuden vaihtelut korjaantuvat pysyvyystilassa.



Kuva 1. Lieriökattilan syöttöveden kolmipistesäätö

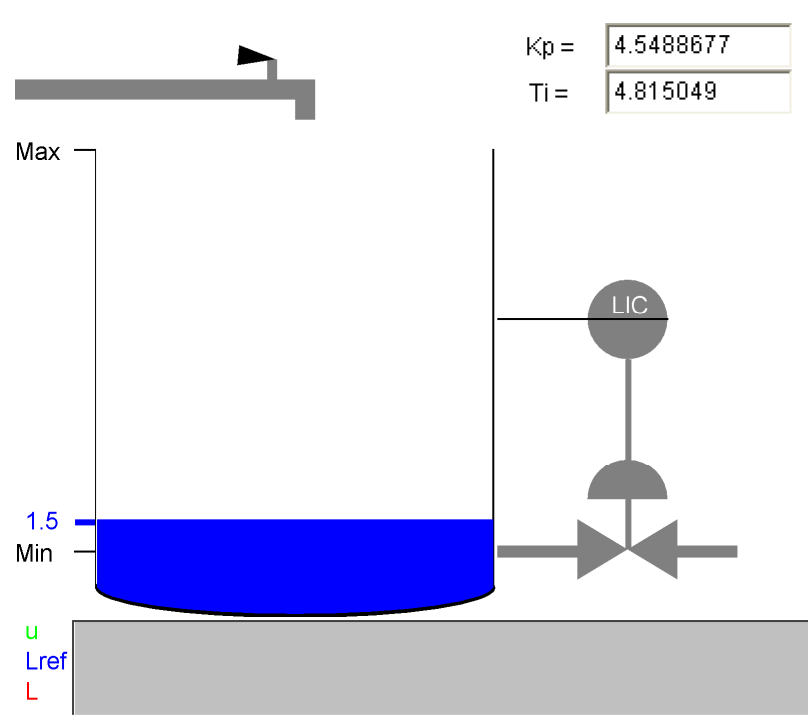
Syöttöveden säätö venttiilillä on nopeaa mutta epätaloudellista. Yleensä käytössä on yhdistetty säätö, jossa vesimäärä säädetään venttiilillä ja painehäviö venttiilin yli säädetään pumpun pyörimisnopeuden mukaan, joka on energiataloudellinen mutta hidas säätötapa. Näin saavutetaan kohtuulliset häviöt ja riittävän nopea säätö. Tavoitteena on syöttövesipumpun säädöllä saada tilanne, jossa syöttövesiventtiili on lähes auki. Lieriön pinnankorkeuden mittaaminen on yksikäsitteinen suure säätöä ajatellen, mutta sen mittaaminen on ongelmallisempaa. Tämä johtuu siitä, että lieriössä oleva vesi on kiehumispisteessä olevan veden ja höyrykuplien seos.

Tehtävä

Seuraavankaltainen varastosäiliö on tyypillinen teollisuusprosessi. Se on myös tyypillinen esimerkki epälineaarista prosessista.

Voit muuttaa tulovirtauksen suuruutta, pinnankorkeuden asetusarvoa ja säätimen viritysparejrejä.

Kokeile kuinka vaikeaa on virittää em. säätin yritys-erehdys -menetelmällä.

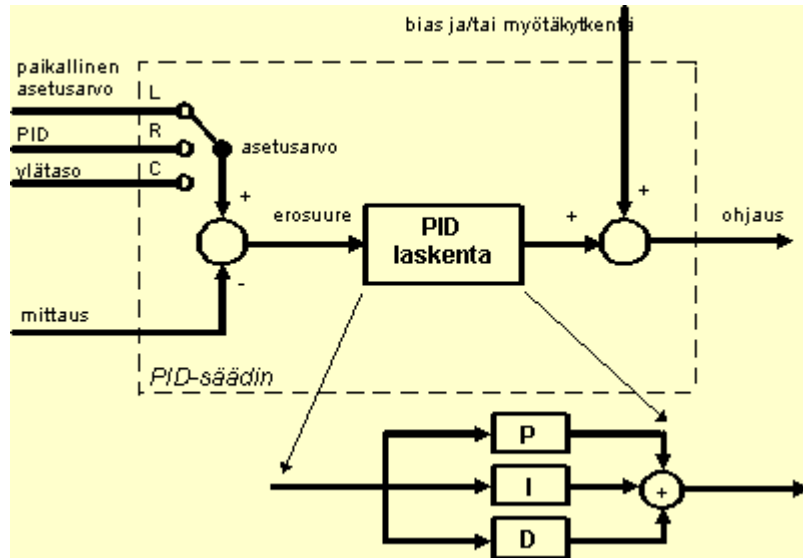


PID-säätimen toiminta ja rakenne

PID-säätimen toiminnan periaatteet

PID-säätimen toiminnan periaatteet

Teollisuudessa yleisimmin käytetty säädin on rakenteeltaan PID-säädin (Proportional-Integral-Derivative). Vaikka säädin on rakenteeltaan yksinkertainen, se toimii hyvin myös piireissä, joissa vaikuttaa useita häiriö- ja epävarmuustekijöitä. Sen virittämisen peruseriaatteet ovat melko tunnetut. PID-säätimestä voidaan käyttää useita eri yhdistelmiä kuten P-, PI- ja PD-säätimiä. PID-säätimestä yleisimmin käytetty säädinrakenne onkin PI-säädin, jolla pystytään hallitsemaan tyypillisimmät teollisuusprosessit.



Kuva 1. PID-säätimen signaalit ja periaatteellinen rakenne

PID-säädin laskee ohjauksen kolmen eri osan summasta (Kuva 1), kun säätimen tulona on eroosuure (= asetusarvo - mitaus). Toimilaitteelle menevään signaaliin (= ohjaus) summataan tarvittaessa myötäkkykentä tai bias-termi (= nollasta eroava vakiotaso). Säätimen ohjaus koostuu siis seuraavista osista,

- P-osa, suhdetermi
- I-osa, integroiva termi
- D-osa, derivoiva termi.

PID-säätimen asetusarvo voidaan valita seuraavasti:

- L = Local, paikallisen asetusarvon valinta

- R = Remote, kaskadisäätimen valinta
- C = Computer, ylemmän tason säätimen valinta.

Näistä paikallinen (*Local*) asetusarvo on käyttäjän antama paikallinen vakioasetusarvo, kun taas *Remote* ja *Computer* asennot ovat muuttuvia asetusarvoja, jotka tulevat jonkun ylemmän tason säätimen ohjauksesta. Tämä tarkoittaa siis säätimen kaskadikytkentää. Näistä Remote on järjestelmän sisäinen muuttuva asetusarvo, kun taas Computer on järjestelmän ulkopuolisen tietokoneen tms. laskema asetusarvo.

P-säätö

P-säädössä jatkuva-aikainen ohjaussignaalin arvo $u(t)$ riippuu suoraan erosuureen arvosta $e(t)$

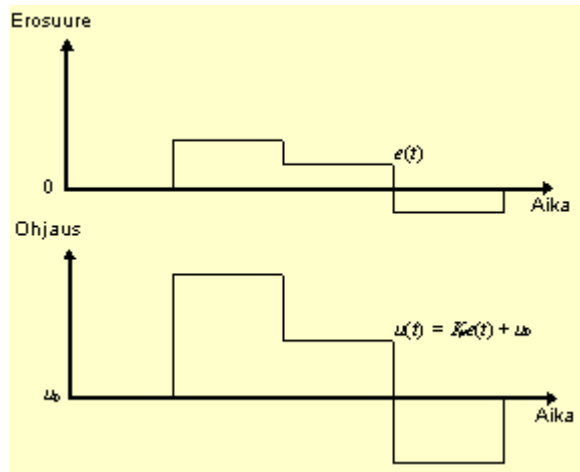
$$u(t) = K_p e(t) + u_0$$

missä K_p on säätimen vahvistus ja u_0 on ohjaussignaalin vakiotaso kun $e(t) = 0$. Ohjaussignaalin vakiotaso asetetaan sellaiseksi, että halutussa toimintapisteessä ei esiinny säätövirhettä. Matemaattisena esityksenä kyseessä on siis pelkkä kerto- ja yhteenlasku. Jos säätöpoikkeama (= erosuure) on nolla, on myöskin säätimen lähtö sama kuin u_0 (usein nolla). Damatic XD-järjestelmässä *bias* parametri tarkoittaa juuri samaa kuin u_0 . P-säädin tyypillisesti jättää säädettävään systeemiin asentovirhettä (ja nopeusvirhettä) eli asetusarvo mittausta 0. Jos vakiotaso u_0 valitaan nimenomaan tyypillistä toimintapistettä vastaavaksi, niin asentovirhe jää silloin melko pieneksi. Tarkastellaan seuraavaksi stabiilia prosessia ja pelkkää P-säätöä, missä säädin on siis pelkkä vahvistus K_p ja G kuvaa prosessia. Nyt ohjaus $U = K_p E$ ja säädettävä suure on $Y = GU = GK_p E$. Erosuure voidaan laskea $E = R - Y = R - GK_p E$ josta saadaan yhtälö $E + GK_p E = R$ eli $E(1 + GK_p) = R$. Nyt saadaan suhde

$$\frac{E}{R} = \frac{1}{1 + GK_p} \neq 0$$

vaikka säätimen vahvistus K_p olisi kuinka suuri. Erosuure lähestyy nollaa säätimen vahvistuksen kasvaessa kohti ääretöntä, mutta nollaa se ei saavuta koskaan. Käytännössä vastaan tulee säätimen vahvistuksen yläraja jo paljon aikaisemmin.

Tarkastellaan esimerkkiä missä erosuureeseen tulee muutoksia ja oletetaan tilanne, missä säädettävä suure ei reagoi ohjaukseen. Nyt siis syystä tai toisesta ei ole käytössä takaisinkytkentää. Tätä voidaan pitää testitapauksena, jolla tutkitaan kuinka käytetty säädin yrittää ohjata prosessia. Vaikka käytännössä erosuure ei olekaan vakio, voidaan säätimen eri osien toiminta ymmärtää helposti tämän esimerkin avulla. Säätimen lähtö eli ohjaus on askel, jonka koko on erosuureen askel kerrottuna vahvistuksella K_p (Kuva 1). P-säätimessä ohjaussuure pysyy vakiona jos erosuure ei muutu. Tästä havaitaan taipumus pysyvään virheeseen; P-osa tekee sen minkä se pystyy. Toimilaitteen asento riippuu erosuureesta, joka on nolla vain tietyllä toimilaitteen asennolla. Jos virhettä edelleen jää, pelkkä P-säädin ei pysty siihen enää reagoimaan.

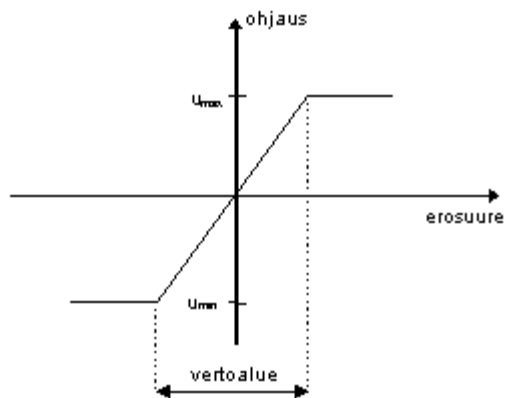


Kuva 1. P-osa

Joissakin säätimissä (lähinnä amerikkalaisissa) käytetään vahvistuksen sijasta *vertoaluetta* (Proportional Band)

$$PB = \frac{100}{K_p} [\%]$$

Vertoalueen suuruus riippuu kääntäen verrannollisesti säätimen P-osan vahvistuksesta. Mitä suurempi vahvistus on, sitä suurempi on kulmakerroin eroosuureen ja ohjauksen välisessä suhteessa ja samalla vertoalue on pienempi (Kuva 2). Vahvistuksen arvo $K_p = 1$ vastaa siis vertoaluetta 100% (Taulukko 1).



Kuva 2. Vertoalue

<i>Vertoalue PB</i>	<i>Vahvistus K_p</i>
1 %	100
10 %	10
50 %	2
100 %	1
500 %	0,2
1000 %	0,1

Taulukko 1. Esimerkkejä vertoalueen ja vahvistuksen välisestä riippuvuudesta

Säätimen vahvistuksen etumerkillä voidaan määrätä myös toimisuunta. Näin tehdään esimerkiksi Alcont järjestelmässä. Säätimen toimisuunta on suora, jos erosuureen kasvaessa säätimen ohjaus kasvaa ($K_p > 0$). Toimisuunta on käänteinen, jos erosuureen kasvaessa säätimen ohjaus pienenee ($K_p < 0$).

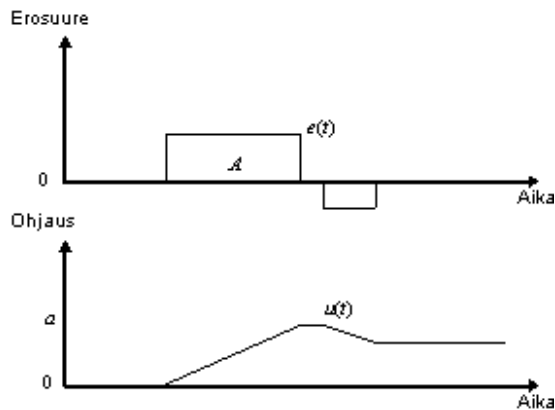
Toimisuunta valitaan useissa automaatiojärjestelmissä omalla parametrillään (esim. Damatic XD *condir*), ja säätimen vahvistus K_p on aina positiivinen.

Integroiva säätö

Integroivaa säätöä käytetään usein yhdessä P-säädön kanssa. I-osan ansiosta tyypillinen P-säädön asentovirhe jää pois. PI-säätimen ohjaussignaali on

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right)$$

missä T_i on integrointiaika sekunneissa. Pelkkään P-säätöön verrattuna säätimen signaalin vakiotaso u_0 on nyt korvattu ajan funktiona muuttuvalla erosuureen integraalilausekeella. Integraalilauseke voidaan mieltää vanhojen erosuureiden summaan verrannolliseksi. Säätimen lähtö muuttuu niin kauan kuin säätöpoikkeama ei ole nolla. Säätimen lähtöön vaikuttaa siis säätöpoikkeaman suuruus ja säätöpoikkeaman vaikutusaika. Matemaattisesti integrointi tarkoittaa pinta-alan laskemista, eli ohjaustaso a on riippuvainen pinta-alasta A (Kuva 1). PI-säädin on monien hyvien ominaisuuksiensa vuoksi yleisimmin käytetty säädintyyppi.



Kuva 1. I-osa

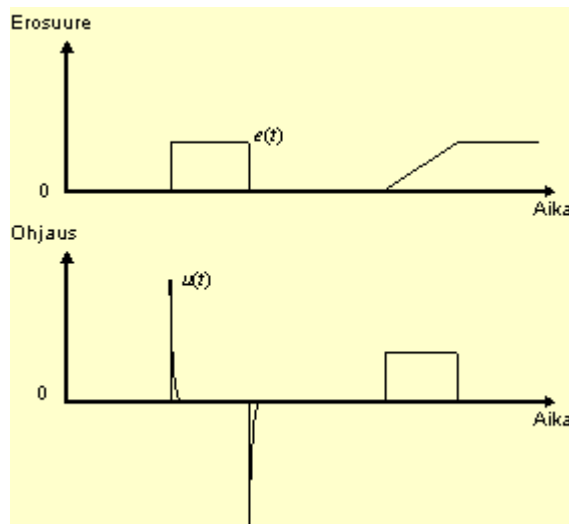
Tarkastellaan edellä olevaa kuvaajaa (Kuva 1), jossa on I-osan vaikutus säätimen lähtöön samanlaisessa tilanteessa kuin äsken P-termin yhteydessä. Kun erosuureeseen tulee ensimmäinen askelmainen muutos, säätimen lähtö kasvaa aluksi melkein suoraviivaisesti ja kulmakerroin riippuu integrointitermin vahvistuksesta K_p/T_i . Kun erosuure menee nolleen, jää säätimen ohjaus vakioksi. Säätimen lähtö voi pienentyä vain kun erosuure on negatiivinen. Erosuure vaihtaa merkkiään vain kun säädettävä suure leikkaa asetusravon. Kuvassa erosuure on suuruudeltaan pienempi negatiiviseen suuntaan, joten myös säätimen ohjaus pienenee hitaammin kuin kasvaa. Kun lopuksi erosuure jää nolleen, jää säätimen ohjaukseen perustaso (ns. bias). Näin integrointitermi automaattisesti hakee ohjauksen perustason, jolla pysyvää virhettä erosuureeseen ei jää. Tämä vastaa P-säädön vakiotasoa u_0 . Niin kauan kuin erosuureta esiintyy, I-osa kasvattaa/pienentää ohjausta, jotta säätöpoikkeamasta päästään eroon.

Derivoiva säätö

Derivoivaa säätöä käytetään yhdessä P-säädön (PD-säädin) tai integroivan säädön (PID-säädin) kanssa. Ideaalisessa PID-säädössä ohjaussignaali on

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

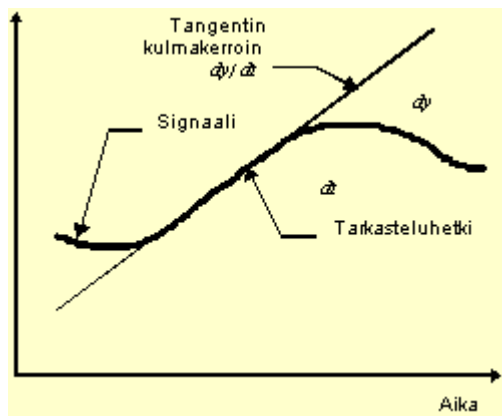
missä T_d on derivointiaika sekunneissa. Derivaatta (d/dt) kuvaa suuren muutosnopeutta. Kun $de(t)/dt$ on nolla, muutoksia ei tapahdu ja D-signaali on siis vakio. Usein erosuuren muuttumisnopeuden (= derivaatan) $de(t)/dt$ sijasta käytetään mittaussuuren muuttumisnopeutta $dy(t)/dt$, jolloin säädin ei reagoi D-osan kautta suoraan asetusarvon muutoksiin. Säädin on toisin sanoen suunniteltu tällöin vain kuormitushäiriöiden kompensointiin. Näin on Damatic XD-järjestelmässä aina, mutta Alcont 3000 järjestelmässä voidaan valita kumpaa tapaa käytetään (parametri *dmo*).



Kuva 1. D-osa

D-osa reagoi erosuuren muutosnopeuteen. Jos muutosnopeus on nolla, on D-osan lähtökin nolla (Kuva 1). Askeleen muutoshetkellä säätimen lähdössä näkyy piikki. Itseasiassa em. ideaalisen D-osan ohjauksena tulisi olla äärettömän korkea ja kapea piikki, mutta piirtämisiongelmiensä vuoksi piikki kuvassa on rajoitettu. Käytännössä ohjaussignaalit ovat aina rajoitettuja. D-säädöstä käytetään nimitystä ennakoiva säätö, koska säätimen lähtö muuttuu enemmän kuin pelkkä säätöpoikkeaman suuruus edellyttäisi. Matemaattisesti derivaatta tarkoittaa sitä, että käyrään sovitetaan suora (= tangentti), joka

sivuaa käyrää tarkastelupisteessä. Derivaatan avulla "kuvitellaan", että järjestelmä jatkaa käyttäytymistään tulevaisuudessakin samaan suuntaan kuin se tarkasteluhetkellä oli menossa. Jos tarkastellaan vain erittäin lyhyitä ajanjaksoja eteenpäin, ajatus tuntuu toimivalta (Kuva 2). Käytännön toteutus automaatiojärjestelmissä eroaa kuitenkin hieman edellä kuvatusta peruseriaatteesta.



Kuva 2. Derivaatan laskeminen signaalista

Viritysparametrien merkitys

Vahvistus

Vahvistuskerroin K_p on suhdekerroin säätimen ohjauksen ja erosuureen välillä. Vahvistus näkyy erosuureen askelmuutoksessa säätimen ohjauksen perustason arvona. Vahvistusta kasvattamalla nopeutetaan järjestelmän käyttäytymistä. P-säädin tuntee siis erosuureen suuruuden ja etumerkin.

Integrointiaika

Integrointiosa käyttää ohjaukseen järjestelmän historiatietoja, siis erosuureen vanhoja arvoja. Sen päätarkoituksena on poistaa jatkuvuustilan virhe, sillä pienikin erosuureen arvo kasvattaa integrointiosan ansiosta säätimen lähtöä. Integrointiaika T_i on aika, jossa I-osa saa aikaan samansuuruisen muutoksen ohjaussuureeseen kuin P-osa askelmaisessa erosuureen muutoksessa. Mitä suurempi integrointiaika, sitä pienempi I-osan vaikutus on. Pieni integrointiaika aiheuttaa suuren ohjauksen kasvunopeuden. Koska integrointiaika on kaavassa muotoa $1/T_i$, havaitaan että laittamalla T_i äärettömän suureksi sen vaikutus katoaa ja PI-säädin alkaa muistuttaa P-säädintä. PI-säädin tuntee siis erosuureen suuruuden, etumerkin ja kestoajan.

Derivointiaika

D-osa muodostaa ohjauksen erosuureen tai tarkasteltavan säädettävän suureen muutosnopeuden pohjalta. Muutosnopeutta voidaan pitää ennustuksena järjestelmän käyttäytymisestä tulevaisuudessa. Prosessin dynamiikasta johtuen ohjauksen muutokset havaitaan järjestelmän lähdössä vasta pienen ajan kuluttua. Suljetun piirin suorituskyvyn ja vaimennuskyvyn parantamiseksi em. voidaan kompensoida käyttämällä ennustamista. Mitä suurempaa derivointiaikaa käytetään, sitä voimakkaampi D-osan vaikutus on. Mikäli prosessissa on viivettä, täytyy derivaattaan suhtautua varovaisesti.

Haittapuolena on se, että D-osa korostaa korkeita taajuuksia, siis esim. mittauskohinaa. Tämän vuoksi tarvitaan joko signaalien suodatusta tai derivaatan laskemista hieman eri tavalla. Tämän takia derivoiva säätö on harvemmin käytössä prosessiteollisuudessa, jossa mittaussignaalit ovat aina kohinaisia. Mekaanisten järjestelmien yhteydessä D-osan käyttö onkin jo yleisempää, osaltaan johtuen lyhyistä signaalien siirtoteistä. PID-säädin reagoi erosuureen suuruuteen, etumerkkiin, kesto aikaan ja muutosnopeuteen.

Derivoinnin suodatus

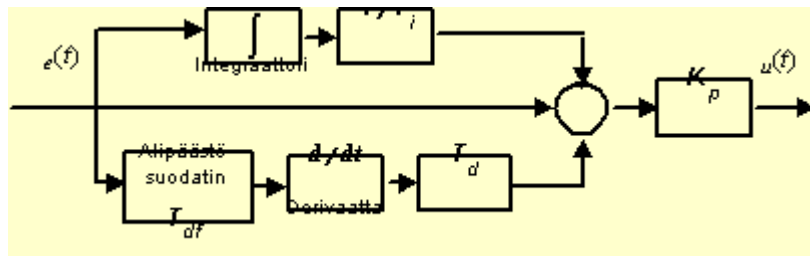
Käytännössä päästään harvoin suoraan hyödyntämään signaalin todellista derivaattaa (joissain tapauksissa se voi olla suoraan fysikaalisesti mitattavissa, esimerkiksi servosäädössä asennon derivaatta eli nopeus voidaan mitata takometrillä). Sen vuoksi derivaatta joudutaan määrittämään likimääräisesti. Eräs yleisesti käytössä oleva tapa toteuttaa realistisempi derivointi on liittää derivoinnin yhteyteen nopea alipäästösuodatus, jonka aikavakio on T_d/N , missä N on tyypillisesti teollisuussovelluksissa välillä 3 ... 20. Monissa järjestelmissä, esim. Damatic XD ja Alcont 3000, derivoinnin suodatus määritellään pelkän aikavakiotermin $T_{df}(= T_d/N)$ avulla. Suodatuskerroin N määrää derivointiosan maksimivahvistuksen. Mitä suurempi suodatusaikavakio on, sitä enemmän derivoinnin vaikutus pienenee eli sama vaikutus jaetaan pidemmälle ajalle. On huomattava, että virittämisen kannalta sekä derivointi että sen suodatus tulisi käsitellä aina yhdessä. Näin tavallisessa PID-säätimessä onkin neljä viritettävää parametriä. Nyt ohjaussignaali PID-säädössä on

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + D \right),$$

missä D :tä kuvaa yhtälö

$$D = T_d \frac{de(t)}{dt} - T_{df} \frac{dD}{dt}$$

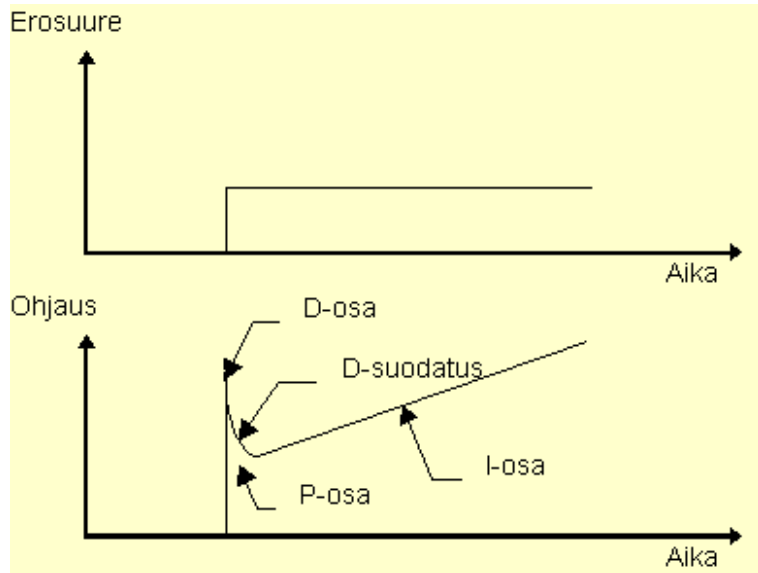
oheisen rakennekuvan mukaisesti (Kuva 1).



Kuva 1. P-, I- ja D-osa sekä derivointiosan suodatus alipäästösuodattimella, jonka aikavakio on T_{df}

Viritysparametrien yhteisvaikutus säätimen lähtöön

Yhdistämällä eri tekijät samaan kuvaajaan (Kuva 1), voidaan tarkastella kuinka PID-säädin ohjaa prosessia. Tilanne on sama kuin aikaisemmissa kuvaajissa, tässä testitilanteessa tarkastellaan siis kuinka säädin reagoi erosuureen askelmaiseen muutokseen, kun takaisinkytkentä ei ole käytössä. Kun erosuure muuttuu, D-osa reagoi tavalla, joka näkyy ohjauksessa piikkinä. Derivoinnin suodatuksella jaetaan derivaatan vaikutusaika pidemmälle välille, joka kuvaajassa näkyy piikin vaimenemisena. P-osa antaa ohjauksen perustason, ja I-osa kasvattaa lähtöä niin kauan kuin erosuureta on.



Kuva 1. PID-säädin

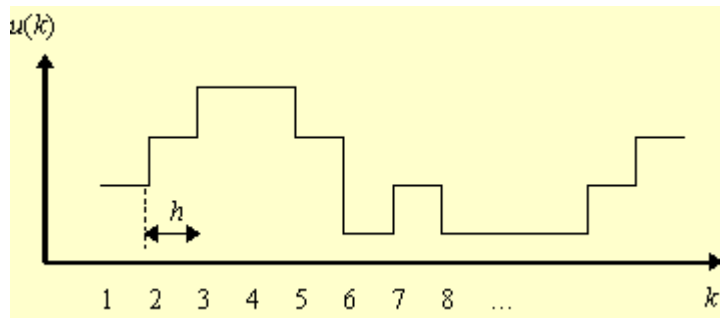
PID-säätimen kolmen eri osan edut ja haitat on koottuna seuraavassa taulukossa (Taulukko 1). Käytännössä PI-säätimessä I-osaa käytetään juuri varmistamaan, ettei pysyvää säätövirhettä jää.

	<i>P-osa</i>	<i>I-osa</i>	<i>D-osa</i>
<i>Tavoite</i>	Poistaa virhe	Poistaa pysyvä virhe	Nopeuttaa vastetta
<i>Haitta</i>	Pysyvä virhe	Ylitys, hidas vaste	Herkkyys kohinalle

Taulukko 1. P, I ja D osien tarkoitus ja haittavaikutukset

Tietokonesäätö

Nykyaikaiset säätimet toteutetaan mikroprosessipohjaisilla ratkaisuilla. Tietokonepohjaisella säädöllä saavutetaan monia etuja. Olemassaolevan säätöalgoritmin muokkaaminen on suhteellisen helppoa ja kustannuksiltaan kohtuullista eikä toteutettavan laskennan monimutkaisuudelle ole rajoja. Mikroprosessorissa tietojenkäsittely perustuu peräkkäisiin toimintoihin, joten laskentaan kuluu aikaa. Nyt uusia signaaleja voidaan ottaa vastaan vain tietyin aikavälein. *Digitaalinen* (diskreettiaikainen) PID-säädin vastaa ominaisuuksiltaan em. analogista, aikajatkuvaa PID-säädintä. Kun toteutustekniikka otetaan huomioon, niin olennaisena lisäpiirteenä on säädön viritykseen vaikuttava uusi parametri, *säätöväli*. Säätövälillä (h) ajan digitaalinen säädin pitää lähtöarvonsa vakiona (Kuva 1). Koko laskenta perustuu *näytteisiin*, joten säätimet toimivat digitaalisena. Säätimen ohjaus on porrasmainen, siis $u(t) = u(kh)$, $kh < t < kh + h$ missä h on säätöväli ja $k = 0, 1, 2, \dots$, eli ohjaus pidetään vakiona koko säätövälillä. Tätä kutsutaan nollannen kertaluvun pitopiiriksi (ZOH, Zero Order Hold).



Kuva 1. Säätimen lähtö on digitaalinen lukujono, josta nollannen kertaluvun pitopiiri muodostaa paloittain vakion signaalin

Digitaalisen säätimen virityksessä pätee yleensä kaikki samat virityssäännöt kuin analogiasäätimenkin. Näin on erityisesti silloin kun säätöväli on melko lyhyt verrattuna säädettävän järjestelmän nopeuteen. Säätimen parametrien valinnassa joudutaan huomattavasti vaikeampaan tilanteeseen, jos säädössä ei ole mahdollista käyttää riittävän lyhyttä säätöväliä. Enää parametreja ei voi valita pelkän jatkuva-aikaisen mallin perusteella vaan järjestelmää täytyy analysoida tarkemmin. Automaatiojärjestelmissä käyttäjä antaa aikajatkuvat parametrit, ja säädin käyttää laskennassaan säätövälillä mukaan skaalattuja arvoja.

Laskentakaavat

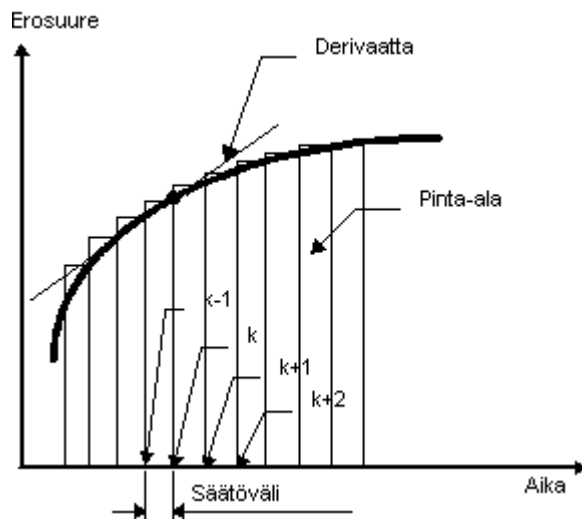
Digitaalisen säätimen toteutuksen takia säädin suorittaa uuden ohjaustoimenpiteen tietyn ajan välein, jota kutsutaan säätöväliksi. Näin järjestelmän käyttäytymistä ei tunneta kuin pisteittäin ja aikaisemmat tarkastelut eivät enää kelpaa. Nyt täytyy tutkia säätimen todellista sisäistä toimintaa ja puhutaan diskreeteistä (digitaalitekniikalla toteutetuista) säätimistä. Edellä käsitellyt aikajatkuvat säätimet voidaan kuitenkin muuttaa tähän digitaaliseen muotoon. Käsitellään seuraavaksi erästä tällaista muunnosta. Aikaisemmin esitettyä jatkuva-aikaista integrointitermiä kuvataan diskreettiaikaisena

Toteutustavat ja rakenteet

suorakaiteiden summana, jossa jokaisen yksittäisen suorakaiteen kanta on säätöväli ja korkeus on suuren loppupiste kyseisen näytteen hetkellä (Kuva 2). Mitä pienempi säätöväli on, sitä tarkemmin suorakaiteiden pinta-alojen summa vastaa todellista pinta-alaa. Pinta-alaa kuvaa nyt termi

$$\sum_{n=1}^k h \cdot e(n)$$

missä merkintä tarkoittaa summaa suorakaiteiden pinta-alasta (kanta h kertaa korkeus $e(n)$). Menetelmiä säätimen muuttamiseksi digitaaliseen muotoon on muitakin, esimerkiksi suorakaiteiden sijasta voidaan summata puolisuunnikkaita, jolloin virhe pienenee.



Kuva 2. Esimerkki pinta-alan ja derivaatan laskemisesta näytteenottoon perustuen

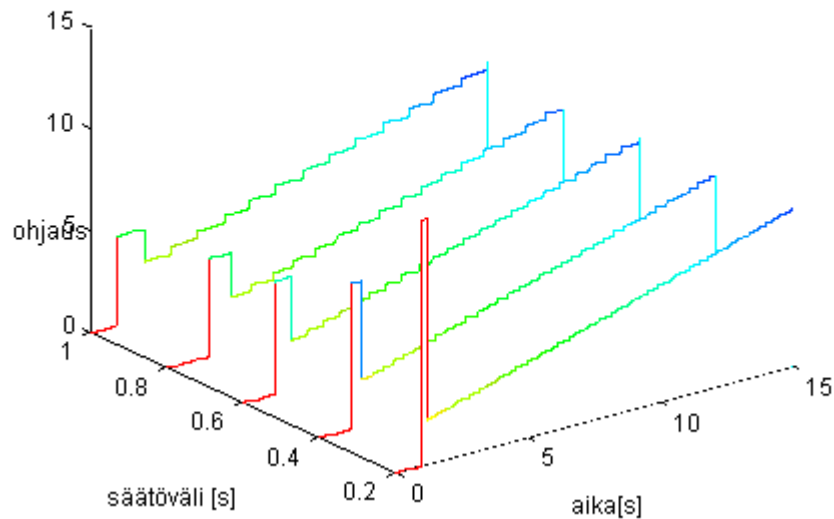
Vastaavasti kuvataan myös derivaattaa (Kuva 2). Nyt käyrää sivuavan suoran kulmakerroin (eli siis derivaatta) korvataan likiarvolla

$$\frac{e(k) - e(k - 1)}{h}$$

joka on kahden vierekkäisen pisteen arvojen erotus jaettuna säätöväliillä.

Säätövälin vaikutus

Säätövälin vaikutusta digitaalisen säätimen lähtöön voidaan tarkastella seuraavalla kuvaajalla, jossa on simuloituna digitaalisen säätimen lähtö viidellä eri säätövälimillä (0,2, 0,4,..., 1 s.), viritysparametrit ovat samat koko ajan (Kuva 3).



Kuva 3. Säätövälin vaikutus digitaalisen PID-säätimen lähtöön

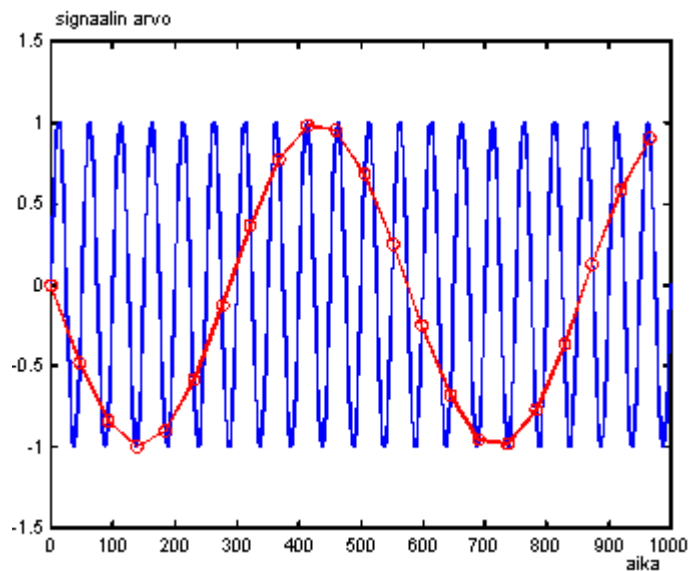
Kuvasta huomataan, että säätöväli vaikuttaa vähiten P- ja I-osiin. Digitalisointi muuttaa erosuuretta aikajatkuvaan verrattuna ja siten vaikuttaa jopa P-osaan (pelkkä kertolasku). Sen sijaan derivoinnin piikki muuttuu huomattavasti kun säätöväli kasvaa. Säätövälin aiheuttamat portaat ohjauksessa ovat selvästi nähtävissä kun säätöväli kasvaa. Säätöväli konfiguroidaan automaatiojärjestelmässä, eikä sitä virituksen yhteydessä mielellään muuteta. Tähänkin saatetaan joutua prosessikokeiden yhteydessä, jos säätöväli on liian pitkä verrattuna prosessin omaan nopeuteen. Pieni säätöväli kuormittaa prosessiasemia, joten monesti joudutaan resurssisyyistä turvautumaan liian suuriin säätöväleihin.

Näytteenoton vaikutus

Tässä yhteydessä kannattaa kiinnittää myös hieman huomiota näytteenottovälin vaikutukseen ja automaatiojärjestelmän trendeihin. Jotta mittaussignaalin näytteenotto voi yleensäkin onnistua, tulee näytteenottotaajuuden olla vähintään *kaksinkertainen* korkeimpaan tarkasteltavaan taajuuteen nähden. Tämä edellyttää, että mittaussignaalista suodatetaan liian korkeat taajuudet pois ennen näytteenottoa. Mikäli näytteenottoväli on liian pitkä, tapahtuu ns. laskostumisilmiö (aliasing). Tarkastellaan esimerkkinä sinisignaalia, jonka jaksonaika on 10 sekuntia (Kuva 4). Nyt alkuperäisestä signaalista otetaan näytteitä aivan liian harvakseltaan (vajaa 50 sekunnin näytteenottoväli), jolloin näin muodostuvan uuden sinisignaalin jaksonajaksi tuleeekin n. 600 sekuntia!

Asia on ongelmallinen nopeimpien säätöpiirien (paine, virtaus) yhteydessä. Automaatiojärjestelmän operointiasemalla ei välttämättä ole riittävän nopeaa päivitysväliä trendin piirtotyökaluissa, ja näin pääteltynä piirin värähtelyn jaksonaika saattaa olla jotain ihan muuta kuin todellisuudessa. Laskostumisilmiö voidaan päätellä helposti muuttamalla trendin päivitysväliä; jos samalla muuttuu tutkittavan signaalin taajuus, voidaan päätellä laskostumisilmiön olemassaolo.

Automaatiojärjestelmän trendien yhteydessä kannattaa myös muistaa, että trendillä näkyvään signaaliin vaikuttaa suodatus, näytteenotto sekä datan keskiarvottaminen. Jos säätöpiirin toimintaa haluaa analysoida tarkasti, joudutaan usein mittausdatan keruu järjestämään itse jotta saatu data todellakin edustaa sitä mitä sen halutaan esittävän.



Kuva 4. Näytteenoton vaikutus. Alkuperäisestä signaalista (jaksonaika 50 s.) otetaan näytteitä liian harvaan, jolloin saadaan täysin väärä jaksonaika (n. 600 s.)

Nopeus- ja asentoalgoritmit

Ottamalla käyttöön edellä esitetyt laskentakaavat, digitaalisen PID-säätimen ohjaus lasketaan esimerkiksi kaavalla

$$u(k) = K_p \left(e(k) + \frac{h}{T_i} \sum_{n=1}^k e(n) + \frac{T_d}{h} (e(k) - e(k-1)) \right)$$

Näin saatua algoritmia kutsutaan *asentoalgoritmiksi* (= absoluuttitila), koska joka ajanhetki k ($k = 1, 2, 3, \dots$) se kertoo ohjauksen $u(k)$ sen hetkisen absoluuttisen (todellisen toimilaitteelle menevän) arvon. Toinen tapa laskea ohjaus on ns. *nopeusalgoritmi* eli säätimen *inkrementtitila*

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1),$$

missä $u(k)$ on ohjaussignaalin muutos eli inkrementti hetkellä k eli nykyisen ja edellisen arvon erotus. Todellinen säätimen lähdön arvo lasketaan siis kaavasta

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

Joissakin tapauksissa tämä summaaminen voidaan yhdistää suoraan laskenta-algoritmiin. Nopeusalgoritmi on toiminnaltaan täsmälleen samankaltainen asentoalgoritmin kanssa, kunhan säätimien alkuarvot vastaavat toisiaan ja säätimien vahvistuksia ei muuteta, mutta toteutuksessa vältetään tietyt ongelmat. Damatic XD -järjestelmässä ohjaus voidaan valita *cmode* parametrilla, Alcont 3000 -järjestelmässä on käytössä erikseen ohjaus CON ja sen muutos OUD.

Nopeusalgoritmimuodossa esitettynä säädin soveltuu sellaisenaan myös järjestelmiin, missä itse toimilaitteessa on "muisti" (esimerkiksi akselin asento, jota ohjataan askelmootorilla ja säädin antaa vain pulssiohjausta). Tällöin inkrementtitilassa säädin antaa lähtösignaaliksi ohjauksen muutoksen. Nämä inkrementti-säätimet ovat tyypillisiä voimalaitoskäytössä, joissa toimilaitteella (askelmootorilla) ohjataan suuria ilmapeltejä.

Esimerkki digitaalisesta PI-säätimestä

Tarkastellaan esimerkkiä digitaalisen PI-säätimen toiminnasta. Yksinkertaisessa silmukassa lasketaan tilanne, kun asetusarvoa muutetaan nolasta yhteen. Säädin laskee erosuureen yksinkertaisen simuloidun prosessimallin lähdöstä. Säätimen ohjaus lasketaan P- ja I-osan mukaan.

Alustus

$h = 1$

Säätöväli [s]

```

Kp = 1
Ti = 15
X = Kp*h/Ti

Simulointi
for k=alku to loppu
    Lue mittaukset
    r(k) = 1
    y(k) = 0.15*u(k-1)+0.9*y(k-1)
    Laske ohjaus
    e(k) = r(k) - y(k)
    I(k) = I(k-1) + e(k)
    u(k) = Kp*e(k) + X*I(k)
next

```

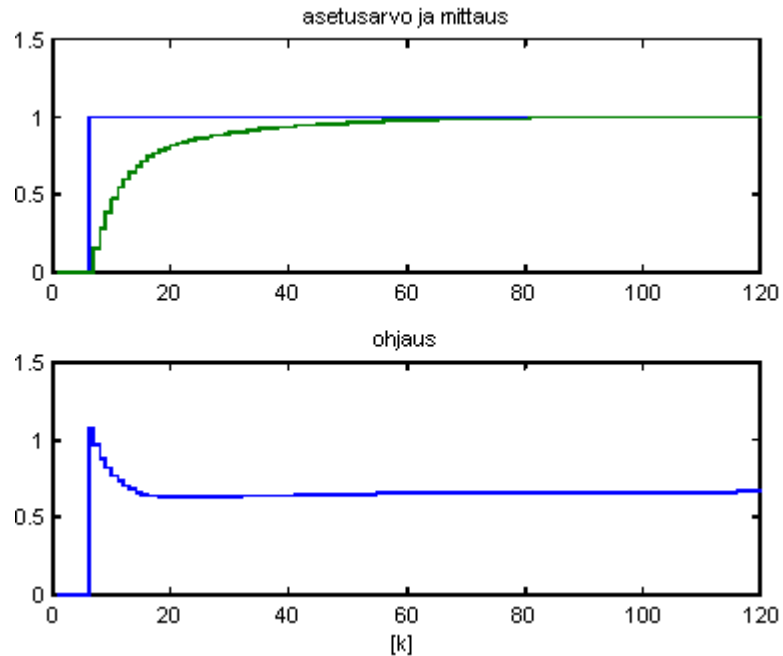
Vahvistus [-]
 Integrointiaika [s]
 Apumuuttuja
 Asetusarvo
 Yksinkertainen
 prosessimalli
 Erosuure
 I-termi
 Ohjaus

Tarkastellaan esimerkkiä numeroiden muodossa. Viiden ensimmäisen askeleen aikana asetusarvo on nolla, jonka jälkeen se muuttuu askelmaisesti ykköseksi. Nyt kuudennen askeleen kohdalla erosuure on $1 - 0 = 1$, jolloin säädin alkaa reagoimaan erosuureeseen ($u(6) = 1,0667$). Tämä ohjaus sisältää pääasiassa P-osan ohjauksen $K_p e(6) = 1 \times 1$. Nyt prosessimalli alkaa reagoida ohjaussignaaliin, eli $y(7) = 0,1600$. Näin etenemällä voidaan simuloida säätimen toimintaa. Laskenta on hyvin yksinkertaista, sillä siihen ei tarvita kuin taskulaskin ja ruutupaperia! Muistissa ei välttämättä tarvitse pitää kuin suureiden edelliset arvot, ja uuden laskentakierroksen (k) jälkeen voidaan päivittää taas muistiin uudet arvot jne.

k	r(k)	y(k)	e(k)	I(k)	u(k)
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	1	0	1.0000	1.0000	1.0667
7	1	0.1600	0.8400	1.8400	0.9627

8	1	0.2884	0.7116	2.5516	0.8817
9	1	0.3918	0.6082	3.1598	0.8188
10	1	0.4755	0.5245	3.6843	0.7702
11	1	0.5434	0.4566	4.1409	0.7326
12	1	0.5990	0.4010	4.5419	0.7038
13	1	0.6447	0.3553	4.8972	0.6818
14	1	0.6825	0.3175	5.2148	0.6652
15	1	0.7140	0.2860	5.5008	0.6527
...	jne				
115	1	0.9983	0.0017	9.9656	0.6661
116	1	0.9984	0.0016	9.9672	0.6661
117	1	0.9985	0.0015	9.9688	0.6661
118	1	0.9985	0.0015	9.9702	0.6661
119	1	0.9986	0.0014	9.9716	0.6662
120	1	0.9987	0.0013	9.9730	0.6662

Tulokset voidaan esittää myös kuvana, jossa näkyvät sekä asetusarvon muutos, prosessin käyttäytyminen että säätimen lähtö (Kuva 5). Aika-akseli sekunteina saadaan kertomalla askeleen numero säätöväylillä, siis *kh*.



Kuva 5. Simuloitu esimerkki digitaalisen PI-säätimen toiminnasta

AntiWindUp

Kaikissa toimilaitteissa on omat fysikaaliset rajoituksensa, moottori pyörii maksiminopeudellaan, venttiili on jo täysin auki/kiinni jne. Koska säätöjärjestelmät toimivat monissa olosuhteissa, saattaa tulla vastaan tilanteita joissa ohjaussignaali saavuttaa toimilaitteen rajoitukset. Tällöin säätöpiiristä tulee itseasiassa avoin järjestelmä, sillä toimilaite pysyy rajoituksessaan riippumatta prosessin tilasta. Säätimessä oleva I-osa jatkaa kuitenkin kasvamistaan koko ajan, koska säätöpiirissä edelleenkin on erosuuretta. Säätimen I-osa siis kasvattaa koko ajan ohjausta, mutta toimilaite ei enää pysty liikkumaan. Jotta tämä I-osa voisi palata normaaliin tilaan, tulisi erosuureen merkin olla vastakkainen hyvin pitkän ajan. Tämä ns. WindUp-ilmio aiheuttaa ongelmia mikäli sitä ei ole otettu huomioon säätimen toteutuksessa. Teollisissa säätimissä tyypillisesti oleva *AntiWindUp*-rakenne estää em. käyttäytymisen. Ongelma on lähinnä digitaalisissa säätimissä, ei niinkään elektronisissa ja/tai pneumaattisissa, joissa itse säätimessäkin tulee vastaan tietyt fysikaaliset rajat.

Rakenteelliset erot

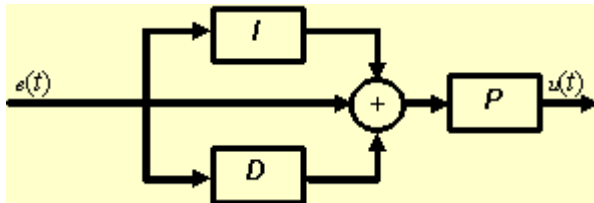
PID-säätimen perusrakenne on yksinkertainen. Kuitenkin sen käytännön toteutuksia on useita. Säätimien valmistajilla on lukuisia omia ideaalisesta perusversiosta eroavia rakenneratkaisuja. Oleellista on kuitenkin perusrakenne, jossa säätimen lähtö muodostetaan P-osasta, erosuureen integraalista ja derivaatasta. Säätimellä on kolme viritysparametriä, joilla painotetaan näiden kolmen perusosan keskinäisiä suhteita.

Jos asetusarvoon tehdään askelmainen muutos, myös erosuure muuttuu askelmaisesti. Suuri muutos erosuureessa näkyy voimakkaana ohjausmuutoksina, joita prosessiteollisuudessa usein pyritään välttämään. Useat automaatiojärjestelmien PID-säätimet käsittelevät tätä ongelmaa omilla rakenteellisilla eroilla. Derivointitermi voidaan laskea erosuureen sijasta mittaussignaalista, tätä on käsitelty jo aikaisemmin. Askelmainen (harvoin tapahtuva) asetusarvonmuutos voidaan rampittaa tai suodattaa, esim. Damatic XD -järjestelmässä mikäli $cha\#$ parametri on laitettu ykköseksi. P-osassa voidaan erosuureen sijasta käyttää termiä $br(t)$ $y(t)$, missä termillä b voidaan vaimentaa asetusarvonmuutostilanteista aiheutuvia voimakkaita ohjaustoimenpiteitä.

Teollisissa säätimissä säätimen rakenne ja parametrivalinnat sekä monet erikoispiirteet poikkeavat toisistaan usein merkittävästikin. Perusrakenne voi olla ideaalinen, sarjamuotoinen tai rinnakkaisuotoinen.

Ideaalirakenne

Ideaalirakenteinen säädin on nykyään yleisin toteutustapa. Mikäli toisin ei mainita, puhuttaessa PID-säätimestä tarkoitetaan juuri tätä rakennetta (Kuva 1). Damatic XD ja Alcont 3000 perustuvat tähän perusrakenteeseen.



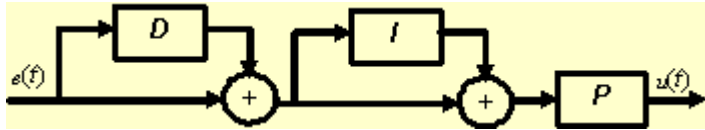
Kuva 1. Ideaalirakenteinen PID-säädin

Säätimen vahvistuksella kerrotaan sekä erosuure että sen derivaatta ja integraali eli seuraavassa PID-kaavassa vahvistus on sulkujen ulkopuolella

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Sarjarakenne

Sarjarakenteinen säädin on nykyään harvemmin käytössä oleva säädinrakenne. Tätä rakennetta on käytetty mekaanisesti toteutetuissa säätimissä, esim. pneumaattisissa ja analogiaelektroniikalla toteutetuissa säätimissä. Rakenteessa derivointiaika vaikuttaa integrointiosaan, joskus tästä käytetään nimitystä *vuorovaikutteinen* säädinrakenne. Jos suhde T_d/T_i on pieni (esim. pienempi kuin 0.1), voidaan olettaa säätimen vastaavan ideaalitapausta. Jos D-termiä ei ole käytössä, rakenne vastaa ideaalitapausta.



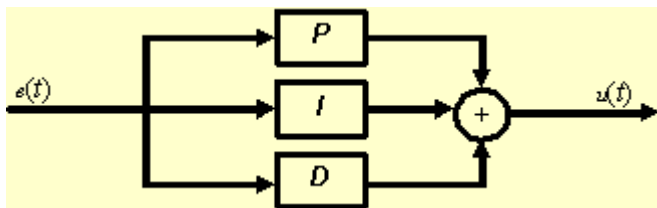
Kuva 2. Sarjarakenteinen PID-säädin

$$u(t) = K_p \left(Z(t) + \frac{1}{T_i} \int Z(t) dt \right)$$

$$Z(t) = e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Rinnakkaisrakenne

Säätimen rakenne määräytyy sen perusteella, kuinka eri säädinlohkot kytkeytyvät toisiinsa. Rinnakkaisrakenteisessa (*vuorovaikutukseton* rakenne) säätimessä kaikki kolme osaa ovat rinnakkain ja usein kullakin haaralla on oma vahvistustekijänsä.



Kuva 3. Rinnakkaisrakenteinen PID-säädin

Laskentakaavassa tämä näkyy kolmena erillisenä terminä

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

Ideaalirakenteesta saadaan rinnakkaisrakenteinen, jos valitaan vahvistukset $k_p = K_p$, $k_i = K_p/T_i$ ja $k_d = K_p T_d$.

Rakenteen merkitys

Eri säädinrakenteilla on merkitystä siinä tilanteessa, kun viritysparametrejä siirretään toiselta säätimeltä toiselle, esimerkiksi vanha yksikkösäädin tai PLC korvataan automaatiojärjestelmän säätimellä. Eri valmistajien säätimien rakenteet eivät vastaa toisiaan, joten ennen muunnosta on syytä varmistua mitä parametrit tarkoittavat. Sama pätee myös pelkästään viritysparametreihin, esimerkiksi annetaanko P-osa vahvistuksena vai vertoalueena ja onko integrointi- ja derivointiajat minuutteja vai sekunteja. Joillain valmistajilla "integrointi-aika" tarkoittaa itseasiassa I-osan vahvistusta.

Muunnos sarjarakenteisesta ideaalirakenteiseen säätimeen voidaan tehdä kaavoilla

$$\begin{cases} K_p = K_p' \frac{T_i' + T_d'}{T_i'} \\ T_i = T_i' + T_d' \\ T_d = \frac{T_i' T_d'}{T_i' + T_d'} \end{cases}$$

missä pilkulla (') on merkitty sarjarakenteisen säätimen parametrejä. Muunnos toiseen suuntaa voidaan laskea jos $T_i > 4T_d$ kaavoilla

$$\begin{cases} K_p' = \frac{K_p}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \\ T_i' = \frac{T_i}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \\ T_d' = \frac{T_i}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4T_d}{T_i}} \right) \end{cases}$$

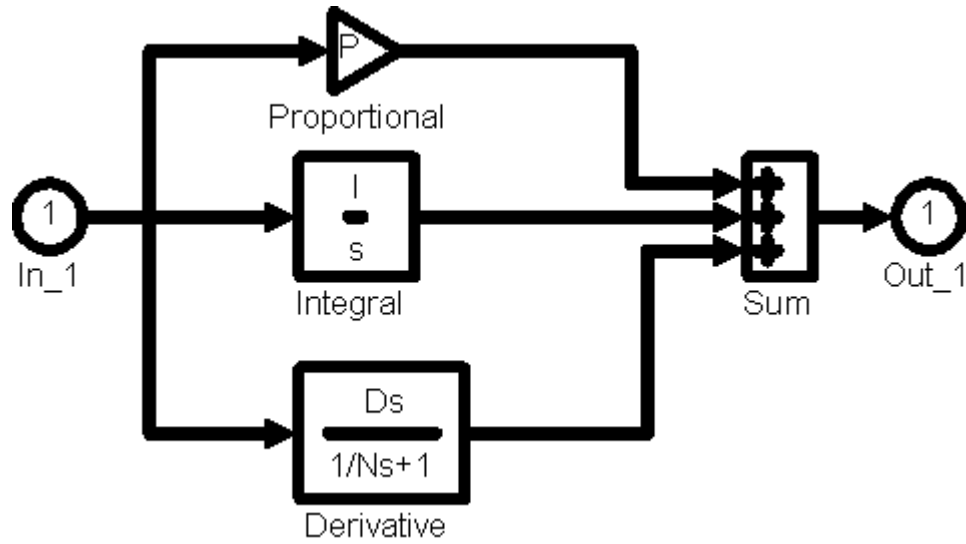
Ominaisuudet

Kolmen viritysparametrin lisäksi PID-säätimissä on lukuisia käyttöön liittyviä valmistajakohtaisia ominaisuuksia, laskentakaavojen muunnoksia ja käytännön säätöratkaisuja:

- D-termin alipäästösuodatus
- derivoinnin valinta suoraan mittauksesta tai erosuureesta
- neliöllinen algoritmi, erosuureen sijasta käytetään P-osassa termiä $e|e|$
- myötäkytkentä-mahdollisuus
- ohjauksen vakiotaso (bias-termi ilmoittaa säätimen lähdön erosuureen arvolla nolla)
- pakko-ohjaus erillisestä ohjaustulosta tai käsiohjaukselta
- hälytykset (+ rajojen asetukset)
- automaattinen parametrien skaalaus (insinööriyksiköiksi)
- asento / nopeusalgoritmin valinta
- ohjauksen / ohjausmuutoksen rajoitus ja anti-windup
- toimisuunta (suora / käänteinen)
- sysäyksetön vaihto manuaaliohjauksesta automaattiohjaukselle ja parametrien vaihdon yhteydessä.

Tehtävä 1

Simulink-ohjelmistossa on seuraavanlainen PID-säädinlohko. Mikä on sen rakenne? Kuinka oheinen säädin on parametrisoiva, kun sen halutaan vastaavan ideaalirakenteista säädintä parametreilla $K_p = 0,2$, $T_i = 15$, $T_d = 3$ ja $T_{df} = 1$?



PID Controller (with Approximate Derivative) [X]

PID(2) Controller (mask) (link)

Enter Proportional(P), Integral(I), and Derivative(D) and divisor (N) terms.
 $P + I/s + Ds/(1/Ns + 1)$

Parameters

Proportional:

Integral:

Derivative:

Derivative divisor(N):

Apply Revert Help Close

Tehtävä 2

Derivointitermi ja sen suodatus voidaan esittää ns. siirtofunktiona (ks. liite) seuraavasti

$$D(s) = \frac{T_d s}{T_d s + 1}$$

missä s on ns. Laplace-muuttuja. System Six (DCU3200) automaatiojärjestelmässä derivointitermi lasketaan kuitenkin muodossa

$$D(s) = T_d \left(\frac{s\alpha}{s + \alpha} \right)$$

missä parametrilla määritellään derivointitermin suodatus (oletusarvo = 8). Kuinka lasketaan riippuvuus $T_{df} N$?

PID-säädin automaatiojärjestelmässä

Damatic XD

Seuraavassa tarkastellaan Damatic XD -automaatiojärjestelmän *pid*-säädintoimilohkoa. Säätimessä lasketaan aktiivisen asetusarvon *spa* ja mittauksen *me* erotuksesta säätimen tulosignaali, ja lähtösignaalina on ohjaus *con*. Derivaatta lasketaan suoraan mittauksesta *me*, ei siis eroosuureesta. Säätimen ohjaus lasketaan siis (periaatteellinen laskukaava)

$$con = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int edt - D \right) + k_{ff} m_{ff} + bias$$

$$D = T_d \frac{d}{dt}(me) - T_{df} \frac{d}{dt}(D)$$

missä *con* on säätimen lähtö, *e* = erosuure (*spa* - *me*), *me* = mittaus, *m_{ff}* on myötäkytkentäkanavan tulo ja *k_{ff}* on sen viritysparametri (= kompensattori) sekä *bias* kertoo säätimen lähdön kun erosuure on nolla.

Jos konfigurointiparametri *squ* on tosi(1), P-osan laskennassa käytetään erosuureen sijasta ns. *neliöintiä* eli termiä *e|e|*. Tällä on mahdollista saada rauhalliset ohjaukset pienille erosuureen arvoille mutta voimakkaammat ohjaustoimenpiteet kun mittausarvo eroaa asetusarvosta paljon. Tätä rakennetta on kuitenkin käyttävä erittäin varovasti!

Derivoinnin suodatus tehdään aikavakiolla *T_{df}* eli mitä isompi on aikavakio, sen pidemmällä menneisyyteen derivaatan vaikutus ulottuu.

Haluttu säädinyhdistelmä (P, PI, PD, PID) rakennetaan konfigurointiparametreilla *pu* (P-osa), *iu* (I-osa) ja *deu* (D-osa). Parametrilla *ma* ilmoitetaan, onko säädin manuaali- vai automaattitilassa.

Viritysparametreista on huomattava, että parametrit *K_p*, *T_i*, *T_d* ja *T_{df}* skaalataan säätimessä sisäisesti, kun konfigurointiparametri *parch* on tosi(1) yhden säätövälän ajan. Vaihdettaessa parametrit valvomosta, tämä toimenpide suoritetaan automaattisesti. Näin integrointi- ja derivointiajat voidaan antaa sekunneissa huolimatta säätövälistä. Todelliset, säätimen sisäisessä laskennassa käytettävät viritysparametrit ovat nähtävissä esim. debuggerin avulla muuttujasta

`:e:pr:position_nimi:sta:ikp`

missä *ikp* tarkoittaa säätimen sisäisessä laskennassa käytettyä vahvistusta (vastaavasti myös *iti* ja *itd*). Näin voidaan todeta kuinka säätöväli vaikuttaa säätimen sisäisessä laskennassa käytettyihin parametreihin sekä todeta viritysparametrien siirron onnistuminen.

Ohjauksen suunta valitaan parametrilla *condir*. Suorassa ohjauksessa muutoksen etumerkki on sama kuin erosuureen (*spa me*). Parametrillä *cmode* valitaan säätimen absoluutti- ja inkrementtitila. Säätöpiirin viritystä ja mallinnusta varten tarvitaan jokatapauksessa toimilaitteen absoluuttiasento, joka voidaan lukea säätimen muuttujasta :*sta:pcon*. Tässä muuttujassa näkyvät muutokset näkyvät myös toimilaitteen muutoksina, tosin muuttujassa on mielivaltainen taso (siis keskiarvo), joka täytyy poistaa ennenkuin signaalia voidaan käyttää.

Mittauksen ala- ja ylärajat ilmoitetaan parametreillä *memi* ja *mema*, vastaavasti ohjauksen parametreilla *comi* ja *coma*. Näitä rajoja tarvitaan virituksen yhteydessä skaalauksiin, jotta vahvistus olisi oikein.

Tärkeimmät parametrit voidaan siis koota seuraavaan taulukkoon.

<i>Parametri</i>	<i>Selite</i>
me	mittaussignaali
con	ohjaussignaali
spa	aktiivinen asetusarvo
ma	automaatti/käsiäjo tila
memi	mittauksen alaraja
mema	mittauksen yläraja
comi	ohjauksen alaraja
coma	ohjauksen yläraja
kp	säätimen vahvistus
ti	säätimen integrointiaika s
td	säätimen derivointiaika s
tdf	säätimen derivoinnin suodatus s

Taulukko 1. Damatic XD -järjestelmän yleisimmät virityksessä tarvittavat parametrit ja signaalit

Ongelmia prosessikokeen suorituksessa voi aiheuttaa parametri *cha#* (*#* = 1-3), jolla harvoin tapahtuvat asetusarvomuutokset rampitetaan integraattorin avulla. Jos tämä parametri on tosi(1), asetusarvoon tehty askelmuutos saattaa suodattua pois, eikä näin saada riittävän suurta muutosta aikaiseksi säätimen ohjaukseen. Toinen mahdollisesti ongelmia aiheuttava parametri on *conch*, jolla ilmoitetaan inkrementtitilassa ohjauksen maksimi muutosnopeus 1/s. Säätimen lähtöön summattavat ohjausmuutokset saattavat jäädä suorittamatta, jos em. parametrilla estetään liian nopeat muutokset ohjaussignaalissa.

Damatic Classic

Classic-järjestelmän yhteydessä tarkastellaan sekä Classicin omaa PID-säädintä että XD-järjestelmän *clspid*-toimilohkoa. Classic-järjestelmässä on joitakin perustavaa laatua olevia eroja verrattuna XD-järjestelmään. Ensinnäkin Classicissa oleva säädin eroaa XD-säätimestä muuttujiltaan. Prosessikokeita tehtäessä Classicin ja XD:n välisestä tiedonsiirrosta johtuen datan kirjoittaminen ja lukeminen tapahtuvat eri nimisten signaalien kautta. Tämä edellyttää kahdenkertaisen liityntätiedon käsittelyä yhtä kirjoitettavaa signaalia kohden.

PID-säätimen lähtö lasketaan kaavalla

$$pos = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int edt - T_d \frac{d(me)}{dt} \right),$$

eli kyseessä on normaali ideaalirakenteinen säädin. Vastaavasti toimii myös PI-säädin, eli lähtö lasketaan kaavalla

$$pos = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int edt \right)$$

Derivoinnin suodatuksessa käytetään erillistä *der*-lohkoa, jonka toimintaperiaate poikkeaa yleisesti käytetystä derivoinnista. Tällä loholla lasketaan suodatusaikavakio missä parametri n on välillä $0 \dots 15$. Tämä parametri n on prosessiasemakohtainen, ei siis säädinkohtainen. Kun n on nolla, ei derivoinnin suodatusta käytetä. Tämä suodatusaikavakio vastaa aikaisemmin esitettyä derivaatan suodatusta kun

$$T_d = h2^n$$

Käytännössä suuren derivointiajan vaikutus siis suodatetaan "pois" tällä aikavakiolla. Ei kannata ihmetellä, vaikka derivointiajat tuntuisivat suurilta. Jos esimerkiksi säätöväli $h = 2$ s ja $n = 10$, suodatusaikavakioksi tulee 2048 sekuntia, oletusarvona on $n = 3$. Jos asiaa haluaa tarkastella yleisen derivoinnin suodatusermin N kannalta, voidaan tämä laskea kaavalla

$$N = \frac{T_d}{h} 2^{-n}$$

Classic-säätimistä puuttuu *bias*-signaali, johon automaattitilassa tehtävän prosessikokeen testisignaali voitaisiin syöttää. Tämän takia joudutaan käyttämään asetusarvosignaalia. Mittauksen ja ohjauksen rajoja (*memi*, *mema*, *comi*, *coma*) ei pystytä lukemaan automaattisesti suoraan Classic-

järjestelmästä, vaan ne täytyy katsoa operointinäytöltä. Seuraavassa taulukossa on virityksen yhteydessä tarvittavat parametrit, jotka on luettavissa säätimeltä erilliseen PC-koneeseen.

<i>Parametri</i>	<i>Selite</i>
me	mittaussignaali
pos	ohjaussignaali
spa	asetusarvo
ma	automaatti/käsiäjo tila
kp	säätimen vahvistus
ti	säätimen integrointiaika
td	säätimen derivointiaika

Taulukko 1. Classic-parametrit, jotka ovat luettavissa erilliseen PC-koneeseen

Seuraavia virittämisen yhteydessä tarvittavia parametrejä ei pystytä lukemaan automaattisesti järjestelmästä, joten käyttäjän on haettava tarvittavat tiedot esim. valvomosovelluksesta.

<i>Parametri</i>	<i>Selite</i>
memi	mittaussignaalin alaraja
mema	mittaussignaalin yläraja
comi	ohjaussignaalin alaraja
coma	ohjaussignaalin yläraja
cmode	absoluutti/inkrementtitila, cmode on aina nolla (= absoluuttitila)

Taulukko 2. Classic-parametrit, jotka eivät ole luettavissa erilliseen PC-koneeseen

Tilatiedot luetaan Damatic XD -järjestelmän kautta muuttujasta

:e:xc:position_nimi:item,

missä etuliite $e:xc:$ viittaa Classic-säätimeen ja $item$ on jokin em. taulukoiden muuttujista.

Classic-säätimessä on mahdollista käyttää vain taulukoituja viritysparametreja. Mahdolliset integrointi- ja derivointiajat riippuvat säätimen suoritusvälistä (0,4 tai 2 sekuntia). Viritysparametrit valitaan seuraavasta taulukosta.

K_p	T_i		T_d	
	$h=0,4s$	$h=2s$	$h=0,4s$	$h=2s$
0,125	inf	inf	0	0
0,25	273,1	1365	4,8	24
0,5	204,8	1024	6,4	32
0,75	136,5	683	9,6	48
1,0	102,4	512	12,8	64
1,25	68,3	341	19,2	96
1,5	51,2	256	25,6	128
1,75	34,1	171	38,4	192
2,0	25,6	128	51,2	256
3,0	17,1	85	76,8	384
4,0	12,8	64	102,4	512
6,0	8,5	43	153,6	768
8,0	6,4	32	204,8	1024
12,0	4,3	21	307,2	1536
16,0	3,2	16	409,6	2048
24,0	2,1	10,7	614,4	3072

Taulukko 3. Classicissa mahdolliset viritysparametrit

Pitkiä integrointiaikoja varten on mahdollista kertoa konfiguroitu integrointiaika luvun kaksi jollakin potenssilla, tuloksena siis $T_i 2^n$.

Taulukoiduista parametreista saattaa olla vaikeaa löytää sellaista yhdistelmää, joka täyttää halutut kriteerit, erityisesti jos asiaa tutkitaan

tietokonesimuloinneilla. Turvallisuuden takia kannattaa pyöristää vahvistus alaspäin ja integrointi-aika ylöspäin lähimpään soveltuvaan parametriin. Siirrettäessä parametrit valvomosta järjestelmä pyöristää automaattisesti parametrit tiettyjen sääntöjen mukaisesti lähimpään soveltuvaan lukuarvoon. Huonolla onnella saamme helposti liian nopeat viritysparametrit, jotka näkyvät prosessin värähtelynä.

Classic-järjestelmässä on erilliset säätimet PI- ja PID-tapauksille. Säädinyhdistelmä on luettavissa *pu*, *iu* ja *deu* parametrien avulla. Classic-järjestelmässä ladattuja PID-parametrejä ei tarvitse aktivoida *parch*-muuttujalla.

Alcont 3000

Alcont 3000 ja Alcont 2 -automaatiojärjestelmissä on käytössä sama PID-algoritmi. Käytössä on kolme erillistä säätöalgoritmia, P, PI ja PID, ja PID-säätimen lähtö lasketaan kaavalla

$$CON = GNF \left(e + \frac{1}{INT} \int edt + D \right)$$

$$D = GND \frac{d(e)}{dt} - DER \frac{d(D)}{dt}$$

missä derivaatta lasketaan joko erosuureesta e tai vain mittauksesta MES. Rakenne vastaa siis ideaalirakenteista säädintä. Virityksessä yleisimmin tarvittavat parametrit ovat seuraavassa taulukossa.

<i>Parametri</i>	<i>Selite</i>
MES	mittaussignaali
CON	ohjaussignaali
ODU	ohjausmuutos
SET	asetusarvo
mde	automaatti/käsiajo -tila
MLL	mittauksen alaraja
MUL	mittauksen yläraja
CLL	ohjauksen alaraja
CUL	ohjauksen yläraja
GNF	säätimen vahvistus
INT	säätimen integrointiaika min
GND	säätimen derivointiaika min
DER	säätimen derivoinnin suodatus min

Taulukko 1. Alcont 3000 -järjestelmän tyypillisimmät virityksessä tarvittavat parametrit

Derivintiaika GND määrää derivoinnin voimakkuuden ja DER sen suodatuksen eli DER vastaa derivoinnin suodatusaikavakiota T_{df} (sama kuin XD-järjestelmässä). GND saattaa olla kuitenkin selvyyden vuoksi kytketty säätimen reunaliittimeen DER, jolloin derivoinnin suodatus on säätöpiirin PAR-reunaliittimessä. Parametrilla dmo voidaan valita lasketaanko derivaatta vain mittaussignaalista ($dmo = 0$ tai $dmo = 2$).

On huomattava, että sekä PI- ja PID-säätimistä voidaan poistaa integrointiominaisuus kun integrointiaikaparametri INT on joko nolla tai suurempi kuin 999.

Tarkastellaan seuraavana hieman Alcontin EXPFIL-alipäästösuodatin lohkoa, joka vastaa toiminnaltaan AILIX-mittauslohkon FIL-parametrin käyttöä. Työkaluohjelmistoilla voidaan kerätyn mittausdatan pohjalta arvioida soveltuvaa suodatuksen voimakkuutta. Esimerkiksi ensimmäisen kertaluvun (*First order*) alipäästösuodattimen aikavakion ja FIL-parametrin riippuvuus voidaan esittää kaavoilla

$$\begin{cases} FIL = 1 - e^{-\frac{h}{T}} \\ T = \frac{-h}{\ln(1 - FIL)} \end{cases},$$

missä h = säätimen suoritus aika (s) ja T on suodattimen aikavakio (s).

Alcont 1

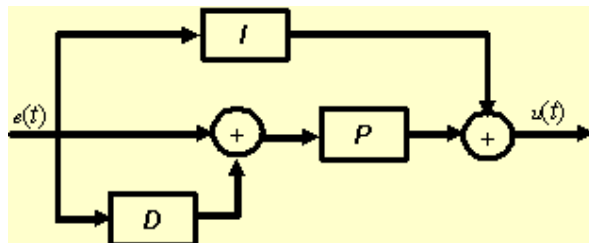
Alcont 1 -järjestelmässä integrointi ja derivointi eroavat Alcont 3000 -järjestelmän parametreista. Integrointitermissä ei ole mukana säätimen vahvistusta K_p , vaan integrointiaika itsessään kertoo säätimen I-osan vahvistuksen. Rakenteeltaan tämä tarkoittaa sitä, että P- ja I-osat ovat kuin normaalissa rinnakkaisrakenteisessa säätimessä. Toisaalta P- ja D-osat ovat kuin sarjarakenteisessa säätimessä. Alcont 1 -järjestelmän säädin onkin tässä suhteessa poikkeava yleisistä säädinrakenteista (Kuva 1).

Käytössä on kaksi PID-säädin toimilohkoa, PID ja PIDM. PID-toimilohkossa on suora toimsuunta, joka voidaan muuttaa käänteiseksi negatiivisella säätimen vahvistuksella. PIDM-lohkossa toimsuunta on toistepäin, eli normaalisti käytössä on käänteinen toimsuunta joka voidaan vaihtaa suoraksi negatiivisella säätimen vahvistuksella.

Alcont 1 -järjestelmän PID-säädin voidaan kirjoittaa muodossa

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt$$

Säätimen vahvistus K_p ei sisälly integrointiosaan, PI-termien osalta kyseessä on siis rinnakkaisrakenteinen säädin. Integrointiajalla ei tarkoiteta samaa asiaa kuin ideaalirakenteisessa säätimessä, vaan sillä määritetään yksinään I-osan vahvistus ($1/T_i$). Jos integrointiaika on nolla tai suurempi kuin 999, ei laskennassa käytetä integrointiosaa. Kun integrointiosa on mukana, säätimen lähtö on aina rajoitettu välille 0 ... 100. Integrointi- ja derivointiajat annetaan minuuteissa.



Kuva 1. Alcont 1 -järjestelmän säätimen rakenne

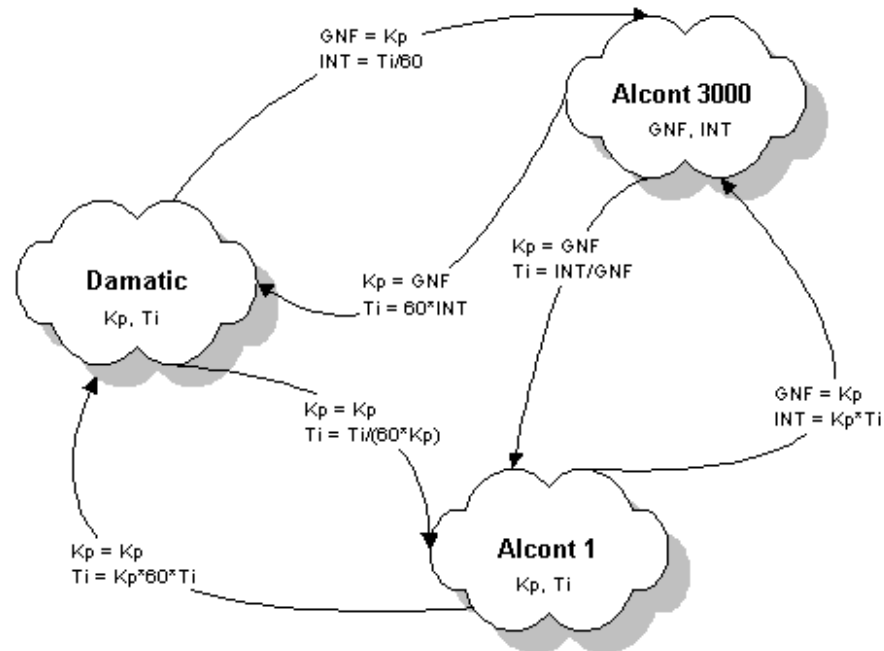
Derivoinnin suodatus on myös erikoinen. Derivointiajan kasvattaminen ei kasvata derivointia, sillä maksimissaankin derivoinnin vaikutus on sama kuin P-osan vaikutus. Derivointiajan kasvaessa kasvaa myös derivoinnin suodatus! Tämä tarkoittaa sitä, että T_d vastaa huonosti yleisesti tarkoitettua derivointiaikaa. Nyt derivointiosan maksimivahvistus, jota yleisessä tapauksessa kuvaa suodatustekijä N , on kiinteästi valittu ykköseksi. Derivointia siis suodatetaan rajusti, ja se edellyttää myös suuria derivointiaikoja.

Parametrien vastaavuus järjestelmien välillä

Seuraava kuva kertoo kuinka PI-säätimen parametrit muuttuvat järjestelmästä toiseen siirryttäessä (Kuva 1). Eroa aiheuttavat lähinnä integrointiajan minuutti <-> sekunti muunnos sekä Alcont 1 -järjestelmän integrointiaika, jossa ei ole mukana säätimen vahvistusta. Jos esimerkiksi Damaticissa olevat PI-parametrit siirretään Alcont 3000 -järjestelmään, on vahvistukset samoja, mutta integrointiaika INT täytyy jakaa 60:llä Damaticin vastaavasta. Valitettavasti derivointiajoille ei pystytä antamaan yhtä yksinkertaisia muunnoskaavoja. Eräs laskuesimerkki on oheisessa taulukossa, jossa samat ideaalisäätimen parametrit (vahvistus 0,7, integrointiaika 270 s) on annettu Damatic XD ja Classic, Alcont 3000 ja Alcont 1 -parametreinä (Taulukko 1).

	<i>Damatic</i>	<i>Alcont 3000</i>	<i>Alcont 1</i>
Vahvistus	$K_p = 0,7$	$GNF = 0,7$	$K_p = 0,7$
Integrointiaika	$T_i = 270$	$INT = 4,5$	$T_i = 6,4$

Taulukko 1. Esimerkki muunnoskaavojen käytöstä



Kuva 1. PI-parametrien siirtäminen automaatiojärjestelmästä toiseen

Virityksessä käytetyt prosessikokeet ja prosessimallit

Yksinkertaiset prosessimallit

Tehtävä 1

Erään säätimen viritysparametrit ovat $PB = 150\%$, $INT = 1,2$ min. Laske vastaavat viritysparametrit Damatic ja Alcont järjestelmiin?

Tehtävä 2

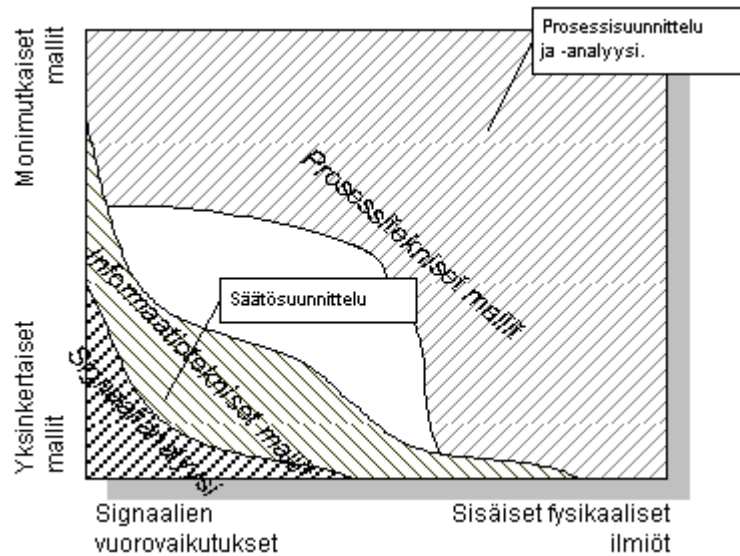
Viritystyökaluohjelmistolla on suodatettu mittaussignaaleista kohina pois ensimmäisen kertaluvun alipäästösuodattimella, jonka aikavakio 2 s. ja säätimen suoritusväli on 1 s. Mikä on Alcont järjestelmän FIL parametrin arvo?

Säätötekniiset mallit

Säätötekniisten mallien ensisijaisena tehtävänä on kuvata ohjaus- ja häiriösuureiden vaikutuksia prosessin säädettävään suureeseen. Tavoitteena on löytää sopiva ja tarkoituksenmukainen riippuvuus suureiden välille (*informaatiotekninen malli*). Tällöin tarkastellaan itseasiassa vain erilaisia signaaleja ja niiden kulkureittejä. Jos mallin halutaan kuvaavan prosessin todellisia fysikaalisia ilmiöitä mahdollisimman yksityiskohtaisesti, voidaan puolestaan puhua *prosessiteknisistä* malleista. Prosessiteknisestä lähtökohdasta katsottuna mallin tulisi kuvata prosessin käyttäytymistä niinkuin se on todellisuudessa, jotta turvallisemman, paremman ja tehokkaamman prosessin suunnittelu olisi mahdollista. Tämän takia vaaditaan paljon tietoa eri osaprosesseista ja komponenteista, joka joskus johtaa monimutkaiseen matemaattisiin yhtälöihin. Säätötekniikan puolesta mallit voivat olla huomattavastikin yksinkertaisempia, lähinnä kuvaten vain signaalien riippuvuuksia eikä niinkään sisäisiä kemiallisia ja fysikaalisia reaktioita. Näin saadut mallit "vain" muokkaavat instrumentoinnista ja automaatiojärjestelmästä tulevaa informaatiota. Säätötekniikan kannalta informaatiotekniisten mallien tyypillinen ominaisuus on se, että jokaista eri sovellusta varten samalle prosessille "räätälöidään" oma matemaattinen mallinsa. Kun tiettyä teollisuusprosessia varten suunnitellaan säätöratkaisua, on aluksi valittava tarkoitukseen soveltuva mallityyppi. Mallintamista ei koskaan saa tarkastella erillisenä osana säätösuunnittelua, vaan se on kiinteästi riippuvainen säädön tavoitteista.

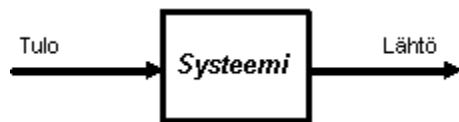
Prosessi- ja informaatiotekniisten mallien erot ovat toisinaan luonteeltaan lähinnä filosofisia eikä aina olleenkaan itsestään selviä. Kysymys on, tarkastellaanko yksinomaan signaaleja vai tarvitaanko syvempää prosessin sisäisen rakenteen tuntemista. Joskus yksinkertaisen säätötekniikan ongelman ratkaisu vaatii hyvinkin yksityiskohtaisen prosessimallin (esim. toimilaitteen ja asennoittimen sisäisen rakenteen malli), kun taas toisinaan prosessin käyttäytyminen voi olla niin yksinkertaista ja suoraviivaista ettei monimutkaisia malleja tarvita. Monimutkaisia malleja käsiteltäessä on pystyttävä jakamaan kokonaisuus pienempiin osaprosesseihin, jolloin kokonaisuus voidaan koota käyttäen valmiita modulaarisia komponentteja. Rakenne ja osamallien kytkennät kuvataan erillisiin hierarkiatasoihin. Tätä tapaa tukevat useimmat kaupalliset simulointityökaluohjelmit.

Eri mallirakenteita ja niiden käyttöä erityyppisten ongelmien ratkaisuun voidaan havainnollistaa seuraavalla kuvalla (Kuva 1). Vasemmassa alareunassa ovat yksinkertaisimmat mittausdataan sovitettavat mallityypit, jotka soveltuvat monien säätöongelmien ratkaisuihin. Oikeassa yläkulmassa on vastaavasti parhaiten todellisuutta kuvaavat monimutkaiset mallit. Useimmat säätötekniikan prosessimallit sijaitsevat kuvaajan pystyakselin läheisyydessä, yksinkertaiset sovellukset origon läheisyydessä (kuten esimerkiksi viritystyökalujen prosessimallit) ja laajat järjestelmät ylempänä pystyakselilla. Joissakin tapauksissa (esim. epälineaarisuudet) säätötekniisiä sovelluksia löytyy myös vaaka-akselin läheisyydessä. Lähinnä soveltuvan teorian puutteen vuoksi informaatio- ja prosessitekniisten mallien väliin jää aukko, jota säätösuunnittelussa ei ainakaan vielä kyetä täyttämään. Usein laajan ja monipuolisen prosessitekniikan mallin siirto säätötekniiseen suunnitteluun perustuu ainoastaan linearisointiin.



Kuva 1. Erityyppisten mallien käyttö niin prosessi- kuin säätösuunnittelun työkaluina

Tulo- ja lähtösignaalien välinen riippuvuussuhde (Kuva 2) voi olla joko *dynaaminen* tai *staattinen*. Staattisessa systeemissä jokainen ulostulon arvo on kokonaan määritelty viimeisimmän tulosignaalin arvon mukaan. Dynaamisessa järjestelmässä lähtö on riippuvainen myös aikaisemmista tulosignaalin arvoista eli tulosignaalin historia vaikuttaa lähdön tämänhetkiseen arvoon. Dynaamiset systeemit voidaan jakaa karkeasti hitaisiin tai nopeisiin, värähteleviin, stabiileihin tai epästabiileihin. Kaksi tyypillisintä dynaamista systeemiä ovat *kapasiteetti* ja *viive* (eli kuollut aika). Kapasiteetti on esim. massan tai energian "varasto", siis vaikkapa säiliö. Viive on dynaaminen systeemi, jossa tulosignaali on viivästynyt tietyn ajan verran.



Kuva 2. Tulo- ja lähtösignaalien suhde

Suureiden välisten riippuvuuksien kuvaamiseksi ei välttämättä tarvita yhtälöillä ja parametreilla kuvattavaa mallia, vaan riippuvuus voidaan kuvata myös yksikäsitteisen "graafisen kuvaajan" avulla. Jos halutaan analysoida säätöpiirin toimintaa tarkemmin, joudutaan molempia mallityyppejä käsittelemään.

Säädin valitaan prosessimallin ja säädön suunnittelutavoitteiden mukaisesti. Mitä yksinkertaisempi malli on, sen helpommaksi tulee säätimen viritys. Jos kohdejärjestelmä pyritään kuvaamaan tarkasti, niin järjestelmän malli muodostuu monimutkaiseksi. Usein sopiva säätösuunnitelun malli saadaan laajemmasta mallista tarkastelemalla vain tiettyä yksittäistä (tai useampaa) toimintapistettä.

Esimerkki matemaattisesta mallintamisesta

Järjestelmän matemaattinen kuvaus voidaan johtaa fysikaalisten yhtälöiden perusteella. Kaikkien fysikaalisten yksityiskohtien huomioonottaminen saattaa olla erittäin vaikeaa (jopa mahdotonta). Järjestelmän tarkka kuvaus ei suinkaan ole välttämätöntä säätötekniikan kannalta vaan jonkinlainen likimääräistys vaikutussuhteista on usein riittävä. Mallin likimääräistys ja yksinkertaistus edellyttää tekijältään ko. järjestelmän tuntemusta. On tiedettävä, mitä tekijöitä voidaan jättää pois tarkasteluista.

Dynaamisen järjestelmän käyttäytymistä kuvaavat yhtälöt luodaan fysikaaliselle järjestelmälle jonkin tasapainoehdon (hetkellinen tasapaino) perusteella;

- ainemäärän tasapaino (tilavuus, massa, mooli): ainemäärän hetkellinen muutos on tulevan ja lähtevän ainemäärän erotus
- voimatasapaino eli Newtonin 2. laki (lineaariliikessä voima [N], pyörivässä liikkeessä vääntömomentti [Nm]): kappaleen liiketilan (nopeuden) hetkellinen muutos määräytyy suoraan kappaleeseen kohdistuvien voimien summana
- energian (lämpömäärä) tasapaino: hetkellinen lämpötilan muutos riippuu tulevan lämpömäärän ja lähtevän lämpömäärän erotuksesta
- sähkövirran tasapaino Kirchhoffin 1. ja 2. laki: liitokseen tulevien ja lähtevien sähkövirtojen hetkellinen summa on nolla (Kirchhoffin 1. laki, virtalaki); suljetussa virtasilmukassa olevien komponenttien yli olevien hetkellisten jännitearvojen summa on sama kuin piiriin annettu sähkömotorinen voima (Elektro Magnetic Force, emf).

Tarkastellaan esimerkkinä säiliötä, jonka pinnankorkeus L riippuu tulevan tilavuusvirtauksen F_{in} ja lähtevän tilavuusvirtauksen F_{out} välisestä erosta ja säiliön pohjan pinta-alasta A . Säiliön tilavuus V on pohjan pinta-ala kertaa korkeus, joten tilavuuden muutos on pohjan pinta-ala kertaa korkeuden muutos. Tilavuuden muutos taas aiheutuu tulevan ja lähtevän virtauksen eroista. Nyt voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d(AL)}{dt} = A \frac{dL}{dt} = F_{in} - F_{out}$$

Yhtälö kuvaa (äärettömän lyhyen ajanjakson dt verran) säiliön nestetilavuuden hetkellistä muutosta, joka on tietenkin sama kuin hetkellinen tulevan ja lähtevän virtauksen (tilavuusvirtaus) erotus. Jos säiliö on avonainen ja poistoputki on lyhyt, lähtövirtaus F_{out} on riippuvainen venttiilin yli olevasta paine-erosta $\Delta p = \rho \times g \times L$ (hydrostaattinen paine, missä ρ on nesteen tiheys kg/m^3 , g on gravitaatiovakio $9,81 \text{ m/s}^2$ ja L on pinnankorkeus m),

$$F_{out} = C_v \sqrt{\rho g L}$$

Virtausvakio C_v riippuu venttiilin avaumasta (eli säätimen ohjauksesta). Tarkastelemalla vain yhtä kiinteää C_v -arvoa havaitaan, että eri pinnankorkeuden L arvoilla järjestelmän dynamiikka muuttuu johtuen lähtövirtauksen riippuvuudesta, siis pinnankorkeuden L neliöjuuresta.

Vertaamalla 1 m suuruista pinnankorkeuden muutosta välillä 1 - 2 m ja välillä 3 - 4 m havaitaan, että lähtövirtaus ei suinkaan muuttunut samassa suhteessa: välillä 1 - 2 m muutoksen suhden on $\sqrt{2}/\sqrt{1}$ 0,414 ja välillä 3 - 4 m vastaavasti $\sqrt{4}/\sqrt{3}$ 0,268. Koska lähtövirtaus vaikuttaa yhtälön tasapainotilaan ja muutosnopeuteen, prosessi käyttäytyy eri tavalla eri pinnankorkeuden arvoilla. Toisin sanoen prosessin malli on *epälineaarinen*.

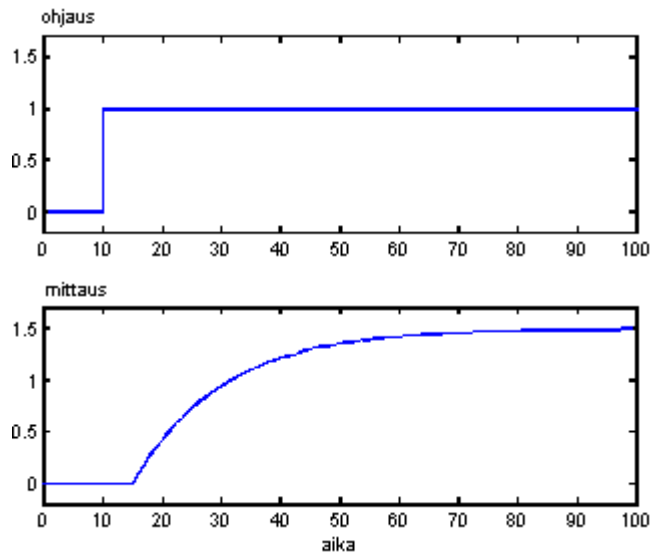
Toinen tapa lähestyä prosessin mallintamista on kokeellinen mallintaminen, jossa suoritetaan erityyppisiä prosessikokeita, ja saadun mittausdatan avulla haetaan soveltuva prosessimalli. Seuraavassa käsitellään yksinomaan tätä lähestymistapaa, sillä viritystyökalut perustuvat tähän.

Askelvaste

Yksinkertaisin ja teollisuudessa yleisin tapa kuvata järjestelmän käyttäytymistä on askelvaste. Askelvaste saadaan syöttämällä järjestelmään askelmainen heräte ja mittaamalla järjestelmän lähtö. Askelvastekoetta käytetään sekä matemaattisen mallin parametreja määriteltäessä että suljetun säätöpiirin toiminnan testaamisessa. Kun askelkoe tehdään ohjaussignaaliin säätimen ollessa käsiajolla, tarkastellaan vain prosessin käyttäytymistä. Jos taas muutos tehdään asetusarvoon säätimen ollessa automaattilla, tarkastellaan koko säätöpiirin toimintaa, erityisesti viritysparametrien vaikutusta. Seuraavankaltaisia vasteita voidaan saada askelmaiseen herätteeseen.

Yhden aikavakion prosessit

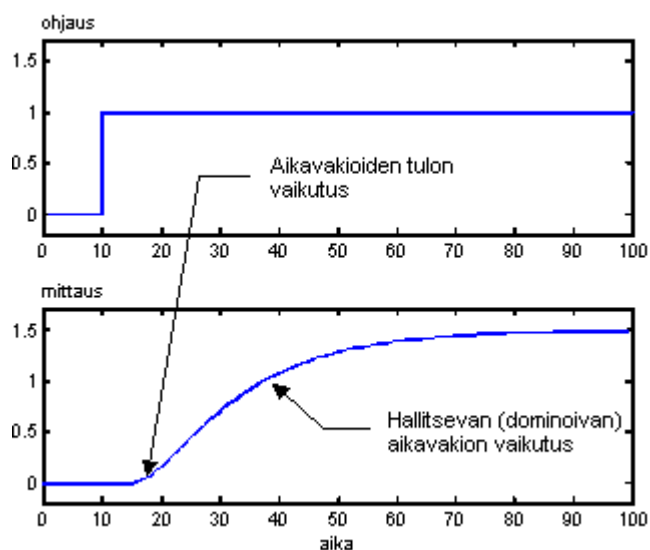
Usein tyypillistä teollisuusprosessia voidaan kuvata riittävällä tarkkuudella yhdellä aikavakiolla (Kuva 1). Todellisuudessa prosessi voi olla monimutkaisempi, mutta tällä yksinkertaistuksella pärjätään useimmissa tapauksissa. Aikavakiolla kuvataan järjestelmän dynaamista nopeutta. Kyseessä on dynaaminen ilmiö, eli prosessissa tapahtuu *varastoitumista*. Esimerkiksi lämpötilan säätö on usein tällainen. Kuvatuissa systeemeissä on lisäksi viiden sekunnin viive.



Kuva 1. Yhden aikavakion prosessin askelvaste

Usean aikavakion prosessit

Useamman aikavakion prosessit ovat hyvin tyypillisiä prosesseja. Virtaus- ja painepiirit ovat usein tällaisia, samoin jotkut lämpötilansäätöpiirit. Usean aikavakion prosessit koostuvat peräkkäisistä, rinnakkaisista tai tietyin ehdoin takaisinkytketyistä yhden aikavakion prosesseista. Tässä yhteydessä tarkastellaan tilannetta, jossa aikavakiot ovat sarjaankytketty, esim. toimilaitte ja prosessi. Monesti tällainen malli voidaan korvata yhdellä aikavakiolla ja viiveellä. Askelvastekuvaaja näyttää hyvin samanlaiselta kuin yhden aikavakion prosessilla, mutta toinen (tai useammat) aikavakiot näkyvät askeleen muutoshetkellä, prosessi lähtee rauhallisemmin liikenteeseen (Kuva 2). Kun tarkoitetaan hallitsevaa aikavakiota, puhutaan ns. *dominoivasta* aikavakiosta, jonka vaikutus prosessin käyttäytymiseen on merkittävin. Toinen, nopeampi aikavakio "kuolee" pois eikä se näy vasteessa kuin hetken. Usein todelliset askelvasteet näyttävät tällaisilta. Kohinaisista signaaleista voi kuitenkin olla vaikea määrittää pienempää aikavakiota, joten usein käytetään yhden aikavakion ja viiveen mallia. Näiden kahden (tai useamman) aikavakion suhde sekä mallin käyttötarkoitus määrää sen, onko tarpeen tarkastella toista aikavakiota lainkaan, vai voiko sen olemassaolon unohtaa. Esimerkiksi toimilaitetta voidaan kuvata yhdellä aikavakiolla. Nyt tarkasteltaessa yhdistelmää toimilaitte + prosessi joudutaan miettimään onko toimilaitteen dynamikka otettava mukaan tarkasteluun, vai onko se riittävän nopea verrattuna prosessiin, jolloin se voidaan unohtaa.

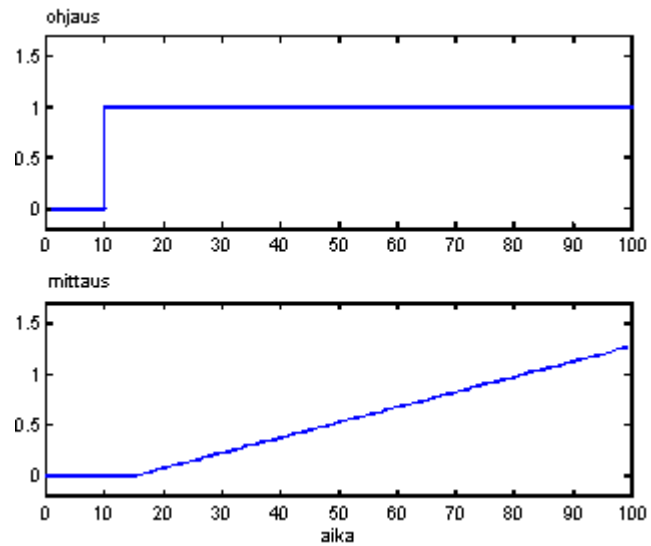


Kuva 2. Kahden aikavakion prosessin askelvaste

Integroivat prosessit

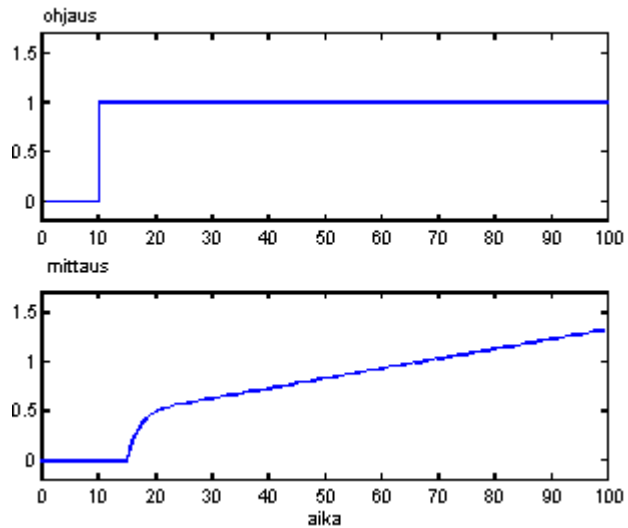
Useimmat prosessiteollisuuden prosessit ovat stabiileja, eli askelmuutoksen jälkeen prosessin vaste suppenee johonkin uuteen loppuarvoon. Tämän lisäksi on prosesseja, jotka käyttäytyvät *integraivasti*. Kun prosessin ohjaukseen tehdään askelmainen muutos, prosessin lähtö kasvaa suoraviivaisesti kunnes prosessin rajat tulevat vastaan, esimerkiksi säiliö täyttyy (Kuva 3). Tulosuureen ollessa vakio, prosessin tila muuttuu ajan mukana. Tyypillisesti

pinnankorkeus on tällainen. On huomattava, että välttämättä kaikki pinnankorkeuden säätöpiirit eivät ole integroivia. Jos poistovirtaus on vakio (= pumppu), tulovirtauksen muutos aiheuttaa pinnankorkeuden muuttumisen ajan mukana. Jos taas säiliön poistovirtaus riippuu vain nesteen omasta massasta, pinnankorkeus on tavallinen yhden aikavakion prosessi. Nyt aikavakio isoilla säiliöillä tulee suureksi. Pinnankorkeuden lisäksi tyypillinen esimerkki on asento, toisin kuin jos tarkasteltaisiin nopeutta.



Kuva 3. Integroivan prosessin askelvaste

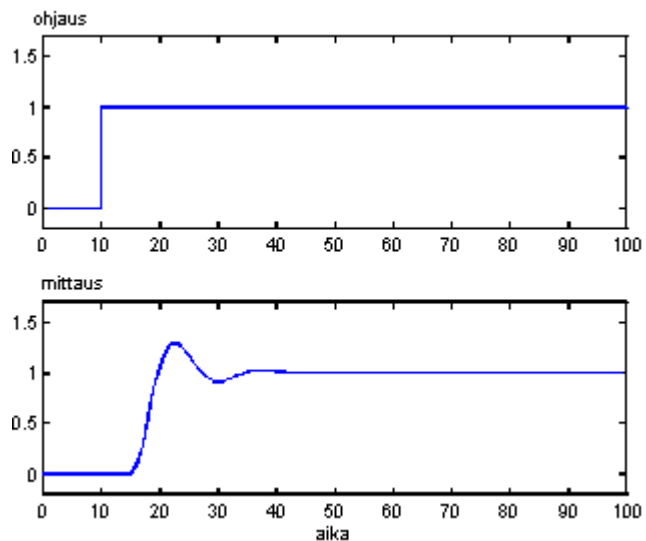
Integroivien prosessien yhteydessä tavataan myös joskus tapauksia, joissa prosessi reagoi voimakkaasti ohjauksen askelmaiseen muutokseen, ja sen jälkeen se käyttäytyy kuin "normaali" integroiva prosessi (Kuva 4). Tällaisia prosesseja löytyy esim. voimalaitosympäristön paineensäädöistä.



Kuva 4. Integroivan prosessin askelvaste, joka reagoi voimakkaasti ohjausmuutokseen

Värähtelevät prosessit

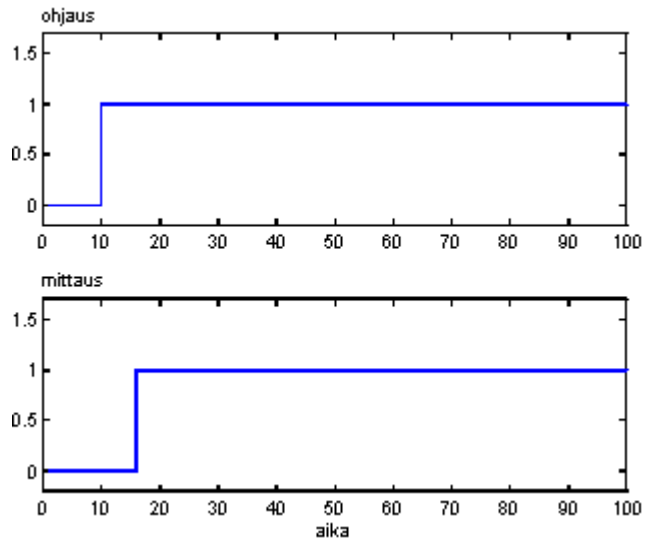
Värähtelevät prosessit ovat harvinaisempia prosessiteollisuudessa, tyypillistä niille on värähtely ennen asettumista loppuarvoonsa (Kuva 5). Yksi esimerkki on konsentraationsäätö nesteiden kierrätyksessä (palautusvirtaukset). Mekaanisissa järjestelmissä tämä on jo huomattavasti tyypillisempi ilmiö, johtuen kokoonpuristuvista materiaaleista, joustoista mekaanisista laitteista yms. Värähtelevistä prosesseista puhuttaessa on tärkeää tehdä selväksi onko kyseessä avoimen- vai suljetun piirin tilanne. Värähtelevä vaste käsiajolla tehtyyn askeleeseen on prosessiteollisuudessa harvinainen, mutta suljetulla piirillä ja väärällä säätimen virityksellä useimpien piirien vasteet saadaan kyllä värähtelemään.



Kuva 5. Värähtelevän prosessin askelvaste

Kuolleen ajan prosessit

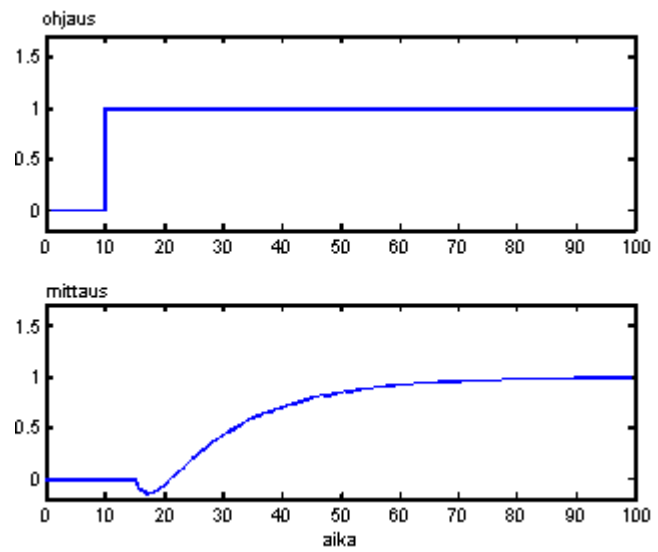
Viiveelliset eli kuolleen ajan prosessit kuvaavat järjestelmiä, jossa mittaus reagoi ohjaukseen tietyn viiveen jälkeen (Kuva 6). Tässä esimerkissä prosessilla ei ole muuta dynamiikkaa, vaan sen malliksi riittää pelkkä kulkuaikaviive. Usein viive on kuitenkin yhdistettynä prosessin dynamiikkaan kuten aikaisemmissa askelvastekuvaajissa. Tyypillinen puhtaan viiveen prosessiesimerkki on kuljetin. Kun kuljettimen alkupäässä syötetään tavaraa kuljettimelle, havaitsee loppupäässä oleva mittaus syötteen samansuuruisena, mutta tietyn viiveen jälkeen. Prosessiteollisuudessa viivettä aiheuttaa toimilaitteen ja anturin välinen etäisyys, mittalaitteen oma hitaus ja signaalien suodatus. Viive on säätötekniikan kannalta ongelmallinen, sillä sen kompensoimiseksi ei ole monia menetelmiä. Viiveelle vastakkainen operaatiohan on ennustaminen. Lisäksi viive on usein muuttuva suure, kuljetinesimerkissä kuljettimen nopeus vaikuttaa viiveeseen. Sama ongelma tulee esille sakeussäätöjen yhteydessä, jossa virtausnopeuden muutokset näkyvät suoraan kulkuaikaviiveen muutoksena.



Kuva 6. Pelkän kuolleen ajan (viiveen) prosessin askelvaste

Ei-minimivaiheiset prosessit

Tämä prosessityyppi on huomattavasti edellisiä harvinaisempi. Prosessi käyttäytyy kuin joku edellä mainituista prosessityypeistä, mutta askelmuutoksen jälkeen mittaus lähtee aluksi hetken aikaa "väärään" suuntaan (Kuva 7). Yksi esimerkki on höyrykattilan lieriön pinnankorkeuden säätö. Yksinkertaisimmillaan ei-minimivaiheinen käyttäytyminen korvataan pelkällä ylimääräisellä viiveellä.



Kuva 7. Erään ei-minimivaiheisen prosessin askelvaste

Yksinkertaisen prosessimallin määrittely

Askelvastekokeen järjestäminen on yleensä helppoa. Järjestelmän viive, jatkuvuustilan vahvistus ja aikavakio muodostavat yhdessä yksinkertaisen mutta käyttökelpoisen prosessimallin. Näiden kolmen malliparametrin määrittely on melko yksinkertaista askelvastekokeesta (Kuva 1).

Viive L (kuollut aika) on se aika, jolloin prosessi ei reagoi ohjaussignaalin muutokseen. Viiveettömässä prosessissa tulosuureen muutos aiheuttaa välittömän lähtösuureen muutoksen.

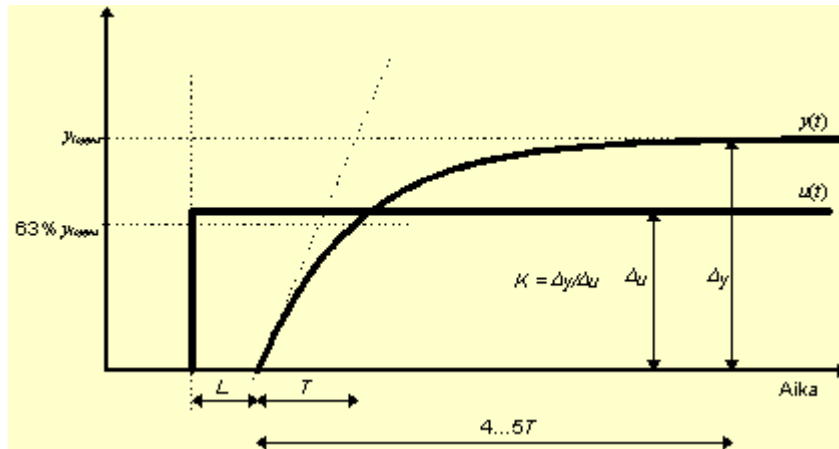
Prosessimallin *vahvistus K* on mittaussignaalin muutoksen *delta y* ja ohjaussignaalin muutoksen *delta u* suhde tasapainotilassa. On huomattava, että molempien signaalien täytyy olla samassa skaalassa, joten todelliset signaalit täytyy usein skaalata ohjauksen- ja mittauksen ylä- ja alarajojen suhteen, siis esim.

$$PV_{skaalattu} = \frac{PV - PV_{min}}{PV_{max} - PV_{min}}$$
$$CO_{skaalattu} = \frac{CO - CO_{min}}{CO_{max} - CO_{min}},$$

missä *PV* on mittaus, *CO* on ohjaus ja alaindeksi *min* tarkoittaa alarajaa, *max* ylärajaa. Askelvasteesta voidaan määrittellä suoraan vasteen nousunopeuteen (järjestelmän nopeuteen) verrannollinen *aikavakio T*. Aikavakion arvioimiseksi on useita menetelmiä. Jos piirretään suora jyrkimpään nousukohtaan, saadaan tämän suoran ja lopputason leikkauspisteen kohdalta aikavakio. Toinen tapa on arvioida aikavakio 63% nousuajan kohdalta. On muistettava, että viive *L* ei kuulu mukaan tähän aikaan. Prosessin asettumisaika (esim. mittaus pysyvästi +/- 1% loppuarvosta) on noin 4 ... 5 kertaa aikavakion suuruus plus viive. Oheisen yhden aikavakion vasteen (Kuva 1) yhtälö aikatasossa voidaan esittää

$$y(t) = K(1 - e^{-t/T}),$$

jossa muuttujat *t* = aika, *K* on vahvistus ja *T* on aikavakio. Tästä voidaan laskea muutamia erikoistapauksia, esim. $y(T) = 0,632K$, $y(0) = 0$, $y(\infty) = K$ ja $y(5T) = 0,993K$.



Kuva 1. Yhden aikavakion ja viiveen prosessimallin määrittely askelvastekuvaajasta

Perinteisesti PID-säätimen yksinkertaisessa virityksessä käytetyt mallit ovat olleet yhden aikavakion ja viiveen muodostamia *siirtofunktiota*. Tässä yhteydessä siirtofunktioita käytetään merkintätapana prosessimalleille, eikä niiden perustana olevaa *Laplace*-muunnosta eikä itse siirtofunktioiden taustaa esitellä enempää. Siirtofunktiota voidaan kuitenkin pitää reaalityyppisenä "suhdelulukuna". Liitteessä on matemaattisista muunnoksista ja siirtofunktioista hieman lisätietoja. Lohkokaaviossa siirtofunktio sijoitetaan lohkon sisään. Se kuvaa signaalimuutoksia kyseisen lohkon sisällä. Aikavakio muodossa olevan siirtofunktion $G(s)$ vahvistus on K , aikavakio T ja viive (kuollut aika) L . Siirtofunktiossa esiintyvä muuttuja s on ns. Laplace-muuttuja. Yhden aikavakion ja viiveen prosessimalli esitetään ohjauksen- ja mittauksen Laplace-muunnosten suhteena siirtofunktiona

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-sL}}{Ts + 1}$$

Tämä siirtofunktioityyppi voidaan toki esittää useassa eri muodossa, esimerkiksi

$$G(s) = \frac{e^{-sL}}{as + b} = \frac{1}{\frac{a}{b}s + 1} = \frac{1}{s + \frac{b}{a}} = \frac{Ke^{-sL}}{Ts + 1}$$

ExperTune-ohjelmisto käyttää näistä ensimmäistä muotoa. Myös kahden aikavakion ja viiveen malleja voidaan kuvata siirtofunktioilla, nyt kuvitellaan

kaksi yhden aikavakion (T_1 ja T_2) järjestelmää sarjaankytketyksi. Tätä kuvaava siirtofunktio on

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

Jos askelvaste on värähtelevä, voidaan tiettyjä tunnuslukuja katsoa vasteesta. Nämä esitellään myöhemmin.

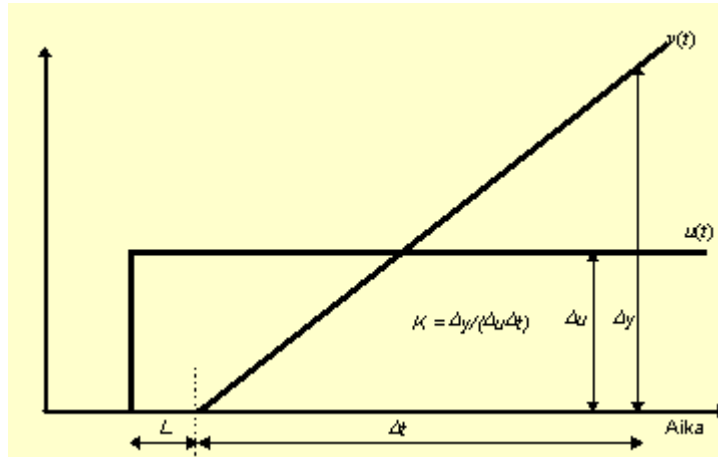
Integroivien prosessien yhteydessä saadaan hieman erilaisia tuloksia (Kuva 2). Integroivan prosessin siirtofunktio esitetään muodossa

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{s}$$

Vahvistus on suoraan kuvaajan kulmakerroin $1/s$, jos tulosignaali on yksikköaskeleen suuruinen. Vahvistuksen lukuarvo on usein pieni teollisuusprosessien tyypillisillä skaalauksilla, ja tämä saattaa aiheuttaa pyörityksistä yms. laskennallisista seikoista johtuvia ongelmia. Integroivien prosessien yhteydessä saattaa olla mukana myös aikavakio, jonka vaikutus näkyy muutoshetken yhteydessä, prosessi lähtee "pehmeämmin" liikkeelle. Jos asiaa halutaan tarkastella siirtofunktion avulla, se voidaan esittää muodossa

$$G(s) = \frac{Ke^{-sL}}{s(Ts + 1)},$$

missä yksinäinen s nimittäjässä tarkoittaa integrointia ja $(Ts + 1)$ kuvaa yhtä aikavakiota.



Kuva 2. Integroivan prosessimallin parametrien määrittäminen

Mikäli integroivan prosessin vaste on värähtelevä (sinisignaali) säätimen ollessa automaattilla, voidaan prosessin vahvistus laskea helposti ohjaus- ja mittaussignaalin värähtelyn amplitudin ja jaksonajan perusteella

$$K = \frac{A_{PV}}{A_{CO}} \cdot \frac{2\pi}{P}$$

missä A_{PV} on mittaussignaalin värähtelyn amplitudi, A_{CO} on vastaava ohjaussignaalin amplitudi ja P on em. värähtelyn jaksonaika. Amplitudisuhteen laskennassa on otettava huomioon, että signaalit täytyy ennen suhteen laskemista skaalata mittausten ylä- ja alarajojen suhteen, jotta amplitudien suhde olisi yksikötön.

Aikasarjamallit

Eräs yleisesti käytetty vaihtoehto on soveltaa monipuolisempia mallin rakenteita tietokoneelle sopivassa muodossa. TuneUp-ohjelmisto perustuu kokonaan näihin malleihin. Digitaalisissa (= diskreeteissä) aikasarjamalleissa parametrit riippuvat käytetystä näytteenottovälistä. Tämä seikka vääristää tai hautaa alleen täysin aikajatkuvien mallien fysikaalisen merkityksen mallit muuttuvat vain sarjaksi vaikeasti tulkittavia, "merkityksettömiä" numeroita. Edellä kuvatut aikajatkuvat mallit voidaan muuttaa digitaalisiksi monella eri menetelmällä. Perusajatuksena tässä muunnoksessa on korvata malliin liittyvät integraali- ja derivointitermit digitaalisilla vastineilla.

Helpoin tapa luoda digitaalinen matemaattinen malli aikajatkuvasta yhtälömallista perustuu erotusosamäärän lausekkeen hyväksikäyttöön. Erotusosamäärän raja-arvo (kun $\Delta t \rightarrow 0$) määrittelee derivaatan matemaattisen käsitteen. Kun Δt saa äärellisen arvon, derivaatan erotusosamääräapproksimaatio on

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

Tämähän on tuttua jo digitaalisen PID-säätimen yhteydestä. Tarkastellaan esimerkkinä yksinkertaista pinnankorkeuden yhtälöä

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{A} (F_{in} - F_{out})$$

missä L on pinnankorkeus, A on säiliön pohjapinta-ala, F_{in} on tulovirtaus (tilavuusvirtaus) ja F_{out} on lähtövirtaus. Korvaamalla derivaatan lauseke erotusosamäärän lausekkeella ja käyttämällä näytevälinä Δt saadaan approksimaatioksi

$$\frac{L(k) - L(k-1)}{\Delta t} = \frac{1}{A} (F_{in}(k) - F_{out}(k))$$

Jos pinnankorkeuden L uutta arvoa päivitetään em. yhtälön mukaisesti, saadaan pinnankorkeudelle rekursiivinen yhtälö

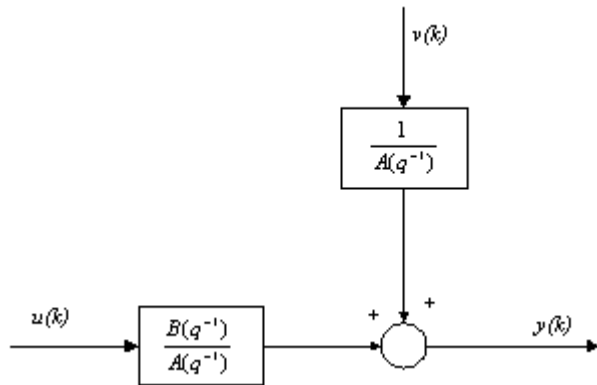
$$L(k) = L(k-1) + \Delta t \frac{1}{A} (F_{in}(k) - F_{out}(k))$$

eli pinnankorkeuden edelliseen arvoon summataan termi, joka riippuu virtausten erosta. Digitaalinen malli voidaan esittää myös siirto-operaattorin q^{-1}

$(q^{-1}u(k) = u(k - 1))$ avulla yleisessä muodossa

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d} B(q^{-1})u(k) + v(k),$$

missä d on kulkuviive ja $v(k)$ häiriösuure. TuneUp-ohjelma käyttää tällaista mallirakennetta. Häiriö $v(k)$ oletetaan tässä kohinatyyppiseksi häiriöksi. Jos järjestelmään vaikuttavaa häiriötä $v(k)$ ei erikseen oteta huomioon, puhutaan ns. ARX mallista. Jos kohinahäiriö myös mallitetaan, niin silloin puhutaan ns. ARMAX-mallista. Myös muita mallityyppejä voidaan määritellä. Monipuolisempi mallin rakenne mahdollistaa sen, että prosessin ja häiriön dynamiikka voidaan ottaa paremmin huomioon, mutta samalla se edellyttää vaativampia menettelytapoja mallin löytämiseksi. ARX-mallin rakenne voidaan esittää lohkokaaviona (Kuva 1). Tästä huomataan ARX-mallin heikkous, sillä häiriömalli on hyvin yksinkertainen. Toisaalta ARX-mallin yksinkertaisuuden vuoksi parametrien sovitus esim. pienimmän neliösumman menetelmillä muodostuu tietokoneella helpoksi.



Kuva 1. ARX-mallin rakenne

ARX-malli voidaan muuntaa algoritmimuotoon

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{na} y(k-na) = b_1 u(k-1) + \dots + b_{nb} u(k-nb) + v(k).$$

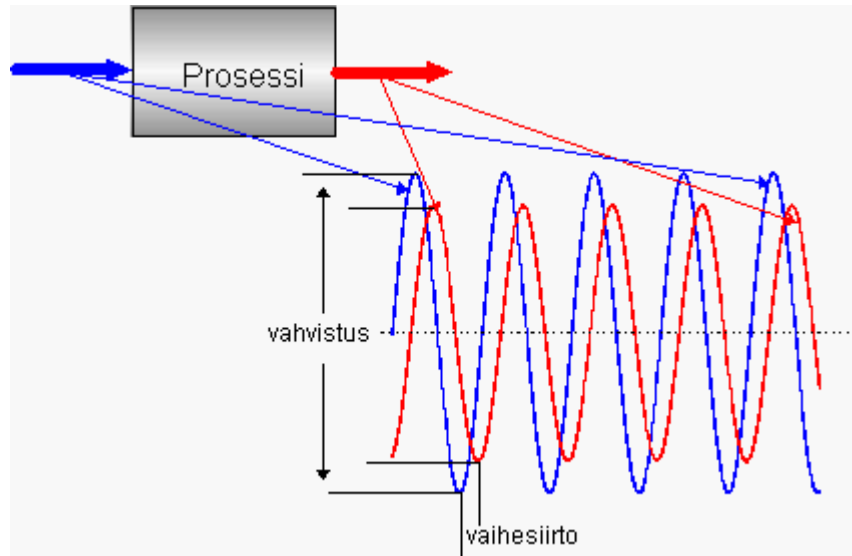
Kaavasta nähdään yhtälön *rekursiivisuus* (auto regressive), koska muuttujan y uusin arvo riippuu tulevan signaalin u lisäksi myös y :n vanhoista arvoista. Tästä voidaan päätellä, että tilanteessa, jossa järjestelmään syötetään hetkellä 0 nolasta poikkeava pulssin arvo, pulssin vaikutus ei katoa lähdöstä edes äärettömän pitkän ajan kuluttua.

Tässä muodossa useat simuloinnissa ja säätötekniikassa käytetyt ohjelmistot (esim. TuneUp ja MATLAB) käsittelevät malleja. Käyttäjän valittavaksi

jää kuinka monta vanhaa ohjauksen ja mittauksen arvoa laskennassa käytetään sekä viive. Tämän jälkeen mallin kertoimien laskenta tietokoneella on helppoa, ja tulos voidaan esittää antamalla $a:n$ ja $b:n$ kertoimet. Usein kertaluvun yläraja on rajoitettu (esim. 3-4 parametriä), jottei mallista tule ns. yliparametrisoitua. Mitä enemmän malliparametrejä lasketaan, sitä paremmin malli sovituu kyseiseen dataan. Periaatteessa, jos mallin parametrejä kasvatetaan yhtä suureksi kuin datassa on mittauspisteitä, saadaan malli jossa virhettä ei ole lainkaan! Näin saatu malli on kuitenkin hyödytön, sillä malli kuvaa ainoastaan laskennassa käytettyä datajoukkoa, ei mitään muuta. Säädeteknisiin tarkoituksiin riittää loppujen lopuksi yllättävänkin yksinkertaiset mallit.

Taajuusvaste

Syöttämällä prosessiin jatkuvaa sinimuotoista tulosignaalia muodostuu lähtöön transienttivaste ja jatkuvuustilan vaste. Dynaaminen ominaisuus aiheuttaa transienttivasteen, joka häviää stabiileilla järjestelmillä ajan kuluessa. Kun transienttivaihe on mennyt ohi jää jäljelle jatkuvuustilan vaste. Tätä kutsutaan *taajuusvasteeksi*. Tutkimalla jatkuvuustilan vastetta erilaisilla tulosignaalien taajuuksilla saadaan perusteet taajuusvasteeseen perustuvaan analyysiin (Kuva 1).

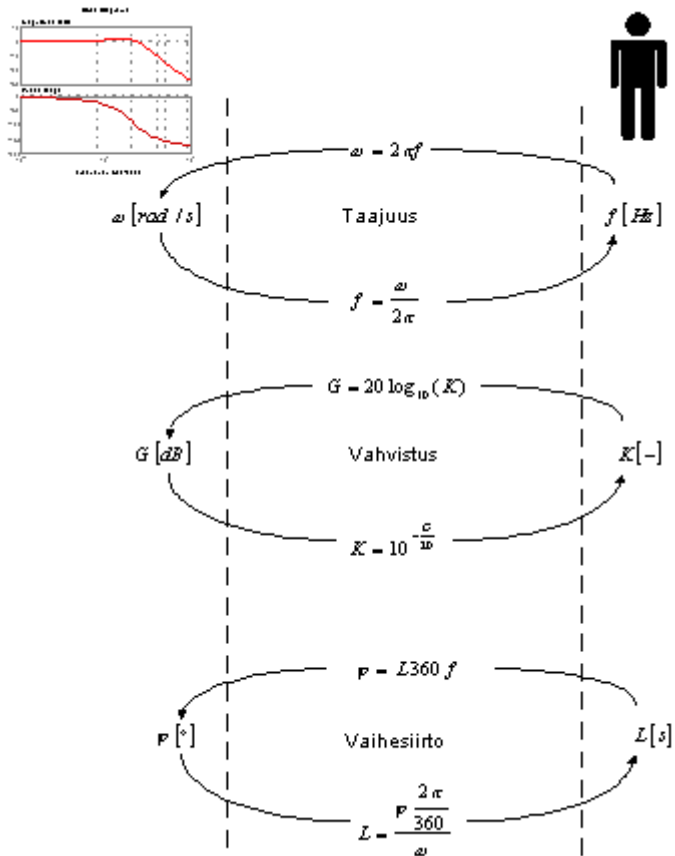


Kuva 1. Taajuusvaste

Syöttämällä sinimuotoista tulosignaalia järjestelmään (vakio taajuus, vakio amplitudi) havaitaan lähdössä samantaajuinen sinisignaali, joka on hieman *vaimentunut* ja *viivästynyt* prosessissa. Mittaamalla tulosignaalin taajuus ja vasteen vahvistus/vaimennus sekä vaihesiirto saadaan perusteet taajuusanalyysille, kun tulosignaalin taajuutta muutetaan ja mittaukset uusitaan jokaisen taajuuden muutoksen jälkeen. Näin saadut mittaukset voidaan esittää graafisesti monella eri tavalla, esim. Bode, Nyquist tai Nichols -diagrammin muodossa. Tarkastellaan tässä yhteydessä vain *Bode*-diagrammia, koska esim. ExperTunen prosessimalli perustuu tähän graafiseen esitykseen.

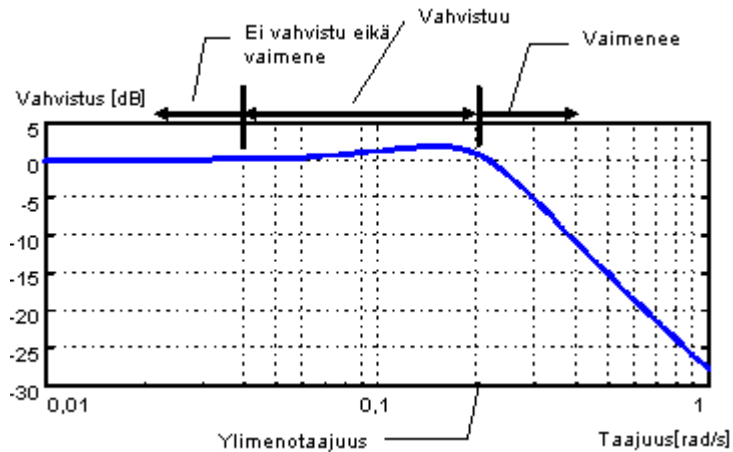
Bode-diagrammi muodostuu kahdesta kuvaajasta, vahvistus- ja vaihekäyrästä. Vaaka-akselina on kulmataajuus omega *radiaaneissa* (yksikkö rad/s), taajuus ilmoitetaan siis yksikössä radiaania sekunnissa ($2\pi \text{ rad} = 360 \text{ astetta}$ eli yksi kierros sekunnissa Hz). Vahvistuskäyrä esitetään yleensä desibeleissä dB ja vaihekäyrä ilmoitetaan asteina. Bode-diagrammissa esiintyvät yksiköt rad/s, dB ja asteet voidaan muuttaa tutumpaan muotoon (Kuva 2). Kuvassa vasemmalla on Bode-diagrammissa esiintyvät yksiköt sekä tarvittavat muunnoskaavat taajuudelle, vahvistukselle ja vaihesiirrolle. Kun

Bode-diagrammista esiintyvä luku halutaan muuttaa toiseen yksikköön, käytetään vasemmalta oikealle kulkevan nuolen kohdalla olevaa kaavaa. Muunnos toistepäin menee luonnollisesti oikealta vasemmalle.



Kuva 2. Bode-diagrammissa esiintyvien yksiköiden muuttaminen tutumpaan muotoon

Tarkastellaan erästä esimerkkiä taajuusvasteen vahvistuskäyrästä (Kuva 3). Taajuudet ja vahvistukset voidaan muuttaa em. kaavojen avulla yksiköstä toiseksi, siis esimerkiksi seuraavan taulukon mukaisesti (Taulukko 1). Hitaat ilmiöt (vasen reuna, $\omega < 0,04$ rad/s) kulkevat järjestelmän lävitse sellaisenaan vahvistumatta tai vaimentumatta. Keskitajuudet ($0,04 < \omega < 0,2$ rad/s) vahvistuvat, ja nopeat ilmiöt (suuret taajuudet, $\omega > 0,2$ rad/s) vaimenevat. Kuvaajassa 0 dB tarkoittaa siis vahvistusta yksi.



Kuva 3. Taajuusvasteen vahvistukäyrä

Edellä nähty käyttäytyminen kuvaa *alipäästösuodatinta*, jossa hitaat muutokset kulkeutuvat järjestelmän lävitse sellaisenaan, mutta nopeita muutoksia systeemi alkaa vaimentamaan eli suodattamaan. Useat teollisuusprosessit käyttäytyvät tällä tavoin, esimerkiksi suuria säiliöitä käytetään juuri vaimentamaan virtauksissa esiintyviä vaihteluita.

<i>Taajuus</i>	<i>Vahvistus</i>
0,01 rad/s = 0,00159 Hz jaksonaika = 628 s	5 dB = 1,778
0,05 rad/s = 0,00796 Hz jaksonaika = 126 s	0 dB = 1
0,2 rad/s = 0,03183 Hz jaksonaika = 31 s	-10 dB = 0,316
1,0 rad/s = 0,15915 Hz jaksonaika = 6 s	-30 dB = 0,032

Taulukko 1. Esimerkkitaajuuksia ja vahvistuksia eri yksiköissä ilmoitettuna

Taajuusvasteesta voidaan määrittellä eräitä tärkeitä suureita: vahvistuksen ja vaiheen ylimenotaajuudet sekä vahvistus- ja vaihevarat. *Vahvistuksen ylimenotaajuudella* vahvistuskäyrä leikkaa 0 dB linjan, ja *vaiheen ylimenotaajuuden* kohdalla vaihekäyrä leikkaa -180 astetta. *Vahvistusvara* kuvaa kuinka paljon piirin vahvistusta voidaan lisätä ennenkuin piiri muuttuu epästabiiliksi ja vastaavasti *vaihevara* kuvaa kuinka paljon vaihesiirto voi kasvaa ennenkuin piiri muuttuu epästabiiliksi. Nämä tunnusluvut lasketaan ohjelmistoissa automaattisesti käyttäjälle.

Eräs syy taajuusvasteen esittelyyn on se, että ExperTune-ohjelmistossa mallintaminen perustuu em. tyyppiseen taajuusvasteeseen. Käyttäjälle piirretään

kaksi vahvistus- ja vaihekäyrää: toinen perustuu malliin ja toinen suoraan mittausdataan. Mallin hyvyys arvioidaan näiden kuvaajien perusteella.

Tyypillisimmät prosessikokeet

Yleistä prosessikokeista

Tässä yhteydessä mallintaminen perustuu järjestelmästä kerättyyn mittausdataan. Tätä kutsutaan *identifioinniksi*. Säätimen tehtävänä on mitattujen ja laskettujen signaaleiden avulla ohjata prosessia niin hyvin kuin mahdollista. Jotta säätösuunnittelun tulos vastaa tavoitteita on tietysti tunnettava kohdejärjestelmän ominaisuudet, näitä tietoja tarvitaan luonnollisesti myös säädön tavoitteiden määrittelemiseen. Signaalin käsittelyn ja analyysin menetelmät tarjoavat tätä varten erinomaisia apuvälineitä. Tyypillisiä tutkittavia asioita ovat:

1. häiriöiden vaikutustiet ja -tyypit
2. prosessisuureiden riippuvuuksien ja toiminnallisten rajoitusten selvittäminen
3. prosessin käyttäytymisen mallintaminen
4. säätöpiirin toimintakyvyn arviointi.

Jotta kohdejärjestelmästä saataisiin mittausten avulla tehokkaasti informaatiota, joudutaan järjestelmän normaalitoimintaa jollain tavalla häiritsemään. Yleensä tämä ei onnistu ilman erillistä prosessikoetta, sillä piirin normaalissa toiminnassa ei ole riittävästi muutoksia. Nythän ollaan kiinnostuttu nimenomaan muutostilanteiden hallinnasta, ja niitä pitää keinotekoisesti luoda prosessikokeen avulla. Jos asetusrvo on useasti muuttuva ja mittausdataa kerätään tarpeeksi pitkään, on periaatteessa mahdollista tehdä prosessimalli näinkin. Kuitenkin viritystyökalujen generoimat testisignaalit ovat automaattisesti oikeanlaisia mallintamista varten, joten niitä kannattaa ilman muuta käyttää. Tavallisesti järjestelmään syötetään testisignaali (tai -signaaleita):

- askelheräte (tyypillisin erityisesti prosessiteollisuudessa), helpoin suorittaa, mitata ja analysoida
- impulssiheräte (pulssiheräte), esimerkiksi viipymäaika mittaukset
- sinimuotoinen heräte, hitailla prosesseilla vaikea suorittaa kattavasti
- pulssijono, helppo suorittaa
- satunnaispulssijono, PRBS (Pseudo Random Binary Signal) melko helppo suorittaa, turvallinen koska amplitudi rajoitettu, tilastollisessa mielessä paras testisignaali.

Säätöpiirin toimintaa tarkasteltaessa prosessin testisignaalit yleensä summataan tasapainotilojen signaaliarvojen päälle. Toisin sanoen tarkastellaan testisignaaleiden aiheuttamia muutoksia tasapainotilojen ympäristössä. Testisignaalin asianmukainen suunnittelu ja sen toteutus määräävät signaaleiden käytännön "hyödyllisyyden", sillä etsittävä informaatio on piiloutuneena signaalin sisään.

Signaalinkäsittelyn menetelmät liittyvät oleellisesti myös säätöjen käytännön toteutuksiin (skaalaukset, liukuva keskiarvo, suodatus yms.), toisin sanoen ne ovat myös osa säätöpiirin suunnittelun kohdetta. Tarkastellaan tässä yhteydessä signaalin käsittelyn menetelmiä kuitenkin vain säätösuunnittelun apuvälineinä. Signaaleiden kelvollisuudesta on varmistuttava ennenkuin monet signaalianalyysin menetelmät kykenevät antamaan tarkoituksenmukaisia tuloksia. On selvítettävä mm.

- onko signaaleissa mittausalueen ulkopuolella olevia arvoja (mittausalueen rajausta)
- onko signaaleissa selvästi virheellisiä mittausarvoja (mittausarvojen korjaus)
- onko signaaleissa keskiarvo tai ryömintää, jotka häiritsevät tuloksen tarkkuutta ja joka olisi poistettava ennen analyysia
- mikä on tarkastelun kannalta mielenkiintoinen taajuusalue (suodatetaan taajuusalueen ulkopuolinen kohina pois signaaleista).

Askelkoe

Helpoin tapa prosessin määrittämiseksi perustuu yksinkertaiseen askelvastekokeeseen ja prosessin parametrien sovittamiseen askelvasteesta. Askelvastekoe on helppo järjestää, eikä sen soveltaminen edellytä minimissään muuta kuin piirturitulosteen kokeesta, viivoittimen ja kynän. Monia virtaus- ja sekoitusprosesseja voidaankin kuvata sen avulla tyydyttävästi. Askelvastemallituksessa saadaan selville erityisen tarkasti jatkuvuustilan vahvistus, mutta säätöpiirin toiminnallisten ominaisuuksien analysoimisen suhteen se saattaa olla liian yksinkertainen. Kaikissa viritystyökaluohjelmistoissa on mahdollisuus askelvastekokeen suorittamiseen.

Automaattisesti tapahtuva mallin sovitus edellyttää, että koetilanteessa järjestelmään ei vaikuta merkittäviä häiriösuureita, koska yksi ainoa signaalitason muutos ei tilastollisessa mielessä pysty tuottamaan riittävän luotettavaa tietoa mallin sovitusta varten. Käytännön olosuhteissa häiriöttömyyttä on vaikea taata, jolloin mallin sovituksessa käyttäjä saattaa joutua muokkaamaan mittausdataa sen keräämisen jälkeen.

Yhden aikavakion ja viiveen prosessimallin avulla voidaan kuvata vain prosesseja, joiden askelvaste ei värähtele. Toisin sanoen esimerkiksi mekaaniset järjestelmät, joissa on värähtelyjä, jäävät auttamattomasti mallinnuksen ulkopuolelle. Tämä mallintamaton dynamiikka puolestaan saattaa aiheuttaa säädön vuritykseen ongelmia.

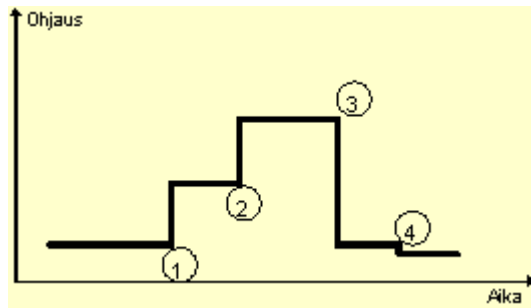
Askelvastekoe (Kuva 2) mallintamista varten suoritetaan seuraavasti:

1. laitetaan säädin *käsiajolle*
2. pyritään poistamaan piirissä esiintyvät kuormitushäiriöt
3. tehdään askelmainen muutos säätimen lähtöön (= toimilaitteen asentoon)
4. kerätään talteen sekä ohjaus että mittaussignaalia niin kauan, kunnes prosessi on asettunut uudelle tasolle.

Askelta tehtäessä on tärkeää muistaa, että askel on todellakin teräväreunainen. Kun koe suoritetaan automaatiojärjestelmän ohjauspaneelilta, kannattaa uusi ohjauksen arvo kirjoittaa valmiiksi ja hyväksyä se yhdellä kuittauksella. Jos ohjausta kasvatetaan pykälittäin (esim. nuolinäppäimien avulla), ei kysessä enää ole askelmainen muutos. Usein prosessit käyttäytyvät erilailla tehtäessä muutos ylös- tai alaspäin, esimerkiksi lämmitys ja jäähdytys saattavat erota prosesseina toisistaan huomattavasti. Tämän takia on tärkeää varmistua siitä, että malli kuvaa prosessin dynamiikkaa riittävän hyvin oli muutoksen suunta kumpi tahansa. Käytännössä tämä merkitsee siis useampien askelkokeiden tekemistä sekä ylös- että alaspäin.

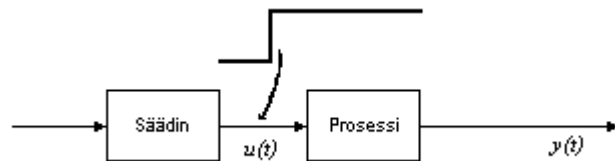
Tarkastellaan hieman monimutkaisempaa koejärjestelyä, jossa tehdään useita askelvasteita peräkkäin (Kuva 1). Käsiajolla tehdyssä ohjaussignaalisissa on neljä erillistä askelvastekoetta. Ensimmäisen askeleen tarkoituksena on poistaa välykset toimilaitteesta. Toinen askel on tarkoitettu varsinaiseen prosessin mallintamiseen, koska tässä tapauksessa toimilaitte liikkuu samaan suuntaan kuin ensimmäisessä askeleessa. Kolmannella askeleella voidaan tarkastaa toimilaitteen hystereesi, eli prosessisuureen tulisi olla samalla tasolla tämän askeleen jälkeen kuin ennen ensimmäistä askelta. Neljännellä askeleella voidaan arvioida kuinka pieniin ohjausmuutoksiin prosessi yleensä reagoi, eli muuttuuko mittaus pienien ohjausmuutosten jälkeen. Viiveet ovat usein säätöventtiileillä suuremmat kun ohjausmuutokset ovat hyvin pieniä, kuten asiaa käsiteltiin säätöventtiilien yhteydessä. Hystereesi

voidaan havaita prosessisuureista ilman mitään koettakaan, sillä värähtelyn jaksonaika kasvaa säätösuureen lähestyessä asetusrvoon, mikä venttiilissä on hystereesiä. Tämä johtuu em. seikoista, eli pienillä muutoksilla hystereesin vaikutus kasvaa lisääntyneen viiveen seurauksena. Tämä näkyy mittauksissa siis kasvavana värähtelyn jaksonaikana lähellä asetusrvoa. Kitka voidaan havaita toimilaitteesta jos askeleen sijasta käytetään ramppimaista ohjausta.



Kuva 1. Monimutkaisempi askelvasteseqvenssi, jolla voidaan analysoida prosessia ja toimilaitteita

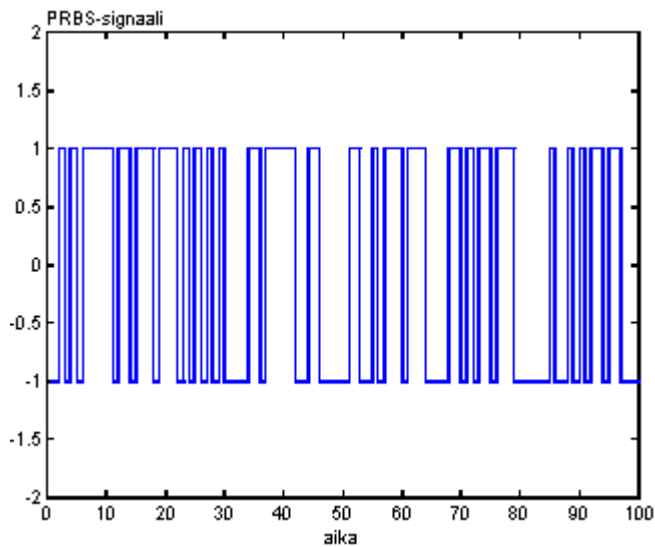
Jos askelkoe tehdään säätimen ollessa automaattilla, täytyy askel tehdä asetusrvoon. Tämä ei kuitenkaan ole mallintamisen kannalta paras tapa. Malli muodostetaan aina säätimen ohjauksen ja mittaussignaalin välille, ja asetusrvoon tehty askel "hukkuu" tällä matkalla. Vaikka viritystyökalu mahdollistaisikin prosessikokeen suorittamisen näin, ei sitä suositella mallintamiseen.



Kuva 2. Avoimen piirin askelkokeen suoritus, kun säädin on käsiajolla

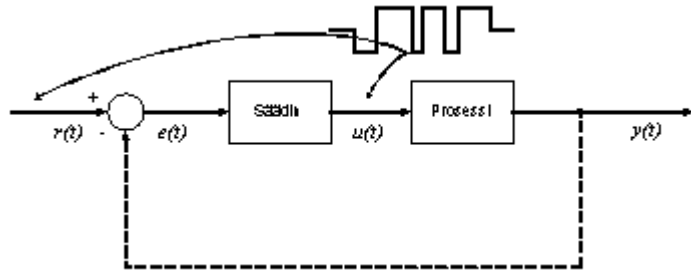
Satunnaispulssikoe

Aikasarjamallin parametrien sovittaminen edellyttää, että prosessille tehdään tilastollisessa mielessä kattava mallinnuskoe. Sovittamalla parametrit tulo- ja lähtösignaaliin löydetään sopivat mallit. Teoreettisessa mielessä paras testisignaali prosessikokeessa on PRBS-heräte (Pseudo Random Binary Signal). PRBS-herätettä käytettäessä saadaan tulosignaalin teho levitettyä tasaisesti kaikille kiinnostaville taajuuksille ja samalla voidaan tarkasti määrätä signaalin amplitudimuutokset ja signaalin tason arvo. Satunnaispulssikoe sisältää useita askeleita peräkkäin niin, että askeleet tehdään sekä ylös- että alaspäin. Näin testisignaali pysyy keskiarvoltaan nollassa. Pulssien pituus arvotaan satunnaisesti, siis joskus tulee lyhyitä pulsseja, joskus taas pulssi on ajallisesti pidempi (Kuva 1). PRBS-nimitys tulee siitä, että kerran näin arvottua signaalia kopioidaan peräkkäin riittävän pitkän testisignaalin aikaansaamiseksi (Pseudo Random, näennäissatunnainen).



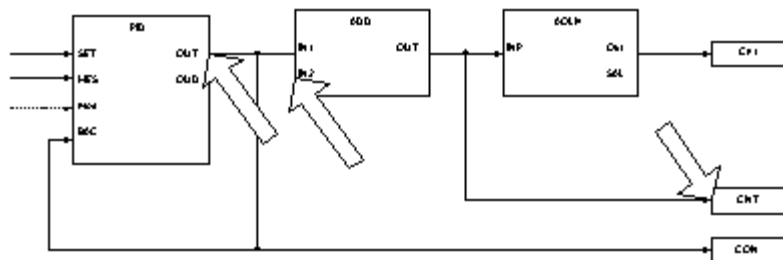
Kuva 1. Esimerkki PRBS-signaalista (tätä jaksoa kopioidaan riittävästi peräkkäin)

Satunnaispulssikoe voidaan tehdä joko käsiajolla tai säätimen ollessa automaattilla (Kuva 2). Paras malli saadaan, kun testi suoritetaan käsiajolla. Tämä vastaa järjestelyiltään askelkoetta, ainoastaan yhden askeleen sijasta tehdään useita askeleita peräkkäin.



Kuva 2. Satunnaispulsstikokeen suoritus. Testisignaali voidaan syöttää joko asetusrvoon tai summata säätimen ohjaukseen, säädin voi olla joko käsiajolla tai automaattilla

Käytännössä miellyttävämpi tapa on tehdä pulssikoe säätimen ollessa automaattilla. Jos säädin on automaattilla, on kaksi mahdollisuutta syöttää testisignaali: joko summata se ohjaussignaaliin tai asetusrvoon. Näistä ohjaussignaaliin summattava testi on parempi, tämä onnistuu automaattisesti TuneUp-ohjelmistolla Damatic XD -automaatiojärjestelmässä. Nyt säädin pystyy edelleen huolehtimaan niin kuormitushäiriöt, integroivat prosessit kuin asetusrvon muutostilanteet, eli säädin voi olla myös kaskaditilassa. Käytännössä tämä merkitsee prosessin turvallista hallintaa koko kokeen ajan. Tämä kuitenkin edellyttää, että säätimen ohjaukseen on mahdollista summata ylimääräinen signaali. Tähän tarkoitukseen käy erillinen bias-signaali tai myötäkäytökentäkanava, jos niille ei ole muuta käyttöä. Nämä löytyvät sellaisenaan esim. Damatic XD -automaatiojärjestelmästä. Alcont 3000 -järjestelmässä täytyy konfiguroida erillinen ADD -lohko, joka summaa testisignaalin säätimen ohjaukseen (Kuva 3).



Kuva 3. Esimerkki summauslohkon luomisesta Alcont 3000 -järjestelmään

Mikäli edellä kuvattu järjestely ei onnistu (esim. Damatic Classic -automaatiojärjestelmässä), on mahdollista käyttää asetusrvoa testisignaalin syöttämiseen tai tyytyä askelkokeeseen. Asetusrvoon syötetty testisignaali on kuitenkin huonompi vaihtoehto, sillä nyt säätimen parametrit vaikeuttavat soveltuvan mittausdatan keruuta. Tehtäessä esimerkiksi 5% muutos asetusrvoon, ei tiedetä kuinka suuri muutos (%) tapahtuu säätimen ohjauksessa, jos säätimen vahvistusta ei tunneta. Jos säätimen vahvistus on pieni, saattaa käydä niin että ohjaussignaalin muutokset eivät ole riittäviä. Toisaalta, jos säätimen vahvistus on suuri, testisignaali aiheuttaa turhaan rajuja ohjaustoimenpiteitä ja häiritsee niin mallinnusta kuin itse prosessia. Lisäksi säädin ei voi olla kaskaditilassa, vaan sen täytyy olla automaattitilassa.

Prosessikokeen suunnittelu ja toteutus

Mittausdatan esikäsittely ja koesuunnittelun perusteet

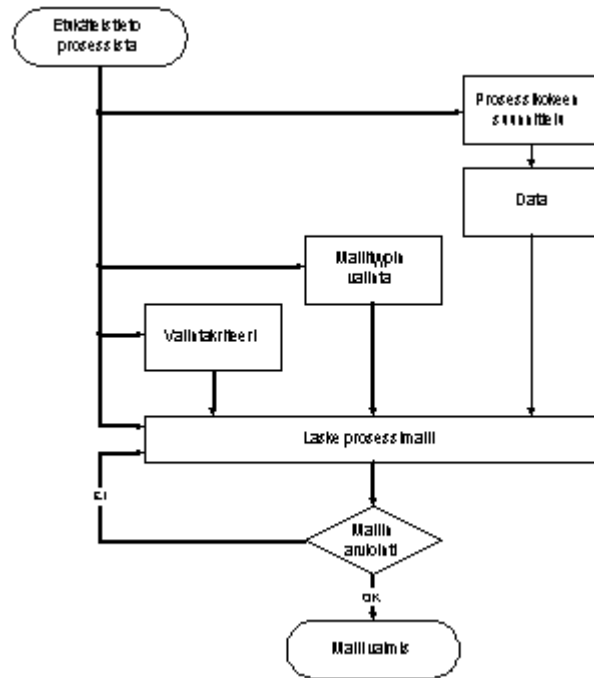
Mallintaminen on ensimmäinen vaihe kun analysoidaan prosessin käyttäytymistä ja suunnitellaan uusia säätöratkaisuja. Säätöpiirin vaatimuksia ja mallintamista ei voida erotella kahdeksi eri toiminnoksi, sillä säätösuunnittelun tulos perustuu aina systeemin malliin ja prosessin toiminnallisiin vaatimuksiin. Seuraaviin seikkoihin on ainakin kiinnitettävä huomiota, jotta prosessista saadaan soveltuva malli:

- mitkä ovat suunniteltavan prosessin toimintaolosuhteet (normaalitoiminta, ylös- tai alasajotilanne tai hätätoiminto)
- mitkä ovat prosessin tärkeimmät ominaisuudet säädön suunnittelun kannalta
- kuinka epäideaalisuudet käsitellään
- voidaanko käyttää hyödyksi mahdollisesti etukäteen tunnettua rakennetietoa
- kuinka mallin hyvyys arvioidaan
- mitkä ovat prosessin alkutilat.

Kun matemaattinen malli tehdään kokeellisen mittausdatan perusteella, on prosessikokeen suunnitteluun kiinnitettävä riittävästi huomiota. Kaikki kokeellisen mallintamisen toimenpiteet kootaan seuraavassa kaaviossa (Kuva 1). Ainakin kolme perusvaihetta sisältyy kokeelliseen mallintamiseen,

1. mittausdatan keruu
2. mahdollisten prosessimallinen valinta
3. menetelmät parhaan mallin löytämiseksi mahdollisten mallien joukosta.

Tässä materiaalissa ei juuri lainkaan käsitellä näistä vaiheista mallijoukon ja hyvyyskriteerin valintaa eikä itse identifioinnin matematiikkaa. Tämä johtuu siitä, että nämä vaiheet ovat piilotettu normaalissa viritystyökaluohjelmistojen käytössä, eikä käyttäjä juurikaan pysty näihin vaiheisiin vaikuttamaan. Menetelmät ovat tunnettuja ja testattuja, esimerkiksi pienimmän neliösumman menetelmän on esittänyt Gauss jo noin 200 vuotta sitten. Joka tapauksessa on hyvä olla tietoinen niistä työvaiheista ja mahdollisista ongelmakohtista, jotka kuuluvat koko mallintamistahtumaan kokeellisen mittausdatan pohjalta.



Kuva 1. Identifioinnin vaiheet

Tarkastellaan oheista toimintakaaviota (Kuva 1) esimerkiksi TuneUp-ohjelmiston käytön kannalta. Säättöpiiristä tarvittava etukäteistieto käsittää jonkinlaisen karkean arvion prosessin nopeudesta (aikavakiolla ilmaistuna) sekä tiedon onko prosessi integroiva vai ei. Prosessituntemuksen pohjalta voidaan valita sopivat parametrit prosessikokeen testisignaalia varten, sekä valitaan soveltuvan tyyppinen koe kyseistä prosessia ajatellen (esim. voidaanko koe tehdä käsiajolla, kuinka suuria amplitudeja voidaan käyttää jne.). Tämän jälkeen ohjelmisto tekee kaikki muut mallintamisen vaiheet, kunnes käyttäjä tulee viimeisessä kohdassa mukaan ja joko hyväksyy tai hylkää mallin. Mikäli malli on korkeintaan kohtuullinen, mutta sitä aiotaan siitä huolimatta käyttää, täytyy tämä epävarmuus huomioida viritysparametrejä valittaessa.

Tilastollisessa mielessä mallin sovituksessa käytettävän datan pitäisi olla nollakeskiarvoista ja tilastollisesti pysyvää (toisin sanoen tilastolliset arvot eivät muutu koeajakson aikana, ei esimerkiksi ryömintää jne.). Tämä edellyttää, että koejärjestelyt on toteutettava huolella. Sen lisäksi signaalien esikäsittely edellyttää useinmiten toimenpiteitä. Mallin rakenteen ja kertaluvun valintaan, sopivien estimointialgorimien valintaan ja saadun mallin kelpoisuuden tarkistukseen on olemassa paljon teoriaa, mutta käytännön kokemukset ovat osoittaneet, että useimmiten pahin ongelma luotettavan mallin aikaansaamiseksi on juuri sopivan koedatan luominen.

Jos data on "hyvää", mallin identifioinnista voidaan odottaa hyviä tuloksia. Identifioinnin vaiheet voidaan kuvata seuraavasti:

1. prosessikokeen suunnittelu ja toteutus *käyttäjä*
2. signaalien esikäsittely (keskiarvon poisto yms.) *käyttäjä/ohjelmisto*
3. mallin rakenteen ja kertaluvun valinta *käyttäjä/ohjelmisto*
4. mallin parametrien estimointi (= laskenta) *ohjelmisto*
5. mallin kelpoisuuden tarkistaminen *käyttäjä*.

Riippuen työkaluohjelmistosta osa ensimmäisistä vaiheista suoritetaan automaattisesti, ja käyttäjälle jää vain mallin kelpoisuuden arvointi. Tämän jälkeen joudutaan usein palaamaan takaisin mallin kertaluvun valintaan. Iteraatioiden jälkeen päästään vasta hyväksyttävään lopputulokseen. Estimointialgoritmi varsinaisesti laskee meille mallin parametriarvot huolimatta mahdollisesti täysin väärin tehdyistä prosessikokeista tai mallin kertaluvun valinnasta.

Säätöpiirin virityksen onnistuminen edellyttää, että mallin sovituksessa otetaan huomioon seuraavia seikkoja:

- Yksinkertaisen näköisessä signaalissa ei voi olla piilossa monimutkaisia asioita (mitä monimutkaisempia asioita selvitetään, sitä perusteellisemmin on suunniteltava prosessikokeet)
- Tuntemattomat häiriöt ja vaikutukset saattavat peittää etsimämme informaation täysin (testisignaalin amplitudin on oltava riittävän suuri, jotta jotain saataisiin irti). Epälineaarisuudet saattavat myös aiheuttaa epämiellyttäviä ilmiöitä mallinnuksessa
- Prosessikokeen kesto saattaa olla liian lyhyt luotettavan informaation löytämiseksi
- Jos prosessi on integroiva, on prosessikokeessa ehdottomasti oltava riittävän pitkiä vakio-ohjaustilanteita, jotta integroiva tekijä löytyy. Useimmiten olisi kuitenkin parasta liittää integroiva tekijä malliin muilla keinoin
- Malli saattaa sovitua johonkin voimakkaaseen ulkopuoliseen häiriöön (esimerkiksi jonkin toisen säätöpiirin värähtely). Tämä puolestaan vaikeuttaa säätimen viritystä
- Mallin kertaluvun ollessa liian pieni jokin järjestelmän ominaisuuksista saattaa jäädä mallintamatta.

PID-säädön viritys

Viritys osana säätösuunnittelua

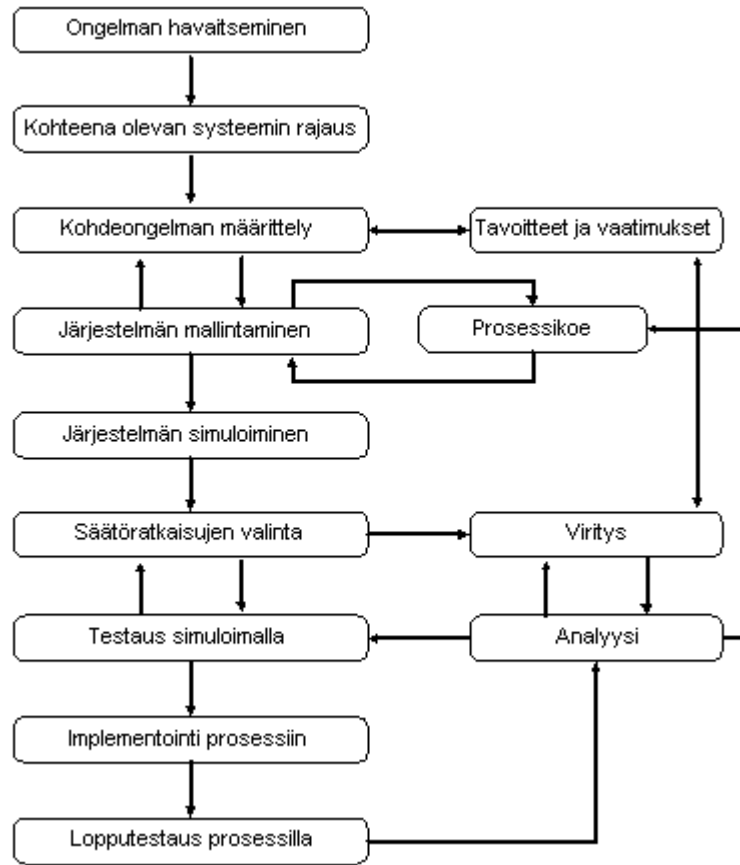
Tavoitteet

Säätösuunnittelun tavoitteet ovat aina tapauskohtaisia. Tavoitteena voi olla hallita joko asetusarvonmuutostilanteet tai kuormitushäiriöiden kompensointitilanteet. Molemmilla perustyypeillä on omat kriteerinsä onnistuneelle säätöratkaisulle ja omat menetelmät virittämiseksi. Lisäksi suunnittelussa on otettava huomioon järjestelmän dynamiikka, epälineaarisuudet, häiriöitä ja epävarmuuksia koskevat ehdot. Ongelmanratkaisussa pitäisi aina käsitellä erikseen sekä asetusarvo- että kuormitushäiriötapaukset, järjestelmän herkkyys mittauskohinaa vastaan ja riittävä varmuus mallintamisvirheitä vastaan. Lisäksi on muistettava tarkastella ohjaussignaalin käyttäytymistä. Tavoitteet nopeuden, stabiilisuuden, häiriösietoisuuden, ristikkäisvaikutusten ja tarkkuuden suhteen voidaan antaa monella eri tapaa. Valitettavasti tavoitteet ovat aina ristiriidassa keskenään. Koko ongelmavyyhti voidaan periaatteessa aina palauttaa kysymykseen "*mitä halutaan ja miksi*", sillä tietyntyyppinen vaste voi olla täysin hyväksyttävissä yhdessä tilanteessa, mutta ei välttämättä jossain toisessa yhteydessä.

Säätöongelman ratkaisuvaiheet

Säätöongelman ratkaisuvaiheita voidaan kuvata seuraavalla kaaviolla (Kuva 1). Lähtökohtana on ongelman havaitseminen. Säätöpiirin toimintaan käytännössä kiinnitetään huomiota jos a) mittaus heiluu, b) säätimen ollessa automaattitilassa jää liian iso erosuure, c) säätöventtiilin ohjaus heiluu (silmämääräisesti), d) säätö ei pysty pitämään säädettävää suureta mitta-alueella tai e) piiri ei toimi ajovuoron haluamalla tavalla. Automaattinen säätöpiirin suorituskykyindeksien laskenta on tällä hetkellä kovan mielenkiinnon kohteena. Automaatiojärjestelmästä saadaan hälytys niiltä piireiltä, jotka vaativat virittämistä tai muuten tarkempaa tutkimista. Kohdeongelman määrittelyyn liittyvät säätösuunnittelun tavoitteet ja vaatimukset, joihin joudutaan usein palaamaan suunnittelun edistyessä. Kohteena olevan systeemin rajaukseen liittyy vuorovaikutusten määrittely järjestelmän ja sen ympäristön välillä. Järjestelmän ja sen epävarmuuksien mallintaminen voi perustua joko fysikaalisiin malleihin tai prosessin identifioimiseen prosessikokeella hankitusta mittausdatasta.

Prosessin simuloinnilla voidaan varmistaa mallintamisen onnistuminen vertaamalla simuloitua vastetta ja prosessikokeesta kerättyä dataa. Prosessikokeiden jälkeen saatua mallia voidaan simuloida ja tutkia näin kohdeprosessin ominaisuuksia. Tämän perusteella voidaan tehdä valinta säätöratkaisujen välillä. Usein säätimeksi valitaan kiinteärakenteinen PID-säädin, jolloin säätösuunnittelun osuudeksi jää tarvittavan yhdistelmän (P, PI, PD, PID) valinta ja ko. rakenteen parametrien virittäminen. PID-säätimeen perustuvaan ratkaisuun voidaan lisätä rakenteellisia ominaisuuksia, esim. myötäkyytkentöjä ja viiveen kompensointia. Virittämiseen liittyy kiinteänä osana suorituskyvyn analysoiminen ja testaaminen simuloinneilla. Säätösuunnittelu on tältä osin usein monivaiheinen prosessi. Analyysi sisältää myös prosessin ja säätöpiirien keskinäisen vuorovaikutuksen analysoimisen. Joissain tapauksissa joudutaan palaamaan myös järjestelmän tavoitteiden ja vaatimusten määrittelyyn. Tämän jälkeen säädin voidaan toteuttaa ja liittää todelliseen prosessiin tai viritysparemetrit voidaan ladata olemassa olevaan säätimeen. Lopullinen testaus suoritetaan todellisella järjestelmällä joko prosessikokeen avulla tai seuraamalla järjestelmän käyttäytymistä normaalin toiminnan yhteydessä, esimerkiksi tilastollisin menetelmin. Tarvittaessa voidaan palata aikaisempiin vaiheisiin mikäli siihen osoittautuu tarvetta. Kuvan tarkoitus on osoittaa, kuinka pieni osa "viritys" on koko säätöongelman ratkaisusta. Suuri osa säätötekniikan kirjallisuudesta keskittyy vain virityskaavojen esittämiseen kun puhutaan säätöpiirin virittämisestä. Viritystyökaluohjelmistoja käytettäessä tämä vaihe on kuitenkin lähes täysin piilotettu käyttäjältä, jolta vaaditaan vain kykyä tulkita ja ymmärtää saatuja tuloksia.



Kuva 1. Säättöongelman ratkaisuvaiheet

Säätöpiirin vaatimukset

Säätöpiirin hyvän virityksen keskeisinä tavoitteina on taata aina riittävä:

1. säädön tarkkuus (asentovirhe)
2. nopeus (asetusarvon seurantakyky) ja/tai
3. kuormitushäiriöiden kompensointikyky
4. ohjaussignaalin rauhallinen käyttäytyminen
5. epäherkkyys mittauskohinaa vastaan
6. epäherkkyys (mallin, säätimen) parametrimuutoksia kohtaan.

Näiden vaatimusten vuoksi säätimen "optimaalinen" viritys onkin tasapainottelua erilaisten vaatimusten ja prosessin ominaisuuksien välillä. Tärkeimmät säätöpiirit (noin 5 - 10% kaikista säätöpiireistä) kaipaavat useasti yksityiskohtaisempaa tarkastelua. Vähemmän tärkeät piirit, joita lukumääräisesti on paljon, eivät tarvitse kovin syvällisiä tarkasteluja, mutta toisaalta nekin olisi syytä saada toimimaan riittävän hyvin. Edellinen kohta edellyttää prosessin analysointimahdollisuuksia, jälkimmäinen puolestaan pitkälle automatisoitua ja nopeata viritysmenettelyä.

Ennenkuin kannattaa alkaa tarkastella itse säätöpiirin virittämistä, täytyy tarkistaa minkälaiset edellytykset säätöpiirin toiminnalle yleensäkin on. Tähän voidaan käyttää "kolmosen sääntöjä" (Taulukko 1), jotka perustuvat kokemukseen, eivät niinkään mihinkään teoriaan.

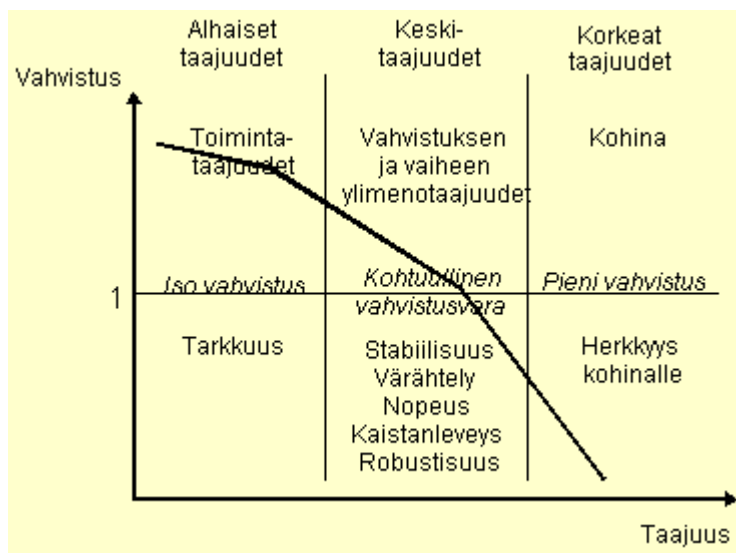
	<i>Hyväksyttävä arvo</i>	<i>Tavoite</i>
<i>Kohinataso</i>	< 3 %	0 %
<i>Hystereesi</i>	< 3 %	0 %
<i>Prosessin vahvistus</i>	< 3	1
<i>Lineaarisuus K_{max}/K_{min}</i>	< 3	1

Taulukko 1. Säätöpiiriin vaatimuksia, "kolmosen säännöt"

Säätöpiiriin tarkkuus, nopeus ja häiriöiden kompensointikyky saavutetaan jos avoimen piirin vahvistus (prosessivahvistus kertaa säätimen vahvistus) on mahdollisimman suuri. Jos säätöpiiriin vahvistusta yritetään kasvattaa vain lisäämällä säätimen vahvistusta törmätään stabiilisuusongelmiin jopa ennenkuin prosessin ja toimilaitteiden toimintarajat. PID-säätimen vahvistuksen K_p lisäksi on muitakin viritysparemetrejä, joilla voidaan muokata säätöpiiriin kokonaisvahvistusta.

Tätä voidaan kuvata seuraavanlaisella vahvistuskäyrällä eri taajuuksalueissa (Kuva 1). Alhaiset taajuudet ovat säätöpiiriin normaalia toiminta-alueita,

jossa säätimen vahvistuksen tulisi olla niin suuri kuin mahdollista. Säättöpiirin tarkkuus ja nopeus taataan siirtämällä ylimenotaajuuksia kohti suurempia taajuusalueita. Erilaisten säättöpiirien tavoitteiden ristiriitaisuus tulee esille keskitaajuuksilla. Vahvistuksen ylimenotaajuuden kohdalla suljetun piirin vahvistus on n. 0,5, jos vaihesiirto on kohtuullisen pieni. Näin ollen säättöpiirin tarkkuutta ei voida enää taata. Suurilla taajuuksilla vahvistuksen tulisi olla pieni jottei mittauskohina häiritse säätöä, samalla pieni vahvistus tarkoittaa ettei säädöllä ole enää tarkkuutta.



Kuva 1. Säättöpiirin tavoitevahvistus jaettuna kolmeen erilliseen alueeseen

Säättöpiirin kokonaisvahvistusta voidaan muokata PID-säätimen viritysparametreillä. Kasvattamalla vahvistusta K_p vaikutetaan koko taajuusalueeseen samanaikaisesti ja piirin vahvistusvara pienenee. Lyhentämällä integrointiaikaa T_i nostetaan alhaisten taajuuksien vahvistusta ilman että se vaikuttaa liikaa korkeimpiin taajuuksiin, samalla sekä vahvistus- että vaihevarat pienenevät. Derivointiaikaa T_d kasvattamalla säättöpiiristä tulee herkempi mittauskohinalle ja samalla vaiheen ylimenotaajuus kasvaa. PID-säätimen lisäksi voidaan käyttää ylimääräisiä alipäästösuodattimia. Nämä kuitenkin aina hidastavat piirin toimintaa. Vaikka suodatus tasoittaa mittaussignaaleja, samalla kasvaa vaihesiirto joka puolestaan pahimmissa tapauksissa voi saattaa koko piirin värähtelemään.

PID-säätimen virittämisen ongelmat

Virittämisen ongelmat

Säätöpiirin virittäminen on periaatteessa helppoa jos tiedetään 1) haluttu säätötavoite sekä 2) käytössä on prosessia kuvaava malli. Ensimmäinen vaatimus tulee lähinnä prosessituntemuksen kautta, käyttäjältä vaaditaan ymmärrystä säädön tavoitteista ja eri säätimien vaikutuksista osaprosessin muiden säätimien toimintaan. Toinen vaatimus saavutetaan kokeellisella mallintamisella suhteellisen helposti jos *a)* toimilaitteet toimivat oletetulla tavalla eikä *b)* piiriin vaikuta prosessikokeen aikana ylimääräisiä häiriöitä eli säätöpiiri toimii riittävän rauhallisesti. Juuri jälkimmäisen ongelman kanssa kuluu ajallisesti suurin osa viritystyöstä, eli prosessiolosuhteiden järjestämisessä virittämiselle soveltuviksi.

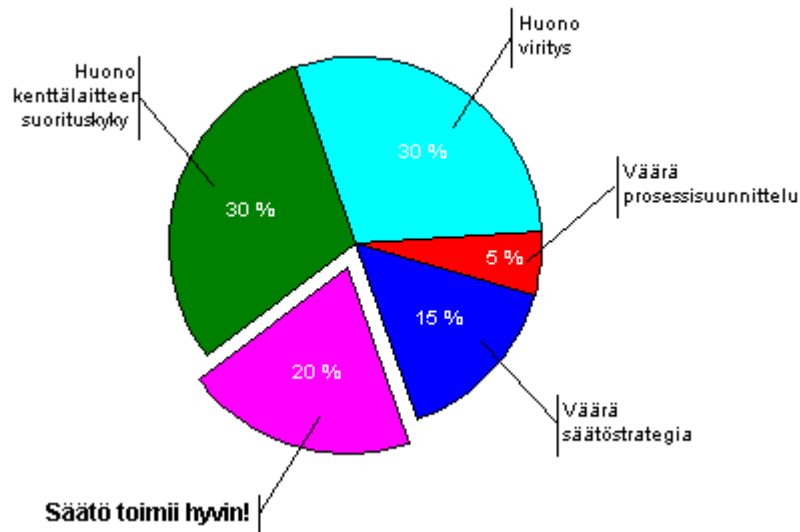
Yleistä viritysmenetelmistä

Säätimen virittämiseen on olemassa lukuisia eri menetelmiä, mutta käytännössä tietyntyyppisen ongelman ratkaisuun soveltuu parhaiten vain tietty viritysrutiini. PID-säätimen virittäminen on yksinkertaisuudessaan kolmen parametrin hakemista kolmiulotteisesta hakuavaruudesta siten, että järjestelmä käyttäytyy toivotulla tavalla. Tämän lisäksi tulevat vielä säätövälin ja soveltuvan suodatuksen valinta sekä mahdolliset PID-algoritmin erityisparametrien valinta. Viritystä varten prosessin kuvaamiseksi riittää usein yksinkertainen malli. Yleiskäyttöisen viritysmenetelmän tulisi pystyä hyödyntämään myös tarkemmista prosessimalleista saatava informaatio. Kaikenlainen etukäteistieto prosessista auttaa viritystä, sillä esimerkiksi integroivan prosessin tunnistaminen pelkän mittausdatan perusteella on vaikeaa. Säädintyyppi riippuu prosessista, ja se on usein valmiiksi konfiguroitu eikä sitä käytännössä helposti muuteta.

Ensimmäinen ongelma on halutun käyttäytymisen määrittelemisen, esimerkiksi piirin nopeusvaatimukset vaihtelevat, ja useat parametriyhdistelmät voivat täyttää nämä ominaisuudet. Tietyissä tilanteissa piiriltä odotetaan tietyntyyppistä käyttäytymistä. Säätimen parametrit riippuvat toisistaan, jolloin säädintä ei voida virittää yksi parametri kerrallaan niin, että ensin haetaan yhdellä parametrilla haluttu vaste, jonka jälkeen siirrytään seuraavaan parametriin jne. Tämä parametrien välinen riippuvuussuhde määräytyy säädettävän prosessin ominaisuuksista. Esimerkiksi prosessissa oleva viive täytyy huomioida säätimen vahvistusta määritettäessä.

Käytännön näkökulma virittämiseen

Uudenaikaisessa paperikoneessa saattaa olla jopa 1000 säätöpiiriä, mutta usein niiden viritys, hallinta ja kunnonvalvonta on kuitenkin hyvin pienen organisaation vastuulla. Amerikkalaisten tutkimusten mukaan jopa 1/3 säätöpiireistä aiheuttaa enemmän ongelmia automaattitilassa kuin käsiajolla, ja toinen kolmannen kyllä parantaa säätötulosta, vaikka suorituskyky onkin kaukana optimista. Pohjoismaiden tehtaiden tilanteesta ei ole tehty systemaattista selvitystä, mutta suorituskyky on usein kaukana siitä mitä se voisi olla. Seuraavassa kuvassa on karkea arvio Entechin yli 300 automaatiosovelluksen suorituskyvyn analysoinnin tuloksista (Kuva 1). Viritystyökaluilla pystytään suoraan vaikuttamaan huonon virituksen osuuteen (30%), mutta välillisesti myös muihin suorituskyvyn osatekijöihin.



Kuva 1. Tulokset säätöpiirien toimintakunnosta (Entech)

Monimutkaisempien säätöalgoritmien käyttöönotto tuskin on mielekästä ennenkuin suhteellisen yksinkertainen PID-säädön viritys ja ylläpito on hallinnassa. Säätöjen suorituskykyyn tehtaalla voidaan vaikuttaa

- lisäämällä ylläpidon resursseja,
- tukemalla nykyisiä resursseja soveltuvilla tietoteknisillä työkaluilla (viritystyökalut) sekä soveltuvalla koulutuksella,
- todistamalla että hyvillä säädöillä saavutetaan merkittävää kilpailuetua vaikka huonoillakin säädöillä päästää kohtuullisiin tuloksiin.

Kunnossapito kyllä korjaa mekaaniset viat, mutta huonojen säätöjen kanssa usein vain eletään. Näin automaatiojärjestelmästä ei oteta sitä hyötyä mikä

siitä olisi saatavissa. Itseasiassa säätöjen viritykseen uhratulla työpanoksella on melko pieni takaisinmaksuaika. Jakamalla automaatiojärjestelmän hankintahinta säätöpiirien lukumäärällä, havaitaan että yksittäisen säätöpiirin hinnat on suunnilleen henkilöauton kanssa samassa kokoluokassa. Vastaavasti voisi olettaa, että myös säätöpiirin ylläpitoon uhrattaisiin saman verran rahaa kuin auton huoltoon, varsinkin kun säätöpiirin elinikä on ainakin yhtä pitkä kuin auton. Ennenkuin kannattaa yrittää mitään kehittyneempää säätöratkaisua, kannattaisi kokeilla säätöpiirien ja osaprosessien virittämistä.

Useat teollisuuden säätöpiirit viritetään yhä edelleen yritys-erehdys periaatteella, ja usein tämä tehdään vain kerran piirin käyttöönoton yhteydessä senhetkisessä toimintapisteessä. Kokeellisesti piiri viritetään vaikkapa seuraavasti. Aluksi säädin konfiguroidaan pelkäksi P-säätimeksi, jonka vahvistusta kasvatetaan, kunnes asetusarvonmuutoksessa vaste ei liiemmin värähtelee. Tämän jälkeen konfiguroidaan PI-säädin, jonka integrointiaikaa pienennetään kunnes vaste on riittävän nopea asetusarvonmuutostilanteissa. Toisena käytännön tapana on käyttää piirikohtaisia (tai jopa automaatiojärjestelmäkohtaisia) vakioparametrejä. Uusia prosessiyksiköitä käyttöönotettaessa viritettävien säätöpiirien lukumäärä saattaa olla kymmeniä tai satoja. Näissä tilanteissa tarvitaan yksinkertaisia menetelmiä ja käytännön kokemusta, jotta tuotanto yleensäkin saadaan käynnistettyä. Tämän jälkeen viritystyökalut tarjoavat mahdollisuuden prosessin suorituskyvyn parantamiseen, kun prosessin toimintapisteet ovat normaaleja ja piirit jotenkuten hallinnassa. Kokeilemalla virittäminen perustuu prosessikokeisiin (asetusarvon askelmuutos), ja säädettävää suuretta tutkimalla muutetaan viritysparametrejä. Kokeilu perustuu lähtökohtaan, että kyseisessä piirissä olevat parametrit ovat suunnilleen kohdallaan. On jokseenkin selvää, että tämänkaltainen lähestymistapa on erittäin epäkäytännöllinen ja kokeilut häiritsevät tehtaan tuotantoa. Viritystyökalujen edut tulevat erityisesti ilmi mitä hitaampi prosessi on, sillä kokeelliseen virittämiseen kuluva aika saattaa kasvaa merkittäväksi.

Eräässä projektissa tutkittiin 25 säätöpiirin toimintaa. Näistä piireistä viidessä oli alkuperäiset tehdasasetukset (vahvistus yksi, integrointiaika 1 min, ei derivointia). Lisäksi kuudessa piirissä viritystä oli muutettu niin, että säätimen vahvistusta oli pienennetty integrointiajan pysyessä samana. Vain yhdessä piirissä oli käytössä derivointi. Viritysohjelmiston tulisi tarjota riittävän varmatoimiset ja yksinkertaiset viritysrutiinit, joista kokenut käyttäjä voi saada silti tarvitsemansa irti. Käytännön tosiasia on, että huonosti toimiva (eli huonosti viritetty) säädin kytketään pois päältä, ja operaattorit ohjaavat prosessia manuaalisesti tai viritys tehdään niin hitaaksi, ettei säädin juuri enää reagoi mihinkään.

Säätöpiirissä olevilla komponenteilla on kaikilla oma tehtävänsä: mittausanturi "katselee" prosessia, säädin "ajattelee" ja toimilaitte "tekee likaisen työn." Anturit ja automaatiojärjestelmissä olevat säätimet ovat suhteellisen tarkkoja, mutta toimilaitteissa virheet saattavat olla hyvinkin suuria. Tämä johtuu siitä yksinkertaisesta seikasta, että toimilaitte on säätöpiirin ainoa mekaanista työtä tekevä komponentti ja siten altis kulumisella, kitkoille yms. Kun piiri alkaa värähtelemään, tulisi ensin ottaa selvää *miksi* piiri värähtelee. Usein toimilaitteviat tulkitaan tarpeeksi virittää säädin, ja käytännössä usein näissä tilanteissa yksinkertaisesti pienennetään säätimen vahvistusta. Näin toki saadaan ohjaussignaalia rauhoittumaan, koska viallinen toimilaitte tekee vähemmän työtä. Tätä jatkamalla usean vuoden ajan tilanne on se, että säätimessä ei juurikaan ole enää vahvistusta eli se ei enää käytännössä reagoi mihinkään. Kun toimilaitte ei liiku, ei siitä voi tietenkään aiheutua ongelmiaakaan. Valitettavasti säädin ei enää tee sitä työtä mitä varten se alunperin on suunniteltu. Jotta säätimen viritysparametrejä tulee muuttaa, jonkun asian on täytynyt muuttua prosessissa.

Prosessin epälineaarisuuksien vuoksi virittäminen tulisi suorittaa aina toimintapisteen muuttuessa, sillä säätimen "oikeat" viritysparametrit vaihtuvat toimintapisteen mukaan. Mikäli yksillä viritysparametreillä ei tulla toimeen, automaatiojärjestelmään voidaan konfiguroida esimerkiksi asetusarvon mukaan valittavat viritysparametrit (Taulukko 1). Sama ilmiö tulee esiin prosessin muuttuessa likaantumisen tms. seurauksena, laitteiston uusimisen

yhteydessä tai prosessin ajotapojen muututtua. Nyt viritys vaatii ylläpitoa, ja säätimet tulisivat virittää joko tiettyjen huoltojen jälkeen tai säännöllisesti ajan mukaan. Valitettavan usein prosessi on viritetty vain kerran käyttöönoton yhteydessä. Tällöinkin on voitu käyttää säätöpiirille tyyppillisiä vakioparametrejä. Säätöpiirin virityksen kuuluisikin olla osa normaalia kunnossapitoa. Käytännössä paperikoneympäristössä yhden työpäivän aikana ehtii virittämään 7-8 säätöpiiriä.

<i>Asetusarvo</i>	K_p	T_i
< 20%	1,2	35 s
20-50%	1,3	35 s
50-80%	1,3	30 s
> 80%	1,4	28 s

Taulukko 1. Esimerkki taulukoiduista virityspareetreista

Virittämisen ajankohta on eräs merkittävä tekijä. Prosessikoe häiritsee tuotantoa vähiten, kun se suoritetaan seisokin yhteydessä. Tällöin prosessi ei ole normaalissa toimintapisteessä, ja virityspareetrit eivät välttämättä ole optimaaliset. Työkaluohjelmistossa täytyy olla mahdollisuus varmistua uusien parametrien järkevyydestä ennenkuin ne siirretään säätimille. Näin turhat tuotantoa häiritsevät kokeet jäävät pois.

Yhteenveto

Säätöpiirin viritys (mille tahansa kohdejärjestelmälle) edellyttää vielä käyttäjän puuttumista vuritykseen. Säätimiin upotetuissa itsevirittyvissä yksiköissä se tehdään prosessiin kytkeydyttäessä ja erillisissä viritystyökaluissa tarjotaan käyttäjälle prosessin analysointi- ja simulointimahdollisuuksia. Erilaiset asiantuntijajärjestelmäpohjaiset lähestymistavat ovat välttämättömiä, jotta eri tyyppisten prosessien säätöongelmia voidaan lähestyä järkevästi.

Tässä materiaalissa on tarkasteltu mahdollisimman käytännönläheisesti niitä tekijöitä, jotka täytyy ottaa huomioon viritettäessä yksinkertaisia PID-säätimiä työkaluohjelmistoilla. Käytännössä suurimman osan virittämiseen kuluva ajasta menee prosessikokeen suorittamiseen, ja tämä vaihe on keskeinen koko virittämisen kannalta. Samalla se on eräs niitä harvoja vaiheita, jossa käyttäjällä on todellinen mahdollisuus vaikuttaa saatujen viritysparametrien käyttökelpoisuuteen. Tässä yhteydessä ei voida koskaan liikaa korostaa prosessituntemuksen tärkeyttä, siis säädettävän kohteen ja osaprosessin tuntemista. Nykyaikaiset ohjelmistotyökalut yhdistettynä prosessikokemukseen takaavat onnistumisen mahdollisuudet säätöpiirien virittämiseen teollisuusympäristössä.

Kaupallista tarjontaa on jo runsaasti. Työkalujen avulla voidaan helposti selvittää yksinkertaiseen PID-säätöön liittyviä ongelmia (kuten säätöpiirin viritystä, myötäkytkennän mitoitusta, säätöpiirin toiminnallisten rajojen etsimistä, säätöpiirin käyttäytymistä jne.). Esimerkkeinä tässä materiaalissa on käytetty TuneUp ja ExperTune -ohjelmistoja.

Uudet säädinrakenteet, viritys- ja analysointiohjelmistot sekä jatkuvasti kiristyvät toiminnalliset vaatimukset tuovat mukanaan uusia menetelmiä. Pienilläkin panostuksilla voidaan saada aikaan suuria taloudellisia etuja. Siksi menetelmien jatkuva opiskelu ja tehostettu käyttöönotto on lähes välttämätöntä.

Säätöpiirin viritys on yksi merkittävimmistä säädön suorituskykyyn vaikuttavista tekijöistä. Se on myös ainoa tapa maksimoida automaatiojärjestelmästä saatava hyöty tuotannon kannalta. Säätöpiirin vuritykseen liittyy oleellisesti myös käytetyt laitteistot ja toimilaitteet - tässä yhteydessä on tarkasteltu yksinomaan säätöventtiiliä. Venttiili on mekaaninen laite, joten se säätöpiirin ainoa laitteena tekee mekaanista työtä. Näin venttiilien säännöllinen kunnonarviointi ja huolto liittyvät oleellisesti säätöpiirin suorituskykyyn. Säätöpiirin viritysparametreilla on kuitenkin suurempi merkitys suorituskyvyn kannalta kuin venttiilin ominaisuuksilla. Ne tulevat merkittäviksi nopeiden säätöpiirien yhteydessä.

Säätöpiirin säännöllisellä kunnonarvioinnilla ja ylläpidolla on lukuisia positiivisia vaikutuksia tehtaan tuotannon kannalta. Näitä vaikutuksia ovat mm. prosessin suorituskyvyn optimointi, pienempi prosessisuureen vaihtelu, raaka-aineiden pienempi kulutus, ympäristöpäästöjen vähentyminen, ennakoiva kunnossapito, laitteiston tehokampi hyödyntäminen, helpompi ongelmien hakeminen, nopeammat ylösajot sekä laatuajärjestelmien vaatimat raportit.

Kaupalliset viritys- ja analyysityökalut ovat tulleet jäädäkseen - yhä enemmän jo säädinyksikön omaksi osaksi. Kaupallinen tarjonta kasvaa ja viritystyökaluja kehitetään kaiken aikaa yhä paremmin vastaamaan käyttäjien tarpeita. Samalla viritystyökalut integroituvat osaksi säätöjen suorituskyvyn automaattisiin seurantajärjestelmiin. Nämä eivät kuitenkaan poista tarvetta ymmärtää myös niitä tekijöitä, joihin automaattinen PID-säädön viritys perustuu.

Lähteet ja lisälukemista

Anon., (1992), Kehittyneiden säätömenetelmien soveltaminen prosessiteollisuudessa, Suomen Automaatioseura r.y., 186 s.

Aumala, O. (*et al.*), (1998), *Mittaussignaalien käsittely*, 3 p., Tampere, Pressus

Bennett, S., (1988), *Real-time Computer Control*, Prentice Hall International Ltd, 362 s.

Berge, J., (1998), *Addressing benefits and FAQs of Fieldbus based FCS Architecture*, ISA TECH/EXPO98, Instrument Society of America, 10 s.

Chia, T. L., Lefkowitz, I., (1992), *PID Tuning Tools*, Intech Magazine October & November 1992

Corripio, A.B., (1982), *Digital Control Techniques*, Editor: Edgar T.F., Process Control, Vol.3, AIChEMI modular instructions: series A, AIChE, New York, s. 63-69.

Dorf, R. C., Bishop, R. H., (1995), *Modern Control Systems*, 7 p., Addison-Wesley, 807 s.

Friman, M., (1997), *Extensions and Modifications of Relay Autotuning*, PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, Åbo Akademi University

Hanhimäki, J., (1998), *Säätöpiirin suorituskyvyn seuranta*, diplomityö, Oulun yliopisto, 101 s.

Harju, T., Marttinen, A., (1997), *Teollisuusprosessien säätöjen viritys*, Automaatioväylä 1-1997, Automaatioväylä Oy, s. 21-24

Harju, T., Marttinen, A., (1997), *Säätöpiirin analysointimenetelmät*, Automaatio 97, Suomen Automaatioseura ry julkaisusarja 21

Harju, T., Olli, J., (1998), *Säätöpiirien toiminta ja käytännön ratkaisumallit*, Automaatioväylä 4-1998, Automaatioväylä Oy, s. 42-43

Harjula, K., (1997), *Paperikoneen instrumenttien optimaalinen kalibrointi ja säätöpiirien viritys*, diplomityö, Oulun yliopisto, 127 s.

Hägglund, T., (1990), *Praktisk processreglering*, Studentlitteratur, Lund, Sweden, 105 s.

Johansson, R., (1993), *System Modeling and Identification*, Prentice-Hall, 513 s.

Kamppari, L. (toim.), (1992), *Flow Control Manual*, Helsinki, Neles-Jamesbury, 142 s.

- Kortela, U., Virkkunen, J., (1980), *Säätötekniikan perusteet*, 2 p., Otakustantamo
- Leigh, J. R., (1992), *Applied Digital Control*, 2 p., Prentice-Hall International Ltd.
- Ljung, L., (1987), *System Identification - Theory for The User*, Prentice-Hall, s. 69-108.
- Maciejowski, J., (1989), *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley Publishing Company, 424 s.
- Marttinen, A., (1992), *An Integrated Environment for Process Control Design*, Editors: Jamshidi M., Herget C.J., Recent advances in computer-aided control system engineering, Elsevier Science Publishers, s. 273-290
- Marttinen, A., (1995), *PID-säädön ja myötäkytkennän automaattinen viritys*, Helsinki, Automaatiopäivät 95, Suomen automaatioseura, s. 171-177
- Marttinen, A., Koivo H., (1984), *Tietokoneavusteinen säätösuunnittelu, taajuustason menetelmät monimuuttujaprosesseille*, Suomen säätötekniillinen seura ry, Julkaisu nro 11, 136 s.
- Marttinen, A., Pajunen, G., (1986), *Adaptiiviset järjestelmät - identifiointi ja säätö*, Suomen säätötekniillinen seura ry., 308 s.
- Moisio, M., (1997), *Paperikoneen säätöjen suorituskyvyn arviointi*, diplomityö, Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 106 s.
- Morris, H.M., (1994), *Loop Controllers Get Enchanced Human-Machine Interfaces*, Control Engineering, June 1994.
- Neles Controls, (1999), *Asennoittimet Sähköpneumaattinen, sarja NE700, Pneumaattinen, sarja NP700, 7NE/NP 20, 2/99, 8 s.*
- Olli, J., Ketonen, M., Marttinen, A., Kortela, U., (1994), *PID-Controller Tuning with An Advanced Tool - Applications Approach*, 3rd IEEE Conference on Control Applications 24.-26.8.1994, Glasgow, Scotland, UK
- Olli, J., Heikkinen, P., Harju, T., (1997), *SISO PID-säätimen viritys automaatiojärjestelmässä*, Automaatio 97, Suomen Automaatioseura ry julkaisusarja 21
- Pennanen, J., (1994), *Tuning of PID Controllers in a Distributed Automation System*, Control Systems 94, Stockholm, Sweden
- Puonnas, M., (1995), *Toimintamalli paperitehtaan säätimien virittämiseksi*, diplomityö, Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 80 s.
- Putkonen, N., (1999), *ExperTune -viritysohjelmiston käyttö ja soveltaminen*, insinööriö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 92 s.

- Ritala, P., (1998), *Säätimien automaattinen viritys*, IIR seminaari Nykyaikaiset automaatiojärjestelmät prosessiteollisuudessa, 12-13.5.1998, Espoo, 3 s.
- Savolainen, J., Vaittinen, R., (1998), *Säätötekniikan perusteita*, 2 p., Opetushallitus
- Stephanopoulos, G., (1984), *Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*, Prentice-Hall, Inc., 696 s.
- Thomasson, F., Bialkowski, B., (1995), *Process Control Tutorial. Process Control Fundamentals for the Pulp and Paper Industry*, TAPPI / ISA '95 Process Control, E&I Conference, March 14, 1995
- Vandoren, V.J., (1994), *The Challenges of Self-tuning Control*, Control Engineering, February 1994.
- Virkkunen, J., (1994), *Säätötekniikan matematiikkaa*, Otatieto Oy
- Virtanen, M., (1981), *Yleinen säätötekniikka*, Gummerus
- Ziegler, J.G., Nichols, N.B., (1942), *Optimum Settings for Automatic Controllers*, Transactions on ASME, 64, 1942.
- Åström, K.J., Anton, J.J., Årzen, K.F. (1986), *Expert Control*, Automatica 22, 1986
- Åström, K.J., Hang, C.C., Persson, P., Ho, W.K. (1992), *Towards Intelligent PID Control*, Automatica, 28, 1992
- Åström, K.J., Hägglund, T., (1984), *Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase And Amplitude margins*, Automatica, 20, 1984
- Åström, K., Hägglund, T., (1995), *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2nd edition, Instrument Society of America, 343 s.
- Åström, K. J., Wittenmark, B., (1997), *Computer Controlled Systems, Theory and Design*, 3 p., Prentice Hall International Inc.

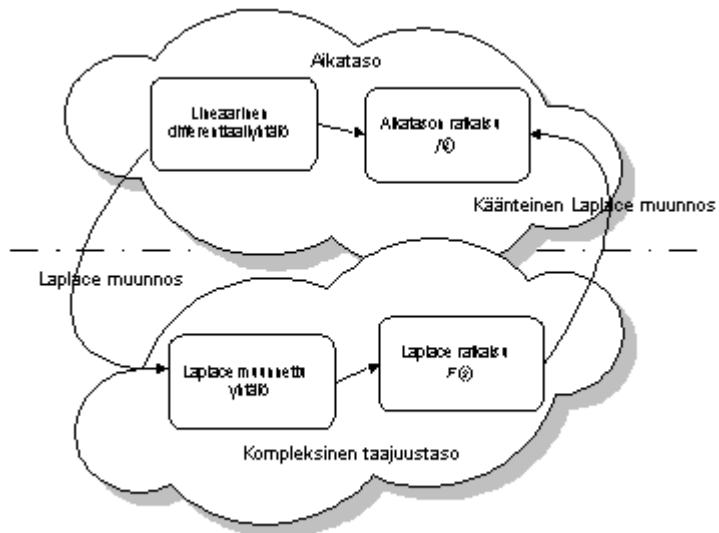
LIITE Sääntötekniikan matematiikkaa

Tarkastellaan hieman lisää muutamaa matemaattista käsitettä, joita käytetään sääntötekniikassa. Tulo- ja lähtösignaalien riippuvuus voi olla joko staattinen tai dynaaminen. Staattisen järjestelmän lähtö määräytyy yksinomaan tulosignaalin viimeisimmän arvon mukaan. Sen sijaan dynaamisen järjestelmän lähtö riippuu myös tulosignaalin historiasta. Dynaamisia, lineaarisia aikajatkuvia systeemejä voidaan matemaattisesti kuvata *differentiaaliyhtälöillä*, jossa muuttujan $y(t)$ lisäksi esiintyy myös sen derivaatta $dy(t)/dt$ (tai derivaattoja). Esimerkiksi

$$y(t) + T \frac{dy(t)}{dt} = Ku(t)$$

on ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälö, missä $y(t)$ = lähtö, $u(t)$ = tulo, K = vahvistus ja T = aikavakio. Differentiaaliyhtälöitä voidaan ratkaista numeerisesti useilla matematiikkaohjelmistoilla, mutta yksinkertaisia yhtälöitä voidaan ratkaista myös analyyttisesti *Laplace*-muunnoksen avulla.

Klassinen sääntöteoria perustuu Laplace (\mathcal{L})-muunnoksen käyttöön. Tässä muunnoksessa systeemiä kuvaava differentiaaliyhtälö muunnetaan Laplace-tasoon. Tämä yksinkertaistaa matemaattista käsittelyä, koska nyt voidaan muunnettuja yhtälöitä muokata algebrallisin menetelmin. Muokkauksen jälkeen aikataason ratkaisu saadaan *käänteismuunnoksella*. Tämä ei ole aina edes tarpeellista, sillä johtopäätöksiä pystytään tekemään myös Laplace-tasossa (Kuva 1).



Kuva 1. Laplace muunnos ja sen käänteismuunnos

Laplace-muunnoksessa signaali $x(t)$ muunnetaan uudeksi kompleksimuuttujan s funktiona olevaksi signaaliksi $X(s) = \mathcal{L}x(t)$ muunnoksella

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt$$

Laplacemuunnoksen matemaattinen kaava osoittaa, että sen sijaan että tarkasteltaisiin signaalin x hetkittäistä arvoa $x(t)$ hetkellä t , tarkastellaankin koko signaalin aikahistoriaa nykyhetkestä eteenpäin. Lineaarisen järjestelmän *siirtofunktio* on määritelty tulo- ja lähtösignaalien Laplace-muunnoksien suhteena, kun kaikki alkutilat oletetaan nolliksi.

Muuttujalla s signaalin $X(s)$ kertominen tarkoittaa samaa kuin signaalin $x(t)$ derivoiminen ja muuttujalla s jakaminen puolestaan tarkoittaa samaa kuin signaalin $x(t)$ integroiminen. Merkinnöissä lisäksi muuttujien kuvaajina pienien kirjaimien sijasta käytetään isoja kirjaimia muunnetuille suureille. Digitaalisten järjestelmien yhteydessä on käytössä samanlainen käsite kuin siirtofunktio. Nyt kuitenkin ei puhuta Laplace muunnoksesta, vaan sitä vastaavasta *z-muunnoksesta*.

Nyt esimerkiksi yksikköaskeleen

$$f(t) = \begin{cases} 0, & -\infty \leq t < 0 \\ 1, & 0 \leq t \leq \infty \end{cases}$$

Laplace muunnos on

$$L[f(t)] = \int_0^{\infty} 1e^{-st} dt = \frac{1}{s}$$

ja eksponenttifunktion

$$f(t) = \begin{cases} 0, & -\infty \leq t < 0 \\ e^{-at}, & 0 \leq t \leq \infty \end{cases}$$

vastaava Laplace muunnos on

$$L[f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-at} e^{-st} dt = \frac{1}{s+a}$$

Seuraavassa taulukossa on esitettyä muutamia muita aikatazon funktioita ja niiden Laplace muunnoksia (Taulukko 1).

Aikatazon funktio, $f(t)$	Laplace muunnos, $F(s)$
Yksikköaskel, $u(t)$	$\frac{1}{s}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
$\sin(t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$

$\cos(t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$e^{-at} f(t)$	$F(s+a)$
t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$f^{(k)}(t) = \frac{d^k f(t)}{dt^k}$	$s^k F(s) - s^{k-1} f(0) - s^{k-2} f'(0^-) - \dots - f^{(k-1)}(0^-)$
$\int_{-\infty}^t f(t) dt$	$\frac{F(s)}{s} + \frac{1}{s} \int_{-\infty}^0 f(t) dt$
Impulssifunktio (t)	1

Taulukko 1. Muutamia tärkeitä Laplace muunnoksia

Laplace muunnoksella on tiettyjä tärkeitä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi lineaarisuus

$$L\{a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)\} = a_1 L\{f_1(t)\} + a_2 L\{f_2(t)\},$$

missä a_1 ja a_2 ovat vakioita. Viivästetty funktio voidaan ilmaista

$$L\{f(t-a)\} = e^{-as} F(s),$$

alkuarvoteoreema on

$$\lim_{t \rightarrow 0} \{f(t)\} = \lim_{s \rightarrow \infty} (sF(s))$$

sekä loppuarvoteoreema

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} (sF(s))$$

Tutkitaan ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöä

$$\frac{dy(t)}{dt} + ay(t) = bu(t)$$

missä $u(t)$ on tulo- ja $y(t)$ lähtösignaali. Jos em. yhtälö kerrotaan tekijällä e^{st} saadaan

$$e^{-st} \frac{dy(t)}{dt} + e^{-st} ay(t) = e^{-st} bu(t)$$

Integroimalla välillä $(0, \infty)$ ajan suhteen saadaan

$$\int_0^{\infty} e^{-st} \frac{dy(t)}{dt} dt + \int_0^{\infty} e^{-st} ay(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-st} bu(t) dt$$

joka on y :n derivaatan, y :n ja u :n Laplace muunnokset, jälkimmäiset vakiolla a ja b kerrottuina, eli

$$L\left\{\frac{dy(t)}{dt}\right\} + aL\{y(t)\} = bL\{u(t)\}$$

Muunnosten määrittelystä seuraa

$$sY(s) - y(0) + aY(s) = bU(s)$$

Jos tunnetaan muunnos $U(s)$, saadaan lähtö $Y(s)$

$$Y(s) = \frac{b}{s+a} U(s) + \frac{1}{s+a} y(0)$$

Tulos eli vaste riippuu siis herätteestä ja alkuarvoista (näiden summasta). Herätteen edessä oleva kerroin on siis siirtofunktio, jonka vahvistus on b/a ja aikavakio on $1/a$.

Tarkastellaan vielä lineaarista, aikajatkuvaa yhden tulosignaalin ja yhden lähtösignaalin dynaamista systeemiä, jonka käyttäytymistä voidaan kuvata yleisellä differentiaaliyhtälöllä

$$\alpha_m \frac{d^m y}{dt^m} + \alpha_{m-1} \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + \alpha_0 y = \beta_m \frac{d^m u}{dt^m} + \beta_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \dots + \beta_0 u$$

Ottamalla Laplace muunnos tästä yhtälöstä olettaen että alkuarvot ovat nolliä, saadaan

$$\frac{\beta_m s^m + \beta_{m-1} s^{m-1} + \dots + \beta_0}{\alpha_m s^m + \alpha_{m-1} s^{m-1} + \dots + \alpha_0} = \frac{Y(s)}{U(s)} = G(s)$$

Systeemin G siirtofunktio on nyt $G(s)$, siis tulo- ja lähtösignaalien Laplace muunnosten suhde, kun kaikki alkuarvot ovat nolliä. Siirtofunktio $G(s)$ on riippumaton tulosignaalista ja lähtösignaali kuvaa systeemin tilaa, kun tulosignaali vaikuttaa järjestelmään.

Merkinnät ja lyhenteet

A	Siirtofunktion nimittäjä
ARMAX	AutoRegressive Moving Average with eXogenous input
ARX	AutoRegressive with eXogenous input
B	Siirtofunktion osoittaja
C	Sakeusmittaus
CIC	Sakeussäädin
CIS	Computer Interface Station
C_{ref}	Sakeuden asetusarvo
CO	COntrol signal
d	Diskreetin järjestelmän viive
D	Häiriön malli
DCS	Distributed Control System
dB	Desibeli
DDE	Dynamic Data Exchange
DIS	Damatic Interface Station
t	Näytteenottoväli
u	Ohjausmuutos
e, E	Erosuure; luonnonvakio, $e = 2,718281828459$
f	Taajuus Hz
F	Virtausmittaus
FF	FeedForward
FFIC	Virtauksen suhdesäädin
FIC	Virtaussäädin
FCS	Field Control System
g	Gravitaatiovakio, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
G	Yleinen siirtofunktion merkintätapa, $G = B/A$

G_c	Säätimen siirtofunktio
G_p	Prosessin siirtofunktio
G_0	Suljetun piirin siirtofunktio
h	Säätöväli [s]
HTML	HyperText Markup Language
IAE	Integral of Absolut Error
IMC	Internal Model Control
in	Tulo
ISE	Integral of Square Error
k, n	Kokonaislukuindeksi (0, 1, 2, 3,...)
K	Prosessin vahvistus
K_{kr}	Prosessin kriittinen vahvistus
K_p	PID-säätimen vahvistus
k_{ff}	Myötäkytkennän vahvistus
L	Prosessin viive s; Pinnankorkeus m; Laplace muunnos
LIC	Pinnankorkeuden säädin
lambda	Viritysparametri lambda-virityksessä, suljetun ja avoimen piirin aikavakioiden suhde
LAMBDA	Suljetun piirin aikavakio
MATLAB	The Mathworks Inc.:n ohjelmisto
N	PID-säätimen derivointiosan suodatuskerroin
na	Siirtofunktion nimittäjäpolynomin kertaluku
nb	Siirtofunktion osoittajapolynomin kertaluku
out	Lähtö
pi	Luonnonvakio, $pi = 3,14159265359$
PB	Proportional Band
PC	Personal Computer
PCS	Process Control Station

PID	Proportional - Integration - Derivative
PLC	Programmable Logic Controller
PRBS	Pseudo Random Binary Signal
PV	Process Variable
ϕ	Vaihesiirto
QIC	Pitoisuuden säädin
q^{-1}	Viiveoperaatio
r, R	Asetusarvo
ρ	Tiheys kg/m ³
RBS	Random Binary Signal
s	Laplace-muuttuja
SPC	Statistical Process Control
t	Jatkuvan ajan muuttuja
T	Prosessin aikavakio [s]
T_{kr}	Prosessin kriittisen värähtelyn jaksonaika [s]
T_d	PID-säätimen derivointiaika
T_{df}	PID-säätimen derivointiajan suodatusaika
T_i	PID-säätimen integrointiaika
TIC	Lämpötilansäädin
u, U	Säätimen ohjaus
u_0	Ohjauksen perustaso, bias
$x; X$	Muuttuja; Kompensaattori
ω	Kulmataajuus [rad/s]
v	Mittaushäiriö, valkoista kohinaa
w	Kuormitushäiriö
WWW	World Wide Web
y, Y	Järjestelmän lähtö
z	z - muunnoksen muuttuja

ZOH

Zero Order Hold