

Heikki Kauppinen

SÄÄTÖVENTTIILIIEN EPÄLINEAARISUUDET

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Heikki Kauppinen: Säästöventtiilien epälineaarisuudet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Automaatiotekniikka
Huhtikuu 2020

Säästöventtiilien epälineaarisuudet ovat yleinen ongelma prosessiteollisuudessa. Epälineaarisuudet säästöpiirissä heikentävät säädön tarkkuutta ja aiheuttavat prosessiin oskillaatiota. Aihetta on tutkittu laajalti kirjallisuudessa. Tässä työssä käydään kootusti läpi tyypillisimmät epälineaariset ilmiöt säästöventtiileissä ja esitetään tapoja havaita ja kompensoida niitä. Työ pohjautuu muuhun kirjallisuuteen.

Säästöventtiilit ovat prosessiteollisuudessa paljon käytettyjä laitteita, joilla säädetään esimerkiksi aineiden virtauksia. Säästöventtiilejä ohjataan avaamalla ja sulkemalla venttiiliä halutun asetusarvon mukaisesti. Säästöpiirissä epälineaarisuudella tarkoitetaan prosessin käyttäytymistä eri tavalla eri toimintapisteissä. Säästöventtiileissä esiintyvistä epälineaarisista ilmiöistä yleisimmät ovat lepokitka, vällys ja vasteeton alue sekä hystereesi. Lepokitka on näistä yleisin ja eniten tutkittu. Epälineaarille ilmiöille yhteistä on niiden heikentävä vaikutus prosessin sujuvuuteen ja säädön tarkkuuteen.

Monien epälineaarisuuksien vaikutus kasvaa lepokitkan vaikutuksen kasvaessa. Lepokitkaa syntyy ajan mittaan venttiilin kuluessa sisäisten osien hankauksesta. Lepokitka saa venttiilin karan jumiutumaan eri asentoihin. Tällaisen venttiilin ohjaus on haastavaa, koska jumiutuminen aiheuttaa oskillaatiota, jota kutsutaan stick-slip-ilmiöksi.

Epälineaaristen ilmiöiden vaikutuksia säästöpiirissä voidaan havaita ja kompensoida erilaisilla menetelmillä. Suurin osa menetelmistä keskittyy lepokitkan vaikutuksiin. Prosessin vasteen oskillaatiota ja sen aaltomuotoa voidaan tarkastella ja tunnistaa siitä lepokitka. Lepokitkaa voidaan kompensoida lisäämällä ohjaukseen lyhyitä pulsseja. Pulssien energia mahdollistaa sen, ettei venttiili jumiudu. Välystä voidaan kompensoida samaan tapaan kuin lepokitkaa ja sen vaikutusta voidaan arvioida vertailemalla prosessin sisään- ja ulostuloa.

Avainsanat: säästöventtiili, epälineaarisuus, lepokitka, oskillaatio

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Haluaisin kiittää Veli-Pekka Pyrhöstä mielenkiintoisesta aiheesta sekä kandidaatintyöni ohjaamisesta. Veli-Pekka oli vahvasti läsnä kandidatyöprosessini alusta loppuun ja auttoi aina tarvittaessa. Kiitoksen ansaitsevat myös kaikki ystävät ja läheiset, jotka tukivat minua tämän työurakan aikana.

Tampereella, 29. huhtikuuta 2020

Heikki Kauppinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄÄTÖVENTTIILIT JA EPÄLINEAARISUUS	2
2.1 Epälineaarisuus	2
2.2 Säätöventtiili	3
2.3 Säätöventtiilin ohjaus	5
3. EPÄLINEAARISET ILMIÖT SÄÄTÖVENTTIILEISSÄ.....	6
3.1 Epälineaariset ilmiöt yleisesti	6
3.2 Lepokitka ja Stick-slip-ilmiö	6
3.3 Välykset ja vasteeton alue	8
3.4 Hystereesi	9
3.5 Muita epälineaarisia ilmiöitä	10
4. EPÄLINEAARISUUKSIEN DIAGNOSOINTI JA KOMPENSOINTI.....	11
4.1 Lepokitkan diagnosointi säätöventtiilissä.....	11
4.2 Lepokitkan kompensointi säätöventtiilissä.....	14
4.3 Välyksen havaitseminen ja kompensointi säätöpiirissä	17
5. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	23

1. JOHDANTO

Säätöventtiileissä esiintyvät epälineaarisuudet ovat yksi merkittävimmistä tekijöistä, jotka aiheuttavat prosesseihin muutoksia [1]. Säätöventtiilejä käytetään paljon prosessiteollisuudessa, kun halutaan säätää esimerkiksi aineiden virtauksia. Epälineaarisuudet aiheuttavat säätöpiiriin ongelmia, jotka voivat johtaa tuotantolaitoksessa tehokkuuden heikkenemiseen ja koko laitoksen tuotannon seisahtumiseen. Epälineaarisuuksien havaitseminen ja kompensointi säätöpiirissä mahdollistaa sen sujuvan toiminnan. Kun säätöpiirit toimivat tarkoituksenmukaisella tavalla, tuotanto on sujuvaa ja tehokasta.

Säätöpiirien heikentynyt tarkkuus voi johtua monista syistä, kuten huonosta virityksestä tai häiriöistä [2, s. 123], mutta tässä työssä keskitytään tarkastelemaan epälineaarisuuksista johtuvia syitä. Epälineaarisuuksia voi esiintyä prosessissa itsessään, säätöventtiileissä tai prosessissa käytetyissä muissa laitteissa [2, s. 123]. Säätöventtiileissä esiintyvistä epälineaarisista ilmiöistä tyypillisimpiä ovat *lepokitka* (engl. stiction), *vasteeton alue* (engl. dead band), *hystereesi* (engl. hysteresis) ja *vällys* (engl. backlash) [2, s. 123]. Tässä työssä epälineaarisista ilmiöistä tarkastellaan eniten lepokitkaa, koska se on ilmiöistä yleisin ja eniten tutkittu [2, s.143].

Aihetta on kirjallisuudessa tutkittu laajalti [1–4] ja monesta näkökulmasta. Kirjallisuudessa on esitetty epälineaaristen ilmiöiden diagnosointi- ja kompensointimenetelmiä säätöpiirissä [1, 3, 4]. Menetelmät keskittyvät lepokitkaan ja välykseen ja kaikki tässä työssä esiintyvät menetelmät ovat Tore Hägglundin kirjoittamia. Tämän työn tarkoituksena käsitellä säätöventtiilien epälineaarisuutta selkeästi ja kootusti muuhun kirjallisuuteen pohjautuen.

Työ koostuu viidestä luvusta, joista ensimmäisenä on johdanto. Toisessa luvussa käydään läpi teoriaa ja taustatietoa säätöventtiileistä sekä epälineaarisuudesta, jotta myöhemmin esitettyjen asioiden ymmärtäminen olisi helpompaa. Seuraavassa luvussa syvennytään tarkastelemaan epälineaarisia ilmiöitä. Ensin ilmiöitä käsitellään yleisellä tasolla ja tämän jälkeen tarkastellaan, miten ne vaikuttavat säätöventtiin toimintaan. Luvussa neljä esitellään tapoja havaita epälineaarisia ilmiöitä ja kompensoida niitä säätöpiirissä. Lopussa on yhteenveto käsitellyistä asioista.

2. SÄÄTÖVENTTIILIT JA EPÄLINEAARISUUS

Tässä luvussa käsitellään, mitä tarkoitetaan epälineaarisuudella ja mitä se tarkoittaa säätöventtiilien näkökulmasta. Lisäksi esitellään säätöventtiilin toimintaperiaate ja lopuksi tarkastellaan säätöventtiilin ohjausta säätöpiirissä.

2.1 Epälineaarisuus

Matemaattisesti epälineaarisuus määritellään lineaarisuuden vastaväitteenä: jos systeemi ei ole lineaarinen, niin se on epälineaarinen. Systeemiä voidaan kuvata matemaattisesti funktiolla $f(x)$. Systeemi on lineaarinen, jos additiivisuus- ja homogeenisuusehto täyttyvät. [2, s. 69]

Additiivisuus määritellään

$$f(x + y) = f(x) + f(y) \quad (2.1)$$

ja homogeenisuus määritellään

$$f(ax) = af(x), \quad (2.2)$$

jossa a on mikä tahansa vakio. Nämä kaksi ehtoa yhdessä tunnetaan superpositioperiaatteena. Yksinkertainen matemaattinen esimerkki epälineaarisesta yhtälöstä on toisen asteen yhtälö. [2, s. 69]

Epälineaarisuus säätöpiirissä tarkoittaa sitä, että prosessi käyttäytyy eri tavalla eri toimintapisteissä [2, s. 113]. Esimerkiksi säätöventtiili reagoi ohjaussignaaliin eri tavoin riippuen siitä, kuinka paljon venttiiliä avataan tai suljetaan (ks. alaluku 3.4). Sääntötekniikassa epälineaarisuuksilla on suuri merkitys, koska epälineaarisuudet prosessissa vaikuttavat haitallisesti säädön tarkkuuteen. Säätöventtiilien tapauksessa epälineaarisuudet voivat aiheuttaa oskillaatiota mitattuun ulostuloon. Yhden takaisinkytketyn säätöpiirin oskillaatio voi johtaa tuotantolaitoksen eri yksiköiden säätöpiirien oskillaatioon. [2, s. 69] Oskillaatiolla tarkoitetaan signaalin värähtelyä jonkin halutun arvon ympärillä.

Lähes kaikki fyysiset systeemit ovat käytännössä epälineaarisia, koska systeemiin vaikuttavia tekijöitä on niin paljon. Käytännön systeemit ovat myös dynaamisia, eli niissä tarkastellaan muutoksia ajan suhteen. Epälineaaristen dynaamisten systeemien ymmärtäminen onkin tärkeää, jotta systeemiä pystytään hallitsemaan ja säätämään halutulla tavalla.

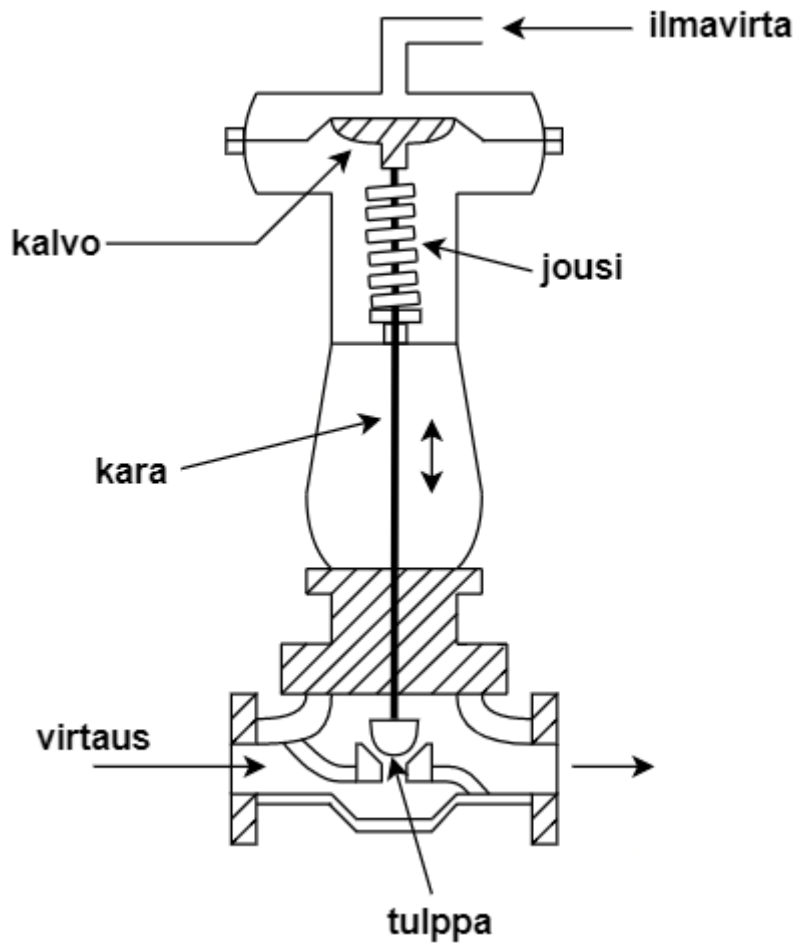
Usein oletetaan, että epälineaarisetkin prosessit käyttäytyisivät suurin piirtein lineaariseen tapaan [2, s. 121] tai niitä voidaan approksimoida käyttämällä lineaarisia malleja [5]. Tähän oletukseen perustuen epälineaarisisissa prosesseissa käytetään usein lineaarisia säätimiä [2, s. 123,183]. Epälineaarisuudet aiheuttavat säätöpiiriin paljon ongelmia ja heikentävät sen tarkkuutta. Epälineaarisuudet lyhentävät usein säätöventtiilien käyttöikä ja aiheuttavat kustannuksia, kun venttiilejä joudutaan korjaamaan tai vaihtamaan. [3] On siis tärkeää tunnistaa epälineaarisuuden aiheuttajat ja pyrkiä kompensoimaan niitä säädöllä.

2.2 Säätöventtiili

Tässä työssä käsitellään ensisijaisesti säätöventtiileihin liittyviä epälineaarisuuksia, joten on tärkeää ymmärtää peruseriaatteet säätöventtiileistä. Säätöventtiili on laite, jolla pysytään säätämään nesteen tai kaasun virtausta. Säätöventtiilejä on paljon erilaisia, mutta kaikkien niiden pääperiaate on sama ja ne koostuvat samankaltaisista osista. Venttiiliä avaava ja sulkeva toimilaitte voi tyypillisesti olla hydraulinen, sähköinen tai ilmakäyttöinen. Prosessien säädössä yli 90 % toimilaitteista on ilmakäyttöisiä eli pneumaattisia. [1]

Säätöventtiilit koostuvat kolmesta pääosasta: venttiilin *rungosta* (engl. body), *toimilaitteesta* (engl. actuator), joka liikuttaa venttiilin *karaa* (engl. stem), ja *asennoittimesta* (engl. positioner), jolla säädetään venttiilin karan asentoa ohjaussignaalin mukaisesti. Toimilaitteita ja runkoja on paljon eri kokoisia, mutta asennoittimen koko ei ole muista komponenteista riippuvainen. [1] Hyvällä säätösuunnittelulla ei saada parhaita mahdollisia tuloksia, jos säätöventtiilin komponentit eivät toimi halutulla tavalla [6].

Kuvassa 2.1 on esitetty läpileikkaus tyypillisestä istukkaventtiilistä, jolla säädetään virtausta. Kuvassa näkyy pneumaattinen toimilaitte ja venttiilin runko, jossa kaasu tai neste virtaa. Ilmavirran paineen suuruutta säätämällä voidaan määrittää, kuinka paljon venttiili on auki tai kiinni. Ilmavirta painaa *kalvoa* (engl. diaphragm), joka taas painaa *jousta*, joka liikuttaa karaa ja sen päässä olevaa *tulppaa*. Tulpan sijainti vaikuttaa aukon suuruuteen, josta neste tai kaasu pääsee virtaamaan.



Kuva 2.1 Lämpileikkaus pneumaattisesta säätöventtiilistä, perustuu lähteeseen [7]

Kuvassa 2.1 näkyvien osien lisäksi säätöventtiileistä löytyy usein asennoitin, jolla varmistetaan venttiilin karan asennon vastaavan ohjaussignaalin mukaista haluttua asentoa. Asennoittimen tärkein tehtävä on kuljettaa paineistettua ilmaa toimilaitteelle ja tarkkailla venttiilin karan asentoa. Asennoitin saa takaisinkytkennän kautta karan sijaintitietoa ja tekee sen perusteella vaadittavat korjaukset, jotta kara olisi asetusarvon mukaisessa asennossa. [8, s. 75]

Prosessiteollisuudessa on käytössä monia erilaisia venttiilirunkotyyppejä. Venttiilityypit ovat ominaisuuksiltaan erilaisia, mutta kaikkien niiden tarkoitus on sama. Kaikkia venttiilejä käytetään virtaavien aineiden säätöön. Venttiilityypeittäin vaihtelevana erona voi olla esimerkiksi suhde, jolla neste tai kaasu pääsee virtaamaan venttiilin läpi. Yleisimpiä runkotyyppejä ovat esimerkiksi pallomaisella sulkijalla varustetut istukkaventtiilit, luistiventtiilit, perhosventtiilit ja palloventtiilit [9].

2.3 Säätöventtiilin ohjaus

Prosessilaitoksissa saattaa olla satoja tai tuhansia toisiinsa vaikuttavia säätöpiirejä, joilla varmistetaan jonkin tuotteen sujuva valmistaminen. Jokaisen yksittäisen säätöpiirin tehtävä on varmistaa, että prosessisuure on halutulla toiminta-alueella. Prosessisuure säätöpiirissä voi olla esimerkiksi paine, virtaus, pinnankorkeus tai lämpötila. Jokaiseen säätöpiiriin tulee häiriöitä ja säätöpiirit vaikuttavat heikentävästi myös toisiinsa. Säätimen tehtävä on prosessoida mitattua informaatiota ja tehdä oikeanlaisia toimenpiteitä, jotta prosessisuure pysyisi mahdollisimman lähellä haluttua asetusarvoa. [10] Säädin saa mittaustietoa prosessisuureesta takaisinkytkennän kautta ja laskee mittauksen ja asetusarvon välisen eron. Tämän perusteella säädin lähettää oikeansuuruisen ohjaussignaalin toimilaitteelle.

Säätöventtiili luokitellaan *toimielimeksi* (engl. final control element), joka on tyypillisesti jokin mekaaninen laite, joka fyysisesti muuttaa prosessia säädön asetusarvon mukaisesti. Toimielimillä saadaan siis haluttu asetusarvon mukainen ulostulo, joka voi olla esimerkiksi jokin tietty virtausnopeus. On huomattu, että tarkemmalla säädöllä saadaan aikaiseksi säästöjä parantamalla laatua ja tehokkuutta prosessilaitoksissa. [11]

Säätöventtiileiden sanotaan olevan säätöpiirin tärkein osa, mutta yleensä myös laiminlyödyin. Tuotantolaitoksissa prosesseja valvoo niin sanotut koneidenkäyttäjät. Koneidenkäyttäjät eivät usein ymmärrä kaikkia järjestelmään vaikuttavia tekijöitä ja heiltä jää siksi vikoja huomaamatta. Säätöpiirissä säätimen rinnalla on usein sensoreita, joilta säädin saa mittaustietoa ja tekee vaadittavat ohjaukset toimielimelle. Säätöpiirissä sensoreita voidaan kutsua ”silmiksi”, säädintä ”aivoiksi” ja toimielintä ”käsiksi”, joka tekee lopulliset ja suurimmat muutokset. [10]

Säätöventtiiliä ohjaamalla avataan ja suljetaan venttiiliä joko kokonaan tai osittain asetusarvon mukaisesti. Venttiilin avaaminen ja sulkeminen toteutetaan usein automaattisesti sähköisillä, hydraulisilla tai pneumaattisilla toimilaitteilla. Asennoittimet ohjaavat venttiilin liikettä sähköisillä tai pneumaattisilla signaaleilla. Pneumaattiset signaalit ovat tyypillisesti 0,2–1,0 bar ja sähköiset signaalit ovat 4–20 mA. [12]

3. EPÄLINEAARISET ILMIÖT SÄÄTÖVENTTIILEISSÄ

Tässä luvussa tarkastellaan epälineaarisia ilmiöitä. Aluksi esitellään ilmiöitä yleisesti, minkä jälkeen ilmiöitä tarkastellaan niiden esiintyvyyden mukaan säätöventtiileissä. Kirjallisuudessa eniten esiintyviä ilmiöitä tarkastellaan ensin ja vähiten esiintyviä viimeiseksi.

3.1 Epälineaariset ilmiöt yleisesti

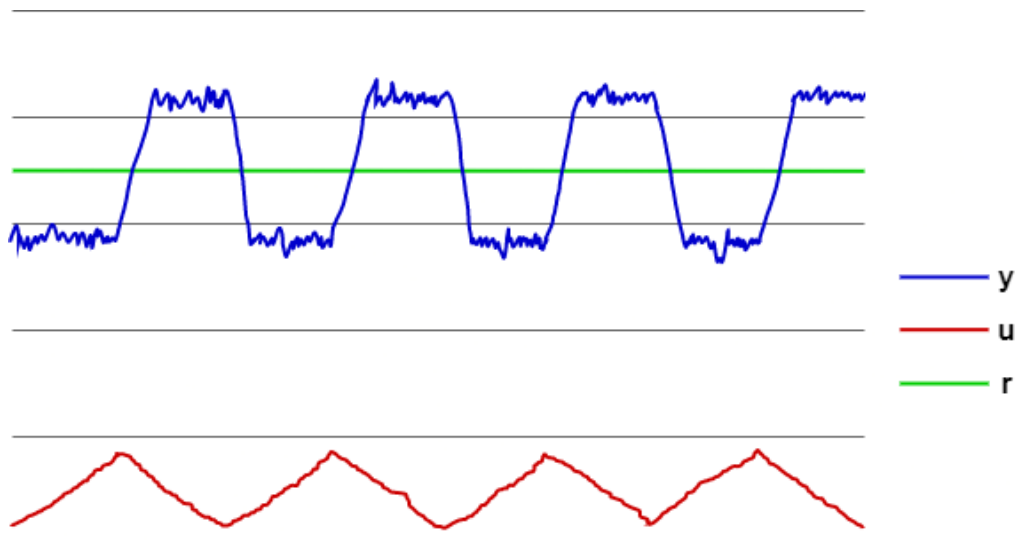
Säätöpiirissä epälineaarisuudet voivat aiheutua prosessin epälineaarisesta dynamiikasta, säätöventtiilin epälineaarisista ominaisuuksista, säätöpiiriin tulevista epälineaarisista häiriöistä tai säätöventtiiliin ilmenevistä epälineaarisista vioista (engl. fault) [2, s.111]. Näitä vikoja ovat esimerkiksi jo aikaisemmin esille tulleet lepokitka, vällys, vasteeton alue ja hystereesi ja nämä ovat nimenomaan säätöventtiilin rakenteisiin liittyviä epälineaarisia vikoja.

Prosessin epälineaarinen luonne ja säätöventtiilin epälineaariset ominaisuudet ovat pehmeitä epälineaarisuuksia (engl. soft nonlinearities). Säätöventtiilissä ilmenevät viat ovat sen sijaan kovia epälineaarisuuksia (engl. hard nonlinearities). Pehmeä epälineaarisuus tarkoittaa sitä, että se voidaan mieltää paikoin lineaariseksi. Kovat epälineaarisuudet ovat säätöpiirin hallitsevia epälineaarisuuksia. [2, s.111] Kovat epälineaarisuudet ovat siis vaikutukseltaan merkittävämpiä ja niitä on syytä tunnistaa ja kompensoida.

3.2 Lepokitka ja Stick-slip-ilmiö

Lepokitka (engl. stiction) on säätöventtiilien epälineaarisista ilmiöistä yleisin. Lepokitka heikentää säätöpiirin tarkkuutta ja aiheuttaa oskillaatiota säädettävään suureeseen. [13] Lepokitkaa syntyy säätöventtiilin sisäisten osien hankauksesta toisiinsa. Sitä esiintyy useimmiten liian tiukoissa venttiilin karan tiivisteissä. Lepokitkaa voi myös aiheutua alimitoitetuista toimilaitteista tai huonosti viritetystä asennoittimesta. [14] Lepokitka muuttuu ajan ja toimintapisteen mukaan. Myös lämpötilan muutokset aiheuttavat muutoksia lepokitkan suuruuteen. [1] Lämpötilan kasvaessa säätöventtiilin materiaalit laajenevat ja aiheuttavat suuremman lepokitkan. Vaikka lepokitka on säätöventtiilien epälineaarisista ilmiöistä yleisin, sille on vaikea löytää yhtenäistä selitystä. Lepokitkan aiheuttajamekanismeista, mittaamisesta ja mallintamisesta on monia eriäviä mielipiteitä [2, s. 146].

Säätöventtiilissä lepokitkan vaikutus ilmenee venttiilin jumiutumisenä eri asentoihin. Pyssähtyessään venttiili, jossa on lepokitkaa, jää herkästi jumiin siihen asentoon. Venttiilin kara tarvitsee ylimääräistä voimaa lähteäkseen uudelleen liikkeelle. Integroivan säätimen ulostulo muuttuu jatkuvasti ja kerryttää painetta venttiiliin. Kun painetta on kertynyt tarpeeksi toimilaitteeseen, venttiilin kara vapautuu ja lähtee liikkeelle. Ylimääräinen paine saa venttiilin karan liikkumaan toiseen ääriasentoon, jonne se vastaavasti jumiutuu. Sama ilmiö toistuu uudelleen. Tätä oskillaatiota asetusarvon molemmin puolin kutsutaan stick-slip-ilmiöksi. [14] Lepokitkasta johtuvaa stick-slip-ilmiötä havainnollistetaan kuvassa 3.1.



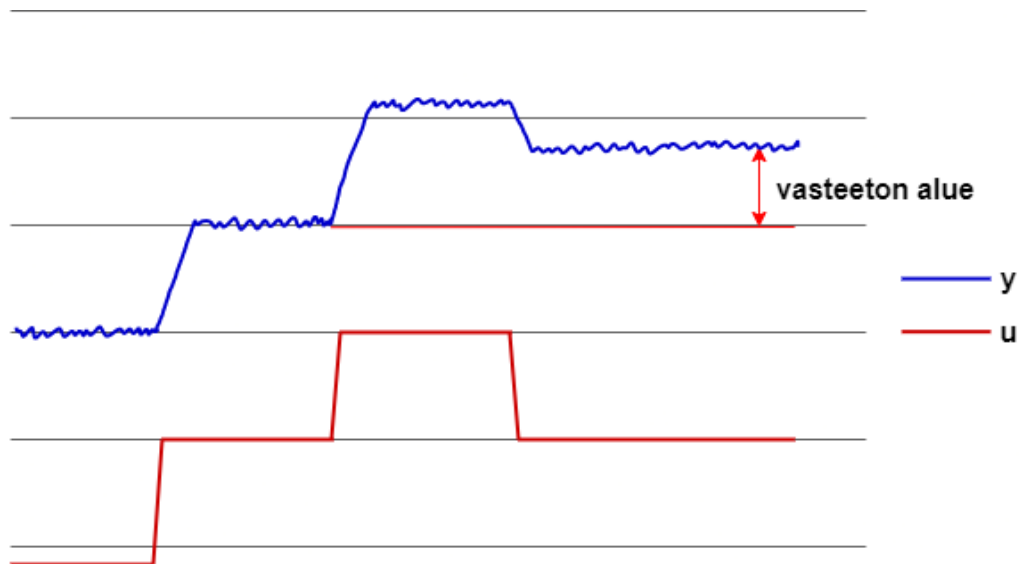
Kuva 3.1 Lepokitkasta johtuva stick-slip-ilmiö, perustuu lähteeseen [14]

Kuvassa 3.1 säädettävän prosessisuureen mittaus kuvassa on y ja sen asetusarvo on r ja säätimen ulostulo on u . Kuvasta näkee, miten prosessisuure oskilloi asetusarvon ympärillä. Kuva havainnollistaa hyvin stick-slip-ilmiötä, jossa säätimen ulostulo kerryttää venttiilin painetta, kunnes se lähtee liikkeelle. Tämän jälkeen säätimen ulostulo muuttaa suuntaa ja ilmiö toistuu. Säätimen ulostulo muistuttaa usein sahalaita-aaltoa, kun taas mittaus muistuttaa kanttiaaltoa tai epäsäännöllistä siniaaltoa [14].

3.3 Välyk ja vasteeton alue

Välyk (engl. backlash) ja *vasteeton alue* (engl. dead band) ilmiöinä muistuttavat toisiaan. Monissa mekaanisissa laitteissa, mukaan lukien säätöventtiileissä, on välystä liikkuvien ja toisiinsa koskevien osien välissä. Aina kun venttiilin liike muuttaa suuntaa, venttiilin täytyy kulkea välyksen pituinen matka ennen todellista liikettä. [15] Välyk aiheuttaa siis ohjaukselle vasteetonta aluetta venttiilin karan suunnan muuttuessa.

Välyksen lisääntyminen on yhteydessä lepokitkan lisääntymiseen. Kun lepokitka lisääntyy, myös välyksen määrä lisääntyy asennoittimessa ja toimilaitteessa. Välyksen määrä kasvaa myös säätöventtiilin kuluessa. Välyk aiheuttaa säätöpiiriin viivettä ja heikentää näin säädön tarkkuutta. [4] Lepokitkan tavoin välyk aiheuttaa säätöpiiriin myös oskillaatiota [14]. Kuvassa 3.2 havainnollistetaan vasteettoman alueen vaikutusta prosessisuureeseen.

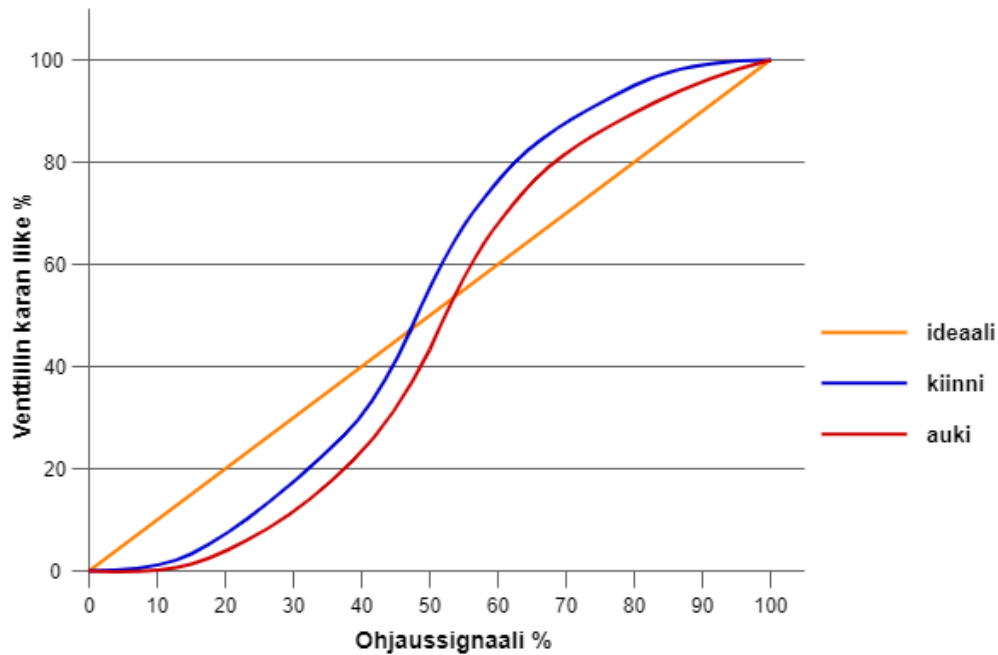


Kuva 3.2 Vasteettoman alueen vaikutus prosessisuureeseen, perustuu lähteeseen [14]

Kuvasta 3.2 näkee, miten prosessisuureen mittaus y reagoi säätimen askelohjaukseen u . Aluksi tarvitaan kaksi samansuuntaista ja riittävän suurta askelohjausta, jotta voidaan varmistua siitä, että välyk on kurottu umpeen. Ensimmäisellä askeleella ei voida olla varmoja, sisältääkö vaste vasteettoman alueen vai ei. Kun muutetaan ohjauksen suuntaa, kuljetaan koko vasteettoman alueen läpi, ennen kuin vasteessa havaitaan mitään. Venttiilin välyksestä johtuen venttiilin kara ei ole lähtenyt fyysisesti liikkeelle, vaikka ohjaussignaali liikettä vaatisikin.

3.4 Hystereesi

Hystereesi ja vasteeton alue usein sekoitetaan keskenään, vaikka kyseessä on eri ilmiöt [14]. Hystereesillä tarkoitetaan venttiilin asennon eroa ”auki” ja ”kiinni” asennoissa suhteessa ohjaussignaaliin. Hystereesin aiheuttaa usein lepokitka. [16] Hystereesin vaikutukset eivät ole niin vakavia kuin välyksen, vasteettoman alueen tai lepokitkan [2, s. 140]. Ilmiötä havainnollistetaan kuvassa 3.3.



Kuva 3.3 Hystereesin vaikutus säätöventtiilissä, perustuu lähteeseen [16]

Kuvassa 3.3 vaaka-akselilla on ohjaussignaali ja pystyakselilla on venttiilin karan liike. Jos hystereesiä ei olisi säätöventtiilissä, karan liike käyttäytyisi lineaarisesti ohjaussignaaliin nähden. Tätä edustaa kuvassa oranssi käyrä. Sininen käyrä kuvastaa liikettä venttiilin sulkeutuessa ja punainen käyrä kuvastaa liikettä venttiilin auetessa. Näiden kahden käyrän välinen ero johtuu hystereesistä. Venttiilin kara käyttäytyy hieman eri tavalla ohjaussignaaliin nähden riippuen siitä, mihin suuntaan venttiilin karaa liikutetaan. Kulkusuunnasta riippuen venttiilin kara voi olla eri asennossa täsmälleen samalla ohjauksella.

3.5 Muita epälineaarisia ilmiöitä

Lepokitkan, välyksen, vasteettoman alueen ja hystereesin lisäksi säätöventtiileissä esiintyy lukuisia muita vikoja, joista syntyy epälineaarisuutta säätöpiiriin. Epälineaarisuutta voi syntyä myös väärillä venttiilivalinnoilla [2, s. 139]. Suurin osa vioista johtuu kuitenkin ajan mittaan tapahtuneesta kulumisesta [2, s. 138].

Säätöventtiilin vikoja ovat esimerkiksi syöpynyt venttiilin istukka, viallinen venttiilin kalvo, tiivisteen vuotaminen ja venttiilin saturaatio (engl. valve saturation) [2, s. 138–139]. Yhteistä kaikille vioille on niiden heikentävä vaikutus säädön tarkkuuteen. Syöpynyt venttiilistukka johtaa vuotoihin venttiilissä ja muuttaa venttiilin ominaiskäyrää. Pitkässä ja intensiivisessä käytössä venttiilin kalvo kuluu ja siihen muodostuu vikoja. Pahimmillaan kalvo voi puhjeta aiheuttaen vuotoja. [2, s. 139]

Venttiili ei voi aueta enempää kuin 100 % tai sulkeutua enempää kuin 0 % johtuen sen fyysisistä rajoitteista. Säätimeltä voi kuitenkin tulla ohjaussignaali, joka pyrkii avaamaan tai sulkemaan venttiiliä enemmän, mitä on mahdollista. Tätä kutsutaan venttiilin saturaatioksi. Saturaatio heikentää säätöpiirin tarkkuutta ja aiheuttaa prosessiin oskillatiota. [2, s 141]

Säätöventtiilit voivat olla myös yli- tai alimitoitettuja. On hyvin tyypillistä, että säätöventtiili on ylimitoitettu. Ylimitoitettu venttiili vastaa hitaasti säätimen ulostulosignaaliin ja pahimmillaan johtaa venttiilin epälineaariseen käyttäytymiseen säätöpiirissä. On vähemmän yleistä, että säätöventtiili on alimitoitettu, mutta sekin on mahdollista. Alimitoitettu venttiili ei kykene toimimaan tarpeeksi suurilla tilavuusvirroilla. Alimitoitettu venttiili johtaa epätarkkaan säätöön ja saturaation kaltaiseen epälineaarisuuteen säätöpiirissä. [2, s. 139]

4. EPÄLINEAARISUUKSIEN DIAGNOSOINTI JA KOMPENSOINTI

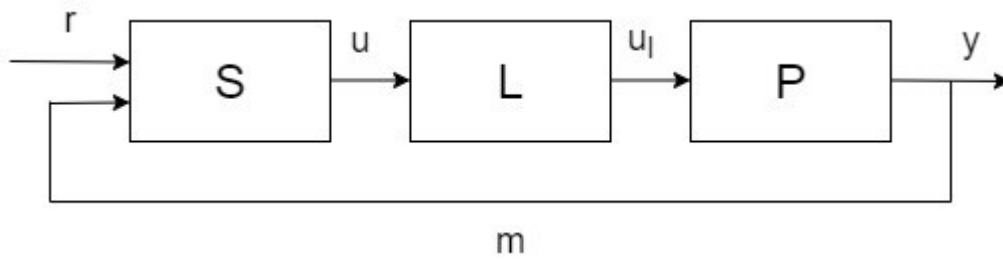
Tässä luvussa tarkastellaan tapoja havaita, diagnosoida ja kompensoida lepokitkaa ja välystä. Lähes kaikki epälineaariset ilmiöt johtuvat enemmän tai vähemmän lepokitkan vaikutuksesta tai ainakin vahvistuvat lepokitkan takia. Tämän takia tässä työssä pääpaino tarkastelussa on lepokitkan diagnosoinnissa ja kompensoinnissa, mutta luvussa käsitellään myös menetelmiä havaita ja kompensoida välyksen vaikutusta. Tässä työssä käsiteltävät menetelmät ovat Tore Hägglundin esittämiä yksittäisiä esimerkkejä diagnosoida ja kompensoida epälineaarisuuksia.

4.1 Lepokitkan diagnosointi säätöventtiilissä

Lepokitkan aiheuttama stick-slip-ilmiö on tunnistettu yleisimmäksi oskillaatiota aiheuttavaksi tekijäksi säätöventtiileissä. Lepokitkan ja muiden epälineaaristen ilmiöiden aiheuttamat ongelmat prosessituotantolaitoksissa ovat vakavia, mutta jäävät usein koneenkäyttäjiltä huomaamatta. Koneenkäyttäjillä on usein liian monta säätöpiiriä valvottavanaan. Violliset säätöventtiilit tulisi vaihtaa tai korjata, mutta tämä keskeyttäisi prosessin ja on myös kallista. Tästä syystä venttiilin käyttöikää pyritään pidentämään esimerkiksi kompensoimalla epälineaarisuuksia. [3]

Viime vuosikymmenien aikana on tehty paljon tutkimusta automaattisten suorituskykyä valvovien menetelmien kehittämiseksi. Menetelmien käyttöönotto teollisuudessa on myös lisääntynyt. Automaattisia menetelmiä oskillaation tunnistamiseksi säätöpiirissä on jo olemassa. Tässä alaluvussa tarkastellaan diagnosointimenetelmää, joka on esitetty Tore Hägglundin artikkelissa: "A shape-analysis approach for diagnosis of stiction in control valves (2011)". Menetelmän tarkoituksena on tarkastella oskilloivan vasteen aaltomuotoa ja arvioida muodosta oskillaation syy. [3]

Säätöpiiriä, jossa on lepokitkaa, havainnollistetaan kuvassa 4.1. Kuvassa on lohkokaa-vio, jossa S on säädin, L lepokitkafunktio, P prosessi, r asetusarvo, u säätimen ulostulo, u_l prosessin sisääntulo, y ulostulo ja m ulostulon mittausta. Säätimen ulostulo ei ole prosessin sisääntulo vaan todellinen sisääntulo saadaan vasta lepokitkafunktiosta.



Kuva 4.1 Lohkokaavio säätöpiiristä, jossa on mukana lepokitkafunktio, perustuu lähteeseen [3]

Lepokitkamallin sisääntulon u ja ulostulon u_l välistä suhdetta voidaan mallintaa

$$u_l(k) = \begin{cases} u_l(k-1), & u(k) - u_l(k-1) \leq d \\ u(k), & \text{muulloin} \end{cases}, \quad (4.1)$$

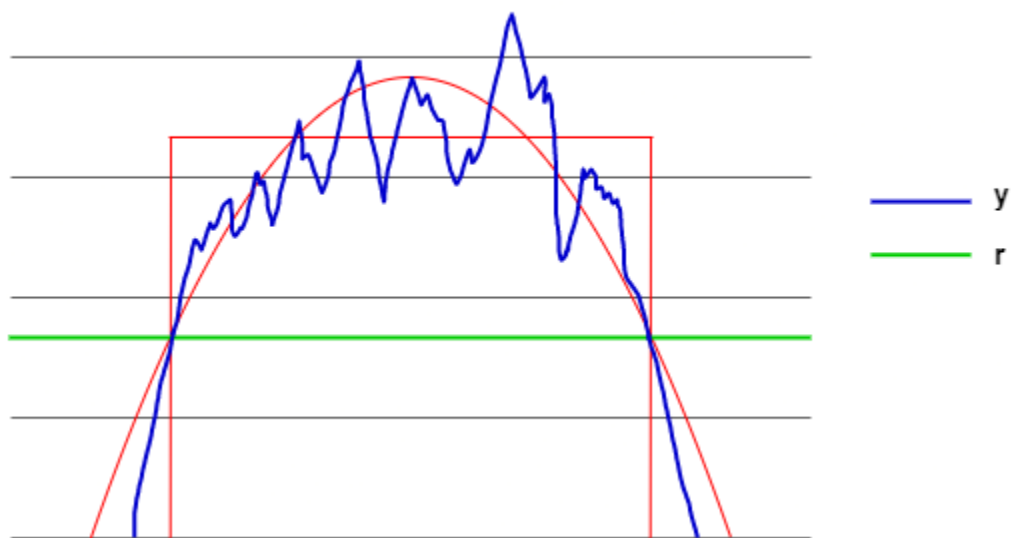
jossa d on lepokitkan suuruus [3]. Malli on diskreettiaikainen ja vertailee tapahtumia ajanhetkellä k ja ajanhetkellä $k-1$. Malli olettaa, että venttiilin kara on jumissa niin kauan, kun säätimen ulostulon u ja lepokitkamallin ulostulon u_l välinen ero on pienempi tai yhtä suuri kuin lepokitkan suuruus d . Kun ero kasvaa suuremmaksi kuin lepokitkan suuruus, venttiilin kara pääsee taas liikkeelle. Säätimen ohjaus kasvaa siis suuremmaksi kuin lepokitkamallin vaikutus.

Hägglundin artikkelissa esitellään simulointituloksia lepokitkan suuruuden vaikutuksen d ollessa 2 %. Simuloinneissa käytettiin PID- ja PI-säätimiä eri vahvistuskertoimilla. Isomalla P-osan vahvistuskertoimella vaste ei saavuttanut tasapainotilaa. Mitä suurempi P-osan vahvistuskerroin oli, sitä enemmän vaste alkoi muistuttaa siniaaltoja kanttiaallon sijaan. Simuloinnissa, jossa käytettiin PI-säädintä, vaste ei saavuttanut tasapainotilaa lainkaan, ja kanttiaallon sijaan nähtiin kolmiomainen aalto. Simuloinnit antoivat hyvän käsityksen stick-slip-ilmiöstä, mutta eivät vastaa täysin todellisuutta. Todellisuudessa oskillaation taajuus ja amplitudi vaihtelisivat enemmän ja epäsäännöllisemmin. [3]

Venttiilin karan liikkeellelähtö riippuu eroisuudesta. Jos prosessin mittaus ja asetisarvo ovat lähellä toisiaan, eli erosuure on pieni, säätimellä kestää kauan kerryttää painetta ja saada venttiilin kara taas liikkeelle. Jos erosuure on iso, säätimen P-osa saa aikaan nopeasti ison muutoksen. Aika seuraavaan stick-slip-liikkeeseen tulee siis lyhyeksi. [3]

Simuloinneilla pystyttiin havainnollistamaan sitä, miten venttiilin kara on jumissa, kunnes säätimen ohjaus ylittää lepokitkan vaikutukset. Tämän jälkeen venttiilin kara lähtee liikkeelle ja jumiutuu uuteen asentoon ja täten aiheuttaa jatkuvaa oskillaatiota.

Kirjallisuudessa on esitetty useita tapoja diagnosoida lepokitkaa säätöpiirissä, mutta mikään menetelmä ei kata kaikkia tapauksia. Aihetta voidaan esimerkiksi tarkastella aika- tai taajuustasossa ja online- tai offline-tilassa. Useat menetelmät tarkastelevat siniaaltojen ja stick-slip-ilmiön eroja aikatasossa ja niillä diagnosoidaan siten oskillaatiota. Hägglundin artikkelissa esitellään menetelmä, joka ei oleta, että oskillaatiolla olisi vakio amplitudi, taajuus ja muoto. Hägglundin esittämä menetelmä ottaa huomioon näiden kolmen tekijän muutokset. Menetelmän tarkoituksena on tarkastella prosessin mittauksen kahden nollakohtien välistä vastetta ja tutkia, muistuttaako se enemmän siniaaltoa vai kanttiaaltoa. [3] Menetelmää havainnollistetaan kuvassa 4.2.



Kuva 4.2 Mittausdataa oskilloivasta prosessista, perustuu lähteeseen [3]

Kuvassa 4.2 sininen käyrä on prosessimuuttujan mittaus y ja vihreä vaakaviiva prosessin asetusarvo r . Kuvassa on merkattu punaisella sini- ja kanttiaalto. Tarkastelukohteena on nollakohtien väliin jäävä alue. Nollakohtien väliin jäävästä mittausdatasta voidaan tarkastella yksittäisiä kohtia ja arvioida matemaattisesti, muistuttaako signaali enemmän kantti- vai siniaaltoa kyseisessä pisteessä. Lepokitkalle lasketaan indeksiarvo, jonka perusteella arvioidaan, mistä oskillaatio johtuu. Indeksiarvo perustuu häviöfunktioon (engl. loss function), joka kertoo signaalin poikkeaman vertailuaalloista eli sini- ja kanttiaallosta. Jos signaali on lähempänä kanttiaaltoa kuin siniaaltoa (positiivinen lepokitkaindeksi), oskillaatio aiheutuu todennäköisesti lepokitkan vaikutuksesta. Jos signaali on lähempänä siniaaltoa (negatiivinen lepokitkaindeksi), oskillaatio johtuu todennäköisesti säätimen viirityksestä tai ulkoisista häiriöistä. [3]

Menetelmällä voidaan tarkastella montaa oskillaatiojaksoa ja päätellä monen jakson keskiarvon perusteella, mistä oskillaatio johtuu. Jos monen jakson lepokitkaindeksien keskiarvo on positiivinen, voidaan sanoa, että oskillaatio johtuu todennäköisesti lepokitkasta. Menetelmällä on syytä tarkastella vain jaksoja, jotka poikkeavat merkittävästi asetusravosta. Pienet poikkeamat voivat johtua kohinasta tai muista ulkoisista häiriöistä. [3]

Menetelmää on testattu teollisessa ympäristössä ja se on osoittautunut toimivaksi. Suurin haaste menetelmää käytettäessä on kohina. Kohina vaikeuttaa oskillaation syyn tunnistamista, koska poikkeamat sekä kanttiaalloista että siniaalloista tulevat suureksi ja lepokitkaindeksin arvo jää lähelle nollaa. Lepokitkaindeksistä on siten vaikea päätellä, mistä oskillaatio johtuu. Kohinaa pystytään vaimentamaan alipäästösuotimilla. Alipäästösuodin päästää lävitseen vain matalamman tason taajuuksia ja korkeammat, kohinasta johtuvat, tulevat suodatetuiksi. [3]

4.2 Lepokitkan kompensointi säätöventtiilissä

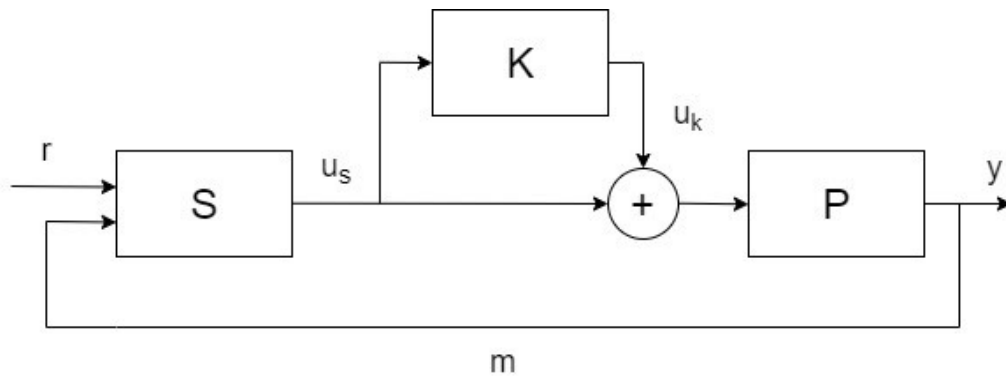
Edellisessä alaluvussa käytiin läpi tapa havaita ja diagnosoida lepokitkan vaikutukset säätöpiiriin. Lepokitkan vaikutuksia voidaan myös kompensoida säätöpiirissä, kun sen vaikutukset säätöpiirissä on tunnistettu. Tässä alaluvussa käydään läpi kompensointimenetelmä, joka on esitetty Tore Hägglundin artikkelissa: ”A friction compensator for pneumatic valves (2002)”. Kompensointimenetelmän tarkoitus on lisätä ohjaussignaaliin lyhyitä pulsseja, joilla estetään venttiilin jumiutuminen. [1]

Kompensaattorin tarkoitus säätöpiirissä on ennaltaehkäistä häiriön vaikutusta. Kompensaattori on kytketty piiriin myötäkytkennällä. Kompensaattorilta tulee sellainen ohjaus, joka reagoi häiriöön ennalta ja eliminoi sen vaikutuksen. Kompensaattorikaan ei saa kuitenkaan koko häiriötä eliminoida, vaan sen kompensoimaton häiriö näkyy mittauksessa. Lepokitkaa voidaan kompensoida lisäämällä ohjaussignaaliin lyhyitä pulsseja. Tätä menetelmää kutsutaan *koputtajaksi* (engl. knocker). [1]

Ideaalinen lepokitkakompensaattori lähettäisi oikea-aikaisia ja energialtaan lepokitkan vaikutuksen suuruisia pulsseja ohjaussignaaliin. Tällainen on kuitenkin käytännössä mahdoton toteuttaa. Jos pulsseilla on liian paljon energiaa, stick-slip-ilmiö vain vahvistuu. Jos pulsseilla on liian vähän energiaa, venttiilin kara pysyy jumiutuneena. Ongelmana on, että lepokitkan vaikutus vaihtelee, eikä ole aina ennustettavissa. [1] Koputtajalla pyritään ylitsepääsemään tämä ongelma.

Koputtajaa on syytä käyttää siinä vaiheessa, kun lepokitka saa aikaan stick-slip-ilmion ja ilmiö on tunnistettu. Koputtajan tarkoitus on lähettää sekvenssi lyhyitä, amplitudiltaan ja kestoltaan yhtä suuria pulsseja säätimen ohjaussignaaliin. Pulssien sopiva energia mahdollistaa sen, että venttiili ei jumiudu stick-slip-ilmion mukaisesti, ja täten oskillaatio säätöpiirissä vähenee. [1]

Jotkin koputtajan lähettimistä signaaleista ovat todennäköisesti etumerkiltään väärä heti sen jälkeen, kun venttiili on vapautunut jumiutuneesta asennosta. Tämä johtuu pienestä mittauksen viiveestä, mikä taas aiheuttaa ohjaukseen pienen viiveen. Nämä ylimääräiset vääränmerkkiset pulssit eivät kuitenkaan haittaa, koska venttiili on jumiutunut toiseen asentoon ja pulssien energia ei riitä ylitsepääsemään lepokitkan vaikutusta. Tämä on nopeiden ja pienienergiaisten pulssien etu. [1] Koputtajan toimintaa säätöpiirissä havainnollistetaan kuvassa 4.3.



Kuva 4.3 Lohkokaavio säätöpiiristä, jossa on koputtaja, perustuu lähteeseen [1]

Kuvassa 4.3 on esitetty myötäkytetty koputtaja säätöpiiriin. Kuvassa S on säädin, P prosessi, K koputtaja, m mittausta, r asetustarvo, y ulostulos, u_s säätimen ulostulo ja u_k koputtajan ulostulo. Säätimen ulostulo ja koputtajan ulostulo yhdessä muodostavat säätöpiirin ohjaussignaalin.

Säätöpiiriin, jossa koputtaja toimii myötäketyttynä kompensattorina ohjaussignaali määritellään

$$u(t) = u_s(t) + u_k(t). \quad (4.2)$$

Käytetty säädin on PID-säädin. Koputtajan ulostulo on pulssisekvenssi, jolla on kolme parametria: aika pulssien välissä h_k , pulssin amplitudi a ja pulssin leveys τ . Koputtajan ulostulo määritellään kaavalla

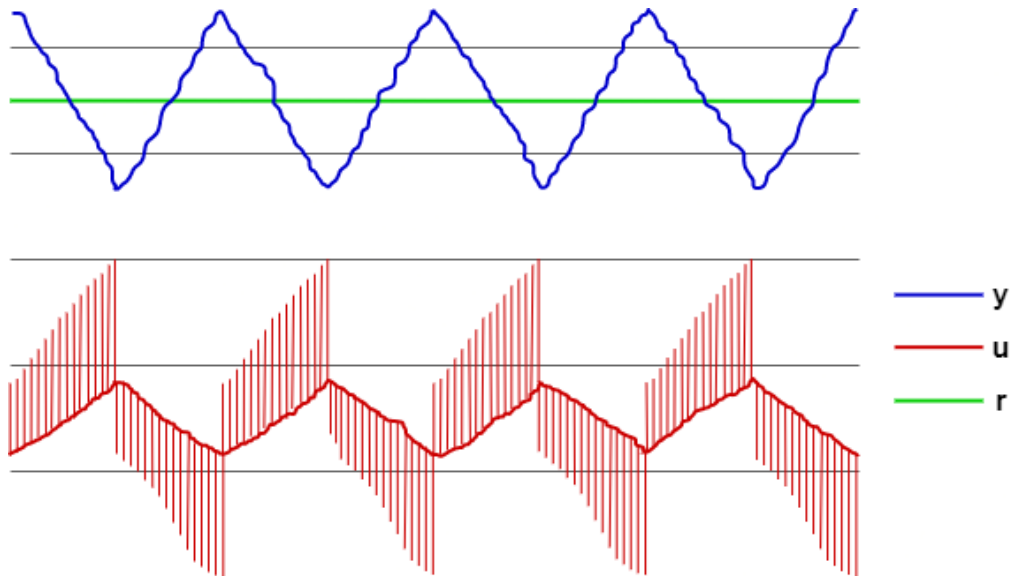
$$u_k(t) = \begin{cases} a \operatorname{sign}(u_s(t) - u_s(t_p)), & t \leq t_p + h_k + \tau \\ 0, & t > t_p + h_k + \tau \end{cases} \quad (4.3)$$

jossa sign on etumerkki ja t_p aika edellisestä pulssista. Pulssin etumerkki määräytyy säätimen ohjaussignaalin muutosnopeuden mukaan. [1]

Koputtajan parametrit tulee valita sopivasti. Pulssien tarvitsee olla riittävän suuria, jotta venttiilin kara lähtisi aikaisemmin liikkeelle kuin ilman koputtajaa. Toisaalta pulssien tulee olla tarpeeksi pieniä, etteivät ne aiheuta ylimääräistä venttiilin karan vapautumisliikettä. Yksittäisten pulssien energia muodostuu amplitudin a ja pulssin leveyden τ tulosta. [1]

Testit, joissa käytettiin koputtajaa, paransivat merkittävästi säädön tarkkuutta stick-slip-ilmion aikana. Koputtaja pienentää oskillaation amplitudia ja lisää sen taajuutta tehden oskillaatiosta säännöllisempää ja helpommin hallittavaa. Oskillaation amplitudi pienenee nimenomaan sen takia, että värähtelyn taajuus lisääntyy. [1]

Hägglundin teoksessa esiteltiin teollisessa ympäristössä tehdyn testin tulokset, jossa tarkasteltiin säätöventtiilin toimintaa vesivirtausjärjestelmässä. Testissä säätöventtiiliä ohjattiin PI-säätimellä, jossa oli mahdollisuus kytkeä koputtaja päälle tai pois. Erot olivat selvästi havaittavissa. Koputtajan kanssa prosessin oskillaation amplitudi pieneni ja taajuus kasvoi. Muutokset prosessisuureessa pienenivät myös huomattavasti tehden oskillaatiosta säännöllisempää ja jaksollisempää. [1] Testin tuloksia havainnollistetaan kuvassa 4.4.



Kuva 4.4 Prosessisuureen oskillaatio ohjauksella, jossa on mukana koputtaja, perustuu lähteeseen [1]

Kuvassa 4.4 prosessisuureen mittaus on y , ohjaussignaali u ja asetusarvo r . Kuvasta näkee hyvin, miten koputtaja vaikuttaa ohjaussignaaliin ja täten prosessisuureeseen. Ohjaussignaali muuttuu radikaalisti, kun siihen lisätään lyhyitä pulsseja. Hägglundin artikkelissa esitellään tuloksia, jossa vertaillaan säädön tarkkuutta ilman koputtajaa ja sen kanssa. Ilman koputtajaa prosessisuure oskilloi hyvin epäsäännöllisesti ja lepokitkan vaikutus on hyvin havaittavissa. Prosessissa on pitkiä jaksoja, jolloin säätöventtiilin kara on jumiutuneessa asennossa lepokitkasta johtuen. Kun ohjaussignaaliin lisätään koputtaja, venttiili ei jumiudu. Koputtajan kanssa prosessisuureen mittauksessa on paljon vähemmän vaihtelua ja oskillaatio on taajuudeltaan tiheämpää. [1] Tämä nähdään hyvin kuvasta 4.4.

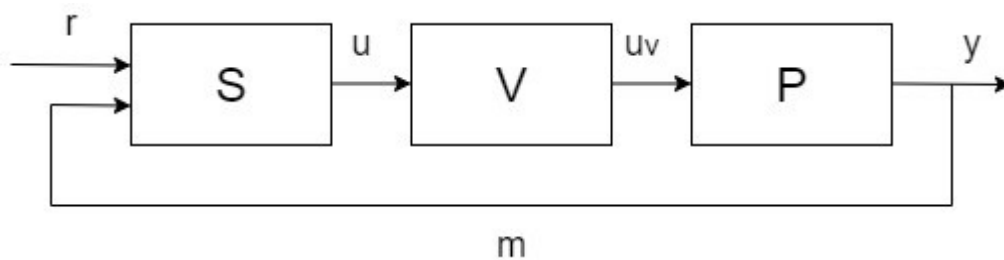
4.3 Välyksen havaitseminen ja kompensointi säätöpiirissä

Hägglundin teoksessa todetaan, että välyksen tunnistamiseksi ei ole vielä olemassa paljon menetelmiä, kun taas lepokitkan tunnistamiselle on useita. Tässä alaluvussa tarkastellaan tapoja kompensoida ja arvioida välyksen vaikutuksia säätöpiirissä, jotka on esitetty Tore Hägglundin artikkelissa: "Automatic on-line estimation of backlash in control loops (2007)". Välystä voidaan kompensoida samaan tapaan kuin lepokitkaa, ja välyksen vaikutuksia voidaan arvioida vertailemalla prosessin sisään- ja ulostuloa. [4]

Säätöventtiilit kuluvat käytössä ajan mittaan. Kuluminen johtaa lepokitkan sekä välyksen kasvuun venttiilissä. Mitä isommaksi lepokitka kasvaa, sitä enemmän se vaikuttaa myös välyksen suuruuteen asennoittimessa ja venttiilin toimilaitteessa. Välykset aiheuttavat viivettä säätöpiiriin huonontamalla säädön tarkkuutta. Välyksen heikentävä vaikutus voi olla jopa 10 %. Yhden säätöpiirin, jossa on välyksestä aiheutuvia ongelmia, vaikutukset voivat heijastua myös muihin vuorovaikutuksessa oleviin säätöpiireihin. [4]

Kuten lepokitkan diagnosoinnissa, ongelmat venttiileissä tulisi havaita tarpeeksi ajoissa venttiilin käyttöajan pidentämiseksi. Sekä lepokitkan että välyksen aiheuttamat ongelmat säätöpiirissä ovat vakavia ja johtavat säätöpiiriin epälineaarisuuteen, mutta välyksen vaikutuksia on helpompi kompensoida kuin lepokitkan. [4]

Säätöpiiriä, jossa on säätöventtiilin välyksen vaikutusta, voidaan havainnollistaa hyvin samankaltaisella lohkokaaviolla kuin kuvassa 4.1, jossa säätöpiirissä on lepokitkan vaikutusta. Kuvassa 4.5 on lohkokaavio, jossa välyksen vaikutus on osana säätöpiiriä.

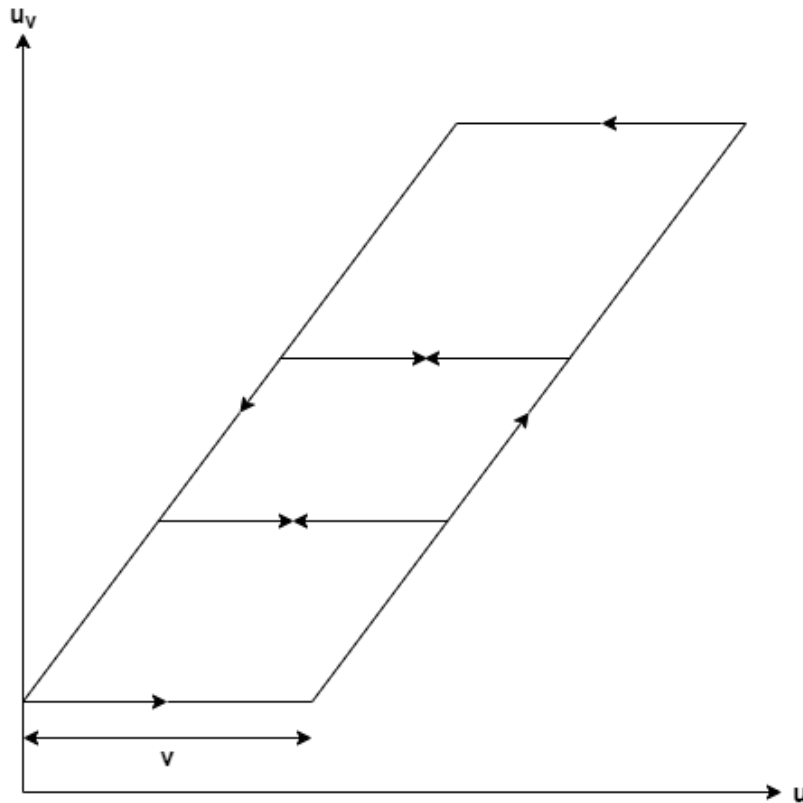


Kuva 4.5 Lohkokaavio säätöpiiristä, jossa on mukana välysfunktio, perustuu lähteeseen [4]

Kuvassa 4.5 S on säädin, P prosessi, V välysfunktio, r asetusarvo, m mittaus, u säätimen ulostulo, u_v välysfunktion ulostulo ja y ulostulo. Kuten lepokitkan tapauksessa, prosessin sisääntulo saadaan vasta välysfunktiosta, eikä suoraan säätimeltä. [4]

Välykset aiheuttavat rajajaksoja (engl. limit cycle) säätöpiiriin, jota ohjataan PID-säätimellä. Rajajakso saavat aikaan oskillaatiota säätöpiiriin. Välykset eivät kuitenkaan normaalisti aiheuta rajajaksoja, mikäli prosessi on stabiili. Hägglundin teoksessa esitetyt simulaatiot vahvistivat, että säätöpiirit, jossa on mukana integroiva säädin, oskilloivat rajajaksojen takia. [4]

Stabiilissa prosessissa ei yleensä ilmene rajajaksoista johtuvaa oskillaatiota, mutta säädön tarkkuus heikkenee siitä huolimatta. Välykseen aiheuttaa joka tapauksessa vasteetonta aluetta säätöön, kun ohjauksignaali muuttaa suuntaa. Aika, joka kuluu vasteettoman alueen ylittämiseen, on sitä pienempi, mitä suurempi erosuure on. [4] Välystä ja sen aiheuttamaa vasteetonta aluetta havainnollistetaan kuvassa 4.6.



Kuva 4.6 Välyksen aiheuttama vasteeton alue ohjauksessa, perustuu lähteeseen [4]

Kuvassa v on vasteeton alue, u säätimen ulostulo ja u_v välysfunktion ulostulo. Kuvasta nähdään hyvin välyksen aiheuttaman vasteettoman alueen vaikutus ohjauksen suunnan muuttuessa. Prosessin sisääntulo ei muutu ennen kuin ohjaus on kulkenut vasteettoman alueen yli. Tämän jälkeen prosessisuure vastaa ohjausta, kunnes ohjauksen suunta taas muuttuu.

Kasvaessaan välyksen vaikutus heikentää säädön tarkkuutta säätöpiirissä ja täten lyhentää säätöventtiilin käyttöikä. Käyttöikä voidaan pidentää kompensoimalla välyksen vaikutusta. Välykseen saa aikaan aina tietyn pituisen vasteettoman alueen ohjaukseen. Yksi tapa kompensoida välystä onkin lisätä ohjaukseen välyksen vaikutuksen suuruisen termi. Prosessin sisääntuloksi tulee näin säätimen ulostulon ja myötäkytketyn kompensointin ulostulo. [4] Kompensaattori toimii siis hieman samalla periaatteella kuin koputaja alaluvussa 4.2.

Manuaaliselle säätöpiirien tarkastuksille ei tuotantolaitoksissa ole aina resursseja, joten välystä tulisi pystyä arvioimaan automaattisesti mittausdatasta. Hägglundin teoksessa esitetään matemaattinen malli, jolla pystytään arvioimaan välyksen vaikutusta säätöpiirissä. Menetelmän idea on vertailla ohjauksen erotusta ja venttiilin todellisen liikkeen välistä eroa. Menetelmän käyttöön vaaditaan vain tiedot säätimen parametreista, joten estimaattori on suhteellisen helppo toteuttaa. [4]

Malli välyksen vaikutuksen suuruuden v estimoinnille määritellään

$$v = \Delta u - \Delta u_{tod.} = \frac{K}{T_i} \Delta y \Delta t - \frac{\Delta y}{K_p}, \quad (4.4)$$

jossa Δu on ohjaussignaalin muutos, $\Delta u_{tod.}$ ohjaus, jonka aikana venttiilin kara liikkuu ja Δy ulostulon etäisyys asetusarvosta, kun ohjaussignaali kulkee vasteettoman alueen yli. Kaavassa K on säätimen P-osan vahvistuskerroin, K_p prosessin vahvistuskerroin, T_i säätimen integrointiaika ja Δt tarkastelujakson pituus. [4]

Kun välyys on tunnistettu säätöpiirissä, sitä voidaan estimoida ja estimoiduista arvoista päätellä sen todellinen vaikutus. Tällä tavoin välystä on myös helpompi kompensoida, kun tiedetään sen todellinen vaikutus. Jos säätöpiirissä on myös lepokitkan vaikutusta, estimoitu vasteettoman alueen määrä on välyksen ja lepokitkan aiheuttaman vasteettoman alueen summa. Täten välyksen kompensointi kompensoi myös lepokitkan vaikutusta. [4]

Hägglundin teoksessa esitetyt simuloinnit todistivat, että välyksen estimointimenetelmä toimii. Välyksen estimoinnin tarkkuus kasvoi, mitä suurempi välyksen vaikutus säätöpiirissä oli. Estimoinnin antama arvo oli usein pienempi kuin välyksen todellinen suuruus. Tämän seurauksena kompensointi ei ole liian suuri, mikä on tavoiteltava asia kompensoinnissa. Estimointimenetelmä pystyi tunnistamaan pienenkin välyksen vaikutuksen muun kohinan joukosta ja antamaan kohtuullisen tarkan arvon välyksen vaikutuksen suuruudesta. Menetelmää testattiin myös käytännössä teollisessa ympäristössä, ja menetelmä toimi halutulla tavalla. [4]

5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin epälineaarisia ilmiöitä säätöventtiileissä. Työ pohjautui muuhun kirjallisuuteen ja esitti kootusti tyypillisimpiä ilmiöitä. Työssä käytiin läpi myös muutamia Tore Hägglundin esittämiä menetelmiä epälineaarisuuksien havaitsemiseen ja kompensointiin säätöpiirissä.

Työn kontekstin ymmärtämiseksi työssä käytiin läpi, mitä tarkoitetaan käsitteellä epälineaarisuus ja lyhyesti säätöventtiilin toimintaperiaatetta. Epälineaarisia ilmiöitä tarkasteltiin niiden esiintyvyyden mukaan kirjallisuudessa. Yleisin ilmiöistä käytiin läpi ensin ja vähiten kirjallisuudessa esiintyvä viimeiseksi. Lopuksi käytiin läpi menetelmiä havaita ja kompensoida lepokitkan ja välyksen vaikutuksia.

Epälineaarisuus säätöpiirissä tarkoittaa prosessin erilaista käyttäytymistä eri toimintapisteissä. Epälineaarisuudet säätöpiirissä johtavat usein prosessin oskillaatioon huonontuen säädön tarkkuutta ja prosessin sujuvuutta. Epälineaarisia ilmiöitä tunnistamalla voidaan niiden vaikutusta kompensoida säätöpiirissä. Vaikutusten kompensointi mahdollistaa prosessin sujuvamman toiminnan. Havaitsemalla ja kompensoimalla saavutetaan myös taloudellisia hyötyjä, sillä epälineaarisuudet lyhentävät usein komponenttien käyttöikä.

Säätöventtiileitä käytetään paljon prosessiteollisuudessa ja niillä säädellään esimerkiksi nesteiden ja kaasujen virtauksia. Säätöventtiilejä on paljon erilaisia, mutta kaikkien niiden toimintaperiaate on lähes sama. Säätöventtiilit koostuvat rungosta, toimilaitteesta ja asennoittimesta. Venttiiliä avataan ja suljetaan usein automaattisesti sähköisillä tai pneumaattisilla toimilaitteilla. Asennoittimet ohjaavat venttiilin karan liikettä tyypillisesti sähköisillä tai pneumaattisilla signaaleilla.

Epälineaarisista ilmiöistä ylivoimaisesti yleisin ja eniten tutkittu on lepokitka. Lepokitkaa syntyy venttiilissä muun muassa sisäisten osien hankauksesta. Lepokitkan vaikutus kasvaa ajan mittaan, kun venttiili kuluu. Lepokitkaa johtaa venttiilin karan jumiutumiseen eri asentoihin. Venttiilin kara tarvitsee ylimääräistä energiaa, jotta se pääsee uudelleen liikkeelle. Ylimääräinen energia ja venttiilin karan nopea vapautuminen saa venttiilin karan jumiin uuteen asentoon. Venttiilin jumiutumista eri asentoihin uudelleen ja uudelleen kutsutaan stick-slip-ilmiöksi.

Vällys ja vasteeton alue sekä hystereesi ovat lepokitkan ohella yleisiä epälineaarisia ilmiöitä säätöventtiileissä. Vällys ilmenee säätöpiirissä vasteettomana alueena ohjauksessa. Säätöventtiileissä on vällystä liikkuvien osien välillä. Ohjauksen suunnan muuttuessa venttiin karan täytyy kulkea vällyksen suuruinen alue ja prosessin mittausta ei vastaa ohjauksella tavoitettua arvoa. Hystereesi tarkoittaa venttiin karan asennon eroa suhteessa ohjaussignaaliin. Venttiili vastaa ohjaukseen eri tavalla venttiin auetessa verrattuna venttiin sulkeutumiseen.

Tässä työssä käytiin läpi Tore Hägglundin esittämiä menetelmiä epälineaaristen ilmiöiden havaitsemiseen ja kompensointiin [1, 3, 4]. Hägglund on esittänyt menetelmän, jonka tarkoituksena on tutkia oskillaatioaallon muotoa, lepokitkan havaitsemiselle ja tunnistamiselle säätöpiirissä. Aallon muotoa vertaillaan kantti- ja siniaaltoon, minkä perusteella päätellään, onko kyseessä lepokitkasta vai esimerkiksi ulkoisista häiriöistä johtuvaa oskillaatiota.

Lepokitkan vaikutuksen kompensoinniksi Hägglund on esittänyt säätöpiiriin myötäkytketyn kompensoattorin, joka lisää ohjaussignaaliin sekvenssin lyhyitä pulsseja. Pulssien energia estää venttiin karaan jumiutumasta. Vällyksen vaikutuksia voidaan kompensoida hieman samoin tavoin lisäämällä vasteettoman alueen suuruinen termi ohjaukseen. Hägglund on esittänyt myös menetelmän vällyksen vaikutuksen havaitsemiseksi ja estimoimiseksi. Menetelmässä verrataan prosessin sisään- ja ulostuloa ja arvioidaan laskeamalla vällyksen vaikutuksen suuruutta säätöpiirissä. Hägglundin menetelmät on testattu toimiviksi teollisessa ympäristössä ja niitä sovelletaan kaupallisesti.

Aihetta tutkiessani huomasin, että lepokitkasta ja sen vaikutuksista on kirjoitettu useita artikkeleja, mutta muista epälineaarisista ilmiöistä oli vaikeampi tai mahdoton löytää muuta kirjallisuutta. Säätöventtiilien kulumisen ja sitä myötä lisääntyvät epälineaariset ilmiöt on tunnistettu merkittäväksi tuotannon tehokkuutta heikentäviksi tekijöiksi. Koen, että aiheelle on paljon jatkotutkimuspotentiaalia esimerkiksi epälineaaristen ilmiöiden tunnistamiseksi tarkemmin.

LÄHTEET

- [1] T. Hägglund, A friction compensator for pneumatic control valves, *Journal of Process Control*, 2002, pp. 897-904
- [2] S. Choudhury, S. Shah, N. Thornhill, *Diagnosis of process nonlinearities and valve stiction: data driven approaches*, Springer Science & Business Media, 2008
- [3] T. Hägglund, A shape-analysis approach for diagnosis of stiction in control valves, *Control Engineering Practice*, 2011, pp. 782-789
- [4] T. Hägglund, Automatic on-line estimation of backlash in control loops, *Journal of Process Control*, 2007, pp. 489-499
- [5] M. Enqvist, L. Ljung, LTI approximations of slightly nonlinear systems: Some intriguing examples, *IFAC Proceedings Volumes*, 2004, pp. 495-500
- [6] S. Hagen, *Control valve technology: Plantservices*, 2003, verkkosivu, saatavissa (viitattu 11.12.2019): <https://www.plantservices.com/articles/2003/124/>
- [7] Types of control valves: Instrumentation tools, verkkosivu, saatavissa (viitattu 25.11.2019): <https://instrumentationtools.com/types-of-control-valves/>
- [8] Control valve handbook, Emerson, verkkosivu, saatavissa (viitattu 26.11.2019): <https://www.emerson.com/documents/automation/control-valve-handbook-en-3661206.pdf>
- [9] Control valve, Automation forum, 2018, verkkosivu, saatavissa (viitattu 25.11.2019): <https://automationforum.co/control-valve/>
- [10] Introduction to control valves: wermac, verkkosivu, saatavissa (viitattu 13.3.2020): http://www.wermac.org/valves/valves_control-valves_principles-of-operation.html
- [11] Final control element: Beck, verkkosivu, saatavissa (viitattu 13.3.2020): <https://www.haroldbeck.com/final-control-element/>
- [12] Control valve working animation: Instrumentation tools, verkkosivu, saatavissa (viitattu 14.3.2020): <https://instrumentationtools.com/control-valve-working-animation/>
- [13] A. Nahid, S. Choudhury, Compensating the Effect of Control Valve Stiction, Fifth international conference on chemical engineering (ICChE2017), Process modeling, safety and control, Bangladesh, 2017
- [14] J. Smuts, Control valve problems, Opticontrols, 2010, verkkosivu, saatavissa (viitattu 3.2.2020): <https://blog.opticontrols.com/archives/77>
- [15] B. Donohue, How to get the most from your control valves: Valve magazine, 2019, verkkosivu, saatavissa (viitattu 5.2.2020): <http://www.valvemagazine.com/web-only/categories/technical-topics/10293-how-to-get-the-most-from-your-control-valves.html>

- [16] Valve terminology: A basic understanding of key concepts: Process industry forum, verkkosivu, saatavissa (viitattu 7.2.2020): <https://www.processindustryforum.com/article/valve-terminology-basic-understanding-key-concepts>