



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

MASSASÄILIÖN SIMULOINTI JA SÄÄTÖ

Simulation and control of pulp tank

Sonja Lindman

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Sonja Lindman
Massasäiliön simulointi ja säätö

2014

Kandidaatintyö.
34 sivua

Tarkastajat: professori Olli Pyrhönen
 tutkijaopettaja Tuomo Lindh

Ohjaaja: DI Sampo Luukkainen

Tämän kandidaatintyön aiheena on tehdas case: massasäiliöiden simulointi ja säätö. Kyseiset massasäiliöt sijaitsevat Stora Enson Enocellin sellutehtaan kuitulinjalla. Säiliöiden on tarkoitus toimia puskureina tasoittaen virtausta ja sitä kautta tuotantoa. Tehtaalla on kuitenkin huomattu etteivät säiliöiden lähtövirtaa säättävät PI-säätimet toimi halutulla tavalla. Työn tavoitteena on muodostaa toimiva simulointimalli säiliösystemistä, ja sen avulla määrittää säätimille toimivimmat parametrit.

Simulointimallilla tehdyistä askelvastekokeista havaitaan, että nykyiset PI-säätimen parametrit aiheuttavat värähtelyä massavirtaan. Askelvastekokeiden avulla saatiin määritettyä säätimille uudet parametrit, joilla värähtelyä syntyy vähemmän. Värähtelyn vähentyminen havaittiin myös käytännössä, kun uusia parametreja testattiin tehtaalla.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	4
1. Johdanto.....	5
2. Tapauksen kuvaus ja säädön tavoite.....	5
3. Simulointimalli	7
3.1 PI-säädin	10
3.2 Venttiilin malli.....	11
3.3 Säiliön malli.....	13
3.4 Säiliösystemin kokonaissiirtofunktio.....	15
4. Mallin testaus todellisilla mittausarvoilla.....	18
5. Säätimien viritys	23
5.1 Parametrien viritys.....	23
5.2 Napa-nolla kuvaaja	27
5.3 Uusien parametrien testaus tehtaalla	29
6. Yhteenveto.....	33
LÄHTEET	35

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	säiliön pohjapinta-ala
f_{in}	säiliön tulovirta
f_{out}	säiliön lähtövirta
G	siirtofunktio
h	säiliön korkeus
I	tehtaalla käytössä oleva säätimen integrointiaika
K	pi-säätimen siirtofunktion vahvistus
k	venttiilin vahvistus
P	tehtaalla käytössä oleva säätimen vahvistus
s	laplace-muuttuja
t	aika
T_I	pi-säätimen siirtofunktion integrointiaika
V	säiliössä olevan massan tilavuus
τ	venttiilin aikavakio

1. JOHDANTO

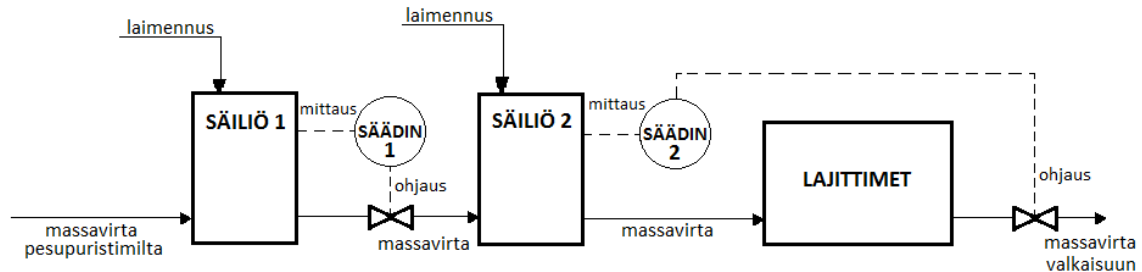
Tässä kandidaatin työssä tutustutaan Stora Enson sellutehdas -caseen, johon sisältyy kaksi massasäiliötä, niiden lähtövirtauksia säättävät PI-säätimet ja säätöventtiilit. Säiliöiden tarkoituksena on toimia puskureina kuitulinjan vaiheiden välillä. Ensin tarkastellaan täyttävätkö säiliöiden lähtövirtauksia ohjaavat säätimet tavoitteet massavirtauksen rauhoittamisesta. Säiliösystemistä muodostetaan simulointimalli ja verrataan saatuja simulointituloksia tehtaan mittausarvoihin. Seuraavaksi viritetään simulointimallin avulla säätimille uudet parametrit askelvastekoetta käyttäen. Piirretään systeemin siirtofunktioiden napa-nolla kuvaajat sekä alkuperäisiä että uusia parametrejä käyttäen. Uusia parametreja testataan myös todellisessa tehdasympäristössä. Lopuksi pohditaan säätimen tyyppin sopivuutta kyseiseen tapaukseen.

2. TAPAUKSEN KUVAUS JA SÄÄDÖN TAVOITE

Tarkasteltava säiliösystemi sijaitsee Stora Enson Enocellin tehtaalla Enossa, jossa tuotetaan havupuusellua. Säädetävään systeemiin kuuluu kaksi massasäiliötä, joiden tehtävä on toimia massapuskureina ja virtauksen tasoittajina kuitulinjalla. Säiliöiden lähtövirtausten on oltava mahdollisimman tasaista, jotta saadaan pidettyä selluntuotanto vakiona. Ensimmäisenä olevaan 250 m³:n massasäiliöön massa tulee pesupuristimilta. Säiliössä olevaa massaa laimennetaan tarpeen mukaan laimennusvirralla, jonka määrää säädetään sakeussäätimellä. Säiliöstä lähtevää massavirtaa säädetään säätöventtiilillä, jota ohjataan PI-säätimellä. Säädin saa ohjearvokseen säiliön pinnankorkeuden. Säiliöstä 1 massa siirtyy 285 m³:n pesumassasäiliöön ja massaa laimennetaan lisälaimennusvirralla sakeussäädinohjauksella tässäkin säiliössä. Jälkimmäisen säiliön lähtövirtausta säädetään myös säätöventtiilillä, mutta nyt venttiili ei ole välittömästi säiliön jälkeen vaan säiliön ja venttiilin välissä sijaitsevat lajittimet. Tämä ei aiheuta säädölle ongelmaa, sillä säiliön ja lajittimien lähtövirrat korreloivat keskenään. Käytettävät säätöventtiilit ovat kuristussäätimiä. Lajittimien jälkeen sellumassa siirtyy valkaisuun.

Käytetään massasäiliöstä 2 ja pesumassasäiliöstä tässä työssä yksinkertaisuuden vuoksi nimiä säiliö 1 ja säiliö 2. Säiliösystemin perusrakenne on esitetty kuvassa 2.1. Lajittimiin kuuluu useita sarjassa ja rinnan olevia lajittimia, mutta tässä niitä kuvataan yksinkertaiste-

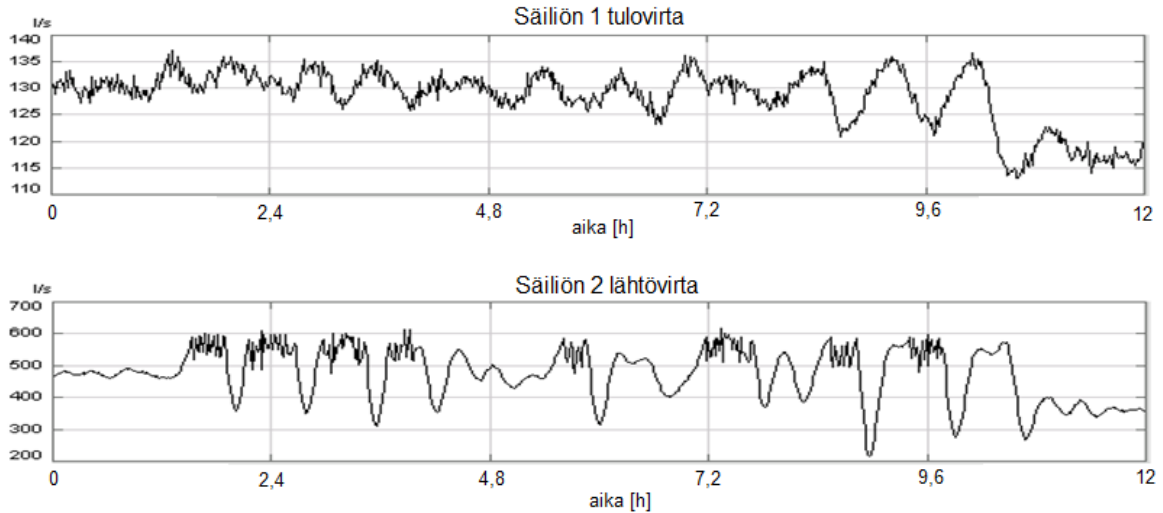
tusti vain yhdellä komponentilla. Oletetaan massan sakeuksien säiliöissä olevan vakioita ja jätetään säiliöiden laimennuksien säädöt tässä työssä huomiotta. Oletetaan myös paineva-kioksi säiliöissä ja niiden välisissä putkissa.



Kuva 2.1 Yleiskuva säiliösystemistä. Systemiin kuuluu kaksi massasäiliötä ja niiden lähtövirtauksia säättävät säätöventtiilit. Venttiilien säätimet saavat ohjearvoikseen säiliöiden pinnankorkeuksien arvot.

Säiliöiden säätimet ovat tyypiltään pinnankorkeussäätimiä, mutta niiden ensisijaisena tehtävänä on tässä tapauksessa virtauksen säätäminen mahdollisimman tasaiseksi. Säiliöiden tarkoitus on siis toimia puskureina tasoittaen virtausta kuitulinjan vaiheiden välillä. Säädön toissijainen tehtävä on pitää säiliöiden pinnankorkeudet sopivina niin, ettei säiliö tyhjene kokonaan eikä myöskään tulvi yli. Tavoitteena on, että pinnankorkeudet vaihtelevat enintään +/- 10 prosenttiyksikköä.

Tehtaalla on huomattu, että massavirtauksen rauhoittumisen sijasta värähtelyt virtauksessa pikemminkin kasvavat virtauksen virratessa säiliöiden läpi. Tämä voidaan havaita kuvasta 2.2, jossa on säiliösystemin tulo- ja lähtövirtaus 12 tunnin ajalta.



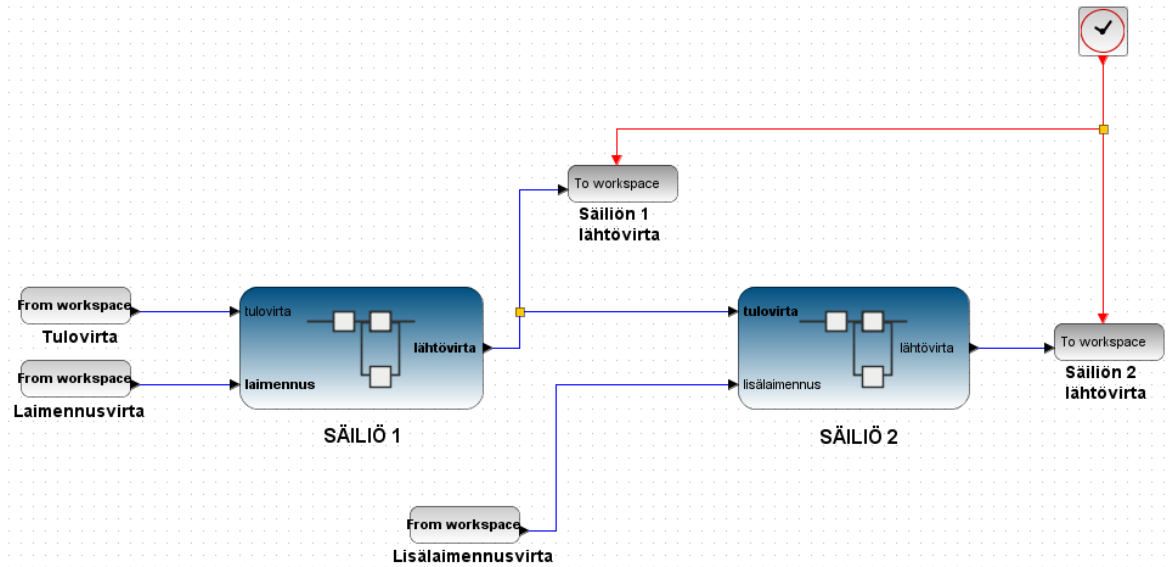
Kuva 2.2 Ylemmässä kuvaajassa on säiliön 1 mitattu tulovirta ja alemmassa säiliön 2 mitattu lähtövirta.

Kuvasta 2.2 nähdään, että sekä säiliö systeemin tulo- että lähtövirta värähtelee. Värähtelyä esiintyy kuitenkin, päinvastoin kuin tavoitteena, enemmän lähtövirtauksessa kuin tulovirtauksessa. Esimerkiksi 50 l/s eli 40 % virtauspiikki säiliön 1 tulovirrassa aiheuttaa 290 l/s eli noin 60 % piikin säiliön 2 lähtövirtaukseen. Värähtelyn kasvun aiheuttajaksi arvellaan huonosti asetettuja PI-säätimien parametreja.

3. SIMULOINTIMALLI

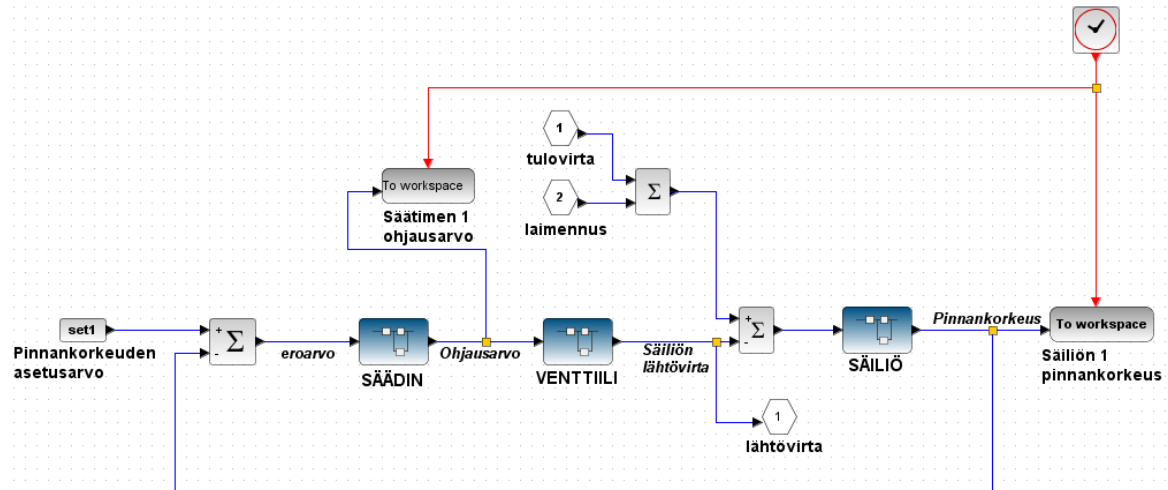
Simuloidaan säiliösystemin toimintaa Scilab-ohjelman Xcos lisäohjelmalla. Scilab on Matlabin kaltainen numeerisen laskennan ohjelmisto, mutta toisin kuin Matlabin sen lähdekoodi on avoin ja se on ilmainen. Xcos on ohjelma mallinnukseen, simulointiin ja analysointiin, ja se vastaa Matlabin Simulinkia. Scilabin käyttämä kieli vastaa joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta Matlab-kieltä.

Ylimmän tason simulointimalli koostuu peräkkäin asetetuista säiliölohkoista, tulovirrasta ja laimennusvirroista. Koska säiliön 2 lähtövirta ja lajittimien jälkeisen säätöventtiilin virta korreloivat, jätetään lajittimet pois mallista. Systemin ylimmän tason simulointimalli on esitetty kuvassa 3.1.

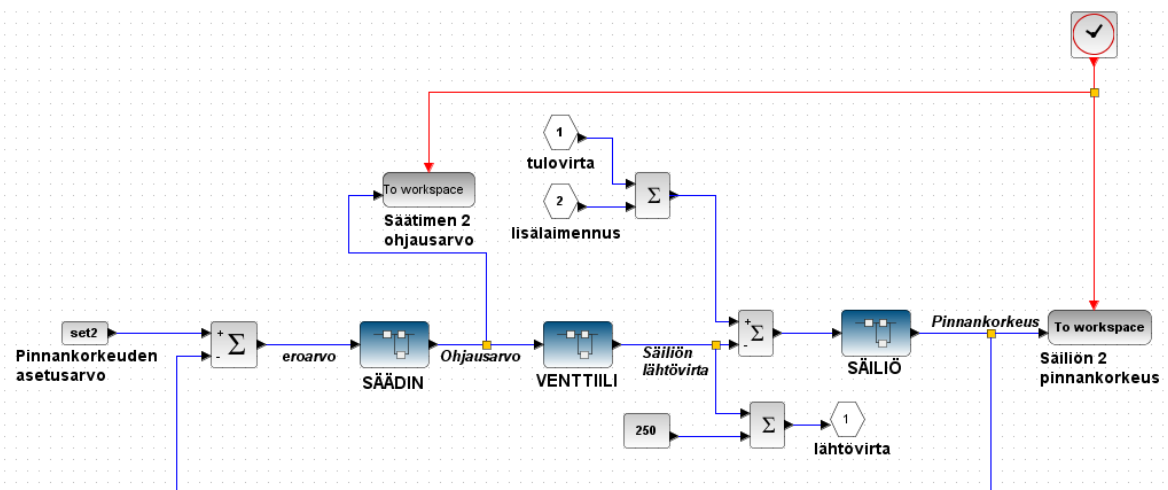


Kuva 3.1 Säiliösystemin simulointimalli, joka koostuu kahdesta säiliölohkosta sekä tuloarvoista. Tuloarvoina käytetään säiliön 1 tulovirtaa ja laimennusta sekä säiliön 2 lisälaimennusta. Mallista luetaan talteen säiliöiden lähtövirtaukset.

Säiliön 1 alilohko saa tuloarvoinaan tulovirran sekä laimennusvirran, säiliön 2 alilohko ensimmäisen säiliön lähtövirran sekä lisälaimennusvirran. Kummankin säiliön lähtövirtojen arvot luetaan Scilabin työtilaan To workspace -lohkolla. To workspace -lohko vaatii toimiaukseen synkronointikellon, jolle tässä on annettu jakson pituudeksi 1 aikayksikkö (sekunti). Säiliölohkosten 1 ja 2 sisällöt on esitetty kuvissa 3.2 ja 3.3.



Kuva 3.2 Säiliön 1 simulointimalli sisältää takaisin kytketyn säätöpiirin, johon kuuluu säädin-, venttiili- ja prosessi- eli säiliölohko. Lohkojen siirtofunktioiden tarkemmat kuvaukset on esitetty seuraavissa aliluvuissa. Mallin tuloarvoina on pinnankorkeuden asetusarvo, säiliön tulovirta ja laimennusvirta. Mallista luetaan talteen säätöventtiilin 1 ohjausarvo ja säiliön 1 pinnankorkeus.



Kuva 3.3 Säiliön 2 simulointimalli sisältää takaisin kytketyn säätöpiirin, johon kuuluu säädin-, venttiili- ja prosessi- eli säiliölohko. Lohkojen siirtofunktioiden tarkemmat kuvaukset on esitetty seuraavissa aliluvuissa. Mallin tuloarvoina on pinnankorkeuden asetusarvo, säiliön tulovirta ja laimennusvirta. Mallista luetaan talteen säätöventtiilin 2 ohjausarvo ja säiliön 2 pinnankorkeus. Mallissa on myös säiliön 1 mallista poiketen lähtövirtaukseen lisätty vakioarvo.

Säiliöiden säätöpiirit ovat pääpiirteissään samanlaisia, takaisinkytkettyjä säätöpiirejä: kummastakin löytyy säädin, toimilaite eli venttiili ja säädettävä prosessi eli säiliölohko. Säätöpiiri saa asetusarvoksi säiliön pinnankorkeuden prosentteina. Prosessin ”häiriöinä”

ovat säiliön tulo- ja lähtövirtaus, jotka ovat yksikössä l/s. Säiliön 1 tulovirran ja säiliön 2 lähtövirran keskiarvot poikkeavat toisistaan, mikä havaitaan kuvasta 2.2. Tämä ero ei selity säiliöiden laimennusvirtojen määristä vaan eron synnyttänevät säiliöissä vallitsevat eri sakeus- ja paine-erot, jotka jätetään mallissa muilta osin huomioimatta. Koska virtaero vaikuttaa olevan vakiosuuruinen, säiliön 2 simulointimallissa on myös kuvan 3.3 mukaisesti lisätty vakiovirta lähtövirtaan.

3.1 PI-säädin

PI-säätimen siirtofunktio on

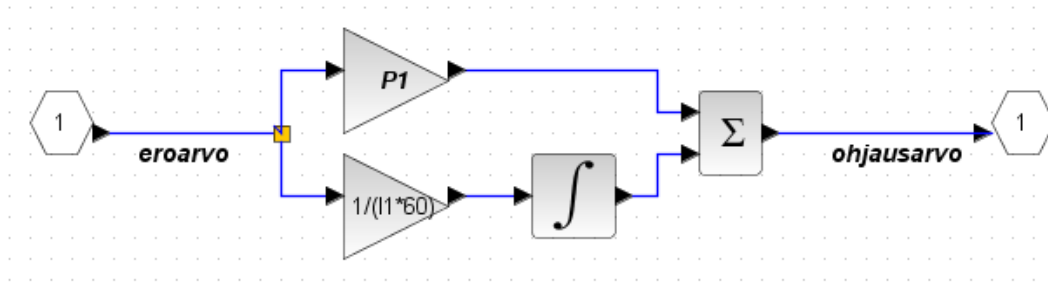
$$G_{pi}(s) = K + \frac{1}{T_I \cdot s}, \quad (3.1)$$

(Savolainen)

missä G_{pi} on siirtofunktio laplace-muuttujan s funktiona, K säätimen vahvistus ja T_I säätimen integrointiaika. Tehtaalla käytetään säädinparametria P säätimen vahvistuksena ja säädinparametria I integrointiaikana yksikössä minuutti. Koska tehtaalla integrointiaikaa käytetään yksikössä minuutti, kerrotaan säädinparametri I luvulla 60, jotta saadaan integrointiaika sekunneissa. Sijoitetaan nämä pi-säätimen siirtofunktion yhtälöön (3.1) jolloin saadaan siirtofunktioksi

$$G_{pi}(s) = \left(P + \frac{1}{I \cdot 60 \cdot s} \right) \quad (3.2)$$

Kuvan 3.2 simulointimallin 1 PI-säädin on esitetty tarkemmin kuvassa 3.4. Vastaava PI-säädin on myös kuvan 3.3 säiliön 2 simulointimallissa säätimenä.



Kuva 3.4 PI-säätimen simulointimalli säiliösystemi 1:stä. Mallin tulona on pinnankorkeuden eroarvo, ja lähtönä venttiilin ohjausarvo.

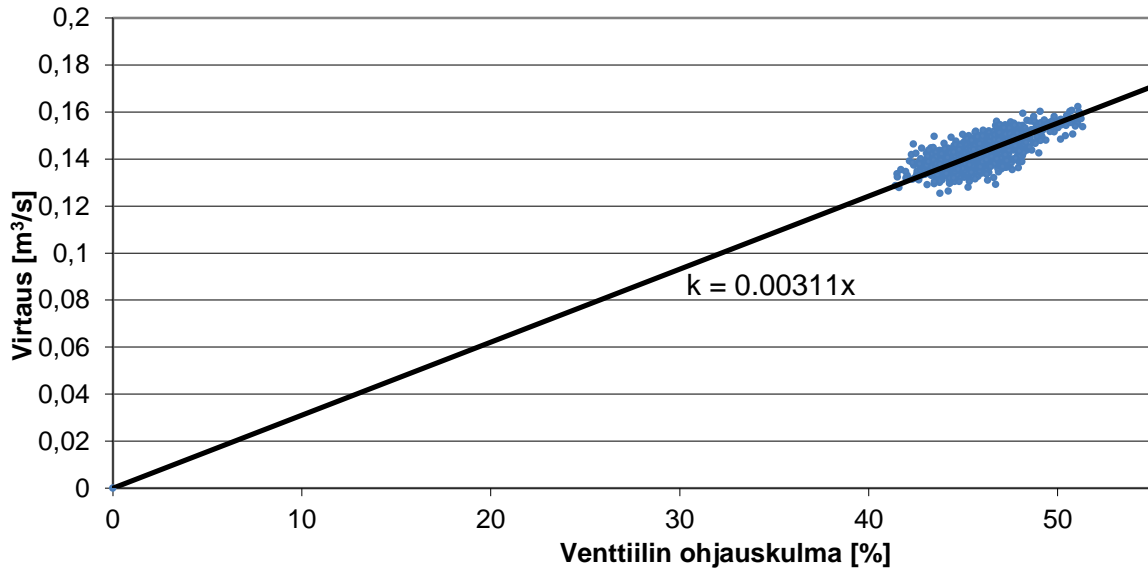
Kuvan 3.4 simulointimallissa on oma integraalilohkonsa termille $\frac{1}{s}$, joka kerrotaan kertoimella $\frac{1}{I \cdot 60}$.

3.2 Venttiilin malli

Säädön toimilaitteina toimivat kuristusventtiilit, joiden tuloarvoina ovat säätimeltä saatavat ohjausarvot. Venttiilien toiminta on yleensä epälineaarista, joten venttiilien realistinen mallintaminen on vaikeaa. Kapealla tarkastelualueella voidaan kuitenkin olettaa virtauksen käyttäytyvän lineaarisesti. Venttiilin käyttäytymistä voidaan kuvata ensimmäisen kertaluvun siirtofunktiolla

$$G_{venttiili} = \frac{k}{\tau \cdot s + 1} \quad (3.3)$$

jossa k on venttiilin vahvistus ja τ venttiilin aikavakio. Piirretään venttiilin ohjauskulmien ja virtauksen mittausdatapisteet venttiilin vahvistuksen määrittämiseksi. Kuvaan 3.5 on merkitty säiliön 1 venttiilin ohjauskulman mittausdatan sekä tulovirran ja laimennuksen mittausdatojen summan mittauspisteet. Vahvistus tulisi määrittää venttiilin virtauksesta, mutta koska sitä ei ole mitattu, oletetaan virran olevan likimain sama kuin säiliön 1 tulovirran ja laimennusvirran summa. Kuvaan 3.5 on piirretty myös linearisointisuora, jonka kulmakertoimesta saadaan venttiilin vahvistus $k_1 = 0,00311$. Samoin saadaan säiliön 2 venttiilin vahvistukseksi $k_2 = 0,00807$.



Kuva 3.5 Säätoventtiilin 1 virtaus ohjaukulman funktiona. Linearisointisuoran kulmakertoimesta saadaan suoraan venttiilin vahvistus.

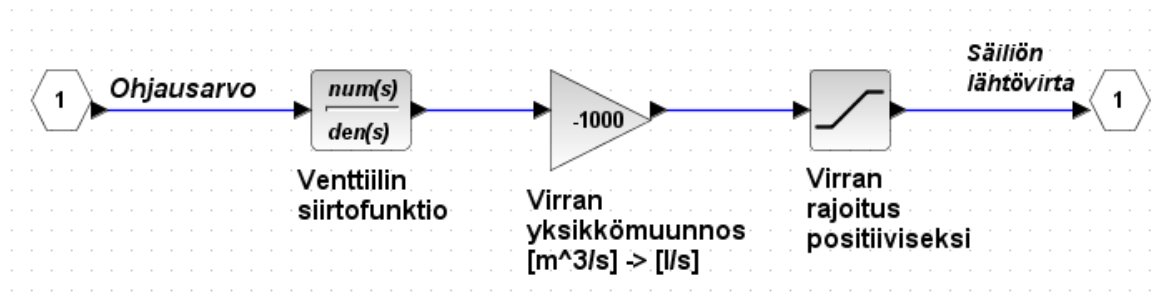
Aikavakio τ venttiilin siirtofunktiossa on aika, jossa venttiilin kulma muuttuu 0...63 % asetusravosta. Oletetaan venttiilien kulmien muuttuvan erittäin nopeasti ja valitaan aikavakioksi 0,5 s. Ensimmäisen venttiilin siirtofunktioksi saadaan nyt

$$G_{v1} = \frac{0,00311}{0,5 \cdot s + 1} \quad (3.4)$$

ja toisen venttiilin siirtofunktioksi

$$G_{v2} = \frac{0,00807}{0,5 \cdot s + 1} \quad (3.5)$$

Venttiilien simulointimallin lohkokaaavio on esitetty kuvassa 3.6.



Kuva 3.6 Venttiilin simulointimalli koostuu venttiilin siirtofunktiosta, yksikkömuunnoskertoimesta ja virran rajoituslohkosta. Mallin tuloarvona on venttiilin ohjausarvo ja lähtöarvona venttiilin virtaus eli säiliön lähtövirta.

Siirtofunktiolohkossa on kummallakin venttiilillä edellä yhtälöissä (3.4) ja (3.5) esitetyt venttiilin siirtofunktiot. Siirtofunktiolohkon lähtö on säiliön lähtövirtaus yksikössä m^3/s . Siirtofunktion lähtö on negatiivinen, joten korjataan se positiiviseksi negatiivisella kertoimella. Virtaukset ilmoitetaan useimmin kuitenkin yksikössä l/s , joten muunnetaan virtaus positiiviseksi ja oikeaan yksikköön kertoimella -1000 . Massavirta ei voi todellisuudessa kulkea venttiilissä kuin yhteen suuntaan, joten rajoitetaan virta saturaatiolohkolla positiiviseksi.

3.3 Säiliön malli

Säiliön malli voidaan muodostaa sen massataseen avulla. Tässä työssä ei oteta sateutta huomioon, vaan oletetaan sen pysyvän vakiona säiliössä, säiliössä olevan massan tilavuuden muutos riippuu ainoastaan säiliön tulo- ja lähtövirtauksista seuraavasti

$$\frac{dV}{dt} = \sum f_{in} - \sum f_{out}, \quad (3.6)$$

(Kortela)

missä dV on säiliössä olevan massan tilavuuden muutos ajassa dt , $\sum f_{in}$ on säiliön tulovirtausten summa ja $\sum f_{out}$ säiliön lähtövirtausten summa. Integroimalla yhtälö (3.6) saadaan säiliössä olevan massan tilavuudeksi

$$dV = \int (\sum f_{in} - \sum f_{out}) \cdot dt \quad (3.7)$$

Säiliössä olevan massan tilavuus on verrannollinen tulo- ja lähtövirtauksen integraalista, eli se toimii integraattorina.

Säiliössä olevan massan määrästä käytetään usein pinnankorkeutta tilavuuden sijaan, joten sijoitetaan yhtälöön (3.7) tilavuuden muutoksen dV tilalle säiliön pohjapinta-alan ja korkeuden muutoksen tulo

$$A \cdot dh = (\sum f_{in} - \sum f_{out}) \cdot dt \quad (3.8)$$

missä A on säiliön pohjan pinta-ala ja dh säiliön pinnankorkeuden muutos. Laplace-muunnetaan taseyhtälö (3.8) puolittain. Korkeuden muutoksen Laplace-muunnos saadaan derivaatan Laplace-muunnoksesta.

$$A \cdot h \cdot s = \sum f_{in} - \sum f_{out} \quad (3.9)$$

Muodostetaan yhtälöstä 3.9 systeemin siirtofunktio

$$\frac{h(s)}{\sum f_{in} - \sum f_{out}} = \frac{1}{A \cdot s} \quad (3.10)$$

$$G_{säiliö} = \frac{1}{A \cdot s} \quad (3.11)$$

Säiliön 1 halkaisija on 6,2 m, jolloin sen siirtofunktioksi saadaan

$$G_{säiliö1} = \frac{1}{\pi \cdot (6,2 \text{ m}/2)^2 \cdot s} \quad (3.12)$$

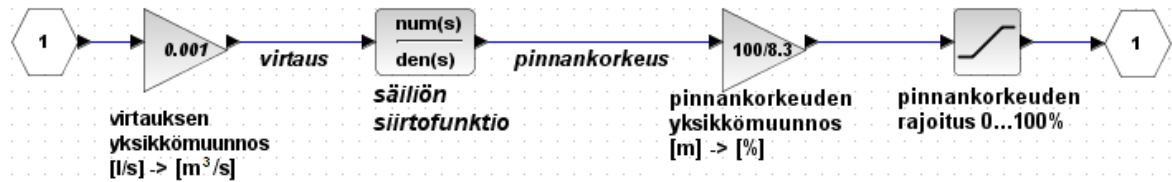
$$G_{säiliö1} = \frac{1}{30,191 \cdot s} \quad (3.13)$$

Säiliön 2 halkaisija on 7,5 m ja sen siirtofunktio saadaan samoin yhtälön (3.11) mukaisesti

$$G_{säiliö2} = \frac{1}{\pi \cdot (7,5 \text{ m}/2)^2 \cdot s} \quad (3.14)$$

$$G_{\text{säiliö2}} = \frac{1}{38,485 \cdot s} \quad (3.15)$$

Säiliön 1 simulointimalli on esitetty kuvassa 3.7.



Kuva 3.7 Säiliön simulointimalli koostuu virtauksen yksikkömuunnoskertoimesta, säiliön siirtofunktiosta, pinnan korkeuden yksikkömuunnoskertoimesta sekä pinnan korkeuden rajoituslohkosta.

Mallissa säiliön tulovirtaus on yksikössä l/s, joten muutetaan se säiliön siirtofunktiota varten yksikköön m³/s kertoimella 0,001, jotta saadaan tulokseksi säiliön pinnan korkeus metreissä. Tiedetään, että säiliön 1 korkeus on 8,3 metriä, joten muutetaan mallin pinnan korkeus prosenteiksi kertoimella $\frac{100}{8,3}$. Vastaavasti 7,0 metriä korkean säiliön 2 mallissa käytetään kerrointa $\frac{100}{7,0}$. Säiliöiden siirtofunktioiksi saadaan nyt siis

$$G_{\text{säiliö1}} = \frac{1}{30,191 \cdot s} \cdot \frac{100}{8,3} \quad (3.16)$$

$$G_{\text{säiliö2}} = \frac{1}{38,485 \cdot s} \cdot \frac{100}{7,0} \quad (3.17)$$

Todellisuudessa säiliön pinnan korkeus ei voi olla enempää kuin säiliön korkeus, sillä silloin säiliö tulvisi yli, eikä myöskään negatiivinen. Rajoitetaan mallin pinnan korkeuden arvo saturaatiolohkolla välille 0... 100 %.

3.4 Säiliösystemin kokonaissiirtofunktio

Edellisissä aliluvuissa muodostettiin säiliösystemin säiliöille, pi-säätimille ja säätöventtiileille siirtofunktiot. Systemin avoimen piirin kokonaissiirtofunktio saadaan kertomalla nämä keskenään

$$G_{sys}(s) = G_{pi}(s) \cdot G_{venttiili}(s) \cdot G_{säiliö}(s) \quad (3.18)$$

Tehtaalla oli säiliön 1 säätöparametreina käytössä $P = 0,6$ ja $I = 4$ minuuttia. Sijoittamalla nämä ja sieventämällä saadaan säiliön 1 kokonaissiirtofunktio muotoon

$$G_{sys,1,avoin}(s) = \frac{279,9 \cdot s + 0,311}{1,128 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 2,255 \cdot 10^5 \cdot s^2} \quad (3.19)$$

Säiliön 2 säätimen parametreina tehtaalla olivat $P = 0,9$ ja $I = 2$ minuuttia, jolloin sen kokonaissiirtofunktioksi saadaan

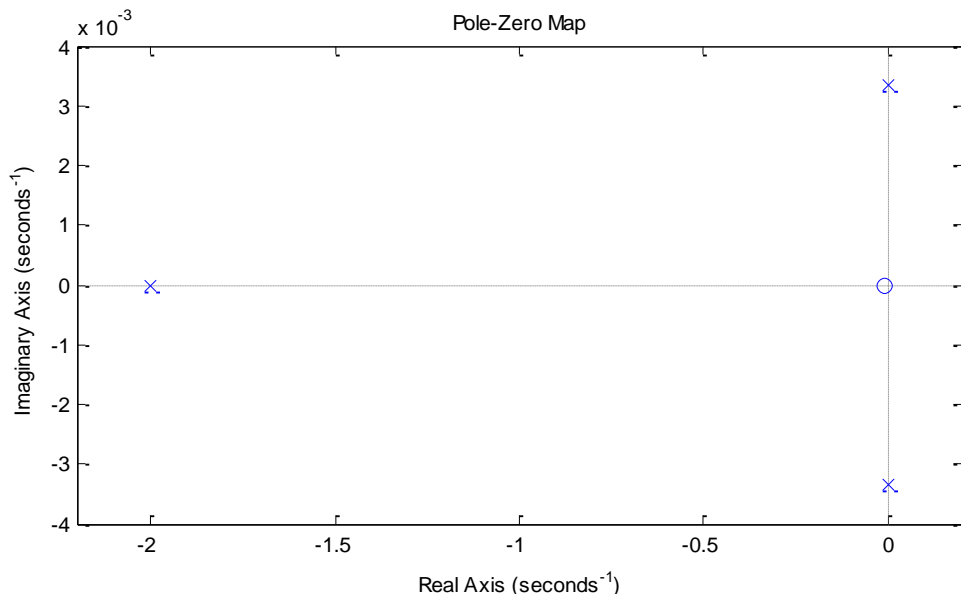
$$G_{sys,2,avoin}(s) = \frac{726,3 \cdot s + 0,807}{1,212 \cdot 10^5 \cdot s^3 + 2,425 \cdot 10^5 \cdot s^2} \quad (3.20)$$

Yhtälöt 3.19 ja 3.20 ovat avoimen piirin siirtofunktioiksi. Muodostetaan systeemin suljetunpiirin siirtofunktiot käyttämällä Matlabin feedback -komentoa. Suljetun piirin siirtofunktioiksi saadaan

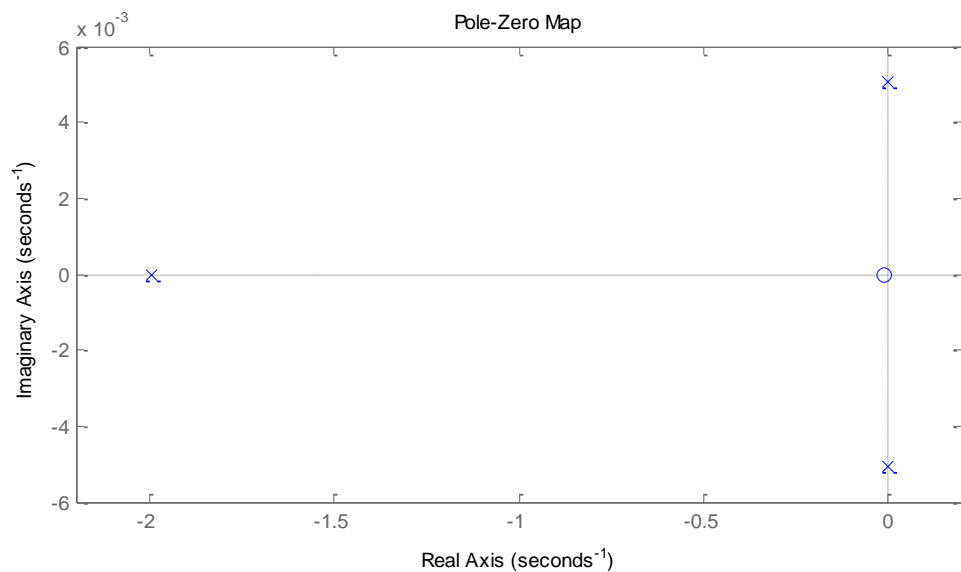
$$G_{sys,1}(s) = \frac{44,78 \cdot s + 0,311}{1,804 \cdot 10^4 \cdot s^3 + 3,608 \cdot 10^4 \cdot s^2 + 44,78 \cdot s + 0,311} \quad (3.21)$$

$$G_{sys,2}(s) = \frac{116,2 \cdot s + 0,807}{1,94 \cdot 10^4 \cdot s^3 + 3,879 \cdot 10^4 \cdot s^2 + 116,2 \cdot s + 0,807} \quad (3.22)$$

Siirtofunktion nimittäjän nollakohdat eli navat ja osoittajan nollakohdat eli nollat vaikuttavat järjestelmän käyttäytymiseen. Nollien vaikutus tosin on hyvin vähäistä napoihin nähden, eikä niillä ole lainkaan vaikutusta järjestelmän stabiilisuuteen. Tarkastellaan säiliösystemien käyttäytymistä kuvien 3.8 ja 3.9 napa-nolla kuvaajien avulla.



Kuva 3.8 Säiliön 1 siirtofunktion napa-nolla kuvaus. Navat on esitetty "x":llä ja nollat "o":lla



Kuva 3.9 Säiliön 2 siirtofunktion napa-nolla kuvaus. Navat on esitetty "x":llä ja nollat "o":lla

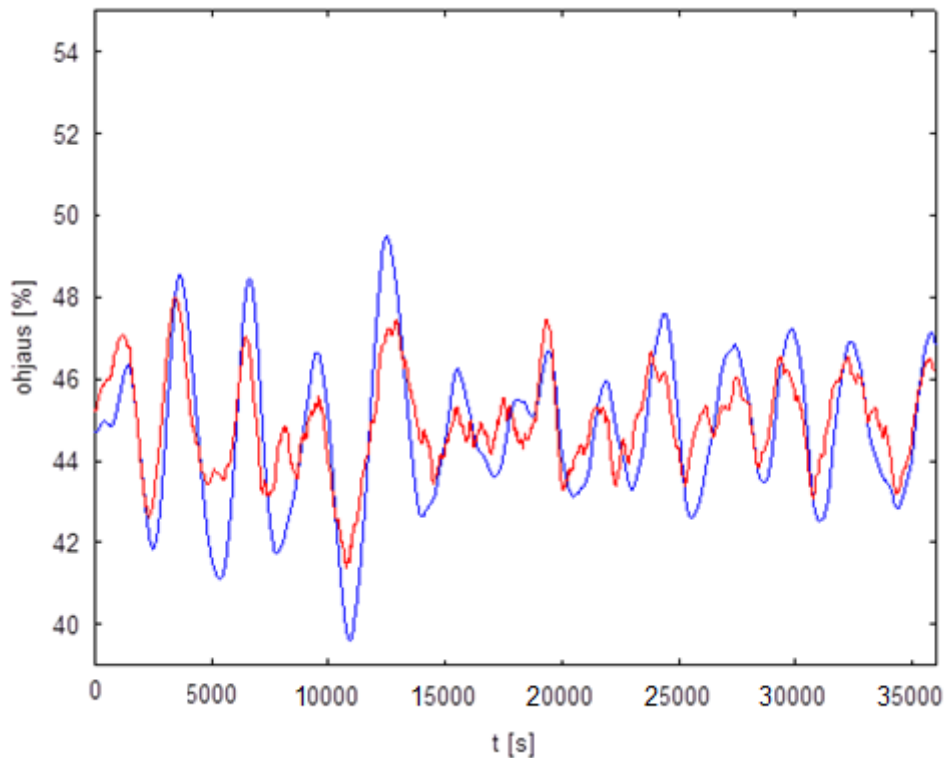
Kuvista 3.8 ja 3.9 nähdään että kummallakin siirtofunktiolla on kompleksinen napapari vasemmassa puolitasossa hyvin lähellä y- eli imaginaariakselia ja kolmas napa reaaliakselilla. Kummallakin on lisäksi yksi nolla vasemmassa puolitasossa hyvin lähellä origoa. Järjestelmä on stabiili, jos kaikki sen siirtofunktion navat sijaitsevat kompleksitasossa imaginaariakselin vasemmalla puolella. Kummankin säiliön siirtofunktion navat sijaitsevat nyt kaikki vasemmassa puolitasossa, joten säiliösystemi on stabiili. Systemillä on kuitenkin kompleksikonjugaatti napapari, mikä aiheuttaa järjestelmään värähtelyä. Napaparin imagi-

naariosan itseisarvo vaikuttaa värähtelyn kulmataajuuteen: suurempi itseisarvo aikaan saa nopeamman värähtelyn. Suuri reaaliosan itseisarvo taas nopeuttaa värähtelyn vaimenemista.

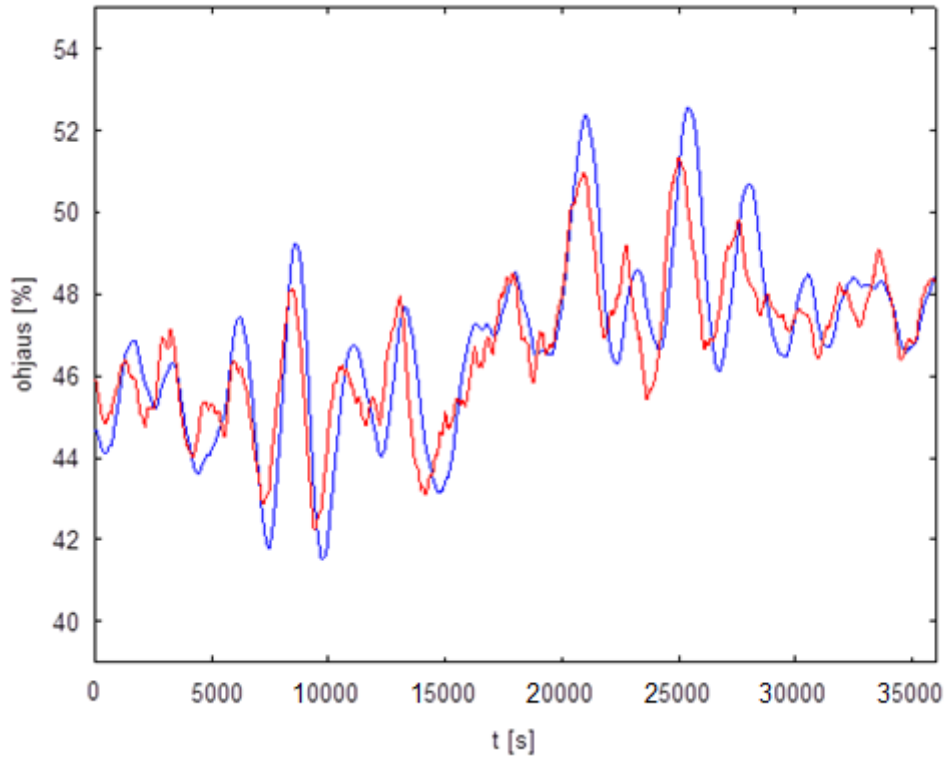
(Savolainen)

4. MALLIN TESTAUS TODELLISILLA MITTAUSARVOILLA

Käytetään mallin tuloarvoina todellisia virtauksen ja laimennusten mittausdاتا. Mittausdatan näytteistysaika on 1 sekunti. Käytetään pinnankorkeuksien asetusarvoina tehtaalla datan mittaushetkellä olleita asetusarvoja ja PI-säätimen parametreina käytössä olleita parametreja. Verrataan simuloimalla saatuja säiliöiden pinnankorkeuksia, venttiilien ohjausarvoja ja säiliön 2 lähtövirtaa mittausarvoihin. Säiliön 2 lähtövirtausta verrataan venttiilillä säädettävään virtaukseen, joka on mitattu vasta säiliön jälkeen olevien lajittimien jälkeiseltä venttiililtä. Säiliön 1 lähtövirtausta ei ole mitattu, joten sitä ei voida verrata todellisiin arvoihin. Kuvissa 4.1 ja 4.2 on venttiilien ohjausarvojen mittausdata sekä simuloituvat arvot.

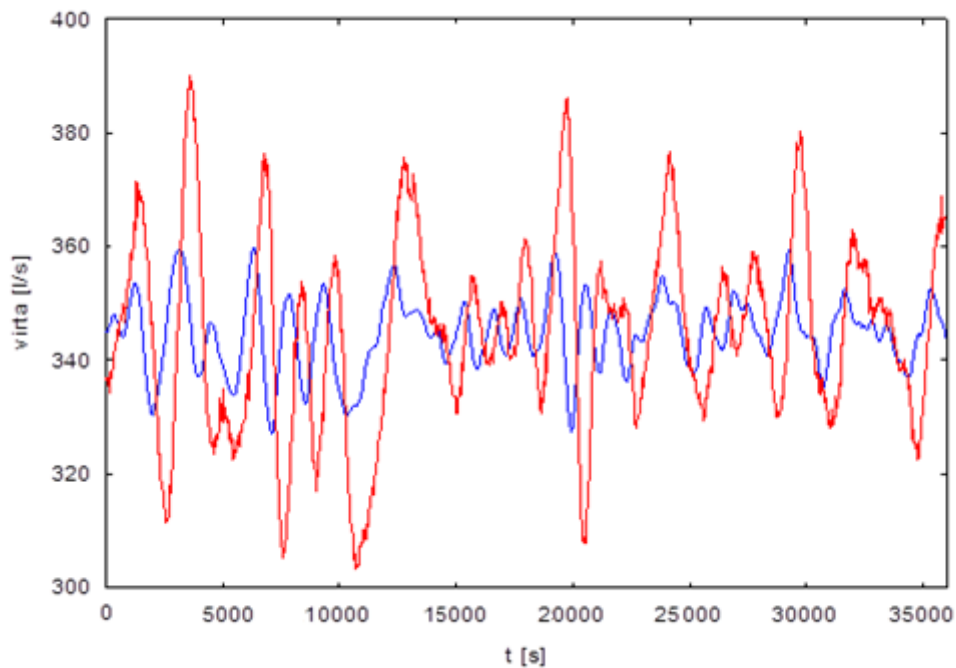


Kuva 4.1 Säiliön 1 venttiilin ohjausarvon mittausdata punaisella ja vastaava simulointitulokset sinisellä vajaan 10 tunnin ajalta.



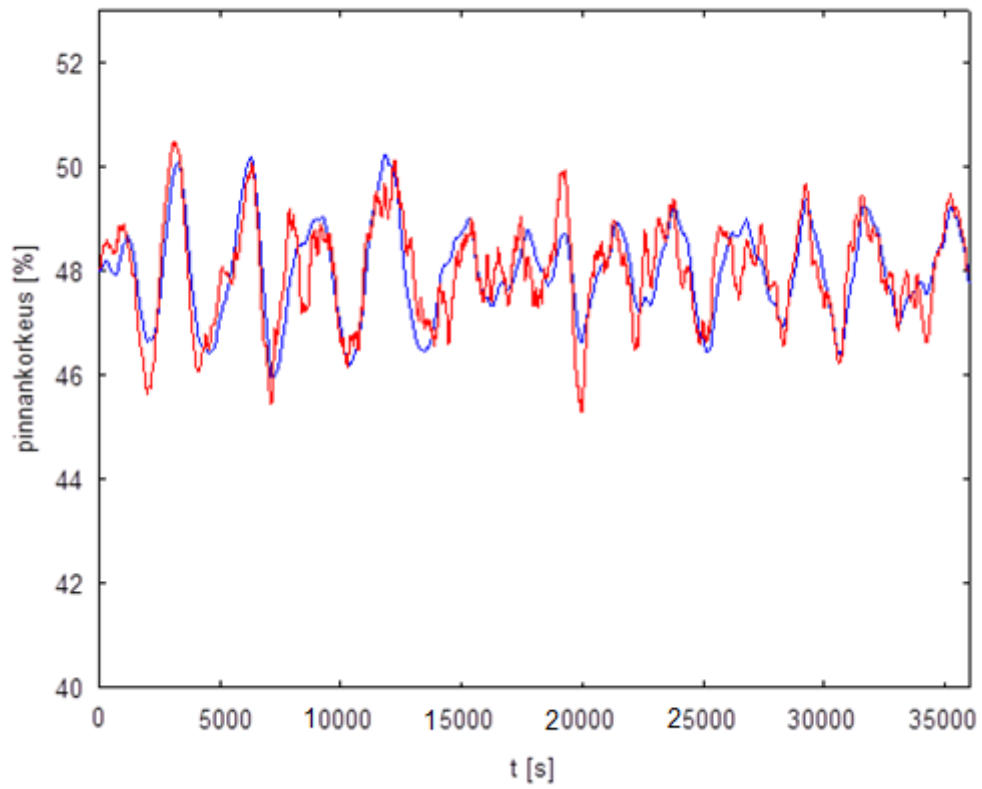
Kuva 4.2 Säiliön 2 venttiilin ohjausarvon mittausdata punaisella ja vastaava simulointitulokset sinisellä vajaan 10 tunnin ajalta.

Kuvista 4.1 ja 4.2 nähdään, että simuloitut ohjausarvot vastaavat hyvin todellisia arvoja. Arvoissa on pieniä eroja, varsinkin ohjaushuippujen kohdilla. Säiliön 2 ohjausarvojen mittausdatassa nähdään myös pieni viive simuloituihin tuloksiin nähden. Erot johtuvat todennäköisesti siitä että mallissa otettiin sakeudet ja paineet vakioiksi. Eroja voi syntyä myös mittausten epätarkkuuksista. Tarkastellaan seuraavaksi säiliön lähtövirtauksen simuloituja ja todellisia arvoja kuvassa 4.3.

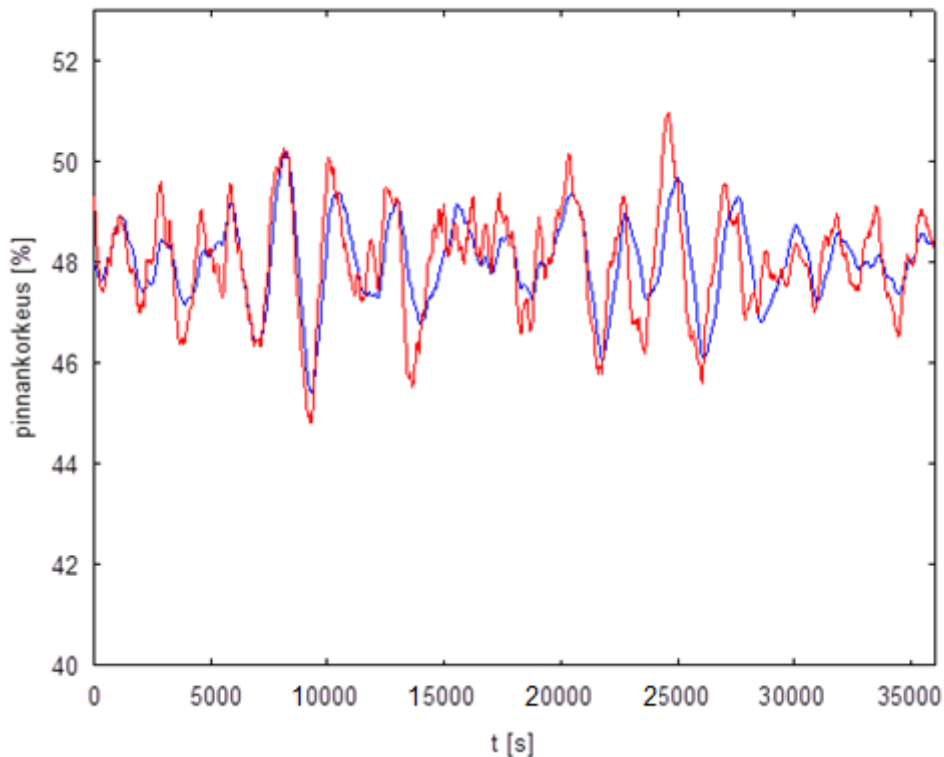


Kuva 4.3 Todellinen mittausdata säätöventtiililtä 2 punaisella ja säiliön 2 lähtövirtauksen simulointitulos sinisellä.

Kuvasta 4.3 nähdään, että simuloitu lähtövirtaus seuraa kohtuullisen hyvin todellisen lähtövirran kuvaajanmuotoja. Virtauksen värähtely tapahtuu kuitenkin pienemmällä amplitudilla kuin todellisessa virtauksessa. Tämän aiheuttaa todennäköisesti virtauksen sakeusvaihtelut, jotka otettiin mallissa huomioon ainoastaan vakioarvoisen virran lisäyksenä. Eroihin vaikuttanevat myös vakioiksi oletettu paine sekä mittausten epätarkkuudet. Tarkastellaan säiliöiden pinnankorkeuksien käyttäytymistä samalta ajalta. Pinnankorkeuksien simuloitujen arvojen ja todellisten mittausten arvot on esitetty kuvissa 4.4 ja 4.5.



Kuva 4.4 Säiliön 1 pinnankorkeuden mittausdata punaisella ja vastaavat simuloitut arvot sinisellä.



Kuva 4.5 Säiliön 2 pinnankorkeuden mittausdata punaisella ja vastaavat simuloitua sinisellä.

Kuvista 4.4 ja 4.5 havaitaan, että simuloitua pinnankorkeuden arvot vastaavat mitattuja arvoja kohtuullisen hyvin, mutta esimerkiksi noin ajan hetkellä 20000 s säiliön 1 simuloitua pinnankorkeuden amplitudi jää selvästi todellista matalammaksi. Säiliön 1 pinnankorkeuden simulointi vastaa todellisuutta hieman paremmin kuin säiliön 2 pinnankorkeus. Tämä johtunee siitä että säätöpiirissä 2 käytetään säiliön tulovirtana säätöpiirissä 1 simuloitua säiliön 1 lähtövirtausta, jossa on todennäköisesti jo jonkin verran virhettä. Erot simuloitujen ja todellisen mittausdatan välillä johtunevat sakeus- ja painevaihteluista, jotka jätettiin mallissa huomiotta. Myös itse mittausdatassa voi esiintyä virhettä, jota voi mittaukseen aiheuttaa esimerkiksi kuoha, jota kertyy säiliössä massan pinnalle.

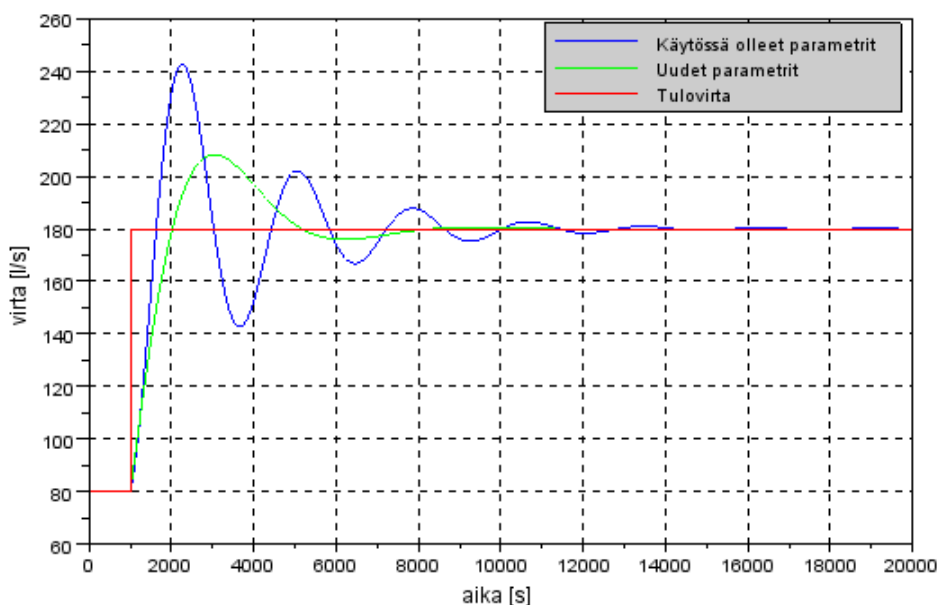
Vaikka simuloituissa ja mitatuissa ohjauksien, lähtövirtauksen ja pinnankorkeuksien oli jonkin verran eroavaisuuksia, voidaan todeta simuloinnin vastaavan kuitenkin hyvin todellisuutta. Näin ollen voidaan mallia käyttää PI-säätimien parametrien optimointiin ja testaamiseen.

5. SÄÄTIMIEN VIRITYS

PI-säätimen parametrit voidaan optimoida kokeellisesti, mutta viritykseen on olemassa myös erilaisia menetelmiä. Yksinkertaisimmat viritystavat ovat ns. peukalosäännöt, joilla parametrit voidaan valita minimipinta-alan periaatteella tai minimihäiriön periaatteella (Jansson). Muita viritysmenetelmiä ovat muun muassa Ziegler-Nicholsin menetelmä ja lambda-viritys (Harju). Tässä tapauksessa näillä menetelmillä saataisiin vähennettyä värähtelyä pinnankorkeudessa, mutta se lisäisi entisestään värähtelyä säiliön lähtövirtauksessa. Tarkoituksena kuitenkin ensisijaisesti on pitää lähtövirta mahdollisimman tasaisena ja sallia pieni värähtely pinnankorkeudessa. Optimoidaan uudet säätimien parametrit kokeellisesti askelvastekokeella siten, että lähtövirtaus värähtelee vähemmän ja säiliöiden pinnankorkeudet pysyvät sallituissa rajoissa.

5.1 Parametrien viritys

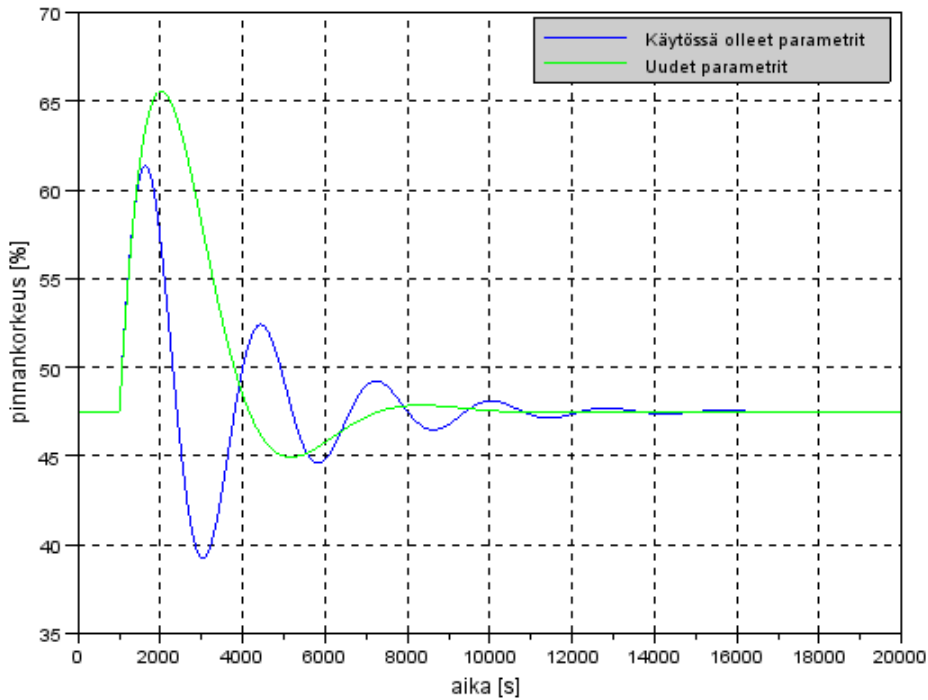
Simuloidaan säiliön 1 toimintaa käyttäen tulovirtana askeltuloa, jossa virtaus muuttuu 80 l/s:sta 180 l/s. Parametreja optimoidessa laitoksella oli käytössä säätäjän kertoimena $P = 0,6$ ja integrointiaikana $I = 4$ min. Kasvatetaan integrointiaikaa, jotta saadaan säätö toimimaan hitaammin, mutta niin ettei virran nousuaika ole kuitenkaan enempää kuin noin 10 minuuttia. Kasvatetaan myös hieman vahvistuksen P arvoa säädön nopeuttamiseksi. Kuvaa 5.1 on piirretty lähtövirran simuloitu käyttäytyminen tehtaalla käytössä olleilla sekä uudelleen optimoiduilla parametrien arvoilla $P = 1$ ja $I = 15$. Kuvassa näkyy punaisella tulovirta, jossa ajan hetkellä 1000 s näkyy 100 l/s askelmainen muutos.



Kuva 5.1 Säiliön 1 askelmainen tulovirta punaisella. Sinisellä simulointi käyttäen käytössä olleita säätöparametreja ja vihreällä uudelleen optimoituja parametreja.

Kuvasta 5.1 nähdään virtauksen värähtelevän todella paljon käytössä olleilla parametreilla. Ylitystä on jopa 60 l/s. Uusilla parametreilla sekä ylitys että asettumisaika saadaan vähentymään puoleen. Käytössä olleilla parametreilla lähtövirran 5 %:n asettumisaika on noin 2 tuntia ja uusilla parametreilla noin 1 tunti.

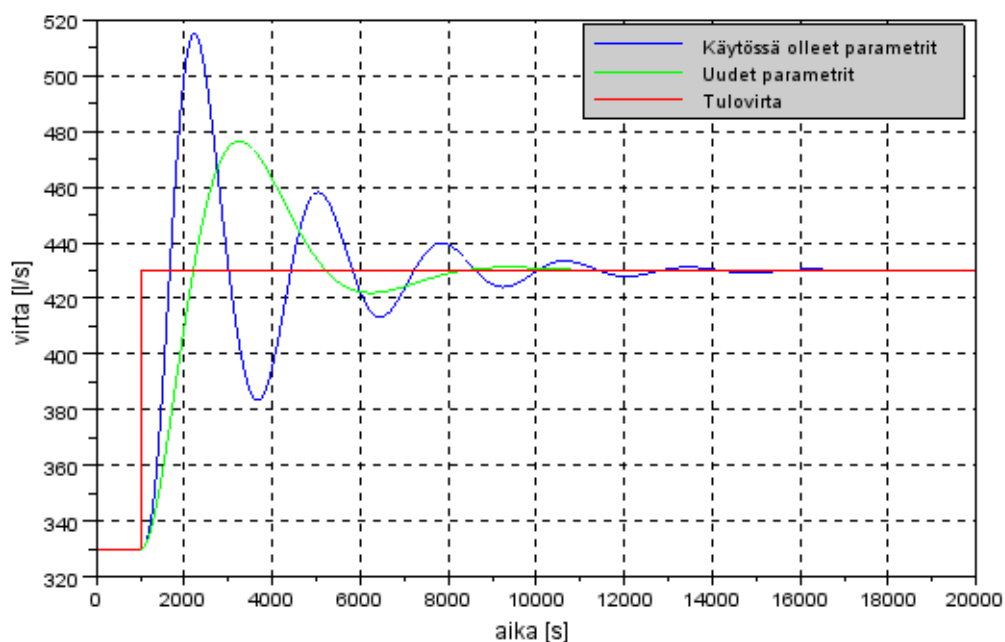
Tarkastellaan seuraavaksi pinnankorkeuden käyttäytymistä tulovirran askelmuutoksen aikana. Kuvassa 5.2 on simuloidut pinnankorkeudet käytössä olleilla parametreilla sinisellä ja uusilla parametreilla vihreällä.



Kuva 5.2 Säiliön 1 pinnankorkeus simuloituna käytössä olleilla parametreilla sinisellä ja uudelleen viritetyillä parametreilla vihreällä. Pinnankorkeuden asetusarvona on 47,5.

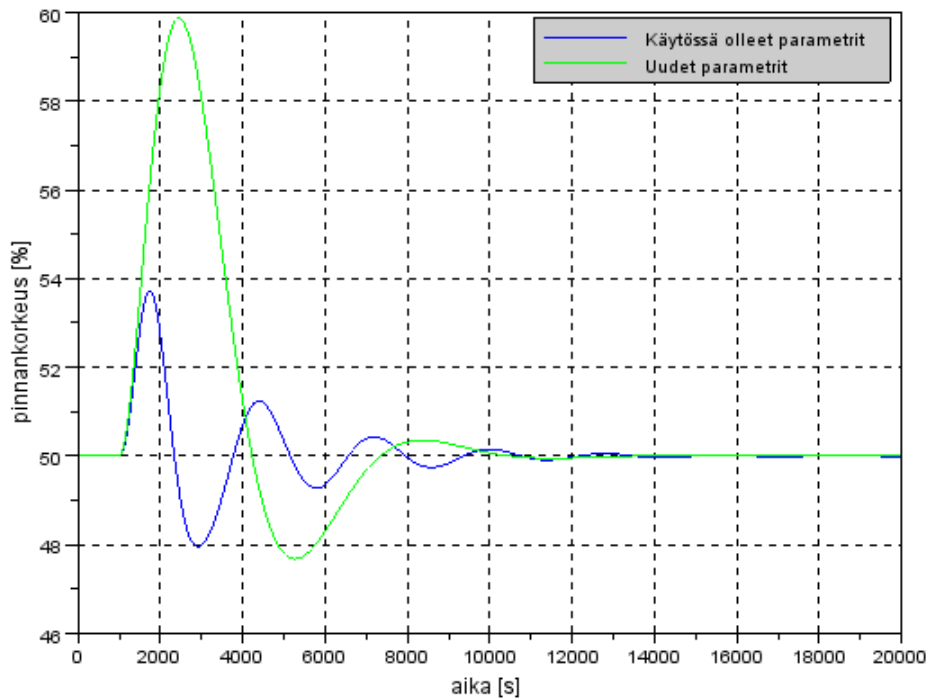
Kuvasta 5.2 nähdään, että uusilla parametreilla pinnankorkeus värähtelee huomattavasti vähemmän. Ylitystä tapahtuu uusilla parametreilla noin 20 % enemmän, mutta ylitys jää alle 20 prosenttiyksikön. Simuloinnissa käytetty 100 l/s muutos tulovirrassa on käytännössä hyvin suuri, mihin nähden pinnankorkeuden ylitys on sallituissa rajoissa.

Simuloidaan seuraavaksi Säiliön 2 toimintaa askeltulovirralla, jossa säiliön 2 tulovirta muuttuu 80 l/s:sta 180 l/s:iin. Pinnankorkeuden asetusarvona on tehtaalla ollut käytössä 50 % ja säätäjän vahvistuksena $P = 0,9$ ja integrointiaikana $I = 2$ min. Kasvatetaan säätimen integrointiajan I arvoa säädön hidastamiseksi ja viritetään myös kertoimen P arvoa. Uusiksi parametreiksi valitaan $P = 0,8$ ja $I = 19$. Kuvassa 5.3. nähdään säiliön lähtövirran käyttäytyminen käytössä olleilla parametreilla sinisellä ja uusilla parametreilla vihreällä.



Kuva 5.3 Sinisellä säiliön 2 lähtövirran simulointitulos käyttäen käytössä olleita parametreja ja vihreällä käyttäen uudelleen optimoituja parametreja. Tulovirtana askeltulo 80 l/s:sta 180 l/s:iin. Koska säiliön 2 virtaukseen lisätään simulointimallissa 250 l/s vakiovirta, on kuvan tulovirtaan lisätty myös tämä määrä, jotta sen vertaaminen lähtövirtaan olisi helpompi.

Kuvasta 5.3 nähdään, että uusilla parametreilla säätö on hitaampi ja siinä on huomattavasti vähemmän värähtelyä. Ylitystä uusilla parametreilla on alle puolet verrattuna ylitykseen vanhoilla parametreilla. Tarkastellaan seuraavaksi kuvassa 5.4 olevaa säiliön 2 simuloitua pinnankorkeutta virran muutoksen aikana.

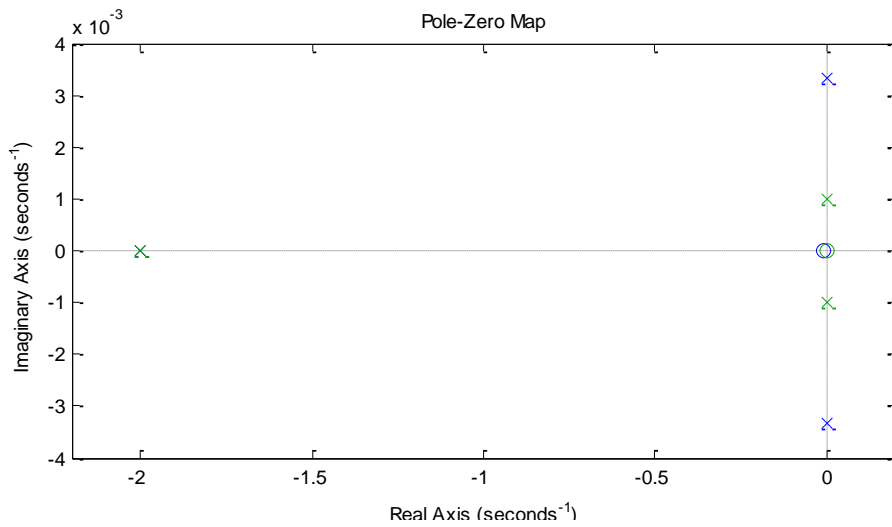


Kuva 5.4 Säiliön 2 pinnankorkeuden muutos tulovirran muuttuessa askelmaisesti 100 l/s. Sinisellä simuloinnissa on käytetty käytössä olleita parametreja ja vihreällä uudelleen simuloituja parametreja.

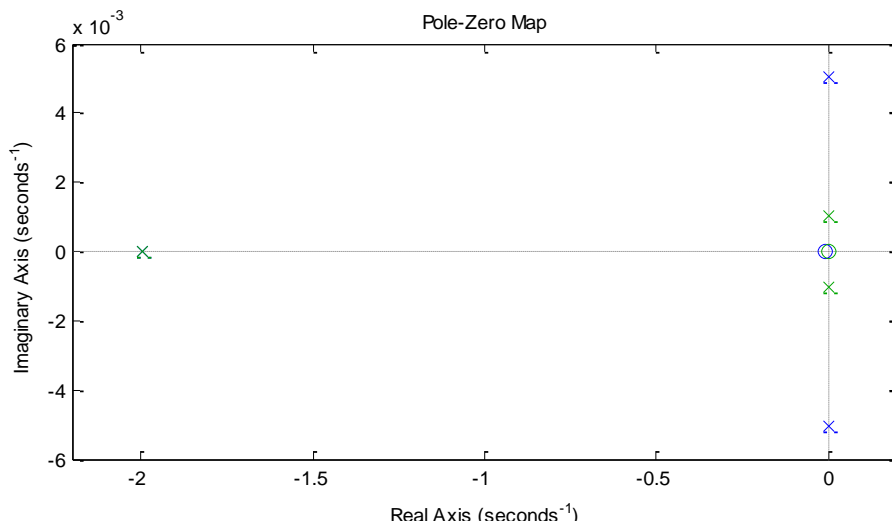
Kuvasta 5.4 nähdään ylityksen kasvavan uusilla parametreilla yli kaksinkertaiseksi, mutta ylitystä on edelleen vain 10 prosenttiyksikköä, mikä on sallituissa rajoissa. Sääto on myös hitaampi eikä pinnankorkeus värähtele yhtä paljon kuin vanhoilla parametreilla.

5.2 Napa-nolla kuvaaja

Tarkastellaan uusien säätäjien parametrien vaikutusta systeemien siirtofunktioiden napoihin. Systeemien napa-nolla kuvaajat on esitetty kuvissa 5.5 ja 5.6.



Kuva 5.5 Säiliön 1 siirtofunktion napa-nolla kuvaus. Sinisellä navat ja nollat vanhoilla säätäjän parametrien arvoilla, vihreällä uusilla arvoilla.



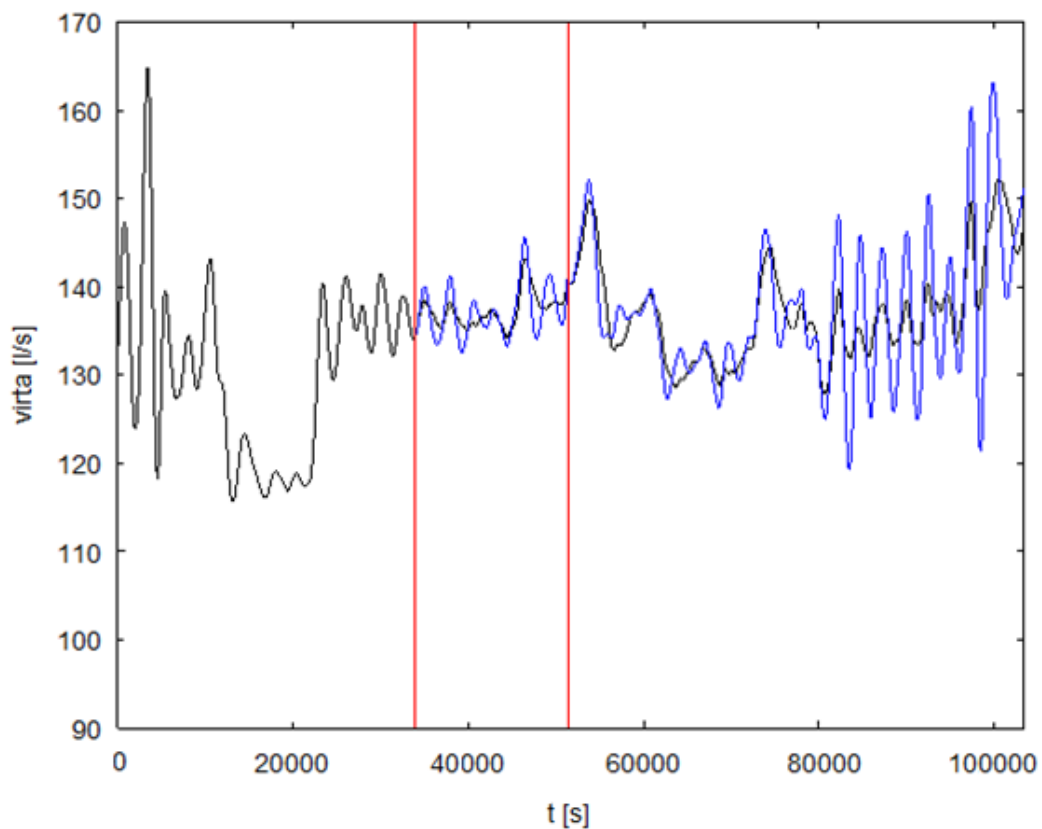
Kuva 5.6 Säiliön 1 siirtofunktion napa-nolla kuvaus. Sinisellä navat ja nollat vanhoilla säätäjän parametrien arvoilla, vihreällä uusilla arvoilla.

Kuvista 5.5 ja 5.6 nähdään, että kummallakin systeemillä on edelleen kompleksikonjugaat-
ti napapari, mutta niiden imaginaariosien itseisarvot ovat pienemmät kuin ennen säätimien
parametrien muutosta. Tästä voidaan havaita, että järjestelmässä on edelleen värähtelyä,
mutta värähtelyn kulmataajuus on pienentynyt. Napojen reaali-osien itseisarvot ovat pysy-
neet samoina, joten värähtely vaimenee yhtä nopeasti kuin ennen parametrien muutosta.

(Savolainen)

5.3 Uusien parametrien testaus tehtaalla

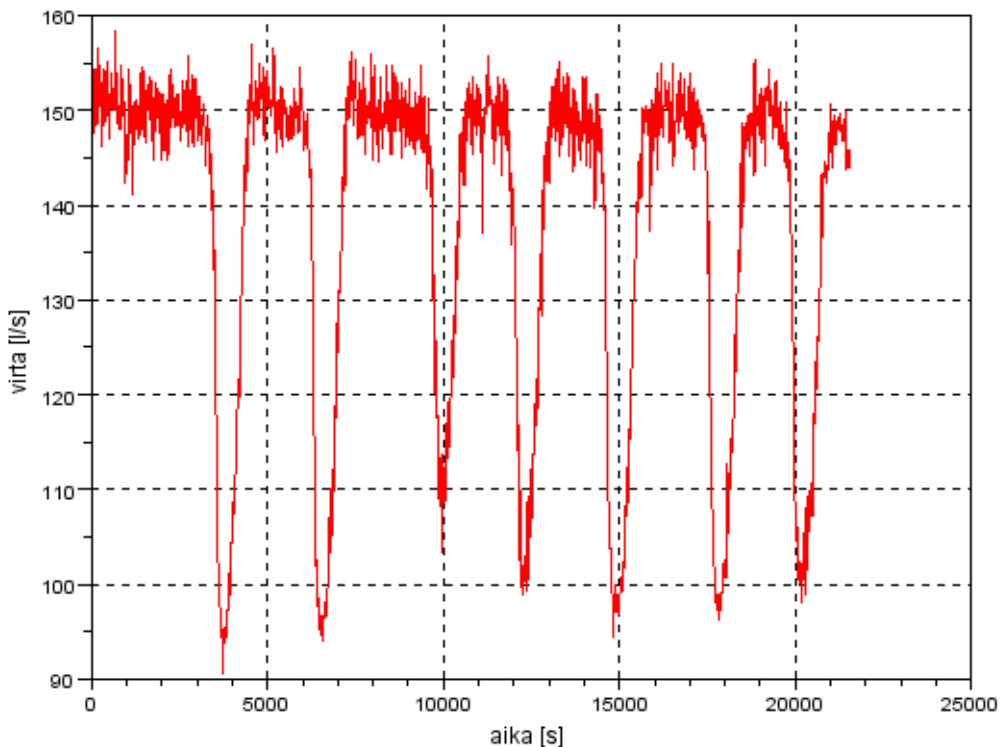
Uusia parametreja testattiin käytännössä tehtaalla muuttaen säiliö 1:n säätöparametreja kahdessa erässä: ensin muutettiin vahvistuksen P arvo 0,6:sta 1:een ja integrointiajan I arvo 4:stä 10:een. Nämä parametrit olivat käytössä noin viisi tuntia, jonka jälkeen integrointiajan I arvo muutettiin 10:stä 15:sta. Tämän jälkeen käyttöön jäivät uudet parametrit. Kuvassa 5.7 on simuloitu säiliön 1 lähtövirtausta käyttäen tulovirtana mittausdataa parametrien muutosten ajalta. Punaiset pystyviivat osoittavat paikat jolloin parametreja muutettiin.



Kuva 5.7 Kuvassa on simuloitu säiliön 1 lähtövirtaa käyttäen tulovirtana mittausdataa parametrien muutoksien ajalta. Parametrien vaihto on tapahtunut punaisten pystyviivojen kohdalla. Mustalla on piirretty simuloitu lähtövirta kunakin aikana käytössä olleilla parametreilla: ensimmäisellä osuudella $P = 0,6$ ja $I = 4$, toisella osuudella $P = 1$ ja $I = 10$ ja kolmannella osuudella $P = 1$ ja $I = 15$. Sinisellä on simuloitu lähtövirran käyttäytymistä siinä tapauksessa, että parametreja ei olisi muutettu ollenkaan eli kerroin $P = 0,6$ ja integrointiaika $I = 4$.

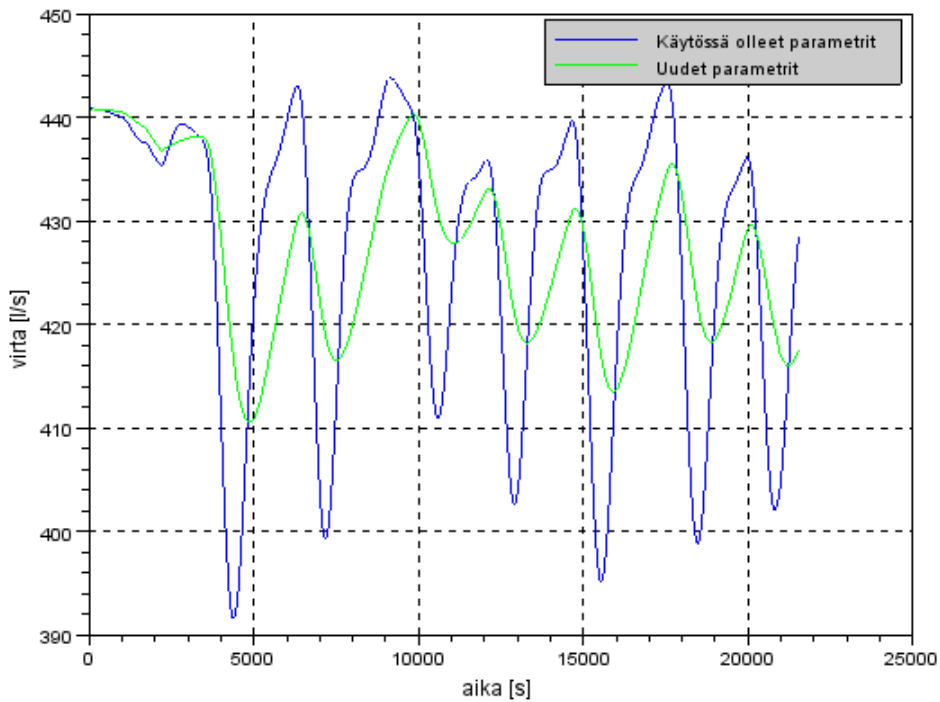
Kuvan 5.7 oikean puoleisesta lohokosta nähdään, että vaikka virtaus värähtelee hieman uusillakin parametreilla, värähtelyä on huomattavasti vähemmän kuin jos olisi jatkettu alkuperäisten parametrien käyttöä.

Säiliön 2 parametrien käytännön testauksen aikana säiliön 1 uudet parametrit olivat jo käytössä, joten säiliön 2 tulovirtaus oli jo sen ansiosta rauhallisempaa. Parametreja muutettiin tälläkin kertaa vaiheittain. Ensin vahvistusta P muutettiin 0,9:stä 0,8:aan ja integrointiaika I 2:sta 10:een. Nämä parametrit olivat käytössä noin vuorokauden jonka jälkeen integrointiaika I nostettiin 15:sta. Simuloimalla valittuun $I = 19$ parametria ei muutettu. Simuloidaan säiliötä uusilla ja vanhoilla parametreilla käyttäen tulovirtana mittausdataa. Mittauksen aikana säiliön 1 tulovirrassa tapahtui suuria vaihteluita. Mitattu tulovirta nähdään kuvassa 5.8.



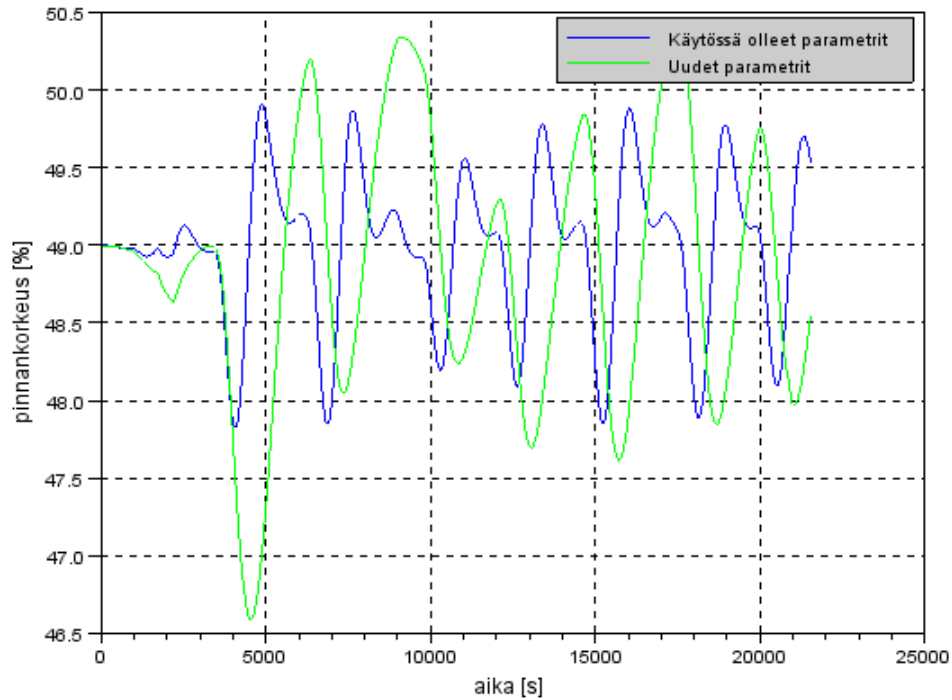
Kuva 5.8 Säiliön 2 tulovirran mittausdata

Kuvan 5.8 tulovirrassa esiintyy noin 16 minuuttia kestäviä häiriöitä, joiden aikana massan virtausnopeus laskee jopa 40 %. Kuvassa 5.9 nähdään miten säätimen parametrien muutos vaikuttaa näiden häiriöiden kompensointiin.



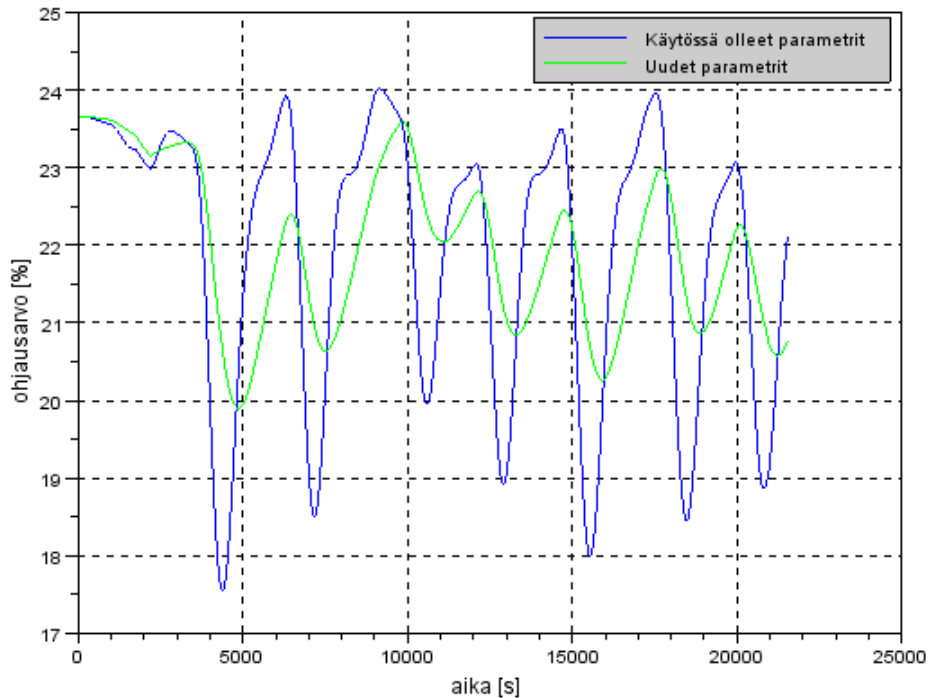
Kuva 5.9 Sinisellä säiliön 2 simuloitu lähtövirtaus vanhoilla käytössä olleilla parametreilla ja vihreällä uusilla, käyttöön jääneillä parametreilla. Simuloinnin aikana säiliön 1 uudet säätöparametrit ovat käytössä.

Kuvasta 5.9 nähdään, että uusilla parametreilla simuloitun lähtövirran vaihtelut puolittuvat verrattuna simulointituloksiin vanhoja parametreja käyttäen. Ensimmäisen suuren häiriöpiikin suuruus vanhoja parametreja käytettäessä on -46 l/s, mikä on -10 % lähtövirtauksesta. Vastaava häiriö uusilla parametreilla on -27 l/s eli -6 %. Tarkastellaan seuraavaksi säiliön 2 pinnankorkeuden käyttäytymistä tällä ajalla kuvassa 5.10.



Kuva 5.10 Säiliön 2 simuloitu pinnankorkeus vanhoja parametreja käyttäen sinisellä ja uusia parametreja käyttäen vihreällä.

Kuvan 5.10 mukaisesti uusia parametreja käytettäessä säiliön 2 pinnankorkeudessa on suurempia vaihteluita kuin vanhoja käytettäessä, mutta vaihtelut pysyvät silti vielä sallituissa $\pm 10\%$:n rajoissa. Tarkastellaan vielä säiliön 2 lähtövirtausta ohjaavan venttiilin ohjausarvoa kuvassa 5.11.



Kuva 5.11 Säiliön 2 lähtövirtausta ohjaavan venttiilin simuloitu ohjauskulma.

Kuvasta 5.11 nähdään, että venttiilin toiminta on uusia parametreja käytettäessä huomattavasti rauhallisempaa kuin tehtaalla käytössä olleilla parametreilla. Tämä rauhoittaa lähtövirtausta, mikä nähtiin kuvasta 5.9. Venttiilin rauhallisempi käyttäytyminen vähentää myös venttiilin kulumista, pidentää sen käyttöikää ja vähentää energian kulutusta.

6. YHTEENVETO

Työssä mallinnettiin onnistuneesti massasäiliöiden virtausta. Venttiilien ohjausarvojen, säiliöiden pinnankorkeuksien ja säiliön 2 lähtövirtauksen simulointiarvoja verrattiin todellisiin, tehtaalla mitattuihin arvoihin. Simuloinnin nähtiin eroavan jonkin verran todellisuudesta, mutta erot olivat tarpeeksi pieniä, jotta simulointimallia voitiin käyttää uusien säätöparametrien viritykseen. Askelvastekokeella havaittiin, että nykyiset parametrit aiheuttavat huomattavan paljon värähtelyä massavirtaan. Värähtely havaittiin myös siirtofunktioiden nolla-napa -kuvaajista. Uudet säätöparametrit viritettiin kokeellisesti askelvastetta käyttäen. Simuloimalla säiliösystemiä tulovirtauksen mittausdataa käyttäen sekä uusilla että vanhoilla parametreilla havaittiin, että virtausta saatiin tasaisemmaksi. Myös napa-nolla

kuvaajien tarkastelu osoitti värähtelyn vähentyvän. Uusia parametreja testattiin myös tehtaalla, jossa tulokset olivat hyviä ja uudet parametrit jätettiin käyttöön.

Koska säätimet joilla säiliöiden lähtövirtausta säädetään ovat periaatteeltaan pinnankorkeus- eivätkä virtaussäätimiä, olisi lähtövirtausta mahdollista saada vieläkin tasaisemmaksi säätimen tyyppiä muuttamalla. Tehtaalla tuotantotasoa kuitenkin muutetaan toisinaan, jolloin massavirtakin muuttuu. Tavoitevirtaa ei siis voida antaa säätimelle ohjearvoksi. PI-säätimen sijaan voisi olla mahdollista käyttää suodatin säätöä, jossa tulovirran mittaus suodatettaisiin ja myötäkytkettäisiin säiliön lähtöön.

LÄHTEET

- (Harju) Harju T., Marttinen A. 2000. Säättöpiirin virityksen perusteet. Espoo: Ota-media Oy.
- (Jansson) Jansson E. 2000. Säättö- ja mittaustekniikka. Iisalmi: IS-PRINT
- (Kortela) Kortela U., Virkkunen J. 1984. Säättötekniikan perusteet. Espoo: Otapaino
- (Savolainen) Savolainen J., Vaittinen R. 2003. Säättötekniikan perusteita. Saarijärvi: Gummerus Kirjapaino Oy