



Karelia-ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)

PWM-taajuusparametrien määrittäminen hydrauliventtiilille

Teemu Koskinen

Opinnäytetyö, Kesäkuu 2023

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023
Konetekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Teemu Koskinen

Nimike
PWM-taajuusparametrien määrittäminen hydrauliventtiilille

Toimeksiantaja
Kesla Oyj

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin pulssinleveysmodulaatiolla (engl. pulse-width modulation, PWM) ohjatun hydrauliventtiilin käyttäytymistä, sekä pyrittiin selvittämään mahdollisimman käyttökelpoiset taajuusparametrit, jotta venttiili saatiin toimimaan täsmällisesti ja viiveettömästi.

Tutkimuksen raportti on progressiivinen. Sen sijaan, että lopussa olisi tulosesittely, tässä tutkimuksessa on välituloksia, joista kerättyä informaatiota hyödynnetään seuraavassa osiossa aina tutkimuksen loppuun saattamiseen saakka. Raportin alussa olevassa teoriaosuudessa avataan, mitä tarkoittaa PWM sekä dither - taajuudet ja kerrotaan, mihin ja miksi niitä käytetään.

Tutkimus toteutettiin Kesla Oyj:n Joensuun tehtaalla tutkimusta varta vasten rakennettua testiasemaa käyttäen ja sen tuloksena saatiin toimivat ohjausparametrit ja ideoita siitä, miten tutkimusta voisi jatkaa tai kehittää.

Kieli
suomi

Sivuja 53

Asiasanat
PWM-ohjaus, Venttiiliohjaus, Taajuusparametrit, solenoidi, dither



THESIS
May 2023
Degree Programme in Mechanical Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Teemu Koskinen

Title
Determination of PWM Frequency Parameters for Hydraulic Valve

Commissioned by
Kesla Ltd.

Abstract

This thesis investigates the functioning of a PWM (pulse-width modulation) controlled hydraulic valve. The aim was to find the most usable frequency parameters to get the valve to operate more precisely and with minimum delay.

The study was carried out in Joensuu at Kesla Ltd.'s factory by using a specially constructed test setup. The thesis includes a theory section that explains the basics of PWM technology and why and where it is used. The thesis report is progressive. Instead of results presentation at the end, this study has intermediate results, from which the information gathered is used in the next section until the end of the study.

As a result of the research, functioning frequency parameters were obtained with ideas for possible extension and development of the project.

Language
Finnish

Pages 53

Keywords
pulse-width modulation (PWM), valve control, frequency parameters, solenoid, dither

Sisältö

1	Johdanto	5
2	PWM-ohjaus	5
2.1	PWM-taustaa	5
2.2	Laitteisto	6
2.3	PWM toimintaperiaate	6
2.3.1	Analoginen ja digitaalinen signaali	6
2.3.2	Kanttiaalto	7
2.3.3	Jakso ja työsykli	8
3	PWM konetekniikassa	9
3.1	Venttiiliohjaus	9
3.1.1	Solenoidi	10
3.1.2	Dither -taajuus	10
3.1.3	Dither toimintaperiaate	10
3.2	Korkea ja matalataajuus PWM	12
4	Tutkimuksen taustatietoa	13
4.1	Lähtötilanne	13
4.2	Venttiilipöydän rakenne	14
4.3	Venttiilipöydän ohjaus	15
5	Tutkimuksen valmistelu	16
5.1	Testiaseman rakennus	16
5.2	Testiaseman liittäminen ohjausyksikköön	20
5.3	Testiaseman määrittäminen	20
5.3.1	Karan asema-anturi	20
5.3.2	Automaatti ja manuaaliohjaus	21
5.3.3	Raja-arvot	22
5.4	Parametrien asettaminen ja koevedosten tallennus	23
6	Tutkimukset ja ilmiöt	24
6.1	Mittaus I: matalimmat käyttöarvot	24
6.2	Mittaus I tulokset ja johtopäätökset	28
6.3	Mittaus II: dither	28
6.4	Mittaus II tulokset ja johtopäätökset	30
6.5	Käyttöjännitteen vaihto	31
6.6	Solenoidin induktiivisuus	32
6.7	Mittaus III	33
6.8	Mittaus III tulokset ja johtopäätökset	41
6.9	Mittaukset IV: tarkennus	41
6.9.1	Dither tarkennus graafit	42
6.9.2	PWM tarkennus graafit	45
6.9.3	Mittaus IV tulokset ja johtopäätökset	48
6.10	Mittaus V: Amplitudi	49
7	Yhteenveto	51
8	Pohdinta	51
8.1	Tutkimus	51
8.2	Huomiot ja tutkimuksen jatko	52

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on selvittää Kesla Oyj:n käyttämälle PWM-ohjaukselle hydrauliventtiilille mahdollisimman käyttökelpoiset taajuusparametrit.

PWM, on lyhenne englannin kielen käsitteestä ”Pulse-Width Modulation”, suomeksi pulssinleveysmodulaatio.

PWM-ohjauksen käytön pääasiallinen ajatus on ohjata ja säätää sähköllä toimivien laitteiden suorituskykyä energiatehokkaasti ja olla ajan tasalla laitteen toiminnasta.

Hydrauliventtiilit muodostavat kokonaisuuden nimeltä venttilipöytä, mikä on tärkeä osa hydraulisesti operoitua konetta. Huonot ohjausarvot aiheuttavat koneen käytössä takertelua sekä hallitsemattomuutta. Koska PWM-ohjaus tapahtuu loogikkaohjaimen kautta, sitä voidaan muokata ja mukauttaa moneen käyttötarkoitukseen.

Opinnäytetyö sisältää konetekniikkaa, automaatiota sekä sähkötekniikkaa. Kirjallisuusosio avaa PWM-tekniikkaa ja luo teoriapohjaa pulman ratkaisemiseksi. Varsinainen tutkimus suoritetaan tutkimalla venttiilin käyttäytymistä Kesla Oyj:n tiloissa.

2 PWM-ohjaus

2.1 PWM-taustaa

PWM-ohjaus esiteltiin yleisölle ensimmäisen kerran vuonna 1976 Silicon General -yhtiön toimesta. Ohjaustavan kehitti nykyisen Texas Instrumentsin teknikko Bob Mammano (Heftman 2005, 1). PWM-ohjausta hyödynnettiin aluksi vain sotateknologiassa, kunnes se omaksuttiin muuhunkin käyttöön.

Tyypillisiä PWM-ohjattuja kohteita ovat nykypäivänä muun muassa sähkömoottorit, venttiilit, led-valot ja vahvistimet.

Maailman kärkipään PWM laitetuottaja on Texas Instruments, minkä pohjalta PWM-teknologia on saanut alkunsa.

Suurta suosiota harraste-, tutkimus- sekä opetuspiireissä nauttii myös yksinkertainen Arduino -järjestelmä.

2.2 Laitteisto

PWM-järjestelmän ydin on yleensä ohjelmoitava logiikkaohjain eli PLC (Programmable Logic Controller). Logiikkaohjaimen voi olla liitettynä näyttöjä, antureita tai ohjaimia. Ohjain kerää näistä informaation ja käsittelee sen. Logiikkaohjaimen voidaan ajaa tietokoneella parametrit, mitä hyödyntäen ohjain aktivoi lähtöjä. (Vadim 2017.)

Jotkin logiikkaohjaimet soveltuvat suoraan PWM-käyttöön, joissain ohjaimissa relelähdöt voidaan muokata PWM-yhteensopiviksi, mutta suorituskyky ei välttämättä ole yhtä hyvä kuin lähdoissä mitkä ovat nimenomaan suunniteltu PWM-käyttöön. (Dietrich 2022.)

2.3 PWM toimintaperiaate

2.3.1 Analoginen ja digitaalinen signaali

Analoginen signaali on arvoiltaan sama kuin siirrettävä data. Analogisessa signaalissa on häiriöitä ja sen voimakkuus heikkenee. Vääristymiä on vaikea erottaa, sillä signaalin vahvistuessa vahvistuvat myös häiriöt. (Signaalikäsittelyn laboratorio 2003, 3.)

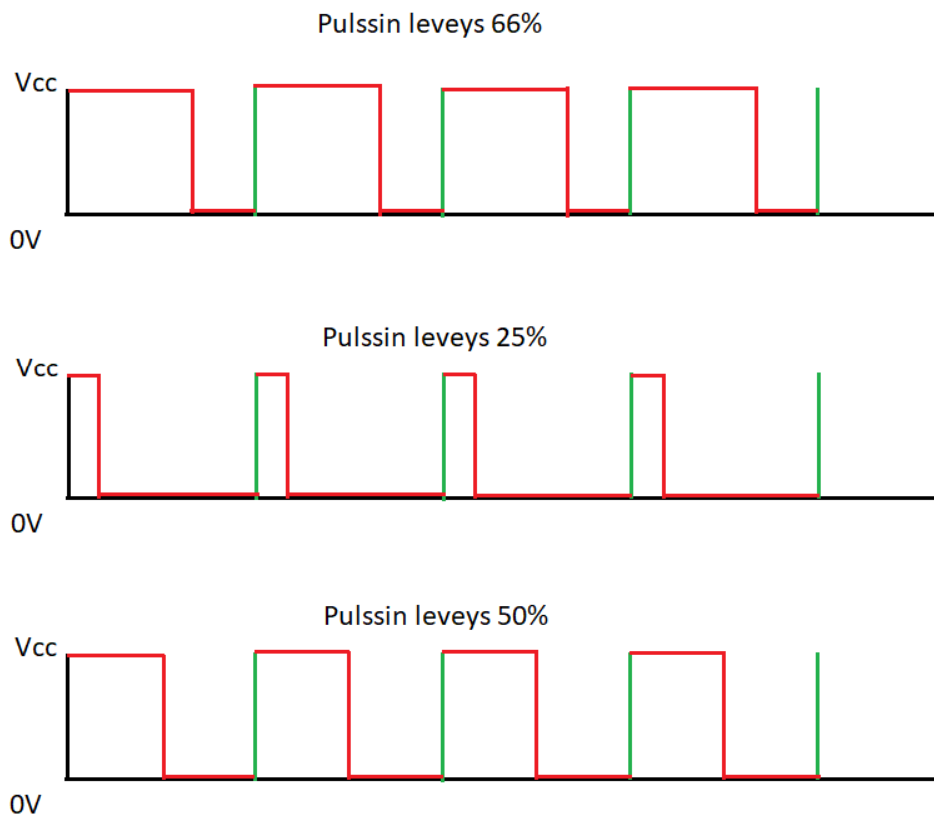
Aktiivikaiuttimet ovat hyvä esimerkki analogisen signaalin toiminnasta. Näissä vastaanotettu pulssi muutetaan sähkömagneetilla mekaaniseksi liikkeeksi, mikä

riittävän nopealla taajuudella syötettynä tuottaa ihmisen kuultavissa olevan äänen.

Digitaalisessa signaalissa analoginen signaali muutetaan ensin digitaaliseksi. Tässä vaiheessa osa informaatiosta katoaa. Digitaalisen signaalin koostumus on numeerinen. Signaalia voidaan vahvistaa tarvittaessa toistimilla. (Signaalikäsitteilyn laboratorio 2003, 3.)

2.3.2 Kanttiaalto

Tyypillinen PWM-mikroprosessori muuntaa digitaalisen syötteen analogiseksi kanttiaalloksi. Aalto koostuu siis päälle-pois-kuviosta. Aallon huippu on V_{cc} :n (Voltage common collector) eli jännitteen yhteiskeräimen arvoinen. (Yadav 2020.) Esimerkiksi Arduino-yksikölle tyypillinen V_{cc} on viisi (5) voltia. Aallon tyvi puolestaan vastaa nollan (0) voltin jännitettä (kuva 1). (Hirzel 2023.)



Kuva 1. Kanttiaallot

PWM-yksikkö saattaa lähettää eri porteista eri jännitteellä lähteviä signaaleja, mutta Vcc on virransyöttö. (Yadav 2020.)

Yksinkertaistettuna Vcc on korkein jännite, mitä PLC-yksikkö lähettää. Vcc-arvo on sidottu laitteen komponentteihin. Mikäli ei haluta spesifioida laitteen antojännitettä tai se ei ole esityksen kannalta oleellista, viitataan maksimi jännitteeseen yleensä lyhenteellä Vcc.

Aallon havainnollistamiseen on käytetty kuvaajaa (kuva 1), missä x-akselilla kulkee aika jaksotettuna ja y-akselilla on jännite.

2.3.3 Jakso ja työsykli

Jakson pituus on signaalin päälläoloaika "on-time", sekä poissaoloaika "off-time", summattuna. "Pulssin leveys"-termi viittaa päälläoloaikaan. (Hirzel 2023.)

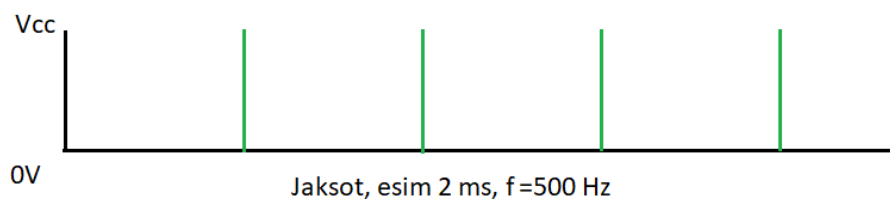
Jakson pituus ajallisesti määräytyy päivitysnopeuden käänteisarvon mukaan (kaava 1).

$$T = 1/f \quad (2)$$

missä T = jaksoaika

f = taajuus

Esimerkiksi kun Arduino-järjestelmän PWM-taajuus on 500 Hz, yhden jakson pituus vastaa kahta (2) millisekuntia (kuva 2). (Hirzel 2023.)



Kuva 2. Jaksot

Työsyklillä tai käyttösyklillä tarkoitetaan signaalin aktiivista aikaa koko jakson aikana. Käyttösyklin ilmaisemiseen on käytetty prosentteja. Jos käyttösykli on 50

% muodostuu tällöin täydellinen kanttiaalto (kuva 3). Eli puolet jaksosta "on-time" ja puolet "off-time". (Colley 2020.)



Kuva 3. On-time = Off-time

Työsykli kertoo suoraan millä kuormituksella laitetta käytetään. Työsyklistä voidaan käyttää myös lyhennettä "D" (duty cycle).

3 PWM konetekniikassa

3.1 Venttiiliohjaus

PWM-ohjausta voidaan hyödyntää todella monipuolisesti eri käyttökohteissa, mutta opinnäytetyön aiheen kannalta järkevintä keskittyä ainoastaan venttiilin ohjaukseen.

Hydrauliventtiilit ovat yleensä luisti-karaisia suuntaventtiilejä niiden monipuolisuuden takia. (Metropolia 2009, 8.)

Metropolia 2009,8) kertoo: "Suuntaventtiilejä voidaan ohjata manuaalisesti, mekaanisesti hydraulisesti, pneumaattisesti tai sähköisesti."

Sähköisesti ohjattu, esimerkiksi luisti-karainen, hydrauliventtiili on ohjattu sähkömagneettisella solenoidilla. Solenoidi voi olla suoraan kiinni luistissa tai solenoidi voi ohjata ohjauspainetta. Ohjauspainetta ohjaavasta ratkaisusta käytetään nimitystä sähköinen esiohjaus. Suoraan karaa liikuttava ratkaisua on kutsuttu lyhyemmällä termillä sähköinen ohjaus. (Metropolia 2009, 8.)

Tutkimuksessa käytettävä esiohjattu suuntaventtiili on luisti-karainen. Karalla on keskitysjouset molemmissa päissä, joita vasten ohjauspainetta ajetaan puolelle kerrallaan.

3.1.1 Solenoidi

Solenoidin toiminta periaate on sähkövirran muuntaminen mekaaniseksi liikkeeksi. Solenoidin pääkomponentit ovat käämi ja sauva. Käämiin syötetty virta luo sähkömagneetin mikä liikuttaa metallista sauvaa magneettisen suunnan perusteella. (Sinha & Minj 2020.) Magneetin tehokkuus riippuu syötetyn jännitteen suuruudesta.

Esiohjaussolenoidissa on sisäänrakennettu palautusjousi, mitä vasten PWM-pulssitus tehdään. Nopea pulssitus määrää solenoidin asennon. Solenoidin sauvaventtiilin läpi kulkeva hydraulinen ohjausvirta tekee työn luistin päädyssä.

3.1.2 Dither -taajuus

Solenoidien sauvoilla on taipumusta jumittua paikoilleen tai takerrella liikkeen aikana. Syynä tähän on lepo sekä liukukitkat. Näiden eliminoimiseen käytetään lisäsignaalia, mikä tuottaa edestakaista värähtelyä siinä pisteessä, mihin sauva on ajettu. (HydraForce 2023.)

Dither-taajuus on pieltä aaltoliikettä, mikä on jatkuvasti aktiivinen PWM-signaalin rinnalla. Aaltoilu saa venttiilin reagoimaan nopeammin ja sulavammin. Monissa laitteissa sekä PWM ja dither-taajuudet ovat säädettävissä erikseen. (Quality Hydraulics 2023.)

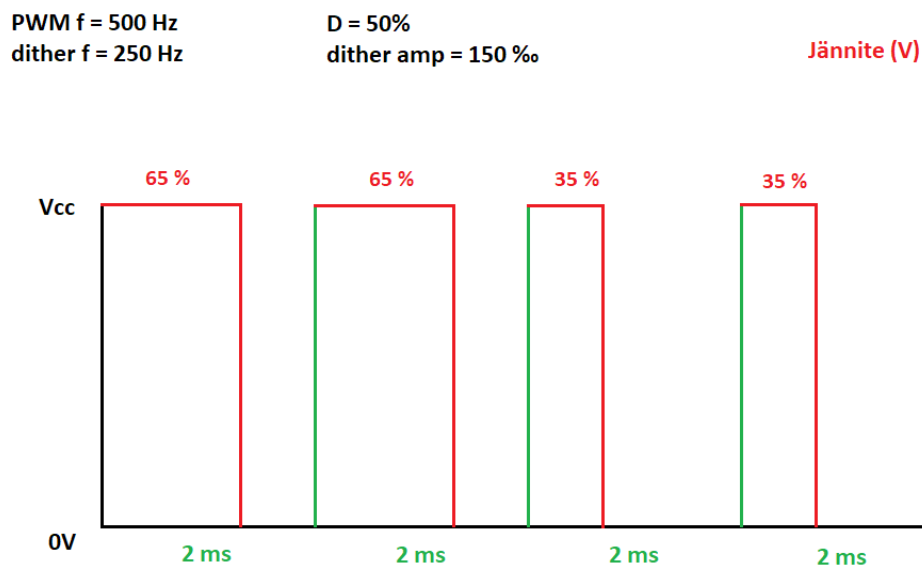
3.1.3 Dither toimintaperiaate

Dither-taajuus käytännön tasolla tekee PWM-signaalista aaltoilevaa, kuitenkin säilyttäen sen tekemän työn. Dither-taajuuden kaksi säädettävää asiaa ovat sen päivitystaajuus ja voimakkuus. Voimakkuus ilmoitetaan yleensä promilleina.

Tätä promillemäärää vuorotellen lisätään sekä vähennetään sen hetkisestä pulssin leveydestä dither päivitystaajuuden mukaan. Voimakkuuden promillet ovat sidottuna jaksoon, eli 1000‰ on yksi jakso. (Buršič 2019.)

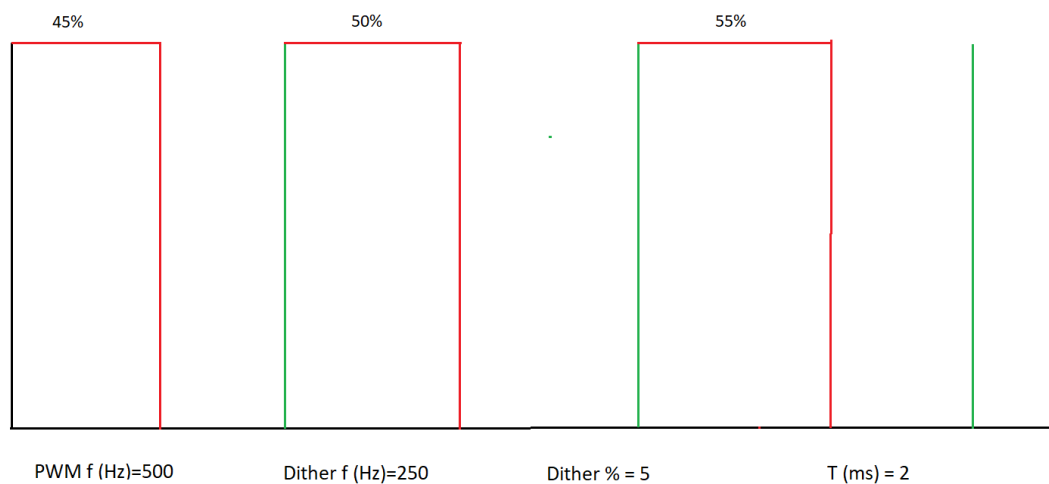
Kuvan 4 tilanteessa tapahtuu neljän (4) millisekunnin välein 150 ‰ pulssin leveyden muutos.

Jos ajatellaan, että dither-taajuus on sama kuin PWM-taajuus, tämä 15 % muutos tapahtuisi joka toisella jaksolla. Eli tällä päivitystaajuudella 2 ms välein.



Kuva 4. Nimellistyösykli D=50 %

Dither voi myös seilata, riippuen taajuudesta se saattaa käydä myös nimellispulssinleveydellä hetkellisesti (kuva 5).

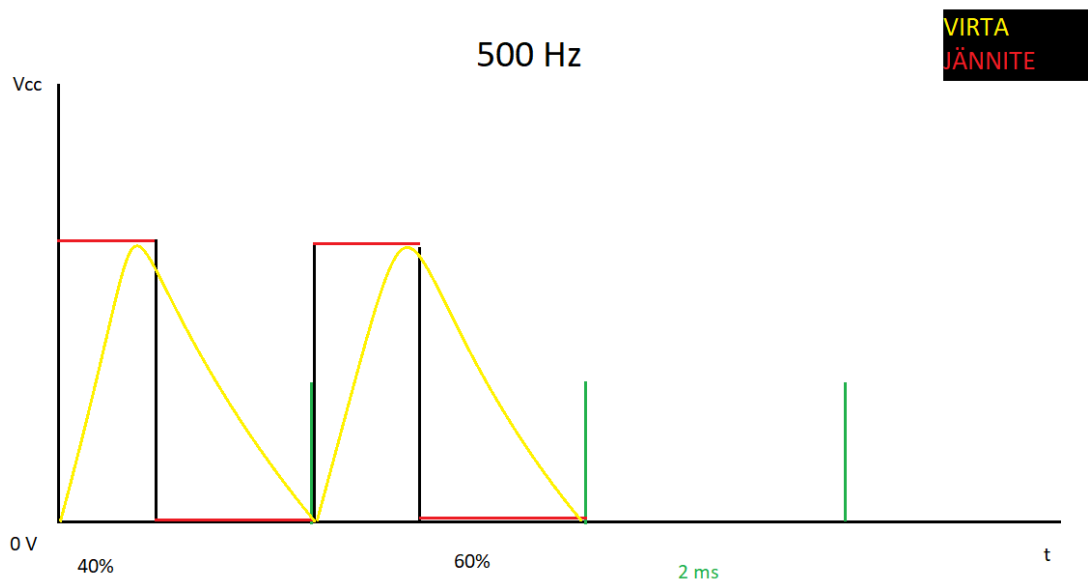


Kuva 5. D=50 %

3.2 Korkea ja matalataajuus PWM

Virtakäyrä ei käyttäydy samalla tavoin kantikkaasti kuin jännitteen syöttö (kantiaalto). Solenoidilla kestää hetki ennen kuin sen läpi kulkeva virta saavuttaa maksimiarvonsa ja hetki, kun virta katoaa (kuva 6). (HydraForce 2023.)

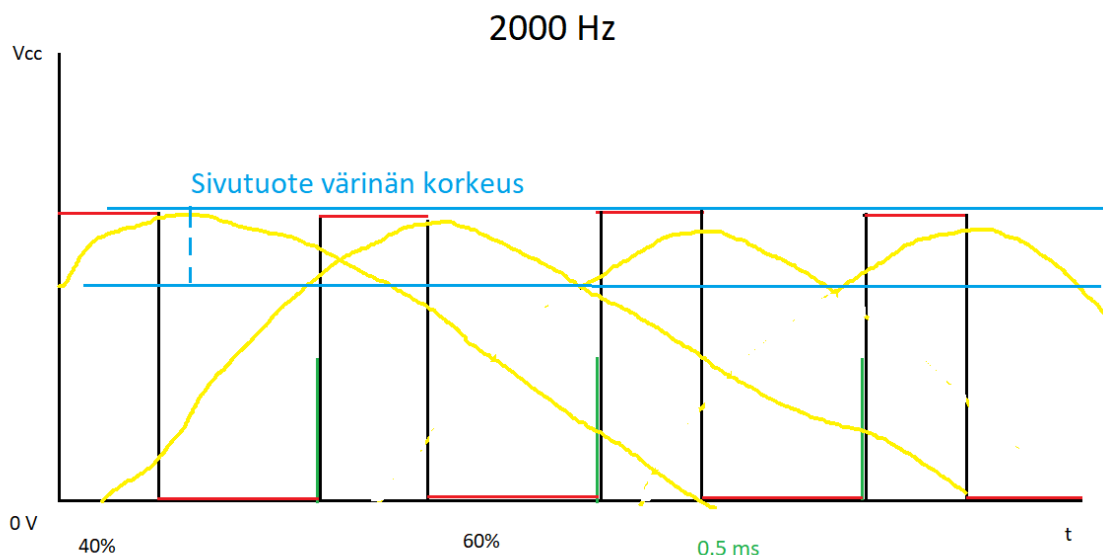
Virta nousee koko työsyklin ajan ja alkaa laskeutumaan heti pulssin loputtua.



Kuva 6. Virtakäyrän käytös

Virran käyttäytymisen takia noin 400 Hz matalammat taajuudet aiheuttavat värinää jo itsessään ja dither-taajuuden käyttö ei ole välttämättä pakollista. Värinä voimistuu, kun lähestytään pulssinleveyden arvoa 50 % ja laskee lähestyessä 100 % arvoa. (HydraForce 2023.)

Jos PWM taajuutta nostetaan reilusti, kelan varaus ei ehdi putoamaan noltaan asti (kuva 7) ja näin ollen sivutuote värinä on vähäisempää tai jopa olematonta. (HydraForce 2023.)



Kuva 7. Havainnollistuskuva ilmiöstä (ei todellinen)

4 Tutkimuksen taustatietoa

4.1 Lähtötilanne

Tutkimuksen idea on selvittää sopivat ohjausarvot sähköisesti esiohjatulle suuntaventtiilille, mikä on tärkeä osa hydraulista puutavaranoistinta, mistä Kesla Oyj:n tuoteperhe valtaosin koostuu.

Puutavaranoistimen ohjaamiseen vaikuttaa monenlaisia muuttujia, kuten nesteen lämpötila, sylinterien ja esiohjauskammioiden geometriset erot ja sekä kuorma. Tässä tutkimuksessa syvennyttään siihen mitä tapahtuu ohjainlaitteiden ja venttiin luistin välillä.

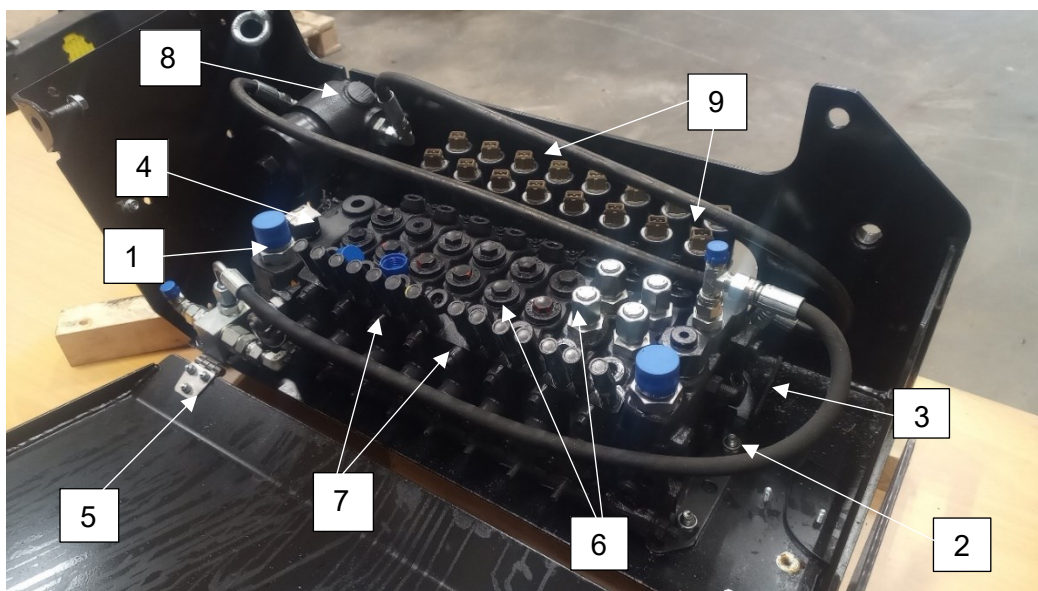
Ongelmana tähän asti on ollut vähäinen tieto siitä, mitä ohjaimen taajuusarvot tulisi olla, jotta laite saataisiin vastaamaan komentoihin mahdollisimman sulavasti ja viiveettömästi.

Koska käytetyt ohjausarvot ovat tähän asti olleet suuntaa antavan informaation mukaisia, tehtävänä on selvittää, voidaanko päästä laitteen hallinnan kannalta parempaan lopputulokseen ohjausarvojen muutoksilla.

Tutkimus toteutetaan käyttäen hydrauliventtiiliä, mikä on osa venttiilipöytä -kokonaisuutta. Venttiilipöytään tehdään tutkimuksen suorittamisen mahdollistavia muutoksia ja lopuksi siihen liitetään logiikkaohjain mihin ajetaan automatiikka ohjelma sekä mahdollisuus käyttää manuaaliohjausta. Testaus menetelmä on ensimmäistä kertaa kokeilussa ja tutkimuksen aikana pohditaan myös, että onko menetelmä toimiva.

4.2 Venttiilipöydän rakenne

Tutkimuksessa käytettävä venttiilipöytä on Parker L90LS (kuva 8). Venttiilipöytä koostuu useasta peräkkäin asennetusta venttiililohkosta, joidenka määrä voi vaihdella tapauskohtaisesti.



Kuva 8. Parker L90LS

1. Tulolinja: pumpulta saapuva hydraulikkaöljy
2. Paluulinja: takasin tankkiin virtaava öljy
3. Esipaineventtiili: Rajoittaa nesteen kulkua ja määrää järjestelmäpaineen, jos pumpulta tuleva paine on liian heikko tai rajoitin liian jäykkä, neste ei liiku järjestelmässä ollenkaan.
4. Päävaro: Mikäli järjestelmäpaine ylittää syystä tai toisesta turvarajan, tämä venttiili laskee öljyt pihalle järjestelmästä.
5. LS anturi: LS eli load-sensing. Järjestelmä käyttää sen verran painetta kuin on tarvis eli pumppu ei tee jatkuvasti töitä 100 % käytöllä vaan säätää painetta kuorman mukaan.

6. Hydraulilähdöt: Näiden letkulähtöjen päihin tulee mekaanista liikettä tekevät hydraulisyliinterit.
7. Lohkokohtaiset paineensäätimet: Eri toiminnot vaativat erimäärän painetta, nämä estävät ei-toivotun paineen nousun lohkossa.
8. Esiohjauksen suodatin: ennen solenoidille menemistä hydraulikkaöljy suodataan vielä kertaalleen. Esiohjaukseen ei saa päästä yhtään kiinteää likaa.
9. PWM-solenoidit: säätävät ohjauspainetta vastaanotettujen komentojen mukaan.

4.3 Venttiilipöydän ohjaus

Keslan laitteissa pulssinleveysmodulaatio tapahtuu PID-säätimen välityksellä. Esimerkiksi kun kahvalta tulee komento, PID ohjain muokkaa pulssin leveyttä sen mukaan. Tämä eroaa lyhyesti tavallisesta PWM-ohjauksesta siten, että säädin seuraa tavoitearvoa ja käyttää erilaisia korjauskertoimia sen ylläpitämiseen.

PID-säätimen parametrit ovat muokattavissa, mutta koska tutkimus keskittyy opinnäytetyön osalta optimaalisen dither-päivitystaajuuden sekä virtaohjauksen päivitystaajuuden etsintään, ohjaimen P ja I arvoihin ei vielä tässä vaiheessa syvennytä (kuva 9).

Tässä tutkimuksessa käytetään ainoastaan "PWM virta Hz", "PWM dirher Hz" sekä "PWM dither määrä" -säätimiä (kuva 9).

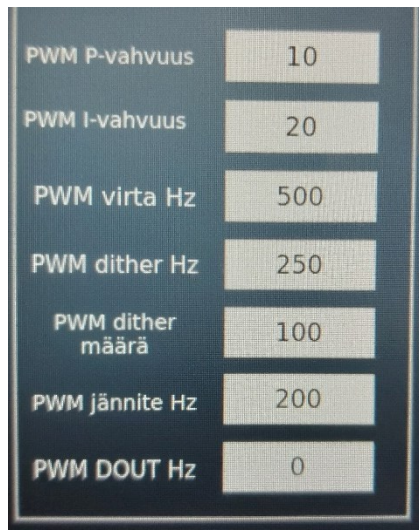
Jänniteohjaus ei ole käytössä vaikkakin sen taajuusarvo ohjaimesta löytyy.

Raportoinnin helpottamiseksi viitataan parametreihin seuraavasti:

PWM virta Hz = PWM

PWM dirher Hz = DTH

PWM dither määrä = AMP (amplitudi)

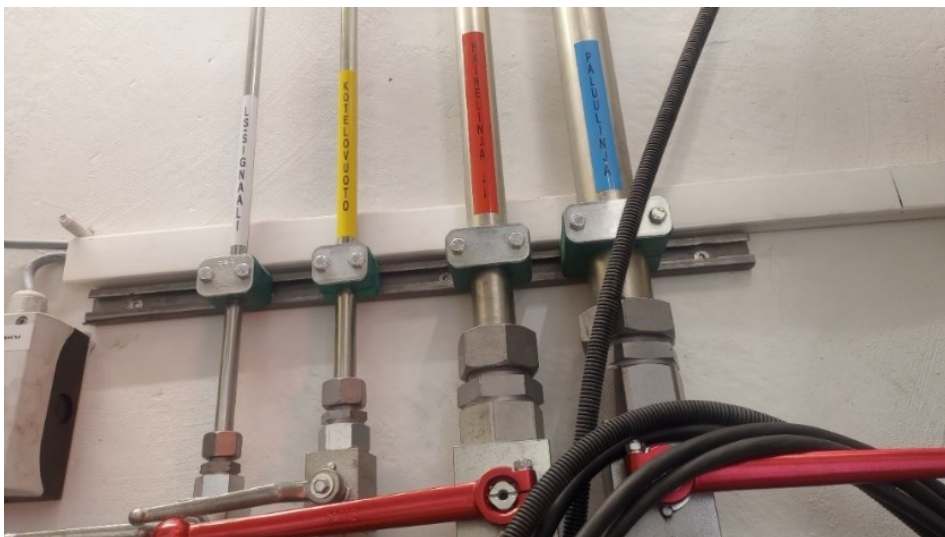


Kuva 9. Parametrien asetus valikko

5 Tutkimuksen valmistelu

5.1 Testiaseman rakennus

Kesla Oyj Joensuun tehtaalta löytyy hydraulikan tutkimuspiste, missä on mahdollista simuloida venttiilin toimintaa turvallisesti sekä ympäristöystävällisesti. Tutkimuspisteen seinästä löytyy samat tulot ja lähdöt kuin esimerkiksi puutavaranostimesta (kuva 10).



Kuva 10. Testipisteen hydraulikka

Venttiilipöytään täytyi tehdä pieniä modifikaatioita, jotta siitä saatiin testaus kelpoinen. Näitä olivat muun muassa letkulähtöjen holkkien vaihtoa yhteensopiviksi seinän lekujen kanssa, karalohkon vaihto karan asema-anturin kanssa yhteensopivaksi sekä ylimääräisten letkulähtöjen tukkiminen teräksisillä tulpilla (kuvat 11-17). Turvallisuussyistä letkusto ripustettiin hallinosturin varaan, jottei letkut, rasitu tai kaada testiasemaa lattialle (kuva 17).



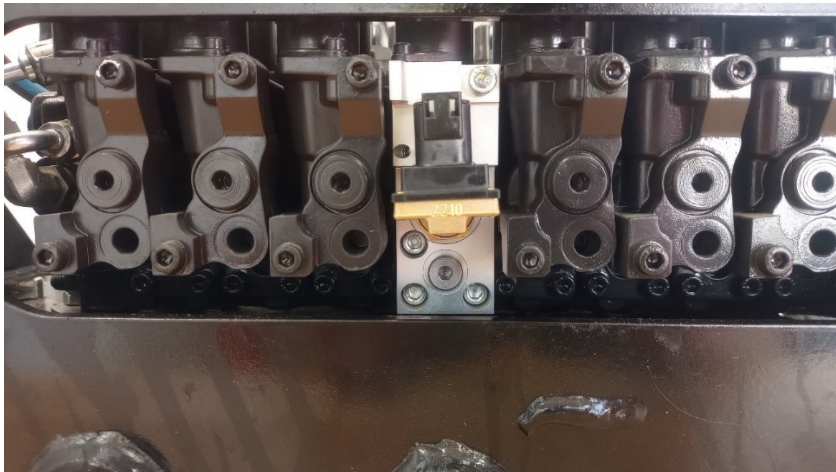
Kuva 11. Terästulppa



Kuva 12. Letkusovittimet



Kuva 13. Karalohko



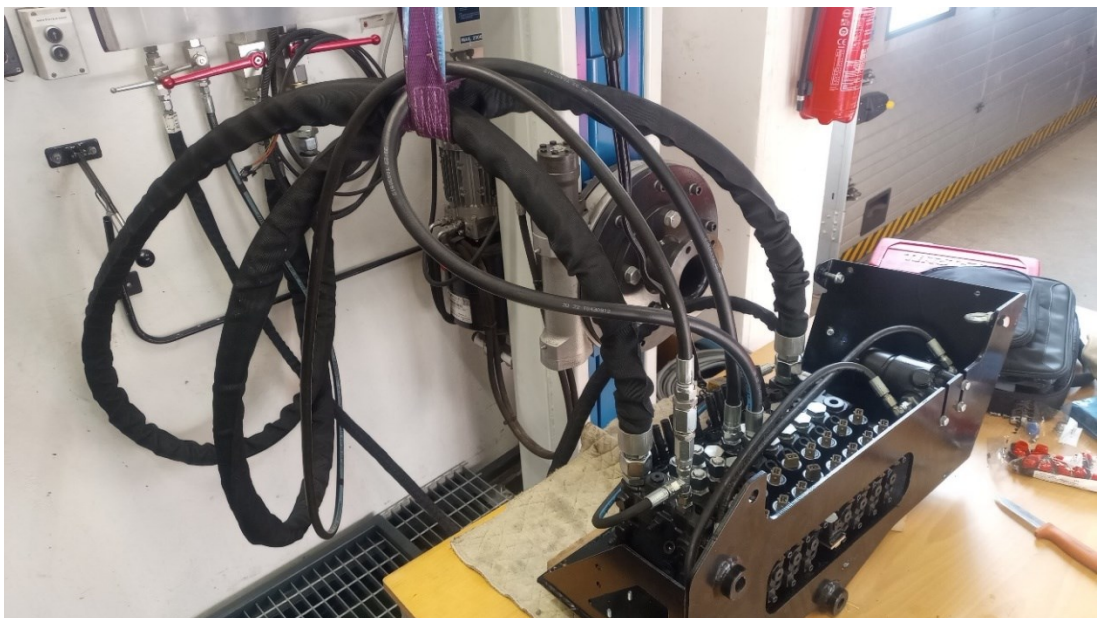
Kuva 14. Karan asema anturi



Kuva 15. Venttiilin alkuperäiset solenoidit



Kuva 16. Kaksi (2) kappaletta muovitulppia (musta) letkulähtöä varten



Kuva 17. Hallinosturin violetti liina

5.2 Testiaseman liittäminen ohjausyksikköön

Testiaseman (kuva 18) osana on Kesla Oyj:n tuotekehityksen kehittämä salkku, mihin on rakennettu nostimen ohjaus kokonaisuudessaan ja sen pääasiallinen tarkoitus on toimia apuvälineenä laitteiden testaus ja esittely tehtävissä sekä opetuskäytössä.

Tässä tutkimuksessa ei tarvita kuin yhtä lähtöä, joten salkun liittäminen venttiilipöytään on melko yksinkertaista. Salkulta tulee vain yksi liitin solenoidille ja salkkuun tulee signaali karan asentoanturilta. Tästä syystä ylimääräiset letkumlähdöt tukittiin.



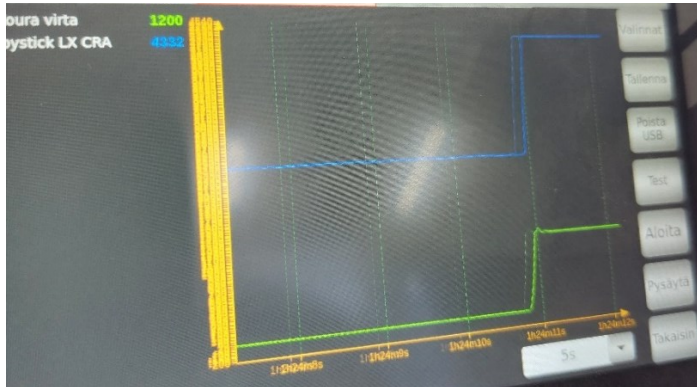
Kuva 18. Testiasema

5.3 Testiaseman määrittäminen

5.3.1 Karan asema-anturi

Kara-anturi ilmoittaa asentonsa jännitelukemalla (ohjaimessa millivoltteina). Jännitelukema on proportionaalinen asentoon nähden, mutta turvallisuussyistä karan liike jää hieman vajaaksi anturin ääriasentoihin nähden, eli karan ollessa ääriasennossa anturi näyttää noin 4.3 V. Anturin skaala on 0–5 V.

Koska ajo tehdään vain yhtä lähtöä käyttäen, kara liikkuu plusliikkeen puolella, oletus jännitelukema on tällöin jotain 2500 mV – 4400 mV väliltä (kuva 19). Vaihtamalla pistoke lohkon toiseen solenoidiin, voidaan ajaa vastaavasti myös miinusliikkeen puolelle. Tällöin karan aseman millivoltilukema laskee, eli kuvio ikään kuin peilautuu näytölle.



Kuva 19. Kara-anturi ajettuna täydellä virralla manuaalisesti päätyyn asti, 4332 mV.

5.3.2 Automaatti ja manuaalijajo

Automaattiohjelman idea on tutkia karan käyttäytymistä virtakäyrään nähden. Automaattijossa karaa ajetaan noin sekunnin mittaisissa jaksoissa vuoron perään kahteen eri asentoon muodostaen kantikasta aaltoliikettä (kuva 20), tällä kyseisellä aaltoliikkeellä ei ole tekemistä PWM kanttiaallon kanssa. Manuaalijajolla puolestaan voidaan tunnustella karan vastaavuutta ja ajaa karaa haluttuun asemaan.

Virtakäyrä (sininen) on ilmoitettu ohjaimessa milliampeereina ja karan asema (vihreä) millivolteina (kuva 20).



Kuva 20. Automaattiajo

5.3.3 Raja-arvot

Paremmen tuloksen vuoksi karan ei tulisi käydä automaattiajon aikana nollassa eikä plus tai miinus -liikkeiden päädyssä asti. Karan ”pohjaaminen” aiheuttaa karan liikettä seuraavassa graafissa muutoksia, joten käyttäytymisen seuraaminen hankaloituu. Tämän vuoksi ajoon on kannattavaa asettaa raja-arvot (kuva 21).

Virtaa solenoidille voidaan laittaa minimissään 300mA ja maksimissaan 1200mA (kuva 21). Virran minimi tarkoittaa käytännössä sitä, kuinka paljon kapulaa tulee painaa ennen kuin solenoidi aloittaa liikkeen. Maksimi virta taas puolestaan määrää, kuinka pitkälle auki solenoidin voi ajaa voi ajaa.

Automaattiajossa solenoidin sauva siirtyy ensin määritetyn minimivirran kohdalle, josta sitten alkaa nousemaan ja laskemaan vuoron perään ohjelman mukaisesti määritettyihin raja arvoihin (kuva 20).



Kuva 21. Raja-arvot

Ajo on määritetty lähdölle "koura kiinni", joten "koura auki" voidaan jättää oletusarvoille (kuva 21). Raja-arvoina 400 mA ja 900 mA toimi parhaiten.

5.4 Parametrien asettaminen ja koevedosten tallennus

Taajuus parametrien muuttamiseen ohjaimella liittyy sääntöjä. Jänniteohjauksen päivitystaajuuden tulee olla jaollinen dither-taajuuden kanssa parillisella numerolla.

Esimerkiksi:

Jänniteohjaus 600 Hz

Dither 100 Hz

OK

Jänniteohjaus 600 Hz

Dither 200 Hz

EI OK

Lisäksi on huomioitava, että ohjain ei hyväksy desimaalilukuja ja että **ohjaimen taajuusalue on 0–2 kHz**. Mikäli näitä sääntöjä ei noudateta, ohjain ei toteuta käskyjä.

Mittauksen tekeminen tapahtuu käynnistämällä automaattiajo asetetuilla arvoilla. Graafi pysäytetään ja mittaus tallennetaan muistitikulle.

6 Tutkimukset ja ilmiöt

6.1 Mittaus I: matalimmat käyttöarvot

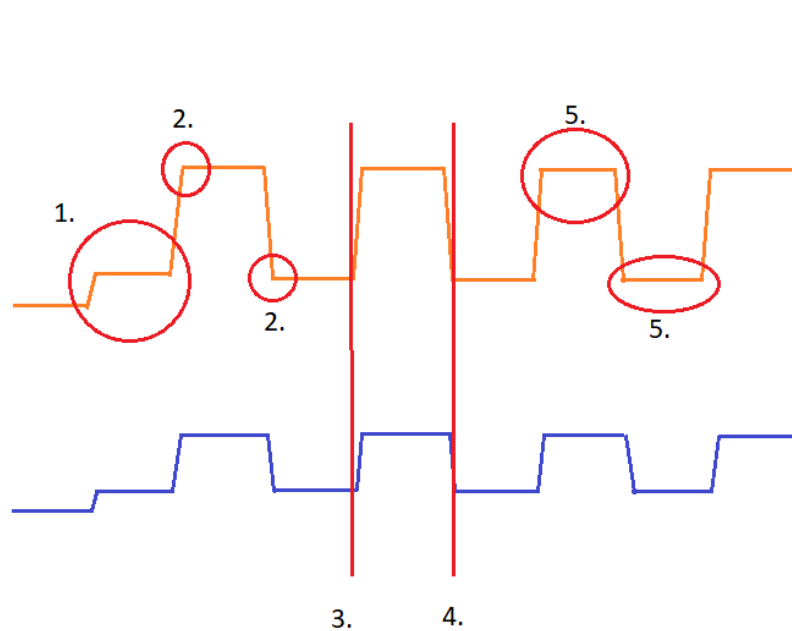
Nämä tutkimukset alkoivat syöttämällä ohjaimen mahdollisimman pienet mutta kutakuinkin toimivat taajuus arvot PWM:lle ja ditherille, amplitudin jätin vielä lähtöarvolle 50 ‰, koska sen suositellaan olevan 0–100 ‰ (kuva 22). Tutkimus eteni nostamalla vuorotellen sekä PWM että dither-taajuuksia.



Kuva 22. PWM 80 Hz, DTH 20 Hz, AMP 50

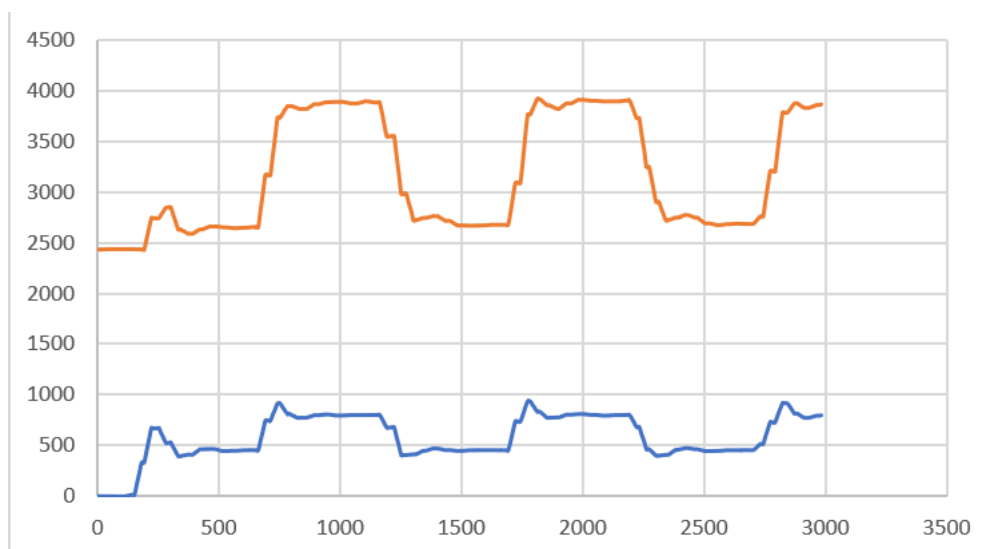
Ohjaimella voi tallentaa kuvaajia TRACE-tiedostona. Käytössäni oleva Microsoft Excel ei tue tätä tiedostomuotoa, joten sain avukseni tutkimusta varten tehdyn Python C -koodin, millä TRACE-tiedosto saatiin muutettua Windows tiedostoksi. Kuvaajan luominen tapahtui noutamalla tämä tiedosto Excelliin.

Kuvaajasta on pyrkimys erottaa muuttujia. Havainnollistuskuva automaattiajon ideaalitalanteesta (kuva 23). Oranssi indikoi karan asemaa ja sininen virta-käyrää.

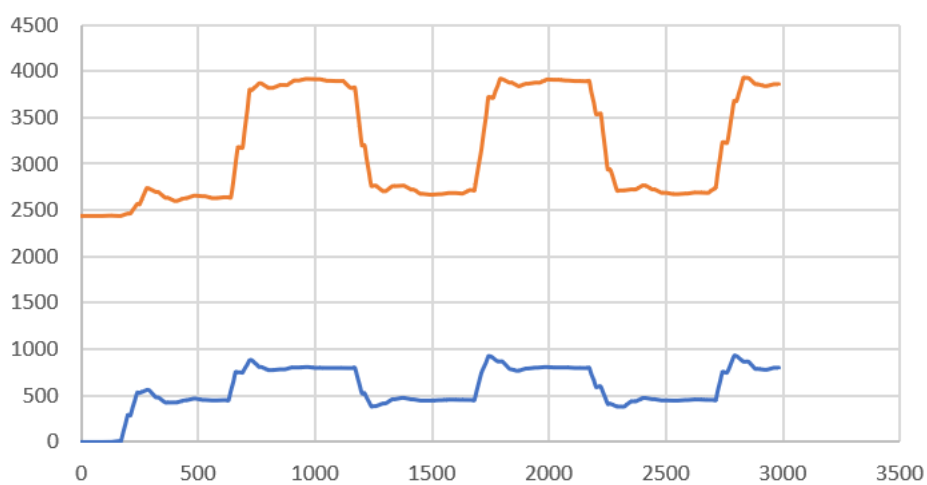


Kuva 23.

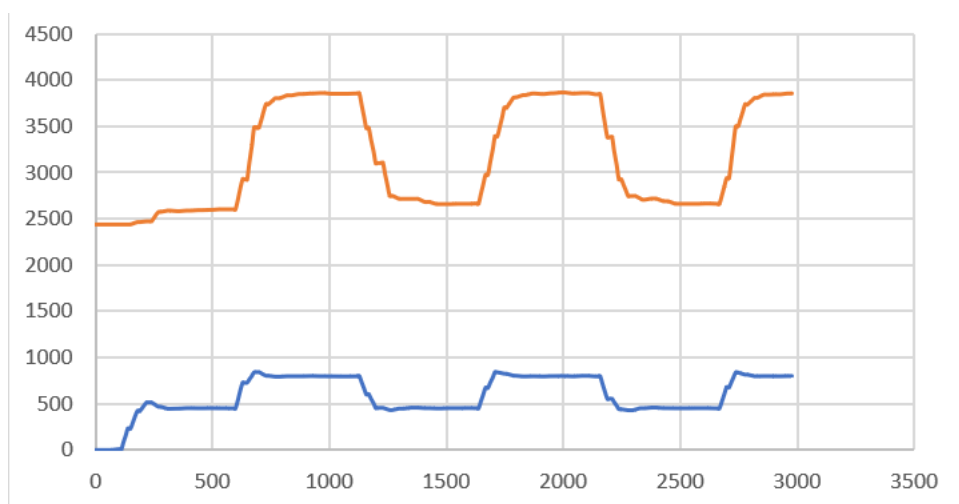
1. Nosto matalammalle pitotasolle: Automaattiohjelmaan kuuluu, että kara napaataan keskitysjousta ohjauspaineen varaan. Jos tämä porras ei piirry graafille, kara ei todennäköisesti liiku kovinkaan sulavasti.
2. Nosto korkeammalle pitotasolle. Jos tässä on mutkaa, niin silloin kara laahaa perässä (hystereesi), vastaava ilmiö laskiessa matalammalle pitotasolle.
3. Karan reagointi syötettyyn virtaan. Jos virta sekä karan asema on melkein samassa kohdassa, kara reagoi ajallaan.
4. Hieman samalla tavoin kohdan kolme (3) kanssa tämä kertoo, ehtiikö kara puolestaan tulemaan ajallaan takaisin matalammalle pitotasolle.
5. Korkean ja matalan virran pito. Jos näissä on nousevaa ramppia (korkealta matalammalle laskiessa laskevaa) on karassa silloin hystereesiä. Jos ramppi laskeutuu (matalammalla tasolla nousee), tällöin kara yliampuu.



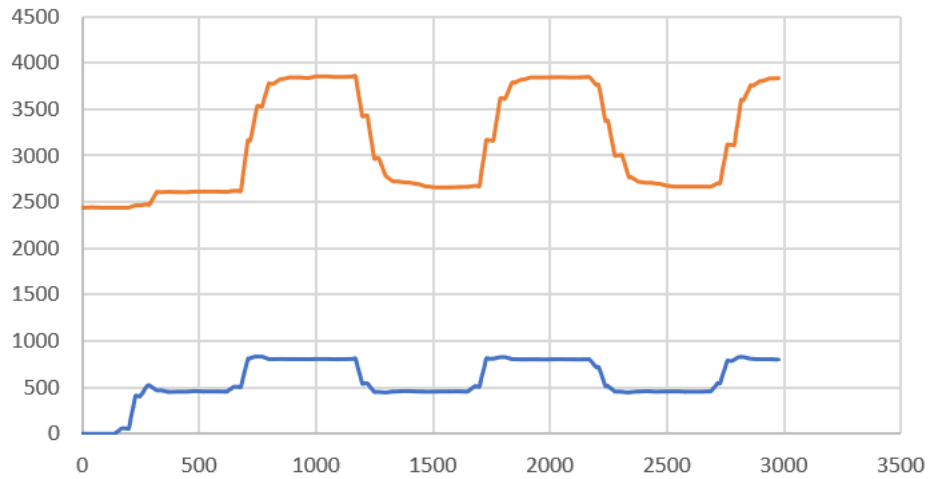
Kuvio 1. PWM 200 Hz / DTH 50 Hz



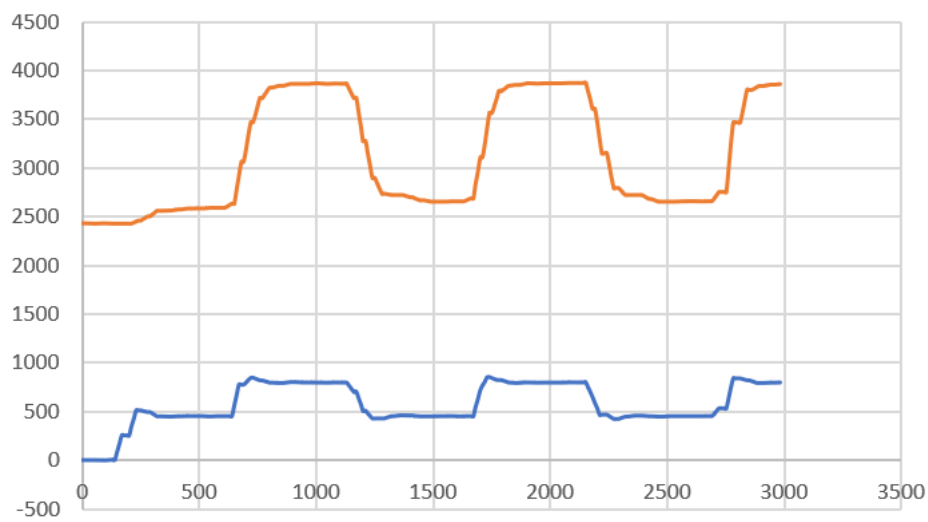
Kuvio 2. PWM 200 Hz / DTH 100 Hz



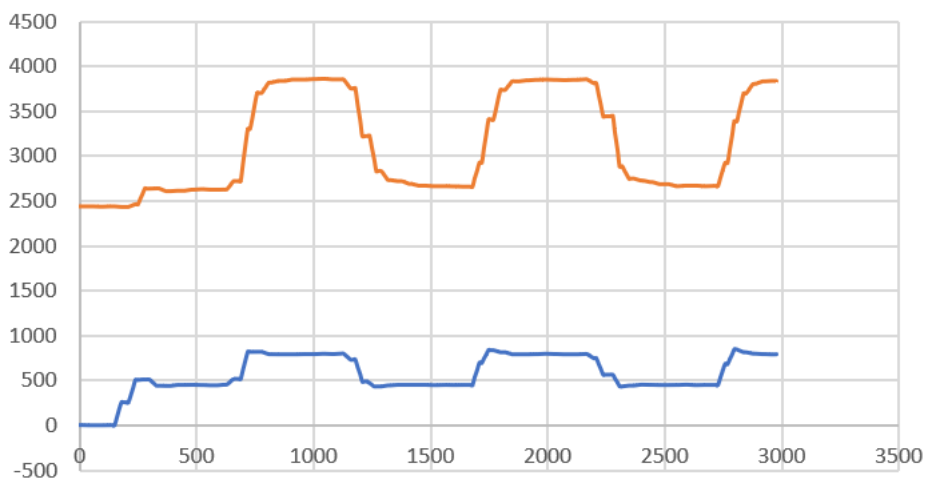
Kuvio 3. PWM 360 Hz / DTH 90 Hz



Kuvio 4. PWM 360 Hz / DTH 180 Hz



Kuvio 5. PWM 320 Hz / DTH 80 Hz



Kuvio 6. PWM 320 / DTH 160 Hz

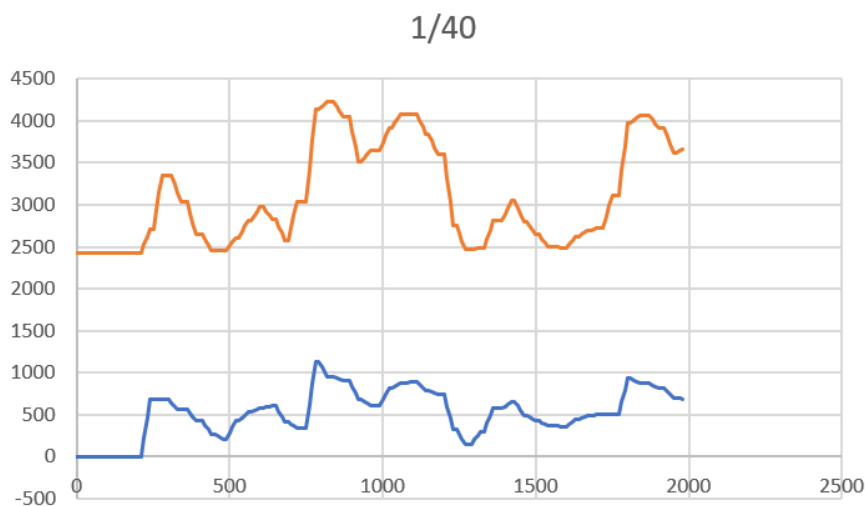
6.2 Mittaus I tulokset ja johtopäätökset

PWM koevedoksista sai selville sen, että dither ei toimi vielä 50 Hz kohdalla, eikä PWM toimi vielä 200 Hz kohdalla. Jos verrataan näitä tallennettuja koevedoksia, selvästi muutosta tapahtuu kolmannella vedolla (kuvio 3), missä PWM 360 Hz ja dither 90 Hz.

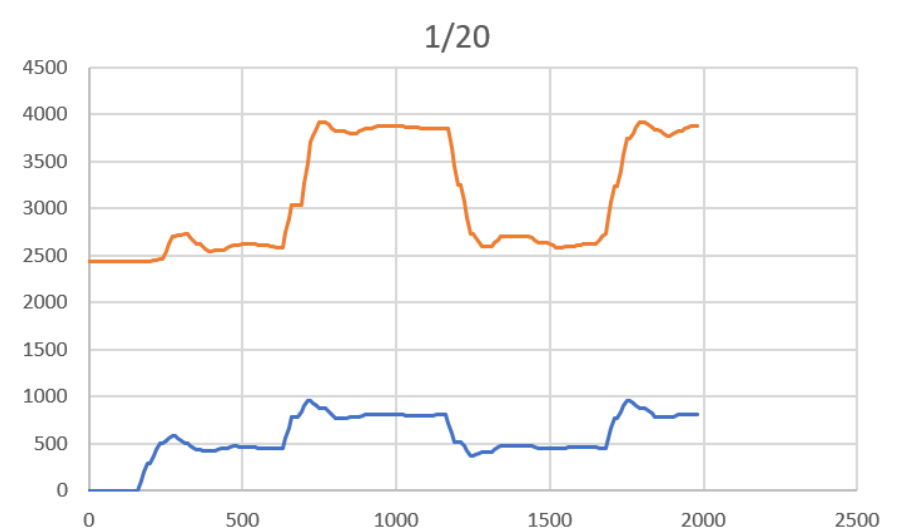
Nyt käyrästä pystytään jo hahmottamaan hystereesi. Hystereesi ilmenee laa haamisena liikkeen loppupäässä. Virtakäyrä tasoittuu ennen kuin kara saavuttaa asemansa.

6.3 Mittaus II: dither

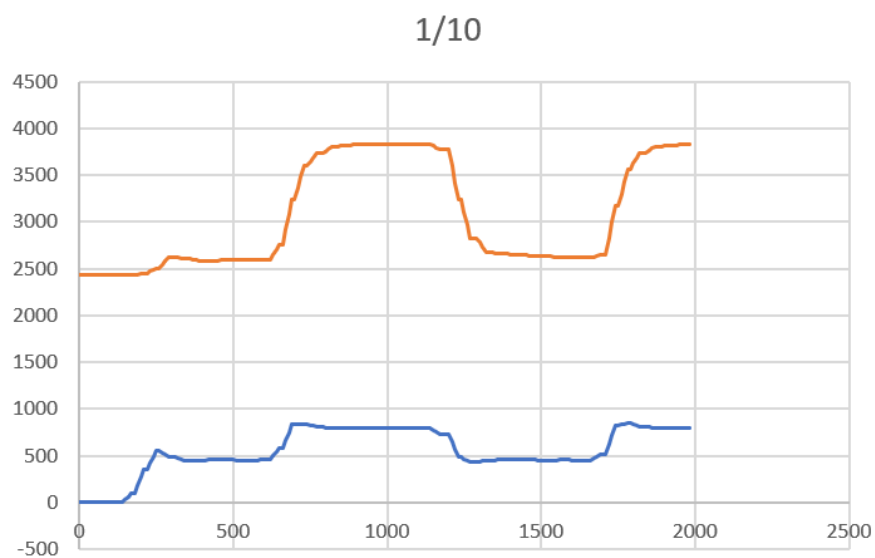
PWM päivitystaajuus näissä mittauksissa on kiinteä 1000Hz ja amplitudi edelleen 50%. PWM taajuuden ollessa 1000 Hz voidaan kokeilla montaa erilaista parillisella numerolla jaollista dither -taajuus vaihtoehtoa. Kaavion otsikkona on jaollisuus indikaattori, esimerkiksi dither-taajuus 1/8 PWM-taajuudesta.



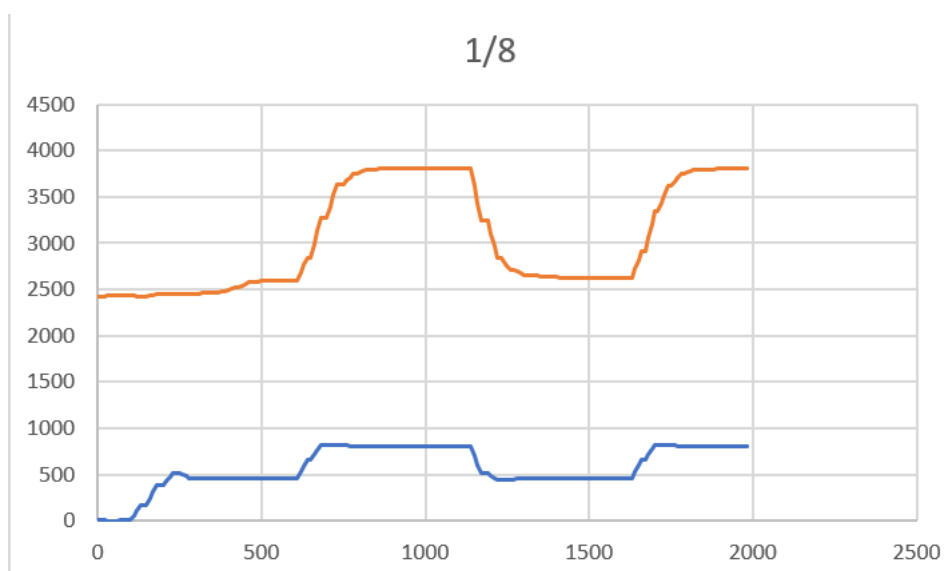
Kuvio 7. PWM 1000Hz / DTH 25 Hz



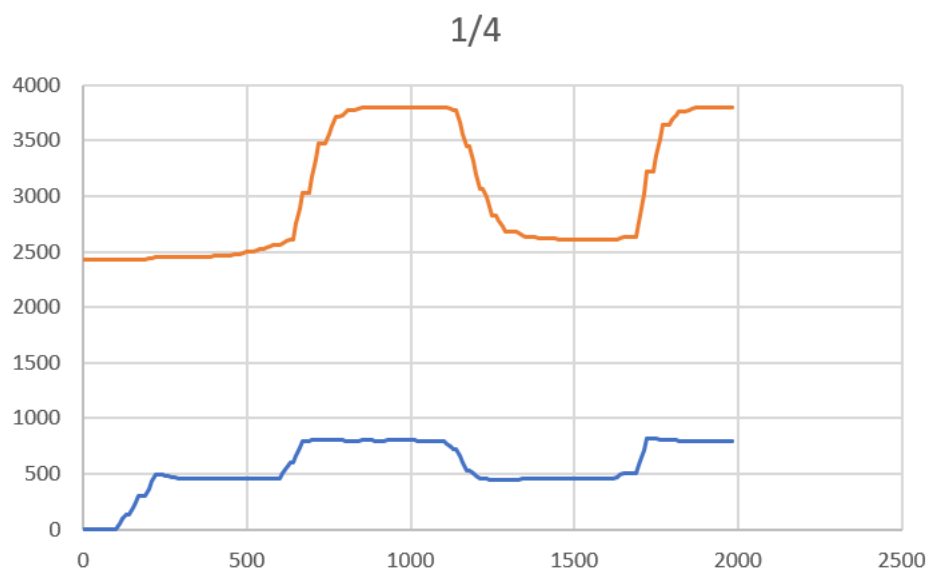
Kuvio 8. PWM 1000 Hz / DTH 50 Hz



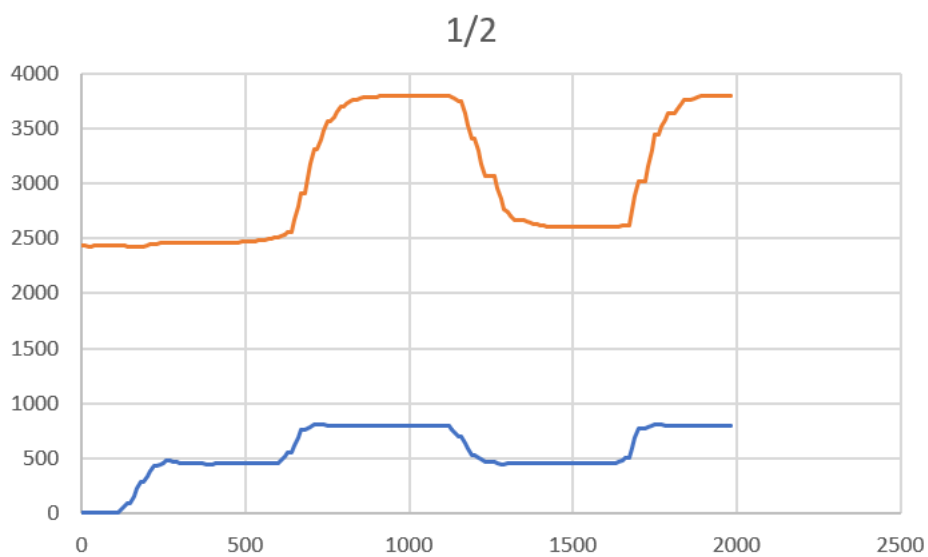
Kuvio 9. PWM 1000 Hz / DTH 100 Hz



Kuvio 10. PWM 1000 Hz / DTH 125 Hz



Kuvio 11. PWM 1000 Hz / DTH 250 Hz



Kuvio 12. PWM 1000 Hz / DTH 500 Hz

6.4 Mittaus II tulokset ja johtopäätökset

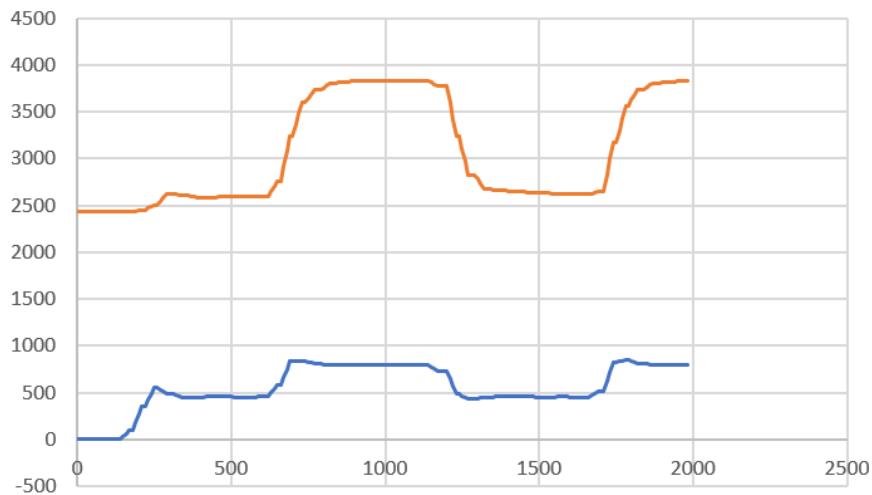
Vedoksen perusteella ditherin nostamisella ei ole enää kovin merkittävää vaikutusta 100 Hz jälkeen. Mitä korkeammalle mennään, esimerkiksi 200 Hz yli, vaikutus heikkenee ja kara alkaa laahaamaan perässä.

Automaattiajon alussa kara nousee matalamman virtatason kohdalle, tämä toteutuu selvästi parhaiten 100 Hz kohdalla (kuvio 9) ja vaikutus on päällä myös 125 Hz taajuudella (kuvio 10).

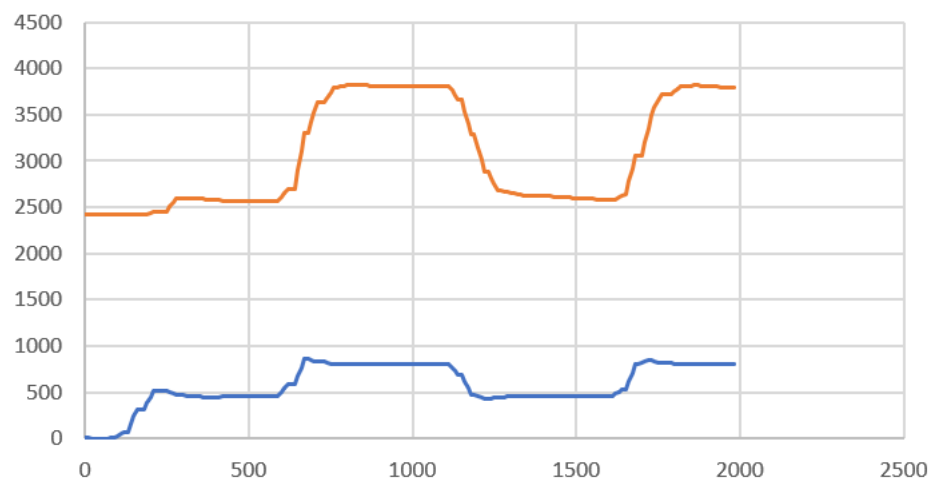
6.5 Käyttöjännitteen vaihto

Kävi ilmi, että venttiilipöytä oli muutettu traktorikäyttöön. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että solenoidit ovat vaihdettu 12 voltisiin L90LS alkuperäisten 24 voltisten tilalle. Tähän asti solenoideille on annettu 24 voltia.

Esimerkki käyttöjännitteen vaihdon vaikutuksesta. PWM taajuus seuraavissa tallenteissa (kuviot 9. ja 13) on 1000 Hz, dither 100 Hz ja amplitudi 50.



Kuvio 9. PWM 1000 Hz | dither 100 Hz | AMP 50 % | 24 V

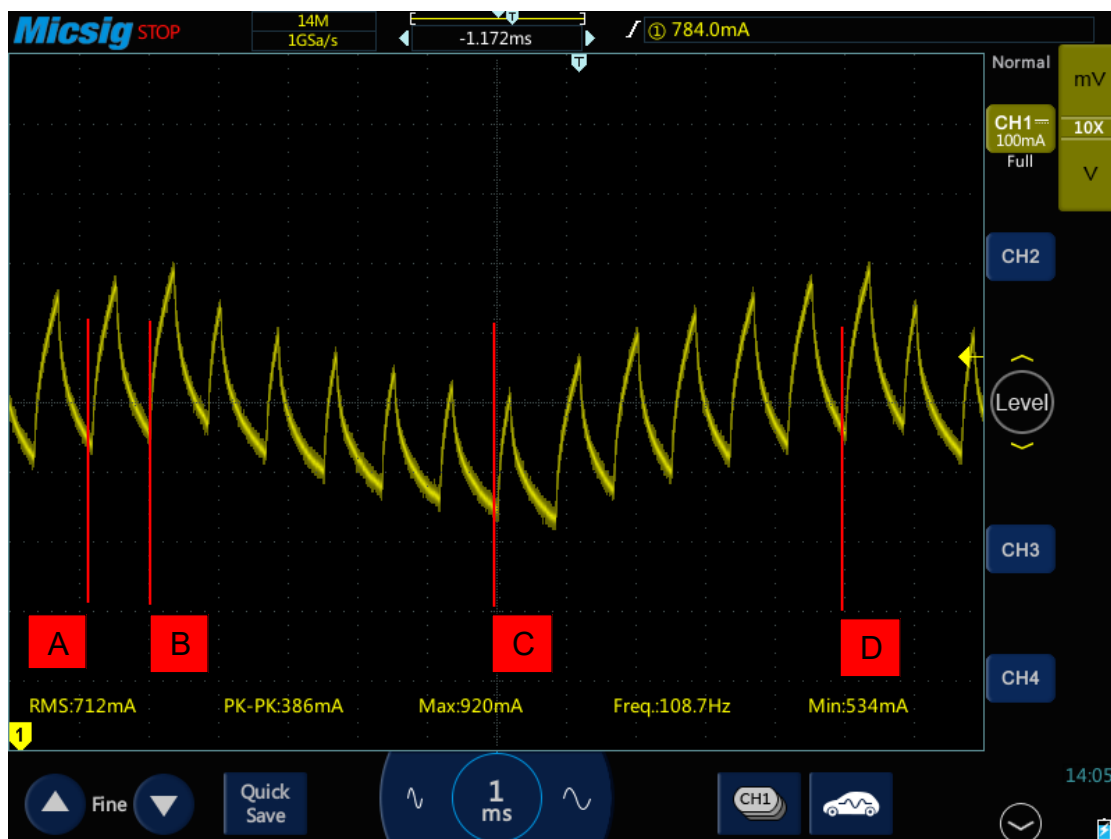


Kuvio 13. PWM 1000 Hz | dither 100 Hz | AMP 50 % | 12 V

Jännitteen vaihdolla ei ollut järkyttävän suurta vaikutusta, todennäköisesti tähän on syynä PI-säädin mikä seuraa tavoitearvoa. Suuremmalla jännitteellä tapahtuu hiukan enemmän hystereesiä. Jännite vaihto mittauksia tehty useampi, mutta ero kaikissa minimaalinen, eli yksi kappale esimerkkejä riittää (kuviot 9 ja 13). Voisi olettaa, että tähänastiset mittaukset ovat kuitenkin suuntaa antavia. Tästä huolimatta kaikki testit ovat jatkossa 12 voltin jännitteellä.

6.6 Solenoidin induktiivisuus

Sähköjä uudelleen virtitellessä oli mahdollisuus päästä kokeilemaan oskilloskooppia. Oskilloskoopilla selvisi, että dither tässä laitteessa on aaltoilevan tyyppistä (kuva 24).

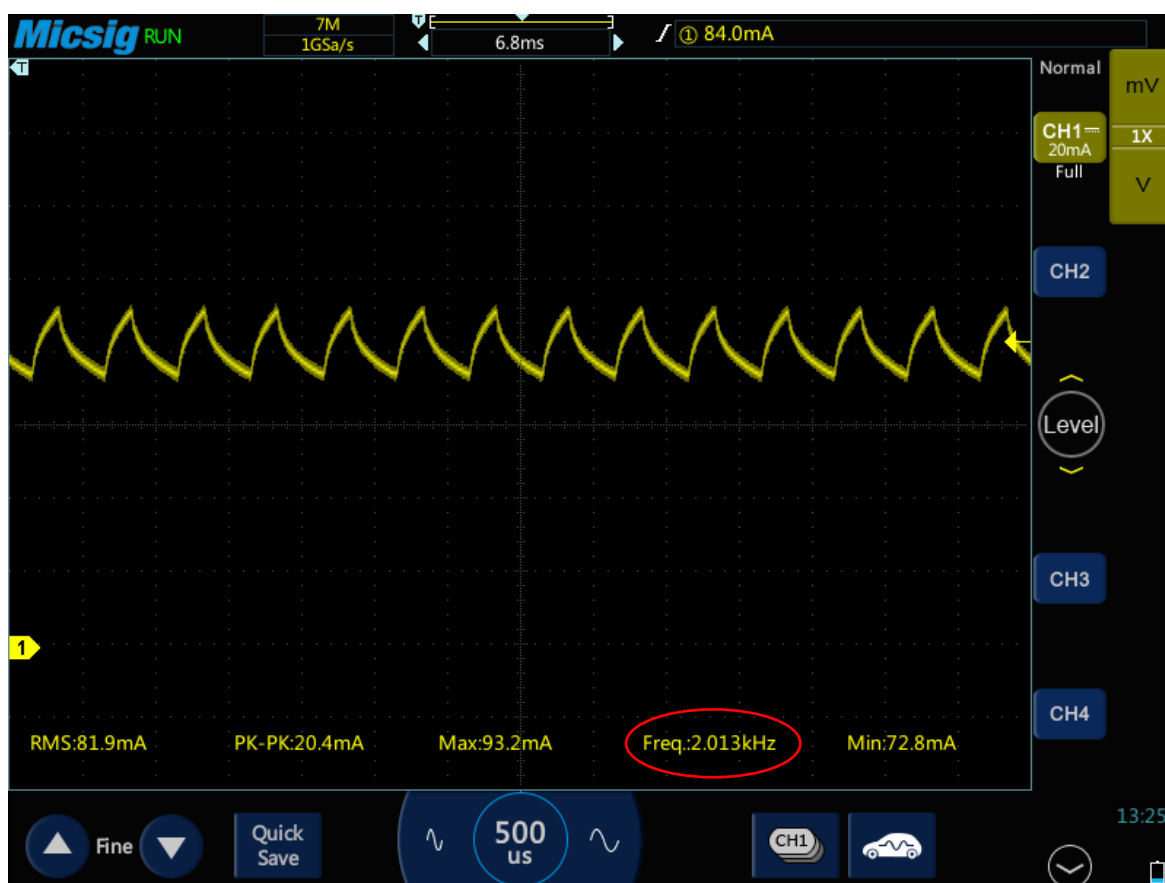


Kuva 24. Aaltoileva dither.

Jakson erottaa oskilloskooppikuvasta keltaisena ylös-alas-liikkeenä (kuva 24: A-B). Dither-värähtelyn vaikutus on vuorollaan nousevaa ja laskevaa ja tässä

tilanteessa sen vaikutus kestää kuuden (6) jakson ajan (kuva 24: B-C, C-D). Tässä tilanteessa dither taajuus todennäköisesti 60 Hz ja PWM taajuus 120 Hz, vaikka kuvassa se hetkellisesti onkin 108 Hz. Jaksoon pituus on näin ollen 8.3 ms.

Kokeilulla saatiin myös varmuus siitä, että solenoidi pysyy mukana koko ohjaimen taajuus alueen, eli 2000 Hz (PWM) asti (kuva 25). Sivutuotevärinä tapahtuu vielä 2000 Hz alueella, joten siltä ei voida välttyä tällä järjestelmällä.



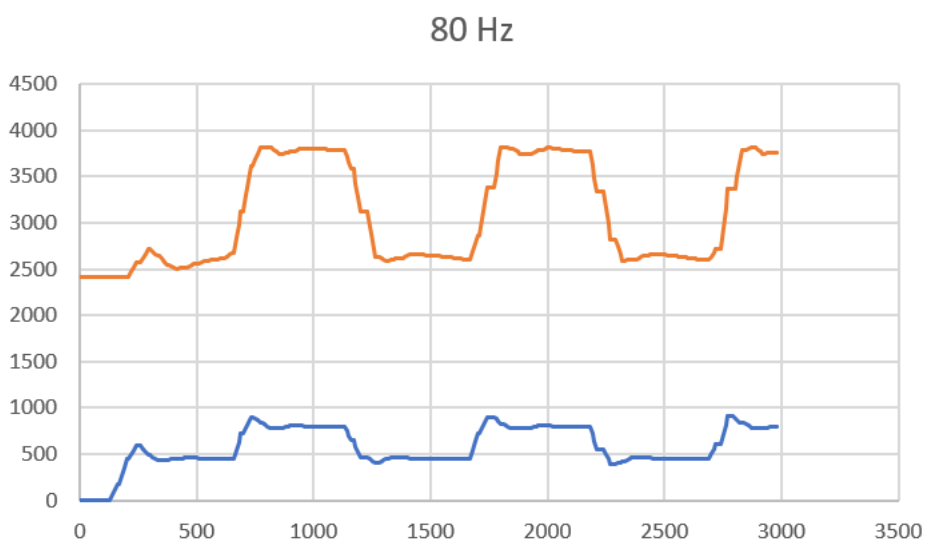
Kuva 25. Virtakäyrän käytös 2 kHz.

6.7 Mittaus III

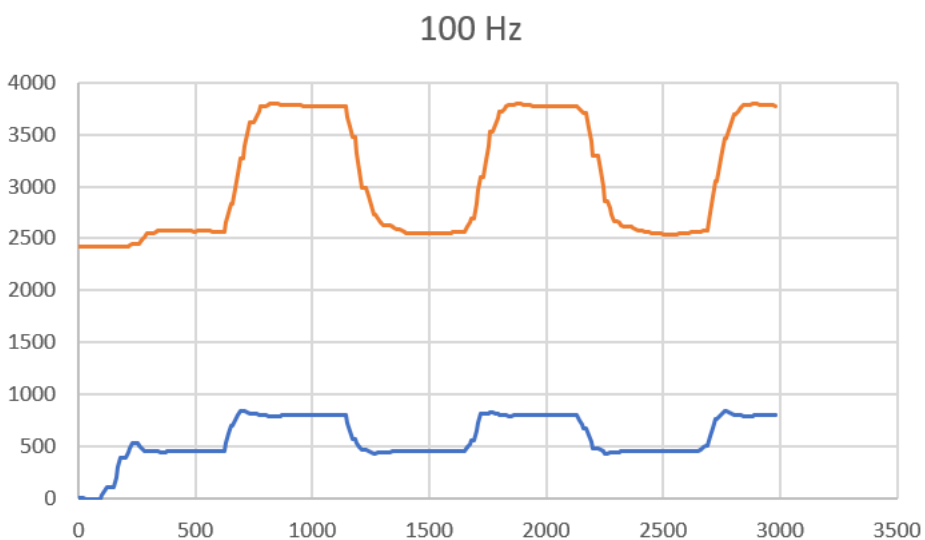
Testissä käytetään eri suuruisia PWM taajuuksia ja kokeillaan kattavasti dither taajuuksia, mitkä ovat lähellä edellisten vedosten perusteella määritettyä hyvää toiminta-alueetta.

Tavoite saada selville onko PWM-taajuuden muutoksella vaikutusta dither-taajuuteen, sekä mahdollisesti saada selville paras dither taajuus.

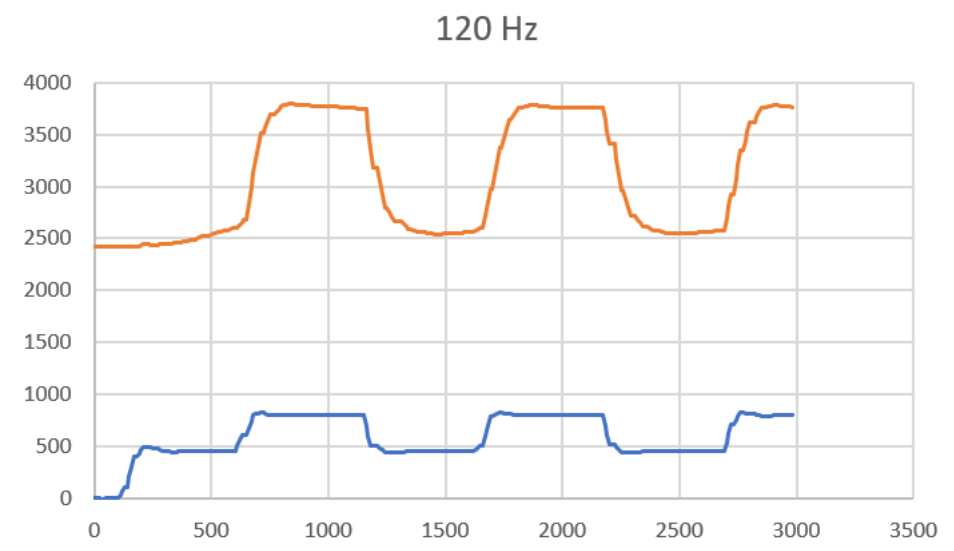
Tutkimus tehdään käyttäen vuorollaan seitsemää (7) eri PWM-taajuutta ja näille taajuusarvoille on määrätty ohjaimen toiminta-alueelle sattuvat sääntöjä noudattavat dither arvot. Amplitudi on näissäkin 50 %. Kaavion otsikko on dither päivitystaajuus.



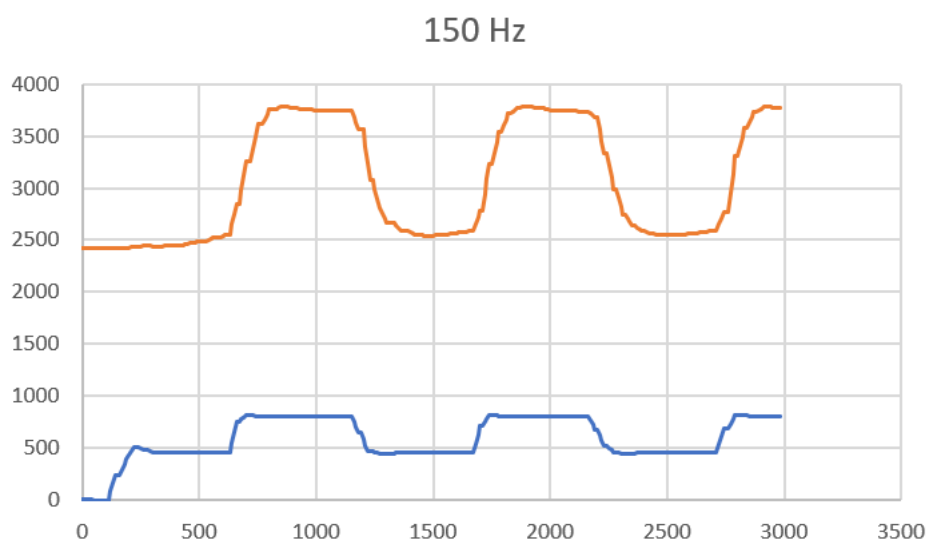
Kuvio 14. PWM 1200 Hz



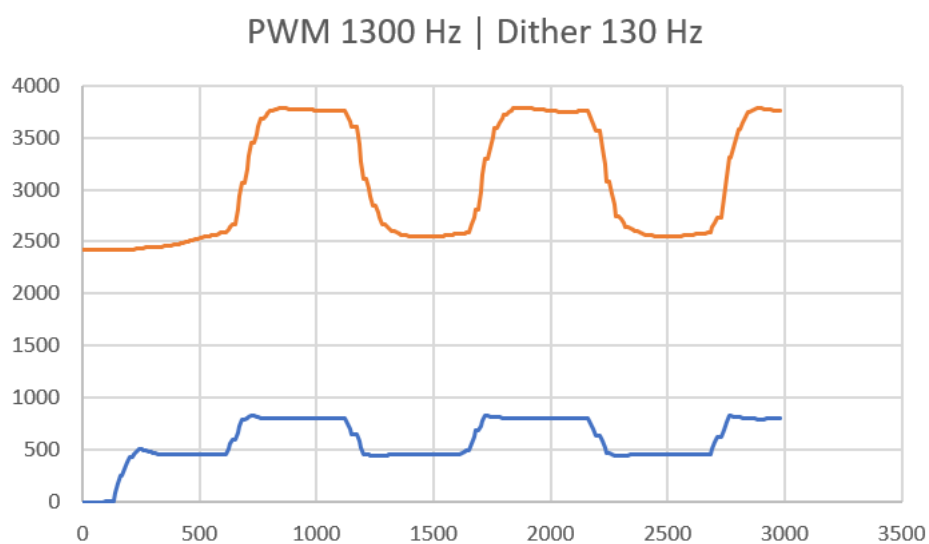
Kuvio 15. PWM 1200 Hz



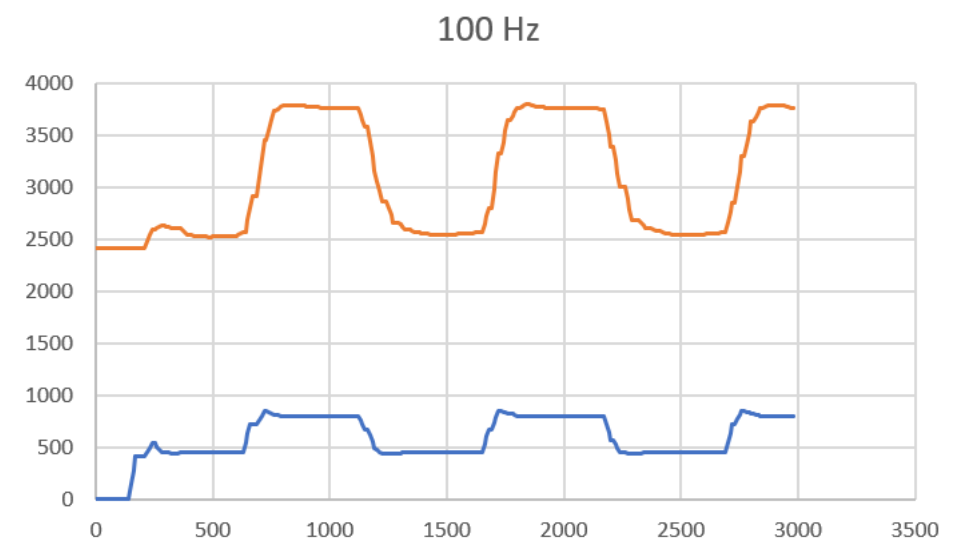
Kuvio 16. PWM 1200 Hz



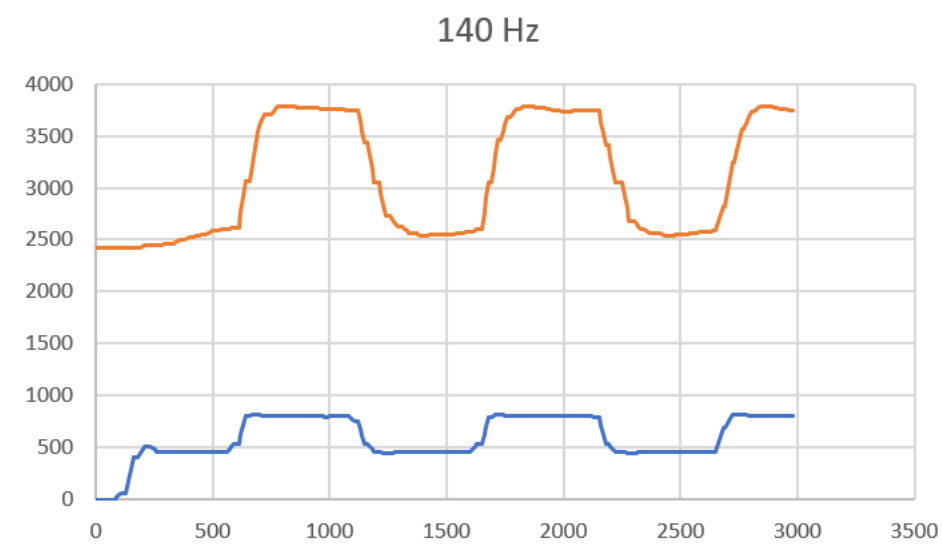
Kuvio 17. PWM 1200 Hz



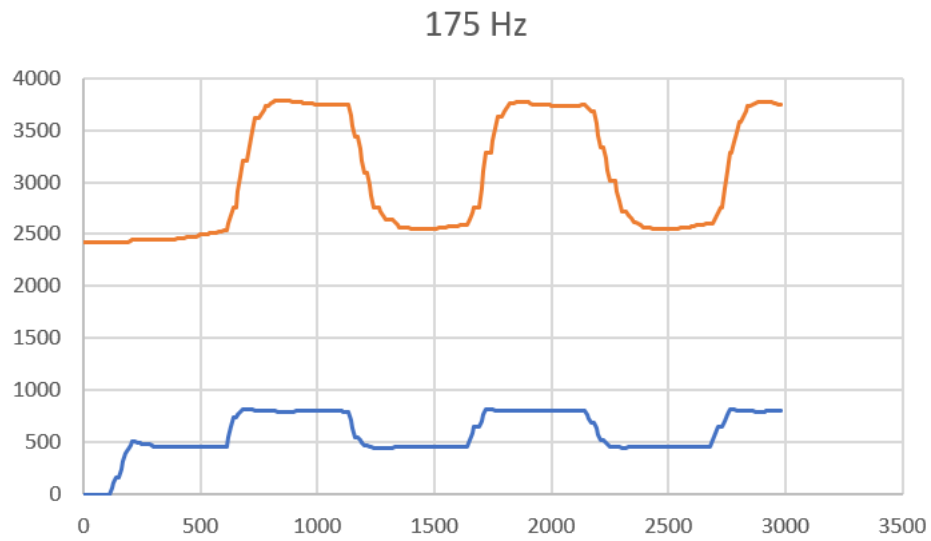
Kuvio 18. PWM 1300 Hz



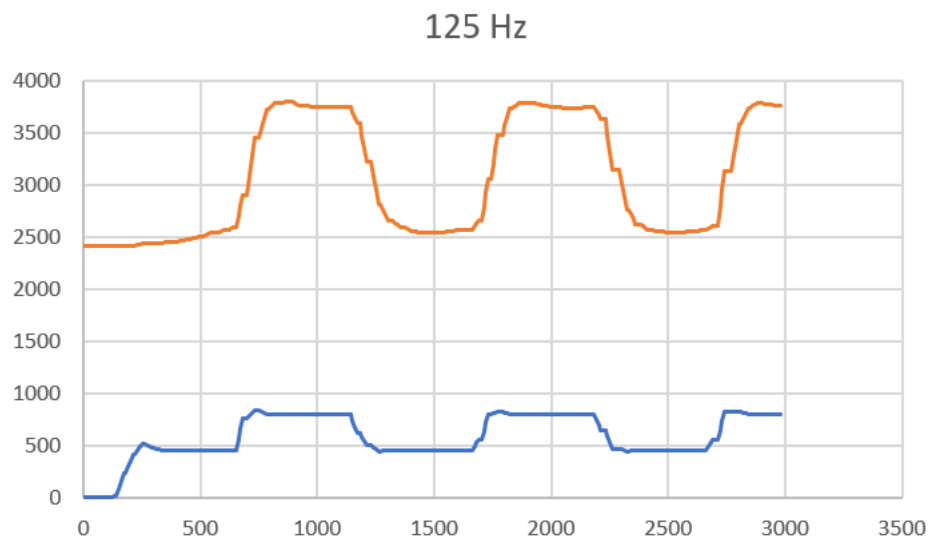
Kuvio 19. PWM 1400 Hz



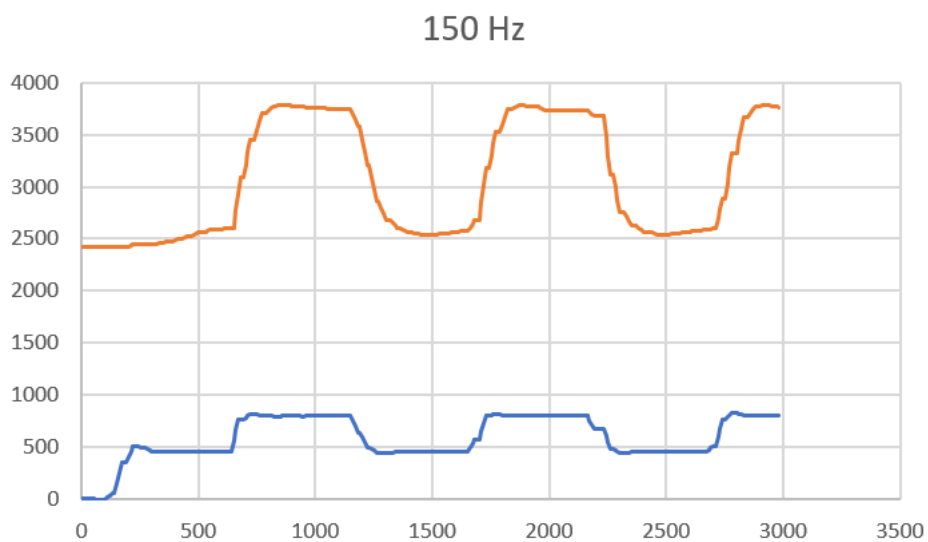
Kuvio 20. PWM 1400 Hz



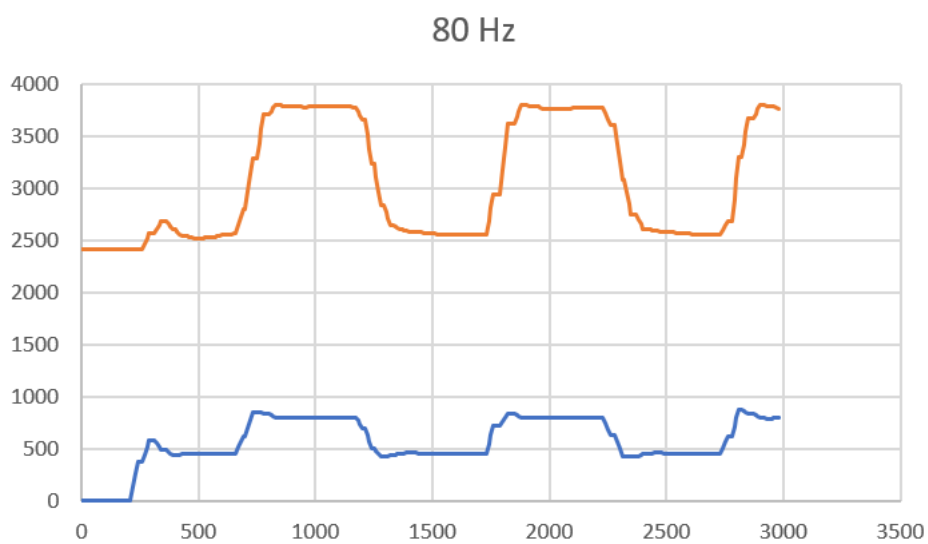
Kuvio 21. PWM 1400 Hz



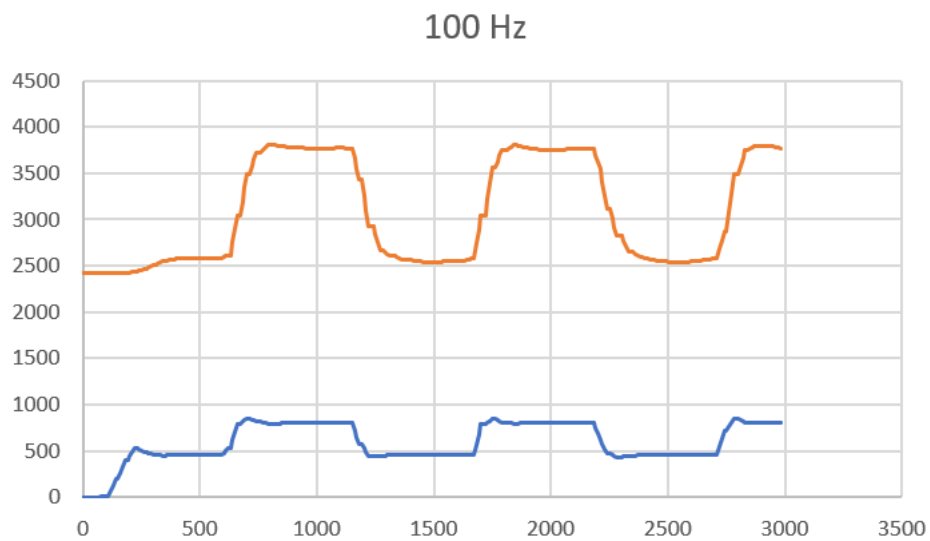
Kuvio 22. PWM 1500 Hz



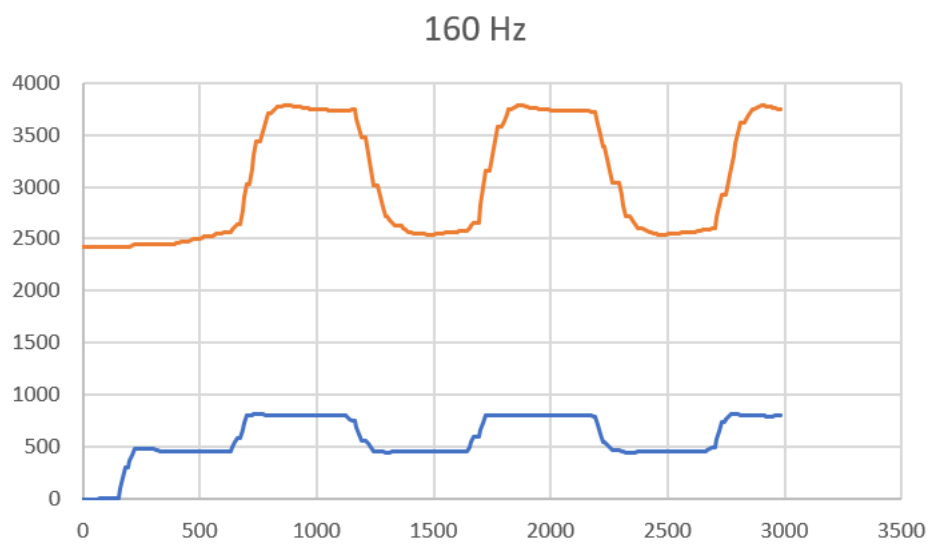
Kuvio 23. PWM 1500 Hz



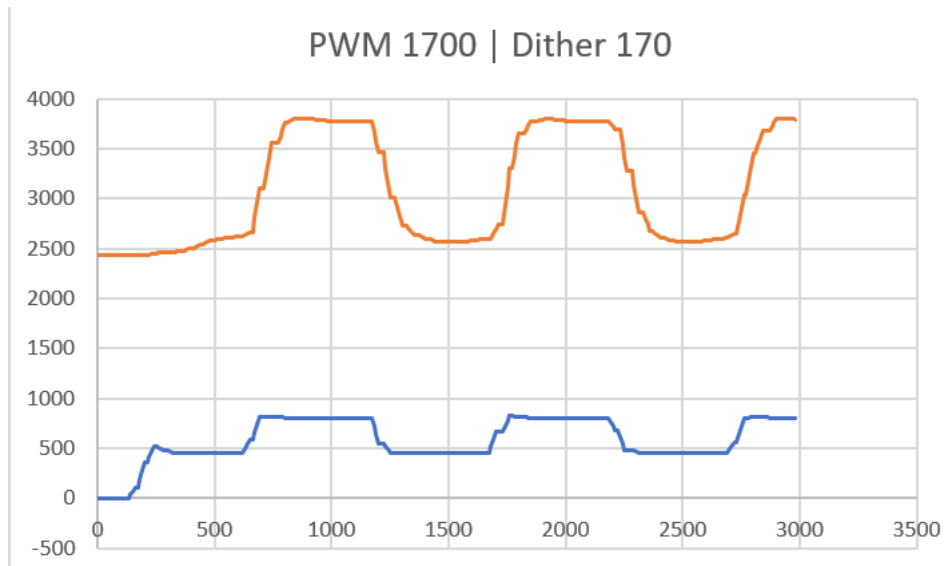
Kuvio 23. PWM 1600 Hz



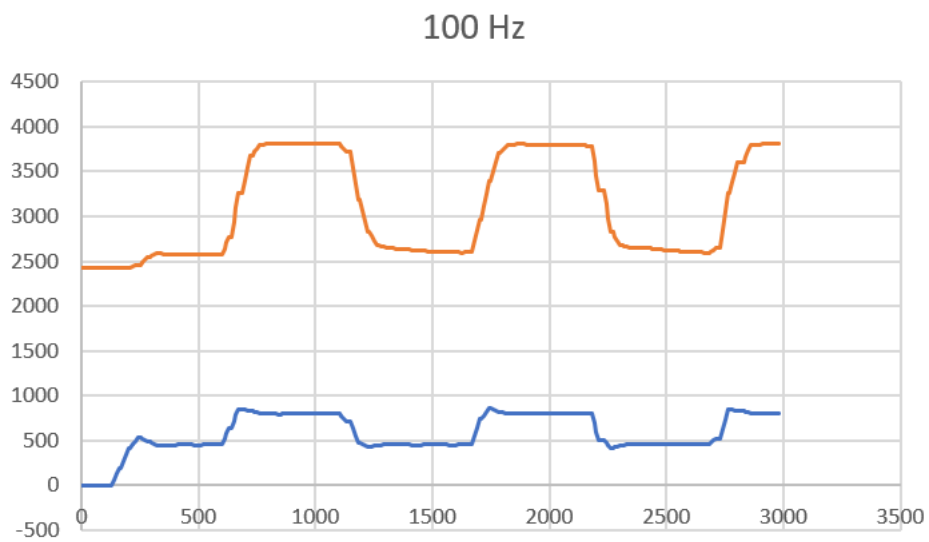
Kuvio 24. PWM 1600 Hz



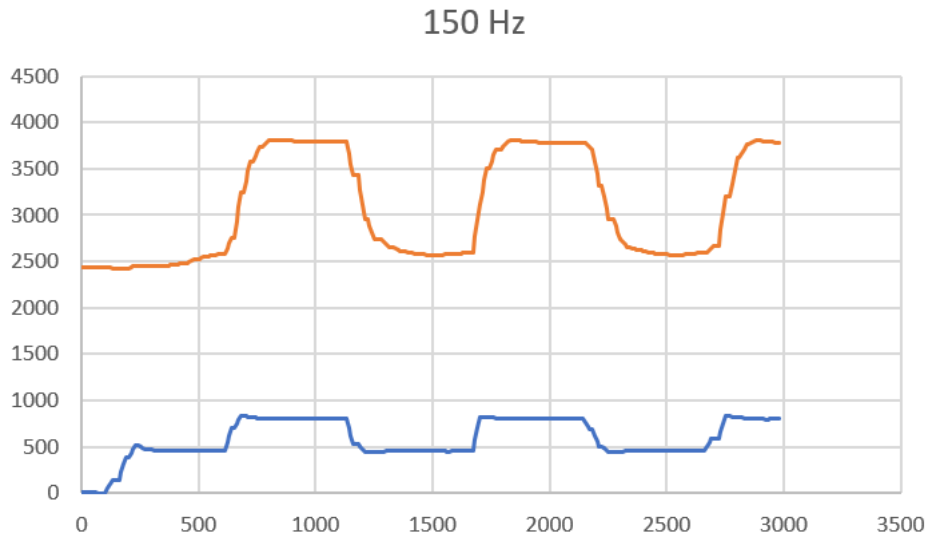
Kuvio 25. PWM 1600 Hz



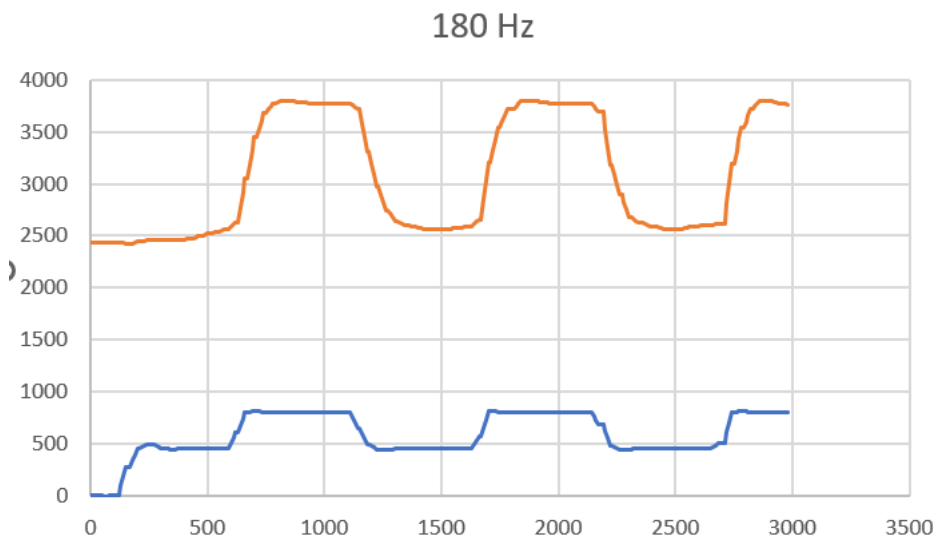
Kuvio 26. PWM 1700 Hz



Kuvio 27. PWM 1800 Hz



Kuvio 28. PWM 1800 Hz



Kuvio 29. PWM 1800 Hz

6.8 Mittaus III tulokset ja johtopäätökset

Riippumatta PWM-taajuuden arvosta näissä vedoksissa paras on 100 Hz dit-heriä, eli todettakoon, että dither ei ole riippuvainen PWM taajuudesta ja sen paras käyttöarvo 5 % amplitudilla on 100Hz alueella.

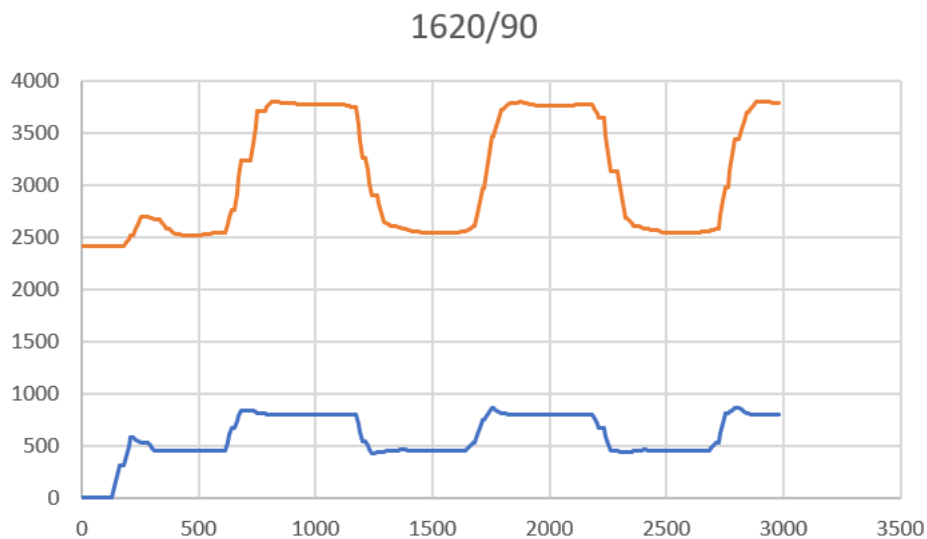
6.9 Mittaukset IV: tarkennus

Tarkennus mittaukset, missä edellisten tulosten perusteella haetaan mahdollisimman optimaalisia parametrejä. Koska dither-taajuusalue on skaalaltaan pienempi kuin PWM-taajuus ja nämä eivät ole riippuvaisia toisistaan tarkennetaan ensin dither. Kun dither arvo on selvillä, vaihtoehdot optimaalisimman PWM-taajuuden löytämiseen vähenee ja tutkimus helpottuu.

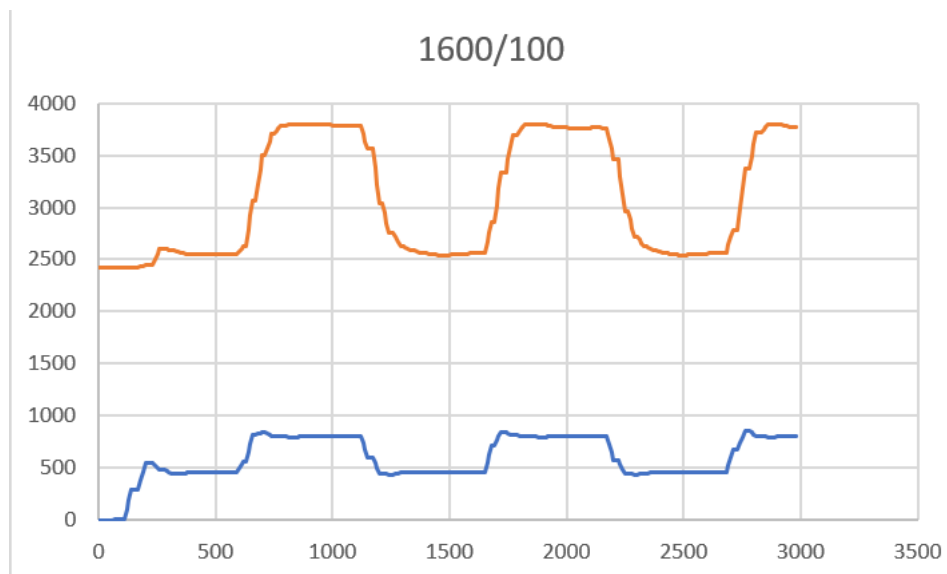
6.9.1 Dither tarkennus graafit

Lähestymistapa on kokeilla dither -taajuutta nostamalla sitä 10 Hz edeltävään nähden, PWM arvo on jaollisuus sääntöjen vuoksi oltava joka kerta eri, mutta pyrkimys pitää PWM-taajuudet lähellä toisiaan.

Kaavion otsikot: PWM/dither



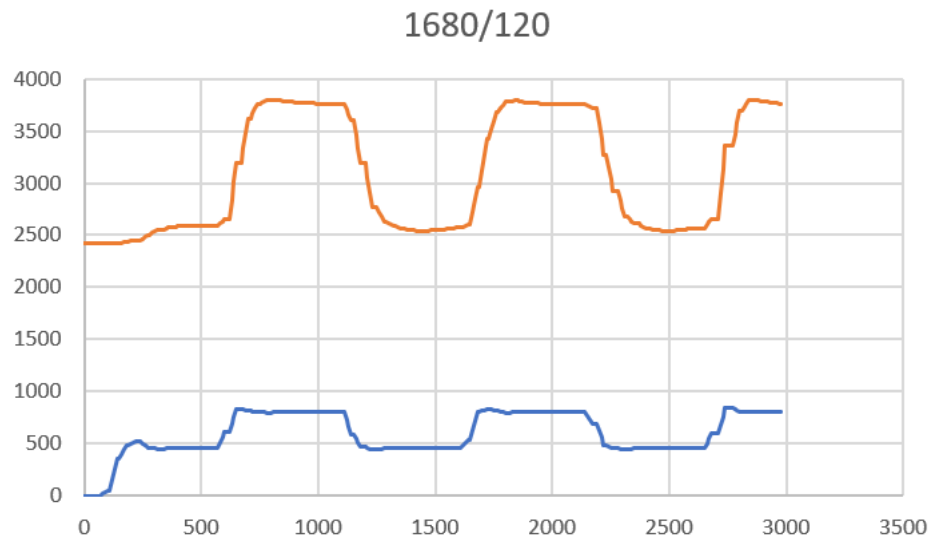
Kuvio 30. Dither 1



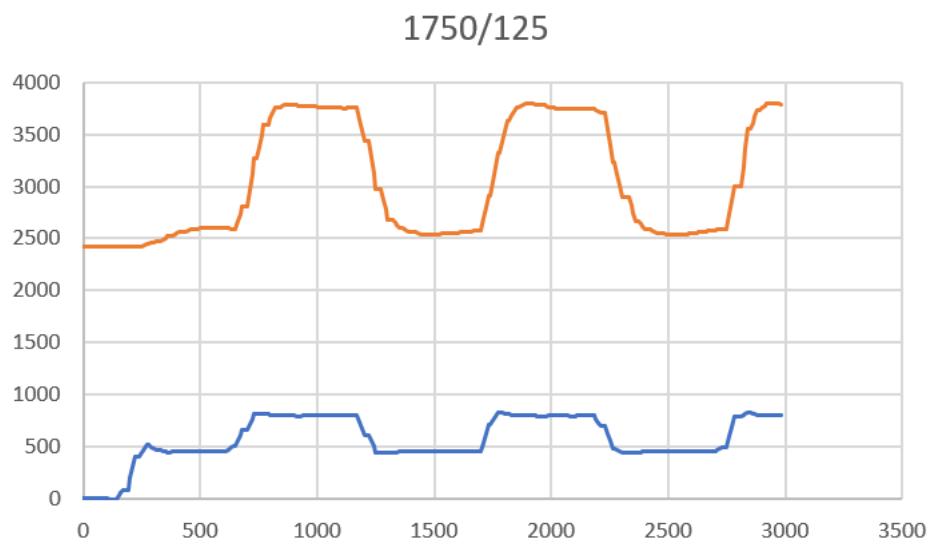
Kuvio 31. Dither 2



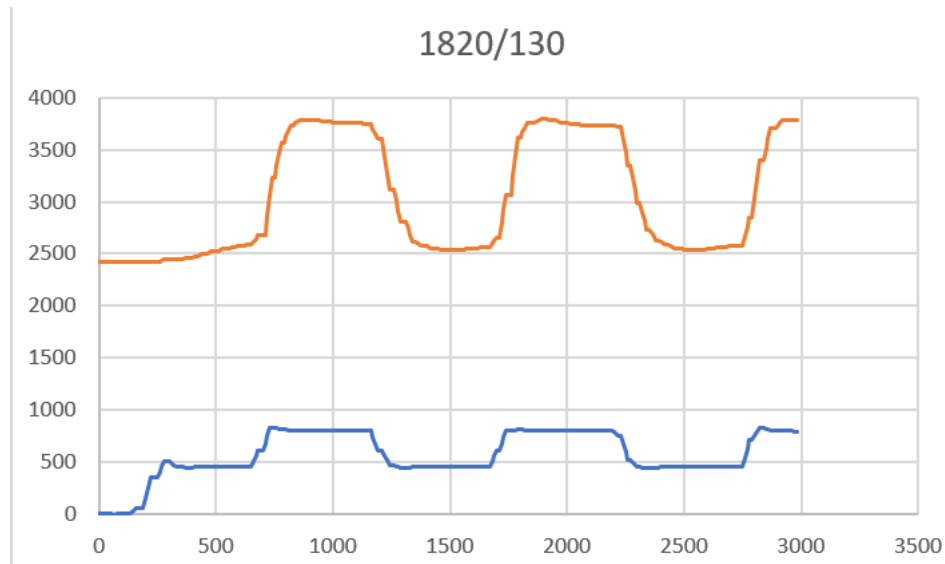
Kuvio 32. Dither 2



Kuvio 33. Dither 3



Kuvio 34. Dither 4

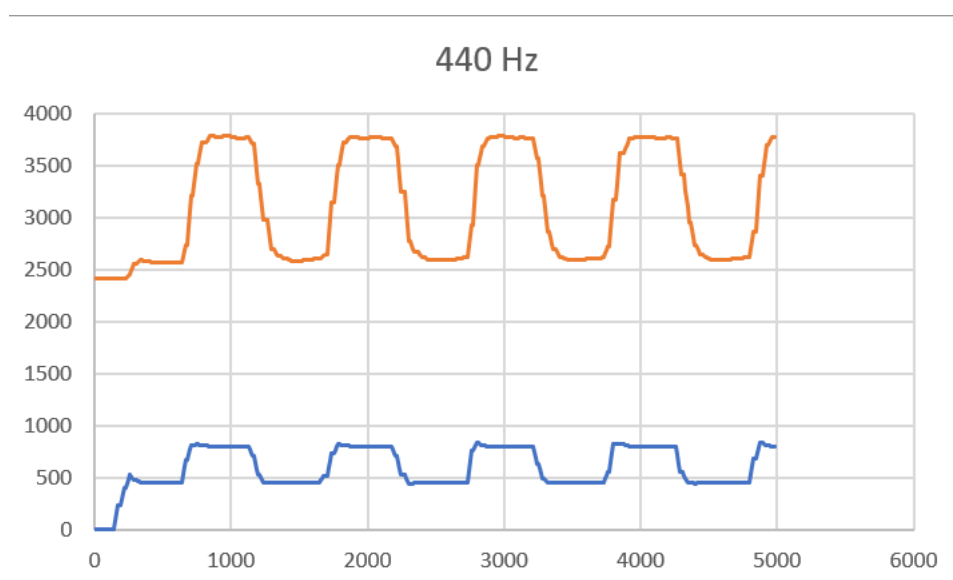


Kuvio 35. Dither 5

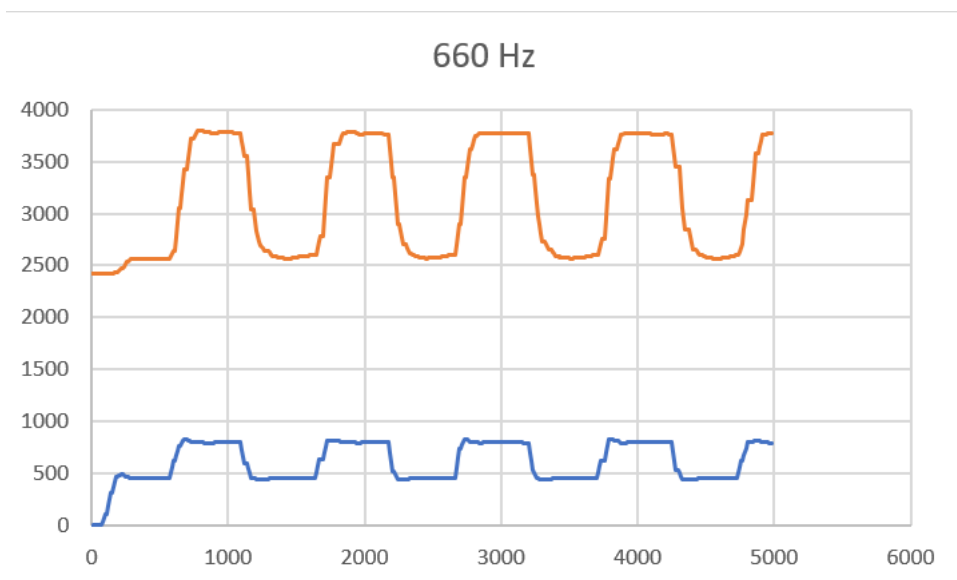
Paras dither 100–120 Hz alueelle (kuviot 31–33). Parhain kara-aseman graafi sattui 110 Hz kohdalle (kuvio 32) mikä on juuri hyvien arvojen keskellä. 100 Hz kohdalla (Kuvio 31) liikkeen alussa tapahtuu pientä yliampumista ja 125 Hz kohdalla (kuvio 34) liikkeen alussa porras alkaa katoamaan.

6.9.2 PWM tarkennus graafit

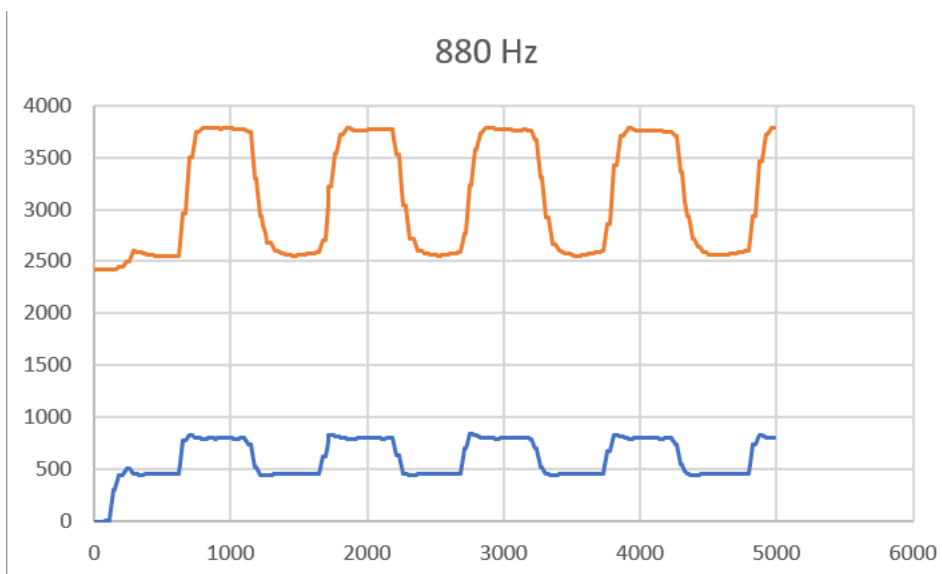
Dither tulosten perusteella PWM selvityksessä on käytössä dither arvo 110 Hz. Amplitudi on 50 promillea.



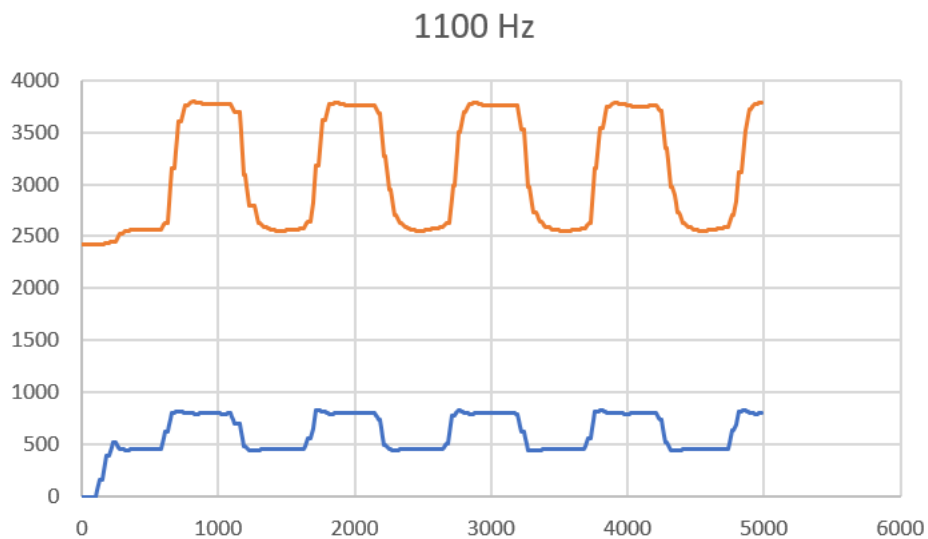
Kuvio 36. PWM 1



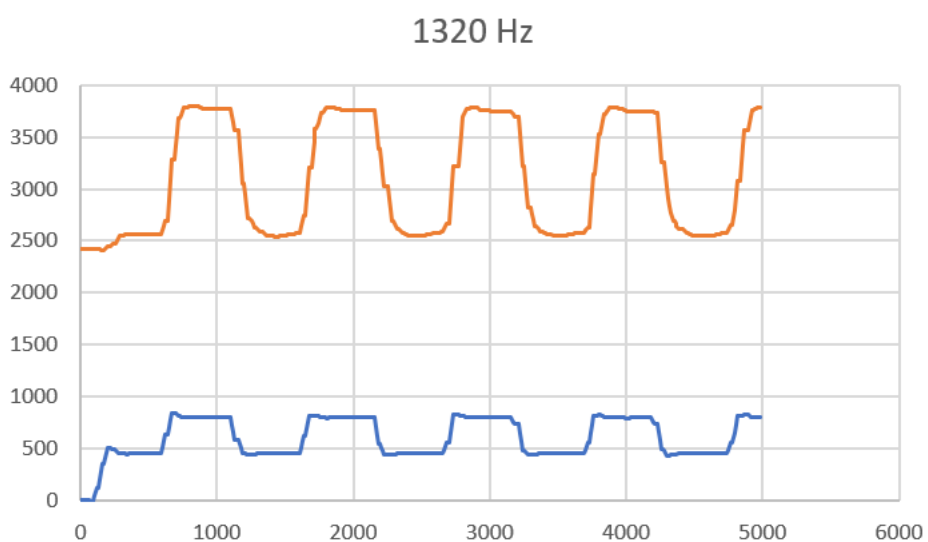
Kuvio 37. PWM 2



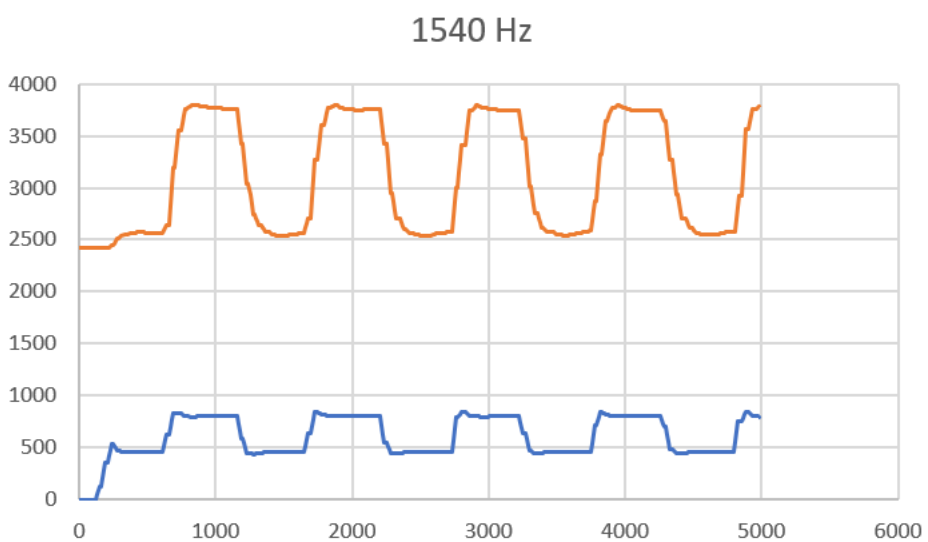
Kuvio 38. PWM 3



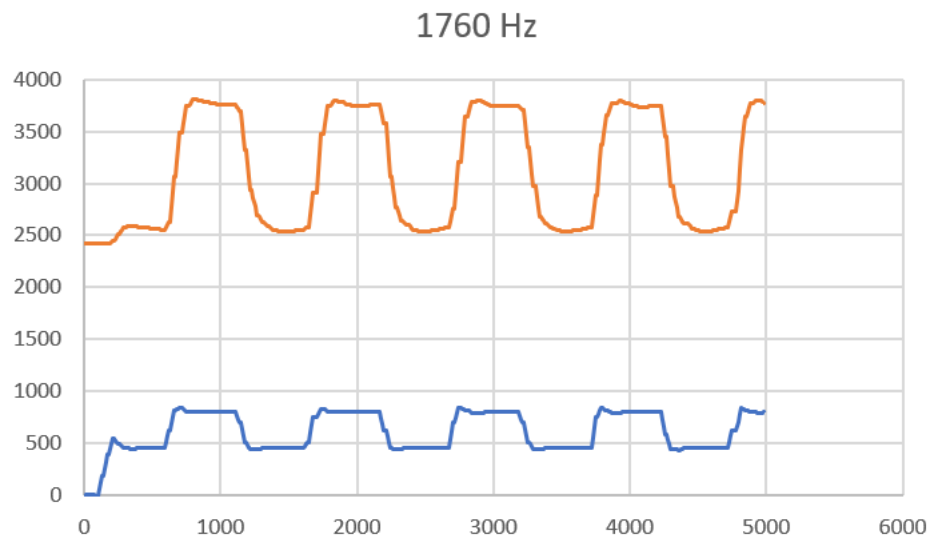
Kuvio 39. PWM 4



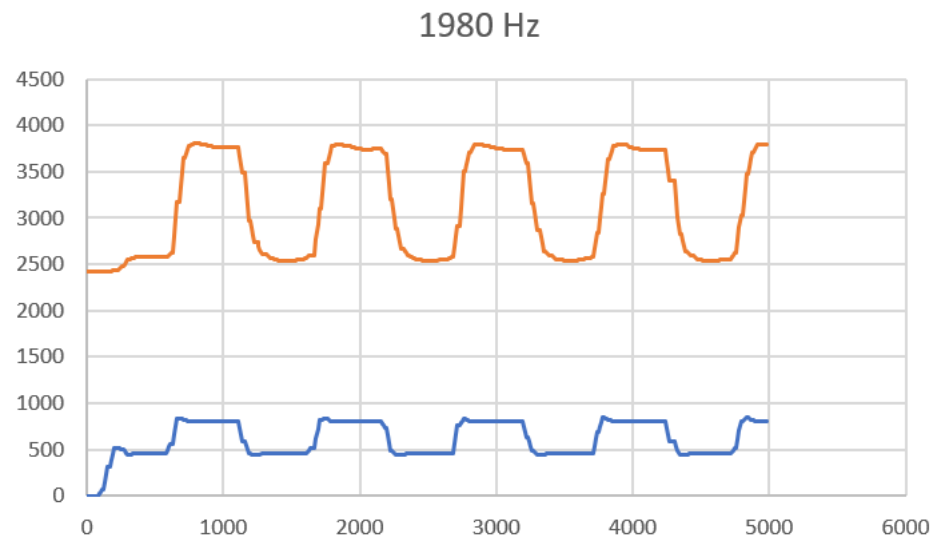
Kuvio 40. PWM 5



Kuvio 41. PWM 6



Kuvio 42. PWM 7



Kuvio 43. PWM 8

6.9.3 Mittaus IV tulokset ja johtopäätökset

Dither arvoja tutkiessa parhaaksi valikoitui 110 Hz (kuvio 32).

Kara-asema graafin profiilin perusteella tämä dither-taajuus toimi kaikkien PWM-taajuuksien kanssa hienosti.

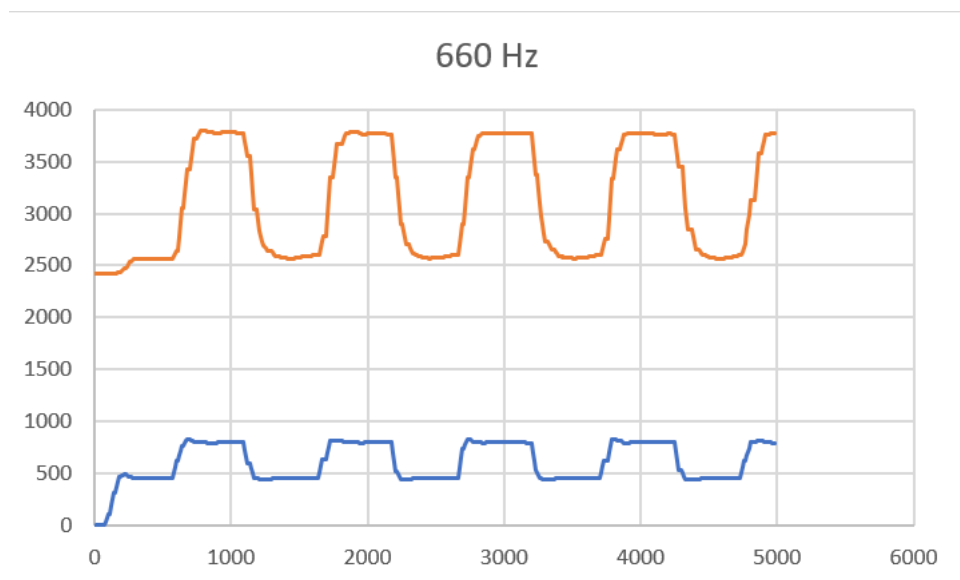
Kohdalla 880 Hz (kuvio 38) kara yliampuu heti liikkeen alussa ja noustessa ylemmälle pitotasolle. Puolestaan laskiessa matalammalle tasolle karassa alkaa

olla hystereesiä. Tämä ilmiö voimistuu mitä korkeammalle PWM-taajuutta nostaa. Parhaaksi osoittautui 660 Hz, vaikkakin 440 Hz taajuudessakaan ei juuri moittimista ole.

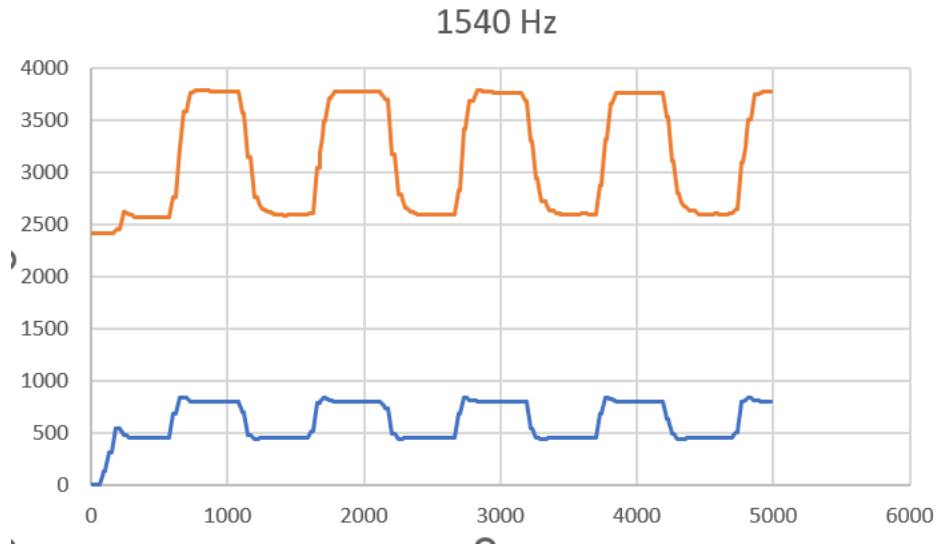
6.10 Mittaus V: Amplitudi

Nyt viimeisenä mittauksena tutkitaan amplitudin toimintaa. Hypoteesi on, että aallon korkeudella voi olla vaikutusta PWM arvoon. Tähän asti on käytetty ohjaimen arvoa 50 ‰.

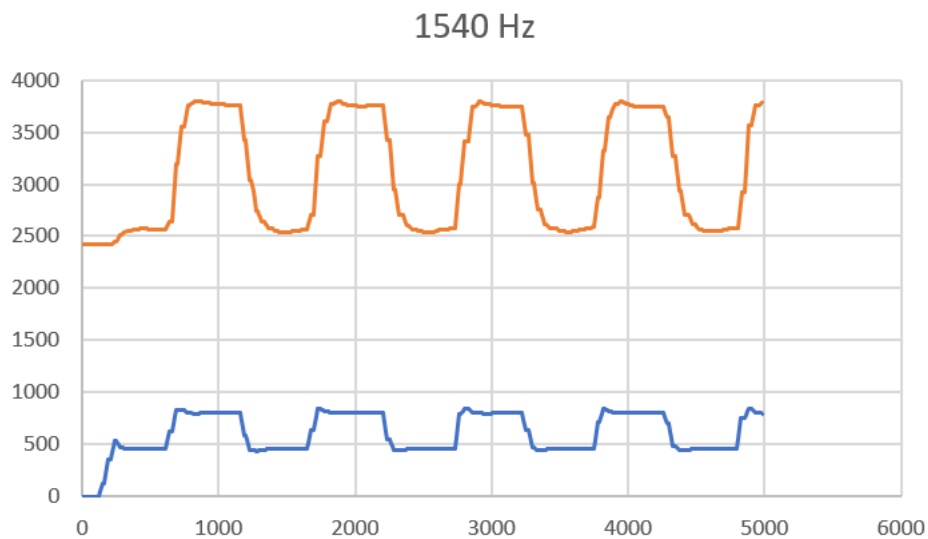
Otetaan edellisen tutkimuksen arvoista 1540 Hz, tämä on selkeästi korkeampi kuin edellisen testin paras, mutta ei aivan ohjaimen ääriarjoilla. Tavoite on saada tämä käyrä näyttämään samalta tai paremmalta kuin edellisen tutkimuksen paras (kuvio 37) muuttamalla pelkästään amplitudin korkeutta. **Graafi tallennetaan nyt vain mahdollisesti onnistuneesta vedoksesta.**



Kuvio 45. PWM 660 Hz | Dither 110 Hz | AMP 50 ‰



Kuvio 46. PWM 1540 Hz | Dither 110 Hz | **AMP 250 %**



Kuvio 47. PWM 1540 Hz | Dither 110 Hz | **AMP 50 %**

Amplitudin nostamisella on selkeä vaikutus käyrän muodostumiseen. Muodosta tuli kohtuullinen vasta 250 % kohdalla (kuvio 46), vaikkakin ajon alussa tapahtuva nosto yliampuu hieman. Myös pitotasot ovat tällöin paljon paremmat kuin pienemmällä amplitudilla (kuvio 47).

250 % lisäys pulssin leveyteen on aivan liikaa, esimerkiksi työsyklillä 10 %, syklistä vähenee 25 %, eli se menee teoriassa 15 % miinukselle. Tämä ei välttämättä sekoita ohjainta, mutta ohjain saattaa jättää toteuttamatta puolet ditheristä pienimmillä työsykleillä ja vaihtoehtoisesti minimiliike saattaa olla 25 % pulssinleveydellä, mikä aiheuttaa hankaluuksia koneen ohjaamisessa.

7 Yhteenveto

Tutkimuksessa käytettäviä menetelmiä hyödyntäen tuloksena käyttökelpoiset parametrit. Lähtötilanteeseen verrattuna parempaan suuntaan päästiin. Menetelmä itsessään on hyödyllinen, sillä seuraamalla karan asemaa anturin avulla päästiin konkreettisesti näkemään ohjauksen muutoksilla tapahtuvat ilmiöt. Näitä ilmiöitä olisi lähestulkoon mahdotonta selvittää esimerkiksi ohjauksen käsituntumaan perustuen runsaiden muuttujien vuoksi.

8 Pohdinta

8.1 Tutkimus

Lopulliset parametrit perustuvat tutkimuksessa selvinneisiin ilmiöihin. Tutkimuksen kannalta tärkein esille tulleista ilmiöistä oli dither päivitystaajuuden löytäminen. Hyvän taajuusarvon löytäminen nopeutti tutkimusta, koska vaihtoehdot jaollisuussäännön täyttävälle PWM-taajuuksille vähenivät selvästi.

Amplitudin käyttäytyminen oli myös mielenkiintoista. Koska korkeammalla PWM-taajuudella amplitudia piti nostaa roimasti (kuvio 46), matalampi ilmeisesti hukkuu PWM-taajuuden sekaan. Tähän voi vaikuttaa se, että dither muutos tapahtuu niin harvoin jaksojen määrään nähden ja tämän vuoksi aallon korkeutta oli nostettava.

Kokeilin amplitudin muutosta kaikille ”PWM tarkennus graafit” tuloksille (kuviot 36–43). Sekä parasta tulosta (kuvio 37) matalammat että korkeammat PWM arvot vaativat aika rajuja amplitudimuutoksia, joten on mahdollista, että dither päivitystaajuudella ja amplitudilla yhteisvaikutus ja nyt tutkimuksessa käytetyllä amplitudilla 50 % vaikutus oli parhaimmillaan dither-taajuudella 110 Hz. Koska solenoidi on oskilloskoopitestin perusteella hyvinkin mukana vielä 2000 Hz asti, vaikea uskoa, että dither taajuus ei voisi olla esimerkiksi 200 Hz vaikka pienemmällä amplitudilla.

Kesken tutkimuksen kävi toteen, että L90LS venttiilipöytää oli muokattu sen aiempaa käyttötarkoitusta varten eli sen olemista osana traktoria. Traktoreissa on 12 voltin järjestelmä ja esiohjaussolenoidit olivat vaihdettu yhteensopiviksi sen kanssa.

Vaikka jännitettä annettiin 100 % liikaa solenoidit kuitenkin missään vaiheessa kuumentuneet ja laite toimi suhteellisen hyvin. Tämä voi johtua siitä, että PID ohjain seuraa tavoitearvoa. Koska yhtä arvoa on tullut liikaa, on se voinut vähentää jotain muuta arvoa. Esimerkiksi pulssin leveyttä muuttamalla voidaan saada sama keskiarvojännite.

Esimerkiksi:

$D=50\%$ (24 V) vastaa vaikutukseltaan $D=100\%$ (12V).

Teoriassa suuremmalla volttilukemalla käyttäytyminen on sama, mutta tarkkuus hieman huonompi. Tämä voi myös selittää miksi graafit olivat kutakuinkin samanlaiset.

Tästä syystä myös uskalsin jättää ensimmäiset tutkimukset raporttiin koska en usko, että on suuremmin merkitystä, kun yritetään selvittää mihin taajuus arvoon solenoidi selvästi alkaa reagoimaan.

Tein tutkimuksen missä kokeiltiin PWM ja dither -taajuuksien jaollisuuden vaikutuksesta toisiinsa. Niissä ilmeni, että kahdella ja neljällä jaolliset käyttäytyivät samalla tavalla ja muutosta tapahtui, kun saavutettiin jaollisuus kuudella. Näissä tutkimuksissa graafit olivat muuten hyviä mutta profiili ei toiminut. Jätin nämä pois pääosin sen takia, että mielestäni ne eivät tuoneet mitään tähän tutkimukseen ja lisäksi ne olivat toteutettu vielä 24 voltilla, joten niihin ei olisi ollut luottamista.

8.2 Huomiot ja tutkimuksen jatko

Tarkemmat tiedot solenoidista voisi auttaa hahmottamaan paremmin sille suunniteltua toiminta-aluetta ja verrata vaikka siihen mitä käytännön tasolla tapahtuu.

Suuttimien vaihtoa kokeiltu, mutta käyttöjännite oli vielä tuolloin 24 voltia, joten tutkimukset menivät hylkyyn tältä osin. Testin voisi suorittaa uudelleen käyttäen 12 voltin jännitettä.

Nesteen käyttölämpötilalla voi olla vaikutusta tutkimustuloksiin. Kylmempi öljy liikkuu hitaammin, eli esimerkiksi pakkasessa parametrit voivat olla täysin sopimattomat. Karan reagointiin voi myös vaikuttaa hydraulikkaöljyn paine.

Tässä tutkimuksessa ei kajottu ohjaimen P ja I arvoihin. P ja I arvojen muutoksella on kuitenkin vaikutusta venttiilin käyttäytymiseen.

Lähteet

- Buršič, M. 2019. Electrical engineering. Stack Exchange. Blogi. <https://electronics.stackexchange.com/questions/424082/could-someone-explain-dither-signal>. 20.5.2023.
- Colley, S. 2020. PWM Timers in Microcontrollers. All about circuits. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-microcontroller-timers-pwm-timers/>. 14.2.2023.
- Corman, E. 2015. Simple Synthesis. Keith McMillen Instruments. Blogi. <https://www.keithmcmillen.com/blog/simple-synthesis-part-6-pulse-width-modulation/>. 20.3.2023.
- Dietrich, S. 2022. Understanding the Basics of Pulse Width Modulation. Control automation. <https://control.com/technical-articles/understanding-the-basics-of-pulse-width-modulation-pwm/>. 22.2.2023.
- Heftman, G. 2005. PWM: From a single chip to a giant industry. Electronic Design. <https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21188405/pwm-from-a-single-chip-to-a-giant-industry>. 13.2.2023.
- Hirzel, T. 2023. Basics of PWM. Arduino. <https://docs.arduino.cc/learn/microcontrollers/analog-output>. 13.2.2023.
- Hydraforce. 2023. Electronic control of hydraulic systems. HydraForce. <https://www.hydraforce.com/resources/technical-reference/electronics-in-the-mobile-equipment-industries/>. 10.5.2023.
- Metropolia. 2009. Koneautomaatio/Hydrauliikka. <https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/8.+Venttiilit>. 8.3.2023.
- Quality Hydraulics. 2023. What is Dither versus PWM? Quality Hydraulics. Blogi. <https://www.qualityhydraulics.com/blog/valves/what-dither-versus-pwm>. 19.2.2023.
- Signaalikäsittelyn laboratorio. 2003. Digitekniikan perusteet. Aalto-yliopisto. <http://legacy.spa.aalto.fi/sig-legacy/digis/luento1/anadigi.html>. 13.2.2023.
- Sinha, A. & Minj, V. 2009. What Is Solenoid And How It Works? Electronicsforu.com. <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/solenoid-basics-working>. 8.3.2023.
- Vadim. 2017. What is the definition of "PLC"? Unitronics. <https://www.unitronicsplc.com/what-is-plc-programmable-logic-controller/>. 22.2.2023.
- Yadav, C. 2020. Vcc and Vss pins. Tutorialspoint. Blogi. <https://www.tutorialspoint.com/vcc-and-vss-pins>. 13.2.2023.