

Juuso Kankkunen

# INERTIAMITTAUSMODUULIN SUUNNITTELU

Diplomityö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastajat: Jouko Heikkinen  
Karri Palovuori  
Tammikuu 2026

# TIIVISTELMÄ

Juuso Kankkunen: Inertiamittausmoduulin suunnittelu  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikan DI-ohjelma  
Tammikuu 2026

---

Tässä diplomityössä suunnitellaan inertiamittausmoduuli. Työssä käydään lyhyesti läpi inertiamittausyksiköiden teoriaa, jonka jälkeen valitaan käyttökohteeseen sopiva IMU-anturi. Valinnassa vertaillaan markkinoilla olevia vaihtoehtoja. Seuraavaksi kahdelle potentiaaliselle anturille tehdään käytännön testejä, joiden perusteella valitaan anturi, jonka ympärille piirikorttimoduuli suunnitellaan. Antureille tehdään staattinen testi, lämpösyklitesti, kulmatarkkuustesti ja iskutesti.

Valitulle anturille suunnitellaan sitten piirikaavio ja piirilevyn layout, jonka jälkeen yksi prototyypipiirikortti valmistetaan piirilevyjyrsimellä. Lopuksi valmistettua piirilevyä testataan. Sen jännitettä ja SPI-väylien signaaleja tutkaillaan oskilloskoopilla. Testauksessa kokeillaan myös sarjavastusten ja ylös- sekä alavetovastusten vaikutuksia signaaleihin. Suunniteltua piirilevyä verrataan myös valmistajan demokittiin, jotta sen suorituskykyä pystytään arvioimaan paremmin. Lopuksi vielä pohditaan mahdollisia parannuksia piirikorttimoduulille. Piirilevyn suunnittelu onnistui ja sen suorituskyky vastasi valmistajan demokitin suorituskykyä. SPI-väylän ja jännitteen mittauksissa kuitenkin löytyi myös merkittävää ylikuulumista, etenkin SPI-väylän kellosignaalin osalta. Kellosignaalin nousu- ja lasku aiheuttavat muissa signaaleissa jännitepiikkejä. Ylikuuluminen ei kuitenkaan vaikuttanut anturin suorituskykyyn.

Työ tehdään Senop Oy:lle. Työssä suunniteltava piirikorttimoduuli on osa laajempaa tuotekehitysprojektia. Piirilevyn kehitystä jatketaan vielä tämän työn jälkeen ja tavoitteena on, että lopulta piirikorttimoduuli voidaan ottaa käyttöön tuotteessa. Suurimpana kehityskohteena on kellosignaalin ylikuulumisen vähentäminen. Kokonaisuudessaan työ on onnistunut ja sen tavoitteisiin päästään.

Avainsanat: Inertiamittausyksikkö, IMU, Gyroskooppi, Kiihtyvyyssanturi, Piirikorttimoduuli.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Juuso Kankkunen: Designing an inertial measurement module  
Master's Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Programme in Electrical Engineering  
January 2026

---

In this Master's thesis, an inertial measurement module was designed. In the beginning, the theory of inertial measurement units was briefly reviewed, after which a suitable IMU sensor was selected for the intended application. The selection was done by comparing commercially available inertial measurement units. Practical tests were then done on two potential sensors. The purpose of the tests was to determine which of the sensors would be better suited for the application. Based on the test results, a sensor was chosen.

For the selected sensor, a circuit schematic and printed circuit board layout were designed, and a prototype board was fabricated using a milling machine. The manufactured board was then subjected to testing. Voltage levels, and quality as well as SPI bus signals were examined with an oscilloscope. The effects of series resistors as well as pull-up and pull-down resistors on the signals were also investigated during testing. The designed circuit board was compared to the manufacturer's demonstration kit to enable a better evaluation of its performance. Finally, potential improvements to the circuit board module were discussed. The module was confirmed to work as intended and its performance matched the manufacturer's demonstration kit. However, some issues were found in the signal quality of the SPI bus and in the supply voltage. There was significant crosstalk between the clock signal of the SPI bus and the other signals in the circuit. Voltage spikes caused by the rise and fall of the clock signal were clearly visible in other signals.

This thesis was made for Senop Oy and the design of the module was a part of a larger product development project. The development of the designed module will continue in the future. The main point of development will be the reduction of the crosstalk caused by the SPI buses clock signal.

Keywords: Inertial Measurement Unit, IMU, Gyroscope, Accelerometer, PCB-module

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei  
 Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: Microsoft Copilot

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Copilot

Käyttötarkoitus: Työssä esitetyt kuvaajat on piirretty Python koodilla käyttäen matplotlib-kirjastoa. Tämän Python koodin pohja on tekoälyn kirjoittamaa, jonka jälkeen se on käsin muokattu sopivaksi.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Luvuissa 3 ja 5 esitettyjen kuvaajien piirtämiseen käytetyn Python koodin kirjoittamisessa.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

# ALKUSANAT

Tämän diplomityön aiheena on inertiamittausmoduulin suunnittelu. Työ on tehty Senop Oy:lle syksyn 2025 aikana. Aihe valikoitui Senop Oy:n tarpeiden mukaan ja se tehtiin osana laajempaa tuotekehitysprojektia. Työn aihe oli mielenkiintoinen ja opettavainen. Kiitokset Tampereen Yliopistolle, työn ohjaajille ja tarkastajille, sekä Senop Oy:lle.

Tampereella, 15.1.2026

Juuso Kankkunen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO.....	1
2.INERTIAMITTAUSYKSIKÖN TEORIAA.....	3
2.1 Gyroskoopin toimintaperiaate .....	4
2.2 Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate .....	10
2.3 IMU-anturille oleelliset ominaisuudet.....	13
2.3.1 Mittausalue, herkkyys ja resoluutio.....	13
2.3.2 Virheet.....	15
2.4 Signaalinkäsittely .....	18
3.ANTURIN VALINTA .....	22
3.1 Anturin vaatimukset.....	22
3.2 Markkinoilla olevia vaihtoehtoja .....	23
3.3 Antureiden vertailu ja testaus .....	27
3.3.1 Staattinen testi .....	29
3.3.2 Lämpösyklitesti.....	34
3.3.3 Kulmatarkkuustesti.....	40
3.3.4 Iskutesti .....	44
3.4 Valintapäätös .....	53
4.PIIRIKORTIN SUUNNITTELU .....	54
4.1 Piirikaavio .....	54
4.2 Piirilevy .....	56
5.PIIRIKORTIN TESTAUS .....	59
5.1 Lähdejännite.....	60
5.2 SPI-väylä .....	63
5.3 Staattinen testi .....	68
6.YHTEENVETO .....	74
LÄHTEET .....	77

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ADC	Analog to Digital Converter
ADEV	Allan Deviation
ARW	Angular Random Walk
AVAR	Allan Variance
CDC	Capacitance to Digital Converter
CS	Chip Select
CVG	Coriolis Vibration Gyroscope
ECAD	Electronic Computer-Aided Design
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
FOG	Fiber Optic Gyroscope
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IC	Integrated Circuit
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
MEMS	Micro-Electromechanical System
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
PCB	Printed Circuit Board
RLG	Ring Laser Gyroscope
RMS	Root Mean Square
RW	Random Walk
SCLK	Serial Clock
SPI	Serial Peripheral Interface
VDDIO	Voltage Drain Digital I/O
VRW	Velocity Random Walk
VSG	Vibrating Structure Gyroscope

# 1. JOHDANTO

Tämän diplomityön aiheena on inertiamittaus-piirikorttimoduulin suunnittelu. Diplomityö tehdään Senop Oy:lle. Työssä valitaan käyttökohteeseen sopiva anturi ja suunnitellaan sen ympärille piirikaavio ja tehdään layout piirilevyille. Tämän lisäksi anturimoduulin toimintaa testataan ja todennetaan. Moduulin suunnittelu on osa suurempaa tuotekehitysprojektia ja se tullaan asentamaan tuotekehityksessä olevaan laitteeseen. Moduulin on siis täytettävä laitteen sille määräämät vaatimukset muun muassa tarkkuuden, hinnan ja fyysisen koon suhteen. Tässä työssä suunniteltava anturimoduuli tulee ensimmäisiin prototyyppilaitteisiin, sitä tullaan parantamaan ja jatkokehittämään laitteen testauksessa ilmenevien tarpeiden mukaan. Työn perimmäisenä tarkoituksena on luoda toimiva ja vaatimukset täyttävä inertiamittauspiirikorttimoduuli.

Inertiamittausyksikkö on anturipaketti, jota käytetään liikkeen mittaamiseen. Inertiamittausyksikköön kuuluu gyroskooppi ja kiihtyvyyssanturi. Gyroskoopilla mitataan kulmanopeutta, jonka avulla voidaan laskea myös kulman muutos. Vastaavasti kiihtyvyyssanturilla mitataan kiihtyvyyttä, jonka avulla voidaan laskea nopeus ja paikan muutos. Gyroskoopin ja kiihtyvyyssanturin mittaustuloksista voidaan laskea inertiamittausyksikön liikerata. Inertiamittausyksiköitä käytetään yleensä liikkeen tunnistuksessa, sekä seuraamisessa. Yleisiä käyttökohteita on esimerkiksi lentokoneet, älypuhelimet, muut älylaitteet ja dronet. Inertiamittausyksikköä kutsutaan usein nimellä IMU (Inertial Measurement Unit) tai IMU-anturi. [1]

Työhön sisältyy kirjallisuuskatsaus, johon sisältyy IMU-antureiden yleistä teoriaa. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on antaa perustason ymmärrys IMU-anturin toiminnasta ja ominaisuuksista, jotta myöhemmin tehtävät päätökset ovat helpommin ymmärrettäviä ja paremmin perusteltuja.

Kirjallisuuskatsauksen jälkeen työssä tarkastellaan tämän hetken IMU-anturimarkkinoiden vaihtoehtoja, sekä valitaan kaksi anturia jatkotestaukseen. Lopulta kahdelle parhaalle vaihtoehdolle suoritetaan käytännön testejä demokittien avulla, jotta antureiden vertailuun saadaan hieman lisätietoa. Antureille tehdään staattinen testi, lämpösyklitesti, kulmatarkkuustesti ja iskutesti. Testien tuloksia analysoimalla tehdään valistunut päätös anturivalinnasta. Senopin pyynnöstä työssä käytettyjen antureiden

nimet ovat piilotettu, eikä niiden mittaustuloksien absoluuttisia arvoja anneta. Antureiden vertailussa käytetään skaalattuja lukuja.

Valitulle anturille suunnitellaan piirikaavio ja piirilevyn layout. Piirilevyn suunnittelu jää valitun anturin takia melko yksinkertaiseksi. Suunnittelussa noudatetaan enimmäkseen valmistajan datalehden ohjeita, minkä lisäksi levyille lisätään sarjavastukset, sekä ylös- ja alasetovastukset kaikille SPI-väylän johtimille. Kun piirilevyn layout on suunniteltu, valmistetaan yksi testikappale piirilevyjä käyttäen piirilevyjyrsintä, jonka jälkeen juotetaan siihen kiinni tarvittavat komponentit.

Valmiille testilevyille, tehdään muutamia testejä, joilla todennetaan sen toiminta. Näissä testeissä sen jännite ja SPI-väylän signaalit tarkastetaan, minkä lisäksi sitä verrataan valmistajan demokittiin. Testien perusteella tehdään yhteenveto suunnittelun lopputuloksesta, jonka avulla piirikorttiin voidaan tehdä tarvittavia parannuksia. Testeissä löytyy muutamia potentiaalisia parannuskohteita. SPI-väylän kellosignaali aiheuttaa merkittävää häiriötä muihin signaaleihin, sekä jännitteeseen. Tämän ylikuulumisen vähentäminen on tärkein parannuskohde seuraavaa versiota varten. Testeissä kuitenkin huomataan, että ylikuulumisen aiheuttamalla häiriöllä ei ole vaikutusta piirikorttimoduulin suorituskykyyn. Tämän lisäksi testeissä todetaan, että SPI-väylän sarja-, ylös- ja alasetovastuksia voidaan poistaa. Lisäksi joidenkin oheiskomponenttien koteloiden kokoja voidaan hieman muuttaa. Suorituskyvyltään suunniteltu piirilevy vastaa valmistajan demokittiä, joten sen suhteen suunnittelu onnistui hyvin. Suorituskyky oli tärkein tavoite, joten pelkästään tämän perusteella suunnittelutyön ja voidaan sanoa onnistuneen.

Piirilevyn kehitys jatkuu vielä tämän diplomityön jälkeen ja tässä työssä suunniteltava piirilevy on vasta ensimmäinen prototyyppiversio, jota voidaan käyttää testauksessa, ja ensimmäisissä toiminnallisissa prototyyppilaitteissa. Kaikki työlle asetetut tavoitteet saavutettiin. Inertiamittausanturin valinta oli onnistunut. Suunnittelun, sekä piirilevyn valmistuksen jälkeen työn lopputuloksena oli toimiva ja suorituskyvyltään erinomainen inertiamittauspiirikorttimoduuli. Moduuli täyttää kaikki sille asetetut vaatimukset.

## 2. INERTIAMITTAUSYKSIKÖN TEORIAA

Inertiamittausyksikkö, eli IMU (Inertial Measurement Unit) on anturipaketti, jota käytetään liikkeen ja asennon mittaamiseen. IMU-anturi on erityisen hyödyllinen, kun mitattavan laitteen liikerataa ei ole mitenkään määritelty tietylle akselille vaan se pääsee vapaasti liikkumaan ja kääntymään. Yksinkertaisemmissa tapauksissa voidaan käyttää mekaanisia antureita, jotka käyttävät ulkoista referenssiä mittaamiseen. IMU-anturin vahvuutena on sen kyky mitata liikettä vain ja ainoastaan sen oman inertian perusteella. Tästä syystä IMU-anturit ovat yleisesti käytössä esimerkiksi älypuhelimissa, droneissa ja lentokoneissa, joissa liikerataa ei voida ennestään tietää, eikä ulkoinen referenssi ole mahdollinen. [2]

Ilman IMU-anturia pyörimistä ja liikettä voidaan mitata suoraa esimerkiksi kulma-anturin avulla, mutta perinteinen kulma-anturi toimii vain rajoitetulla liikeradalla ja yhdellä rajoitetulla pyörimisakselilla. Tämän lisäksi kulma-anturi vaatii mekaanisen kiinnityksen ulkoiseen referenssiin. Siksi käyttökohteissa, joissa mitattava laite kulkee tiettyä rataa, tai pyörii tietyn akselin ympärillä, ei kannata välttämättä käyttää IMU-anturia sillä mittaus onnistuu yksinkertaisemmalla ratkaisulla. Tämän lisäksi mekaanisella anturilla saadaan hyvin vakio mittaustulos pidemmälläkin aikavälillä, kun taas IMU-anturilla esiintyy biasjännitteen muutoksia ja kohinaa, mikä johtaa mittaustuloksen tarkkuuden heikkenemiseen ajan myötä. Osaa tästä virheestä on mahdollista kompensoida, mutta lähtökohtaisesti IMU-anturin mittavirhe kasvaa, kunnes se kalibroidaan uudestaan.[3] IMU-antureiden yleisimpiä käyttökohteita ovat älypuhelimet ja -kellot, dronet, lentokoneet, ohjukset ja robotiikka.[1]

IMU-anturi koostuu vähintään kiihtyvyyssanturista ja gyroskoopista [1]. Näiden lisäksi niihin voi sisältyä myös muun muassa magnetometri ja lämpötila-anturi [4]. Kiihtyvyyssanturilla ja gyroskoopilla voidaan mitata anturin kiihtyvyys ja kulmanopeus, joiden perusteella voidaan laskea laitteen kulkema matka ja nopeus, sekä sen orientaatio ja kulkusuunta. Usein kiihtyvyyttä ja kulmanopeutta mitataan kaikilla kolmella akselilla, jolloin laitteen liikkeestä saadaan kattava kokonaiskuva, mitatun datan perusteella pystytään sitten määrittämään laitteen suhteellinen liikerata. [1] IMU-anturilla ei kuitenkaan voida määrittää absoluuttista sijaintia [5]. Joihinkin IMU-antureihin on sisällytetty myös magnetometri, jonka avulla voidaan mitata absoluuttista suuntaa. Magnetometri mittaa ympärillä olevaa magneettikenttää. Magneettikentän suunnan ja voimakkuuden perusteella voidaan päätellä laitteen suunta suhteessa maan magneettikenttään ja siten määrittää laitteen tarkka orientaatio suhteessa maapalloon.

[6] Jos taas halutaan määrittää sijainti, niin IMU-anturin data voidaan yhdistää tietoon esimerkiksi lähtöpaikasta, jolloin IMU-anturin mittausten perusteella voidaan jatkuvasti laskea nykyistä sijaintia. Tätä tekniikkaa kutsutaan laskelmasuunnistukseksi. Laskelmasuunnistukseen IMU-antureita käytetään esimerkiksi lentokoneiden inertiaalisissa navigointijärjestelmissä, joita usein kutsutaan nimellä INS (Inertial Navigation System). INS:n avulla tehtyä inertiaalisuunnistusta käytetään etenkin lentokoneissa ja ohjuksissa. Lentokoneissa inertiaalisuunnistuksessa tiedetään lentokentän sijainti, sekä lentokoneen lähtösuunta, jolloin pelkän INS:n avulla voidaan jatkuvasti laskea, ja päivittää, lentokoneen sijaintia sekä lentosuuntaa ja siten suunnistaa kohti määränpäättä. [7] Nykyisin lentokoneissa yhdistetään INS ja satelliittipaikannus, eli GNSS (Global Navigation Satellite System). GNSS:n avulla saadaan määritettyä koneen absoluuttinen sijainti vielä tarkemmin ja satelliittipaikannus auttaa korjaamaan INS:n kertyvää virhettä pitkillä lennoilla.[8] Tämän lisäksi lentokoneissa IMU-anturia käytetään muun muassa kallistumis-, kääntymis- ja nousukulmien mittaamiseen. Näin lentokoneen ohjaamossa voidaan näyttää lentäjälle horisontin sijainti, mikä mahdollistaa lentämisen esimerkiksi pilvien läpi tai pimeässä, kun lentäjä ei muuten näe horisonttia.[9] IMU-anturin ja muiden lentokoneen antureiden mittausten avulla koneen lentotietokoneella voidaan myös estää koneen liiallinen kallistuminen, sekä rajoittaa esimerkiksi nousukulmaa ja siten estää koneen siipien sakkaaminen.[10] Inertiaalisuunnistus on myös yleisesti käytössä ohjuksissa, sillä järjestelmä voi toimia täysin itsenäisesti, eikä sitä voida ulkoisesti häiritä. Tarkkuuden parantamiseksi ohjukset käyttävät usein myös GPS-ohjausta, mutta siinä tapauksessa, että GPS-signaalia häiritään, voi ohjus vaihtaa inertiaalisuunnistukseen.[11]

Vaikka magnetometrit, kompassit tai lämpöanturit voivat olla osana IMU-anturia, eivät ne ole tämän diplomityön kannalta oleellisia, joten niihin ei kiinnitetä erityistä huomiota tässä työssä.

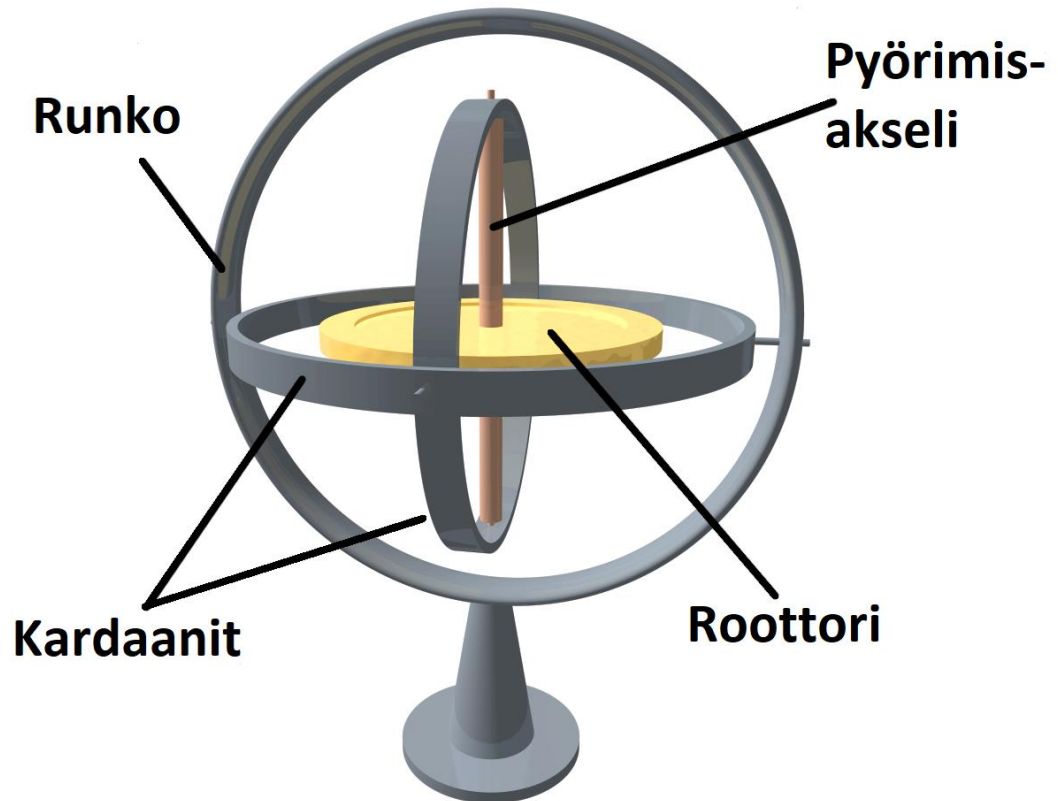
## 2.1 Gyroskoopin toimintaperiaate

Gyroskooppia käytetään kulmanopeuden mittaamiseen. Kulmanopeudesta voidaan sitten laskea esimerkiksi kulman muutos ja siten mitattavan laitteen asento. Gyroskooppi voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Erilaisten gyroskooppien ominaisuuksissa ja toimintaperiaatteissa on suuria eroja, joten niiden valinnassa on hyvä huomioida käyttökohteen vaatimukset. Gyroskoopin tyyppi vaikuttaa erityisen paljon sen tarkkuuteen, fyysiseen kokoon ja hintaan. [12]

Mekaaniset gyroskoopit, eli niin sanotusti perinteiset gyroskoopit toimivat inertiansäilymislain avulla. Mekaanisen gyroskoopin sisällä on roottori, joka pyörii

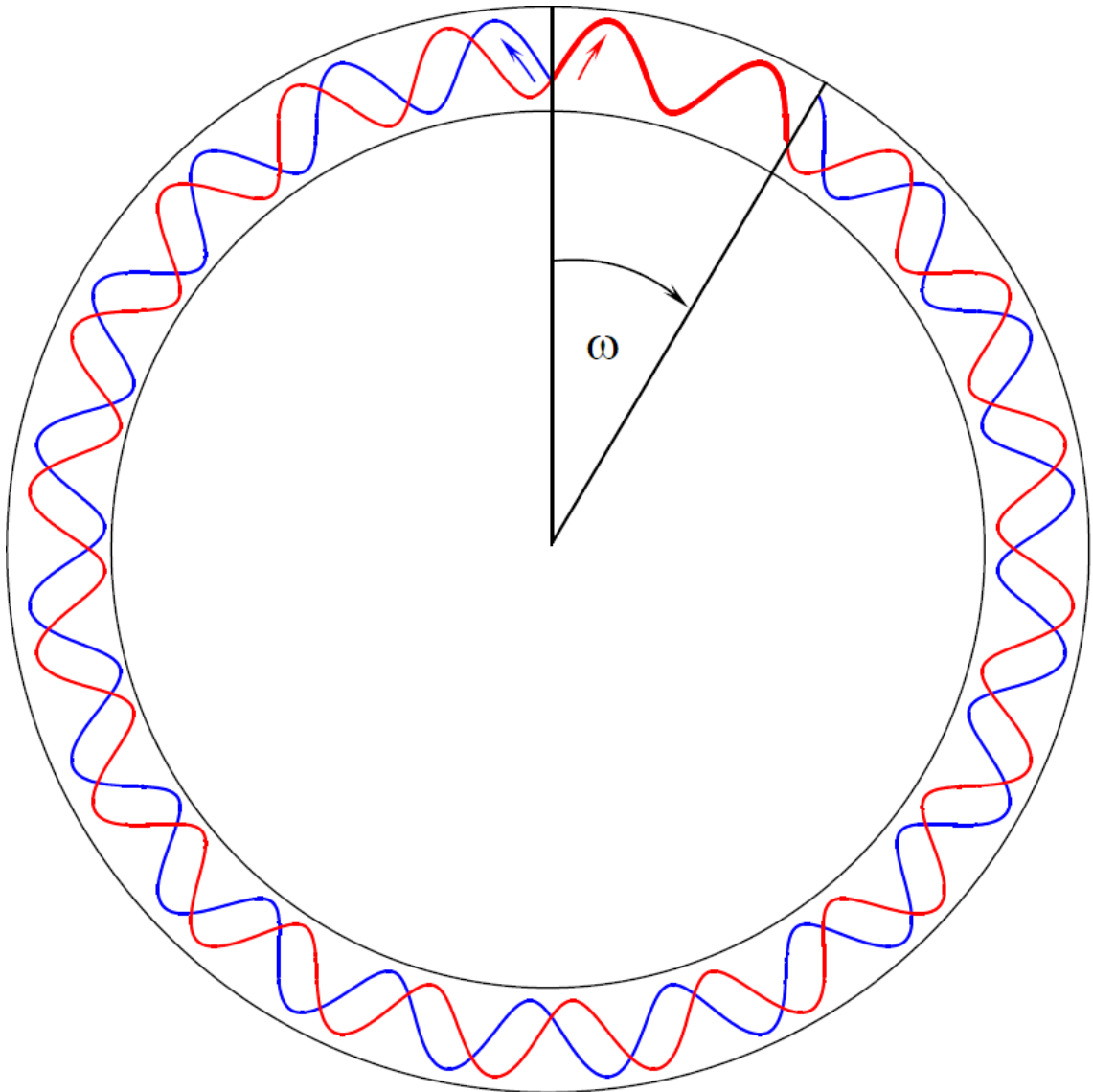
suurella nopeudella. Roottori on kiinnitettynä yhteen tai kahteen kardaanirenkaaseen, jotka kääntyvät vapaasti. Kardaanirenkaiden avulla roottori pääsee vapaasti kääntymään suhteessa gyroskoopin runkoon. Kulmaliikemäärän säilymisen takia pyörivä kappale, eli tässä tapauksessa roottori, on erittäin vakaa pyörimisakselinsa suhteen. Roottorin vakauden ansiosta gyroskoopin runkoa voidaan pyörittää ilman, että sisällä oleva roottori pyörii sen mukana. Roottorin ja rungon välinen kulmanmuutos aiheuttaa kardaanirenkaiden kääntymisen. Kardaanirenkaiden pyörimisnopeutta mittaamalla saadaan selville gyroskoopin pyörimisnopeus kardaanirenkaan suuntaisella akselilla. Tällaisella gyroskoopilla kyetään mittamaan pyörimisnopeus maksimissaan kahdella akselilla, sillä roottori ei vastusta pyörimisakselin suuntaista pyörimistä. Täten roottorin pyörimisakselin suuntaista pyörimistä ei voida mitata yhdellä roottorilla. [13] Kuvassa 1 on esitetty mekaanisen gyroskoopin sisäinen rakenne. Jos kardaanirenkaita on yksi, niin silloin vain sen pyörimisakselin suuntaista pyörimistä voidaan mitata. Toisella kardaanirenkaalla mahdollistetaan myös toinen mittausakseli. Jos myös kolmatta akselia halutaan mitata, on lisättävä toinen gyroskooppi, jossa roottorin pyörimisakseli on erisuuntainen. Kardaaneeihin perustuvan rakenteen takia mekaanisilla gyroskoopeilla esiintyy ilmiö, jota kutsutaan yleisesti nimellä gimbal lock. Gimbal lock on tilanne, jossa gyroskoopin kardaanit ajautuvat samaan kulmaan, jolloin niiden pyörimisakselit ovat samat. Tällöin gyroskooppi menettää kyvyn mitata yhtä pyörimisakselia. Jos myös kolmas kardaanit joutuu samaan kulmaan aiheuttaa se toisenkin mittausakselin menettämisen. Käytännön tilanteissa tämä tarkoittaa, että gyroskoopin liikettä, joudutaan joskus rajoittamaan, jotta gyroskooppi ei ajautuisi gimbal lock- tilaan. Gimbal lock voidaan kuitenkin estää lisäämällä gyroskoopille vielä neljäskin kardaanit. Tämä kuitenkin tekee gyroskoopista monimutkaisemman ja kalliimman, sekä kasvattaa sen liikkuvien osien määrää. [14]

Tämän lisäksi mekaanisen gyroskoopin heikkoutena on sen fyysinen koko ja paino. Mekaanisessa gyroskoopissa on myös paljon liikkuvia osia, jotka kuluvat käytössä ja siten aiheuttavat ylimääräistä mittavirhettä, sekä huoltoa ja lyhentävät käyttöikä. Mekaanisilla gyroskoopeilla on tyypillisesti myös pidempi käynnistysaika, sillä roottorin on kiihdytettävä tiettyyn minimipyörimisnopeuteen, jotta se saavuttaa tarvittavan vakauden. [15]



**Kuva 1: Mekaanisen gyroskoopin rakenne. [16]**

Toinen gyroskooppityyppi on optinen gyroskooppi. Optinen gyroskooppi käyttää pyörimisnopeuden tunnistamisessa valon interferenssiä mekaanisen roottorin sijaan. Optisen gyroskoopin toiminta perustuu niin sanottuun Sagnac-efektiin. Sagnac-efektissä kahden erisuuntaan kulkevan valonsäteen välille syntyy vaihe-ero, kun ne kulkevat saman suljetun reitin pyörivällä alustalla. Kuvassa 2 näkyy havainnollistava esimerkki vaihe-erojen syntymisestä. Sagnac-ilmiötä hyödyntävä laite voidaan toteuttaa esimerkiksi peilien tai lasikuitujohdon avulla. Kun koko järjestelmää pyöritetään, voidaan havaita valonsäteiden välille muodostuva vaihe-erosta johtuva interferenssi. Ilmiö perustuu valonnopeuden riippumattomuuteen. Koska laitteen pyöriminen ei vaikuta valonnopeuteen, on pyörimisen vastaisen valonsäteen reitti lyhyempi. Vastaavasti laitteen pyörimissuuntaan kulkevalla valonsäteellä on pidempi matka, jolloin valonsäteet saavuttavat reitin lopun eri vaihekulmissa. Vaihekulmien ero riippuu laitteen pyörimisnopeudesta, sekä valon kulkeman reitin pituudesta. Tätä ilmiötä voidaan käyttää hyväksi gyroskoopissa. [17]



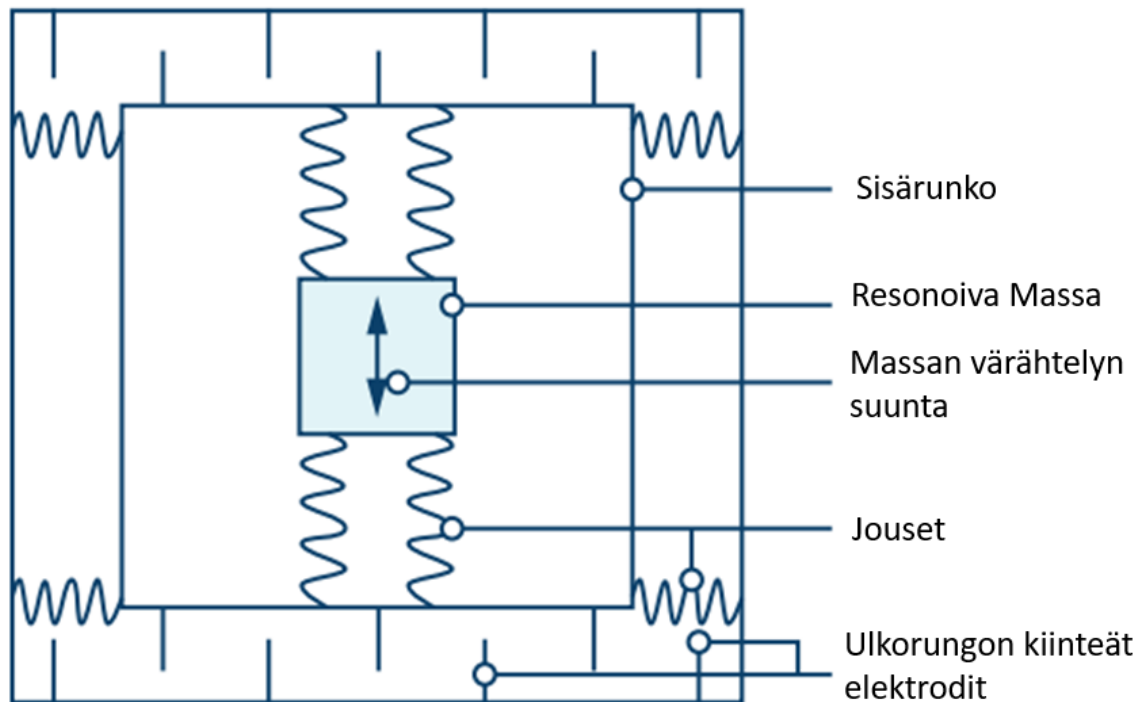
**Kuva 2: Sagnac-ilmiö [18]. Sinisellä merkattu valonsäde kulkee pyörimissuunnan vastaisesti, kun taas punaisella merkattu valonsäde kulkee pyörimissuuntaan. Valonsäteiden lähtö- ja mittauspiste liikkuu pyörimisen mukana, jolloin se tulee vastakkaiseen suuntaan kulkevaa valonsädettä vastaan. Punainen valonsäde joutuu kulkemaan pidemmän matkan, jolloin valonsäteet kohtaavat toisensa eri vaihekulmissa.**

Optisia gyroskooppeja on yleisesti kahta erilaista, RLG (Ring Laser Gyroscope), eli rengaslasergyroskooppi ja FOG (Fiber Optic Gyroscope), eli kuituoptinengyroskooppi. RLG ja FOG toimivat täysin samalla periaatteella, mutta niiden toteutus on hieman erilainen. RLG käyttää kahta vastakkaisiin suuntiin kulkevaa laseria, joita ohjataan peilien avulla. RLG:ssä käytetty lasersäteen lähde on laserputki. Vastaavasti FOG käyttää myös kahta vastakkaisiin suuntiin kulkevaa lasersädettä, mutta niiden lähteenä

on laserdiodi. Tämän lisäksi lasersäteet kulkevat valokuidun sisällä, mikä mahdollistaa useamman kierroksen, jolloin lasersäteet voivat kulkea pidemmän matkan parantaen gyroskoopin mittaustarkkuutta. Vaihtoehtoisesti gyroskoopista voidaan tehdä pienempi. FOG:in kuitukela voi olla jopa kolme kilometriä pitkä. Tästä huolimatta RLG on yleisesti hieman tarkempi vaihtoehto, mutta RLG:n ja FOG:n väliset erot ovat tarkkuuden suhteen melko pienet. Isommat erot nähdään koon ja hinnan suhteen. FOG on keskimäärin halvempi ja pienempi. FOG vaatii myös vähemmän huoltoa.[12]

Optisilla gyroskoopeilla voidaan saavuttaa huomattavan paljon parempi tarkkuus verrattuna mekaanisiin gyroskoopeihin. Lisäksi RLG:ssä on paljon vähemmän liikkuvia osia ja kuituoptisessagyroskoopissa ei ole ollenkaan liikkuvia osia. RLG:n kaasuputkilaser ja peilit kuitenkin vaativat joitain liikkuvia osia, ja niiden shokinkesto onkin heikompi kuin FOG:lla. Liikkuvien osien puute parantaa optisten gyroskoopeiden luotettavuutta ja käyttöikää huomattavasti, sekä vähentää huoltotarvetta. Optiset gyroskoopit ovat pienimmillään muutaman senttimetrin halkaisijaltaan ja painavat muutamia kymmeniä grammoja. FOG on hieman uudempi keksintö kuin RLG, ja ominaisuuksiltaan hieman parempi. RLG:t olivat käytetyimpiä gyroskoopeja pitkä aikaa, mutta FOG:ien kehitys on tehnyt niistä parempia vaihtoehtoja moniin käyttökohteisiin. Viime vuosikymmeninä FOG:ien määrä on kasvanut ja niitä käytetään usein RLG:n tilalla. [19]

MEMS (Micro-Electromechanical System) -gyroskooppi on gyroskooppityypeistä pienin ja usein myös halvin. MEMS-gyroskoopeiden suosio on myös kasvanut jyrkästi, sillä niiden pieni koko ja hyvä saatavuus mahdollistaa niiden käytön pienissäkin laitteissa, kuten puhelimissa ja droneissa.[1] MEMS-gyroskoopeiden toimintaperiaate eroaa edellä mainituista. MEMS-gyroskoopit käyttävät hyödykseen coriolis-voimaa. Ne koostuvat sisemmästä ja ulommasta rungosta. Sisemmän rungon sisällä on värähtelevä massa, joka on asennettu jousien varaan. Sisempi runko taas on asennettuna ulompaan runkoon jousien varaan. Kun gyroskoopin kuori pyörii, vaikuttaa coriolis-voima värähtelevään massaan siten, että sen värähtelysuunta muuttuu hieman, mikä aiheuttaa sisempään runkoon sivuttaisliikkeen. Tätä sivuttaisliikettä mittaamalla saadaan laskettua pyörimisnopeus.[20] Kuvassa 3 on yksinkertaistettu malli MEMS-gyroskoopista.



**Kuva 3: MEMS-gyroskoopin sisäinen rakenne. [21]**

Mittauksessa käytetään usein differentiaalista kapasitiivista siltaa. Sekä sisemmän, että ulomman kuoren kyljellä on vastakkaiset kampamaiset piikit. Nämä piikit ovat toisiinsa nähden limittäin. Sisä- ja ulkorungon piikkien välillä on kapasitanssia. Kun sisempi runko liikkuu, muuttuvat ulko- ja sisärungon piikkien väliset etäisyydet ja siten myös niiden välinen kapasitanssi.[22] Tämä kapasitanssin muutos voidaan muuttaa jännitteeksi, jonka jälkeen se viedään ADC:n (Analog to Digital Converter) läpi prosessorille. Vaihtoehtoisesti kapasitanssin muutos voidaan muuttaa suoraan digitaaliseksi CDC:n (Capacitance to Digital Converter) avulla.[23] Näitä kutsutaan usein nimellä VSG (Vibrating Structure Gyroscope) tai CVG (Coriolis Vibratory Gyroscope). Taulukkoon 1 on koottu eri gyroskooppien ominaisuuksia.

Taulukko 1. Gyroskooppityyppien eroja. [1]

Gyrotyyppi	Periaate	Tarkkuus	Hinta	Käyttökohteita
<b>Mekaaninen</b>	Kulmaliikemäärän säilyminen	Keskitaso	Kallis	Enimmäkseen käytöstä poistunut. Laivat, sukellusveneet, vanhat lentokoneet
<b>FOG</b>	Sagnac-ilmiö	Hyvä	Kallis	Ilmailu- ja avaruusala, Teollinen robotiikka, Laivat
<b>RLG</b>	Sagnac-ilmiö	Erittäin hyvä	Erittäin kallis	Ilmailu- ja avaruusala, puolustusteollisuus
<b>MEMS</b>	Coriolis-voima	Keskitaso/ Hyvä	Halpa	Puhelimet, dronet, autot, robotiikka.

## 2.2 Kiihtyvyyssanturin toimintaperiaate

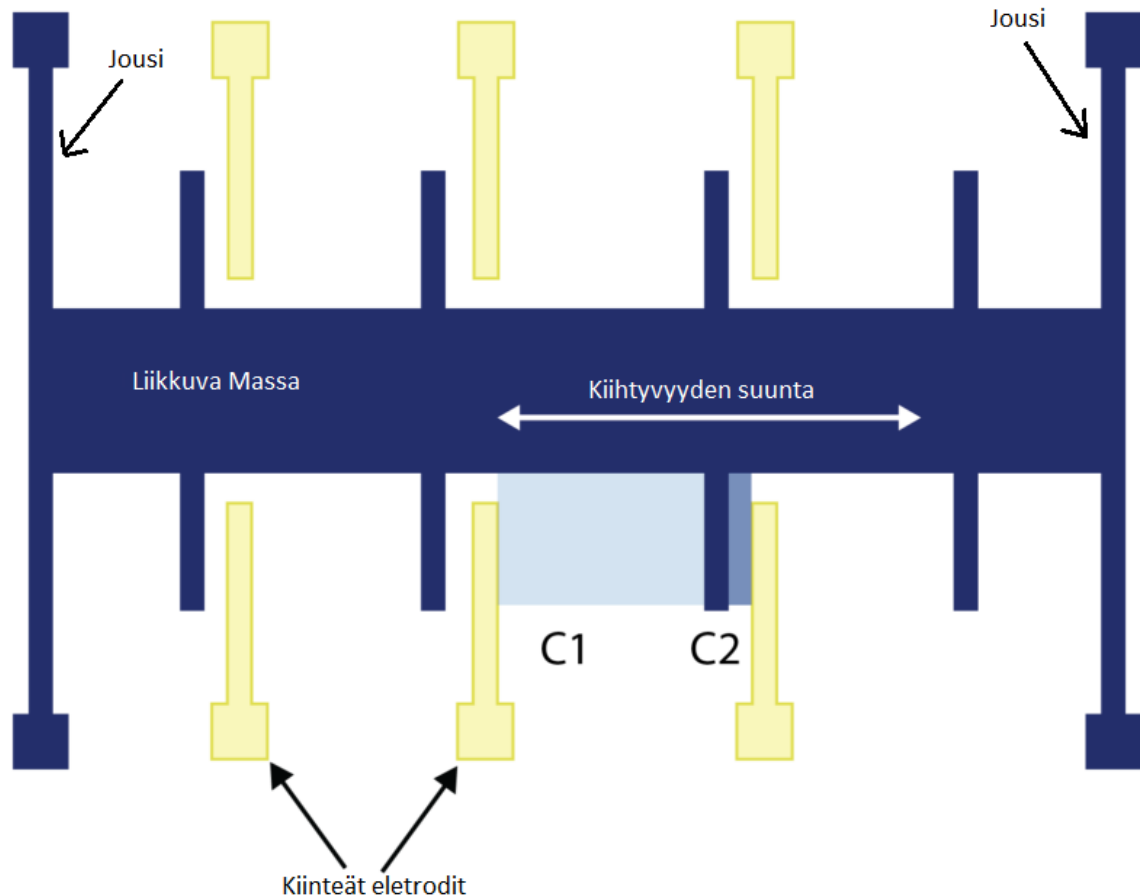
Kiihtyvyyssantureita käytetään nimensä mukaan kiihtyvyyden mittaamiseen. Kiihtyvyyssantureita on muutamia eri päätyyppiä, joista yleisimmät ovat mekaaniset kiihtyvyyssanturit, sekä MEMS-kiihtyvyyssanturit. Näillä molemmilla useita alatyyppejä. Kiihtyvyyssanturit ovat rakenteeltaan ja toimintaperiaateeltaan melko yksinkertaisia ja käyttävät toimintaansa samoja peruseriaatteita. Yksinkertaisimmillaan kiihtyvyyssantureissa on jousien ja vaimentimien varassa oleva massa. Kun laitteen ulkokuoreen kohdistuu kiihtyvyyttä, sisäinen massa haluaa pysyä paikoillaan Newtonin lakien mukaan. Massassa kiinni olevat jouset kuitenkin pakottavat sen liikkeeseen, jolloin jousien massaan kohdistama voima aiheuttaa jousissa yhtä suuren, mutta vastakkaisen voiman, joka puristaa liikkeen suunnasta katsottuna massan takana olevaa jouta kasaan samalla venyttäen massan edessä olevaa jouta. Kun massa ja jouset ovat tarkasti kalibroitu voidaan massan liikkeen, tai jousien venymisen perusteella laskea laitteen kiihtyvyys. Jotta kiihtyvyyden loputtua massa ei jäisi värähtelemään, on kiihtyvyyssanturin jousien rinnalla värähtelynvaimentimet. [13]

Jousien jousivakion ja massan suuruuden perusteella kiihtyvyyssanturin mittausaluetta voidaan säätää, jos käytetään erittäin jäykkiä jousia, voidaan mitata suuria kiihtyvyyksiä, mutta samalla tarkkuus pienien kiihtyvyyksien osalta kärsii, sillä pienellä kiihtyvyydellä massa ei juurikaan liiku. Toisaalta, jos halutaan mitata todella pieniä kiihtyvyyksiä, niin voidaan käyttää löysempiä jousia, jolloin jousen liike on mitattavissa jo pienellä

kiihtyvyydellä. Tämä kuitenkin rajoittaa suurinta mitattavaa kiihtyvyyttä, sillä massan liikerata on lyhyt, joten löysillä jousilla massa saattaa painautua rajoitinta vasten, minkä jälkeen kiihtyvyysanturi ei enää kykene mittaamaan sen suurempia kiihtyvyyksiä. Kun kiihtyvyys pienenee, irtoaa massa taas rajoittimesta ja mittaus jatkuu. Esimerkiksi kova isku kiihtyvyysanturiin saattaa aiheuttaa hetkellisen mittausalueen ylittymisen. Riippuen käyttökohteesta tämä saattaa olla isokin ongelma. Esimerkiksi jos kiihtyvyyden perusteella on laskettu nopeutta, tulee laskuun isoa virhettä, kun kaikista suurimmat kiihtyvyydet, jotka aiheuttaisivat suurimman nopeuden kasvun, leikkautuvat pois. Vastaavasti massan suuruus vaikuttaa samalla tavalla. Suuremmalla massalla saadaan parempi herkkyys pienille kiihtyvyyksille, mutta mitattava maksimiarvo jää pienemmäksi. Mekaaniset ja MEMS-kiihtyvyysanturit käyttävät juuri tätä toimintaperiaatetta. Etenkin MEMS-antureilla jousien ja massan rakenne vaihtelee paljon, mutta niiden peruseriaate on sama. Tällä tekniikalla saadaan yhden akselin mittauskyky. Jos halutaan mitata kolmella akselilla, voidaan samaan pakettiin sisällyttää kolme erillistä kiihtyvyysanturia eri orientaatioissa.[24]

Sekä mekaaniset, että MEMS-kiihtyvyysanturit yleensä suorittavat mittauksen sähköisesti, vaikka itse mekanismi olisi täysin mekaaninen. Se miten massan liike muunnetaan jännitteeksi, on yksi suurin muuttuja kiihtyvyysantureiden välillä. Lähes kaikki kiihtyvyysanturit käyttävät jonkinlaista massaa ja vaimennusta kiihtyvyyden tunnistamiseen. Yleisimmät tavat mekaanisen liikkeen mittaamiseen ovat kapasitiivinen, piezoelektrinen ja piezoresistiivinen. Monet MEMS-anturit käyttävät kapasitiivista mittausta ja esimerkiksi yllä olevassa kuvassa 4 on esitetty juuri tällainen kiihtyvyysanturi. [24]

Kapasitiivisella kiihtyvyysanturilla massa on kiinnitetty piikkejä. Vastaavasti kiihtyvyysanturin kuoreen on kiinnitetty sisäänpäin suuntautuneita kiinteitä levyjä, jotka sijoittuvat piikkien välille. Piikkien ja levyjen välille muodostuu kapasitanssi. Jokainen piikki muodostaa siis kaksi kondensaattoria, koska sen molemmilla puolilla on levy. Levossa nämä kapasitanssit ovat yhtä suuret, koska massa on keskellä, ja siten myös piikki on samalla etäisyydellä molemmista levyistä.



**Kuva 4: MEMS-kiihtyvyydsanturin sisäinen rakenne. [25]**

Kun massa liikkuu kiihtyvyydsanturin sisällä, aiheuttaa se näiden piikkien liikkeen levyjen välissä, jolloin levyjen etäisyys piikkeihin ei ole enää sama ja kapasitanssi muuttuu. Tätä kapasitanssia voidaan mitata ja sen muutoksen suuruus on suoraan verrannollinen kiihtyvyyteen. Mitä useampia piikkejä ja levyjä käytetään, sen tarkempi mittaustulos saadaan. [26]

Piezoelektrisessä mittauksessa kiihtyvyydsanturin sisäinen massa painaa, tai vetää piezoelektristä kristallia. Kun piezoelektriseen materiaaliin kohdistetaan painetta, aiheutuu sen rakenteessa pientä mekaanista joustoa, jolloin se luo varautuu sähköisesti. Kristallin varaus aiheuttaa siihen mitattavan jännitteen, jonka suuruus ja polarisaatio riippuu kiihtyvyyden suuruudesta ja suunnasta. Piezoelektrisellä kiihtyvyydsanturilla massan liike on hyvin pientä, eikä sitä haluta edes mitata, vaan mitattavana suurena on massan piezoelektriseen materiaaliin kohdistama voima. Massa pysyy siis lähes paikallaan, liikkuen vain piezoelektrisen materiaalin jouston verran. Massan liike ei siis muodostu mittausalueen rajoittavaksi tekijäksi. Piezoelektrisellä kiihtyvyydsanturilla mittausaluetta rajoittaa käytetty piezoelektrinen materiaali, jonka tuottama jännite voi

kasvaa vain tiettyyn rajaan asti. Tästä eteenpäin kovempi kiihtyvyyys, ja siten suurempi massan aiheuttama voima ei enää muuta mittaustulosta. [27]

Piezoresistiivisessä mittauksessa taas käytetään massan jousien paikalla piezoresistiivistä materiaalia, joka venyy tai painuu massan liikkeen takia. Piezoresistiivinen materiaali, on materiaali, jonka resistanssi muuttuu, kun siihen kohdistuu mekaanista stressiä. Massan liikkeen aiheuttamaa resistanssin muutosta voidaan sitten mitata, jolloin massan mekaaninen liike saadaan muutettua sähköiseksi signaaliksi. [28]

## 2.3 IMU-anturille oleelliset ominaisuudet

IMU-anturit ovat monimutkaisia laitteita ja niillä on paljon erilaisia ominaisuuksia. Tässä luvussa käsitellään niistä tämän työn kannalta tärkeimmät. Luvun tavoitteena on saada hyvä ymmärrys eri ominaisuuksien vaikutuksista IMU-anturin suorituskykyyn. Eri ominaisuuksien vaikutus ja niiden keskinäisten suhteiden ymmärtäminen on erittäin tärkeää datalehtiä lukiessa. IMU-antureilla on muitakin ominaisuuksia, joita ei tässä työssä mainita. Tässä työssä keskitytään erityisesti niihin ominaisuuksiin, joiden perusteella IMU-anturin valinta lopulta tehdään.

### 2.3.1 Mittausalue, herkkyys ja resoluutio

Inertiamittausyksikön mittausalue, herkkyys ja resoluutio ovat toisistaan riippuvaisia. IMU-anturin resoluutiolla tarkoitetaan yleensä ADC:n bittien määrää, mutta joidenkin valmistajien datalehdillä sillä tarkoitetaan myös anturin ulostulon resoluutiota. Nämä kaksi ovat toisistaan riippuvaisia, sillä ADC:n resoluutio suoraan määrittää, että mikä on pienin mahdollinen ulostulon muutos, eli ulostulon resoluutio. [29]

IMU-anturin mittausalue ja herkkyys ovat toisistaan riippuvaisia. Mittausalue tarkoittaa käytännössä anturin maksimaalista toiminta-aluetta. Mitä suurempi anturin mittausalue on, sitä korkeampia arvoja sillä voidaan mitata. IMU-anturin tapauksessa sekä gyroskoopille, että kiihtyvyyssanturille ilmoitetaan oma mittausalue. Jos anturin kiihtyvyyss tai pyörimisnopeus ovat anturin mittausalueita korkeampi, näyttää anturi mittausarvoksi maksimiarvon, vaikka se ei enää vastaakaan todellista arvoa. Tyypillisesti MEMS-kiihtyvyyssanturin mittausalueet ovat välillä  $\pm 2 \text{ g} - \pm 50 \text{ g}$ . Kiihtyvyyssantureiden datalehdillä mittausalue ja herkkyys saatetaan joskus antaa myös yksikössä  $m/s^2$ . MEMS-gyroskoopilla taas mittausalueet ovat tyypillisesti  $\pm 125 \text{ }^\circ/s - \pm 2000 \text{ }^\circ/s$ . Mittausalueet voivat kuitenkin olla myös suurempia tai pienempiä. [30]

Anturin herkkyys kertoo, kuinka paljon anturin ulostulo muuttuu, kun mitattavan suureen arvo muuttuu. Usein herkkyys on annettu gyroskoopille yksikössä LSB/°/s ja kiihtyvyyssanturille yksikössä LSB/g tai LSB/m/s<sup>2</sup>, jossa LSB tarkoittaa Least significant bit. Jos herkkyys on annettu yksikössä LSB/°/s, niin käytännössä se kertoo, että kuinka monta digitaalista askelta vastaa yhden °/s:n muutosta pyörimisnopeudessa. Herkkyyteen vaikuttaa mittausalueen lisäksi resoluutio. Jos anturin ADC:llä on suurempi resoluutio, niin ADC:n ulostulolla on enemmän eri tasoja, jolloin suurempi määrä arvoja on jaettu samalle mittausalueelle. Tällöin herkkyys on korkeampi. Kaava 1 kuvaa näiden suureiden välistä suhdetta. Anturin herkkyydestä näkee joskus puhuttavan myös resoluutiona, jolloin se on saatettu ilmoittaa herkkyyden käännteislukuna, eli gyroskoopille muodossa °/s/LSB ja kiihtyvyyssanturille muodossa g/LSB tai m/2<sup>2</sup>/LSB. [30]

$$\text{Herkkyyys} = \frac{\text{Mittausalue}}{2^N} \quad (1)$$

Jossa N on ADC:n bittien määrä. Suureiden välistä suhdetta on helpompi havainnollistaa yksinkertaisella esimerkillä. Kuvitellaan, että jokin anturi käyttää 2-bittistä ADC:tä, jolloin ADC kykenee antamaan ulostuloon 2<sup>2</sup>, eli neljä eri arvoa. Tällöin kaikki anturin mitaamat arvot pyörivät johonkin näistä neljästä arvosta. Jos anturin mittausalue on vaikka ±10 °/s, voidaan anturin paras resoluutio laskea jakamalla koko mittausalue, eli 20 °/s, ADC:n eri ulostulotasojen määrällä, jolloin saadaan ulostulon resoluutioksi 5 °/s. Käytännössä 5 °/s resoluutio tarkoittaa, että anturin antama ulostulo muuttuu 5 °/s:n askelin. Tämän esimerkin mukainen anturi olisi todella huono, koska sen surkea resoluutio pakottaa ADC:n pyöristämään liian paljon. Anturi ei pystyisi erottamaan esimerkiksi 1 °/s ja 2 °/s välistä eroa, sillä ne pyörityisivät samaan arvoon.

Tyypillinen ADC:n resoluutio on noin 16-bittiä. Näin suurella ADC:n resoluutiolla ulostulon resoluutio menee niin pieneksi, että anturin epäideaalisuuksista ja ympäristöstä johtuva kohina aiheuttaa suuremman virheen mitaustulokseen. Yksittäisen näytteen kohdalla ADC:n pyöristys vaikuttaa edelleen, mutta missään käyttökohteessa ei oteta yhtä näytettä vaan mitausta jatketaan yleensä useiden satojen näytteiden ajan, jolloin pyöristyksen vaikutus signaalin kohinaan. Joillain antureilla voi olla jopa 32-bittinen ADC, mutta verrattuna 16-bittiseen anturiin, sillä ei saavuteta oikeastaan mitään etua, sillä anturin kohina on aina niin suurta, että 16-bittiä on riittävä.

Resoluution, herkkyyden ja mittausalueen välillä on siis usein tehtävä kompromissi. Teoriassa ADC:n resoluutiota voitaisiin kasvattaa todella suureksi, jolloin mittausaluetta voitaisiin kasvattaa isommaksi ilman, että herkkyys heikkenisi. Tällöin anturin fyysisistä ominaisuuksista muodostuu rajoittavat tekijä. Usein anturit voidaan konfiguroida

mittamaan erikokoisia mittausalueita, jolloin pienemille kiihtyvyyksille ja kulmanopeuksille saadaan parempi herkkyys. [31]

### 2.3.2 Virheet

Inertiamittausyksiköille ei ilmoiteta kokonaisvirhettä, sillä niiden virhe koostuu monesta eri virhelähteestä, ja kokonaisvirheen yksiselitteinen määrittäminen on haastavaa. IMU-antureiden virheet voidaan karkeasti lajitella kahteen eri kategoriaan, jatkuviin ja satunnaisiin.

Jatkuvia virheitä ovat esimerkiksi offset virhe. Offset tarkoittaa anturin vakiovirhettä, joka esiintyy kaikissa mitatuissa näytteissä. Vakiovirheestä puhutaan joskus myös nimellä bias. Käytännössä anturin mittausarvossa on poikkeama todelliseen arvoon. Yksinkertaisimmillaan offsetin voi kuvitella olevan todelliseen arvoon lisätty vakiosumma. Riippuen tilanteesta ja olosuhteista offset ei kuitenkaan ole aina täysin vakio, esimerkiksi lämpötilan muutos voi vaikuttaa offsetin arvoon. Tätä kutsutaan datalehdillä usein nimellä Error over Temperature. Se on myös vakiovirhe, sillä seuraa tiettyä tunnettua käyrää. Käyrä on erilainen jokaisella anturiyksiköllä, mikä tarkoittaa, että anturit joudutaan kalibroimaan lämpötilan suhteen. Kun lämpötilamittaukset on suoritettu, voidaan anturia käytettäessä seurata sen lämpötilaa ja jatkuvasti korjata offsetkorjauksen arvoa. Offsetkorjaus tapahtuu vähentämällä jokaisesta otetusta näytteestä offsetin suuruus. Tämä voidaan tehdä anturin ulkopuoleisella prosessorilla. Offsetin suuruus taas saadaan laskemalla anturin mittausdatasta keskiarvo. Mittauksen aikana anturin on oltava täydellisen paikallaan ja sen tarkka orientaatio on tunnettava, helpoiten tämä onnistuu asettamalla anturin z-akseli suoraan painovoimavektorin suuntaiseksi. [32]

Muita vakiovirheitä ovat muun muassa cross-axis alignment -virhe, joka tarkoittaa käytännössä anturin mittausakselin kanssa erisuuntaisen liikkeen vaikutusta mittaustulokseen. Eli esimerkiksi x-akselin mittaustulokseen vaikuttaa myös y-akselin suuntainen muutos. Tämä vaikutus on kuitenkin hyvin pieni, minkä lisäksi se on jokaiselle anturille vakio. Vastaavasti gyroskoopin toimintaan vaikuttaa erisuuntaisen kulmanopeuden lisäksi myös kiihtyvyys. Jos anturilla on kiihtyvyyttä, aiheuttaa se pientä virhettä gyroskoopin kulmanopeusmittaukseen. Tätä virhettä kutsutaan datalehdillä usein nimellä Linear acceleration effect. Epälineaarisuusvirhe (Nonlinearity) kertoo anturin mittauksen epälineaarisuudesta. Käytännössä se tarkoittaa, että anturin mittausarvo ei kasva täysin lineaarisesti suhteessa todelliseen kulmanopeuteen tai kiihtyvyyteen. Edellä mainitut virheet ovat lähtökohtaisesti hyvin vakioita ja ne voidaan jossain määrin kalibroida pois. [32]

Bias instability kertoo, että kuinka paljon anturin offset muuttuu ajan kuluessa. Offsetin muutos on tarkan mittauksen kannalta todella suuri ongelma, sillä kalibroidut arvot eivät enää riitäkään korjaamaan virhettä, jolloin mittaustulos alkaa karkaamaan todellisesta, vaikka alkuperäinen kalibrointi olisi suoritettu laadukkaasti ja tarkasti. Bias instability voidaan kuitenkin mitata ja siten sekin voidaan huomioida kalibroinnissa. Tätä ongelmaa voidaan myös vältellä kalibroimalla anturi uudestaan ja uudestaan myös käytön aikana. Esimerkiksi, jos anturin datasta nähdään, että se on paikallaan, voidaan kalibrointi suorittaa uudestaan ja täten bias instabilityn aiheuttama offsetin muutos pystytään nollaamaan.

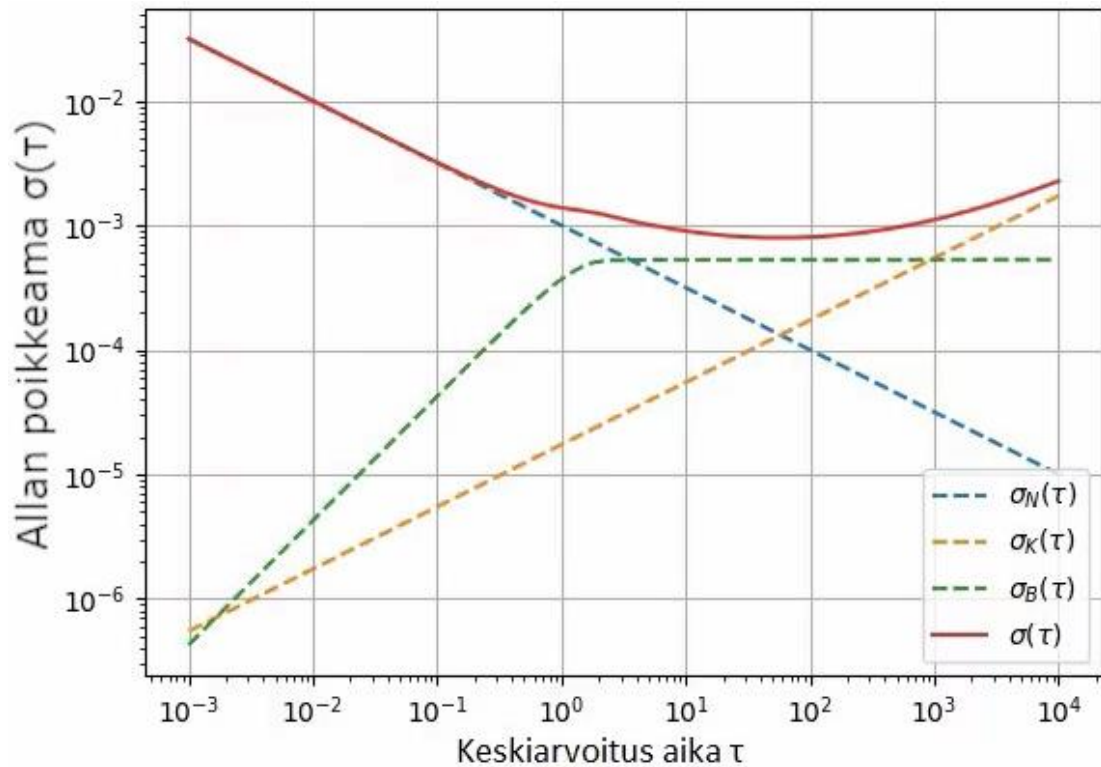
Satunnaisesta virheestä esimerkkinä on RW (Random Walk), jonka suuruutta ja suuntaa ei voida tietää. IMU-anturilla RW-ilmiötä esiintyy sekä gyroskoopilla, että kiihtyvyyssanturilla. Gyroskoopin tapauksessa, sitä kutsutaan usein nimellä ARW (Angular Random Walk). Kiihtyvyyssantureiden yhteydessä siitä puhutaan usein nimellä VRW (Velocity Random Walk). Satunnaiset virheet aiheuttavat anturin arvon vaeltamisen todellisesta samalla tavalla kuin esimerkiksi bias instabilityn aiheuttama offsetin muutos. RW:n suuruus on mitattavissa, mutta sitä ei voida kuitenkaan tarkasti arvioida. RW:n arvo kertoo myös käytännössä anturin kohinan määrän. Mitä suurempi RW on, sitä suurempi on anturin jatkuva kohina. Eräs toinen tapa ilmoittaa sama asia, on kohinatiheys ja RMS-kohina (Root Mean Square). Kohinatiheys, Random Walk ja RMS-kohina voidaan laskea toistensa perusteella, jos tiedetään anturin kaistanleveys. Kohina on IMU-antureiden virheistä ehkä kaikista ongelmallisim, sillä sen kompensoiminen ohjelmistolla ei ole satunnaisuuden vuoksi mahdollista. Kohina aiheuttaa yksittäisten näytteiden kohdalla suurta virhettä. Tämä näkyy anturin mittausdatassa arvojen vaihteluna. Isompi kohina aiheuttaa suuremman vaihteluvälin. Käytännössä siis yksittäinen mittaus ei ole itsellään kovin hyödyllinen. Tämän takia tarkan tuloksen saamiseksi joudutaan ottamaan aina useita näytteitä, jotta niiden keskiarvon perusteella voidaan tehdä arvio todellisesta arvosta. Kohina aiheuttaa myös ongelmia anturin mittauksen toistettavuuden suhteen. Satunnaisen kohinan aiheuttama virhe vaihtelee eri mittausten välillä, joten useamman identtisen mittauksen tuloksissa on aina pientä eroa. Kohina on yksi tärkeimmistä IMU-anturin tarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä. [32]

Kaikista lähimmäksi yhtä kattavaa kokonaisvirhettä päästään käyttämällä Allan-varianssia (Allan Variance, AVAR), tai Allan-poikkeamaa (Allan Deviation, ADEV). AVAR on ADEV:n neliöjuuri. ADEV yhdistää anturin kaikki virheet yhteen kuvaajaan. Tästä kuvaajasta voidaan sitten poimia eri kohdista arvoja sen perusteella, mikä on käyttökohteen kannalta tärkeää. Kuvaajia voidaan myös katsoa kokonaisuutena, mikä

kertoo anturin yleisestä virhetasosta. ADEV on laskettu mittaamalla anturin virheiden suuruus eri keskiarvoitus-ajoilla. Jonka jälkeen kaikkien eri virheiden suuruudet summataan toisiinsa. Näin saadaan yksi piste kuvaajalle. Tämä sama prosessi toistetaan muille keskiarvoitus-ajoille, jolloin saadaan jatkuva kuvaaja, josta voidaan nähdä anturin virheen määrä eri käyttöajoilla. Kuvaajan x-akselilla esitetään keskiarvoitus-ajan pituus, ja y-akselilla esitetään kokonaisvirhe. [33]

Tyypillisesti hyvin lyhyillä keskiarvoitus-ajoilla anturin virhe on suhteessa suurempaa, koska kohinan vaikutus on suuri. Kun otetaan pidempi keskiarvoitus-aika, kohinan vaikutus pienenee, mutta bias instabilityn vaikutus, ei ole vielä merkittävä, joten kokonaisvirheen määrä yleensä laskee hieman näillä keskipitkillä keskiarvoitus-ajoilla. Kun aikaa pidennetään vielä lisää, alkaa bias instabilityn vaikutus näkyä ja kokonaisvirheen määrä lähtee taas kasvuun. Allan varianssin kuvaaja rakennetaan siis ottamalla eri virheiden suuruudet eri keskiarvoituksen pituuksilla ja muodostamalla niistä kuvaaja, jonka jälkeen näiden kuvaajien summasta muodostuu lopullinen Allan-poikkeama. Allan poikkeamasta voidaan laskea Allan varianssi. Kuvassa 5 on esitetty tyypillisen Allan poikkeaman kuvaaja, sekä osa niistä virhekomponenteista, joista se koostuu. [34]

Joskus IMU-antureiden datalehdillä on suoraan annettu AVAR tai ADEV kuvaaja, mutta sitä ei ole mitenkään standardisoitu, joten joillain datalehdillä on AVER, joillain ADEV ja joillain kuvaajaa ei ole ollenkaan. Allan-poikkeaman perusteella voidaan myös laskea yksittäisiä arvoja, ja jotkut valmistajat käyttävät näitä datalehdillä kuvaajien sijaan. Kahden IMU-anturin vertailu kuvaajien perusteella on hieman hankalaa, jos toinen on annettu varianssina ja toinen poikkeamana. Tällöin jompikumpi kuvaajista on manuaalisesti muunnettava toiseen muotoon. Jos kahdelta IMU-anturilta saadaan ADEV-kuvaajat, voidaan niiden virheen suuruutta verrata toisiinsa hyvin kattavasti. Jokaiselle IMU-anturin akselille on kuitenkin laskettava erillinen ADEV-kuvaaja, joten tälläkään tekniikalla ei saada yhtä kokonaisvirheen arvoa.



**KUVA 5: Tyypillinen Allan poikkeaman kuvaaja. Punainen käyrä kuvaa Allan poikkeama, katkoviivoilla on esitetty yksittäiset virheet. Allan poikkeama on näiden virheiden summa. [34]**

IMU-antureilla joudutaan siis aina vertailemaan useita eri parametrejä, jotta saadaan kokonaiskuva anturin suorituskyvystä, sekä sen eri virheiden vaikutuksista. Tämä tekee antureiden vertailusta jossain määrin haastavaa ja valintaprosessissa on tiedettävä mihin ominaisuuksiin halutaan panostaa, jotta anturivalinta tukee käyttökohteen vaatimuksia.

## 2.4 Signaalinkäsittely

Signaalinkäsittelyllä ja suodatuksella voidaan parantaa anturin datan käyttökelpoisuutta ja kompensoida anturin epäideaalisuuksia. Yleensä signaalin suodatus ja käsittely tapahtuu anturin ulkopuolisella prosessorilla, jossa käytetään tekniikoita, kuten Kalman-suodinta, desimaatiota, bias kompensointia ja tekoälyä. IMU-anturilla voi kuitenkin olla oma sisäinen prosessori, jonka avulla se voi esimerkiksi kalibroida itsensä tai tunnistaa liikettä. Monien signaalinkäsittelytekniikoiden tarkoituksena on kompensoida edellisessä luvussa mainittujen virhelähteiden aiheuttamia virheitä. [35]

Desimaatiossa osa näytteistä poistetaan, jolloin datapisteitä jää vähemmän ja kohinan määrää saadaan pienennettyä, samalla keskiarvoitusta saadaan nopeutettua.

Keskiarvoituksessa voidaan käyttää liukuvaa keskiarvoa, jossa esimerkiksi viimeiset tuhat näytettä otetaan huomioon ja jokainen uusi näyte tulee aina vanhimman tilalle. Tällöin yhden näytteen vaikutus jää pieneksi. Keskiarvoitus toimii siis vähän kuten alipäästösuodin, hävittämällä kaikista terävimmät piikit. Keskiarvoituksella saadaan hyvä kuva todellisesta arvosta, sillä siinä suurin kohinan on poistettu. Säättämällä liukuman pituutta, eli sitä kuinka monta näytettä otetaan huomioon liukuvaan keskiarvoon, voidaan sitä, kuinka nopeasti liukuva keskiarvo lähtee reagoimaan arvojen muutokseen. [36]

Bias kompensoinnilla, tai korjauksella, tarkoitetaan anturin biakseen tai offsetin poistamista, tämä voidaan tehdä esimerkiksi mittaamalla anturin ulostulon arvoa sen ollessa paikallaan, jolloin sen arvojen kuuluisi olla nolla. Tämä arvo voidaan tallentaa ja jatkossa kyseinen arvo voidaan vähentää, tai lisätä, anturin ulostulon arvoon. Esimerkiksi, jos anturin mittaustulos paikallaan ollessaan on  $0,1 \text{ }^\circ/\text{s}$ , voidaan kaikista mittaustuloksista vähentää  $0,1 \text{ }^\circ/\text{s}$ . Tällöin anturin ollessa paikallaan, saadaan mittaustulokseksi nolla. Offset kuitenkin voi muuttua olosuhteiden, etenkin lämpötilan, vaikutuksesta, mikä tekee bias korjauksesta hieman haastavampaa. IMU-antureilla lämpötilan vaikutus biakseen on kuitenkin anturille vakio, eli jos se on kerran mitattu, voidaan samoja offset arvoja käyttää myös tulevaisuuden lämpötilan muutoksien kompensoinnissa. Lämpötilan suhteen offset arvot voidaan mitata esimerkiksi käyttämällä sääkaappia, jossa anturin ympäristön lämpötilaa päästään muuttamaan. Anturi laitetaan mittaamaan, jonka jälkeen seurataan anturin lämpötila-anturin arvoa ja verrataan sitä liukuvaan keskiarvoon. Tämä liukuva keskiarvo kertoo offset-arvon, ja kun se tallennetaan lämpötilatiedon kanssa, saadaan jatkuva käyrä offset-arvoille eri lämpötiloissa. Tämän offsetkäyrän perusteella bias korjaus voidaan tehdä vielä tarkemmin olosuhteista riippumatta. [37]

Paremmen tarkkuuden saavuttamiseksi järjestelmässä voidaan käyttää useampia IMU-antureita. Tällöin usean anturin mittaustuloksia voidaan keskiarvottaa. Tämä vaatii tietysti enemmän laskemista, etenkin jos IMU-anturit ovat sijainniltaan kaukana toisistaan, jolloin etenkin niiden kiihtyvyyssarvoissa voi olla suuria eroja. Jos IMU-antureita on useita ja ne ovat kaikki kalibroitu oikein, voidaan yksittäisen anturin virhettä paikata muiden avulla. [38]

Antureiden datan lukemisessa voidaan käyttää myös erilaisia algoritmeja tai tekoälyä. Usein algoritmeja käytetään liikkeentunnistukseen. Esimerkiksi älypuhelimilla on usein ominaisuus, jolla näyttö voidaan käynnistää, kun puhelin otetaan käteen. Tässä tapauksessa liikkeentunnistusalgoritmi on melko yksinkertainen, sillä liikkeen suunnalla ei ole merkitystä, vaan voidaan seurata pelkästään kokonaiskiihtyvyyttä. Vastaavasti IMU-antureita voidaan käyttää myös askelten laskemisessa. Askelten laskeminen on

yleinen ominaisuus älypuhelimissa ja –kelloissa, sekä muissa vastaavissa kuntoiluun tarkoitetuissa laitteissa. Askelten laskeminen ja tunnistus on nostoa hieman monimutkaisempi liike, sillä käytössä puhelin liikkuu ja tärisee muutenkin. IMU-antureilla voidaan kuitenkin helposti tunnistaa liikkeen ääripäät ja esimerkiksi kantapään osuminen maahan tuottaa helposti havaittavan piikin kiihtyvyyteen. Algoritmien avulla voidaan laskea muun muassa askelten pituuksia ja symmetrisyyksiä. [39]

Yksi käytetyimmistä algoritmeista on nimeltään Kalman-suodin. Sitä käytetään gyroskoopin ja kiihtyvyyssanturin datan yhdistämisessä ja anturin orientaation laskemisessa. Kalman-suodin arvioi järjestelmän tilaa mittaustulosten perustella ja päivittää arviota aina uuden mittausdatan mukaan. Kalman-suodin siis seuraa ja päivittää järjestelmän tilaa jatkuvasti. Kalman-suotimen suurin hyöty on sen kyky huomioida dataa useista eri lähteistä, jolloin ylimääräisen kohinan vaikutus saadaan minimoitua. IMU-anturin tapauksessa sillä pystytään seuraamaan anturin asentoa ja liikettä silloinkin, kun anturi kiihtyy ja kääntyy samaan aikaan tai kun anturin liike ja kääntyminen on erisuuntaista suhteessa anturin akseleihin.[40] Yksinään gyroskoopin tai kiihtyvyyssanturin data ei anna minkäänlaista kuvaa anturin kokonaisliikkeestä. Kuvitellaan, että anturi kiihtyy suoralla radalla ja pyörii samaan aikaan. Tällöin kiihtyvyyssanturin datasta voidaan nähdä aluksi, että se kiihtyy esimerkiksi x-akselin suuntaan. Kun anturi on kääntynyt 90 astetta, on kiihtyvyys y-akselin suuntaan. Kun kääntöä jatketaan, mittaa kiihtyvyyssanturi liikettä x-akselin negatiiviseen suuntaan ja niin edelleen. Kiihtyvyyssanturin näkökulmasta anturi liikkuisi ympyräradalla. Vastaavasti gyroskoopin näkökulmasta anturi vain pyörii paikallaan. Koska IMU-antureita käyttävät laitteet ovat yleensä täysin vapaassa liikkeessä, eivätkä kulje mitään rataa pitkin, on yhden anturin datasta hyvin vaikea päätellä kokonaisliikettä. Hyödyllistä tietoa saadaan vasta sitten, kun molempien antureiden data yhdistetään.

IMU-anturit mittaavat suoraan kulmanopeutta ja kiihtyvyyttä. Usein halutaan kuitenkin seurata anturin kulman muutosta, nopeutta tai liikettä. Joskus myös kulmakiihtyvyys saattaa olla tärkeä. Näissä tapauksissa kulmanopeudesta joudutaan laskemaan kulmanmuutos ja kulmakiihtyvyys. Tämä tapahtuu integroimalla tai derivoimalla signaali. Tämä voidaan aloittaa heti mittauksen alusta ja kulman muutosta voidaan päivittää ja seurata koko ajan. Kulmanmuutoksen saamiseksi kulmanopeus pitää integroida, kun taas kulmakiihtyvyyden saamiseksi se on derivoitava. Vastaavasti kiihtyvyyssanturilla kiihtyvyydestä voidaan ensin integroida nopeus, jonka jälkeen nopeudesta voidaan integroida kuljettu matka.

Kiihtyvyyssanturit mittaavat yleensä myös painovoiman aiheuttaman kiihtyvyyden, joten mittausdatan perusteella voidaan nähdä painovoiman suunta. Kun tiedetään

painovoiman suuruus, voidaan laskea anturin kallistuskulma suhteessa painovoimaan. Eli, jos anturi on kallistunut x-akselin suuntaan, on painovoiman aiheuttama kiihtyvyys jakautunut kiihtyvyyssanturin x- ja z-akselien suuntaisiin komponentteihin. Näiden suhteesta voidaan laskea tarkka kallistuskulma. Kallistuskulman on mahdollista laskea vain silloin kuin anturi on muuten paikallaan. Jos anturi kiihtyy samalla esimerkiksi x-akselin suuntaan, ei akseleiden välinen suhde ole enää painovoimaa vastaava. Laskemalla anturin kokonaiskiihtyvyys voidaan nähdä, onko anturi paikallaan vai ei, mutta liikkeessä olevasta anturista ei pystytä suoraan laskemaan kallistuskulmaa pelkän kiihtyvyyssanturin datasta. Tällöin joudutaan käyttämään hyödyksi gyroskoopin kulmanopeudesta integroitua kulmanmuutosta tai Kalman-suodinta.

## 3. ANTURIN VALINTA

Tässä luvussa tarkastellaan markkinoilla olevia IMU-antureita. Luvun tavoitteena on valita lopullinen anturi työn suunnitteluvaiheeseen. Tämä toteutetaan valitsemalla datalehtien perusteella paras anturi, jonka jälkeen sille tehdään muutamia testejä, joiden avulla sitä verrataan nykyisin käytössä olevaan anturiin. Näiden testien perusteella tehdään sitten lopullinen päätös anturista. Anturille tärkeimpiä kriteerejä ovat tarkkuus, hinta, fyysinen koko, sekä saatavuus.

### 3.1 Anturin vaatimukset

Anturille on useita vaatimuksia, mutta suurin osa niistä on suhteellisia, eikä niihin ole tarkkaa absoluuttista minimi- tai maksimiarvoa määritettynä. Tavoitteena ei ole löytää minimivaatimukset täyttävää anturia, vaan anturi, joka on tähän käyttökohteeseen mahdollisimman hyvä. Siksi tietyistä ominaisuuksista voidaan joustaa, jotta käyttökohteen kannalta tärkeimmät ominaisuudet ovat mahdollisimman hyvät. Valinta on kompromissi, joten yhtä täydellisen pätevää vaatimusta ei ole mahdollista asettaa. Ainoana selkeänä vaatimuksena on anturin koko ja paketti, anturin on mahduttava piirilevylle, ja siinä on oltava tarvittavat rajapinnat piirilevylle asennukseen, joten lähtökohtaisesti haetaan IC (Integrated Circuit) -komponenttia, mutta jotkin moduulityyppiset ratkaisut saattavat myös toimia. Yhtenä tarkkana minimivaatimuksena on anturin shokinkesto. Sen on oltava minimissään noin 2000 g, mutta siitä ylöspäin sen suuruudella ei ole merkitystä.

Tärkeimpänä vaatimuksena on gyroskoopin mahdollisimman pieni kohina. Tarkkuus on yksi tärkeimmistä vaatimuksista tässä käyttökohteessa, joten siihen kiinnitetään erityistä huomiota valintaprosessissa. Resoluution on oltava niin korkea, että se ei muodostu rajoittavaksi tekijäksi, mutta ylimääräistä herkkyyttä ei tarvita. Kiihtyvyyssanturiin ei kiinnitetä niin suurta huomiota, sillä gyroskooppi on tässä käytötapauksessa tärkeämpi.

Hinnalle ei ole suoraan määritetty vaatimuksia, mutta se otetaan huomioon antureita vertaillessa. Jos antureilla on toisiaan vastaava suorituskyky ja ne ovat muilta ominaisuuksiltaan potentiaalisia vaihtoehtoja, niin vasta silloin hinnasta muodostuu ratkaiseva tekijä. Tässä kartoituksessa haetaan ensisijaisesti anturia, joka on parempi kuin tällä hetkellä käytössä oleva anturi. Jos tällaista ei löydy, niin valitaan anturiksi nykyisin käytössä oleva ja suunnitellaan sille uusi piirikortti.

## 3.2 Markkinoilla olevia vaihtoehtoja

Tähän alalukuun on poimittu muutamia anturivaihtoehtoja. Alaluvussa vertaillaan niiden ominaisuuksia, sekä soveltuvuutta tähän käyttökohteeseen. Tärkeimpinä kriteereinä ovat anturin gyroskoopin tarkkuus ja toistettavuus, sekä virheen vähäisyys. Tämän lisäksi myös anturin IC-paketilla on vaikutusta päätökseen. Hinta on myös vaikuttava tekijä.

Tähän alustavaan katsaukseen on valittu hieman erityyppisiä antureita, vaikka ne eivät suoraan vastaisikaan anturille asetettuja vaatimuksia. Tämän perusteella kuitenkin valitaan anturit tarkempaa vertailua varten. Lopulliseen valintaan vaikuttaa kuitenkin kokonaisvirheen määrä ja fyysinen koko. Tähän poimituista antureista osa on selvästi vaatimusten ulkopuolella, mutta paremman markkinoiden kokonaiskuvan saamiseksi niitäkin on tarkasteltu nopeasti. Antureiden vertailusta tekee erityisen haastavaa IMU-antureiden monimutkaiset ja eri valmistajien välillä toisistaan poikkeavat datalehdet. Valmistajat eivät esimerkiksi listaa kaikkia anturin virheitä datalehdelle, mikä tekee antureiden suorasta vertaamisesta toisiinsa lähes mahdotonta.

Työtä varten kartoitettiin myös erillisiä kiihtyvyyssantureita ja gyroskooppeja. Jos markkinoilta olisi löytynyt pieni MEMS-gyroskooppi, jonka suorituskyky on selvästi parempi kuin IMU-antureihin integroiduilla gyroskoopeilla, olisi se ollut myös sopiva vaihtoehto. Tällöin myös erillinen kiihtyvyyssanturi olisi pitänyt valita. Kuitenkaan kartoituksessa ei löytynyt merkittävästi parempaa gyroskoppia, joten tämän luvun vertailu keskittyy pelkästään IMU-antureihin. Alla on taulukot 2 ja 3 joihin on koottu IMU-anturi kartoituksessa löytyneitä antureita. Taulukkoon 2 näille antureille on haettu datalehdeltä ARW ja VRW -arvot, joiden avulla pystytään vertailemaan antureiden yleisiä kohinatasoja. Myös bias-instability on otettu taulukkoon mukaan, jotta voidaan arvioida anturin pitkän aikavälin vakautta. Näiden lisäksi taulukossa esitellään vielä antureiden mittausalueet, eli range. Taulukossa 3 taas on esitelty anturin fyysiset mitat, paketin tyyppi, toimintalämpötilat, anturin käyttämä protokolla, shokinkesto, sekä hinta. Kuten aiemmin on mainittu, fyysiset mitat ovat tärkeä ominaisuus anturivalinnan kannalta. Paketin tyyppin suhteen eniten kiinnostaa, onko anturi IC-paketissa vai moduulissa, mutta IC-paketin tyyppillä ei ole sen suurempaa vaikutusta valintaan. Lämpötilojen suhteen halutaan tietysti mahdollisimman leveä toimintaikkuna, mutta se ei ole tässä tapauksessa kriittinen tekijä.

Taulukko 2. Anturivaihtoehtojen mittausalueet, satunnaisvaellus ja bias instability. \*Arvoa ei annettu datalehdellä, joten arvo laskettiin kohinatiheyden tai kokonais RMS kohinan perusteella. [4], [31], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54]

Anturi	Valmistaja	Gyro Range (°/s)	Accel Range (g)	ARW (°/√hr)	VRW (m/s/√hr)	Gyro Bias Instability (°/hr)	Accel Bias Instability (mg)
<b>ADIS16507</b>	Analog Devices	±125/500/2000	±40	0,13	0,039	2,3	0,013
<b>ADIS16475</b>	Analog Devices	±125/500/2000	±8	0,15	0,012	2	0,036
<b>ADIS16486</b>	Analog Devices	±450	±18	0,25	0,029	5,3	0,07
<b>ADIS16495</b>	Analog Devices	±125/450/2000	±8	0,09	0,008	0,8	0,0032
<b>BMI330</b>	Bosch Sensortec	±125/500/2000	±2/4/8/16	0,42*	0,106*	-	-
<b>ICM-42688-P</b>	TDK InvenSense	±15,6/2000	±2/4/8/16	0,168*	0,038*	-	-
<b>ICM-40609-D</b>	TDK InvenSense	±15,6/2000	±4/8/16/32	0,27*	0,059*	-	-
<b>IIM-46234</b>	TDK InvenSense	±250/480	±2/4/8	0,07	0,011	1,9	0,005
<b>ICM-20690</b>	TDK InvenSense	±31,25/2000	±2/4/8/16	0,24*	0,059*	-	-
<b>SCH16T-K10</b>	Murata	±1000/5242	±1,53/26	0,26	0,03	2	0,15
<b>SCH16T-K20</b>	Murata	±62,5/300	±2,04/11,2	0,015	0,017	0,3	-
<b>SCH1633-D01</b>	Murata	±300	±8	0,03	0,032	0,4	0,022
<b>STIM318</b>	Safran	±400	±5	0,15	0,008	0,3	0,002
<b>DMU11</b>	Silicon Sensing	±300	±10	0,4	0,05	10	0,05
<b>NAVCHIP3</b>	Thales	±2000	±16	0,18	0,02	4	0,006
<b>IMU381ZA</b>	ACEINNA	±200/400	±4/8	0,3	0,05	6	0,02
<b>VN-110</b>	VectorNav	±490/2000	±15	0,08	0,024	0,6	0,01

Taulukko 3. Anturivaihtoehtojen koko, paketti, lämpötila-alue, protokolla, shokinkesto ja hinta. Hinnat on tarkistettu 22.10.2025, osalle tuotteista hinta on saatavilla vain tarjouspyynnöllä ja osa tuotteista ovat vanhentuneita, joten niille ei ole enää listattua hintaa. [4], [31], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54]

Anturi	Koko (mm)	Paketti	Toiminta- Lämpötila (°C)	Protokolla	Shokin- kesto (g)	Hinta (€)
ADIS16507	15×15×5	100-ball BGA	-40 +105	SPI	2000	615,50
ADIS16475	11×15×11	44-ball BGA	-40 +105	SPI	2000	775,75
ADIS16486	47×44×14	Moduuli	-40 +105	SPI	2000	-
ADIS16495	47×44×14	Moduuli	-40 +105	SPI	1500	2703,32
BMI330	2,5×3×0,83	LGA	-40 +105	SPI, I <sup>2</sup> C, I3C	20 000	3,86
ICM-42688-P	2,5×3×0,9	14-pin LGA	-40 +85	SPI, I <sup>2</sup> C, I3C	20 000	4,09
ICM-40609-D	3×3×0,91	24-pin LGA	-40 +85	SPI, I <sup>2</sup> C	20 000	3,69
IIM-46234	23×23×8,5	Moduuli	-40 +85	SPI, UART	2000	291,45
ICM-20690	2,5×3×0,91	14-pin LGA	-40 +85	SPI, I <sup>2</sup> C	20 000	-
SCH16T-K10	11,8×13,4×2,9	SOIC-24	-40 +110	SafeSPI2.0	3000	38,80
SCH16T-K20	11,8×13,4×2,9	SOIC-24	-40 +110	SafeSPI2.0	3000	-
SCH1633-D01	11,8×13,4×2,9	SOIC-24	-40 +110	SafeSPI2.0	-	-
STIM318	45×39×21,5	Moduuli	-40 +85	RS-422	1500	-
DMU11	22×22×10,6	LCC**	-40 +85	RS-422	500	183,54
NAVCHIP3	13×25×6,1	SMT	-40 +85	SPI, I <sup>2</sup> C, UART	-	-
IMU381ZA	24×38×9,5	Moduuli	-40 +85	SPI, UART	-	-
VN-110	31×31×12	Moduuli IP68	-40 +85	RS-422, RS- 323	-	-

Taulukoissa punaisella merkatut solut kuvaavat huonoa arvoa, vaaleanpunaiset solut taas kuvaavat heikkoa arvoa. Värittämättömien solujen arvot ovat keskitasoa. Vihreä kuvaa erittäin hyvää arvoa, kun taas vaaleanvihreä tarkoittaa melko hyvää. Taulukoista 2 ja 3 nähdään, että esimerkiksi Bosch Sensortecin BMI330 –anturit ja TDK InvenSensen

ICM-sarjan anturit ovat kooltansa erittäin pieniä. Sama pätee myös muille BMI-sarjan antureilla. Tämän lisäksi anturit ovat hyvin halpoja. Samalla voidaan huomata, että antureiden kohinatasot ovat suhteessa huonot verrattuna kilpailijoihin. Tämä on varmasti tietoinen kompromissi ja kyseiset anturit ovat tarkoitettu lähinnä puhelimien, ohjainten ja dronejen käyttöön, jossa kallistuskulma, koko ja hinta ovat tärkeimmät ominaisuudet. Esimerkiksi älypuhelimella kallistuskulman määrittämiseen ei tarvita kovin tarkkaa anturia vaan muutaman asteen tarkkuus on riittävä. Puhelimeissa IMU-dataa käytetään muun muassa näytön kallistamiseen, joten puhelimen on tiedettävä, että onko se pystyssä vai kyljellään, mutta tähän ei tarvita kovin tarkkaa anturia. ICM- ja BMI- sarjan anturit sopivat hyvin myös elektroniikkaharrastelijoiden projekteihin, niiden matalan hinnan ja integroidun prosessoinnin ansiosta. Useissa Bosch Sensortecin antureissa on integroituna signaalin prosessointia ja erilaisia liikkeentunnistus järjestelmiä, muun muassa sisäänrakennettu askelmittari, pudotuksentunnistus, napautus- ja eletunnistus, sekä kallistuksentunnistus. Nämä mahdollistavat monia ominaisuuksia, joita käytetään esimerkiksi älypuhelimessa ilman, että signaalia pitää käsitellä prosessorilla ja ilman, että käyttäjän tarvitsee itse suunnitella ja toteuttaa monimutkaista algoritmia liikkeentunnistusta varten. Näihin ominaisuuksiin päästään käsiksi anturin sarjaliitännän kautta. Tämä helpottaa monimutkaisempien järjestelmien suunnittelemista, koska prosessorin ohjelmoinnista tulee paljon helpompaa ja yksinkertaisempaa. Anturilla prosessointi myös vähentää laitteen pääprosessorin taakkaa.

Näillä antureilla ei kuitenkaan saavuteta erityisen tarkkaa mittausta suhteellisen korkean kohinan takia, tästä syystä niitä ei voida käyttää navigoinnissa, eikä taktisissa käyttökohteissa. BMI- ja ICM- anturit ovat markkinoiden ääripäässä kokonsa puolesta, mutta kohinan takia ne voidaan suoraan sulkea pois tämän työn anturivalinnasta. Verrattuna ADIS16507-anturiin, BMI330-anturin kohina on selvästi suurempi, minkä lisäksi sillä on suhteellisen huono resoluutio, jota ei kuitenkaan taulukossa ole esitetty. Kokonsa ja hintansa puolesta BMI330 ja ICM-sarjan anturit olisivat loistavia tässäkin käyttökohteessa, mutta yksinkertaisesti niiden tarkkuus ei riitä.

Vastaavasti ADIS16495-anturissa kohina on erittäin pieni ja sen voidaan sanoa olevan tämän vertailun paras anturi suorituskyvyn suhteen. Se on kuitenkin kooltansa erittäin suuri verrattuna normaaliin MEMS IMU-anturiin ja se on tämän vertailun selvästi suurikokoisin anturi. Myös muut suurikokoiset anturit pärjäsivät suorituskyky vertailussa hyvin, esimerkiksi STIM318, IIM-46234 ja VN-110 olivat kaikki parhaimmista vertailun antureista. Kuitenkaan suuri koko ei automaattisesti takaa erityisen hyvää suorituskykyä, sillä esimerkiksi ADIS16486 on suorituskyvyltään verrattain huono suuresta koostaan huolimatta. Toisena esimerkkinä tästä toimii DMU11, joka on koon ja suorituskyvyn

suhteen yhtä huono, kuin ADIS16486. Sen suorituskyky vastaa pieniä ja halpoja kuluttajaluokan antureita, mutta se on siitä huolimatta kooltansa ja hinnaltansa verrattavissa teollisiin antureihin.

Näiden väliltä löytyy muutamia antureita, joiden suorituskyky ja koko on edellisten välimaastossa. Muun muassa ADIS16507, ADIS16475, NAVCHIP3 ja SCH-sarjan anturit kuuluvat tähän. Nämä kaikki ovat saatavilla IC-paketissa ja ovat selvästi pienempiä verrattuna moduuleihin. Suorituskyvyltään ne eivät ole aivan yhtä hyviä, mutta IC-paketin ja pienemmän koon ansiosta ne olisivat parempia vaihtoehtoja tähän käyttökohteeseen. Valittavan anturin olisi hyvä olla samaa kokoluokkaan näiden antureiden kanssa. Etenkin SCH16T-K20 näyttää suorituskyvyltäänkin erittäin hyvältä, sillä sen gyroskooppi on verrattavissa paljon suurempiin ja kalliimpiin antureihin. Tämä saataisi olla erittäin potentiaalinen vaihtoehto tähän käyttökohteeseen, mutta valitettavasti kyseinen anturi on tulossa markkinoille vasta tulevaisuudessa, joten sekin joudutaan sulkemaan pois.

Edellisiä taulukoita 2 ja 3 kootessa, löytyi eräs erittäin sopiva anturi, jonka ominaisuudet sopivat tähän käyttökohteeseen hyvin. Senopin pyynnöstä tuotteissa käytettävien antureiden tarkkoja tietoja ei anneta, joten kutsutaan tätä anturia nimellä Anturi A. Vastaavasti myös Senopin nykyisin käyttämää anturia ei esitellä sen tarkemmin, kutsutaan sitä nimellä Anturi B. Antureiden A ja B valmistajat myyvät antureilleen demokittejä. Demokittiin kuuluu anturi, evaluaatiolevy, sekä ohjelmisto. Näiden demokittien avulla voidaan suorittaa antureille muutamia testejä ja vertailla niiden suorituskykyä käytännössä.

### **3.3 Antureiden vertailu ja testaus**

Tässä alaluvussa esitellään antureille A ja B tehdyt testit, sekä tehdään lopullinen päätös suunnittelussa käytetystä anturista. Koska Anturi B on ollut aiemmin käytössä, tiedetään, että se on suorituskyvyltään riittävä. Muilta ominaisuuksiltaan, kuten kooltansa ja hinnaltansa, anturi A on parempi. Näistä syistä tämänhetkinen halutila on vaihtaa anturi B johonkin toiseen. Seuraavat testit tehdään edesauttamaan vaihtopäätöstä. Toive on, että anturi A osoittautuu testien perusteella suorituskyvyltään sopivaksi, jotta voidaan tehdä perusteltu vaihtopäätös. Jos anturi A on suorituskyvyltään vähintään yhtä hyvä kuin anturi B, niin silloin anturin A valinta on perusteltu. Jos kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien välinen ero on suuri, niin silloin gyroskoopin suorituskyvylle annetaan suurempi painoarvo anturin valinnassa. Testeistä saadusta datasta piirretään sitten kuvaajia ja lasketaan joitain suureita, joiden perusteella antureiden suorituskyky voidaan arvioida. Kuvaajat piirretään Pythonilla käyttäen matplotlib-kirjastoa. Python

skriptin kirjoittamisen nopeuttamiseksi, siinä on käytetty apuna Copilot-tekoälyohjelmaa. Senopin pyynnöstä kuvaajissa ja taulukoissa ei esitetä tarkkoja lukuja antureiden suorituskyvystä, vaan kuvaajien y-akselien arvot on piilotettu ja taulukoiden kaikki lukuarvot on skaalattu. Skaalaus mahdollistaa antureiden suorituskyvyn suhteellisen vertailun, mutta ei suoraan kerro anturin absoluuttista suorituskykyä. Valitettavasti käytännön testit laitteessa eivät onnistu tämän työn aikataulun puitteissa, mutta demokittien avulla muutamia tärkeitä mittauksia voidaan kuitenkin suorittaa.

Ensimmäisenä suoritetaan staattinen testi. Sillä testataan antureiden random walkin, eli kohinan, ja bias instabiliteetin vaikutuksia antureiden mittausarvoon pidemmällä aikavälillä. Tässä testissä molemmat anturit asetetaan samalle levyllä, jonka jälkeen ne sijoitetaan pöydälle, jossa ne ovat paikallaan koko mittauksen ajan. Niiden ulostulot tallennetaan tiedostoon, jotta saatu data voidaan myöhemmin analysoida. Antureiden annetaan olla päällä ja liikkumattomina. Tämä testi toistetaan muutama kertaan. Testissä nähdään samalla myös antureiden yleinen kohinataso.

Toisena testinä on lämpösyklitesti. Tässä testissä anturit asetetaan sääkaappiin, jossa ne käyvät läpi lämpötilasyklin. Samalla niiden ulostulot tallennetaan, jotta antureiden suorituskykyä voidaan verrata jälkikäteen. Sääkaapissa tehtyjen mittausten haasteena on sääkaapin jatkuva tärinä. Jäähdytyksen aikana sääkaapin kompressori menee päälle, mikä lisää sen tärinää entisestään.

Kolmantena tehdään kulmatarkkuustesti. Siinä halutaan testata anturin tarkkuutta kulmanmuutoksen laskemisessa. Tässä testissä anturit asetetaan kääntöpöydälle, jota saadaan käännettyä halutulla akselilla asteen sekunnin, eli 0,00028 asteen tarkkuudella. Samalla tallennetaan antureiden mittausdataa. Jälkikäteen datan avulla lasketaan gyroskooppien kulmanopeuksien perusteella kulman muutos, sekä kiihtyvyyksiantureiden perusteella anturin kallistuskulma.

Neljäntenä testinä tehdään iskutesti, tämän testin tavoitteena on selvittää kovan shokin vaikutus antureiden offset arvoihin. Testissä antureihin kohdistetaan monta mekaanista iskuä eri akseleiden suuntaan ja tarkkaillaan tämän vaikutusta antureiden toimintaan.

Jotta antureiden data on verrattavissa toisiinsa, on mittaukset tehtävä samoissa olosuhteissa, eli mittaukset on suoritettava samaan aikaan, eikä antureiden välillä saa olla liikettä. Mikäli anturit pääsisivät liikkumaan suhteessa toisiinsa, ei kovin luotettavaa vertausta pystytä tekemään, koska silloin liike aiheuttaisi virhettä vain toiseen anturiin. Antureiden välinen liike on estetty ruuvaamalla molemmat anturit ja niiden evaluaatiolevyt muovilevyyn. Kuvassa 6 näkyy muovilevy ja antureille varatut kiinnitykset. Anturi A on kiinnitettynä piikkirimalla evaluaatiolevyyn. Anturi B on

evaluaatiolevyssä johdolla kiinni. Siksi anturin B evaluaatiolevy tulee muovilevyille omiin reikiinsä. Tämän takia anturi A on hieman korkeammalla suhteessa levyn pintaan verrattuna anturiin B. Anturi A on kuitenkin hyvin tukevasti kiinni, eikä se heilu ollenkaan. Jos antureihin kohdistuisi suurta tärinää saattaisi se vaikuttaa anturiin A hieman enemmän. Testeissä ei kuitenkaan mitata tärinän aikaisia arvoja, joten tällä ei ole vaikutusta testitulosten tulkintaan.



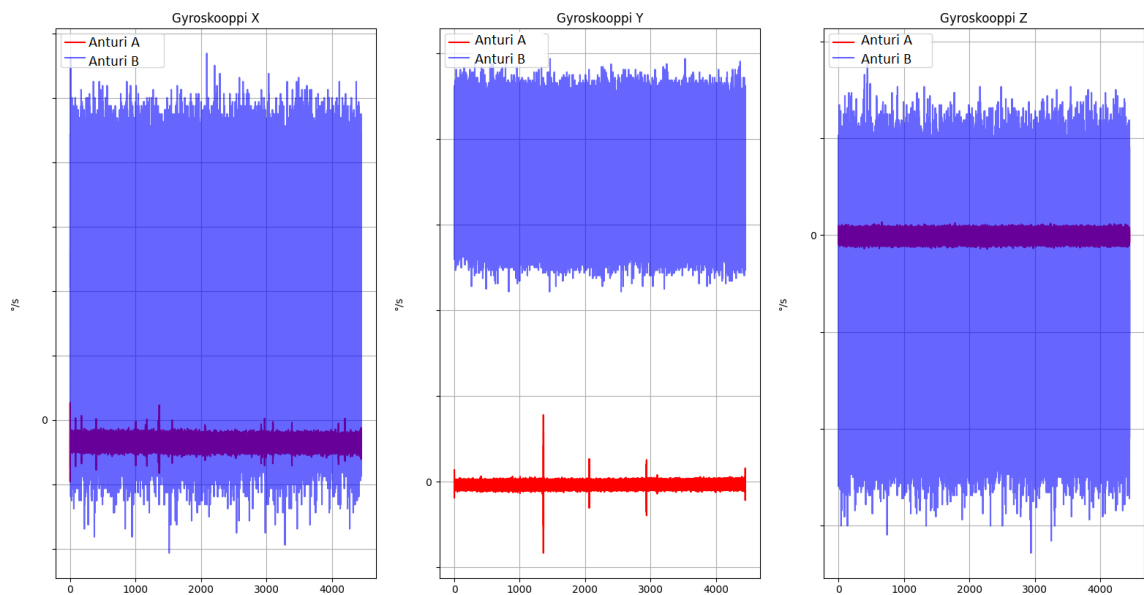
**KUVA 6: testijärjestelyä varten tehty muovilevy. Vasemmalle asennetaan Anturin B evaluaatiolevy, keskelle pieniin alumiinitorneihin asennetaan Anturi B ja oikealla oleviin isompiin torneihin asennetaan anturi A:n evaluaatiolevy, sekä anturi A.**

### 3.3.1 Staattinen testi

Tässä testissä halutaan selvittää antureiden mittausarvojen vaeltamista ajan kuluessa, sekä jatkuvan kohinan suuruutta. Tämä testi kertoo siis antureiden bias instability ja kohina arvojen erot. Anturit asetetaan pöydälle paikalleen ja niiden datankeräys laitetaan päälle. Pitkän aikavälin vaeltamista voidaan mitata vertaamalla alku- ja loppuhetkien arvoja toisiinsa. Arvojen muuttuminen kertoo sen, että onko arvojen vaellusta tapahtunut. Jotta saadaan parempi kuva yleisestä signaalin tasosta, lasketaan mittauksen ensimmäisen ja viimeisen minuutin keskiarvot ja verrataan näitä.

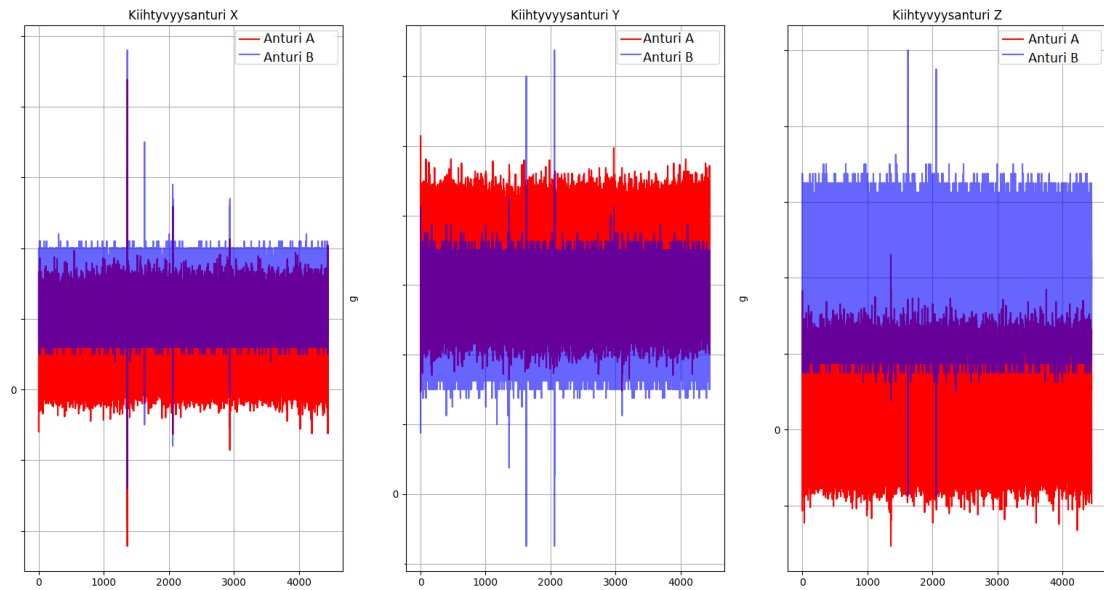
Jatkuvaa kohinaa taas voidaan mitata esimerkiksi keskihajonnan avulla. Mitä pienempi kaikkien näytteiden keskihajonta on, sen vähemmän anturilla on kohinaa. Kohinan määrä voidaan myös suoraan nähdä, kun molempien antureiden datat laitetaan kuvaajaan, jolloin suurempikohinaisella anturilla näkyy enemmän vaihtelua signaalin arvoissa. Kuvassa 7 on esitetty kulmanopeuden raaka data. Kuvassa 8 on esitetty

vastaava kuvaaja kiihtyvyydelle. Kuvissa jokaiselle akselille on piirretty oma kuvaaja, johon on lisätty molempien antureiden data.



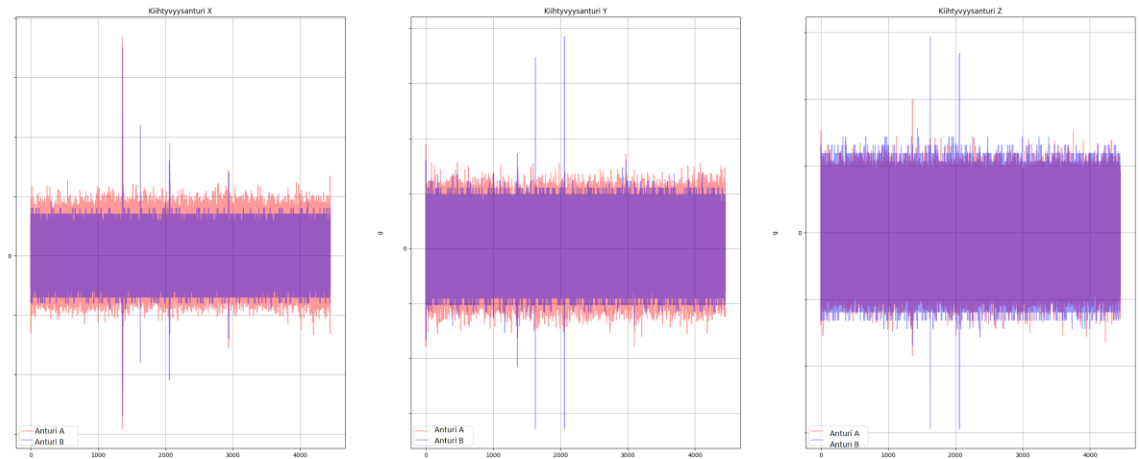
**Kuva 7: Staattisen testin kulmanopeusdatasta piirretyt kuvaajat. Vasemmalla antureiden gyroskooppien x-akselien data, keskellä y-akselien ja oikealla z-akselien.**

Kulmanopeuden kuvaajista voidaan suoraan nähdä, että anturilla A mittausarvojen vaihteluväli on huomattavasti pienempi. Käytännössä tämä tarkoittaa, että anturin A kohina on anturi B:tä pienempää. Offsetin muutoksen suhteen kuvaajasta ei pystytä suoraan toteamaan kumpi antureista on parempi. Molempien kuvaajien offset näyttää pysyvän hyvin vakiona koko mittauksen aikana. Kuvasta 7 nähdään, että antureiden offset arvot ovat hyvin erilaiset. Kulmanopeuden suhteen offset arvot ovat verrattavissa toisiinsa, koska molempien antureiden voidaan todeta olevan liikkumattomia. Offsetin suhteen anturi A vaikuttaisi olevan parempi tässä mittauksessa. Offsetin arvolle ei kuitenkaan anneta kauheasti painoarvoa, koska se voidaan poistaa signaalinkäsittelyssä. Offsetin kannalta tärkeämpänä mittarina on sen muutos ajan suhteen. Kuvaajasta ei selkeästi näy muutosta offsetin suuruudessa millään akselilla.



**Kuva 8: Staattisen testin kiihtyvyyssanturidatasta piirretyt kuvaajat antureiden x-, y- ja z-akseleille.**

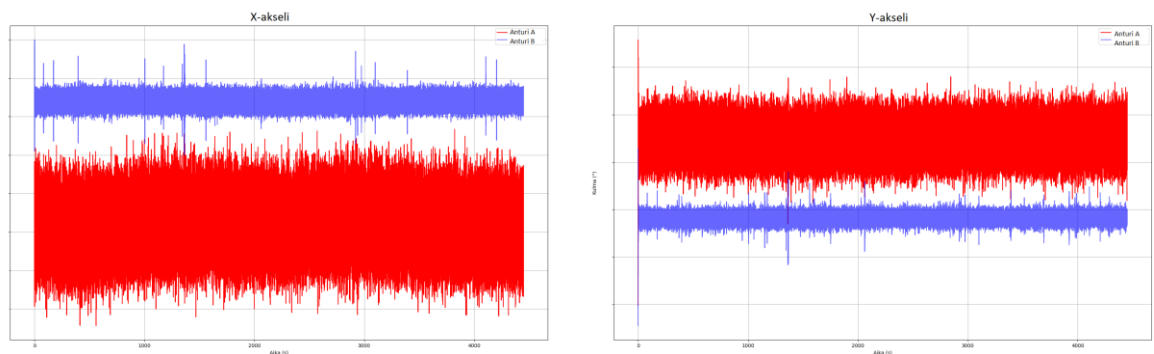
Kiihtyvyyssantureiden datan perusteella voidaan nähdä, että anturit ovat suorituskyvyiltään aika tasaisia. Offsetin takia kuvaajista ei nähdä suoraan, että kummalla antureista on suurempi kohina. Näissä mittauksissa ei nähdä merkittävää offsetin muutosta, joten senkin suhteen anturit vaikuttavat olevan hyvin samanlaisia suorituskykynsä suhteen. Offset arvot eroavat antureiden välillä hieman, mutta kiihtyvyyssantureiden tapauksessa tällä ei ole mitään merkitystä, sillä anturin kuuluukin näyttää nolasta eroavia arvoja, sillä se mittaa myös painovoimasta johtuvaa kiihtyvyyttä. Mittauksissa z-akseli osoitti painovoiman suuntaan, joten sen mittaama kiihtyvyys on jatkuvasti 1 g. Koska anturit eivät testijärjestelyssä ole täysin suorassa, johtaa se pieneen painovoimasta johtuvaan offsettiin myös x- ja y-akseleilla. Antureiden tarkka kulma suhteessa painovoimaan ei ole tiedossa, joten todellisia offset arvoja ei pystytä arvioimaan tämän mittauksen perusteella. Kiihtyvyyssanturin osalta offsetin absoluuttinen arvo voidaan siis jättää kokonaan huomiotta ja keskittyä offsetin muutokseen. Jotta kuvaajasta saadaan havainnollisempi, voidaan mitatulle datalle tehdä bias-korjaus. Kuvassa 9 on esitetty kuvaaja, jossa on kuvan 7 data bias-korjattuna. Bias-korjaus tarkoittaa käytännössä offsetin poistoa ja se voidaan toteuttaa esimerkiksi laskemalla mittauksen keskiarvo ja vähentämällä tai lisäämällä se jokaiseen näytteeseen. Näin koko kuvaaja siirtyy ylös- tai alaspäin offsetin verran.



**Kuva 9: Staattisen testin kiihtyvyyssanturista piirretyt bias-korjatut kuvaajat. Vasemmalta oikealle antureiden x-, y- ja z-akselien kuvaajat.**

Bias-korjatusta kuvaajasta pystytään paljon helpommin tulkitsemaan kohinan suhteellista suuruutta, sillä nyt molempien antureiden datan keskiarvot ovat nollassa. Bias-korjatusta kuvaajasta voidaan suoraan nähdä, että anturin B kiihtyvyyssanturilla on x- ja y-akseleilla hieman pienempi kohina. Z-akselilla taas antureiden kohina on kuvaajan perustella yhtä suurta.

Kiihtyvyyssanturin datasta voidaan myös laskea anturin kallistuskulma. Kuvassa 10 on esitettyinä kiihtyvyyssanturin datasta lasketut kallistuskulmien kuvaajat.



**Kuva 10: Staattisen testin kiihtyvyyssantureiden datasta lasketut kallistuskulmat.**

Kallistuskulmien kuvaajasta nähdään, että kulmaa laskettaessa antureiden välisten kohinoiden ero on paljon suurempi kuin pelkällä kiihtyvyyssanturin datalla. Anturilla A kohina on selvästi suurempaa. Anturilla A on myös pientä offsetin muutosta x-akselilla. Kuvaaja näyttää hieman nousevan mittauksen keskialueella, etenkin jos tarkkaillaan kohinan alareunan tasoa. Antureiden kohinoiden ero näyttää hieman isommalta x-akselilla, mikä vastaa bias-korjatun kiihtyvyyssanturin kuvaajissa nähtyä.

Lopuksi lasketaan vielä molempien antureiden kaikille akseleille keskihajonta ja keskiarvon muutos. Näin saadaan tiivistettyä edellä näytetyt kuvaajat lukuarvoiksi, joiden perusteella antureiden suorituskykyä pystytään tarkastelemaan vieläkin tarkemmin. Taulukossa 4 on esitettyä gyroskoopin kulmanopeudesta ja kiihtyvyydestä lasketut keskihajonnat ja keskiarvon muutokset. Taulukon solut on väritetty hahmottamisen helpottamiseksi. Parempi arvo on merkattu vihreällä ja huonompi arvo punaisella. Samaa väriystapaa käytetään myös myöhemmissä taulukoissa.

Taulukko 4. *Staattisen testin kulmanopeuksien ja kiihtyvyyksien keskihajonnat ja keskiarvon muutokset*

Gyroskooppi	Akseli	Anturi A	Anturi B
Keskihajonta	X	1	15,27
	Y	1	13,92
	Z	1	17,11
Keskiarvon muutos	X	3,86	1
	Y	1	6,15
	Z	1,67	1
Kiihtyvyyssanturi	Akseli	Anturi A	Anturi B
Keskihajonta	X	1,50	1
	Y	1,40	1
	Z	1	1
Keskiarvon muutos	X	1	1
	Y	1,0001	1
	Z	1,0001	1

Taulukosta voidaan havaita samoja asioita kuin aiemmista kuvaajista Kohinan suhteen taulukko tukee kuvaajien perusteella tehtyjä johtopäätöksiä. Nähdään, että anturin A gyroskoopin keskihajonta on todella paljon pienempi kuin anturilla B. Siis, anturilla A on

paljon pienempi kohina. Kiihtyvyyksien keskihajonnasta taas nähdään, että anturi B on hieman parempi x- ja y-akselien suuntaan, mutta z-akseleille antureiden kohina on täysin sama. Taulukosta voidaan myös nähdä offsetin muutoksen suuruudet. Kuvaajissa niitä ei näkynyt, koska muutos oli niin pieni, että se ei tule esille kuvaajasta. Taulukkoon keskiarvon muutos on laskettu vertaamalla mittauksen alun ja lopun keskiarvoja toisiinsa. Ensin on laskettu ensimmäisen ja viimeisen minuutin keskiarvot. Sitten näiden erotuksesta on saatu keskiarvon muutos. Kaikki taulukossa esitetyt arvot on muokattu suhdeluvuiksi siten, että pienemmästä lukuarvosta on aina skaalattu tasan yksi. Sitten suurempi arvo on skaalattu samassa suhteessa. Keskiarvon muutosten suhteen mittausaika oli liian lyhyt, jotta suuria muutoksia olisi tullut esiin. Mutta näiden mittausten perusteella voidaan sanoa, että anturin B kiihtyvyyksianturi oli tämän suhteen hieman parempi, kun taas gyroskoopeilla oli enemmän vaihtelua.

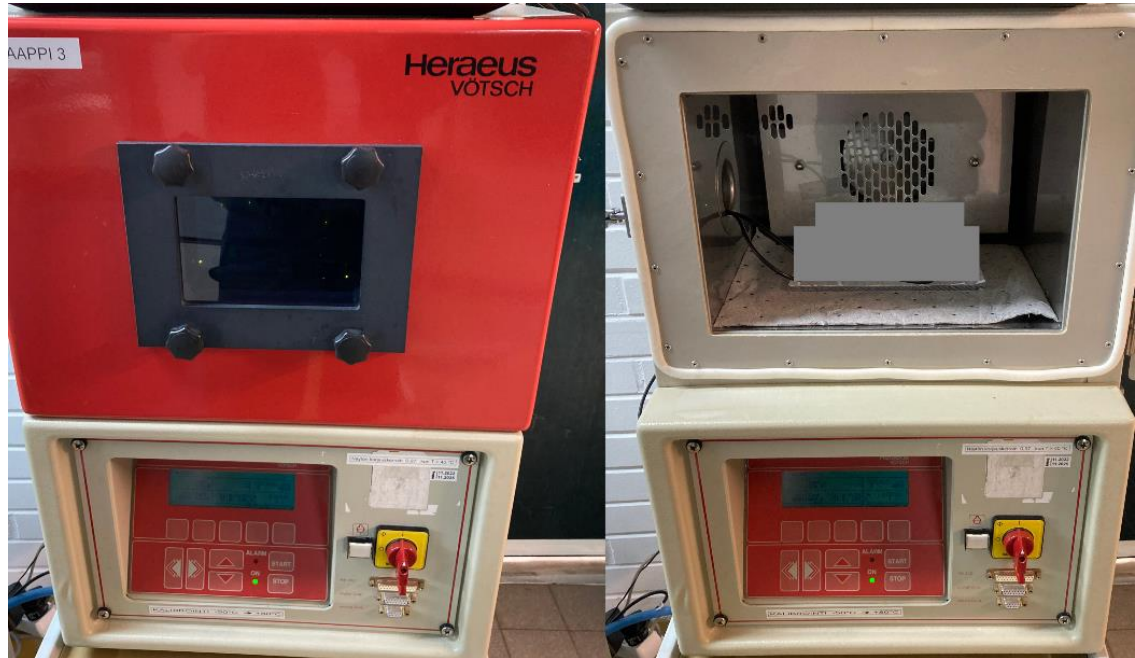
Staattisen testin voittajaksi valitaan anturi A, koska sen gyroskoopin kohina oli todella paljon pienempää ja käyttökohteessamme nimenomaan se on kaikista tärkein parametri. Kiihtyvyyksianturit olivat suorituskyvyltään lähes identtiset. Anturin A gyroskoopin x- ja z-akseleilla keskiarvon muutos oli hieman isompaa kuin anturilla B, mutta kokonaisuutena anturi A on silti tämän testin perustella parempi työn käyttökohdetta varten.

### 3.3.2 Lämpösyklitesti

Lämpösyklitestissä testataan lämpötilan muutoksen vaikutusta antureiden mittaustuloksiin. Ensisijaisesti tässä testissä halutaan nähdä miten lämpötilasykli vaikuttaa anturin offsettiin. Tärkeimpänä mitattavana suurena tässä testissä on offsetin muutos koko mittauksen aikana. Testissä tarkkaillaan offsetin arvoa myös eri lämpötiloissa, mutta tärkeintä on offsetin palaaminen mahdollisimman lähelle lähtöarvoa. Testissä anturit asetetaan muovilevyyn kiinnitettynä sääkaapin sisälle. Sääkaapin alkulämpötilaksi asetetaan 20 °C. Kun 20 °C on saavutettu, aloitetaan antureiden datankeräys. Sääkaapin lämpötila lasketaan ensin arvoon -30 °C, jonka jälkeen se nostetaan arvoon +60 °C. Lopuksi lämpötila palautetaan takaisin alkulämpötilaan.

Haasteena tässä testissä on se, että sääkaappi pärisee jatkuvasti päällä ollessaan, mikä aiheuttaa antureiden mittauksiin suurta kohinaa. Kylmentäessä sääkaappi laittaa myös kompressorin päälle, jolloin pärinä kasvaa entisestään. Testissä saadusta datasta piirretään lopuksi kuvaajat, joiden perusteella antureiden suorituskykyä voidaan vertailla. Koska sääkaapin pärinä aiheuttaa suurta kohinaa, lisätään kuvaajiin myös liukuvan keskiarvon kuvaaja, jotta offsetin muutos on helpompi havaita. Tämän lisäksi halutaan taulukoida offsetin arvot eri lämpötiloissa. Jotta tämä onnistuu mahdollisimman tarkasti, joudutaan sääkaappi sammuttamaan valittujen lämpötilojen kohdalla. Näin sääkaapin

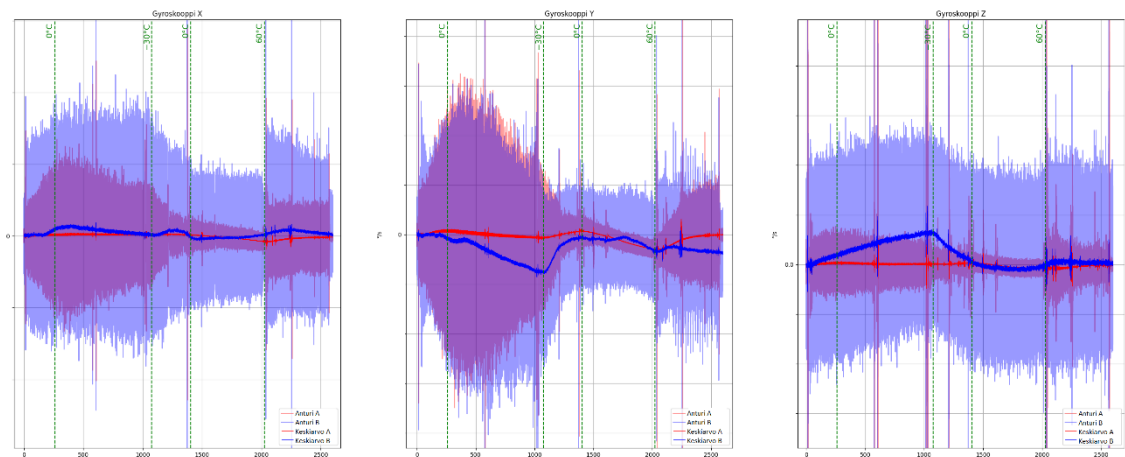
tärinä saadaan loppumaan hetkeksi, jolloin ylimääräinen kohina saadaan poistettua. Tältä ajanhetkeltä voidaan ottaa keskiarvo offsetin määrittämiseksi. Lämpösyklitesti suoritettiin Heraeus Vötsch- sääkapaissa. Kuvassa 10 näkyy sääkappi, sekä kaapin sisäinen testijärjestely. Senopin pyynnöstä anturit on peitetty kuvasta.



**Kuva 10: Lämpösyklitestissä käytetty sääkappi ja anturijärjestely sen sisällä. Evaluaatiolevyjen USB-johdot tuodaan sääkappin kyljestä ulos.**

Kuvassa 11 on esitettyinä lämpösyklitestin kulmanopeuden kuvaajat. Kuvassa 12 on esitettyinä saman mittauksen kiihtyvyyksien bias-korjattu data. Kuvaajat ovat bias-korjattu käyttäen ensimmäisen minuutin keskiarvoa. Näin molempien kuvaajien offset on aluksi nolla. Ilman bias-korjausta kuvaajista tuli hieman epäselviä ja etenkin offsetin muutoksia oli vaikea havaita. Aiemmista kuvaajista poiketen, näihin kuvaajiin on lisätty myös liukuvan keskiarvon viiva. Liukuvan keskiarvon aikaikkunana on yksi sekunti. Liukuva keskiarvo kuvastaa anturin offset-arvoa. Suuren kohinan takia kuvaajasta on hyvin vaikea nähdä tarkka offset, ellei sitä ole erikseen piirretty näkyviin. Liukuvan keskiarvon aikaikkunalle kokeiltiin muutamia eri arvoja, kuten 0,1 s, 1 s, 10 s, ja 60 s. Lopulta valittiin 1 s aikaikkuna, koska sillä saatiin kaikista siistein kuvaaja ilman, että tarkempia yksityiskohtia menetettiin. Anturin B raakadata on merkattu haalealla sinisellä ja keskiarvo on piirretty sinisellä viivalla. Vastaavasti anturi A on merkattu punaisella, mutta kuvaajassa se näyttää, enemmän violetilta, koska anturin B mittaustulokset ovat sen kanssa päällekkäin. Keskiarvo anturille A on piirretty punaisella viivalla. Kuvaajiin on

lisätty myös pystyviivat lämpötilanmuutoksen seuraamiseksi. Pystyviivat ovat merkattu arvojen 0 °C, -30 °C, 0 °C ja +60 °C kohdalle.

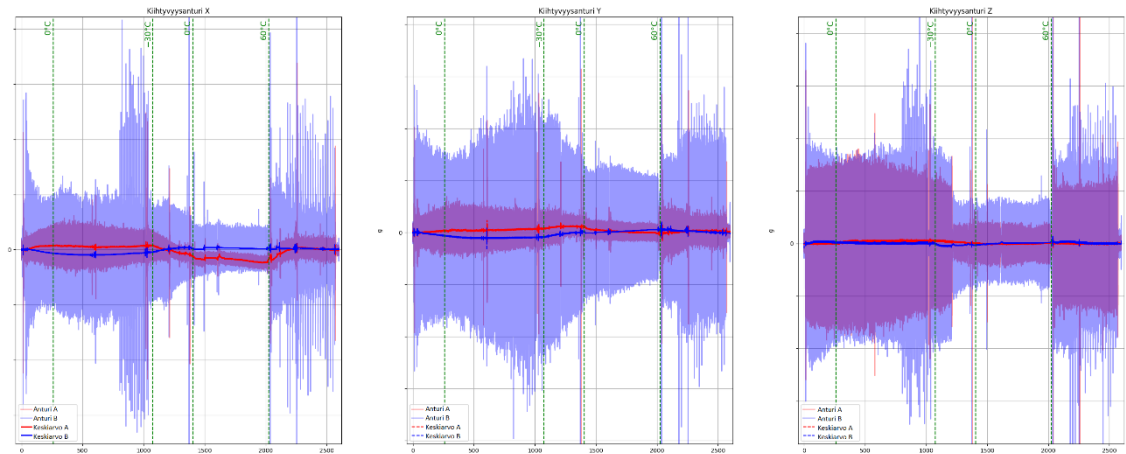


**Kuva 11: Lämpösyklistin kulmanopeuksien bias-korjattu data. Offset-arvoa kuvaava liukuva keskiarvo on piirretty tummemmalla värillä. Vasemmalla gyroskooppien x-akselien data, keskellä y-akselien ja oikealla z-akselien.**

Kuvasta 11 voidaan nähdä, että ensinnäkin anturin B kohina on suurempaa koko mittauksen ajan x- ja z- akseleilla. y-akselilla kohina on aluksi yhtä suurta, mutta lämmityksen aikana sen on anturilla B paljon suurempi. Lämmityksen aikana sääkaapin kompressorin sammuu, jolloin sen aiheuttama kohina häviää kuvasta. Tärinän puuttuminen tuo paremmin esille antureiden välisiä eroja kohinan suhteen.

Offset-arvoja tarkkaillessa voidaan huomata, että anturi A on lämpötilan suhteen vakaampi. Anturin A offset muuttuu hyvin maltillisesti verrattuna Anturiin B. Tässä mittauksessa kiinnostaa eniten anturin offsetin palautuminen alkuperäiseen lämpösyklin jälkeen. Koska antureille on tehty bias-korjaus, tarkoittaa tämä, että liukuvasen keskiarvon kuvaajan pitäisi palata nolnaan mittauksen lopussa. X ja z- akseleilla molemmat anturit palautuvat ainakin kuvaajien perusteella hyvin lähelle nolaa, eikä tässä ole antureiden välillä suurta eroa. y-akselilla on selvästi nähtävissä, että anturi B ei palaudu lähellekään nolaa.

Etenkin kylmässä, y- ja z- akseleilla anturin B offsetin muutos on todella paljon suurempaa kuin anturilla A. Kuten kuvaajista nähdään, kun lämpötila on minimissään, on anturin B offset todella suurta. Kuitenkin nollan asteen kohdalla offset on palautunut takaisin normaaliin ja on lähes yhtä suuri kuin anturilla A.



**Kuva 12: Kiihtyvyyksien bias-korjattu data lämpösyklitestistä. Vasemmalla kiihtyvyyssantureiden x-akselien data, keskellä y-akselien ja oikealla z-akselien.**

Kuvasta 12 nähdään, että kiihtyvyyden osalta anturin B kohina on paljon suurempi. Tämä ei ole suoraan linjassa staattisen testin kanssa, jossa kiihtyvyyssantureiden kohinat olivat lähes yhtä suuria ja anturin B kohina oli jopa hieman pienempää.

Kuten aiemmin on mainittu, sääkaapin kompressori lisää tärinää merkittävästi. Muilla kuvaajilla tärinä ei erotu kuvaajasta suoraan, mutta z-akselin kuvaajasta se voidaan erittäin selvästi. Tästä voidaan päätellä, että sääkaapin kompressori aiheuttaa enimmäkseen pystysuuntaista tärinää.

Offsetin muutoksen suhteen nähdään, että erot ovat pienemmät kuin kulmanopeuden kuvaajissa. x-akselilla offsetin muutokset ovat erimerkkisiä antureilla, mutta kuvaajasta katsottuna offsetin muutos näyttäisi olevan samansuuruista kylmässä. Lämpimässä taas Anturi A:lla on hieman suurempi offsetin muutos. Anturi A:n offset palautuu kuitenkin lähelle nollaa, kun mittaus lähenee loppuaan. Akselilla y offsetin muutokset ovat koko mittauksen ajan lähes yhtä suuria, mutta anturi B näyttäisi muuttuvan hieman enemmän. Mittauksen lopussa arvot eivät palaudu täysin samaan, mutta kuvaajasta on vaikea sanoa, että kumpi antureista jää kauemmas nollostaa. z-akselilla erot ovat vielä pienemmät ja kuvaajan perusteella molempien antureiden offset palautuu hyvin lähelle nollaa.

Mittauksen aikana sääkaappi sammutettiin muutamaan kertaan tärinän lopettamiseksi. Näistä ajankohdista on mitattu noin kolmen sekunnin keskiarvot, jotka ovat taulukoituna alla olevissa taulukoissa 5 ja 6. Taulukoon 5 on koottu kulmanopeuksien arvot. Taulukkoon on laskettu antureiden offsetin muutos tiettyinä lämpötilaväleinä. Nämä arvot on sitten skaalattu siten, että pienempi arvo on tasan 1. Taulukon viimeiselle riville on laskettu koko mittauksen aikainen offsetin muutos. Tämä on taulukon arvoista kaikista

tärkein. Lämpötilan aiheuttama offsetin muutos voidaan kompensoida, mutta jos offset ei enää palaudu alkuperäiseen lämpösyklin jälkeen, ei sitä voida kompensoida.

Taulukko 5. *Kulmanopeuksien offsetin muutokset lämpösyklimitäyksessä.*

Kulmanopeus	X		Y		Z	
	Anturi A	Anturi B	Anturi A	Anturi B	Anturi A	Anturi B
20°C - -30°C	1,50	1	-1	-14,10	1	39,94
-30°C - -15°C	1	-75,25	1	12,80	1	-195,00
-15°C - 0°C	1	-40,00	1	2,47	1	-14,96
0°C - 30°C	1	-2,67	-4,03	-1	-1	-4,49
30°C - 60°C	-1,72	1	-1,14	-1	-2,86	1
60°C - 20°C	8,17	1	8,83	-1	1,30	1
20°C - 20°C	-1,06	1	-1	-69,00	-1	3,06
<b>Koko mittaus</b>						

Taulukosta 5 nähdään samoja asioita kuin kuvaajastakin. Pienemmät erot voidaan kuitenkin nähdä taulukosta paremmin. Esimerkiksi x-akselin osalta nähdään, että anturi B:n offset palautui lähemmäs alkuarvoaan. Skaalauksen takia antureiden eri akselien välisiä eroja ei pystytä vertaamaan tämän taulukon avulla. Esimerkiksi y-akselilla anturin B offsetin muutos vaikuttaisi ensisilmäyksellä paljon pienemmältä kuin z-akselilla. Kuvaajia katsomalla nähdään, että näin ei ole. Tämä johtuu siitä, että anturi A:n offsetin muutos oli y-akselilla myös huomattava, kun taas z-akselilla anturin A offsetin muutos oli erittäin pieni. Tämä johtaa siihen, että anturiin A suhteutettuna anturin B muutos oli suurempi z-akselilla. Senopin pyynnöstä absoluuttisia arvoja ei kuitenkaan anneta.

Taulukon tärkeimpänä antina on koko mittauksen aikainen offsetin muutos. Nähdään, että x-akselilla anturi B oli hieman parempi, kun taas y- ja z-akseleilla anturi A oli parempi. y-akselin kohdalla ero oli todella suuri, mikä voitiin todeta jo kuvaajista.

Kuvaajia ja taulukkoa vertaillessa huomataan, että taulukkoon valittuja mittauspisteitä olisi kannattanut muuttaa kattavamman kokonaiskuvan saamiseksi. Esimerkiksi x-

akselin kuvaajasta nähdään, että Anturin B offset nousee selvästi noin nollan asteen kohdalla. Offset lähtee kuitenkin laskemaan uudestaan ja taulukon ensimmäisen mittauspisteen, eli arvon  $-30\text{ °C}$  kohdalla offset on jo palautunut lähes alkuperäiseen. Tätä muutosta ei nähdä taulukossa ollenkaan. Jos mittaus toistettaisiin, kannattaisi ensimmäinen mittausväli jakaa kahteen nollan asteen kohdalta.

Taulukko 6. *Lämpösyklistin kiihtyvyyden offsetin muutokset.*

Kiihtyvyys	X		Y		Z	
	Anturi A	Anturi B	Anturi A	Anturi B	Anturi A	Anturi B
20°C - -30°C	1,38	-1	1	-1,29	4,50	-1
-30°C - -15°C	-1,25	1	1	1,10	-3,00	-1
-15°C - 0°C	-2,67	1	1	7,00	-2,00	-1
0°C - 30°C	-16,00	1	-9,00	1	-1	2,00
30°C - 60°C	-4,00	1	-1	1,25	5,00	1
60°C - 20°C	12,00	-1	1	-2,33	-1	-7,00
20°C - 20°C Koko mittaus	-1	1	2,50	-1	1	-3,00

Kiihtyvyydsanturin arvojen taulukko 6 vastaa odotettua. Kuvaajien perusteella x-akselilla anturi A:n offset näytti muuttuvan enemmän nolasta asteesta lämmitettäessä. Myös taulukossa tämä on havaittavissa. Nollan ja kuudenkymmenen asteen välillä anturin A offsetin muutos oli 16-kertainen verrattuna anturiin B. Lämpösyklin lopuksi molempien antureiden muutokset olivat kuitenkin yhtä suuret verrattuna mittauksen alkuhetkeen. Akselin y osalta huomataan, että anturi B:n offset muuttuu enemmän, mutta palautuu paremmin takaisin alkuarvoonsa. Mittauksen keskivaiheilla esiintyvä ero on hieman suurempi kuin mitä kuvaajasta voisi päätellä. Tästä voidaan päätellä, että anturin A offsetin absoluuttinen muutos oli todella pientä. z-akselilla anturi A:n offset muuttuu keskimäärin hieman enemmän, mutta lopulta se palautuu lähemmäs alkuarvoa.

Edellä esitelyjen kuvaajien ja taulukoiden perusteella anturin A gyroskooppi on selvästi vakaampi lämpötilan suhteen ja lämpötilasyklin vaikutus sen offsetin arvoon on paljon pienempi kuin anturilla B. Kiihtyvyyssantureiden suhteen erot ovat melko pienet. Koska anturivalintaa tehdään käyttökohteeseen, jossa gyroskoopin suorituskyky on kiihtyvyyssanturia tärkeämpi, valitaan tämän testin voittajaksi anturi A. Anturi B:n suoritus kulmanopeusmittauksen y-akselilla oli erityisen huono. Muutenkin anturin B gyroskoopin offset muuttui todella paljon. Tämän testin osalta anturi A:n paremmuus on suhteellisen selkeää, etenkin kun huomioidaan käyttökohde.

### 3.3.3 Kulmatarkkuustesti

Kulmatarkkuustestissä tavoitteena on verrata antureiden kulmatarkkuutta, sekä kulman toistettavuutta. Testissä antureita käännettään, ja niiden datasta lasketaan kulmanmuutos integroimalla se gyroskoopin kulmanopeusmittauksista. Testi toteutetaan kääntöpöydällä, jotta todellinen kulma on tiedossa. Koska anturit ovat muovilevyllä vain silmätarkkuudella, ei absoluuttisen kulman vertaaminen ole kuitenkaan mahdollista. Kääntöpöydän avulla anturit voidaan palauttaa lähtöasentoonsa asteen sekunnin tarkkuudella. Teoriassa integroidun kulman pitäisi siis näyttää tasan nolla astetta mittauksen lopussa.

Tässä testissä toistetaan useampi mittaus anturin jokaisella akselilla. Aluksi mitataan jokainen akseli siten, että antureita käännetään 90 astetta, jonka jälkeen ne palautetaan takaisin lähtöasentoon. Testi toistetaan kolme kertaa molempiin pyörimissuuntiin. Lisäksi vastaavia testejä tehdään, mutta hitaammalla ja nopeammalla kulmanopeudella, jossa antureita käännetään kolme astetta ja 180 astetta. Näin saadaan testattua antureiden suorituskykyä myös eri kulmanopeuksilla ja eri mittausten kestolla. Nopeimmat mittaukset kestävät vain noin 30 sekuntia. Pisimmät mittaukset kestävät noin kolme minuuttia. Tässä työssä ei käydä läpi, eikä esitellä jokaista mittausta. Tähän alalukuun on valittu havainnollistava esimerkki erään mittauksen kuvaajasta ja mittaustulokset tiivistävä taulukko kaikista mittauksista.

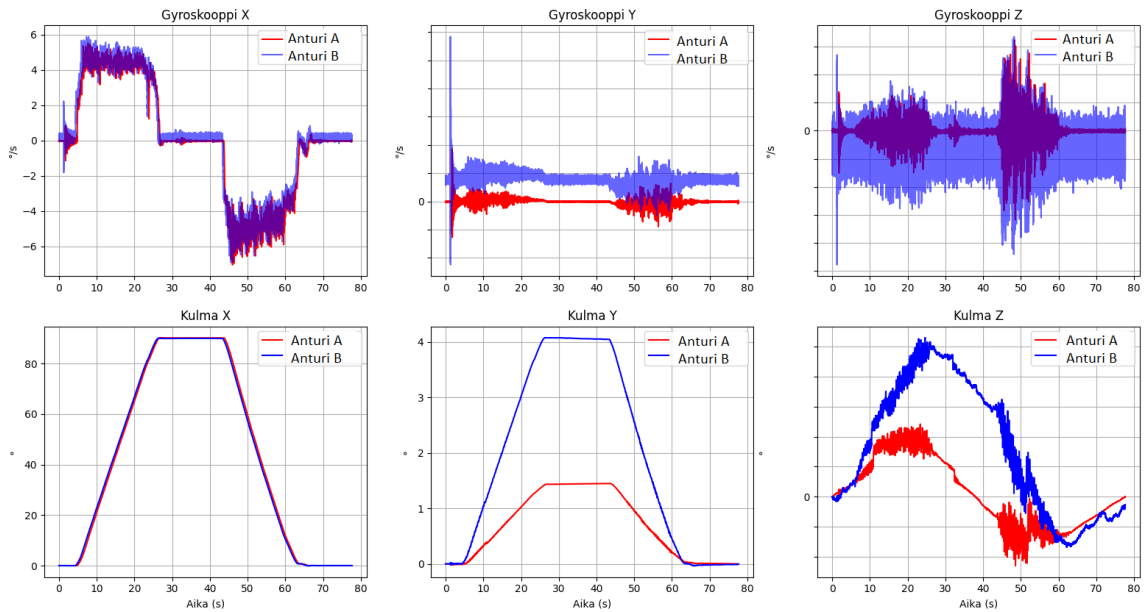
Tämän testin suhteen kiihtyvyyssantureiden data ei ole verrattavissa, sillä anturit ovat eri etäisyydellä ja korkeudella verrattuna kääntöpöydän pyörimisakseliin. Lisäksi pöydän ja kääntöpöydän liike aiheuttaa ylimääräistä kohinaa signaaliin. Pöydän heilumisen aiheuttamat piikit kiihtyvyyssatassa ovat antureiden erilaisien sijaintien takia eri suuret. Tässä testissä ollaan kiinnostuneita vain kulmanopeuden ja siitä lasketun integroidun kulman mittaustuloksista. Kääntöpöytä on normaalin metallirunkoisen ja puutasoisen

toimistopöydän päällä. Kuvassa 13 on esitettyä käytetty testijärjestely. Senopin pyynnöstä kuvasta on peitetty anturit ja niiden evaluaatiolevyt. Kuvan 13 järjestelyssä antureita käännettiin x-akselin suuntaan. Kääntöpöytää voidaan kääntää kahdella eri akselilla, joista vain toisella pystytään mittaamaan kulmaa tarkasti. Kulmatarkkuusmittauksessa käytettiin tarkempaa kääntösuuntaa. Kuvassa 13 kääntöpöytä on pystyasennossa. Kuvassa 13 valkoinen muovilevy on kiinni ruskeassa pyöreässä kiinnityslevyssä. Testeissä tätä kiinnityslevyä käännetään. Eli kuvassa 13, pyörimisakseli on muovilevyn pidemmän sivun suuntainen. Muissa testeissä muovilevy käännettiin eri päin, jotta antureiden y-akselia päästiin mittaamaan. Viimeisessä mittauksessa kääntöpöytä laskettiin alas, jolloin antureiden z-akselien suorituskyky voitiin mitata.



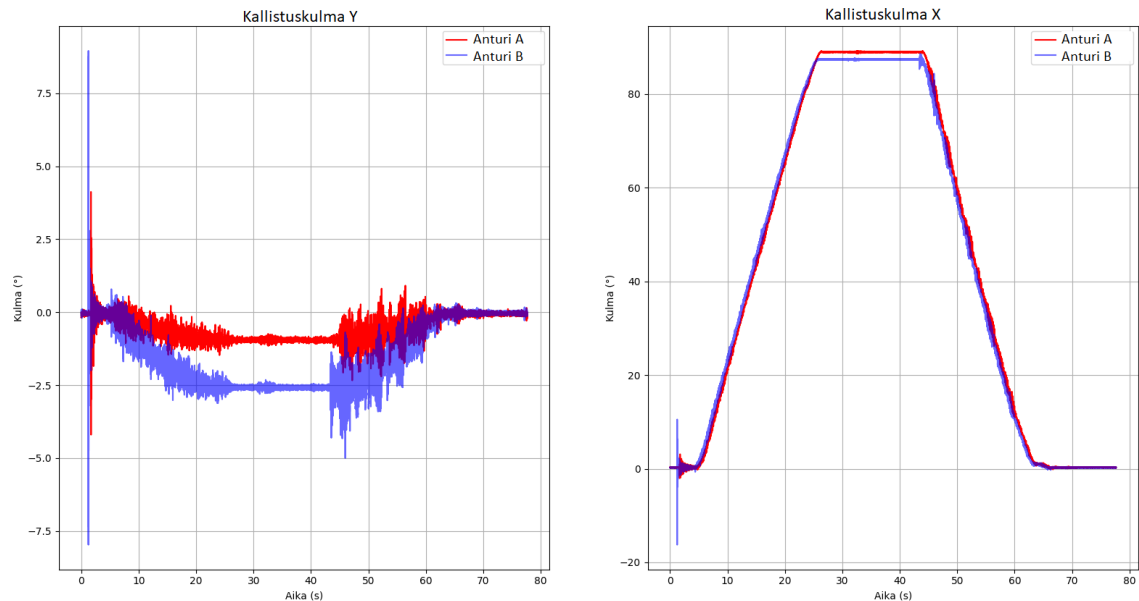
**Kuva 13: Kulmatarkkuus testin testijärjestely.**

Pöytää painettaessa se joustaa huomattavasti ja tämä jousto on selvästi nähtävissä antureiden kiihtyvyyssanturidatassa. Kääntöpöytää käännetään manuaalisesti, joten käännön aikana pöytä heiluu hieman. Kuvassa 14 on esitetty erään mittauksen kulmanopeusdata. Kuvasta voidaan selvästi nähdä käännön aikainen suuri kohina, joka johtuu osin pöydän heilumisesta ja osin epätasaisesta kääntönopeudesta.



**Kuva 14: Kuvaajat x-akselin suuntaisen kääntöpöytätestin kulmanopeudesta ja integroidusta kulman muutoksesta. Vasemmalla gyroskooppien x-akselien data, keskellä y-akselien ja oikealla z-akselien. Ylemmällä rivillä on esitettynä gyroskooppien kulmanopeuksien mittausdata. Alemmalla rivillä on kulmanopeuksien datasta integroidut kulman muutokset.**

Kuvan 14 kuvaajista nähdään, että kyseisessä testissä antureita on käännetty x-akselin suhteen positiiviseen suuntaan. Kuvaajat eivät tämän testin osalta kerro mittatarkkuudesta juuri mitään, mutta niistä voidaan helposti nähdä antureiden sijoittelun epäideaalisuuksia. Esimerkiksi y-akselin integroitu kulma näyttää anturilla B noin neljää astetta, kun vastaava kulma on anturilla A vain noin puolitoista astetta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että käännön aikana anturit ovat kääntyneet hieman myös Y-akselin suuntaisesti. Koska antureiden välillä on noin suuri ero, ei tämä voi johtua pöydän tai kääntöpöydän virheestä. Molemmat anturi ovat kiinni muovilevyssä, joten antureiden keskinäinen kääntyminen on täysin sama. Siis, anturi ovat asennettuna muovilevyille hieman eri kulmassa. Kuvassa 15 on esitettyä kiihtyvyyssantureiden datan perusteella laskettujen kallistuskulmien kuvaajat.



**Kuva 15: Kiihtyvyyssantureiden datasta lasketut kallistuskulmien kuvaajat. Vasemmalla kallistuskulmien y-akselien data ja oikealla x-akselien.**

Kuvista 14 ja 15 nähdään pitkälti samat asiat. Anturit kääntyvät hieman myös y-akselin suhteen. Laskettu kulman muutos on kuitenkin hieman eri integroidulla kulmalla ja kallistuskulmilla. Kallistuskulmien mukaan anturin B kallistus on noin 2,5 astetta, kun integroidun kulman mukaan se oli noin 4 astetta. Ero saattaa johtua osin siitä, että kääntymisen keskipiste on noin 5 cm antureiden alapuolella. Todellisuudessa anturit siis kulkevat noin 8 cm pitkän kaarevan radan, jonka aikana ne kääntyvät 90 astetta. Kallistuskulman kuvaajista myös x-akselilla nähdään suurempi ero maksimikulmien välillä. Kallistuskulmien mukaan anturin A maksimikulma on hieman suurempi. Vastaava ero on juuri ja juuri havaittavissa, myös integroidun kulman kuvaajassa, mutta siinä ero on todella pieni.

Suurin virhe tässä mittauksessa aiheutui siis antureiden keskinäisestä kulmasta. Koska antureiden asennot muovilevyllä eivät ole täydellisen suorassa. Tämän lisäksi anturit saattavat olla hieman eri kaltevuuskulmassa toisiinsa verrattuna. Voidaan siis olettaa, että mitkään anturit eivät ole minkään akselin suhteen täysin samansuuntaiset. Myöskään kääntöpöytään suhteutettuna anturit eivät ole täydellisen suorassa. Muovilevyn reuna on tasaisena kääntöpöytää vasten, mutta anturit eivät ole suorassa muovin reunan suhteen. Antureiden virheasunnoista aiheutuu se, että esimerkiksi y-akselin mittauksissa myös x-akselilla näkyy kulmanmuutosta. Tämä on sama ilmiö cross-axis alignment virhe, joka lyhyesti mainittiin luvussa 2. Anturilla itsellään se tarkoittaa sisäisen rakenteen ja kuoren välistä kulmaa, tässä testissä se tarkoittaa anturin ja kääntöpöydän välistä kulmaa. Tästä syystä mittaustulosten analysoinnissa ei keskitytä

absoluuttiseen kulman muutokseen, vaan tärkein mitattava suure on kulman palautuminen alkuarvoon, eli nollaan. Koska testin lopussa anturit ovat käännettynä takaisin lähtöasentoon, on niiden kulman muutos mittauksen alku- ja loppuhetken välillä tasan nolla astetta. Kun antureiden mittausdatasta integroidaan kulmanmuutos, pitäisi sen siis näyttää mittauksen lopussa nollaa. Täten paras tapa verrata kulmanmuutoksen tarkkuutta antureiden välillä on verrata alku- ja loppuhetken välistä kulman muutosta. Koska anturit ovat asennettuna kiinteästi, eivätkä liiku suhteessa toisiinsa, ei kääntöpöydän mittavirheelläkään ole merkitystä, sillä sama virhe esiintyy molempien antureiden mittauksissa.

Kuten luvun alussa mainittiin, 90 asteen testien lisäksi testattiin pienempiä ja suurempia kääntökulmia, sekä pitkäkestoisempaa kääntelyä. Eri kääntelyprofiileilla saadut tulokset olivat linjassa 90 asteen kääntelyiden kanssa. Pidemmällä mittauksilla absoluuttinen ero oli hieman suurempi, mutta suhteessa erot olivat samaa suuruusluokkaa. Taulukkoon 7 on tiivistetty näiden kaikkien mittausten tulokset. Taulukon arvot on laskettu siten, että jokaisesta yksittäisestä mittauksesta on ensin laskettu keskiarvon muutoksen absoluuttinen itseisarvo. Seuraavaksi näille itseisarvoille on laskettu keskiarvot, jonka jälkeen saadut luvut on skaalattu siten, että pienempi arvo on aina tasan yksi.

Taulukko 7. *Kulmatarkkuustestien kulmanopeuden ja integroidun kulman keskiarvon muutokset. Taulukon arvot ovat kaikkien mittausten tulosten skaalatut keskiarvot.*

Keskiarvon muutos	Akseli	Anturi A	Anturi B
Kulmanopeus	X	1	4,4
	Y	1	2,2
	Z	1	8,7
Integroitu Kulma	X	1	4,4
	Y	1	4,6
	Z	1	2,2

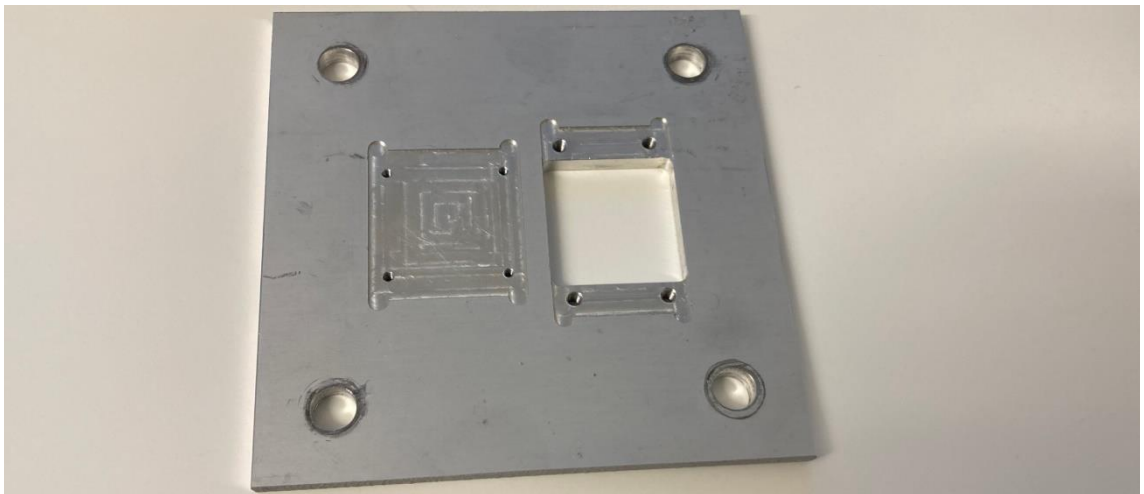
Taulukosta 7 nähdään päivänselvästi, että anturin A avulla laskettu kulmanmuutoksen virhe on x- ja y- akselilla noin neljäsosa anturin B virheestä. z-akselilla Anturi A:n virhe on keskimäärin noin puolet anturin B virheestä. Tämän perusteella voidaan todeta, että kulmanmuutoksen laskemissa anturi A on yksiselitteisesti parempi. Edellä esiteltyjen mittausten perusteella valitaan tämän testin voittajaksi anturi A.

### 3.3.4 Iskutesti

Testin tavoitteena on nähdä, että vaikuttaako mekaaninen isku antureiden offset arvoihin, sekä toimivatko anturit normaalisti iskun aikana, sekä välittömästi sen jälkeen.

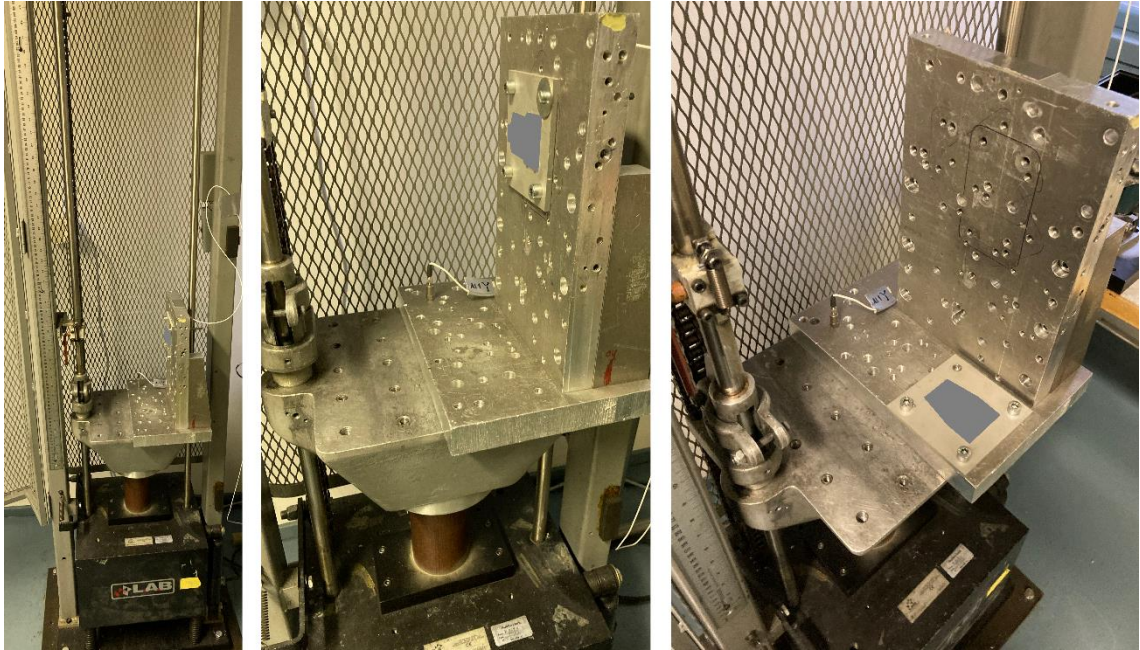
Iskutestissä antureille annetaan useampi kova mekaaninen isku, ja tarkasteltiin sen vaikutusta anturin toimintaan.

Iskutestin järjestelyyn vaadittiin hieman kestävämpi kiinnikelevy, tämä levy näkyy kuvassa 16. Uuden kiinnikkeen lisäksi demokittien evaluaatiolevyt piti ottaa erilleen levystä, jotta niihin ei kohdistuisi iskua. Evaluaatiolevyyn kohdistunut isku saattaisi vaikuttaa mittaustulokseen. Uusi pidikelevy valmistetaan alumiinista ja siten, että anturit voitiin ruuvata suoraan levyyn, ilman tornipaloja. Näin varmistetaan se, että aluslevy varmasti kestää iskun, eikä mahdollinen tornipalojen taipuminen vaikuta testiin. Anturia A joudutaan liittämään evaluaatiolevyyn johtimien avulla, jotta evaluaatiolevy saadaan kauemmaksi, aiemmin anturin piirilevy oli asennettuna piikkirimoilla kiinteästi evaluaatiolevyyn kiinni. Testissä tarvittavat iskut tehdään iskutestilaitteen avulla. Iskutestilaitteessa on iso massa, jota voidaan nostaa sähkömoottorin avulla ilmaan. Kun massa vapautetaan, se alkaa putoamaan. Lopulta massa osuu laitteen pohjalla olevaan pysäytyspalaan, mikä aiheuttaa kovan mekaanisen iskun. Iskun maksimivoimaa voidaan säätää nostamalla tai laskemalla pudotuskorkeutta. Pysäytyspalaa vaihtamalla voidaan vaikuttaa myös iskun keston. Tässä testissä iskun kesto on noin 1 ms. Kuvan 17 vasemmassa reunassa näkyy iskutestilaitte.



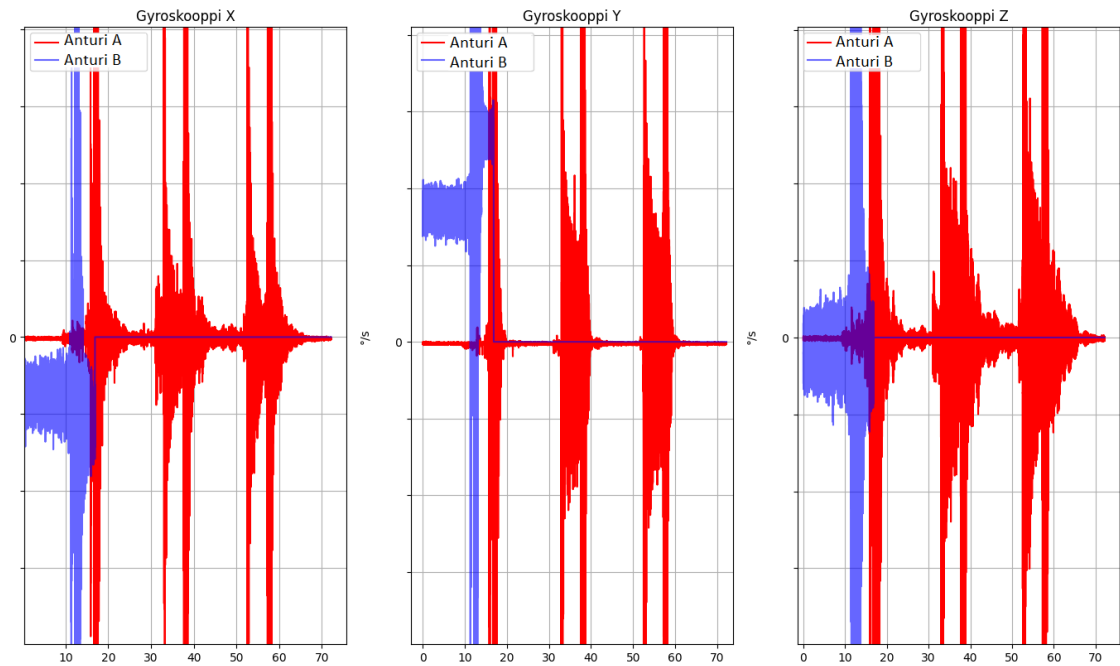
**Kuva 16: Iskutestiä varten tehty uusi aluslevy antureille. Vasemmalla Anturi A, oikealla Anturi B.**

Ensin tehtiin testimittaus z-suuntaan, jossa käytiin 500 g:n iskua, tämä isku toistettiin kolme kertaa. Iskun maksimi g-voimat todennettiin iskutestilaitteessa olevalla kiihtyvyyssanturilla. Testimittauksen aikana molemmat anturit vaikuttivat mittaavan normaalisti ja niiden evaluaatio-ohjelmistot piirsivät jatkuvaa kuvaaja.



***Kuva 17: Iskutestilaite, ja antureiden sijoittelu testilaitteeseen. Vasemmalla X-akselin mittaus, keskellä Y-akselin mittaus ja oikealla Z-akselin mittaus.***

Varsinaiset testit suoritettiin käyttäen kolmea 800 g:n iskua, ensimmäinen testi aloitettiin testipudotusten jälkeen. Mittauksia tehtiin useampi, jonka jälkeen piirrettiin kuvaajat. Ensimmäiset mittaukset piirrettiin heti z-akselin mittausten jälkeen, ennen seuraaviin akselisiin siirtymistä. Kuvaajista nähtiin anturin B:llä suurta kohinaa ja mittauksen loppuminen. Ongelma toistui kaikilla tehdyillä mittauksilla, joten ne toistettiin vielä uudestaan. Uusillakaan testeillä mikään ei muuttunut, joten seuraavaksi toistettiin testit vielä noin 500 g:n iskulla, sekä 300 g:n iskulla. Pienemmilläkin iskuilla sama ongelma esiintyi. Myöhemmin myös testipudotukselle piirrettiin kuvaaja, ja siinäkin näkyi sama ongelma. Näiden mittausten jälkeen anturit käännettiin ja samat mittaukset toistettiin ensin x-akselilla ja sitten y-akselilla. Kuvassa 18 on ensimmäisen 800 g:n mittauksen kiihtyvyyssantureiden datasta piirretty kuvaaja. Kaikkia yksittäisiä mittauksia ei tulla esittämään tässä työssä, mutta kaikissa niissä esiintyi samoja piirteitä kuin kuvissa 18, 19, 20 ja 21. Kuvassa 19 on esitetty toinen mittaus, josta nähdään, että mittauksen alussa anturi B oli jo valmiiksi pois päältä. Kuvassa 20 on valittu se mittaus, jossa anturi B suoriutui kaikista parhaiten. Kuvassa 21 on kuvan 20 kuvaajasta lähennetty versio, jossa näkyy anturi B:n mittauksen loppuminen tarkemmin.

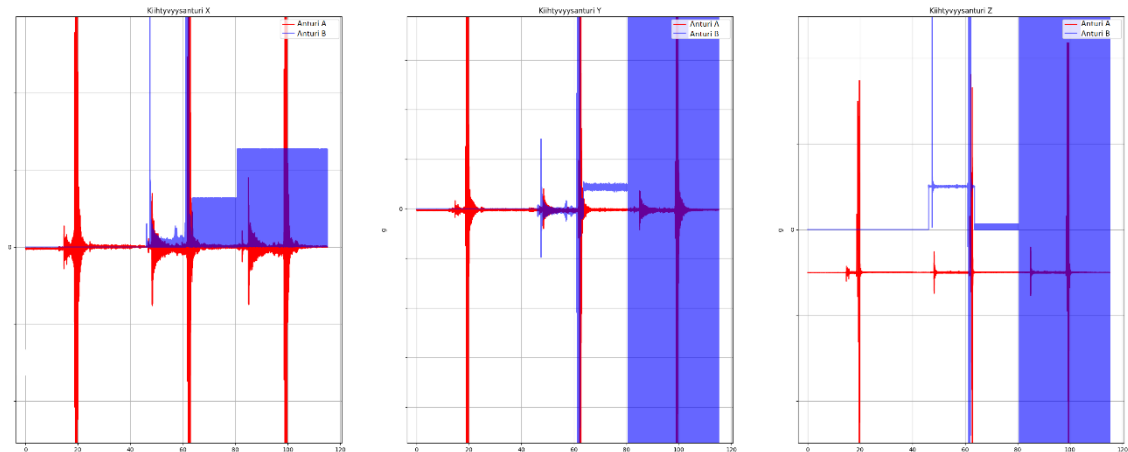


**Kuva 18: Ensimmäisen varsinaisen mittauksen kulmanopeusdata. Huomataan, että anturi B:n mittaus loppuu noin 15 sekunnin kohdalla. Vasemmalla gyroskooppien x-akselien data, keskellä y-akselien ja oikealla z-akselien.**

Kuvassa 18 kuvaajan y-akselia, eli kulmanopeuden suuruutta on leikattu, jotta mittauksen loppuminen näkyy selvemmin. Kuvissa näkyvät piikit kuvastavat iskuja. Jokaista suurta piikkiä edeltää pieni piikki, jotka tässä kuvassa näyttävät samalta, y-akselin leikkauksen takia. Kuvassa 19 piikkien ero näkyy selkeämmin. Pienempi, eli ensin tuleva piikki on se hetki, jolloin iskustestilaitte aloitti noston. Pienen ja suuren piikin välinen korkeampi kohina johtuu iskustestilaitteen moottorin ja ketjun värinästä. Huomattavaa on myös se, että tässä työssä käytettyjä kuvaajia ei ole korjattu ajan suhteen. Mittauksien pituus on sama, mutta koska yksi mittaus alkoi muutamia sekunteja toista aiemmin, ovat piikit hieman eri kohdissa. Todellisuudessa anturit olivat kuitenkin samassa alumiinilevyssä kiinni, ja niihin kohdistui täysin sama isku. Kuvaajia ei ole korjattu, koska korjatusta kuvaajasta on paljon vaikeampi erottaa antureiden piikit. Kun piikit ovat hieman eri kohdissa, helpottaa se niiden näkemistä. Kuvaajista kuitenkin näkee selvästi, että mitkä piikit vastaavat toisiaan. Kuvan 18 kuvaajissa ensimmäisellä iskulla ei näy pienempää piikkiä, koska iskustestilaitte oli valmiiksi yläasennossa ennen mittauksen aloittamista.

Kuten mainittu, testipudotuksessa havaittiin myös sammuminen. Testipudotusten jälkeen anturit olivat sammutettuina ennen varsinaisia mittauksia, mikä saattoi korjata ongelman. Kuten kuvasta 18 nähdään, anturi B lopetti mittauksen heti ensimmäisen iskun jälkeen. Anturi A taas mittasi koko mittauksen ajan ilman ongelmia. Kuvassa 19

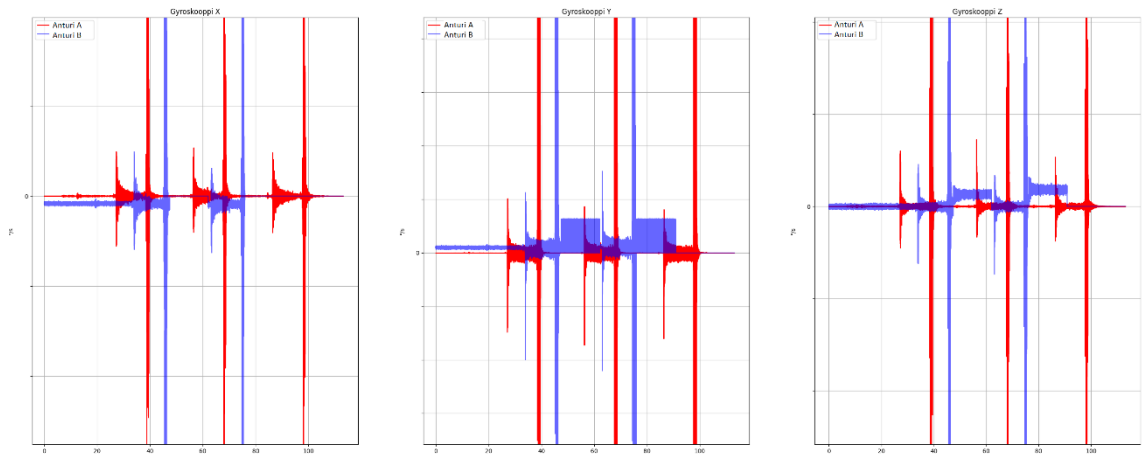
näkyä seuraavan tehdyn mittauksen kiihtyvyyden kuvaajat. Kuvat 18 ja 19 eivät siis ole suoraan verrattavia, koska kuvassa 18 kulmanopeuden kuvaajat. Kuitenkin kuvasta 19 nähdään, että anturi B oli sammuneena, jo ennen mittauksen aloittamista. Kuvasta nähdään myös, että anturi herää henkiin uudestaan. Sen jälkeen anturi mittasi yhden iskun ajan, kunnes se taas lopetti mittauksen. Kiihtyvyydsanturin datassa näkyy suurta kohinaa, mutta vastaavassa kohdassa kulmanopeuden kuvaajassa anturi näyttää nolaa.



**Kuva 19: Toisen varsinaisen iskutesti mittauksen kiihtyvyydsdata. Vasemmalla kiihtyvyydsantureiden x-akselien data, keskellä y-akselien ja oikealla z-akselien.**

Kulmanopeuden ja kiihtyvyyden kuvaajien erona on suuren kohinan esiintyminen. Kuvassa 19 näkyvä erittäin suuri kohina esiintyi vain kiihtyvyydsanturin datassa. Joskus kiihtyvyyden kuvaajat menevät nolaaan, ja joskus niissä esiintyy kohinaa. Vastaavilla hetkillä kulmanopeus menee aina nolaaan. Logiikkaa sille, että koska kiihtyvyydsanturilla näkyy kohinaa ja koska nolaa ei näiden mittauksen aikana löytynyt. Kohinaa esiintyi jossain määrin jokaisessa tehdystä mittauksesta. Ensimmäisen ja toinen testi tehtiin peräjälkeen, eikä antureihin koskettu testien välissä.

Kuvan 18 ja 19 perusteella on kuitenkin selvää, että anturi B sammuu tai lopettaa mittauksen iskun takia. Tämän lisäksi selvää on, että anturi toipuu tästä itsestään ja aloittaa mittaamisen uudestaan hetken kuluttua. Tarkkaa syytä tälle käyttäytymiselle ei ole tiedossa. Eräs teoria on, että anturin automaattinen itsensä vahtiminen näkee iskun takia jotain ongelmallista, ja sen seurauksena pakottaa anturille nolauksen, kalibroinnin tai uudelleen käynnistysen. Jos anturilla tapahtuu jonkinlainen kalibrointi samaan aikaan, kun iskutestilaitteen noston aiheuttama värinä vaikuttaa siihen, saattaisi se haitata kalibrointia ja aiheuttaa suuren kohinan. Edellä esitetty teoria on kuitenkin pelkkää spekulatiota, eikä tarkkaa syytä käytökselle selvinnyt.

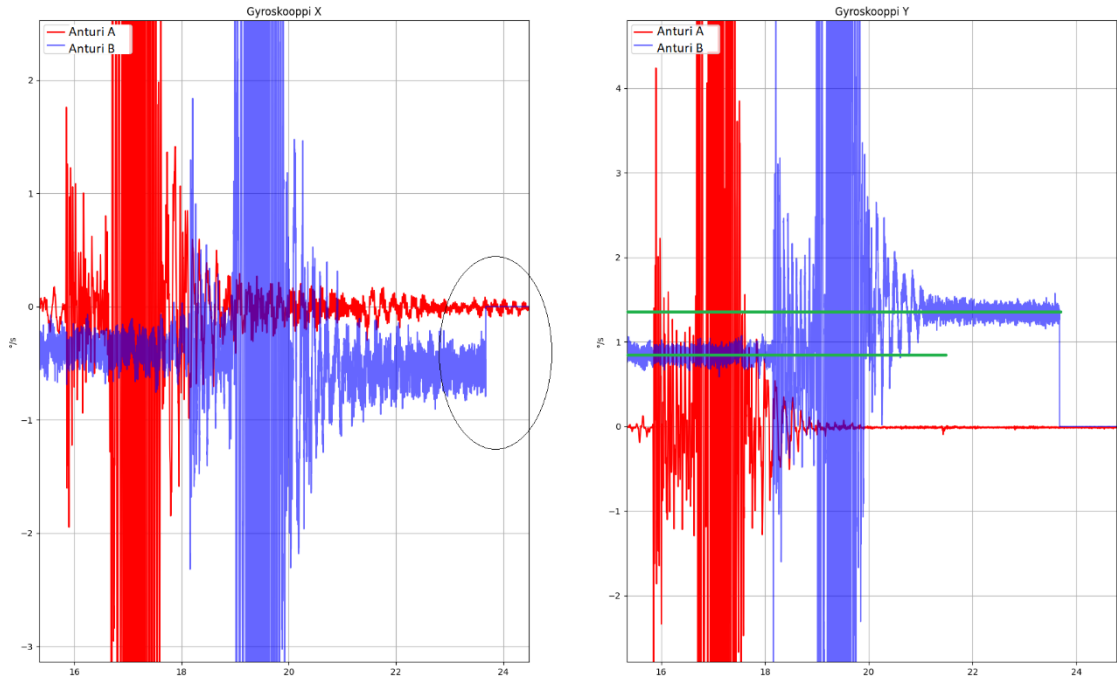


**Kuva 20: Kulmanopeuksien kuvaajat mittauksesta, jossa anturi B toimi pisimpään. Vasemmalla gyroskooppien x-akselien data, keskellä y-akselien ja oikealla z-akselien.**

Kuvasta 20 nähdään, että parhaimmillaan anturi B kykeni mittamaan kahden iskun ajan normaalisti. Kuvassa esitetty kuvaaja on kaikista mittauksista anturi B:n selvästi paras suoritus. Kuvassa on kuitenkin kulmanopeuden mittauksille epätyypillistä kohinaa, joka on suhteessa melko suurta. Kohina näkyy y-akselilla iskujen välissä. Samalla hetkellä x-akselin mittaus näytti nollaa. Z-akselilla samoilla ajanhetkillä tapahtuu myös kohinaa. Z-akselin kohina on suuruudeltaan normaalia, mutta jostain syystä sillä on selvästi suurempi offset. Kuitenkin anturi toipui tästä hyvin nopeasti ja ehti mittaamaan heti seuraavaan iskun. Tämäkään mittaus ei siis kokonaisuutena ollut anturi B:n osalta kovin laadukas.

Koska anturin B ongelmille ei löytynyt ratkaisua, siirryttiin seuraavaksi mittaamaan samanlaisten iskujen vaikutuksia eri akseleiden suuntaan. Samat testit toistettiin x-akselin suuntaan ja havainnot olivat samat. Anturi A mittasi kaikki iskut ilman ongelmia ja anturi B sammui aina välillä. Lopuksi samat testit toistettiin vielä y-akselinkin suuntaan, mutta mittaustulosten kannalta mikään ei muuttunut. Edelleenkin anturi B ei onnistunut mittaamaan yhtäkään kolmen iskun sarjaa kokonaan.

Yhtenä tämän testin tärkeimmistä mittauksista piti olla anturin gyroskooppien offsetin muutokset iskun jälkeen. Tätä ei päästy mittaamaan hyvin, koska anturin B kanssa oli niin paljon muita ongelmia. Kuitenkin mittausten joukosta voitiin poimia yksittäisiä iskuja, jotka anturi B onnistui mittaamaan kokonaan. Kuvassa 21 on esimerkki eräästä tällaisesta iskusta.

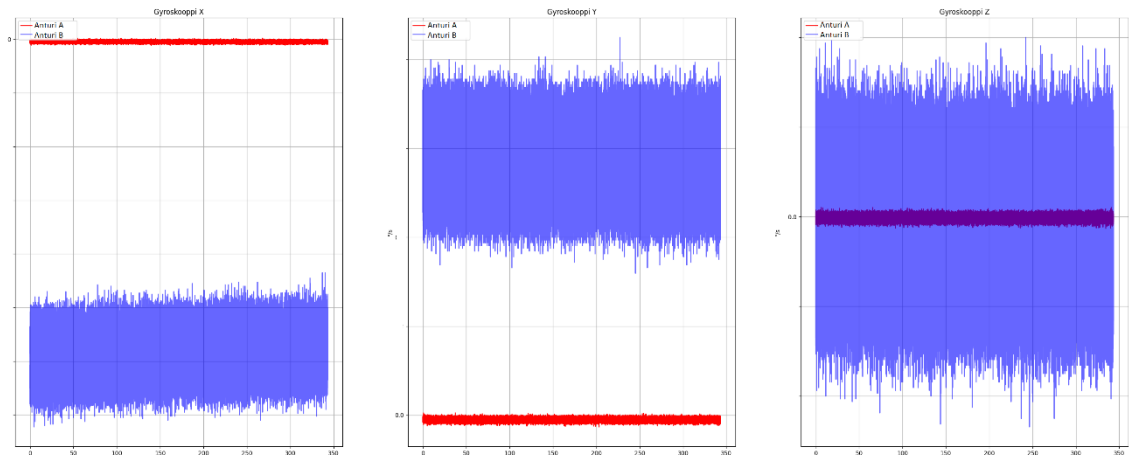


**Kuva 21: Kulmanopeuden kuvaaja iskusta, jonka molemmat anturit mittasivat kokonaisuudessaan. Kuvaaja on zoomattu iskun jälkeiseen hetkeen. Kuvassa vasemmalla on x-akselien kulmanopeudet, oikealla on esitettyä y-akselien kulmanopeudet.**

Kuvassa 21 kuvaajaa on zoomattu siten, että iskua edeltävää offset arvoa päästään vertaamaan iskun jälkeiseen offsettiin. Kuvissa näkyy myös hyvin se hetki, kun anturi B lopettaa mittauksen. Vasemmanpuoleiseen kuvaan tämä hetki on ympyröity mustalla. Siitä näkyy, miten kahden näytteen välillä mittaustulos muuttuu normaalista offsetistä tasan nolliin. Tämä ei ole mitenkään selitettävissä muulla kuin anturin mittaamisen loppumisella. Kuvaaja näyttää tästä hetkestä eteenpäin tasan nolliin, ilman minkäänlaista kohinaa.

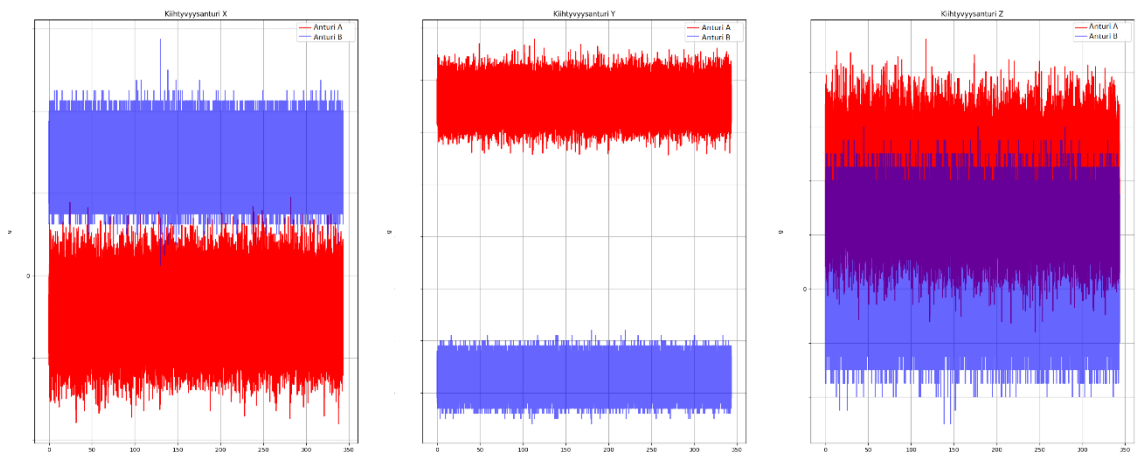
Oikeanpuoleisesta kuvaajasta voidaan nähdä offsetin muutos. Kuvaajaan on piirretty vihreät viivat kuvastamaan offsetin arvoa iskua ennen ja sen jälkeen. Huomataan, että anturin B offset on muuttunut noin  $0,5 \text{ }^\circ/\text{s}$ . Anturin A offsetin muutos on niin pieni, että sitä ei voi silmällä edes havaita tämän kuvaajan perusteella.

Koska edellä esiteltyjen testien perusteella anturin B kunto hieman huolestutti, päätettiin aiemmin tehty staattinen testi toistaa. Viimeisen iskutestin ja staattisen testin välillä antureihin ei koskettu ollenkaan, joten kaikki johdot ja liittimet olivat muuttumattomia mittausten välissä. Tällä kertaa staattisen testin mittausaikana oli vain viisi minuuttia. Kuvassa 22 on esitetty staattisen testin kulmanopeuksien kuvaajat.



**Kuva 22: Iskujen jälkeen tehdyn Staattisen testin kulmanopeuden kuvaajat. Vasemmalta oikealle x-, y- ja z-akselien kuvaajat.**

Kuvasta 22 nähdään, että anturi B toimii taas normaalisti. Kohinan suuruudet vastaavat ainakin kuvaajien perusteella aiemmin mitattuja, mutta offsetit ovat x- ja y-akseleilla hieman suuremmat. X-akselilla nähdään myös suhteellisen selvää offsetin muutosta jo kuvaajasta. Vastaavaa ei näkynyt aiemmissa staattisissa mittauksissa. Tärkeimpänä on kuitenkin se, että anturi mittasi jatkuvasti koko viiden minuutin ajan ilman ongelmia. Kuvassa 23 on saman staattisen mittauksen kiihtyvyyksien kuvaajat.



**Kuva 23: Iskujen jälkeen tehdyn staattisen testin kiihtyvyyksien kuvaajat. Vasemmalta oikealle x-, y- ja z-akselien kuvaajat.**

Kuvasta 23 nähdään, että myös kiihtyvyyksien kuvaajat näyttävät samalta kuin aiemmin tehdyissä staattisissa testeissä. Huomattavaa on, että tässä mittauksessa anturi oli eri asennossa kuin aiemmin. Anturin erilaisen kallistuksen takia offset-arvot eivät ole missään määrin verrattavia aikaisempiin. Staattisen testin perusteella voidaan sanoa, että anturi B ei hajonnut kokonaan iskujen takia. Iskutestien aikana havaitut häiriöt

johtuivat siis nimenomaan iskuista. Lopuksi staattisesta testin datasta laskettiin keskihajonta ja keskiarvon muutos vastaavalla tavalla kuin luvussa 3.3.1. Taulukkoon 8 on lisätty nämä arvot.

Taulukko 8. *Iskutestin jälkeisen staattisen testin keskihajonnat ja keskiarvon muutokset.*

	Suure	Akseli	Anturi A	Anturi B
<b>Kulmanopeus</b>	Keskihajonta	X	1	19,23
		Y	1	15,91
		Z	1	17,00
	Keskiarvon muutos	X	1	-108,75
		Y	1	17,29
		Z	-2,00	1
<b>Kiihtyvyys</b>	Keskihajonta	X	1,50	1
		Y	1,20	1
		Z	1	1
	Keskiarvon muutos	X	1	1
		Y	1	1
		Z	1	1
<b>Kallistuskulmat</b>	Keskihajonta	X	1,35	1
		Y	1,36	1
	Keskiarvon muutos	X	-3,40	1
		Y	1	1

Kun verrataan tämän staattisen testin tuloksia luvussa 3.3.1 tehtyyn staattiseen testiin, huomataan että kohina on edelleen samaa suuruusluokkaa. Taulukon 8 perusteella, myös antureiden väliset erot ovat edelleen yhtä suuret. Taulukosta voidaan huomata kulmanopeuden X-akselilla anturin B suuri offsetin muutos, joka nähtiin jo kuvaajasta. Syytä näin suurelle offsetin muutokselle ei tiedetä varmaksi, mutta voidaan spekuloida, että iskujen aiheuttama offsetin muutos on ehkä vain hetkittäistä ja offset arvo saattaa iskujen loppumisen jälkeen palata hiljalleen takaisin alkuperäisen tasolla. Tällaisesta ilmiöstä ei kuitenkaan ole sen enempää todisteita, eikä sitä lähdetty mittamaan uudestaan, joten se jäi spekulointin tasolla. Vastaavaa offsetin muutosta ei ollut havaittavissa aiemmissa staattisissa testeissä, vaikka ne olivat paljon pidempikestoisia, eli selvästi tässä mittauksessa anturissa oli jokin epätyypillinen ongelma. Koska mittaus tehtiin heti iskujen jälkeen, voidaan olettaa, että ongelma liittyi jotenkin iskuihin.

Edellä esiteltyjen testien perusteella iskutestin voittajaksi valitaan anturi A. Valinta perustuu enimmäkseen siihen, että Anturilla B ei kyetty edes mittamaan iskun vaikutuksia, kun taas anturi A toimi moitteettomasti. Lisäksi anturin B offset muuttui merkittävästi niiden iskujen kohdalla, jotka se onnistui mittamaan.

### 3.4 Valintapäätös

Edellisen luvun vertailun perusteella anturiksi valittiin Anturi A. Tehtyjen testien perusteella voidaan sanoa, että Antureiden A ja B välisessä vertailussa Anturin A gyroskoopilla on parempi suorituskyky. Vastaavasti kiihtyvyyssanturi on Anturi B:ssä hieman parempi.

Tärkeimpinä tekijöinä tähän valintaan olivat gyroskoopin suorituskyky, sekä anturin hinta, koko ja kotelo. Lisäksi Anturi B:n kanssa on todettu aiemmin muitakin ongelmia, joita halutaan karsia pois. Päätökseen vaikuttavana tekijänä on myös se, että päästään kokeilemaan uutta anturia. Antureiden vertailu ja testaus jatkuvat myös tästä eteenpäin. Kun laitteen tuotekehitysprojekti etenee pidemmälle ja sille tehdään toiminnallisia testejä, voidaan valitun IMU-anturin suorituskykyä arvioida paremmin. Tämä päätös ei ole laajemman tuotekehitysprojektin näkökulmasta välttämättä lopullinen, mutta Anturia A halutaan ehdottomasti päästä testaamaan laitteessa. Tässä diplomityössä suunnittelutyö tehdään siis anturille A. Edellisten testien perusteella anturin suorituskyky on käyttötarkoituksen kannalta parempi kuin anturi B:llä.

Edellisten testien yhteenvetona voidaan todeta, että kohinaltansa anturi A:n gyroskooppi on huomattavan paljon parempi, kun taas kiihtyvyyssantureiden kohinat ovat hyvin samaa suuruusluokkaa. Kuten aiemmin on mainittu, tässä työssä nimenomaan gyroskoopin tarkkuudella on isompi prioriteetti, joten tämä tulos tukee anturiin A vaihtamista. Kulmatarkkuustesteissä taas nähtiin, että integroitu kulma pystytään laskemaan selvästi tarkemmin anturilla A. Tämä todennäköisesti juontuu Anturi A:n gyroskoopin pienemmästä kohinasta. Kaikkien kulmatarkkuusmittauksien datasta laskettujen keskiarvojen perusteella Anturi A:n integroituun kulmaan kertyvä virhe on noin yksi neljäsosa Anturiin B kertyvästä virheestä. Lämpötilatestien perusteella antureiden kiihtyvyyssanturit olivat hyvin samanlaiset ja erot olivat pieniä, mutta Anturi B:llä lämpösyklin vaikutus offset-arvoon oli hieman pienempi. Gyroskoopeilla erot olivat hieman suuremmat ja etenkin Y-akselilla anturi B jäi lämpösyklin jälkeen hyvin kauas alkuperäisestä offset-arvosta. Iskutestissä ei edes päästy mittaamaan Anturin B suorituskykyä, koska se ei jatkanut mittausta loppuun asti. Näistä tuloksista voidaan havaita yleinen trendi, jonka mukaan Anturin A gyroskooppi on suorituskyvyltään selvästi parempi, kun taas Anturi B:n kiihtyvyyssanturi on suorituskyvyltään hieman parempi. Lopulta Anturi A:n valinta suunnitteluvaiheeseen oli aika selkeä ja yksiselitteinen. Suorituskyvyn, koon ja hinnan yhdistelmä oli huomattavasti parempi kuin Anturi B:llä. Näiden lisäksi Anturin A layoutista saadaan suunniteltua yksinkertaisempi ja helpommin valmistettava. Anturi B:n erilainen kotelo vaatisi käytännössä minimisään neljäkerroksisen piirilevyn, kun Anturille A suunnittelu onnistuu kaksipuoleiselle levyille.

## 4. PIIRIKORTIN SUUNNITTELU

Tässä luvussa suunnitellaan piirikaavio ja piirilevy edellisessä luvussa valitulle anturille A. Luvussa käydään läpi piirikortin suunnitteluprosessi ja käsitellään käytetyt tekniikat ja ohjelmistot, sekä esitellään ja perustellaan suunnittelussa tehdyt päätökset. Suunniteltava piirilevy tulee olemaan ensimmäinen prototyyppiversio ja sitä tullaan jatkokehittämään tarpeen mukaan. Jatkokehitys ei kuitenkaan tule osaksi tätä diplomityötä.

Piirikortin suunnittelu koostuu kahdesta osasta, piirikaavion suunnittelusta ja piirilevyn layoutin suunnittelusta. Piirikaavion suunnitteluun kuuluu käytettävien komponenttien valinta ja niiden välisten johdotuksien suunnittelu. Piirikortin suunnitteluun kuuluu komponenttien koteloiden valinta, niiden sijoittelu piirilevylle, sekä tarvittavien valmistuksessa käytettävien gerber-tiedostojen tekeminen.

Kun piirikaaviossa käytetyt komponentit on valittu, aloitetaan piirikaavion suunnittelu ECAD (Electronic Computer-Aided Design) -ohjelmistossa. Tässä työssä käytetään PADS Standard plus –ohjelmistopakettia. Se koostuu useammasta ohjelmistosta, joista PADS Logic on piirikaavioiden suunnitteluun tarkoitettu ja PADS Layout on piirilevyn suunnitteluun tarkoitettu. Käytetty ohjelmistoversio on VX2.17.

### 4.1 Piirikaavio

Valitun IMU-anturin ansiosta piirikaavion suunnittelusta tulee suhteellisen yksinkertaista. Koska tähän käyttökohteeseen löydettiin sopiva IMU-anturi, eikä sitä tarvitse itse rakentaa yksittäisistä gyroskoopeista ja kiihtyvyyssantureista, tulee piirikaavioon oikeastaan vain yksi pääkomponentti ja sille muutama oheiskomponentti. Lisäksi piirikortille lisätään liitin johtoja varten.

Senopin pyynnöstä piirikaaviosta ei näytetä kuvaa, eikä anturin jokaisen pinnan liitoksia kerrota. Anturin oleellimmat liitokset, sekä perustelut eri ratkaisulle käydään läpi. Käytetyt oheiskomponentit ovat lähdejännitteiden suodatuskondensaattorit, SPI-linjan sarjavastukset, sekä SPI-linjan alas- ja ylös vetovastukset. Anturilla on valmiina omat sisäiset ylös vetovastukset, eikä datalehdellä ole määrätty ulkoisia ylös vetovastuksia, mutta lisätään piirikaavioon ylös vetovastukset siitä huolimatta. Tämä mahdollistaa ylös vetovastuksien vaikutuksen testaamisen. Testivaiheessa se tarkoittaa, että layoutille jätetään tyhjät paikat ylös vetovastuksille. Jos SPI-väylän signaali näyttää huonolta, voidaan vastukset lisätä helposti ja todentaa, että onko niille tarvetta lopullisella

piirilevyllä. Lisätään myös sarjavastukset kaikille SPI-linjan johtimille, jotta niidenkin vaikutusta päästään testaamaan. Jos sarja- ja ylösvetovastukset osoittautuvat turhiksi tai haitallisiksi, voidaan ne poistaa lopullisesta tuotantoon menevästä piirikortista. Käytetään lähtökohtaisesti 10 kOhm:n ylösvetovastuksia, mutta niiden arvoa voidaan muokata testivaiheessa, jos signaali ei näytä hyvältä. Sarjavastukset ovat tyypillisesti aika pieniä, sillä liian suuret sarjavastuksen arvot johtavat nousuajan kasvamiseen, mikä rajoittaa SPI:n maksiminopeutta. Valitaan sarjavastusten arvot testausvaiheessa, sen perusteella minkälaisia vastuksia on saatavilla sillä hetkellä. Suodatuskondensaattoreiden sijainnit ja niiden kapasitanssiarvot on annettu valmiina anturin datalehdellä, joten käytetään valmistajan määrittämiä arvoja.

Tässä työssä käytetään vain anturin perusominaisuuksia, joten pelkkä SPI-linjan yhdistäminen riittää. Täten liittimeksi tarvitaan kuusi pinninen liitin, johon liitetään 3v3 lähdejännite, maa ja SPI:n MISO (Master In Slave Out), MOSI (Master Out Slave In), CS (Chip Select) ja SCLK (Serial Clock) –linjat. Muiden anturin pinnien kiinnitykset katsotaan myös anturin datalehdeltä. Datalehdellä yksi käyttämätön pinni käsketään jättää kellumaan, kun taas kaksi muuta käyttämätöntä pinniä käsketään laittamaan maahan. Noudatetaan datalehden ohjeita näiden pinnien kohdalla. Reset-pinni taas käsketään yhdistämään suoraan anturin VDDIO (Voltage Drain Digital I/O) -pinniin tai maksimissaan 20 kOhm suuruisen ylösvetovastuksen kautta lähdejännitteeseen, joten tehdään näin.

Datalehdellä käsketystä poiketen VDDIO:lle ei tuoda omaa jännitettä, vaan se yhdistetään suoraan 3,3 V lähdejännitteeseen. Normaalisti anturille tuodaan kaksi eri jännitettä, joista toinen, eli VDDIO, määrää anturin väylien jännitteet, mikä mahdollistaa anturin kommunikoinnin muiden laitteiden, kuten prosessorien kanssa. VDDIO siis asetetaan samaksi kuin prosessorin jännite. Jos prosessori käyttää 5V jännitettä, vaatii se myös SPI-linjalta 5V jännitteen. Anturin itsensä käyttämä lähdejännite on 3,3V, joten 5V prosessoria varten anturille olisi vietävä kaksi eri jännitettä. Kuitenkin tässä tapauksessa käytössä oleva prosessori käyttää myös 3,3V jännitettä, joten anturin 3,3V ja VDDIO voidaan yhdistää toisiinsa.

Piirikaavion laatiminen alkaa komponenttien lisäämisellä. PADS ohjelmistoon sisältyy valmis komponenttikirjasto, mutta tässä työssä käytetyt komponentit eivät suoraan löydy sieltä, joten komponentit on tehtävä itse tai ladattava netistä. Elektroniikkasuunnittelun osalta komponenteille tarvitaan footprint, dekaali ja piirikaaviosymboli. Mekaniikkasuunnittelun kannalta myös 3D-mallit ovat hyödyllisiä ja niiden avulla voidaan esimerkiksi tarkistaa, että suunniteltu piirilevy mahtuu sille tarkoitettulle paikalle. PADS Layout sisältää myös ominaisuuden, jolla valmis 3D-malli voidaan ladata. Sitä varten

komponenteille on oltava 3D-mallit. Komponenttien 3D-malleja voi ladata nettisivuilta, kuten UltraLibrarian tai ComponentSearchEngine.

Kun dekaalit ja symbolit on tehty, voidaan ne lisätä PADS Schematic ohjelmassa piirikaavioon. Sitten piirikaavioon piirretään aiemmassa luvussa selitetyt johdotukset.

Piirikaavion suunnittelu sujui lopulta nopeasti, sillä anturin datalehdellä oli erittäin kattavat ohjeet suunnittelua varten. Vain komponenttien dekaalien ja symbolien tekeminen vei paljon aikaa. Erillisillä gyroskoopeilla ja kiihtyvyyssantureilla suunnittelutyöstä olisi tullut paljon monimutkaisempi ja haastavampi. Kun piirikaavio on tehty PADS Schematic –ohjelmassa, voidaan se siirtää PADS Layout- ohjelmaan.

## 4.2 Piirilevy

Tässä alaluvussa suunnitellaan piirilevyn layout, sekä päätetään käytettävien oheiskomponenttien kotelot. Piirilevylle ei ole koon ja kiinnitysreikien lisäksi muita vaatimuksia. Koko, kiinnitysreiät ja reikävälit määräytyvät piirilevylle varatun tilan perusteella. Piirilevy sijoitetaan lopullisessa käyttökohteessa erilleen prosessorin piirilevystä, joten näiden kahden levyn välille tarvitaan johdin. Johtimen liittimenä käytetään Pico-Clasp 1x6 liitintä 1 mm jakovälillä. Valitaan RA-malli, joka tarkoittaa suorakulmaista liitintä, eli lähtevät johdot tulevat suoraan kulmaan suhteessa piirilevyn pintaan. Toisin sanoen johdot lähtevät sivulle piirilevyn reunalta. Piirilevynä käytetään normaalia 1,6 mm paksuista kaksipuoleista FR4-piirilevyä.

Anturin ja liittimen dekaaleille on annettu mitat niiden datalehdillä, joten noudatetaan niitä ja tehdään komponenteille dekaalit. Oheiskomponenteille valitaan kooksi 0603. Tämän valinnan perusteena on 0603-pakettisten kondensaattorien ja vastusten hyvä saatavuus. Tehonkulutuksen puolesta myös pienemmät komponentin sopisivat käytettäväksi, mutta etenkin tässä työssä tehtävän ensimmäisen version kannalta on hyödyllistä, että komponentteja voidaan tarvittaessa vaihtaa eriarvoisiin, jos testauksessa ilmenee ongelmia. 0603-kokoisia komponentteja on myös helppo ja nopea vaihtaa, mikä tekee protolevyn testaamisesta vaivattomampaa. Suurista oheiskomponenttien paketeista ei myöskään ole tässä tapauksessa haittaa, sillä levyllä jää paljon tilaa.

Levyllä tulee useita suodatuskondensaattoreita, jotka kytketään toiselta pinniltään maahan. Lisäksi anturin pinneistä yhdeksän kytketään suoraan maahan. Lisäksi levyn kiinnitysreiät halutaan maadoittaa. Tätä varten tehdään levyn molemmille puolille yhtenäiset maatasot. Maatasot yhdistetään toisiinsa useiden läpivientien avulla. Levyn yläpuolelle jää kohtia, joissa johtimien väliin tulee maataso, joka ei ilman läpivientä olisi kiinni muussa maatasossa. Kondensaattorien ja läpivientien kohdalle on tehtävä niin

sanotut thermal padit. Thermal pad tarkoittaa yleensä maahan kytketyn pintaliitoskomponentin padin ympärille tehtävää lämpöä eristävää rakennetta. Maassa olevan pinnan voisi suoraan juottaa isoon kuparitasoon, mutta kuparin hyvä lämmönjohtokyky johtaa tinan leviämiseen. Tinan leviämisen estämiseksi padin ympäriltä poistetaan hieman kuparia, jolloin lämpö ei pääse siirtymään maatasoon yhtä tehokkaasti. Tässä tapauksessa Thermal pad vain helpottaa juottamista. Kiinnitysreikiä varten ei tehdä Thermal padejä, sillä niiden avulla on tarkoitus ruuvata levy laitteen runkoon ja siten juottamiselle ei ole tarvetta. Piirilevyn suunnittelussa valittiin 0,2 mm johtimien väliseksi minimietäisyydeksi. Myös thermal padien ympäriltä poistetun kuparin leveydeksi valitaan 0,2 mm. Vastaavasti johtimien välinen minimietäisyys on myös 0,2 mm.

Kaikki piirilevylle asennettavat komponentit sijoitetaan piirilevyn yläpinnalle. Komponenttien sijoittaminen yläpinnalle on pakollista, sillä levylle tehdyn tilavarauksen perusteella alapuolelle jää tilaa vain noin 0,25 mm. Myös suurin osa johdotuksista laitetaan yläpinnalle. Vain CS-linja joudutaan viemään levyn alapinnalle, sillä sen on mentävä ristiin MOSI-linjan kanssa.

Kuten luvussa 4.1 mainittiin, piirilevylle tulee muutamia ylimääräisiä paikkavarauksia vastuksille, jotta niiden vaikutuksia päästään testaamaan. Näiden reititys ja suunnittelu tehdään samalla tavalla kuin kaikille muillekin komponenteille. Sarjavastukset sijoitetaan mahdollisimman lähelle anturin pinnejä. Myös suodatuskondensaattorit halutaan mahdollisimman lähelle anturia. Ylös- ja alasetovastukset sijoitetaan sitten jäljelle jäävään tilaan. Ylössetovastukset on hyvä sijoittaa lähelle lähdejännitettä, jotta ylösvedon johdinpituus pysyy suhteellisen lyhyenä.

Valmistusta ja tuotantoa varten piirilevylle pitää generoida gerber-tiedostot. Tämän työn osalta gerber-tiedostot tehdään vain itse valmistettua protolevyä varten. Käytössä oleva piirilevyjyrsin tarvitsee neljä eri tiedostoa, joiden mukaan se jyräsi halutun piirilevyn. Piirilevyn valmistus jyräsimellä tapahtuu siten, että piirilevyn kuparikerros jyräsitään pois halutuista kohdista. Tarvittavat tiedostot ovat piirilevyn reunat, ylä- ja alapuolen reitityskuvat, sekä porauskuva. Nämä tiedostot PADS-ohjelmisto pystyy generoimaan automaattisesti, kunhan komponentit ja reititykset on tehty oikealle tasolle. Ohjelmiston asetuksista saa valita, että mitä kaikkea eri tasoihin sisällytetään riippuen valmistuksessa käytetyistä laitteista. Esimerkiksi tässä työssä käytetty jyräsin vaatii, että levyn ulkoreunalle on oma tiedostonsa, jolloin levyn ulkoreunat ovat poistettava ylä- ja alapuolen reitityskuvista.

Tuotantovaiheeseen siirryttäessä tarvitaan hieman erilaiset gerber-tiedostot. Protoiluvaiheessa esimerkiksi juotosmaskille ja piirilevyn silkkipainolle ei ole tarvetta. Koska juotokset tehdään käsin, ei myöskään osaluetteloa tai komponenttien sijoittelukuvaa tarvita. Tuotantoa varten myös nämä tiedostot on oltava, ja ne voidaan generoida PADS:n avulla. Tässä diplomityössä ei suunniteltu juotosmaskia, eikä silkkipainoa, mutta piirilevyn jatkokehityksessä myös ne tullaan suunnittelemaan. Juotosmaskin suhteen suunnittelutyö on hyvin vähäistä, sillä komponenttien dekaalit sisältävät jo valmiiksi juotosmaskin. Yleensä juotosmaski lisätään kaikkialle paitsi juotettavien padien kohdalle.

## 5. PIIRIKORTIN TESTAUS

Tässä luvussa käsitellään demopiirikortin valmistusta ja sen testausta, sekä todennetaan sen toiminta. Testauksen tuloksien analyysin yhteydessä pohditaan mahdollisia piirilevyn suunnittelussa tehtyjä virheitä ja niiden ratkaisuja tai muita parannusvaihtoehtoja.

Valmiin piirilevyn tilauksessa kestää niin kauan, että se ei vielä ehdi tämän työn aikatauluun, joten testausta varten valmistetaan demopiirilevy itse. Piirilevyn demoversio valmistetaan Tampereen Yliopistolla käyttäen piirilevyjyrsintä. Demolevyn ansiosta suunnitellulle piirilevylle päästään suorittamaan alustavia testejä. Valitettavasti tämän työn aikataulun puitteissa tarkempia käytännön toiminnallisia testejä ei ehditä suorittamaan.

Protolevyn tarkoituksena on todentaa suunnitellun piirilevyn toiminta. Tärkeimpänä mittarina toiminnalle on se, että anturi saadaan päälle ja sen mittaustulokset saavuttavat saman tai lähes saman tarkkuuden kuin valmistajan oma demokit. Mittaustuloksia verrataan siis aiemmin luvussa 3 käytettyyn Anturin A demokittiin. Tämän lisäksi SPI-signaalien signaalimuotoja tarkastellaan oskilloskoopilla. Kaikki liittimelle vietävät signaalit tarkistetaan. Lähdejännitteen suhteen halutaan tarkkailla suodatuskondensaattorien toimivuutta mittaamalla jännitteen vaihtelua. SPI-linjan johtimien suhteen kiinnostaa etenkin sarjavastuksien, sekä ylös- ja alasvetovastuksien vaikutus signaalin muotoon. Tämän testin tavoitteena on todeta kytkentä toimivaksi, mutta myös selvittää mikä on vastuksien todellinen tarve.

Todennäköisesti joitakin vastuksia voidaan poistaa kokonaan, eikä se vaikuta signaalin laatuun. Näissä tapauksissa piirikaaviota voidaan yksinkertaistaa poistamalla turhia vastuksia. Mittauksissa testataan signaali ilman mitään vastuksia, sarjavastauksen kanssa, mutta ilman ylösvetovastusta, molempien vastusten kanssa, ja lopulta pelkän ylösvetovastuksen kanssa. Näistä parhaan tuloksen perusteella valitaan jatkossa käytettävät vastukset. Samat mittaukset toistetaan siis CS, SCLK, MISO ja MOSI signaaleille. Oletuksena on, että suurin osa vastuksista on turhia, sillä anturin SPI-linja on aktiivisesti ajettu, joten ylösvetovastuksille ei pitäisi olla tarvetta. Sarjavastuksia taas käytetään yleensä heijastusten poistamiseen. Heijastuksia esiintyy yleensä pidemmällä johtimilla. Tämän piirilevyn tapauksessa johtimet ovat aika lyhyitä, mutta käytettävässä testijärjestelyssä johtimet ovat selvästi pidemmät, joten sarjavastuksen osalta tilanne eroaa selvästi käyttökohteesta. Lopullisessa käyttökohteessa johtimet tulevat olemaan

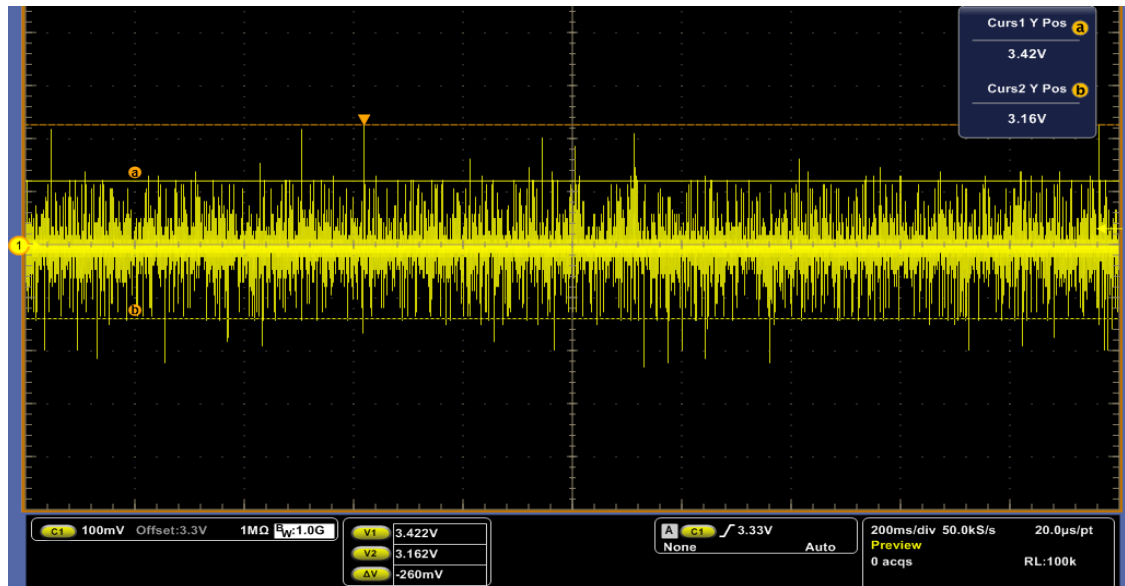
paljon lyhyemmät. Pitkät johtimet saattavat aiheuttaa muun muassa ylimääräistä kohinaa ja ylikuulumista signaaleihin, sekä hidastaa niiden nousuaikoja.

Näitä testejä varten suunniteltu piirilevy tullaan asentamaan aiemmin käytetylle anturin A demokitin evaluaatiolevylle. Koska piirilevy ei suoraan sovi evaluaatiolevylle, joudutaan sille tekemään oma johto. Piirilevy asennetaan aiemmissa testeissä käytetylle muovilevyllä, evaluaatiolevyn viereen. Järjestelyn takia piirilevyn ja evaluaatiolevyn välisen johdon pituuden on oltava noin 15 cm. Suunnitellun piirilevyn ja valmistajan demokitin välillä on muutamia pieniä eroja. Suunniteltu piirilevy on kaksi kerroksinen, kun taas valmistajan demokit näyttäisi olevan neljä kerroksinen. Demokit on myös mahdollista kiinnittää evaluaatiolevyllä piikkiriman avulla. Huomattavaa on myös se, että demokitillä ei näy mitään vastuksia. Lisäksi kaikki demokitin pinnit ovat kytkettynä evaluaatiolevyyn, kun taas suunnitellussa piirilevyssä vain lähdejännite, maa ja SPI-väylä on kytkettynä. Nämä erot saattavat aiheuttaa mittaustuloksissa eroja antureiden välille. Etenkin pitkän johdon käyttäminen saattaa aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia mittaukseen.

## 5.1 Lähdejännite

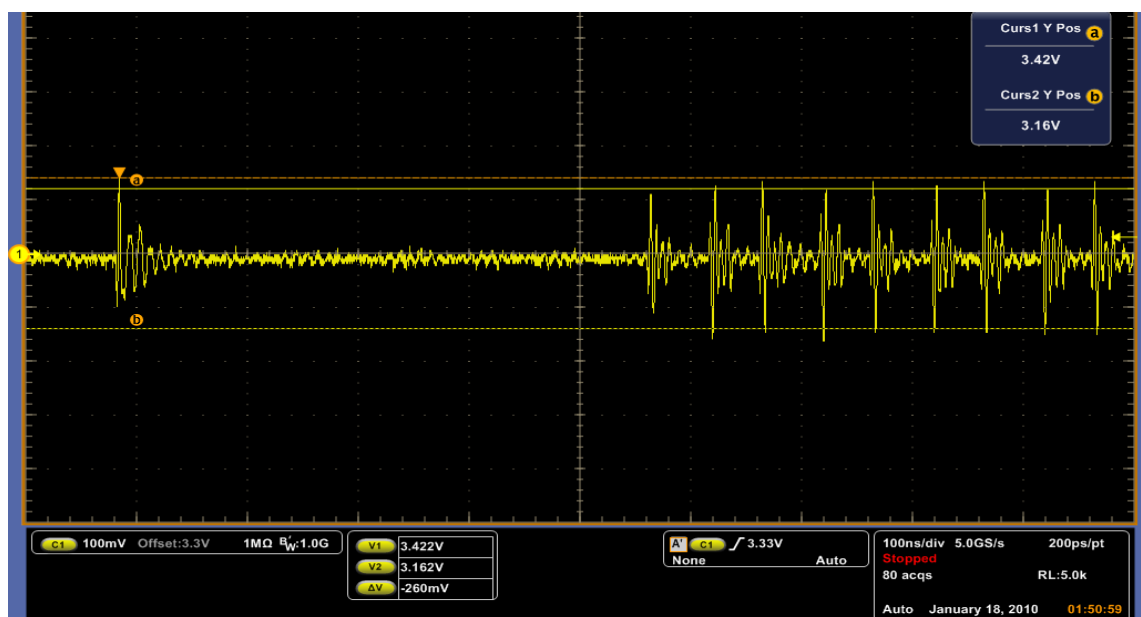
Ensimmäisenä tarkistetaan anturin lähdejännite. Jännite mitataan oskilloskoopilla suoraan anturin pinneiltä. Kolmelle anturin pinnille viedään jännite, joista yksi on VDDIO ja kaksi muuta ovat anturin käyttöjännite. Näiden kolmen jännitteen pitäisi olla keskenään sama, ja niiden suuruuden pitäisi olla noin 3,3 volttia. Yleismittarilla tarkasteltaessa jännite on 3,3 volttia ja anturin kaikilla kolmella jännitepinnillä mittaustulos oli sama. Oskilloskoopin kanssa mitatessa kuitenkin huomataan, että jännitteessä on suurta kohinaa. Kuvassa 24 näkyy oskilloskoopilla mitattu kohina. Kohina esiintyy riippumatta siitä, että miltä jännitepinniltä jännite mitataan.

Tämän kohinan suuruus vaihtelee hieman eri mittausten välillä, mutta pahimmillaan sen huipusta huippuun arvo on noin 700 mV. Kun jännitettä tarkastellaan lyhyemmällä aikavälillä, huomataan, että kohina on jaksottaista. Jokainen tällainen jakso on vielä jaettuna kolmeen osioon. Kokonaisuudessaan kohinajakson kesto on noin 5,5  $\mu$ s ja jaksojen välit ovat noin 21  $\mu$ s. Kohinajaksojen välistä mitattuna jännitteen kohina on noin 30 mV huipusta huippuun, mikä vastaa valmistajan demokitiltä mitattua jännitettä.



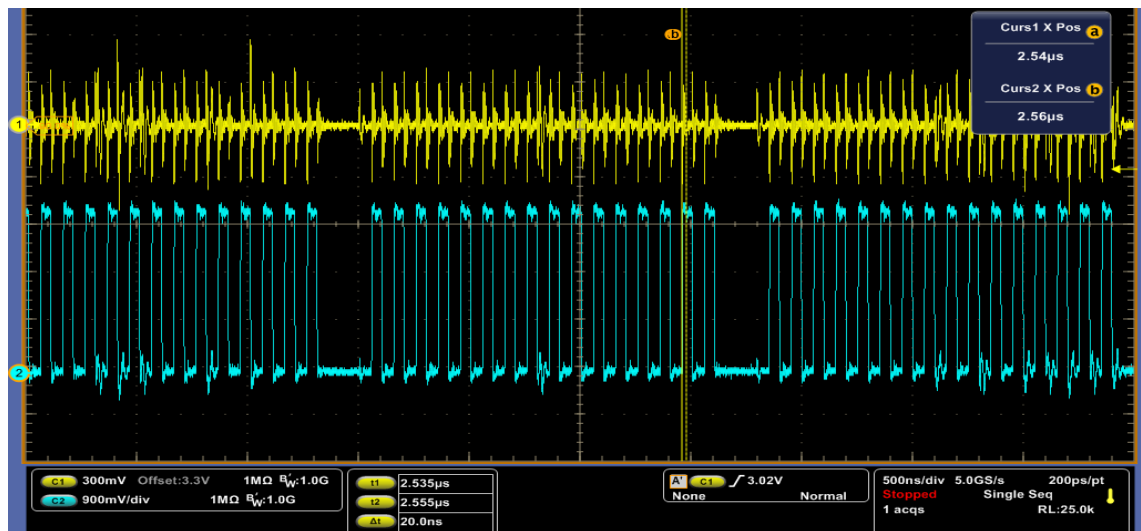
**Kuva 24: Anturin lähdejännitteessä on selvää kohinaa. Kohinan suuruus on noin 260mV**

Oskilloskoopin aikaikkunaa lyhentäessä saadaan näkyviin yksittäiset jännitepiikit, joista kohina muodostuu. Nämä piikit näkyvät kuvassa 25. Piikkien värähtelyjen jaksonaika on noin 5 ns, ja kahden piikin välinen aika on 42 ns ja 57 ns. Joka toinen piikkienväli on kestoltaan 42 ns ja joka toinen 57 ns. Jokaisen kohinajakson väli on noin 21  $\mu$ s ja kesto noin 5,5  $\mu$ s. Yksi kohinajakso taas on jakautunut kolmeen erilliseen lyhyempään kohinajaksoon, joiden pituudet ovat noin 1,6  $\mu$ s ja välit 190 ns.



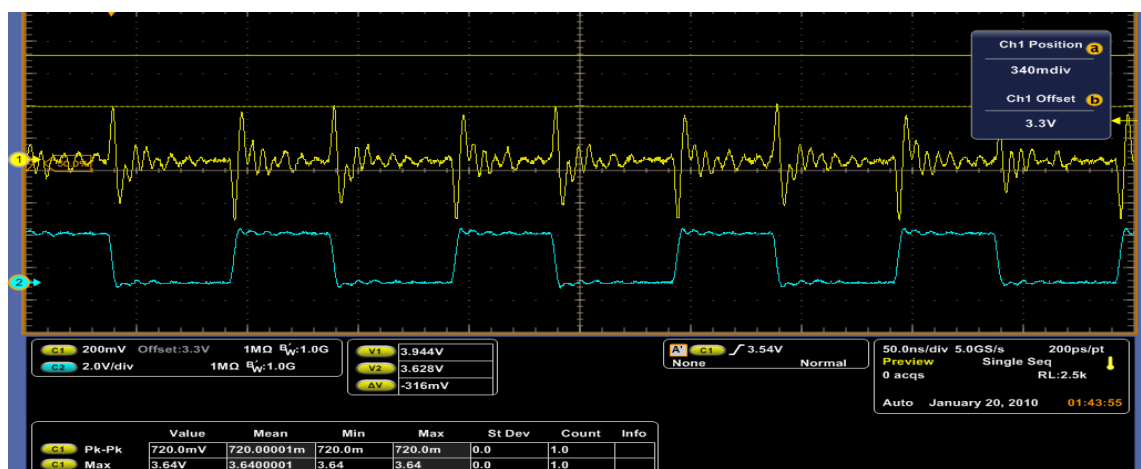
**Kuva 25: Lyhyemmällä aikavälillä tarkasteltuna kohina näkyy piikkeinä, piikkien värähtelyn jaksonaika on noin 5 ns. Piikkien välit ovat vuorottain 42 ns ja 52 ns.**

Tämän mittauksen jälkeen siirryttiin mittaamaan SPI-väylän signaaleja, mutta SCLK-linjan, eli kellosignaalin mittauksissa huomattiin, että kellosignaali näyttää hyvin samalta kuin jännitteessä näkyvät piikit. Tämän seurauksena päätettiin mitata jännitettä ja kellosignaalia samanaikaisesti. Kuvassa 26 on esitetty tämän mittauksen tulos. Kuten kuvasta nähdään, jännitteen kohina on samassa rytmissä kellosignaalin kanssa. Kuvassa 26 näkyy myös aiemmin mainittu kohinajakso, joita jännitteessä voitiin havaita. Tämäkin vastaa kellosignaalia.



**Kuva 26: Jännitteessä näkyvä häiriö keltaisella ja kellosignaali sinisellä mitattuna samanaikaisesti.**

Seuraavaksi tarkasteltiin samoja signaaleja myös lyhemmällä aikavälillä. Tämä on esitetty kuvassa 27. Kuvasta nähdään, että jännitteen piikit tapahtuvat juuri samalla hetkellä kellosignaalin nousu- ja laskuhetkien kanssa.



**Kuva 27: Kellosignaali sinisellä ja jännite keltaisella. Kuvasta nähdään, että kellosignaalin nousu- ja lasku aiheuttavat piikkejä jännitteessä.**

Näiden mittausten perusteella voidaan tehdä päätelmä, että kellosignaalin ylikuuluminen jännitteessä aiheuttaa jännitteen kohinan. Kun kellosignaali irrotetaan kokonaan, paranee jännite huomattavasti, mutta siellä esiintyy edelleen yksittäisiä piikkejä. MOSI- ja CS-linjat irrottamalla nämäkin piikit häviävät. Myös nämä linjat aiheuttavat pientä häiriötä jännitteeseen, mutta SCLK-linjan vaikutus on selvästi suurin. Oletettavasti myös MISO-linja aiheuttaa piikkejä, mutta niiden vaikutusta ei voida nähdä siten, että kellosignaali on kiinnitettynä, koska mahdolliset piikit hukkuvat kellosignaalin aiheuttamaan kohinaan. Ilman kellosignaalia MISO lopettaa lähettämisen, joten sen aiheuttamia piikkejä ei päästä näkemään oskilloskoopilla.

Näistä mittauksista nähdään, että jännitteen kohina voidaan selittää SPI-väylän ylikuulumisella. Ylikuulumista voidaan pienentää muun muassa sijoittamalla signaalien vedot eri lailla piirilevyille. Kun halutaan vähentää ylikuulumista, voidaan vedot siirtää kauemmaksi toisistaan tai kääntää ne eri kulmaan, jotta ne eivät olisi keskenään rinnakkain. Tämän lisäksi esimerkiksi kellosignaalin veto voitaisiin viedä piirilevyn alapuolelle. Piirilevyn layout muutosten lisäksi ylikuulumisen vaikutusta voidaan yrittää pienentää suodattamalla se pois jännitteestä. Jännitteeseen voitaisiin lisätä kela sarjaan, mikä auttaisi vaimentamaan piikkejä. Vaihtoehtoisesti valittujen kondensaattorien kokoja voitaisiin muuttaa tai ylimääräisiä kondensaattoreita voitaisiin lisätä.

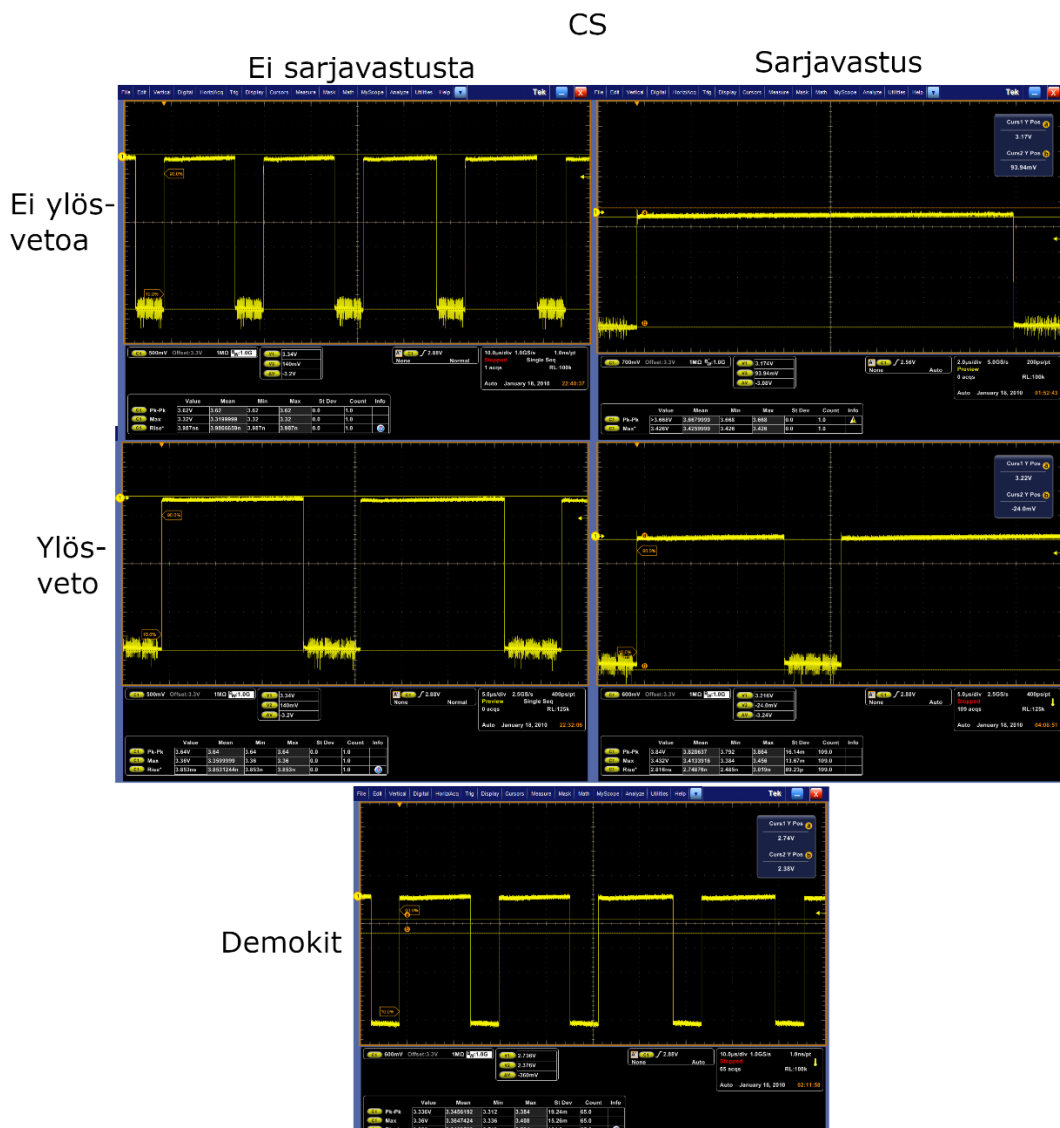
Myös käytetyn johdon pituus saattaa vaikuttaa ylikuulumisen suuruuteen. Käyttökohteessa johdosta tulee huomattavasti lyhempi, joten ylikuuluminen saattaa vähentyä jo sillä. Johdon yksittäisiä johtimia ei kuitenkaan voida erottaa, joten pyritään pitämään johto mahdollisimman lyhyenä. Edellä mainittuja muutoksia ei ehditä tämän diplomityön aikataulussa kokeilemaan, mutta ne tullaan ottamaan huomioon seuraavalla suunnittelukierroksella. Demokitissä vastaavia piikkejä ei ole havaittavissa. Demokitin monikerroksisuus, sekä piikkirimakytKentä voivat osin vaikuttaa tähän. Pitkät rinnakkaiset johdot voivat osin selittää ylikuulumista. Toisaalta mittaus toistettiin siten, että johtoja vedettiin hieman erilleen. Johdot jäivät silti hyvin lähelle toisiaan, mutta eivät olleet enää kontaktissa keskenään. Tällä ei ollut havaittavaa vaikutusta ylikuulumisen määrään. Käytetyt suodatuskondensaattorit ovat samanlaisia kuin demokitillä.

## 5.2 SPI-väylä

Seuraavaksi testataan suunnitellun IMU-kortin signaalien laatua eri vastuskombinaatioilla. Anturi, suodatuskondensaattorit ja liitin on jo juotettuna kiinni. Aloitetaan lisäämällä jokaiselle SPI-linjan pinnille sarjavastus 33ohm. Sen jälkeen toistetaan mittaukset käyttäen sarjavastusta ja ylös- tai alavetovastusta. Sitten toistetaan mittaukset käyttäen pelkkää ylös- tai alavetovastusta ja viimeisenä toistetaan testi

kokonaan ilman vastuksia. Verrataan tuloksia demokitin signaaleihin, ja päätetään sen perusteella, mikä vastuskombinaatio on paras tai mitkä vastukset ovat tarpeellisia.

Mittauksissa käytetään oskilloskooppia, jotta signaalin aaltomuotoa voidaan analysoida. Huomioitavaa on, että kaikkia mittauksia ei ole tehty samana päivänä ja oskilloskoopin asetukset ovat hieman erilaiset mittausten välillä. Tämän lisäksi oskilloskoopin päivämäärä on hieman vanha. Mittaukset on suoritettu vuonna 2025 viikolla 47. Mittausta varten piirikortti yhdistetään evaluaatiolevyyn ja se laitetaan päälle valmistajan ohjelmiston avulla. Ensimmäisenä mitataan SPI-väylän CS-linja. Kuvassa 28 on esitettyinä kaikkien viiden mittauksen tulokset.

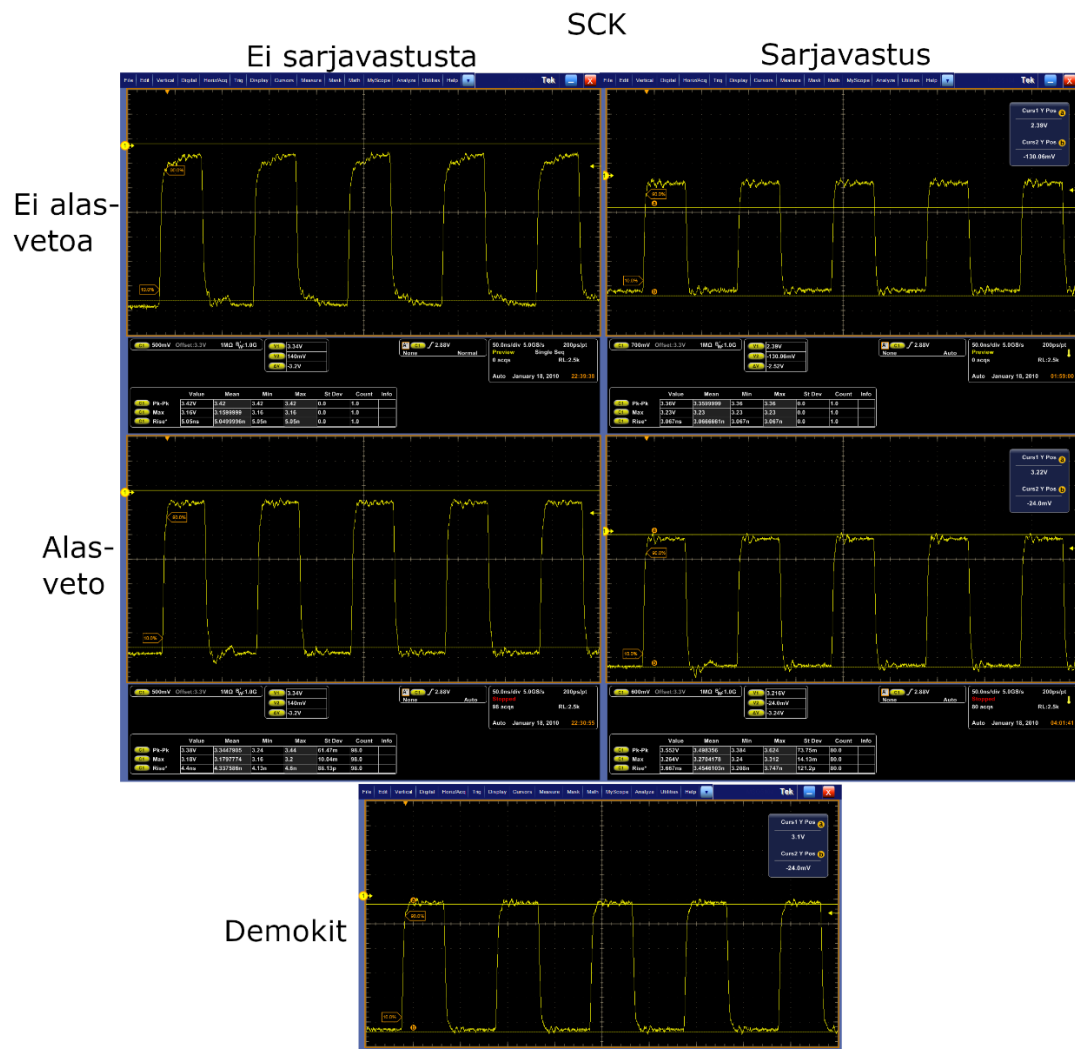


**Kuva 28: Piirikortin CS-linjan vertailu eri vastuskombinaatioilla.**

CS-linjan signaalia katsottaessa huomataan, että signaalin ollessa alhaalla, siinä on huomattavaa kohinaa. Tämä ei muutu millään vastuskombinaatiolla ja muutenkin

signaali on hyvin samankaltainen riippumatta vastuksista. Signaalin nousuaika ja jännite pysyvät hyvin vakiona vastuksista huolimatta. Myös signaalin muoto, näyttää samalta kaikissa testeissä. Signaali on muodoltansa erittäin siisti kanttiaalto. Signaalissa näkyvä kohina vastaa jännitteessä nähtyä, eli myös tämä kohina johtuu SPI-linjojen ylikuulumisesta. Demokitin vastaavassa signaalissa ei ole samanlaista kohinaa, joten tässä kohtaa on selvää parantamisen varaa tulevia versioita varten. Vastuksilla ei ollut kohinaan vaikutusta, joten voidaan todeta, että CS-linjalle ei tarvitse asentaa mitään vastuksia. Näin ollen niiden paikat voidaan poistaa tulevista piirilevy versioista.

Seuraavaksi sama mittaus toistetaan SPI-väylän SCLK-linjalle. Mittaukset tehdään samalla tavalla kuin CS-linjalle. Kuvassa 29 on esitetty näiden mittausten tulokset.

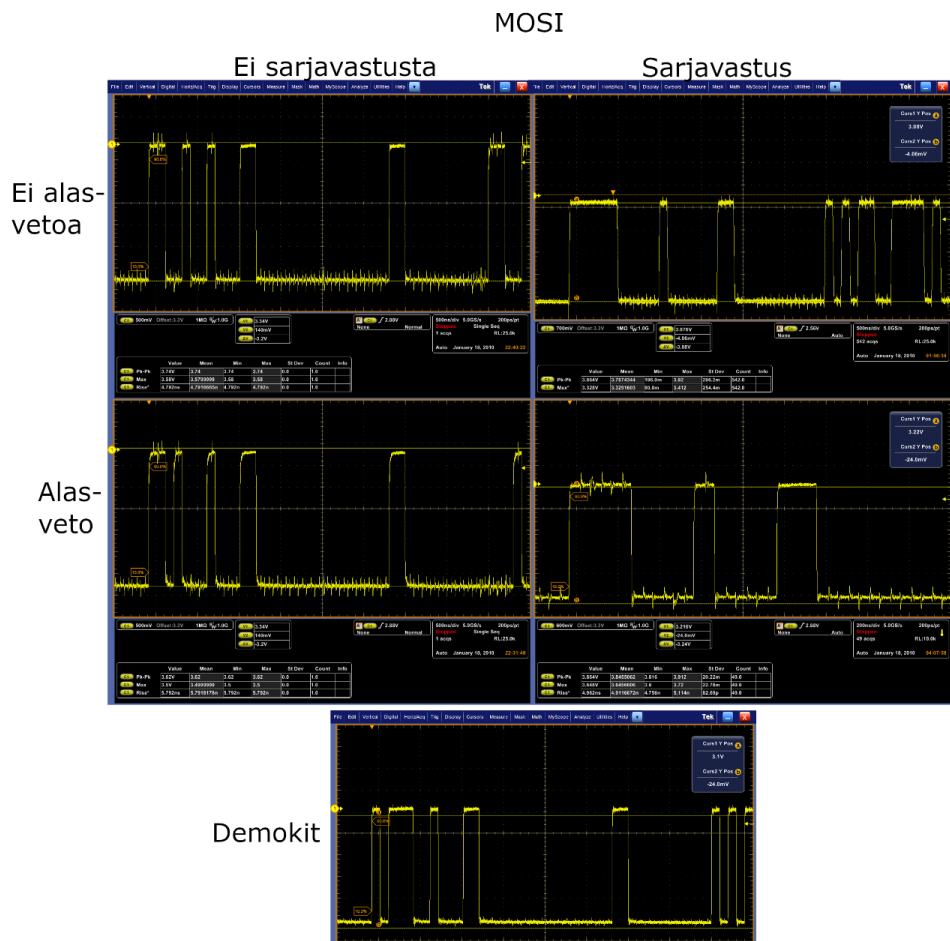


**Kuva 29: SCLK-linjan mittaukset**

SCLK-linjan suhteen signaali on hyvin lähellä demokitin vastaavaa. Demokitinkään signaali ei ole ihan täydellinen kanttiaalto vaan sen nousunopeudessa on nähtävissä selvää hidastumista, mikä pyöristää signaalia hieman. Kellosignaali voidaan kuitenkin

nähdä selviä eroja eri vastuskombinaatioilla. Ilman vastuksia signaali pyöristyy selvästi enemmän ja se jatkaa nousua aina signaalin laskuhetkeen asti. Alasvetovastuksen kanssa signaali on huomattavasti kantikkaampi ja vastaa hyvin läheisesti demokitin signaalia. Sarjavastuksen kanssa signaali on muodoltaan hyvin samanlainen kuin alasvetovastuksella, mutta sen kohina on hieman suurempaa. Kun käytetään molempia vastuksia, pysyy signaalin terävyys yhtä hyvänä, mutta ei oikeastaan parane ollenkaan. Näiden mittausten perusteella vastuksista on selvää hyötyä. Parhaat tulokset saatiin käyttämällä pelkkää alasvetovastusta tai molempia vastuksia. Sarjavastuksen lisäys alasvetovastuksen kanssa ei tuo juurikaan lisää parannusta, joten tulevissa piirilevy versioissa voidaan käyttää pelkkää alasvetovastusta.

Kolmantena mitataan MOSI-linja vastaavalla tavalla kuin kaksi edellistä. Kuvassa 30 on esitettynä näiden mittausten tulokset.



**Kuva 30: MOSI-linjan signaali muodot eri vastuskombinaatioilla.**

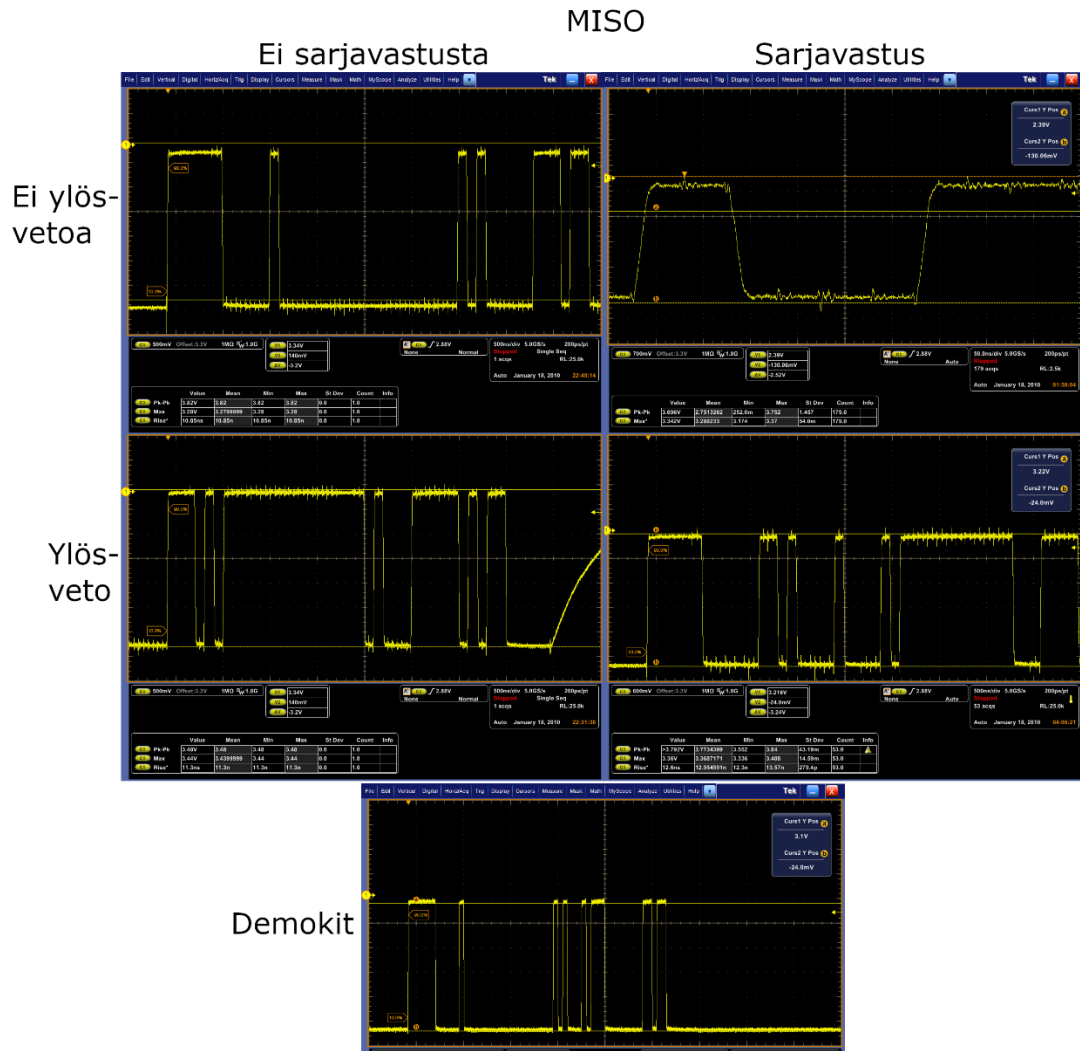
Kuvasta nähdään, että suunnitellun piirilevyn signaalit näyttävät lähes samalta kuin demokitin signaali. Piirilevyllä on jälleen havaittavissa selvää kohinaa, mikä selittyy taas

SPI-linjan signaalien välisellä ylikuulumisella. Signaalimuoto on kuitenkin yhtä siisti kuin demokitillä. Kuvasta voidaan huomata, että alasetovastus aiheuttaa kanttiaallon pientä pyöristymistä. Vastaava ei ole havaittavissa muissa mittaustuloksissa. Tällä perusteella pelkän alasetovastuksen käyttö voidaan sulkea pois. Sarjavastuksen ollessa kiinni alasetovastuksen vaikutus vähenee, mutta silti pelkällä sarjavastuksella tehty mittausta näyttää hieman siistimmältä verrattuna molempien vastusten mittaukseen. Sarjavastuksen vaikutus näyttää myös hyvin pieneltä, mutta kuvien perusteella signaali on ehkä hieman puhtaampi sarjavastuksen kanssa. Ilman vastuksia tehdyn mittauksen ja sarjavastusmittauksen välinen ero on kuitenkin niin pieni, että ei sillä ole merkitystä. Täten yksinkertaisuuden takia poistetaan molemmat MOSI-linjan vastukset seuraavasta piirilevyversiosta.

Viimeisenä mitataan vielä MISO-linja samalla tavalla. Kuvassa 31 on esitettyinä näiden mittausten tulokset.

Näissä kuvissa oskilloskoopin asetuksissa on ollut isoja eroja, etenkin sarjavastuksen mittauksessa aikaväli on paljon pienempi kuin muissa. Valitettavasti uudelleen mittausta ei nyt onnistu, joten ero pitää ottaa huomioon analyysissä. Mittauksissa huomattiin, että ylösvetovastus aiheuttaa välillä todella pitkiä nousuaikoja. Tämä näkyy kuvan ylösvetovastusta käyttävän mittauksen oikeassa reunassa, jossa signaali lähtee nousemaan todella hitaasti. Sama toistui myös molemmilla vastuksilla tehdystä mittauksesta, vaikka se ei kuvassa näy. Tästä syystä hylätään ylösvetovastuksen käyttö. Ilman vastuksia ja sarjavastuksen kanssa signaali näyttää hyvältä, ja on käytännössä identtinen demokitin signaalin kanssa.

Eri mittausten aika-akselien takia suora vertaus on hieman haastavaa kuvan perusteella, mutta kuvan asteikosta katsottuna molempien signaalien nousuaika on noin 10 ns, mikä vastaa myös demokitin nousuaikaa. Ilman vastuksia signaali näyttää samalta kuin demokitissä. Se on siisti kanttiaalto ja se voidaan todeta tarpeeksi hyväksi. Sarjavastus ei ainakaan suuresti paranna signaalia, joten MISO-linjan osalta voidaan poistaa molemmat vastukset seuraavasta piirilevyversiosta.



**Kuva 31: MISO-linjan mittaukset**

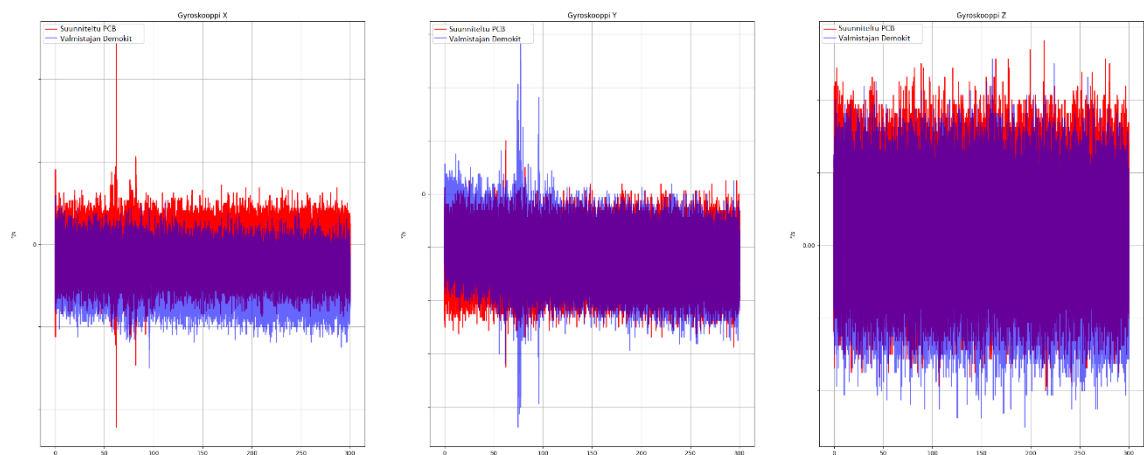
Näiden mittausten perusteella johtopäätöksenä on vastusten poistaminen kokonaan MISO-, MOSI- ja CS linjoista, sekä sarjavastuksen poistaminen SCLK-linjasta. Täten SCLK-linjan alasvetovastus on ainoa vastus, joka jätetään piirilevylle. Näiden vastusten poistaminen vapauttaa piirilevyltä huomattavan paljon tilaa, mikä mahdollistaa SPI-linjojen paremman sijoittelun ylikuulumisen vähentämiseksi.

### 5.3 Staattinen testi

Lopuksi vielä tarkistetaan anturin mittaustarkkuus. Ensin halutaan nähdä, että toimiiko piirilevy valmistajan ohjelmiston kanssa. Anturi yhdistyi ohjelmistoon ongelmitta ja anturi antaa ulostulon jokaiselle akselille. Ulostulo näyttää järkevältä ja anturin pyörittäminen näkyy datassa selkeästi ja oikeilla akseleilla, joten voidaan aloittaa mittaus.

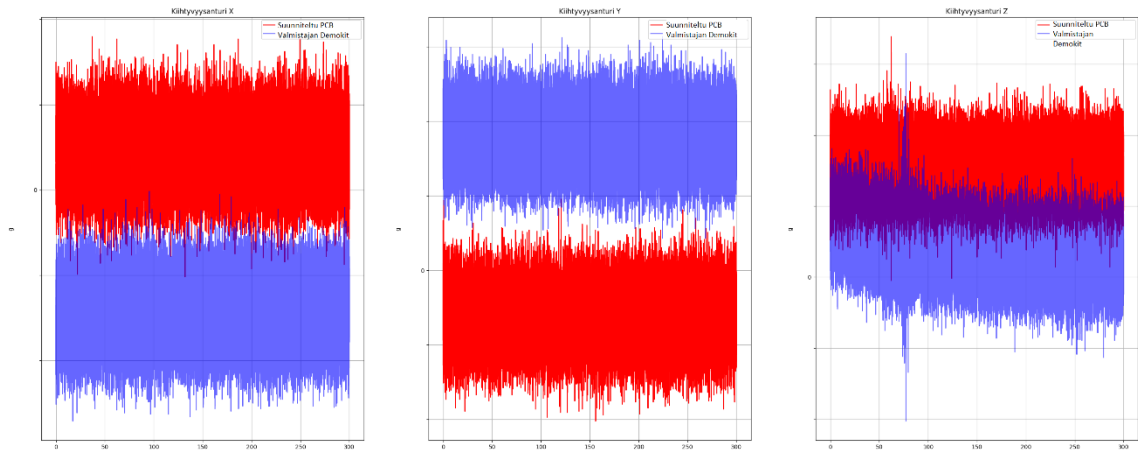
Suunnitellulle piirikortille tehdään sama staattinen testi kuin luvussa 3.3.1. Tässä testissä piirilevylle ei ole asennettu mitään sarjavastuksia, eikä ylös- tai alasvetovastuksia. Sama

mittaus toistetaan sitten valmistajan demokitillä. Koska evaluaatiolevyjä on vain yksi, voidaan mittaukset tehdä vain yksi kerrallaan, joten datassa saattaa esiintyä häiriötä, jota ei toisessa mittauksessa esiintynyt. Esimerkiksi, jos mittaushuoneen ulkopuolisella käytävällä kävelee ihmisiä, näkyy se mittauksessa. Mittausten aikana käytävällä ei kuitenkaan ollut merkittävää liikennettä, joten sen vaikutuksen pitäisi olla hyvin pientä. Kuvissa 32, 33 ja 34 on esitetty tämän mittauksen kuvaajat. Anturit olivat ruuvattuna muovilevyyn kiinni ja muovilevy oli asetettu samaan kohtaan molempia mittauksia varten. Molempien mittauksien pituus oli viisi minuuttia.



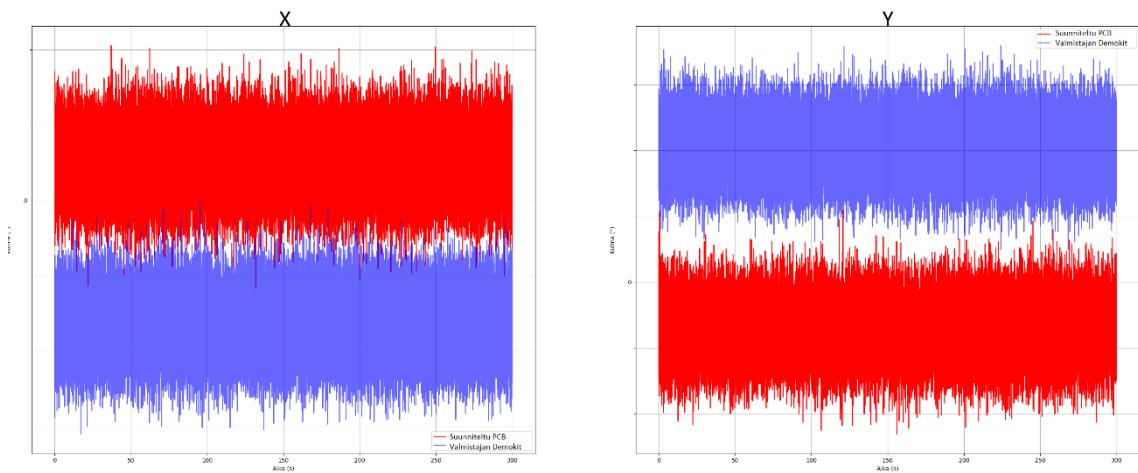
**Kuva 32: Kulmanopeudet demokitille ja suunnitellulle piirilevyllä tehdyistä staattisista testeistä.**

Kuvasta 32 nähdään demokitin x- ja y-akseleilla selkeää offsetin muutosta, vaikka mittausaika on todella lyhyt. Aiemmissa mittauksissa tällaista ei ole nähty. Offsetin muutos saattaa johtua esimerkiksi siitä, että mittaus aloitettiin lähes heti anturin käynnistämisen jälkeen, joten se saattoi esimerkiksi lämmetä mittauksen aikana. Aiempien mittauksien perusteella kuitenkin tiedetään, että normaalisti demokitillä ei tapahdu tällaista, joten voidaan jättää se huomiotta. Mittauksesta nähdään, että tässä työssä suunniteltu piirikortti pitää offset-arvonsa hyvin tasaisena. Tämä vastaa demokitillä tehtyjä aiempia mittauksia. Kohinan suhteen anturit näyttävät yhtä hyviltä.



**Kuva 33: Demokitin ja suunnitellun piirilevyn staattisen testin kiihtyvyydet**

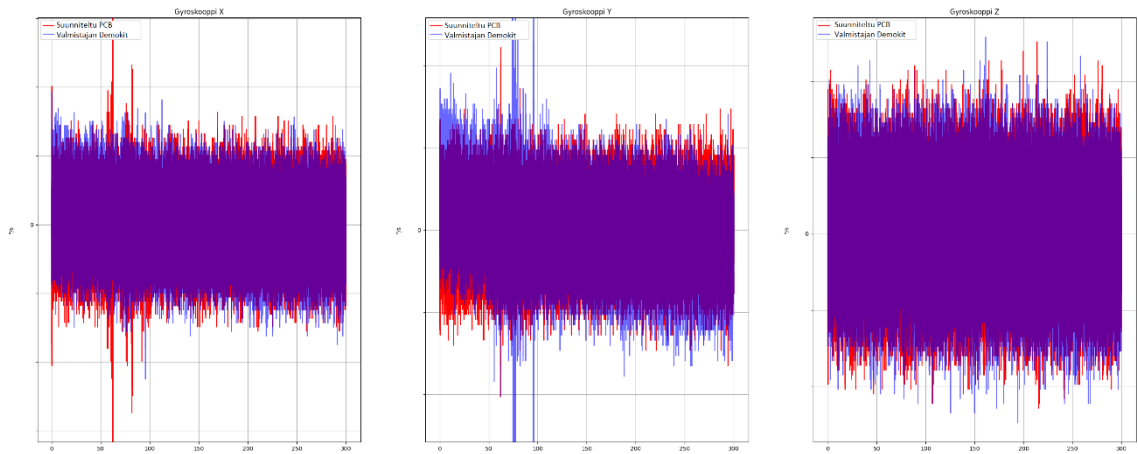
Kuvassa 33 nähdään kiihtyvyyden kuvaajat samoille staattisille mittauksille. X- ja y-akselien osalta mittaus kohinat ovat täysin samat ja offsetit pysyvät vakiona molemmilla antureilla. Z-akselilla demokitin anturin offset muuttuu todella paljon.



**Kuva 34: Demokitin ja suunnitellun piirilevyn staattisten testien kallistuskulmat.**

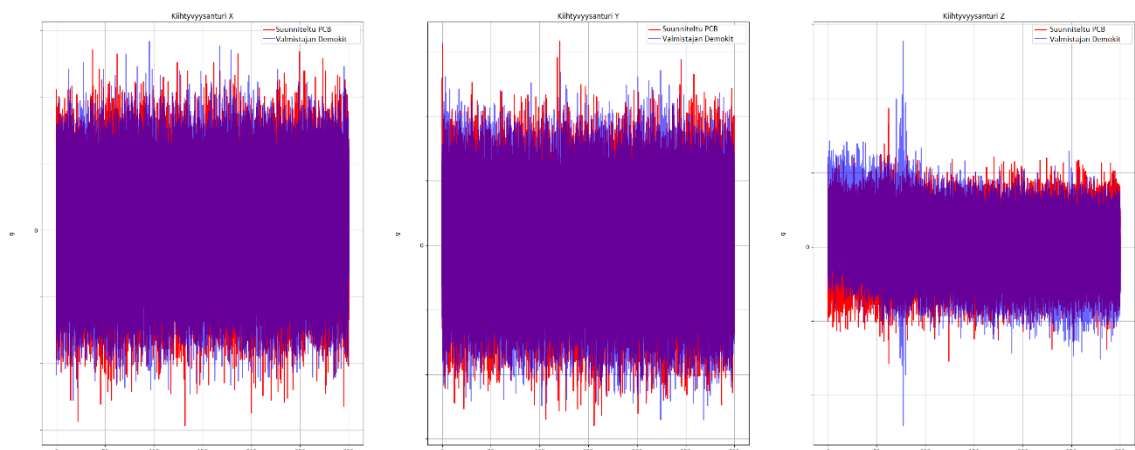
Kallistuskulmien kuvaajien perusteella, myös niiden kohina on lähes identtistä, mikä olikin odotettavissa kiihtyvyytkuvaajien samankaltaisuuden perusteella. Kuitenkaan kiihtyvyyden z-akselin suuri offsetin muutos ei näytä vaikuttavan näihin kuvaajiin juurikaan.

Jotta kohinan suuruuksia pystytään vertaamaan paremmin, piirretään vielä bias-korjatut kuvaajat kulmanopeudella ja kiihtyvyydelle. Nämä on esitetty kuvissa 35 ja 36.



**Kuva 35: Staattisen testin bias-korjatut kuvaajat kulmanopeuksille.**

Kuvasta 35 nähdään, että kulmanopeuden kohinat ovat antureiden välillä kaikilla akseleilla yhtä suurta. Offsetin muutokset näkyvät näissäkin kuvaajissa selvästi.



**Kuva 36: Staattisen testin bias-korjatut kuvaajat kiihtyvyyksille.**

Myös kuvan 36 kuvaajat tukevat aiemmin todettua. Eli, myös kiihtyvyyden kuvaajissa näkyy kohinaa yhtä paljon molemmilla antureilla.

Bias-korjatuista kuvaajista nähdään, että kohina on molemmilla piirilevyillä yhtä suurta. Staattisen testin perusteella, työssä suunniteltu piirilevy voidaan siis todeta toimivaksi. Nähdään, että piirikortti kykenee mittamaan kulmanopeutta ja kiihtyvyyttä yhtä pienellä kohinalla kuin IMU-anturin valmistajan tekemä demokit. Voidaan siis sanoa, että suunniteltu piirilevy toimii tavoitellulla tavalla. Vaikka aiemmissa mittauksissa nähtiin SPI-väylän signaaleissa ja jännitteessä huomattavaa häiriötä, ei se vaikuta mittaustuloksiin. Tätä mittausta tehdessä, ei käytetty sarjavastuksia, eikä ylös- tai alavetovastuksia, ja siten voidaan sanoa, että vaikka joistain vastuksista saattoi olla hyötyä signaalimuodon suhteen, ei niillä ole vaikutusta mittaustulokseen. Aiemmin

päätettiin poistaa kaikki muut vastukset paitsi SCLK-linjan alavetovastus, mutta tämän testin perusteella sekin voitaisiin poistaa, sillä mittaustulos oli yhtä tarkka kuin demokitillä, vaikka vastus ei ollut käytössä. Demokit toimii testeissä referenssinä, koska oletettavasti valmistaja on suunnitellut demokitin siten, että sillä saavutetaan anturin paras mahdollinen suorituskyky. Oletetaan, että anturi ei missään olosuhteissa minkäänlaisella piirilevyllä kykene demokittiä parempaan suorituskykyyn.

Staattisen testin datasta laskettiin vielä keskihajonnat, sekä keskiarvon muutos kulmanopeudelle, kiihtyvyydelle ja kallistuskulmille. Tulokset ovat esiteltynä taulukossa 9.

Taulukko 9. Demokitin ja suunnitellun piirilevyn staattisten testien tuloksien taulukot keskihajonnalle ja keskiarvon muutokselle.

<b>Kulmanopeus</b>	<b>Akseli</b>	<b>Suunniteltu PCB</b>	<b>Demokit</b>
Keskihajonta	X	1	1
	Y	1	1,17
	Z	1	1
Keskiarvon muutos	X	1	12,00
	Y	1	16,67
	Z	1	-14,00
<b>Kiihtyvyys</b>	<b>Akseli</b>	<b>Suunniteltu PCB</b>	<b>Demokit</b>
Keskihajonta	X	1	1
	Y	1	1
	Z	1	1,167
Keskiarvon muutos	X	1	1
	Y	1	1
	Z	1	1,001
<b>Kallistuskulmat</b>	<b>Akseli</b>	<b>Suunniteltu PCB</b>	<b>Demokit</b>
Keskihajonta	X	1,025	1
	Y	1,003	1
Keskiarvon muutos	X	2,875	1
	Y	1	23

Taulukoistakin nähdään, että suunniteltu piirilevy on suorituskyvyltään yhtä hyvä kuin valmistajan demokit. Keskihajonta on kaikilla molempien levyjen kaikilla akseleilla lähes sama.

Kuten aiemmin mainittiin, tämän testin perusteella kaikki vastukset voitaisiin poistaa piiriltä, eikä se vaikuttaisi suorituskykyyn. Sarjavastuksilla saattaa olla kuitenkin vaikutusta piirikortin EMI:n (Electromagnetic interference) määrään, joten niiden käyttöä voidaan harkita, vaikka ne eivät suoraan suorituskykyyn vaikutakaan. Laajemmassa

projektissa suunniteltavan laitteen kannalta EMI halutaan minimoida. Valitettavasti EMI:tä ei päästy mittamaan tämän työn aikataulussa. Laitteen laajemmassa testauksessa EMC-mittaukset (Electromagnetic Compatibility) tullaan tekemään, ja jos niissä todetaan ongelmia, voidaan silloin suorittaa lisätestejä myös IMU-piirikortille. EMC-mittauksissa mitataan laitteen tuottamaa EMI:tä, sekä laitteen EMI:n kestoa. Oskilloskoopilla tehdyissä mittauksissa sarjavastuksilla ei ollut merkittävää vaikutusta signaalissa näkyviin piikkeihin, joten voidaan olettaa, että niillä ei olisi suurta vaikutusta myöskään EMI:n suuruuteen. Tätä tullaan todennäköisesti kuitenkin testaamaan myöhemmin.

Piirilevyille oli suunniteltu useita läpivientejä yhdistämään ylä- ja alapuolen maatasot toisiinsa, mutta edellisissä testeissä niitä kaikkia ei ollut käytetty. Läpiviennit saattavat vähentää ylikuulumista, joten loputkin läpiviennit lisättiin ja mittaukset toistettiin, mutta jännitteessä näkyi edelleen piikkejä, eikä niiden amplitudi muuttunut.

Yhteenvedona voidaan todeta, että piirilevyn suunnittelu onnistui halutulla tavalla, sillä sen suorituskyky on vaaditun tasoinen. Suunniteltu piirilevy on kohinan ja mittaustarkkuuden puolesta yhtä tarkka kuin valmistajan demokit. Testauksessa kuitenkin löytyi muutamia ongelmia, jotka halutaan korjata seuraaviin piirilevyversioihin. Korjauksiin kuuluu ylimääräisten vastusten poistaminen piirilevyiltä, SPI-väylän kellosignaalin aiheuttaman ylikuulumisen minimointi, sekä vastusten ja kondensaattorien koteloiden vaihtaminen sopivamman kokoiseen. Seuraavaan piirilevyyn jätetään SPI-väylän vastuksista vain SCLK-linjan alavetovastus. Tälle vastukselle valitaan 0402-kokoinen paketti. SPI-väylän ylikuulumisen vähentämiseksi pyritään sijoittamaan SPI-väylän johtovedot kauemmas toisistaan ja eri puolille piirilevyä. Lisäksi vältellään tekemästä näille rinnakkaisia vetoja. Suodatuskondensaattoreista pienimmät voidaan vaihtaa 0402-koteloihin, kun taas isoin, eli 10  $\mu\text{F}$ , kondensaattori vaihdetaan 1210-koteloiseen.

## 6. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä suunniteltiin inertiamittaus-piirikortti. Työ tehtiin osana laajempaa tuotekehitysprojektia ja sen tarkoituksena oli mahdollistaa projektissa suunniteltavalle laitteelle IMU-anturin käyttäminen. Työssä tutustuttiin ensin IMU-antureiden teoriaan, lyhyellä kirjallisuuskatsauksella, jonka perusteella voitiin paremmin määritellä vaatimukset valittavalle IMU-antureille. Seuraavaksi valittiin IMU-anturi, jonka ympärille piirikortti suunniteltiin. Valinta aloitettiin kartoittamalla markkinoilla olevia antureita, kunnes niistä kaksi valittiin jatkotutkimuksiin ja käytännön testeihin. Antureille tehtiin staattinen testi, kulmatarkkuustesti, lämpötilatesti ja iskutesti. Staattisen testin tavoitteena oli mitata antureiden kohinaa ja vakiovirheen muutosta. Kulmatarkkuustestissä haluttiin mitata integroidun kulman tarkkuutta antureilla. Lämpötilatestissä haluttiin nähdä lämpötilasyklin vaikutus antureiden offset arvoihin. Iskutestissä antureihin kohdistettiin kovia mekaanisia iskuja ja tarkkailtiin niiden mittaustuloksia, tavoitteena oli nähdä iskun vaikutus anturin offset arvoihin, sekä varmistua, että anturit pysyvät päällä ja kykenevät mittamaan myös kovan iskun aikana ja välittömästi sen jälkeen.

Senopin pyynnöstä antureiden nimiä, eikä mittaustarkkuuksia esitetty työssä. Testeihin valittavia antureita kutsuttiin nimillä anturi A ja anturi B. Staattisen testin perusteella anturilla A todettiin paljon pienempi gyroskoopin kohina. Kiihtyvyyssantureiden kohinat olivat antureilla lähes yhtä suuret. Lämpösyklitestissä nähtiin, että anturin A gyroskoopin offset oli hieman vakaampi kuin anturilla B. Anturin A offset myös palautui takaisin lähtöarvoonsa paremmin. Kiihtyvyyssantureiden suorituskyky oli tässäkin testissä hyvin samankaltaista. Kulmatarkkuustestin tuloksista nähtiin, että anturilla B laskettuun kulman muutokseen kertyi noin nelinkertainen määrä virhettä verrattuna anturiin A. Iskutestissä anturi B ei pysynyt mittausten aikana päällä, joten offsetin muutosta ei päästy mittaamaan. Anturi A toimi moitteettomasti kaikkien iskutestien ajan.

Edellä mainittujen testien tulosten perusteella valittiin voittajaksi anturi A, jonka jälkeen piirikaavion suunnittelu aloitettiin. Piirikaavion suunnittelussa noudatettiin pitkälti valmistajan datalehden ohjeita. Datalehdestä poiketen, anturin SPI-väylän johtimille lisättiin sarjavastukset, sekä ylös- ja alaspäin vastukset. Piirikaaviosuunnittelun jälkeen siirryttiin suunnittelemaan piirilevyn layoutia. Layoutissa pyrittiin sijoittamaan suodatuskondensaattorit mahdollisimman lähelle anturin pinnejä. Myös sarjavastukset haluttiin lähelle anturia. Ylös- ja alaspäin vastukset sijoitettiin siten, että ne olivat lähellä sarjavastuksia ja mahdollistivat mahdollisimman lyhyet johtimet. Piirilevylle asetetut

ulkoiset vaatimukset määräisivät käytetyn liittimen ja sen sijainnin. Näiden lisäksi piirilevylle lisättiin useita läpivientejä ja kiinnitysreiät.

Suunnittelun jälkeen piirilevystä valmistettiin prototyyppiversio Tampereen Yliopiston elektroniikkalaboratorion piirilevyjyrsimellä. Piirilevyyn juotettiin komponentit ja sille tehtiin muutamia testejä. Työn aikataulun puitteissa ei ehditty tekemään toiminnallisia testejä laitteessa. Piirilevyn toiminta testattiin, sen jännitteet ja SPI-väylän linjojen signaalit tarkastettiin oskilloskoopilla. SPI-väylän signaaleille mittausta toistettiin useita kertoja eri vastuskombinaatioilla. Aluksi mitattiin pelkän sarjavastuksen kanssa, mutta ilman ylös- tai alasvetoa. Sitten mitattiin sarjavastuksen, sekä ylös- tai alasvedon kanssa, jonka jälkeen mitattiin pelkällä ylös- tai alasvedolla, ja lopuksi mittausta toistettiin vielä kokonaan ilman vastuksia. Piirilevylle tehtiin myös staattinen testi, jonka avulla sen suorituskykyä voitiin verrata valmistajan demokittiin. Staattisessa testissä ei käytetty mitään vastuksia.

Piirilevy toimi ongelmitta ja staattisessa testissä sen suorituskyky oli valmistajan demokittiä vastaava. Piirilevyn lähdejännitteen arvo oli sopiva, mutta oskilloskoopilla siinä voitiin nähdä huomattavaa kohinaa. Tarkemmalla tarkastelulla nähtiin, että kohina johtui SPI-väylän kellosignaalista. Kellosignaalin nousu- ja lasku aiheutti selvän piikin jännitteessä. Eri vastuskombinaatioilla tehdyissä mittauksissa nähtiin, että tässä tapauksessa vastuksilla ei ollut juurikaan merkitystä SPI-linjan signaalimuotoihin, eikä jännitteen kohinaan. SPI-väylän kellosignaali päätettiin kuitenkin jättää sarjavastus. Muut testauksessa käytetyt vastukset voidaan poistaa piiriltä.

Piirilevystä suunnitellaan seuraavaksi uusi versio, jossa turhat vastukset poistetaan, oheiskomponenttien koteloiden kokoja muutetaan ja kellosignaalin ylikuulumista pyritään vähentämään. Ylikuulumisen vähentämiseksi SPI-väylän johtimet reititetään uudestaan. Ne pyritään siirtämään kauemmaksi toisistaan ja niiden rinnakkaista reititystä tullaan välttelemään. Myös maatasojen välisiä läpivientejä lisätään. Lisäksi piirilevylle tullaan tekemään EMC-mittauksia, joiden perusteella päätetään muista mahdollisista muutoksista. Piirikorttimoduulin jatkokehitys ei enää mahdu tähän diplomityöhön.

Prosessina työn kirjoitus onnistui kohtalaisen hyvin. Alkuperäinen suunnitelma pysyi pääpiirteittäin samana, mutta työn aikana suunnitelmaan tuli hieman lisäyksiä ja tarkennuksia. Parannettavaa olisi ollut työn hallinnassa. Työn eri vaiheet etenivät hieman eri aikataulussa ja esimerkiksi luku 2 ei ollut vielä täysin valmis silloin kun luvun 3 mittauksia aloitettiin. Mittauksen suunnittelua ja toteutusta olisi voinut helpottaa tekemällä teoriaosuus ensin loppuun asti valmiiksi. Suunnitteluprosessin osalta suurimmaksi parannuskohteeksi valitsisin paremman perehtymisen aiheeseen.

Esimerkiksi luvun 5 mittauksissa ilmennyt ylikuulumisongelma olisi voinut olla kokonaan vältettävissä, jos SPI-linjaan ja sen suunnitteluun olisi kiinnitetty enemmän huomiota. Jälkikäteen tehdyn lyhyen tiedonhaun perusteella SPI-linjan ylikuuluminen ei ole täysin uusi ongelma. SPI-väylään liittyvä tiedonhaku olisi pitänyt suorittaa jo ennen piirilevyn suunnittelua, jotta ylikuuluminen olisi voitu ennakoida ja sen vaikutusta olisi voitu minimoida jo ensimmäiseen piirilevyversioon. Onneksi piirilevystä oli tarkoitus tehdä uusi versio joka tapauksessa, joten tällä kertaa sen suurempaa ongelmaa ei ole.

Kokonaisuutena työ oli onnistunut ja työssä suunnitellun piirilevyn avulla laiteelle voidaan tehdä toiminnallisia testejä. Piirilevyä voidaan käyttää ensimmäisissä prototyypeissä tällaisenaan, mutta lopulliseen tuotteeseen siihen on tehtävä pieniä muokkauksia etenkin kellosignaalin ylikuulumisen osalta. Työn tavoitteena oli suunnitella inertiamittauspiirikorttimoduuli ja tähän tavoitteeseen päästiin.

# LÄHTEET

- [1] "Understanding Inertial Measurement Unit (IMU): Basics, Applications, and Future Trends", GuideNav.com. Viitattu: 29. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://guidenav.com/understanding-inertial-measurement-unit-imu-basics-applications-and-future-trends/>
- [2] "Inertial Measurement Unit: Essential Guide to IMU Technology - Conoptics". Viitattu: 8. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.conoptics.com/inertial-measurement-unit/>
- [3] "Inertial Guidance: A Brief History and Overview", Advanced Navigation. Viitattu: 29. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-guidance-a-brief-history-and-overview/>
- [4] "ADIS16465 (Rev. C)". Viitattu: 29. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16465.pdf>
- [5] S. Y. Alaba, "GPS-IMU Sensor Fusion for Reliable Autonomous Vehicle Position Estimation", 13. toukokuuta 2024. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.08119>.
- [6] "Understanding Magnetometers for an IMU System". Viitattu: 29. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://daischsensor.com/understanding-magnetometers-for-an-imu-system/>
- [7] "Dead Reckoning Navigation: A Comprehensive Guide". Viitattu: 29. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.rfwireless-world.com/articles/dead-reckoning-navigation-method>
- [8] N. Boguspayev, D. Akhmedov, A. Raskaliyev, A. Kim, ja A. Sukhenko, "A Comprehensive Review of GNSS/INS Integration Techniques for Land and Air Vehicle Applications", *Appl. Sci.*, vol. 13, nro 8, tammi 2023.
- [9] "Knowledge in IMU Systems of Yaw, Pitch and Roll". Viitattu: 29. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://daischsensor.com/knowledge-in-imu-systems-of-yaw-pitch-and-roll/>
- [10] "Stall Protection Systems (SPS) | SKYbrary Aviation Safety". Viitattu: 29. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://skybrary.aero/articles/stall-protection-systems-sps>
- [11] E. Han Ata, K. S. Erer, ja E. İ. Konukseven, "Enhanced Inertial Navigation System for Missile Applications Using Seeker, RF Data Link and Radar Altimeter Measurements", kesä 2022.
- [12] V. M. N. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo, ja C. E. Campanella, "Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective", *Sensors*, vol. 17, nro 10, loka 2017.
- [13] A. Lawrence, *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*. Springer New York, 1998.
- [14] L. K. Barker ja J. A. Houck, "Theoretical Three- and Four-Axis Gimbal Robot Wrists", touko 1986.
- [15] "How is MEMS Different from Mechanical Gyroscope?", Ericco Inertial Technology. Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.ericcointernational.com/application/how-is-mems-different-from-mechanical-gyroscope.html>
- [16] "File:3D Gyroscope.png - Wikipedia". Viitattu: 28. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D\\_Gyroscope.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_Gyroscope.png)
- [17] M. N. Armenise, C. Ciminelli, F. Dell'Olio, ja V. M. N. Passaro, *Advances in Gyroscope Technologies*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. doi: 10.1007/978-3-642-15494-2.
- [18] N. machine-readable author provided B. assumed, *Sagnac Phase Shift*. 2006. Viitattu: 28. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SagnacPhase.PNG>
- [19] S. Beereddy, "EVALUATION OF RING LASER AND FIBER OPTIC GYROSCOPE TECHNOLOGY".
- [20] H. Cao ja J. Li, "Dual-Mass MEMS Gyroscope Structure, Design, and Electrostatic Compensation", teoksessa *MEMS Sensors - Design and Application*, S. Yellampalli, Toim., InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.74364.
- [21] "MEMS Gyroscope Provides Precision Inertial Sensing in Harsh, High Temperature Environments | Analog Devices". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa:

- <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/mems-gyroscope-provides-precision-inertial-sensing.html>
- [22] W. Huang *ym.*, "MEMS and MOEMS Gyroscopes: A Review", *Photonic Sens.*, vol. 13, loka 2023.
- [23] "A Capacitance-To-Digital Converter for MEMS Sensors for Smart Applications". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/6/1312>
- [24] V. S. N. Rai, H. L. Suresh, ja V. S. Nagaraja, "Design, Modelling, and Simulation analysis of a Single Axis MEMS-based Capacitive Accelerometer", *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 69, nro 10, loka 2021, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V69I10P211.
- [25] "MEMS Accelerometers for Analyzing Mechanical Vibrations -", Ericco Inertial Technology. Viitattu: 28. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.ericcointernational.com/application/mems-accelerometers-for-analyzing-mechanical-vibrations.html>
- [26] D. Wang, "FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications", 2014.
- [27] "IJIRT101325\_PAPER.pdf". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://ijirt.org/publishedpaper/IJIRT101325\\_PAPER.pdf](https://ijirt.org/publishedpaper/IJIRT101325_PAPER.pdf)
- [28] "(PDF) Design and simulation of piezoresistive polymer accelerometer", *ResearchGate*, elo 2025, Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/337197422\\_Design\\_and\\_simulation\\_of\\_piezoresistive\\_polymer\\_accelerometer](https://www.researchgate.net/publication/337197422_Design_and_simulation_of_piezoresistive_polymer_accelerometer)
- [29] "IMU Specifications Explained · VectorNav". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/specifications-and-error-budgets/specs-imuspecs>
- [30] S. Zanella, "Effect of Gyroscope and Accelerometer Datasheet Parameters on Inertial Navigation Systems Accuracy", 2017.
- [31] "ADIS16507 (Rev. A)". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adis16507.pdf>
- [32] "How to compare IMU", sbg-systems.com. Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://support.sbg-systems.com/sc/kb/latest/technology-insights/how-to-compare-imu>
- [33] "Calibration and Characterization of IMUs · VectorNav". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/specifications--and--error-budgets/specs-imucal>
- [34] "IMU Fundamentals, Part 4: Allan Deviation and IMU Error Modeling", Tangram Vision. Viitattu: 28. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.tangramvision.com/blog/the-allan-deviation-and-imu-error-modeling-part-4-of-5>
- [35] "Inertial Measurement Unit (IMU) – An Introduction", Advanced Navigation. Viitattu: 28. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-measurement-unit-imu-an-introduction/>
- [36] M. Jaén-Vargas *ym.*, "Effects of sliding window variation in the performance of acceleration-based human activity recognition using deep learning models", *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 8, s. e1052, elo 2022, doi: 10.7717/peerj-cs.1052.
- [37] S. Segu, "Understanding and Mastering IMU Intrinsic Calibration", Medium. Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://medium.com/@sugunsegu/understanding-and-mastering-imu-intrinsic-calibration-ab1e4a4dd3ea>
- [38] M. Faizullin ja G. Ferrer, "Best Axes Composition: Multiple Gyroscopes IMU Sensor Fusion to Reduce Systematic Error", 22. heinäkuuta 2021. doi: 10.48550/arXiv.2107.02632.
- [39] "Sensor tech #LikeABosch: new smart sensor system is more than a digital fitness coach in miniature size", Bosch Media Service. Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/sensor-tech-likeabosch-new-smart-sensor-system-is-more-than-a-digital-fitness-coach-in-miniature-size-250048.html>
- [40] "Getting up to speed with Kalman filters", VectorNav.co. Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/math-fundamentals/math-kalman>
- [41] "ADIS16475 (Rev. D)". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16475.pdf>
- [42] "ADIS16486 (Rev. 0)". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adis16486.pdf>

- [43] "ADIS16495 (Rev. C)". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adis16495.pdf>
- [44] "BST-BMI330-DS000-02.PDF". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmi330-ds000.pdf>
- [45] "DMU11-00-0100-132 Rev 5.indd". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://siliconsensing.com/wp-content/uploads/dmu11-00-0100-132-rev5-datasheet.pdf>
- [46] "DS-000178-ICM-20690-v1.0.pdf". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2016/10/DS-000178-ICM-20690-v1.0.pdf>
- [47] "DS-000300-IIM-46234-and-IIM-46230-v1.3.pdf". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2022/10/DS-000300-IIM-46234-and-IIM-46230-v1.3.pdf>
- [48] "DS-000330-ICM-40609-D-v1.2.pdf". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2022/07/DS-000330-ICM-40609-D-v1.2.pdf>
- [49] "ds-000347-icm-42688-p-v1.6.pdf". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/motion-inertial/imu/data\\_sheet/ds-000347-icm-42688-p-v1.6.pdf](https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/motion-inertial/imu/data_sheet/ds-000347-icm-42688-p-v1.6.pdf)
- [50] "Microsoft Word - 6020-3881-01\_C\_IMU381ZA\_Datasheet.docx". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.mouser.com/datasheet/2/940/6020-3881-01\\_C\\_IMU381ZA\\_Datasheet-1531737.pdf?srltid=AfmBOooZhS6NxHYhtAkh-UGRfg1dbn5x2jZHeGcuvQ2BP5yYgr6X9sXv](https://www.mouser.com/datasheet/2/940/6020-3881-01_C_IMU381ZA_Datasheet-1531737.pdf?srltid=AfmBOooZhS6NxHYhtAkh-UGRfg1dbn5x2jZHeGcuvQ2BP5yYgr6X9sXv)
- [51] "NavChip Series 3 Product Data Sheet". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.intersense.com/wp-content/uploads/2020/07/NavChip\\_Series\\_3\\_Full\\_Technical\\_Datasheet.pdf](https://www.intersense.com/wp-content/uploads/2020/07/NavChip_Series_3_Full_Technical_Datasheet.pdf)
- [52] "SCH16T-K10 datasheet (Short)". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/pdf/datasheet/datasheet-sch16t-k10-short.ashx?la=ja-jp&cvid=20241226073945000000>
- [53] "SCH1633-D01 Flyer". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/gyro/sch1600/sch1633-d01-flyer.ashx?la=ja-jp&cvid=20241108015524000000>
- [54] "vectornav.com/docs/default-source/product-brief/vn-110-product-brief.pdf?sfvrsn=b7077cbf\_2". Viitattu: 2. joulukuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.vectornav.com/docs/default-source/product-brief/vn-110-product-brief.pdf?sfvrsn=b7077cbf\\_2](https://www.vectornav.com/docs/default-source/product-brief/vn-110-product-brief.pdf?sfvrsn=b7077cbf_2)