

Opinnäytetyö (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

2021

Heikki Peltomäki

VÄRÄHTELYANTUREIHIN PERUSTUVAN PAIKANNUSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN JA TESTAUS

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Tieto- ja viestintäteknikka

2021 | 59 sivua, 6 liitesivua

Heikki Peltomäki

VÄRÄHTELYANTUREIHIN PERUSTUVAN PAIKANNUSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN JA TESTAUS

Pietsosähköisten värähtelyantureiden käyttöä rakenteisiin kohdistuvien iskujen paikannuksessa on tutkittu suhteellisen vähän, vaikka toimivalle ratkaisulle olisi laajoja kaupallisiakin käyttötarkoituksia. Toimivaa järjestelmää voitaisiin käyttää esimerkiksi rakenteeseen osuvan iskun osumapaikan tarkastuksessa paikantamalla iskupiste antureiden avulla, jolloin varsinaisen tarkastuksen suorittaja löytää osumakohdan ja mahdolliset vauriot nopeammin.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään nelikulmaiseen teräslevyn osuvan iskun sijainnin määrittämiseen levyyn kiinnitettävien pietsosähköisten antureiden avulla, mittaamalla antureille saapuvan värähtelyn etureunan aikaeroja antureiden välillä. Antureina käytetään keraamisia pietsolevyjä ja signaalin vahvistus tapahtuu operaatiovahvistimeen perustuvalla vahvistuspiirillä. Signaalin lopullinen prosessointi tapahtuu FPGA-piirillä ja ulos tuotettava informaatio on aikaerotus mikrosekuntiluokassa.

Työ sisälsi värähtelyn mittausta erilaisten pietsoantureiden avulla, vahvistinpiirin suunnittelun ja toteutuksen, VHDL-koodin toteutuksen FPGA-piirille, sekä koko järjestelmän testausta tarkoituksenmukaisessa testiympäristössä. Työn lopullinen tarkoitus oli tuottaa konseptitodistus, eli näyttö siitä, onko idea toteuttamiskelpoinen.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi RandomTec Oy ja työ on osa laajempaa kaupallista konseptia.

ASIASANAT:

Pietsosähkö, elektroniikka, anturi, paikannus, värähtelyanturi

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Information and communications technology

2021 | 59 pages, 6 pages in appendices

Heikki Peltomäki

DESIGN AND TESTING OF A POSITIONING SYSTEM BASED ON PIEZOELECTRIC SENSORS

Use of piezoelectric sensors in positioning of strikes on structures has been studied relatively scarcely, although a working solution would have tremendous commercial uses. A working system could for example be used to ease inspecting a location of a hit on a structure by locating the position using said sensors. Afterwards the person or device conducting the actual inspection can find the point of impact and possible damages faster.

This thesis will focus on locating a hit on a quadrangle steel plate with piezoelectric sensors attached to said plate, by measuring time difference of the front edge of the vibration of the plate reaching the sensors. The sensors are ceramic piezoelectric sensors, and the signal is amplified by an amplifier based on an operational amplifier. Signal processing is performed by a FPGA-circuit and the extracted information is time difference in microseconds.

The project included measuring vibration using various kinds of piezoelectric sensors, designing, and implementing the amplifier circuit, writing VHDL-code for the FPGA-circuit and the testing of the final system in an appropriate testing environment. The end product was a proof of concept showing if the idea is a feasible one.

The commissioner of this thesis was RandomTec Ltd, and the project is a part of a larger commercial concept.

KEYWORDS:

Piezoelectricity, electronics, sensor, positioning, vibration sensor

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	9
2 JOHDATUS TYÖSSÄ KÄYTETTYIHIN TEKNOLOGIOIHIN	10
2.1 Pietsosähköinen ilmiö	10
2.1.1 Pietsosähköiset anturit	11
2.2 Operaatiovahvistimet ja käytetyt vahvistinpiirit	14
2.2.1 Jännitevahvistinpiiri	17
2.2.2 Varausvahvistinpiiri	20
2.3 FPGA-piiri	24
3 VAATIMUKSET	29
3.1 Värähtelysignaalin erotteluresoluutio	29
3.2 Mittauspiirin vaatimukset	30
3.2.1 Koko ja kannettavuus	30
3.2.2 Jännite ja virrankulutus	31
3.3 Järjestelmän tuottama tulostus	33
3.4 Taulukko vaatimuksista prioriteetteineen (MoSCoW method)	34
4 TYÖN TOTEUTUS	35
4.1 Suunnittelun lähtökohdat	35
4.1.1 Proof of concept	35
4.2 Käytettävä värähtelyalusta, oskilloskooppi ja ensitestit	35
4.3 Vahvistinpiiri	39
4.3.1 Vahvistinpiirin suunnittelu	42
4.4 FPGA-piiri	43
5 MITTAUKSET, TESTAUS JA VAHVISTINPIIRIN KEHITYS	47
5.1 Alkumittaukset	47
5.2 Vahvistimen mittaus ja jatkokehitys	49
5.3 FPGA-piirillä tehtävät mittaukset	54
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	55

LIITTEET

Liite 1. Muita värähtelyantureihin perustuvia kaupallisia järjestelmiä ja RandomTec Oy:n toimeksianto.

Liite 2. Testauksessa käytetyt teräslevyt.

Liite 3. Tasasuuntaava jännitevahvistin pietsosähköiselle anturille.

KUVAT

Kuva 1. Pietsoelementin periaatekuva.	10
Kuva 2. Pietsosähköisen anturin rakenne.	11
Kuva 3. Kaksi eri kokoista pietsosähköistä anturia, E12-sarjan keraaminen vastus kokovertailua varten. Pienempi levy on halkaisijaltaan 20mm, suurempi 35mm.	12
Kuva 4. Pietsosähköisen anturin sijaiskytkentä varauslähteenä.	13
Kuva 5. Pietsosähköisen anturin sijaiskytkentä jännitelähteenä.	13
Kuva 6. PCB-yrityksen IEPE (ICP)-mallisen pietsosähköisen anturin poikkileikkaus (7).	14
Kuva 7. Yksinkertaistettu pietsoanturin ja kaapelin virtapiiri.	16
Kuva 8. CMK 222 kaapelin poikkileikkaus.	17
Kuva 9. Jännitevahvistinmalli TLV2771-vahvistimella (10).	19
Kuva 10. Operaatiovahvistinkytkennät, vasemmalla invertoiva vahvistin ja oikealla invertoiva integraattori.	20
Kuva 11. Varausvahvistin TLV2771-vahvistimella (10).	21
Kuva 12. TLV2772-vahvistimen ympärille rakennettu vahvistinpiiri.	22
Kuva 13. Kuvan 12 piirin transienttisimulaation tulos.	23
Kuva 14. Arduino Uno-mikrokontrolleri (13).	25
Kuva 15. TUL PynQ-Z2-järjestelmäpiiri (14).	26
Kuva 16. PynQ-Z2 lohkoakaavio (16).	27
Kuva 17. PynQ-Z2 Base Overlay Vivado-ohjelmaan ladattuna.	28
Kuva 18. MicroBlaze-alijärjestelmä.	28
Kuva 19. TTL-signaalien loogiset tilat.	31
Kuva 20. PynQ-Z2 kortin Arduino-liittimien käyttöjännitteet (17).	32
Kuva 21. FPGA-piirin virran mittaaminen USB-testerillä	33
Kuva 22. Testialusta ja pietsoantureita.	36
Kuva 23. PicoScope 5444D MSO digitaalinen oskilloskooppi.	37
Kuva 24. PicoScope 6 ohjelmisto (17).	38
Kuva 25. PicoScope 6-ohjelmistosta tallennettu kuvatiedosto mittaustuloksista.	39
Kuva 26. Alun testien kolmen kanavan vahvistamattomat signaalit kolmelta eri pietsoanturilta.	40
Kuva 27. Pietsoantureiden tuottama jänniteamplitudi oskilloskoopilla mitattuna 500 - 1000 mm etäisyydeltä iskusta.	41
Kuva 28. Koekytkentälevy.	43
Kuva 29. Zynq lohkodeigrammi (16).	44

Kuva 30. Jännitteenjakopiiri.	44
Kuva 31. Tilakone FPGA-mittauspiirille.	45
Kuva 32. Logiikkaportteihin perustuva nelikanavainen iskuilmaisin.	46
Kuva 33. Pietzosähköisten antureiden ensitestien tulos PicoScope 6-ohjelmistolla.	47
Kuva 34. Värähtelyn vaimentuminen levyllä.	48
Kuva 35. Neljä eri signaalia oskilloskoopilla mitattuna.	49
Kuva 36. Signaalin kytkeytyminen toiseen kanavaan.	50
Kuva 37. Signaalin kytkeytyminen toiseen kanavaan ja syöttöjännitteen aiheuttama häiriö.	51
Kuva 38. Vahvistettu ja tasasuunnattu pietsoanturin tuottama signaali.	52
Kuva 39. Kahden pietsoanturin tuottamaa signaalia eri etäisyyksiltä iskuun nähden.	53
Kuva 40. Kolme eri pietsoanturia, noin. 100, 200 ja 250 mm päässä iskusta.	54
Kuva 41. Transienttisimulaatiossa näkyvä viive vahvistimen lähtöjännitteessä.	55

TAULUKOT

Taulukko 1. MoSCoW-menetelmän mukainen vaatimusten priorisointi	34
---	----

KÄYTETYT LYHENTEET

A	Ampeeri, virran yksikkö
A	Vahvistus (engl. Gain)
AC	Vaihtovirta
ADC	Analog to digital converter, A/D-muunnin, muuntaa analogisen signaalin digitaaliseksi
C	Coulombi, varauksen yksikkö
C	Kapasitanssi
DC	Tasavirta
F	Faradi, kapasitanssin yksikkö
FPGA	Field-programmable gate array
I	Virta
IP (VHDL)	Intellectual Property, lisensoitu, uudelleenkäytettävä lohkosuunnitelma
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems, mikrosysteemi
p	Piko, $1 \cdot 10^{-12}$, SI-järjestelmän kerrannaisyksikön etuliite
PL	Programmable Logic, FPGA-piirin ohjelmoitava logiikka
PS	Processing System, FPGA-piirin prosessori
OPAMP	Operation amplifier, operaatiovahvistin
Q	Sähkövaraus
RRO	Rail-to-rail output, operaatiovahvistimen kyky tuottaa lähes syöttöjännitteen tasoinen lähtöjännite
RTL	Register-transfer level, piirin korkean tason kuvauskielen esitys
SoC	System on a chip, järjestelmäpiiri
SR	Slew Rate, lähtöjännitteen muutosnopeus
TI	Texas Instruments (yritys)
TTL	Transistor-transistor logic, digitaalinen sisääntulosignaali
U	Jännite
V	Voltti, jännitteen yksikkö

VHDL	VHSIC hardware description language, laitteistokuvauskieli
VHSIC	Very high-speed integrated circuit
XADC	Xilinx FPGA-piirien sisäinen A/D-muunnin

1 JOHDANTO

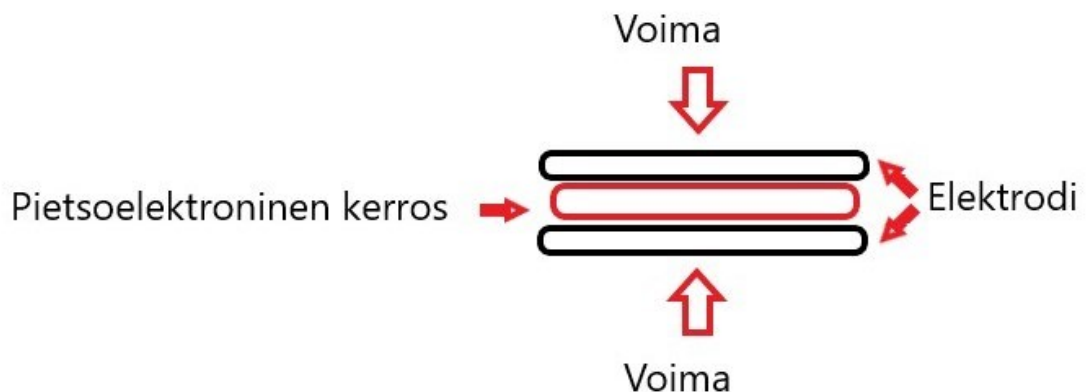
Värähtely- ja iskuantureita on kehitetty jo pitkään mm. autoteollisuuden tarpeisiin, esimerkiksi varashälyttimiksi, tai törmäystunnistusjärjestelmien osaksi. Pietsosähköiset anturit ovat todella herkkiä ja ne ilmaisevat pienetkin muutokset nopeasti, joten niiden käyttö iskujen paikannusjärjestelmässä on luonnollista. Aihetta on tutkittu laajalti, mutta näin tarkkaan paikannukseen ei antureita ole toistaiseksi laaja-alaisesti käytössä. Tutkimustietoa pietsosähköisestä ilmiöstä ja sen käytöstä antureissa on paljon, sillä niitä käytetään eri teollisuuden aloilla, kuten auto- ja rakennusteknologiassa. Iskujen paikannusta värähtelyantureita käyttäen on kehitelty esimerkiksi siltarakenteiden tarkistamisen helpottamiseksi todettujen osumien jälkeen (1), LVI-putkistojen kunnan tarkistamiseen (2), ajoneuvojen varashälyttimiin ja törmäystunnistukseen (3), sekä maanvyöryjen tarkkailuun ja ennustamiseen (4). Lisäksi värähtelyantureihin perustuvia kaupallisia järjestelmiä on jo olemassa eri käyttötarkoituksiin, joita on esitelty liitteessä 1, mutta tarve tarkemmalle ja dynaamisemmalle järjestelmälle on olemassa.

Proof of concept eli konseptitodistus pyrkii näyttämään, onko jokin idea toteuttamiskelpoinen. Tämän työn lopullinen tarkoitus on tuottaa konseptitodistus siitä, että keraamisilla tai vastaavilla pietsosähköisillä antureilla on mahdollista paikallistaa kolahduksen tarkka sijainti suoralla teräslevyllä. Projekti on esitelty tarkemmin liitteessä 1. Konseptitodistus tällaisessa käyttötarkoituksessa tarkoittaa vääjäämättä myös jonkinlaisen prototyyppin tuottamista, sillä teoria ja kirjallisuus aiheen ympäriltä ottaa hyvin vähän kantaa ympäristön vaikutuksiin lopputuloksessa. Pietsosähköinen anturi ei erottele sen levyihin aiheutuvan paineen lähdettä, vaan se tuottaa vastaavalla amplitudilla jännitettä ulostulona, aiheutti muutoksen sitten anturiin kohdistuva fyysinen isku, tai paineaalto. Erityisesti tästä syystä todellisessa käyttöympäristössä tehtävät testaukset ovat pakollisia myös konseptitodistuksen luomisessa. Työ etenee teorian ja kirjallisuuskatsauksen kautta käytettyjen teknologioiden tarkempaan esittelyyn. Teknologioiden jälkeen esitellään projektin varsinainen eteneminen suunnittelusta sähköisten piirien käytännön toteutukseen ja mittauksiin. Lopuksi esitellään lopputulokset ja työn jatkumo.

2 JOHDATUS TYÖSSÄ KÄYTETTYIHIN TEKNOLOGIOIHIN

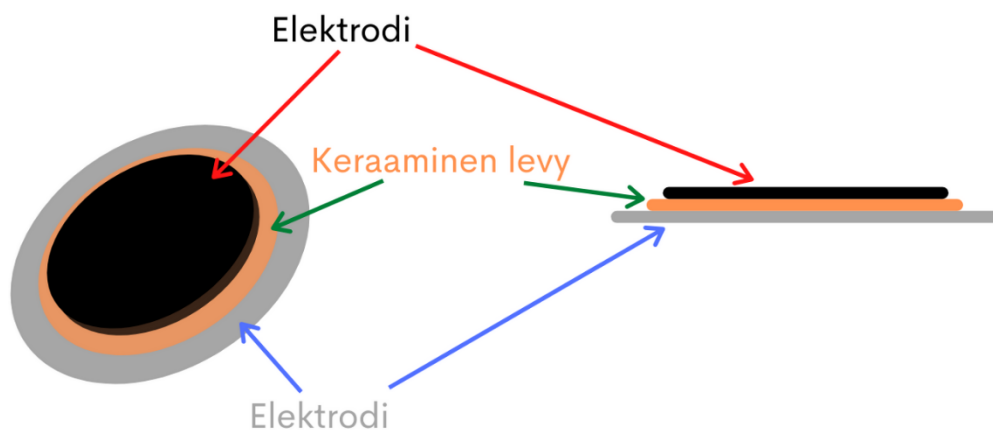
2.1 Pietsosähköinen ilmiö

Pietsosähköinen ilmiö on tunnettu 1800-luvulta lähtien. Pietsosähköä ja pietsosähköisiä antureita käytetään monissa arkipäiväisissä sovelluksissa, kuten lääketieteellisissä kuvantamisissa, sytyttimissä tai paineantureina. Ilmiön löysivät ensimmäisenä kaksi ranskalaista tiedemiestä, Jacques ja Pierre Curie vuonna 1880. He huomasivat miten kvartsiin kohdistettu paine aiheuttaa sähköisen latauksen. Sanan alkuperäinen nimitys tulee kreikankielisestä sanasta "piezo", joka tarkoittaa puristamista tai painamista. Pietsosähköinen ilmiö syntyy tiettyihin kiteisiin materiaaleihin aiheutetusta mekaanisesta jännityksestä tai venymisestä kuvan 1 mukaisesti. Ilmiössä kiteen vastakkaisten päiden välille syntyy jännite-ero, joka on suoraan verrannollinen kohdistetun paineen määrään. Ilmiölle on olemassa käänteinen ilmiö, jossa pietsosähköiseen materiaaliin syötetään jännitettä, jolloin materiaalin muoto muuttuu suhteessa syötettyyn jännitteeseen. Näitä kiteisiä materiaaleja tunnetaan nykypäivänä muutama kymmenen erilaista, kuten esimerkiksi kvartsi, bariumtitanaatti sekä litiumsulfaatti. Materiaalit eivät itsessään johda sähköä eli ne toimivat eristeenä, jolloin myöskään materiaalin varauksenkuljettajat eivät kumoa syntyneitä sähködipolin vaikutusta, mikä mahdollistaa pietsosähköisen ilmiön syntymisen (5).



Kuva 1. Pietsoelementin periaatekuva.

Kuvassa 2 esitetty käytännön pietsosähköinen anturi koostuu kahden metallilevyn, elektrodin, välissä olevasta kristallista. Levyt toimivat joko kiteen sähködipolina tai käänteistä ilmiötä käytettäessä, niihin syötetään jännitettä. Kun anturin elektrodieihin ajetaan vaihtovirtaa, alkaa levy oskilloida jännitteen napaisuuden vaihtelun mukaisesti, aiheuttaen samalla ääniaaltoja. Näitä pietsosähköisiä antureita käytetään esimerkiksi tuottamaan ultraääntä kaikuluotaimissa tai erilaisissa lääkinällisissä laitteissa. Kaikuluotaimissa pietsosähköiset anturit toimivat myös vastaanottimina, koska takaisin heijastuneet ultraääniaallot aiheuttavat anturiin osuessaan levyn muodon muuttumisen ja täten sähköistä signaalia. Niiden pieni koko on käytännöllinen elektroniikan parissa, missä niitä käytetäänkin esimerkiksi mikrofoneissa ja pienissä summereissa. Herkkyytensä ansiosta pietsosähköisillä antureilla voidaan mitata pieniäkin painenvaihteluita tai rakenteen värähtelyitä, esimerkiksi rakenteisiin kohdistuvan rasituksen aiheuttamana.

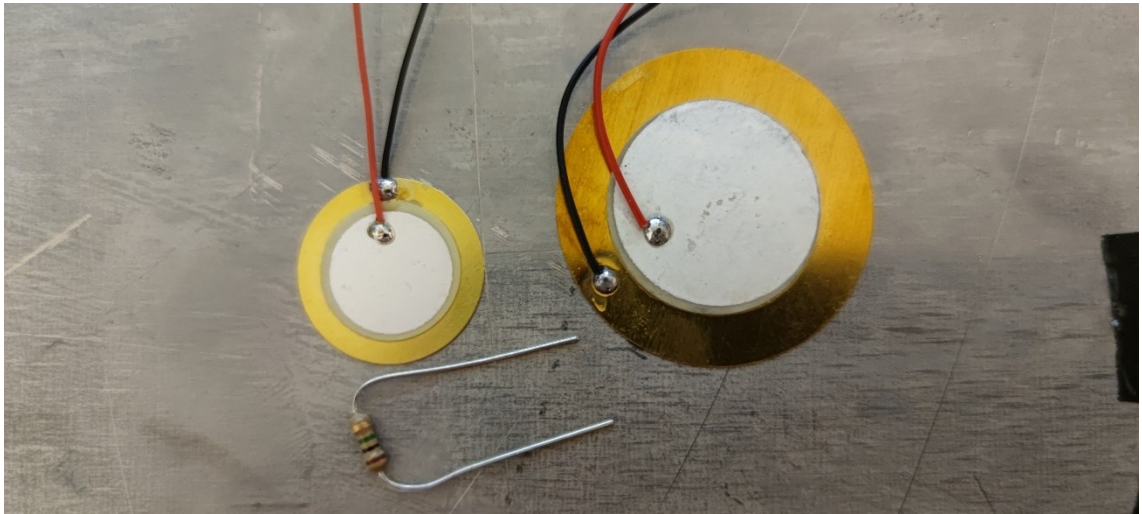


Kuva 2. Pietsosähköisen anturin rakenne.

2.1.1 Pietsosähköiset anturit

Pietsosähköinen anturi on tyypillisesti ohut, vain joitakin millijä paksu levy, jossa kahden elektrodin välissä on kidemateriaalia ja elektrodista lähtee kaksi johdinta. Anturin alapinnaksi on yleensä lisätty metallilevy, joka kiinnittyy alemman elektrodin alapintaan. Tällöin anturin sähköinen signaali voidaan ottaa ulos tämän metallilevyn kautta esimerkiksi juottamalla johdin suoraan levyyn kiinni, kuten kuvan 3 antureissa. Tarkasteltaessa anturin lähtösignaalia jännitteenä, muuttuu se suhteessa kiteeseen aiheutetun voiman muutosnopeuteen, eikä varsinaisen voiman suuruuteen nähden. Tästä syystä

pietsosähköisillä antureilla kyetään mittaamaan dynaamisia tapahtumia, mutta staattisen voiman tai paineen mittaaminen ei onnistu luotettavasti.



Kuva 3. Kaksi eri kokoista pietsosähköistä anturia, E12-sarjan keraaminen vastus kokovertailua varten. Pienempi levy on halkaisijaltaan 20 mm, suurempi 35 mm.

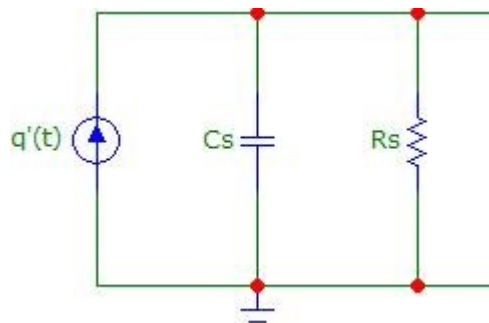
Anturi voidaan kiinnittää alustaan esimerkiksi liimaamalla tai kaksipuolisella teipillä. Kiinnitettäessä anturi johtavaan materiaaliin, tulee muistaa, että anturi kykenee myös tuottamaan jännitettä. Tästä saattaa tietyissä tapauksissa aiheutua suuriakin ongelmia, esimerkiksi käytettäessä useita antureita pienellä alueella, jolloin sähköinen signaali kulkeutuu anturista toiseen johtavaa materiaalia pitkin. Kiinnitystä suunnitellessa tulee myös muistaa, että anturin ja alustan väliin tuleva materiaali vaimentaa esimerkiksi värähtelyn aiheuttamaa kiteen muutosta ja täten elektrodeista ulos tulevaa sähkösignaalia. Levymallisten antureiden lisäksi on valmiita teollisia antureita koteloituneena, kuten esimerkiksi Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE)-malliset anturit, joissa anturin kotelossa on integroituna myös varaus- tai jännitevahvistin sen mukaan, kummalle on tarve. Integroidun elektroniikan tehtävä on muuntaa pietsosähköisen anturin korkeaimpedanssinen signaali matalan impedanssin jännitesignaaliksi. Matala impedanssitaso helpottaa signaalin siirtoa ja jatkokäsittelyä, siirrossa ei tarvitse käyttää erityisiä matalan häiriötason kaapeleita, vaan tilalla voidaan käyttää normaaleita koaksiaalikaapeleita ja -liittimiä (6). IEPE-antureita voidaan kutsua myös nimellä Integrated Circuit-Piezoelectric (ICP).

Pietsosähköinen anturi mallinnetaan kuvan 4 mukaisesti varauslähteenä, johon on rinnankytketty kondensaattori (C_s) ja vastus (R_s), lähtöjännite muodostuu vastuksen

napojen välille. Pietsosähköisen anturin tuottama sähkövaraus Q muuttuu piiriin liitettäessä sähkövirraksi I , sillä virta on sähkövarauksen liikettä kappaleessa kaavan

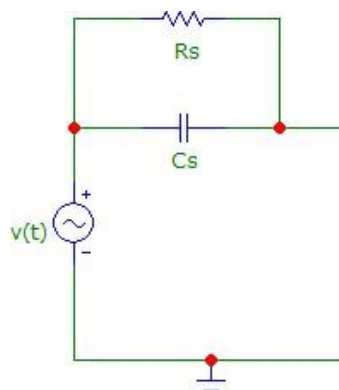
$$I = \frac{dQ}{dt}$$

mukaisesti, joten mallinnuksessa voidaan varauslähteen sijaan käyttää virtalähdettä.



Kuva 4. Pietsosähköisen anturin sijaiskytkentä varauslähteenä.

Toinen tapa mallintaa pietsosähköinen anturi on jännitelähteenä kuvan 5 mukaisesti. Tällöin kondensaattorin (C_s) ja vastuksen (R_s) rinnankytkentä kytkeytyy sarjaan anturin kanssa, ja lähtöjännite muodostuu rinnankytkennän lähdön ja maapotentiaalin välille.



Kuva 5. Pietsosähköisen anturin sijaiskytkentä jännitelähteenä.

Anturin ulkomuoto ja kotelointi vaihtelee suuresti käyttötarkoituksen perusteella. Edellä kuvaillun levyn muotoisen keraamisen pietsosähköisen anturin lisäksi esimerkiksi ilmanpaineen vaihtelua mittaavassa anturissa on usein putkimainen rakenne, jossa paine johdetaan putkea pitkin joustavalle kalvolle. Tämä taas siirtää paineen kiteeseen ja

lopputuloksena on jännitesignaali. IEPE-malliset elektroniikkaa sisältävät anturit on koteloitu metallisella suojakuorella kuten kuvan 6 PCB:n mallissa, jonka sisällä kaikki anturin toimintaan vaikuttavat komponentit sijaitsevat. Metallinen suojakuori vähentää ulkopuolelta tulevia häiriöitä ja suojaa herkkää elektroniikkaa fyysisiltä vaurioilta.

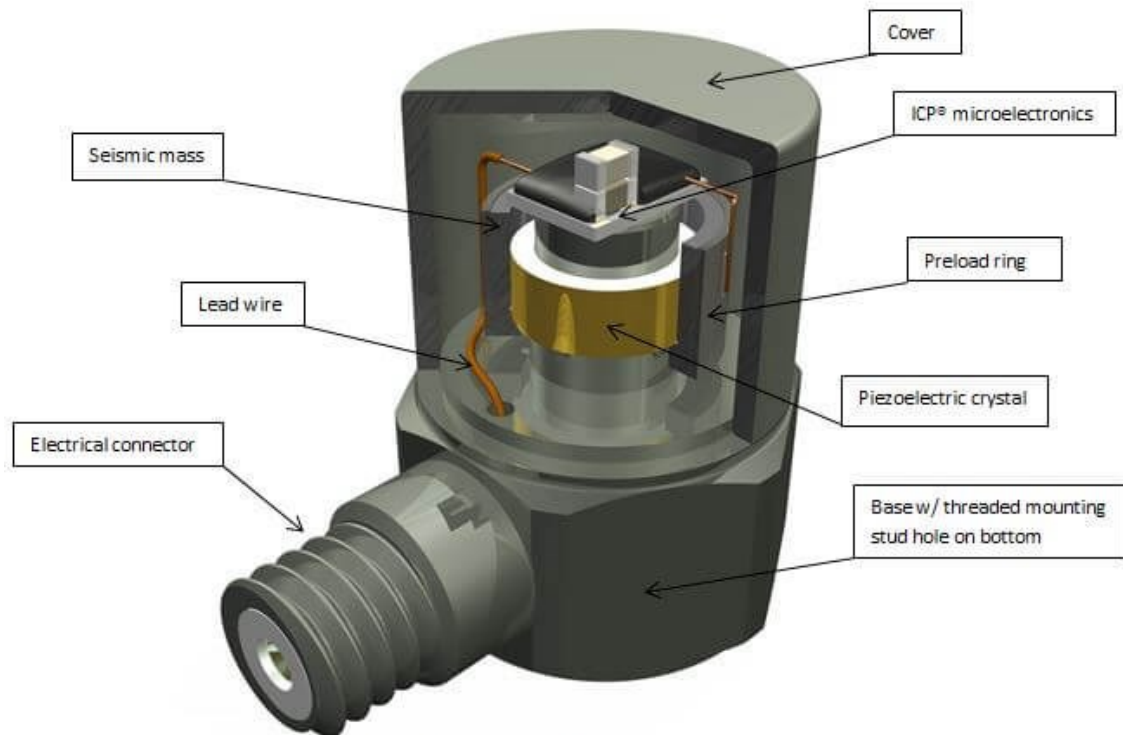


Figure 1: Typical ICP® Accelerometer

Kuva 6. PCB-yrityksen IEPE (ICP)-mallisen pietsosähköisen anturin poikkileikkaus (7).

2.2 Operaatiovahvistimet ja käytetyt vahvistinpiirit

Pietsosähköisen anturin tuottama sähköinen signaali voi olla jänniteamplitudin osalta jopa kymmeniä voltteja. Signaalin sisältämä varaus on kuitenkin heikko, tyypillisesti joi-tain kymmeniä picocoulombeja. Tästä syystä signaalia on syytä vahvistaa joko jännite-tai varausvahvistimella, riippuen siitä kuinka lähelle anturia vahvistin voidaan sijoittaa. Lähellä anturia voidaan vahvistaa jännitevahvistimella, kauempana varausvahvistimella. Kaupallisia antureita tehdään sekä integroidulla vahvistimella että ilman integroitua vahvistinta. Integroitu vahvistin on usein jännitetä vahvistavaa mallia ja sijaitsee anturin kanssa samassa koteloinnissa. Pelkkä anturi ilman vahvistinta kytketään yleensä va-rausvahvistimeen ja tällöin tulee ottaa huomioon esimerkiksi kaapeloinnin aiheuttamat haasteet. Anturin korkea impedanssi vaatii häiriöiden vähentämiseksi

operaatiovahvistimen, jolla on korkea sisääntuloimpedanssi. Lisäksi pietsoanturin kanssa käytettävällä vahvistimella tulee olla nopea lähtöjännitteen muutosnopeus (engl. slew rate, SR).

Vahvistimen lähtöjännitteen muutosnopeus SR, tarkoittaa kokonaislähtöjännitteestä 10 – 90 % välille jäävää jänniteamplitudin arvon muutosta mikrosekunnissa. Lähtöjännitteen muutosnopeus lasketaan kaavalla

$$SR = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta Time} = \frac{(V_{out_{90\%}} - V_{out_{10\%}})}{(t_{90\%} - t_{10\%})}$$

Kaavan mukaisesti, jos signaalin etureuna on tasaisesti nouseva ja amplitudi nousee 0:sta 10 V:iin 1 μ s:ssa, jolloin $t_{90\%} = 0,9 \mu$ s ja $t_{10\%} = 0,1 \mu$ s voidaan laskea, että

$$SR = \frac{(V_{out_{90\%}} - V_{out_{10\%}})}{(t_{90\%} - t_{10\%})} = \frac{9 V - 1 V}{0,9 \mu s - 0,1 \mu s} = 10 V/\mu s$$

Edellä esitetyt vaatimukset täyttää esimerkiksi Texas Instrumentsin (TI) valmistama TLV277X-sarja. Mallimerkinnän viimeinen luku (1-4) kertoo kuinka monta kanavaa kyseinen piiri sisältää, esimerkiksi TLV2771-piirissä on yksi kanava käytettävissä, TLV2772-piirissä kaksi kanavaa ja niin edelleen.

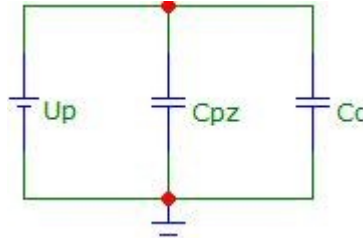
Pietsoanturin ulostuleva signaali voi olla erittäin korkeataajuuksista, jopa satoja megahertsejä, jolloin vahvistimen pitää kyetä erittäin nopeaan lähtöjännitteen muutosnopeuteen. TLV277X-sarjan lähtöjännitteen tyypillinen muutosnopeus on 10,5 V/ μ s, joka on riittävä pietsoantureiden kanssa käytettäväksi.

Kaapelointi anturilta vahvistimelle tulisi suorittaa erityisellä suojauksella varustetulla laadukkaalla kaapelilla ja suojauksen ulkopuoliset johtimet tulisi kiertää toistensa ympärille ylimääräisten häiriöiden välttämiseksi. Esimerkiksi mikrofoni-kaapeli on hyvin häiriösuojattu, ja soveltuu erinomaisesti pietsosähköisen anturin signaalin siirtoon. Kaikki signaalin siirtoon käytetty kaapelointi aiheuttaa lopulliseen virtapiiriin esimerkiksi parasitiittistä resistanssia ja kapasitanssia. Anturin ja siihen kytkettävän kaapelin kapasitanssit voidaan esittää kahtena rinnakkain kytkettynä kondensaattorina. Kapasitanssi määritellään jakamalla varaus jännitteellä kaavaa

$$C = \frac{Q}{U}$$

käyttäen.

Anturi tuottaa jännitettä, jolloin saadaan kuvan 7 mukainen yksinkertaistettu sijaiskytkentä. Piiri sisältää anturin jännitelähteenä (U_p), anturin kapasitanssia kuvaavan kondensaattorin (C_{pz}) sekä kaapelin kapasitanssia kuvaavan kondensaattorin (C_c).



Kuva 7. Yksinkertaistettu pietsoanturin ja kaapelin virtapiiri.

Tästä piiristä huomataan, että molempien kondensaattoreiden yli vaikuttaa sama jännite, U_p . Kirchoffin virtalain mukaisesti virtapiiriin jokaiseen pisteeseen tuleva virta on yhtä suuri pisteestä lähtevän virran kanssa, eli virtaa ei häviä mihinkään. Virta on sähkövarauksen liikettä kappaleessa (virtapiirissä), eli Kirchoffin virtalain perusteella voidaan todeta, ettei varauksen määrä virtapiirissä muutu. Kokonaisvaraus (Q_t) on kaavan

$$Q_t = Q_{cpz} + Q_{cc}$$

mukaisesti tällöin jokaisen rinnakkain kytketyn kondensaattorin varauksien summa.

Molempien kondensaattoreiden yli vaikuttaa sama jännite, U_p ja kaavan 2 mukaisesti varaus voidaan ilmoittaa jännitteen ja kapasitanssin tulona. Edellä mainittuja kaavoja käyttäen voidaan laskea kokonaiskapasitanssi (C_t).

$$C_t * U_p = C_{pz} * U_{pz} + C_c * U_c, ja$$

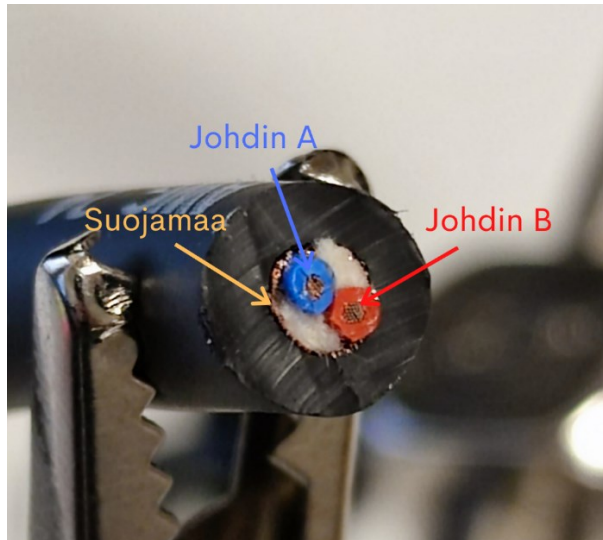
$$U_p = U_{pz} = U_c$$

$$\rightarrow C_t = C_{pz} + C_c$$

Rinnakkaiskapasitanssit siis summautuvat yhteen, muodostaen kokonaiskapasitanssin yksinkertaistetussa pietsoanturin ja kaapelin virtapiirissä (8).

Edellä kuvatut vaikutukset tulee ottaa huomioon lopullista virtapiiriä suunnitellessa, erityisesti piirin simuloinnin ja analysoinnin yhteydessä. Tässä työssä pisimmän kaapelin pituus on alle 150 mm, joka on niin lyhyt, ettei parasitiittistä resistanssia tarvitse huomioida. Kaapeloinnista johtuva rinnakkainen kapasitanssi tulee kuitenkin arvioida

laskemalla tai tarkistaa kaapelin datalehdeltä. Tässä työssä käytettiin CMK 222-mikrofonikaapelia, jonka kapasitanssi on datalehdessä (9) mukaan 55 pF/m. Kuvassa 8 näkyy kyseisen kaapelin poikkileikkaus.



Kuva 8. CMK 222 kaapelin poikkileikkaus.

Operaatiovahvistimien kytkennöistä muodostuu suunniteltujen kytkentätyyppien kautta erilaisia ali- ja ylipäästösuodattimia, jotka tulee huomioida vahvistinpiirin suunnittelun yhteydessä. Näiden laskenta on esitetty kappaleissa 2.2.1 ja 2.2.2.

2.2.1 Jännitevahvistinpiiri

Jännitevahvistimen tuottama lähtöjännite on verrannollinen anturin näkemän kapasitanssin määrään. Tämä tulee ottaa huomioon tehdessä muutoksia piiriin tai kaapeleita vaihtaessa (10). Varauslähteen tuottaman lähtöjännitteen laskeminen tapahtuu kappaleessa 2.2 esitettyä kapasitanssin määritelmää käyttäen. Jännitevahvistin pyrkii muuntamaan sisään tulevan korkeaimpedanssisen pietsanturin signaalin vahvistimen lähdössä matalaimpedanssiseksi jännitesignaalksi.

Aiemmin mainittu kaapeloinnista johtuva rinnakkaiskapasitanssi voi vaikuttaa huomattavasti piirin muodostamaan jännitteeseen sillä varsinaisen anturin sisältämä kapasitanssi on pieni, joitain satoja pikofaradeja. Tästä syystä jännitevahvistinta tulisi käyttää vain niissä tapauksissa, joissa vahvistinpiiri voidaan sijoittaa lähelle käytettävää anturia, esimerkiksi samaan metalliseen kotelointiin. Kotelointi suojaa samalla myös ulkoisilta

häiriöiltä. Jännitevahvistinta käyttävät IEPE-anturit ovat kuitenkin yleisesti käytössä juuri niiden yksinkertaisen käytettävyyden johdosta. IEPE:n ulostulosignaalia pystytään siirtämään normaalilla koaksiaalikaapelilla, sillä sen sisältämä elektroniikka muuttaa anturin tuottaman suuren impedanssin varaukseen perustuvan lähtösignaalin matalaimpedanssiseksi jännitesignaaliksi. IEPE-anturin käyttökohteita rajoittaa käyttölämpötila, joka asettuu sen sisältämän elektroniikkapiirin maksimikäyttölämpötilaan. Käyttölämpötilan raja on kuitenkin useimmilla antureilla yli 100 °C, joillain malleilla jopa 175 °C. Toinen IEPE-anturin rajoittava tekijä on ennalta määritelty anturin lähtösignaali. Siinä missä varausvahvistimella varustetun anturin lähtösignaalia voidaan käyttää sen koko skaalalta vahvistinpiiriä vaihtamalla, jännitevahvistimella varustettu anturi pitää päättää ennalta, sillä sen koteloinnin sisäistä vahvistinpiiriä ei voi vaihtaa.

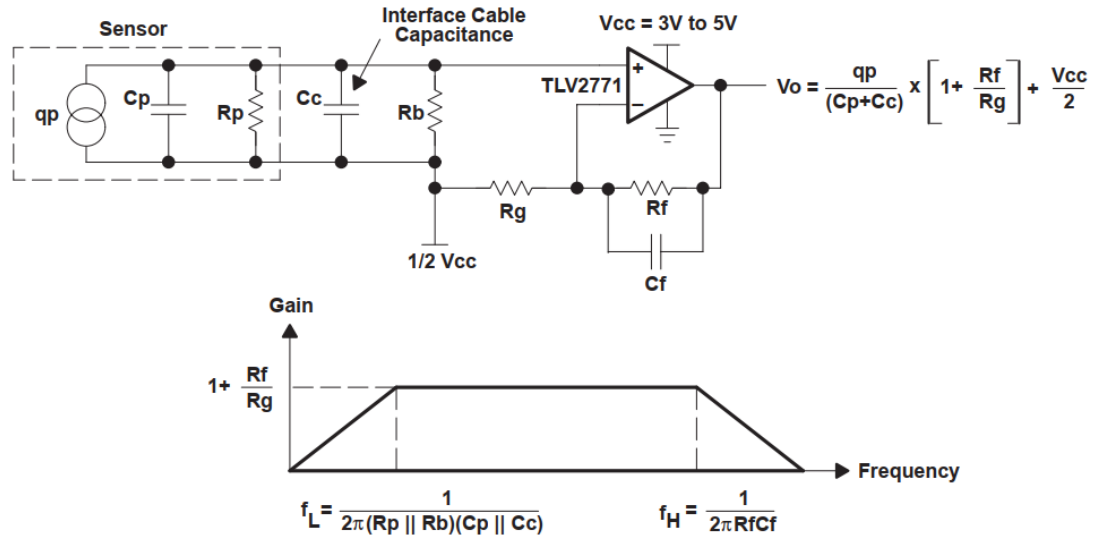
Kuvassa 9 on esitetty TI:n raportin ”*Signal conditioning piezoelectric sensors*” (10) mukainen jännitevahvistinmalli, jossa on käytetty yksikanavaista TLV2771 operaatiovahvistinta. Kuvassa piezoanturi on rajattu katkoviivalla ja kaapelista johtuva parasiittinen kapasitanssi (C_c) pitää laskea tai vähintään arvioida vahvistimen muita komponentteja suunnitellessa, sillä se vaikuttaa kaavan

$$V_o = \frac{qp}{(cp + Cc)} \cdot \left(1 + \frac{Rf}{Rg}\right) + \frac{V_{cc}}{2}$$

mukaisesti suoraan piirin lähtöjännitteeseen (V_o). Lisäksi vahvistukseen vaikuttaa suuresti vastusten R_f ja R_g suhde, joka määrittää vahvistimen vahvistuksen määrän (engl. gain) ja vahvistimen käyttöjännite V_{cc} .

Lähtöjännite biasoidaan käyttöjännitteen puoleen väliin syöttämällä $\frac{1}{2} \cdot V_{cc}$ vastusten R_g ja R_b välille. Tällöin lähtöjännite on ilman sisään tulevaa signaalia $\frac{1}{2} \cdot V_{cc}$, nollan voltin sijaan ja vahvistettu sisääntulosignaali heiluu tämän jännitteen ylä- ja alapuolella. Lähtöjännitteen maksimi on vahvistimen käyttöjännite ja minimi on 0 V, lähtöjännite ei siis missään vaiheessa saa negatiivista arvoa. TLV277X-sarjan vahvistimien käyttöjännite on yksipuolinen, eli niille ei syötetä lainkaan negatiivista käyttöjännitettä, vaan $+V_{cc}$ ja toinen napa maadoitetaan (0 V).

Voltage Mode Amplifier



Kuva 9. Jännitevahvistinmalli TLV2771-vahvistimella (10).

Vastus R_b toimii vahvistimen sisääntuloasteen tasajännitebiasointivastuksena ja se tulisi olla mahdollisimman suuri. TI:n raportti ehdottaa TLV2771-operaatiovahvistimen kanssa $10\text{ M}\Omega$ vastusta, jotta sisääntulojen välinen kompensatiojännite (V_{IO}) putoaa noin $60\text{ }\mu\text{V}$:iin. TLV2771:n datalehden (11) mukaan sen tyypillinen V_{IO} on $360\text{ }\mu\text{V}$, joten valitsemalla vastus R_b TI:n raportin mukaisesti, saadaan tässä piirissä vahvistimen V_{IO} pudotettua noin kuudesosaan vahvistimen tyypillisestä arvosta. Sisääntulojen välinen kompensatiojännite tarkoittaa sitä jännitettä, joka pitää syöttää sisääntulojen välille, jotta lähtöjännite olisi 0 V . Käytännössä tällaista jännitettä ei kuitenkaan vahvistimelle syötetä, vaan sen arvo halutaan oikeanlaisella suunnittelulla mahdollisimman pieneksi, jotta sen vaikutus lähtöjännitteeseen kyetään minimoimaan. V_{IO} ei ole edes jokaisella saman sarjan vahvistimella vakio, vaan sen arvo on yksilöllinen (12).

Kyseisen vahvistinpiirin kytkennöistä muodostuu kaistanpäästösuodatin. Alarajataajuus f_L määräytyy kaavan

$$f_L = \frac{1}{2\pi \cdot (R_p \parallel R_b) \cdot (C_p \parallel C_c)}$$

mukaan pietsoanturin sisäisen vastuksen R_p ja biasointivastuksen R_b rinnankytkennästä, sekä pietson sisäisen kapasitanssin C_p ja kaapelista aiheutuvan parasiittisen kapasitanssin C_c rinnankytkennästä.

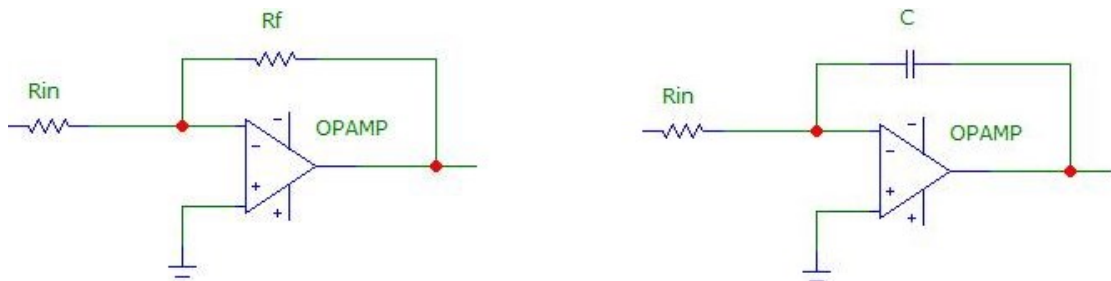
Ylärajataajuus f_H määräytyy kaavan

$$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_f}$$

mukaan takaisinkytkentään käytetyn vastuksen R_f ja kondensaattorin C_f rinnankytkennän perusteella.

2.2.2 Varausvahvistinpiiri

Jännitevahvistinpiirin ongelmaksi muodostuu piirin muista komponenteista, pääasiassa kaapeloinnista aiheutuva parasiittinen kapasitanssi. Varausvahvistin perustuu invertoivaan vahvistinkytkentään, tarkemmin invertoivaan integraattorikytkentään kuvan 10 mukaisesti, jossa operaatiovahvistimella suoritetaan virran integrointioperaatio ajan suhteen. Integrointioperaatio siis muuntaa varauksen jännitteeksi kytkennän lähdössä. Invertoivassa kytkennässä sisään tulevan signaalin vaihe käännetään vastakkaisvaiheiseksi tuomalla takaisinkytkentä kytkennän lähdöstä vahvistimen negatiiviseen sisään-tuloon.



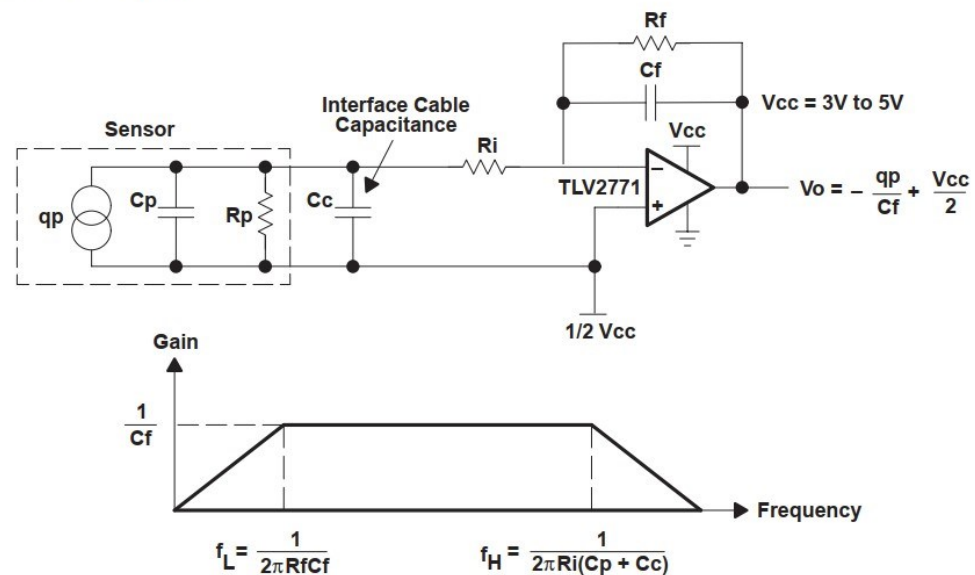
Kuva 10. Operaatiovahvistinkytkennät, vasemmalla invertoiva vahvistin ja oikealla invertoiva integraattori.

Varausvahvistimeen pitää lisäksi lisätä kondensaattorin rinnalle vastus, joka luo kondensaattorille purkautumiskanavan. Tällä vältetään vahvistimen ajautuminen saturaatio-tilaan, mikä tapahtuisi operaatiovahvistimeen sisään tulevan bias-virran aiheuttamana. Varausvahvistimen kanssa ei tarvitse huolehtia kaapeloinnin aiheuttamasta kapasitanssista, koska kaapeloinnin läpi ei tämän tyyppisen kytkennän kanssa kulje virtaa positiivisen sisääntulon ollessa kytkettynä maahan. Koska operaatiovahvistin pyrkii pitämään

sisääntulot samassa potentiaalissa, negatiivisen sisääntulon kohdalla vaikuttaa niin sanottu virtuaalinen maa.

Kuvassa 11 on esitetty TI:n raportin ”*Signal conditioning piezoelectric sensors*” (10) mukainen varausvahvistinmalli, jossa on käytetty yksikanavaista TLV2771 operaatiovahvistinta. Vahvistinmalli eroaa saman raportin jännitevahvistimesta toimintaperiaatteen osalta suuresti. Varausvahvistin pyrkii tasoittamaan vahvistimen negatiiviseen sisääntuloon syötettävää varausta varaamalla takaisinkytkentäkondensaattorin C_f . Edellä mainitun periaatteen mukaisesti myös TI:n mallissa kytketään kondensaattorin C_f rinnalle vastus R_f , jotta kondensaattori voi purkautua hitaasti vahvistimen ajautumatta saturaatiotiilaan. Vastus R_f luo samalla tasajännitebiasointikanavan negatiiviselle sisääntulolle. Vahvistimen käyttöjännite on yksipuolinen ja toinen napa maadoitetaan (0 V).

Charge Mode Amplifier



Kuva 11. Varausvahvistin TLV2771-vahvistimella (10).

Kuvasta 11 nähdään, että lähtöjännite varausvahvistimella ei pohjaudu enää lainkaan kaapeloinnin parasiittiseen kapasitanssiin, vaan vain piezoanturin tuottaman varauksen ja takaisinkytkentäkondensaattorin suhteeseen biasoituna $\frac{1}{2} \cdot V_{cc}$ ympärille. Parasiittiset kapasitanssit eivät aiheuta piirin toiminnalle ongelmia sillä tässä piirissä vahvistimen sisääntuloissa on 0 V, eli potentiaaliero ei synny. Vastuksen R_i tehtävänä on suojata vahvistinta sähköstaattisilta purkauksilta (engl. Electrostatic discharge, ESD). Vahvistimen vahvistus A riippuu takaisinkytkentäkondensaattorista C_f .

$$A = \frac{1}{Cf}$$

Kytkenässä käytetyistä komponenteista muodostuu kaistanpäästösuodatin, jossa alarajataajuus f_L määräytyy kaavan

$$f_L = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_f}$$

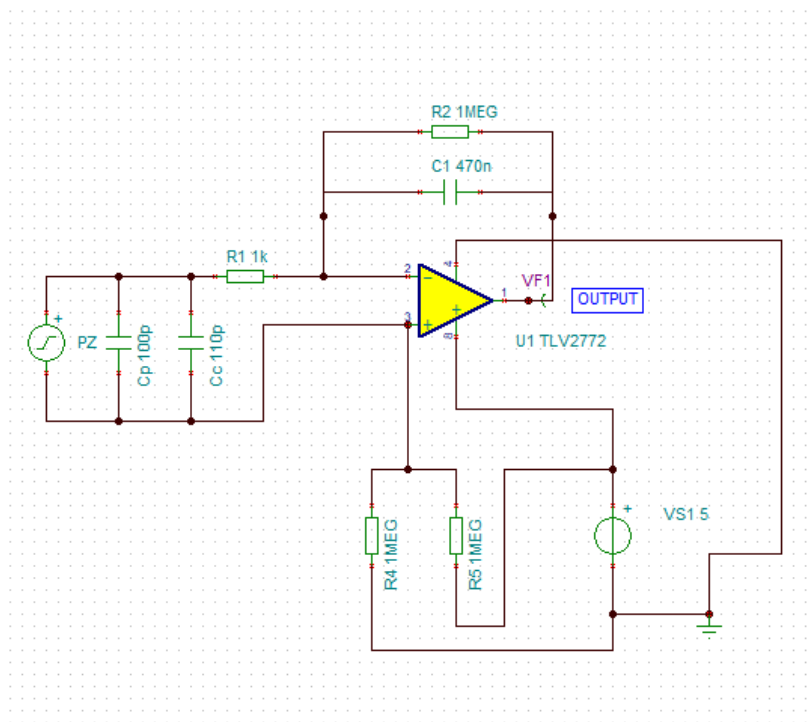
mukaan takaisinkytkennässä käytetyistä kondensaattorista C_f ja vastuksesta R_f .

Ylärajataajuus f_H muodostuu kaavan

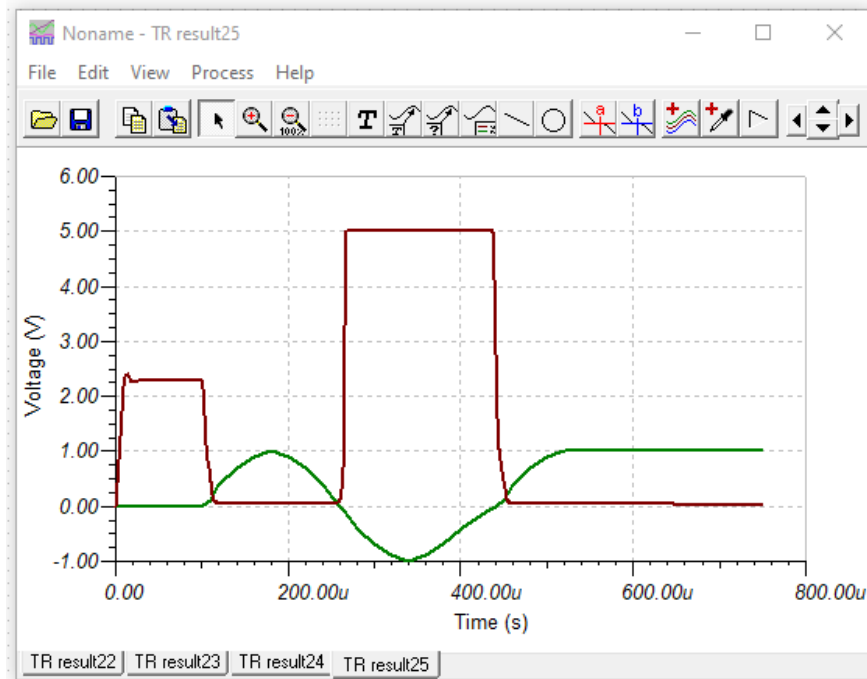
$$F_H = \frac{1}{2\pi \cdot R_i \cdot (C_p + C_c)}$$

mukaan, eli sähköstaattisilta purkauksilta suojaavan vastuksen R_i ja pietsoanturin sisäisen kapasitanssin C_p lisäksi kaapeloinnin parasiittisellä kapasitanssilla C_c on oma vaikutuksensa piirin toimintaan myös varausvahvistimen kohdalla.

Käyttämällä TI:n mallia suunnittelun pohjana, voisi käytännön toteutus varausvahvistimesta olla kuvan 12 mukainen. Kuvassa 13 on kuvan 12 piirin transienttisimulointitulokset.



Kuva 12. TLV2772-vahvistimen ympärille rakennettu vahvistinpiiri.



Kuva 13. Kuvan 12 piirin transienttisimulaation tulos.

Kuvasta 13 huomataan, että sisääntulosignaalin ollessa 0 V, piirin lähtöjännite on noin puolet vahvistimen käyttöjännitteestä, eli 2,5 V. Koska kyseessä on invertoiva vahvistinpiiri, sisään tulevan positiivisen aallon alkaessa lähtöjännite putoaa noltaan ja sisään tulevan negatiivisen aallon aikana lähtöjännite nousee piirin maksimiin, eli käyttöjännitteen 5 V tasalle. Vahvistus piirissä suunnitellaan hyvin korkeaksi, esimerkiksi yli 100 dB, jotta pienikin muutos sisään tulevassa signaalissa aiheuttaisi välittömästi lähes pystysuoran muutoksen lähtöjännitteeseen. Edellä esiteltyjen kaavojen mukaisesti kaistanpäästösuodattimen alarajataajuus f_L on

$$f_L = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_f} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \text{ M}\Omega \cdot 470 \text{ nF}} \approx 0,3 \text{ Hz}$$

mikä käytännössä tarkoittaa, ettei alarajataajuutta ole. Koska vastus R_f ei vaikuta vahvistukseen ja kondensaattori C_f määrittää vahvistuksen, valitaan ensin halutun vahvistuksen mukaisesti kondensaattori C_f . Tämän jälkeen valitaan vastus R_f halutun taajuusvasteen saavuttamiseksi.

Kaistanpäästösuodattimen ylärajataajuus f_H on

$$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot R_i \cdot (C_p + C_c)} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \text{ k}\Omega \cdot (100 \text{ pF} + 110 \text{ pF})} \approx 758 \text{ kHz}$$

ja kaavan perusteella ylärajataajuuteen voidaan vaikuttaa helpoiten muuttamalla vastusta R_i . Pietsoanturin sisäiseen kapasitanssiin C_p ja kaapeloinnista aiheutuvaan paraasiittiseen kapasitanssiin C_c voidaan vaikuttaa vain vaihtamalla koko anturi tai kaapelointi.

Varausvahvistin on hallittavien komponenttien osalta huomattavasti helpompi käyttää kuin jännitevahvistin. Kaapelointi voidaan suorittaa esimerkiksi normaalilla koaksiaalikaapelilla, jos sen ominaisuudet kelpaavat halutulle kaistanpäästösuodatuksen ylärajataajuudelle. Kaupalliset jännitevahvistinmallit, kuten IEPE-anturit ovat kuitenkin edullisempia ja samalla varmatoimisia, joten tässä työssä keskitytään jännitevahvistimen suunnitteluun konseptitodistuksen suorittamiseksi. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että konseptitodistusta varten, jokaiselle pietsoanturille rakennetaan erillinen jännitevahvistin mahdollisimman lähelle anturia.

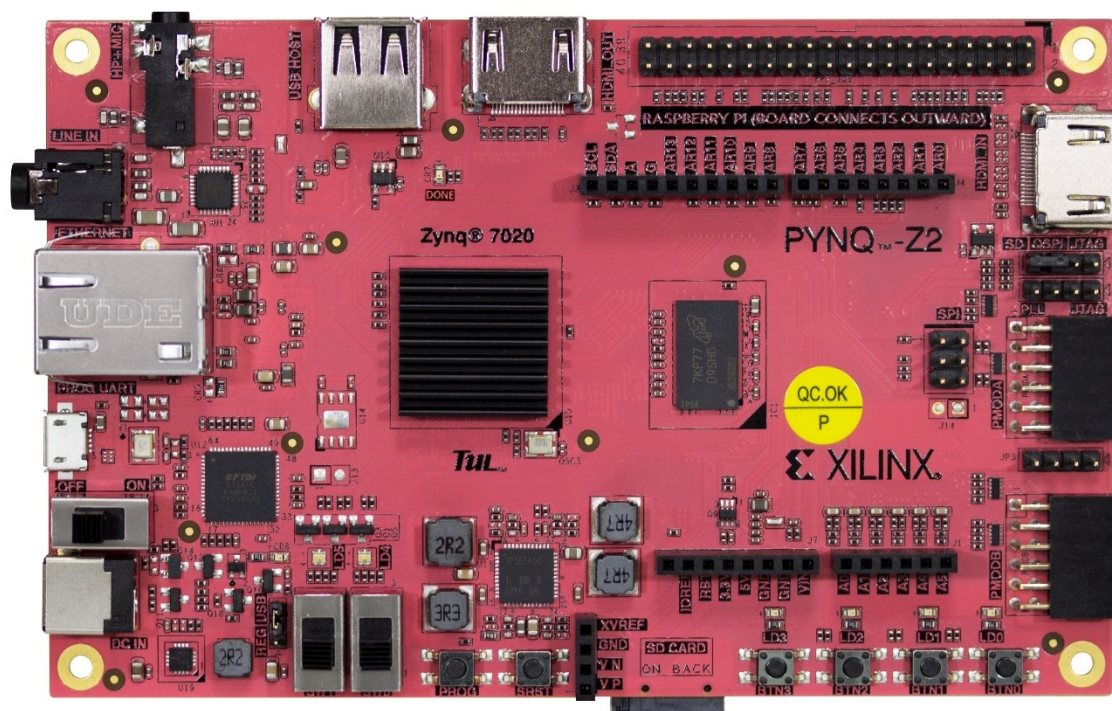
2.3 FPGA-piiri

FPGA-piiri (Field-Programmable Gate Array) on järjestelmäpiiri, jonka toimintaa ja toimintoja voidaan muuttaa piirin valmistamisen jälkeen laitteistokuvauskielellä ohjelmalla. Piirin toiminta pohjautuu loogisiin portteihin, joita yhdistelemällä saadaan luotua todella laaja kirjo erilaisia toimintoja. FPGA-piirit voivat sisältää nopean mikroprosessorin, jonka kellotaajuus on halvempia ja yksinkertaisempia mikrokontrollereita korkeampi ja ohjelmointikielen tason takia toiminta on nopeampaa. Yksinkertaisten mikrokontrollereiden ohjelmointi tapahtuu usein korkean tason ohjelmointikieltä, kuten C++:aa tai Pythonia käyttäen, jolloin laitteistoa ohjataan ennalta jo joidenkin toimintojen osalta. Usein korkean tason ohjelmoinnissa käytetään osaltaan valmiita funktioita, jolloin resursseja, kuten prosessoriaikaa ja muistia, käytetään turhaan. Tämä johtuu siitä, että korkean tason kielten tulisi olla ohjelmoijalle yksinkertaisia ja nopeita käyttää. Korkean tason ohjelmoinnissa suoritettava ohjelma etenee sekventiaalisesti käskyltä seuraavalle, siten että seuraavan käskyn toiminta saattaa odottaa edellisellä käskyllä esitetyn toiminnon päättymistä. Yleisesti käytetty esimerkki tällaisesta mikrokontrollerista on kuvassa 14 esitetty Arduino Uno. Arduino Uno perustuu 8-bittiseen ATmega328-mikropiiriin ja sen 16 MHz kellotaajuus tuotetaan keraamisella resonaattorilla. Teoriassa 16 MHz kellotaajuudella kykenisi suorittamaan toiminnon 62,5 ns välein, käytännössä käytetty ohjelmointikieli rajoittaa nopeutta huomattavasti. Tästä syystä erittäin nopeita toimintoja vaativissa käyttökohteissa käytetään enemmän esimerkiksi FPGA-piirejä ja laitteistokuvauskieltä kuten VHDL:ää (VHSIC Hardware Description Language).



Kuva 14. Arduino Uno-mikrokontrolleri (13).

FPGA-ohjelmointi tapahtuu matalan tason ohjelmointikielillä, kuten laitteistokuvauskielillä, VHDL:ää tai Verilogia käyttäen. Laitteistokuvauskielissä kuvataan digitaalipiirin toimintaa raudan tasolla ja ohjelma etenee korkean tason ohjelmoinnista poiketen huomattavan rinnakkaisesti. Ohjelmointi perustuu hyvin pitkälle loogisten porttien ja näiden yhdistelmien luomiseen erilaisilla ohjelmointiohjelmilla, kuten Xilinx Vivadolla. Ohjelmointiohjelmat helpottavat laitteistokuvauskielten käyttöä siten, että ne osaavat syntetisoida kirjoitetun koodin perusteella mahdollisimman kevyen yhdistelmän erilaisia loogisia portteja halutun lopputuloksen saavuttamiseksi, jotta resursseja ei käytetä turhaan ja laitteiston toiminta pysyy mahdollisimman nopeana. Tätä kutsutaan laitteistosynteesiksi ja sen tulee perustua jollekin olemassa olevalle FPGA-piirille, kuten PynQ-Z2:lle, jotta ohjelma pystyy varmistamaan synteesin olevan mahdollinen toteuttaa. Kuvassa 15 esitetty PynQ-Z2 on Zynq 7000-sarjaan perustuva järjestelmäpiiri, jonka suoritin on 650 MHz kellotaajuudella toimiva kaksiytiminen ARM Cortex-A9. PynQ-Z2 sisältää muun muassa Arduino Unon ja Raspberry Pin toiminnallisuudet ja pääosan fyysisistä liittimistä yhdellä järjestelmälevyllä, joten sen käyttömahdollisuudet ovat huomattavasti kyseisiä yksittäisiä mikrokontrollereita laajemmat (14).



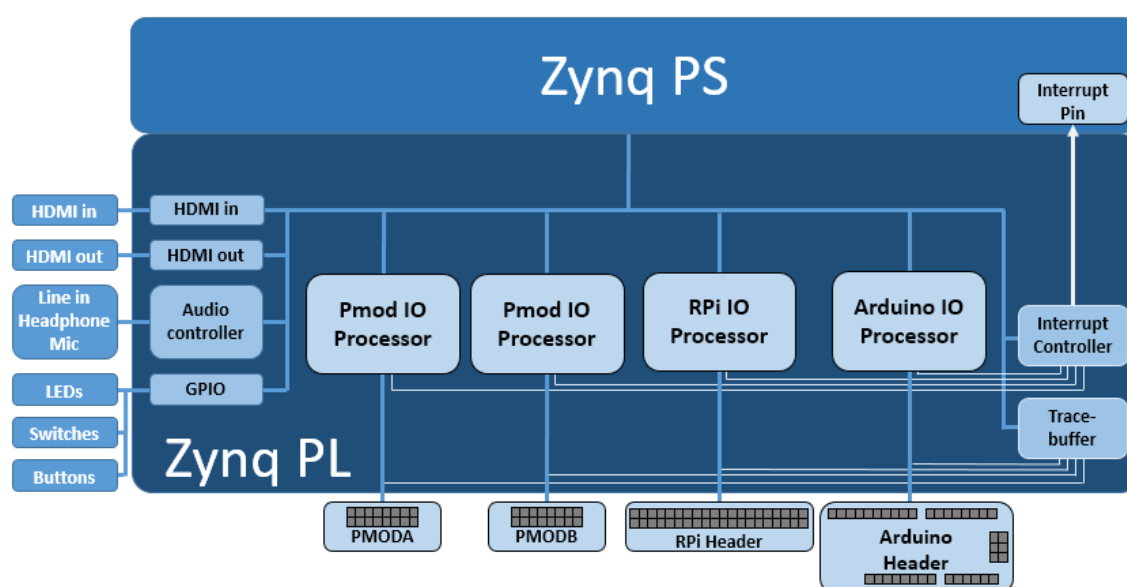
Kuva 15. TUL PynQ-Z2-järjestelmäpiiri (14).

Arduino Unon ja PynQ-Z2 suorituskyvyn erotuksen esimerkkinä voidaan käsitellä analogisen sisääntulon arvon lukemista. Arduino Unolla ohjelmointi tapahtuu C++-kielen avulla ja analogisen sisääntulon lukemiseen löytyy valmis funktio, `analogRead()`. Arduinon ohjeiden perusteella `analogRead()`-funktion suoritus-aika on noin 100 μ s, joten erillisiä mittauksia voidaan tehdä noin 10000 kertaa sekunnin aikana (15).

PynQ-Z2 ohjelmoinnissa käytettävän Vivado-ohjelmiston avulla voidaan käytettävä kellotaajuus asettaa esimerkiksi 125 MHz:iin (suorittimen maksimi kellotaajuus 650 MHz), ja tällä kellotaajuudella voidaan analoginen arvo ohjelman sisällä lukea 8 ns välein, eli 125 miljoonaa kertaa sekunnin aikana. Tämä vaatii ohjelmoijalta kykyä rakentaa sopiva IP-lohko (Intellectual Property) ja sen yhdistämistä piirilevyiltä löytyviin väyliin, jos sellaista ei löydy valmiina. Laitteistokuvailukielellä tehdyn IP-lohkon käyttäminen eri soveluksiin voidaan toteuttaa esimerkiksi Python-ohjelmointikielen perustuvan Jupyter Notebook-käyttöympäristön avulla. Jupyter Notebook-ympäristöä voidaan ajaa PynQ-Z2:lla muistikortilta suoraan tietokoneen avulla, joko verkko- tai terminaaliyhteyden kautta. Tämä mahdollistaa PynQ-Z2 toimintojen käytön korkean ohjelmointikielten ohjelmoijille. Pythonilla kirjoitetaan koodi, joka tuottaa halutut toiminnot käyttäen Pythonin valmiita kirjastoja. Tällä kertaa kuitenkin käytettävänä resurssina löytyy myös VHDL:llä kuvailtu

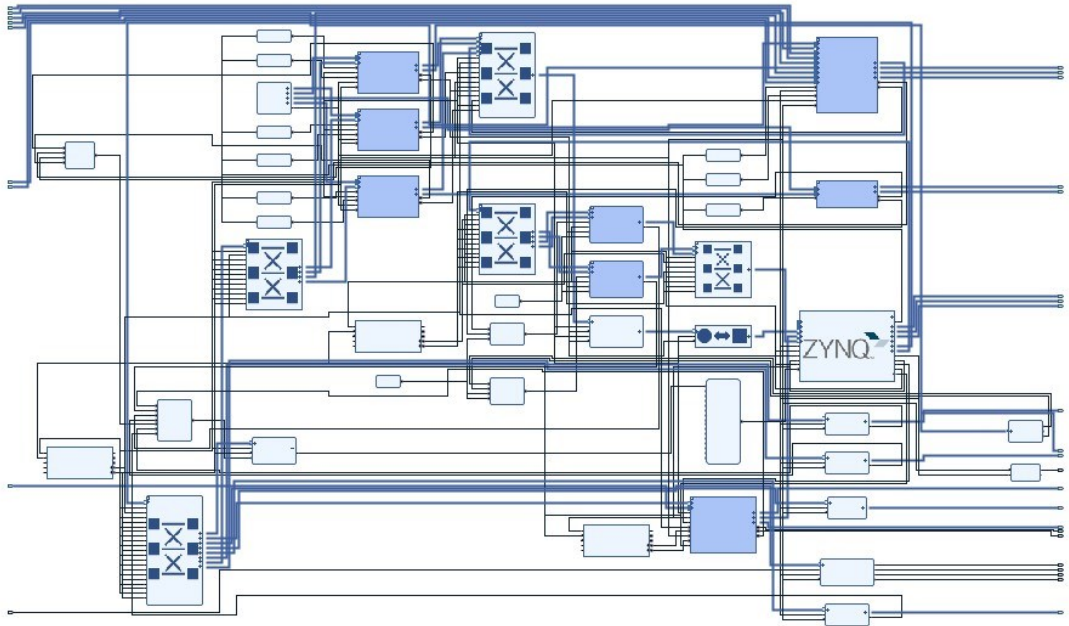
rautatason komponentti toimintoinen, joita käytetään viittaamalla VHDL:ssä kuvattuihin portteihin ja signaaleihin.

Kuvassa 16 on esitetty PynQ-Z2 lohkodeigrammi piirin prosessorista (Processing System, PS) ja siihen integroidusta FPGA-sidoksesta (Programmable Logic, PL). Prosessorin alaisuudessa toimii piirin erityiset lisälaitteet, kuten muistiohjaimet ja USB- ja muistikorttipaikat. FPGA-sidoksella pystyy kortin toimintoja laajentamaan, esimerkiksi kytkeään PynQ MicroBlaze-alijärjestelmää käyttäen eri sisään- ja ulostulostandardeja käytäviä laitteita piirin toimintaan. PynQ-Z2 sisältää kolme erilaista MicroBlaze-alijärjestelmää, Pmod, Arduino ja RaspberryPi, joista tässä työssä hyödynnetään Arduinoa (16).



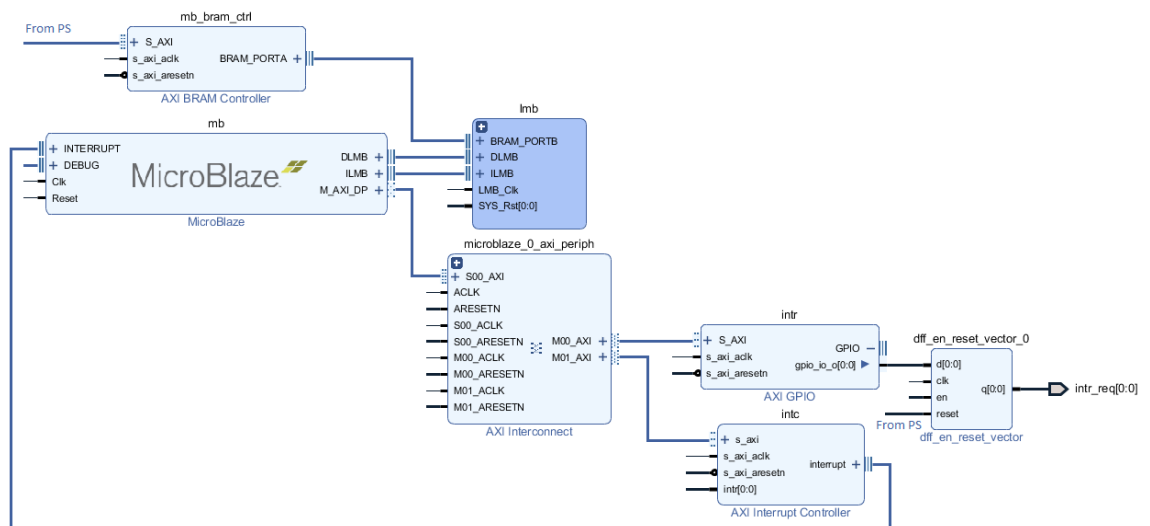
Kuva 16. PynQ-Z2 lohkodeigrammi (16).

PynQ-Z2:n käyttö Jupyter Notebookin avulla vaatii koko järjestelmän vedoksen viemistä muistikortille, josta se käynnistetään laitteen mukana. Järjestelmiä voidaan kuvata laitteistokirjastojen (engl. Overlays) avulla. PynQ-Z2:sta löytyy koko järjestelmän kattava laitteistokirjasto nimeltä "Base" (Base Overlay), jonka lohkodeigrammi on esitetty kuvassa 17. Tämä kirjasto toimii koko järjestelmäpiirin referenssinä, jonka sisälle ohjelmoija voi luoda uusia kirjastoja, jotka voidaan yhdistää olemassa oleviin kirjastoihin lisäten piirin toimintoja.



Kuva 17. PynQ-Z2 Base Overlay Vivado-ohjelmaan ladattuna.

Kuvan 17 lohkokaaviossa on näkyvillä vain järjestelmään kuuluvat pääkomponentit. Suurin osa toiminnoista ja liitännöistä on piilossa kyseisten lohkojen alla, esimerkkinä kuvassa 18 esitetty MicroBlaze-alijärjestelmä.



Kuva 18. MicroBlaze-alijärjestelmä.

3 VAATIMUKSET

3.1 Värähtelysignaalin erotteluresoluutio

Värähtelysignaalin erotteluresoluutio, eli nopeus, jolla järjestelmä kykenee erottelemaan eri signaalien saapumisajat, määräytyy värähtelyn etenemisnopeudesta teräslevyllä. Järjestelmän pitää olla tarpeeksi nopea, jotta eri aikaan ja eri kanaviin saapuvat värähtelyt kyetään erottamaan erillisiksi signaaleiksi. Koko värähtelystä mitataan tässä järjestelmässä vain jokaiselle anturille saapuvan värähtelyn ensimmäinen reuna, koska se on paikannuksen kannalta ainoa merkitsevä hetki. Tästä syystä värähtelyn taajuudella tai järjestelmän kyvyllä seurata taajuuksia ei ole järjestelmän toiminnan kannalta väliä.

Opinnäytetyötä varten testaukset suoritettiin kolmella erikokoisella teräslevyllä, jotka on esitelty liitteessä 2. Värähtely etenee levyssä iskukohdasta aaltomaisena liikkeenä tasaisesti joka suuntaan, pieniä eroja saattaa syntyä esimerkiksi tietyssä kulmassa saapuvasta iskusta. Värähtelyn edetessä ja erityisesti sen kimmotessa levyn reunoista tai epätasaisuuksista saattaa eri vaiheissa olevien värähtelyiden kohdatessa tapahtua joko aallon vahvistumista tai vaimentumista, eli vahvistava tai vaimentava interferenssi. Superpositioperiaatteen mukaisesti interferenssiaalto muodostuu kahden aallon yhteenlaskusta. Vahvistava vaikutus tapahtuu, kun kaksi samassa vaiheessa olevaa aaltoa kohtaa samassa pisteessä, kun taas kaksi vastakkaisessa vaiheessa olevaa aaltoa vaimentavat toisiaan, joskus jopa täysin. Vaimentava interferenssi ei vaikuta järjestelmän toimintaan, sillä järjestelmän toiminnan kannalta olennaiset ensimmäiset antureille saapuvat aalto-reunat eivät voi olla summutuneita simulointitulosten perusteella. Simulointitulokset osoittavat, että värähtely etenee nopeimmin lyhintä reittiä pitkin, jolloin kimmonneet värähtelyt saapuvat aina antureille suoraan edenneiden jälkeen. Huomioon otettavan ongelman muodostavat vahvistavat interferenssiaallot, sillä pietsoanturi tuottaa muutosnopeuteen nähden samassa suhteessa amplitudiltaan kasvavan lähtöjännitteen. Jännitteen amplitudia pitää kyetä rajoittamaan viimeistään ennen FPGA-piirin sisääntuloa.

Järjestelmä mittaa vain pietsoanturille saapuvan värähtelyn ensimmäisen reunan, joten kerrannaisvärähtelyt eivät tässä tapauksessa haittaa järjestelmän toimintaa tai vaikuta tarkkuuteen. Pietsoantureita ei ohjata järjestelmällä, vaan ne antavat sähköistä signaalia niin kauan kuin levyn fyysinen värähtely muuttaa kiteen muotoa ja vahvistin vahvistaa jokaista vahvistettavissa olevaa signaalia, joten suodatus tulee tehdä signaalin

digitaalisen prosessoinnin aikana. Suodatus on mahdollista tehdä lisäämällä jokaisen mittauksen jälkeen sopivan pituinen jakso, jolloin ohjelmallisesti ei kuunnella mitään saapuvaa signaalia. Tämä ohjelmallisesti pois suodatettu aika tulee olla värähtelyn vaimenemisajaa pidempi, mutta kuitenkin lyhyempi kuin mahdollisten uusien osumien välinen aika edellisestä iskusta, jottei yhtäkään iskua jää mittaamatta. Tarvittavat parametrit koodiin saadaan mittaamalla aikaväli, jossa levyn värähtely vaimenee nolnaan, tai vähintään niin pieneksi ettei sen vahvistettu muoto nouse digitaalisen signaalin 1-tasoksi vaadittavan amplitudin yli. Toinen parametri on halutun järjestelmän nopeus seuraavaa iskua varten, esimerkiksi kahden vasaralla lyödyn iskun aikaero voisi olla 1500 ms. Jos värähtely vaimenee nolnaan 120 ms:ssa, pitää parametrien mukaisesti suodatusaika olla pidempi kuin 120 ms, mutta lyhyempi kuin 1500 ms.

3.2 Mittauspiirin vaatimukset

RandomTec Oy antoi mittauspiirille ja sen toteutukselle täyden vapauden, kunhan sillä kyetään toteuttamaan aloituspalavereissa käytyjen keskusteluiden perusteella yhdessä asetetut vaatimukset lopullista käyttötarkoitusta ajatellen. Tällaisia vaatimuksia ovat muun muassa mittauspiirin nopeus ja herkkyys (Liite 3). Järjestelmä tulee tarvitsemaan 230 VAC sähkösyötön hakkurivirtalähteelle ja FPGA-piirin muuntajalle, joten kannettava tai siirrettävästä järjestelmästä ei ole kyse. RandomTec Oy asetti kahden erillisen iskun väliseksi minimiajaksi 150 ms.

3.2.1 Koko ja kannettavuus

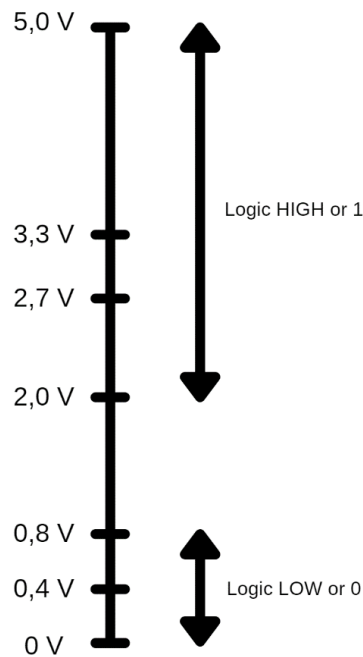
Mittauspiirin koko tulisi olla mahdollisimman pieni ja siten helposti siirrettävissä, erityisesti testivaihetta ajatellen, sillä testaukseen käytettävää välineistöä ei voida sen koosta ja erityispiirteistä johtuen kasata mihinkään kiinteästi, vaan sen on oltava nopeasti kasattavissa ja purettavissa. Lopullisen järjestelmän kokoa ei tarvitse rajoittaa, mutta piirin komponenttien vähyydestä ja jäähtymisen tarpeettomuudesta johtuen järjestelmän fyysinen koko ei tule olemaan suuri. Itse mittauspiiri on hyvin pieni kytkentälevylle kasattuna, noin 40 x 60 mm. FPGA-piirinä toimii TUL PynQ-Z2, jonka ulkomitat ilman koteloita ovat 87 x 137 mm (syvyys x leveys). Molemmat tarvitsevat lisäksi virtalähteen, mittauspiiri 5 VDC joko hakkurivirtalähteen tai paristokotelon avulla ja PynQ-Z2 toimii joko 12 VDC virtalähteellä tai Micro-USB-portin syötöllä, eli 5 VDC. Maksimissaan 1 A

virransyötön kapasiteetti on riittävä. Paristokoteloä käytettäessä pitää huomioida paristojen varauksen laskiessa syöttöjännitteen samanaikainen aleneminen, joten sen käyttö tulisi rajoittaa testausvaiheeseen.

3.2.2 Jännite ja virrankulutus

Vahvistinpiiriin suunniteltu 3,3 V tasajännite syöttöjännitteenä tarkoittaa kahta 1,5 V paristoa sarjassa, jolloin saavutetaan 2 x 1,5 V, eli 3 V. Todellisuudessa uuden pariston napajännite on hieman yli ilmoitetun 1,5 V, esimerkiksi testauksessa käytettyjen Energizer AAA-paristojen napajännite oli alussa 1,6 V. Tällöin pääsemme vielä hieman lähemmäs haluttua 3,3 V tasajännitettä, kahdella paristolla 3,2 V:iin. Hakkurivirtalähteestä kytetään vaihtamaan syöttöjännitettä muun muassa 3 ja 5 V välillä.

Vahvistettu signaali syötetään PynQ-Z2:n sisäisen Arduino-piiriin liittimiin, joihin voidaan syöttää 3,3 V TTL-signaali (Transistor-Transistor Logic). TTL-signaalin sisään tuleva ”tosi” (”HIGH” tai ”1”) tarkoittava jännitetaso on 2 – 5 V ja ”epätosi” (”LOW” tai ”0”) tarkoittava jännitetaso 0 – 0,8 V. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki 0 – 0,8 V jännitesignaalit luetaan sisään tulevana loogisena tilana 0 ja kaikki yli 2 V luetaan sisään tulevana loogisena tilana 1 kuvan 19 mukaisesti.



Kuva 19. TTL-signaalien loogiset tilat.

Kuvassa 19 esitetyt 2,7 V ja 0,4 V jännitetasot liittyvät laitteesta ulos lähteviin TTL-syöttöjännitteisiin. Arvojen 0,8 V ja 2 V välille jäävällä alueella sisään tuleva jännite aiheuttaa laitteen epävarmaa toimintaa, mikä tarkoittaa sitä, että 1-tilan signaali pyritään tuottamaan mahdollisimman lähelle 3,3 tai 5 V jännitetasoa ja 0-tilan signaali pyritään pitämään mahdollisimman lähellä 0 V:a.

Näille digitaalisille sisääntuloporteille on edellä mainitun mukaisesti asetettu maksimijännite, joko 5 tai 3,3 V. PynQ-Z2 käyttöohjeesta löytyy taulukko käyttöjännitteistä, joka on esitelty kuvassa 20. Taulukon mukaan kortin Arduino-liittimien suositeltava käyttöjännite on 3,4 V ja absoluuttinen maksimi 3,75 V (17). Koska lähtökohtaisesti 3,3 V TTL-taso on yhteensopiva 5 V TTL-tason kanssa, voidaan tarvittaessa vahvistinpiiriä käyttää suoraan sellaisenaan 5 V TTL-tasoa käyttävän järjestelmäpiirin kanssa.

	Absolute Minimum Voltage	Recommended Minimum Operating Voltage	Recommended Maximum Operating Voltage	Absolute Maximum Voltage
Powered	-0.4V	-0.2V	3.4V	3.75V
Unpowered	-0.4V	N/A	N/A	0.55V

Table 15 Arduino header digital pin voltages

Kuva 20. PynQ-Z2 kortin Arduino-liittimien käyttöjännitteet (17).

Vahvistinpiirin virrankulutus tulee olemaan todella pientä, milliampeeriluokkaa. PynQ-Z2 ottaa virtansa Micro-USB-portin kautta, jolloin syöttöjännite on 5 V ja virrankulutus on ilman analysoinnin suorittavaa koodia kuvassa 21 esitetyllä mittarilla mitattuna noin 300 mA. Analysointi vaatii FPGA-piiriltä käyttöön useita sisäisiä lisälaitteita, kuten Arduino PYNQ MicroBlaze-alijärjestelmän, jolla ajetaan siihen liitettyjä sisääntuloja ja lähtöjä. Näiden lisälaitteiden ja alijärjestelmien käyttö nostaa virrankulutusta huomattavasti, jopa 500 mA asti. Jos USB-virransyöttö otetaan tietokoneen USB-portista, tulee aina käyttää suoraan emolevyn lähtöön kytkettyä porttia, sillä USB-keskittimet ja muut jatkotai jakokappaleet saattavat rajoittaa virransyötön kapasiteettia, jolloin FPGA-piirin toiminta muuttuu epäluotettavaksi. Jännitteiden amplitudeja rajoittaa muun muassa käytetyn operaatiovahvistimen suurin sallittu jännite, sekä FPGA-kortin digitaalisen sisääntulon suurin suositeltu käyttöjännite 3,4 V.



Kuva 21. FPGA-piirin virran mittaus USB-testerillä

3.3 Järjestelmän tuottama tulostus

Projektin vaatimuksena on näyttää toteen, että on mahdollista mitata pietsoantureiden tuottamien jännitteiden ensimmäisten nollassa poikkeavien etureunojen väliset aikaerot. Pietsoanturi tuottaa värähtelyä taajuudeltaan ja amplitudiltaan vaihtelevaa siniaaltoja, jonka vahvistin ottaa vastaan ja vahvistaa käytännössä kantiaalloksi, rajoittaen samalla jännitteen maksimissaan +3,3 V:iin. Koska kyseessä on siniaalto ja vahvistin on invertoiva, voi ensimmäinen reuna olla nollassa nähden positiivinen tai negatiivinen. Järjestelmän kannalta olennainen tieto on signaalin ensimmäinen muuttuva reuna, joka pyritään tuottamaan vahvistimen avulla mahdollisimman nopeaksi (pystysuoraksi), jolloin sitä voidaan käsitellä kuin digitaalista signaalia, nollassa tai ykkösenä. Looginen tila HIGH on aina nollassa poikkeava ja yli 2 V. Koska pietsoanturin tuottaman siniaallon ensimmäinen reuna voi olla joko positiiviseen tai negatiiviseen suuntaan, pitää vahvistimelta lähtevä signaali myös tasasuunnata, jotta sekä positiiviset että negatiiviset signaalit antavat indikaation FPGA-piirille. Jos tasasuuntaus jätettäisiin tekemättä, saattaisi ensimmäinen positiiviseen suuntaan nouseva reuna olla useita mikrosekunteja tai jopa kymmeniä mikrosekunteja myöhässä, jolloin mittaus olisi erittäin epätarkka. Signaali kytketään FPGA-piirin digitaaliseen sisääntuloon ja piiri laskee sisään tulevien signaalien aikaerot saapumisjärjestyksessä. Nolla-aika asetetaan ensimmäiseksi saapuneen signaalin kohdalle ja lopuille signaaleille lasketaan aikaero nolla-aikaan. FPGA-piirin tulostus on aikaerot halutussa formaatissa, esimerkiksi selkolukuisena tekstinä. Tämän tulostuksen jatkokäyttö ei kuulu enää opinnäytetyön laajuuteen.

3.4 Taulukko vaatimuksista prioriteetteineen (MoSCoW method)

Projektin onnistumisen varmistamiseksi päädyttiin käyttämään priorisointimenetelmää nimeltä ”MoSCoW”. Nimitys tulee sanoista ”Must have”, ”Should have”, ”Could have”, ”Won’t have (this time)”. Eli projektille valitaan vaatimuksia jotka:

- pitää ehdottomasti olla, sijoitetaan ”Must have” alle
- ovat tärkeitä mutta eivät kuitenkaan pakollisia, sijoitetaan ”Should have” alle
- halutaan, muttei ole millään tavalla välttämättömiä, sijoitetaan ”Could have” alle
- eivät ole olennaisia (tässä vaiheessa) eikä näihin resursoida ollenkaan aikaa, sijoitetaan ”Won’t have” alle

Taulukossa 1 ensimmäiset kaksi saraketta ovat ne asiat, joihin resursoidaan eniten aikaa ja testikapasiteettia. Näiden sarakkeiden sisältö laaditaan toimeksiantajan vaatimusten ja mittauspiirille asetettujen tavoitteiden perusteella. Jälkimmäiset kaksi saraketta voivat toimia jatkokehittelyn pohjana tulevaisuudessa. MoSCoW-menetelmä mahdollistaa yhtenäisen ajatuksen tilaajan ja toimittajan välillä siitä mihin rajalliset resurssit sijoitetaan (18).

Taulukko 1. MoSCoW-menetelmän mukainen vaatimusten priorisointi

Must have / Täytyy olla	Should have / Pitäisi olla	Could have / Voisi olla	Won’t have / Ei toteuteta (toistaiseksi)
<ul style="list-style-type: none"> • Mikrosekuntiluokan erottelu- resoluutio • Mittaustulokset oskilloskoopilla • 10 mm etäisyys- erottelukyky 	<ul style="list-style-type: none"> • Pieni koko • Mittaustulokset FPGA-piirillä • 5 mm etäisyys-erot- telukyky 	<ul style="list-style-type: none"> • Liikuteltava järjestelmä • Mittaustulokset automaattisesti tekstitiedostoon • < 5 mm etäi- syyserottelu- kyky 	<ul style="list-style-type: none"> • Akkukäyttö

4 TYÖN TOTEUTUS

4.1 Suunnittelun lähtökohdat

Työn tarkoitus on tuottaa konseptitodistus idean pohjalta. Projektin suunnitteluun voi käyttää olemassa olevia komponentteja ja piirejä, mutta myös uusia voi suunnitella, riippuen kumpi on järkevämpää ajallisesti ja kustannusten kannalta. Projektin alussa ei ollut tarkempaa tietoa soveltuvista osista tai järjestelmäpiireistä, joten suunnittelu tuli aloittaa kattavalla kirjallisuuskatsauksella vastaavatyypisiin tutkimuksiin ja projekteihin, sekä suorittamalla omia testejä pietsoantureiden kanssa.

4.1.1 Proof of concept

Proof of concept eli konseptitodistus pyrkii näyttämään, onko jokin idea toteuttamiskelpoinen (19). Työn tarkoituksena oli siis todistaa, että tämänkaltainen järjestelmä on mahdollista tuottaa. Järjestelmän luonteesta johtuen, valmistuu konseptitodistuksen yhteydessä myös prototyyppi, jotta mittaukset voidaan todentaa oikeassa käyttöympäristössä, eikä vain kirjallisena todistuksena. Konseptitodistukseksi riittää oskilloskoopilla mitatut tulokset neljän anturin tuottamista aikaeroista, eli käytössä tulee olla vähintään nelikanavainen oskilloskooppi. Jos järjestelmä kykenee tuottamaan pietsoantureilta lähtevistä signaaleista loogiseksi 1:ksi ja 0:ksi luettavia signaaleita (TTL signaali), kykenee FPGA-piiri mittaamaan ja tuottamaan tulosteen niiden välisistä aikaeroista sopivalla laitteistokuvauskielellä tehdyllä IP-lohkolla ja sitä käyttävällä Pythonilla tai vastaavalla korkeamman tason ohjelmointikielellä kirjoitetulla ohjelmalla.

4.2 Käytettävä värähtelyalusta, oskilloskooppi ja ensitestit

Konseptitodistusta varten testit tehtiin eri kokoisilla teräslevyllä (Liite 2). Varsinaiset konseptitodistuksen jälkeiset testit tullaan tekemään lopulliseen käyttötarkoitukseen paremmin soveltuvilla teräslevyillä, mutta näiden käyttö tulee vaatimaan jo piirin uudelleen kalibrointia, sillä värähtely vaimenee huomattavasti matkatessaan teräslevyllä. Lopulliseen järjestelmän käyttötarkoitukseen tulee myös sisältymään muita mittaukseen vaikuttavia ominaisuuksia, mutta näiden käsittely rajataan tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

Värähtelyn etenemisnopeutta levyllä testattiin asettamalla identtisiä pietsoantureita samalla kiinnitystavalla levyn pintaan 50 mm välein eri suuntiin kuvan 22 mukaisesti. Levyn keskelle iskettiin terävällä lyöntituurnalla ja pietsojen lähtösignaali mitattiin oskilloskoopilla. Oskilloskoopin ruudulle piirretty signaalin jänniteamplitudi Y-akselille ja aika X-akselille. Alun ensimmäisten testien aikana ei ollut vielä tiedossa tarvetta vahvistimelle, joten testit jouduttiin suorittamaan useasti luotettavan keskiarvon saamiseksi. Testaaminen aloitettiin kahdella anturilla kerrallaan. Lähimpänä levyn keskipistettä oleva pietsoanturi pidettiin joka testin aikana oskilloskoopin mittauksen käynnistyskanavana (engl. trigger channel) ja toiselle testikanavalle vaihdeltiin eri etäisyyksillä olevia pietsoantureita.



Kuva 22. Testialusta ja pietsoantureita.

Mittaukset suoritettiin nelikanavaisella digitaalioskilloskoopilla, PicoScope 5444D MSO:lla. Kuvassa 23 esitellyssä 5444D:ssä on neljä kanavaa, 200 MHz kaistanleveys ja se kykenee näyttämään jopa 1,75 ns:ssa nousevan reunan signaalista. Oskilloskoopista löytyy myös 16 digitaalista kanavaa MSO-liittimen muodossa. PicoScopen mittapäät kytetään muiden oskilloskoopien tapaan BNC-liittimiä käyttäen oskilloskoopin kanaviin A, B, C ja D.



Kuva 23. PicoScope 5444D MSO digitaalinen oskilloskooppi.

Oskilloskooppi kytketään tietokoneeseen USB 3-liittimellä ja sitä käytetään tietokoneelle asennetun PicoScope 6-ohjelmistolla. Oskilloskoopin virransyöttö tapahtuu erillisen muuntajan tai USB 3-liittimen välityksellä. Vain USB 3-liitintä käyttäessä osa oskilloskoopin toiminnoista on rajoitettu, esimerkiksi resoluutio on pienempi ja vain kaksi neljästä kanavasta on käytettävissä. PicoScope 6-ohjelmiston avulla oskilloskoopin asetuksia voidaan muuttaa helposti ja nopeasti, esimerkiksi kanavia voidaan ottaa tai poistaa käytöstä, kanavien herkkyksiä voidaan muuttaa tai käynnistää oskilloskoopin oma signaaligeneraattori (20). PicoScope 6-ohjelmiston päätoiminnot on esitelty kuvassa 24. Digitaalisen oskilloskoopin sijaan olisi mahdollista käyttää perinteisempää analogista oskilloskooppia, mutta tällöin mittauksen tarkkuus saattaisi kärsiä tulosten tulkinnanvaraisuudesta johtuen.

PicoScope 6 software

The display can be as simple or as advanced as you need. Begin with a single view of one channel, and then expand the display to include any number of live channels, math channels and reference waveforms.

Tools: Including serial decoding, reference channels, macro recorder, alarms, mask limit testing and math channels.

Waveform replay tools: PicoScope 6 automatically records up to 10,000 of the most recent waveforms. You can quickly scan through to look for intermittent events, or use the **Buffer Navigator** to search visually.

Zoom and pan tools: PicoScope 6 allows a zoom factor of several million, which is necessary when working with the deep memory of the 5000D Series scopes.

Signal generator: Generates standard signals or arbitrary waveforms. Includes frequency sweep mode.

Ruler legend: Absolute and differential ruler measurements are listed here.

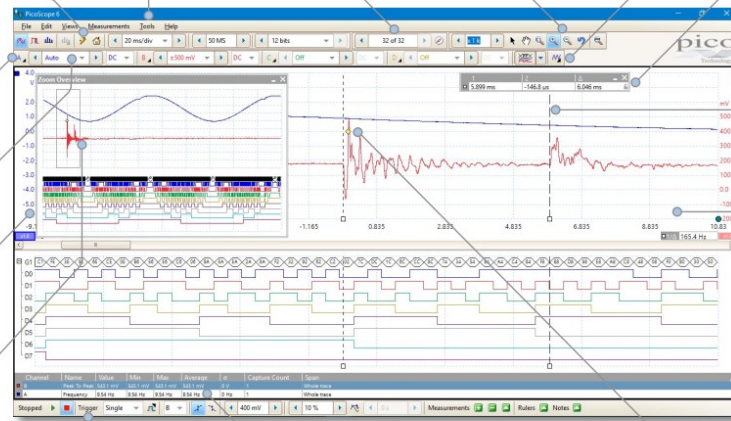
Auto setup button: Configures the collection time and voltage range for clear display of signals.

Channel options: Filtering, offset, resolution enhancement, custom probes and more.

Oscilloscope controls: Controls such as voltage range, scope resolution, channel enable, timebase and memory depth.

Movable axes: The vertical axes can be dragged up and down. This feature is particularly useful when one waveform is obscuring another. There's also an **Auto Arrange Axes** command.

Zoom overview: Click and drag for quick navigation in zoomed views.



Trigger toolbar: Quick access to main controls, with advanced triggers in a pop-up window.

Automatic measurements: Display calculated measurements for troubleshooting and analysis. You can add as many measurements as you need on each view. Each measurement includes statistical parameters showing its variability.

Trigger marker: Drag the yellow diamond to adjust trigger level and pre-trigger time.

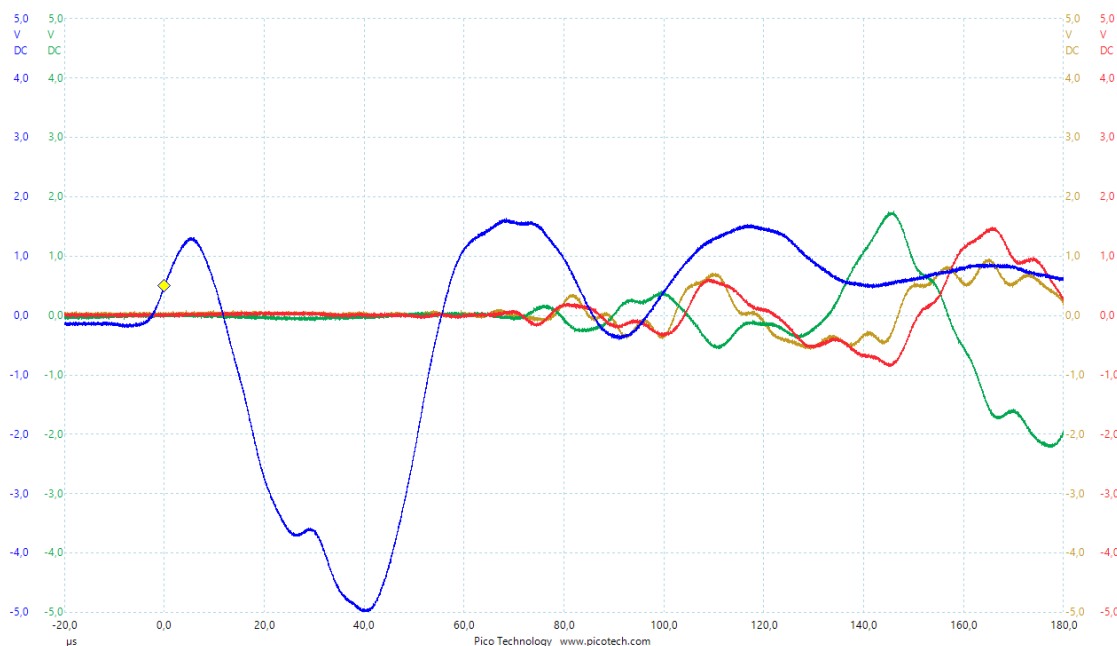
Rulers: Each axis has two rulers that can be dragged across the screen to make quick measurements of amplitude, time and frequency.

Views: PicoScope 6 is carefully designed to make the best use of the display area. You can add new scope, spectrum and XY views with automatic or custom layouts.

PicoScope® 5000D Series oscilloscopes

Kuva 24. PicoScope 6 ohjelmisto (17).

Testien dokumentointi on huomattavasti helpompaa digitaalisen oskilloskoopin kanssa, testitulosten tallentuessa kuvatiedostoina suoraan tietokoneen kiintolevyille kuvan 25 mukaisesti. Digitaalisen oskilloskoopin heikkoutena pidettiin mahdollisuutta ohjelmiston kaatumiseen kesken mittaustoimenpiteiden ja täten mittaustulosten tuhoutumisen tai korruptoitumisen. Tällaiset kaatumiset olivat työn aikana erittäin harvinaisia, eivätkä ne aiheuttaneet työn etenemisen kannalta ongelmia.

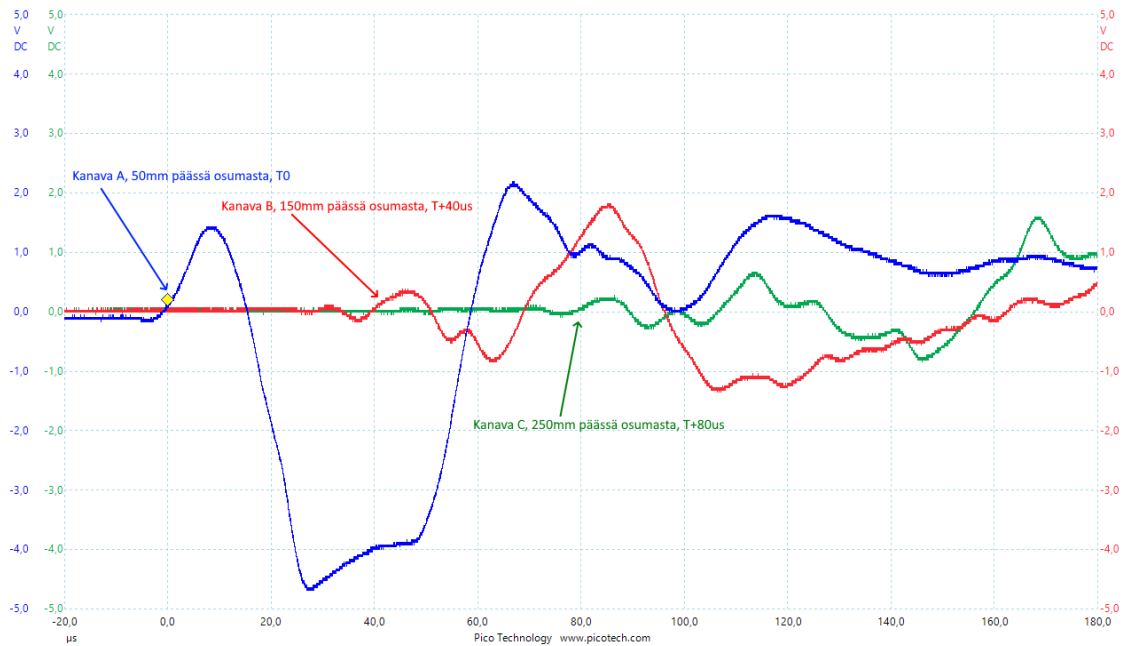


Kuva 25. PicoScope 6-ohjelmistosta tallennettu kuvatiedosto mittauksista.

4.3 Vahvistinpiiri

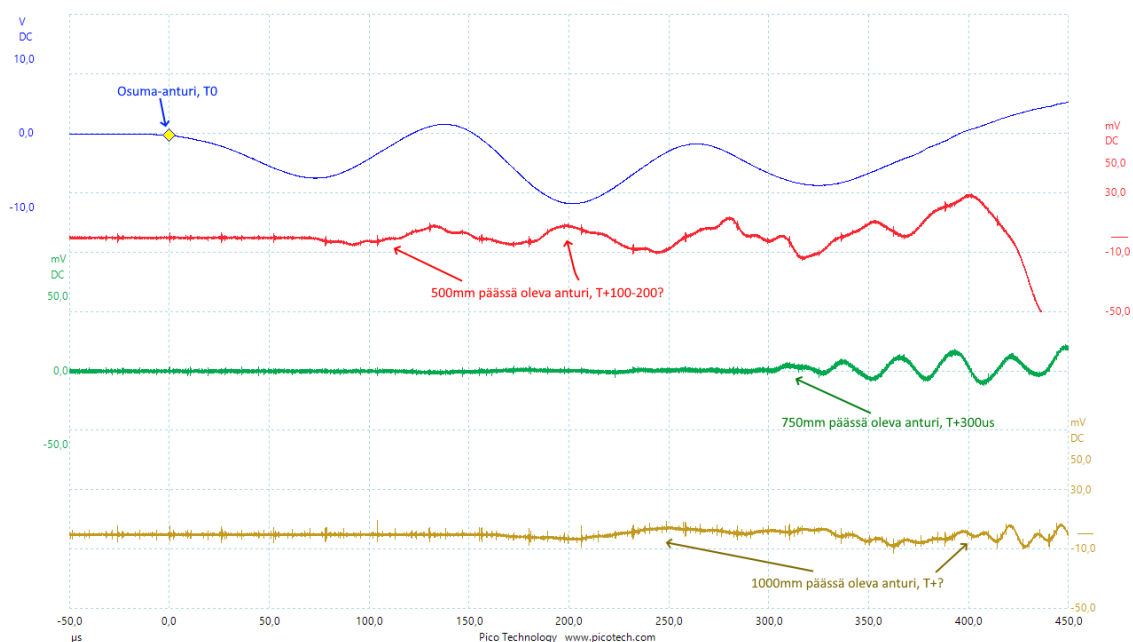
Ensimmäisten testien perusteella ja kirjallisuuskatsauksen aikana selvisi, että pietsoantureiden tuottamaa signaalia tulee vahvistaa erillisellä vahvistinpiirillä. Anturit tuottavat amplitudiltaan sadoista millivolteista aina kymmeneen volttiin yltävää jännitettä. Etäisyyden kasvaessa lyönnin aiheuttama värähtely vaimenee levyssä kuitenkin hyvin nopeasti, joten anturilta lähtevä signaali saattaa olla amplitudiltaan pieni. Järjestelmän luotettava ja tarkka toiminta vaatii vähintään neljä erillistä signaalia isku kohden ja isku saattaa sijaita kaukana tietystä anturista, joten vahvistus tulee olla tarpeeksi suuri heikkojen signaalien luotettavan vastaanottamisen mahdollistamiseksi.

Kuvassa 26 on esitetty ensimmäisissä testeissä ilmenneet ongelmat pietsoantureiden tuottaman jänniteamplitudin kanssa. Pietsoantureilta tulevien signaalien taso vaihtelee suuresti ja ensimmäinen signaalin reuna saattaa olla joko positiivinen tai negatiivinen. Kuvan 26 mittausten perusteella ei voitaisi luotettavasti todeta missä vaiheessa esimerkiksi kanavan C (vihreä) ensimmäinen reuna sijaitsee, sillä signaalin aaltokuvio näyttäisi ensin lähtevän lievästi negatiiviseen suuntaan ja sen jälkeen nousevan hieman vahvemmin positiiviseen suuntaan.



Kuva 26. Alun testien kolmen kanavan vahvistamattomat signaalit kolmelta eri pietsoanturilta.

Kuvassa 27 antureiden mittauspisteet sijaitsivat huomattavasti kauempana ja mitatuista amplitudeista huomaa selvästi värähtelyn ja täten antureiden tuottaman jänniteamplitudin heikkenemisen etäisyyden kasvaessa. Anturit sijaitsivat 500 – 1000 mm etäisyydellä lyöntituurnalla tehdystä iskusta levyn pintaan. Anturi kanavalla A sijaitsi suoraan lyöntipisteen vieressä, kanavien B, C ja D skaala piti pudottaa ± 50 mV tasolle, jotta signaalien etureunat saatiin edes näkyviin. Signaalitasot ensimmäisten reunojen kohdalla olivat vain joitakin millivolteja. Tämä signaali on kyettävä vahvistamaan ja tasasuuntaamaan vähintään + 2 V tasolle, jotta järjestelmä kykenee tunnistamaan sen tilaksi loogisen 1:n.



Kuva 27. Pietsoantureiden tuottama jänniteamplitudi oskilloskoopilla mitattuna 500 - 1000 mm etäisyydeltä iskusta.

Vahvistimen kannalta olennaisimmat ominaisuudet ovat suuri vahvistus, vahvistimen lähtöjännitteen suuri muutosnopeus ja palautumiskyky. Työn alkuvaiheessa pyrittiin tuottamaan vahvistettu, mutta jänniteamplitudiltaan rajattu analoginen signaali, jonka mittaus olisi tapahtunut suoraan mikrokontrollerin tai FPGA-piirin analogisen sisääntulon kautta. Signaali oli tarkoitus biasoida noin puoliväliin maksimijännitettä ja ohjelmallisesti tästä niin sanotusta perustasosta poikkeava ensimmäinen signaali olisi tallennettu nolla-ajaksi. Nolla-aikaa vasten olisi verrattu kolmea seuraavaa erillisiin kanaviin saapuvaa signaalia ja aikaerotukset olisi tulostettu järjestelmästä ulos. Mittausten edetessä huomattiin, että analogisignaalien mittaaminen suoraan käytettävissä olevilla komponenteilla tarvittavalla nopeudella olisi erittäin hankalaa. Mikrokontrollereiden käyttö osoittautui jo heti alussa hankalaksi niiden syntaksin hitauden takia. FPGA-piiriksi valikoituneen ZynQ-Z2 analoginen sisääntulo on rajoitettu maksimissaan ± 1 V:iin. Tämä taas asettaa suuria vaatimuksia sisään tulevan signaalin amplitudin tasaisuudelle, jota ei pietsoantureiden kanssa voida helposti taata. Vahvistinpiirin suunnittelussa päädyttiin yksinkertaisemman rakenteen takia jännitevahvistinpiiriin, vaikka olemassa olevien tutkimusten ja kirjallisuuden perusteella varausvahvistin olisi saattanut olla häiriöherkkyyden kannalta helpompi toteuttaa. Varausvahvistimen tuottama signaali ei kärsi yhtä herkästi signaalin siirtotien häiriöistä tai piirin muutoksista, kuin jännitevahvistin. Jännitevahvistus kyetään kuitenkin tuottamaan tuomalla jännitevahvistuspiiri pietsoanturin viereen. Vahvistimen

lähtöjännite siirretään jatkokäsittelyyn käyttäen suojattua parikaapelia. Vahvistinpiirin operaatiovahvistimeksi valikoitui TLV277X-sarja, joita tilattiin mittauksia varten useaa eri mallia, yksikanavaisesta aina nelikanavaiseseen malliin asti.

4.3.1 Vahvistinpiirin suunnittelu

Pietsosähköisten antureiden vahvistimina käytetään yleensä joko jännite- tai varausvahvistinmallia, joiden tarkemmat toimintaperiaatteet ja ominaisuudet on esitelty kappaleessa 2.2. Käytettäessä operaatiovahvistinta pietsosähköisen anturin kanssa, tulisi sen ominaisuuksiin kuulua muun muassa nopea SR. Jännitevahvistinmallissa operaatiovahvistimen sisääntulo (engl. input) tulisi olla korkeaimpedanssinen ja lähtö (engl. output) matalaimpedanssinen. Tämä johtuu siitä, että jännitevahvistimen tarkoituksena on vahvistaa jännitettä haluttu määrä. Toiminta perustuu jänniteenjakooppiiriin, jossa jännite U jakautuu kaavojen

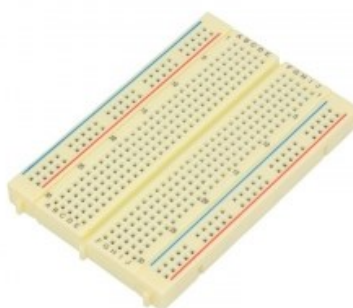
$$U = Z * I \text{ ja}$$

$$U = R * I$$

mukaisesti eniten sinne, missä on suurin impedanssi Z tai resistanssi R , kaavassa I on virta.

Sisääntulossa halutaan suurimman osan signaalin jännitteestä jakautuvan vahvistimelle, joten korkea impedanssi on haluttu tilanne. Ulos lähtiessä vahvistetun jännitesignaalin halutaan päätyvän kuormaan, eli käyttökohteelle, jolloin ulostulon halutaan olevan impedanssiltaan matala. TLV277X-sarjan operaatiovahvistimet ovat ominaisuuksiltaan sopivia tämän tyyppiseen käyttöön, sillä niiden SR on tyypillisesti noin $10,5 \text{ V} / \mu\text{s}$ ja niissä on korkea sisääntulon impedanssi. Lisäksi TLV277X-sarjan vahvistimet ovat lähdön osalta RRO-mallia (Rail-to-rail output), eli ne kykenevät tuottamaan lähtöjännitteen puhtaana, ilman suuria vääristymiä. Vahvistin suunniteltiin ensin käyttäen Texas Instrumentin Tina-Ti-simulaatio-ohjelmaa. Tina-Ti on SPICE-pohjainen (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) analogisten piirien suunnitteluun tarkoitettu ohjelmisto. Ohjelmisto on avoimeen lähdekoodiin perustuva ja se sisältää kaikki tässä työssä tarvittavat tärkeimmät analyysit piirisuunnittelun kannalta, kuten transientti- ja DC-analyysit. Kaikkia komponentteja ei löydy valmiina ohjelmistosta, kuten esimerkiksi TLV-2772-operaatiovahvistinta, mutta usein niistä löytyy SPICE-malli valmiina ja ne pystytään lisäämään Tina-Ti:n komponenttikirjastoon manuaalisesti. Vahvistinpiirin pohjana käytettiin TI:n

raportista (10) löytyvää jännitevahvistimen mallia, jota soveltamalla saatiin vahvistinpiiristä tähän työhön sopiva versio. Tina-Ti:llä komponentit voi kytkeä toisiinsa ja niille voidaan asettaa tosimaailmaa kuvaavia arvoja, kuten sisäisiä resistansseja tai impedansseja. Simulaation perusteella kasattiin kuvan 28 mukaiselle koekytkentälevylle vahvistinpiiri oikeilla komponenteilla tehtäviä testejä varten. Simulaatiossa testattiin DC analyysi, eli piirin pisteistä löytyvät muuttumattomat jännitteet, kun vahvistin on valmiustilassa. Lisäksi testattiin transienttianalyysi, eli miten signaali muuttuu esiasetetuissa mittauspisteissä tietyn ajan sisällä. Sisään tuleva signaali asetettiin vastaamaan pietsoanturilta lähtevää korkeaimpedanssista signaalia ja haluttu tieto oli vahvistinpiirin lähtöjännitteen vaste.

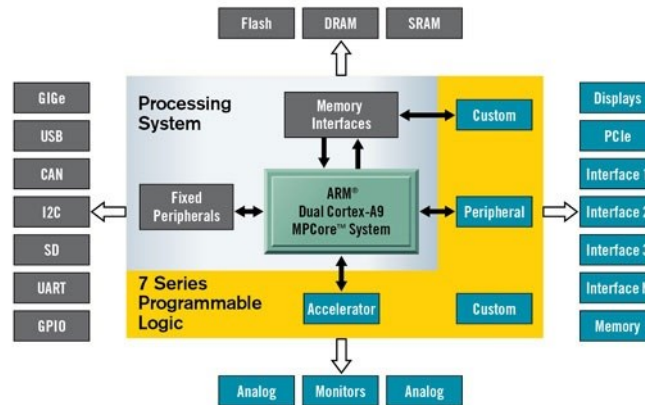


Kuva 28. Koekytkentälevy.

Vahvistinpiirejä testatessa kävi selväksi, että koekytkentälevy itsessään aiheuttaa jo ongelmia, joita käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.2.

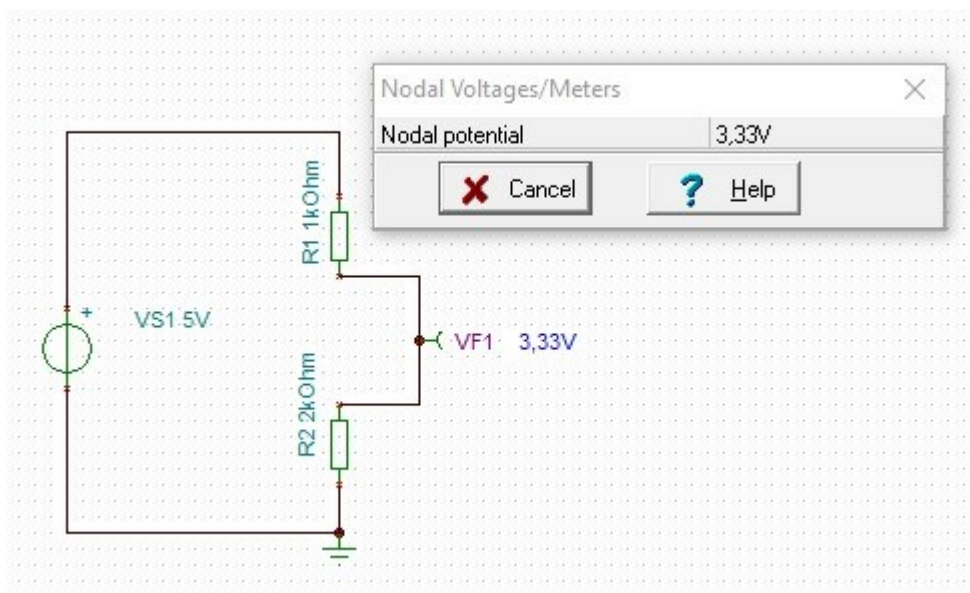
4.4 FPGA-piiri

FPGA-piirin olennaisimmat ominaisuudet ovat vähintään neljä digitaalista sisääntuloa ja tarpeeksi tarkan resoluution mahdollistava prosessorin nopeus. Sopivaksi piiriksi valikoitui kappaleessa 2.3 esitelty TUL PynQ-Z2 System on a chip (SOC), joka perustuu Xilinx ZynQ-järjestelmäpiirille. PynQ-Z2:n prosessori on kaksiytiminen Cortex-A9, jonka kellotaajuus on 650 MHz. Tätä prosessoria ja kiinteitä oheislaitteita, sekä muistirajapintaa kutsutaan nimellä Processing System (PS). PS:ään on integroitu FPGA-sidos Programmable Logic (PL). Näiden lohkojen toiminta ja karkea yhteenliittyminen on esitelty kuvassa 29.



Kuva 29. Zynq lohkodiagrammi (16).

PynQ-Z2 digitaalisen sisääntulon jännitteen maksimiampplitudi on kappaleen 3.3.2 mukaisesti +3,4 V (absoluuttinen maksimi +3,75 V) ja suunnitellussa vahvistinpiirissä lähtöjännite on rajoitettu +5 V:iin, joten ennen FPGA-piiriin syöttämistä, pitää jännitettä rajoittaa vielä esimerkiksi kuvan 30 mukaisella jännitteenjakopiirillä. Jännitteenjakopiirissä osa syöttöjännitteestä (5 V) jää vastukselle $R1$ ja osa vastukselle $R2$. Digitaalisen sisääntulon jännite otetaan näiden vastusten väliltä, jolloin jännite on sama kuin vastuksen $R2$ ylitse vaikuttava jännite, esimerkissä 3,33 V.

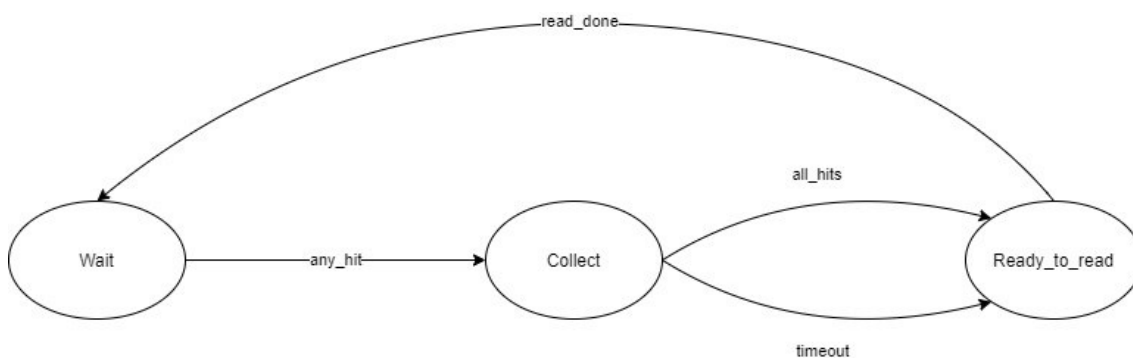


Kuva 30. Jännitteenjakopiiri.

Nopeaa mittausta varten tulisi FPGA:lle kirjoittaa VHDL:llä oma IP-lohko. Suunniteltu lohko liitettäisiin olemassa olevaan PynQ-Z2 Base Overlay-pohjaan, jolloin sitä voitaisiin

käyttää suoraan esimerkiksi Jupyter Notebooks-ympäristön avulla Python-ohjelmointikieltä käyttäen. Tällaisen toteutuksen pohjana toimii vaatimusmäärittelyt, eli mikrosekuntien erotuksella saapuvien digitaalisten signaalien välisten aikaerojen mittausta ja tulostusta.

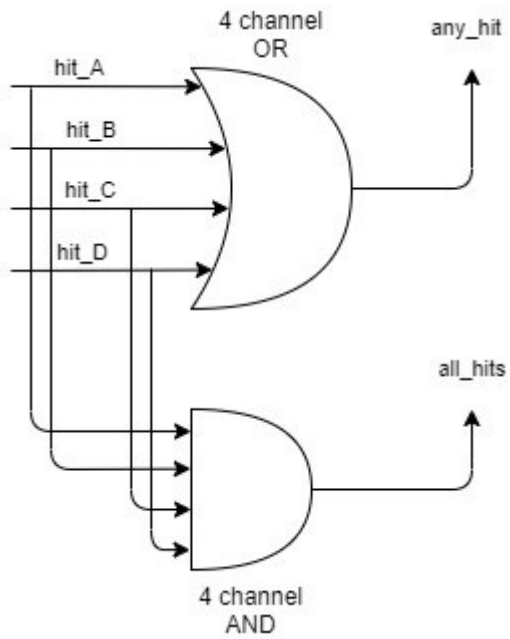
IP-lohko toimii kuvan 31 mukaisena tilakoneena (engl. state machine), joka on lepotilassa (*Wait*), kunnes johonkin neljästä sisääntulosta saapuu signaali (*any_hit*). Tämän jälkeen tilakone siirtyy tilaan, jossa se pyrkii keräämään kolme seuraavaa eri kanaviin saapuvaa signaalia (*Collect*). Tilakone siirtyy seuraavaan tilaan vasta, kun se on saanut yhteensä neljä signaalia eri kanavista (*all_hits*) tai ennalta määritelty aika on kulunut umpeen (*timeout*). Ennalta määritellyn ajan määräytymisen periaate on esitelty kappaleessa 3.1. Tilakoneen seuraavassa tilassa (*Ready_to_read*) tilakone ilmoittaa olevansa valmis antamaan mitatut aikaerot ensimmäisenä saapuneen signaalin määrittämännolla-ajasta. Tämä on signaali Pythonilla kirjoitetulle ohjelmalle, että järjestelmässä on tiedot valmiina, jolloin ohjelma lukee tilakoneen tuottamat tiedot ja jatkokäsittelee ne halutulla tavalla, esimerkiksi tulostamalla ne erilliseen tekstitiedostoon. Tilakone siirtyy tietojen luvun jälkeen (*read_done*) takaisin lepotilaan, odottamaan seuraavia signaaleita. Tilakoneelle tulee määrittää luvun 3.1 mukaisesti erillisten mittausten välinen aika. Tällöin levyllä värähtelevä signaali tulee heiketä niin paljon, ettei se aiheuta vahingossa uutta mittausta, vaikka kyseessä olisi tällöin edelleen sama, jo kertaalleen mitattu isku.



Kuva 31. Tilakone FPGA-mittauspiirille.

Tilakone esittelee IP-lohkon toimintaperiaatteen. Tarkemmin lohkon toiminta määräytyy rekistereitä muokkaavien logiikkaporttien yhdistelmien avulla. Esimerkiksi kuvan 32 mukainen iskuilmaisin voidaan rakentaa AND- ja OR-porttien avulla. Tässä iskuilmaisimessa käytetään neljää digitaalista kanavaa (A-D), jolloin mikä tahansa näistä kanavista laukaisee nelikanavaisen OR-portin kautta toiminnon *any_hit*, joka aloittaa tilakoneessa väliaikojen keräämisen. Kun jokaisesta kanavasta on kertaalleen tullut ainakin

yksi signaali, laukaistaan toiminto *all_hits*, joka kertoo tilakoneelle, että tulos on valmiina luettavaksi.

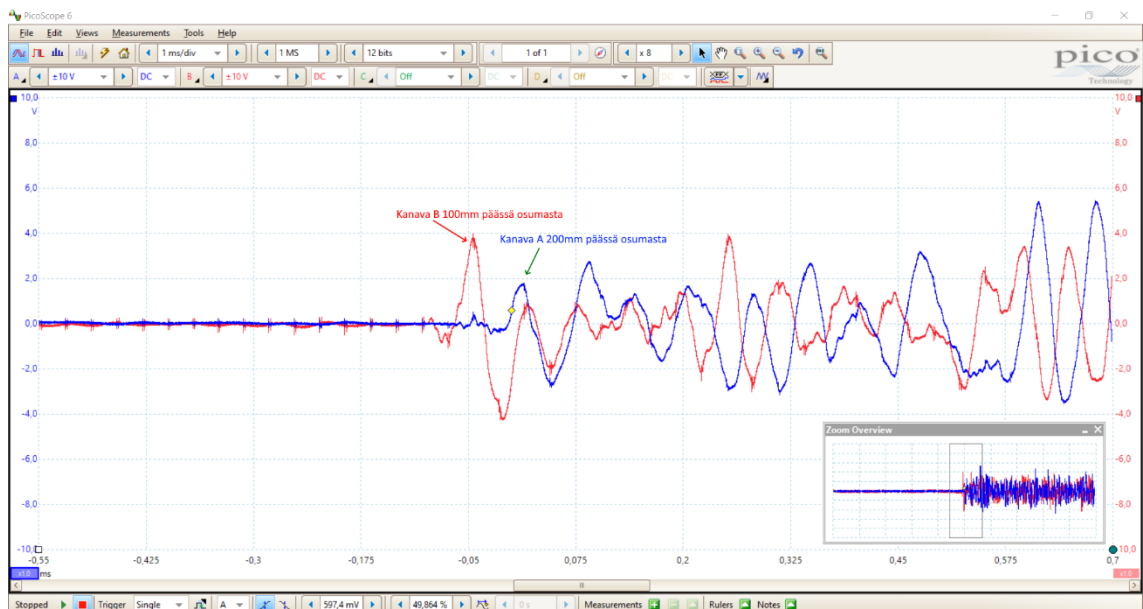


Kuva 32. Logiikkaportteihin perustuva nelikanavainen iskuilmaisin.

5 MITTAUKSET, TESTAUS JA VAHVISTINPIIRIN KEHITYS

5.1 Alkumittaukset

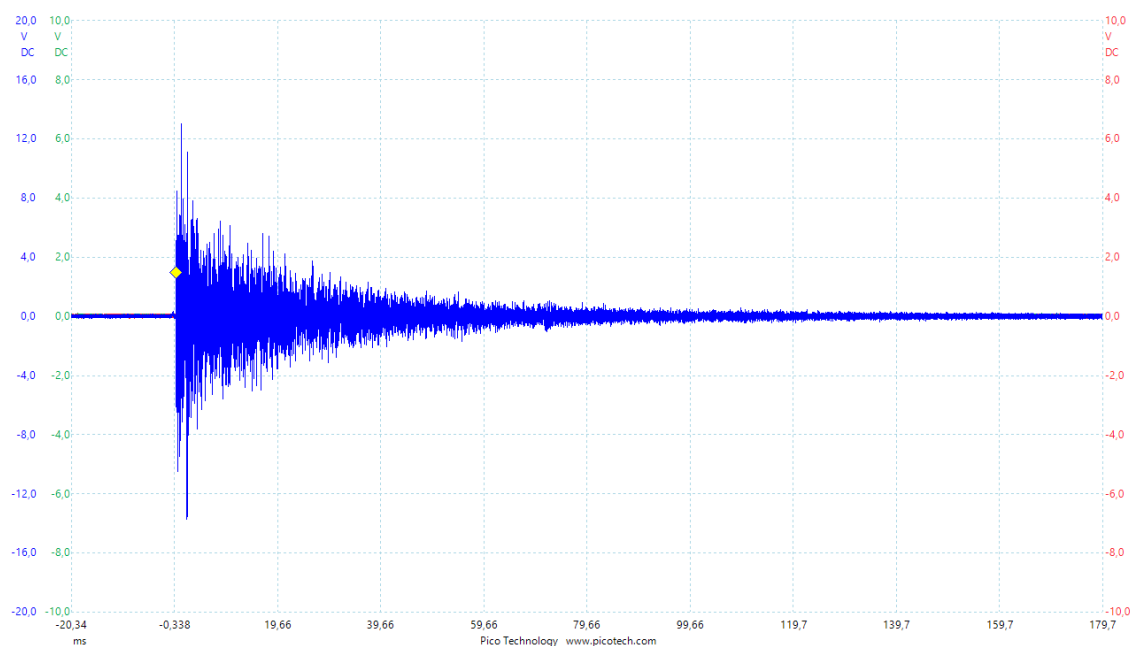
Projektin aluksi mitattiin suoraan oskilloskoopilla metallilevyyn kiinnitettyjen pietsosähköisten antureiden tuottamaa jännitettä, lyömällä levyä vasaralla ja myöhemmin erilaisilla lyöntituurnilla. Kuvissa 33 ja 34 nähtävien ensitestien tulosten perusteella anturit kykenevät tuottamaan jopa ± 20 V jännitteitä.



Kuva 33. Pietsosähköisten antureiden ensitestien tulos PicoScope 6-ohjelmistolla.

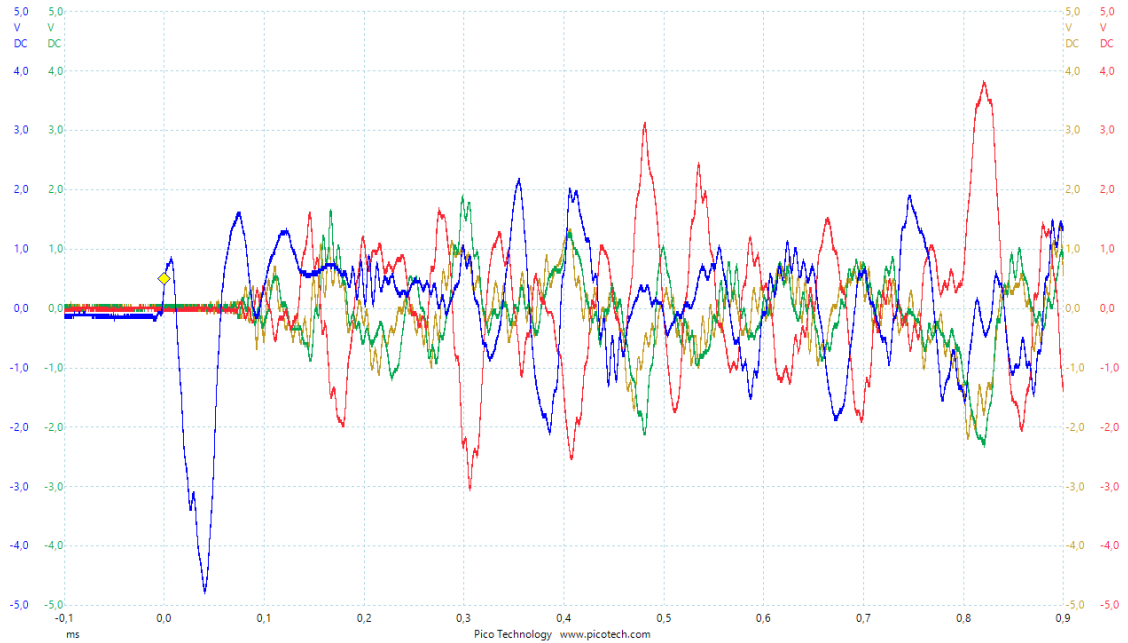
Ensimmäisten testien perusteella huomattiin, että anturit tuottavat sinisignaaleja eri amplitudeilla ja vaihtelevalla taajuudella. Testeissä saatiin arvioitua fyysisen värähtelyn etenemisnopeudeksi kyseisellä levyllä noin $2,5 \text{ mm}/\mu\text{s}$. Tästä ja järjestelmävaatimuksista johtuen järjestelmän resoluutioksi määriteltiin mikrosekuntiluokan erottelukyky eri signaalien välillä. Värähtelyn kesto levyllä oli eräs mielenkiinnon kohde, sillä se määrittelee myös osaltaan sen, kuinka nopeilla väleillä voidaan erilliset iskut tunnistaa. Edellisen iskun värähtelyn levyllä tulee olla vaimentunut lähes kokonaan, jotta uusi isku voidaan tunnistaa. Kuvasta 34 on nähtävissä, että värähtelyn määrää vastaava jännite vaimenee pääasiassa viimeistään vaatimukseksi asetetun 150 ms jälkeen. Noin 100 ms jälkeen

jännitteen amplitudi on enää joitakin millivoltteja. Järjestelmän kalibrointia varten pitää kuitenkin mittaukset tehdä aina erikseen kyseisen levyn paksuudesta ja muista fyysisistä mitoista, sekä levyn kiinnityksestä johtuen, sillä eri kokoiset levy materiaalit värähtelevät eri ajan.



Kuva 34. Värähtelyn vaimentuminen levyllä.

Kuvasta 35 huomataan edellä mainittu signaalien suuri vaihtelu neljällä eri kanavalla. Mittauksia edeltäneissä levyyn tehtävien iskujen simuloinneissa huomattiin, että etenevät aallot osuvat joskus samalle kohdalle eri suunnasta tulevan aallon kanssa ja tapahtuu interferenssi, eli aallot summautuvat. Tämä interferenssi on käsitelty tarkemmin kapaleessa 3.1.

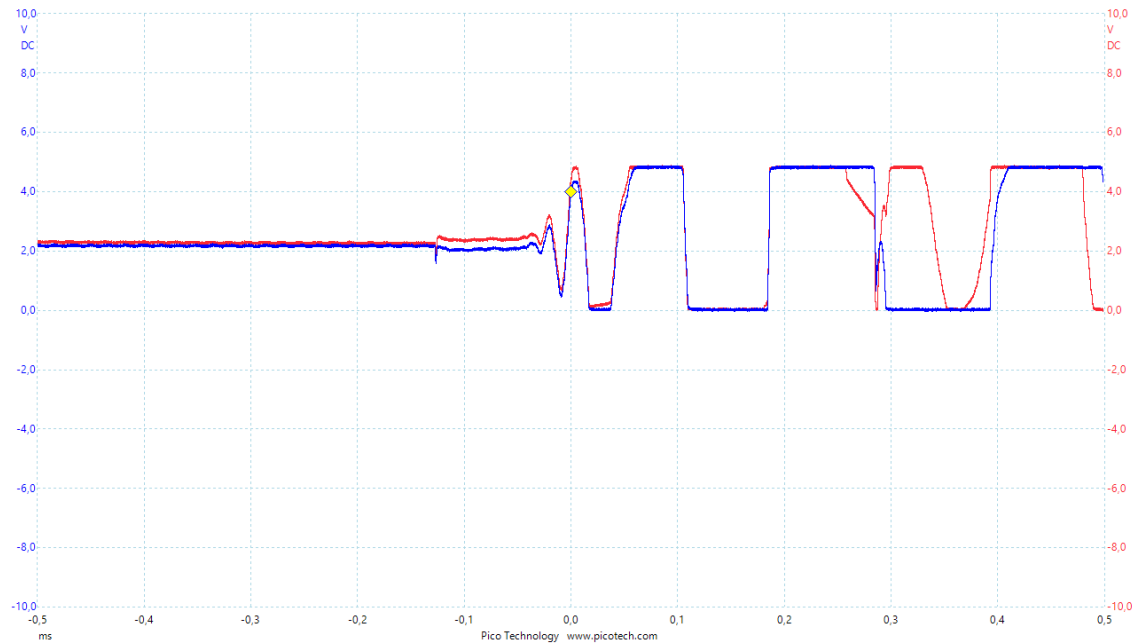


Kuva 35. Neljä eri signaalia oskilloskoopilla mitattuna.

5.2 Vahvistimen mittaus ja jatkokehitys

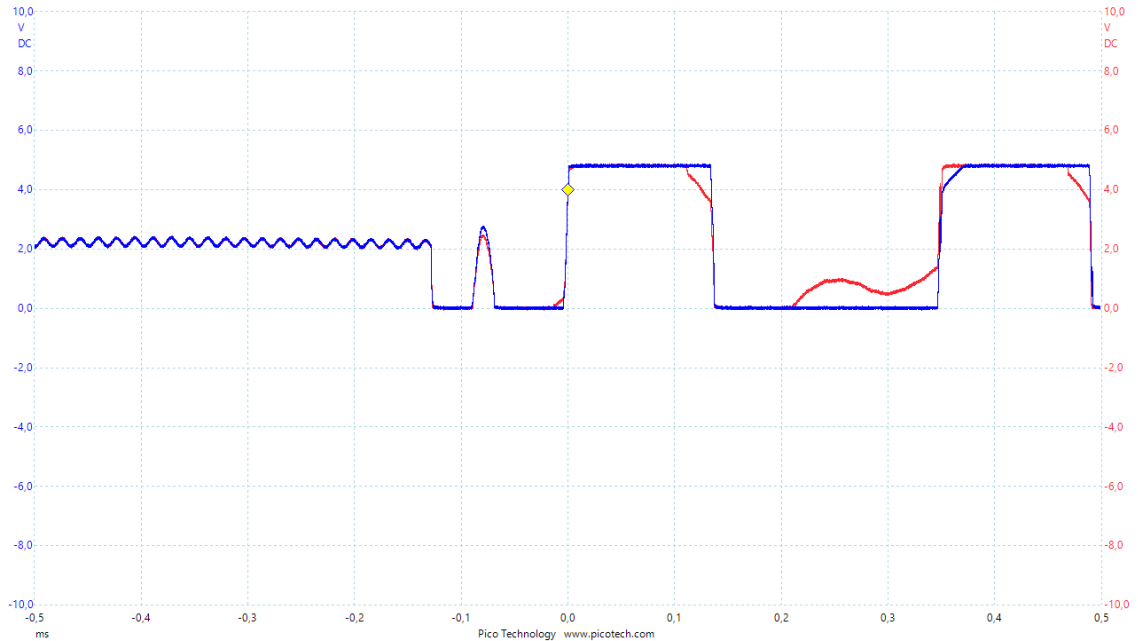
Ensimmäisten mittauspiirien prototyypin perusteella huomattiin, että pietsoantureilta lähtevä signaali kytkeytyy helposti muihin kaapeleihin tai vahvistimen toisiin kanaviin. Kuvassa 36 ja 37 näkyy kahden eri vahvistinpiirin oskilloskoopilla mitatut signaalit, joista huomataan kytkeytyminen. Sininen väri kuvastaa kanavan A kautta mitattavaa signaalia ja punainen väri kuvastaa kanavaa B. A-kanava on kolahdusta lähempänä ja signaalien saapumisajassa tulisi olla useita kymmeniä mikrosekunteja välissä, mutta kanavan

A signaali kytkeytyy joko kaapeloinnin, koekytentälevyn tai vahvistinpiirin kautta kanavaan B.



Kuva 36. Signaalin kytkeytyminen toiseen kanavaan.

Kuvassa 37 näkyy selvästi ensimmäisten vahvistinpiirien sähkönsyötön aiheuttama häiriö signaalin nolatasossa. Signaalin amplitudi ei pysy tasaisesti 2,5 V:ssa, vaan se tuottaa pientä sinisignaalia tason ympärille. Tämä johtuu käytetyn virtalähteen heikosta suodattuksesta ja asia ratkaistiin asettamalla vahvistinpiirin ja virtalähteen välille 22 μF elektrolyyttikondensaattori suodattamaan häiriöitä. Kondensaattori kytkettiin +5 V ja 0 V napojen välille piirilevyn päässä.



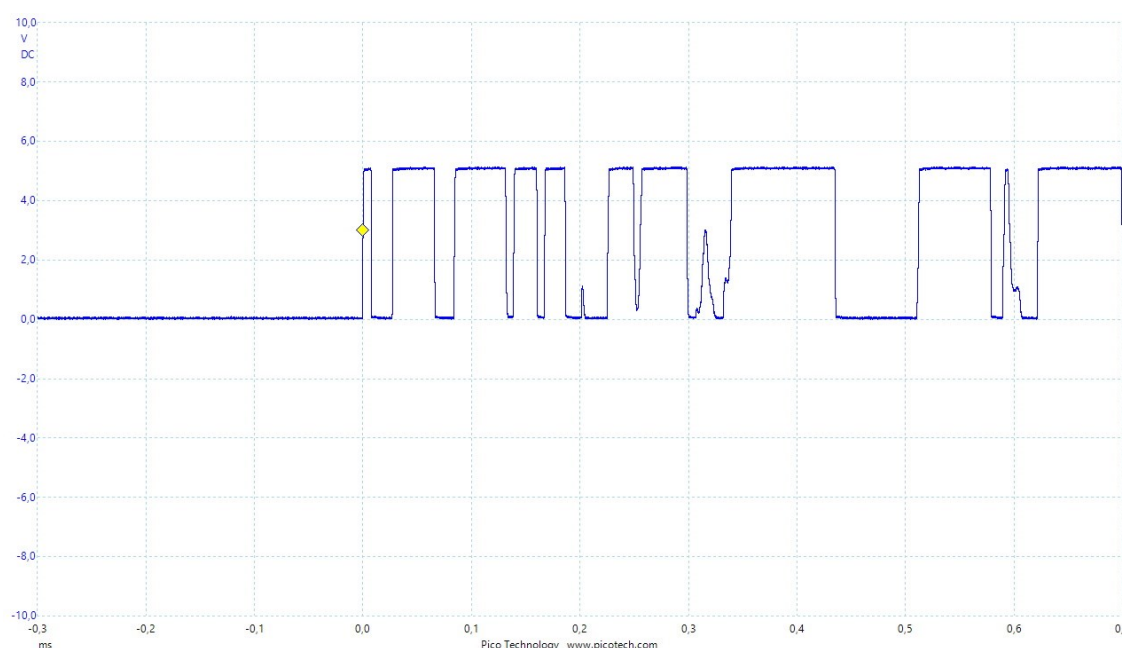
Kuva 37. Signaalin kytkeytyminen toiseen kanavaan ja syöttöjännitteen aiheuttama häiriö.

Alkumittaukset ensimmäisillä vahvistimilla osoittivat, että toimiva vahvistinpiiri vaatii useassa kohdassa häiriöitä ja kytkeytymistä vähentäviä toimenpiteitä. Tällaisiksi toimenpiteiksi valikoitui muun muassa piirin rakentaminen koekytkentälevyn sijaan niin sanotulle reikälevylle siten, että komponentit kolvattiin paikoilleen ja komponenttien kytkentäjalkojen pituudet pidettiin lyhyinä. Lisäksi pietsoantureilta levyllä yhdistettävät johtimet kierrettiin toistensa ympärille testiympäristön magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden kytkeytymisen estämiseksi. Antureiden johtimet pidettiin mahdollisimman lyhyinä ja vahvistinpiiri sijoitettiin noin 100 – 150 mm etäisyydelle anturista. Kytkeytymisen vähentämiseksi edelleen voidaan käyttää paremmin suojattua parikaapelia, kuten kappaleessa 2.2 esitettyä Cordial CMK 222-mikrofonikaapelia. Kaapelin kiertäminen ja suojaus estää häiriöiden siirtymistä molempiin suuntiin, sekä kaapeliin että kaapelista ulos. Testilevyn maadoitusta parannettiin lisäämällä useampi maadoitusjohdin eri levy kohtiin.

Ensimmäinen vahvistinpiiri todettiin myös epäsopivaksi, sillä sen vahvistusominaisuudet eivät olleet riittävät ja sen tuottama signaali ei huomionnut negatiiviseen suuntaan lähteviä jännitteitä ollenkaan. Piiriä parannettiin asiantuntijan konsultaation avulla, sekä jatkokehitettiin tasasuuntaus piiriin integroituna, jotta negatiiviseen suuntaan lähtevät jännitesignaalit saatiin indikoitua (21). Ensimmäisessä piirissä vahvistimen ulostulojännite biasoitiin 2,5 V tasalle vahvistimen odottaessa sisään tulevaa signaalia, kuten kuvasta 37 on nähtävissä. Jotta signaalia voidaan käyttää TTL-signaalina esimerkiksi FPGA-

piirissä, ei vahvistimelta tuleva referenssijännite voi ilman sisään tulevaa signaalia olla 2,5 V, vaan sen tulee olla alle kappaleen 3.3.2 mukaisesti 0 – 0,8 V. Tasasuuntauspiirin lisääminen vahvistinpiirin jälkeen ratkaisi tämän ongelman, kuten kuvasta 38 on huomattavissa.

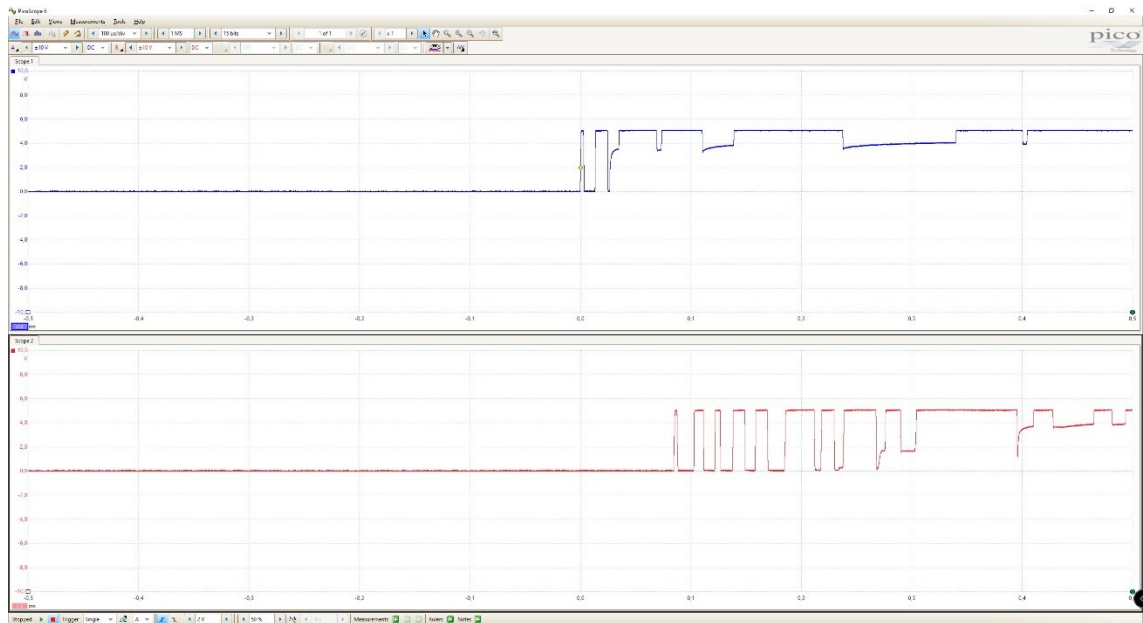
Liitteessä 3 esitelty jännitevahvistin muuttaa pietsoanturilta saatavan signaalin selkeämmäksi TTL-signaaliksi, jota on helpompi jatkokäsitellä ja eri signaalien väliset aikaerot ovat helposti luettavissa oskilloskoopilla. Kuvassa 38 on esitelty yhden pietsoanturin signaali jännitevahvistinpiirin jälkeen. Ensimmäinen nouseva reuna on lähes pystysuora, nousuaika on noin 1 μ s.



Kuva 38. Vahvistettu ja tasasuunnattu pietsoanturin tuottama signaali.

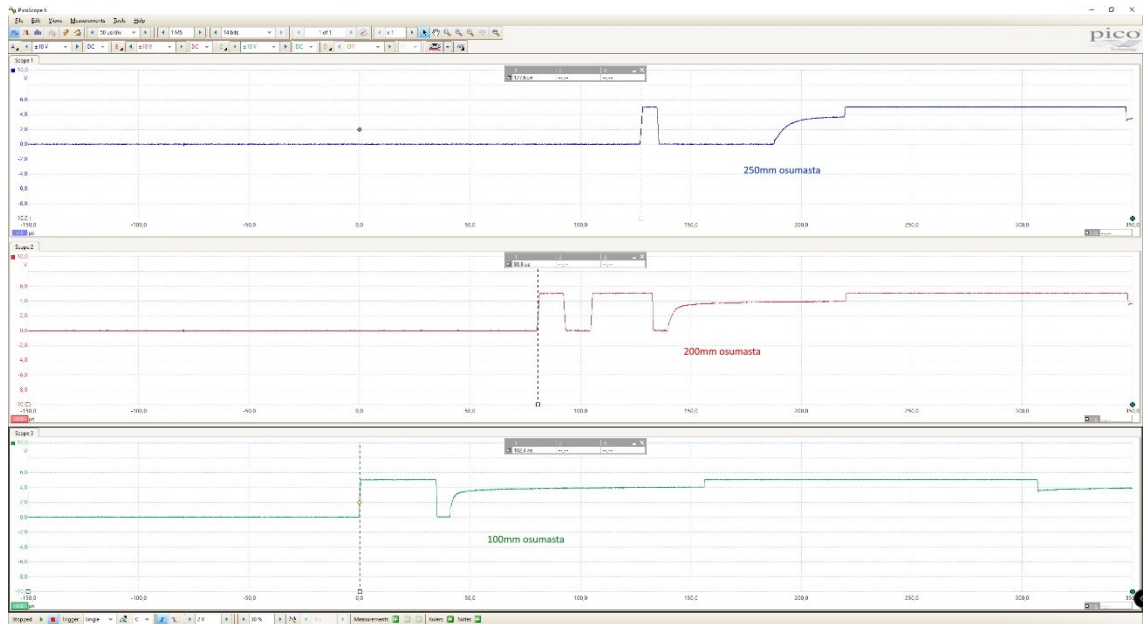
Kuvassa 38 esitetty testitulos yhdellä vahvistinpiirillä ei vielä näytä tapahtuuko useamman erillisen vahvistinpiirin kautta esimerkiksi signaalin kytkeytymistä vahvistimesta toiseen, joten vahvistinpiirejä tuli rakentaa useampi.

Kuvassa 39 on esitelty kahden erillisen vahvistinpiirin mittaustulos pietsoantureiden sijaitessa eri etäisyyksillä levyllä iskukohtaan nähden. Mittaustuloksen perusteella sinisellä merkitty kanava A ei kytkeydy punaisella merkittyyn kanavaan B ja molemmat kanavat toimivat itsenäisesti tuottaen indikaatiota vain niihin kytketyn pietsoanturin tuottamasta lähtöjännitteestä.



Kuva 39. Kahden pietsoanturin tuottamaa signaalia eri etäisyyksiltä iskuun nähden.

Testien luotettavuuden varmistamiseksi rakennettiin vielä kolmas vahvistinpiiri ja mitaukset tehtiin kolmella erillisellä pietsoanturilla ja jokaiseen erikseen kytketyllä vahvistinpiirillä. Kuvassa 40 on esitetty kolmen piirin tuottamat signaalit, joista on myös mitattavissa tarkemmin värähtelyn etenemisnopeus levyllä. Pietsoanturit sijaitsivat levyllä siten, että kanava C (vihreä) oli 100 mm, kanava B (punainen) 200 mm ja kanava A (sininen) 250 mm etäisyydellä iskukohdasta. Mittauksen perusteella värähtely eteni 100 mm matkan, eli C ja B välin noin 80 μs aikana ja 150 mm matkan, eli C ja A välin noin 127 μs aikana. Värähtely etenee testien perusteella noin 1 mm matkan 0,8 μs aikana, eli noin 1,25 mm/ μs . Tulos eroaa alkumittauksista huomattavasti, mikä saattaa indikoida sitä, että ilman vahvistusta jää signaaleista huomattava osa pois näkyvistä oskilloskoopilla mitattuna. Testit toistettiin useasti tulosten luotettavuuden varmentamiseksi, kuitenkin tarkemmin kontrolloituja testejä tulee suorittaa maksimaalisen tarkkuuden ja luotettavien referenssien saavuttamiseksi.



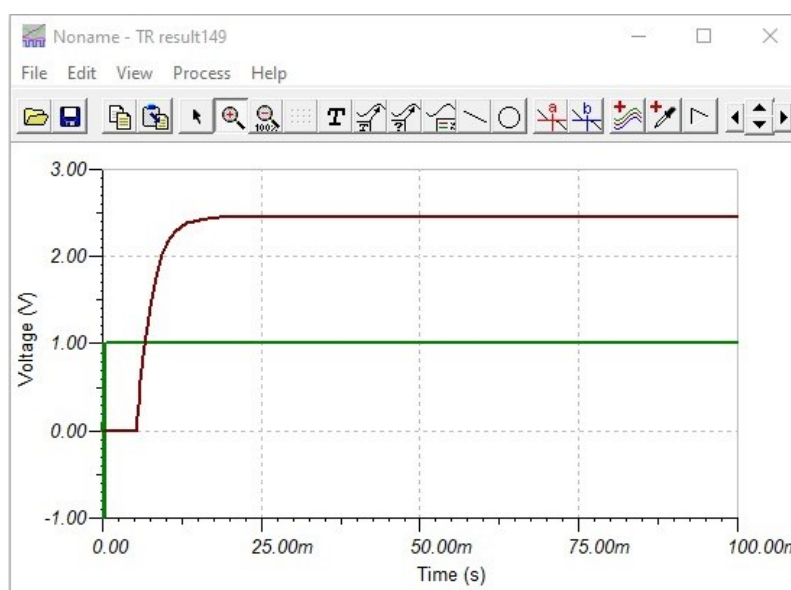
Kuva 40. Kolme eri pietsoanturia, noin. 100, 200 ja 250 mm päässä iskusta.

5.3 FPGA-piirillä tehtävät mittaukset

FPGA-piirillä oli tarkoitus käyttää vahvistinpiirin kautta tulevia signaaleita ja tulostaa signaalien väliset aikaerot Pythonilla kirjoitetun koodin avulla tekstitiedostoon. FPGA-piirin suunnittelu osoittautui huomattavasti haasteellisemmaksi ja se olisi vaatinut runsaasti lisää aikaa, joten se päätettiin siirtää toimeksiantajan kanssa yhteisymmärryksessä tämän työn ulkopuoliseksi tehtäväksi, sillä konseptitodistus voidaan toteuttaa alkuperäisen suunnitelman mukaisesti oskilloskoopilla tuotettujen tulosten avulla.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Konseptitodistuksen tarkoituksena on näyttää, onko jokin idea toteuttamiskelpoinen. Tässä työssä suoritettu konseptitodistus näytti, että värähtelyantureilla olisi mahdollista mitata iskun alkupiste jopa suhteellisen yksinkertaisillakin työkaluilla, kuten halvoilla piet-sosähköisillä antureilla, itse rakennetuilla vahvistimilla, sekä FPGA-piirillä. Värähtelyantureilla toteutettava paikannusjärjestelmä vaatii neljä erillistä anturia ja näiden tuottaman signaalin tarkkaa ja nopeaa mittausta värähtelyn saavuttaessa anturin. Vahvistinpiirinä pietsoanturin jännitevahvistin on yksinkertainen, mutta testien perusteella vikaherkkä. Vahvistin tulee suunnitella huolella, sekä simuloida käyttäen erilaisia parametreja, kuten pietsoanturin lähtöjännite ja sisäinen impedanssi. Simuloinneissa tulee ottaa huomioon esimerkiksi vahvistimen ”käynnistymisaika”, eli käytetyistä komponenteista johtuen saattaa vahvistimen lähtöjännite saavuttaa niin sanotun ”nollatason” vasta usean millisekunnin jälkeen. Transienttisimulaatiossa voidaan asettaa simulaation alku viivästetyksi, joka on suositeltava osa vianhakuprosessia, jos vahvistin ei käyttäydy tavoitellulla tavalla. Esimerkkinä yksi versio tässä työssä käytetystä jännitevahvistimesta nosti lähtöjännitteen $\frac{1}{2} \cdot V_{cc}$ eli biasjännitteen tasolle vasta noin 5 ms jälkeen simuloinnin aloituksesta. Kuvassa 41 näkyvä viive aiheutti aikavälille 0 – 1 ms ajoitetussa transienttisimulaatiossa virheellisiä tuloksia, vaikka tosiasiaassa 5 ms viive lähtöjännitteen tasoittumisessa ei aiheuttaisi ongelmia.



Kuva 41. Transienttisimulaatiossa näkyvä viive vahvistimen lähtöjännitteessä.

Kun simulaatio siirrettiin viivästetyksi, esimerkiksi aikavälille 24 – 25 ms, ei vastaavia ongelmia esiintynyt, sillä lähtöjännite oli ehtinyt tasaantumaan.

Simulointien ja mittausten edetessä vahvistinpiiriä muunneltiin useaan otteeseen, kunnes lopputuloksena saatiin järjestelmästä ulos tavoiteltu signaali. Vahvistinpiirin teoreettisessa suunnittelussa on vaikea ottaa huomioon kaikkia todellisen sovelluksen epäideaalisuuksia, kuten signaalin vuotamista tai kytkeytymistä toiseen kaapeliin. Nämä piirin heikkoudet tulee usein esiin vasta testatessa oikeassa testiympäristössä simuloinnin läpäisyyttä prototyyppiä. Kytkeytymistä tapahtuu useiden kanavien kautta, kuten kappaleessa 5 on todettu, joten vianhaku ei ole aina suoraviivaista tai yksinkertaista. Ongelmia saattaa samaan aikaan aiheuttaa useampi piirin osa ja ne kaikki tulee poistaa, jotta testeissä päästään etenemään. Suurimpia ongelmia näissä aiheuttavat puutteellinen maadoitus ja suodattimina toimivien kondensaattoreiden puuttuminen. Jännitevahvistimen lopullinen muoto onnistuu käyttäen yhtä vahvistinsirua, jos siinä on kaksi kanavaa käytettävissä. Kaksikanavaista vahvistinta käytettäessä säästetään komponenttien ja johtimien määrässä, joka taas vähentää vioille alttiita kohtia piirissä. Kaksikanavainen vahvistin toimii lopullisessa piirissä sekä vahvistimena että tasasuuntauspiirinä. Kaikki piirin komponentit mahtuvat 40 x 60 mm kokoiselle piirilevyille kolvattuna, mutta markkinoilla on myös valmiita mikroteknologiaa hyödyntäviä mikrosysteemejä (engl. Micro Electro Mechanical Systems, MEMS), joissa on yhdistetty elektroniikkaan esimerkiksi mekaanisia toimintoja. Nämä elektroniikan ja pietsoanturin sisältävät mikrosysteemit ovat kotoilu valmiiksi ja ne tuottavat suoraan sellaisenaan haluttua lähtöjännitettä. Valmiiden ja testattujen mikrosysteemien käyttö saattaa helpottaa varsinaisen paikannusjärjestelmän rakentamista. Valmiiden anturipiirien muokkaaminen jälkikäteen on haastavaa, joten valmistajilta tulisi löytyä juuri tähän käyttötarkoitukseen sopivilla parametreilla olevia laitteita.

Kappaleessa 5 esitetyt mittaustulokset tukevat idean toteuttamiskelpoisuutta. Kolmella vahvistimella suoritettavat testit osoittavat, että järjestelmästä on mahdollista tuottaa kolme erillistä TTL-signaalia. Neljäs vahvistinpiiri jäi osien tilapäisen puutteen vuoksi rakentamatta, mutta testituloksissa mikään ei viittaa siihen, että neljännen vahvistiminen lisääminen järjestelmään muuttaisi lopputulosta mitenkään. Lopullinen liitteessä 3 esitelty vahvistinmalli kykenee tuottamaan tavoiteltua tasasuunnattua signaalia ilman kytkeytymistä muihin vahvistinpiireihin.

Osa tavoitteista jäi saavuttamatta työn aikana esiin tulleiden haasteiden, kuten VHDL-koodin monimutkaisuuden takia. Konseptitodistus ei kuitenkaan vaadi toimivaa FPGA-

piiriä automatisoimaan mittauksia, vaan onnistuneet mittaukset kyettiin suorittamaan digitaalisella oskilloskoopilla. Konseptitodistuksen jälkeinen työ on etsiä ja valita idean kannalta parhaan hinta-laatusuhteen omaavat välineet toimivan järjestelmän rakentamiseksi. Työ tulee jatkumaan tästä eteenpäin VHDL:llä kirjoitetun IP-lohkon suunnittelulla ja toteutuksella FPGA-piirin mittauksia varten, sekä testijärjestelmän kokoamisella. Konseptitodistusta varten signaalit testattiin vahvistimien ja antureiden sijaitessa samalla puolella kuin levyyn osuva isku. Jatkossa testit kannattaa suorittaa sekä samalta että vastakkaiselta puolelta kuin levyyn osuva isku, jotta järjestelmän käyttöä useammissa käyttökohteissa voidaan arvioida. Isku levyn vastakkaiselle puolelle aiheuttaa oletettavasti huomattavasti heikomman värähtelyn antureille, joka taas johtaa heikompaan vahvistettavaan signaaliin ja tämä johtaa vääjäämättä vahvistinpiirien kalibrointitarpeeseen. Testivaiheissa todellisissa ympäristöissä vallitsevat hallitsemattomat tekijät saattavat myös aiheuttaa epätarkkuuksia mittaustuloksiin, joten lopullisen järjestelmän kehittelyn kannalta olennaista on viedä testijärjestelmä tarkoituksenmukaiseen ympäristöön testaamista varten.

LÄHTEET

- (1) Morón, C. et al.. Low-cost impact detection and location for automated inspections of 3D metallic based structures. *Sensors*. [Verkkolehti] 2015. Vol. 15:6. S.12651-12667. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/6/12651>. (Luettu: 13.2.2021).
- (2) Shin, Y. et al. Identification of acoustic wave propagation in a duct line and its application to detection of impact source location based on signal processing. *Journal of mechanical science and technology*. 2010. Vol. 24:12. S. 2401- 2411. ISSN 1738-494X.
- (3) Krause, M. et al. Large area piezoelectric impact sensors. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2012. S. 681-683. ISSN 0084-9162.
- (4) Li M. et al. A high performance piezoelectric sensor for dynamic force monitoring of landslide. *Sensors*. [Verkkolehti] 2017. Vol. 17:2. 394. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/2/394>. (Luettu: 10.3.2021).
- (5) Curie J., Curie P. Développement par compression de l' électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Bulletin de Minéralogie*. [Verkkodokumentti] 1880. Vol. 3, 4. S. 90-93. Saatavissa: https://www.persee.fr/doc/bulmi_0150-9640_1880_num_3_4_1564. (Luettu: 5.1.2021).
- (6) Stein, G. Some recent developments in acceleration sensors. *Measurement science review*, 2001. Vol. 1:1. S.183-186.
- (7) PCB Piezotronics. *Introduction to ICP accelerometers*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-accelerometers>. (Luettu: 3.3.2021).
- (8) Boylestad, R. *Introductory circuit analysis*. 12th ed. Pearson Education; 2015. S.441-442. ISBN 978-1-292-02400-4.
- (9) Cordial GmbH. *CMK 222*. 2021. [Datalehti] Saatavissa: <https://www.cordial-cables.com/product-pictures/bulk-cable/cm-k-222/cm-k-222.pdf>. (Luettu: 27.2.2021).
- (10) Karki, J. *Application Report Signal Conditioning Piezoelectric Sensors*. Texas Instruments, 2000. 6 s.
- (11) Texas Instruments. *TLV277x, TLV277xA Family of 2.7-V high-slew-rate rail-to-rail output operational amplifiers with shutdown*. 1998. [Datalehti]. Saatavissa: <https://www.ti.com/lit/gpn/tlv2772>. (Luettu: 15.1.2021).
- (12) Palmer, R. *Application Report DC Parameters: Input Offset Voltage (Vio)*. Texas Instruments, 2001. 24 s.
- (13) Córcoles Córcoles S, Moreno Muñoz A. *Arduino*. Madrid, Espanja: RA-MA Editorial; 2018. 452 s. ISBN 978-8499647456.

- (14) TUL. *Introducing TUL PYNQ™-Z2*. 2021. [Datalehti] Saatavissa: https://www.tul.com.tw/images/PYNQ-Z2_PA_v2_pp_20201209_STD.pdf. (Luettu: 20.3.2021).
- (15) Arduino.cc. *analogRead()*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/analog-io/analogread/>. (Luettu: 20.3.2021).
- (16) PynQ.readthedocs.io. *PynQ read the docs*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://pynq.readthedocs.io/en/v2.6.1/>. (Luettu: 23.3.2021).
- (17) TUL. *PYNQ-Z2 Reference Manual v1.1*. 2019. [Käyttöohje]. Saatavissa: https://dpoauwgwqsy2x.cloudfront.net/Download/PYNQ_Z2_User_Manual_v1.1.pdf. (Luettu: 25.3.2021).
- (18) Productplan.com. *MoSCoW Prioritization*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.productplan.com/glossary/moscow-prioritization/>. (Luettu: 20.12.2020).
- (19) Techslan.com. *What is a Proof of Concept (PoC)?*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.techslang.com/definition/what-is-a-proof-of-concept/>. (Luettu: 15.10.2020).
- (20) Pico Technology. *PicoScope® 5000D Series. FlexRes® oscilloscopes and MSOs*. [Datalehti]. Saatavissa: <https://www.picotech.com/download/datasheets/picoscope-5000d-series-data-sheet.pdf>. (Luettu: 13.4.2021).
- (21) Vilhonen, S. 2021. *Head of RF and mmWave design, LG Electronics Finland lab*. [Keskustelu 31.3.2021].

Liite 1. Muita värähtelyantureihin perustuvia kaupallisia järjestelmiä ja RandomTec Oy:n toimeksianto. (ei julkinen)

Liite 2. Testauksessa käytetyt teräslevy. (ei julkinen)

Liite 3. Tasasuuntaava jännitevahvistinpiiri pietsosähköiselle anturille. (ei julkinen)