

Artturi Mantila

**AUTOMAATTINEN ISKUVASARALAITTE TUOTANNON  
TESTAUKSEEN**

# **AUTOMAATTINEN ISKUVASARALAITTE TUOTANNON TESTAUKSEEN**

Artturi Mantila  
Opinnäytetyö  
Syksy 2016  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

---

Tekijä: Artturi Mantila  
Opinnäytetyön nimi: Automaattinen iskuvasaralaite tuotannon testaukseen  
Työn ohjaaja: Jari Viitala  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2016 Sivumäärä: 50 + 5 liitettä

---

Opinnäytetyössä suunniteltiin ja valmistettiin automaattinen iskuvasaralaite RF-suodattimien tuotannon testaukseen. Laite korvaa tuotannon testauksessa tehtävän manuaalisen vasaroinnin. Testauslaite suunniteltiin osaksi automatisoitua teollisuusrobotin käyttämää testaus- ja virityslinjastoa. Laitteen kehityksessä keskeisimpiä vaatimuksia olivat hyvä säädettävyys, toistettavuus, työkiertojen ohjelmoitavuus ja testauksen seurattavuus.

Työn alussa tutkittiin RF-suodattimiin sekä keskeismodulaatiosäröön liittyvää teoriaa, jonka jälkeen perehdyttiin erilaisiin voima-anturointityyppeihin. Selvisi, että dynaamisen iskuvoiman tarkasteluun soveltuvat parhaiten pietsosähköisten voima-anturien lisäksi venymäliuskapohjaiset anturit.

Laitteen lyöntiaktuaattoriksi valittiin solenoidi, sillä sitä käytetään laajasti elektroteknikkateollisuuden automaatioissa. Ideana oli, että solenoidin iskuvoimaa voitaisiin säätää muuttamalla sille lähetetyn sähköpulsin leveyttä. Idea päätettiin validoida proof-of-concept-prototyypin avulla. Prototyypin kehitettiin tietokoneelta ohjattava pulssigeneraattori, joka mahdollisti lyhyiden, säädettävien sähköpulsien lähettämisen. Prototyyppi todisti, että pulssinleveyttä säätämällä voidaan vaikuttaa solenoidin tuottaman iskun voimakkuuteen ja että idea oli jatkokehityskelpoinen.

Laitteen lopullinen suunnittelu sisälsi toimi- sekä mittalaitteiden valinnan, mekaniikkasuunnittelun sekä ohjauksen suunnittelun. Laitteelle kehitetty sulautettu ohjausjärjestelmä mahdollisti lopuksi laitteen käytännön testauksen. Testauksessa tutkittiin kahden erilaisen solenoidin suorituskykyä ja lyöntivoiman toistettavuutta. Lyöntivoimatestien perusteella päädyttiin laitteessa käyttämään pienempää solenoidia, sillä sen lyöntivoima oli sovellukseen ideaalinen. Toistettavuustesteistä selvisi, että solenoidi tuotti iskuja todella hyvällä toistettavuudella.

Mekaniikkasuunnittelun työkaluna käytettiin SolidWorks 2015 -ohjelmaa, laitteen ohjaus toteutettiin Arduino-mikrokontrollerilla ja sen graafinen käyttöliittymä tehtiin Visual Studio 2015 -ohjelmalla.

---

Asiasanat: tuotekehitys, voima-anturit, mekaniikkasuunnittelu, automaatio, testaus

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Mechanical and Production engineering, Machine Automation

---

Author: Artturi Mantila

Title of thesis: Automated Impact Hammer System for Production Testing

Supervisor: Jari Viitala

Term and year when the thesis was submitted: Fall 2016 Pages: 50 + 5 appendices

---

The subject of this thesis was to design and produce an automated impact hammer system for RF-filter production testing. The system was designed to be part of a fully automated tuning and testing line. The main requirements of the system were good controllability, repeatability and programmability.

Firstly, intermodulation distortion and the Device Under Test were researched. After that, the theory associated with the impact force was researched and different force sensors were studied. Solenoid was chosen as the impact actuator, since they are widely used in the electronics industry. The idea was to adjust the impact force of the solenoid by changing the electrical pulse width given to the solenoid. The idea was validated with a proof-of-concept-prototype. A computer controlled pulse generator was developed for the prototype. The prototype showed that the pulse width can be adjusted to affect the intensity of the impact generated by the solenoid and the idea was worth further development.

The planning phase included the selection of the measuring equipment and actuators together with mechanical design and software and hardware design. The embedded control system allowed the practical testing of the system. Two different solenoids were compared with impact force tests. The impact force tests showed that the smaller solenoid was ideal to the application. The smaller solenoid was then tested with repeatability tests that proved a good repeatability of the system.

As a result, a fully automated impact hammer system was developed and its performance was validated. The system's impact force variation was less than two percent, which is considered a success. The system was also introduced for testing use and further development.

The mechanical design was carried out using the SolidWorks 2015 software, the embedded system with the Arduino microcontroller and the graphical user interface with the Visual Studio 2015 software.

---

Keywords: R&D, force sensors, mechanical design, automation, testing

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 RF-TEKNIikka	8
2.1 RF-suodatin	8
2.2 Passiivinen keskeismodulaatio	10
2.3 Keskeismodulaatiosärön testaus	10
3 LYÖNTIVOIMA JA SPESIFIKAATIO	12
3.1 Lyöntivoima	12
3.1.1 Voima ja jousto	13
3.1.2 Voima ja iskun kesto	13
3.2 Spesifikaatio	14
4 VOIMAN MITTAUS	15
4.1 Venymäliuska-anturit	15
4.1.1 Venymäliuskat	15
4.1.2 Venymäliuskaan perustuvat voima-anturit	16
4.2 Kapasitiiviset voima-anturit	18
4.3 Sähkönjohtavat polymeerit	19
4.4 Piettosähköiset voima-anturit	19
5 LYÖNTIMEKANISMIN ESISUUNNITTELU	22
5.1 Ideointi	22
5.2 Solenoidi aktuaattorina	23
6 PROOF-OF-CONCEPT PROTOTYYPPI	24
6.1 Toteutus	24
6.2 Ohjaus	25
6.3 Prototyypin arviointi ja pohdinta	27
7 SUUNNITTELU	28
7.1 Voima-anturin valinta	28
7.1.1 Piettosähköisten- ja venymäliuskaan perustuvien anturien vertailu	29

7.1.2 Signaalinmuokkaus ja vahvistus	30
7.2 Solenoidin valinta	31
7.3 Lyöntikärki	32
7.4 Anturitiedon lukeminen ja tallentaminen	33
7.5 Ohjaus	34
8 MEKANIKKASUUNNITTELU	36
9 TESTAUS JA ANALYYSI	42
9.1 Pulssinleveyden suhde lyöntivoimaan	42
9.2 Toistettavuus	42
9.3 Voima-anturin signaalin tarkastelu	43
10 JATKOKEHITYS	45
11 YHTEENVETO	47
LÄHTEET	48
LIITTEET	
Liite 1 Kokoonpanokuva	
Liite 2 Lyöntivoimatesti RM050	
Liite 3 Lyöntivoimatesti RM060	
Liite 4 Toistettavuustesti 1	
Liite 5 Toistettavuustesti 2	

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan ja valmistetaan automaattinen iskuvasaralaite RF-suodattimien tuotannon testaukseen. Laite korvaa tuotannon testauksessa tehtävän manuaalisen vasaroinnin. Testauslaite suunnitellaan osaksi automatisoitua teollisuusrobotin käyttämää testaus- sekä virityslinjastoa. Automaattisen vasaralaitteen kehityksen keskeisenä tavoitteena on suunnitella laite, jonka lyöntivoima on säädettävissä ja seurattavissa hyvällä toistettavuudella sekä työkierrat ovat täysin ohjelmoitavissa. Koska laitteella testattavat RF-suodattimet ovat kooltaan vaihtelevia, on laitteen mekaniikkasuunnittelu toteutettava niin, että laite voidaan muokata sekä monistaa eri tuotteiden testaamiseen.

## 2 RF-TEKNIikka

Lyhenne RF tulee sanoista radio frequency ja tarkoittaa radioaaltoja, jotka ovat sähkömagneettisessa spektrissä taajuusvälillä 3 kHz - 300 GHz. Radioaaltojen spektri jaetaan osa-alueisiin, joita merkitään kirjainlyhenteillä taulukon 1 mukaisesti. Alle 300 MHz:n taajuisia aaltoja kutsutaan usein RF-aalloiksi. UHF- ja SHF-alueita kutsutaan mikroaalloiksi. EHF-aluetta kutsutaan millimetriaaltoalueeksi ja taajuusaluetta 300 GHz - 3 THz alimillimetrialueeksi. (1, s. 9.)

TAULUKKO 1. Radioaaltojen taajuusalueet (1, s. 10)

VLF	Very Low Frequencies	3 - 30 kHz
LF	Low Frequencies	30 - 300 kHz
MF	Medium Frequencies	300 - 3000 kHz
HF	High Frequencies	3 - 30 MHz
VHF	Very High Frequencies	30 - 300 MHz
UHF	Ultra High Frequencies	300 - 3000 MHz
SHF	Super High Frequencies	3 - 30 GHz
EHF	Extremely High Frequencies	30 - 300 GHz

Nykyaikainen radiotietoliikenne on keskittynyt erityisesti UHF- ja SHF-alueille, mutta myös millimetriaaltoalueen merkitys on kasvanut. Järjestelmien välitaajuudet ovat usein VHF-alueella. Myös muut sovellukset kuten tutkat, radionavigointijärjestelmät, anturit ja tehosovellukset ovat keskittyneet lähinnä VHF-, UHF- ja SHF-alueille. VLF-, LF-, MF- ja HF-alueiden merkitys on vähenemässä. Opinnäytetyön testilaitteen RF-suodattimia käytetään UHF-alueella. (2, s. 11.)

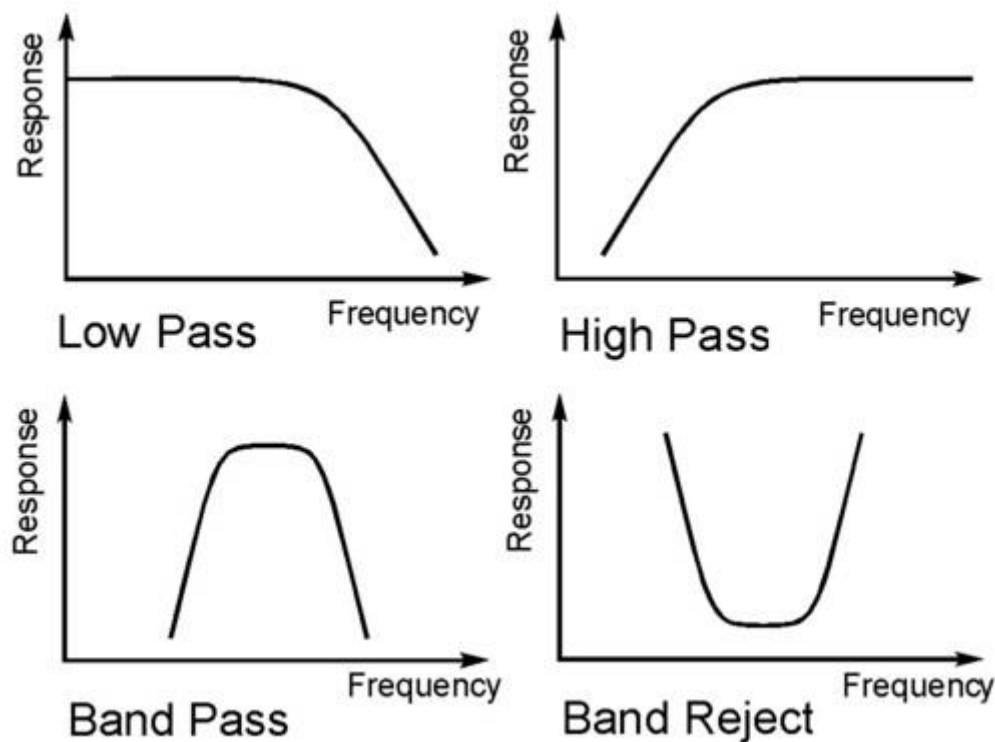
### 2.1 RF-suodatin

Suodattimet ovat tärkeitä komponentteja radiospektrin käytön tehokkuuden kannalta. Suodattimia tarvitaan lähettimissä ja vastaanottimissa eritaajuisien signaalien erottamiseen toisistaan, sillä käytössä on paljon erilaisia taajuuksia, jotka ilman suodattimia häiritsisivät toisiaan. Signaalia voidaan suodattaa kanta-  
taajuudella eli informaation alkuperäisellä taajuudella, välitaajuudella tai suurtaajuudella, mutta usein signaalia suodatetaan kaikissa näissä vaiheissa. (2, s. 87.)



Lähetysignaalin suodatuksella muokataan signaalin spektriä ja estetään lähettimessä syntyvien väärintaajuisien signaalien pääsy antennin kautta radiokanavaan. Vastaanottimessa suodattimella rajoitetaan vastaanottoon kytkeytyvää kohinaa ja häiriötä sekä estetään muiden ei-toivottujen signaalien kytkeytyminen. Ei-toivottuja signaaleja voivat olla naapurikanavien signaalit, sekoittimen peilitaajuudella olevat signaalit tai mitkä tahansa muu signaali, jonka taajuudella vastaanottimella on merkittävä vaste. Myös laitteiden sisällä voi syntyä väärintaajuisia signaaleja, jotka on suodatettava. (2, s. 87.)

Ideaalitapauksessa ei suodattimen päästökaistalla tapahdu vaimennusta lainkaan ja estokaistalla vaimennus on ääretön. Kuvassa 1 ovat yleisimmät suodatintyytit, jotka jaetaan kaistan muodon perusteella kaistanpäästö-, kaistanesto-, alipäästö- ja ylipäästösuodattimiin. Ideaalisten suodattimien vaihevaste on päästökaistalla lineaarinen, jolloin useita taajuuskomponentteja sisältävä signaali ei vääristy. Suodattimilla voidaan myös yhdistää eritaajuisia signaaleja toisiinsa (multipleksointi) tai erottamaan niitä toisistaan (demultipleksointi). (1, s. 120.)



KUVA 1. Suodatintyytit (3)

## 2.2 Passiivinen keskeismodulaatio

PIM on lyhenne sanoista Passive Intermodulation eli passiivinen keskeismodulaatio. Passiivinen-etuliite viittaa siihen, että antennijärjestelmä toteutetaan passiivisilla komponenteilla ilman vahvistimia. Tarvittava radiosignaalin teho saadaan siihen kytketyistä operaattoreiden toistimista tai tukiasemista. Passiivinen verkko on lähes huoltovapaa, sillä se on käyttöjännitteetön sekä kustannuksiltaan kohtuullinen. (4.)

Passiivinen intermodulaatio (PIM) on keskeismodulaatiosärön (IMD) muoto, jota ilmenee tavallisesti lineaarisina pidetyissä komponenteissa, kuten kaapeleissa, liittimissä ja antenneissa. Kun käytetään korkeita tehoja, voivat nämä laitteet kuitenkin saada aikaan jopa  $-80$  dBm tai korkeamman keskeismodulaatiosignaalin. (5.)

Passiivista keskeismodulaatiota syntyy kahden tai useamman eri taajuuden ja epälineaaristen liitoskohtien yhteisvaikutuksesta. Näiden tuloksena syntyy häiriötaajuuksia, joita passiivisessa verkossa kutsutaan PIM-säröksi. Jos tällainen häiriötaajuus syntyy käyttötaajuuden kohdalle, se voi jopa katkaista matkapuhelin yhteyden. Tämän takia verkon toteuttajien on pidettävä häiriötaajuuksia joko kokonaan käyttötaajuuksien ulkopuolella tai vähintään sallitulla tasolla. (4.)

Osasyynä passiiviseen keskeismodulaatioon ovat epälineaariset liitoskohdat, joita voi syntyä vahingoittuneista tai huonosti kiristetyistä liittimistä, likaisuudesta, väsymismurtumista, kylmäjuotoksista ja korroosiosta. Vahingoittuneet liittimet, kaapelit, diplekserit ja antennit voivat kaikki sisältää epälineaarisia liitoskohtia. Lisäksi lähistöllä olevat syöpyneet metalliset esineet kuten ruostuneet pultit, aidat ja peltikatot voivat aiheuttaa passiivista keskeismodulaatiota. Tätä ilmiötä kutsutaan englanniksi Rusty Bolt Effectiksi. (5.)

## 2.3 Keskeismodulaatiosärön testaus

RF-suodattimet viritetään ja testataan valmistuksen jälkeen. Testauksessa suodattimien valmistuksen sekä virityksen laatua arvioidaan erilaisilla menetelmillä. Opinnäytetyössä automatisoitavassa työvaiheessa testataan RF-suodattimien

keskeismodulaation muutosta. Ensin suodattimen keskeismodulaation arvo mitataan, minkä jälkeen suodatinta isketään kumivasaralla. Vasaran isku saa aikaan keskeismodulaatioarvojen nousun. Kuitenkin pian lyönnin jälkeen keskeismodulaation arvon tulisi laskea takaisin entiselle tasolleen.

Suodattimien testaus voidaan laskea hyväksytyksi, jos keskeismodulaation arvo laskee ensiksi mitatun arvon tasolle. Jos vasaroinnin jälkeinen arvo poikkeaa ensimmäisestä arvosta, on RF-suodattimessa valmistusvirhe. Keskeismodulaatioarvon muutos tarkoittaa, että suotimen sisällä on esimerkiksi likaisuutta tai irrallisia osia. Kumivasaran lyönti saa nämä epäpuhtaudet liikkeelle, jolloin ne vaikuttavat keskeismodulaatioon.

## 3 LYÖNTIVOIMA JA SPESIFIKAATIO

### 3.1 Lyöntivoima

Automaattista iskuvasaralaitetta suunniteltaessa oli ensiksi tarkasteltava vasaran vaikutusta lyötävään kappaleeseen. Vasaran lyönnin voimakkuuden määrittää sen saavuttama energian määrä ennen vasaran kärjen osumista lyötävään kohteeseen. Koska vasaran saavuttaman energian määrää on vaikea käytännössä mitata, on lyönnin voimakkuutta mitattava voiman, nopeuden, kiihtyvyyden, etäisyyden tai ajan funktiona. Vasaran saavuttamaa energiaa voidaan kuitenkin arvioida tarkastelemalla pudotustestiä. Pudotustestissä pudotettavan kappaleen potentiaalienergia muuttuu pudotuksen aikana kineettiseksi energiaksi energian säilymislain mukaisesti kaavalla 1. (6.)

$$E_p = E_k$$

KAAVA 1

$E_p$  = potentiaalienergia

$E_k$  = kineettinen energia

Yksinkertaisessa pudotustestissä sovelletaan energian säilymislakia kaavan 2 mukaisesti. (6.)

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

KAAVA 2

$m$  = massa

$g$  = painovoima

$h$  = korkeus

$v$  = nopeus

Kuten yhtälöstä kaksi nähdään, massalla ei ole vaikutusta törmäysnopeuteen. Kun ilmanvastusta ei oteta huomioon, voidaan törmäysnopeus ratkaista kaavalla 3. (6.)

$$v = \sqrt{2gh}$$

KAAVA 3

### 3.1.1 Voima ja jousto

Pudotustestissä esiintymiä voimia voidaan arvioida työ-energiaperiaatteen avulla. Törmäyksen tekemä työ lasketaan kaavasta 4, joka on yhtä suuri kuin törmäyksen voima kerrottuna törmäyksen jälkeen kuljetulla matkalla eli kappaleen jouston määrällä. (6.)

$$W = Fs$$

KAAVA 4

$W$  = törmäyksen tekemä työ

$F$  = törmäyksen voima

$s$  = kuljettu matka

Nettotyö voidaan laskea kaavasta 5. (6.)

$$W_{net} = \frac{1}{2}mv_{loppu}^2 - \frac{1}{2}mv_{alku}^2$$

KAAVA 5

Koska pudotustestissä pudotettavalla kappaleella ei ole lähtönopeutta, lasetaan törmäysvoima kaavalla 6. (6.)

$$F = \frac{W_{net}}{d}$$

KAAVA 6

$d$  = törmäyksen aikana kuljettu matka

Putoavan kappaleen nopeus juuri ennen törmäystä on mitattavissa esimerkiksi induktiivisella nopeusanturilla. Törmäyksen aikana kuljettu matka kuitenkin on käytännössä haastavampi mitata, sillä materiaalin jousto etenkin metalli-metalli-kontaktissa voi olla alle millimetrin luokkaa.

### 3.1.2 Voima ja iskun kesto

Toinen lähestymistapa voiman mittaamiseen on iskun keston eli pulssinleveyden arviointi. Törmäyksen voima saadaan laskettua liikkeen laista kaavalla 7. (6.)

$$F = ma$$

KAAVA 7

$a$  = kiihtyvyys

Käyttämällä törmäysnopeuden kaavaa voidaan laskea iskun kiihtyvyys. Tämä kiihtyvyys on riippuvainen iskun pulssinleveydestä. Iskun kiihtyvyys voidaan laskea nopeuden muutoksesta pulssinleveyden aikana kaavalla 8. (6.)

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{t_{pulssi}} \quad \text{KAAVA 8}$$

$dv$  = nopeuden muutos

$t_{pulssi}$  = pulssinleveys

Jos oletetaan, että törmäys on täysin elastinen, ovat törmäyksen aloitusnopeus ja törmäyksen jälkeinen nopeus saman suuruisia, mutta erisuuntaisia. Tällöin iskun kiihtyvyys pudotustestissä lasketaan kaavalla 9. (6.)

$$a = \frac{v_{alku} - v_{loppu}}{t_{pulssi}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2gh}}{t_{pulssi}} \quad \text{KAAVA 9}$$

Pulssinleveys vaihtelee materiaalin jouston tavoin. Mitä joustavampi materiaali on kyseessä, sitä pidempi on iskun pulssinleveys. Pulssinleveyden mittaaminen voitaisiin käytännössä toteuttaa esimerkiksi nopealla kosketusanturilla, joka mittaisi, kuinka kauan törmäävät kappaleet ovat kosketuksissa keskenään.

### 3.2 Spesifikaatio

RF-suodattimien testauksessa tehtävä vasarointi on tarkoitus standardisoida tulevaisuudessa. Työn tilaaja oli ennen opinnäytetyön asettamista teettänyt mittalaitteisiin erikoistuneella yrityksellä RF-suodattimien testaukseen liittyvän tutkimuksen. Tutkimuksessa selvitettiin testauksen aikana suodattimeen kohdistuvan voiman suuruutta. Voiman mittaamiseen oli käytetty esivahvistettua piezosähköistä anturia. Voiman suuruutta oli testattu erilaisilla tavoilla ja materiaaleilla ja keskimääräiseksi lyöntivoimaksi saatiin noin 300 newtonia. Tämä spesifikaatio otettiin pohjaksi vasarointilaitteen kehitystyölle.

## **4 VOIMAN MITTAUS**

1980-luvun kirjallisuudessa useimmat kirjoittajat ennustivat, että suurin voima-anturointia laajemmin käyttävä ala olisi teollisuuden automaatio. Kysyntä kuitenkin osoittautui alhaisemmaksi kuin luultiin. Voima-anturoinnin määrä on kuitenkin runsaasti kasvamassa esimerkiksi hyvinvointiteknikassa, koska kirurgia- ja kuntoutuslaitteiden automaatio tarvitsee voima-anturointia toimiakseen luotettavasti. (7, s. 35.)

Voima-anturointi on yleistymässä myös teollisuuden automatisoinnin myötä, sillä tarkkojen, vain ihmisen käsin suoritettavien töiden automatisointi vaatii toimiakseen tarkkaa voimien seuranta. Voima-anturointia voidaan hyödyntää tuotannon lisäksi tuotekehityksen eri vaiheissa sekä testauksessa. Voima-anturoinnin käyttökohteita ovat esimerkiksi materiaalin koetukseen tarkoitetut laitteet sekä komponenttien testauslaitteet. (7, s. 35.)

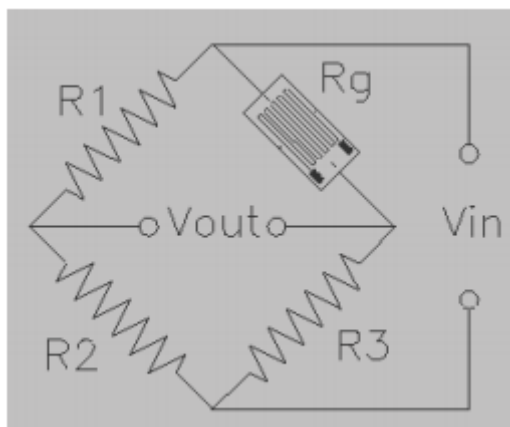
Voima-antureita löytyy useita erilaisia riippuen sovelluksen vaatimuksista. Veto- ja puristusvoimien mittaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi venymäliuskapohjaisia antureita, pietsosähköisiä antureita, hydraulisia- ja pneumaattisia antureita sekä kapasitiivisia antureita. Seuraavaksi on tutkittu erilaisia anturityyppejä, jotka soveltuvat etenkin veto- ja puristusvoimien mittaamiseen.

### **4.1 Venymäliuska-anturit**

#### **4.1.1 Venymäliuskat**

Venymäliuskat ovat vastuksia, joiden toiminta perustuu elastisen muodonmuutoksen aiheuttamaan resistanssin muutokseen. Kun venymäliuskaa venytetään, se muuttuu kapeammaksi ja pidemmäksi, jolloin sen resistanssi kasvaa. Venymäliuska koostuu johtamattomasta, joustavasta taustasta sekä johdinkuviosta. Johdinkuvio voi olla ohut metallilanka, metallikalvo tai puolijohde. Näistä käytetyin on metallikalvoliuska. (7, s. 8.)

Venymäliuska voidaan kytkeä kuvan 2 mukaiseen wheatstonen siltakytkentään, jossa mitataan vastuksen muutoksen aiheuttamat jännitemuutokset. Jännite voidaan nollata säätämällä sillan vastuksia. Venymäliuskat tarvitsevat tavallisesti 5 - 15 voltin tasa- tai vaihtojännitesyötön. Ulostulojännitteen ollessa nimelliskuormalla kymmeniä millivoltteja, joudutaan signaali vahvistamaan ennen jatkokäsittelyä. Venymäliuskoilla voidaan toteuttaa anturointi kohteisiin, joihin kaupallista voima-anturia ei löydy. Venymäliuskat ovat myös edullinen vaihtoehto kaupallisiin voima-antureihin verrattuna. (8.)

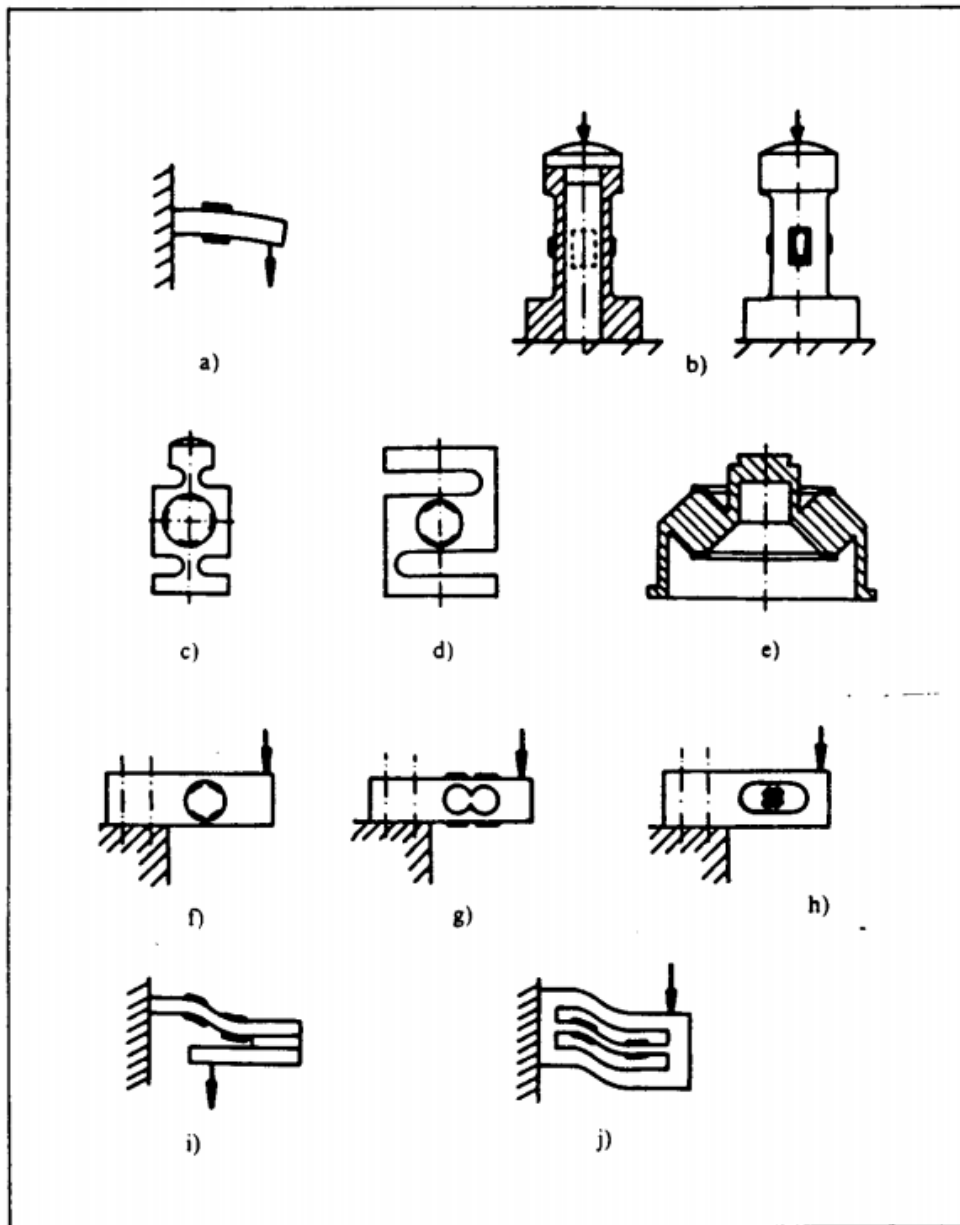


KUVA 2. Wheatstonen siltakytkentä (9)

#### 4.1.2 Venymäliuskaan perustuvat voima-anturit

Useimmiten voima-anturit perustuvat venymäliuska-tekniikkaan. Venymäliuskaan perustuvat anturit soveltuvat sekä staattisen että dynaamisen kuormituksen tarkasteluun. Niiden rakenne vaihtelee käyttötarkoituksesta riippuen. Kuvassa 3 on esitelty muutamia voima-anturien rakennemalleja. Kuvan 3 rakenteista sauvamainen tyyppi b soveltuu parhaiten suurien voimien mittaamiseen, kun taas tyyppin c- ja d-rakenteet soveltuvat paremmin pienille voimille herkemmän rakenteensa takia. Matalaa rakennetta tarjoavat kuvan 3 f-, g- ja h-tyyppiset palkkimaiset rakenteet. Palkkimaiset anturit voivat olla rakenteeltaan joko taivutusvoiman tai leikkausvoiman mittaamiseen perustuvia. Luotettavan mitaustuloksen saamiseksi voima on kohdistettava tarkoin. (8, s. 60.)





KUVA 3. Venymäliuska-antureiden rakennemalleja (8, s. 62)

Venymäliuskoihin verrattuna venymäliuskapohjaiset anturit ovat helpompia asentaa ja voiman kohdistaminen on luotettavampaa, sillä niissä on venymäliuskojen lisäksi joustoelementti, johon voima kohdistetaan. Joustoelementin avulla siihen kohdistuva voima saadaan mitattua lineaarisesti sekä hyvällä toistettavuudella. Joustoelementin materiaalin sekä muodon valinnalla voidaan määritellä anturin ominaisuuksia. (10.)

Venymäliuskaan perustuvien voima-anturien etuja ovat todella korkea tarkkuus sekä kohtuulliset kustannukset. Wheatstonen siltakytkentä mahdollistaa anturin

säädettävyyden. Esimerkiksi lämpötilan vaikutus, taivutusmomentit sekä sivuttaisvoimat saadaan kompensoitua pois sillan vastuksia muuttamalla. (10.)

## 4.2 Kapasitiiviset voima-anturit

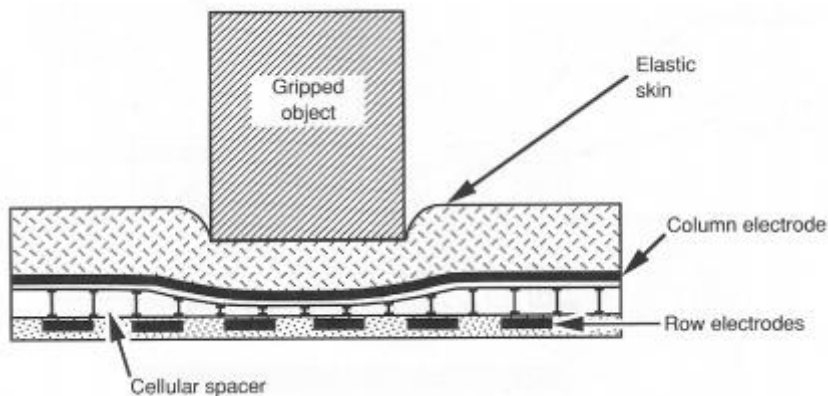
Kapasitiiviset anturit perustuvat kahden levyn väliseen kapasitanssin eli sähkökentän muutokseen kaavan 10 mukaisesti. Kapasitanssi muuttuu, kun väliaineen dielektrisyysvakio  $K$  muuttuu, levyjen yhteinen pinta-ala  $A$  muuttuu tai kun levyjen välinen etäisyys  $d$  muuttuu. (11.)

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d}$$

KAAVA 10

Yleisimmin kapasitiivisia antureita käytetään kiinteiden ja nestemäisten aineiden havaitsemiseen sekä pinnankorkeuden tarkkailuun mutta niitä voidaan kuitenkin hyödyntää myös leikkausvoiman ja normaalivoiman mittauksessa. Normaalivoima painaa anturin kahta levyä tasaisesti toisiinsa muuttaen levyjen välistä etäisyyttä. Leikkausvoima puolestaan saa vain osan levyjen pinta-alasta lähetytään toisiaan. (7, s. 5.)

Kuvassa 4 on esimerkki kapasitiivisen anturin käytöstä voima-anturina kosketuksen mittauksessa. Anturissa on rivissä toisistaan erotettuja elektrodeja, jotka on jaettu tasaisesti anturin pinta-alalle. Kosketus saa aikaan muutoksen pintojen välisessä etäisyydessä, jolloin voidaan mitata kosketuksen voimakkuus. Kapasitiivisen anturin ominaisuuksia voidaan muokata pintojen välistä materiaalia vaihtamalla tai muotoilemalla. (7, s. 5.)



KUVA 4. Kosketusvoiman mittaus kapasitiivisella anturilla (7, s. 7)

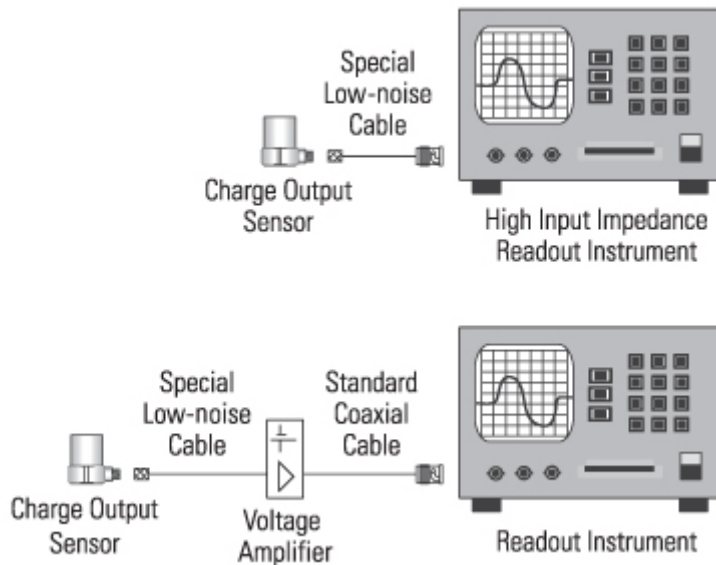
### **4.3 Sähkönjohtavat polymeerit**

Sähkönjohtavissa ja joustavissa polymeereissä on sähköä johtavia hiukkasia, jotka painautuvat lähemmäksi toisiaan, kun materiaaliin kohdistetaan painetta. Tällöin materiaalin resistanssi laskee. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi materiaaliin kohdistuvan voiman mittaamisessa. Materiaalin etuja ovat keveys, edullisuus ja joustavuus. Etenkin joustavuutensa takia sähkönjohtavien polymeerien käyttö on lisääntymässä älyvaatteiden ja kosketuslaitteiden keskuudessa. (12, s. 46.)

### **4.4 Pietsosähköiset voima-anturit**

Pietsosähköiset anturit perustuvat pietsosähköiseen ilmiöön, jossa kvartsikide tuottaa korkeaimpedanssisen sähköjännitteen, kun siihen kohdistetaan painetta. Anturin rakennetta muuttamalla voidaan mitata veto- ja puristusvoimien lisäksi leikkausvoimaa. Kiteen tuottama jännite on verrannollinen siihen kohdistettuun voimaan. Kun kuormitus on pidempiaikaista staattista kuormitusta, alkaa kiteen tuottama jännite hiipua kohti nollaa. Tämän takia pietsosähköiset anturit soveltuvatkin paremmin dynaamisen kuormituksen tarkasteluun. (7, s. 10.)

Pietsosähköiset voima-anturit voidaan jakaa kahteen tyyppiin, tavallisiin purkaustyyppisiin antureihin sekä ICP-antureihin. Tavallisella purkaustyyppisellä anturilla varustettu mittausjärjestelmä voidaan toteuttaa kuvan 5 mukaisesti kahdella tapaa. Pietsokiteen tuottama sähkövaraus on joko kuljetettava häiriösuojattua kaapelia pitkin suoraan korkeaimpedanssiselle lukijalaitteelle tai vahvistettava matkalla. Tällöin häiriösuojattua kaapelia on käytettävä vain anturin ja vahvistimen välillä. Vahvistettu signaali voidaan siirtää vahvistimelta lukijalaitteelle tavallista koaksiaalikaapelia pitkin.



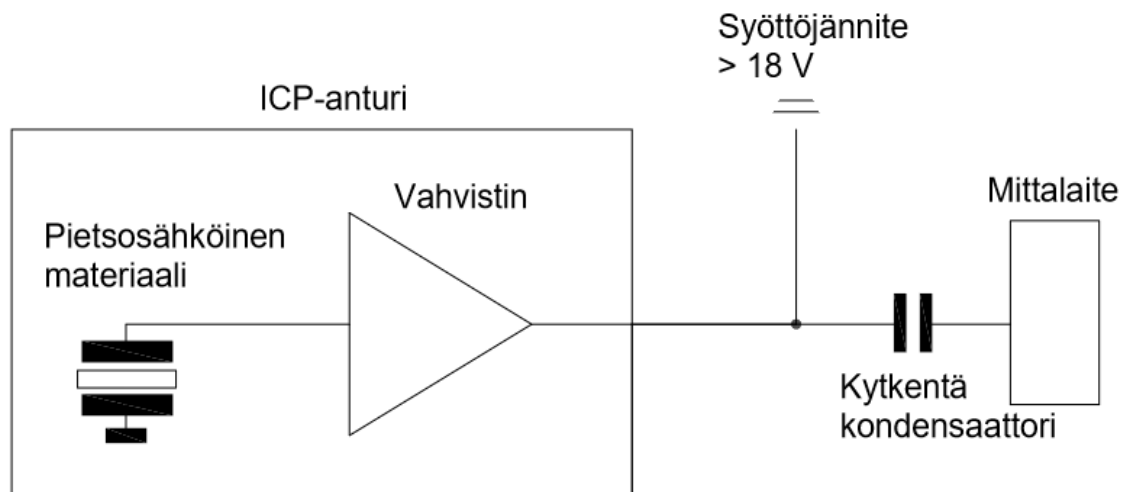
KUVA 5. Purkaustyyppisten pietsosähköisten anturien asennustavat (13)

### ICP-anturit

ICP-anturi eli Integrated Circuit Piezoelectric Sensor on pietsosähköinen anturi, jossa on sisäänrakennettu esivahvistin. ICP on PCB Groupin rekisteröimä tavaramerkki, mutta muita samanlaista tekniikkaa käyttäviä tuotemerkkejä ovat esimerkiksi IEPE, CCLD, Isotron, Deltatron sekä Piezotron. (14.)

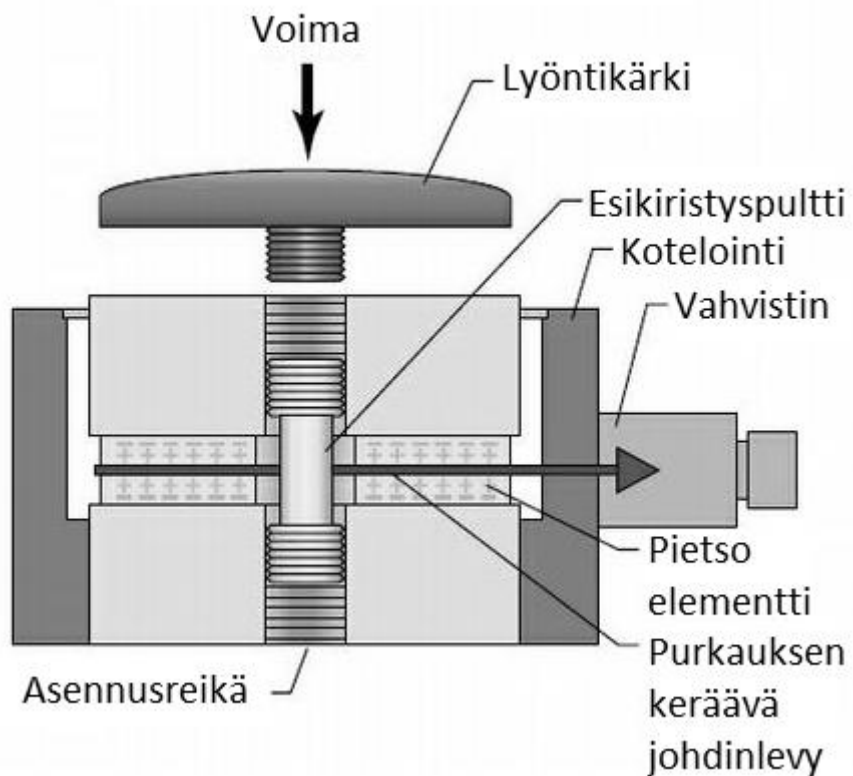
Koska ICP-antureissa on sisäänrakennettu esivahvistin, muuttaa se pietsokiteen tuottaman korkean impedanssin varauksen matalaimpedanssiseksi jännitesignaaliaksi anturin sisällä. Koska signaali vahvistetaan heti anturilla, ympäristön häiriöt eivät heikennä signaalia. Tällöin signaali voidaan siirtää tavallista kaksijohtimista johtoa tai koaksiaalikaapelia pitkin lukijalaitteelle. (13.)

ICP-anturin sisäänrakennettu vahvistin saa syöttöjännitteensä vakiovirtalähteestä. Tämä vakiovirtalähde voi olla erillinen yksikkö tai osa mittalaitetta. Kuvasta 6 voidaan nähdä ICP-anturin pelkistetty toimintaperiaate. Anturin signaali siirretään takaisin virtalähteeseen moduloituna bias-jännitteenä. Sekä syöttöjännite, että anturin tuottama jännitetulo siirretään samaa koaksiaalikaapelia pitkin. Kun bias-jännite saavuttaa mittalaitteen, erotetaan se syöttöjännitteestä kondensaattorilla, jolloin jäljelle jää vain anturin tuottama analogiasignaali. (14.)



KUVA 6. ICP-anturin toimintaperiaate (14)

Piettosähköiset anturit ovat rakenteeltaan hyvin kompakteja ja kevyitä. Kuvassa 7 on läpileikkaus ICP-anturin rakenteesta. Voima kohdistuu lyöntikärjen kautta piezoelementtiin, jonka tuottama signaali viedään johdinlevyä pitkin vahvistimelle. Esikiristuspultti lisää anturin tuottaman signaalin lineaarisuutta.



KUVA 7. ICP-anturin läpileikkaus (15)

## 5 LYÖNTIMEKANISMIN ESISUUNNITTELU

Opinnäytetyön lähtökohtana oli suunnitella automaattinen laite, joka korvaa testauksessa käsin tehtävän kumivasaralla lyömisen. Työn tilaaja esitti toteutukselle muutamia vaatimuksia, mutta muuten toteutustapa oli vapaa. Tuotekehitys toteutettiin käyttäen järjestelmällisen tuotekehityksen periaatetta, jonka vaiheet ovat esisuunnittelu, yksityiskohtainen suunnittelu sekä testaus ja viimeistely.

### 5.1 Ideointi

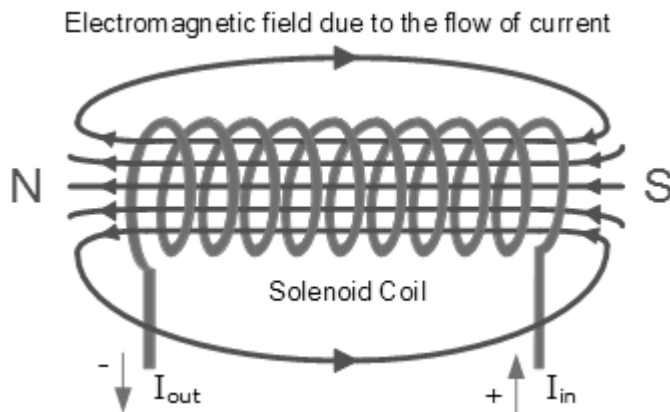
Ensimmäisenä oli ideoitava, millä tavalla vasaran lyöminen voitaisiin toteuttaa. Hydrauliiikan käyttö poistettiin heti suunnitelmista, sillä se ei sovellu parhaiten elektroniikkateollisuuteen ja sen käyttöönottokustannukset ovat suhteellisen korkeat. Pneumatiikka ja sähkö jäivät potentiaalisiksi vaihtoehdoiksi käyttövoimalle.

Elektroniikkateollisuuden automaatiolaitteissa pneumatiikan käyttö on hyvin yleistä. Pneumatiikka tarjoaa nopeita mekaanisia liikkeitä ja kohtalaisen hyvää säädettävyyttä. Pneumaattisten sylinterien liikenopeuksia säädetään rajoittamalla sylinteriltä lähtevän ilman virtausta. Tämä toteutetaan säädettävällä vastusvastaventtiilillä, jota säädetään yleisimmin sorminupilla, ruuvitalalla, kuusiokoloavaimella tai mekaanisesti. Vastusvastaventtiilien säätäminen sähköisesti on harvinaisempaa.

Sähkötoimisista aktuaattoreista vasarointiin sopivia ovat lineaariset sähkömoottorit sekä solenoidit. Sähkötoimisten toimilaitteiden etuna on hyvä säädettävyys. Lineaariset sähkömoottorit ovat kuitenkin suhteellisen kalliita ja niiden ohjaamiseen tarvitaan usein valmistajan oma ohjausjärjestelmä. Lisäksi sähkömoottorit voivat vahingoittua iskevässä käytössä. Lyöntimekanismin toimilaitteeksi valittiin solenoidi sen hyvän säädettävyytensä ja edullisuutensa ansiosta. Solenoidin lyöntivoiman toistettavuudesta ei löytynyt kattavaa materiaalia, joten toistettavuus päätettiin testata käytännön kokein.

## 5.2 Solenoidi aktuaattorina

Solenoidi on elektromagneettinen toimilaite, joka muuntaa sähkövirran fyysisiksi liikkeeksi. Kuvassa 8 on havainnollistettu solenoidin magneettikenttää. Kun solenoidin käämille kytketään virta, synnyttää se magneettikentän. Magneettikenttä saa solenoidin sisällä olevan rautasydämen eli ankkurin kiihtyvään liikkeeseen.



KUVA 8. Solenoidin magneettikenttä (16)

Ankkurin liikkeen aikana saavuttama kineettinen energia määrittää solenoidin iskun voimakkuuden. Solenoidin magneettikentän voimakkuuteen voidaan vaikuttaa muuttamalla sille syötetyn sähkövirran määrää. Mitä suurempi on virta, sitä voimakkaampi on magneettikenttä. Suurin iskun voimakkuus saavutetaan, kun solenoidille annetaan virtaa koko iskunpituuden ajan. Tällöin solenoidin ankkuri on kiihtyvässä liikkeessä iskun loppuun asti.

Jos sähkövirran antaminen lopetetaan puolessa välissä solenoidin iskunpituutta, iskunpituuden loppumatkan ankkuri kulkee saavuttamallaan kineettisellä energialla. Tällöin iskun voimakkuus on heikompi, kuin tilanteessa, jossa solenoidi on aktivoituna koko iskunpituuden ajan. Tällöin solenoidin iskun voimakkuuteen vaikuttaa myös se, kuinka pitkään syöttövirtaa annetaan. Tätä voidaan kutsua syöttövirran pulssinleveydeksi. (17.)

## 6 PROOF-OF-CONCEPT PROTOTYYPPI

Ideoinnin jälkeen tehtiin proof-of-concept -prototyyppi. Tavoitteena oli testata solenoidin soveltuvuutta iskuvasaraksi ja tarkastella sen säädettävyyttä. Tarkoituksena oli kehittää yksinkertainen sulautettu järjestelmä, joka antaa solenoidille lyhyitä sähköpulsseja. Pulssin pituutta kasvattamalla päästäisiin muuttamaan solenoidin iskun voimakkuutta.

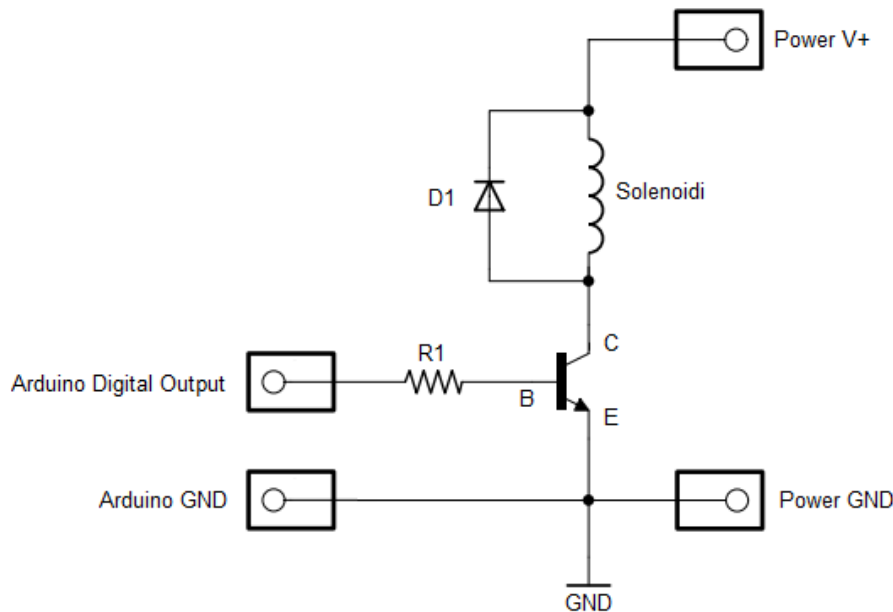
### 6.1 Toteutus

Prototyypin tavoitteena oli saada selville, kuinka syöttövirran pulssinleveyttä säätämällä voidaan vaikuttaa solenoidin iskun voimakkuuteen. Prototyypissä käytettiin pienikokoista työntävää solenoidia. Koska solenoidissa ei ollut palautusjoustia, asennettiin solenoidi tekemään iskunsa ylöspäin, jolloin painovoima teki palautuksen.

Jotta solenoidille pystyttiin lähettämään lyhyitä, säädettävissä olevia sähköpulsseja, oli prototyypille suunniteltava pulssigeneraattori. Pulssigeneraattori asennettiin koekytkenälevylle ja se koostui virtalähteestä, transistorista ja sitä ohjaavasta mikrokontrollerista. Kuvassa 9 on prototyypin kytkentäkaavio. Kun mikrokontrollerilta lähetetään ulostulojännite, ohjaa se transistoria ja transistorin kollektorilla oleva solenoidi vetää.



Solenoidin käämin yli kytkettiin suojadiodi, jotta käämivirran nopean katkaisun aiheuttama vastakkaissuuntainen jännitepiikki ei vahingoittaisi transistoria.



KUVA 9. Prototyypin kytkentäkaavio

Mikrokontrollerina prototyypissä käytettiin Arduino Unoa. Koska opinnäytetyön tilaajan vaatimuksena oli, että laitetta voi ohjata tietokoneelta käsin, tehtiin myös prototyyppiin alustava käyttöliittymä. Käyttöliittymä tehtiin C# -ohjelmointikielellä Visual Studio 2015 -ohjelmistoa käyttäen. Näin saatiin tehtyä visuaalinen käyttöliittymä exe-tiedostoksi, jolla mikrokontrolleria pystyi ohjaamaan. Mikrokontrollerin puolelle ohjelma tehtiin C++ -ohjelmistokielellä Arduino IDE -ohjelmistolla.

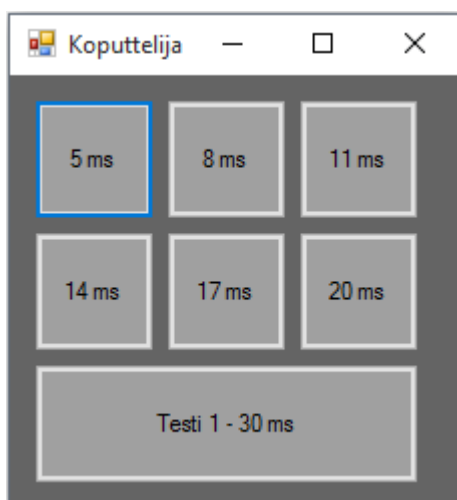
## 6.2 Ohjaus

Jotta käyttöliittymä ja mikrokontrolleri pystyisivät viestimään keskenään, oli niiden väliseen viestintään kehitettävä protokolla. Protokolla tehtiin mikrokontrollerin puolelle niin, että se vastaanottaa käskyn tietynlaisessa muodossa USB-sarjaportin kautta. Käyttöliittymän lähettämä viesti koostui neljästä luvusta. Viestin ensimmäinen luku kertoo, halutaanko kontrollerille kirjoittaa tietoa, vai lukea sitä (1= kirjoitus, 2 = luku). Viestin toinen luku kertoo kontrollerille, halutaanko käsitellä digitaalista vai analogista pinniä (1 = analoginen, 2 = digitaalinen). Käskyn kolmas luku kertoo, mikä on käsiteltävän pinnin numero. Viestin neljäs numero

koskee vain pinnien kirjoittamista ja kertoo kontrollerille, mihin tilaan pinni kirjoitetaan. Digitaalisissa pinneissä tilaksi voidaan kirjoittaa 1 tai 0, kun taas analogisiin pinneihin voidaan kirjata arvo väliltä 0 - 255.

Tietokoneelta käytettävä käyttöliittymä on se osapuoli, joka lähettää mikrokontrollerille käskyjä. Käyttöliittymään tehtiin alustavasti seitsemän erilaista toimintoa, joilla saadaan lähetettyä eripituisia pulsseja transistorille. Toiminnot käynnistetään visuaalisesta käyttöliittymästä painiketta painamalla. Kun näppäintä painetaan, lähettää ohjelma ulostulojännitteen aktivointikäskyn sarjaporttia pitkin. Kontrolleri vastaanottaa käskyn ja kirjoittaa digitaalisen pinnin tilaksi 1, jolloin transistoriohjattu solenoidi vetää. Seuraavaksi ohjelma odottaa määrätyn ajan, kunnes lähettää ulostulojännitteen nollauskäskyn. Kontrolleri vastaanottaa käskyn ja nolaa transistoria ohjaavan digitaalitulon, palauttaen solenoidin nollasentoonsa. Säättämällä ohjelman odotusaikaa käskyjen välillä saadaan säädettyä solenoidin pulssinleveyttä.

Kuvassa 10 on ensimmäisen prototyypin käyttöliittymä, johon tehtiin seitsemän toimintoa. Painikkeet 1 - 6 lähettävät 5 - 20 millisekunnin pituisen pulssin solenoidille. Painike 7 lähettää 30 peräkkäisen pulssin sekvenssin, nostaen pulssinleveyttä yhdestä millisekunnista kolmeen kymmeneen.



*KUVA 10. Pulssigeneraattorin ensimmäinen käyttöliittymä*

### 6.3 Prototyypin arviointi ja pohdinta

Prototyypin tavoitteena oli kehittää yksinkertainen sulautettu järjestelmä, jolla syöttövirran pulssinleveyttä muuttamalla vaikutettaisiin solenoidin iskun voimakkuuteen. Tuloksena oli yksinkertainen elektroniikka, pulssigeneraattori ja sitä ohjaava käyttöliittymä, jotka ajoivat asiansa hyvin. Prototyypillä saatiin selville, että säätämällä pulssinleveyttä, solenoidin iskun voimakkuudessa oli havaittavissa selvä muutos. Koska tavoitteena oli saada vain käsitys iskuvoiman muutoksesta, ei iskuvoiman tarkkaa mittaamista koettu tässä vaiheessa vielä tarpeelliseksi. Voiman muutos oli hyvin havaittavissa tuntoaistilla.

Prototyyppi saatiin tuotettua lyhyessä ajassa ja se antoi hyvän käsityksen siitä, että yksinkertainen solenoidi soveltuu aktuaattoriksi, kun siltä vaaditaan säädettävyyttä ja nopeutta. Prototyypissä käytettiin solenoidin virtalähteenä 12 voltin tasavirtalähdettä. Koska solenoidin voimakkuuteen vaikuttaa pulssinleveyden lisäksi sen saaman jännitteen määrä, voidaan myös säädettävällä virtalähteellä vaikuttaa lyöntivoimaan.

## 7 SUUNNITTELU

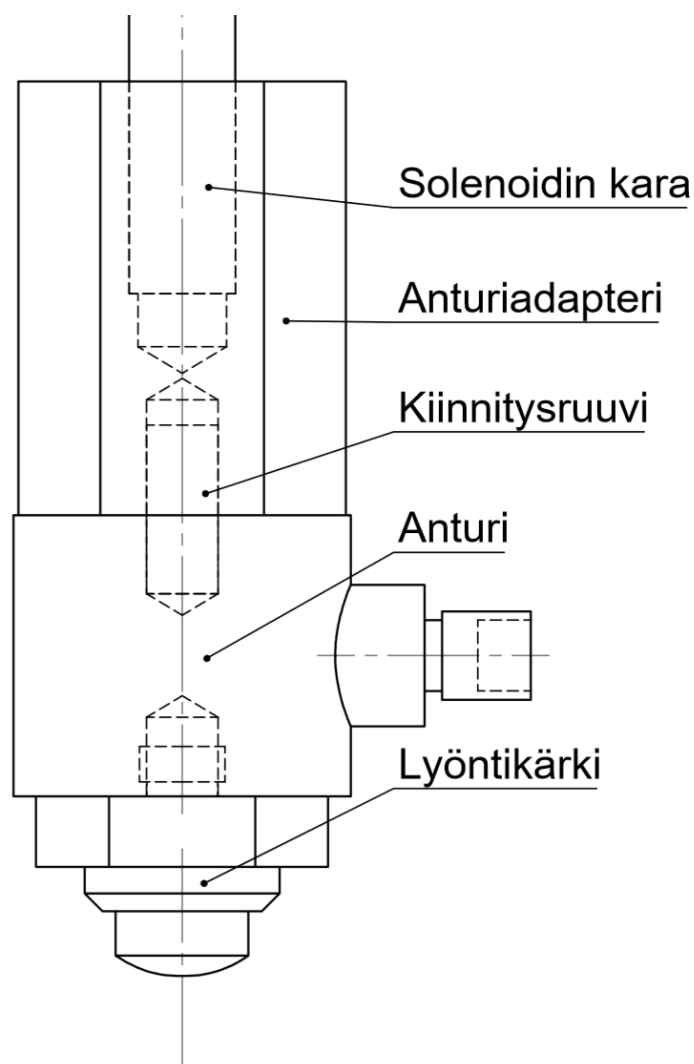
Koska ensimmäinen prototyyppi validoi solenoidin käytön aktuaattorina, päätettiin lopullinen toteutustapa varmentaa toisella prototyypillä. Tavoitteena oli valmistaa prototyyppi, joka pienillä muutoksilla olisi mahdollista skaalata lopulliseksi testilaitteeksi. Jotta aktuaattorin lyöntivoimakkuus saadaan säädettyä halutulle tasolle, otettiin toiseen prototyyppiin mukaan voima-anturointi sekä säädettävä virtalähde.

### 7.1 Voima-anturin valinta

Koska lyönnin voimakkuutta oli seurattava testauksen aikana, oli löydettävä sovellukseen sopiva voima-anturi. Anturi suunniteltiin asennettavaksi solenoidin karan ja lyöntikärjen väliin kuvan 11 mukaisesti. Anturille asetettuja vaatimuksia olivat

- korkea mittaustaajuus
- mittaalue vähintään 0 – 1 000 N
- soveltuvuus dynaamisen kuormituksen mittaukseen
- pieni koko
- keveys
- kierrereiät
- liikettä kestävä kaapeli.

Voima-antureita on useita erilaisia, mutta tämän sovelluksen vaatimukset täyttivät parhaiten kaksi anturityyppiä, esivahvistetut pietsosähköiset anturit sekä venymäliuskaan perustuvat anturit. Näiden kahden tyyppin ominaisuuksia vertailtiin ennen anturin valintaa.

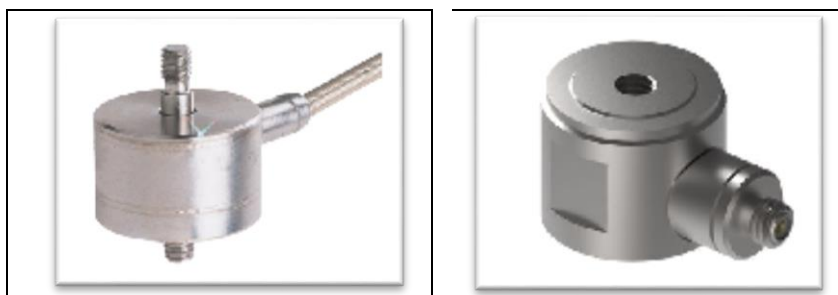


KUVA 11. Anturin asennus

### 7.1.1 Piettosähköisten- ja venymäliuskaan perustuvien anturien vertailu

Sekä venymäliuskaan perustuvia antureita että pietsosähköisiä antureita on saatavana kompakteina ja kevyinä malleina, jotka on mahdollista kiinnittää solenoidin karan päähän. Anturityyppien mittausalueet ovat hyvin laajalti asiakkaan määriteltävissä. Taulukossa 2 on vertailtu Omegan LCMFD-1KN -venymäliuska-anturia sekä Dytranin 1053V4 ICP-tyyppistä pietsoanturia. Taulukosta näkyy, että pietsoanturin mittausalue on huomattavasti Omegan mallia suurempi. Lisäksi ulostulosignaali on esivahvistetulla pietsoanturilla parempi, sillä Omegan antama millivoltitason signaali on vahvistettava. Näiden seikkojen takia vasaralaitteessa päädyttiin käyttämään Dytranin anturia.

TAULUKKO 2. Voima-anturien vertailu (18, 19)



Malli	Omega LCMFD1-1KN	Dytran 1053V4
Tyyppi	Venymäliuskaan perustuva	Pietsosähköinen, esivahvistettu
Soveltuvuus	Staattiset ja dynaamiset voimat	Dynaamiset voimat
Mittausalue	0 - 1000 N	0 - 2224 N
Paino	68 g	28 g
Lineaarisuus	0,05 %	1 %
Mittaustaajuus	4 kHz	75 kHz
Liitäntä	4-wire	10–32 koaksiaali
Ulostulosignaali	0 - 20 mV	0 - 5 V

### 7.1.2 Signaalinmuokkaus ja vahvistus

Kuten aiemmin mainittu, esivahvistetut pietsosähköiset anturit tarvitsevat vakio-virtalähteen, joka poistaa esivahvistimen käyttämän bias-jännitteen. Valittu anturi toimii 18 - 30 V tasavirralla ja sen bias-jännite on noin 7,5 - 9,5 V tasavirtaa. Virtalähteeksi valittiin kuvan 12 mukainen Hansford Sensorsin HS-551. Virtalähde on yksikanavainen, se on varustettu ruuviliitännöillä ja se on asennettava DIN-kiskoon. Anturiulostulo on saatavissa ruuviliittimen lisäksi BNC-liittimen kautta. (20.) Lopullisessa testilaitteessa käytetään useampikanavaista virtalähdettä, sillä käytössä on useita antureita samaan aikaan.



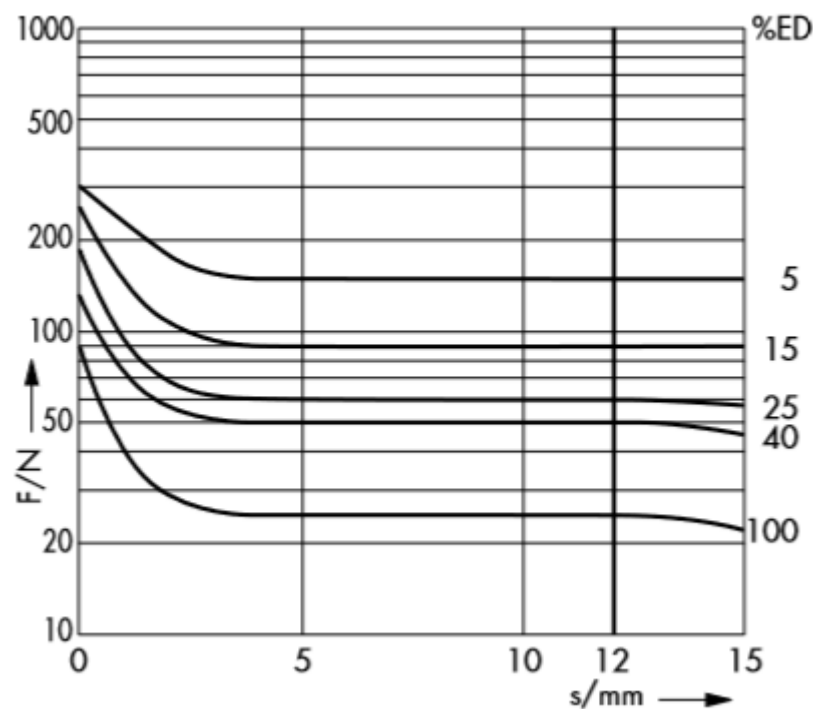
*KUVA 12. Anturin tasavirtalähde (20)*

## **7.2 Solenoidin valinta**

Seuraavaksi valittiin vasarointiin sopiva solenoidi. Vaatimuksina olivat riittävän suuri voima, hyvät asennusmahdollisuudet sekä kestävä rakenne. Kaupallisten solenoidien määrä markkinoilla on valtava, mutta datalehtiä tutkimalla selvisi, että suurin osa niistä on liian heikkoja. Solenoidien datalehdissä on usein kuvan kolmetoista mukainen voima-iskunpituus-kaavio, josta selviää solenoidin työntövoima iskunpituuden eri vaiheissa. Työntövoima on kuitenkin eri asia kuin anturista saatava voiman arvo. Jos iskun kesto on millisekuntien luokkaa, on iskun voima huomattavasti suurempi kuin jatkuva, staattinen voima, jonka työntövoima tuottaa. (21.)

Solenoidit tilattiin koon ja painon mukaan niin, että ne sopisivat käytettäväksi lopullisessa laitteessa. Tarkoituksena oli testata solenoideja käytännön kokeilla voima-anturin kanssa ja laskemalla solenoidille annettavaa jännitettä, jos voima olisi liian suuri. Valitut solenoidit olivat Impulse Automationin valmistamia, pyöreäprofiilisia solenoideja, joiden halkaisijat olivat 60 mm ja 50 mm. Suuremman solenoidin iskunpituus oli 15 mm ja pienemmän 10 mm. Valittuihin solenoideihin otettiin mukaan helpon asennuksen mahdollistavat laipat.

Solenoideille piti lisäksi valita haluttu käyttösuhde. Käyttösuhteella tarkoitetaan sitä suhdetta, kuinka pitkään solenoidia voidaan pitää jännitteisenä tietyn ajanjakson aikana. Jos tuo aika ylittyy toistuvasti, voi solenoidi kuumentua tai vahingoittua. Kuten kuvasta 13 nähdään, on käyttösuhteella kuitenkin merkittävä vaikutus solenoidin tuottamaan voimaan. Käyttösuhteeksi valittiin 5 %, sillä vasaorin sovellutuksessa solenoidia aktivoidaan vain kymmenien millisekuntien ajaksi kerrallaan. (16.)



KUVA 13. Voima-iskunpituus-kaavio (22)

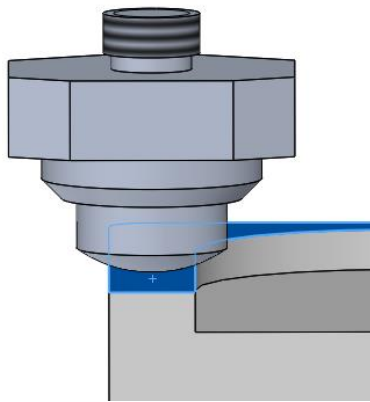
### 7.3 Lyöntikärki

Työn tilaajan vaatimuksena oli, ettei laitteen testaus vahingoita testattavaa tuotetta. Lyöntikärjen materiaaliksi tilaaja toivoi nylonia. Koska lyötävä alue oli hyvin kapea, valittiin lyöntikärki sen mukaan. Vaatimuksena oli, että kohdealueen ympärillä olevat komponentit ja osat eivät altistuisi iskulle.

Lyöntikärjeksi valittiin anturivalmistaja Dytranin tarjoama lyöntikärki 6250PT, sillä se oli suoraan yhteensopiva anturin kanssa. Lyöntikärjessä on tuumainen hienokierre 10–32 ja anturissa on samaa kokoa oleva kierrereikä. (23.) Kuten



kuvasta 14 nähdään, on lyöntikärki juuri sopivan kokoinen, kun sinisellä korostettu alue on lyöntialue. Kärjen materiaaliksi valittiin Delrin, joka on polyasetalin kaupp nimi. Vaihtoehtona oli myös pehmeämpi polyuretaani, mutta Delrin valittiin, koska se mahdollistaa suuremman lyöntivoiman pienemmän joustavuutensa ansiosta. Nylon ja polyasetali ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyvin samanlaisia ja niitä käytetään sovelluksissa, joissa tarvitaan mekaanista kestävyttä kuten hammasrattaissa, rullissa sekä venttiileissä. (24.)



KUVA 14. Lyöntikärki ja lyöntialue

#### 7.4 Anturitiedon lukeminen ja tallentaminen

Voima-anturien valinnan jälkeen tarkasteltiin, kuinka anturin lähettämää tietoa voitaisiin parhaiten lukea ja tallentaa sekä syöttää tietokoneohjelmaan. Esivahvistetun pietsosähköisen voima-anturin lähettämä signaali on luokkaa 0 - 5 V, joka on luettavissa esimerkiksi oskilloskoopin kautta.

Koska anturin mittaustaaajuus on korkea, vaadittiin mittauslaitteeltakin suurta kaistanleveyttä. Korkea mittaustaaajuus oli tärkeää säilyttää, sillä solenoidin isku tuottaa lyhyen, vain muutaman millisekunnin kestoisen analogiasignaalin. Anturin lähettämälle signaalille oli lisäksi tehtävä diskreetointi, eli analogisen signaalin muuttaminen digitaaliseksi, jotta anturin lähettämä data saataisiin syötettyä tietokoneohjelman parametriksi.

Anturisignaalin näytteenottolaitteeksi valittiin Saleaen valmistama Logic Pro 16, joka on logiikka-analysaattorin ja oskilloskoopin yhdistelmä. Laite kytketään tietokoneen USB-porttiin ja anturin signaali kytketään yhteen laitteen kuudesta toista mittaportista. Laitteen speksit täyttivät mittaussovelluksen vaatimukset hyvin, sillä Saleae Logic Pro 16 käsittelee analogiasignaaleja 50 MS/s eli 50 000 000 näytettä sekunnissa, kun taas voima-anturin lähettämä signaali on 75 kHz. Laitteessa on 16 kanavaa, joka riittää hyvin useammankin vasaran anturitiedon tallentamiseen. Saleae tukee lisäksi neljää erilaista datan export-formaattia, joten data saadaan syötettyä tietokoneohjelmalle erilaisilla tavoilla. Saleae saadaan osaksi automaatiojärjestelmää sen automaatorajapinnan avulla. (25.)

Automaattinen iskuvasaralaitte suunniteltiin testaamaan RF-suodatinta, jota lyödään kuuteentoista eri paikkaan. Tällöin iskuvasaroita on laitteessa kuusitoista kappaletta. Koska logiikka-analysaattori ei ole tarkoitettu jatkuvaan mittaamiseen, pitää sen mittausjakso triggata eli laukaista juuri ennen iskua. Tällöin käytetään mittausjakson laukaisemiseen digitaalista triggauskanavaa. Triggauskanava kytketään vasaralaitetta ohjaavan mikrokontrollerin digitaalituloon, jolloin lyöntikäsky saa triggauskanavan kytkemään logiikka-analysaattorin mittauksen päälle. Koska jokaisen voima-anturin signaali vaatii yhden logiikka-analysaattorin analogiakanavan, ovat logiikka-analysaattorin kaikki kanavat käytössä. Tämän takia 16 vasarainen testilaitte vaatii kaksi rinnakkaista Logic Pro 16:sta. Tällöin toinen logiikka-analysaattori mittaa antureita ja toinen laukaisee ne.

## 7.5 Ohjaus

Vasaralaitteen ohjaus toteutettiin samalla tavalla kuin ensimmäisessä prototyyppissä, mutta pienillä muutoksilla. Ohjelmaan lisättiin tekstikenttä, johon syötetään haluttu pulssinleveyden arvo. Tämän jälkeen laite toteuttaa iskun halutulla voimakkuudella. Ohjelman graafista ulkoasua myös parannettiin, kuten kuvasta 15 näkyy. Ohjelmaan lisättiin kaksi erilaista sekvenssiä, joista toinen iskee useita iskuja peräkkäin, nostaen jokaisen iskun jälkeen pulssinleveyttä yhdellä

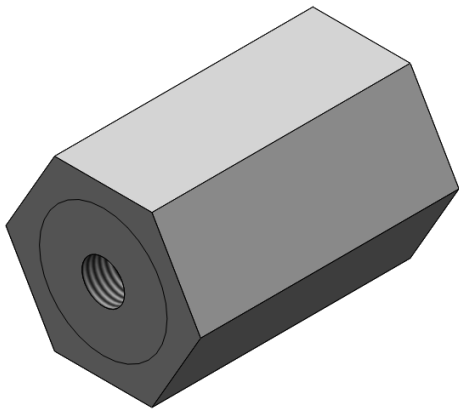
millisekunnilla. Toinen sekvenssi iskee kenttään syötetyllä pulssinleveyden arvolla viisi kertaa. Käyttöliittymän alalaitaan lisättiin infokenttä, joka kertoo valitun pulssinleveyden tai valitun sekvenssin toimintaperiaatteen.



*KUVA 15. Iskuvasaralaitteen käyttöliittymä*

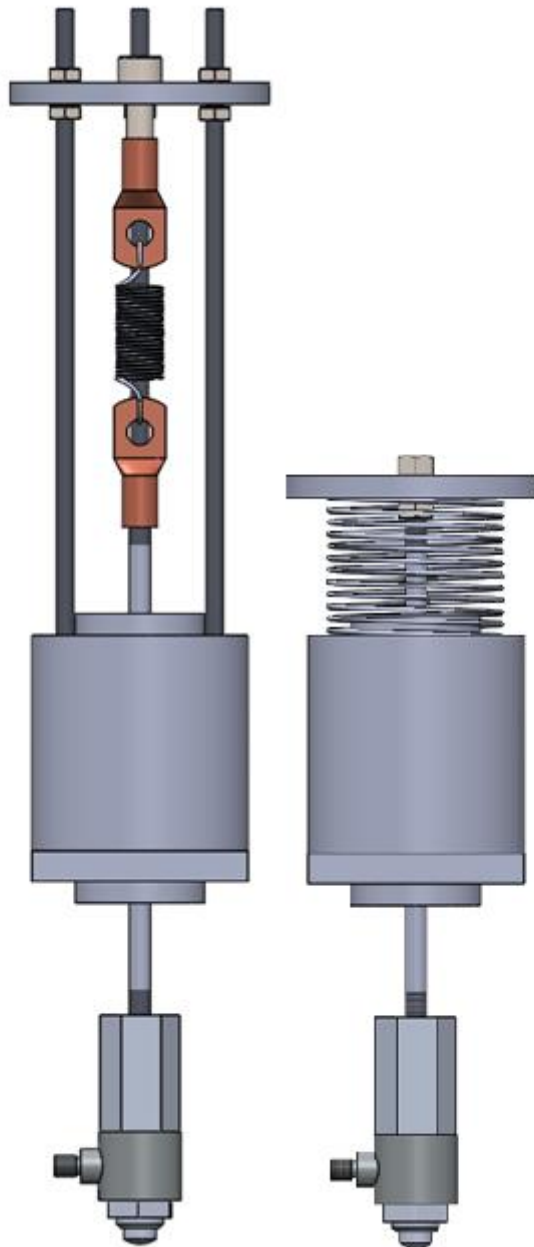
## 8 MEKANIKKASUUNNITTELU

Automaattisen vasaralaitteen mekaniikkasuunnittelu aloitettiin suunnittelemalla yhden solenoidin alikokoonpano. Ensin mallinnettiin solenoidit, anturi sekä lyöntikärki. Tämän jälkeen suunniteltiin kuvan 16 mukainen adapteriosa, joka yhdistää solenoidin karan anturiin. Adapteri muotoiltiin kuusikulmaiseksi, jotta osan asentaminen ja kunnossapito helpottuisivat. Anturin kunnollinen asennus on ensisijaisen tärkeää, jotta sen antama anturitieto on luotettavaa. Adapteri suunniteltiin täyttämään anturivalmistajan asettamat vaatimukset asennuspinnalle. Vaatimukset koskivat asennuspinta-alaa, tasaisuusehtoa sekä pinnan työstötappaa. Materiaalina käytettiin ruostumatonta terästä, sillä alumiininen osa voisi kuluä käytössä ja näin anturin asennus voisi olla epäluotettava.



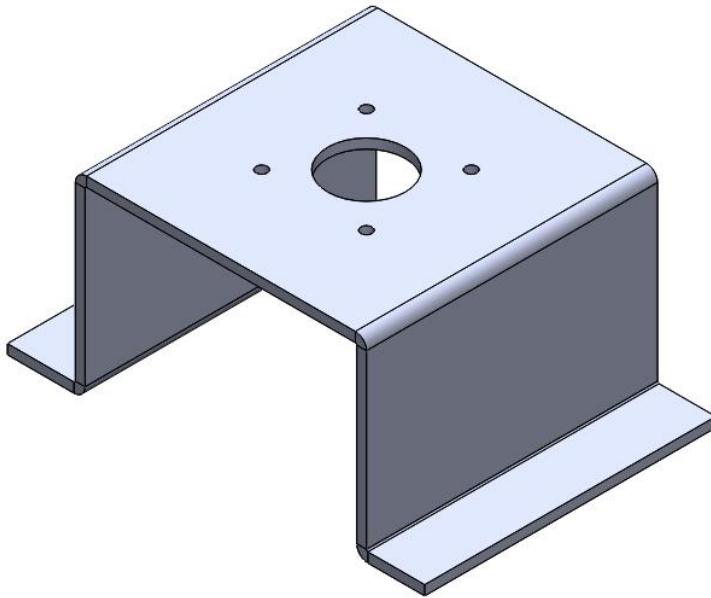
*KUVA 16. Anturiadapteri*

Seuraavaksi suunniteltiin solenoidin karan palautusmekanismi. Sekä puristus- että vetojousia harkittiin. Kuvassa 17 on vertailtuna molemmat jouset. Vetojousi suunniteltiin asennettavaksi kolmen kierretangon avulla niin, että palautusmekanismi olisi säädettävissä.



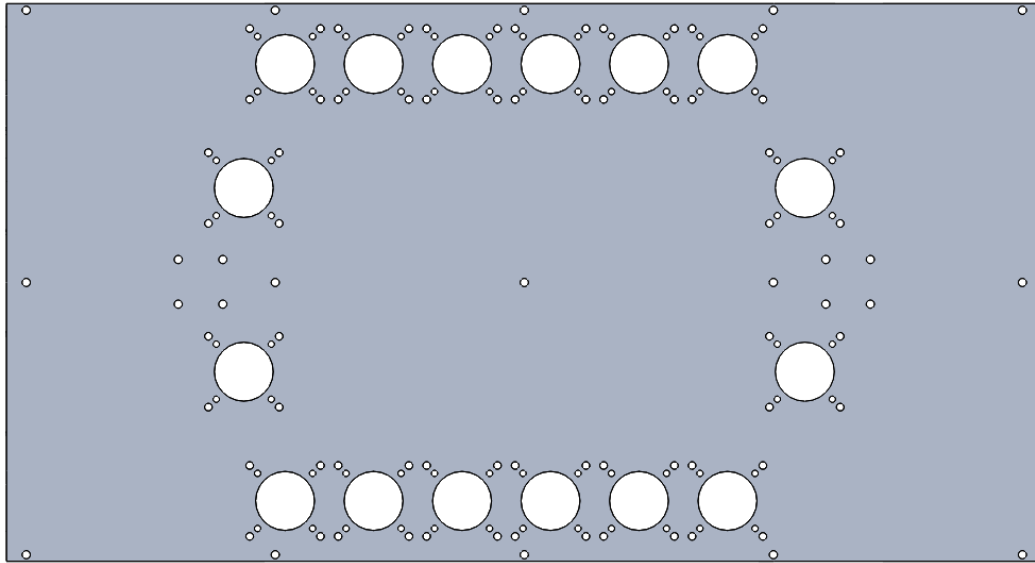
*KUVA 17. Palautusjouset*

Seuraavaksi suunniteltiin laitteen runko. Ensin ajatuksena oli toteuttaa kuvan 18 mukainen yksinkertainen, ohutlevystä valmistettu runko, joka olisi asennettavissa puristimilla tavalliselle pöydälle. Tämän rungon etuina olisivat olleet edullisuus sekä nopea valmistus. Rungon heikkoutena olisi ollut ohutlevyn jousto, joka olisi vaikuttanut lyönnin voimakkuuteen.



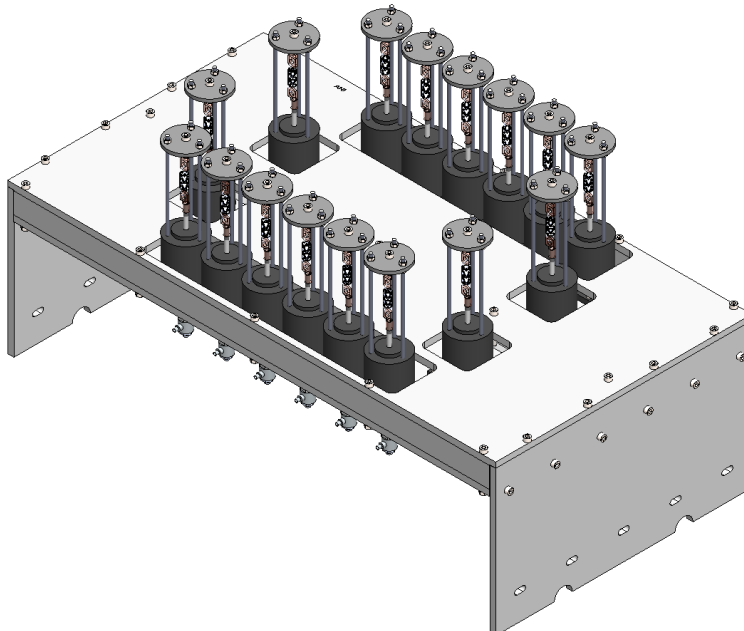
*KUVA 18. Ohutlevyrunkoprototyyppi*

Lopulta laite suunniteltiin kuitenkin asennettavaksi työn tilaajan käyttämään alumiiniprofiileista valmistettuun testauslaitekaappiin. Näin prototyyppi olisi lähempänä laitteen lopullista toteutusta ja ylimääräisistä joustoista päästäisiin eroon. Rungon suunnittelussa pääpaino oli vasaroiden asemoinnilla. Laitekaappi oli vasaralaitteelle varattu, joten tilaa oli riittävästi. Tilaaja oli määrittänyt testattavasta tuotteesta pisteet, mihin lyöntien haluttiin kohdistuvan. Tämä toteutettiin suunnittelemalla kuvan 19 mukainen solenoidien asennuslevy, joka tehtiin tuotekohtaiseksi. Koska prototyypissä käytettiin kahta erilaista solenoidia, tehtiin asennuslevy sopivaksi molemmille tyypeille.



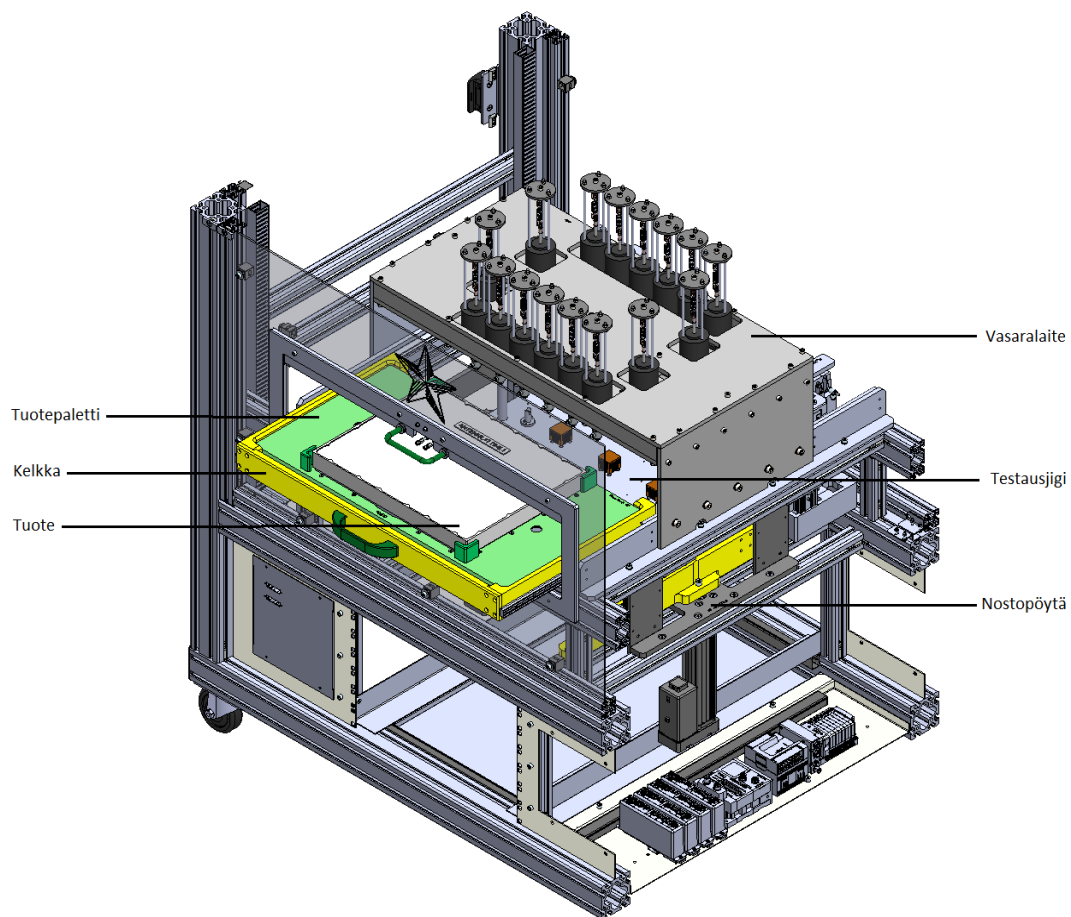
KUVA 19. Solenoidien asennuslevy

Asennuslevy vahvistettiin kolmella jäykistelevyllä, jotka tulevat asennuslevyn ja päällylevyn väliin. Päällylevyyn suunniteltiin solenoidin vaihtoa helpottavat reiät. Kaikki levyt työstettiin 10 mm alumiinilevystä jysimällä. Kuvassa 20 näkyy vasaralaitteen rungon lopullinen toteutus.



KUVA 20. Vasaralaitteen runko

Leikkauskuvassa 21 vasaralaite on testilaittekaapissa. Runko on varustettu liukukiskoilla liikkuvalla kelkalla, johon tuotekohtainen paletti asetetaan. Paletin tehtävänä on alustavasti kohdistaa testattava tuote, mutta palettia vaihtamalla se mahdollistaa myös erimuotoisten tuotteiden käytön. Kelkan alla on tuotekohtainen testausjigi, joka nousee kahden sähköisen lineaariyksikön avulla. Nouseessaan testausjigi ottaa tuotepaletin mukaansa ja nousee vasaralaitteen alle, joka on asennettu liukukiskojen päälle. Jigi kohdistaa ja lukitsee testattavan tuotteen paikalleen niin, että testaus voidaan suorittaa.

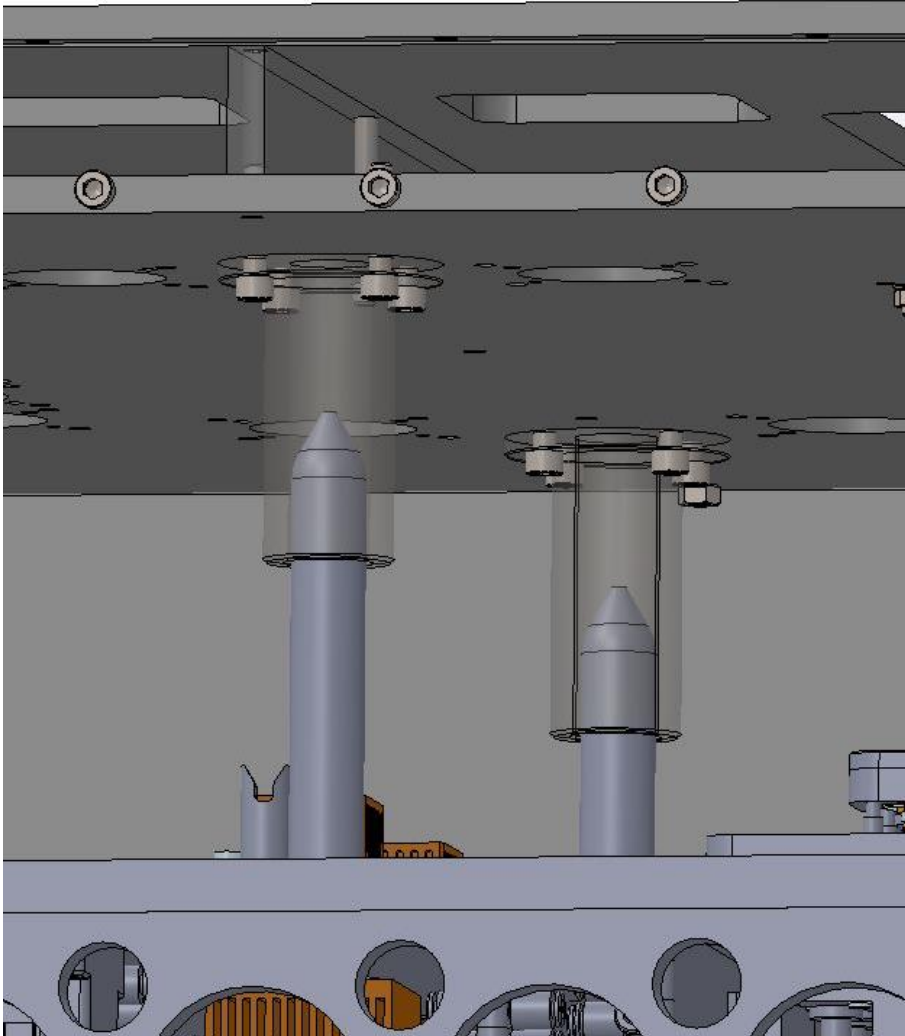


*KUVA 21. Vasaralaite testauslaittekaapissa*

Vasaralaitteen alta nousevan jigin paikoitus laiterunkoon tehtiin kahdella paikoitustapilla. Ne kohdistuvat laitteen rungossa oleviin kahteen paikoitusputkeen, kuva 22. Toinen putkista on pyöreä, toinen ellipsi. Pyöreän putken tehtävänä on paikoittaa jigi laiterunkoon. Ellipsimäisen putken tehtävänä on pitää jigi sekä



runko toisiinsa nähden samansuuntaisina. Koska paikoitusosat altistuvat kohtuullisen suurelle mekaaniselle rasitukselle, valmistettiin ne ruostumattomasta teräksestä.



*KUVA 22. Jigin paikoitus laiterunkoon*

Laitteen kokoonpano suoritettiin työn tilaajan tiloissa. Kokoonpano aloitettiin solenoidien alikokoonpanoista, jonka jälkeen asennettiin laiterunko. Seuraavaksi solenoidit asennettiin elektroniikkaan ja käytännön testaus aloitettiin.

## 9 TESTAUS JA ANALYYSI

### 9.1 Pulssinleveyden suhde lyöntivoimaan

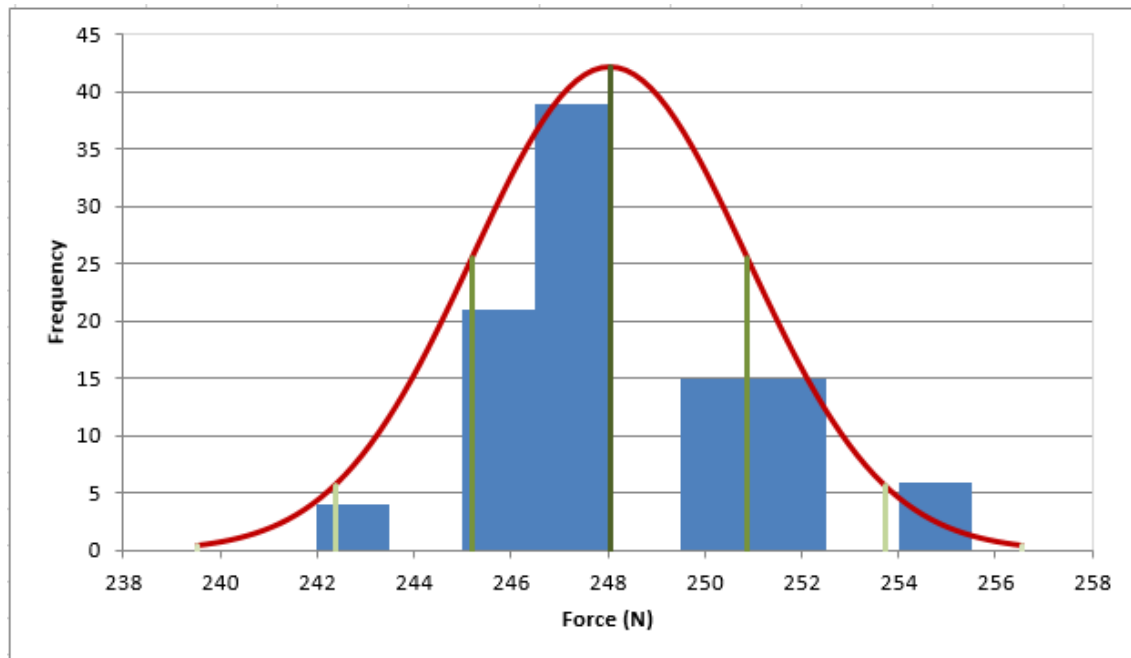
Lopuksi vasaralaitteelle suoritettiin käytännön testit. Ensimmäisessä testissä tarkoituksena oli tutkia pulssinleveyden suhdetta lyöntivoimaan. Solenoideille annettua pulssinleveyttä kasvatettiin, kunnes iskun voima saturoitui. Voima-anturin jännitesignaalin huippuarvo luettiin kalibroidulta oskilloskoopilta. Jokaisella pulssinleveyden arvolla mitattiin kolmen iskun anturilukemat. Sama testi toistettiin vielä muuttamalla solenoidille annettua jännitettä. Testi toistettiin molemmalle solenoidille, liitteessä 2 on pienemmän solenoidin tulokset ja liitteessä 3 isomman solenoidin tulokset. Pienemmällä solenoidilla saavutettiin 480 newtonin lyöntivoima 15 millisekunnin pulssinleveydellä, jännitteen ollessa 28 voltia tasavirtaa. Suuremmalla solenoidilla saavutettiin 1 454 newtonin lyöntivoima 14 millisekunnin pulssinleveydellä, jännitteen ollessa 24 voltia tasavirtaa.

Tulokset olivat hyviä, sillä voima nousi lyhyin askelin. Tällöin, etenkin käyttämällä säädettävää virtalähdettä, voidaan lyöntivoimaa säätää lähes portaattomasti. Voima-pulssinleveys-käyrät olivat myös hyvin lineaarisia.

### 9.2 Toistettavuus

Liitteiden 4 ja 5 testeissä mitattiin iskuvoiman toistettavuutta. Liitteen 4 testissä toistettavuutta tutkittiin testillä, jossa saman vahvuinen isku toistettiin 100 kertaa, 10 iskun sarjoissa. Voima-anturin lukema luettiin joka lyönnistä Saleae lo-giikka-analysaattorin avulla. Liitteen 5 testissä saman vahvuinen isku toistettiin kaksituhatta kertaa, mitaten voima-anturin lukema joka kahdessadas lyönti. Testien datan perusteella voitiin kummallekin otannalle laskea keskihajonta. Keskihajonta mittaa havaintoarvojen hajaantumista muuttujan jakauman keskikohdan ympärille. Kuvassa 23 on sadan iskun testin histogrammi sekä normaalijakauman käyrä.

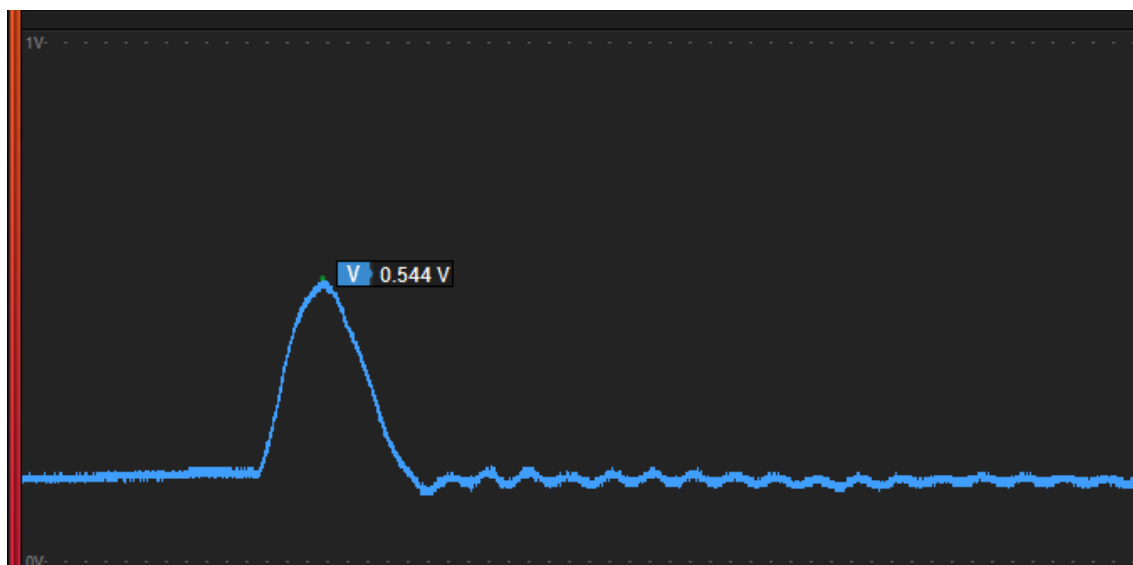
Toistettavuustestien tulokset yllättivät tasaisuudellaan. Sadan iskun testissä suurin ero keskiarvosta oli 6 newtonia, kun taas kahdentuhannen iskun testissä suurin ero keskiarvosta oli vain 5 newtonia. Tämä tarkoittaa kahden prosentin eroa lyöntivoimien keskiarvosta, jota voidaan pitää hyvänä tuloksena.



KUVA 23. Lyöntivoimien histogrammi ja normaalijakauma

### 9.3 Voima-anturin signaalin tarkastelu

Kuvan 24 voima-anturin analogiasignaalia tutkiessa voidaan todeta, että anturin asennus ja sijoitus onnistuivat hyvin. Voima-anturi tuottaa tasaisen aallon lyöntikärjen iskiessä testattavaan tuotteeseen eikä minkäänlaisia häiriöpiikkejä synny, jolloin voiman huippuarvo on helposti luettavissa. Iskun jälkeen voima-anturin tulo resonoi hetken, kunnes palaa nollatilaansa. Analogiasignaalin tulkitsemiseen valittu Saleae Logic Pro 16 palveli tarkoitustaan hyvin oskilloskoopin kaltaisena mittalaitteena.

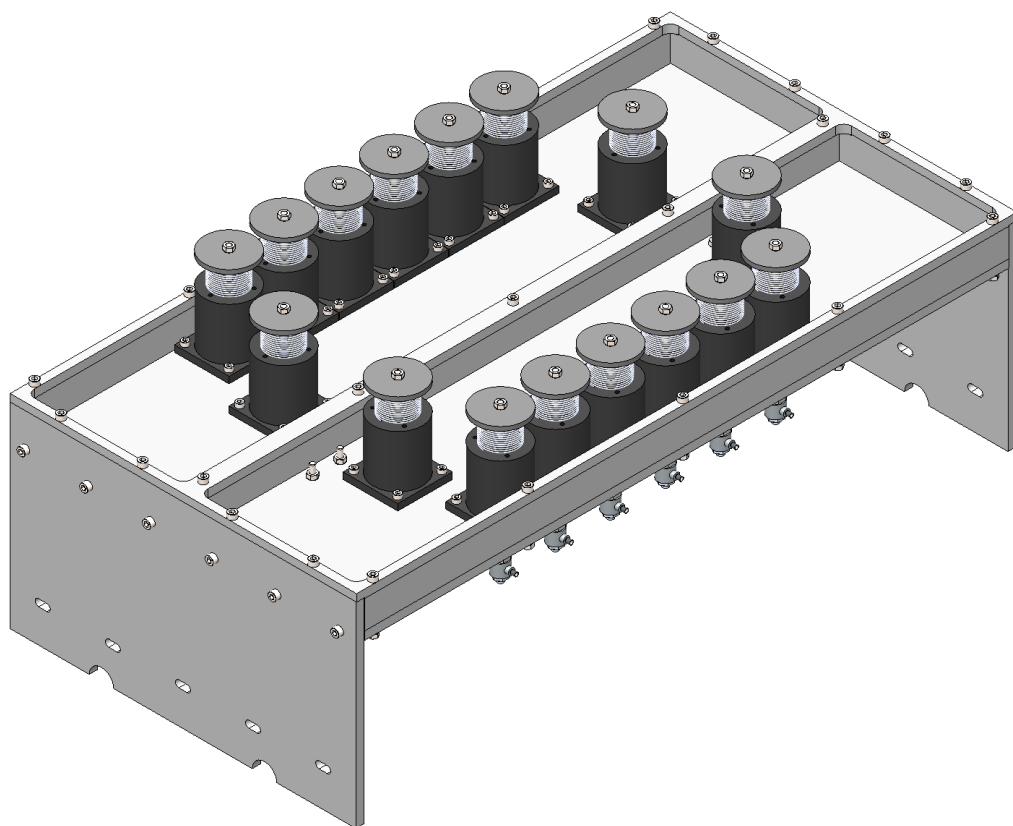


*KUVA 24. Voima-anturin analogiasignaali logiikka-analysaattorissa*

## 10 JATKOKEHITYS

Iskuvasaralaitteen prototyyppi osoittautui käytännön kokeiden kautta hyväksi tavaksi toteuttaa tuotteen vasarointi. Laitteen suorituskyky täytti sille asetetut vaatimukset ja osaksi myös ylitti ne. Suunnittelun jälkeen mieleen tuli ajatuksia, kuinka laitetta voisi kehittää jatkossa. Ulkonäköseikkana lieriökantaiset ruuvit voisi korvata uppokantaisilla ruuveilla. Lisäksi solenoidien, paikoitusosien sekä jäykistelevyjen ruuvi-mutteriliitokset voisi korvata kierrerei'illä. Rungon ylälevyn asennusreiät olisi voinut suunnitella vielä suuremmiksi, kuten esimerkiksi kuvan 25 mukaisesti. Tällöin solenoidien vaihtaminen helpottuisi. Lisäksi anturien- sekä solenoidien johdoille tulee tehdä jäykistelevyihin tai sivulevyihin läpiviennit lopullisen laitekaappilayoutin selvittyä. Solenoidin palautusmekanismi olisi parempi toteuttaa puristusjousella, kuten kuvassa 25, jolloin laitteen korkeus las- kisi noin 100 mm.

Koska vasaralaitteen tuottaman lyöntivoiman toistettavuus oli hyvä, voidaan laitteesta kehittää jatkossa myös versio, jossa voima-anturit eivät ole kiinteänä osana laitetta. Laite voitaisiin säännöllisesti kalibroida kalibrointikappaleella, jossa itsessään olisi voima-anturit. Tällainen ratkaisu ei vaatisi jokaiselta järjestelmältä omia voima-antureita, vaan niitä voitaisiin kierrättää useamman järjestelmän kesken. Näin sekä laitekohtaiset kustannukset että anturien kalibrointikustannukset vähenisivät.



*KUVA 25. Laitteen kehitysehdotus*

## 11 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä suunniteltiin ja valmistettiin automaattinen iskuvasaralaite RF-suodattimien tuotannon testauksen käyttöön. Testauslaite tulee osaksi täysin automatisoitua teollisuusrobotin käyttämää testaus- sekä virityslinjastoa.

Työn alussa tutkittiin tuotteen testausta ja siihen liittyvää teoriaa sekä kartoitettiin erilaisia voima-anturityyppejä. Tämän jälkeen tuotteen testaustapa kehitettiin ja todistettiin proof-of-concept-prototyypin avulla. Tämän jälkeen valittiin toimi- sekä mittalaitteet ja suunniteltiin laitteen mekaniikka. Laitteelle kehitettiin tietokoneohjaus, joka mahdollisti laitteen käytännön testauksen. Testauksessa tutkittiin laitteen suorituskykyä sekä toistettavuutta. Testitulokset dokumentoitiin ja analysoitiin. Mekaniikkasuunnittelussa käytettiin SolidWorks 2015 -ohjelmaa, laitteen ohjaus toteutettiin Arduino-mikrokontrolleria sekä Visual Studio -ohjelmaa käyttäen.

Työ oli kokonaisuudessaan hyvin mielenkiintoinen toteuttaa ja monipuolisuutta ja sekä haastavuutta riitti. Opinnäytetyön tavoitteet täytettiin ja osaksi myös ylitettiin. Mekaniikka oli toimiva ja voima-anturin analogiasignaalin tasainen käyrä kertoi voiman johtuvan oikein mittalaitteelle. Laitteen käytännön testit yllättivät positiivisesti, sillä vasaran tuottaman lyöntivoiman toistettavuus oli todella hyvä. Lyöntivoiman varianssi oli vain kolme prosenttia, vaikka iskuja toistettiin pari tuhatta peräkkäin. Projektin onnistumisesta kertoo myös se, että työn tilaaja otti laitteen testauksen käyttöön ja aloitti sen jatkokehityksen.

## LÄHTEET

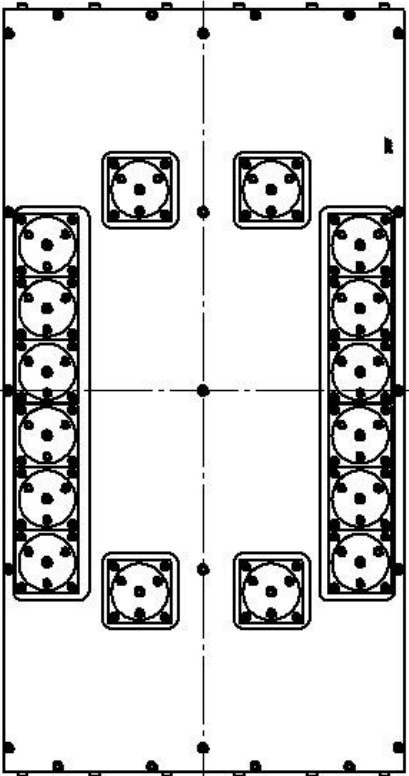
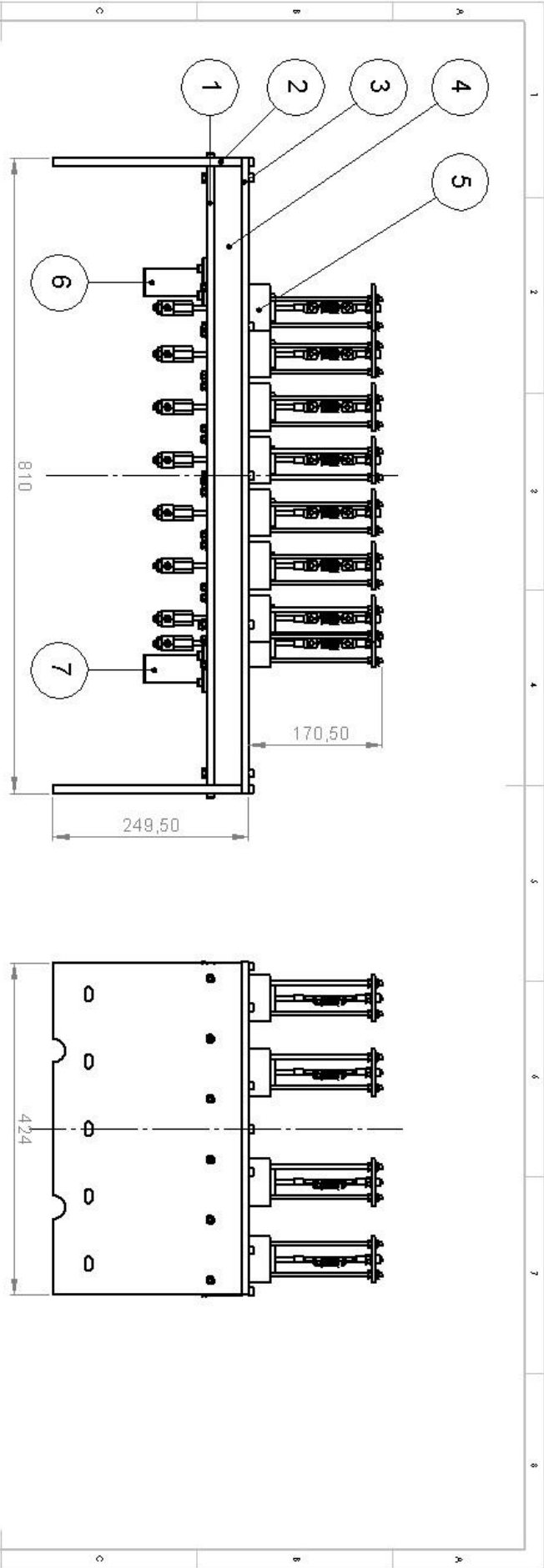
1. Räisänen, Antti – Lehto, Arto 2007. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Ota-tieto.
2. Räisänen, Antti – Lehto, Arto 2006. RF- ja mikroaaltotekniikka. Helsinki: Ota-tieto.
3. RF filter basics tutorial. 2016. Radio-electronics.com. Saatavissa: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/rf-filters/rf-filter-basics-tutorial.php>. Hakupäivä 16.9.2016.
4. Niemi, Pentti 2015. PIM – Antenniverkkojen häiriö. Orbis Oy. Saatavissa: <http://www.orbis.fi/blogi/pim-%E2%80%93-antenniverkkojen-h%C3%A4irikk%C3%B6>. Hakupäivä 16.9.2016.
5. Understanding PIM. 2016. Anritsu Corporation. Saatavissa: <http://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/solutions/en-us/Understanding-PIM#>. Hakupäivä 16.9.2016.
6. Metz, Robert 2007. Impact and Drop Testing with ICP® Force Sensors. Sound and Vibration. Helmikuu 2007. S. 18–20. Saatavissa: <http://www.sandv.com/downloads/0702metz.pdf>. Hakupäivä 16.9.2016.
7. Fässler, Matthias 2010. Force Sensing Technologies. Saatavissa: [http://students.asl.ethz.ch/upl\\_pdf/231-report.pdf](http://students.asl.ethz.ch/upl_pdf/231-report.pdf). Hakupäivä 16.9.2016.
8. Anturit ja Kenttälaitteet, Helsingin ammatti-instituutti. 1997. Kurssimateriaali. Saatavissa: [http://personal.inet.fi/yritys/kkov.eduserver/yhteinen/anturitekniikka3\\_54\\_84.pdf](http://personal.inet.fi/yritys/kkov.eduserver/yhteinen/anturitekniikka3_54_84.pdf). Hakupäivä 16.9.2016.
9. Viitala, Jari 2014. T320303 Anturitekniikka 3 op. Opintojakson luentomateriaali syksyllä 2014. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
10. Force transducers based on strain gauges. HBM Test and Measurement. Saatavissa: <https://www.hbm.com/en/2636/force-transducers-based-on-strain-gauges/>. Hakupäivä 16.9.2016.



11. Kärhä, Petri 2006. Anturit ja mittausvahvistimet. Helsinki: Aalto-yliopisto.
12. Niinikoski, Virpi 2010. Elastomeerien sähkönjohtavuus. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos.
13. Signal Conditioning Basics for ICP® & Charge Output Sensors. PCB Piezotronics. Saatavissa: [http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/tech\\_signal](http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/tech_signal). Hakupäivä 16.9.2016.
14. IEPE Standard. Metra Mess- und Frequenztechnik. Saatavissa: [http://www.mmf.de/iepe\\_standard.htm](http://www.mmf.de/iepe_standard.htm). Hakupäivä 16.9.2016.
15. Sensor Sense: Piezoelectric Force Sensors. 2008. Artikkel. Machine Design. Saatavissa: <http://machinedesign.com/sensors/sensor-sense-piezoelectric-force-sensors>.
16. Linear Solenoid Actuator. 2013. Electronics Tutorials. Saatavissa: [http://www.electronics-tutorials.ws/io/io\\_6.html](http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_6.html). Hakupäivä 16.9.2016.
17. Norman – Jung – Ratcliffe – Crane – Davis 2012. Development of an Automated Impact Hammer for Modal Analysis of Structures. Victoria: DSTO Defence Science and Technology Organisation.
18. Subminiature tension or compression high accuracy load cells, LCFD/LCMFD Series. Datalehti. Omega Engineering.
19. Model 1053V4, IEPE Force Sensor. Datalehti. Dytran Instruments.
20. HS-551 Vibration Module. Datalehti. Hansford Sensors.
21. Allain, Rhett 2014. How do you estimate impact force? Saatavissa: <https://www.wired.com/2014/07/how-do-you-estimate-impact-force/>. Hakupäivä 16.9.2016.
22. RM060 Series Linear Solenoid Thrust and/or Pull Type. Datalehti. Impulse Automation.
23. Model 6250PT, Impact Tip. Datalehti. Dytran Instruments.

24. Kontio, Esa 2014. T312503 Muovituotetekniikka 3 op. Opintojakson luentomateriaali syksyllä 2014. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.


25. Saleae Logic Pro 16 USB Logic Analyzer. Datalehti. Saleae.




ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	P335103 01	Solenoid mounting plate	1
2	P335692 01	Impact tester support plate	2
3	P335695 01	Impact tester top plate	1
4	P335694 01	Impact tester stiffener	3
5		Solenoid assembly RM050	16
6	P335696 01	Locating round	1
7	P335697 01	Locating slot	1

Scale	ITEM CODE	Material	Title
ISO2768-X 1:5 A3			IMD Tapping module

PREP	AM	20.04.2016	
DES	AM	20.04.2016	
CHK			
APP			



DAMK  
DANSK AVANCEMENT I KØBENHAVN



Drawing code

## IMPACT TEST WITH LINEAR SOLENOID RM050

Date: 1.7.2016

Place: Oulu

Author: Artturi Mantila

Equipment: Keysight 5747 Power Supply, 60V, 12,5A, 750W

Dytran 1053V4, IEPE Force Sensor

Hansford Sensors HS-551 Vibration Module Power Supply

Agilent 54622D Mixed Signal Oscilloscope

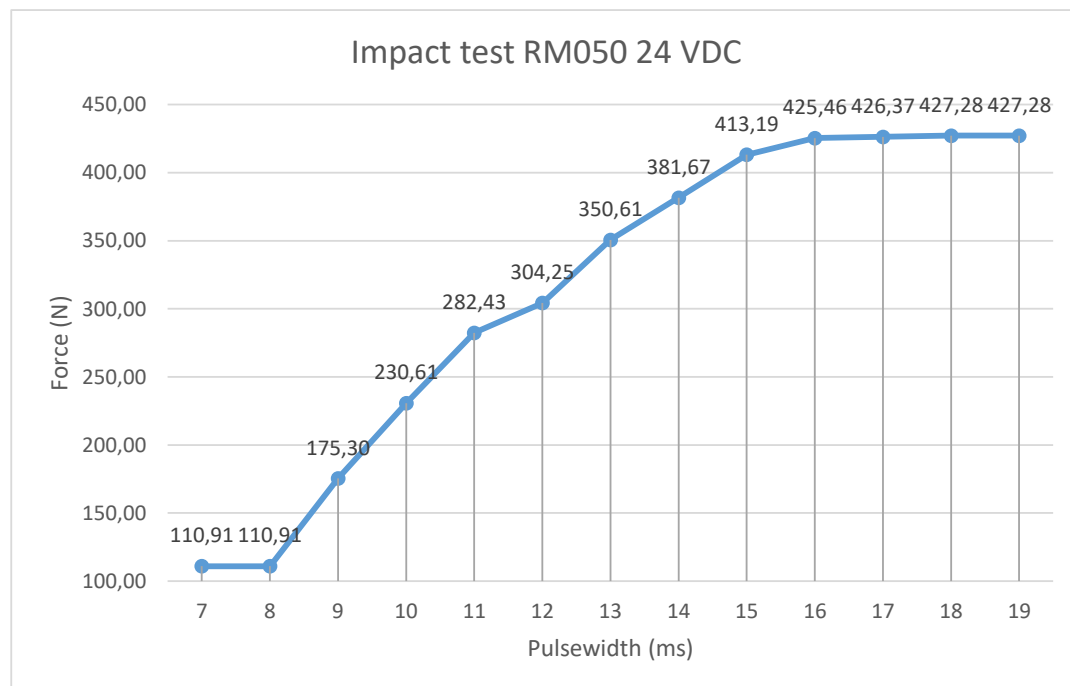
Arduino Uno Microcontroller

Voltage used: 24 VDC

Measurement: Peak voltage measurement for each impact. Three impacts per pulsewidth.

Pulsewidth is increased until peak voltage is saturated.

Pulsewidth (ms)	VP1 (V)	VP2 (V)	VP3 (V)	VP (V)	Force (N)
7	0,24	0,24	0,24	0,24	110,91
8	0,24	0,24	0,24	0,24	110,91
9	0,47	0,39	0,30	0,39	175,30
10	0,50	0,53	0,49	0,51	230,61
11	0,66	0,61	0,59	0,62	282,43
12	0,68	0,68	0,64	0,67	304,25
13	0,78	0,77	0,76	0,77	350,61
14	0,87	0,83	0,83	0,84	381,67
15	0,88	0,91	0,93	0,91	413,19
16	0,94	0,94	0,93	0,94	425,46
17	0,94	0,94	0,94	0,94	426,37
18	0,94	0,94	0,94	0,94	427,28
19	0,94	0,94	0,94	0,94	427,28



## IMPACT TEST WITH LINEAR SOLENOID RM050

Date: 1.7.2016

Place: Oulu

Author: Artturi Mantila

Equipment: Keysight 5747 Power Supply, 60V, 12,5A, 750W

Dytran 1053V4, IEPE Force Sensor

Hansford Sensors HS-551 Vibration Module Power Supply

Agilent 54622D Mixed Signal Oscilloscope

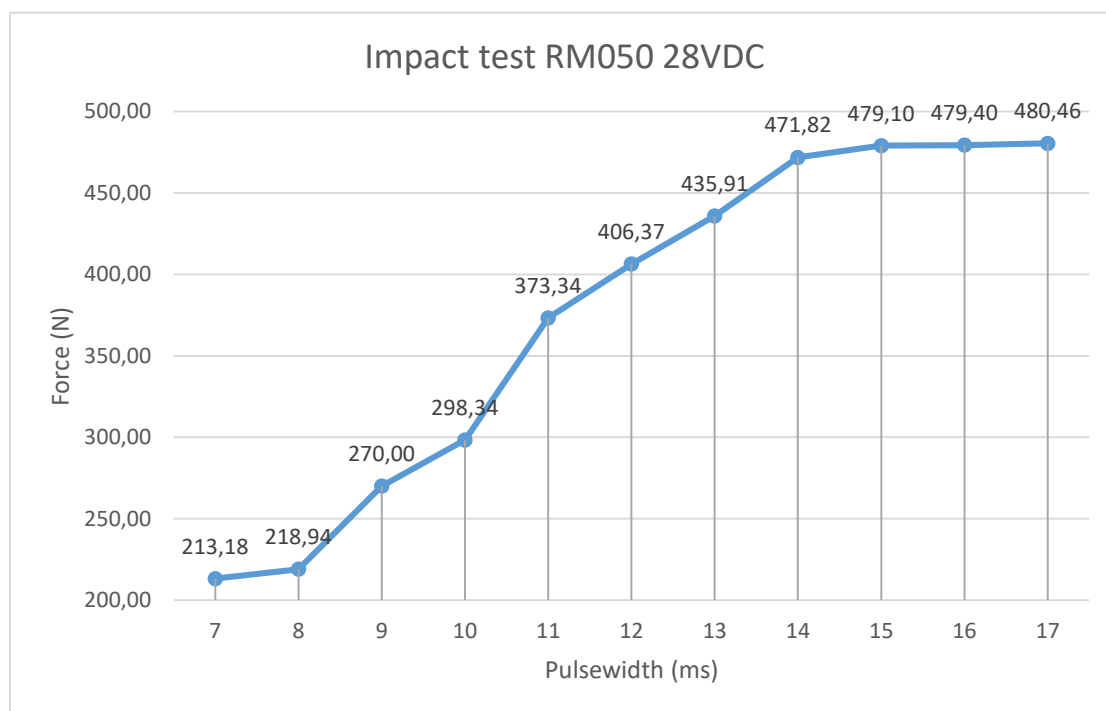
Arduino Uno Microcontroller

Voltage used: 28 VDC

Measurement: Peak voltage measurement for each impact. Three impacts per pulsewidth.

Pulsewidth is increased until peak voltage is saturated.

Pulsewidth (ms)	VP1 (V)	VP2 (V)	VP3 (V)	VP (V)	Force (N)
7	0,46	0,47	0,48	0,47	213,18
8	0,49	0,47	0,48	0,48	218,94
9	0,57	0,63	0,59	0,59	270,00
10	0,67	0,65	0,65	0,66	298,34
11	0,82	0,81	0,84	0,82	373,34
12	0,96	0,85	0,88	0,89	406,37
13	0,91	0,96	1,01	0,96	435,91
14	1,04	1,04	1,03	1,04	471,82
15	1,06	1,05	1,06	1,05	479,10
16	1,06	1,04	1,06	1,05	479,40
17	1,06	1,06	1,06	1,06	480,46



## IMPACT TEST WITH LINEAR SOLENOID RM060

Date: 1.7.2016

Place: Oulu

Author: Artturi Mantila

Equipment: Keysight 5747 Power Supply, 60V, 12,5A, 750W

Dytran 1053V4, IEPE Force Sensor

Hansford Sensors HS-551 Vibration Module Power Supply

Agilent 54622D Mixed Signal Oscilloscope

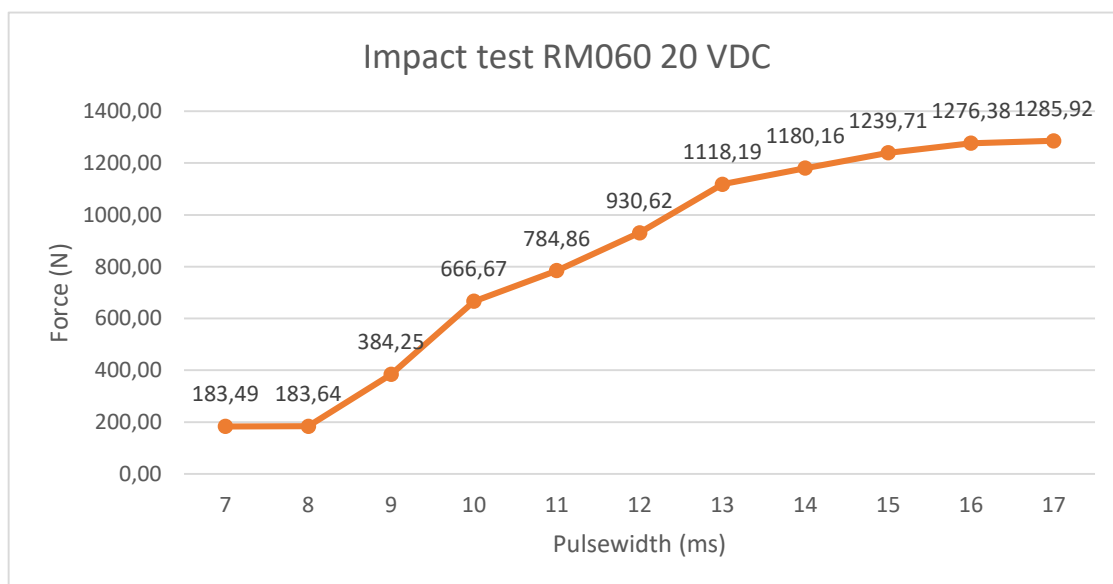
Arduino Uno Microcontroller

Voltage used: 20 VDC

Measurement: Peak voltage measurement for each impact. Three impacts per pulsewidth.

Pulsewidth is increased until peak voltage is saturated.

Pulsewidth (ms)	VP1 (V)	VP2 (V)	VP3 (V)	VP (V)	Force (N)
7	0,41	0,40	0,40	0,40	183,49
8	0,40	0,41	0,41	0,40	183,64
9	0,79	0,90	0,85	0,85	384,25
10	1,37	1,60	1,44	1,47	666,67
11	1,86	1,60	1,71	1,73	784,86
12	2,00	1,96	2,18	2,05	930,62
13	2,53	2,39	2,46	2,46	1118,19
14	2,59	2,55	2,65	2,60	1180,16
15	2,70	2,71	2,77	2,73	1239,71
16	2,87	2,70	2,85	2,81	1276,38
17	2,82	2,86	2,81	2,83	1285,92



## IMPACT TEST WITH LINEAR SOLENOID RM060

Date: 1.7.2016

Place: Oulu

Author: Artturi Mantila

Equipment: Keysight 5747 Power Supply, 60V, 12,5A, 750W

Dytran 1053V4, IEPE Force Sensor

Hansford Sensors HS-551 Vibration Module Power Supply

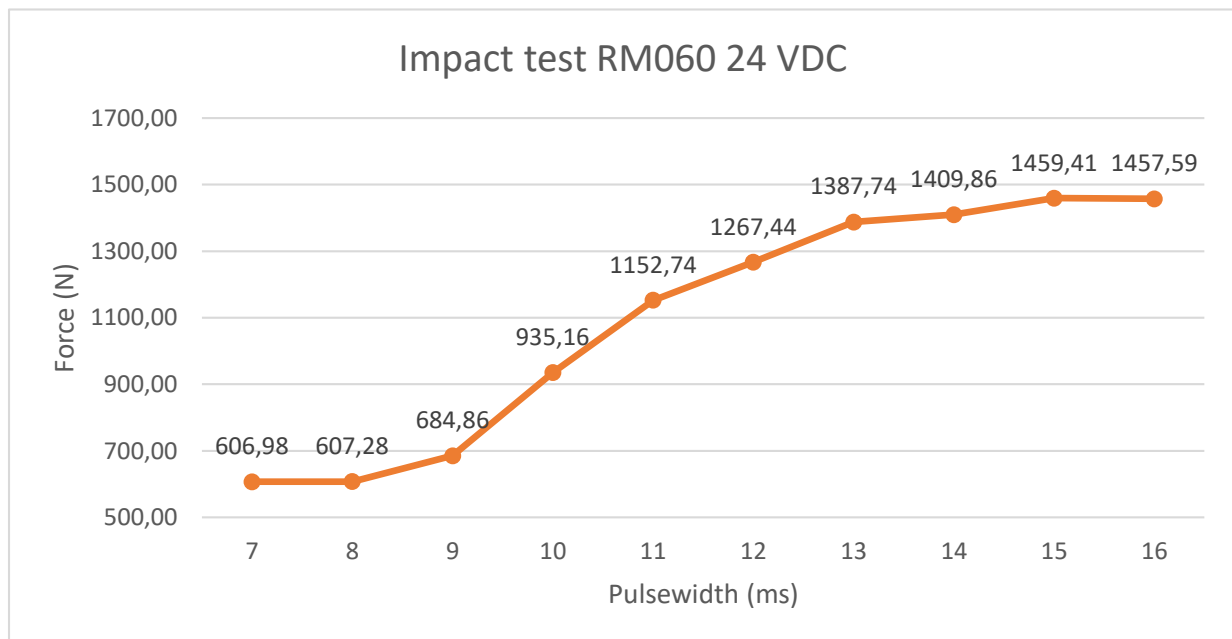
Agilent 54622D Mixed Signal Oscilloscope

Arduino Uno Microcontroller

Voltage used: 24 VDC

Measurement: Peak voltage measurement for each impact. Three impacts per pulsewidth.  
Pulsewidth is increased until peak voltage is saturated.

Pulsewidth (ms)	VP1 (V)	VP2 (V)	VP3 (V)	VP (V)	Force (N)
7	1,34	1,34	1,33	1,34	606,98
8	1,33	1,34	1,34	1,34	607,28
9	1,51	1,51	1,49	1,51	684,86
10	2,06	2,03	2,09	2,06	935,16
11	2,56	2,49	2,56	2,54	1152,74
12	2,77	2,81	2,79	2,79	1267,44
13	3,05	3,12	2,99	3,05	1387,74
14	3,05	3,11	3,14	3,10	1409,86
15	3,22	3,22	3,19	3,21	1459,41
16	3,21	3,22	3,20	3,21	1457,59



## REPEATABILITY TEST WITH LINEAR SOLENOID RM050

Date: 15.9.2016

Place: Oulu

Author: Artturi Mantila

Equipment: Keysight 5747 Power Supply, 60V, 12,5A, 750W

Dytran 1053V4, IEPE Force Sensor

Hansford Sensors HS-551 Vibration Module Power Supply

Raspberry Pi Microcontroller

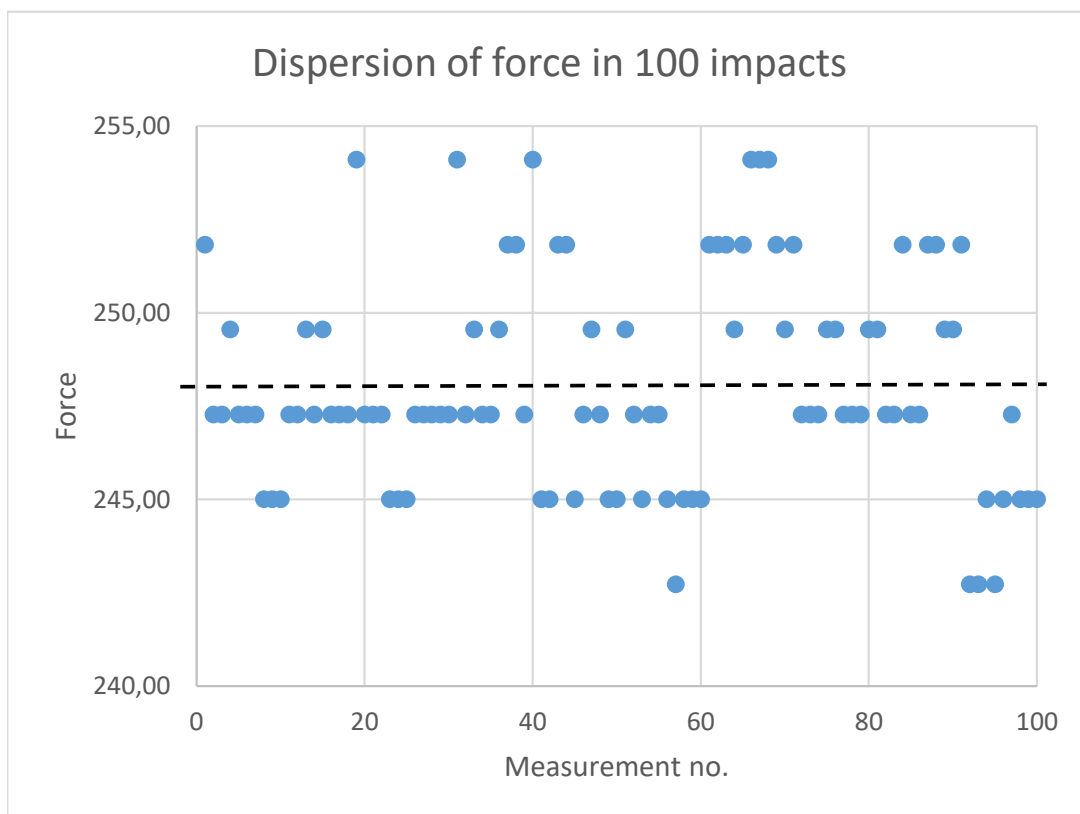
Saleae Logic Pro 16 Logic Analyzer

Voltage used: 24 VDC

Measurement: 100 impacts in series of 10, peak voltage measurement for every impact.

Pulse width: 12 ms

Average force (N):	248,05
Minimum force (N):	242,7
Maximum force (N):	254,1
Standard deviation (N):	2,82
Force variance (N):	8,06
Force variance (%):	3,25 %





Measurement	Peak voltage	Force (N)	Measurement	Peak voltage	Force (N)
1	0,55	251,82	51	0,55	249,55
2	0,54	247,28	52	0,54	247,28
3	0,54	247,28	53	0,54	245,00
4	0,55	249,55	54	0,54	247,28
5	0,54	247,28	55	0,54	247,28
6	0,54	247,28	56	0,54	245,00
7	0,54	247,28	57	0,53	242,73
8	0,54	245,00	58	0,54	245,00
9	0,54	245,00	59	0,54	245,00
10	0,54	245,00	60	0,54	245,00
11	0,54	247,28	61	0,55	251,82
12	0,54	247,28	62	0,55	251,82
13	0,55	249,55	63	0,55	251,82
14	0,54	247,28	64	0,55	249,55
15	0,55	249,55	65	0,55	251,82
16	0,54	247,28	66	0,56	254,09
17	0,54	247,28	67	0,56	254,09
18	0,54	247,28	68	0,56	254,09
19	0,56	254,09	69	0,55	251,82
20	0,54	247,28	70	0,55	249,55
21	0,54	247,28	71	0,55	251,82
22	0,54	247,28	72	0,54	247,28
23	0,54	245,00	73	0,54	247,28
24	0,54	245,00	74	0,54	247,28
25	0,54	245,00	75	0,55	249,55
26	0,54	247,28	76	0,55	249,55
27	0,54	247,28	77	0,54	247,28
28	0,54	247,28	78	0,54	247,28
29	0,54	247,28	79	0,54	247,28
30	0,54	247,28	80	0,55	249,55
31	0,56	254,09	81	0,55	249,55
32	0,54	247,28	82	0,54	247,28
33	0,55	249,55	83	0,54	247,28
34	0,54	247,28	84	0,55	251,82
35	0,54	247,28	85	0,54	247,28
36	0,55	249,55	86	0,54	247,28
37	0,55	251,82	87	0,55	251,82
38	0,55	251,82	88	0,55	251,82
39	0,54	247,28	89	0,55	249,55
40	0,56	254,09	90	0,55	249,55
41	0,54	245,00	91	0,55	251,82
42	0,54	245,00	92	0,53	242,73
43	0,55	251,82	93	0,53	242,73
44	0,55	251,82	94	0,54	245,00
45	0,54	245,00	95	0,53	242,73
46	0,54	247,28	96	0,54	245,00
47	0,55	249,55	97	0,54	247,28
48	0,54	247,28	98	0,54	245,00
49	0,54	245,00	99	0,54	245,00
50	0,54	245,00	100	0,54	245,00

## REPEATABILITY TEST WITH LINEAR SOLENOID RM050

Date: 1.7.2016

Place: Oulu

Author: Artturi Mantila

Equipment: Keysight 5747 Power Supply, 60V, 12,5A, 750W

Dytran 1053V4, IEPE Force Sensor

Hansford Sensors HS-551 Vibration Module Power Supply

Raspberry Pi Microcontroller

Saleae Logic Pro 16 Logic Analyzer

Voltage used: 24 VDC

Measurement: 2000 impacts, ten peak voltage measurements in steps of 200

Pulse width: 12 ms

Measurement	Peak voltage	Force (N)
200	0,554	251,8
400	0,539	245,0
600	0,539	245,0
800	0,534	242,7
1000	0,544	247,3
1200	0,544	247,3
1400	0,544	247,3
1600	0,539	245,0
1800	0,549	249,5
2000	0,544	247,3

Average force (N):	246,82
Minimum force (N):	242,7
Maximum force (N):	251,8
Standard deviation (N):	2,45
Force variance (N):	6,66
Force variance (%):	2,70 %

