

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Kaarel Adamson

DMA mõõteseade

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:
vanemteadur Andres Punning

Tartu 2017

Kokkuvõte

DMA mõõteseade

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli valmistada seade, mille abil on võimalik mõõta erinevate katsekehade dünaamilist elastsusmoodulit. Töö aluseks oli Karl-Kristjan Kokka poolt valmistatud DMA-seade, millest tehti edasiarendus, kus varda positsiooni muutust mõõdetakse tensoanduri asemel kahe Halli efekti anduriga. Esimene tajur on positsiooni määramiseks ning teise ülesandeks on kõrvaliste magnetväljade poolt tekitatud müra elimineerimine.

Töö alguses on kirjutatud sellest, mis on deformatsioon ning kuidas seda hinnatakse, antakse kerge ülevaade deformatsiooni erinevatest vormides. Lisaks on toodud kaks kirjeldavat näidet, kuidas elastsusmoodulit on võimalik määrata, millest üks, kolme punkti meetod, on aluseks lõputööna valminud seadme tööpõhimõttele. Edasi on töös kirjeldatud tensotajuri ning Halli tajuri tööpõhimõtted ning seda, kuidas neid praktikas kasutatakse, millised on levinumad ühendusskeemid.

Praktilises pooles kirjutatakse valminud elastsusmooduli mõõtmise seadme riist- ning tarkvaralisest lahendusest. Kirjeldatakse kalibreerimisprotsessi koos graafikute ning saadud tulemustega. Seadmega on tehtud esimesed mõõtmised ning sellele on antud esmane täpsushinnang.

Töö tulemusel valmis seade, mille olulisemad parameetrid on:

- Valjuhääldile on võimalik saata siinus- ja kolmnurksignaali sagedusega 1-10Hz
- Saadetava signaali ning mõõtmiste sãmplimissagedus on 1000Hz
- Mõõdetava jõu piirkonnaks on 0,002-1,44 N
- Varda liikumise amplituud on 0,09-3,5mm

Võtmesõnad:

Dünaamiline elastsusmoodul, dünaamiline mehaaniline analüüs, Halli andur, tensotajur, kalibreerimine, veahinnang.

CERCS:

T110 Instrumentatsioonitehnoloogia, T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia

Abstract

DMA device

The purpose of this bachelor thesis was to build a device which would be able to measure the dynamic modulus of elasticity. The work was based on a DMA device previously built by Karl-Kristjan Kokk, but it was improved by using two Hall effect sensor instead of a strain gauge to measure the motion amplitude of the force-applying rod. The first Hall effect sensor is for measuring the motion distance and the second one is for removing noise of extraneous magnetic fields.

The beginning of thesis gives a brief description of what deformation is how it's measured and also gives a light overview of different forms of deformation. In addition, two ways of determining elastic modulus are given, one of them is tensile test and another three point test which is the working principle of built device. After that working principles, practical uses and common connection diagrams of strain gauge and Hall effect sensor are given.

In the practical part of thesis gives an overview of device's hardware and software. The calibration process results and description with graphs are given. There is description and results of the first measurements and also the device has been given an accuracy rating.

The result of the thesis is a device with following parameters:

- The force can be applied as a sine or triangle wave with frequency of 1-10Hz
- The sampling rates of force signal and measurements is 1000Hz
- The region of measured force is 0,002-1,44N
- The motion amplitude of force-applying rod is 0,09-3,5mm

Keywords:

Dynamic modulus of elasticity, dynamic mechanical analysis, Hall effect sensor, strain gauge, calibration, margin of error.

CERCS:

T110 Instrumentation technology, T120 Systems engineering, computer technology

Sisukord

Kokkuvõte	2
Abstract	3
Lühendid/mõisted.....	6
1. Sissejuhatus	7
1.1. Young'i moodul.....	7
1.2. Dünaamilise elastsusmooduli mõõtmise seade.....	8
2. Deformatsiooni vormid	10
2.1. Mehaaniline pinge ja deformatsioon	10
2.2. Young'i moodul.....	10
2.3. Nihkemoodul ja Poissoni tegur.....	11
2.4. Young'i mooduli määramine.....	12
2.4.1. Tõmbekatse	12
2.4.2. Kolme punkti katse.....	12
2.5. Dünaamiline elastsusmoodul	13
3. Jõusensor	15
3.1. Tensotajur	15
3.2. Wheatstone'i sild	16
3.3. Ühendamise skeem	17
4. Halli efekti sensor.....	18
4.1. Halli efekt	18
4.2. Halli tajur	18
4.3. Halli tajurid AD22151	19
5. Riistvaraline ja tarkvaraline lahendus	20
5.1. Riistvara.....	20

5.2.	Tarkvara.....	21
5.2.1.	Mikrokontrolleri püsivara	21
5.2.2.	Kasutajaliidese programm.....	22
5.3.	Seadme ehitus	23
6.	Seadme kalibreerimine	25
6.1.	Jõuanduri kalibreerimine	25
6.2.	Halli tajuri kalibreerimine	26
6.3.	Halli tajurite mürahinnang.....	27
7.	Seadme veahinnang.....	29
8.	Näidismõõtmine	30
	Viited.....	31
	Lisad	32
	Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	33
	Mina, Kaarel Adamson,.....	33

Lühendid/mõisted

ADC – analoog-digitaalmuundur (*analog-to-digital converter*) on seade, mis muudab analoogsignaali digitaalseks signaaliks, ehk pidev signaal teisendatakse diskreetsesse vormi.

Baud rate – suurus, mis näitab kommunikatsioonikanali informatsiooni saatmise määra. Näiteks järjestikühenduste puhul tähendab 9600 *baud rate* seda, et port on võimeline saatma maksimaalselt 9600 biti sekundis.

DAC – digitaal-analoogmuundur (*digitaal-analog converter*) on seade, mis muundab digitaalsignaali analoogsignaaliks.

DMA – dünaamiline mehaaniline analüüs (*dynamic mechanical analysis*) on tehnika, mille puhul rakendatakse kehale perioodilist mehaanilist pinget ja mõõdetakse keha deformeerumise ulatust. Sellisel viisil on võimalik mõõta viskoosete ja viskoelastsete materjalide dünaamilist elastsusmoodulit.

PDI – programmeerimise ja silumise liides (*Program and Debug Interface*) on Atmeli poolt välja töötatud liides, millega programmeerida ning siluda XMEGA protsessoreid.

UART – universaalne asünkroonne saatja/vastuvõtja (*universal asynchronous receiver/transmitter*) on arvutiriistvara seade asünkroonseks järjestiksuhtluseks, kus andmevorming ning saatmiskiirused on seadistatavad.

1. Sissejuhatus

Olukorda, kus eseme suurus või kuju muutub temperatuuri muutuse või talle füüsilise jõu rakendumise tõttu nimetatakse deformatsiooniks. Esimesel puhul toimub deformatsioonienergia üle kandmine soojusülekanne kaudu, teisel puhul on deformatsioonienergia allikaks füüsiline jõud, mis avaldub läbi tõmbamise, kokkusurumise, nihke, väänamise või painutamise. Selle alusel, kuidas kehad deformatsioonijõu rakendumise ajal ja järgselt käituvad kategoriseeritakse deformatsioone elastseks, plastseks ja viskoelastseks. Elastse deformatsiooni puhul taastub keha kuju pärast jõu rakendumise lõppemist täielikult. Kui deformeeriv jõud lakkab ning keha kuju ei taastu, nimetatakse deformatsiooni plastseks. Viskoelastne deformatsioon kujutab endast olukorda, kus keha kuju muutub jõu rakendumisel mittelineaarselt jõu suurusega ja lakkamisel taastub pikema aja jooksul. Elastsete materjalide iseloomustamiseks on füüsikaline suurus Young'i moodul ehk elastsusmoodul.

1.1. Young'i moodul

Young'i moodul (tähis E) on suurus, mis näitab materjali elastsust ning see avaldub materjalile rakenduva mehaanilise pinge ja materjali elastse deformatsiooni suhtena. Elastsusmoodul iseloomustab materjali jäikust, mis tähendab keha võimet avaldada deformeerivale jõule vastupanu. See näiteks aitab hinnata kui palju materjal pikeneb venituse tagajärjel.

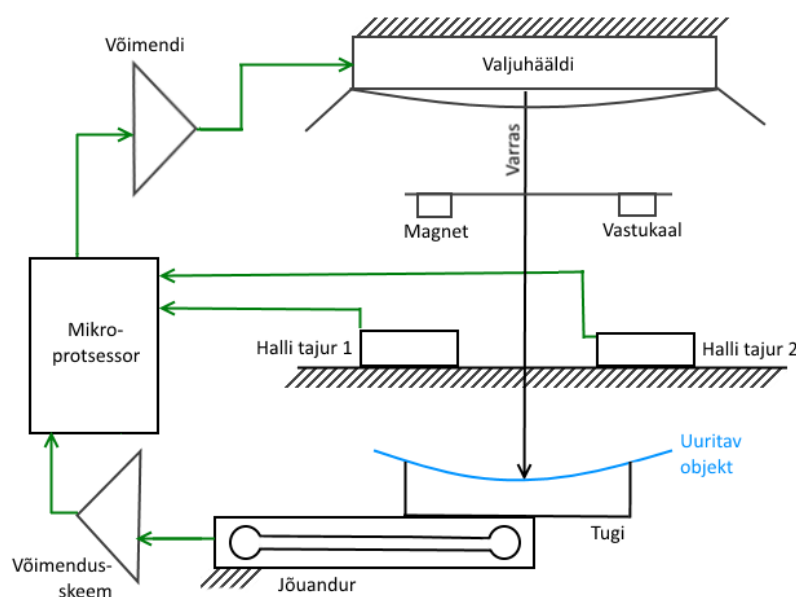
Elastsusmooduli mõõtühikuks on paskal (Pa või N/m^2), kuid reaalsed elastsusmooduli ühikud on mega- ja gigapaskalid (MPa/GPa). Tabelis 1 on toodud välja mõnede materjalide elastsusmoodulid.[1]

Materjal	Elastsusmoodul
Kumm	0,01-0,1 GPa
PET	2-2,7 GPa
Klaas	50-90 GPa
Teras	200 GPa
Teemant	1050-1210 GPa

Tabel 1. Materjalide elastsusmoodulid [1]

Selleks, et elastsusmoodulit hinnata on olemas mitmeid meetodeid, millest üheks levinumaks on kolme punkti meetod. Selle meetodi puhul asetatakse piklik keha kahele punktile ning kolmandast punktist, mis asub täpselt kahe punkti vahel, avaldatakse kehale ristisuunalist jõudu. Tekkiva deformatsiooni parameetreid mõõtes on võimalik arvutada välja keha elastsusmoodul.

1.2. Dünaamilise elastsusmooduli mõõtmise seade



Joonis 1-1. Mõõtmisseadme tööpõhimõte

Antud töös ehitatud seade põhineb kolme punkti katsel. Jõuanduri peale on kinnitatud teravate otstega tugi, millele asetatakse testitav keha. Kehale hakkab kolmandast punktist jõudu avaldama varras, mis on kinnitatud valjuhääldi membraani külge. Omakorda on varra külge kinnitatud väike plaat, mille ühe külje peal on magnet ning teisel pool on vastukaal. Varra liikumise amplituudi mõõdetakse Halli tajuritega, mis on kinnitatud kõlari raami külge valjuhääldi magnetist 1,8cm kaugusele. Halli tajureid on kaks selleks, et elimineerida valjuhääldi poolt tekitatava magnetvälja ning ka muude magnetväljade põhjustatavat väljundpinget, mis seadme täpsust võiksid segada. Jõuanduri eesmärgiks on mõõta jõudu, mida rakendatakse uuritavale objektile.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on valmistada edasiarendus Karl-Kristjan Kokka poolt ehitatud DMA seadmele.[2] Põhilised erinevused on järgnevad:

1. Kui eelmises prototüübis mõõdeti varda asukoha muutust jõuanduri abil, siis nüüd toimuvad mõõtmised Halli tajuriga. Halli tajur on kinnitatud liikumatult 1,6cm kaugusele valjuhääldist ning varda külge on kinnitatud silindri-kujuline neodüümmagnet, mille diameeter on 0,6cm, paksus on 0,4cm ning mass on 0,85g. Niisugune lahendus võimaldab märksa suuremat vertikaalvarda liikumise amplituudi, kui eelmise, jõuanduriga lahenduse korral.
2. Seadmes pannakse vertikaalne varras liikuma elektromagnetiga (valjuhääldiga). Halli tajurid tunnevad nad ka seda magnetvälja ning muid juhuslikke aparatuurist tingitud magnetvälju. Nende magnetväljade mõju elimineerimiseks on seadmes kasutatud veel teist Halli tajurit, mis on paigutatud esimese tajuriga vertikaaltelje suhtes sümmeetriliselt, kuid selle vastas püsimagnetit ei ole. Mikrokontroller mõõdab ADC-ga mõlema anduri pinget ning lahutab esimese tulemusest teise maha.
3. Mikrokontrollerile on kirjutatud uus püsivara ning arvuti tarbeks on kirjutatud uus kasutajaliidese programm, milles on põhilisteks muudatusteks:
 - UART suhtluse kiirus on tõstetud 38400 pealt 10000 baud rate peale
 - Mikrokontroller edastab mõõtmistulemused kohe üle UART liidese arvutile, varem toimus mõõtmine seadme NI USB-6218 kaudu
 - Mikrokontrolleris on realiseeritud ADC nihke kalibratsioon maa suhtes
 - Kasutajaliidese programmis on võimalik määrata fail, kuhu saadud mõõtmistulemused salvestatakse

2. Deformatsiooni vormid

2.1. Mehaaniline pinge ja deformatsioon

Young'i mooduli idee põhineb Hooke'i seadusel, mis ütleb, et elastsusjõud, mis tekib keha venitamisel või kokku surumisel on võrdeline keha pikkuse muutusega ning avaldub valemis:

$$F = -k\Delta x \quad (1)$$

Selles valemis F on rakendatav jõud, Δx on keha pikkuse muutus ning k on jäikust väljendav konstant, mis sõltub keha materjalist. Miinusmärk väljendab seda, et elastsusjõud on vastassuunaline deformeerivale jõule.

Aastal 1807 jõudis Thomas Young järeltulele, et kui rakendada Hooke'i valemit materjalidele omaste suurustega, saame parameetri, mille abil võib iseloomustada materjali, mitte iga üksikut keha. Seega jõu F ning keha pikkuse muutuse Δx asemel on samas valemis kasutatud mehaanilist pinget σ ning suhtelist deformatsiooni ε ning nende parameetrite kaudu avaldub Young'i moodul E . [3]

Kui kehale pikkusega l rakendada piki telge deformeerivat jõudu, siis antud tema pikkuse muutust nimetatakse absoluutseks deformatsiooniks ning tähistatakse Δl . Suhtelise deformatsiooni tähiseks on ε ning see väljendub valemiga

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (2)$$

Mehaanilise pinge σ valem on

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3)$$

ning see iseloomustab suurust, kus F väljendab avaldatavad jõudu ning S on selle pinna suurus, millele jõudu avaldatakse. [4]

2.2. Young'i moodul

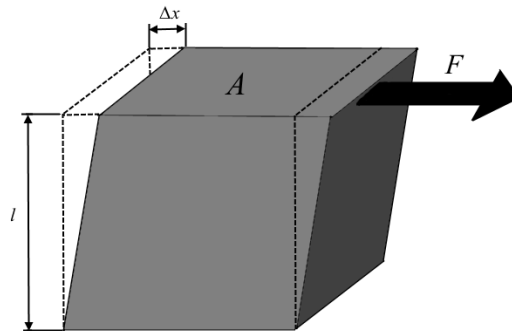
Enamus materjale deformeeruvad pinge rakendamisel proportsionaalselt ning seda suhet iseloomustab Young'i moodul või elastsusmoodul ning see avaldub Hooke'i seadusest tulenevalt valemiga:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Mehaaniline pinge σ on avaldatud valemis 3 ning suhteline deformatsioon valemis 2. Youngi mooduli ühikuks on N/m^2 ehk Pa.

2.3. Nihkemoodul ja Poissoni tegur

Nihkedeformatsioon toimub, kui keha mingile pinnale A rakendatakse selle pinna sihis jõudu F ehk tangentsiaalpinget.

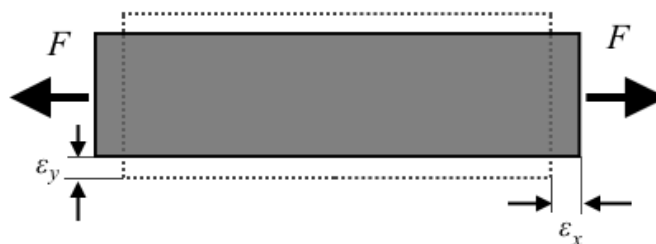


Joonis 2-1. Nihkedeformatsioon

Nihkemoodul G avaldub läbi joonisel 2-1 näidatud suuruste:

$$G = \frac{F/A}{\Delta x/l} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (5)$$

Poissoni efektiks nimetatakse seda, kui keha surutakse ühes suunas kokku ning ta laieneb teises suunas. Sellist efekti on kõige parem jälgida kummipaelte puhul, kus tema venitamisel pael ise peenemaks muutub. Poissoni efekti kirjeldab Poissoni tegur ν , mis on ühikuta suurus.[6]



Joonis 2-2. Poissoni efekt

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (6)$$

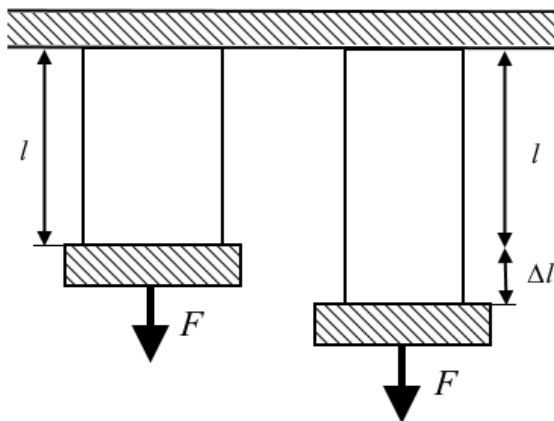
Kuna Young'i moodul, nihkemoodul ja poissoni tegur iseloomustavad keha muutumist jõu rakendumise toimel, siis on neid võimalik üksteise kaudu avaldada:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (7)$$

2.4. Young'i mooduli määramine

2.4.1. Tõmbekatse

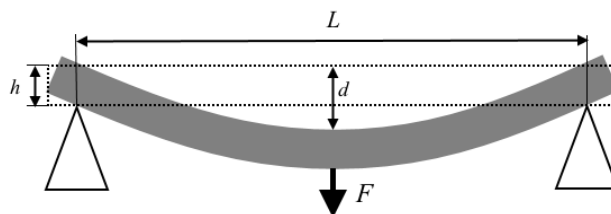
Tõmbekatse on enim levinud elastsusmooduli määramise viis. Keha kinnitatakse mõlemast otsast ning siis hakatakse ühelt poolt kehale jõudu rakendama tõmbamise teel. Sel viisil on võimalik kehale avalduvat pinget ja venituse tagajärjel tekkivat deformatsiooni mõõta, ning valemi (4) abil elastsusmoodul arvutada.



Joonis 2-3 Tõmbetest

2.4.2. Kolme punkti katse

Kolme punkti katse puhul asetatakse katsekeha kahele teravale aluspunktile ning kolmandast punktist nende vahel rakendatakse kehale ristisuunalist jõudu nii, et keha painduks. Selleks, et katse abil selgitada välja elastsusmoodul E on vaja teada keha kuju, mõõtmeid, rakendatud jõudu ning painde amplituudi.



Joonis 2-4 Kolme punkti test

Euler-Bernoulli teooria kohaselt saab leida varda sümmeetrilisel koormamisel keha läbipaindumuse d valemiga

$$d = \frac{FL^3}{48EI} \quad (8)$$

Suurus I on antud valemis keha läbilõikepindala inertsimoment, mis ristkülikukujulise keha puhul avaldub:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (9)$$

Asendades inertsimomendi I valemisse (8) ja avaldades välja elastsusmooduli E , saame valemi

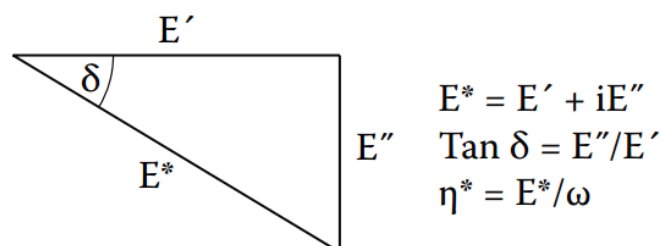
$$E = \frac{FL^3}{4dbh^3} \quad (10)$$

kus d on katsekeha painde ulatus, h on keha paksus ja b laius, F on sellele rakenduv jõud, ning L kahe aluspunkti vaheline amplituud. Antud valemit kasutame seadme valmimisel kehade elastsusmooduli arvutamiseks.

2.5. Dünaamiline elastsusmoodul

Dünaamiline elastsusmoodul, mida vahel kutsutakse ka kompleksmooduliks, on suhe pingest ja deformeerumise vahel olukorras, kus kehale avaldatakse perioodilist jõudu. See moodul iseloomustab viskoelastseid kehasid ning selle mõõtmiseks kasutatakse dünaamilist mehhaanilist analüüsi (inglise keeles *Dynamic Mechanical Analysis*) ehk DMA'd.

DMA seadmete puhul on võimalik mõõta jäikust ning sumbumist. Kuna kehale avaldatakse perioodilist jõudu, väljendatakse elastsusmoodulit kahe komponendina: faasis osa – jääkmoodul E' ning kaomoodul E'' . Suhet nende kahe mooduli vahel iseloomustab $\tan \delta$, mis näitab energia kadu materjalis ning kutsutakse ka sumbumisteguriks. [7]



Joonis 2-5 Jääkmoodul ja kaomoodul

Joonisel 2-5 on kujutatud DMA seadmega mõõdetud faasinihe $\tan \delta$ ning jääkmoodul E' ning sellest tulenevad kaomoodul E'' ning arvutatav dünaamiline elastsusmoodul E^* . Joonisel on ka iseloomustatud energia kadu η^* läbi dünaamilise mooduli ning nurksageduse ω . [8]

Elastsete materjalide puhul faasinihet ei teki ning dünaamiline elastsusmoodul on sama, mis jääkmoodul, kuid viskoosete materjalide puhul on faasinihe 90° . Viskoelastsete materjalide puhul on faasinihe vahemikus $0^\circ - 90^\circ$. [8]

Dünaamiline elastsusmoodul on vajalik just seetõttu, et tänapäeval kasutatakse materjale väga erinevates tingimustes ning sagedusvahemikes ning viskoosete ja viskoelastsete materjalide puhul võivad omadused olla sagedusest sõltuvad. [7]

3. Jõusensor

Lõputöö käigus valminud seadmes kasutatakse ühte tensotajuri alusel ehitatud jõusensorit, et mõõta jõudu, mida avaldab võimendi külge kinnitatud varras mõõdetavale kehale.

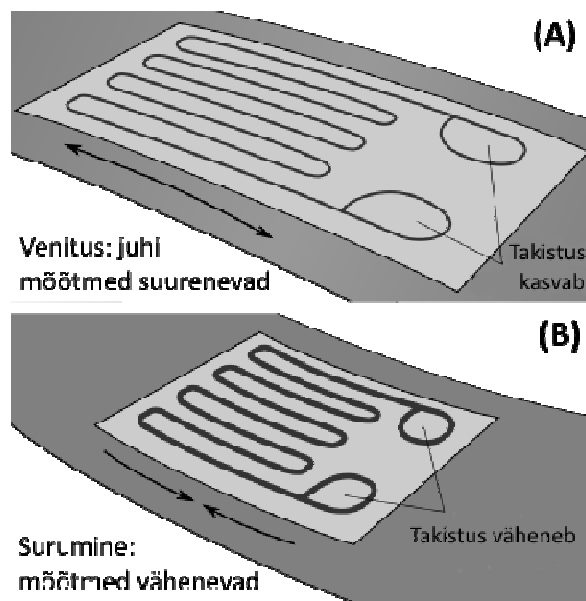
3.1. Tensotajur

Tensotajur on seade, mida kasutatakse laialdaselt, et mõõta kehale avaldatavat mehaanilist pinget ja jõudu. Sensor tehakse elastsest elektrit juhtivast materjalist, mis on kaetud isoleerkihiga, et teda oleks võimalik kinnitada keha külge, millele avaldatavat survet tahtetakse mõõta.[9]

Tensotajur tööpõhimõtte kasutab ära elektrijuhi takistuse muutust vastavalt juhi mõõtmetele. On teada, et juhi takistus on arvatav valemiga

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (11)$$

kus l on juhi pikkus meetrites, A on juhi ristlõike pindala ruutmeetrites ning ρ juhi eritakistus oom-meetrites. Kui tajurile rakendub füüsiline jõud, siis elastsele loomusele omaselt tema ruumilised omadused muutuvad ning seetõttu muutub ka tema takistus. Joonisel 3-1 on näha, et venitava jõu rakendamisel juhtiva materjali pikkus kasvab ning läbimõõt väheneb ning seetõttu kasvab takistus. Samas kokkusuruva jõu puhul aga anduri poolt avaldatav takistus väheneb. Klassikaliselt on elektrit juhtiv materjal seatud õhukesse sikk-sakk mustrisse mööda jõu mõõtmise telge, et ka väike muutus paindes avalduks suuremas takistuse muutuses.[10]



Joonis 3-1 Tensotajuri tööpõhimõtte [10]

Tensoanduri venitusefekti kvantitatiivseks iseloomustajaks on venitustundlikkuse tegur k , mis avaldub valemiga:

$$k = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}, \quad (12)$$

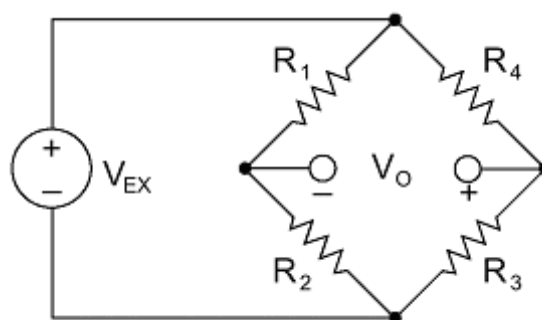
kus R on deformeerimata anduri takistus, ΔR on deformeeriva jõu tagajärjel toimunud takistuse muutus ning ϵ on avaldatav pinge. Suurel osal voolujuht-tensoanduritel jäävad k väärtused 1,9 ja 2,5 vahele.[11]

3.2. Wheatstone'i sild

Kuna tensotajuri takistuse muutus on väga väike (umbes 0,1%), mis tähendab umbes $0,1\Omega$ muutust 100Ω anduri puhul, siis kasutatakse tema takistuse muutuse mõõtmiseks elektrilülitust, mida kutsutakse sildlülituseks või Wheatstone'i sillaks. Sildlülituses, kujutatud joonisel 3-2, kasutatakse kahte paralleelset pingejagurit, kus esimene koosneb takistitest R_1 ja R_2 ning teine takistitest R_3 ning R_4 . Silla väljundpinget V_O , arvutatakse sisendpinge V_{EX} kaudu järgneva valemiga:

$$V_O = V_{EX} \cdot \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \quad (13)$$

Selle valemi alusel on võimalik näha, et kui $R_1/R_2 = R_4/R_3$, siis on väljund on null. Sellisel juhul öeldakse, et sild on tasakaalustatud. Kui toimuvad muutused tasakaalus silla takistustes, siis muutub ka väljundpinge väärtus.[12]



Joonis 3-2 Wheatstone'i sild [12]

Kui kõik takistid on võrdsed ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$) ning takistuste muutused ΔR_i on palju väiksem kui iga takistus ise, siis võib Wheatstone'i silda vaadata ka valemina

$$\frac{V_O}{V_{EX}} = \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right]. \quad (14)$$

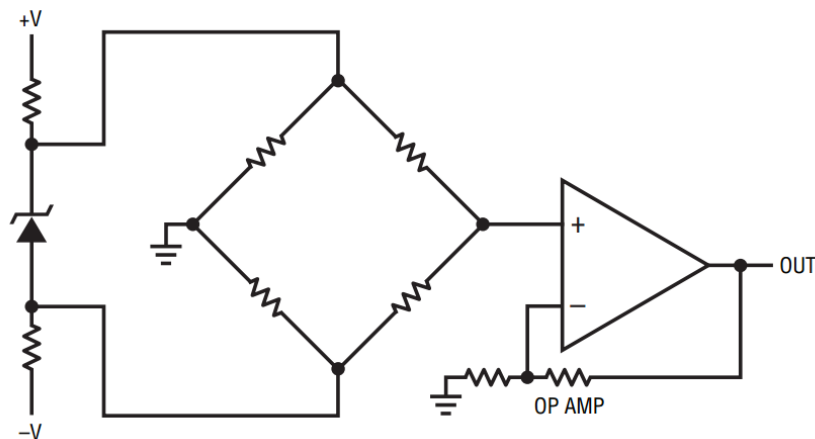
Kui me asendame tensoanduri takistiga R_4 , ja me teame, et ülejäänud takistite väärtused ei varieeru, võime valemi lihtsustada kujule: [13]

$$\frac{V_O}{V_{EX}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (15)$$

3.3. Ühendamise skeem

Kuna tensoandurit kasutades muutub keha takistus vaid väga väikese suuruse võrra, siis see tähendab ka Wheatstone'i silda kasutades väikest pinget muutust. Selleks, et silla linearsust ja tundlikkust parandada on aja jooksul välja töötatud mitmeid skeeme.

Näiteks on üks võimenduskeem toodud joonisel 3-3, kus sisendpinge on tasakaalustatud Zener diodiga, et sisendpinge kõikumine ei mõjutaks skeemi väljundit ning väljund on ühendatud operatsioonivõimendi külge. Selline ühendus võimaldab saada kuni 140dB võimendust ning võimendusteguri täpsust kuni 0,001%, samas on suureks miinuseks see, et diod põhjustab viga nii võimenduses kui ka nihet tulemusel.[14]



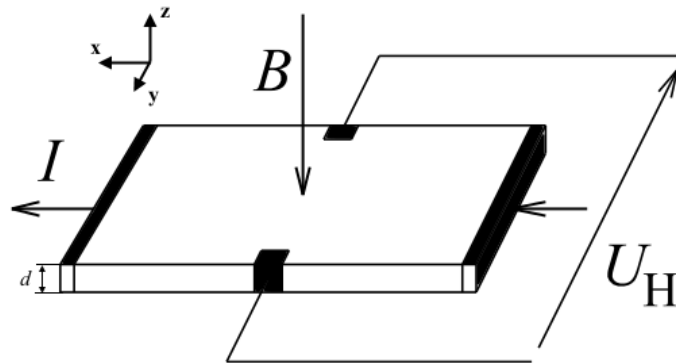
Joonis 3-3 Wheatstone'i silla võimenduskeem

Ideaaljuhul on tasakaalustatud silla väljundpinge null, kuid perfektset silda kokku panna on praktiliselt võimatu. Seetõttu tuleb väljundpinge eemaldamiseks kasutada kas tarkvaralist lahendust ning mõõta välja silla nihe, ning sellega hilisematel mõõtmistel arvestada, või lahendada olukord riistvaraliselt kasutades potentsiomeetreid ning vastavat skeemi.

4. Halli efekti sensor

4.1. Halli efekt

1879. aastal täheldas Edwin Hall sellist nähtust, kus magnetväljas asuvas elektrit juhtivas materjalis, milles on elektrivool, tekib elektriväli, mis on risti nii magnetväljaga kui juhti läbiva voolu suunaga.



Joonis 4-1 Halli efekt

Halli efekti põhjustajaks on Lorentzi jõud, mis on kombinatsioon elektri- ja magnetjõust. Kui elektron liigub elektriväljas ristsuunas magnetväljaga, mõjub talle magnetjõud. Magnetjõu F suunda saab hinnata parema käe reeglit kasutades ning see väljendub valemiga

$$F = -q(E + v \times B), \quad (16)$$

kus q on elementaarlaeng ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C), v on osakese kiirus ning B on magnetvälja tugevus. Risttahuka-kujulises pooljuhis paksusega d on laengukandjateks elektronid puistetihedusega n . Kui vool I liigub joonise 4-1 järgi mööda x telge ning magnetvälja B suund on z teljega paralleelne. Elektronid, mida Lorentzi jõud mõjutab liiguvad nüüd enda esialgselt marsruudilt y telje suunas ning nii tekib pooljuhi kahele küljele elektrilaeng, mis põhjustab Halli pinget U_H , mis väljendub valemina:[15]

$$U_H = \frac{IB}{qnd}. \quad (17)$$

4.2. Halli tajur

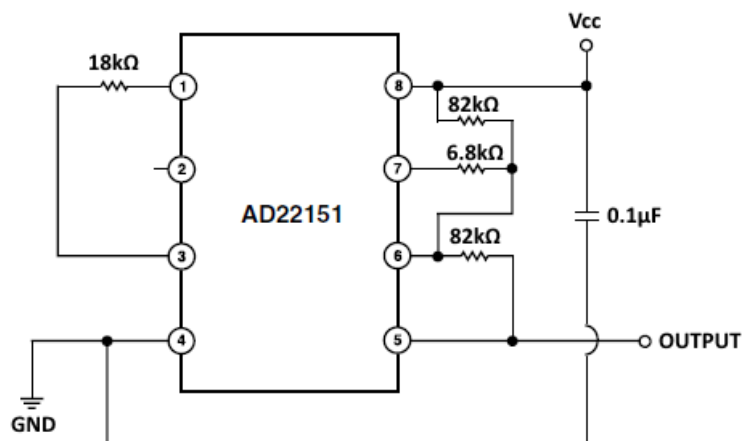
Halli tajur on andur, mis muudab enda väljundpinget vastavalt muutustele magnetväljas anduri läheduses. Tööstuses kasutatakse Halli tajureid tihti lülititena, positsiooni- või kiiruseanduritena. Sel eesmärgil asetatakse liikuvatele osadele magnetid, mille magnetvälja

tugevus on teada ning nii on võimalik vahetu kontaktita tuvastada, kui kaugel liikuv osa antud sensorist on.

Halli tajurid on väga populaarsed oma positiivsete omaduste tõttu. Need on väga väikesed, mis lubab neid kasutada väga väikestes kohtades, kuhu teised sensorid ei mahuks ning nad töötavad oma suuruse tõttu kui „punktsensorid“ mõõtes magnetvälja tugevust ühes kindlas ruumi punktis. Kuna neid toodetakse tihti kinnises korpuses siis see muudab nad väga töökindlaks ning kasutatavaks ka äärmuslikes olukordades. Halli efekti sensorid on peaaegu lineaarse väljundiga neile mõjuva magnetvälja suhtes, mis tähendab head täpsust mõõtmistulemustes ning viimaks on nad väga madala hinnaga, mis annab neile suure eelise teiste magnet- ja ka muude sensorite ees.[16]

4.3. Halli tajurid AD22151

Käesolevas töös võtame kasutusele Halli tajurid AD22151, mis töötab pingel +5V ja tarbib 6mA voolu, tema väljundi tundlikus on 0,4mV/G ning tagastab lineaarse pinget sõltuvalt magnetvälja tugevusest vahemikus 10-90% Vcc. Antud seadet on võimalik ühendada kahel viisil: ühepooluselisse lülitusse, kus väljundpinge muutub 0-Vcc, ning kahepooluselisse, kus keskseks punktis on null ning tulempinge liigub ühele ja teisele poole nulli. [17]

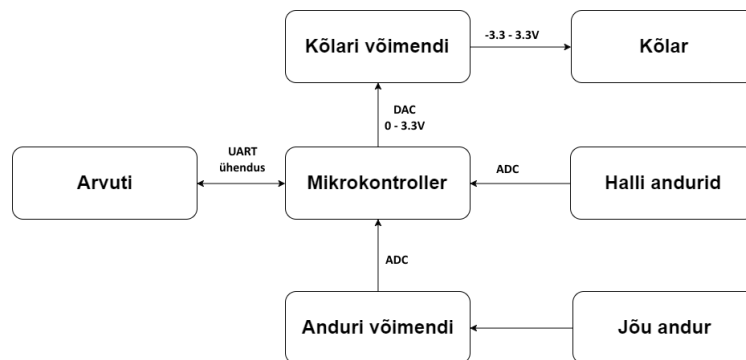


Joonis 4-2 Ühepoolse lülituse skeem.

Halli tajurite üks suurimaid miinuseid on suur müra tundlikus. Müra võib olla tingitud nii välistest magnetväljadest kui ka toitepingest. Nende kõrvalmõjude minimeerimiseks on antud seadmes kasutatud kahte samasugust sensorit, mida toidetakse müra vähendamiseks patareidega. Oluline on jälgida, et patareitoide ei langeks alla 5V, sest sel juhul hakkab väljundpinge vähenema.

5. Riistvaraline ja tarkvaraline lahendus

Nii Halli tajurid, kui ka jõuandur on ühendatud mikrokontrolleriga, mis ADC' de abil mõõdab sissetuleva pinge väärtused, mida saab vastavalt jõuks ja distantsiks ümber arvutada. Lisaks ADC mõõtmistele saadab mikrokontroller DAC'i kaudu siinus- või kolmnurksignaali võimendisse, mis seal kaks korda võimendatakse ja nihutatakse nii, et signaal oleks sümmeetriline 0V suhtes ning seejärel valjuhääldisse saadetakse. Mikrokontroller on ühendatud UART liideselega arvutiga ning arvutis on kasutajal võimalik läbi liidese programmi määrata saadetava signaali amplituudi, kuju ning sagedust ning mõõtmise aega. Pärast parameetrite saatmist teeb seade mõõtmised ning väljastab tulemused kasutaja poolt ette määratud faili.



Joonis 5-1. Ühenduste plokkskeem

5.1. Riistvara

Kuna varem oli Karl-Kristjan Kokk'al disainitud plaat, mis töötab ning rahuldab ka modifitseeritud lahendusega seadmele, siis aja ja kulude kokkuhoiu mõttes uut plaati ei disainitud.

Mikrokontrollerina on kasutuses ATxmega32A4U, mille põhilisteks kasutatavateks omadusteks on, neli eraldi ADC muunduri kanalit, DAC konverter ning UART. Kontroller vajab töötamiseks 3,3V pinget, mille ta saab LD117ASTR lineaarsest pingeregulaatorist ning tema taktsageduse määrab 16MHz HC-49S kvartsikristall.[18]

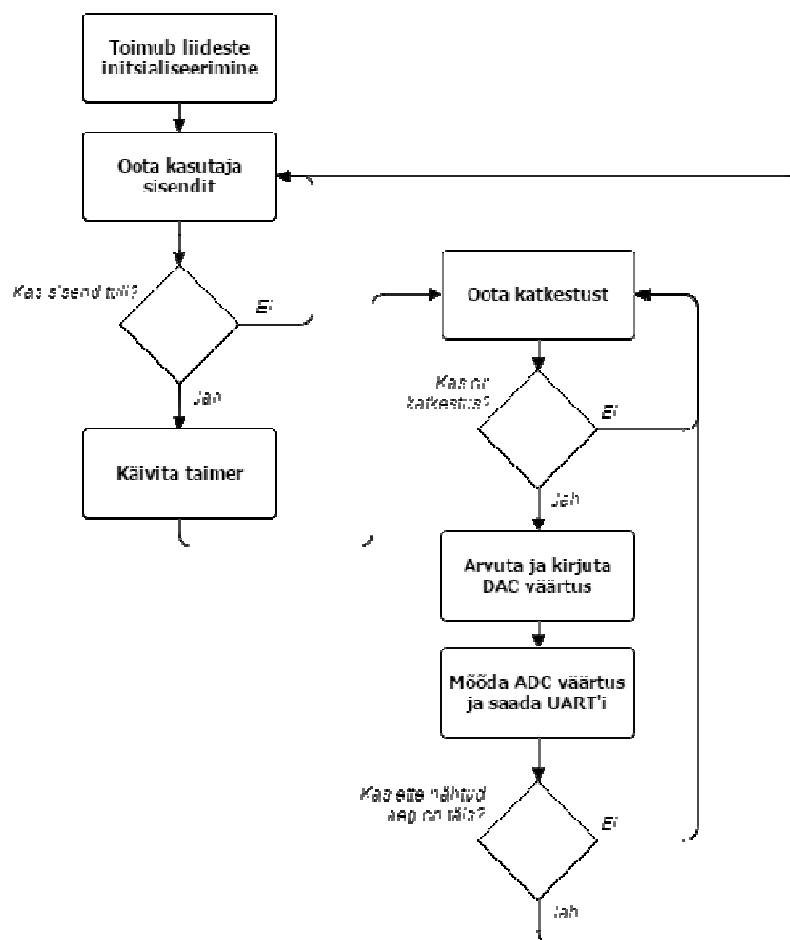
Toitepinge 5V tuleb läbi USB pordi, mille kaudu toimub ka andmevahetus arvuti ning mikrokontrolleri vahel. Selleks, et mikrokontrolleri sees poleks vaja USB protokollis sisalduvat tarkvaralist liidest kirjutada, kasutatakse FT230XS kiipi, mis realiseerib UART liidese arvuti ja mikrokontrolleri vahel.[19]

5.2. Tarkvara

5.2.1. Mikrokontrolleri püsivara

Mikrokontrolleri kood on kirjutatud C keeles ning on kirjutatud Atmel Studio 6.2 versioonis. Mikrokontrolleri mällu laeti programm kasutades atmeli poolt välja töötatud PDI'd (*programming and debugging interface*) AVR JTAGICE3.

Programm initsialiseerib UART liidese 100000 baud rate'ga, et oleks reaajas võimalik arvutile mõõtmistulemusi saata, seejärel initsialiseeritakse taimer 1 ms katkestusega, et oleks võimalik teha mõõtmisi kuni 1000 korda sekundis ning siis initsialiseeritakse DAC ning toimub ka ADC initsialiseerimine ning nullkalibratsioon, kus leitakse 0V pingel olev ADC näidu nihe, mis hiljem mõõtmistulemustest lahutatakse.



Joonis 5-2 Mikrokontrolleri programm

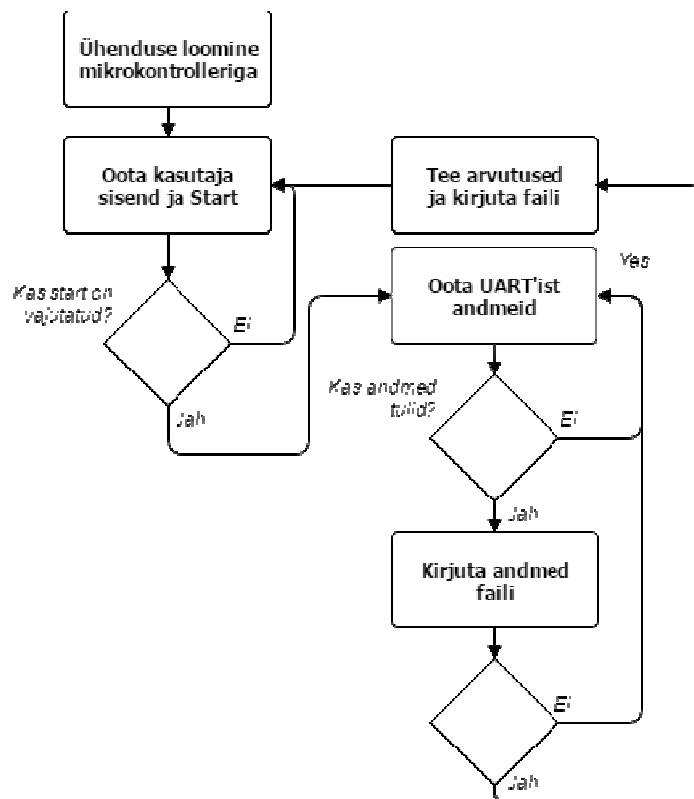
Edasi jääb programm ootama kasutajapoolset sisendit, mille kaudu antakse talle parameetrid signaali genereerimiseks. Muutuvateks parameetriteks on signaali kuju (kolmnurk või siinussignaali), amplituud (0-3,2V), sagedus ning mõõtmise aeg. Kui sisend on saabunud,

käivitub taimer, mis iga millisekundi tagant arvutab uue signaaliväärtuse, saadab selle DACi, siis teeb mõõtmised ADC kanalitesse ühendatud anduritelt ning saadab need üle UART ühenduse arvutile. Kui mõõtmisi on tehtud nõutud aeg, naaseb programm tagasi ootefaasi. Graafiliselt on töö põhimõte kujutatud joonisel 5-3 ning programmi kood on lisas number 1.

5.2.2. Kasutajaliidese programm

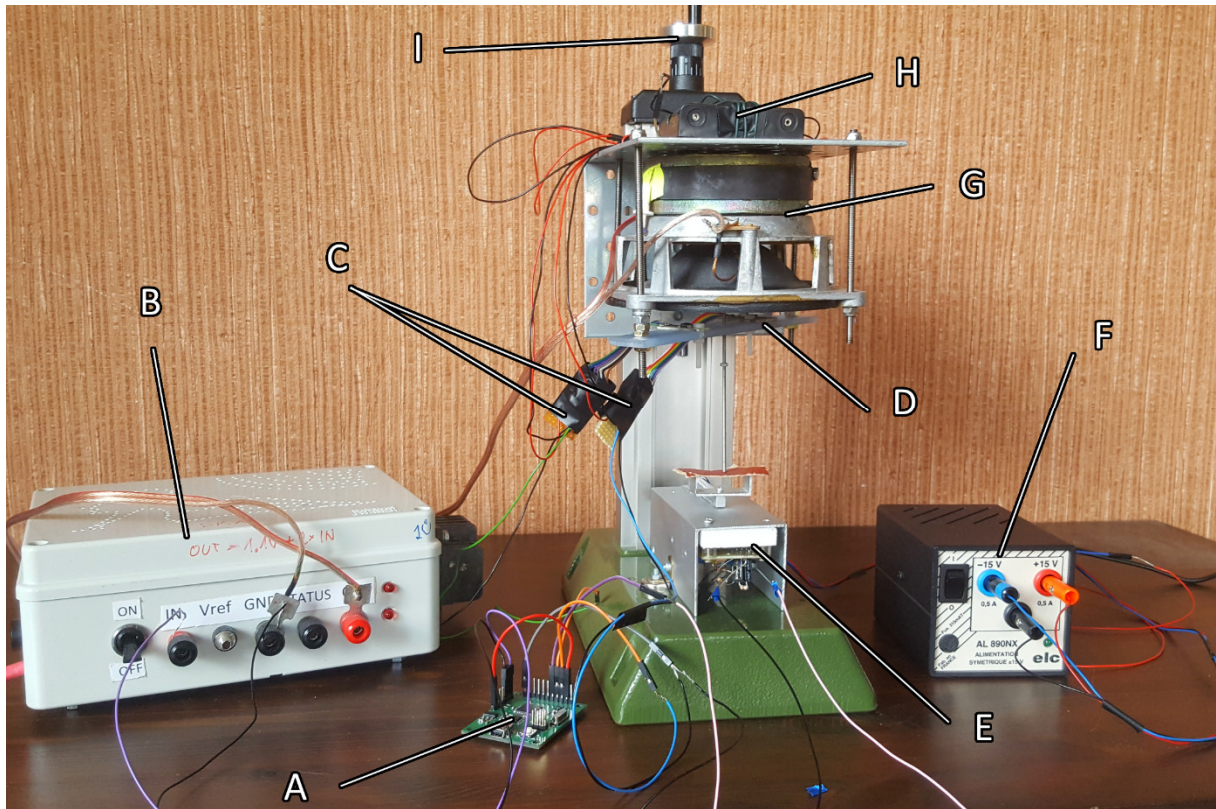
Kasutajaliidese programm on kirjutatud programmeerimiskeeles Python 3.6 ning selle realiseerimisel on kasutatud lisapakette *pyserial* UART ühenduse jaoks ning *tkinter* realiseerimaks graafilist lahendust.

Graafilise liidese programmi abil saab kasutaja lihtsalt testimise parameetrid sisestada. Programmi käivitamisel luuakse ühendus mikrokontrolleriga ning oodatakse kasutaja sisendeid kastidesse, kuhu saab sisestada soovitud signaali kuju, sageduse, amplituudi ning mõõtmise aja, ning Start nupu vajutamist. Pärast nupule vajutust saadetakse parameetrid mikrokontrollerisse ning jäädakse ootama mõõtmistulemusi. UART ühenduse kaudu saab programm andmed ja pärast ADC näidu pingeks teisendust kirjutab mõõtmistulemused kasutaja poolt määratud faili. Kasutajaliidese programmi loogika on graafiliselt kujutatud joonisel 5-4 ning programm on saadaval lisas number 1.



Joonis 5-3 Kasutajaliidese programm

5.3. Seadme ehitus



Joonis 5-4 DMA seade

Joonisel 5-4 on toodud lõputööna valminud seadme ehitus. Pildil on näha järgmised elemendid:

- A. Mikrokontroller ATxmega32A4U plaat, mille ADC ja DAC pin headerite külge on ühendatud Halli andurid, jõuandur ning väljund võimendisse.
- B. Kuna mikrokontroller suudab DAC kaudu välja anda pinget 0-3,3V ning maksimaalselt 50mA, siis see pole valjuhääldi membraani liigutamiseks piisav. Signaali võimendamiseks kasutatakse võimendit OPA548, mis on seatud sisendsignaali kaks korda võimendama ning -3,3V nihutama. Tänu sellele on maksimaalne valjuhääldile saadav pingeamplituud -3,3 – 3,3V.
- C. Halli andurite ühepooluselise ühenduse skeemid, mis on välja toodud joonisel 4-2.
- D. Halli andurid on kinnitatud horisontaalse lati külge valjuhääldi membraani lähedal võrdsele kaugusele valjuhääldist ning kehale jõudu avaldavast latist.
- E. Jõuandur ning tema võimenduskeem. Stabiliseerimiseks kinnitub alus magnetiga malmstatiivi külge.
- F. Jõuanduri võimenduskeemis kasutatavad operatsioonivõimendid vajavad -15V ja +15V toidet ning selle genereerimiseks kasutatakse toiteallikat AL890NX.

- G. Valjuhääldi 25 ZT-1, mida kasutatakse jõudu avaldava varda liigutamiseks. Varras on valjuhääldi membraani külge kinnitatud liimiga ning lisaks on selle külge kinnitatud ka püsिमagnet, mille tekitatud magnetvälja abil saab Halli anduritega arvutada membraani ja ka varda liikumise amplituudi.
- H. Halli andurid vajavad töötamiseks toitepinget 4-6V, mis saadakse neljast jadamisi ühendatud 1,5V AA-tüüpi patareist.
- I. Valjuhääldi ning Halli tajurid on stabiliseerimiseks kinnitatud minifreesi Proxxon MF70 statiivi külge ning neid on võimalik millimeeterkrugi abil üles-alla liigutada. See võimaldab meil varda seada täpselt soovitud vertikaalpositsioonile ning avaldada uuritavale objektile mehaanilist eelpinget.

6. Seadme kalibreerimine

6.1. Jõuanduri kalibreerimine

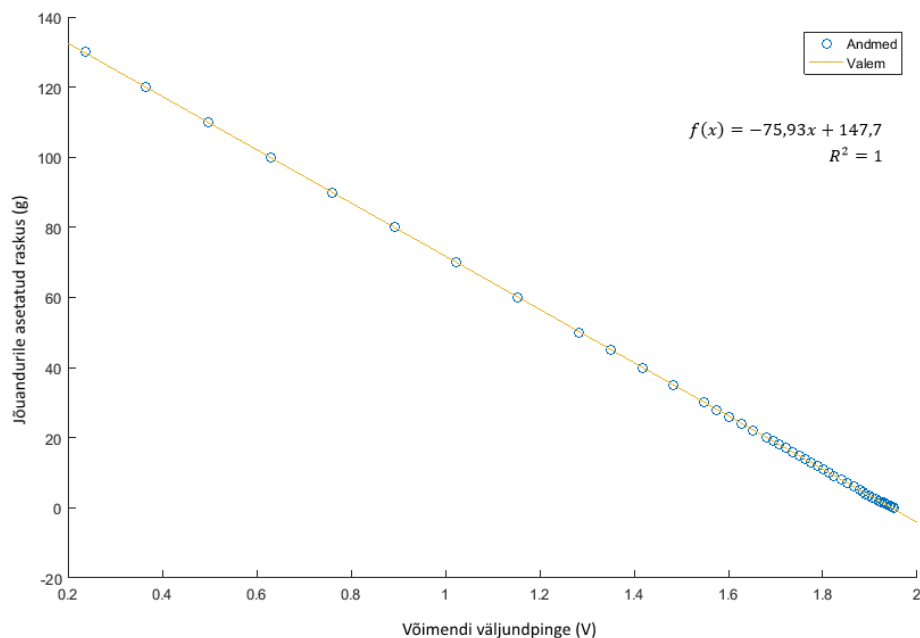
Jõuanduri puhul on meil vaja teada, mis pinge vastab kui suurele jõule. Sellist seost on kõige lihtsam leida kasutades kaaluvihte ning jälgides pinge muutumist raskusjõu rakendumisel. Mõõtmisprotsess nägi välja selline:

1. Mõõdeti esialgne süsteemi väljundpinge
2. Jõuandurile asetati teada oleva suurusega raskus
3. Mõõdeti väljundpinget
4. Samme 2 ja 3 rakendati mitu korda erinevate raskustega, et oleks võimalik luua seos

Jõuanduri võimendi väljundpinge ning temale asetatud massi vahel leiti lineaarne seos, mis on väljendatav valemiga:

$$f(x) = -75,93x + 147,7 \quad (18)$$

Oluline on märkida, et antud valem annab teisenduse massiks, mis tuleb ümber arvutada raskusjõuks. Mõõtmistulemused on välja toodud lisas number 2 ning seose graafiline kujutus on toodud joonisel 6-1.



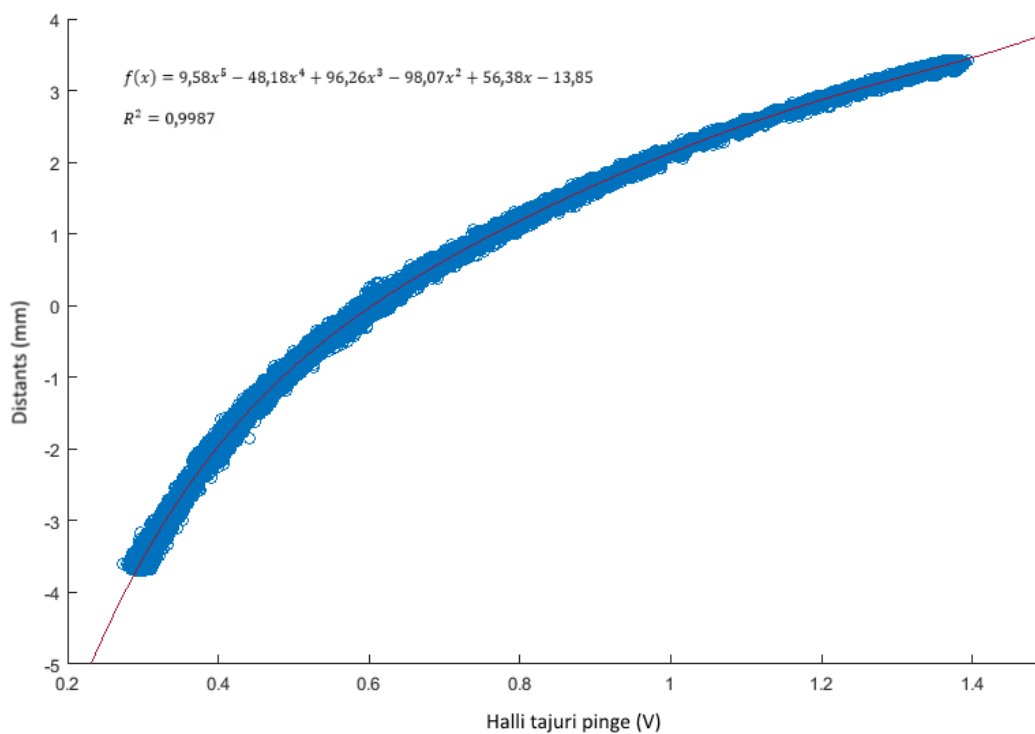
Joonis 6-1 Jõuanduri kalibratsioon

6.2. Halli tajuri kalibreerimine

Halli andureid kasutatakse käesolevas töös distantsi mõõtmiseks. Selleks, et saada seost pingemuudu ja varda liikumise kauguse vahel kasutati kalibratsiooni tarbeks lasermõõtjat LG10A65PU. Varda külge kinnitati ristisuunalise pinnaga väike plaat, millele osutati laserkiir ning seejärel ühendati nii lasermõõdik kui ka Halli efekti tajurid NI USB-6218 seadme külge, mille abil tehti mõõtmisi.

Mõõtmisprotsess nägi välja järgmine:

1. Valjuhääldisse saadeti siinus/kolmnurk pinget sagedusega 1-3Hz
2. Sagedusega 1000 Hz mõõdeti nii lasermõõtjast kui ka Halli anduritest näidud
3. Korrati samme 1 ja 2 suurema pingeamplituudiga
4. Lahutati siluva Halli anduri pinge magneti juures oleva tajuri pingest
5. Leiti seos tajuri väljundpinge ning distantsi vahel



Joonis 6-2 Halli anduri kalibratsioon

Mõõtmistulemused on esitatud lisa 1. Tulemusi analüüsid selgus, et mõõtmiste käigus tekkis mõõtmistes faasinihe, mis sai enne korrelatsiooni leidmist kompenseeritud. Sagedusest sõltumata olid laserkaugusmõõtja tulemused 50ms hilisemad, kui muud mõõtmised. Kuna laserkaugusmõõtjat kalibreerides selgus, et selle väljundpinge ja distants on seoses valemiga

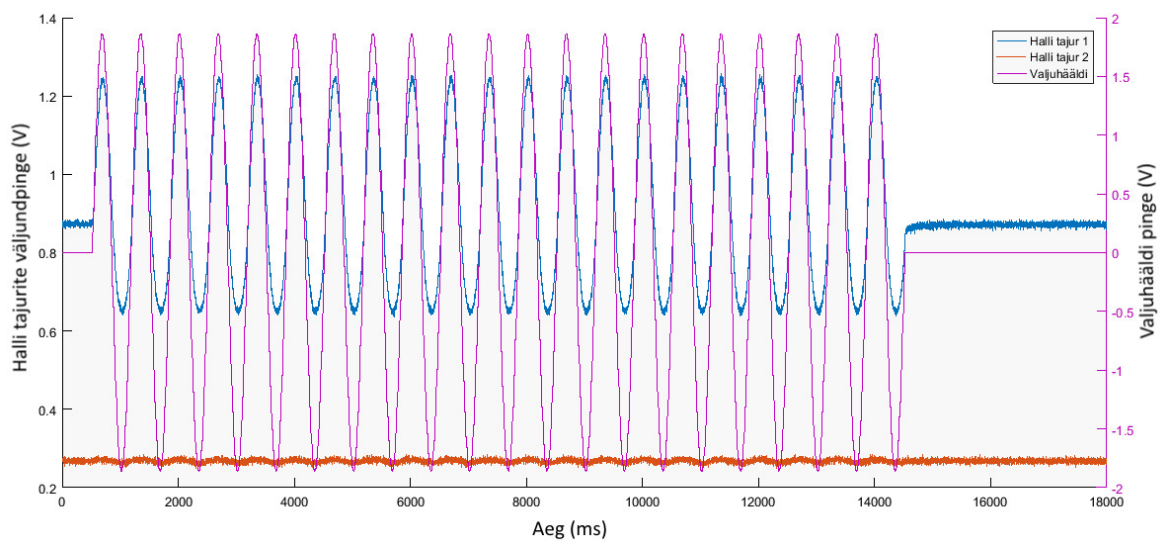
$$f(x) = 2,049x + 80,697, \quad (19)$$

siis oli võimalik leida korrelatsioon Halli tajurite pinge ning muutuva distantsi vahel, mis on graafiliselt kujutatud joonisel 6-2 ning seose valem on:

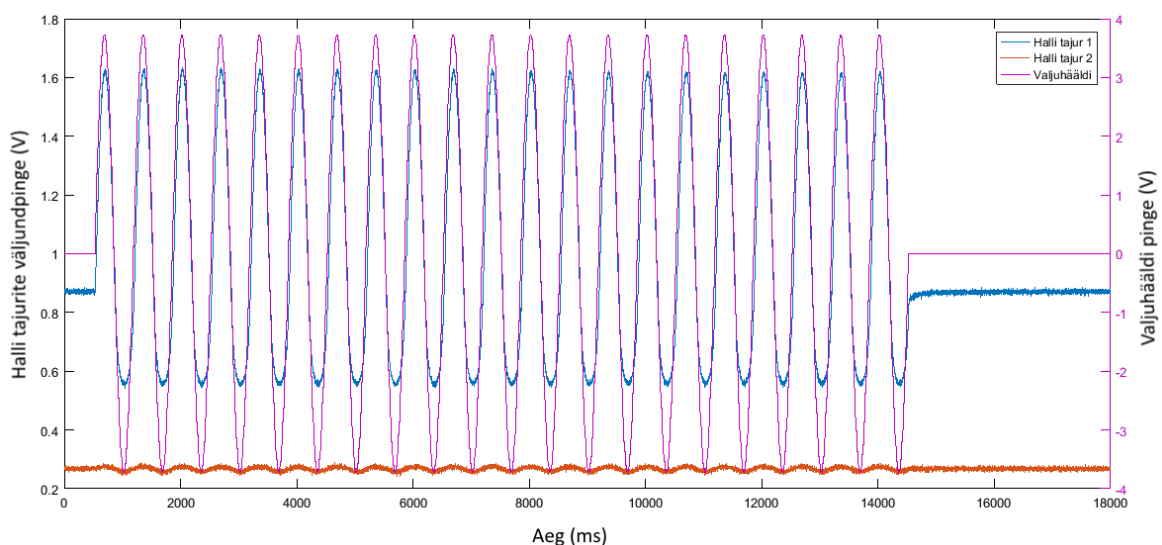
$$f(x) = 9,58x^5 - 48,18x^4 + 96,26x^3 - 98,07x^2 + 56,38x - 13,85 \quad (20)$$

6.3. Halli tajurite mürahinnang

Valjuhääldi liigutamine toimub elektromagneti abil ning tekkiv magnetväli on nõnda tugev, et mõjutab Halli anduri väljundpinget. Seetõttu on vajalik, et kasutataks kahte Halli andurit, millest ühe lähedal on vertikaalse varda külge kinnitatud püsिमagnet ning teine on samal kaugusel valjuhääldist, kuid püsिमagnet puudub. Andurid on valjuhääldist 1,6cm kaugusel.



Joonis 6-3 Mõõtmised valjuhääldi amplituudil ±1,8V



Joonis 6-4 Mõõtmised valjuhääldi amplituudil ±3,7V

Kui valjuhääldisse on saadetud siinussignaali $\pm 1,8\text{V}$, siis on halli andurite väljundpinged $0,64\text{--}1,25\text{V}$ esimese halli anduri puhul ning $0,26\text{--}0,27\text{V}$ teise anduri puhul ning $\pm 3,7\text{V}$ siinussignaali puhul on väljundpingete vahemikeks esimesel anduril $0,56\text{--}1,61\text{V}$ ning teisel anduril $0,25\text{--}0,28\text{V}$. Kahe anduri väljundpinge sõltuvalt valjuhääldi pingest on toodud joonistel 6-3 ja 6-4.

7. Seadme veahinnang

Seadme iseloomustamisel üks tähtsamaid parameetreid on seadme veahinnang, mis annab meile arusaama, kui täpselt on võimalik ette nähtud parameetreid mõõta. Kui rakendada elastsusmooduli mõõtmiseks valemit 10, siis selle kaudu avaldub arvutusviga järgmiselt.

$$\gamma_E = \gamma_F + 3\gamma_L + \gamma_d + \gamma_b + 3\gamma_h \quad (21)$$

Kus γ_E on elastsusmooduli suhteline viga, γ_F on rakendatava jõu suhteline viga, γ_L on kahe mõõtepunkti vahelise kauguse suhteline viga, γ_d on painde ulatuse suhteline viga, γ_b on uuritava keha laiuse suhteline viga ning γ_h on katsekeha paksuse suhteline viga.

Jõu mõõtmise suhteline viga avaldub läbi teisendusvalemi ning mikrokontrolleri ADC vea. ADC mõõtmisviga on tingitud tema resolutsioonist ning kuna valemi sobilikkus seost iseloomustama oli 99,87%, siis on $\gamma_F = 0,0013 + 1/4096 = 0,0015$.

Teine mikrokontrolleriga mõõdetud väärtus on painde ulatus ning selle suhteline viga avaldub läbi valemi sobivuse ning ADC. Valemi sobivus seost iseloomustama on 98,15% ning sellest tulenevalt on $\gamma_d = 0,019$.

Keha laiust γ_b ning kahe punkti vahelise kaugust γ_L mõõdetakse nihikuga ning nende täpsust hakkab iseloomustama nihiku mõõteviga. Sellest tulenevalt on nende suhtelised vead $\gamma_b = 0,1/13,5 = 0,0074$ ja $\gamma_L = 0,1/28 = 0,0036$.

Kasutatava materjali paksust mõõdetakse mikromeetriga, mille absoluutne viga on 0,01mm ning selle kaudu tuleb suhteline viga $\gamma_h = 0,01/0,14 = 0,071$.

Kokkuvõtvalt tuleb seadme veahinnanguks

$$\gamma_E = 0,0015 + 3 \cdot 0,0036 + 0,019 + 0,0074 + 3 \cdot 0,071 = 0,2517. \quad (22)$$

See tulemus on küll üsna ebatäpne, kuid tuleb tähele panna, et suureks mõjutajaks on materjali paksuse täpsus ning ka kahe punkti vahelise kauguse täpsus, mida mõlemat kolmekordistatakse. Seega, mida täpsemalt on võimalik mõõta materjali paksust ning neid parameetreid, mida katse käigus sai nihikuga mõõdetud, seda parem on ka elastsusmooduli täpsus.

8. Näidismõõtmine

Töö tulemusel valminud seadmega sai dünaamiliselt mõõdetud terasest katsekeha. Kahe punkti vaheline kaugus oli L 2,8 cm, keha laius d oli 1,71 cm ning paksus 140 μ m.

Asendades tulemused valemisse 10, saame valemi

$$E = \frac{F \cdot (0,028m)^3}{4 \cdot 0,0171m \cdot b \cdot (0,00014m)^3} \quad (23)$$

Seadme poolt mõõdetud jõu F ning deformeerimise ulatuse b valemisse asendades mõõdetud erineva jõu rakendumisel elastsusmoodul E ning tulemuste mediaaniks sai 215 GPa ning aritmeetiliseks keskmiseks 218 GPa, mis arvestades valemis 22 saadud seadme veahinnangut 25,17% tähendab tulemust 218 ± 54 GPa. Tabeli 1 järgi on terase elastsusmoodul 200GPa, seega võib öelda, et seade on võimeline elastsusmoodulit õiges suurusjärgus mõõtma. Täpsemad mõõtmistulemused on välja toodud lisan 1.

Viited

- [1] *Wikipedia – The Free Encyclopedia | Young’s modulus* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 05.05.2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus
- [2] K. Kokk, *DMA mõõteseade*, 2016
- [3] *IMPRESS Education | Mechanical Properties* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 26.04.2017] <http://spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/index.html>
- [4] I. Kleis, H. Arumäe, *Rakendusmehaanika*, 2001
- [5] W. D. Callister Jr., *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, 2001
- [6] *IMPRESS Education | Mechanical Properties, Additional Moduli* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 26.04.2017] <http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/MoreModuli.html>
- [7] PerkinElmer Inc., *Introduction to DMA*, 2008
- [8] K. P. Menard, *Dynamic Mechanical Analysis – Second Edition*, 2008
- [9] *eFunda | Strain Gage: Theoretical Background* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 29.04.2017]
- [10] *Wikipedia – The Free Encyclopedia | Strain gauge* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 29.04.2017] https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge
- [11] *Tallinna tööstushariduskeskus | Jõu- ja mehaanilise pinge andurid* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 29.04.2017] http://www.tthk.ee/MEH/Andurid_3.html
- [12] *National Instruments | Measuring Strain with Strain Gages* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 29.04.2017] <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/>
- [13] K. Hoffman, *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*
- [14] J. Williams, *Application note 43: Bridge Circuits Marrying Gain and Balance*, 1990
- [15] *National Institute of Standards and Technology | The Hall Effect* [Võrgumaterjal] [Kasutatud 27.04.2017] <https://www.nist.gov/pml/engineering-physics-division/hall-effect>
- [16] E. Ramsden, *Hall-Effect Sensors: Theory and Application - Second Edition*, 2006
- [17] Analog Devices, *Linear Output Magnetic Field Sensor AD22151 Datasheet*
- [18] Atmel, *8/16-bit Atmel XMEGA Microcontroller ATxmega32A4U Datasheet*
- [19] Future Technology Devices International Ltd., *USB to basic UART IC FT230X Datasheet*

Lisad

Lisa 1. Lõputööga koos üles laetud zip faili sisu, mis sisaldab:

- Mikrokontrolleri püsivara ning kasutajaliidese programmi kood
- Kalibreerimisprotsessi mõõtmistulemused
- Näidismõõtmise tulemused

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kaarel Adamson,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) enda loodud teose

DMA mõõteseade, mille juhendaja on Andres Punning,

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **17.05.2017**