



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**DÜNAMOMEETRI ARENDAMINE
TUDENGIVORMELI VEERMIKUHOODELE
MÕJUVA JÕU MÕÕTMISEKS**

**STRAIN MEASUREMENT DEVICE DEVELOPMENT FOR
FORMULA STUDENT CLASS CAR**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Martin Luts

Üliõpilaskood: 164552MAHB

Juhendaja: Indrek Roasto, Vanemteadur

Tallinn 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....201.... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Martin Luts (sünnikuupäev: 15.03.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Dünamomeetri arendamine tudengivormeli veermikuhuobadele mõjuva jõu mõõtmiseks, mille juhendaja on Indrek Roasto,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

SISUKORD

EESSÕNA.....	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	9
1 DÜNAMOMEETRI OLEMUS JA LÄHTEÜLESANNE	10
1.1 Mehhaaniline dünamomeeter	10
1.2 Digitaalne dünamomeeter	10
1.2.1 Deformatsioonimõõtur	10
1.2.2 Wheatstone'i sild.....	13
1.3 Tudengivormel FEST20 kinemaatika	14
1.3.1 Tudengivormeli FEST20 veermikus kasutatavad hoovad	15
1.3.2 Deformatsioon tudengivormeli veermikus	15
1.4 Tudengivormeli FEST20 elektrisüsteem	17
1.4.1 Kõrgepingesüsteem.....	17
1.4.2 Madalpingesüsteem	17
1.4.3 Mõõtetulemuste salvestamine ning kasutajaliides.....	18
1.5 Projekteeritava dünamomeetri kirjeldus	19
2 DÜNAMOMEETRI RIISTVARA PROJEKTEERIMINE.....	20
2.1 Signaalivõimendi valik	21
2.2 ADC valik.....	21
2.3 Mikrokontrolleri valik	22
2.4 CAN transiiveri valik.....	23
2.5 Trükkplaadi ühildumine tudengivormeliga	24
2.6 Pingemuundurite ahelad	25
2.7 Signaalivõimendi ahel.....	26
2.7.1 Wheatstone'i sild trükkplaadil.....	28
2.8 Analoo digitaalmuunduri ahel	29
2.9 Mikrokontrolleri ahel.....	30
2.10 Komponentide paigutus trükkplaadil	31
2.11 Analooahelate projekteerimine trükkplaadile	33
2.12 CAN transiiveri ahelate projekteerimine trükkplaadile	34
2.13 Komponentide trükkplaadile fikseerimine	35
3 DÜNAMOMEETRI TARKVARA	37
3.1 Dünamomeetri tarkvara kirjeldus	37

3.2	SPI liidese andmevahetus	38
3.2.1	ADC seadistamine SPI liidese kaudu	39
3.2.2	Väärtuse lugemine ADC registrist SPI liidese kaudu	40
3.3	Mikrokontrolleris arvatavad väärtused	41
3.4	Andmete edastamine CAN busi	41
4	PROTOTÜÜBI KATSETUS NING MÕÕTETULEMUSED	43
4.1	Katse ettevalmistus	43
4.1.1	Katsekeha valik	43
4.1.2	Deformatsioonimõõtuuri paigaldamine katsekehale	43
4.2	Katse käik	43
4.3	Katse tulemused	46
	KOKKUVÕTE	50
	SUMMARY	51
	KASUTATUD KIRJANDUS	52
	LISAD	54

EESSÕNA

Lõputöö on valminud Tallinna Tudengivormeli meeskonna initsiatiivil. Antud lõputöö on meeskonna jaoks oluline projekteeritud veermiku valideerimiseks. Lõputöö lähteandmed ning ülesandepüstitus põhinevad Tudengivormeli FEST20 projekteeritud andmetel.

Lõputöö autor soovib tänu avaldada juhendajale, Indrek Roastole, kes andis lõputöö tegemiseks hüva nõu, samuti endistele ja praegustele meeskonnaliikmetele, kellelt pärinevad lõputöö teema jaoks lähteandmed ning kes abistasid graafiliste lahendustega. Kogu meeskonna nimel avaldatakse tänu Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanika ja tööstustehnika instituudi mehaanika ja metroloogia katselaborile.

Sisu kirjeldus: Käesoleva lõputöö eesmärgiks on arendada mõõtesüsteem, millega mõõta tudengivormeli veermikuhoobadele mõjuvaid jõudusid. Mõõtesüsteem on vajalik projekteeritud veermiku valideerimiseks.

Kuna sellist tüüpi mõõteseadmeid ei ole kaubanduses saada, siis tuli mõõtesüsteem ise projekteerida. Projekteerimisel lähtuti tudengivormeli auto poolt ette seatud tingimustest ning mõõtmisi mõjutavatest keskkonnatingimustest.

Töö käigus projekteeritud mõõtesüsteem töötas, aga liigse ebatäpsuse tõttu ei olnud seda võimalik kasutada veermiku valideerimiseks. Süsteem vajab edasiarendamist ning töö lõpuosas on kirjeldatud põhjuseid, miks mõõtmine ebaõnnestus.

Märksõnad: elektroonika, mikrokontrollerid, signaalivõimendi, tudengivormel, bakalaureusetöö.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

<i>ADC</i>	Analoog - digitaalmuundur
<i>CAN bus</i>	<i>Controller Area Network</i> , Autotööstuses kasutatav sõnumiprotokoll
<i>SPI</i>	<i>Serial peripheral interface</i> , sünkroonse järjestiksuhtluse liidese standard
<i>STM</i>	Mikroskeemide tootja
<i>STM32F7</i>	Mikroskeemide tootja STM mikrokontrollerite seeria
<i>VDC</i>	Alalisvoolu pinge
<i>SD kaart</i>	<i>Secure Digital</i> mälukaart, tootja Secure Digitali poolt välja töötatud mälukaardi formaat

SISSEJUHATUS

Formula Student Team Tallinn on alates 2006 aastast tegutev Formula Student sarjas osalev meeskond. Meeskond asub Tallinnas ning koosneb peamiselt Tallinna Tehnikaülikoolis ning Tallinna Tehnikakõrgkoolis õppivatest bakalaureuse- ning magistriõppe inseneritudengitest. Aastatel 2006 – 2013 võistles meeskond sise põlemismootoriga tudengivormelite klassis, alates 2013 aastast liiguti üle elektrivormelite klassi, kusjuures esimene nelikveoga elektrivormel valmis aastal 2015. Alates 2018 aastast arendatakse lisaks elektrivormelile ka paralleelselt isesõitvat vormelit. Meeskonna eesmärgiks on edukas osalemine Euroopas toimuvatel tudengivormeli sarja võistlustel ning laiemalt noortele inseneridele teadmiste, esmase töökogemuse ning meeskonnatöö andmine. [1]

Antud bakalaureuse lõputöö eesmärgiks on arendada Formula Student Team Tallinna autodele mõõtesüsteem, millega on võimalik mõõta õõtshoobadele, roolivarrastele ja tõukurvarrastele mõjuvaid jõude tööolukorras, kuni käesoleva ajani ei ole Formula Student Team Tallinna autodel antud mõõtmisi teostatud. Antud mõõtesüsteem on meeskonnale oluline selleks, et valideerida projekteerimise käigus saadud arvutuslikke veermikule mõjuvaid jõude reaalses olukorras tekkivatega. Mõõdetud jõudude abil on võimalik hinnata, kas veermik on projekteeritud optimaalselt või on veermiku projekteerimise käigus eksitud ning tekkivad jõud on kasutatavate hoobade jaoks liiga suured või väikesed. Saadud tulemustest sõltub veermikuhoobade materjal, mõõtmed ja kaal. Eesmärk on kasutada võimalikult optimaalseid hoobasid. Käesolev teema on aktuaalne ka autotööstuses ja lääneühiskoonas laiemalt, kus liigutakse resursse ning loodust säästvate lahenduste poole. Optimaalne lahendus säästab autode kaalu ning seetõttu on autod ka ökonoomsemad.

Mõõtesüsteem tehakse ise, kuna antud mõõtmisteks kasutatavat seadet ei ole üldkaubandusest leida ning antud mõõtmistega tegelevad mõõtetehnikale spetsialiseerunud ettevõtted eritellimustel. Töö koostajale ei ole töö koostamise ajaks teada, et Eestis oleks ettevõtteid, kes sellise mõõtmisega tegeleks. Tudengivormeli sarjas konkureerivad ülejäänud meeskonnad kasutavad antud mõõtmisteks kas toetajate või ülikoolide seadmeid ja teenuseid.

Käesoleva Bakalaureuse lõputöö esimeses osas selgitatakse erinevate dünamomeetrite tööpõhimõtteid. Teises osas kirjeldatakse dünamomeetri projekteerimiseks lähteandmeid ning keskkonnatingimusi. Kolmandas kuni kuuendas osas seletatakse põhjalikumalt lahti dünamomeetri projekteerimisprotsess.

Dünamomeetri valmistamisel kasutati trükkplaadi projekteerimiseks tarkvara Altium Designer ning mikrokontrolleri programmeerimiks tarkvarasid STM32CubeMX ja Atollic TrueStudio.

1 DÜNAMOMEETRI OLEMUS JA LÄHTEÜLESANNE

1.1 Mehhaaniline dünamomeeter

Klassikaline mehhaaniline dünamomeeter koosneb vedrust, mille pikkuse muutuse järgi on võimalik arvutada vedrule mõjuv jõud vastavalt Hooke'i seadusele kui on teada vedru konstant.

Vedrule mõjuva jõu arvutamine vastavalt Hooke'i seadusele [2]:

$$F_s = k * x \quad (1.1)$$

Kus F_s – vedrule mõjuv tõmbejõud

k – Vedru konstant

x – vedru pikkuse muutus

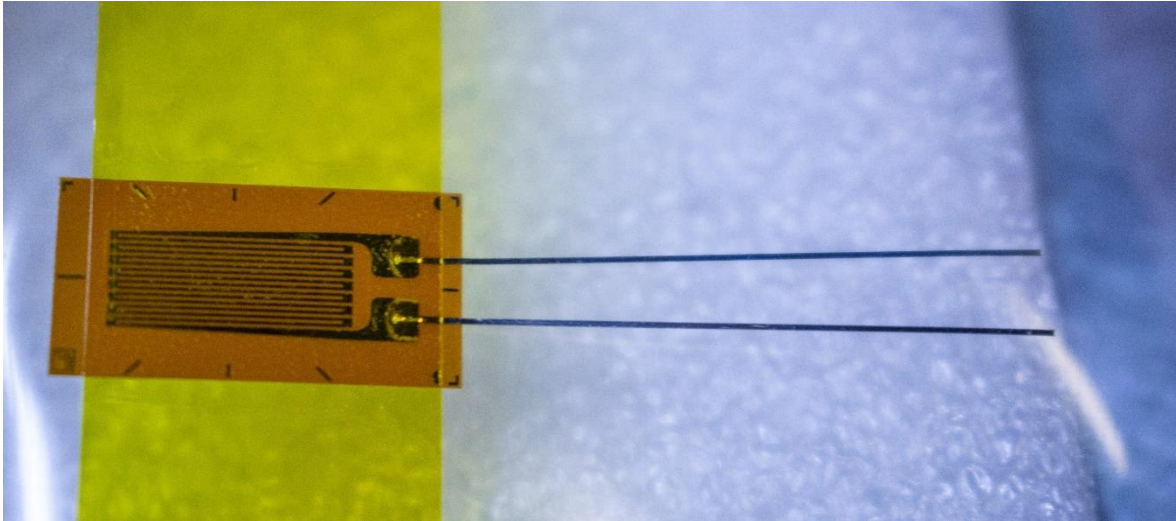
Klassikalist dünamomeetrit saab kasutada staatiliste jõudude mõõtmiseks või kehade kaalumiseks.

1.2 Digitaalne dünamomeeter

Digitaalsetes dünamomeetrites kasutatakse deformatsioonimõõtureid, mille füüsikalised parameetrid muutuvad kui nendele jõudu rakendada. Deformatsioonimõõturid on paigutatud elektriskeemis wheatstone'i silla konfiguratsioonis, tänu millele on võimalik mõõta väikeseid pingeerinevusi, mis tekivad kui deformatsioonimõõturi takistus muutub tema deformatsiooni tõttu. Wheatstone'i sillal tekkinud pingeerinevus on võimalik ümber arvutada deformatsioonimõõturi pikenemiseks või lühenemiseks ning vastavalt materjali pikenemisele, mille deformatsioonimõõtur asetseb, saab arvutada materjalile mõjuva jõu.

1.2.1 Deformatsioonimõõtur

Deformatsioonimõõtur on seade, millega mõõdetakse mõõdetava objekti deformeerumist. Deformatsiooni all peetakse antud seadmetega mõõtes enamasti pikenemist või lühenemist. Seade koosneb elastsest isoleerivast materjalist, mille sees on sikk-saki kujuliselt paigutatud elektrit juhtiv rada. Kui deformatsioonimõõtur elastselt pikeneb, siis suureneb tema takistus, kui lüheneb, siis muutub takistus väiksemaks. Antud töös kasutatud deformatsioonimõõturit on kujutatud joonisel 1.1.



Joonis 1.1 Deformatsioonimõõtur HBM 1-LY11-10/120A [3]

Deformatsioonimõõturi suhet mehaanilise muutuse ja tema elektrilistakistuse vahel kirjeldatakse pikenemisteguriga (strain factor) [4]

$$K = \frac{\Delta R}{Rg} \div \frac{\Delta L}{Lg} = \frac{\Delta R}{Rg} \div \varepsilon = 1 + \frac{2}{\nu} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \div \varepsilon \quad (1.2)$$

Kus K – pikenemistegur (strain factor)

ΔR – deformatsioonimõõturi takistuse muutus, Ω

Rg – deformatsioonimõõturi takistus algolekus, Ω

ΔL – deformatsioonimõõturi pikkuse muutus, mm

Lg – deformatsioonimõõturi pikkus algolekus, mm

ε – normaalpikenemine

ν – Poissoni tegur

$\Delta \rho$ – eritakistuse muutus, $\Omega \cdot \text{mm}$

ρ – eritakistus, $\Omega \cdot \text{mm}$

Mõõturid kinnitatakse mõõdetavale pinnale liimiga. Pind peab olema eelnevalt puhastatud, et tagada deformatsioonimõõtuuri ühtlane asetsemine pinnal ning liimi nakkumine. Deformatsioonimõõturite takistuse muutus deformatsiooni korral jääb enamasti vahemikku $0 \Omega - 2 \Omega$. Kuna deformatsioonimõõturite takistuse muutus deformatsiooni korral on küllaltki väike, siis tuleb täpse mõõtetulemuse saamiseks arvesse võtta ka erinevaid keskkonnategureid, mis deformatsioonimõõtuuri takistust mõjutavad. [5]

Deformatsioonimõõturit mõjutavad keskkonnategurid on näiteks temperatuur, õhuniiskus ja elektromagneetilised häired. Deformatsioonimõõturid on väga tundlikud temperatuurile. See tähendab, et nende takistus sõltub temperatuurist ning mõõtmisel tuleb temperatuuri arvesse võtta. Kui mõõtmine toimub stabiilse temperatuuriga keskkonnas, näiteks ruumis, mille temperatuur lühikese aja jooksul ei muutu, siis saab deformatsioonimõõtuuri temperatuuri tõttu muutuvat takistust kompenseerida tavalise termomeetri abil. Kuna temperatuurist oleneb materjali pikenemine, siis saab temperatuuri tõttu toimuva pikenemise välja arvutada järgnevalt [6]:

$$\varepsilon_t = \alpha * T \quad (1.3)$$

Kus ε_t – Temperatuuri tõttu toimuv pikenemine

α – ruumpaisumistegur

T – temperatuur

Lisaks temperatuurile mõjutab mõõtmist ka õhuniiskus. Kui mõõtmine toimub välistingimustes kus õhuniiskus on võrreldes siseruumidega kõrge, siis tuleb kõik mõõteahelas kasutatavad juhtmed ja ühendused isoleerida nii, et õhuniiskus neile ligi ei pääseks. Õhuniiskus võib põhjustada metallidel korrosiooni, mis omakorda võib tekitada ahelasse lisatakistuse.

Oluline on deformatsioonimõõtureid kasutades arvestada ka elektromagneetiliste häiretega kui tegu on täpsete mõõtmistega. Enamasti kasutatakse deformatsioonimõõturite takistuse mõõtmiseks wheatsone'I silda, mille ergutuspinget deformatsioonimõõturite takistusega muundatakse Elektromagneetiline induktsioon mõjutab mõõdetavas ahelas olevat pinget ning täppismõõtmiste korral tekitavad probleeme juba indutseeritud mikrovoldid.

Keskkonnas, kus on ühtlane temperatuur, õhuniiskusega on arvestatud ning ei esine elektromagneetilisi häireid, saab deformatsioonimõõtureid kasutada küllaltki lihtsalt. Näiteks ühtlase temperatuuriga toas saab temperatuurist tulenevaid muutusi kompenseerida termomeetriga ning juhtmete korrodeerumisest õhuniiskuse käes kaitsevad tavalised juhtmeisolaatorid. Sellisel viisil kasutatakse

deformatsioonimõõtureid käsi-dünamomeetrites ning kaaludes. Kui deformatsioonimõõtur asub keskkonnas, kus temperatuur mõõtmise ajal muutub pidevalt, siis tuleb temperatuurimuutusi kompenseerida mitme Wheatstone'I silda paigutatud deformatsioonimõõturi abil. [7]

1.2.2 Wheatstone'i sild

Wheatstone'i sillaks nimetatakse kahte rööbiti astsevat pingejagurit. Pingejagurite toitepinget nimetatakse ergutuspingeks. Wheatstone'i sillas mõõdetakse pinget mõlema pingejaguri esimese ja teise takisti vahel, seda pinget nimetatakse väljundpingeks.

Teades kolme takisti väärtust on võimalik määrata mõõdetud pingeerinevuse põhjal neljanda takisti väärtus. Wheatstone'i sildades, mida kasutatakse andurite takistuse mõõtmiseks kasutatakse takistite asemel andureid, mille tööprintsibiiks on takistuse muutumisel, samuti kasutatakse andureid koos takistitega. [8]

Wheatstone silda, mida on kujutatud joonisel 1.2, eelistatakse tavalisele pingejagurile täppismõõtesüsteemides, kuna Wheatstone'i sild kompenseerib võimalikke vigade tekkimist. Näiteks on sillaga elimineeritud toiteahela pinge kõikumisest tulenev viga ning esialgne pingenihe. Kuna pinge muutus on võrreldes esialgse pingenihega on väga väike, jäädes maksimaalselt mõne millivoldi juurde, siis on analoog - digitaalmuunduritega saavutatav mõõtepiirkond väga väike. Kasutades Wheatstone'i silda, on mõõtetulemuseks millivoltidesse jääb kahe pingejaguri vaheline differentsiaalpinge, mida saab võimendiga võimendada ning seejärel ADC'sse sisse lugeda. Tavalise pingejaguriga mõõtmise korral oleks vaja teada ka ühe takisti väärtust väga täpselt, mis Wheatstone'i silla puhul ei ole oluline.

Wheatstone sillas saab arvutada tundmatu takisti R_4 väärtuse Skeemil 1.1 toodud konfiguratsiooni korral järgmise valemi järgi [9]:

$$R_4 = \frac{R_2 * V_s - (R_1 + R_2) * V_g}{R_1 * V_s + (R_1 + R_2) * V_g} R_3 \quad (1.4)$$

Kus R_1 – Takisti R1 väärtus, oomides

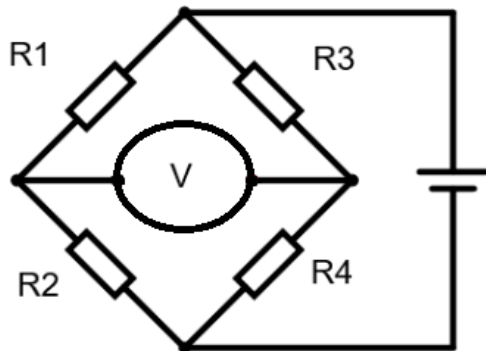
R_2 – Takisti R2 väärtus, oomides

R_3 – Takisti R3 väärtus, oomides

R_4 – Takisti R4 väärtus, oomides

V_s – Wheatstone silla toitepinge, voltides

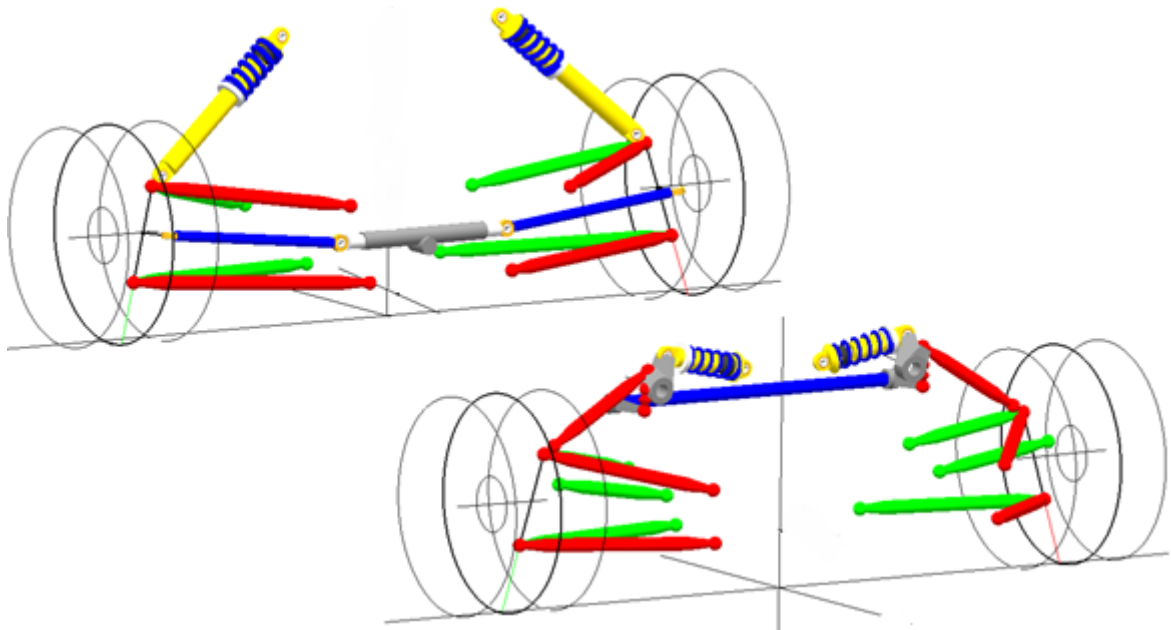
V_g – Wheatstone silla pinge, voltides



Joonis 1.2 Wheatstone'i Sild

1.3 Tudengivormel FEST20 kinemaatika

Tudengivormel FEST20 veermikus kasutatakse esi- ja tagateljel topelttõtshoob lahendust tõukurvarrastega, mille geometria on kujutatud joonisel 1.3. Vedrustuse hoobades mõjuvad jõud arvutatakse kinemaatika projekteerija poolt vastavas MS Excelli arvutusmoodulis. Kogu hoovastik on projekteeritud nii, et maksimaalne hoova pikenemine on 0,1 mm. Hoovastik peab olema jäik, et tagada kinnituspunktide võimalikult väike muutus nende projekteeritud algseade suhtes. [10]



Joonis 1.3 FEST20 esi- ja tagavedrustuse geometria

1.3.1 Tudengivormeli FEST20 veermikus kasutatavad hoovad

Tudengivormelil FEST20 veermikus kasutatakse süsinikkomposiitmaterjalist valmistatud torusid, üks nendest on roolivarras, mis on näidatud joonisel 1.4. Varasematel vormelitel on kasutatud terasest torusid (25CrMo4). Süsinikkomposiitmaterjalist valmistatud torude eelis terasest valmistatute ees on nende kergem kaal. Samuti on süsinikust toru külge lihtsam paigaldada toru-lõppusid. Olenevalt jõule ja selle suurusele kasutatakse eri kohtadest erineva läbimõõdu ning seinapaksusega torusid.



Joonis 1.4 Tudengivormeli FEST20 süsinikust roolivarras koos torulõpuga [11]

1.3.2 Deformatsioon tudengivormeli veermikus

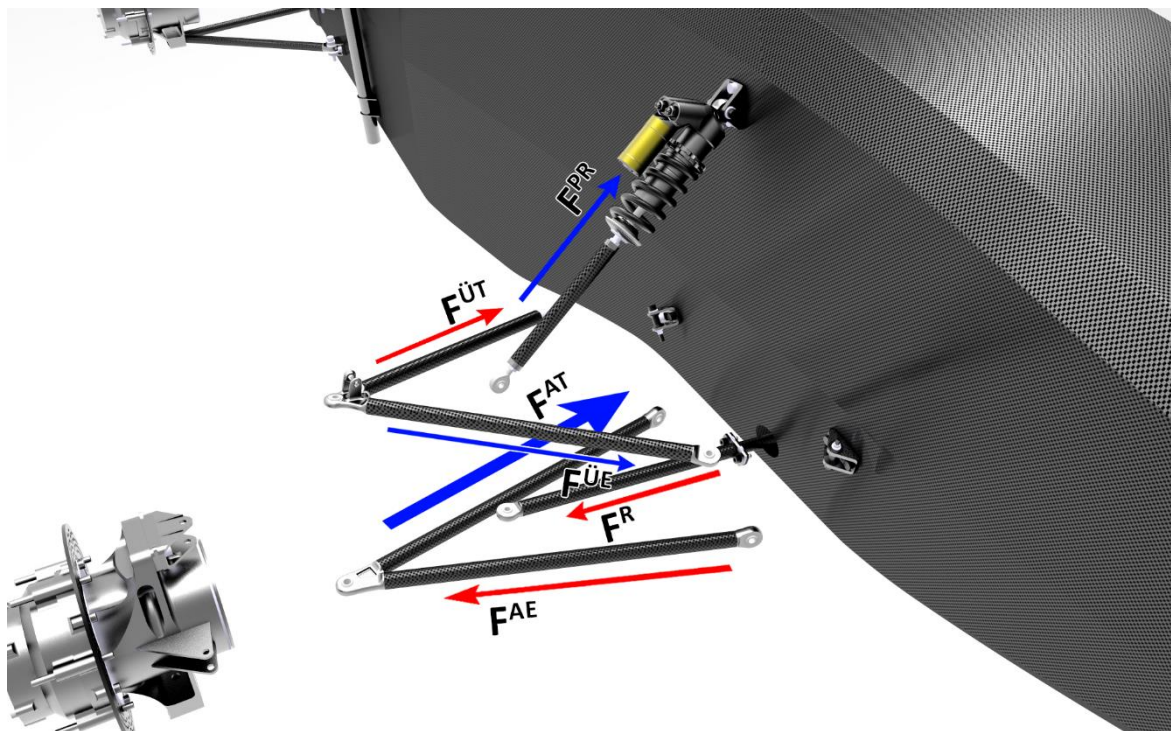
Deformatsioon on keha kuju ja mõõtmete muutus kehale avalduva jõu tulemusel. Antud töös uuritakse deformeeruvaid süsinikkiust torusid, mida on kasutatud tudengivormeli veermiku ehitusel, vormeli veermikuvarrastele mõjuvad jõud on kujutatud joonisel 1.5. Torud on projekteeritud töötama pikenemisele ning lühenemisele. Normaaldeformatsioon on keha algpikkuse ja pikenemise suhe [12]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.5)$$

Kus ε – suhteline normaaldeformatsioon

L – keha algpikkus

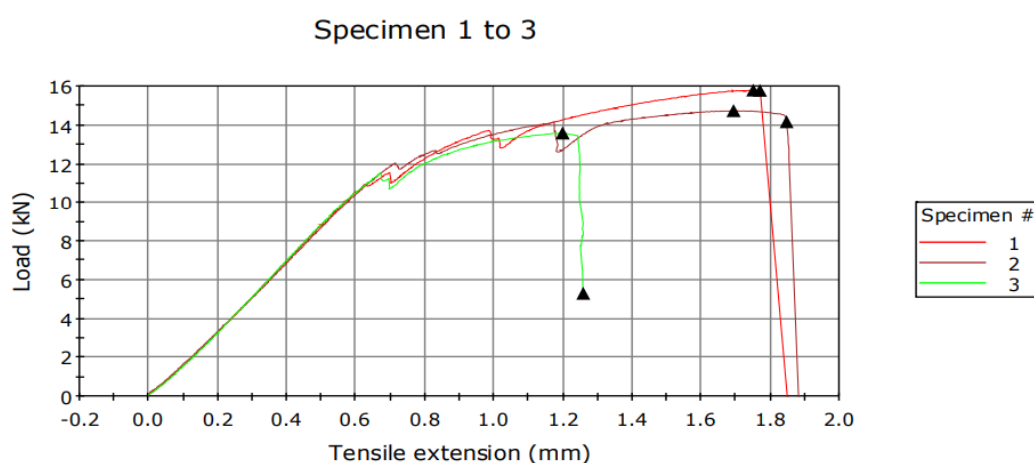
ΔL – Pikkuse muutus



Joonis 1.5 Tudengivormeli veermikule mõjuvad jõud [13]

Vastavalt mõõdetud deformatsioonile saab tõmbegraafiku alusel määrata jõu, mis torule mõjub. Süsinikvarraste tõmbegraafikud on tehtud Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika ja tööstustehnika instituudi mehaanika ja metroloogia katselabori tõmbepingis. Veermikuhoobadele mõjuvad jõud tudengivormelil FEST20 jäävad vahemikku 0N – 10kN. Graafikul 1.1 on kujutatud erinevate süsinikvarraste tõmbeteime.

Graafik 1.1 Süsinikkiudvarraste tõmbeteim [14]



	Specimen label	Maximum Load (kN)	Load at Break (Standard) (kN)	Tensile extension at Maximum Load (mm)	Extension at Break (Standard) (mm)	Comment	Rate 1 (mm/min)
	1	15,78	15,77	1,75	1,77		1,0
	2	14,72	14,16	1,69	1,85		1,0
	3	13,58	5,33	1,20	1,26		1,0
	Mean	14,70	11,75	1,55	1,62		1,0

1.4 Tudengivormeli FEST20 elektrisüsteem

Tudengivormel FEST20 elektrisüsteem koosneb kahest eraldiseisavast elektrisüsteemist – kõrgepingesüsteemist ning madalpingesüsteemist. Tudengivormeli sarja reeglitega on määratud, et kõik elektripinged, mis on kõrgemad kui 60 VDC liigitatakse kõrgepinge alla, samas ei tohi pinge ületada 600 VDC. Kõik elektripinged, mis on madalamad kui 60VDC loetakse madalpingesüsteemik kuuluvateks.

1.4.1 Kõrgepingesüsteem

Kõrgepingesüsteemi kasutatakse mootorite toiteahelana, sinna kuuluvad akupakk, mis koosneb LiPo akudest, akupaki maksimaalne pinge on kuni 600VDC, kuna vormel on nelikveoline, siis on kasutusel 4 mootorit, mis igaüks paiknevad ratta rummu küljes. Mootorid saavad toite inverteritest, mida on iga mootori kohta samuti üks. Kõrgepingesüsteemis esinevad suured voolud ning seetõttu esineb kogu autos elektromagneetilisi häiringuid. Elektromagneetilisi häiringuid põhjustavad ka inverteris kasutusel olevad IGBT transistorid ning nende tekitatav mootorimähiste toimiseks kasutatav vahelduvvool.

1.4.2 Madalpingesüsteem

Madalpingesüsteem tudengivormelis FEST20 on nominaalpingega 24VDC, seda kasutatakse näiteks erinevate trükkplaatide, ventilaatorite, veepumba ja inverterite juhtskeemide toiteks. Madalpingesüsteemis suhtlevad erinevad seadmed omavahel CAN busi kaudu. Madalpingesüsteem on kõrgepingesüsteemist galvaaniliselt eraldatud.

1.4.3 Mõõtetulemuste salvestamine ning kasutajaliides

FEST20 CAN Bus ahelas liikuv andmevoog salvestatakse datalogerisse, mis on võimeline salvestama andmeid kiirusega 1 KHz. Andmed salvestatakse mälupulgale, millega saab salvestatud andmed hiljem arvutisse tõsta ning seejärel on võimalik andmed graafiliselt kasutajale kuvada. Andmete graafiliseks kuvamiseks kasutatakse tarkvara GEMS Data Analysis. Joonisel 1.6 on näidatud FEST20 autos kasutatav GEMS DA3 datalogger.



Joonis 1.6 GEMS DA3 Datalogger [15]

1.5 Projekteeritava dünamomeetri kirjeldus

Projekteeritava dünamomeetri kõige olulisem nõue on, et see peab olema võimeline mõõtma korraga vähemalt kuute erinevat veermikuvarrast. See tuleneb sellest, et üks rattarumm kinnitub auto kere külge kuue erineva hoova abil. Dünamomeeter peab olema võimeline mõõtma nii pikisuunalisi kui toruga risti mõjuvaid jõudusid. Kuna toru pikenemine ja lühenemine jääb vahemikku 0 mm – 0,9 mm, siis on oluline, et mõõteviga ei oleks suurem kui +- 0,01 mm.

Mõõtmine toimub väliskeskkonnas, kus temperatuur võib olenevalt ilmastikuoludest kiiresti muutuda, samuti tuleb arvestada ka õhuliikumisega auto sõidu ajal, mis hakkab mõõteseadme temperatuuri mõjutama, oluline on silmas pidada ka, et autokere välispind on kaetud tumeda süsinikkiud kangaga, mis päikeselise ilma korral läheb võrreldes ümbritseva keskkonnaga oluliselt soojemaks. Nendest teguritest tulenevalt on ülimalt oluline väga täpne temperatuuri kompenseerimine.

Süsteemi toitepingena on kasutusel tudengivormelis FEST20 kasutusel olev madalpingesüsteemi pinge 24VDC. Kuna anduritest käiks 24V juures läbi liialt suur vool, mis põhjustaks nende soojenemist, siis tuleb kasutada alalispingemuundureid, et pinget alandada. Deformatsioonimõõturite puhul on tegemist analooganduritega mille mõõtetulemuseks on analoogsignaali, mis tuleb muundada digitaalsignaals. Selleks kasutatakse analoog – digitaalmuundurit. Andmed on võimalik salvestada GEMS DA3 Datalogerisse, see eeldab aga, et dünamomeeter on ühendatud auto CAN võrku. CAN võrk seab siinkohal aga mõõtmistulemuste salvestamisesse kitsenduse, kuna auto CAN võrgus liigub muid kõrgema prioriteediga sõnumeid ning seetõttu ei ole võimalik andmeid salvestada 1KHz sagedusega. Kuna CAN võrku ei saa pidevalt andmeid saata, siis tuleb lisaks datalogerile andmed salvestada ka mõnele muule andmekandjale. Datalogeri andmeid saab kasutada esialgsete andmete kuvamiseks kasutajale, kui on vajalik täpsem info, siis saab teiselt andmekandjalt maha lugeda täpsemad andmed.

Kõik mõõtetulemuste vastu võtmise jaoks vajalikud elektriskeemid ning komponendid projekteeritakse trükkplaadile, kus toimub andmete digitaalseks muundamine, andmete töötlemine ning nende salvestamine ja edastamine CAN võrku.

Mõõdetud andmete vastuvõtmiseks, töötlemiseks ning edastamiseks CAN võrku ja lisaandmekandjale tuleb kasutada mikrokontrollerit, mis on ühildub nii ADC, CAN transiiveri kui ka valise andmekandjaga.

2 DÜNAMOMEETRI RIISTVARA PROJEKTEERIMINE

Käesolevat mõõtesüsteemi kasutatakse tudengivormelil ainult testperioodil ning seetõttu ei ole sellele auto sisse projekteeritud ka kindlat asukohta. Kuna mõõtesüsteemi peab saama paigaldada kõigi nelja ratta varrastele, siis peab trükkplaat koos vajalike komponentidega autos ka asukohta muutma. Tuleb arvestada, et auto keres ei jagu iga ratta juures ruumi ning trükkplaat paigaldatakse auto kerest väljapoole. Seetõttu on oluline trükkplaadile ümber projekteerida ka korpus ning tuleb arvestada, et nii auto esi kui ka tagaosas oleks ligipääs toitepingele kui ka CAN busi liinidele tagatud.

Dünamomeetri trükkplaadil on järgnevad elektriahelad:

Tabel 2.1 Dünamomeetri trükkplaadil olevad elekrtiahelad

Elektriahel	Alam-elektriahel	
Pingemuundurid	Sisendpinge	Väljundpinge
	24 VDC ahel	5 VDC ahel
	5 VDC ahel	3,3 VDC ahel
	5 VDC ahel	1,65 VDC ahel
Mikrokontrolleri ahelad		
	Mikrokontrolleri taktsageduse ahel	
	Mikrokontrolleri SD kaardi ahel	
	CAN bus transsiiveri ahel	
	SPI suhtlusahel mikrokontrolleri ja ADC vahel	
Signaalivõimendite ahel		
	Wheatstone sildade ahel deformatsioonimõõturite mõõtmiseks	

2.1 Signaalivõimendi valik

Kuna deformatsioonimõõturite takistuse muutus pikenemisel on väga väike, maksimaalselt mõni oom, siis Wheatstone'I sillast tekkinud pingemuutus, mis jääb millioomidesse, on ADC jaoks samuti liiga väike. Kui lugeda pinget otse Wheatstone sillast ADC'sse, siis ei kasutata ära ADC täielikku mõõteresolutsiooni ning mõõtmine ebaõnnestub. Selleks, et ADC täielik resolutsioon ära kasutada, võimendatakse signaal eelnevalt ning alles seejärel loetakse võimendatud signaal ADC'sse.

Wheatstone'I silla pinget võimendamisel kasutatakse diferentsiaalvõimendit. Diferentsiaalvõimendi konfiguratsioonis saaks kasutada tavalist operatsioonvõimendit, kuid trükkplaadil ruumi säästmiseks kasutatakse diferentsiaalvõimendit, mis ei vaja nii palju väliseid komponente kui vajaks tavaline operatsioonvõimendi. Valitud operatsioonvõimendisse on integreeritud ka filtreid, mis vähendavad võimendi enda toiteallikast tulevat müra. Valitud signaalivõimendiks on Texas Instrumentsi diferentsiaalvõimendi INA333. [16]

2.2 ADC valik

ADC ehk analoog – digitaalmuunduri puhul on üheks tähtsamaks parameetrik resolutsioon ehk bittide arv, millest sõltub millise sammuga toimub analoogsignaali digitaalseks muundamine. ADC sisendanaloo pinget jääb vahemikku 0 VDC – 3,3 VDC, vastavalt sellele saab valida ADC, mis on deformatsioonimõõturite sisselugmiseks piisav. ADC resolutsiooni arvutamine toimub järgnevalt [17]:

$$res = \frac{U}{2^b} \quad (2.1)$$

Kus res – resolutsioon

U – maksimaalne mõõdetav analoogpinge

b – ADC bittide arv

Lisaks resolutsioonile peab ADC olema ka piisavalt kiire muundamiskiirusega, et see ei hakkaks piirama mõõtetulemuste sisselugemist.

ADC peab olema ühilduv ka mikrokontrolleriga suhtlusprotokollidega, et edastada mõõdetud tulemused.

Valitud ADC on Texas Instrumentsi toode ADS8698. Tegemist on 18 bitise ADC'ga mis võimaline sisse lugema 500 000 lugemit sekundis. 18 bitise ADC resolutsioon maksimaalselt mõõdetava pinge 3,3 VDC puhul on 10 mikrovolti. Valitud ADC edastab mõõdetud tulemused mikrokontrollerisse üle SPI protokoll. [18]

2.3 Mikrokontrolleri valik

Mikrokontrolleri valiku puhul tuli lähtuda sellest, et see oleks ühilduv kõikide teiste põhiliste komponentidega, mis on dünamomeetri disainimiseks vajalikud. Sealhulgas peab mikrokontroller olema võimalik salvestama andmeid lisaks ka välisele andmekandjale.

Nõuded mikrokontrollerile on järgnevad:

- Ühilduv CAN bus 2.0b standardiga
- Toetama SPI suhtlusprotokoll
- Olema võimeline salvestama andmeid välisele andmekandjale, näiteks mälukaartile.
- Programmeerimist lihtsustab, kui mikrokontroller on vähemalt 18 bitine.

Valitud mikrokontrolleriks osutus STM32F732RE mikrokontroller, sest tegemist on 32 bitise mikrokontrolleriga, mis täidab kõik eelpool toodud vajadused. STM32F7 on võimeline andmeid salvestama ka SD kaardile. STM mikrokontrolleritele on välja töötatud ka programm CubeMX, millega on kasutajal võimalik genereerida mikrokontrolleri algseadistus, see lihtsustab oluliselt mikrokontrolleri programmeerimist. Lisaks on olemas programmeerimistarkvara Atollic Studio, mis sisaldab endas STM mikrokontrollerite teekide kogumeid, mis samuti lihtsustavad programmeerimist. [19]

2.4 CAN transiiveri valik

Tudengivormelil FEST20 kasutatakse erinevate seadmete omavaheliseks suhtluseks CAN bus 2.0a protokoll. CANi liinid on galvaaniliselt eraldatud ülejäänud madalpingesüsteemist eesmärgiga tekitada CANi signaalidele müravaesem referentspinge.

CAN transiiverina kasutatakse dünamomeetri trükkplaadil tootja Analog Devices integreeritud skeemi ADM3053, mis tagab signaalide galvaanilise eralduse ning on ühilduv STM32F7 tüüpi mikrokontrolleriga.

ADM3053 transiiver valiti, sest sellel on isoleeritud toiteahel ülejäänud trükkplaadist ning samuti on isoleeritud CAN busi ning mikrokontrolleri vaheline andmeliin. Kuna CAN bus liin tudengivormeli autos on ligikaudu 4 meetrit pikk ning on paigutatud üle kogu auto, siis toimib see justkui antennina ning soodustab interfeerents häirivate magnetväljadega, mis autos esinevad. Eelkõige põhjustavad häiringuid HV juhtmetes liikuvad suured voolud ning inverterite lülitused.

Selleks, et häiringutest tekkivad liigpinged ning ostsillatsioonid ei jõuaks CAN busi liinilt edasi trükkplaatidel olevate tundlike komponentideni ongi isoleeritus oluline. Lisaks tagab isoleeritus CAN busile CAN high ja CAN low differentsiaalsignaalidele eraldatud referentspinge CAN ground. Eraldatud referentspinge ülejäänud auto maandusest tagab ühtlasemad signaalide pinged kõikidel seadmetel, mis on ühendatud CAN bus liinile, see aitab vältida häiringuid CAN bus suhtluses. Lisaks isoleeritud CAN bus transiiveritele kasutatakse FEST20 autos kolmest juhtmest koosnevat keerdkaablit, mis omakorda on varjestatud.

Varasematel vormelitel, näiteks FEST 18, kasutati isoleerimata autotööstusele mõeldud CAN transiiverit TCAN1042-Q1 ning antud auto CAN bus suhtluses esines valede andmetega ning vigaseid sõnumeid.

2.5 Trükkplaadi ühildumine tudengivormeliga

Selleks, et trükkplaati oleks võimalik tudengivormeli külge ühendada, tuleb arvestada signaalidega, mis on autos saadaval. Eelnevates peatükkides kirjeldatu põhjal on teada, et toitepingena on kasutusel 24 VDC ja dataloggerisse andmete saatmiseks CAN võrk. Need signaalid ühendatakse süsteemi külge pistikutega. Trükkplaadil kasutatakse sisendite ja väljundite ühendamiseks tootja MOLEXi pistikuid.

Trükkplaadi sisendteks ja väljunditeks on järgnevad signaalid:

Tabel 2.2 Trükkplaadi sisendsignaalid

Pistiku tüüp	Pini number	Signaal	Signaali kirjeldus
MOLEX 43650-0200	1	24V toide	Trükkplaadi 24 volti toitepinge +
	2	GND	Trükkplaadi 24 volti toitepinge -
MOLEX 43650-0309	1	CAN GND	CAN liini referentspinge
	2	CAN HIGH	CAN liini kõrge signaal
	3	CAN LOW	CAN liini madal signaal

Toiteliinide ja CAN liinide jaoks kasutatakse eraldi pistikuid, kuna CAN liinid on isoleeritud ülejäänud auto 24 voldi toiteahelast. Kahe eraldi pistiku kasutamine lihtsustab trükkplaadil komponentide paigutust ning muudab CAN võrgu töökindlamaks.

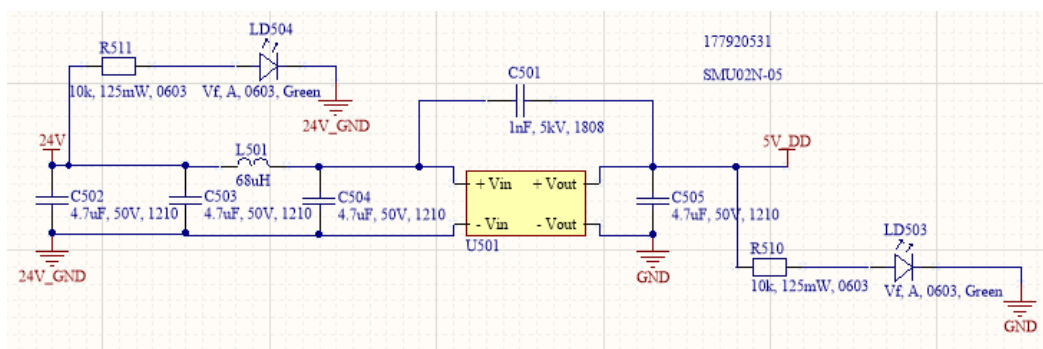
2.6 Pingemuundurite ahelad

Pingemuundureid kasutatakse trükkplaadil toitepinge muundamiseks seetõttu, et komponendid trükkplaadil ei ole ette nähtud 24 VDC pingega kasutamiseks.

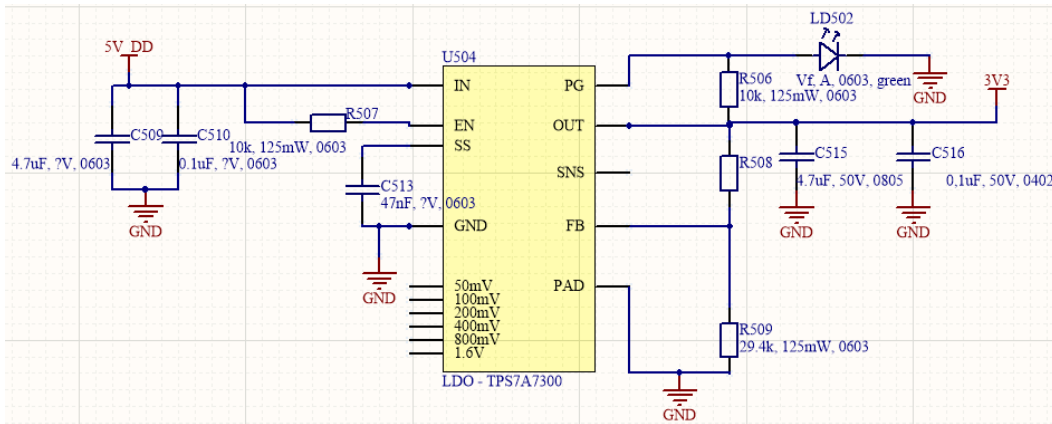
Kuna 24 VDC on trükkplaadil kasutatavatega pingetega võrreldes kõrge, siis kasutatakse pinget muundamiseks kahte erinevat tüüpi pingemuundurite skeemi. Kõigepealt muundatakse pinget 24 VDC pealt 5 VDC peale madaldava pingemuunduriga, antud skeem on kujutatud joonisel 2.1. Ülejäänud pinged muundatakse lineaarmuundurite abiga.

Vajalikud pinged trükkplaadil on:

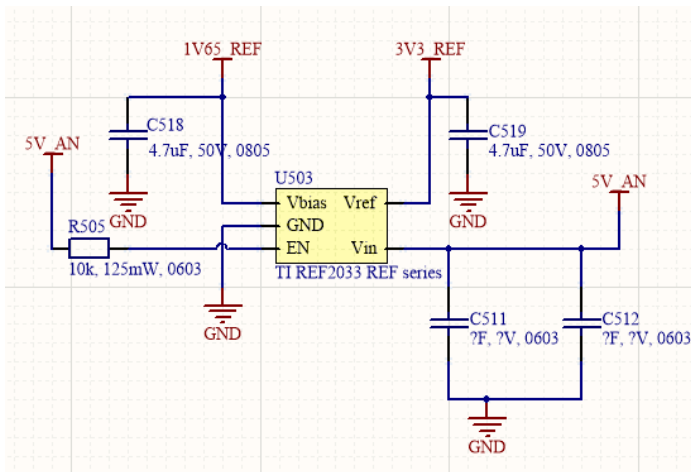
- 5 VDC ahel – kasutatakse CAN transiiveri ja ADC toiteks.
- 3,3 VDC ahel – Seda pinget kasutatakse mikrokontrolleri toitmiseks ning ADC ja CAN transiiveri suhtlusahelate toitmiseks mikrokontrolleri vahel. Kasutatud lineaarmuunduri skeem on näidatud joonisel 2.2. Lisaks 3,3 VDC ahelale, millega toidetakse erinevaid seadmeid, kasutatakse referentspinge 3,3 volti tekitamiseks eraldi pingemuundurit.
- 1,65 VDC ja 3,3 VDC referentspinge ahel – Kasutatakse referentspingetena signaalivõimendites ja analoog digitaalmuunduris. Kasutatud pingemuundur on mõeldud spetsiaalselt referentspingete tekitamiseks. Pingemuundurisse on sisse ehitatud filtrid, mis hoiavad väljundpinget stabiilsena. Referentspingete skeem on välja toodud joonisel 2.3.



Joonis 2.1 Pingemuunduri 24VDC / 5 VDC skeem



Joonis 2.2 Lineaarpingeregulaatori skeem, 5VDC / 3,3 VDC



Joonis 2.3 1,65 VDC ja 3,3 VDC täppis võrdluspingeallika skeem

2.7 Signaalivõimendi ahel

Wheatstone'i sillast tuleva signaali võimendamiseks on kasutatud diferentsiaalvõimendit, üks wheatstone'i silla komponente on deformatsioonimõõtur. Valitud komponent on tehtud kasutajasõbralikuks ning vajab töötamiseks ainult toitepinget, referentspinget ning välist takistit, millega määratakse võimendustegur. Võimendusteguri jaoks vajalik takisti konkreetse võimendi jaoks valitakse järgmise valemi abil [16]:

$$G = 1 + \left(\frac{100k\Omega}{R_g} \right) \quad (2.2)$$

Kus G – võimendustegur

$100\text{ k}\Omega$ - Võimendi sisemine takistus, kilo – oomides

R_g – Kasutaja poolt määratud võimendiväline takisti, oomides

Määratud võimendusteguriks on valitud 1001, ehk R_g väärtus on valitud 100 oomi. [16]

Kokku kasutatakse trükkplaadil kokku kaheksat signaalivõimendit. Võimendi väljundpinge on ühendatud analoog digitaalmuunduri külge läbi madalpäasufiltri.

Madalpääsufiltrit kasutatakse selleks, et vältida kiiretest pingemuutustest tingitud häiringuid signaalivõimendi väljundis. Madalpääsufilter, mille skeem on välja toodud joonisel 2.4, koosneb takistist ning kondensaatorist, mis on ühendatud jadamisi. Takisti ning kondensaatori väärtused arvutatakse järgneva valemi abil [20]:

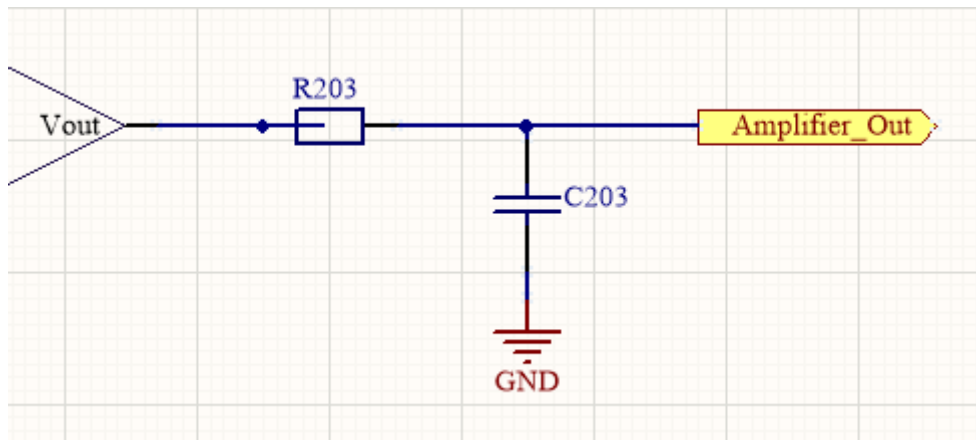
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.3)$$

Kus f_c – äralõikesagedus, Hz

n - pii

R – takisti väärtus, oom

C – kondensaatori mahutavus, fahrad

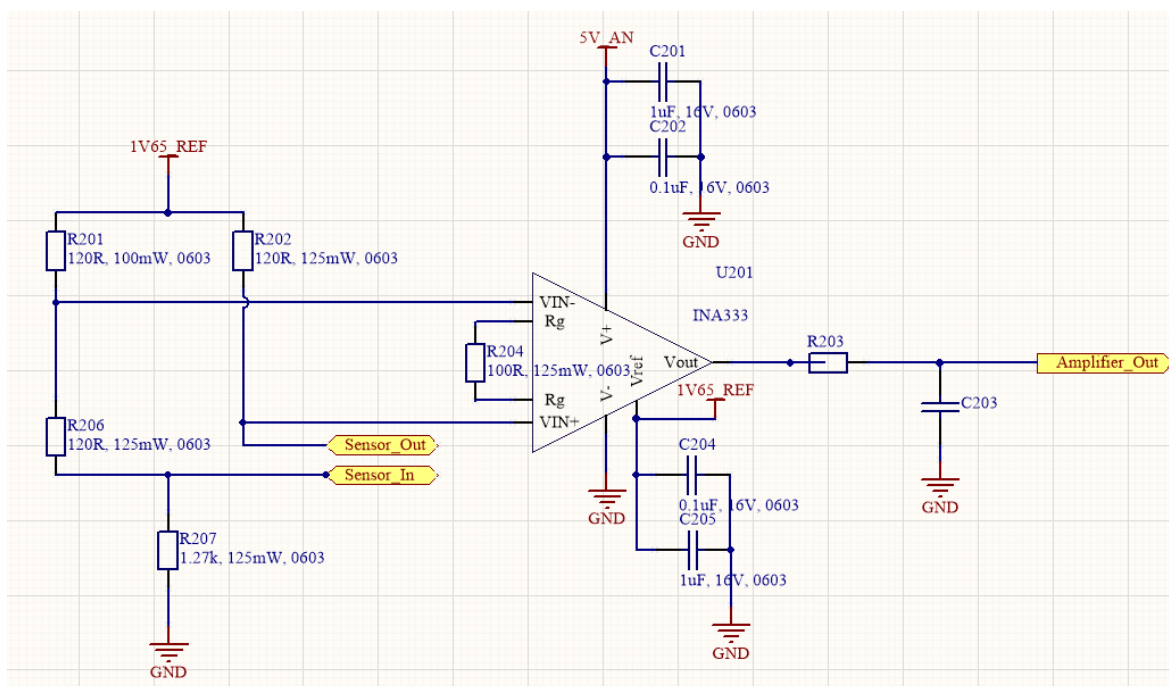


Joonis 2.4 R203 ja C203 moodustatud madalpääsufilter signaalivõimendi väljundis

2.7.1 Wheatstone'i sild trükkplaadil

Wheatstone'I silla ergutuspingena kasutatakse 1,65 VDC pinget. Wheatstone'I silla pinge on takisti abil viidud nihkesse nii, et oleks võimalik eristada deformatsioonimõõtu pikenemist ja lühenemist. Kui deformatsioonimõõtur on pikenemata ehk algasendis, on signaalivõimendi väljund 1,65 volti. Kui deformatsioonimõõtu pinge väheneb, siis väheneb ka signaalivõimendi väljundpinge ning kui deformatsioonimõõtu takistus kasvab, kasvab ka signaalivõimendi väljundpinge. Esialgsel kalibreerimisel peale deformatsioonimõõtu paigaldamist saab tänu sellele eemaldada arvutuslikult ka temperatuurist tuleneva vea.

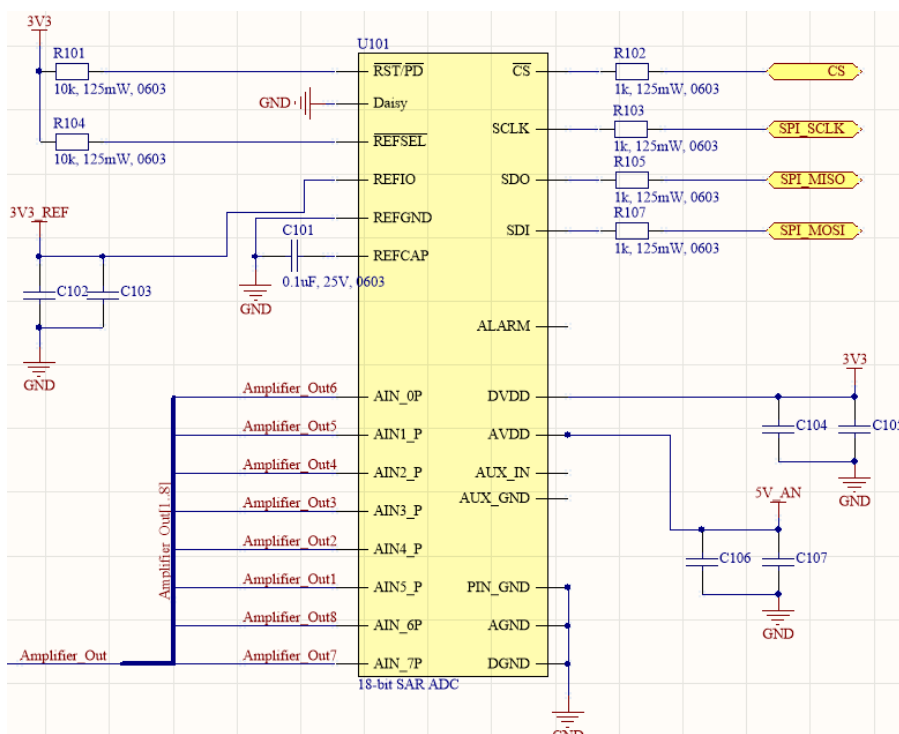
Deformatsioonimõõtur on Wheatstone'I silla külge ühendatud pistiku abiga. Trükkplaadil ruumi säästmiseks on kaheksa sensori ühendamiseks kasutatud nelja pistikut. Joonisel 2.5 on näidatud signaalivõimendi sisenditesse ühendatud Wheatstone sild.



Joonis 2.5 Signaalivõimendi ja Wheatstone sild

2.8 Analoo digitaalmuunduri ahel

Analoo digitaalmuunduri skeemis kasutatakse SAR tüüpi muundurit. SAR tüüpi muundurit kasutatakse, sest see vajab tööks suhteliselt vähe väliseid komponente. Piisab ainult toitepingete ja referentspinge ühendamisest vajalikele sisenditele. Kuna ADC põhiskeem töötab 5 voldise pingega, siis on häiringute vähendamiseks kasutatud 24 VDC pingest muundatud 5 voldi ja ADC 5 voldi toite vahel veel lisaks lineaarmuundurit, et vähendada toitepinge kõikumist. Analoo mõõtmiste jaoks on kasutatakse ADC'1 3,3 voldist referentspinget. Trükkplaadil kasutatud analoo digitaalmuunduri skeem on esitatud joonisel 2.6. ADC'l on kokku 8 kanalit ning SPI liides, mis ühendatakse otse mikrokontrolleri SPI liiniga.



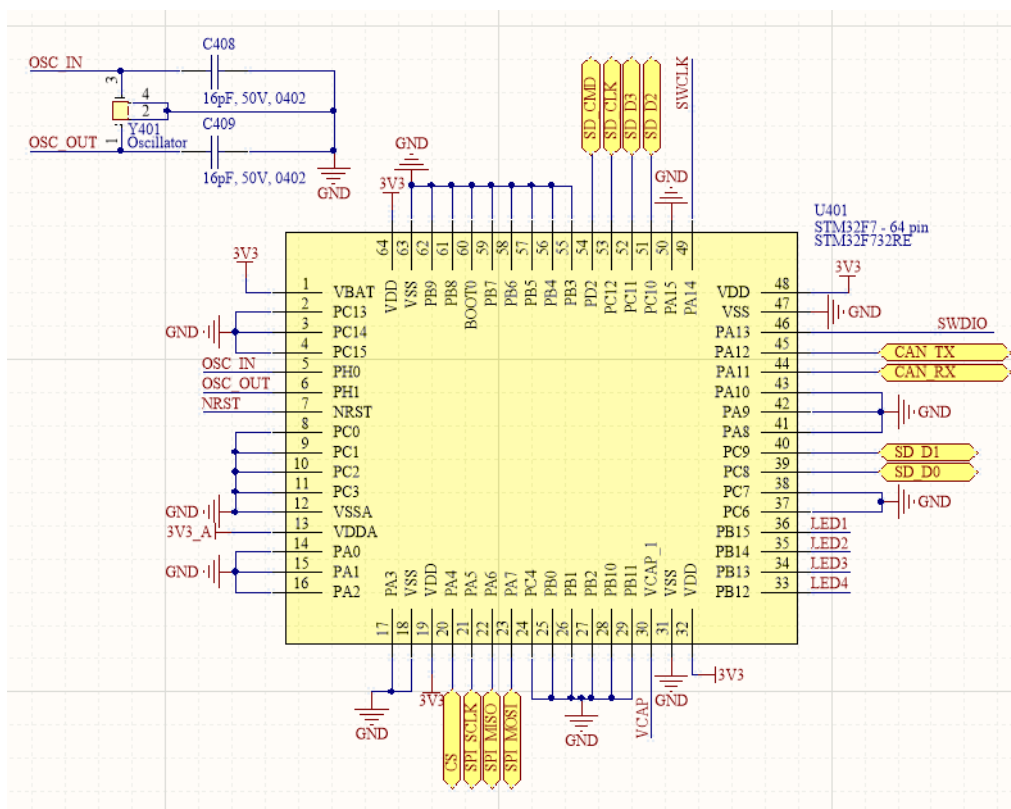
Joonis 2.6 Analoo-digitaalmuunduri skeem

2.9 Mikrokontrolleri ahel

Mikrokontroller on dünamomeetri üks olulisem põhikomponent. Mikrokontroller suhtleb ADC'ga üle SPI siini ning seejärel toimub vastuvõetud andmete töötlemine. Sisseloetud pinge ADC'st teisendatakse arvutuste abil jõuks, mis edastatakse CAN transiiveri abil CAN bus liinile ning salvestatakse dataloggeri poolt. Töödeldud andmed salvestatakse ka kõrgema sagedusega mälukaardile kui need edastatakse CAN bus liinile.

Lisaks andmevoo edastamise skeemidele on mikrokontrolleri külge ühendatud väline ostsillaatoriahel, mis on vajalik mikrokontrollerile taktsageduse tekitamiseks. STM32F7 seeria mikrokontrolleritel on ka sisseehitatud ostsillaatorid, kuid kuna oluline on tagada SPI ning CAN bus suhtlusliinide tõrgeteta töö, siis eelistati kasutada välist, mis on täpsem ning robustsem. Kasutatud väline ostsillator on 25 Mhz sagedusel töötav kristallostsillator.

Mikrokontrolleri programmeerimiseks kasutatakse Serial Wire debug liidest. Läbi serial wire debug liidese mikrokontrolleri programmeerimiseks on vaja eraldi programmeerimisplaati, mis omakorda ühendub arvuti külge USB kaudu. Mikrokontrolleri skeem, mida antud töös kasutatakse on näidatud joonisel 2.7.



Joonis 2.7 Mikrokontrolleri ahel koos välise ostsillaatoriga

2.10 Komponentide paigutus trükkplaadil

Dünamomeetri elektriahelad on ning komponendid on paigutatud neljast vasekihist ning neid isoleerivatest kihtidest koosnevale trükkplaadile, trükkplaadi kogupaksus on 1,616 (+/- 10%) mm. Neljakihilise trükkplaadi ülesehituse kasuks otsustati, kuna tudengivormeli meeskonnasisene kokkulepe on projekteerida kõik plaadid 2 või 4 kihilistele plaatidele. Kuna trükkplaadil on palju signaale ning paljud neist on tundlikud analoogsignaale, siis oli ka see üheks teguriks, mis soosis neljakihilist trükkplaati.

Tudengivormeli trükkplaadid tootis kuni 2019 aastani meeskonna pikaajalise toetaja Brandner PCB, kelle poolt on ettemääratud trükkplaadi vasekihi paksused.

Tabel 2.3 Brander PCB standardised neljakihilise trükkplaadi vasekihi paksused [21]

Kiht	Vasekihi paksus (mm)
Pealmine välisfoolium	0,053
Pealmine sisefoolium	0,035
Alumine sisefoolium	0,035
Alumine välisfoolium	0,053

Kuna trükkplaadil esineb tundlikke mõõteahelaid ning samuti ahelaid, mis võivad mõõteahelates häiringuid tekitada, siis on komponentide paigutamisel trükkplaadile rõhku pandud sellele, et häiringud tekitavad ahelad mõõteahelatest võimalikult eemal hoida, joonisel 2.8 on näidatud, kuidas trükkplaadil erinevad ahelad on paigutatud. Plaadi kompaktsust ei ole siinkohal peetud oluliseks, seetõttu on trükkplaadi enamus komponendid paigutatud ka ühele plaadi poolele. Joonisel 2.9 on näidatud trükkplaadi alumina pool.

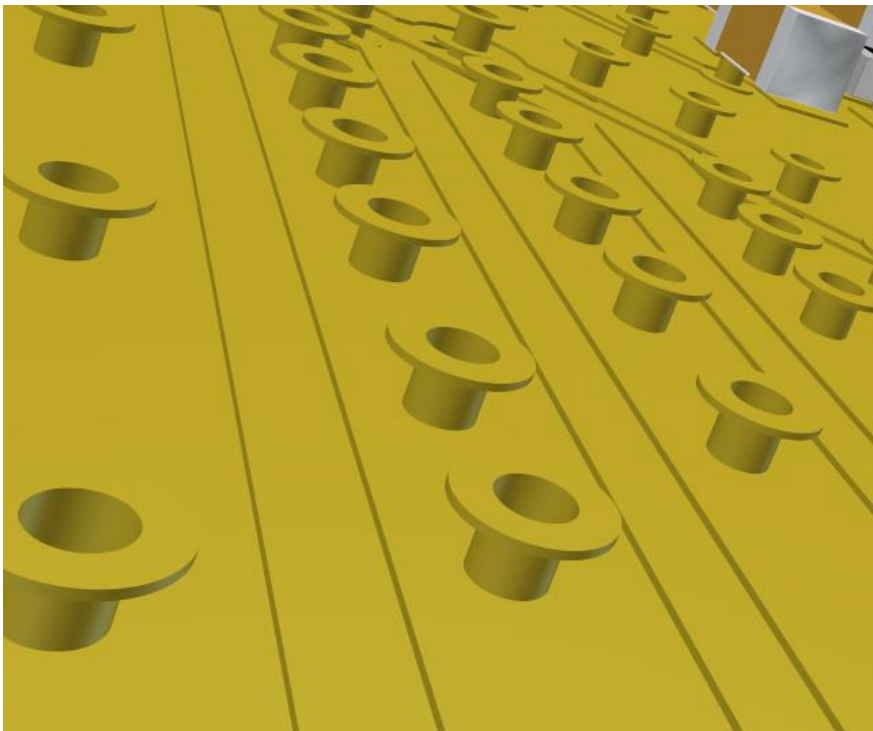
Mõõteahelatesse kuuluvad komponendid koos radadega on:

- Wheatstone'i silla komponendid
- Signaalivõimendi
- ADC signaalivõimendi sisendid

Komponendid ja ahelad, mis tuleb mõõteahelatest eemal hoida:

2.11 Analoogahelate projekteerimine trükkplaadile

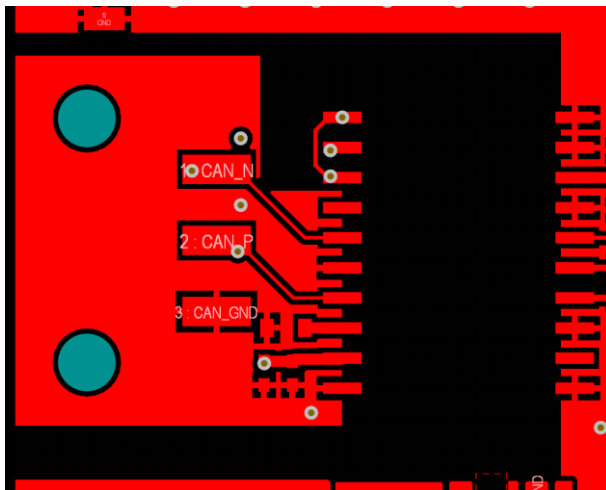
Analoogahelad on paigutatud ülejäänud ahelatest eemale, samuti on jäetud tühjaks trükkplaadi alumine pool, mille kohal asetsevad analoogahelate rajad. Analoogahelate rajad on elektromagneetiliste häiringute eest parema kaitstuse tagamiseks projekteeritud neljakihilise trükkplaadi sisemistele radadele. Seejuures on Välimisetal vasekihtidele projekteeritud suured vasealad, mis on ühendatud GND ehk maandusega. Tundlikud analoogmõõteahelarajad on ümbritsetud läbiviikudega, mis moodustavad radade ümber Faraday puuri. Signaaliradu, mis on ümbritsetud Faraday puuriga, on näha joonisel 2.10. Faraday kest radade ümber toimib varjestusena ning kaitseb radasi elektromagneetiliste häiringute eest, mis võiksid mõõtetulemusi mõjutada.



Joonis 2.10 analoograjad läbiviikude keskel (eemaldatud pealmine vasekiht)

2.12 CAN transiiveri ahelate projekteerimine trükkplaadile

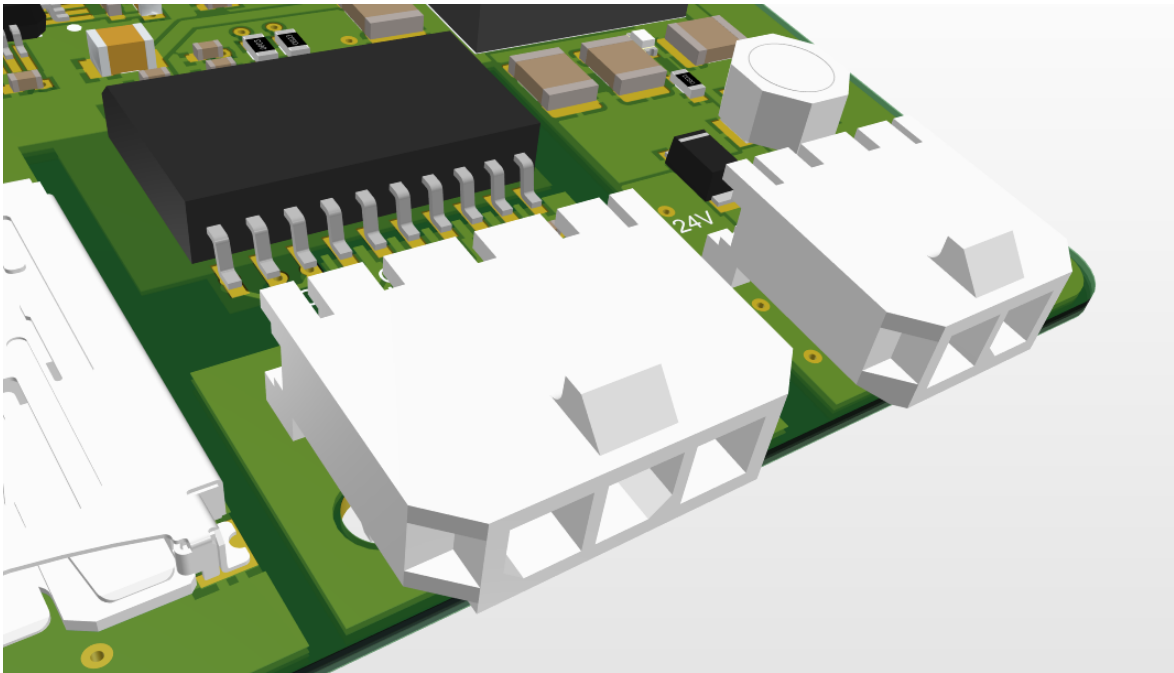
Kuna CAN ahel on ülejäänud trükkplaadi signaalidest galvaaniliselt eraldatud, siis on ka selle galvaaniliselt eraldatud osa vasealad ülejäänud trükkplaadi vasealadest lahti ühendatud. Vasealad paiknevad eraldi põhjusel, et vältida elektromagneetiliste lainete levimist ülejäänud signaalide ning vasealadeni. Eraldatud vaseala on näidatud joonisel 2.11.



Joonis 2.11 Eraldatud vaseala isoleeritud CAN transiiveri jaoks
Punased alad – vasealad, must ala – ilma vaseala

Trükkplaadi kihtides on isoleeritud osa maanduse ja ülejäänud trükkplaadi maanduse vahel paigutatud kohati kaks vaseala, mis tekitavad kondensaatori. Tekitatud kondensaatoriefektiga vähendatakse isoleeritud osas tekkinud müra jõudmist ülejäänud plaadi ahelatesse. Müra tekitaja CANi mikroskeemi sees on isoleeritud pingemuundur, mida lülitatakse 180 Mhz sagedusega. [22] Isoleeritud CAN busi skeem on näidatud joonisel 2.12

CAN busi pistik on samuti eraldi ülejäänud plaadi plistikust, et vähendada võimalikku müra galvaaniliselt isoleeritud osade vahel. Can busi liinide ühendamisel on kasutatud pindmontaaziga trükkplaadi külge joodetavat pistikut. Pindmontaaziga pistiku eelis läbiviikutesse paigaldatava ees on väiksem parasiitmahutavus ning -induktiivsus.

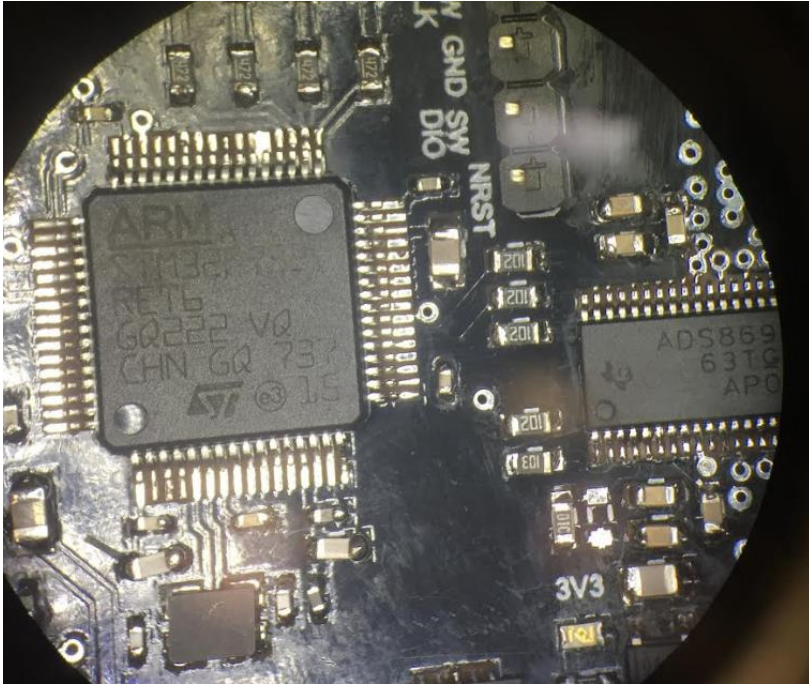


Joonis 2.12 galvaaniliselt eraldatud CAN bus ahel

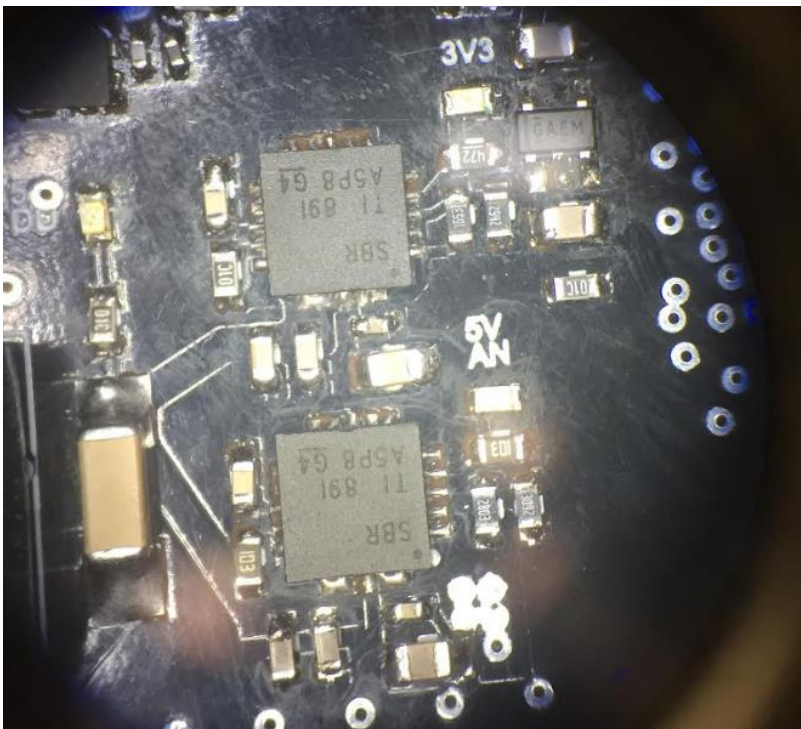
2.13 Komponentide trükkplaadile fikseerimine

Trükkplaadil kasutatavatest komponentidest kõik komponendid peale mõnede pistikute on pindmontaazikomponendid. Suuremad mikroskeemid on korpustes, mille jalad asetsevad külgedel ning on lihtsasti ligipääsetavad. Lineaarmuundurite puhul on kasutatud QFN-korpusega komponente, et juhtida pingemuundamisel tekkiv soojus vasekihti, mis toimib radiaatorina. QFN tüüpi korpusel on nimelt trükkplaadile joodetav termopadi, mille kaudu saab efektiivselt juhtida soojust komponendist trükkplaadi vasekihtidesse, et vältida selle ülekuumenemist. LQFP ning QFN tüüpi pindmontaazkorpustega komponente on näidatud joonistel 2.13 ja 2.14.

Komponentide fikseerimiseks trükkplaadile kasutatakse käsitsijootmistehnikat. Kuna komponendid, mis trükkplaadile joodetakse on palja silmaga raskesti nähtavad, siis töö hõlbustamiseks kasutati Distelkamp Di-Li 900-T mikroskoopi, millel maksimaalne suurendus on 45 kordne. [23]



Joonis 2.13 Vaade läbi mikroskoobi mikrokontrollerile (vasakul) ning ADC'le (paremal) trükkplaadile joodetuna



Joonis 2.14 Vaade läbi mikroskoobi QFN korpuses komponentidele

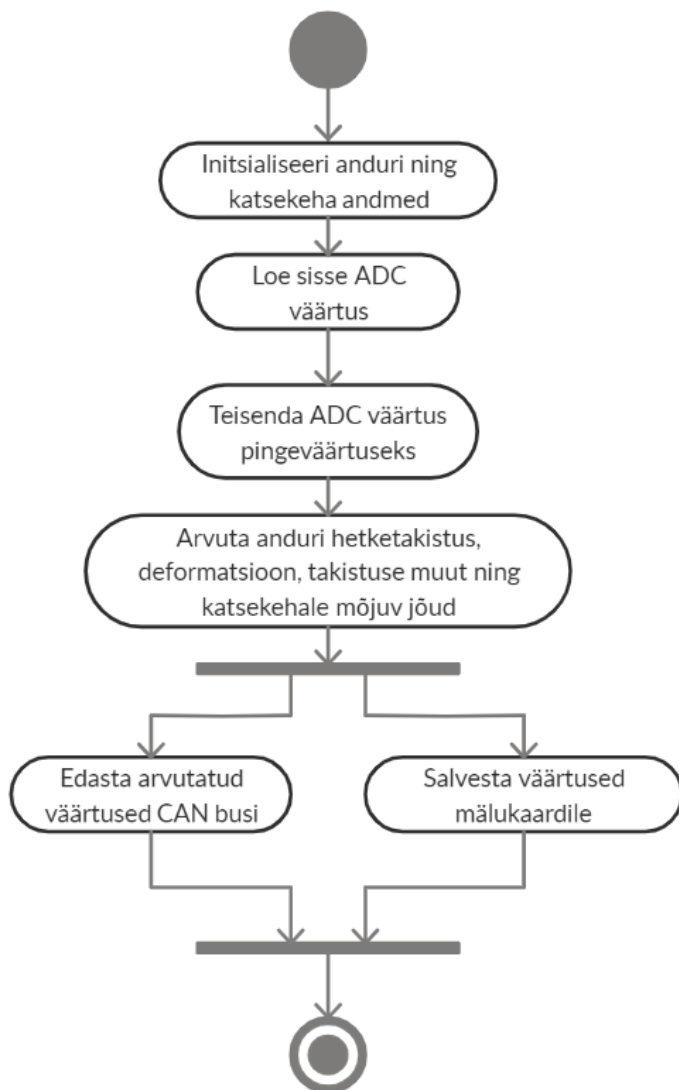
3 DÜNAMOMEETRI TARKVARA

3.1 Dünamomeetri tarkvara kirjeldus

Dünamomeetri trükkplaadil olevat STM32F7 seeria ARM tüüpi mikrokontrollerit programmeeritakse C programmeerimiskeeles. Tarkvara kirjutamiseks on kasutatud STM32CubeMX ning Atollic TruStudio tarkvarasid. STM32CubeMX on STM32 seeria mikrokontrolleritele mõeldud konfiguraator, mis hõlbustab kasutajal mikrokontrolleri algeadistamist. STM32CubeMX tarkvaras toimub mikrokontrolleri seadistamine graafilisel liidesel, tarkvara genereerib kasutaja poolt tehtud graafilise seadistuse põhjal automaatselt C programmeerimiskeeles seadistuse.

Atollic TruStudio on spetsiaalselt STM32 seeria mikrokontrollerite jaoks kasutatav integreeritud programmeerimiskeskond, mis ühildub STM32CubeMX poolt genereeritud algeadistusega. Atollic TruStudio sisaldab endas STM32 seeria mikrokontrollerite programmeerimist hõlbustavaid teeke. Dünamomeetri mikrokontrolleri programmeerimist hõlbustasid oluliselt SPI ning SD mälukaardi programmeerimisteegid.

Dünamomeetri trükkplaadil oleva mikrokontrolleri põhiülesandeks on andmetöötlus ning -edastus. ADC poolt sisse loetud Wheatstone silla pinge põhjal arvutab mikrokontroller sensori deformatsiooni, hetketakistuse, takistuse muutuse algtakistuse suhtes ning katsekehale mõjuva jõu. Lisaks ADC poolt mikrokontrollerisse edastatud pingeandmetele on arvutuste tegemiseks vajalikud ka andmed deformatsioonimõõtuuri andmelehest ning katsekeha parameetrid, et deformatsiooni põhjal sellele mõjuvad jõud arvutada. Peale vajalike arvutuste tegemist edastatakse tulemused Can busi ning salvestatakse mälukaardile. Joonisel 3.1 on näidatud mikrokontrolleri algoritm.



Joonis 3.1 Mikrokontrolleri algoritmskeem

3.2 SPI liidese andmevahetus

Mikrokontrolleri ning ADC vaheline suhtlus toimub SPI liidese kaudu, milles mikrokontroller on ülem (*master*) ning ADC on alluv (*slave*). Trükkplaadil kasutatav ADS8698 ADC'l on andmete vahetamiseks ning sisendite seadistamiseks 2 registrit – käsu- ning programmiregister. Käsuregistrit kasutatakse põhiliselt andmete lugemiseks ning programmiregistrit ADC seadistamiseks. Mõlemad registrid on 16 bitised ning nendest andmete lugemiseks tuleb ADC'le mikrokontrollerist saata vastav käsk ning kirjutamise korral ka väärtus, mis registrisse kirjutatakse. Programmikoodis saadetakse ning võetakse väärtuseid vastu baitide haaval ja kuuteistkümnendsüsteemis, sellest tulenevalt kirjutatakse koodis ADC registrisse sõnumite saatmiseks 2 baiti.

3.2.1 ADC seadistamine SPI liidese kaudu

Dünamomeetri prototüübil kasutatakse ADC'ga suhtlemiseks kahte käsku. Esmalt seadistatakse sisendkanali mõõtevahemik, selleks saadetakse programmiregistri aadressile 0x0A (tähistab sisendkanalit) käsk 0x1 (tähistab kirjutamiskäsku) ning registriväärtuseks 0x6 (tähistab soovitud mõõtevahemikku). Mõõtevahemiku seadistamiseks saadetud sõnumis bitid 15 - 9 tähistavad aadressi, bit 8 tähistab käsku, bitid 7 - 4 peavad alati olema väärtusega 0 ning bitid 3 - 0 on väärtus, mis registri aadressile kirjutatakse. Programmikoodis kirjutatakse välja saadetavateks baitideks 0x15 ja 0x6. Joonisel 3.2 on näidatud ADS8698 andmelehes antud juhised ADC sisendite mõõtevahemike seadistamiseks. [18]



ADS8694, ADS8698

www.ti.com

SBAS686 –JULY 2015

8.5.2.3.3 Range Select Registers (addresses 05h-0Ch)

Address 05h corresponds to channel 0, address 06h corresponds to channel 1, address 07h corresponds to channel 2, address 08h corresponds to channel 3, address 09h corresponds to channel 4, address 0Ah corresponds to channel 5, address 0Bh corresponds to channel 6, and address 0Ch corresponds to channel 7.

These registers allow the selection of input ranges for all individual channels (n = 0 to 3 for the ADS8694 and n = 0 to 7 for the ADS8698). The default value for these registers is 00h.

Figure 96. Channel n Input Range Registers

7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	Range_CHn[3:0]			
R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R/W-0h			

LEGEND: R/W = Read/Write; R = Read only; -n = value after reset

Table 15. Channel n Input Range Registers Field Descriptions

Bit	Field	Type	Reset	Description
7-4	0	R	0h	Must always be set to 0
3-0	Range_CHn[3:0]	R/W	0h	Input range selection bits for channel n (n = 0 to 3 for the ADS8694 and n = 0 to 7 for the ADS8698). 0000 = Input range is set to $\pm 2.5 \times V_{REF}$ 0001 = Input range is set to $\pm 1.25 \times V_{REF}$ 0010 = Input range is set to $\pm 0.625 \times V_{REF}$ 0101 = Input range is set to 0 to $2.5 \times V_{REF}$ 0110 = Input range is set to 0 to $1.25 \times V_{REF}$

Joonis 3.2 ADS8698 sisendite mõõtevahemiku seadistamisjuhised [18]

Programmikoodis kasutatakse sõnumi saatmiseks HAL_SPI teegi funktsiooni HAL_SPI_Transmit. HAL_SPI teek on genereeritud STM32CubeMX programmi poolt ning lisatud programmikoodi projekti. Antud käsk saadetakse ADC'sse ühe korra mikorkontrolleri alginitsialiseerimisel. Joonisel 3.3 on näidatud koodiread, millega ADC kanal seadistatakse.

```
HAL_GPIO_WritePin(SPI_GPIO_PIN_Port, SPI_CS_Pin, GPIO_PIN_RESET); //SPI suhtluse alustamine ADCga - CS pin madal
while (HAL_SPI_Transmit(&hspi1, Channel_5_range, 2, 4000) != 0); // kanali 5 mõõtevahemiku seadistamiskäsk
HAL_GPIO_WritePin(SPI_GPIO_PIN_Port, SPI_CS_Pin, GPIO_PIN_SET); //SPI suhtluse lõpetamine ADCga - CS pin kõrge
```

Joonis 3.3 Mõõtevahemiku seadistamiskäsu saatmine programmikoodis

3.2.2 Väärtuse lugemine ADC registrist SPI liidese kaudu

ADC Väärtuste lugemiseks saadab mikrokontroller ADC käsuregistrisse vastava käsu mille peale ADC saadab mikrokontrollerisse küsitud väärtuse. ADS8698 võimaldab ühe kasuga järjest sisse lugeda kõiki kaheksa sisendkanali väärtused kuid kuna dünamomeetri prototüübil kasutatakse ainult ühte kanalit, loetakse selle väärtus sisse käsuga, mis tagastab ainult konkreetse kanali, antud juhul kanali 5, väärtuse. Seda käsku kasutatakse kuna see ei nõua rohkemat programmiregistri seadistamist.

Väärtuse lugemiseks kirjutatakse ADCle saadetak käsk koodis kahe baidina – 0xD4, mis on register, mille väärtust soovitakse sisse lugeda ning teine bait on null bait ehk 0x0, mis on vaja saata, kuna register on 2 baidine. Joonisel 3.4 on ADS8698 andmelehest välja toodud käsuregistri kasutamisesjuhised.

Table 6. Command Register Map

REGISTER	MSB BYTE								LSB BYTE	COMMAND (Hex)	OPERATION IN NEXT FRAME	
	B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B[7:0]			
Continued Operation (NO_OP)	0	0	0	0	0	0	0	0	0000 0000	0000h	Continue operation in previous mode	
Standby (STDBY)	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0000 0000	8200h	Device is placed into standby mode
Power Down (PWR_DN)	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0000 0000	8300h	Device is powered down
Reset program registers (RST)	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0000 0000	8500h	Program register is reset to default
Auto Ch. Sequence with Reset (AUTO_RST)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0000 0000	A000h	Auto mode enabled following a reset
Manual Ch 0 Selection (MAN_Ch_0)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0000 0000	C000h	Channel 0 input is selected
Manual Ch 1 Selection (MAN_Ch_1)	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0000 0000	C400h	Channel 1 input is selected
Manual Ch 2 Selection (MAN_Ch_2)	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0000 0000	C800h	Channel 2 input is selected
Manual Ch 3 Selection (MAN_Ch_3)	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0000 0000	CC00h	Channel 3 input is selected
Manual Ch 4 Selection (MAN_Ch_4) ⁽¹⁾	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0000 0000	D000h	Channel 4 input is selected
Manual Ch 5 Selection (MAN_Ch_5)	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0000 0000	D400h	Channel 5 input is selected
Manual Ch 6 Selection (MAN_Ch_6)	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0000 0000	D800h	Channel 6 input is selected
Manual Ch 7 Selection (MAN_Ch_7)	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0000 0000	DC00h	Channel 7 input is selected
Manual AUX Selection (MAN_AUX)	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0000 0000	E000h	AUX channel input is selected

(1) Shading indicates bits or registers not included in the 4-channel version of the device.

Joonis 3.4 ADS8698 käsuregistri seadistamisjuhised [18]

Peale registrisse käsu saatmist tagastab ADC kanali 5 väärtuse mikrokontrollerisse. Tagastatud arvu suurus on 18 bitti ning mikrokontroller loeb need sisse kolme baiti. Peale väärtuse sisse lugemist kombineeritakse kõik 18 bitti kokku ühte 32 bitisesse muutujasse, millega on lihtsam edasisi arvutusi teha. Joonisel 3.5 on näidatud kogu andmevahetus kanali 5 väärtuse sisselugemiseks ning selle kombineerimine ühes muutujaks.


```

uint8_t adc_tx_data[] = {0xD4, 0x00}; // buffer saadetavate SPI sõnumite jaoks
uint8_t adc_rx_data[3]; // sisseloetud andmete buffer
HAL_GPIO_WritePin(SPI_GPIO_PIN_Port, SPI_CS_Pin, GPIO_PIN_RESET); // SPI andmevahetuse algus - CS pin madal
while (HAL_SPI_Transmit(&hspi1, adc_tx_data, 2, 4000) != 0); // käsuregistrist kanali 5 väärtuse küsimine
while (HAL_SPI_Receive(&hspi1, adc_rx_data, 3, 4000) != 0); // käsuregistrist kanali 5 väärtuse sisselugemine
HAL_GPIO_WritePin(SPI_GPIO_PIN_Port, SPI_CS_Pin, GPIO_PIN_SET); // SPI andmevahetuse lõpp - CS pin kõrge
result = (adc_rx_data[0] << 10) + (adc_rx_data[1] << 2) + (adc_rx_data[2] >> 6); // Kanali 5 väärtuse kombineerimine 32 bitisesse muutujasse

```

Joonis 3.5 Andmevahetus Kanali 5 väärtuse sisselugemiseks ning selle kombineerimine ühte muutujasse

3.3 Mikrokontrolleris arvutatavad väärtused

Peale ADC kanali väärtuse sisse lugemist teisendatakse see pingeväärtuseks, et oleks võimalik teostada edasisi arvutusi. Arvutused, mis sõltuvad kanali pingeväärtusest on välja toodud tabelis 3.1.

Arvutatav väärtus	ühik
Deformatsioonianduri hetketakistus	Ohm (Ω)
Deformatsioonianduri deformatsioon	Millimeeter (mm)
Deformatsioonianduri takistuse muut	Ohm (Ω)
Katsekehale mõjuv jõud	Kilonjuuton (kN)

Tabel 3.1 Mikrokontrolleris arvutatavad väärtused

3.4 Andmete edastamine CAN busi

Peale arvutuste tegemist edastatakse need CAN busi. CAN busi saadetav sõnum koostatakse ning saadetakse HAL_CAN teegi abil. Sõnumi tähtsaimateks osadeks on sõnumi ID ning andmed mida see sisaldab. Sõnumi ID'ks on 256, mis on kooskõlastatud kõikide ülejäänud sõnumitega, mis tudengivormeli CAN busis liiguvad. 64 bitine sõnumi andmehulk on jaotatuks kaheksaks baidiks ning koodis toimub andmete sisestamine baidi kaupa. Kuna välja saadetavad andmed on komakohtadega, korrutatakse need ka eelnevalt piisavalt suure kordajaga läbi, et andmed võimalikult täpselt edastada. Joonisel 3.6 on näidatud kuidas dünamomeetri koodis sõnum koostatakse ning välja saadetakse.

```

CanMsg msg; // sõnumi andmehulga loomine
msg.id = 0x100; // sõnumile ID omastamine
msg.ide = IDE_STD; // sõnumi ID pikkus on 11 bitti (CAN 2.0A)
msg.rtr = RTR_DATA; // sõnumi sisuks on määratud andmed
msg.len = 8; // edastatav andmehulk on 8 baiti
msg.data[0] = result; // ADC väärtuse esimene bait (bitid 17-10)
msg.data[1] = result >> 8; // ADC väärtuse teine bait (bitid 9-2)
msg.data[2] = result >> 16; // ADC väärtuse viimased 2 bitti (1-0)
msg.data[3] = strain; // Anduri deformatsiooni esimene bait
msg.data[4] = strain >> 8; // Anduri deformatsiooni teine bait
msg.data[5] = currentResistance; // Anduri hetketakistuse esimene bait
msg.data[6] = currentResistance >> 8; // Anduri hetketakistuse teine bait
msg.data[7] = outputData.resistanceChange; // takistuse muut
canx_transmit(CAN1, &msg); // funktsioon sõnumi saatmiseks

```

Joonis 3.6 CAN sõnumi koostamine ning välja saatmine

Selleks, et dataloger ja muud seadmed oskaks välja saadetud sõnumi 64 andmebiti õigesti tõlgendada, koostatakse tudengivormeli meeskonna liikmete poolt programmi CANTrace abiga CAN sõnumite andmebaas, kus on kirjeldatud kõik sõnumid ning nende sisu.

Töö valmimise ajaks ei saadud tööle SD kaardile andmete logimist, seetõttu kasutati esmasel prototüübil ainult CAN busi andmete edastamiseks.

4 PROTOTÜÜBI KATSETUS NING MÕÖTETULEMUSED

Valideerimaks, et dünomomeeter mõõdab lineaarse deformatsioonimõõtu pikenemist õigesti, viidi läbi katse tõmbepingis. Katse eesmärgiks oli tõmbepinki paigutatud katsekeha lineaarse kiirusega venitada ning seejärel võrrelda, kas tõmbepingi poolt mõõdetud pikenemine ning deformatsioonimõõtu poolt mõõdetud pikenemine on samasugused.

4.1 Katse ettevalmistus

Katse läbiviimiseks oli vaja valida sobiv katsekeha ning selle külge kinnitada deformatsioonimõõtu. Deformatsioonimõõtu ühendati dünamomeetri trükkplaadi pistikusse ning mõõteandmed saadeti läbi can busi arvutisse kus deformatsioonimõõtu andmed logiti.

4.1.1 Katsekeha valik

Katsekeha valikul lähtuti sellest, et see oleks elastne, kergesti töödeldavast materjalist ning kättesaadav. Sobivaks materjaliks osutus POM plastik, kuna seda on lihtne töödelda ning materjali elastsusmoodul on madal (2.7 GPa) [24]. Katsekeha mõõteteks valiti 22mm x 110mm x 2mm, et sinna peale oleks lihtne paigaldada deformatsioonimõõtu ning et tõmbepingi käppadel oleks piisavalt ruumi katsekehast kinni võtta ilma deformatsioonimõõtu kahjustamata.

4.1.2 Deformatsioonimõõtu paigaldamine katsekehale

Deformatsioonimõõtu paigaldati katsekehale Loctite 3090 kiirliimi abil. Ennem deformatsioonimõõtu liimimist puhastati liimitavad pinnad piiritusega, et tagada liimi parem nakkuvus. Ennem liimimist mõõdeti välja ka katsekeha keskkohu deformatsioonimõõtu paigaldati. Peale liimimist joodeti deformatsioonimõõtu jalgade külge juhtmed. Juhtmete teise otsa pressiti tangide abil kaabliotsad.

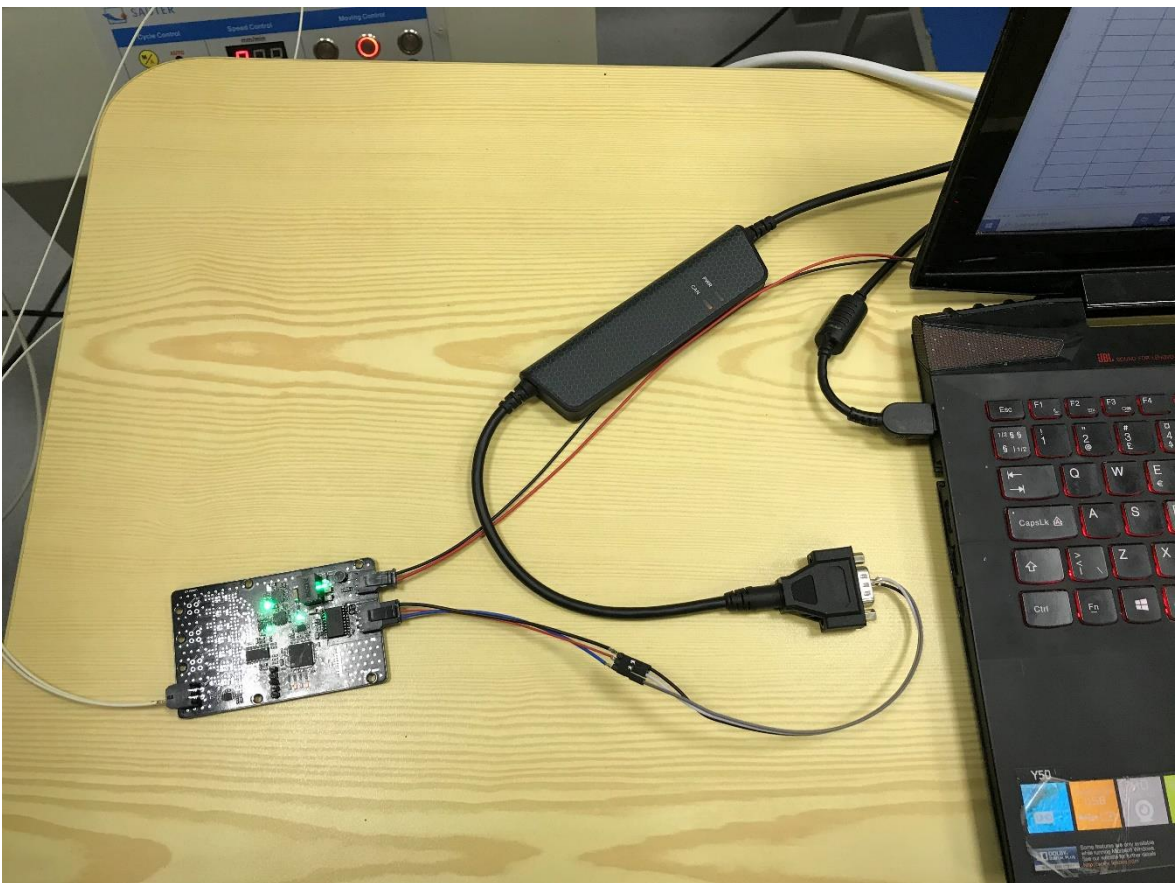
4.2 Katse käik

Enne katse tegemist asetati katsekeha koos deformatsioonimõõturiga tõmbepinki ning fikseeriti tõmbepingi käppade vahele, mida on näidatud joonisel 4.1. Tõmbepingi küljes olev nihkemõõtu nulliti ning tõmbepingi tõmbekiiruseks määrati 34 mm/min. Sensori juhtmed ühendati dünamomeetri trükkplaadi esimese sensori sisendisse. Trükkplaadi Can bus pistikusse ühendati Can bus analüüsaator Kvaser Leaf Light v2, mille teine ühendus ühendati arvuti külge, kuhu logiti mõõtetulemused.

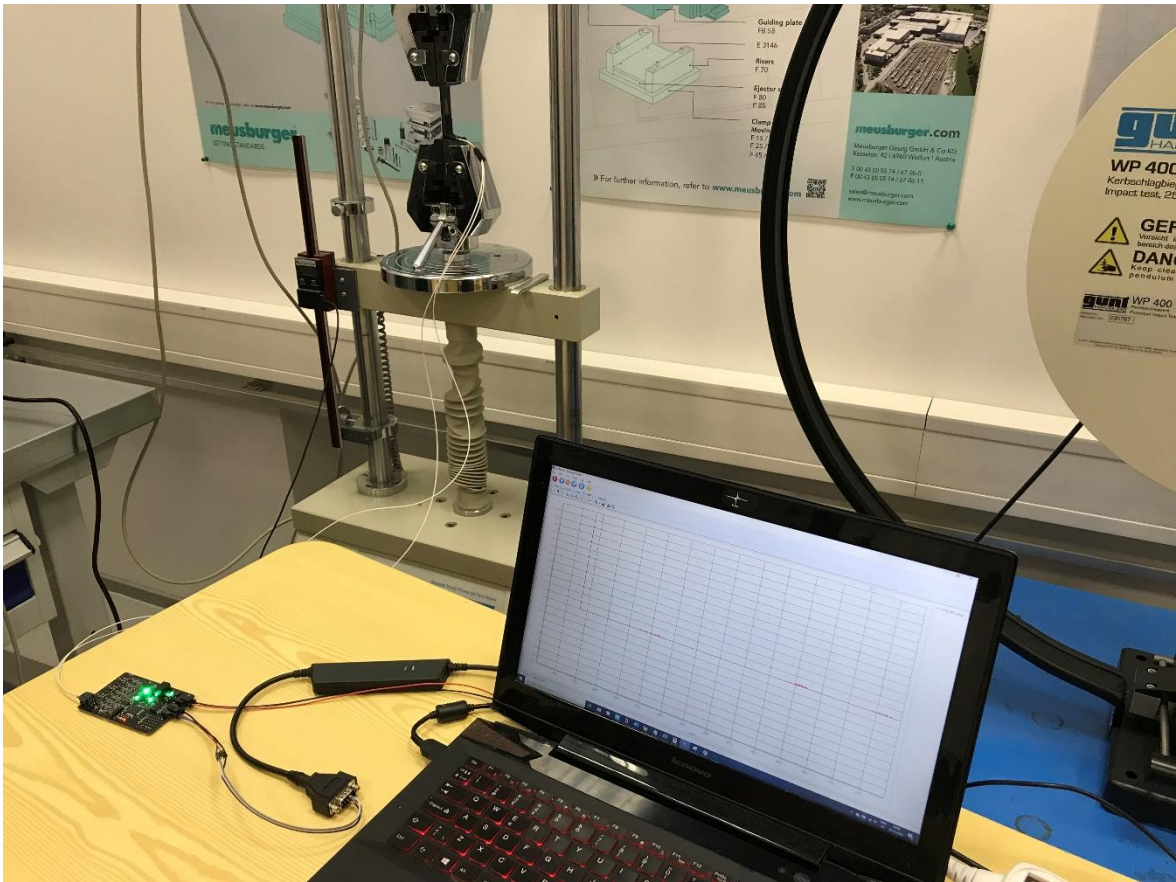
Trükkplaadi ja Can bus analüsaatori ühendused on näidatud piltidel 4.2, kõik testis kasutatavad seadmed on näidatud joonisel 4.3.



Joonis 4.1 Katsekeha tõmbepingi käppade vahel

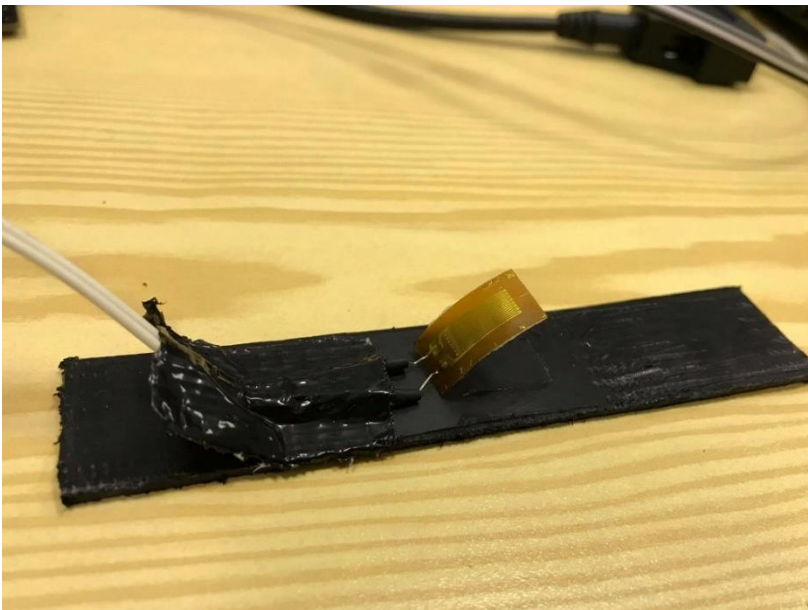


Joonis 4.2 Dünamomeetri trükkplaat (vasakul) ning Kvaser Leaf light v2 Can bus analüsaator



Joonis 4.3 Kõik testiseadmed

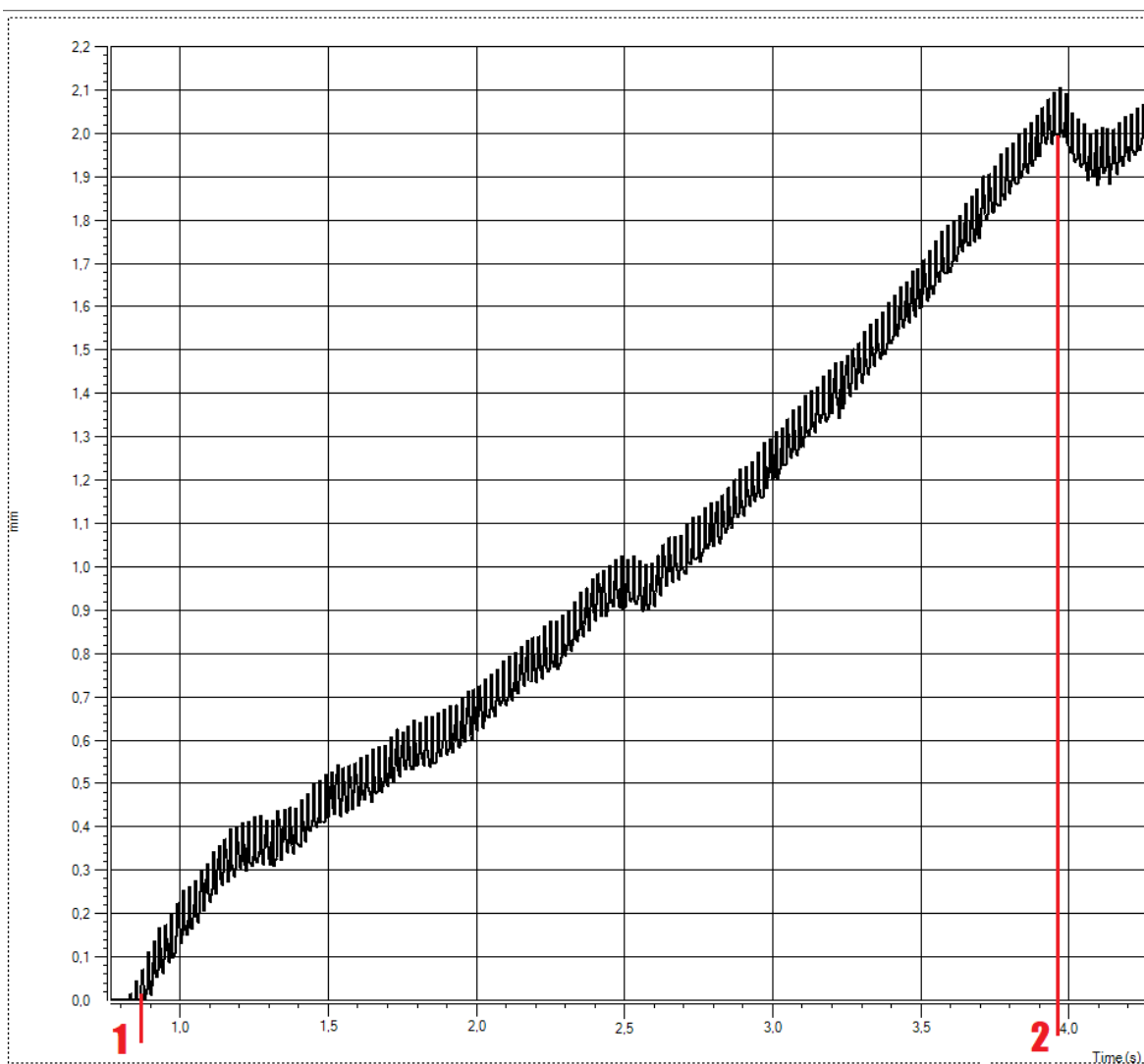
Peale katse ülesseadmist tõmmati katsekeha kiirusega 43 mm/min seni kuni deformatsioonimõõtur katsekeha küljest lahti tuli. Deformatsioonimõõtur tuli katsekeha küljest lahti, sest liim millega see kinnitatud oli ei olnud antud otstarbeks ette nähtud. Kasutatud liim on mõeldud asjade jäigaks kokku fikseerimiseks ning ei ole mõeldud olema elastne, antud katse jaoks oli liim siiski piisavalt elastne. Lahti tulnud deformatsioonimõõturit on näidatud joonisel 4.4.



Joonis 4.4 Deformatsioonimõõturi ja katsekeha vahelise liimliite purunemine

4.3 Katse tulemused

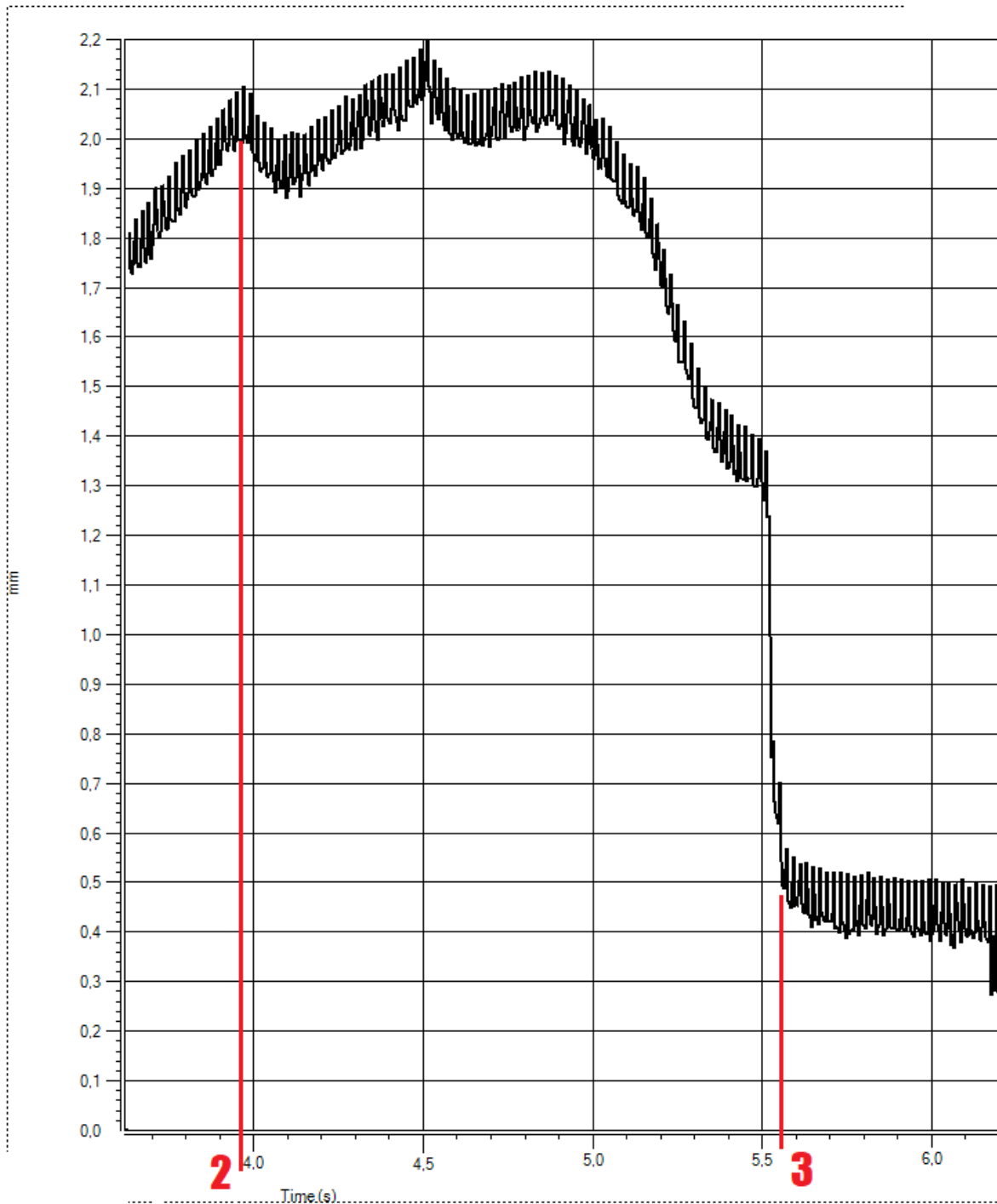
Deformatsioonimõõduri poolt mõõdetud töötlemata deformatsioonigraafik on esitatud lisa 2. Katsegraafiku logimiseks kasutati programmi CANTrace. Katse algab graafikul ajahetkel 0,9 sekundit (graafikul 4.1 punkt 1) ning deformatsioonianduri mõõdetud andmed on oodatult küllaltki lineaarsed kuni 3,9 sekundini (graafikul 4.1 punkt 2). Selle aja möödab deformatsiooniandur katsekeha pikendamiseks 2,15 mm.



Joonis 4.5 Katse mõõtetulemused ajavahemikus 0,9 – 3,9 sekundit.

X telg - katse aeg (s), Y telg - deformatsioonianduri poolt mõõdetur deformatsioon (mm)

Peale 3,9 sekundit mõõtmist muutub graafik mittelineaarseks, seda seetõttu, et deformatsiooniandur hakkas katsekeha küljest lahti tulema (joonisel 4.6 punktide 2 ja 3 vahemik). 5.1 sekundit peale katse lõppu on deformatsiooniandur katsekeha küljest täielikult eemaldunud (joonisel 4.6 punkt 3). Peale 5.1 sekundit katse kestust (graafikul 4.6 peale punkti 3) on näha, et andur näitab mõõtetulemuseks 0,4 – 0,5 mm kuigi on täielikult katsekeha küljest eemaldunud, vale kinnitusliimi tõttu sai deformatsiooniandur kahjustada.



Joonis 4.6 Katse mõõtetulemused ajavahemikus 3,5 – 6.2 sekundit

X telg - katse aeg (s), Y telg – deformatsioonianduri poolt mõõdetud deformatsioon (mm)

Katse algseks eesmärgiks olnud kahe tulemuse võrdlemine ebaõnnestus, kuna deformatsioonimõõtur tuli katsekeha küljest lahti kuid pink jätkas tõmbamist. Tõmbepingi nihkemõõturi lugem näitas katse seiskudes 3,8 mm, näidatud joonisel 4.7, kuid graafikult on näha, et deformatsioonimõõturi lugem muutub mittelineaarseks peale 2,15 mm suurust deformatsiooni.

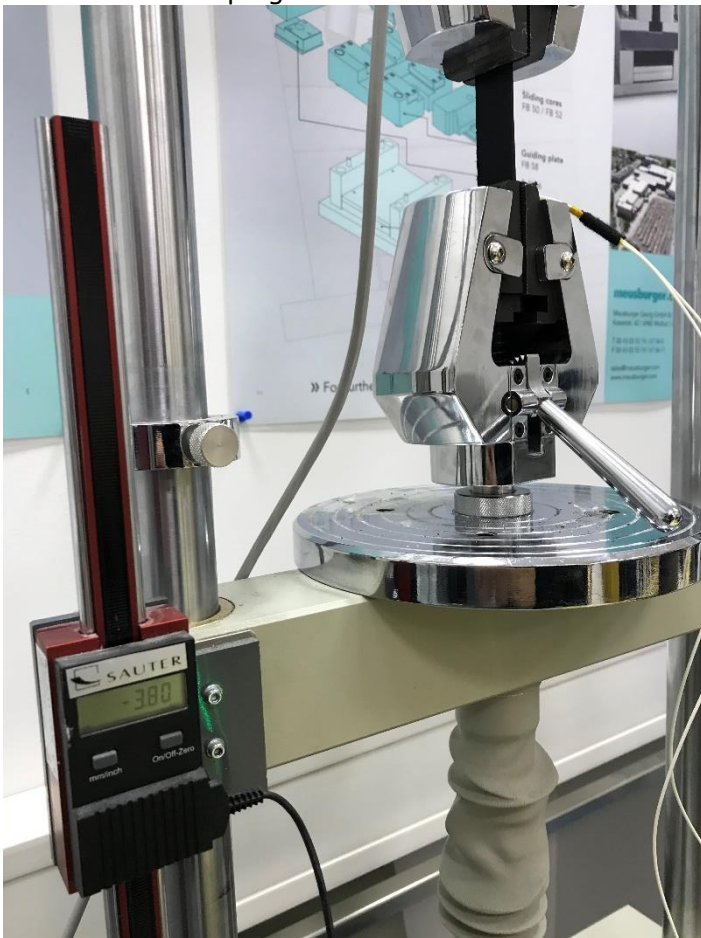
Tõmbepingi tõmbamiskiiruseks määrati katse alguses 43 mm/min, teades tõmbekiirust saab graafiku lineaarse osa põhjal ristkorrutisega arvutada, kas deformatsioonianduri näit suurenes samuti 43mm/min.

$$\frac{2,15\text{mm} \cdot 60\text{s}}{3\text{s}} = 43 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Kus 2,15 mm – deformatsioonianduri poolt mõõdetud pikenemine

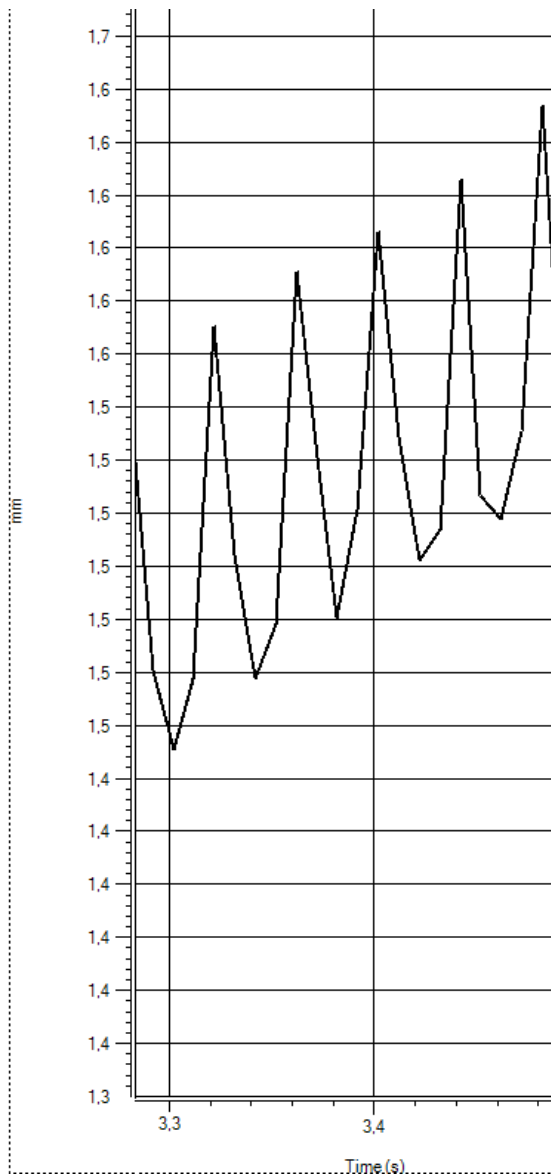
60 s – sekundit minutis

3 s – aeg, mille jooksul mõõdeti deformatsioonianduri poolt mõõdetud pikenemine. Arvutuse põhjal võib öelda, et deformatsioonimõõturi lugem kasvas sama kiirelt kui tõmbepingile määratud tõmbekiirus.



Joonis 4.7 Tõmbepingi nihkemõõturi näit peale katset

Samas on graafikutelt näha, et mõõtetulemustes esinevad häiringute tõttu ostsillatsioonid, mis on ligikaudu väärtusega 0,1 mm (näidatud joonisel 4.8). Selle tõttu on arvutustes kasutatud graafikult loetud arvud ligikaudsed, kuid töö autori arvates on antud mõõtetulemus esmase prototüübi valideerimiseks rahuldav kuid mõõteviga on tudengivormeli auto jõudude mõõtmiseks liiga ebatäpne.



Joonis 4.8 häiringute poolt põhjustatud ostsillatsioonid mõõtetulemustes

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli projekteerida dünamomeeter, millega on võimalik mõõta Tudengivormeli veermikule mõjuvaid jõudusid.

Töö käigus uuriti ja tutvuti esmalt erinevate dünamomeetrite tööpõhimõtetega. Kuna üldkaubanduses antud otstarbeks seadet osta ei saa, siis otsustati antud seade ise projekteerida.

Peale esmast ülevaadet dünamomeetrite tööpõhimõtetest, disainiti spetsiaalseks mõõtmiseks vajalik seade vastavalt tudengivormeli auto ning keskkonnatingimustele, kus mõõtmine toimub. Tudengivormeli puhul olid mõõdetavateks objektideks veermikuhuovad, mis on valmistatud süsinikkiud materjalist, mis on projekteeritud maksimaalselt 0,1 mm pikenemisele. Sealt tulenes ka nõue mõõtesüsteemi väiksele mõõteveale. Lisaks mõõdetavale objektile tuli arvestada ka tudengivormeli elektrisüsteemiga, et dünamomeeter oleks sellega lihtsalt ühilduv.

Järgnes dünamomeetri elektriskeemide koostamine ning trükkplaadi projekteerimine, vahetult enne elektriskeemide koostamist valiti vastavalt vajadusele välja ka põhikomponendid, mida skeemis kasutada. Dünamomeetri elektriskeemi põhikomponentideks olid: Signaalivõimendi, mikrokontroller, analoog – digitaalmundur ning CAN transiiver. Peale skeemide koostamist paigutati komponendid trükkplaadile.

Raudvara valmimise järgselt programmeeriti mikrokontroller, mis on kogu süsteemi keskne osa ning milles tehakse vajalikud arvutused. Mikrokontroller programmeeriti C programmeerimiskeeles ja programmeerimise lihtsustamiseks kasutati programme STM32CubeMX ja Atollic TruStudio.

Peale programmeerimist sai asuda testmõõtmiste ning nende analüüsimise juurde. Testmõõtmiste analüüsimise käigus selgus, et soovitud mõõtetäpsust ei saavutatud. Laboris tehtud testmõõtmise käigus saadi süsteemi mõõteveaks ligikaudu 0,1 mm. Kuna tudengivormeli veermik on projekteeritud maksimaalselt pikenemisele 0,1 mm, siis esmase prototüübi mõõtetäpsus selle jaoks ei sobi. Esmase prototüübiga leiti kinnitus sellele, et põhimõtte poolest selline lahendus töötab kuid töö tulemus näitab, et see vajab olulist täiendamist.

Täpsema mõõtetulemuse saavutamiseks tuleb uurida antud mõõtesüsteemile mõjuvaid keskkonnategureid ning trükkplaadi ja elektriskeemi disainist tulenevaid müraallikaid. Lisaks eelpool mainitule on täpsete mõõtetulemuste saavutamiseks vaja ka deformatsiooniandurite korrektne kinnitamine mõõdetavale objektile.

SUMMARY

The aim of this thesis was to develop a strain measuring device to measure strain in the control arms of a Formula Student class car.

In the first part of the thesis, working principles of different strain and force gauges were described. Since there are no devices available for this type of measurement on the market, it was decided to design one by the Author of this thesis.

After an overview of different force gauges, a measurement device was designed according to the environmental conditions and conditions inside the formula student car. The measuring objects were control arms that are made of carbon fiber, these are designed into the chassis in the way, that they only elongate 0.1 mm. Since the measuring range was small, the mistake made during the measuring had to be small aswell.

After the conditions for the design process were set, the main components for the printed circuit board were chosen and the electric schematics were drawn. The main components on the PCB were the following: Amplifier, microcontroller, analog to digital converter and CAN bus transceiver. After the drawing the schematics was finished, the components had to be placed on the circuit board.

After the hardware development, the programming of the microcontroller was done. The microcontroller used was an STM32F7 type microcontroller and it was programmed in C language with the help of STM32CubeMX and Atollic truestudio integrated development environment.

Right after the programming the test measurements were done and analyzed. Analyzing the measurement results was following: The measurement device is inaccurate. During the test in laboratory it was found out, that the measurement error is about 0,1 mm which is not sufficient to measure the strain of formula student car links and rods. The first designed prototype proved that the concept of the device is working but it needs to be improved in more detail.

For more accurate measurement results, environmental and printed circuit board design caused intergerence have to be investigated. It is also important to use proper bonding materials to attach strain gauges to test specimen for more accurate measurements.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] T. T. Formula Student, "Formula Student Team Tallinn," 2019. [Online]. Saadaval: <https://formulastudent.ee/>. [Accessed 01 Detsember 2019].
- [2] M. Williams, "Universe Today," 2015 02 13. [Online]. Saadaval: <https://www.universetoday.com/55027/hookes-law/>. [Accessed 01 12 2019].
- [3] M. Reinok, Artist, *Deformatsioonimõõtur*. [Art]. FS Team Tallinn, 2019.
- [4] V. Koncar, Smart Textiles for In Situ Monitoring of Composites, Woodhead Publishing, 2019.
- [5] National Instruments, "National Instruments," 14 03 2019. [Online]. Saadaval: <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/07/measuring-strain-with-strain-gages.html>. [Accessed 02 12 2019].
- [6] H. M. j. N. M. ukio Ueda, Welding Deformation and Residual Stress Prevention, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [7] HBM, "Temperature compensation of strain gauges," 2019. [Online]. Saadaval: <https://www.hbm.com/en/6725/article-temperature-compensation-of-strain-gauges/>. [Accessed 12 02 2019].
- [8] HBM, "Wheatstone bridge circuit," [Online]. Saadaval: <https://www.hbm.com/en/7163/wheatstone-bridge-circuit/>. [Accessed 03 12 2019].
- [9] "Electronics Tutorials," [Online]. Saadaval: <https://www.electronicstutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>. [Accessed 20 12 2019].
- [10] S. Parts, "Jõuülekande projekteerimine Tudengivormelile FEST17," 2017.
- [11] M. Reinok, Artist, *FEST20 roolivarras koos torulõpuga*. [Art]. Formula Student Team Tallinn, 2019.
- [12] Boston University, "Boston University," [Online]. Saadaval: <https://www.bu.edu/moss/mechanics-of-materials-strain/>. [Accessed 15 12 2019].
- [13] M. Reinok, Artist, *FEST20 veermikule mõjuvad jõud*. [Art]. Formula Student Team Tallinn, 2019.
- [14] G. Kõivumägi, Artist, *tõmbeteim 7jan2019*. [Art]. Formula Student Team Tallinn, 2019.
- [15] GEMS Performance Electronics, "Data - Acquisition DA3," 2019. [Online]. Saadaval: <https://gems.co.uk/products/data-acquisition/da3/>. [Accessed 2019 12 04].
- [16] "INA 333 Datasheet," [Online]. Saadaval: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/sbos445b/sbos445b.pdf>. [Accessed 05 12 2019].
- [17] Measurement Computing, "Analog to Digital conversion," [Online]. Saadaval: <https://www.mccdaq.com/PDFs/specs/Analog-to-Digital.pdf>. [Accessed 15 12 2019].

- [18] "ADS869x 18-Bit, 500-kSPS, 4- and 8-Channel, Single-Supply, SAR ADCs with Bipolar Input Ranges," Texas Instruments, 06 2015. [Online]. Saadaval: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8698.pdf>. [Accessed 05 12 2019].
- [19] STMicroelectronics, "STM32F732XX, STM32F733xx Datasheet," 10 04 2018. [Online]. Saadaval: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f732re.pdf>. [Accessed 02 12 2019].
- [20] D. Mercer and M. Antoniu, "ADALM1000 SMU Training Topic 10: Low Pass and High Pass Filters," Analog Devices, 10 2018. [Online]. Saadaval: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/studentzone/studentzone-october-2018.html>. [Accessed 15 12 2019].
- [21] Brandner PCB, "brandner.ee," 2019. [Online]. Saadaval: <https://www.brandner.ee/et/kusi-hinnapakumist/>. [Accessed 07 12 2019].
- [22] Analog Devices, "Data Sheet ADM3053," 12 2017. [Online]. Saadaval: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADM3053.pdf>. [Accessed 09 12 2019].
- [23] "Di - Li Mikroskope," [Online]. Saadaval: http://www.farnell.com/datasheets/1718328.pdf?_ga=2.199392617.675181892.1575995196-1645504762.1570560664. [Accessed 10 12 2019].
- [24] SpecialChem SA, "Omnexus," [Online]. Saadaval: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/young-modulus?src=omproperty>. [Accessed 06 05 2020].
- [25] L. S. Sterling, *The Art of Agent-Oriented Modeling*, London: The MIT Press, 2009.
- [26] HBM, *1-LY11-10/120A Datasheet* Saadaval: Lisa 1.

Lisa 1 HBM 1-LY11-10/120A Andmeleht



Dehnungsmessstreifen
Strain gages
Jauges d'extensométrie

Bestellnummer
Order No.
No. de référence
1-LY11-10/120A

Typ
Type
Type
10/120A LY11

Stückzahl
Contents
Quantité
10
Mit Applikationshilfe
With application aid
Avec support d'aide
à l'application

Temperaturkoeffizient
des k-Faktors
Temperature coefficient
of gage factor
Coefficient de température
du facteur k
93 ±10 [10⁻⁶ / K]
(-10°C ... +45°C)

Folienlos
Foil lot
Lot de la feuille
A413/06

Herstellungslot
Production batch
Lot de fabrication
812083809

Widerstand
Resistance
Résistance
120 Ω ±0.35 %

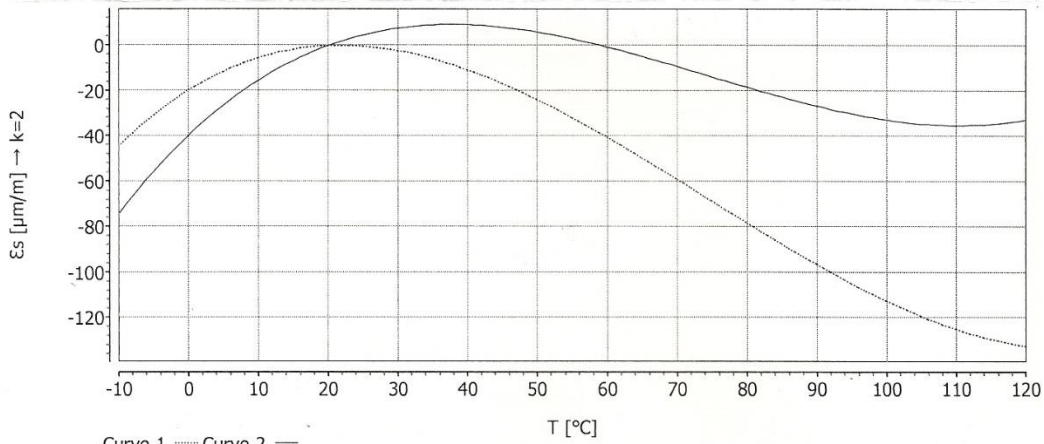
k-Faktor
Gage factor
Facteur k
2.06 ±1.0 %

Querempfindlichkeit
Transverse sensitivity
Sensibilité transverse
0.0 %

Temperaturkompensation: Ferritischer Stahl mit
Temperature compensation: steel with
Compensation de température: acier avec

α = 10.8 [10⁻⁶ / K]

Max. effekt. Brückenspeisespannung
max. rms bridge excitation voltage
tension d'alim. de pont maxi eff.
13.0 V



$$\epsilon_s(T) = -19.92 + 1.93 \cdot T - 5.20E-02 \cdot T^2 + 2.34E-04 \cdot T^3 \pm (T-20) \cdot 0.30 [\mu\text{m/m}] + 0.03330 \cdot L \cdot (T-20) [\mu\text{m/m}]$$

Alle technischen Daten nach VDI/VE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und Herstellungslot an.

All specifications in accordance with VDI/VE 2635. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number.

Toutes les caractéristiques techniques selon la norme VDI/VE 2635. Dans toutes communications, prière d'indiquer le numéro de commande et le numéro du lot de production.

Réponse en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont des coefficients de dilatation thermique α sont indiqués. Mesurée à variation continue de la température.

Courbe 1: Jauges sans pattes de raccordement.

Courbe 2: Jauges avec pattes de raccordement (longueur unitaire de la patte de 30 mm). Lorsque les pattes sont plus courtes, la réponse en température se trouvera entre les deux courbes 1 et 2. La représentation numérique permet de calculer exactement la réponse en température pour chaque longueur de patte. T = température en °C L = longueur unitaire de la patte en mm (sans dimension)

Temperaturgang der Dehnungsmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten α. Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

Kennlinie 1: DMS ohne Anschlussbändchen.

Kennlinie 2: DMS mit Anschlussbändchen (30mm einfache Bändchenlänge). Bei gekürzten Bändchen liegt der Temperaturgang zwischen Kennlinie 1 und 2. Die numerische Darstellung erlaubt, den Temperaturgang für jede Bändchenlänge exakt zu errechnen. T = Temperatur in °C L = einfache Bändchenlänge in mm (dimensionslos)

The temperature response refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion α. Values are measured with continuous temperature variation.

Curve 1: Strain gages without leads.

Curve 2: Strain gages with leads (simple lead length of 30 mm). If the leads are shorter, the temperature response lies between curve 1 and 2. The numeric representation allows exact calculation of the temperature response for any lead length. T = temperature in °C L = simple lead length in mm (dimensionless)

Kopfdaten / Header / Titre



A point (".") is used as decimal separator in data; the separator needs to be configured accordingly for import into Excel.

LISA 2 KATSETULEMUSTE GRAAFIK

