



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**PUUDUVATE KOMPONENTIDE AUTOMAATNE
TUVASTAMINE MOBIILSETES LABORITES**

**AUTOMATED DETECTION OF MISSING COMPONENTS IN
MOBILE LABORATORIES**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Jürgen Tümanok

Üliõpilaskood: 179496EAAB

Juhendajad: Heigo Mölder, Insener

Martin Jaanus, Vanemlektor

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.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Jürgen Tümanok

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Puuduvate komponentide automaatne tuvastamine mobiilsetes laborites,

mille juhendajad on Heigo Mölder, Martin Jaanus,

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.

16.12.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Jürgen Tümanok

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Puuduvate komponentide automaatne tuvastamine mobiilsetes laborites

Kuupäev: 16.12.2021

86 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: insener Heigo Mõlder, vanemlektor Martin Jaanus

Töö konsultant: Martin Parker

Sisu kirjeldus:

Tallinna Tehnikaülikoolis on kasutusel mobiilsed laborid. Mobiilne labor on kohver, mille sees on komplekt komponente laboratoorsete ülesannete läbimiseks. Mobiilsete laborite kasutamise käigus lähevad komponendid kaduma ning õppejõud peab pidevalt füüsiliselt kontrollima nende olemasolu. Lõputöö eesmärk oli leida viis, kuidas automaatselt tuvastada, kui mobiilsest laborist on mõni komponent puudu ning ehitada ülesande täitmiseks prototüüp. Töö käigus otsustati, et ülesande jaoks oli kõige sobilikum kasutada kaalupõhist tehnikat, kus puuduv komponent tuvastati mobiilse labori massi muutuse abil. Selleks, et mobiilsete laborite massi oleks võimalik täpselt mõõta, viidi läbi kaalu kalibreerimine, kaaluti mobiilsete laborite komponente ning viidi läbi koormuselementide kalibreerimised. Mõõtmis- ja kalibreerimistulemuste alusel arvutati mobiilsete laborite massi kontrollprotsessile mõõtemääramatus. Samas valiti prototüübi jaoks välja elektroonika komponendid ning prototüübi jaoks koostati 3D-mudel ja programm.

Mobiilsete laborite maksimaalne mass oli 3,5 kg ning kõige kergema komponendi mass oli 6 g. Prototüüp läks maksma alla 100 €, suutis tulemuse anda 20 s vältel ning kontrollprotsessi mõõtemääramatus jäi alla 2,3 g. Lühikeste perioodide vältel toimis prototüüp korrektselt, kuid prototüübi katsetamise käigus selgus, et mobiilsete laborite mass muutus nädala vältel keskmiselt 4,6 g võrra. Mobiilsete laborite massi muutusest tulenevalt ei suutnud prototüüp anda korrektseid tulemusi. Mobiilsete laborite massi muutus tulenes eeldatavasti õhuniiskusest.

Märksõnad: mobiilne labor, koormuselement, kalibreerimine, mõõtemääramatus, kaalumine, bakalaureusetöö.

ABSTRACT

Author: Jürgen Tümanok

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Automated Detection of Missing Components in Mobile Laboratories

Date: 16.12.2021

86 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisors of the thesis: Engineer Heigo Mõlder, Senior Lecturer Martin Jaanus

Consultant: Martin Parker

Abstract:

Tallinn University of Technology uses mobile laboratories. A mobile laboratory is a suitcase that houses a set of components for fulfilling laboratory assignments. During the use of mobile laboratories, the components disappear, and the teacher must constantly physically check for the presence of the components. The objective of the thesis was to find a way to automatically detect if a component is missing from a mobile laboratory and to build a prototype to carry out the task. In the course of the thesis, it was decided that a weight-based technique was most suitable for the task, where the missing component was identified by the change in the weight of the mobile laboratory. In order to measure the mass of the mobile laboratory accurately, a scale was calibrated, the components of the mobile laboratories were weighed, and calibrations of load cells were performed. Based on the measurement and calibration results, the measurement uncertainty for the mass control process of the mobile laboratories was calculated. In addition, electronic components were selected, a 3D model and a program were developed for the prototype. The maximum weight of the mobile laboratories was 3,5 kg and the lightest component weighed 6 g. The prototype cost less than 100 €, it was able to give results in less than 20 s and the measurement uncertainty of the control process was less than 2,3 g. The prototype worked correctly in shorter time periods, but testing the prototype revealed that the weight of the mobile laboratories changed by an average of 4,6 g in a week-long period. Due to the change in weight of the mobile laboratories, the prototype could not give correct results. The change in weight of the mobile laboratories was expected to be due to humidity.

Keywords: mobile laboratory, load cell, calibration, measurement uncertainty, weighing, bachelor's thesis.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Puuduvate komponentide automaatne tuvastamine mobiilsetes laborites**

Lõputöö teema inglise keeles: **Automated Detection of Missing Components in Mobile Laboratories**

Üliõpilane: **Jürgen Tümanok, 179496**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**

Lõputöö liik: **Bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Heigo Mölder, Martin Jaanus**

Lõputöö kaasjuhendaja:
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande
kehtivusaeg: **30.06.2022**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **21.12.2021**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tallinna Tehnikaülikoolis kasutatakse õppeainetes ATR0110 „Analoog- ja digitaaltehnika“ ja ISC0100 „Küberelektroonika“ mobiilseid laboreid. Mobiilne labor on komplekt seadmetest, mida läheb õppeaines osaleval tudengil vaja laboratoorsete ülesannete läbimiseks. Mobiilseid laboreid laenutatakse tudengitele välja, et nad saaksid ülesandeid teha ülikoolist väljaspool endale sobival ajal. COVID-19 tõttu piiratakse inimeste ligipääsu laboriruumidesse ja ülikooli, mis muudab ülikoolis laboratoorsete ülesannete läbimise keeruliseks. Antud olukorras on mobiilsete laborite süsteem perfektne tudengitele praktiliste ülesannete läbimiseks.

Mobiilsete laborite puhul on probleemiks, et välja laenutamise ajal lähevad mobiilsetest laboritest komponendid kaduma. Kui mõni komponent on mobiilsest laborist puudu, siis ei saa mobiilse labori laenutanud tudeng osa ülesandeid laenutamissessiooni ajal teha. Samas on iga kaduma läinud komponent rahaline kaotus ülikoolile. Komponentide

kadumise vältimiseks peab õppejõud pidevalt füüsiliselt kontrollima, kas kõik komponendid on mobiilsetes laborites olemas. Kontrollimise käigus võib inimlikust veast jääda mõni puuduv komponent tuvastamata. Antud lõputöö raames otsitakse lahendust, kuidas automatiseerida mobiilsetest laboritest puuduvate komponentide tuvastamine.

2. Töö eesmärk

Leida lahendus, kuidas automatiseerida mobiilsetest laboritest puuduvate komponentide tuvastamine ning ehitada selleks prototüüp.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Milliseid tehnikaid kasutatakse ettevõtetes komplektist puuduvate komponentide tuvastamiseks?

Milline ettevõtetes kasutatavatest tehnikatest on kõige sobivam mobiilsetest laboritest puuduvate komponentide tuvastamiseks?

Milline peab olema prototüübi ülesehitus?

4. Lähteandmed

Mobiilsete laborite kohta saadakse informatsiooni vanemlektor Martin Jaanuse käest ning doktoritööst „Interaktiivne õpikeskkond mobiilsetele laboritele“. Mobiilsetest laboritest puuduvate komponentide tuvastamiseks sobiliku tehnika valimiseks uuritakse internetist milliseid tehnikaid kasutavad ettevõtted tööriistakomplektist puuduvate tööriistade tuvastamiseks. Peamiseks eeskujuks on HenschmanTRAK tööriistakomplektide tootesari. Prototüübi jaoks sobilike elektroonika komponentide valimisel lähtutakse elektroonika komponentide kirjeldustest ja andmelehtedest. Koormuselemendi valimisel lähtutakse töö käigus saadavatest mõõtmis- ja kalibreerimistulemustest.

5. Uurimismeetodid

Esmalt viiakse läbi intervjuu vanemlektor Martin Jaanusega. Intervjuu käigus saadakse teada, millised on mobiilsete laborite puudused ning millised on nõuded uuritava tehnika ja prototüübi jaoks.

Prototüübi jaoks sobiliku tehnika valimiseks, uuritakse internetist milliseid tehnikaid kasutavad ettevõtted tööriistekomplektist puuduvate tööriistade tuvastamiseks. Tehnikate vahel viiakse läbi võrdlus ning lähtuvalt nõuetest valitakse prototüübi jaoks kõige sobilikum tehnika.

Internetist uuritakse, milliseid elektroonika komponente kasutada prototüübi valmistamiseks, võrreldakse nende omadusi ning valitakse välja kõige sobilikumad. Lähtuvalt välja valitud elektroonika komponentidest koostatakse prototüübi 3D-mudel ning programm.

Selleks, et tuvastada täpselt puuduv komponent, kalibreeritakse kaal, kaalutakse mobiilsete laborite komponente ning kalibreeritakse koormuselemente. Mõõte- ja kalibreerimistulemuste põhjal arvutatakse mobiilsete laborite kontrollprotsessi mõõtemääramatus.

Lõputöö käigus valminud prototüübiga viiakse läbi katsed, kus simuleeritakse mobiilse labori laenutamist, komponentide kadumist ning mobiilse labori tagastamist.

6. Graafiline osa

Põhiosas esitatakse mobiilset laborit tutvustavad pildid, pildid ettevõtetes kasutatavatest tehnikatest tööriistakomplektist puuduvate tööriistade tuvastamiseks, ettevõtetes kasutatavate tehnikate võrdlustabel, mobiilsete laborite komponentide masside tabel, elektroonika komponentide võrdlustabelid, prototüübi elektriskeem, pildid prototüübi 3D-mudelist ning pildid valminud prototüübist.

Lisades esitatakse kalibreerimiste ja katsete tulemuste tabelid, prototüübi BOM ning prototüübi programmi diagramm.

7. Töö struktuur

- Sissejuhatus
- Mobiilsete laborite kirjeldus
 - Mobiilsete laborite ülesehitus
 - Mobiilsete laborite laenutamine ja tagastamine
 - lähteülesanne
- Puuduvate komponentide tuvastamiseks sobiliku tehnika valik
 - Tööriistade varjutamine
 - Automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakärud
 - Mobiilsete tööriistakohvrite kontrolljaamad
- Puuduvate komponentide tuvastamine
- Mobiilsete laborite komponentide massid
- Elektroonika
 - Elektroonika komponentide valik
 - Massi mõõtmine
 - Mobiilse labori tuvastamine
 - Inim-masin liides
 - Kontroller
 - Toide
 - Elektriskeem
- Mehhaanika
- Tarkvara
- Prototüübi katsetamine
- Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

M. Jaanus. (2021). Intervjuu

M. Jaanus. (2011). Interaktiivne õpikeskkond mobiilsetele laboritele. Tallinn

H. B. Halverson II. (2016). TOOL CONTROL AND ACCOUNTABILITY POLICY. NOAA Office of Marine and Aviation Operations

R. Laaneots, O. Mathiesen. (2002). Mõõtmise alused. Tallinn

9. Lõputöö konsultandid

Insener Martin Parker andis nõu kaalu ja koormuselementide kalibreerimisel ning mõõtemääramatuste arvutamisel.

10. Töö etapid ja ajakava

Lähteandmete kogumine (01.06.2021)

Teoreetilise osa kirjutamine (01.07.2021)

Mõõtmiste läbiviimine (15.09.2021)

Prototüübi projekteerimine ja valmistamine (01.10.2021)

Prototüübi katsetamine (20.11.2021)

Töö lõplik versioon valmis (16.12.2021)

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	13
Lühendite ja tähiste loetelu	14
SISSEJUHATUS	18
1 MOBIILSETE LABORITE KIRJELDUS	19
1.1 MOBIILSE LABORI ÜLESEHITUS.....	19
1.2 MOBIILSETE LABORITE LAENUTAMINE JA TAGASTAMINE.....	22
1.3 LÄHTEÜLESANNE	22
2 PUUDUVATE KOMPONENTIDE TUVASTAMISEKS SOBILIKU TEHNIKA VALIK	24
2.1 TÖÖRIISTADE VARJUTAMINE.....	24
2.2 AUTOMATISEERITUD TÖÖRIISTA KONTROLLIGA TÖÖRIISTAKÄRUD	26
2.3 MOBIILSETE TÖÖRIISTAKOHVRITE KONTROLLJAAMAD	28
3 PUUDUVATE KOMPONENTIDE TUVASTAMINE.....	30
4 MOBIILSETE LABORITE KOMPONENTIDE MASSID	32
5 ELEKTROONIKA	35
5.1 ELEKTROONIKA KOMPONENTIDE VALIK	36
5.1.1 Massi mõõtmine	36
5.1.2 Mobiilse labori tuvastamine.....	42
5.1.3 Inim-masin liides.....	44
5.1.4 Kontroller	45
5.1.5 Toide	47
5.1.6 Elektriskeem	48
6 MEHHAANIKA	49
7 TARKVARA	52
8 PROTOTÜÜBI KATSETAMINE.....	55
KOKKUVÕTE	56
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	58

LISAD	62
LISA 1 KAALU KALIBREERIMISE EESKIRI	63
LISA 2 KERN PCB 1000-2 KAALU KALIBREERIMINE	65
LISA 3 KOORMUSELEMENTIDE KALIBREERIMISE EESKIRI.....	69
LISA 4 KOORMUSELEMENTIDE KALIBREERIMISE TULEMUSED	74
LISA 5 BOM	79
LISA 6 PROTOTÜÜBI PROGRAMMI DIAGRAMM	80
LISA 7 PROTOTÜÜBI KATSETAMISE EESKIRI	81
LISA 8 PROTOTÜÜBI KATSETAMISE TULEMUSED	84

EESSÕNA

Lõputöö teema koostati lõputöö autori ning juhendajate Heigo Mõlder ja Martin Jaanuse koostöös. Töö koostati, andmed koguti ning prototüüp valmis Tallinna Tehnikaülikoolis. Metroloogia teemadel oli konsultandiks Martin Parker. Avaldan tänu oma juhendajatele Heigo Mõlderile ja Martin Jaanusele ning konsultandile Martin Parkerile.

Töö eesmärk oli leida viis, kuidas automaatselt tuvastada, kui mobiilsetest laboritest on mõni komponent puudu ning ehitada selleks prototüüp. Töö käigus valiti välja ülesande jaoks sobiv tehnika ja elektroonika komponendid, kalibreeriti kaal, kaaluti mobiilsete laborite komponente ning kalibreeriti koormuselemente. Kogu kontrollprotsessile arvutati mõõtemääramatus. Samas koostatakse prototüübi 3D-mudel ning programm.

Võtmesõnad: mobiilne labor, koormuselement, kalibreerimine, mõõtemääramatus, kaalumine, bakalaureusetöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

ADM – analoog-digitaalmuundur

AIDC – ingl. k. *Automatic Identification and Data Capture*

BOM – ingl. k. *Bill of Materials*

EEPROM – ingl. k. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*

E_i – etalonmassi nimiväärtus mõõtepunktis i

E_R – resolutsiooni katse ajal kasutatud lisavihi nimiväärtus

i – järjekorraindeks

I/O – sisendid ja väljundid

I²C – ingl. k. *Inter-Integrated Circuit*

k – kattetegur

K_i – näidu parand mõõtepunktis i

$K_{m,x}$ – komponendi x näidu parand

LCD - ingl. k. *Liquid-Crystal Display*

$L_{m,K}$ – mobiilse labori kontrollitava massi näit

$L_{m,S}$ – mobiilse labori salvestatud massi näit

$L_{m,x}$ – komponendi x näit

m – järjekorraindeks

$m_{kontroll}$ – kontrollitava mobiilse labori mass

$m_{max,i}$ – komponendi kategooria i raskeima komponendi mass

$m_{max,näit}$ – mobiilse labori kaalumisel saadud näitudest suurim näit

$m_{min,i}$ – komponendi kategooria i kergeima komponendi mass

$m_{min,näit}$ – mobiilse labori kaalumisel saadud näitudest väikseim näit

$m_{salvestatud}$ – salvestatud mobiilse labori mass

m_{vahe} – Mobiilse labori salvestatud massi ja kontrollitava mobiilse labori massi vahe

m_x – komponendi x kaalumise mõõtetulemus

n – sisendsuuruste arv

$P_{EKS,kesk,i}$ – ekstsentrilise koormamise katse ajal kaaluplatvormi keskelt saadud näit mõõtepunktis i

$P_{EKS,max,i}$ – ekstsentrilise koormamise katse ajal kaaluplatvormi nurkadest saadud näit, mis oli kõige erinevam kaaluplatvormi keskelt saadud näidust mõõtepunktis i

P_i – kaalu näit mõõtepunktis i

$P_{REP,max,i}$ – korratavuse katse ajal saadud suurim näit mõõtepunktis i

$P_{REP,min,i}$ – korratavuse katse ajal saadud väikseim näit mõõtepunktis i

QR – ingl. k. *Quick Response*

RFID – ingl. k. *Radio-Frequency Identification*

SPI – ingl. k. *Serial Peripheral Interface*

SPST – ingl. k. *Single Pole Single Throw*

U – kontrollprotsessi mõõtemääramatus

u – sisendsuuruste määramatuste liitmääramatus

$u(L_m)$ – näidu määramatus mobiilse labori kaalumisel

$u(L_{m,K})$ – mobiilse labori kontrollitava massi näidu määramatus

$u(L_{m,S})$ – mobiilse labori salvestatud massi näidu määramatus

$u_{EKS,ELE}$ – koormuselemendi kalibreerimisel saadud ekstsentrilisest koormamisest tulenev määramatus

$u_{EKS,i}$ – ekstsentrilisest koormamisest tulenev määramatus mõõtepunktis i

$u_{EKS,KAAL}$ – kaalu kalibreerimisel saadud ekstsentrilisest koormamisest tulenev määramatus

U_{ELE} – koormuselemendile omane määramatus

$U_{ETA,KAAL}$ – kaalu kalibreerimisel kasutatud etalonmasside massi määramatus

$U_{HÜS}$ – hüstereesist tulenev määramatus

$U_{HÜS,ELE,A}$ – andmelehes antud koormuselemendi hüstereesist tulenev määramatus

UID – ingl. k. *Unique Identifier*

$U_{K,KAAL}$ – kaalu näidu parand

$U_{KOMB,ELE,A}$ – andmelehes antud koormuselemendi kombineeritud hälve

U_{KOMP} – mobiilsete laborite komponentide kaalumise liitmääramatus

$U_{koormuselement}$ – koormuselemendi andmelehest tulenev liitmääramatus

U_{LIN} – lineaarsusest tulenev määramatus

$U_{LIN,ELE,A}$ – andmelehes antud koormuselemendi lineaarsusest tulenev määramatus

$U_{LIN,KAAL,A}$ – andmelehes antud kaalu lineaarsusest tulenev määramatus

U_m – sisendsuuruse m standardmääramatus

U_{MOB} – mobiilsete laborite kaalumise liitmääramatus

$U_{REP,ELE,A}$ – andmelehes antud koormuselemendi korratavusest tulenev määramatus

$U_{REP,i}$ – korratavusest tulenev määramatus mõõtepunktis i

$U_{REP,KAAL}$ – kaalu kalibreerimisel saadud korratavusest tulenev määramatus

$U_{REP,KAAL,A}$ – andmelehes antud kaalu korratavusest tulenev määramatus

U_{RES} – resolutsioonist tulenev määramatus

$U_{RES,ELE}$ – koormuselemendi kalibreerimisel saadud resolutsioonist tulenev määramatus

U_{TEAD} – mobiilsete laborite kontrollimise teadaolev määramatus

U_{VJ} – vähimast jaotisest tulenev määramatus

$U_{VJ,KAAL}$ – kaalu vähimast jaotisest tulenev määramatus

VJ – vähim jaotis

x – komponendi järjekorraindeks

$\Delta P_{HÜS,max}$ – hüstereesi katse ajal leitud maksimaalne näitude vahe

$\Delta P_{LIN,max}$ – lineaarsuse katse ajal leitud maksimaalne näidu ja etalonmassi nimiväärtuse vahe

ΔP_T – koormuselemendile omane näidu muutuse tolerants

$\delta K_{EKS,ELE}$ – koormuselemendi ekstsentrilisuse parand

δK_{LIN} – lineaarsuse parand

$\delta K_{LIN,ELE}$ – koormuselemendi lineaarsuse parand

δK_{REP} – korratavuse parand

$\delta K_{REP,ELE}$ – koormuselemendi korratavuse parand

$\delta K_{RES,ELE}$ – koormuselemendi resolutsioonist tulenev parand

δK_{VJ} – kaalu vähimast jaotisest tulenev parand

SISSEJUHATUS

Tallinna Tehnikaülikoolis kasutatakse õppeainetes ATR0110 „Analoog- ja digitaaltehnikat“ ja ISC0100 „Küberelektroonika“ mobiilseid laboreid. Mobiilne labor koosneb kohvrast, mille sisse on paigutatud vajalikud komponendid laboratoorsete ülesannete läbi viimiseks interaktiivses interneti keskkonnas [1]. Mobiilseid laboreid laenutatakse õppeainete raames välja tudengitele, et nad saaksid laboratoorseid ülesandeid läbi viia väljaspool ülikooli endale sobival ajal. Mobiilsete laborite koostanud ning nende laenutamise tegeleb Tallinna Tehnikaülikooli vanemlektor Martin Jaanus.

Seoses COVID-19 viirusega on ülikoolides võetud laialdasemalt kasutusele distantsõpet. Pandeemiast tuleneva distantsõppe ajal piiratakse ülikooli ruumides viibivate inimeste arvu või on inimeste viibimine ülikoolis üldse keelatud. See muudab keeruliseks praktikumide läbi viimise [2]. Antud olukorras on mobiilsete laborite süsteem perfektne lahendus tudengitele praktikumide läbimiseks, kuna tudengid ei pea olema koos laboriruumis ning inimeste vaheline kontakt on minimaalne.

Mobiilsete laborite puhul on oluline, et kõik komponendid oleksid kohvrast olemas. Kui mõni komponent on mobiilsest laborist puudu, siis ei ole võimalik tudengil kindlaid ülesandeid laenutamise ajal läbida. Kuna mobiilsete laborite komponendid liiguvad ühe tudengi käest teise kätte, siis lähevad inimlikust veast komponendid kaduma. Iga kadunud komponent on ka rahaline kaotus ülikoolile. Antud olukorra vältimiseks on vaja õppejõul enne mobiilse labori välja laenutamist ning pärast mobiilse labori tagastamist kontrollida, kas kõik komponendid on mobiilsetes laborites olemas. Selline kontrollimisprotsess on tüütu, aeganõudev ning õppejõud ei suuda iga kord kindlalt kõiki komponente üle kontrollida.

Lõputöö eesmärk on leida viis, kuidas automaatselt tuvastada, kui mobiilsetest laborite komponendid on puudu ja ehitada selleks prototüüp. Lõputöö käigus uuritakse tehnikaid, mida kasutatakse ettevõtetes tööriistakomplektist puudevate tööriistade tuvastamiseks. Tehnikatest valitakse välja sobiv tehnika mobiilsete laborite jaoks. Samas valitakse välja prototüübi jaoks sobivad elektroonika komponendid, tehakse prototüübi 3D-mudel ning luuakse prototüübile programm. Lõputöö käigus kalibreeritakse kaal mobiilsete laborite komponentide kaalumiseks ja koormuselemendid mobiilsete laborite kaalumiseks. Mõõtmis- ja kalibreerimistulemuste alusel arvutatakse mobiilsete laborite kontrollprotsessile mõõtemääramatus. Lõputöö käigus valminud prototüübiga viiakse läbi katsed, kus simuleeritakse mobiilsete laborite kasutamist. Töö lisades on toodud kalibreerimise ja katsete eeskirjad ning tulemused, prototüübi BOM (ingl. k. *Bill of Materials*) ja prototüübi programmi diagramm.

1 MOBIILSETE LABORITE KIRJELDUS

1.1 Mobiilse labori ülesehitus

Mobiilsete laborite puhul kasutatakse komponentide hoiustamiseks kohvrit, mille mõõtmeteks on 340x245x130 mm. Kohver sisaldab eri sorti ja eri suuruses komponente (vt Joonis 1.2). Komponentid jagunevad toodetud seadmeteks, üksikuteks komponentideks ja ostutoodeteks. Toodetud seadmed on:

- alalisvoolu toiteallikas,
- signaaligeneraator koos ostilloskoobiga,
- operatsioonivõimendi,
- autonoomne kaks клемм,
- takistuslik kaks клемм.

Toodetud seadmed on paigutatud eraldi mustadesse plastikust karpidesse, mille mõõtmeteks on 35x90x110 mm (vt Joonis 1.1.B).

Üksikud komponendid on:

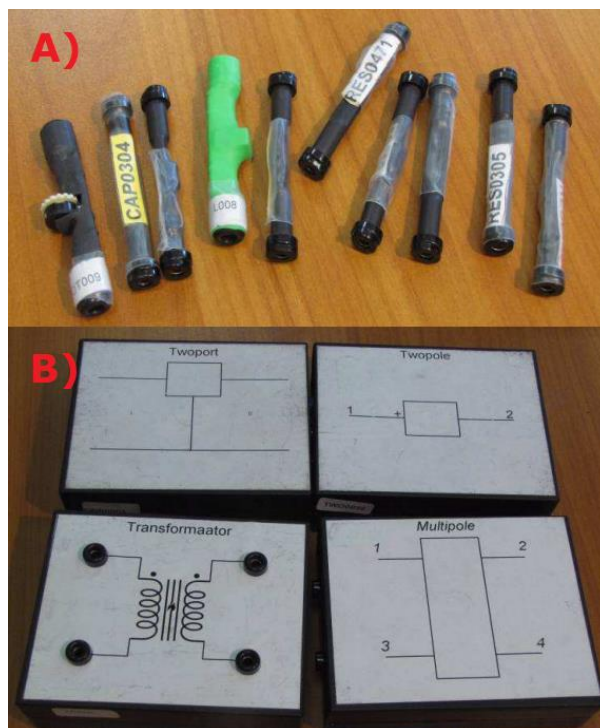
- takisti,
- kondensaator,
- induktiivpool,
- transistor,
- potentsiomeeter.

Takistid, kondensaatorid ja induktiivpoolid on paigutatud eraldi plastikust torude sisse (vt Joonis 1.1.A). Plastikust torude mõõtmed erinevad sõltuvalt üksiku komponendi mõõtmetest. Transistor on paigutatud plastikust karpi, mille mõõtmeteks on 65x90x35 mm ning potentsiomeeter on paigutatud plastikust karpi, mille mõõtmeteks on 55x55x55 mm.

Ostutooted on:

- toodetud seadmete toitejuhtmed,
- multimeetrid,
- ühendusjuhtmed.

Mobilsetes laborites on kasutusel erinevad todetud seadmete toitejuhtmed, multimeetrite mudelid ja erineva pikkusega ühendusjuhtmed.



Joonis 1.1 A) Toru sisse paigutatud üksikud komponendid, B) Karpidesse paigutatud todetud seadmed [1]



Joonis 1.2 Avatud mobiilne labor

Ühe mobiilse labori sees on:

- 1 signaaligeneraator koos ostsilloskoobiga,
- 1 autonoomne kaksklemm,
- 1 takistuslik kaksklemm,
- 1 alalisvoolu toiteallikas,
- 1 transistor,
- 1 operatsioonivõimendi,
- 1 analoog multimeeter,
- 1 digitaalne multimeeter,
- 1 potentsiomeeter,
- 3 kondensaatorit,
- 1 induktiivpool,
- 6-9 takistit,
- 8-15 ühendusjuhet,
- 1 kaabel ostsilloskoobi ühendamiseks arvutiga,
- 1 toodetud seadmete toitejuhe.

Mobiilsete laborite jaoks toodetud seadmed on projekteeritud nii, et need täidaksid väga kindlat eesmärki ning sellest tulenevalt on toodetud seadmed kasutajale lihtsamini mõistetavad ja kasutatavad kuid samas odavad [1]. Kuigi mobiilsete laborite komponendid on odavad, on ikkagi iga kaduma läinud komponent rahaline kaotus ülikooli jaoks. Lõputöö valmimise ajal oli turul elektroonika komponentide puudus ning elektroonika komponentide hind oli tõusnud [3] [4]. Mobiilsetes laborites oli kõige hinnalistemaks komponentideks signaaligeneraator koos ostsilloskoobiga, operatsioonivõimendi, analoog ja digitaalsed multimeetrid ning alalisvoolu toiteallikas.

Tulevikus võib mobiilsete laborite ülesehitus muutuda. Kuna õppekavad muutuvad, siis muutuvad ka õppeainete õpiväljundid ja sellest tulenevalt ka ülesanded, mida laborites läbi viiakse. Näiteks on nähtud ette, et tulevikus lisanduvad mobiilsete laborite komponentide hulka elektrimootorid. Samas on kohvid kulunud ning tulevikus vahetatakse need välja. [5]

1.2 Mobiilsete laborite laenutamine ja tagastamine

Mobiilseid laboreid laenutatakse ühe kaupa tudengitele välja. Enne mobiilse labori välja laenutamist veendub õppejõud, et kohvris on kõik komponendid olemas. Kui visuaalselt on kõik komponendid olemas, siis annab õppejõud mobiilse labori tudengile üle. Kui visuaalse kontrolli ajal selgub, et mõni komponent on kohvrist puudu või katki, siis asendab õppejõud antud komponendi.

Sarnaselt mobiilse labori välja laenutamisele toimub ka mobiilse labori tagastamine. Tudeng tagastab mobiilse labori õppejõu kätte, kes veendub, et kohvris on kõik komponendid olemas. Kui mõni komponent on puudu, siis asendab õppejõud puuduva komponendi ning annab tudengile teada, et tudeng puuduva komponendi tagastaks.

Juhul, kui õppejõul ei ole piisavalt ressursi põhjalikuks kontrolliks, võib mõni puuduv komponent märkamata jääda. Halvimal juhul laenutatakse mobiilne labor välja järgnevale tudengile puuduva komponendiga. Kui laenutamisel või tagastamisel jääb puuduv komponent märkamata, siis ei saa mobiilse labori laenutanud tudeng laenutamise ajal kõiki ülesandeid sooritada. Samas kui komponendi puudumine ei tuvastata koheselt on keerulisem teada saada, millal komponent ära kadus, kes komponendi kaotas ning komponendi tagasi saamine on keerulisem.

1.3 Lähteülesanne

Lõputöö raames valmib prototüüp, mis tuvastab automaatselt, kui mobiilsest laborist on mõni komponent puudu. Prototüübi eesmärk on parandada õppekvaliteeti, sh:

- vähendada võimalust, et mobiilse labori laenutanud tudengil jääb kadunud komponendi pärast mõni ülesanne tegemata,
- vähendada õppejõul mobiilsete laborite komponentide kontrollimiseks kuluvat aega,
- kiirendada mobiilsete laborite laenutamise ja tagastamise protsessi,
- vähendada mobiilsetest laboritest kadunud komponentidest tulenevat rahalist kadu ülikoolile,
- suurendada võimalust, et mobiilsest laborist kadunud komponent leitakse taas üles.

Prototüübi projekteerimise juures eeldati, et mobiilse labori laenutanud tudeng ei soovi/plaani mobiilsest laborist ühtegi komponenti ära kaotada/hävitada/varastada. Eeldati ka, et tudeng ei kaota korruga ära rohkem kui ühe komponendi. Samas eeldati, et kui mobiilsetele laboritele tulevikus tehakse uuendusi, siis kasutatakse samasid kohvreid ning kohvrite mõõtmed ei muutu.

Järgmiseks on välja toodud kokkuvõtvalt kõik nõuded, millega antud lõputöös arvestatakse. Nõuete koostamisel lähtuti Tallinna Tehnikaülikooli vanemlektor Martin Jaanusega läbi viidud intervjuust [5]. Lõputöö raames valmiv prototüüp:

- Peab väljendama selgesti komponendi puudumist,
- Peab olema lihtsasti mõistetav ja kasutatav,
- Ei tohi komponentide tuvastamiseks nõuda palju lisaega,
- Peab soodustama mobiilsetes laborites komponentide välja vahetamist, kui mõni komponent on katki või puudu,
- Peab kindlalt tuvastama signaaligeneraatori ja ostsilloskoobi, operatsioonivõimendi, analoog ja digitaalse multimeeteri ning alalisvoolu toiteallika puudumise,
- Peab soodustama mobiilsete laborite uuendamist tulevikus,
- Peab olema odav.

2 PUUDUVATE KOMPONENTIDE TUVASTAMISEKS SOBILIKU TEHNIKA VALIK

Mobiilsetest laboritest puuduvate komponentide tuvastamiseks võeti eeskujuks ettevõtetes kasutatavad tehnikad. Sobiva tehnika leidmiseks uuriti tööriistakomplektides puuduvate tööriistade tuvastamiseks kasutatavaid tehnikaid, kuna mobiilsed laborid sarnanevad tööriistakomplektile. Võib võrrelda, et tööriistakomplekt on mobiilsetes laborites kasutatav kohver ning komplektis olevad tööriistad on mobiilses laboris paiknevad komponendid.

Tööriistade loendamine on äärmiselt oluline lennunduses, kus parandus- või hooldustöödel lennukisse jäänud tööriist võib tekitada lennukile tõsiseid kahjustusi [6] [7]. Sellest tulenevalt uuriti lõputöö raames just lennunduses kasutatavaid tehnikaid puuduvate tööriistade tuvastamiseks tööriistakomplektist.

2.1 Tööriistade varjutamine

Kõige levinum meetod puuduvate tööriistade tuvastamiseks tööriistakomplektist on tööriistade varjutamine (ingl. k. *Tool Shadowing*). Tööriistade varjutamist kasutatakse peamiselt tööriistakärudes, kus tööriistad on paigutatud sahtlitesse. Antud juhul paigutatakse sahtlite põhja vahtplaat, kust lõigatakse välja komplekti kuuluvate tööriistade kujutised (varjud) (vt Joonis 2.1). Tööriistade varjude sisse paigutatakse tööriistad. Tööriistade varjutamist kasutatakse ka väljaspool lennundust, kuna see on odav, efektiivne ning ei vaja toimimiseks elektroonikat [8].

Tööriista varjutamisega määratakse igale tööriistale kindel koht tööriistakomplektis ning välistatakse tööriista valesti paigutamine tööriistakomplekti. Sellest tulenevalt jääb alles kaks võimalust, kas tööriist asub tööriistakomplektis või mitte.

Tööriistade varjud tehakse tavaliselt teist värvi, kui vahtplaat, kust varjud välja lõigatud on. Näiteks vahtplaat on musta värvi ning tööriista vari on punast värvi. Kui tööriist on omal kohal, siis katab tööriist oma varju ning punast värvi ei ole tööriistakomplektis näha. Kui tööriist eemaldada tööriistakomplektist oma kohalt, jääb kasutajale nähtavale punane vari. See indikeerib, et tööriist on puudu.

Kuigi peamiselt kasutatakse tööriistade varjutamist tööriistakappide puhul, leidub ka tööriistakohvreid, kus on kasutatud tööriistade varjutamist. Antud juhul paigutatakse kohvrise mitu vahtplaadi kihti üksteise peale, et tööriistad kohvrise ära mahutada (vt Joonis 2.1).



Joonis 2.1 Lahti pakitud tööriistakohver, kus on kasutatud tööriistade varjutamist, koos vahtplaatide kihtidega [9]

Kuigi antud tehnika on odav, ei vaja puuduvate komponentide tuvastamiseks palju aega, väljendab selgesti komponentide puudumist ning on lihtsasti kasutatav, ei soodusta see mobiilsete laborite uuendamist. Näiteks kui oleks soov lisada mobiilse labori komplekti elektrimootor, siis ei saa seda paigutada endise vahtplaadi sisse ning see nõuaks uut vahtplaati. Komponentide varjutamine on liiga permanentne lahendus puuduvate komponentide tuvastamiseks mobiilsetes laborites.

2.2 Automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakärud

Mitmed ettevõtted nagu näiteks HenschmanTRAK [10], Snap-on Industrial [11] ja Habco Industries [12] on välja töötanud automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakärud. Automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakäru erineb välimuselt tavalisest tööriistakärust selle poolest, et selle küljes on interaktiivne ekraan (vt Joonis 2.2).



Joonis 2.2 HenschmanTRAK KABTRAK automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakäru [10]

Automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakäru kasutamiseks peab igal töölisel olema oma ID-kaart või -kiip, mis tuleb esitada automatiseeritud tööriistakärule. Kui tööriistakäru tuvastab, et töölisel on õigus tööriistadele ligi pääseda, siis avanevad sahtlid. Tööline eemaldab tööriistakärust vajalikud tööriistad, sulgeb sahtlid, märgib ära kus tööobjekti sektoris tööriistu kasutatakse ning lõpetab sessiooni [13]. Tööriistakäru tuvastab millised tööriistad eemaldati ning millised tööriistad on alles masinnägemise või tööriistade külge kinnitatud RFID (ingl. k. *Radio-Frequency Identification*)-kiipide abil [11]. Tööriistakärudes kasutatakse tööriistade varjutamist, mis eeldatavasti aitab kaasa korrektsele tööriistade tuvastamisele.

Tööriistakärud salvestavad, mis tööriistad on tööriistakapist eemaldatud, isiku, kes tööriistad eemaldas, kus tööriistu kasutati ning kuupäeva ja kellaaja, millal tööriistad eemaldati [14]. Samad andmed salvestatakse ka tööriistade tagastamisel. Antud andmete põhjal on võimalik kindlaks teha kuhu mõni tööriist jäi ja kes tööriista ära kaotas.

Mobiilsete laborite puhul oleks võimalik komponentide külge panna RFID-kiibid ning kohvrise RFID-lugeja ja kontrolleri, mis koostöös kontrollivad, et kõikide RFID-kiipide signaalid, sellest tulenevalt ka kõik komponendid, on kohvris olemas. Selline lahendus annaks kindla ja pideva ülevaate komponentidest kohvris. Antud lahendus võimaldaks ka mobiilsetes laborites uuenduste tegemist, kuna uue komponendi lisandumisel või komponendi välja vahetamisel oleks vaja vaid uuele komponendile kinnitada RFID-kiip ning RFID-kiibi kood lisada mobiilse labori komponentide nimekirja kontrolleri. Teiselt poolt peaks antud tehnika jaoks igasse kohvrise paigutama vähemalt ühe RFID-lugeja, kontrolleri RFID-lugeja juhtimiseks ning akud kontrolleri toiteks. Selline lahendus läheks võrdlemisi kalliks. Samas ei soodustaks antud tehnika ka kohvrite välja vahetamist.

Teine võimalus oleks luua eraldi kontrollimisjaam, mis koosneks kaamerast, kontrolleri ja ekraanist. Mobiilse labori laenutamisel ja tagastamisel paigutatakse kontrollimisjaama kaamera ette avatud mobiilne labor nii, et kõik komponendid oleksid kaamerale nähtavad ning kasutades masinnägemist kontrollitakse kas kõik komponendid on mobiilsetes laborites olemas. Kontrolli tulemused kuvatakse ekraanil. Selline lahendus oleks odav selle poolest, et kõikide mobiilsete laborite jaoks saaks kasutada ühte kontrollijaama ning komponentidele ei pea RFID-kiipe lisama. Samas võimaldaks selline lahendus mobiilsetes laborites muudatuste tegemist. Kui mobiilsetesse laboritesse lisatakse uus komponent või vahetatakse mõni komponent välja, siis on vaja lisada vaid vajalikud parameetrid mobiilse labori komponentide nimekirja kontrolleri. Antud lahenduse puhul võib probleemiks kujuneda masinnägemine. Kuna komponendid paiknevad mobiilsetes laborites segamini ning üksteise peal, siis ei ole kõiki komponente võimalik ühe pildi peal näha (vt Joonis 1.2). Sellisel juhul oleks vaja mobiilsetes laborites ikkagi kasutada komponentide varjutamist, et komponendid oleksid paigutatud mobiilsetesse laborisse kindlal viisil ning kaamerale nähtavad. Komponentide varjutamine aga jällegi ei võimalda mobiilsetes laborites uuenduste tegemist.

2.3 Mobiilsete tööriistakohvrite kontrolljaamad

Sarnaselt automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakärudele, on HenschmanTRAK välja töötanud PORTATRAK [15] kontrolljaamade süsteemi mobiilsetele tööriistakohvritele (vt Joonis 2.3). PORTATRAK on mõeldud tööriistakohvritele, mille tööline ise tööobjektile toob. Süsteemis kasutatakse spetsiaalseid tööriistakohvreid, mille külge on kinnitatud RFID-kiip ning kontrolljaamasid, mis kasutavad tööriistakohvritest puuduvate tööriistade tuvastamiseks kaalu.

Sarnaselt automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakärudele, peab tööline kontrolljaama kasutamiseks esitama enda ID-kaardi või -kiibi. Seejärel paigutab tööline oma tööriistakohvri kontrolljaama kaalule ning kontrolljaam tuvastab tööriistakohvri RFID-kiibi järgi. Kontrolljaam kaalub tööriistakohvri massi ning võrdleb seda varasemalt salvestatud massiga. Kui kõik tööriistad on tööriistakohvril olemas, siis on kaalutud mass võrdne salvestatud massiga. Kui mõni tööriist on puudu, siis ei ole kaalutud mass võrdne salvestatud massiga. [15]



Joonis 2.3 HenschmanTRAK PORTATRAK kontrolljaam [15]

Mobiilsete laborite puhul on võimalik teha sarnane kontrolljaam, mis koosneks kaalust, RFID-lugejast, kontrollierist ja ekraanist ning iga kohvri külge oleks kinnitatud RFID-kiip. Mobiilse labori laenutamisel ja tagastamisel paigutatakse mobiilne labor kontrolljaama kaalule. Kaal tuvastab RFID-lugeja abil kohvri. Kohver kaalutakse ning kontrollier võrdleb kaalutud massi varasemalt salvestatud massiga. Kui kaalutud mass on võrdne salvestatud massiga, siis järeldatakse, et kõik komponendid on kohvris olemas ning ekraanil kuvatakse vastav teade. Kui kaalutud mass ei ole võrdne salvestatud massiga, siis kuvatakse ekraanil teade, mis komponent puudu võiks olla.

Antud lahendus oleks odav, kuna kõiki mobiilseid laboreid saaks kontrollida ühe kontrolljaama abil ning ainuke muudatus mobiilsete laborite juures oleks lisatud RFID-kiip. Lahenduse suureks eeliseks on see, et selle juures ei ole vaja arvestada erinevate komponentide mõõtmisega. Lahendus võimaldaks ka muudatuste tegemist mobiilsetes laborites, kuna uue komponendi lisamisel või komponendi välja vahetamisel on vaja vaid salvestada mobiilse labori uus mass. Antud lahendus oleks lihtsasti kasutatav, kontrollimine ei vajaks palju lisaega ning lahendus väljendaks arusaadaval moel komponentide puudumist.

Tehnikate võrdlemiseks koostati tabel (vt Tabel 2.1). Komponentide varjutamine ning masinnägemine ei ole sobilikud komponentide välja vahetamiseks ega mobiilsesse laborisse uute komponentide lisamiseks. Samas mobiilsete laborite komponentide külge RFID-kiipide lisamine ning RFID-kiipide olemasolu kontrollimine läheks võrdlemisi kalliks. Mobiilsete laborite komponentide kontrollimine mobiilse labori massi järgi vastab kõigile nõutele ning sellest tulenevalt otsustati antud tehnikat lõputöös kasutada.

Tabel 2.1 Mobiilsetest laboritest puuduvate komponentide tuvastamiseks võimalike tehnikate eelised ja puudused ning sobiliku tehnika valik

	Komponentide varjutamine	Kontroll RFID abil	Masinnägemine	Kontroll massi abil
väljendab selgesti komponendi puudumist	+	+	+	+
lihtsasti mõistetav ja kasutatav	+	+	-	+
kiire tulemus	+	+	+	+
soodustab komponentide välja vahetamist	-	+	-	+
soodustab mobiilse labori uuendamist	-	-	-	+
odav	+	-	+	+

3 PUUDUVATE KOMPONENTIDE TUVASTAMINE

Lõputöö käigus valmiva prototüübi kasutamiseks oli vaja esmalt salvestada mobiilse labori mass. Selleks veenduti, et mobiilises laboris on kõik komponendid olemas, mobiilne labor kaaluti prototüübil ning mobiilse labori mass salvestati prototüübi mällu. Hiljem oli võimalik kontrollida komponentide olemasolu mobiilse labori kaalumisega samal prototüübil. Prototüüp lahutas mobiilse labori kontrollitava massi $m_{kontroll}$ väärtuse varasemalt salvestatud massi $m_{salvestatud}$ väärtusest, et saada massi vahe m_{vahe} (3.1).

$$m_{vahe} = m_{salvestatud} - m_{kontroll} , \quad (3.1)$$

Saadud massi vahe võrreldi mobiilsete laborite komponentide massidega. Komponentid jaotati funktsiooni alusel kategooriatesse. Igale mobiilse labori komponendi kategooriale määrati massi vahemik. Komponenti kategooria massi vahemik võttis arvesse komponendi massi varieeruvusvahemiku ja kontrollprotsessi mõõtemääramatuse. Komponentide massi vahemike leidmiseks viidi läbi mõõtmised, mille käigus kaaluti mobiilsete laborite komponente. Komponenti kategooria i massi varieeruvusvahemik määrati kategooriasse kuuluva kergeima ($m_{min,i}$) ja raskeima ($m_{max,i}$) komponendi massi järgi. Komponenti kategooria i massi varieeruvusvahemik oli (3.2):

$$m_{min,i} \text{ kuni } m_{max,i} , \quad (3.2)$$

Selleks, et mobiilsete laborite kontrollimise juures oleks arvestatud mõõtemääramatusega, lahutati kergeima komponendi massist kontrollprotsessi mõõtemääramatus ning raskeima komponendi massile liideti kontrollprotsessi mõõtemääramatus U . Kontrollprotsessi mõõtemääramatuse kattetegur oli $k=2$. Sellisel juhul oli komponendi kategooria massi vahemik (3.3):

$$m_{min,i} - U \text{ kuni } m_{max,i} + U , \quad (3.3)$$

Kontrollprotsessi mõõtemääramatus võttis arvesse komponentide kaalumise liitmääramatuse U_{KOMP} ning mobiilsete laborite kaalumise liitmääramatuse U_{MOB} . Komponentide kaalumise liitmääramatuse ja mobiilsete laborite kaalumise liitmääramatuse leidmiseks pidi kalibreerima kaalu, millega kaaluti mobiilsete laborite komponente ning koormuselemendi, mida kasutati prototüübis. Liitmääramatused liideti kokku kasutades valemit (3.4) [16]:

$$u = \sqrt{\sum_{m=1}^n u_m^2} \quad (3.4)$$

kus u – sisendsuuruste määramatuste liitmääramatus,

n – sisendsuuruste arv,

u_m – sisendsuuruse m standardmääramatus, $k=1$,

m – järjekorraindeks.

Sellisel juhul oli lõputöös otsitav mõõtemääramatus (3.5):

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{KOMP}^2 + u_{MOB}^2} \quad (3.5)$$

Kokkuvõtvalt pidi lõputöö käigus läbi tegema viis mõõtmisseeriat:

- mobiilsete laborite komponentide kaalumiseks kasutatava kaalu kalibreerimine,
- mobiilsete laborite komponentide kaalumine,
- Prototüübis kasutatava koormuselemendi kalibreerimine,
- salvestatava mobiilse labori kaalumine,
- kontrollitava mobiilse labori kaalumine.

4 MOBIILSETE LABORITE KOMPONENTIDE MASSID

Komponentide kaalumise käigus saadi iga komponendi kategooria kõige raskema ja kergema komponendi massi hinnang. Antud kergeima ja raskeima komponendi massi hinnangule tuli leida näidu parand ja mõõtemääramatus. Komponenti x kaalumise mõõtemudel oli (4.1):

$$m_x = L_{m,x} + K_{m,x} + \delta K_{VJ} + \delta K_{LIN} + \delta K_{REP} \quad (4.1)$$

kus m_x – komponendi x kaalumise mõõtetulemus,

$L_{m,x}$ – komponendi x näit,

$K_{m,x}$ – komponendi x näidu parand,

δK_{VJ} – kaalu vähimast jaotisest tulenev parand,

δK_{LIN} – lineaarsuse parand,

δK_{REP} – korratavuse parand.

Mõõtemudeli põhjal koostati büdžett. Büdžetis olid määramatused viidud standardmääramatuse kujule, ehk tasemele $k=1$. Komponenti x kaalumise büdžett oli järgmine (vt Tabel 4.1):

Tabel 4.1 Komponenti x kaalumise büdžett

Suurus	Hinnang, g	St.määramatus,g	Tundlikkuse tegur	Panus, g
$L_{m,x}$		$U_{REP,KAAL}$	1	$U_{REP,KAAL}$
$K_{m,x}$		$U_{K,KAAL}$	1	$U_{K,KAAL}$
δK_{VJ}	0	$U_{VJ,KAAL}$	1	$U_{VJ,KAAL}$
δK_{LIN}	0	$U_{LIN,KAAL,A}$	1	$U_{LIN,KAAL,A}$
δK_{REP}	0	$U_{REP,KAAL,A}$	1	$U_{REP,KAAL,A}$

$L_{m,x}$ hinnang oli võrdne kaalu näiduga. Komponenti näidu määramatus oli võrdne korratavusest tuleneva määramatusega $U_{REP,KAAL}$, mis saadi kaalu kalibreerimise käigus (vt Lisa 2). Tundlikkuse tegur oli suuruse osatuletis ja selle väärtus oli üks ning panus oli võrdne korratavusest tuleneva määramatusega.

$K_{m,x}$ hinnang ning näidu parandi määramatus $U_{K,KAAL}$ saadi kaalu kalibreerimise käigus (vt Lisa 2). Tundlikkuse teguriks oli üks ning panus oli võrdne kaalu näidu parandi määramatusega.

δK_{VJ} hinnang oli null. Vähimast jaotisest tulenev määramatus $U_{VJ,KAAL}$ saadi kaalu kalibreerimise käigus (vt Lisa 2). Kaalu vähimast jaotisest tuleneva parandi tundlikkuse

tegur oli üks ning panus oli võrdne kaalu vähimast jaotisest tuleneva parandi määramatusega.

δK_{LIN} hinnang oli null. Lineaarsuse parandi määramatus oli võrdne kaalu andmelehes antud lineaarsusest tuleneva määramatusega $u_{LIN,KAAL,A}$ ning oli viidud standardmääramatuse kujule, $k=1$. Tundlikkuse tegur oli üks ning panus oli võrdne lineaarsuse parandi määramatusega.

δK_{REP} hinnang oli null. Korratavuse parandi määramatus oli võrdne kaalu andmelehes antud korratavusest tuleneva määramatusega $u_{REP,KAAL,A}$ ning oli viidud standardmääramatuse kujule, $k=1$. Tundlikkuse tegur oli üks ning panus oli võrdne korratavuse parandi määramatusega.

Komponendi massi hinnang arvutati valemiga (4.2):

$$m_x = L_{m,x} + K_{m,x} \cdot \quad (4.2)$$

Komponendi massi liitmääramatuse hinnang arvutati valemiga (4.3):

$$u_{KOMP} = \sqrt{u_{REP,KAAL}^2 + u_{K,KAAL}^2 + u_{VJ,KAAL}^2 + u_{LIN,KAAL,A}^2 + u_{REP,KAAL,A}^2} \cdot \quad (4.3)$$

Selleks, et büdžeti saaks koostada, oli vaja läbi viia kaalu kalibreerimine (vt Lisa 2). Kalibreerimise käigus saadi kaalu näidu parandid ning näidu parandi määramatus. Kaalu näidu parandi määramatus koosnes määramatustest, mis tulenesid:

- kaalu vähimast jaotisest, $u_{VJ,KAAL}$,
- korratavusest, $u_{REP,KAAL}$,
- ekstsentrilisest koormamisest, $u_{EKS,KAAL}$,
- etalonmasside massi määramatusest, $u_{ETA,KAAL}$.

Näidu parandi määrmaatus arvutati valemiga (4.4):

$$u_{KAAL} = \sqrt{u_{VJ,KAAL}^2 + u_{REP,KAAL}^2 + u_{EKS,KAAL}^2 + u_{ETA,KAAL}^2} \cdot \quad (4.4)$$

Kaalu näidu parandite ning vähimast jaotisest, korratavusest, ekstsentrilisest koormamisest ja etalonmasside massist tulenevate määramatuste arvutamine on toodud lisades (vt Lisa 2). $u_{K,KAAL}$ väärtuseks arvutati 0,014 g.

Kui kaalu kalibreerimine oli läbitud, siis oli võimalik arvutada komponendi kaalumise liitmääramatus. Komponentide kaalumise liitmääramatuse arvutus on toodud lisades (vt Lisa 2). U_{KOMP} väärtuseks arvutati 0,024 g.

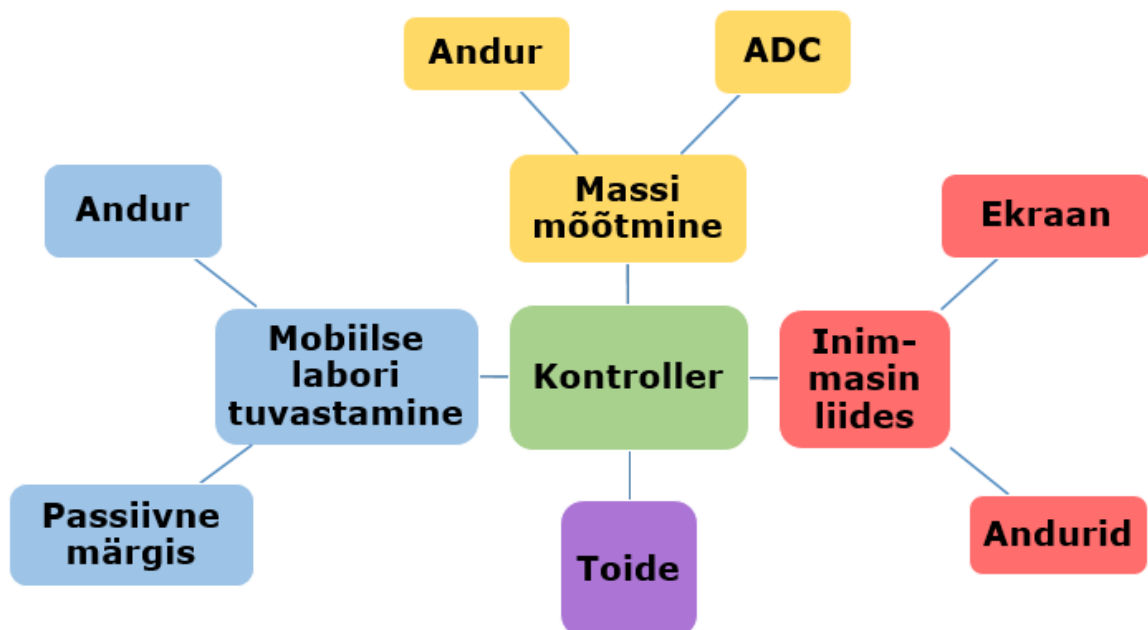
Tudengitele oli laenutamiseks 39 mobiilset laborit. Lõputöö käigus valiti välja 22 suvalist mobiilset labori, mille sees paiknevad komponendid kaaluti. Komponentide kategooriad jagunesid alakategooriateks, kuna kasutusel oli erinevaid komponentide mudeleid. Näiteks oli kasutusel erinevad digitaalsete multimeetrite mudelid. Komponentide kategooriate ja alakategooriate kergeimate ja raskeimate komponentide masside hinnangud, on toodud allpool tabelis (vt Tabel 4.2):

Tabel 4.2 Komponentide kategooriate kergeimate ja raskeimate komponentide masside hinnangud

Komponendi kategooria	Alakategooria	m_{min} , g	m_{max} , g
Takisti		5,97	15,42
Kondensaator		6,05	6,73
Induktiivpool		9,17	12,24
Ühendusjuhe		9,20	22,25
Ostsilloskoobi kaabel	must	57,37	72,59
	hõbedane	29,60	30,61
	Hall, jäme	81,47	82,32
	Hall, peen	42,42	55,36
Toodetud seadmete toitejuhe	must, väike	194,72	196,27
	Must, suur	335,16	339,02
	valge	320,65	325,89
Potentsiomeeter		45,59	46,83
Analoog multimeeter	AVM360 ümbriseta	244,73	278,55
	AVM360 ümbrisega	391,62	447,88
Digitaalne multimeeter	UT33D	176,22	206,27
	LX-830B	122,89	127,66
Alalisvoolu toiteallikas		159,08	167,38
Transistor		124,97	129,39
Takistuslik kaksclomm		94,46	99,34
Autonoomne kaksclomm		120,08	146,46
Operatsioonivõimendi		131,71	152,26
Signaaligeneraator koos ostsilloskoobiga		146,15	160,54

5 ELEKTROONIKA

Lõputöö käigus valmiv prototüüp pidi täitma nelja funktsiooni: tuvastama mobiilse labori, kaaluma mobiilse labori massi, tuvastama puuduva komponendi ning suhtlema kasutajaga (vt Joonis 5.1). Selleks, et täita antud funktsioone vajab prototüüp lisaks ka toidet. Kogu seadme tööd juhtis kontrolleri. Mobiilse labori tuvastamise funktsioon pidi ära tundma millise mobiilse laboriga on tegu, et prototüüp teaks, millise salvestatud massiga kontrollitavat massi võrrelda. See pidi koosnema passiivsest märgisest, mis oli mobiilse labori küljes ning andurist, mis tuvastas passiivse märgise. Andur pidi tuvastatud mobiilse labori info saatma kontrollerrisse. Mobiilse labori kaalumise funktsioon pidi kaaluma võimalikult täpselt mobiilse labori massi ning saatma tulemuse kontrollerrisse. See koosnes andurist ning analoog-digitaalmuundurist (ADM). Kontrolleri viis läbi vajalikud arvutused ning funktsioonid andurite ja täiturseadmete tööks. Prototüüp pidi tulemused esitama kasutajale ning koguma infot, mida kasutaja teha soovib. Selleks kasutati inim-masin liidest, mis koosnes ekraanist, info edastamiseks kasutajale ning anduritest, et anda prototübile teada, mida kasutaja teha soovib.



Joonis 5.1 Elektroonika komponentide plokk skeem

5.1 Elektroonika komponentide valik

Elektroonika komponentide valiku juures oli oluline, et komponendid oleksid odavad, täidaksid oma funktsiooni korrektselt, oleks lihtsasti kasutatavad ning lihtsasti kättesaadavad. Samas oli otsuse juures oluline elektroonika komponendi populaarsus, kuna see näitas, et elektroonika komponenti oli lihtne kasutada ning selle soetamiseks oli rohkem võimalusi. Samas tähendas suurem kasutajaskond, et antud elektroonika komponendi kohta oli rohkem informatsiooni ning tekkivatele probleemidele oli võimalik kiiremini leida lahendus.

5.1.1 Massi mõõtmine

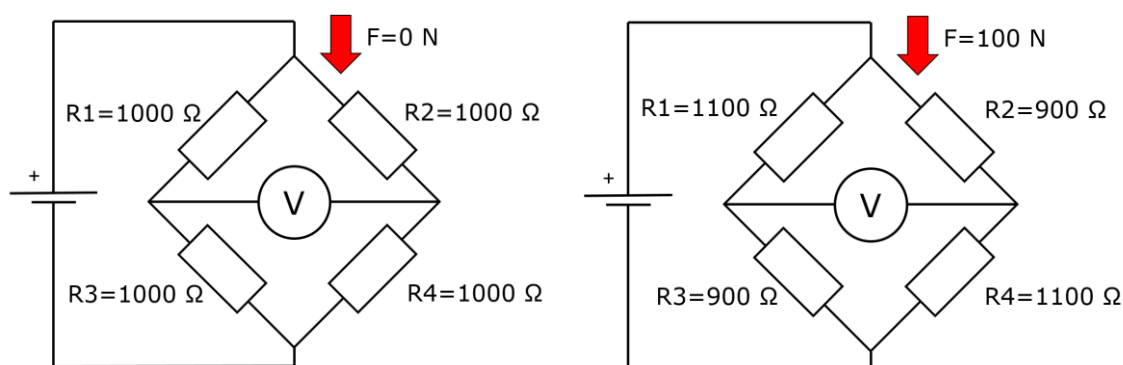
Koormuselement (ingl. k. *Load Cell*) on seade, mis muudab koormuselemendile esineva jõu signaaliks, mida elektroonikaseadmed suudavad lugeda. On olemas erinevaid koormuselemente nagu näiteks pingutusmõõtuuri (ingl. k. *Strain Gauge*) põhine, hüdrauliline, pneumaatiline, piesoelektriline ja mahutavuslik. Antud koormuselementidest on kõige populaarsemad pingutusmõõtuuri põhised koormuselemendid. [17]

Mobiilsete laborite massi mõõtmisel oli tegu ristsuunali koormamisega, kus mobiilse labori massist tulenev jõud oli suunatud risti pinnaga, kus peal prototüüp asus. Selleks oli turul laialdaselt müügil pingutusmõõtuuri põhiseid koormuselemente ühe- ja nelja-punktiliseks kaalumiseks. Nelja-punktilist kaalumist kasutatakse igapäevaelus kõige rohkem, nt vannitoa- ja köögikaaludes. Nelja-punktilise kaalumise puhul paikneb igas kaaluplatvormi nurgas üks koormuselement. Sellisel juhul jaotub kaalule esinev koormus nelja koormuselemendi vahel. Ühe-punktilise kaalumise puhul paikneb koormuselement tavaliselt kaaluplatvormi keskel. Antud juhul langeb kogu kaaluplatvormile esinev koormus ühele koormuselemendile.

Ühe-punktiline kaalumine võimaldab keskmevälist koormamist [18]. See tähendab, kui ühe-punkti kaaluplatvormil on koormus ebaühtlaselt jaotatud, siis võimaldab kaal säilitada oma täpsuse [18]. Samas on ühe-punktilisel kaalumisel oluline koormuselemendile määratud kaaluplatvormi suurus. Kui kaaluplatvormi koormatakse tsentrist liiga kaugelt, siis võib see kahjustada koormuselementi.

Pingutusmõõtuuri põhised koormuselemendid muudavad neile esineva jõu elektrisignaaliks kasutades pingutusmõõtuurit. Pingutusmõõtur on andur, mille takistus

muutub, kui seda tõmmata või suruda. Koormuselementide puhul on pingutusmõõturitest moodustatud Wheatstone'i sild, kus iga takisti asemel on pingutusmõõtur. Pingestades silla kaks vastastikust nurka, tekib kaks pingejagurit. Pingejagurite väljundite potentsiaalide vahe on võimalik mõõta ülejäänud kahest vastastikusest silla nurgast. Pingutusmõõturid on paigutatud silda nii, et silla vastas külgedel asuvad pingutusmõõturid kogevad koormuselemendi koormamisel samasuunalist jõudu kas tõmmet või surumist. Sellest tulenevalt muutuvad koormuselemendi koormamisel vastas külgedel asuvate pingutusmõõturite takistused sarnaselt kas suuremaks või väiksemaks ning pingejagurite väljundite vaheline potentsiaalide vahe suureneb. Pingejagurite väljundite pingepotentsiaalide vahe järgi on võimalik öelda, kui suur koormus on koormuselemendil (vt Joonis 5.2). [17]



Joonis 5.2 Näide pingutusmõõturitest moodustatud Wheatstone'i sild koormamata olekus (vasak) ning koormatud olekus (parem)

Kuna koormuselementidelt mõõdetav pinge on väike, mikro- või millivoltides, siis on pinge mõõtmiseks vaja võimendit ja ADM-i. Koormuselementidelt saadava pinge väärtuse mõõtmiseks oli laialdaselt kasutusel spetsiaalne moodul, kus oli koos võimendi ning 24-bitine ADM, mis kasutab HX711 mikroskeemi [19]. See suudab lugeda koormuselementidelt pinget kuni 40 mV ning edastab mõõdise kasutades jadaliidest. 24-bitine resolutsioon tähendab, et mõõtmispiirkond koosneb umbes 16,8 miljonist mõõtmisammust. See tähendab, et kui mõõtmispiirkonda kasutada näiteks 10 kg mõõtmiseks, siis suudaks ideaalsel juhul ADM eristada 0,6 μg erinevust. Antud eristusvõime oli prototüübi jaoks piisav. Kõige odavamalt leiti ADM hinnaga 3,49 € [20].

Katsetamiseks taheti tellida ühe- ja nelja-punkti mõõtmiseks mõeldud pingutusmõõtuuri põhiseid koormuselemente. Koormuselemente valides oli teada, et mobiilse labori maksimaalne mass oli umbes 3,5 kg. Sellest tulenevalt otsiti koormuselemente, mille maksimaalne koormuse piirang jääks 3,5 kg lähedale. Koormuselemente valides jälgiti koormuselemendi korratavust, hüstereesi ja lineaarsust. Ühe-punkti koormuselementide puhul jälgiti ka lubatud kaaluplatvormi suurust. Lubatud

kaaluplatvormi mõõtmised pidid olema suuremad, kui mobiilse labori põhja mõõtmised, mis oli 340x130 mm.

Kuna lõputöös valmiv prototüüp paiknes ühes kindlas siseruumis, siis ei pidanud arvestama koormuselementide valiku juures temperatuuri teguritega. Samas ei hoita seadet koormatud asendid pikka aega ning enne igat mõõtmist läbitakse Tare funktsioon. Tare funktsiooni käigus elimineeritakse kaalu koormamata olekus igasugune nullist erinev näit. Sellest tulenevalt ei pidanud arvestama näidu triiviga (ingl. k. *Creep*).

Otsingu tulemusel leiti, et nelja-punkti mõõtmiseks mõeldud pingutusmõõtuuri põhiseid koormuselemente oli hea saadavusega ainult üks, mis olid mõeldud 50 kg mõõtmiseks [21] [22]. 50 kg oli liiga suur mõõtmispiirkond ning antud koormuselement ei suudaks väikseid massi muutuseid tuvastada. Antud koormuselementi sobimatus väljendub ka koormuselementi määramatustes (vt Tabel 5.1).

Aasia-välistest internetipoodidest leiti vaid üks sobilik ühe-punkti mõõtmiseks mõeldud koormuselement YZC-1B [23]. See oli mõeldud 350x350 mm kaaluplatvormi jaoks ning 5 kg mõõtmiseks. YZC-1B koormuselementi andmeleht oli puudulik. Aasia internetipoodides leiti lisaks kaks sobilikku ühe-punkti mõõtmiseks mõeldud koormuselementi. Koormuselement CZL-601 [24] ning NA1 [25].

Suurem osa koormuselementide andmelehtedes oli välja toodu lineaarsusest $u_{LIN,ELE,A}$, hüstereesist $u_{HÜS,ELE,A}$ ja korratavusest $u_{REP,ELE,A}$ tulenev määramatus. Kehvemal juhul oli välja toodud ainult kombineeritud hälve $u_{KOMB,ELE,A}$. Koormuselementide võrdlemiseks arvutati iga koormuselementi liitmääramatus $u_{koormuselement}$ kasutades valemit (5.1):

$$u_{koormuselement} = \sqrt{u_{LIN,ELE,A}^2 + u_{HÜS,ELE,A}^2 + u_{REP,ELE,A}^2 + u_{KOMB,ELE,A}^2} \quad (5.1)$$

Kui andmelehes oli mõni antud määramatustest puudu, siis selle väärtus valemis võrdus nulliga. Koormuselementide andmed on toodud allpool tabelis (vt Tabel 5.1). Tabelis on kõik määramatused viidud standardmääramatuse kujule, ehk tasemele $k=1$.

Tabel 5.1 Koormuselementide andmed. Määramatused on viidud tasemele $k=1$

Koormuselement	Nelja-punkti	Ühe-punkti		
	OKY3481-1	YZC-1B	CZL-601	NA1
Möötepiirkond, g	50000	5000	5000	5000
Hind, €	6,24	25,15	15,37	19,94
Ergastuspinge, V	5	10-15	9-12	5-12
Väljundpinge, mV/V	1 ±0,1	2±0,15	2±0,1	2±0,2
Sisendtakistus, Ω	1000	402	405	410
$U_{LIN,ELE,A}$, g	7,22	-	0,29	0,29
$U_{HÜS,ELE,A}$, g	11,55	-	0,29	0,29
$U_{REP,ELE,A}$, g	14,43	-	0,29	0,29
$U_{KOMB,ELE,A}$, g	-	0,87	-	-
$U_{koormuselement}$, g	19,84	0,87	0,50	0,50

Valikust olid kõige sobilikumad koormuselemendid CZL-601 ja NA1. Nende andmeleht oli täiuslikum ning need olid odavad. Antud koormuselementidega viidi läbi kalibreerimine (vt Lisa 4). Kalibreerimise käigus oli vaja näha, kas koormuselement vastas tootja andmelehele. Samas oli vaja lisaks teada saada kuidas koormuselement käitub ekstsentrilise koormamise korral ning mis resolutsiooniga suudab koormuselement tulemusi anda. Allpool tabelis (vt Tabel 5.2) on toodud andmelehes märgitud määramatused, koos kalibreerimisel leitud määramatustega. Kõik määramatused on viidud standardmääramatuse tasemele ehk tasemele $k=1$.

Tabel 5.2 Välja valitud koormuselementide andmelehe väärtused koos kalibreerimise tulemustega. Määramatused on viidud tasemele $k=1$

	NA1	CZL-601
Andmelehe väärtused		
Korratavus, g	0,29	0,29
Lineaarsus, g	0,29	0,29
Hüsterees, g	0,29	0,29
Kalibreerimise tulemused		
Max parand, g	1,07	0,27
Korratavus, g	0,30	0,16
Ekstsentrilisus, g	0,46	0,58
Resolutsioon, g	0,29	0,29
Hüsterees, g	0,33	0,13
Lineaartsus, g	0,40	0,13

NA1 koormuselementide puhul oli maksimaalne näidu parand, korratavus, hüsteresis ja lineaarsus suurem, kui andmelehes märgitud. CZL-601 koormuselement oli parem, kuna kalibreerimise tulemused vastasid andmelehele. See tähendas, et mõõtetulemuse

määramatuse arvutamisel võis arvestada andmelehe väärtustega. Lõputöös otsustati kasutada CZL-601 koormuselemente.

Koormuselementide toitena kasutati 5 V toidet. Sellises olukorras tarbis ADM koos koormuselemendiga umbes 14 mA. ADM vajas ühendamiseks kahte digitaalset sisendit.

CZL-601 koormuselementide kalibreerimistulemuste põhjal koostati mobiilsete laborite kaalumise mõõtemudel (5.2):

$$m_{vahe} = L_{m,S} + \delta K_{RES,ELE} + \delta K_{LIN,ELE} + \delta K_{EKS,ELE} + \delta K_{REP,ELE} - (L_{m,K} + \delta K_{RES,ELE} + \delta K_{LIN,ELE} + \delta K_{EKS,ELE} + \delta K_{REP,ELE}), \quad (5.2)$$

kus $L_{m,S}$ – mobiilse labori salvestatud massi näit,

$L_{m,K}$ – mobiilse labori kontrollitava massi näit,

$\delta K_{RES,ELE}$ – koormuselemendi resolutsioonist tulenev parand,

$\delta K_{LIN,ELE}$ – koormuselemendi lineaarsuse parand,

$\delta K_{EKS,ELE}$ – koormuselemendi ekstsentrilisuse parand,

$\delta K_{REP,ELE}$ – koormuselemendi korratavuse parand.

Kuna kalibreerimisel saadud näidu parandid jäid alla andmelehes märgitud lineaarsuse määramatuse, siis ei olnud vaja näidu parandit arvestada. Samas ei olnud vaja arvestada ka mõõtemudelis hüstereesi, kuna mõõtmismeetodist tulenevalt, ei mõjutanud hüsterees mõõtetulemust. Mõõtemudeli põhjal koostati mobiilsete laborite kaalumise büdžett (vt Tabel 5.3). Büdžetis olid määramatused viidud standardmääramatuse kujule, ehk tasemele $k=1$.

Tabel 5.3 Mobiilsete laborite kaalumise büdžett

Suurus	Hinnang, g	St.määramatus, g	Tundlikkuse tegur	Panus, g
$L_{m,S}$		$u(L_{m,S})$	1	$u(L_{m,S})$
$\delta K_{RES,ELE}$	0	$U_{RES,ELE}$	1	$U_{RES,ELE}$
$\delta K_{LIN,ELE}$	0	$U_{LIN,ELE,A}$	1	$U_{LIN,ELE,A}$
$\delta K_{EKS,ELE}$	0	$U_{EKS,ELE}$	1	$U_{EKS,ELE}$
$\delta K_{REP,ELE}$	0	$U_{REP,ELE,A}$	1	$U_{REP,ELE,A}$
$L_{m,K}$		$u(L_{m,K})$	-1	$-u(L_{m,K})$
$\delta K_{RES,ELE}$	0	$U_{RES,ELE}$	-1	$-U_{RES,ELE}$
$\delta K_{LIN,ELE}$	0	$U_{LIN,ELE,A}$	-1	$-U_{LIN,ELE,A}$
$\delta K_{EKS,ELE}$	0	$U_{EKS,ELE}$	-1	$-U_{EKS,ELE}$
$\delta K_{REP,ELE}$	0	$U_{REP,ELE,A}$	-1	$-U_{REP,ELE,A}$

$L_{m,S}$ ja $L_{m,K}$ hinnang oli võrdne kaalumise ajal saavate mõõdiste aritmeetilise keskmisega. Massi näidu määramatus $u(L_{m,S})$ ja $u(L_{m,K})$ saadi mobiilsete laborite

kaalumise ajal. Massi näidu määramatuse arvutus on toodud lisades (vt Lisa 4). Tundlikkuse tegur oli suuruse osatuletis mõõtemudelist ning selle väärtus oli vastavalt üks ja miinus üks. Panus oli võrdne massi näidu määramatuse ja tundlikkuse teguri korrutisega.

$\delta K_{RES,ELE}$ hinnang oli null ning määramatusena kasutati kalibreerimisel saadud resolutsioonist tulenevat määramatust $U_{RES,ELE}$ (vt Lisa 4). Tundlikkuse tegur oli vastavalt üks või miinus üks. Panus oli võrdne resolutsiooni parandi määramatuse ja tundlikkuse teguri korrutisega.

$\delta K_{LIN,ELE}$ hinnang oli null ning määramatusena kasutati andmelehes antud lineaarsusest tulenevat määramatust $U_{LIN,ELE,A}$ tasemel $k=1$. Tundlikkuse tegur oli vastavalt üks või miinus üks. Panus oli võrdne lineaarsuse parandi määramatuse ja tundlikkuse teguri korrutisega.

$\delta K_{EKS,ELE}$ hinnang oli null ning määramatusena kasutati kalibreerimisel saadud ekstsentrilisest koormamisest tulenevat määramatust $U_{EKS,ELE}$ (vt Lisa 4). Tundlikkuse tegur oli vastavalt üks või miinus üks. Panus oli võrdne ekstsentrilisuse parandi määramatuse ja tundlikkuse teguri korrutisega.

$\delta K_{REP,ELE}$ hinnang on null ning määramatusena kasutati andmelehes antud korratavusest tulenevat määramatust $U_{REP,ELE,A}$ tasemel $k=1$. Tundlikkuse tegur oli vastavalt üks või miinus üks. Panus oli võrdne korratavuse parandi määramatuse ja tundlikkuse teguri korrutisega.

Mobiilse labori massi vahe hinnang arvutati valemiga (5.3):

$$m_{vahe} = L_{m,S} - L_{m,K} \cdot \quad (5.3)$$

Büdzeti põhjal oli võimalik leida mobiilsete labori kaalumise liitmääramatuse hinnang (5.4):

$$u_{MOB} = \sqrt{u(L_{m,S})^2 + u(L_{m,K})^2 + 2 \cdot u_{RES,ELE}^2 + 2 \cdot u_{LIN,ELE,A}^2 + 2 \cdot u_{EKS,ELE}^2 + 2 \cdot u_{REP,ELE,A}^2} \cdot \quad (5.4)$$

Resolutsioonist, lineaarsusest, ekstsentrilisest koormamisest ja korratavusest tulenev määramatus oli võimalik lühidalt kokku võtta koormuselemendile omase määramatusena U_{ELE} (5.5):

$$u_{ELE} = \sqrt{u_{RES,ELE}^2 + u_{LIN,ELE,A}^2 + u_{EKS,ELE}^2 + u_{REP,ELE,A}^2} \cdot \quad (5.5)$$

Sellisel juhul oli mobiilsete laborite kaalumise liitmääramatus leitav valemiga (5.6):

$$u_{MOB} = \sqrt{u(L_{m,S})^2 + u(L_{m,K})^2 + 2 \cdot u_{ELE}^2} \cdot \quad (5.6)$$

Koormuselemendi andmelehe ja kalibreerimistulemuste põhjal oli võimalik vastavalt valemile (5.5) arvutada u_{ELE} väärtus:

$$u_{ELE} = \sqrt{0,29^2 + 0,29^2 + 0,58^2 + 0,29^2} = 0,77 \text{ g} \cdot$$

Mobiilsete laborite näitude hinnangud ning näidu määramatused saadi mobiilsete laborite kaalumise ajal.

5.1.2 Mobiilse labori tuvastamine

Objektide automaatseks tuvastamiseks kasutatakse tavaliselt AIDC (ingl. k. *Automatic Identification and Data Capture*) tehnoloogiat. AIDC võimaldab objekti kohta käiva informatsiooni sisestada arvuti süsteemi ilma inimese vahetu sekkumiseta [26]. AIDC tehnoloogia hulka kuuluvad triipkood, RFID ja QR (ingl. k. *Quick Response*)-kood.

Triipkoodi lugemiseks kasutatakse spetsiaalset optilist triipkoodi lugejat. Triipkoodi on kirjutatud informatsioon, mis käib objekti kohta, mille külge triipkood kinnitatud on. Triipkoodi lugeja loeb triipkoodilt informatsiooni, tõlgib selle digitaalseks informatsiooniks ning saadab informatsiooni arvutisse. [26]

Sarnaselt triipkoodile, sisaldab QR-kood informatsiooni objekti kohta, mille külge see kinnitatud on. Samas võib QR-kood sisaldada URL-i, teksti või telefoni numbrit. QR-kood võib võrreldes triipkoodiga sisaldada rohkem informatsiooni. QR-koodi lugemiseks on vaja optilist QR-koodi lugejat, mis võimaldab arvutil lugeda QR-koodi kirjutatud informatsiooni. [27]

RFID on tehnoloogia, kus RFID-kiipide sisse kodeeritakse digitaalne informatsioon. RFID-kiibi sisse kodeeritud informatsiooni on võimalik lugeda RFID-lugejaga. RFID

tehnoloogia on sarnane triipkoodi tehnoloogiale, aga RFID puhul ei pea kiip olema nähtavas kohas ning kiip ei pea lugemiseks olema täpselt positsioneeritud. [28]

Mobiilsete laborite tuvastamiseks sobis kõige paremini RFID tehnoloogia, kuna see ei vaja nii täpset positsioneerimist, kiip ei pea olema nähtavas kohas ning RFID ei vaja optilisi lugejaid. Kasutusel on kõrge (850 MHz kuni 950 MHz ja 2.4 GHz kuni 2.5 GHz) ning madala (30 kHz kuni 500 kHz) sagedusega RFID süsteeme. Kõrgema sagedusega süsteemid võimaldavad kiipe lugeda kaugemalt ning kiiremini [29].

Laialdaselt oli levinud MFRC522 mikroskeemi põhine RFID-lugeja moodul RC522 [30], kuna see oli odav ning töökindel. Turul oli ka odavalt kättesaadav STMicroelectronics poolt toodetav M24SR64-Y mikroskeemi põhine RFID-lugeja moodul ANT7-T-M24SR64 [31], mis ei olnud nii laialdaselt kasutatud kui RC522. Mõlemad moodulid töötasid sagedusel 13,56 MHz (vt Tabel 5.4).

Tabel 5.4 RFID-lugeja moodulite võrdlus

Moodul	Hind, €	Suhtlusprotokoll	Populaarsus
RC522	5,73 [32]	SPI	Väga populaarne
ANT7-T-M24SR64	4,08 [33]	I ² C	Vähe populaarne

RC522 toetas SPI (ingl. k. *Serial Peripheral Interface*) suhtlusprotokolli ja ANT7-T-M24SR64 toetas I²C (ingl. k. *Inter-Integrated Circuit*) suhtlusprotokolli. RC522 moodulil oli populaarsuse tõttu suurem toetajaskond. Samas ei olnud moodulite hinna erinevus väga suur. Lõputöös otsustati kasutada RC522 RFID-lugeja moodulit. RC522 moodul tarbis maksimaalselt 26 mA, vajab ühendamiseks viite digitaalset sisendit ja 3,3 V toidet [34].

RFID-lugeja paigutati lõputöös valmiva prototüübi külge. RFID-lugeja pidi olema paigutatud prototüübi külge nii, et mobiilse labori küljes olev RFID-kiip satuks alati RFID-lugeja lugemispiirkonda.

Igal RFID-kiibil oli juba tehases tulles UID (ingl. k. *Unique Identifier*) ehk unikaalne identifitseerimise kood. Antud UID-d sai kasutada mobiilsete laborite tuvastamiseks. Turul oli müügil väga palju erinevaid RFID-kiipe, mis olid erinevates pakendites. Laialdaselt oli müügil RFID-kaardid, -võtmehoidjad, -mündid ja -kleepsud. Mobiilsete laborite tuvastamiseks sobisid kõige paremini RFID-kleepsud. Neid oli võimalik lihtsasti mobiilse labori külge kleepida ning need olid madala profiiliga. RFID-kleepsud leiti kõige odavamalt hinnaga 0,32 €/tk [35].

5.1.3 Inim-masin liides

Kasutajal sai valida prototüübi kahe tegevuse vahel, kas salvestada mobiilse labori mass või kontrollida mobiilse labori massi. Samas pidi prototüüp kasutajale teada andma, kas mõni komponent on puudu ning milline komponent puudu võiks olla.

Selleks et anda prototübile teada, millist tegevust kasutaja tahab läbi viia, kasutati kahte lüliti. Lüliti pidi olema momentaalne SPST (ingl. k. *Single Pole Single Throw*) OFF-(ON) lüliti. Üks lüliti terminaali oli vaja ühendada toitega ning teine kontrolleri digitaalse sisendiga.

Antud ülesandeks sobisid kaks eri värvi lüliti, mis maskid alla 0,85 €. Üks lüliti oli punane ning teine roheline [36] [37]. Nuppude kasutamiseks oli vaja kahte digitaalset sisendit ning kahte 5 V toite väljundit. Nuppude volutarve jäi alla 1 mA.

Selleks et prototüüp saaks kasutajale informatsiooni edasi anda, kasutati LCD (ingl. k. *Liquid-Crystal Display*)-ekraani. Ekraanil kuvatavad sõnumid olid võimalikult lühikesed. Suuremate sõnumite puhul on vaja suuremat ekraani ning suuremad ekraanid maksavad rohkem. Ekraanil kuvatavad sõnumid on toodud allpool tabelis (vt Tabel 5.5).

Tabel 5.5 Prototüübi kasutamisel esinevad olukorrad ning neile vastavad kirjad LCD-ekraanil

Olukord	Kiri LCD-ekraanil
Kasutajalt käskluse ootamine	vali tegevus
Funktsiooni läbimine	oota...
Mobiilne labor tuvastatud	tuvastatud
Kõik komponendid on mobiilses laboris olemas	kõik olemas
Mõni komponent on puudu	komponent puudu
Puudu on suur komponent	suur komponent
Puudu on väike komponent	väike komponent
Puudu on takisti	takisti
Puudu on kondensaator	kondensaator
Puudu on induktiivpool	induktiivpool
Puudu on ühendusjuhe	ühendusjuhe
Puudu on signaaligeneraator koos ostsilloskoobiga	ostsilloskoop
Puudu on autonoomne kaks клемм	twopole
Puudu on takistuslik kaks клемм	twoport
Puudu on alalisvoolu toiteallikas	DC toide
Puudu on transistor	transistor
Puudu on operatsioonivõimendi	OP-AMP
Puudu on potentsiomeeter	potentsiomeeter
Puudu on analoog multimeeter	A-multimeeter
Puudu on digitaalne multimeeter	D-multimeeter
Puudu on kaabel ostsilloskoobi ühendamiseks arvutiga	Kaabel
Puudu on toodetud seadmete toitejuhe	toitejuhe

Kõige pikem kiri, mis oli vaja LCD-ekraanil esitada oli „komponent puudu“ ja „potentsiomeeter“. Mõlemad kirjad olid koos tühikutega 15 tähemärki. See tähendas, et LCD-ekraan pidi võimaldama esitada minimaalselt 15 tähemärki ühel real. Samas pidi ekraan olema piisavalt suur, et kiri oleks selgesti loetav. Turul olid ühe- ja kaherealised LCD-ekraanid, mis suutsid ühel real kuvada 16 tähemärki. LCD-ekraanide võrdlus on toodud allpool tabelis (vt Tabel 5.6).

Tabel 5.6 LCD-ekraanide võrdlus

Toote nimi	RC1601A-YHY-JSX [38]	NPC1602LRS-JWB-K [39]	NPC1602LRS-FWA-H [40]
Hind, €	4,25	4,71	4,75
Tähemärkide paigutus, LxK	16x1	16x2	16x2
Tähemärkide suurus, LxK, mm	3,07x6,56	2,95x5,55	2,95x5,55
Suhtlusprotokoll	6800-jada paralleel liides		
Keskmine toitepinge, V	5		
Keskmine toitevool, mA	1,2	2	1,5
Heledus, cd/m ²	-	35	40
Vaatenurk, °	~30	~42	~42
Ühendusliinide arv	16	14	16

Kuna ühe- ja kaherealise ekraani hinna vahe oli väike, otsustati kasutada kaherealist ekraani, mis võimaldas prototüübil edastada kasutajale rohkem infot. Võrreldes kahte kaherealist ekraani, siis NPC1602LRS-FWA-H ekraanil oli 16 ühendusliini, mis oli laialdasemalt kasutatud, kui NPC1602LRS-JWB-K ekraan, millel oli 14 ühendusliini. Otsustati kasutada NPC1602LRS-FWA-H LCD-ekraani. Antud ekraani andmeleht oli täiuslikum ja andis tootest parema ülevaate. Võrreldes teiste ekraanidega oli NPC1602LRS-FWA-H ekraani vaatenurk hea, voolutarve oli keskmine ning heledus kõige suurem. Ekraan vajab kuut digitaalset sisendit ning 5 V toidet. Ekraani tagatule voolutarve piirati 220 Ω takistiga (vt Joonis 5.3), sellest tulenevalt tarbis ekraan maksimaalselt 26 mA.

5.1.4 Kontroller

Kontroller viis prototüübis läbi vajalikke arvutusi, kogus infot anduritelt ning juhtis täiturseadmeid. Prototüübil ei olnud väga palju funktsioone mida läbida ning funktsioonide läbimise kiirus ehk töösagedus ei pidanud olema suur. Lõputöö käigus vaadeldi populaarseid arendusplatvorme. Arendusplatvormid on loodud kiireks

prototüübi loomiseks, eemaldavad vajaduse tükkplaadi koostamiseks ning on lihtsad kasutada. Kuna arendusplatvorm eemaldab vajaduse personaalse trükkplaadi koostamiseks, hoiab see kokku aega ning raha.

Arendusplatvormile oli määratud kindel arv sisendeid ja väljundeid (I/O). Arendusplatvormile pidid mahtuma kõik andurite ja täiturseadmete sisendid ja väljundid. Allpool tabelis on välja toodud funktsioonide täitmiseks vajalikud sisendid ja väljundid (vt Tabel 5.7):

Tabel 5.7 Arendusplatvormi sisendite ja väljundite nõudlus

Funktsioon	I/O kokku	toide	Digitaalne I/O
Kaalumine	4	2	2
Mobiilse labori tuvastamine	7	2	5
Inim-masin liides	12	4	8
Kokku:	23	8	15

Andurite ja täiturseadmete toite sai vajadusel tuua ühe arendusplatvormi väljundi pealt või eraldi toiteseadmest. Lisaks sisenditele ja väljunditele pidi arendusplatvorm toetama kõiki andmeside protokolle, mida plaaniti kasutada. Antud juhul pidi arendusplatvorm toetama jadaliidest, 6800-jada paralleel liidest ja SPI suhtlusprotokolle.

Kõige populaarsemad arendusplatvormid on Arduino UNO, Arduino MEGA, Arduino NANO, Arduino MICRO ja Raspberry PI (vt Tabel 5.8). Kõiki Arduino arendusplatvorme saab programmeerida C-keeles. Raspberry PI programmeerimiseks kasutatakse Püütonit. Kõikide antud arendusplatvormid toetavad vajalikke suhtlusprotokolle.

Tabel 5.8 Arendusplatvormide võrdlus

Arendusplatvorm	Hind, €	Digital I/O arv
Arduino UNO	17,7 [41]	20
Arduino MEGA	32,2 [42]	54
Arduino NANO	11,8 [43]	22
Arduino MICRO	14,9 [44]	20
Raspberry PI	27,5 [45]	40

Valikutest eemaldati Raspberry PI ning Arduino MEGA. Need maksid liiga palju ning neil oli liiga palju sisendeid ja väljundeid. Kuigi Arduino NANO ja Arduino MICRO olid odavamad, otsustati lõputöös kasutada Arduino UNO arendusplatvormi. Arduino UNO oli Arduino arendusplatvormidest kõige populaarsem, selle hind ei olnud väga palju kõrgem ja Arduino UNO arendusplatvormid olid Tallinna Tehnikaülikoolis juba laialdaselt kasutusel.

Arduino UNO vajas 7-12 V toidet ning tarbimine oli piiratud 500 mA kaitsmega [46]. Arduino UNO reaalne voolutarve olenes programmist, mida jooksutati ning

arendusplatvormi külge ühendatud seadmete voolutarbest. Jooksutades Arduino UNO arendusplatvormil tühja programmi, tarbib arendusplatvorm umbes 100 mA [47].

5.1.5 Toide

Arduino UNO peal oli 3,3 V ja 5 V toite väljundid. 3,3 V väljundist oli võimalik tarbida 50 mA ning 5 V väljundist ja digitaalsetest väljunditest oli võimalik kokku tarbida 500 mA. [46]

Toiteallika valimisel oli vaja arvestada kõikide seadmetega, mida kasutati. Oli vaja teada, millise pingega toidet seadmed vajavad ning mis oli nende voolutarve. Järgnevas tabelis on toodud kokkuvõtte elektroonika komponentide toite nõuetest (vt Tabel 5.9).

Tabel 5.9 Elektroonika komponentide toitepingete ja voolutarvete kokkuvõtte

Seade	Toitepinge, V	Voolutarve, mA
Arduino UNO	7-12	<500
Kaalumine	5	14
Nupud	5	2
LCD-ekraan	5	26
RFID-lugeja	3,3	26

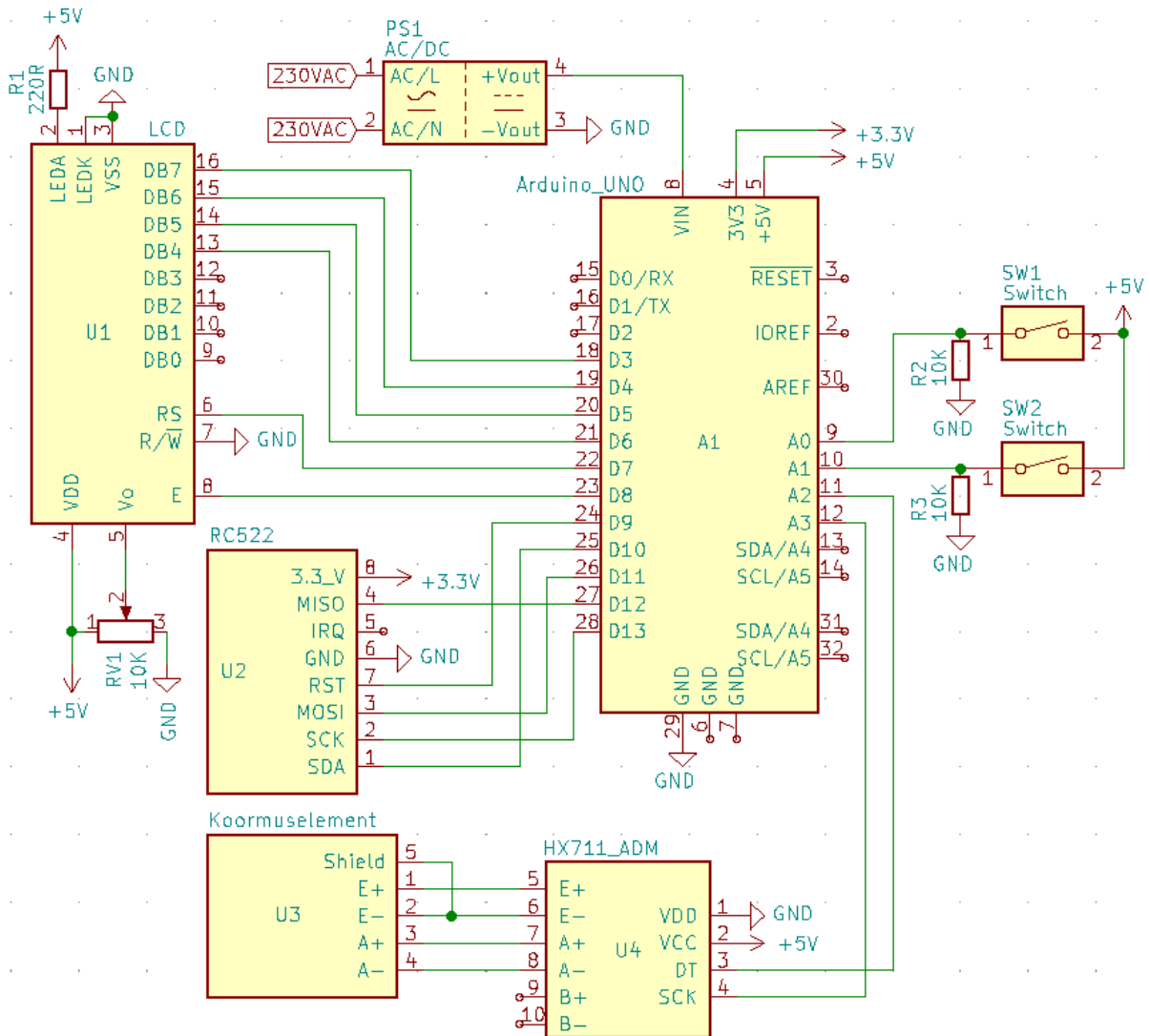
See tähendas, et andurite ja täiturseadmete toiteks oli vaja 5 V toidet, mis suutis väljastada 42 mA ning 3,3 V toidet, mis suutis väljastada 26 mA. Antud toite võimalused olid olemas Arduino UNO arendusplatvormil. Oli vaja vaid Arduino UNO toidet.

Arduino UNO arendusplatvormi otsustati toita läbi AC/DC muunduri 230 VAC võrgust. Arduino UNO peal oli toiteks naissoost ümar 2,1x5,5 mm keskelt positiivne pistik. Sobivate parameetritega toiteallikas maksis 2,05 € [48]. Toiteallika toitepinge oli 12 V, maksimaalne toitevool 1 A.

Kokku läksid elektroonika komponendid maksma 63 €. Prototüübi BOM on toodud lisades (vt Lisa 5). Skeemis vajalikud takistid ja ühendusjuhtmed saadi Tallinna Tehnikaülikoolist tasuta.

5.1.6 Elektriskeem

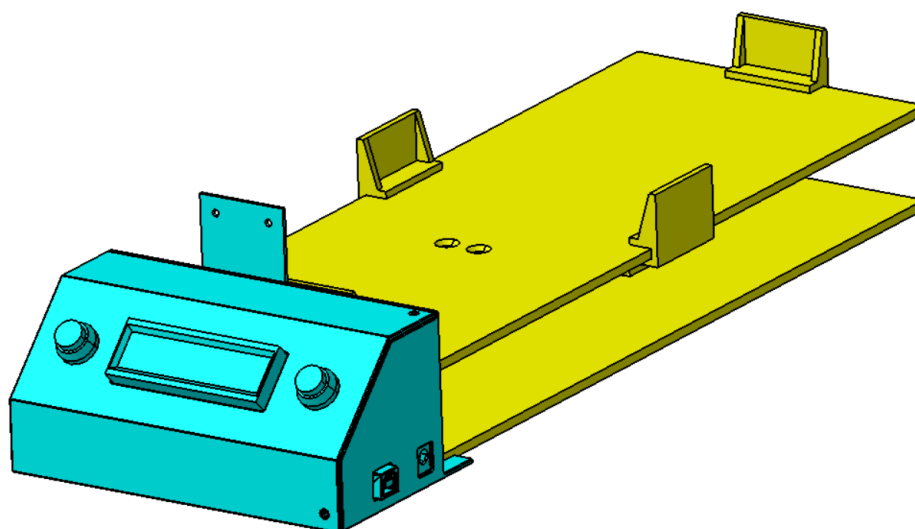
Kui kõik elektroonika komponendid olid välja valitud, siis oli võimalik koostada elektriskeem elektroonika komponentide ühendamiseks (vt Joonis 5.3). Skeem koostati kasutades programmi KiCAD.



Joonis 5.3 Prototüübi elektriskeem

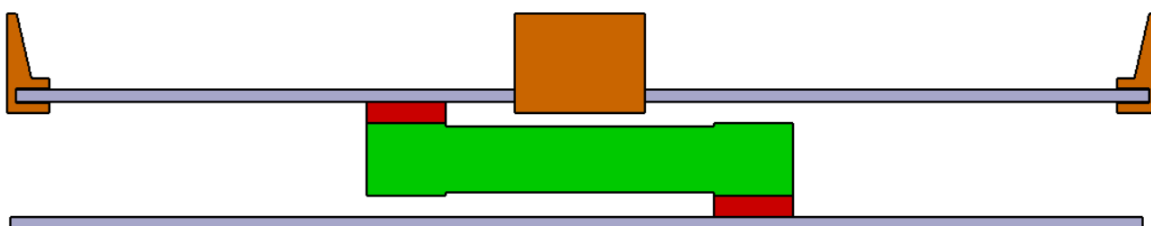
6 MEHHAANIKA

Prototüübi jaoks tehti 3D-mudel. Mudel koosnes kaalu osast ning elektroonika seksioonist. Allpool joonisel on elektroonika seksioon värvitud siniseks ning kaalu osa värvitud kollaseks (vt Joonis 6.1). Prototüübi 3D-mudel on leitav internetist [49].



Joonis 6.1 Ekraanitõmmis programmist FreeCAD. Prototüübi 3D-mudeli isomeetriline vaade. Kollane - kaalu osa, sinine – elektroonika seksioon

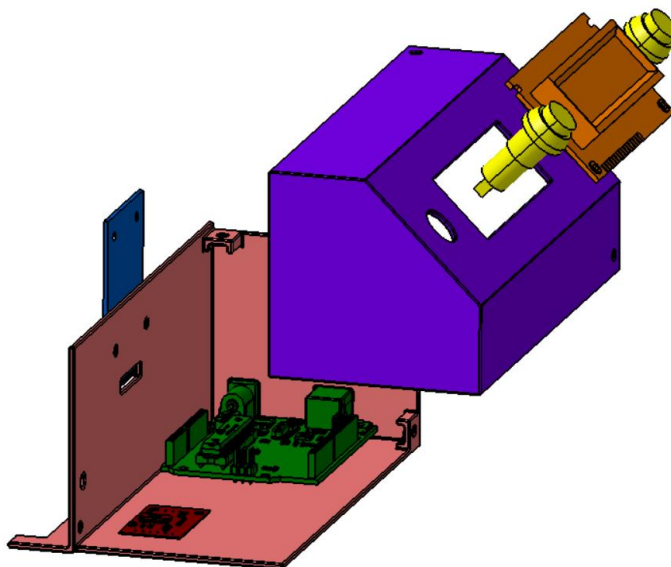
Kaalu osa koosnes kahest alumiiniumplaadist, koormuselemendist, kõrgendustest ning piirajatest (vt Joonis 6.2). Üks alumiiniumplaat oli kaalu alusplaat ning teine alumiiniumplaat käitus kaaluplatvormina. Alusplaadi ja kaaluplatvormi vahele oli nelja M6 peitpeapoldiga kinnitatud koormuselement. Koormuselemente ja alumiiniumplaatide eraldasid üksteisest 3D-prinditud kõrgendused. Kaaluplatvormile paigutatakse mobiilne labor. Selleks, et suunata mobiilne labor kaaluplatvormi keskele, olid kaaluplatvormi äärtesse paigutatud 3D-prinditud piirajad.



Joonis 6.2 Ekraanitõmmis programmist FreeCAD. Prototüübi kaalu osa külgvaade. Roheline - koormuselement, hall - alumiiniumplaadid, punane - kõrgendused, oranž - piirajad

Elektroonika seksioon koosnes 3D-prinditud korpusest, kuhu sisse paigutati kõik elektroonika komponendid peale koormuselemendi ja toitejuhtme (vt Joonis 6.3). Korpus koosnes omakorda paneelist ning alusest. Korpus käis kokku kolme M3 poldiga.

Paneeli küljes paiknesid inim-masin liidese komponendid: LCD-ekraan ja kaks nuppu. Aluse küljes paiknesid Arduino UNO [50], ADM moodul [51] ning RFID-lugeja moodul [52].



Joonis 6.3 Ekraanitõmmis programmist FreeCAD. Prototüübi elektroonika sektsiooni plahvatatud-vaade (ingl. k. *Exploded-view*). Kollane – nupud, oranž – LCD-ekraan, roheline – Arduino UNO, pruun – ADM moodul, sinine – RFID-lugeja moodul, lilla – korpuse paneel, roosa – korpuse alus

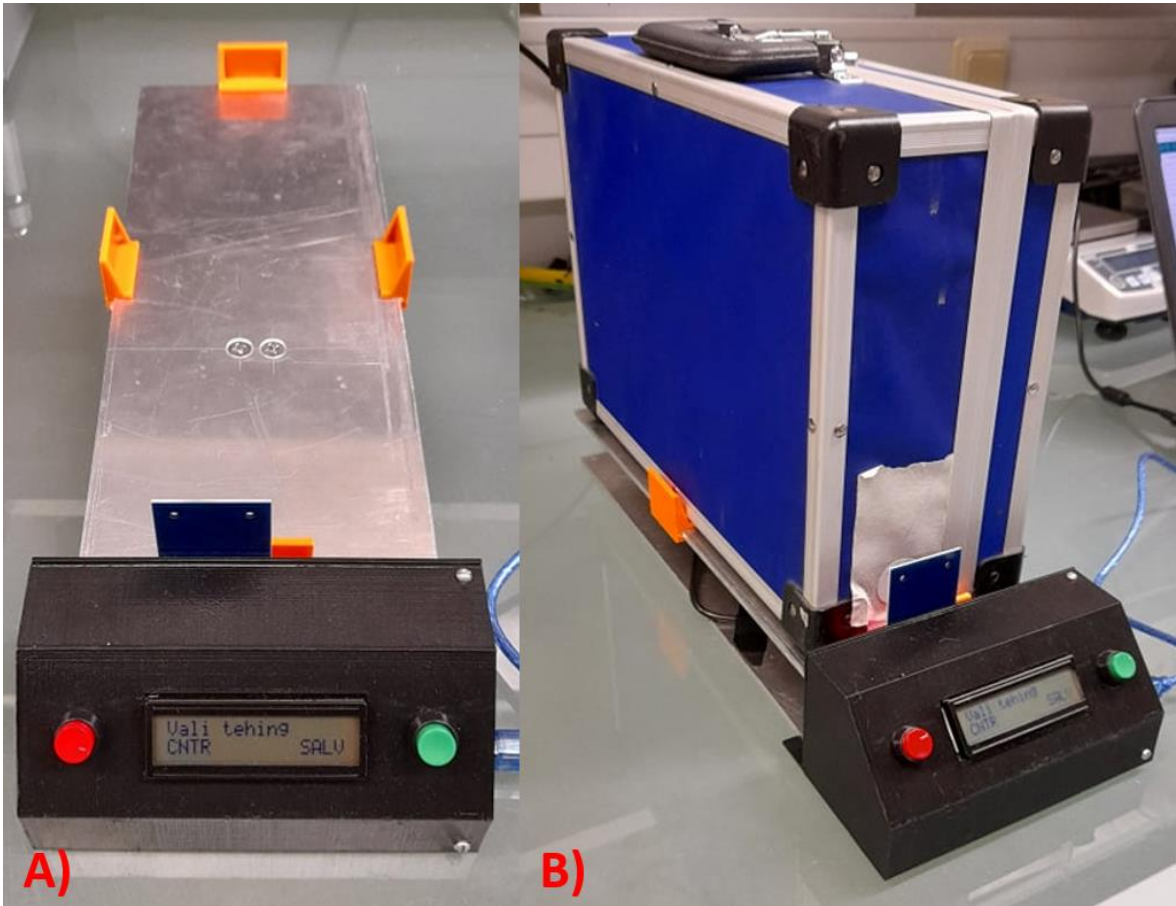
RFID-lugeja moodul kinnitati korpuse aluse külge nii, et see oleks võimalikult lähedal kaaluplatvormile. See tagas, et prototüüp suudab lugeda veatult sisse mobiilse labori küljes oleva RFID-kleepsu. RFID-lugeja moodulit ei kinnitatud kaaluplatvormi külge, kuna juhtmed, mis ühendavad mooduli Arduino UNO külge oleksid paindudes mõjutanud mõõtetulemust. Mobiilse labori külge kinnitati RFID-kleeps kaaluplatvormist umbes 38 mm kõrgusele ning mobiilse labori äärest 46 mm kaugusele.

Elektroonika sektsioon ei olnud kinnitatud kaalu osa külge, et vältida ühenduskoha purunemist. Korpuse aluse küljes olid suunajad, mis hoidsid elektroonika sektsiooni paigal ning õiges positsioonis (vt Joonis 6.4).



Joonis 6.4 Ekraanitõmmis programmist FreeCAD. Prototüübi altvaade. elektroonika sektsiooni aluse küljes olevad suunajad. Kollane - kaalu osa, sinine - elektroonika sektsiooni korpuse alus

Kõik 3D-prinditud osad prinditi välja Tallinna Tehnikaülikoolis tasuta. Samas saadi kaalu osa jaoks alumiiniumplaatide materjal ning lõikus ja kõik kinnitusvahendid Tallinna Tehnikaülikoolist tasuta. Valminud prototüüp on näha allpool joonisel (vt Joonis 6.5).



Joonis 6.5 Valmis prototüüp. A) ilma mobiilse laborita, B) koos mobiilse laboriga

7 TARKVARA

Prototüübi jaoks koostati programm kasutades Arduino IDE programmi. Prototüübi programmi diagramm on toodud lisades (vt Lisa 6). Programmis kasutati HX711 [53], LiquidCrystal [54], EEPROM [55], MFRC522 [56] ja SPI [57] teeki. Samas kasutati löike näidisprogrammist [58]. Prototüübi programm on leitav internetist [59].

Programm andis kasutajale võimaluse, kas salvestada uus mobiilne labor või kontrollida mobiilse labori massi. Arduino UNO EEPROM (ingl. k. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) mällu salvestati mobiilse labori küljes oleva RFID-kiibi UID, mobiilse labori massi näit ja näidu määramatus. Mobiilse labori mass ja näidu määramatus olid float kujul ning on neli baiti pikad. Sarnaselt oli ka Kasutatavate RFID-kiipide UID neli baiti pikk. See tähendas, et ühele mobiilsele laborile kuulus mälus 12 baiti. Kuna Arduino UNO arendusplatvormil oli 1024 baiti EEPROM mälu [46], siis oli võimalik prototüübi mällu salvestada 85 mobiilset laborit. Mobiilsete laborite andmed säilisis isegi siis, kui prototüübilt toide eemaldada.

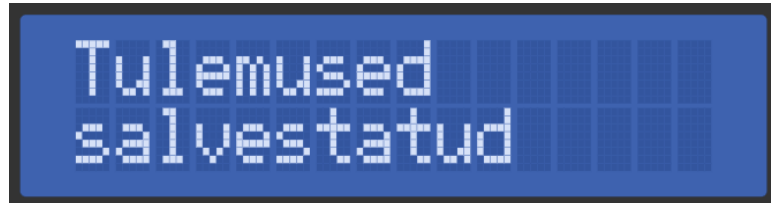
Prototüübi algmenüüs küsiti kasutajalt, mis protsess soovitakse läbida. Selleks kuvati ekraanil valikud: kontrollimine (CNTR) ja salvestamine (SALV). Valikud olid paigutatud ekraani vasakusse ja paremasse äärde vastavalt nuppude funktsioonile (vt Joonis 7.1).



Joonis 7.1 Ekraanitõmmis programmist TinkerCAD. Prototüübi algmenüü ekraanil

Kui kasutaja soovis salvestada uue mobiilse labori või salvestada uue massi mobiilsele laborile, siis pidi kasutaja vajutama parempoolset nuppu. Seejärel juhendas prototüüp kasutajat, et läbi viia mobiilse labori kaalumine. Mobiilse labori kaalumise protsess on täpsemalt kirjeldatud lisades (vt Lisa 3). Prototüüp kontrollis, et kaaluplatvormile esinev koormus ei ületaks koormuselemendi maksimaalset lubatud koormust. Kuna kaaluplatvorm kaalus umbes 500 g, siis programmis defineeriti maksimaalseks koormuseks 4,5 kg. Kui maksimaalne koormus ületati, siis teavitas prototüüp sellest kasutajat ning naasis algmenüüsse. Kui kaalumine oli läbitud, siis luges prototüüp sisse mobiilse labori RFID UID. Kui mingil põhjusel RFID-kiipi ei olnud võimalik sisse lugeda, siis andis prototüüp kasutajale teada, et kasutaja kohendaks mobiilse labori paigutust nii, et kiip oleks loetav. Kuna selleks hetkeks oli kaalumine läbitud, siis mobiilse labori liigutamine kaaluplatvormil ei mõjutanud mobiilse labori kaalumise tulemust.

Kui mobiilse labori UID oli sisse loetud, siis kontrollis prototüüp, kas mobiilne labor oli juba varasemalt salvestatud. Kui mobiilse labori UID oli juba mälus olemas, siis kirjutas prototüüp UID-le vastavatesse baitidesse mobiilse labori uue massi ja näidu määramatuse $u(L_m)$ (0.5). Kui UID ei eksisteerinud mälus, siis salvestati UID ning seejärel salvestati samamoodi mobiilse labori mass ja näidu määramatus. Kui salvestamine oli läbitud kuvati ekraanil kolm sekundit kinnitussõnum (vt Joonis 7.2).



Joonis 7.2 Ekraanitõmmis programmist TinkerCAD. Prototüübi ekraanil kuvatav kinnitussõnum pärast salvestamist

Kui kasutaja soovis kontrollida mobiilse labori massi, siis pidi kasutaja vajutama almenüüs vasakpoolset nuppu. Sarnaselt salvestamisele juhendas prototüüp kasutajat, et läbida kaalumine ning, et lugeda sisse RFID. Seejärel kontrolliti, kas mobiilne labor eksisteeris mälus. Kui mobiilse labori UID ei olnud mällu salvestatud, siis andis prototüüp kasutajale teada, et tegu on tundmatu mobiilse laboriga ning prototüüp naasis almenüüsse. Kui mobiilse labori info oli mälus olemas, siis arvutas prototüüp mobiilse labori massi vahe (3.1) ja kontrollprotsessi mõõtemääramatuse U vastavalt valemile (3.5). Vastavalt valemitele (4.3) ja (5.6) nägi kontrollprotsessi mõõtemääramatuse valem välja järgmine (7.1):

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{KOMP}^2 + u(L_{m,S})^2 + u(L_{m,K})^2 + 2 \cdot u_{ELE}^2} . \quad (7.1)$$

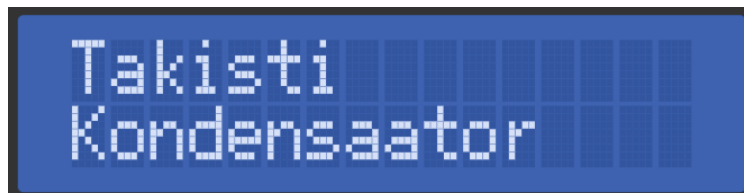
Kuna u_{KOMP} ja u_{ELE} väärtused olid teada, siis oli võimalik arvutada mobiilsete laborite kontrollimise teadaolev määramatus u_{TEAD} (7.2):

$$u_{TEAD} = \sqrt{u_{KOMP}^2 + 2 \cdot u_{ELE}^2} = \sqrt{0,024^2 + 2 \cdot 0,77^2} = 1,09 \text{ g} . \quad (7.2)$$

u_{TEAD} väärtus oli defineeritud prototüübi programmis. Selleks, et arvutada lõplik mõõtemääramatus U , võttis prototüüp mälust mobiilse labori salvestatud massi näidu määramatuse $u(L_{m,S})$ ning kontrollimisel saadud näidu määramatuse $u(L_{m,K})$ ning viis läbi arvutuse (7.3). Saadud U väärtus liideti komponentide masside vahemikele (3.3).

$$U = 2 \cdot \sqrt{u(L_{m,S})^2 + u(L_{m,K})^2 + u_{TEAD}^2} . \quad (7.3)$$

Prototüüp kontrollis läbi millistesse komponentide massi vahemikkesse arvatud mobiilsete laborite massi vahe jäi ning väljastas kõik võimalused, mis komponent puudu võiks olla. Kõik võimalused liikusid üle ekraani alt üles. Iga komponent oli ekraanil kuus sekundit. Kui näiteks mobiilsest laborist oli puudu kondensaator, siis võis prototüüp pakkuda, et puudu oli takisti või kondensaator, kuna antud komponentide massi vahemikud kattusid (vt Joonis 7.3).



Joonis 7.3 Ekraanitõmmis programmist TinkerCAD. Prototüübi ekraanil kuvatav tekst, kui mobiilsest laborist oli puudu kondensaator

Kui mobiilses laboris olid kõik komponendid olemas, siis kuvati ekraanil „Koik olemas“. Samas, kui prototüüp tuvastas, et mingi komponent oli puudu, aga mobiilsete laborite massi vahe ei ühtinud ühegi komponendi massi vahemikuga, siis vastavalt massi vahe suurusele kuvas prototüüp ekraanil, kas puudu oli väike komponent või suur komponent. Väiksed komponendid olid: takisti, kondensaator, induktiivpool ja ühendusjuhtmed. Kõik ülejäänud komponendid kuulusid suurte komponentide hulka. Programmi oli lisatud ka kontroll, et kontrollitava mobiilse labori mass ei oleks suurem, kui salvestatud mobiilse labori mass. Sellisel juhul eeldati, et mobiilsesse laborisse oli midagi lisatud ning kasutajat teavitati sellest. Prototüüp teavitas ka kasutajat, kui mobiilsete laborite massi vahe ületas kõige raskema komponendi massi eeldusel, et mobiilsest laborist oli puudu mitu komponenti.

8 PROTOTÜÜBI KATSETAMINE

Prototüübi katsetamiseks kasutati kolme mobiilset laborit, mille külge kinnitati RFID-kleepsud. Katsetamise käigus simuleeriti mobiilsete laborite kasutamist. Simuleeriti olukorda, kus ükski komponent ei olnud mobiilsest laborist puudu, väike komponent oli puudu ning olukorda, kus puudu oli hinnaline komponent. Samas kontrolliti eriolukordi, nt olukorda, kus soovitakse kontrollida mobiilset laborit, mis ei ole salvestatud. Katsete täpsem kirjeldus on toodud lisades (vt Lisa 7).

Katse viidi läbi kahes osas. Esimeses osas salvestati mobiilsete laborite mass prototüübi mällu. Pärast salvestamist simuleeriti komponentide kadumist. Katse teine osa viidi läbi nädalaega peale salvestamist, et simuleerida mobiilse labori tagastamist. Teises osas simuleeriti taas komponentide kadumist.

Katsetes oli vaja näha, et prototüüp pakub alati võimalike puuduvate komponentide valiku seas komponendi, mis tegelikkuses mobiilsest laborist puudu oli. Samas taheti näha, et prototüüp toimiks eriolukordades õigesti. Katsete tulemused on toodud lisades (vt Lisa 8).

Katse esimeses osas toimis prototüüp korrektselt. Prototüüp pakkus alati võimalike puuduvate komponentide valikus komponendi, mis oli tegelikkuses mobiilsest laborist puudu. Samas leiti, et prototüüp käitus eriolukordades vastavalt ning andis kasutajale sobiva tagasiside. Katsetest järeldati, et sõltuvalt salvestamisel ja kontrollimisel saadavast näidu määramatusest jäi kontrollprotsessi mõõtemääramatus U vahemikku 2,18 g kuni 2,25 g. Katsetest sai ka järeldada, et mobiilsete laborite salvestamine ja kontrollimine võttis aega vähem kui 20 s.

Katse teises osas ilmnes, et kõigi kolme mobiilse labori mass oli muutunud nädala jooksul keskmiselt 4,6 g võrra väiksemaks. Kasutades F1 klassi etalonmasse veenduti, et prototüübi näit oli õige. Mobiilse labori massi muutus võis tuleneda õhuniiskusest. Katse esimese osa ajal oli ilm niiskem, kui teise osa ajal. Niiskus võis aurustuda mobiilsetest laboritest välja, muutes need kergemaks. Mobiilsete laborite massi muutusest tulenevalt, et suutnud prototüüp anda korrektseid tulemusi.

Mobiilsete laborite massi muutuse probleemi saaks lahendada, kui prototüüp arvestaks mobiilsete laborite massi muutusega ning reguleeriks vastavalt mõõtetulemust. Selleks aga oleks vaja uurida mis tegurid mõjutavad mobiilsete laborite massi ning kui palju mobiilse labori mass võib neist tulenevalt muutuda.

KOKKUVÕTE

Lõputöö käigus ehitati prototüüp mobiilsetest laboritest puuduvate komponentide automaatseks tuvastamiseks. Töö käigus uuriti kolme tehnikat, mida ettevõtted kasutavad tööriistakomplektidest puuduvate tööriistade tuvastamiseks: tööriistade varjutamine, automatiseeritud tööriista kontrolliga tööriistakärud ja mobiilsete tööriistakohvrite kontrolljaamad. Prototüübile võeti eeskujuks mobiilsete tööriistakohvrite kontrolljaamad, kus puuduv tööriist tuvastatakse tööriistakohvri massi muutuse alusel.

Prototüüp andis kasutajale kaks võimalust, kas salvestada uus mobiilne labor või kontrollida, kas mobiilses laboris on kõik komponendid olemas. Kontrollimise vastuseks andis prototüüp, kas kõik komponendid olid olemas või andis kasutajale nimekirja komponentidest, mis võisid olla puudu.

Prototüübi kasutamiseks oli esmalt vaja salvestada mobiilse labori mass, kus olid kõik komponendid olemas. Hiljem oli võimalik kontrollida, kas kõik komponendid olid olemas, mobiilse labori kaalumise abil. Mobiilse labori salvestatud massi ja kontrollitava massi vahe järgi oli võimalik tuvastada, milline komponent puudu võis olla. Mobiilsed laborid kaalusid 3 kg kuni 3,5 kg. Samas mobiilsete laborite komponentide massid olid 6 g kuni 450 g.

Prototüübis kasutati elektroonika komponentidena Arduino UNO arendusplatvormi, RFID-lugeja moodulit, LCD-ekraani, kahte lülitit ning ühe-punkti koormuselementi koos ADM mooduliga. Suur osa elektroonika komponente paigutati 3D-prinditud korpusesse. Korpusest jäi välja koormuselement, mis paigutati kahe alumiiniumist plaadi vahele. Alumine alumiiniumplaat käitus kaalu põhjana ning ülemine kaaluplatvormina. Prototüüp läks maksma alla 100 €.

Prototüübi kasutamiseks oli vaja iga mobiilse labori külge kinnitada RFID-kleeps. RFID-kleepsu abil tuvastas prototüüp, millise mobiilse laboriga on tegu. Prototüüp salvestas mobiilsete laborite andmed EEPROM mällu. Sellisel juhul ei kadunud salvestatud andmed, kui prototüübilt toide ära kadus.

Lõputöös valminud prototüüpi katsetades selgus, et prototüüp suutis tuvastada korrektselt puuduvaid komponente. Prototüüp suutis anda tulemuse 20 s vältel ning mobiilsete laborite kontrollprotsessi mõõtemääramatus jäi alla 2,3 g. Samas selgus, et mobiilsete laborite mass muutus nädala vältel keskmiselt 4,6 g võrra väiksemaks. Eeldatavalt põhjustas massi muudatuse õhuniiskus. Mobiilsete laborite massi muutus ei võimaldanud prototüübil tuvastada korrektselt komponentide puudumist.

Mobiilsete laborite massi muutuse probleemi saaks lahendada, kui prototüüp arvestaks mobiilsete laborite massi muutusega ning reguleeriks vastavalt mõõtetulemust. Selleks aga oleks vaja uurida, millest tuleneb mobiilse labori massi muutus ning kui palju mobiilse labori mass võib muutuda. Lisaks oleks võimalik panna prototüüp pakkuma puuduvaid komponente tõenäosuse alusel, et pakkumised oleksid täpsemad. Samas saaks prototüübi ühendada internetiga, et prototüüp oleks kaugelt jälgitav. Lõputöö oli suunatud mobiilsete laborite väljastusautomaatide välja arendamisele.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Jaanus, *The Interactive Learning Environment for Mobile Laboratories*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2011.
- [2] K. Härmat, „IT-TEADUSKONNA KOGEMUS: DISTANTSÕPE LÜKKAS E-ÕPPELE TÄISKÄIGU SISSE,“ *TalTech*, 18. 09. 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://taltech.ee/uudised/it-teaduskonna-kogemus-distantsope-lukkas-e-opepele-taiskaigu-sisse>. [Kasutatud 04. 07. 2021].
- [3] Circuit Digest, „The Reason for Global Shortage of Electronic Components and How the companies are Fighting It,“ *Circuit Digest*, 29. 04. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://circuitdigest.com/article/the-reason-for-global-shortage-of-electronic-components-and-how-the-companies-are-fighting-it>. [Kasutatud 11. 07. 2021].
- [4] Ärileht, „Pandeemia kasvatas nõudlust elektroonika järele, kuid komponentide tarne venimine pärsib tööstust,“ *Ärileht*, 13. 04. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://arileht.delfi.ee/artikkel/93115897/pandeemia-kasvatas-noudlust-elektroonika-jarele-kuid-komponentide-tarne-venimine-parsib-toostust>. [Kasutatud 11. 07. 2021].
- [5] M. Jaanus, *Interviewee, Mobiilsete laborite ülesehitus*. [Intervjuu]. 17. 06. 2021.
- [6] H. B. H. II, „TOOL CONTROL AND ACCOUNTABILITY POLICY,“ NOAA Office of Marine and Aviation Operations, 01. 02. 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://espo.nasa.gov/sites/default/files/documents/221-13%20Tool%20Control%20and%20Accountability%20v3.0%20FINAL%20Eff%201%20Feb%202014.pdf>. [Kasutatud 01. 08. 2021].
- [7] Aviationpros, „Tool Control,“ *Aviationpros*, 29. 12. 2005. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aviationpros.com/tools-equipment/article/10385420/tool-control>. [Kasutatud 04. 07. 2021].
- [8] T. Culverwell, „Tackling Tool Control in Aviation Maintenance,“ *Linkedin*, 15. 03. 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/tackling-tool-control-aviation-maintenance-travis-culverwell>. [Kasutatud 11. 07. 2021].
- [9] Red Box Tools, „RBI9500T Mechanic Hand Carry Tool Kit– Imperial Kit, includes 160 Tools,“ *Red Box Tools*, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.redboxaviation.com/product/rbi9500t-mechanic-hand-carry-tool-kit-with-tools-imperial-kit-includes-159-tools/>. [Kasutatud 04. 07. 2021].
- [10] HenchmanTRAK, „KABTRAK TOOL CABINET,“ *HenchmanTRAK*, [Võrgumaterjal]. Available: <https://henchmantrak.com/kabtrak>. [Kasutatud 04. 07. 2021].
- [11] Snap-on Industrial, „LEVEL 5 AUTOMATED TOOL CONTROL,“ *Snap-on Industrial*, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.snapon-industrial.co.uk/programs/level-5-automated-tool-control.html>. [Kasutatud 04. 07. 2021].
- [12] Habco, „PINPOINT,“ *Habco*, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://habco.biz/services/pinpoint/>. [Kasutatud 04. 07. 2021].
- [13] Henchmantrak, „KABTRAK,“ *Henchmantrak*, [Võrgumaterjal]. Available: <https://henchmantrak.com/kabtrak>. [Kasutatud 28. 07. 2021].
- [14] Henchmantrak, „Software,“ *Henchmantrak*, [Võrgumaterjal]. Available: <https://henchmantrak.com/software>. [Kasutatud 28. 07. 2021].
- [15] HenchmanTRAK, „PORTATRAK,“ *HenchmanTRAK*, [Võrgumaterjal]. Available: <https://henchmantrak.com/portatrak>. [Kasutatud 04. 07. 2021].
- [16] O. M. Rein Laaneots, *Mõõtmise alused*, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2002.

- [17] PCB Group, Inc., „Load Cell Handbook,” 2004. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.pcb.com/contentstore/MktgContent/LinkedDocuments/Load_Torque/LT-LoadCellHandbook_LowRes.pdf. [Kasutatud 16. 09. 2021].
- [18] Flintec Inc., „What Is A Single-Point Load Cell, And How Does It Work?,” Flintec Inc., 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.flintec.com/weight-sensors/load-cells/how-does-a-single-point-load-cell>. [Kasutatud 16. 09. 2021].
- [19] Avia Semiconductor, „HX711,” [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mouser.ee/datasheet/2/830/hx711_english-2488368.pdf. [Kasutatud 24. 10. 2021].
- [20] TME, „OKY3478-1,” 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/oky3478-1/muud-andurid/okystar/>. [Kasutatud 24. 10. 2021].
- [21] TME, „OKY3481-1,” TME, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/oky3481-1/muud-andurid/okystar/>. [Kasutatud 21. 10. 2021].
- [22] Shenzhen Okystar Technology Co., Ltd, „OKY3481-1 andmed,” Shenzhen Okystar Technology Co., Ltd, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.okystar.com/product-item/weigh-bridge-weight-scales-sensor-oky3481-1/4/>. [Kasutatud 21. 10. 2021].
- [23] Amazon, „YZC-1B koormuselement,” Amazon, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.amazon.de/-/en/System-YZC-1B-aluminium-single-calculation/dp/B0817QQ1P3/ref=sr_1_26?dchild=1&keywords=w%C3%A4gezelle&qid=1631744314&sr=8-26&th=1. [Kasutatud 21. 10. 2021].
- [24] AliExpress.com, „CZL-601,” AliExpress.com, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.aliexpress.com/item/1005002856725528.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.61623010RKJ2aZ&ad_pvid=20211014014225604683222269550000145351_2&s=p. [Kasutatud 21. 10. 2021].
- [25] AliExpress.com, „NA1,” AliExpress.com, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.aliexpress.com/item/1005001305376730.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.61623010RKJ2aZ&algo_pvid=bbdededb-edd9-4c06-ab99-4e04ce5cd84c&algo_exp_id=bbdededb-edd9-4c06-ab99-4e04ce5cd84c-8&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000015645870626%22%7D. [Kasutatud 21. 10. 2021].
- [26] Elprocus, „Automatic Identification and Data Capturing (AIDC) Technology,” Elprocus, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elprocus.com/aidc-what-is-automatic-identification-and-data-capture-technology/>. [Kasutatud 10. 10. 2021].
- [27] AO Kaspersky Lab, „QR Code Security: What are QR codes and are they safe to use?,” AO Kaspersky Lab, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kaspersky.com/resource-center/definitions/what-is-a-qr-code-how-to-scan>. [Kasutatud 10. 10. 2021].
- [28] AB&R, „What is RFID and How Does RFID Work?,” AB&R, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.abr.com/what-is-rfid-how-does-rfid-work/>. [Kasutatud 10. 10. 2021].
- [29] aim North America, „AIDC TECHNOLOGIES,” aim North America, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aim-na.org/aidc-technology.html>. [Kasutatud 10. 10. 2021].
- [30] NXP Semiconductors N.V, „MFRC522,” NXP Semiconductors N.V, 27. 04. 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/MFRC522.pdf>. [Kasutatud 10. 10. 2021].
- [31] STMicroelectronics, „ANT7-T-M24SR64,” STMicroelectronics, 22. 06. 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/389/ant7-t-m24sr64-1848016.pdf>. [Kasutatud 10. 10. 2021].

- [32] TME, „OKY3494,“ TME, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/oky3494/muud-moodulid/okystar/>. [Kasutatud 10. 10. 2021].
- [33] Mouser Electronics, Inc., „ANT7-T-M24SR64,“ Mouser Electronics, Inc., 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/STMicroelectronics/ANT7-T-M24SR64?qs=kHy2Dt%2FAQztZ1ixzDI3IkA%3D%3D>. [Kasutatud 10. 10. 2021].
- [34] HobbyTronics Ltd, „RC522,“ HobbyTronics Ltd, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.hobbytronics.co.uk/mfrc522-reader>. [Kasutatud 17. 10. 2021].
- [35] TME, „NFC STICKER 213,“ TME, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/rfid-stick-nt213/rfid-moodulid-ja-loendurid/goodwin/nfc-sticker-213/>. [Kasutatud 11. 10. 2021].
- [36] TME, „PS11BRD,“ TME, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/ps11brd/standardsed-lulitid/>. [Kasutatud 27. 11. 2021].
- [37] TME, „PS11BGN,“ TME, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/ps11bgn/standardsed-lulitid/>. [Kasutatud 27. 11. 2021].
- [38] TME, „RC1601A-YHY-JSX,“ TME, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/rc1601a-yhy-jsx/alfanumbrilised-lcd-ekraanid/raystar-optronics/>. [Kasutatud 11. 10. 2021].
- [39] TME, „NPC1602LRS-JWB-K,“ TME, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/npc1602lrs-jwb-k/alfanumbrilised-lcd-ekraanid/powerip/>. [Kasutatud 11. 10. 2021].
- [40] TME, „NPC1602LRS-FWA-H,“ TME, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/npc1602lrs-fwa-h/alfanumbrilised-lcd-ekraanid/powerip/>. [Kasutatud 11. 10. 2021].
- [41] Mouser, „Arduino UNO,“ Mouser, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Arduino/A000073?qs=8PMfw1Pw72VfrrCu0Mm0mA==>. [Kasutatud 17. 10. 2021].
- [42] Mouser, „Arduino MEGA,“ Mouser, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Arduino/A000067?qs=sGAepiMZZMt1iCLsaqcCFmKyA2HznXaWhAhtN0ITQ%252BU%3D>. [Kasutatud 17. 10. 2021].
- [43] Mouser, „Arduino NANO,“ Mouser, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Arduino/ABX00033?qs=sGAepiMZZMv0NwlthflBi1H6hhIlmFGN6GJmjnhB2Mk%3D>. [Kasutatud 17. 10. 2021].
- [44] Mouser, „Arduino MICRO,“ Mouser, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Arduino/A000093?qs=B4lwOSfBLokJean8vPGHVA%3D%3D>. [Kasutatud 17. 10. 2021].
- [45] Mouser, „Raspberry PI,“ Mouser, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Adafruit/4027?qs=sGAepiMZZMv0NwlthflBiwY602tbLMd1eoYOdGjxHc4%3D>. [Kasutatud 17. 10. 2021].
- [46] Mouser, „Arduino UNO andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.mouser.ee/datasheet/2/34/Arduino_A000073-1893642.pdf. [Kasutatud 18. 10. 2021].
- [47] DY, „Guide to reduce the Arduino Power Consumption,“ DY, 22. 12. 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://diyi0t.com/arduino-reduce-power-consumption/>. [Kasutatud 18. 10. 2021].
- [48] Arrow Electronics, Inc., „SWI12-12-E-P5,“ Arrow Electronics, Inc., 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.arrow.com/en/products/swi12-12-e-p5/cui-inc>. [Kasutatud 23. 10. 2021].

- [49] J. Tümanok, „Prototüübi mudel,“ 28. 11. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://drive.google.com/drive/folders/1uhQlwNgZEBWtZEDy7bimGRZtQ91-EDzF?usp=sharing>. [Kasutatud 28. 11. 2021].
- [50] Andrew_Whitham, „Arduino Uno R3,“ Grabcad, 03. 01. 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://grabcad.com/library/arduino-uno-r3-1>. [Kasutatud 21. 11. 2021].
- [51] n. cohen, „xfw-hx711,“ Grabcad, 2018 02. 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://grabcad.com/library/xfw-hx711-2>. [Kasutatud 28 11. 2021].
- [52] Oguz, „RC522 RFID Module,“ Grabcad, 07. 06. 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://grabcad.com/library/rc522-rfid-module-1>. [Kasutatud 21. 11. 2021].
- [53] bogde, „HX711,“ 04. 03. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/bogde/HX711>. [Kasutatud 23. 10. 2021].
- [54] Arduino LLC, „LiquidCrystal,“ Arduino LLC, 01. 10. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/arduino-libraries/LiquidCrystal>. [Kasutatud 21. 11. 2021].
- [55] C. Andrews, „EEPROM,“ Christopher Andrews, 15. 05. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/PaulStoffregen/EEPROM>. [Kasutatud 21. 11. 2021].
- [56] M. A. Balboa, „rfid,“ Miguel André Balboa, 07. 11. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/miguelbalboa/rfid>. [Kasutatud 21. 11. 2021].
- [57] karlsoderby, „SD,“ karlsoderby, 21. 10. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/arduino-libraries/SD>. [Kasutatud 21. 11. 2021].
- [58] Ö. Ş. Baysal, „RFID522-Door-Unlock,“ Ömer Şiar Baysal, 07. 06. 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/omersiar/RFID522-Door-Unlock>. [Kasutatud 21. 11. 2021].
- [59] J. Tümanok, „Prototüübi programm,“ 27. 11. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: https://drive.google.com/drive/folders/14RuKy7xyIb3sW07Unov_shW7FHR7PoC4?usp=sharing. [Kasutatud 27. 11. 2021].
- [60] INTERNATIONAL ORGANIZATION, „OIML R 111-1,“ INTERNATIONAL ORGANIZATION, 2004. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf. [Kasutatud 14. 11. 2021].
- [61] Farnell, „Kern PCB 1000-2,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/2875515.pdf>. [Kasutatud 18. 10. 2021].
- [62] N. Seidle, „HX711-Load-Cell-Amplifier,“ 25. 06. 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://github.com/sparkfun/HX711-Load-Cell-Amplifier>. [Kasutatud 23. 10. 2021].
- [63] ISOBUDGETS, „Isobudgets koduleht,“ ISOBUDGETS, 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.isobudgets.com/>. [Kasutatud 24. 10. 2021].

LISAD

Kalibreerimise protsessi kirjeldus

Kaalu kalibreerimiseks valiti välja mõõtepunktid, mis jäid kaalu maksimaalse koormuse piirkonda või kaalutavate esemete massi piirkonda. Mõõtepunktid valiti nii, et need oleksid ühtlaselt jaotatud soovitud piirkonna peale. Kalibreerimiseks kasutati F1 klassi etalonmasse.

Näidu parandid

Enne igat mõõtmist eemaldati igasugune koormus kaaluplatvormilt ning oodati, et näit naaseks nulli. Igas mõõtepunktis i asetati kaaluplatvormi keskele mõõtepunktile vastava nimimassiga etalonmass E_i . Kaalu näit P_i pandi pärast stabiliseerumist kirja. Mõõtepunktile i vastav näidu parand K_i arvutati valemiga (0.1) [16]:

$$K_i = E_i - P_i. \quad (0.1)$$

Vähimast jaotisest tulenev määramatus

Vähim jaotis on väikseim ühik, mida mõõteseade suudab kuvada. Kuna tegu oli digitaalse seadmega, siis vähimast jaotisest VJ tulenev määramatus u_{VJ} arvutati valemiga (0.2) [16]:

$$u_{VJ} = \frac{VJ}{\sqrt{3}}. \quad (0.2)$$

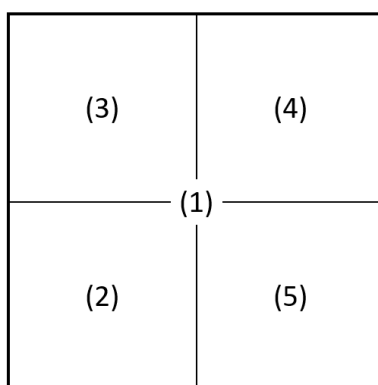
Korratavus

Enne igat mõõtmist eemaldati igasugune koormus kaaluplatvormilt ning oodati, et näit naaseks nulli. Igas mõõtepunktis i asetati kaaluplatvormi keskele mõõtepunktile vastava nimimassiga etalonmass E_i . Igas mõõtepunktis koormati sama etalonmassiga kaaluplatvormi nõutud arv kordi, eemaldades pärast igat näidu võtmist koormuse kaaluplatvormilt. Pärast korduvat koormamist leiti igas mõõtepunktis i suurim näit $P_{REP,max,i}$ ja väikseim näit $P_{REP,min,i}$. Korratavusest tulenev määramatus $u_{REP,i}$ mõõtepunktis i arvutati valemiga (0.3) [16]:

$$u_{REP,i} = \frac{P_{REP,max,i} - P_{REP,min,i}}{2 \cdot \sqrt{3}} . \quad (0.3)$$

Ekstsentriline koormamine

Enne igat mõõtmist eemaldati igasugune koormus kaaluplatvormilt ning oodati, et näit naaseks nulli. Igas mõõtepunktis i asetati kaaluplatvormi keskele ning nurkadesse mõõtepunktile vastava nimimassiga etalonmass E_i . Igas mõõtepunktis asetati etalonmassid kaaluplatvormile alati samas järjekorras vastavalt allpool toodud joonisele (vt Joonis 0.1).



Joonis 0.1 Kaaluplatvormi koormamise punktid ning järjekord ekstsentrilise koormamise korral

Järgmiseks võrreldi igas mõõtepunktis kaaluplatvormi nurkadest saadud näite kaaluplatvormi keskest saadud näiduga. Leiti nurgast saadud näit $P_{EKS,max,i}$, mis oli keskest saadud näidust $P_{EKS,kesk,i}$ kõige erinevam. Ekstsentrilisest koormamisest tulenev määramatus $u_{EKS,i}$ mõõtepunktis i arvutati valemiga (0.4) [16]:

$$u_{EKS,i} = \frac{|P_{EKS,kesk,i} - P_{EKS,max,i}|}{\sqrt{3}} . \quad (0.4)$$

Etalonmasside massi määramatus

Igal etalonmassil on omane massi määramatus. Igas mõõtepunktis arvutati etalonmassi massi määramatus vastavalt valemile (3.4), kus liideti kokku kõikide etalonmasside määramatused, mida kindlas mõõtepunktis kasutati. Kalibreerimisel kasutati F1 klassi etalonmasse, millele on määratud maksimaalne lubatud määramatus [60].

Lisa 2 KERN PCB 1000-2 kaalu kalibreerimine

Kalibreerimine viidi läbi vastavalt kaalu kalibreerimise eeskirjale (vt Lisa 1).

Mobiilsete laborite komponentide massi vahemike määramiseks kasutati KERN PCB 1000-2 [61] kaalu, mille maksimaalne koormus oli 1000 g ning väikseim jaotis oli 0,01 g. KERN PCB 1000-2 andmelehes oli antud kaalu korratavuseks 0,01 g ning lineaarsuseks $\pm 0,03$ g. Enne kalibreerimist ja mõõtmiste tegemist veenduti, et kaal oli loodis.

Eelnevalt oli üldiselt kaalutud mobiilsete laborite komponente, et saada komponentide massidest ülevaade. Mõõtmiste alusel otsustati kaal kalibreerida kümnes mõõtepunktis. Mõõtepunktide massid olid järgmised:

- 5 g
- 15 g
- 30 g
- 50 g
- 100 g
- 130 g
- 150 g
- 200 g
- 300 g
- 450 g

Vähimast jaotisest tulenev määramatus

Kuna kaalu vähim jaotis oli 0,01 g, siis oli vastavalt valemile (0.2) igas antud mõõtepunktis kaalu vähimast jaotisest tulenev määramatus 0,006 g.

$$u_{VJ,KAAL} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,006 \text{ g}$$

Näidu parandid

Kaalu näidu parandid arvutati vastavalt valemile (0.1). Näidu parandid jäid alla 0,05 g (vt Tabel 0.1).

Tabel 0.1 KERN PCB 1000-2 kaalu näidu parandid mõõtepunktides

Etalon, g	Näit, g	Parand, g
5	5,01	-0,01
15	14,99	0,01
30	30,01	-0,01
50	49,99	0,01
100	99,98	0,02
130	129,99	0,01
150	149,98	0,02
200	199,98	0,02
300	299,97	0,03
450	449,95	0,05

Korratavus

Korratavusest tulenev määramatus arvutati vastavalt valemile (0.3). Ühes mõõtepunktis tehti viis mõõtmist. Mõõtmiste tulemused ning arvutatud korratavusest tulenev määramatus on toodud allpool tabelis (vt Tabel 0.2)

Tabel 0.2 KERN PCB 1000-2 kaalu korratavuse katse tulemused ning korratavusest tuleneva määramatuse väärtused mõõtepunktides

Etalon, g	Näit, g					uREP,KAAL, g
	1	2	3	4	5	
5	4,99	5,01	5,00	5,00	5,01	0,006
15	15,00	14,99	15,01	15,00	15,00	0,006
30	30,01	29,99	30,00	30,00	30,00	0,006
50	50,00	49,99	49,99	50,00	49,99	0,003
100	99,99	99,98	99,99	99,99	99,98	0,003
130	129,98	129,99	129,99	129,99	129,98	0,003
150	149,98	149,98	149,99	149,98	149,98	0,003
200	199,98	199,97	199,97	199,97	199,97	0,003
300	299,97	299,97	299,96	299,96	299,96	0,003
450	449,96	449,96	449,96	449,95	449,95	0,003

Ekstsentriline koormamine

Ekstsentrilisest koormamisest tulenev määramatus arvutati vastavalt valemile (0.4). Kaalu ekstsentrilise koormamise katse tulemused ning ekstsentrilisest koormamisest tulenev määramatus igas mõõtepunktis on toodud allpool tabelis (vt Tabel 0.3).

Tabel 0.3 KERN PCB 1000-2 kaalu ekstsentrilise koormamise katse tulemused ning ekstsentrilisest koormamisest tulenev määramatus mõõtepunktides

Etalon, g	1	2	3	4	5	$U_{EKS,KAAL}$, g
5	5,01	4,99	4,99	5	5	0,012
15	14,99	15	15	14,99	14,99	0,006
30	29,99	30	29,99	29,99	30	0,006
50	50	49,98	49,99	49,99	49,99	0,012
100	99,99	99,98	99,99	99,99	99,98	0,006
130	129,98	129,98	130	129,99	129,99	0,012
150	149,98	149,97	149,97	149,98	149,98	0,006
200	199,97	199,98	199,99	199,98	199,98	0,012
300	299,96	299,96	299,97	299,98	299,97	0,012
450	449,94	449,95	449,95	449,96	449,95	0,012

Etalonmasside massi määramatus

Etalonmasside massi määramatus arvutati vastavalt valemile (3.4). Kaalu kalibreerimisel kasutatavate etalonmasside massi määramatused on toodud allpool tabelis (vt Tabel 0.4).

Tabel 0.4 Etalonmasside massi määramatused mõõtepunktides

mõõtepunkt, g	Etalonide nimimassid, g	Etalonide max massi määramatus, $k=1$, g			$U_{ETA,KAAL}$, g
5	5	0,00009			0,00009
15	5+10	0,00009	0,00012		0,00015
30	10+20	0,00012	0,00014		0,00018
50	50	0,00017			0,00017
100	100	0,00029			0,00029
130	100+20+10	0,00029	0,00014	0,00012	0,00034
150	100+50	0,00029	0,00017		0,00034
200	200	0,00058			0,00058
300	200+100	0,00058	0,00029		0,00065
450	200+200+50	0,00058	0,00058	0,00017	0,00083

Näidu parandi määramatus

Määramatuste põhjal arvutati igale mõõtepunktile vastav näidu parandi määramatus $U_{K,KAAL}$. Näidu parandi määramatus arvutati vastavalt valemile (4.4). Kalibreerimisel leitud määramatuste kokkuvõtte ja näidu parandi määramatuse arvutuste tulemused on toodud allpool tabelis (vt Tabel 0.5):

Tabel 0.5 Kalibreerimisel saadud määramatuste ja arvutatud näidu parandi määramatuste kokkuvõtte mõõtepunktides

Etalon, g	$u_{VJ,KAAL}$, g	$u_{REP,KAAL}$, g	$u_{EKS,KAAL}$, g	$u_{ETA,KAAL}$, g	$u_{K,KAAL}$, g
5	0,006	0,006	0,012	0,000	0,014
15	0,006	0,006	0,006	0,000	0,010
30	0,006	0,006	0,006	0,000	0,010
50	0,006	0,003	0,012	0,000	0,013
100	0,006	0,003	0,006	0,000	0,009
130	0,006	0,003	0,012	0,000	0,013
150	0,006	0,003	0,006	0,000	0,009
200	0,006	0,003	0,012	0,001	0,013
300	0,006	0,003	0,012	0,001	0,013
450	0,006	0,003	0,012	0,001	0,013

Komponentide kaalumise mõõtemääramatus

Komponentide kaalumise liitmääramatus arvutati vastavalt valemile (4.3). Komponentide kaalumise liitmääramatuste kokkuvõtte on toodud allpool tabelis (vt Tabel 0.6). Selleks, et lihtsustada edasisi arvutusi, otsustati edaspidi kasutada leitud suurimat komponentide kaalumise liitmääramatust, milleks oli 5 g mõõtepunktis leitud u_{KOMP} väärtusega 0,024 g.

Tabel 0.6 Mobiilsete laborite komponentide kaalumise liitmääramatuse arvutamise lähteandmed ja tulemused mõõtepunktides

Etalon, g	$u_{REP,KAAL}$, g	$u_{K,KAAL}$, g	$u_{VJ,KAAL}$, g	$u_{LIN,KAAL,A}$, g	$u_{REP,KAAL,A}$, g	u_{KOMP} , g
5	0,006	0,014	0,006	0,017	0,003	0,024
15	0,006	0,010	0,006	0,017	0,003	0,022
30	0,006	0,010	0,006	0,017	0,003	0,022
50	0,003	0,013	0,006	0,017	0,003	0,023
100	0,003	0,009	0,006	0,017	0,003	0,021
130	0,003	0,013	0,006	0,017	0,003	0,023
150	0,003	0,009	0,006	0,017	0,003	0,021
200	0,003	0,013	0,006	0,017	0,003	0,023
300	0,003	0,013	0,006	0,017	0,003	0,023
450	0,003	0,013	0,006	0,017	0,003	0,023

Lisa 3 Koormuselementide kalibreerimise eeskiri

Kaalumisprotsessi selgitus

Koormuselementide kalibreerimiseks pidi esmalt paika panema, kuidas neid kasutatakse. Oli teada, et mobiilsete laborite mass oli 3 kg kuni 3,5 kg. Kõige raskema komponendi mass oli umbes 500 g. Kui kõige kergemast mobiilsest laborist kaob ära kõige raskem komponent, siis on mobiilse labori mass umbes 2,5 kg. See tähendas, et koormuselemente kasutati vahemikus 2,5 kg kuni 3,5 kg. Mõõtmispiirkonnast tulenevalt otsustati koormuselemendid kalibreerida järgnevates mõõtepunktides:

- 2500 g
- 2700 g
- 2900 g
- 3100 g
- 3300 g
- 3500 g

Kalibreerimiseks kasutati F1 klassi etalonmasse. Koormuselementidele tehti kaaluplatvorm 10 mm paksust vineerpuidust, kuna see oli odav ning lihtsasti käsitletav. Samas oli vineerpuit jäik.

Eesmärgiks seati, et mobiilse labori kaalumise võtaks aega vähem kui 10 s, alustades mobiilse labori paigutamisest kaaluplatvormile ning lõpetades mõõtetulemusega. Võrdluseks saab tuua professionaalsema kaalu KERN PCB 1000-2, mis andis mõõtetulemuse keskmiselt kolme sekundiga.

Mõõtetulemuse saamiseks tuli koostada programm. Kasutades HX711 ADM moodulit, oli võimalik saada koormuselemendilt mõõdiseid 10 Hz sagedusega. Programm ei pidanud jälgima kaaluplatvormi koormatavust nii suure sagedusega. Programmis otsustati võtta näit iga viie mõõdise järel. Üks näit oli viie mõõdise aritmeetiline keskmine. See muutis koormuselementidelt saadud tulemused stabiilsemaks ning jälgitavamaks.

Programmi alguses kasutati kaalul Tare funktsiooni, et näit nullida. Programm pidi tuvastama, kui mobiilne labor on paigutatud kaaluplatvormile, ootama, et näit stabiliseeruks ning pärast näidu stabiliseerumist võtma mõõtetulemuse. Prototüüp tuvastas, et mobiilne labor on paigutatud kaaluplatvormile, kui näitude väärus ületas 2

kg piiri. 2 kg piiri ületamine andis prototüübile teada, et see peab hakkama kontrollima näidu stabiilsust. Kui kaaluplatvormile esinev koormus jäi alla 2 kg piiri, siis ei andnud prototüüp mõõtetulemust. 2 kg piiri kasutamine välistas võimaluse, et mõõtetulemuseks oleks null või mõni teadmata väärtus.

Prototüüp tuvastas, et näit oli stabiliseerunud, kui eelneva ja järgneva näidu vahe absoluutväärtus oli väiksem näidu muutuse tolerantsist ΔP_T . Koormuselemendile omase näidu muutuse tolerantsi väärtuse määramiseks viidi läbi katsed.

Kui prototüüp oli tuvastanud, et näit oli stabiliseerunud, siis võttis mõõtetulemuseks prototüüp kümme näitu. Mõõtetulemuse aritmeetiline keskmine oli mobiilse labori massi hinnang. Lisaks massi hinnangule arvutas prototüüp näidu määramatuse $u(L_m)$. Selle jaoks leidis prototüüp näitudest suurima $m_{max,näit}$ ja väikseima $m_{min,näit}$ väärtusega näidu ning viis läbi arvutuse (0.5) [16]:

$$u(L_m) = \frac{m_{max,näit} - m_{min,näit}}{2 \cdot \sqrt{3}}. \quad (0.5)$$

Kalibreerimistegur

ADM muutis koormuselementidelt saadava analoog väärtuse digitaalseks väärtuseks. Algselt ei olnud teada, millisele koormusele ADM-lt saadav väärtus vastab. Selleks, et luua seos ADM-lt saadava väärtuse ning kaaluplatvormil asetseva massi väärtuse vahel, kasutati kalibreerimistegurit. Kalibreerimistegur on tegur millega ADM-lt saadud väärtus läbi jagatakse.

Kalibreerimisteguri leidmiseks kasutati Nathan Seidle loodud programmi [62] ning bogde loodud teeki [53]. Kalibreerimisteguri määramiseks asetati etalonmass nimiväärtusega 3500 g kaaluplatvormi keskele. Seejärel muudeti kalibreerimistegurit suuremaks või väiksemaks kuni näit oli võrdne etalonmassi nimiväärtusega

Näidu muutuse tolerants

Kui kalibreerimistegur oli määratud, siis järgmiseks määrati näidu muutuse tolerants. Mõõtmised viidi läbi kahes mõõtepunktis 2500 g ning 3500 g. Mõlemas mõõtepunktis korrati katsed kolm korda. Mõõtmisi tehes kasutati programmi, mis esitas ekraanil näidu, mis oli iga viie mõõdise aritmeetilise keskmise. Mõõtmiste eesmärgiks oli teha kindlaks, kui palju näit tõusva koormuse olekus ja stabiilses olekus muutub.

Esmalt alustati kontrolleriil programm. Kui ekraanile ilmus esimene näit, alustati aja mõõtmiseks taimer. Seejärel asetati vastav etalonmass kaaluplatvormile. Oodati, et taimer jõuaks kahekümne sekundini, misjärel kontrolleri lülitati välja.

Näitudest moodustati tabel, mis kujutas näidu muutust ajas. Seejärel märgiti ära, ajahetk kus etalonmass kaaluplatvormile asetati ja näidu väärtus tõusma hakkas. Ajahetkele, kus näidu väärtus tõusma hakkas, liideti juurde kümme sekundit ning saadud ajahetke väärtus märgiti ära. Selle tulemusel saadi ajavahemik, mille vältel prototüüp pidi mõõtetulemuse saavutama. Kümne sekundi vahemikus lahutati iga järgneva näidu väärtusest eelmise näidu väärtus ning igast näitude vahest võeti absoluutväärtus. Vaadeldes graafikut jaotati kümne sekundi vahemik kaheks: olukord, kus näit tõusis ning olukord, kus näit oli stabiliseerunud. Näidu stabiilses olekus leiti maksimaalne näidu vahe, mille põhjal määrati näidu muutuse tolerantsi ΔP_T väärtus. Samas vaadati, et tõusva koormuse olekus oleks näitude vahe märgatavalt suurem, kui stabiilses olekus.

Kuna mõõtmine eeldas, et kõik etalonmassid asetatakse kaaluplatvormile üheaegselt, siis asetati etalonmassid esmalt metallist plaadile ning seejärel asetati metallist plaat koos kõikide etalonmassidega kaaluplatvormile. Metallist plaadi mass kaaluti KERN PCB 1000-2 kaalu abil. Saadud tulemusele liideti kaalu kalibreerimisel saadud näidu parand (vt Lisa 2). Pärast parandi lisamist saadud metallist plaadi mass liideti etalonmasside nimiväärtusele.

Parandid

Kui näidu muutuse tolerants oli määratud, oli võimalik luua sobiv programm, mis iseseisvalt mõõtetulemuseni jõudis. Antud programmi kasutati näidu parandite määramisel. Näidu parandid määrati vastavalt kaalu kalibreerimise eeskirjale (vt Lisa 1). Kuna mõõtmine eeldas, et kõik etalonmassid asetatakse kaaluplatvormile üheaegselt, siis asetati etalonmassid esmalt metallist plaadile ning seejärel asetati metallist plaat koos kõikide etalonmassidega kaaluplatvormile.

Korratavus

Korratavusest tulenev määramatus saadi vastavalt kaalu kalibreerimise eeskirjale (vt Lisa 1). Igas mõõtepunktis tehti kümme mõõtmist. Kuna mõõtmine eeldas, et kõik etalonmassid asetatakse kaaluplatvormile üheaegselt, siis asetati etalonmassid esmalt

metallist plaadile ning seejärel asetati metallist plaat koos kõikide etalonmassidega kaaluplatvormile. Metallist plaat lisas küll kaaluplatvormile lisakoormust, kuid ei mõjutanud katse lõpptulemust, kuna mõõtetulemusi võrreldi omavahel.

Ekstsentriline koormamine

Ekstsentrilisest koormamisest tulenev määramatus saadi vastavalt kaalu kalibreerimise eeskirjale (vt Lisa 1). Kuna mõõtmine eeldas, et kõik etalonmassid asetatakse kaaluplatvormile üheaegselt, siis asetati etalonmassid esmalt metallist plaadile ning seejärel asetati metallist plaat koos kõikide etalonmassidega kaaluplatvormile. Metallist plaat lisas küll kaaluplatvormile lisakoormust, kuid ei mõjutanud katse lõpptulemust, kuna mõõtetulemusi võrreldi omavahel.

Resolutsioon

Kuigi ADM-st tulenev eraldusvõime oli väga väike, ei tähendanud see, et prototüüp suudab eristada sama väikseid muutuseid kaaluplatvormi koormuses. Selleks, et teha kindlaks kui suurt muutust koormuselement suudab tuvastada kasutati programmi, mis võttis näidu, mis oli viie mõõdise aritmeetiline keskmine ning kuvas selle ekraanil.

Mõõtmiste käigus esmalt käivitati programm. Seejärel asetati kaaluplatvormile mõõtepunktile vastav etalonmass. Kui näit oli stabiliseerunud, asetati kaaluplatvormile väikse nimimassiga F1 klassi lisaviht, oodati kolm sekundit ning lisaviht eemaldati taas kaaluplatvormilt. Mõõtmiste tulemustes taheti näha lisavihi nimimassile võrdset muutust näidus nii lisavihi lisamisel kui ka eemaldamisel. Kui muutus näidus oli ebaselge või mitteeristatav, siis järeldati, et koormuselement ei suutnud lisavihi nimimassi suurust muutust koormuses eristada ning järgnevad katsed viidi läbi lisavihuga, mille nimimass oli suurem.

Mõõtmised viidi läbi mõõtepunktis 3500 g ning katsed korrati kümme korda. Vastavalt lisavihi nimiväärtusele E_R arvutati resolutsioonist tulenev määramatus u_{RES} valemiga (0.6) [16]:

$$u_{RES} = \frac{E_R}{\sqrt{3}} \quad (0.6)$$

Lineaarsus ja hüsterees

Mõõtmiste tegemiseks kasutati programmi, mis võttis näidu, mis on viie mõõdise aritmeetiline keskmine ning kuvas selle ekraanil. Mõõtmised viidi läbi kaheksas mõõtepunktis. Mõõtepunktid olid:

- 50 g
- 100 g
- 500 g
- 1500 g
- 2500 g
- 3000 g
- 3500 g
- 4000 g

Mõõtmiste käigus paigutati etalonmasse järjest kaaluplatvormi keskele kasvavas järjekorras. Pärast iga etalonmassi lisamist oodati, et näit stabiliseeruks ning näit pandi kirja. Kui jõuti 4000 grammini, siis eemaldati etalonmassid vastupidises järjekorras kaaluplatvormilt ning igas mõõtepunktis pandi taas näit kirja.

Järgmiseks vaadeldi näite, mis saadi kaaluplatvormi kasvava koormamise korral. Igast näidust lahutati vastava etalonmassi nimiväärtus. Leiti maksimaalne näidu ja etalonmassi nimiväärtuse vahe $\Delta P_{LIN,max}$. Selle põhjal sai arvutada lineaarsusest tuleneva määramatuse u_{LIN} valemiga (0.7) [16] [63]:

$$u_{LIN} = \frac{|\Delta P_{LIN,max}|}{\sqrt{3}}. \quad (0.7)$$

Hüstereesist tuleneva määramatuse leidmiseks oli vaja igast näidust, mis saadi kasvava koormuse puhul, lahutada näit, mis saadi kahaneva koormuse puhul. Leiti maksimaalne näitude vahe $\Delta P_{HÜS,max}$. Selle põhjal oli võimalik arvutada hüstereesist tulenev määramatus $u_{HÜS}$ valemiga (0.8) [16] [63]:

$$u_{HÜS} = \frac{|\Delta P_{HÜS,max}|}{\sqrt{3}}. \quad (0.8)$$

Lisa 4 Koormuselementide kalibreerimise tulemused

Mõõtmised viidi läbi vastavalt koormuselementide kalibreerimise eeskirjale (vt Lisa 3).

Kalibreerimisteguri määramine

NA1 koormuselemendil määrati kalibreerimisteguriks 902,7 ning CZL-601 koormuselemendil määrati kalibreerimisteguriks 881,2.

Näidu muutuse tolerantsi määramine

NA1 koormuselemendi puhul kõikus näit stabiilses olekus maksimaalselt 0,15 g ning tõusva koormuse olekus kõikus näit minimaalselt 3,85 g. CZL-601 koormuselementide puhul kõikus näit stabiilses olekus maksimaalselt 0,17 g ning tõusva koormuse olekus kõikus näit minimaalselt 19,64 g. Mõlema koormuselemendi näidu muutuse tolerantsi ΔP_T väärtuseks määrati 0,2 g.

Allpool tabelis (vt Tabel 0.7) on toodud lõik NA1 ja CZL-601 koormuselementide näidu muutuse tolerantsi määramise katsetest. Tulemused on toodud mõõtepunktis 3500 g, millele lisandus metallist plaadi mass. Metallist plaadi mass, mida kasutati etalonmasside paigutamiseks kaaluplatvormile, oli 137,4 g.

Tabel 0.7 Lõik NA1 ja CZL-601 koormuselementide näidu muutuse tolerantsi määramise mõõtetulemustest, kui koormus oli 3637,4 g

NA1			CZL-601		
Aeg, s	Näit, g	Näidu muutus, g	Aeg, s	Näit, g	Näidu muutus, g
4,7	9,17	9,12	4,8	727,62	727,34
5,1	2227,85	2218,68	5,2	3499,37	2771,75
5,5	3636,40	1408,55	5,7	3637,17	137,80
6,0	3636,45	0,05	6,1	3637,18	0,01
6,4	3636,42	0,03	6,5	3637,20	0,02
6,8	3636,45	0,03	7,0	3637,19	0,01
7,2	3636,44	0,01	7,4	3637,24	0,05
7,7	3636,48	0,04	7,8	3637,27	0,03
8,1	3636,46	0,02	8,3	3637,31	0,04
8,5	3636,50	0,04	8,7	3637,34	0,03
8,9	3636,48	0,02	9,1	3637,33	0,01
9,4	3636,50	0,02	9,6	3637,36	0,03
9,8	3636,50	0,00	10,0	3637,36	0,00
10,2	3636,52	0,02	10,4	3637,37	0,01

Tabel 0.7 järg

NA1			CZL-601		
Aeg, s	Näit, g	Näidu muutus, g	Aeg, s	Näit, g	Näidu muutus, g
10,6	3636,53	0,01	10,9	3637,39	0,02
11,1	3636,53	0,00	11,3	3637,37	0,02
11,5	3636,51	0,02	11,7	3637,36	0,01
11,9	3636,54	0,03	12,2	3637,38	0,02
12,3	3636,53	0,01	12,6	3637,41	0,03
12,8	3636,52	0,01	13,0	3637,41	0,00
13,2	3636,51	0,01	13,5	3637,41	0,00
13,6	3636,55	0,04	13,9	3637,44	0,03
14,0	3636,57	0,02	14,3	3637,44	0,00
14,5	3636,66	0,09	14,8	3637,38	0,06

Näidu parandid

Näidu parandid arvutati vastavalt valemile (0.1)(vt Tabel 0.8).

Tabel 0.8 NA1 ja CZL-601 koormuselementide näidu parandid mõõtepunktides

NA1			CZL-601		
Etalon, g	Mõõtetulemus, g	Parand, g	Etalon, g	Mõõtetulemus, g	Parand, g
2637,40	2636,70	0,70	2637,40	2637,65	-0,25
2837,40	2836,60	0,80	2837,40	2837,45	-0,05
3037,40	3036,41	0,99	3037,40	3037,55	-0,15
3237,40	3236,43	0,97	3237,40	3237,35	0,05
3437,40	3436,49	0,91	3437,40	3437,13	0,27
3637,40	3636,33	1,07	3637,40	3637,30	0,10

Korratavus

Korratavusest tulenevad määramatud arvutati vastavalt valemile (0.3)(vt Tabel 0.9 ja Tabel 0.10). Edasistes arvutustes ja võrdlustes otsustati kasutada korratavusest tuleneva määramatuse $U_{REP,ELE}$ maksimaalset väärtust, milleks oli NA1 koormuselementide puhul 0,29 g ning CZL-601 koormuselementide puhul 0,16 g.

Tabel 0.9 NA1 koormuselemendi korratavuse katse tulemused ja korratavusest tulenevad määramatused mõõtepunktides

Etalon, g	2637,40	2837,40	3037,40	3237,40	3437,40	3637,40
1	2636,96	2836,20	3036,14	3236,84	3436,76	3636,67
2	2636,36	2835,91	3036,00	3237,15	3436,97	3636,57
3	2636,23	2835,90	3035,91	3237,08	3436,89	3636,31
4	2636,12	2835,99	3036,08	3237,16	3436,85	3636,79
5	2636,20	2836,06	3036,23	3237,19	3436,76	3636,72
6	2636,21	2836,31	3036,09	3237,24	3436,75	3636,71
7	2636,25	2835,96	3036,02	3236,82	3436,91	3636,64
8	2636,20	2835,89	3036,42	3236,81	3436,75	3636,70
9	2636,05	2835,90	3036,55	3237,11	3436,78	3636,66
10	2635,96	2836,26	3036,95	3237,09	3436,75	3636,63
$U_{REP,ELE}$, g	0,29	0,12	0,30	0,12	0,06	0,14

Tabel 0.10 CZL-601 koormuselemendi korratavuse katse tulemused ja korratavusest tulenevad määramatused mõõtepunktides

Etalon, g	2637,40	2837,40	3037,40	3237,40	3437,40	3637,40
1	2637,11	2837,30	3037,28	3237,18	3437,11	3637,11
2	2637,65	2837,36	3037,35	3237,35	3437,23	3637,17
3	2637,39	2837,51	3037,36	3237,21	3437,12	3637,20
4	2637,42	2837,27	3037,32	3237,13	3437,12	3637,16
5	2637,46	2837,35	3037,25	3237,20	3437,13	3637,00
6	2637,31	2837,49	3037,16	3237,20	3437,26	3637,13
7	2637,50	2837,40	3037,28	3237,33	3437,25	3637,17
8	2637,39	2837,36	3037,02	3237,20	3437,31	3637,00
9	2637,44	2837,46	3037,22	3237,21	3437,14	3636,97
10	2637,36	2837,35	3037,32	3237,19	3437,14	3637,11
$U_{REP,ELE}$, g	0,16	0,07	0,10	0,06	0,06	0,07

Ekstsentriline koormamine

Ekstsentrilisest koormamisest tulenevad määramatused arvutati vastavalt valemile (0.4)(vt Tabel 0.11 ja Tabel 0.12). Edasistes arvutustes ja võrdlustes otsustati kasutada ekstsentrilisest koormamisest tuleneva määramatuse $U_{EKS,ELE}$ maksimaalset väärtust, milleks oli NA1 koormuselementide puhul 0,46 g ning CZL-601 koormuselementide puhul 0,58 g.

Tabel 0.11 NA1 koormuselemendi ekstsentrilise koormamise katse tulemused ja ekstsentrilisest koormamisest tuluvad määramatud mõõtepunktid

Etalon, g	1	2	3	4	5	$U_{EKS,ELE}$, g
2637,40	2637,90	2637,39	2637,57	2638,15	2637,66	0,29
2837,40	2837,40	2837,80	2837,76	2837,74	2837,79	0,23
3037,40	3037,80	3037,70	3037,77	3037,29	3037,09	0,41
3237,40	3237,77	3237,42	3237,61	3236,98	3237,09	0,46
3437,40	3437,99	3437,73	3438,45	3438,21	3438,14	0,27
3637,40	3637,66	3637,47	3637,35	3637,58	3637,18	0,28

Tabel 0.12 CZL-601 koormuselemendi ekstsentrilise koormamise katse tulemused ja ekstsentrilisest koormamisest tuluvad määramatud mõõtepunktid

Etalon, g	1	2	3	4	5	$U_{EKS,ELE}$, g
2637,40	2637,20	2637,18	2637,69	2637,64	2637,24	0,28
2837,40	2837,30	2837,36	2837,68	2837,59	2837,20	0,22
3037,40	3036,91	3037,38	3037,55	3037,36	3037,20	0,37
3237,40	3237,24	3237,26	3237,67	3237,32	3237,02	0,25
3437,40	3436,83	3437,24	3437,47	3437,23	3437,00	0,37
3637,40	3636,67	3637,21	3637,67	3637,10	3636,82	0,58

Resolutsioon

Kuna mõlema koormuselementide näidu muutuse tolerantsid olid 0,2 g, siis resolutsioon pidi olema sellest suurem. Resolutsiooni katse tulemuste põhjal järeldati, et koormuselemendid tunnetavad arusaadavalt 0,5 g muutust (vt Tabel 0.13). Sellest sai järeldada, et vastavalt valemile (0.6) olid koormuselementide resolutsioonist tulenevate määramatuste $U_{RES,ELE}$ väärtused 0,29 g.

Tabel 0.13 NA1 ja CZL-601 koormuselementide resolutsiooni katse tulemused

	NA1		CZL-601	
	Tõus	Langus	Tõus	Langus
1	0,49	0,48	0,56	0,41
2	0,55	0,47	0,51	0,44
3	0,51	0,43	0,55	0,49
4	0,53	0,51	0,53	0,40
5	0,56	0,50	0,54	0,40
6	0,68	0,40	0,59	0,42
7	0,51	0,54	0,58	0,42
8	0,50	0,50	0,66	0,42
9	0,55	0,52	0,53	0,47
10	0,50	0,51	0,55	0,41

Lineaarsus ja hüsterees

Koormuselementide lineaarsusest tulenevad määramatused arvutati vastavalt valemile (0.7)(vt Tabel 0.14).

Tabel 0.14 NA1 ja CZL-601 koormuselementide lineaarsuse katse tulemused ja lineaarsusest tulenevad määramatused

Etalon, g	NA1		CZL-601	
	Näit, g	Vahe, g	Näit, g	Vahe, g
50	49,87	0,13	50,03	0,03
100	100,20	0,20	100,05	0,05
500	500,25	0,25	500,16	0,16
1500	1500,30	0,30	1500,21	0,21
2500	2499,99	0,01	2500,18	0,18
3000	2999,53	0,47	3000,10	0,10
3500	3499,51	0,49	3499,97	0,03
4000	3999,30	0,70	3999,77	0,23
	$u_{LIN,ELE}$, g	0,40		0,13

Koormuselementide hüstereesist tulenevad määramatused arvutati vastavalt valemile (0.8)(vt Tabel 0.15).

Tabel 0.15 NA1 ja CZL-601 koormuselementide hüstereesi katse tulemused ja hüstereesist tulenevad määramatused

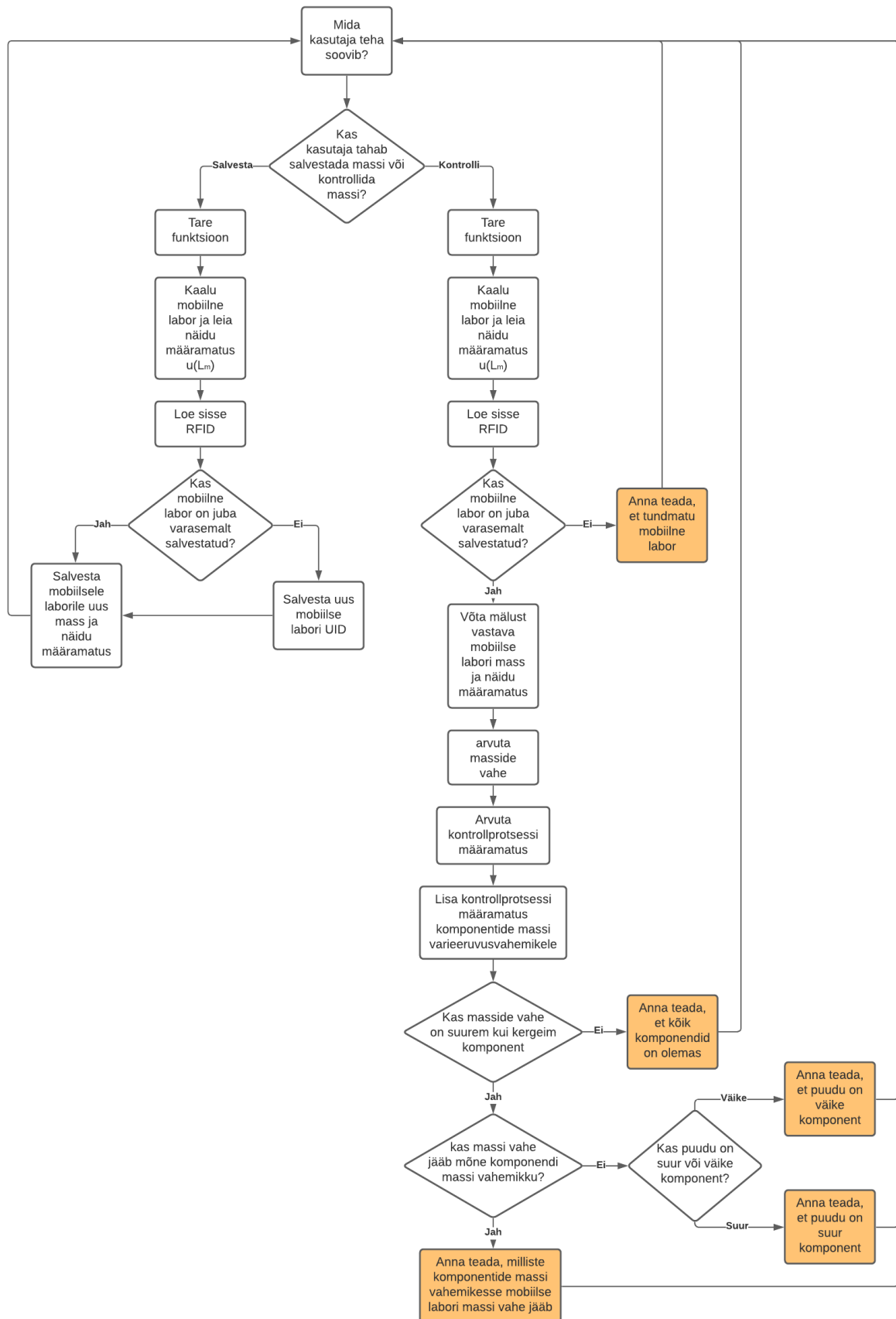
Etalon, g	NA1			CZL-601		
	Tõus	Langus		Tõus	Langus	
Näit, g	Näit, g	vahe, g		Näit, g	Näit, g	vahe, g
50	49,87	50,45	0,58	50,03	50,19	0,16
100	100,20	100,24	0,04	100,05	100,27	0,22
500	500,25	500,19	0,06	500,16	500,34	0,18
1500	1500,30	1500,16	0,14	1500,21	1500,30	0,09
2500	2499,99	2499,89	0,10	2500,18	2500,15	0,03
3000	2999,53	2999,55	0,02	3000,10	2999,96	0,14
3500	3499,51	3499,54	0,03	3499,97	3499,92	0,05
4000	3999,30			3999,77		
		$u_{HÜS,ELE}$, g	0,33			0,13

Allpool tabelis on toodud kokkuvõtte komponentidest, mida kasutati prototüübis, nende kogus ja kogusele vastav hind (vt Tabel 0.16).

Tabel 0.16 Prototüübi komponentide loetelu, kogus ja kogusele vastav hind

Komponent	Kogus, tk	Hind, €
ADM	1	3,49
Koormuselement	1	15,37
RFID-kleepsud	40	12,80
RFID-lugeja	1	5,73
LCD-ekraan	1	4,75
Lüliti	2	0,85
Arduino UNO	1	17,70
Toide	1	2,05
Takistid	5	0,00
Ühendusjuhtmed	-	0,00
Alumiiniumplaat	2	0,00
Piirajad	4	0,00
Kõrgendused	2	0,00
Korpuse paneel	1	0,00
Korpuse alus	1	0,00
Kinnitusvahendid	-	0,00
	Kokku:	62,74

Lisa 6 Prototüübi programmi diagramm



Joonis 0.2 Ekraanitõmmis programmist Lucidchart. Prototüübi tüviprogrammi diagramm

Lisa 7 Prototüübi katsetamise eeskiri

Enne katsete läbi viimist oli veendunud, et prototüüp salvestab andmed korrektselt mällu ning suudab mälust korrektselt andmeid lugeda. Samas veenduti, et RFID-lugeja, koormuselement, LCD-ekraan ja nupud toimivad korrektselt. Katsed viidi läbi kolme mobiilse laboriga, mille külge kinnitati RFID-kleepsud. Enne katsete alustamist tühjendati Arduino UNO EEPROM mälu.

Katsed viidi läbi kahes osas. Esimeses osas viidi läbi kõik allpool nimetatud etapid, nii mobiilsete laborite salvestamine, kui ka kontrollimine. Katse teine osa viidi läbi nädalaga pärast katse esimese osa läbimist. Katse teises osas viidi läbi ainult mobiilsete laborite kontrollimine, ehk kõik allpool nimetatud etapid välja arvatud salvestamata mobiilsete laborite kontrollimine ning mobiilsete laborite salvestamine. Katse teine osa viidi läbi nädal aega pärast salvestamist, et simuleerida mobiilse labori tagastamist ning näha, kas prototüüp suudab nädal aega hiljem tuvastada puuduvaid komponente korrektselt. Katse eesmärgiks oli näha, et prototüüp pakub alati komponendi, mis mobiilsest laborist eemaldatud oli. Samas taheti näha, et prototüüp toimib eriolukordades korrektselt.

Katsete ajal pandi kirja mobiilsete laborite mass, kus olid kõik komponendid olemas. Lisaks jälgiti katsete ajal kontrollprotsessi määramatust. Samas kontrolliti, kui palju mingi protsess prototüübil aega võtab. Aja mõõtmist alustati prototüübi paneelil nupu vajutamisel. Aja mõõtmine lõpetati, kui ekraanile ilmus tulemuse tekst, nt tekst „kõik olemas“ või prototüüp alustas puuduvate komponentide loendamist.

Mobiilsete laborite salvestamine

Salvestamata mobiilse labori kontrollimine

Enne mobiilsete laborite salvestamist oli vaja kontrollida, kas prototüüp laseb salvestamata mobiilseid laboreid kontrollida. Prototüüp pidi andma kasutajale tagasiside, et tegu on tundmatu mobiilse laboriga.

Mobiilsete laborite salvestamine

Kõik kolm mobiilset laborit salvestati prototüübi mällu. Salvestamise protsess pidi toimima veatult ning andma kasutajale tagasiside, et andmed on salvestatud. Samas mõõdeti ka salvestamisprotsessi aega.

Mobiilsete laborite kontrollimine

Komplekse mobiilse labori kontroll

Enne komponentide kadumise simuleerimist oli vaja kontrollida olukorda, kus kõik komponendid olid mobiilses laboris olemas. Antud olukorras pidi prototüüp andma vastuseks, et kõik komponendid on olemas. Samas kontrolliti olukorda, kus kõik komponendid olid mobiilses laboris olemas kuid kõikide komponentide asukoht muudeti mobiilses laboris ära. See kinnitas, et prototüübi tulemus ei olenenud komponentide asukohast mobiilses laboris.

Komponentide kadumise simuleerimine

Komponentide kadumise simuleerimiseks eemaldati mobiilne labor prototüübilt. Seejärel eemaldati mobiilsest laborist vastav komponent. Pärast komponendi eemaldamist vajutati prototüübil kontrolli nuppu, et alustada kontrolliprotsess. Puuduva komponendiga mobiilne labor asetati prototüübile. Seejärel pandi kirja prototüübi poolt pakutud komponendid, mis võisid puudu olla. Samas mõõdeti kontrollimisprotsessi aega, kui mobiilsest laborist oli puudu takisti või analoog multimeeter. Pärast tulemuste kirja panemist, eemaldati mobiilne labor prototüübilt ning puudev komponent asetati tagasi mobiilsesse laborisse.

Esmalt simuleeriti väiksete komponentide kadumist. Väiksed komponendid olid:

- takisti,
- kondensaator,
- induktiivpool,
- ühendusjuhe.

Järgmiseks simuleeriti hinnaliste komponentide kadumist. Hinnalised komponendid olid:

- signaaligeneraator ja ostsilloskoop,
- operatsioonivõimendi,
- analoog multimeeter,
- digitaalne multimeeter,

- alalisvoolu toiteallikas.

Viimaks simuleeriti olukorda, kus mobiilsest laborist eemaldati mitu rasket komponenti. Katses oli vaja näha, et prototüüp annab tagasisideks, et mobiilsest laborist on palju komponente puudu. Selleks eemaldati mobiilsest laborist korraga:

- analoog multimeeter,
- digitaalne multimeeter,
- toitejuhe.

Komponentide lisamine

Simuleeriti olukorda, kus mobiilsesse laborisse oli lisatud mõni komponent. Selleks eemaldati mobiilne labor prototüübilt. Seejärel lisati mobiilsesse laborisse vastav komponent. Pärast komponendi lisamist vajutati prototüübil kontrolli nuppu, et alustada kontrollprotsess. Lisatud komponendiga mobiilne labor asetati prototüübile. Katses oli vaja näha, et prototüüp annab tagasisideks, et midagi on lisatud. Pärast mobiilse labori kontrollimist, eemaldati mobiilne labor prototüübilt ning mobiilsest laborist eemaldati lisatud komponent.

Katse viidi läbi kerge komponendiga ning raske komponendiga. Komponentidena kasutati:

- takistit,
- analoog multimeetrit.

Maksimaalse koormuse ületamine

Kõige raskemale mobiilsele laborile lisati F1 klassi etalonmasse nii, et masside summa ületaks 4,5 kg. Katses oli vaja näha, et prototüüp annab tagasisideks, et kaalul on liiga suur koormus ning naaseb algmenüüsse.

Lisa 8 Prototüübi katsetamise tulemused

Katsed viidi läbi vastavalt prototüübi katsetamise eeskirjale (vt Lisa 7). Katsetes kasutati mobiilseid laboreid numbritega 334, 364 ja 358. Mobiilne labor 334 oli mobiilsete laborite komponentide kaalumisel kõige kergem mobiilne labor. Mobiilne labor 358 oli mobiilsete laborite komponentide kaalumisel kõige raskem mobiilne labor. Mobiilne labor 364 valiti suvaliselt.

Katse esimene osa

Salvestamata mobiilse labori kontrollimine

Kõigi kolme mobiilse labori puhul kaalus prototüüp mobiilse labori ära, luges sisse RFID ning andis teada, et tegu on tundmatu mobiilse laboriga. Seejärel naasis prototüüp algmenüüsse.

Mobiilsete laborite salvestamine

Kõigi kolme mobiilse labori puhul toimis salvestamisprotsess veatult. Salvestamisprotsess võttis aega keskmiselt 14 s.

Mobiilsete laborite kontrollimine

Mobiilsete laborite kontrollprotsess võttis aega maksimaalselt 18 s. Katsete ajal oli maksimaalne kontrollprotsessi määramatus 2,24 g. Allpool tabelis on toodud katse esimeses osas kaalutud kompleksete mobiilsete laborite massid, prototüübi pakutud puuduvad komponendid ja eriolukorrad vastavalt olukorrale (vt Tabel 0.17).

Tabel 0.17 Prototüübi katsetamise esimese osa tulemused. Mobiilse labori number, komplekse mobiilse labori mass, simuleeritud olukorrad ning prototüübi vasted olukordadele

Mobiilse labori nr.	334	364	358
Komplekse labori mass, g	2947,35	3289,40	3549,01
	Prototüübi pakutud puuduvad komponendid	Prototüübi pakutud puuduvad komponendid	Prototüübi pakutud puuduvad komponendid
Kõik komponendid olemas	Kõik olemas	Kõik olemas	Kõik olemas
Kõik komponendid ümber paigutatud	Kõik olemas	Kõik olemas	Kõik olemas
Kui on puudu:			
Takisti	Takisti, kondensaator	Takisti, kondensaator	Takisti, kondensaator
Kondensaator	Takisti, kondensaator, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, kondensaator	Takisti, kondensaator
Induktiivpool	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe
Ühendusjuhe	Ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe
Ostsilloskoop	Ostsilloskoop	Ostsilloskoop	Ostsilloskoop
Operatsioonivõimendi	-	-	Operatsioonivõimendi, ostsilloskoop
Analoog multimeeter	Analoog multimeeter	Analoog multimeeter	Analoog multimeeter
Digitaalne multimeeter	Digitaalne multimeeter	Digitaalne multimeeter	Digitaalne multimeeter
Alalisvoolu toiteallikas	Alalisvoolu toiteallikas	Ostsilloskoop, alalisvoolu toiteallikas	Alalisvoolu toiteallikas
Multimeetrid+toitejuhe	Palju asju puudu	Palju asju puudu	Palju asju puudu
Kui on lisatud takisti	Midagi lisatud	Midagi lisatud	Midagi lisatud
Kui on lisatud analoog multimeeter	Midagi lisatud	Midagi lisatud	Midagi lisatud
Max koormus	-	-	Liiga suur mass

Katse teine osa

Katse teise osa käigus ilmnis, et mobiilsete laborite mass oli muutunud. Kasutades F1 klassi etalonmasse veenduti, et prototüübi näit oli õige. Sellest tulenevalt järeldati, et mobiilsete laborite mass oli muutunud keskmiselt 4,6 g võrra kergemaks. Massi muutusest tulenevalt ei andnud prototüüp korrektseid vastuseid. Kontrollprotsess võttis maksimaalselt aega 16 s. Katsete ajal oli maksimaalne kontrollprotsessi määramatus 2,25 g. Allpool tabelis on toodud katse teises osas kaalutud kompleksete mobiilsete laborite massid, prototüübi pakutud puuduvad komponendid ja eriolukorrad vastavalt olukorrale (vt Tabel 0.18).

Tabel 0.18 Prototüübi katsetamise teise osa tulemused. Mobiilse labori number, komplekse mobiilse labori mass, simuleeritud olukorrad ning prototüübi vasted olukordadele

Mobiilse labori nr.	334	364	358
Komplekse labori mass, g	2943,35	3284,58	3543,91
	Prototüübi pakutud puuduvad komponendid	Prototüübi pakutud puuduvad komponendid	Prototüübi pakutud puuduvad komponendid
Kõik komponendid olemas	Takisti, kondensaator	Takisti, kondensaator	Takisti, kondensaator
Kõik komponendid ümber paigutatud	Takisti, kondensaator	Takisti, kondensaator	Takisti, kondensaator
Kui on puudu:			
Takisti	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe
Kondensaator	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe
Induktiivpool	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe	Takisti, ühendusjuhe	Takisti, ühendusjuhe
Ühendusjuhe	Väike komponent	Takisti, ühendusjuhe	Takisti, induktiivpool, ühendusjuhe
Ostilloskoop	Ostilloskoop, alalisvoolu toiteallikas	Ostilloskoop, alalisvoolu toiteallikas	Ostilloskoop, alalisvoolu toiteallikas
Operatsioonivõimendi	-	-	Ostilloskoop
Analoog multimeeter	Suur komponent	Analoog multimeeter	Analoog multimeeter
Digitaalne multimeeter	Digitaalne multimeeter	Suur komponent	Digitaalne multimeeter
Alalisvoolu toiteallikas	Alalisvoolu toiteallikas	Alalisvoolu toiteallikas	Alalisvoolu toiteallikas
Multimeetrid+toitejuhe	Palju asju puudu	Palju asju puudu	Palju asju puudu
Kui on lisatud takisti	Kõik olemas	Kõik olemas	Kõik olemas
Kui on lisatud analoog multimeeter	Midagi lisatud	Midagi lisatud	Midagi lisatud
Max koormus	-	-	Liiga suur mass