



INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

MUDELSÕIDUKI ENERGIATARBIMISE MÕÕTMINE JA VÕIMSUSE PIIRAMINE

RC MODEL ENERGY CONSUMPTION MEASURING AND POWER CONSTRAINING

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Erik Rebane

Üliõpilaskood: 179552 EAAB

Juhendaja: Heigo Mölder, insener

Tallinn 2022

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Erik Rebane (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Mudelsõiduki energia tarbimise mõõtmine ja juhtimine, mille juhendaja on Heigo Mölder,
 - 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.

18.05.2022 (*kuupäev*)

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 loomingu 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: Erik Rebane

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: mudelsõiduki energia tarbimise mõõtmine ja võimsuse kontrollimine

Kuupäev: 17.05.2022

53 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Heigo Mölder

Töö konsultant (konsultandid):

Sisu kirjeldus:

Eesmärgiks on tarbitud energiat mõõtva seadme disainimine, prototüüpimine ja katsetamine. Seade võrdleb tarbitud energiat piirmääraga ja kontrollib vastavalt juhtsignaali. Uuritakse voolu ja pinget mõõtemeetodeid ning sooritatakse katsemõõtmiseid mille põhjal hinnatakse seadme mõõtetäpsust. Seadme disainimist kajastatakse jooniste ja piltide abil. Kirjeldatakse seadme komponentide valikut ja ülesandeid.

Märksõnad: alalispinge, alalisvool, energia, INA228-Q1, laevamodellism, tootearendus, trükkplaat, Arduino,

ABSTRACT

<i>Author:</i> Erik Rebane	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> RC model energy consumption measurement and power management	
<i>Date:</i> 17.05.2022	<i>53 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Heigo Mõlder	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>The goal is to design consumed energy measuring device, prototype and test it. Device measures consumed energy and compares it to predefined limit, manipulates control signal accordingly. Voltage and current measuring methods are researched, and practical tests are made, based on the test results device's measuring accuracy is evaluated. Progress of designing the device is supported with graphs and pictures. Components selection and their roles are described.</p>	
<i>Keywords:</i> direct voltage, direct current, energy, INA228-Q1, RC shipmodelling, product development, printed circuit board, Arduino	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Mudelsõiduki energia tarbimise mõõtmine ja võimsuse kontrollimine
Lõputöö teema inglise keeles:	RC model energy consumption measuring and power management
Üliõpilane:	Erik Rebane, 179552 EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Heigo Mölder
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	31.06.2022
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2022

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Akust tarbitava energiamõõtja vajadus on ajendatud isiklikust hobitegevusest rahvusvahelisel tasemel. Eesmärk on luua rahvusvahelistele nõuetele baseeruv seade, mis on hetkel pakutavatest seadmetest odavam. Töö käigus saadakse elektroonikasüsteemi disainimise, koostamise ja katsetamise kogemus.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on luua mudelpaadis kasutatava energiamõõtja prototüüp, mis mõõdab mudeli poolt akust võetavat energiat ja on suuteline kontrollima mudelpaadi juhtsignaali ning vastab rahvusvahelistele reeglitele. Uurida erinevaid pinge ja voolu mõõtmise meetodeid ja kuidas luua süsteemne terviklahendus. Õppida toote arendamist läbi

praktilise tegevuse. Õppida mikroprotsessorite ja sensorite programmeerimist ja juhtimist.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Milline on täpseim ja optimaalseim alalispinge- ja voolu mõõtmistehnika?

Milliste seadmetega on võimalik saavutada soovitud funktsionaalsus?

Kuidas energiatarbimist piirata?

Millised on seadme funktsionaalsuse saavutamiseks vajalikud komponendid?

Kuidas koostada elektriskeem ja trükkplaat?

4. Lähteandmed

NAVIGA võistlusreeglid

Katseandmed isikliku mudelpaadi pealt

5. Uurimismeetodid

Analüüsida maailmas varem loodud lahendusi.

Lua elektroonikaskeem, planeeritud lahendus ehitada reaalseks prototüübiks.

Viia läbi teoreetiliste arvutuste ja praktiliste mõõtetulemuste võrdlus ning teostada tulemustest lähtuvalt süsteemi analüüs.

6. Graafiline osa

Joonised, tabelid, pildid.

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Ülevaade olemasolevatest lahendustest
3. Prototüübi ehitamine
4. Tarkvara
5. Katsemõõtmised
6. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Õppematerjalid

NAVIGA reeglid

Toodete andmelehed

9. Töö etapid ja ajakava

- Sissejuhatus ja probleemi kirjeldus (14.03.2022)
- Trükkplaadi versioon 1 disainimine ja komponentide tellimine (15.03.2022)
- Trükkplaadi versioon 1 komplekteerimine ja testimine (20.03.2022)
- Trükkplaadi versioon 2 disainimine ja komponentide tellimine (25.03.2022)
- Trükkplaadi versioon 2 komplekteerimine ja testimine (28.03.2022)
- Trükkplaadi versioon 2 päriseluline testimine (9.04.2022)
- Töö eelkaitsmine (25.04.2022)
- Töö esitamine (18.05.2022)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
1 SISSEJUHATUS.....	10
1.1 NAVIGA M klassi reeglid.....	10
1.2 Probleemi kirjeldus	14
2 ÜLEVAADE OLEMASOLEVATEST LAHENDUSTEST	15
3 ALGANDMETE KOGUMINE	18
3.1 Energiatarbe arvutused	18
3.2 Katsemõõtmised mudelpaadiga	21
4 LAHENDUSE KAVANDAMINE	22
4.1 Planeeritava energiapiiraja süsteemi plokkskeem	22
4.2 Komponentide valimine	23
4.3 Energiapiiraja versioon 1	26
4.4 Energiapiiraja versioon 1 katsemõõtmised.....	28
4.5 Energiapiiraja versioon 2	31
4.6 Energiapiiraja versioon 2 katsemõõtmised.....	32
4.6.1 Katse nr 1	33
4.6.2 Katse nr 2	35
4.6.3 Katse nr 3	35
4.7 Signaalitöötlus.....	38
4.8 Tarkvara.....	39
4.8.1 Tarkvaraline PLM signaali kontrollimine	40
4.8.2 Riistvaraline PLM ümberlülitus.....	41
4.9 Energia piiraja alternatiivsed kasutusala ja edasiarendused.....	42
5 KOKKUVÕTE	43
6 SUMMARY	45
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	47
LISAD	50

1 SISSEJUHATUS

Tehnikasport on inseneeria piire nihutav valdkond, pürgides üha kõrgema efektiivsuse ja võimsuse poole. Laialt levinud tehnikaspordiharuks on modellism, olgu selleks siis lennukid, autod, laevad. Neid kõiki ühendavad vähendatud mõõtmed ja juhtimisel inimese otsese kontakti puudumine ehk raadiosignaali teel juhtimine. Mudelid teeb eriliseks ja põnevaks teistmoodi väljakutsed, neile rakenduvad teadaolevad füüsikaseadused, kuid nende füüsiline suurus võrreldes lennukite, autode ja laevadega loob uusi nüansse ja nõuab probleemidele teistmoodi lähenemist. Bakalaureusetöö põhineb konkreetsest isiklikust vajadusest, mis on seotud laevamodellismiga kus NAVIGA poolt on sätestatud võistlusreeglid mudelitele ja täpsemalt energiaallikatele, akudele [1]. Piiride raames maksimaalse efektiivsuse ja võimsuse saavutamine on kulukas ja nõuab põhjalike teadmisi tehnikavaldkonnas. Loodav seade aitab vähendada võistlejate kulu mudeli energiaallikate peale ja ühtlustab võistlustingimusi, et hoida spordiala kättesaadavamana laiemale ringkonnale.

NAVIGA on rahvusvaheline organisatsioon, mis tegeleb laevamodellismi spordiga. NAVIGA koosseisu kuuluvad riikide esindused, mitte üksikisikud, nende eesmärkideks on laevamodellismi toetamine, edasiarendamine ja levitamine luues sõbralike suhteid ja juurutades sportlikku käitumist. NAVIGA on jagatud kuute erinevasse klassi, millest igaüks vastutab vastava mudeliklassi eest. Klassid on: A/B – jõhvi otsa kinnitatud kiirusmudelid; C – mittesõitvad koopiamudelid; E – kestvusvõidusõidumudelid; FSR – sisepõlemismootoriga kiirusmudelid; M – elektrimootoriga kiirusmudelid; NS – sõitvad koopiamudelid; S – purjemudelid. NAVIGA korraldab iga kahe aasta tagant igas klassis maailmameistrivõistluse, kui on piisav osalejate huvi siis ka regionaalseid võistluseid. Komitee koostab iga võistlusklassi jaoks reeglid, mis on kõigile vabalt kättesaadavad. Sportlaste eesmärk on ehitada ja arendada kiireim reeglitele vastav mudel ja üksteisega mõõtu võttes välja selgitada parimad sportlased.

1.1 NAVIGA M klassi reeglid

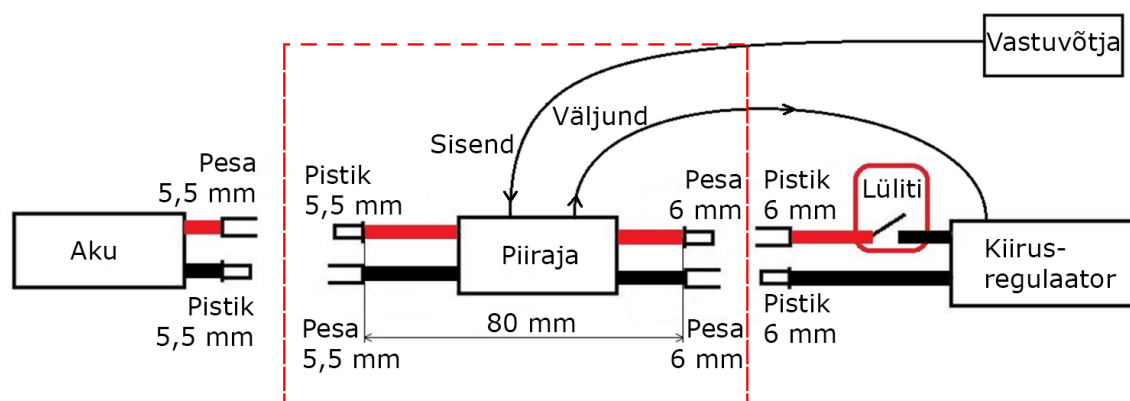
Antud töö põhineb NAVIGA M klassi reeglite põhjal [2]. M klassi kuuluvad elektrimootori jõul töötavaid kiirusmudelid ja on jagatud kaheks suuruse alusel, kokku on erinevaid võistlusklasse seitse: *Mini Eco*, *Eco*, *Mini Mono*, *Mono I*, *Mono II*, *Mini Hydro*, *Hydro*. Iga klassi *Mini* on lubatud energiaallika poolest väiksem millest tulenevalt on ka ülejäänud mudel väiksem ja kiirustelt madalam. Iga võistleja ülesanne on disainida ja ehitada reeglitele vastav mudel, mis on kiirem ja stabiilsem konkurentide omast. Mudeli ehitusel võib kasutada turul olevaid komponente või disainida vajalikud osad ise.

Töö on ülesehitatud *Eco* ja *Mini Eco* eripärasid ja nõudeid arvestades. Tabel 1.1 kajastab NAVIGA poolt aastal 2021 sätestatud reeglid energiaallikatele ehk akudel, mis on antud töö kontekstis olulised, punaselt on alla joonitud tähtsamad parameetrid.

Tabel 1.1 Eco klasside aku reeglite kontsentreeritud väljavõte [2]

Klassi energialimiit	Aku elementide arv/min/max kaal LiPo	Sõiduaeg
Eco – <u>60 Wh</u>	2S1P/2S2P/3S1P/3S2P min <u>350 gr.</u> Kaabel minimaalselt 30mm AWG 12	6 minutit
Mini Eco – <u>21 Wh</u>	2S1P/2S2P/3S1P/3S2P max <u>113 gr.</u> Kaabel minimaalselt 30mm AWG 16	6 minutit

Reeglites on lubatud kasutada kolme eri tehnoloogial põhinevaid akusid: LiPo, NiMH ja LiFePo. NAVIGA on loonud reeglistiku energiapiirajale selle parameetrite ja kasutamise kohta. Ehitatava energiapiiraja nõue kehtib kasutades LiPo tehnoloogial põhinevaid akusid sellest tulenevalt on Tabel 1.1 märgitud maksimaalne kasutatav energiahulk *Eco Mini* ja *Eco* klassi jaoks vastavalt 21 Wh ja 60 Wh. Hooajal 2019 oli lubatud *Eco* klassis kasutada piirkaaluga akut, mis koos minimaalselt 30 mm AWG 12 juhtmete ja akuelementidega ei tohtinud kaaluda rohkem kui 285 g [3]. Alternatiivina, *Mini Eco* klassis ja aastast 2021 kohustuslikuna *Eco* klassis, on lubatud kasutada energiat piiravat seadet, mis ühendatakse aku ja kiirusregulaatori vahele, piiraja on märgistatud punktiirjoonega, Joonis 1.1. Ühendades piiraja enne avariilüliti tagatakse, et seade saab toidet ka siis kui võistleja ühendab toite aku ja kiirusregulaatori vahel lahti. Piirajale pideva toite tagamisega elimineeritakse võimalus seadme energialoenduri nullimiseks läbi toite katkestuse, seadme nullimise võimaluks tegemine, ilma mudelit avamata, on üks energiapiirajale kehtestatud nõuetest. Joonisel 1.1 on punase punktiirjoonega tähistatud töös lahendatav osa.



Joonis 1.1 Energiapiiraja ühendamise mudelis [2]

Maailma- ja euroopameistrivõistlustel varustab korraldaja, NAVIGA, võistlejaid energiapiirajatega, et tagada ausus. Korraldajad eelseadistavad kõik seadmed ja katavad programmeerimispesad kinni teibiga, mis eemaldamisel puruneb, et vältida võistleja poolset ümberprogrammeerimist [2]. Regionaalsetel võistlustel järgitakse ausa võistlemise printsiipe ja kui kaasvõistlejatel tekib kahtlus väärkasutuse kohta siis arutatakse seda korraldaja ja võistlejatega.

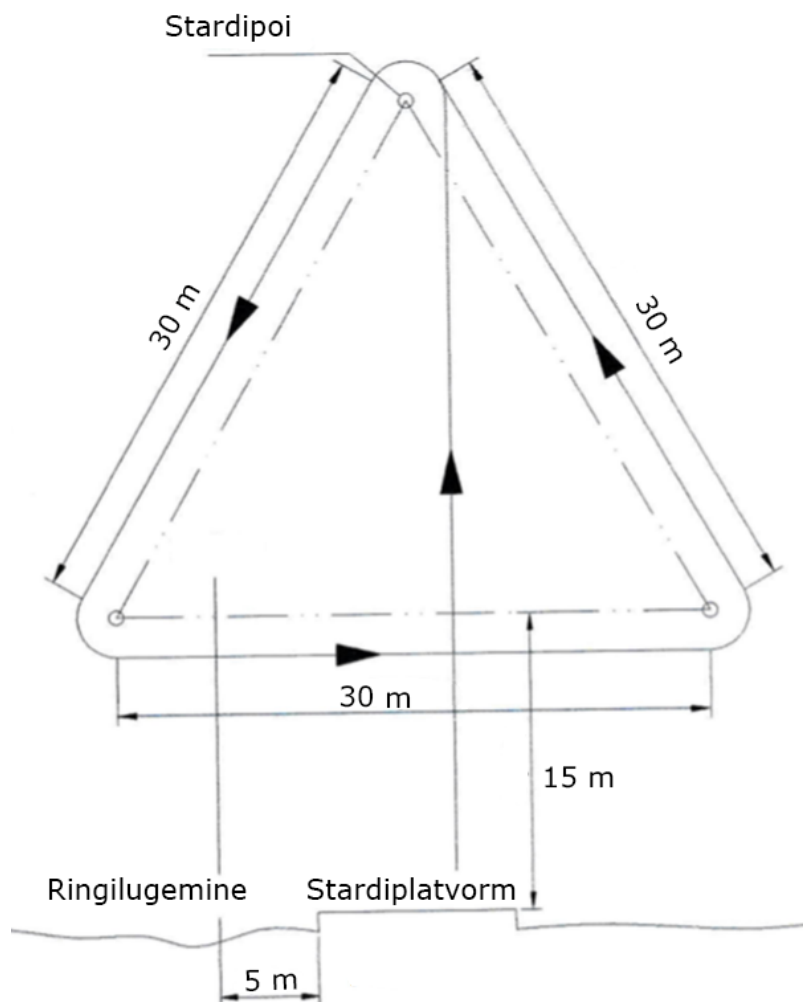
Energiapiiraja on seade, mis ühendatakse energiaallika (aku) ja tarbija (kiirusregulaatori ja harjadeta mootori) vahele. Seadme ülesandeks on mõõta kui palju akust energiat tarbitakse, võrrelda tarbitud energia hulka eelseadistatud limiidiga 21 Wh või 60 Wh. Energia limiidi saavutamisel, seisatakse mootor.

Eco Expert klassi mudel koosneb järgnevates komponentidest: kere, mootor, kiirusregulaator, servomootor, aku, raadioside vastuvõtja, tüür, kardaan, võll, sõukruvi. Lisaks on iga komponendi jaoks kere sisse ja külge paigutatud vajalikud kinnitused ja abikonstruktsioonid: mootorialus, võllitoru, servomootori alus, tüürihoidik, volukontakt. Valmistamisel kasutatakse epoksiidvaiku ja klaaskiudriideid. Kere mõlemad pooled (alumine ja pealmine) valmistatakse eraldi ja hiljem liimitakse, kasutades epoksiidvaiku ja klaaskiudriiet, omavahel kokku saades veekindla kesta. Elektroonika jaoks on kere peal ava, mis võistlemise ajaks kaetakse kinni kaanega ja teibitakse, et tagada veekindlus.



Pilt 1.1 Eco Expert kere külg ja pealtvaade

Võisteldakse võrdkülgse kolmnurga kujulisel rajal mille küljepikkus on 30m, mis on kujutatud Joonis 1.2. Rada on paigutatud selliselt, et kolmnurga tipp asub kaldal või sillal seisvatest võistlejatest kaugemal. Rada on veekogule märgistatud üldjuhul vahtmaterjalist poidega. Sõit käib vastupäeva ja eesmärk on teha kuue minuti jooksul maksimaalselt palju ringe. Korruga sõidab kuni seitse mudelit.



Joonis 1.2 Võistlusrada (Annex C1. [2])

1.2 Probleemi kirjeldus

Akudele kehtiv maksimaalkaal tekitab olukorra kus akude tootjad hakkasid tegema üha suurema energiamahuvusega akusid, kuid seda füüsilise konstruktsiooni ja isolatsioonmaterjalide arvelt, et saavutada reeglites akudele sätestatud maksimaalkaalu. Isolatsioonmaterjalide vähendamine suurendab akude ohtlikust [4]. Kõige levinum liitiumil põhinev aku, mida võistlustel kasutatakse, on LiPo, ehk liitiumpolümeeraku.

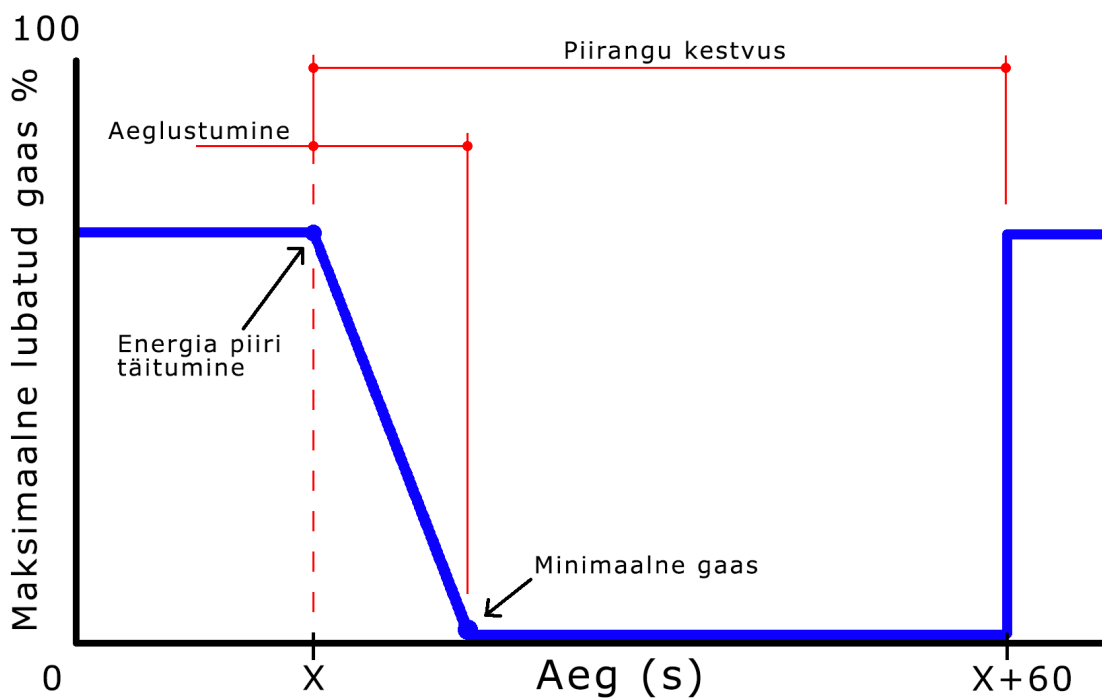
Võistlejate soov saada akust maksimaalselt energiat tähendas akud viimist väga kriitilise tühjakslaadumiseni, mis suurendas akude süttimisohtu ja kahjustas akusid. Liitiumil põhinevate akude liigne tühjakslaadimine põhjustab aku keemia muutust, mis väljendub peamiselt aku sisetakistuse muutuses. Sisetakistuse suurenemine tähendab aku laadimisel ja tühjakslaadimisel aku enda liigset soojenemist, mis võib viia aku süttimiseni [4]. NAVIGA kehtestas ka minimaalse lubatud akuelemendi jääkpinge suuruse, milleks LiPo aku puhul on 3,3 V.

Sisuliselt tekkis olukord kus uus aku pidas vastu ainult mõne võistlussõidu, kuna pärast väga tõsist tühjakslaadimist ei suuda liitiumil põhinevad akud enam hoida esialgset energia kogust ja pakkuda samalaadset võimsust kui uus aku, see omakorda tõstis võistlemise hinda lisaks niigi kõrgetele akude hindadele, mis ei ole atraktiivne uutele spordialaga liitujatele ja on seega vastuolus NAVIGA põhimõtetega. LiPo akude hinnad on sõltuvalt aku parameetritest ja kvaliteedist vahemikus 30-100 €. Ebavõrdsust suurendab ka ebaühtlane akude kättesaadavus maailmajagude vahel, mis pärsib ühtsete võistlustingimuste saavutamist. Lisaks akude ülekoormamisele esineb ka uute akude puhul mahuvuse kõikumisi, ehk pakendil olev mahuvus võib tegelikult mahuvusest olla suurem või väiksem ja seega võrdsed tingimused võistlejate jaoks ei ole garanteeritud. Energiapiirajat kasutades leevendatakse ilmnenud probleemi. Piiraja lubab akust tarbida vaid seadistatud koguse energiat ja koos piirajaga tohib kasutada akut mille mahuvus ületab tarbitava energia hulka, mis tähendab, et võistleja saab olla kindel aku jõudluses.

Turul on olemas kolme eri tootja energiapiirajad, mis erinevad üksteisest põhiliselt lisafunktsioonide poolest. Töö eesmärk on uurida kuidas selline seade töötab, millised on seadme alamosad ja milliste komponentidega on võimalik soovitud funktsionaalsus luua, tagades seejuures energia mõõtetäpsus +/-1 % või parem. Soov on luua hinnalt odavam seade kui seda on praegused pakutavad lahendused ja pakkuda võimalike seadme kasutusalasid väljaspool töö ajendiks olevat spordiala.

2 ÜLEVAADE OLEMASOLEVATEST LAHENDUSTEST


NAVIGA 2021 aasta reeglite lisas on välja toodud energiat piirava seadme nõuded ühendustele, asetsemisele mudelis kui ka funktsioonide ja parameetrite kohta [2]. Seade peab arvestama akust võetavat energiat, kui arvestatud energia saab võrdseks eelmääratud limiidiga siis katkestatakse raadiosaatja vastuvõtja ja kiirusregulaatori vahel olev pulsilaiusmodulatsioon (PLM), inglise keeles *Pulse With Modulation* (PWM), millega juhitakse mootori kiirust. Energialimiidi täitumisel peab seade sujuvalt vähendama mootori kiirust viie sekundi jooksul hetkväärtusest kuni seismajäämiseni ja seejärel alustama ühe minuti pikkust loendust, protsess on kujutatud Joonis 2.1. Ühe minuti möödumisel taastatakse side raadiosaatja vastuvõtja ja kiirusregulaatori vahel, et saaks mudeliga kalda juurde sõita. Seadme energia mõõtetäpsus peab olema +/-1 % või parem, lisaks peab olema tagatud IP67 või parem veekindlus.



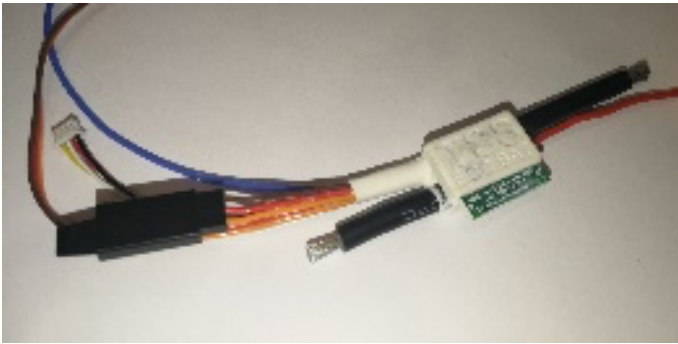
Joonis 2.1 Piirangu rakendumine

Hetkel on turul saadaval kolme eri tootja seadmed, mis vastavad NAVIGA poolt kehtestatud nõuetele ja on ka NAVIGA poolt heaks kiidetud. Tabel 2.1-3 võrdleb eri tootjate lahendusi, võrdlusest selgub, et kõigi mudelite maksimaalne pidevalt mõõdetav vool on sama, erinevad aga talutavad hetkvoolu väärtused. Kõik ülejäänud parameetrid on väikeste erinevustega kuid samas suurusjärgus, mis annab hea orientiiri valmistatava seadme komponentide valimiseks.


Tabel 2.1 Energiapiiraja „mlm eLim“ parameetrid [5]

Suurus \ Mudel	mlm eLim	Pilt
U_{sisend} V	0-60	
$I_{pidev(max)}$ A	100(160)	
f Hz	-	
R m Ω	-	
U_{jaotis} mV	4	
I_{jaotis} mA	20	
$t_{juhtsignaal}$ ms	-	
m , g (AWG 10 juhtmetega)	22	
Hind, € (11.10.21)	88,40	

Tabel 2.2 Energiapiiraja „TSS Limiter“ parameetrid [6]

Suurus \ Mudel	TSS Limiter	Pilt
U_{sisend} V	0-44	
$I_{pidev(max)}$ A	100(150)	
f Hz	300	
R m Ω	0,25	
U_{jaotis} mV	4,4	
I_{jaotis} mA	50	
$t_{juhtsignaal}$ ms	0,7-2,3	
m , g (AWG 10 juhtmetega)	18	
Hind, € (11.01.22)	95	

Tabel 2.3 Energiapiiraja „Wozniak KLW203 strong“ parameetrid [7]

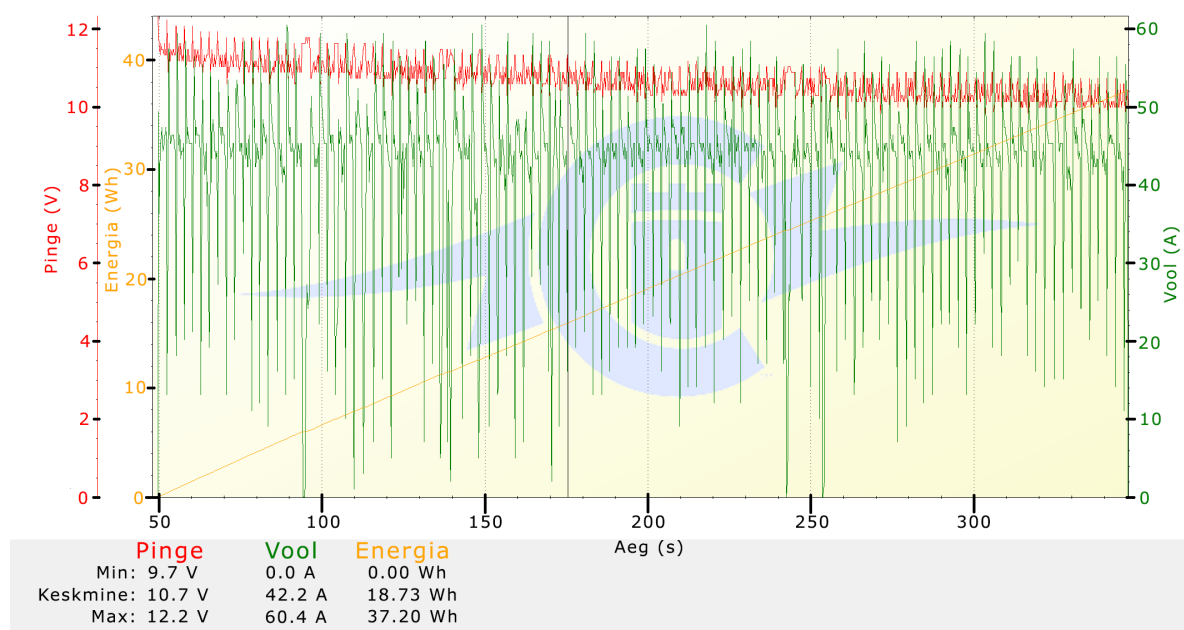
Mudel Suurus	Wozniak KLW203 strong	Pilt
$U_{sisendr}$ V	0-45	
$I_{pidev(max)}$ A	100(300)	
f Hz	333	
R m Ω	0,1	
U_{jaotis} mV	-	
I_{jaotis} mA	-	
$t_{juhtsignaal}$ ms	0,8-1,6	
m , g (AWG 10 juhtmetega)	32	
Hind, € (11.01.22)	110	

Eesmärk on luua seade, mis on olemasolevatest odavam, vähem kui 85 €, ja väga robustne oma tööpõhimõtete poolest, ehk siis ilma lisafunktsioonideta, nagu näiteks: telemeetria, andmete logimine, mobiilirakenduse abil seadistamine, mis tõstavad seadme keerukust ja võivad vähendada töökindlust. Olemasolevate lahenduste võrdlusest järeldub, et mõistlik on valida seadme parameetrite ulatused järgnevalt, pingevalutus kuni 60 V, mis on samas suurusjärgus olemasolevate seadmetega ja lubab loodava seadme kasutamist ka muudes rakendustes, nagu näiteks parvlaev NYMO [8] energiatarbimise jälgimisel. Valides seadme maksimaalseks pingeks 60 V on ruumi tulevikus tekkivate reeglumuudatuste jaoks. Voolu mõõteulatus valiti võimalike tulevikus tehtavaid muudatusi silmas pidades, kuna mudelite kiirused ja võimsused aina suurenevad. Voolu mõõtmise maksimumiks valiti 130 A, see on ühtlasi lubatud pideva mõõtmise tase, mis on rohkem kui turul pakutavatel lahendustel. Need on kaks põhiparameetrit, pinge ja vool, mis on aluseks ülejäänud süsteemi komponentide valimisel.

3 ALGANDMETE KOGUMINE

3.1 Energiatarbe arvutused

Eco Expert mudeli energiatarve on üpriski kaootiline. Ideaaltrajektoori sõites on oma kogemuste põhjal kõige optimaalsem vähendada mootori pöörded poole võrra, sooritada manööver ja siis järsul kiirendada kuni järgmise kurvini. Selline sõidustiil lubab parimat täpsust kurvi läbimisel ja vähendab võimalust, et mudel sukelduks või teeks piruetti. Pidev kiirendamine-aeglustumine tähendab aga väga suurt voolukõikumist ja ebahütlane koormus mõjutab ka akut, mis väljendub aku pinge kõikumises vooluga vastupidiselt.



Pilt 3.1 Andmeliigi *Castle Phoenix Ice100* kiirusregulaatorist

Pilt 3.1 esitab mudelpaadi voolutarbe, aku pinge ja kasutatud energia vatt-tundides. Graafik pärineb kiirusregulaatorist *Castle Phoenix Ice100* ja salvestatud andmete vaatamiseks on kasutatud tootja poolt valmistatud tarkvara *Castle Link Graph Viewer* [9][10]. Voolutarve on tähistatud roheline värviga ja selgesti eristatavad on kohad kus kiirendati või siis vähendati kiirust, kiirendamisel on voolutarve suur, aeglustumisel madal. Punasega on tähistatud aku kogupinge, mis sõitu alustades näitab 12,2 V ehk 4,06 V elemendi kohta ja sõidu lõppedes 9,7 V ehk 3,23 V elemendi kohta. Antud sõidus kasutati *RedZone* 5050 mAh 3S LiPo akut ilma energiapiirajata, ehk siis aku vastas 285 g kaalupiirangule [14].

Kui vaadata tarbitud energiahulka, mis sõidu lõpuks oli 37,2 Wh ja võrrelda seda NAVIGA reeglites maksimaalse lubatud energialimiidiga 60 Wh on näha, et kasutamata on veel suur hulk energiat ja potentsiaalset võimsust ning kiirust, selle põhjuseks on ebapiisav energiaallikas. Akust tarbiti 37,2 Wh energiat ja selle energiahulga tarbimise järel oli aku pinge langenud 9,7 V-ni ehk saanud tühjaks.

Tehti arvutused, mis kirjeldavad idealiseeritud olukorda eesmärgiga hinnata vajamineva aku mahtuvuse suurusjärku. Reaalses olukorras mõjutab aku välja antavat energiahulka aku pinge ja voolu suurus millega akut koormatakse [11]. Kasutades valemit 1 saame leida kui suur peab olema aku mahtuvus milliampertundides (mAh) kahe erineva akuelementide konfiguratsiooni puhul.

$$E_{\text{energiapiir}} = Q_{\text{aku(Ah)}} * U_{\text{nimipinge}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{aku}} = \frac{E_{\text{energiapiir}}}{U_{\text{nimipinge}}} = \frac{60}{7,4} = 8,108 \text{ Ah} \approx 8110 \text{ mAh} \quad (2)$$

Kahe elemendiga aku (2S1P/2S2P, nimipingega 7,4 V) mahtuvus peab olema suurusjärgus 8110 mAh (2).

$$Q_{\text{aku}} = \frac{E_{\text{energiapiir}}}{U_{\text{nimipinge}}} = \frac{60}{11,1} = 5,405 \text{ Ah} \approx 5400 \text{ mAh} \quad (3)$$

Kolme elemendiga aku (3S1P/3S2P, nimipingega 11,1 V). Mahtuvus peab olema suurusjärgus 5400 mAh (3).

Aku, mis kaaluks 285 g ja hoiaks endas 60 Wh energiat, ei ole laialt levinud [3]. Puuduvad 2S1P/2S2P konfiguratsioonis piisava mahtuvusega akud, seega kitseneb valik 3S1P/3S2P akude peale. Tabel 3.1 on välja toodud mõningad turul pakutavad 3S LiPo akud, mis vastavad 60 Wh kriteeriumile. Neist akudest vaid RedZone aku vastab ka kaalu piirangule, ülejäänud nõuavad legaalseks kasutamiseks energiapiiraja implementeerimist. Kuigi näitena kasutatud RedZone aku mahtuvus tootja andmete järgi on 5400 mAh, ei ole garanteeritud, et aku koormamisel annab 60 Wh energiat, sest aku võimekus sõltub koormusvoolu suurusel. LiPo aku valikul on suur roll tühjaks laadumise kordajal, mis näitab kui kiiresti suudab aku energiat välja anda. Valida tuleks võimalikult suure kordajaga aku, sest siis on aku kahjustamise oht suurte koormustel väiksem ja aku eluiga pikem.

Suurem tühjakslaadumis kordaja kaudselt tähendab aku madalamat sisetakistust ja seega koormusel väiksemat energiakadu, energiakadu väljendub aku soojenemisel [11]. Pidevat koormusvoolu saame arvutada valemi (4) järgi.

$$I_{pidev}(A) = \frac{Q_{aku} * C_{tühjakslaadimis\ kordaja}}{1000} \quad (4)$$

Tabel 3.1 Akude võrdlus

Suurus \ Tootja	ZIPPY [12]	OVONIC [13]	REDZONE [14]	SLS [15]	OVERLANDER [16]
U_{akur} V	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
Q_{akur} mAh	6200	6000	5400	5800	5800
$C_{pidev(hetkeline)}$	40(50)	50(100)	20	30(60)	35(65)
$I_{pidev\ koormus}$ V	248	300	108	174	203
m_{akur} g	309	410	283	423	398
Nõuab energiapiirajat	JAH	JAH	EI	JAH	JAH
Hind, € (12.01.22)	45,92	31,58	71,93	58,00	81,30

Aku valikul on oluline silmas pidada kui suur on koormus. Harjadeta mootori *Scorpion IS-2835-3300KV* maksimaalne vool on 68 A [17]. LiPo akust välja antav energiahulk väheneb mida kiiremini akut tühjaks laadida, seega matemaatiliselt piisab *RedZone 3S* 5400 mAh [14] akust kuid suure koormuse juures ei anna aku 60 Wh energiat välja [11].

Kuigi võistlustel on võimalik osaleda akuga milles on vähem kui 60 Wh energiat on mõistlikum kasutada ära kogu lubatud energiahulk, mille arvelt saab viia mudelpaadi kiiruse ja võimsuse maksimumini kasutades agressiivsemaid sõukruvi. Agressiivsem sõukruvi tarbib rohkem energiat kuid arendab suuremat lõppkiirust. Kuna võistluse eesmärk on ajapiirangu jooksul teha võimalikult palju ringe siis suurem mudelpaadi kiirus tähendab väiksemat aega ühe ringi läbimiseks ja lõpptulemusena suuremat läbitud ringide hulka. Olukorras kus aku tõttu ei ole võimalik kasutada 60 Wh energiat vaid näiteks ainult 37,2 Wh tuleb teha kompromisse kiiruse arvelt, valida vähem agressiivne propeller selliselt, et aku ei saaks tühjaks enne sõidu lõppu. Ka 60 Wh energiat on võimalik ära kulutada enne sõidu lõppu kui kasutad liiga agressiivset propellerit. Lühidalt on tegu optimeerimisega, milline seadistus arendab maksimaalselt suurt kiirust kasutades kuni 60 Wh energiat selliselt, et aku ei tühjeneks täielikult enne võistluse lõppu.

3.2 Katsemõõtmised mudelpaadiga

Reaalsetes võistlustingimustes korraldati võistlustel kasutatava mudelpaadiga katseseeria. Iga katse pikkuseks tehti viie minuti pikkune sõit, kokku neli sõitu, iga sõit uue täislaetud akuga. Kõik akud olid *Turnigy Zippy Compact* 6200 mAh 3S LiPo [12]. Sõitude vahel muudeti maksimaalset mootori juhtsignaali pulsi kestvust vahemikus 20-80 %, ehk 1,6-1,9 ms, millega piirati mootori maksimaalseid pöördeid ja seega kiirust. Eesmärk oli koguda andmeid aku pingele muutumise kohta erinevatel koormusastmetel ja vaadelda kas akude vanus on selgelt eristuv.

Hüpotees: mida suurem on akust tarbitud energiahulk seda kiiremini langeb aku pingele. Mootori võimsuse piiramisega määrati katse jaoks koormuse ülempiir. Lisa 1-4 on graafikud iga katse kohta kus on kujutatud pingele ja tarbitud energia. Katseseerias kasutati *Turnigy Zippy Compact* 6200 mAh 3S LiPo [12] akusid, mis olid erineva kulumisastmega.

Pinge	Aku 1	Aku 2	Aku 3	Aku 4
$U_{katse\ algus}$ V	12,57	12,60	12,57	12,57
$U_{katse\ lõpp}$ V	11,83	11,77	11,62	11,78
$U_{pärast\ laadimist}$ V	12,57	12,57	12,57	12,59
$E_{kasutatud}$ Wh	30,10	25,14	26,90	21,60

Katsetes kasutatud akudest, aku 1 oli kõige uuem (kasutatud ühe võistlushooaja), seda on näha ka sõidu lõppedes mõõdetud aku kogupingest võrreldes ülejäänud katsetes kasutatud akudega, kuigi katse nr. 1 puhul tarbiti akust kõige rohkem energiat. Akud 2 – 4 on olnud kasutuses kahel võistlushooajal.

4 LAHENDUSE KAVANDAMINE

4.1 Planeeritava energiapiiraja süsteemi plokk skeem

Voolu mõõtmisel on süsteemis kaks rolli, mõõta kui palju voolu tarbitakse ja tuvastada millal tarbitakse liiga palju ehk on tegemist äärmusliku olukorra, näiteks lühisega. Täpsete mõõteandmete põhjal on võimalik teha otsuseid süsteemi juhtimiseks, lülitada välja seadmeid energia kokkuhoiu või süsteemi normaliseerumise eesmärgil. Liigtarbimise tuvastamine aitab kaitsta ülejäänud süsteemi komponente. Voolu on võimalik mõõta otseselt ja/või kaudselt, mõlema variandi puhul on olemas erinevaid tehnoloogiaid millest igaüks oma tugevuste ja puudustega. Otsese mõõtmise tehnoloogiateks on näiteks šunt-takisti ja voolujuhi masstakistuse kaudu. Kaudse mõõtmise tehnoloogiateks on näiteks voolutrafo ja halliandur.

Šundiga voolu mõõtmise eelis on lihtsus ja lineaarsus. Takisti paigaldatakse koormusega jadamisi ja šunti läbiv vool põhjustab väikse pingelangu, mis ära mõõtes ja Ohmi seadust kasutades võimaldab arvutada voolu. Šundil tekkiv pingelang põhjustab energiakao, mis väljendub šundi soojenemises. Lisaks šundi lihtsusele ja lineaarsusele on tegu ka väga odava lahendusega millel on stabiilne temperatuuri koefitsient α_T 0,01 %/°C, mis tähendab, et takistus ei muutu väga palju šundi soojenemisel. Mõnedel spetsiaalselt voolu mõõtmise jaoks disainitud mikrokiipidel on olemas funktsioon šundi soojenemise arvestamiseks, mis tõstab mõõtetäpsust. Šundi robustsus ja lihtsus tagavad hea ja kauakestva süsteemi toimimise.

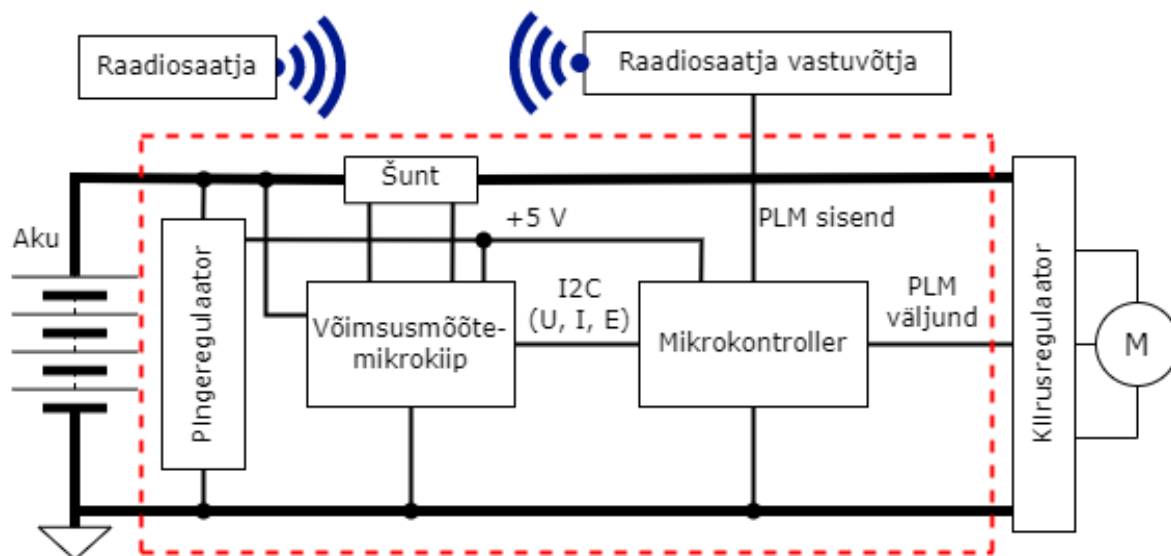
Voolujuhi masstakistuse kasutamine on kadudeta viis voolu mõõtmiseks. Takistust omab vaskjuht mille takistus on tüüpiliselt $R < 1 \text{ m}\Omega$ ja eksisteerib lisafunktsioonina juba süsteemis eksisteerivale osale. Sellel meetodil on kaks olulist puudujääki; esiteks vase α_T 0,39 %/°C, sellest tulenevalt on vaja kindlasti lisada juurde täpne temperatuuri mõõtmine ja arvutuslik mõõtetulemuse kompenseerimine tulenevalt takistuse suurenemisest temperatuuri tõusuga. Teiseks puuduseks on vase enda kvaliteedi varieeruvus, takistust sõltub ka vaskraja mõõtmetest.

Voolutrafo on kaudne, kadudeta ja isoleeritud ülejäänud ahelast. Trafo kaudu on võimalik mõõta vahelduvvoolu või pulseerivat alalisvoolu, et toimuks magnetvälja muutus millele trafo reageerib. Just vahelduvvoolu tingimuse tõttu see meetod antud töös käsitletava lahenduse jaoks ei sobi.

Halliandur on juht, mis magnetvälja asetatuna, mõõdab tekkivat potentsiaalide vahet, mis on risti magnetvälja ja samasuunalist juhti läbiva vooluga. Halliandurite eeliseks on

suutlikus mõõta suuri voolusid väga madala energiakaoga soojenemise näol. Puuduseks on aga mittelineaarne väljundi muutus sõltuvalt temperatuurist, piiratud mõõtevahemik ja mõjutavatus ümbritsevatest magnetväljadest. Lisaks on selline mõõteviis oma hinnalt kallis [18].

Energiapiiraja võib jagada funktsionaalselt kolme osa vahel – toitepinge reguleerimine, pinge ja voolu mõõtmine ning andmetöötlus. Joonis 4.1 kujutatab süsteemi osasid ja nende omavahelisi ühendusi.



Joonis 4.1 Planeeritava seadme struktuur

4.2 Komponentide valimine

Uurides erinevaid lahendusi jõuti järeldusele, et seadme jaoks on kõige mõistlikum kasutada just šunt takisti meetodit tema odava hinna, lihtsuse ja vähese ruuminõuete tõttu, mis aitab kaasa seadme lihtsusele ja kompaktsusele. Šundi valikul tuleb arvestada soovitud maksimaalset pingelangu suurima oodatava koormusvoolu puhul, oluline on ka takistuse tolerants, sest see mõjutab otseselt mõõtmistulemust. Takisti väärtust kasutatakse takistit läbiva voolu arvutamiseks Ohmi seaduse kaudu, kus pingeks on koormuse toitepinge. Mõõtes šundil tekkiva pingelangu ja teades šundi takistuse väärtust saame valemi (5) abil arvutada šunti läbiva voolu.

$$I_{\text{šunt}} = \frac{U_{\text{šunt}}}{R_{\text{šunt}}} \quad (5)$$

Lahenduse jaoks valiti $R = 0,3 \text{ m}\Omega$ takisti mille takistuse väärtuse tolerants on +/- 1%. Valitud šundi α_T on 350 ppm/°C ehk 3,5% takisti väärtusest. Energiamõõte-mikrokiibil INA228-Q1 on funktsioon kompenseerimaks šundi takistuse muutust sõltuvalt

temperatuurist lähtudes temperatuuriteguri (ppm/°C) väärtusest, mis suurendab seadme mõõtetäpsust.

Kuna šundil tekkiv pingelang on väike siis selle mõõtmiseks ja arvutuste tegemiseks on vajalik eelnev pingelangu võimendamine. Selleks sobivad spetsiaalselt energia mõõtmise jaoks disainitud mikrokiibid, mis omavad endas signaali võimendust ja lisaks voolu arvutamisele ka muid kasulike funktsioone. Süsteemi on võimalik lihtsustada ja töökindlamaks muuta kui valida integreeritud takistiga mikrokiip. Sellise seadme valikul kaob ära takisti küljest tulevate mõõtekontaktide jootetakistus ja võimalikud lisatakistused vaskradade kasutamise puhul. Paraku seadmele valitud parameetrid, $U_{sisend} = 60\text{ V}$ ja $I_{max} = 130\text{ A}$, välistavad integreeritud takistiga mikrokiipide kasutamise. Suurima mõõteulatusega leitud mikrokiip suudab mõõta voolu kuni 15 A, sellised seadmed on näiteks *Texas Instruments-i* poolt toodetud INA250 ja INA260, kuid nende pingevahemik on kuni 36 V. Sobiva mikrokiibi valikul kasutati *Texas Instrumentsi* loodud kalkulaatorit – *Power Monitor Calculator*, mis on loodud lisana digitaalsete võimsust mõõtvate seadmete juhendmaterjalile [19]. Sisestades tööriista meie valitud piirparameetrid ja soovitud lisafunktsiooni energia mõõtmise näol pakuti sobivateks mikrokiipideks kaks järgnevat mudelit: *INA228-Q1*; *INA229*.

Tabel 4.1 Voolumõõtmis-mikrokiipide võrdlus

Suurus \ Mudel	INA228-Q1 [20]	INA229 [21]
ADM, bitti	20	20
Šundi pingelangu vahemik, mV (ADCRANGE)	-163,84 – 163,84 (0) -40,96 – 40,96 (1)	-163,84 – 163,84 (0) -40,96 – 40,96 (1)
$U_{ühispinge}$, V	-0,3 – 85	-0,3 – 85
Soovituslik šundi takistus, mΩ (maksimaalne vool, A)	0,3 (136,80)	0,3 (136,80)
Šundil eralduv võimsus, W @130A	5	5
Energia mõõtetäpsus, %	1	1
Andmeedastus-protokoll	I2C	SPI
Hind, € (24.04.2022)	1,92	2,11

Seadme jaoks valiti voolumõõte mikrokiip *INA228-Q1*. Määravaks sai seadme energia väärtuse mõõtetäpsus milleks on +/- 1 %, mis vastab ka *NAVIGA* reeglites kehtestatud nõudele, lisaks vajab I2C siin andmete edastamiseks vaid kahte juhti SPI siini nelja juhi asemel, mis lihtsustab trükkplaadi disaini.

Mikrokontrolleri valikul on antud lahenduse juures kõige olulisem taimerite olemasolu ja nende vähima mõõdetava vahemiku suurus. Taimereid kasutatakse mikrokontrolleris aja mõõtmiseks ja teiste ajatundlike funktsioonide rakenduseks. Loodaval seadmel on kaks ajakriitilist funktsiooni, aja mõõtmine energialiimidi täitumisel ja piirangu rakendumisel, et piirang kestaks täpselt 60 sekundit, teiseks oluliseks funktsiooniks on sumbuva PLM signaali genereerimine piirangu rakendumise algfaasis ja ühtlase PLM signaali hoidmine kogu ülejäänud piirangu vältel. Lisaks peab mikrokontrolleeril olema I2C siini tugi INA228-Q1 mikrokiibiga suhtlemiseks. Oluline on ka mikrokontrolleri kasutamise lihtsus. Varasemate kogemuste põhjal on kõige tuttavam *Arduino* arendusplaatidel kasutatavad *ATmega* seeria mikrokontrolleerid. Alternatiividena on võimalik kasutada ka *Texas Instruments*-i MSP430 ja *Stmicrocontroller*-i STM32 seeria mikrokontrolleereid. Otsustati *ATmega 328p-AU* mikrokontrolleri kasuks kuna sellel on olemas kõik vajalikud funktsioonid ülesande täitmiseks ja tuttav programmeerimiskeel kiirendab prototüübi ehitust ja kulub vähema aega uue platvormi õppimiseks. Seadmes kasutatava *ATmega 328p-AU* ja *INA228-Q1* toitepingeks on 5 V. Energiapiiraja sisendpingeks on kuni 60 V, seega on vaja pinget reguleerida seadmetele sobilikuks 5 V peale. Pingeregulaatori valikul on vaja teada sisendpinge vahemiku, soovitud väljundpinget ja kui palju voolu tarbivad regulaatoriga toidetavad seadmed. Tabel 4.2 on väljatoodud peamised komponendid ja nende maksimaalne energiatarve, mis on leitavad komponentide andmelehtedest.

Tabel 4.2 Komponentide voolutarve

Komponent	Tootekood	Maksimaalne voolutarve @5 V
Energiamõõde- mikrokiip	INA228AQDGSRQ1	0,6 mA
Mikrokontrolleer	ATmega 328p-AU	15 mA

Süsteemi toitmiseks valiti LM2597HVM-5.0/NOPB, mis on fikseeritud 5 V väljundiga *step-down* pingeregulaator. Valitud regulaator talub kuni 60 V suurust sisendpinget ja maksimaalselt 500 mA suurust koormust. Andmelehes toodud disaininäidet kasutati aktiiv- ja passiivkomponentide valikuks ja trükkplaadil skeemi koostamiseks.

Tabel 4.3 kajastab vajalike komponente ja nende koguseid mida on vaja energiapiiraja versioon 1 koostamiseks, tabelis ei ole kajastatud mikrokontrolleerit, akuühenduste ja kiirusregulaatori ühendusteks vajalike juhtmeid ja pistikuid, sest need võivad muutuda vastavalt konkreetsele rakendusele kus energiamõõtjat kasutatakse.

Tabel 4.3 Energiapiiraja versioon 1 komponentide loetelu

Kategooria	Tootja ID	Kogus	Hind 1tk, € (15.01.22)
Energiamõõte mikrokiip	INA228AQDGSRQ1	1	5,52
Pingeregulaator	LM2597HVM-5.0/NOPB	1	5,54
Šunt takisti, 0,3 mΩ	WSLP3921L3000FEA	1	1,85
Mikrokiiplüliti	TMUX1119DCKR	1	1,58
Kondensaator, 0,1-μF, 50 V	C1210C104K5HACAUTO	4	0,51
Kondensaator, 10-μF, 35 V	TPSD106K035R0300	1	1,54
Kondensaator, 100-μF, 10 V	TAJY107K010RNJ	1	1,12
Takisti, 4,7 kΩ	SMD0805-4K7 JRT1	1	0,2
22 kΩ takisti	MCMR06X2202FTL	1	0,01
10 kΩ takisti	SFR03EZPF1002	2	0,11
Schottky diood, 40 V, 1 A	RBR1VWM40ATR	1	0,39
Induktiivpool, 100 μH	DO3316P-104MLD	1	1,68
Kruviklemmiplokk	TB-001	3	0,3
Kogumaksumus			21,01

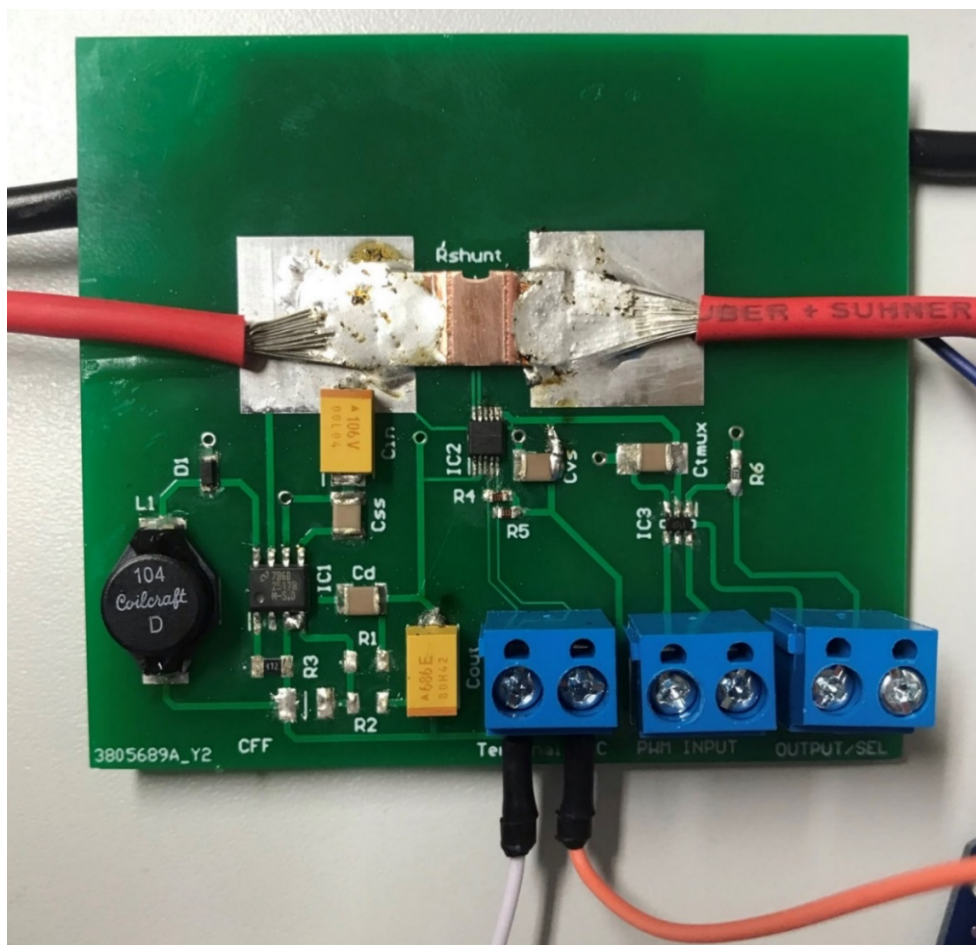
4.3 Energiapiiraja versioon 1

Esimese trükkplaadi eesmärgiks oli katsetada valitud energiamõõte mikrokiibi INA228-Q1 sobivust ja õppida kuidas seadet käsitleda ja uurida ühte võimalikku signaalitöötlemise versiooni sisendsignaali ümberlülituse näol. Trükkplaadi disainimisel kasutati tarkvara *Altium Designer*, mis on laialt kasutatav skeemide ja trükkplaatide professionaalne disainimistarkvara erinevate keerukate süsteemide jaoks. Elektroonikaskeemi, mille järgi luuakse trükkplaat, inglise keeles *printed circuit board* (PCB). Disaini loomise eelduseks on põhikomponentide ja vajalike lisakomponentide loetelu, ühtlasi on loetelu järgi võimalik arvutada milline on komponentide maksumus ja vajalikud kogused, et trükkplaat komplekteerida töötavaks prototüübiks. Trükkplaadi valmistajaks on välismaineettevõtte *JLCPCB*. Skeemil on kolm osa; sisendpinge reguleerimine, voolu mõõtmine ja signaali lülitusosa.

Prototüüpimiseks ja mikrokontrolleriga ühendamiseks on lisatud kolm kruviterminali, täiendustepanekuna juhendaja poolt lisati kruviklemmiplakk ka +5 V ja maa tasandi (GND) ühenduste jaoks. Loodud prototüüpi saab kasutada ja katsetada erinevate mikrokontrolleritega millel on I2C siini tugi.

Elektriskeemi (Lisa 5) põhjal loodi trükkplaadi disain. Trükkplaat on kahekihiline, millest alumine pool on ühendatud toiteallika negatiivse juhi külge ja kannab endas GND signaali komponentideni, plaadi ülemisel küljel on komponendid ning nende omavahelised ühendused. Pärast esmast prototüübi ehitamist ja katsetamist vaadatakse elektriskeem ja trükkplaat üle eesmärgiga parandada ilmnenud vigu ja optimeerida seadme lõpliku paigutust, suurust ja kasutusmugavust. Kõik komponendid joodeti trükkplaadile käsitsi.

Energiapiiraja versioon 1 testimise tulemusena parandati ilmnenud disainiviga pingereguleerimise osas, mis andis soovitud +5 V asemel +12 V. Viga parandati mõne komponendi eemaldamise ja vajalike ühenduste loomisega. Katsetamise käigus selgus, et signaali ümberlülitamine ei ole praktiline ja optimaalne lahendus. Energiamõõte-mikrokiip töötas ootuspäraselt ja sobib seadme funktsioonide saavutamiseks.



Pilt 4.1 Komplekteeritud energiapiiraja versioon 1

4.4 Energiapiiraja versioon 1 katsemõõtmised

Loodud prototüübi katsetamisel oli peamiseks eesmärgiks veenduda valitud komponentide sobivuses ja pakkuda muudatusettepanekuid disaini täiustamiseks.

Prototüübi riistvara kontrollimisel ilmnis, et toiteahela disainimisel on tehtud viga. Pingeregulaator pidi tagama 5 V suuruse väljundpinge kuid disainivea tõttu oli väljundpinge hoopis 12 V. Analüüsi veelikord andmelehti ja selles olevaid disaininäiteid ja leiti, et tuleb mõni lisakomponent eemaldada ja parandada ühendusi. Tulemuseks saadi stabiilne 4,9 V väljundpinge, mis on sobilik teistele seadmes kasutatavatele mikrokiipidele. Avastatud disainiviga eemaldati energiapiiraja versioon 2 planeerimisel. Tarkvara kirjutamise ja seadme peal katsetamise käigus tuvastati, et I2C SDA (andmeedastus) klemmi mehaaniline kontakt oli puudulik ja seeläbi ei olnud võimalik saada adekvaatseid andmeid *INA228-Q1* mikrokiibilt. Viga prooviti mitmeid kordi lahendada tarkvaraliselt, kulutades tulemuseta palju aega, kuigi viga oli riistvaraline. Viga tuvastati ostsillokoobi abil I2C siini klemme monitoorides.

Prototüübi funktsioonide testimisel alustati erinevate *INA228-Q1* mõõdetavate suuruste individuaalse testimisega. Esmalt loeti ja kalibreeriti *INA228-Q1* toitepinge mõõteväärtus, seejärel šundi pingelangu ja voolu mõõtetulemust ja seadistati šundi temperatuuri kompenseerimine. Üksikute osade kontrollimine on oluline seadme lõppfunktsiooni – energia mõõtmise seisukohast sellepärast, et energia väärtus on arvutuslik ja täpsus sõltub osatäpsustest. Ka vool on arvutuslik suurus, mis sõltub takistil tekkivast pingelangust ja *INA228-Q1* mikrokiibile seadistatud šunt-takisti arvulisest väärtusest. *Texas Instruments* andmelehe alusel on *INA228-Q1* energia mõõtetäpsus +/- 1 %.

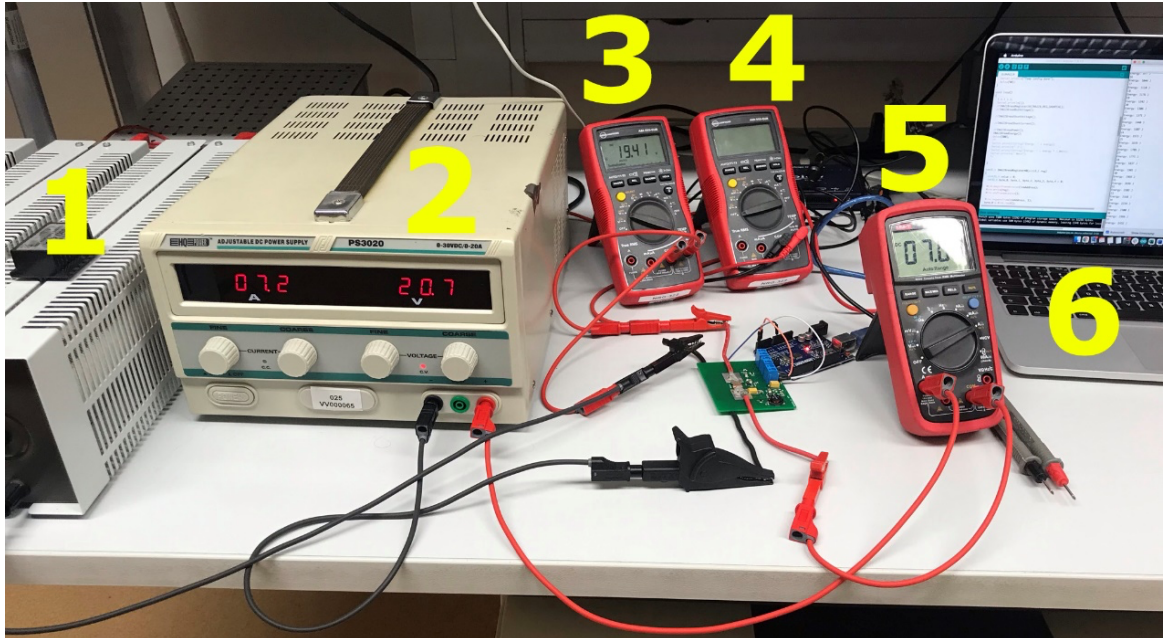
Prototüübi katsetamisel võrreldi seadme mõõtetulemust arvutusliku tulemusega. Toiteallikaks oli *HQ Power PS3020 0-30 VDC/0-20 A*, koormuse jaoks kolm 33 Ω 4,4 A suurust reostaati, mis olid ühendatud ahelasse rööbiti vähendades kogutakistust. Reostaatide takistust muudeti selliselt, et kogutakistus oleks 2,78 Ω ehk osatakistusega 8,2 Ω. Rööptakistuse kogutakistus arvutati valemiga 6. Koormust läbiv vool oli ≈ 7 A ja toitepinge seejuures ≈ 19,5 V .

$$R_{koormus} = \frac{U}{I} = \frac{25}{9} = 2,78 \Omega \approx 2,8 \Omega \quad (6)$$

Katsemõõtmise kestvus oli üks minut ja katset korrati kümme korda. Valemi (7) abil arvutati tarbitud energia iga katse kohta, arvutatud tulemused on esitatud Tabel 4.4.

$$E_{tarbitud} = U_{aku} * I_{koormus} * t_{sekund} \quad (7)$$

INA228-Q1 raporteerib energia mõõtetulemust džaulides, Tabel 4.4 on tarbitud energia välja toodud džaulides, mis on arvutatud valemi 7 järgi, tulemus on teisendatud ka vatt-tundidesse. Pilt 4.2 on näha katses kasutatavad seadmed, toiteallikas, reostaadid, multimeetrid ja loodud energiamõõtja prototüüp versioon 1.



Pilt 4.2 Katseseadmed. 1: reostaadid; 2: toiteplokk; 3: multimeeter (sisendpinge); 4: multimeeter (šundi pinge); 5: multimeeter (koormusvool); 6: arvuti (Arduino IDE tarkvara)

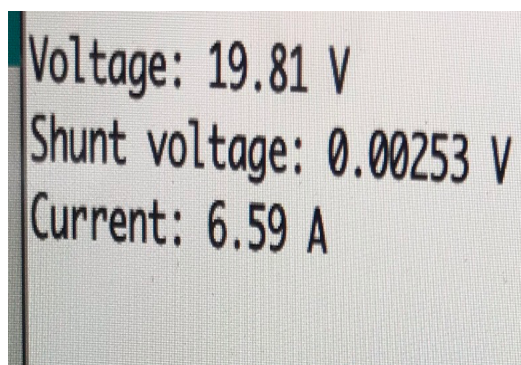
Tabel 4.4 Versioon 1 mõõtetäpsuse katseseeria

Suurus Katse	U_{toide} V	I_{koormus} A	$E_{\text{arvutuslik}}$ J (Wh)	$E_{\text{mõõdetud}}$ J (Wh)	ΔE , %
1	19,40	7,02	8171 (2,27)	8120 (2,26)	0,6
2	19,44	7,05	8223 (2,28)	8142 (2,26)	1,7
3	19,67	7,14	8427 (2,34)	8125 (2,26)	4,3
4	19,59	7,11	8357 (2,32)	8094 (2,25)	3,9
5	19,53	7,08	8296 (2,30)	8082 (2,25)	3,3
6	19,59	7,11	8357 (2,32)	8163 (2,27)	3,0
7	19,51	7,08	8288 (2,30)	8149 (2,26)	2,4
8	19,48	7,07	8263 (2,29)	8116 (2,25)	2,5
9	19,49	7,08	8279 (2,29)	8113 (2,25)	2,7
10	19,48	7,07	8263 (2,29)	8158 (2,27)	2,0

Katses teostati ajajälgimist tarkvaraliselt ja mõõtetulemuse 60 sekundi möödumisel ekraanile. Arvutuste ja katsemõõtmiste keskmine erinevus on 2,3 %, eesmärk oli saavutada mõõtetäpsus 1 %, mõõtetäpsus suureneks kui mõõta aega täpsemalt ja suurendada mõõdetavat voolu. Koormus 7 A on seadme mõõtepiirkonna alguses. Suuremate koormuste katsetamist ei peetud prototüübi esmase tööpõhimõtte testimisel vajalikuks. Seade mõõdab hea täpsusega nii pinget kui ka voolu. Pilt 4.3-Pilt 4.4 on näha samal ajahetkel jäädvustatud multimeetrite ja energiamõõtja versioon 1 mõõtetulemused.



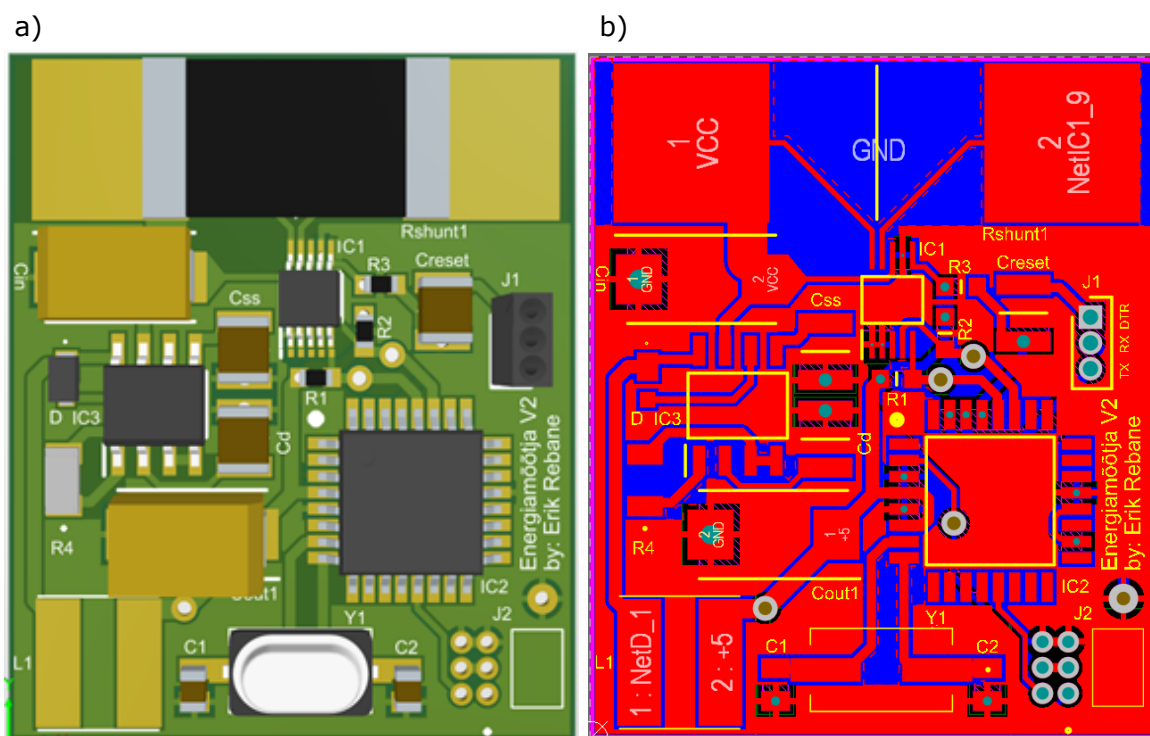
Pilt 4.3 Multimeetrite näidud.
1: toiteallika pinget; 2: šundi pingelang;
3: vool



Pilt 4.4 Energiapiiraja lugem
(pinge, šundi pinge, vool)

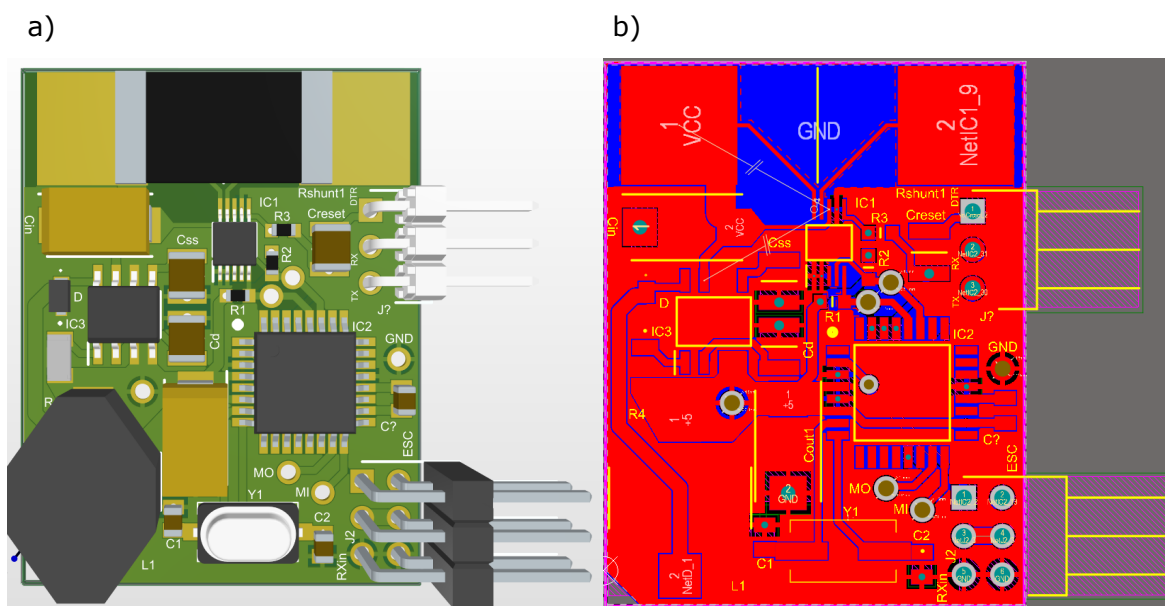
4.5 Energiapiiraja versioon 2

Trükkplaadi versioon 2 parandab ära pingeregulaatori disainivea, lisab juurde mikrokontrolleri *ATmega 328p-AU* ja on mõõtmetelt suurusjärgus 4 korda väiksem kui versioon 1, trükkplaatide suurused on vastavalt: versioon 1: 45 cm^2 ; versioon 2: 10 cm^2 . Olulise muutusena trükkplaadi tehnilises disainis on suurte vasealade kasutamine. Loodi kogu trükkplaati hõlmav vaseala maa tasandi (GND) jaoks ja kasutati väiksemaid vasealasid üksteise lähedal olevate komponentide vaheliste ühenduste loomiseks. Vasealade kasutamine kiirendab trükkplaadi tootmisprotsessi ja vähendab häiringute mõju seadme komponentidele. Pilt 4.5 kujutab trükkplaadi versioon 2 vaadet komponentidega kus on näha komponentide paiknemine ja suurused, vaseradade vaade kujutab komponentide vahelisi ühendusi, kus punase värviga on ühendused trükkplaadi pealmisel ja sinisega alumisel kihil. Komponentide trükkplaadile jootmisel kasutati kuumutusahju. *JLPCB* valmistas spetsiaalse šablooni jootevõrgude pastaga katmiseks. Komponentid laoti vastavatele kohtadele ja seejärel kuumutati ahjus kus pastas olevad väiksed tinaosakesed sulasid ja löid ühenduse komponendi ja trükkplaadil oleva kontaktpinnaga.



Pilt 4.5 a) vaade komponentidele; b) vaade vaseradadele

Trükkplaadi versioon 2 ilmnenuv puuduste põhjal disainiti valmis versioon 3, mis optimeerib komponentide paigutust, lisab versioon 2 puudunud ühendused ja korrigeerib kontaktide mõõtmeid.



Pilt 4.6 a) vaade komponentidele; b) vaade vaseradadele

4.6 Energiapiiraja versioon 2 katsemõõtmised

Pingeregulaatori katsetamisel ilmnnes kaks trükkplaadil puuduolevat ühendust, mis parandati jootes juhtmed vajalike ühenduste vahele. Lisaks vahetati välja induktiivpool suurema küllastusvooluga pooli vastu, mis tagas stabiilsema väljundpinge.

Seadme põhifunktsiooni, energia mõõtmise, jaoks ehitati spetsiaalne rakis, mis võimaldab katsetada seadet mudelpaadile väga sarnastel tingimustel. Rakis ehitamiseks liimiti plastmassist kasti külge mootori raam, võllitoru ja vesijahutuse liitmikud (Pilt 4.7). Rakise eesmärk oli luua võimalus kasutada mudelpaadis kasutatavat mootori, kiirusregulaatorit ja koormust, ehk sõukruvi. Sõukruvi on vahetatav ja selle kaudu on võimalik muuta maksimaalset koormuse suurust mootorile.

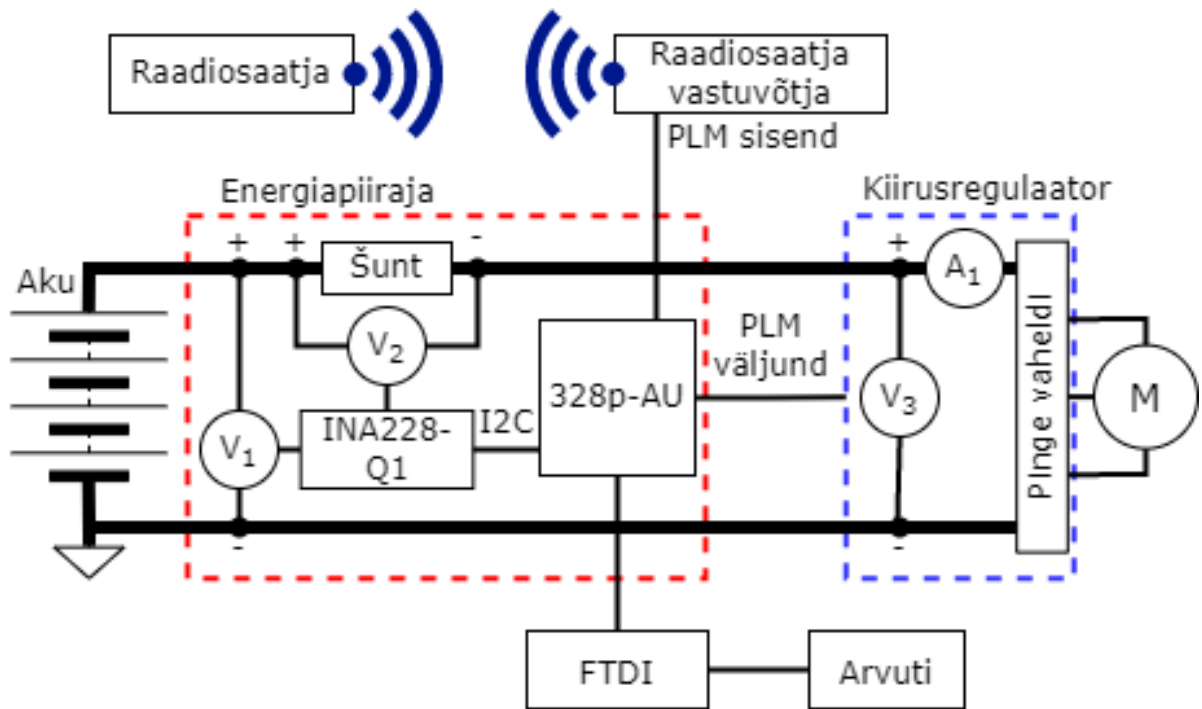


Pilt 4.7 Koormusrakis. 1: mootor; 2: võllitoru; 3: sõukruvi

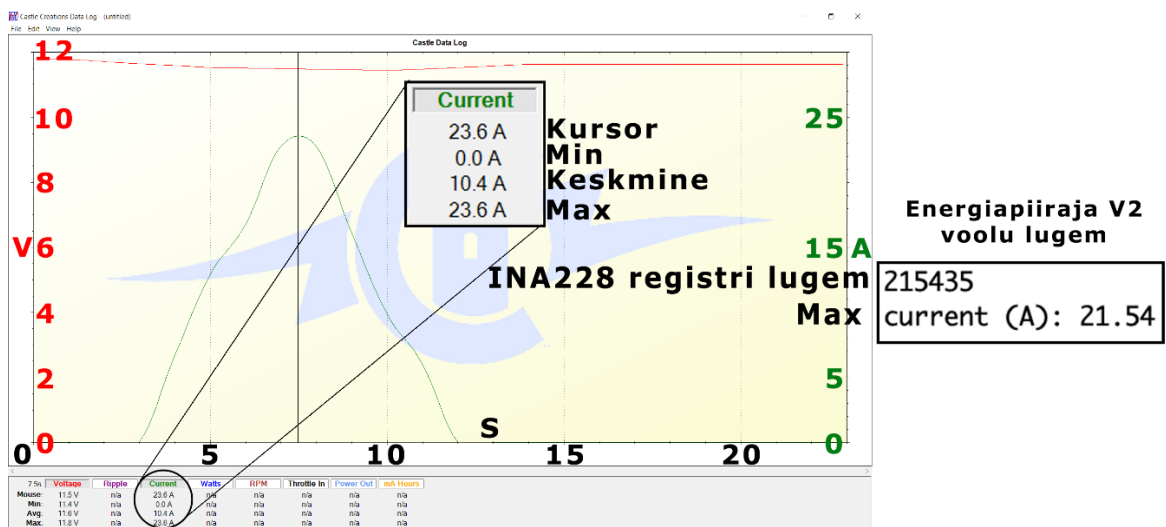
4.6.1 Katse nr 1

Esmase koormuskatse eesmärk oli hinnata seadme poolt mõõdetavate suuruste väärtust. Selle jaoks kuvati Arduino IDE *Serial Monitor*-i energiapiiraja poolt mõõdetud toiteallika pinget, voolu mõõteregistri väärtust ja voolu väärtust amprites. Neid suurusid võrreldi kiirusregulaatori andmelogiga. Esimene katse toimus üle 20 A suuruse voolu juures. Energiapiiraja ja kiirusregulaatori mõõtetulemuse vahe oli 2 A, energiapiiraja näitas väiksemat voolu kui kiirusregulaator (Pilt 4.8). Selle katse tulemusena saadi kindlus seadme toimimise osas ja jätkati katseid koormust suurendades.

Mõõtetäpsuse parandamiseks seadistati INA228 mõõdetavate väärtuste mõõtmiste kestvust ja mõõtetulemuste ümardamist, mis parandab signaali-müra suhet, sellest on kirjutatud täpsemalt tarkvara kirjeldavas peatükis. Katseskeemil (Joonis 4.2) on kujutatud katsetes nr 1 ja 2 kasutatud seadmed ja mõõdetavate suuruste mõõtekohad. Energiapiiraja aku pinget näitu mõõdab V_{m_1} , koormusvoolu näit arvutatakse V_{m_2} , ehk šundi pingelangu järgi, võrdlevaks seadmeks on kiirusregulaatori andmelogi kus aku pinget näitu mõõdab V_{m_3} ja koormusvoolu A_{m_1} .



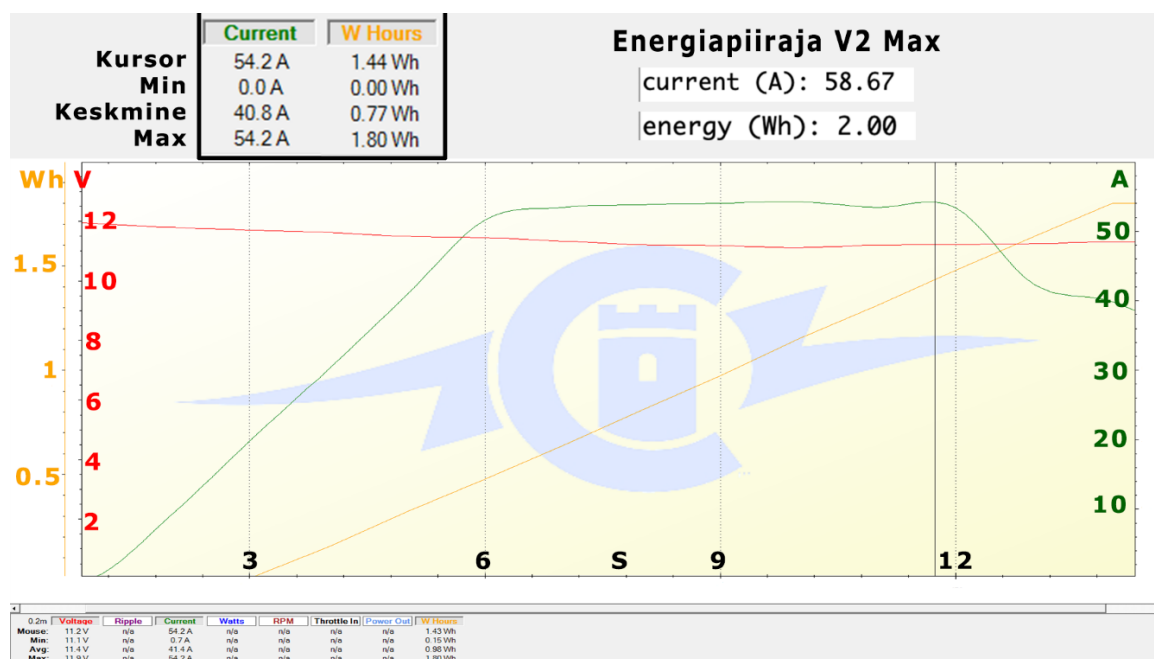
Joonis 4.2 Katseskeem nr 1



Pilt 4.8 Katse nr 1 tulemus

4.6.2 Katse nr 2

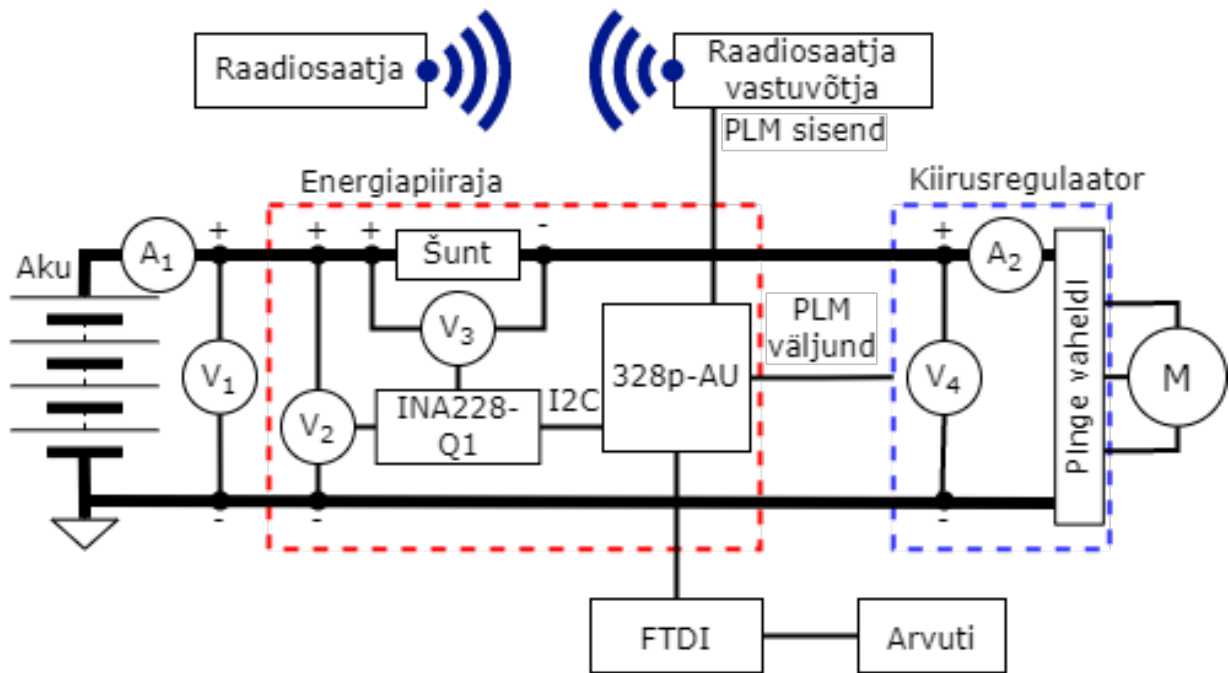
Tehti katseseeria kus suurendati koormust pikendati ja koormuse kestvust. Ühe mõõtmise kestvuseks valiti 10 sekundit. Mõõtmise ajal kasutati mootorit maksimaalsel kiirusel mida juhiti raadioside puldiga. *Arduino IDE* kaudu jälgiti energiapiiraja poolt arvutatavat tarbitud energiahulka vatt-tundides mida hiljem võrreldi kiirusregulaatori andmelogi energiahulga lugemiga. Katse eesmärk oli: a) testida seadet suuremal koormusel, b) anda hinnang energia mõõtetäpsuse kohta. Katsest selgus, et loodud energiapiiraja raporteerib voolu ja tarbitud energiahulka suuremana kui mootori kiirusregulaator. Pilt 4.9 kajastab katses mõõdetud tulemusi.



Pilt 4.9 Katse nr 2 tulemus

4.6.3 Katse nr 3

Kolmanda katse eesmärk oli peen häälestada seadme voolu mõõtetäpsust, millest sõltub olulisel määral ka energia mõõtetäpsus. Katsel kasutati sama suurt koormust, mis katse nr 2 korral. Võrdleva mõõteseadmena kasutati *PeakTech 1635 3 IN 1 MINI AC/DC CLAMP METER*, see seade suudab mõõta alalisvoolu kuni 80 A millest piisas katse teostamiseks. Ampertangide mõõtetäpsus on +/- (2.8 %-1 mA) [22]. Aku pinget mõõdeti seadmega *UNI-T UT139C* mille mõõtetäpsus on +/- (0.5 %+2) [23]. Mõõtetulemus võeti viis sekundit pärast maksimaalse koormuse saavutamist. Katse kestvus hoiti lühiajalisena, et vähendada koormust akule pinge langemise ja aku tühjenemise näol. Joonis 4.3 kujutab lisatud mõõteseadmeid ja mõõtekohti ahelas. Ampertangide tähiseks skeemil on A_{m_1} ja aku pinget mõõtva multimeetri tähiseks V_{m_1} .



Joonis 4.3 Katseskeem nr 2

Tabel 4.5 Katse nr 3 mõõtetulemused

Katse \ Suurus	$I_{koormus, PeakTech}, A$	$I_{koormus, energiapiiiraja}, A$	$U_{aku, UT139C}, V$	$U_{aku, energiapiiiraja}, V$
1	72,8	72,77	12,50	12,50
2	71,2	71,34	12,40	12,42
3	72,3	72,81	12,33	12,34
4	69,6	70,75	12,28	12,29
5	72,6	72,70	12,21	12,22

Katse 3 tulemusest järeldub, et katsetes nr 1 ja 2 võrdleva seadmena kasutatud kiirusregulaatori mõõtetäpsus oli eeldatust madalam. Kasutatud kiirusregulaatori andmelehes ei ole täpsustatud parameetrite logimise mõõtetäpsust. Energiapiiraja versioon 2 ja ampertangmööteriista näidud langevad üldiselt kokku, mis tähendab, et energiapiirajat saab usaldada. Energiamõõtetäpsuse hindamiseks arvutati katse 3 (Tabel 4.5) *PeakTech*-i ja *UT139C* mõõtetulemuste põhjal MIN ja MAX väärtused tootjapoolse mõõtevea arvestamiseks kasutades valemeid 8 ja 9, kus n tähistab katse numbrit.

$$I_{max/min(n)} = I_{koormus, PeakTech-n} +/-((I_{koormus, PeakTech(n)} * 0,028) - 0,001 A) \quad (8)$$

$$U_{max/min(n)} = U_{aku, UT139C-n} +/-((U_{aku, UT139C(n)} * 0,005) +/ - 0,02) \quad (9)$$

Arvutuste järel saadi iga katse kohta kolm mõõtetulemust, MIN, mõõteriista näit ja MAX. Kõigi katsete tulemustest võeti keskmine. Keskmine väärtust arvutati ka energiapiiraja koormusvoolu ja aku pinge näitude kohta. Keskmistatud mõõtetulemused on välja toodud Tabel 4.6 Keskmistatud mõõtetulemused. Kasutades valemit 10 arvutati energiapiiraja mõõtetäpsus ampertangide ja multimeetri suhtes, kus mõõdetud väärtuseks on energiapiiraja keskmine pinge või koormusvool ja tegelikuks väärtuseks ampertangide keskmine koormusvool või multimeetri keskmine pinge.

Tabel 4.6 Keskmistatud mõõtetulemused

<i>I</i> _{koormus keskmine, A} PeakTech	<i>I</i> _{koormus keskmine, A} energiapiiraja	<i>U</i> _{aku keskmine, V} UT139C	<i>U</i> _{aku keskmine, V} energiapiiraja
71,70	72,07	12,34	12,35

$$\text{protsentuaalne viga} = \frac{|\text{mõõdetud väärtus} - \text{tegelik väärtus}|}{|\text{tegelik väärtus}|} * 100 \quad (10)$$

$$I_{\text{energiapiiraja}} \% = \frac{|72,07 - 71,70|}{|71,70|} * 100 = 0,52 \%$$

$$U_{\text{energiapiiraja}} \% = \frac{|12,35 - 12,34|}{|12,34|} * 100 = 0,52 \% = 0,08 \%$$

Valem 11 kujutab arvutuskäiku energia mõõtevea arvutamiseks pinge ja voolu mõõtevea kaudu [25].

$$E \pm E_{\%} = (U \pm U_{\text{energiapiiraja}} \%) * (I \pm I_{\text{energiapiiraja}} \%) \quad (11)$$

$$E \pm E_{\%} = (U * I) \pm (0,52 + 0,08) = E \pm 0,6 \%$$

Rakendades valemit 11 saame energia mõõtetäpsuse suuruseks 0,6 %, mis on parem seatud eesmärgist +/- 1 %.

4.7 Signaalitöötlus

Signaali töötlemiseks ja süsteemi juhtivaks seadmeks valiti *Atmega 328p* mikroprotsessoril põhinev *Arduino Uno* arendusplaat esmaste katsetuste jaoks tema olemasolu ja laialt saadavate õppematerjalide tõttu. Mikrokontrolleri peamine ülesanne on mõõta aega, võrrelda *INA228-Q1* poolt mõõdetud kasutatud energiahulka ettemääratud energiapiiriga ja genereerida sumbuv PLM signaal lubatud energiahulga täitumisel. Mudelpaadi kiirust ja tüüri kontrollitakse PLM signaali kaudu vastavalt kiirusregulaatori ja servomootori abil, seega peab energiapiiraja olema võimeline katkestama ja üle võtma kiirusregulaatori ning raadiosaatja vastuvõtja vahel oleva PLM signaali. Signaali juhtimiseks ja manipuleerimiseks on kaks võimalust. Esiteks lugeda mikrokontrolleriga vastuvõtjast tulev PLM signaal ja siis signaal edasi peegeldada väljundklemmi kaudu. Teine võimalus on kasutada mõnesugust lülitismehhanismi, mis vahetaks kiirusregulaatorisse mineva PLM signaali allikat. Esimese lahenduse puhul ei ole vaja kasutada mingeid lisaseadmeid, kogu soovitud funktsionaalsus programmeeritakse mikrokontrolleri siseselt. Küll aga on selle lahenduse puhul väljakutseks täpne sünkroniseerimine kiirusregulaatoriga. Katsetamisel selgus, et mikrokontrolleriga genereeritud PLM-il ilmselt signaalis hüppeid ja kõikumisi. Esmalt mikrokontrolleriga signaali lugedes ja seejärel signaali peegeldades lisandub süsteemi 20 ms, ehk ühe perioodi pikkune viide, mis võib osutada häirivaks teguriks mudelpaadi juhtimisel. Erinevaid PLM signaali kontrollimise võimalusi katsetades jõuti lahenduseni kus mikrokontrolleri üks klemm on seadistatud sisendklemmina ja reageerib konkreetse klemmi olekumuutusele, ehk siis kui raadiosaatja vastuvõtjast tulev signaal muutub kas madalast olekust kõrgeks või vastupidi käivitatakse mikrokontrolleris riistvaralise häiringu alamprogramm, mis tuvastab klemmi hetkeoleku, kas siis kõrge või madal, ja lülitab seadistatud väljundklemmi vastavalt. Sellise lahenduse puhul on sisendsignaali ja väljundsignaali ajaline nihe minimaalne.

Trükkplaadi versioon 1 vajab mõõteväärtuste lugemiseks ja juhtsignaali kontrollimiseks välist mikrokontrollerit milleks oli *Arduino Uno*, trükkplaadil versioon 2 asendati mõõtetmetelt suur *Arduino Uno* kompaktsama *ATmega 328p-AU* mikroprotsessoriga ja kõik vajalikud ühendusrajad joonistati trükkplaadi disainile. Selleks, et mikroprotsessorit programmeerida saaks laeti FTDI mooduli kaudu mikroprotsessorile käivitusprogramm, inglise keeles *bootloader*. Sama FTDI moodulit kasutades laeti üles programmikood ja kuvati katsetuste käigus arvutiekraanile mõõtetulemusi.

4.8 Tarkvara

Tarkvara loodi *Arduino IDE* keskkonnas, kasutades C++ programmeerimiskeelet. Kirjutatud tarkvara üheks funktsionaalsuseks loodava lahenduse juures on *INA228-Q1* programmeerimine ja parameetrite seadistamine kasutades mikrokontrolleri ja mikrokiibi vahelise suhtluse jaoks I2C protokoll. Teise funktsioonina loeb mikrokontroller I2C siini kaudu mikrokiibilt tarbitud energia väärtuse ja võrdleb eelmääratud energia piirväärtusega. Mikrokontroller reageerib ka raadioside vastuvõtja poolt genereeritavale PLM signaalile ja vastavalt signaali kujule lülitab väljundklemmi. Energia limiidi täitumisel on tarkvara ülesanne piirata ära tavatalitluse juures 1:1-le peegeldatava signaali täitetegur selliselt, et mudelpaat seiskub ja püsib seisvana ühe minuti pärast mida normaaltalitus taastatakse. Nimetatud funktsioonide seadistamiseks kasutati olemasolevaid teeke I2C käskude näol. Aja möötamisega seotud funktsioonid seadistati kasutades mikroprotsessori registreid manipuleerides.

Programmikood algab *INA228-Q1* tootja poolt eelmääratud registrite defineerimisega, et neile oleks hiljem programmi käigus võimalik viidata kirjutamis ja lugemiskäskude teostamiseks. *INA228-Q1* andmelehes on seletatud millisel tuleb üle I2C protokoll andmeid saata. Seadme korrektse töö jaoks tuleb häälestada mõned registrid millega määratakse möötmete režiim, möötmete kestvused, tulemuste ümardamine, šundi takistuse väärtust kirjeldav koefitsient ja temperatuuri kalibreerimise jaoks šundi temperatuuri koefitsient. Need registrid on vastavalt: *CONFIG*, *ADC_CONFIG*, *SHUNT_CAL*, *SHUNT_TEMP_CO*. Nimetatud registritest kõige olulisem möötmetulemuste seisukohalt on *SHUNT_CAL*, mis mõjutab otseselt mõõdetava voolu mõõteväärtust. Korrektne väärtus arvutatakse andmelehes kirjeldatud valemite 12 ja 13 kaudu kus valemis on ühe muutujana šundi takistus.

$$SHUNT_CAL = 13107,2 * 10^6 * CURRENT_LSB * R_{\text{šunt}} \quad (12)$$

$$CURRENT_LSB = \frac{\text{Maksimaalne oodatav vool}}{2^{19}} \quad (13)$$

Arendustöö käigus kasutati *Texas Instruments*-i loodud tööriista *Power Monitor Calculator*, mis teostas ka *SHUNT_CAL* arvutuse ja andis väärtuseks 1024. Saadud väärtus korrutati omakorda neljaga, sest valitud mõõtevahemike kõige optimaalsemaks mõõtmiseks kasutab seade šundi pingelangu mõõtmisel režiimi 1 [20, lk 33]. *SHUNT_CAL* väärtus 1024 lubab kasutada 0,003 Ω suuruse takisti kogu mõõteulatust eesmärgiks seatud 130 A pealt 136 A suuruse vooluni.

INA228-Q1 võimaldab määrata ka parameetrite ülem ja alampiiri näiteks ülepinge või lühisvoolu tuvastamiseks kuid need funktsioonid ei olnud antud seadme arendusfaasis olulised.

Süsteemi seadistusele järgneb töösükkel kus pidevalt loetakse soovitud parameetreid. Prototüüpimise käigus esitati päringuid pinge, voolu, võimsuse ja energia kohta, seadme lõpplahenduses on vaja lugeda vaid energia väärtust mida võrreldakse piirmääraga.

4.8.1 Tarkvaraline PLM signaali kontrollimine

Esmase variandina PLM signaali kontrollimiseks katsetati tarkvaralist meetodit, ehk loeti *Arduino* kaudu raadiosaatja vastuvõtjast PLM väljundit ja peegeldati sissetulevat signaali väljundklemmi kaudu edasi mootori kiirusregulaatorisse. Idee testimisel prooviti erinevaid versioone. Esmalt seadistati *Arduino* Timer1 töötama 50 Hz sagedusel ja sünkroniseeriti taktsignaali vastuvõtjast tuleva signaaliga. Idee oli, et mõõdetakse raadioside vastuvõtja poolt edastatava pulsi pikkus, teades pulsi pikkust edastaks samasuguse kestvusega pulss kiirusregulaatorisse, kasutades signaali genereerimiseks seadistatud taimerit. Põhjus pulsi pikkuse mõõtmiseks oli luua võimalus pulsi pikkuse manipuleerimiseks. See lahendus aga ei toimunud hästi kuna esines väljundsignaalis signaali hüppeid, mis arvatavasti olid põhjustatud *Arduino* ja raadioside vastuvõtja ebaideaalsest sünkroonist.

Toimiv lahendus saavutati kasutades mikroprotsessori klemmi oleku muutuse tuvastamise funktsionaalsust. Mikroprotsessori klemm 4 seadistati reageerima oleku muutusele. Tuvastades oleku muutuse käivitatakse häiringu alamprogramm, mis vaatleb sisendklemmi hetke olekut ja lülitab väljundklemmi identseks sisendklemmiga.

```
ISR (PCINT2_vect)
{
  if (PIND & B00010000) //D5 is HIGH
  {
    PORTB = B00000010; //pin 9 goes HIGH
  }
  else //D5 is LOW
  {
    PORTB = B00000000; //pin 9 goes LOW
    CPUfree = true; //enables I2C transmission
  }
}
```

Tarkvaras on läbivalt kasutatud ingliskeelseid kommentaare, et lihtsustada tarkvara kirjutamist kasutades internetis leitavaid koodinäiteid. Lisatud koodilõigus on tegu häiringu rutiiniga. Häiringu põhjustab sisendklemmi oleku muutus, mis käivitab

ISR (*PCINT2_vect*) rutiini milles kontrollitakse sisendklemmi hetkeolekut ja vastavalt lülitatakse väljundklemm kõrgeks (HIGH) või madalaks (LOW).

4.8.2 Riistvaraline PLM ümberlülitus

Ühe potentsiaalse variandina PLM signaali manipuleerimiseks vaadeldi signaali ümberlülituse võimalust, ehk võimalust valida lüliti abil milline signaali allikas on ühendatud väljundklemmiga. Seda lahendust katsetati trükkplaadi versioon 1 peal kasutades mikrokiiplüliti *TMUX1119DCKR*. Tööpõhimõtte testimisel kasutati väljundseadmena servomootorit, mida juhitakse samasuguse PLM signaali kaudu nagu kiirusregulaatoreidki. Mikrokiiplüliti üheks sisendiks oli mikroprotsessori poolt genereeritav PLM signaal, teiseks sisendiks raadioside vastuvõtja poolt genereeritav PLM signaal. Sisendi ümberlülitusel ilmnes soovimatuid signaali hüppeid, mis põhjustasid servomootori soovimatut asendimuutust. Esines olukordi kus mikrokiiplüliti ei reageerinud lülituskäsule. Arvestades ilmnenud puuduseid loobuti antud lahendusest. Kirjeldatud lahendus oleks lisanud süsteemi juurde ühe täiendava osa, sest tarkvaralisest signaali genereerimisest sisendi ümberlülituse meetodil lahti ei saa. Energiapiiraja versioon 2 disainiti selliselt, et signaali manipuleerimine käib tarkvaraliselt ja ei loodud ühendusi mikrokiiplüliti jaoks.

4.9 Energia piiraja alternatiivsed kasutusala ja edasiarendused

Loodud seade sobib oma parameetrite poolest ka TalTech-is arendatava autonoomse parvlaeva NYMO energiatarbimise mõõtmiseks. NYMO toiteallikaks on 48 V nimipingega aku. Kuna tegu on autonoomselt toimiva veesõidukiga siis on oluline, et sõiduk teab hetke millal on vaja naasta laadimisdokki [19]. Parim viis selleks on logida energia tarbimist. Teades ilmastikuolusid, kaugust kodubaasist ja kiirust on võimalik masinõppe algoritmide abil hinnata kui kaua on võimalik veel mõõtmisi sooritada ja millal on vaja naasta akusid laadima. Pidevalt energiatarbimise andmeid kogudes saab õpetada algoritmi, et vältida olukorda kus aku saab tühjaks avamerel. Loodud energiapiiraja parameetrid on sobivad mõõtmaks ka NYMO energiatarbimist. Soovi korral on võimalik *INA228-Q1* mikrokiibilt lugeda eraldi voolu, pinget ja tarbitud energiat, mis lisab paindlikust algoritmi õpetamisel. Lisaks saab programmeerida *INA228-Q1* edastama ka alarm signaale üle- ja alapinge, lühisvoolu kohta. Energiapiirajat on võimalik kasutada kompaktse testseadmena. Laevamodellismi edasiarendamiseks on võimalik energiapiirajast ehitada testseade erinevate sõukruvide võrdlemiseks, lisades juurde ekraanimooduli mugavamaks kasutamiseks. Testseade koos katses nr 3 kasutatud testpingi või mõne muu sarnase süsteemiga lubab täpsemalt võrrelda sõukruvide voolutarvet ja aitab kaasa kõige optimaalsema mudelpaadi kompleksuse loomisele. Lisades seadmele andmeedastus süsteemid näiteks 4G või *Bluetooth* näol on võimalik süsteemi energiatarbimist jälgida reaalsajas ja andmeid salvestades luua masinõppe kaudu algoritme, mis aitavad optimeerida energia tarbimist ja vähendada majandusliku kulu energiale.

5 KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk oli disainida, ehitada ja katsetada laevamodellismi spordialal nõutav energiatarbimist mõõtev seade. Mudelspordialal tekkis probleem LiPo akude üha ohtlikumaks muutumisega, akud viidi kasutamise jooksul kriitilise tühjakslaadimiseni. Akutootjad vastasid võistlejate kasvavale energiatiheduse soovidele vähendades LiPo akude isolatsioonmaterjali, mis tõstab LiPo akude süttimisohtu. NAVIGA oli kehtestanud võistlemiseks akudele maksimaalse kaalupiirangu. Tekkinud LiPo akude kasutamise ohu suurenemise ja ka akude lühem elutsükkel on suuremaks ohuks ja koormaks ka keskkonnale. Probleemi lahenduseks loodi reeglimuudatused, mis lubavad kasutada füüsiliselt ja mahtvuselt suuremaid akusid koostöös energiahulka piirava seadmega mille energia mõõtetäpsus on +/- 1% või parem. Töös koostati reeglitele vastav energiat piirav seade. Selliseid seadmeid eksisteerib kolme eri variandi erinevate tootjate poolt, mille hinnad on vahemikus 85-110 €, eesmärk oli luua seade ise ja soodsamalt.

Algandmete kogumiseks võrreldi turul olemasolevaid lahendusi ja nende parameetreid. Võrdluse tulemusena seati loodava seadme parameetrid, pingevalutus kuni 60 V ja pidev voolu mõõtmine kuni 130 A. Mudelpaadiga teostati katseseeria vaatlemaks eri vanuses akude jõudlust erinevatel koormustel, tulemusena oli eristatav akude töötssükli arv, vanemate akude pingelang oli suurem.

Energiapiiraja tehnilise lahenduse väljatöötamiseks uuriti erinevate pinge ja voolu mõõtmise tehnikaid. Uurimise tulemusena valiti sobivaks lahenduseks šunt takistil põhinev voolu mõõtmistehnika, kus šundil tekkiva pingelangu kaudu arvutatakse takistit läbiv vool. Šundi pingelangu mõõtmiseks ja voolu arvutamiseks valiti energiamõõtemikrokiip *Texas Instruments'i* poolt *INA228-Q1*, mis lisaks voolu mõõtmisele arvutab ka tarbitud energia. Toitepinge reguleerimiseks komponentide jaoks disainiti pinge regulaator *LM2597HVM-5.0/NOPB* seadme põhjal. Põhikomponentide ja nende andmelehtede alusel koostati elektriskeem ja elektriskeemi kaudu trükkplaat.

Energiapiiraja versioon 1 eesmärk oli testida valitud põhikomponentide sobivust seatud funktsioonide saavutamiseks. Disain oli oma olemuselt üledimensioneeritud, et oleks võimalik lihtsasti tuvastada ja parandada tekkinud vigu. Sooritati katsemõõtmised suurustel pinge ~20 V ja koormusvool ~7 A. Katsest piisas veendumaks valitud komponentide sobivuses loodava seadme jaoks.

Energiapiiraja versioon 2 parandas versioonil 1 ilmnunud disainivead ja lisandus juurde mikrokontroller *ATmega 328p-AU*, mis suhtleb *INA228-Q1* seadmega ja juhib raadioside süsteemilt tulevat mootori juhtsignaali. Versioon 2 vähendas seadme mõõtmeid umbes neli korda. Seadme testimiseks ehitati spetsiaalne katserakis, mis jäljendab reaalseid tingimusi, rakises on koormuseks mudelpaadis kasutatav harjadeta elektrimootor, mis käitab sõukruvi saavutades realistliku koormusvoolu suuruse. Energiapiiraja versioon 2 katsetuste tulemuseks saavutati pinge mõõtetäpsus 0,08 % ja voolu mõõtetäpsus 0,52% katsetes võrdluseks kasutatud multimeetri *UT139C* ja ampertangide *PeakTech 1635* suhtes. Arvestades, et *INA228-Q1* energia mõõtetäpsus andmelehe järgi on +/- 1% ja energiapiiraja versioon 2 osasuuruste mõõtetäpsuste summa on 0,6% saavutati töös seatud energia mõõtetäpsuse eesmärk ja seadme hind komponentidele on suurusjärgus 25 €.

Seadme tarkvara kirjeldavad peatükid seletavad, kuidas seadet programmeeriti ja milliseid lahenduse prooviti mootori juhtsignaali juhtimiseks. Tarkvaraga on võimalik seadmele funktsioone juurde luua ja muuta seadme käitumist vastavalt soovitud kasutusale.

Energiapiiraja versioon 2 on eraldiseisev seade mida on soovi korral võimalik lisada juba olemasolevatesse süsteemidesse energiatarbimise jälgimiseks. Üheks võimalikuks edasiarenduseks on lisada seadmele mugavad kasutajaliidesed muutes seadme sobilikuks testseadmeks õppelabori jaoks, kui lisada juurde juhtmevaba andmeside kas siis GPS, 4G või *Bluetooth* moodulid saab seadme arendada telemeetria seadmeks, mille abil saab hõlpsasti jälgida näiteks mudelpaadi kiirust ja koormusvoolu õige sõukruvi valiku tegemiseks, et saavutada suurim kiirus vähima energiatarbimisega. Seadistades seadme 4G mooduli kaudu andmeid laadima mõnda pilvekeskkonda on võimalik masinõppe algoritmide abil prognoosida seadme aku kestvust sõltuvalt välistest parameetritest.

6 SUMMARY

The aim of this bachelor's thesis was to design, build and test an energy consumption measuring device required in the sport of ship modelling. In the field of model sports, there was a problem with LiPo batteries becoming more and more dangerous, the batteries were taken to a critical discharge during use. Battery manufacturers have responded to competitors' growing demands for energy density by reducing the insulation material of LiPo batteries, which increases the risk of LiPo batteries igniting. *NAVIGA* had set a maximum weight limit for the batteries. The increased risk of using LiPo batteries and the shorter life cycle of the batteries is a greater danger and burden on the environment. To solve the problem, changes have been made to the rules that allow the use of batteries that are larger in physical and capacity in cooperation with an energy-limiting device with an energy measurement accuracy of +/- 1% or better. An energy-limiting device that complies with the rules was developed in the work. There are three different variants of such devices by different manufacturers, with prices ranging from 85 to 110 €, the goal was to create the device yourself and more cheaply.

To collect the initial data, available solutions on the market and their parameters were compared. As a result of the comparison, the parameters of the device were set, voltage range up to 60 V and continuous current measurement up to 130 A.

Various voltage and current measurement techniques were researched to develop a technical solution for the energy limiter. As a result of the research, a shunt resistor-based current measurement technique was chosen as a suitable solution, where the current through the resistor is calculated through the voltage drop across the shunt. An energy measurement microchip was selected by *Texas Instruments INA228-Q1* to measure the shunt voltage drop and calculate the current, which, in addition to measuring the current, also calculates the consumed energy. To control the supply voltage for the components, a voltage regulator was designed based on the *LM2597HVM-5.0/NOPB*. Based on the main components and their data sheets, an electrical diagram and a printed circuit board were prepared through the electrical diagram.

The purpose of the energy limiter version 1 was to test the suitability of the selected key components to achieve the set functions. The design was inherently oversized so that errors could be easily identified and corrected. Test measurements were performed at voltages of ~ 20 V and load currents of ~ 7 A. The test was sufficient to verify the suitability of the selected components for the device to be created.

The energy limiter version 2 corrected the design errors in version 1 and added the *ATmega 328p-AU* microcontroller, which communicates with the *INA228-Q1* and controls the engine control signal from the radio communication system. Version 2 reduced the size of the device by about four times. To test the device, a special test rig was built that mimics real conditions, the rig is loaded with a brushless electric motor used in a model boat, which drives the propeller to a realistic load current. The energy limiter version 2 tests resulted in a voltage measurement accuracy of 0,08 % and a current measurement accuracy of 0,52 % for the *UT139C* multimeter and *PeakTech 1635* clamp meters used in the tests. Considering that the energy measurement accuracy of the *INA228-Q1* according to the data sheet is +/- 1 % and the sum of the measurement accuracies of the energy limiter version 2 is 0,6 %, the target set for energy measurement accuracy was achieved.

The chapters describing the device software explain how the device was programmed and what solutions were tried to control the motor control signal. With the software you can create additional functions for the device and change the behaviour of the device according to the desired application.

Energy limiter version 2 is a stand-alone device that can be added to existing systems to monitor energy consumption if desired. One possible development is to add user-friendly interfaces to the device, making it a suitable test device for a training laboratory; if you add wireless data, either GPS, 4G or Bluetooth modules, the device can be developed into a telemetry device that achieve maximum speed with minimum energy consumption. By setting the device to load data to a cloud environment via the 4G module, it is possible to predict the battery life of the device using machine learning algorithms, depending on external parameters.

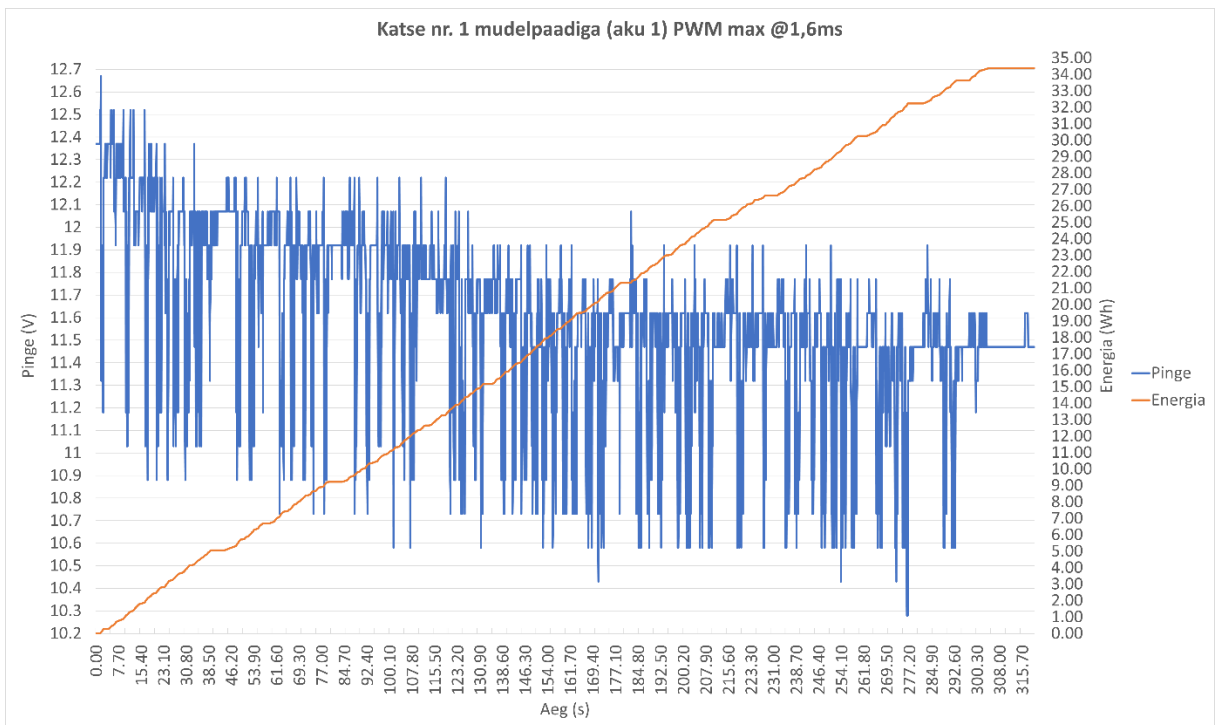
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. WORLD ORGANISATION FOR MODELSHIPBUILDING AND MODELSHIPSPORT, "About Us," 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.naviga.org/?page_id=4. [Kasutatud 11.02.2022].
2. WORLD ORGANISATION FOR MODELSHIPBUILDING AND MODELSHIPSPORT, "Annexes-M-2021," 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.naviga.org/wp-content/uploads/2020/12/2021_annexes.pdf. [Kasutatud 11.02.2022].
Annex A1 (Lk 3), Annex A3 (Lk 5), Annex C1 (Lk 7)
3. WORLD ORGANISATION FOR MODELSHIPBUILDING AND MODELSHIPSPORT, "Rulebook 2019" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.naviga.org/section_m/wp-content/uploads/2018/12/Rulebook-M-2019.pdf. [Kasutatud 11.02.2022].
4. Roger's HobbyCentre, „A Guide to understanding LiPo batteries” 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://rogershobbycenter.com/lipoguide>. [Kasutatud 26.02.2022].
5. Mlm Technology, "eLim Energy Limiter" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.mlmsolutions.biz/elim.php>. [Kasutatud 11.02.2022].
6. TSS Limiter, "TSS Limiter-Logger Pro V.2.0" 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://tsslimiter.com/products/tss-limiter-logger-pro-v-2-0/>. [Kasutatud 11.02.2022].
7. WOZNIAK RC TECH, "KLW202" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.wozniakrctech.com/produkty_KLW202_2.html. [Kasutatud 11.02.2022].
8. MindChip, "NYMO" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://mindchip.ee/nymo/>. [Kasutatud 11.02.2022].
9. Castle Creations, "Phoenix Edge Series ESC" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://home.castlecreations.com/air#PhoenixLite>. [Kasutatud 11.02.2022].
10. Castle Creations, "Castle Link" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://home.castlecreations.com/download-castle-link>. [Kasutatud 11.02.2022].
11. MDPI, "Calculation of Constant Power Lithium Battery Discharge Curves" 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mdpi.com/2313-0105/2/2/17/pdf>. [Kasutatud 11.02.2022].
12. Hobbyking, "Zippy Compact 6200mah LiPo battery pack" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://hobbyking.com/en_us/zippy-compact-6200mah-3s-40c-lipo-

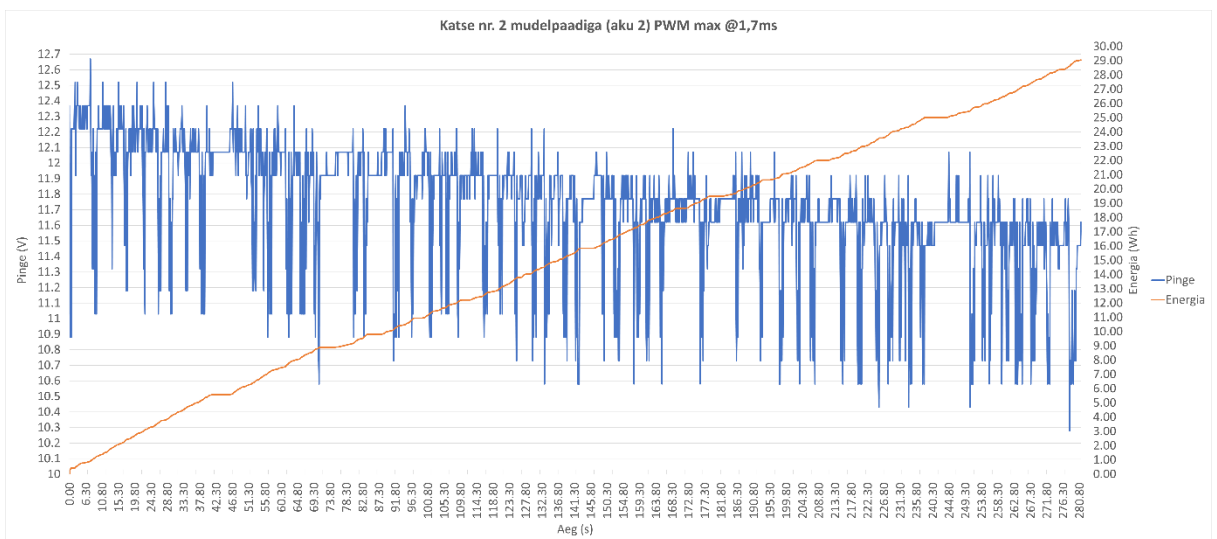
- [pack.html?queryID=8c4573d98cc4bd09cd8231db854e386f&objectID=45381&indexName=hbk_live_products_analytics](https://www.ampow.com/products/ovonic-50c-11-1v-6000mah-3s1p-deans-lipo-battery?variant=34827473125532). [Kasutatud 12.02.2022].
13. Ampow, "OVONIC 6000mAh LiPo battery pack" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ampow.com/products/ovonic-50c-11-1v-6000mah-3s1p-deans-lipo-battery?variant=34827473125532>. [Kasutatud 12.02.2022].
 14. Ecomaster, "REDZONE 5400mAh LiPo battery pack" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://ecomaster.torgg.com/collection/for-rc-boat/product/lipo-5400mah-3s1p-20c-redzone-made-in-april-2019>. [Kasutatud 12.02.2022].
 15. SLS, "QUANTUM 5800mAh LiPo battery pack" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.stefansliposhop.de/en/batteries/sls-quantum/sls-quantum-30c/sls-quantum-5800mah-3s1p-11-1v-30c-60c::1691.html>. [Kasutatud 12.02.2022].
 16. Overlander Batteries, "SUPERSPORT PRO 5800mAh LiPo battery pack" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.overlander.co.uk/lipo-batteries/11-1v-3s/5800mah-11-1v-3s-35c-supersport-pro-lipo-battery.html>. [Kasutatud 12.02.2022].
 17. Scorpion Systems, "Scorpion IS2835 3300KV" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.scorpionsystem.com/catalog/boat/motor_3/is-28_1/IS_2835_3300/. [Kasutatud 12.02.2022].
 18. Power Electronics, "Components and Methods for Current Measurement" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.powerelectronics.com/technologies/power-electronics-systems/article/21861306/components-and-methods-for-current-measurement>. [Kasutatud 12.02.2022].
 19. Texas Instruments, "Getting Started with Digital Power Monitors" 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ti.com/lit/an/sboa511a/sboa511a.pdf?ts=1635088471357>. [Kasutatud 12.02.2022].
 20. Texas Instruments, "INA228 85-V, 20-Bit, Ultra-Precise Power/Energy/Charge Monitor With I2C Interface" 2021 [Andmeleht] Saadaval: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina228.pdf?ts=1646984544546&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA228 Kasutatud [12.02.2022].
 21. Texas Instruments, "INA229 85-V, 20-Bit, Ultra-Precise Power/Energy/Charge Monitor With SPI Interface" 2021 [Andmeleht] Saadaval: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina229.pdf?ts=1646994278818&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA229 Kasutatud [12.02.2022].

22. Reichelt, "UT139C True RMS Digital Multimeter" 2022 [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://www.reichelt.com/at/en/peaktech-1635-ac-dc-leakage-current-tester-peaktech-1635-p67404.html?r=1> Kasutatud [02.05.2022].
23. UNI-T, "PEAKTECH 1635 PeakTech 1635 AC/DC leakage current tester" 2022 [Võrgumaterjal] Saadaval: http://www.uni-trend.com/meters/html/product/General_Meters/DigitalMultimeters/UT139/UT139C.html Kasutatud [02.05.2022].
24. Physics Catalyst, "How to calculate percentage error" 2022 [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://physicscatalyst.com/article/percentage-error/> Kasutatud [08.05.2022].
25. Sciencing, "How to calculate Uncertainty" 2022 [Võrgumaterjal] Saadaval: <https://sciencing.com/how-to-calculate-uncertainty-13710219.html> Kasutatud [08.05.2022].

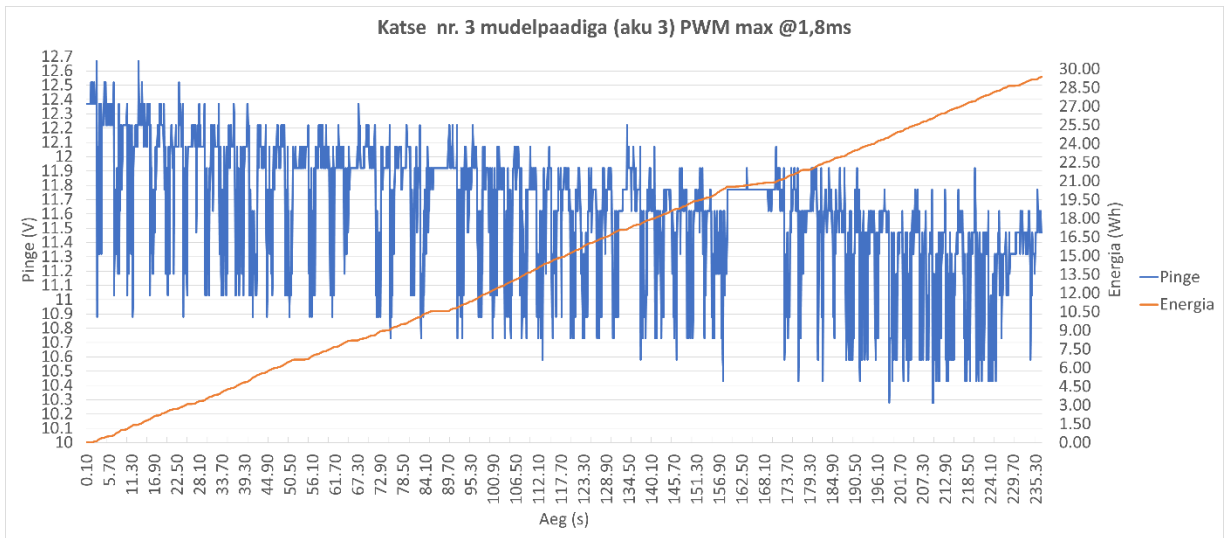
LISAD



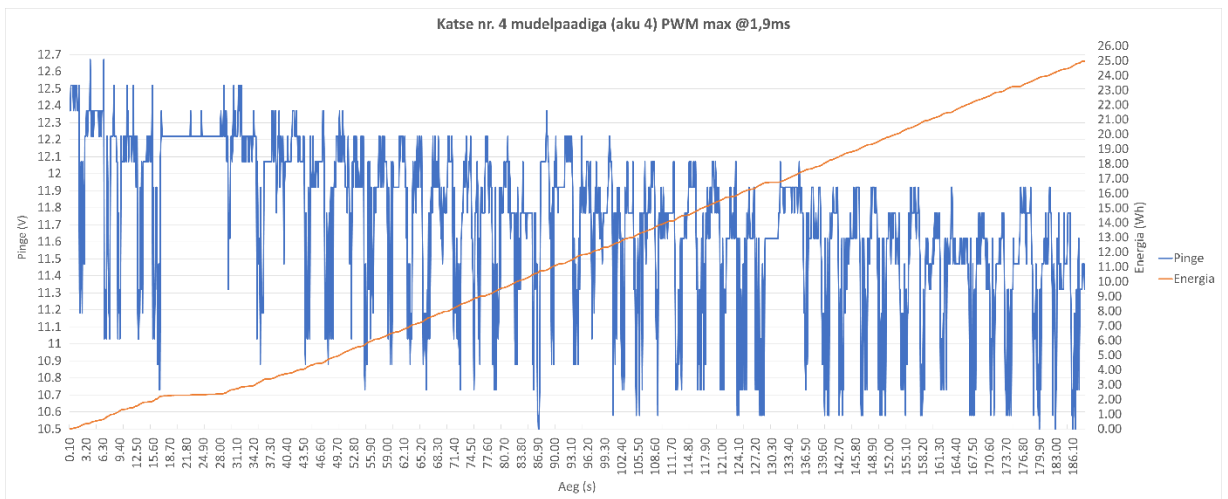
Lisa 1 Katse nr. 1 graafik



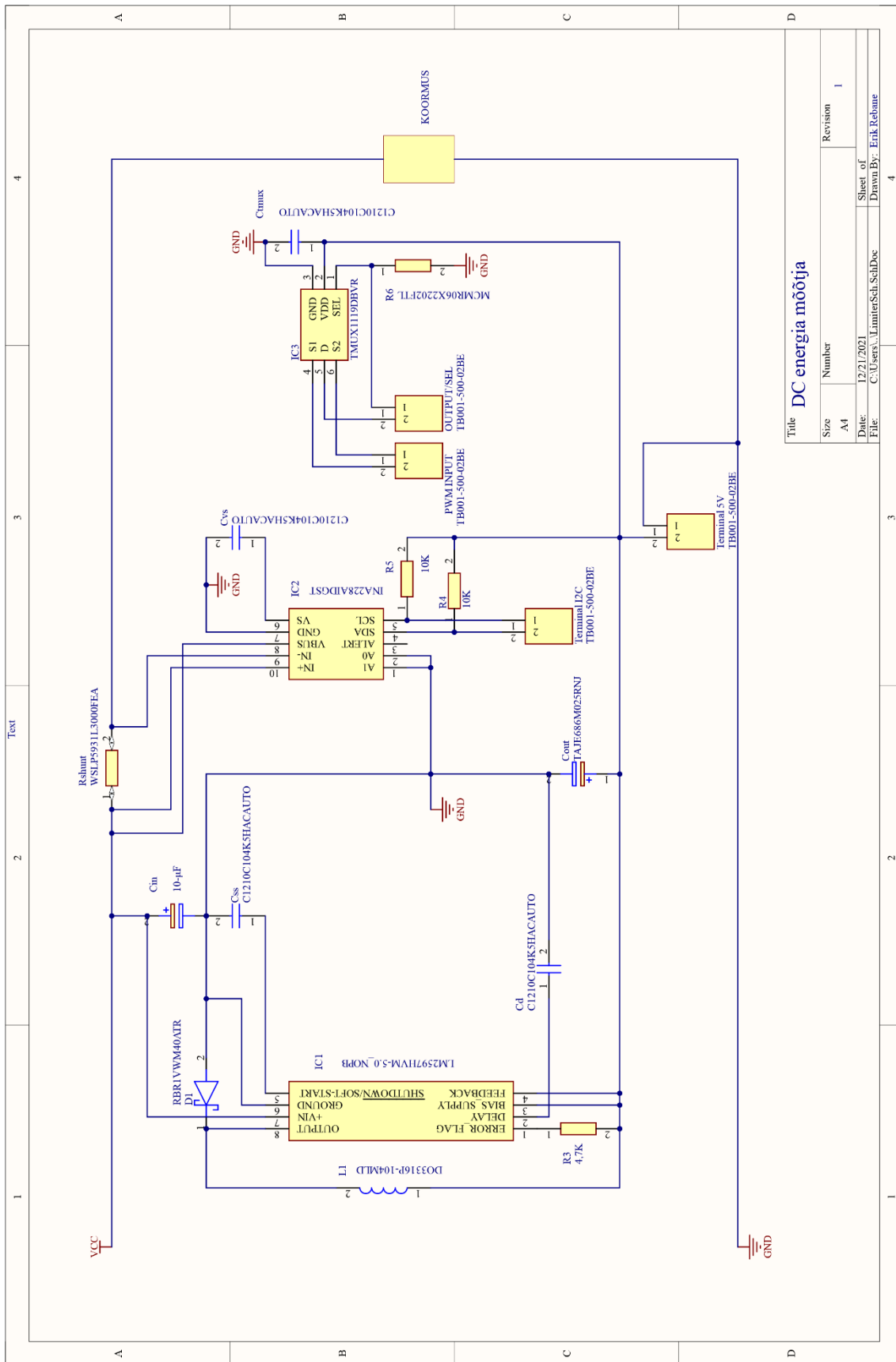
Lisa 2 Katse nr. 2 graafik



Lisa 3 Katse nr. 3 graafik



Lisa 4 Katse nr. 4 graafik



Title		DC energia mõõtja	
Size	Number	Revision	1
A4			
Date:	12/21/2021	Sheet of	4
File:	C:\Users\... \LimiterSch_SchDoe	Drawn By:	Enik Rebane

Lisa 5 Elektriskeem V1

