

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Robert Valge

**Toitepinge ja tarbevoolu monitoorimine ning toitehalduse püsivara
loomine õpperobotil Robotont**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

Veiko Vunder, PhD

Tartu 2024

Resümee/Abstract

Toitepinge ja tarbevoolu monitoorimine ning toitehalduse püsivara loomine õpperobotil Robotont.

Roboteid kasutatakse igapäevaelus üha rohkem. Seetõttu on vaja välja õpetada ka insenere, kes oskavad neid luua, arendada ja parandada. Tartu Ülikoolis kasutatakse selliste inseneride koolitamiseks õpperobotit Robotont. Käesoleva töö eesmärk on luua antud platvormi kasutajale informatiivsed ja automaatsed pinge ning voolu monitoorimissüsteemid, täiendades ja testides toitesüsteemi elektroonikalahendust ning arendades välja toitehalduskontrollerile sobiliku püsivara. Töö käigus loodi vastavad elektroonikalahenduse disainid, toitehalduskontrolleri püsivara ning põhiprotsessori püsivara teostamiseks I²C suhtlust. Samuti implementeeriti ROS-il põhineva draiveri pistikprogramm roboti pardaarvutis andmete vastuvõtmiseks ja kasutajale edastamiseks. Töö tulemusena on kasutajal pidev ülevaade nii toiteallika olekust kui ka tarbevooludest. Lisaks suurenenud kasutajamugavusele annab lahendus võimaluse koguda järgmisteks edasiarendusteks statistikat ja roboti energiatarbimismustreid, et muuta seeläbi platvormi energiatõhusamaks.

CERCS: T125, automatiseerimine, T170, elektroonika, robotika, *control engineering*

Märksõnad: automatiseerimine, ROS, pinge mõõtmine, voolu mõõtmine, Robotont

Monitoring supply voltage and current consumption and creating firmware for Robotont's power management system.

Robots are increasingly used in everyday life. Because of that, there is a need to train engineers who can create, develop and improve them. At the University of Tartu, the educational robot Robotont is used to train such engineers. The aim of this work is to create informative and automatic voltage and current monitoring systems for the users of Robotont's platform, by upgrading and testing the electronics solution of the power system and developing suitable firmware for the power management controller. The work produced the design of the corresponding electronics solution, the firmware for the power management controller and the firmware for the main processor to perform I²C communication. Also, a ROS-based driver plug-in was implemented in the robot's on-board computer to receive and publish data to the user. As a result of the work, the user has a constant overview of both the power supply status

and the power consumption. In addition to increased user convenience, the solution provides the opportunity to collect statistics and energy consumption patterns of the robot for further developments, thus making the platform more energy efficient.

CERCS: T125, automation, T170, electronics, robotics, control engineering

Keywords: automation, ROS, voltage measurement, current measurement, Robotont

Sisukord

Jooniste loetelu.....	6
Tabelite loetelu.....	7
Lühendid, konstandid, mõisted	8
1 Sissejuhatus	9
2 Kirjanduse ülevaade	11
2.1 Haridusrobotika olulisus	11
2.2 Voolu mõõtmise tehnoloogiad robotites	14
2.3 Robotont.....	17
2.3.1 Toitelahendus.....	17
2.3.2 Töö alguspunkt.....	18
3 Töö eesmärk ja nõuded lahendusele	19
4 Roboti elektrilised karakteristikud.....	20
5 Lahendus.....	26
5.1 Mõõtesüsteemi lahendus	27
5.1.1 Pinge mõõtmise elektrooniline lahendus	27
5.1.2 Tarbevoolu mõõtmise elektrooniline lahendus	27
5.1.2.1 Mootorite tarbevoolu mõõtmine	28
5.1.2.2 Välisseadmete ja pardaarvuti tarbevoolu mõõtmine.....	29
5.2 Toitehalduskontrolleri püsivara	30
5.2.1 Toitepinge ja tarbevoolu mõõtmine toitehalduskontrolleris	30
5.2.2 Tarbevoolude ja toitepingete tulemuste saatmine põhiprotsessorile	31
5.2.3 Roboti sisse- ja väljalülitamine	32
5.2.4 Valmidus toiteallika vahetuseks	33
5.2.5 Stopp-nupu käsitletus.....	34
5.3 Põhiprotsessori püsivara	35

5.4	Pardaarvuti Intel NUC ROS-i pistikprogramm.....	36
6	Tulemus	38
6.1	Mõõtetäpsuse hindamine	38
6.2	Mõõtelahenduse kasutamine robotiga.....	40
7	Kokkuvõte	42
	Tänuavaldused	43
	Viited.....	44
	Lisad.....	47
	Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	48

Jooniste loetelu

Joonis 1. Lego Spike [11]	12
Joonis 2. Duckiebot [15]	13
Joonis 3. TurtleBot 4 [17]	13
Joonis 4. Ohmi seadusel põhinev voolu mõõtmise süsteem	15
Joonis 5. Halli sensori põhine voolu mõõtmise süsteem [26]	16
Joonis 6. (a) – Robotont 2, (b) – Robotont3	17
Joonis 7. Mõõtmiste sooritamiseks kasutatud ahel	20
Joonis 8. Pardaarvuti Intel NUC sulgumine täisjõudluseel töötades	22
Joonis 9. Pardaarvuti Intel NUC käivitamine minimaalse võimaliku pingega	23
Joonis 10. Pingega langemise aeg 14 V-st 9,5 V-ni täisjõudluseel töötades	24
Joonis 11. Pingega langemise aeg 14 voldist 9,5 voldini jõudeolekus töötades	25
Joonis 12. Lahenduse üldine ülesehitus	26
Joonis 13. Pingete mõõtmiseks kasutatud pingejagurid	27
Joonis 14. Mootorite voolu mõõtmise elektroonika lahendus	29
Joonis 15. Pardaarvuti ja väliste seadmete voolu mõõtmise elektroonika lahendus	30
Joonis 16. Analoog-digitaalmuunduri katkestusrutiini voodiagramm	31
Joonis 17. Põhitsükli voodiagramm	33
Joonis 18. Taimeriga katkestusrutiini voodiagramm	34
Joonis 19. Stopp-nupu katkestusrutiini voodiagramm	35
Joonis 20. ROS pistikprogrammi voodiagramm	37
Joonis 21. Demokatses demonstreerimaks mõõteahela funktsionaalsust	40
Joonis 22. Roboti pideva ja agressiivse sõidu võimsuse graafik	41

Tabelite loetelu

Tabel 1. Pardaarvuti ja väliste seadmete voolu mõõteahela täpsuse kontrollimine (kus andmed on esitatud kujul robotondi näit / toiteploki näit).....38

Tabel 2. Mootorite voolu mõõteahela täpsuse kontrollimine (kus andmed on esitatud kujul robotondi näit / toiteploki näit)39

Tabel 3. Aku ning välise toiteallika pinge mõõteahela täpsuse kontrollimine (kus andmed on esitatud kujul vastava mõõtepunkti miinimum/**mood**/maksimum)39

Lühendid, konstandid, mõisted

ROS – *Robot Operating System*

Li-Ion aku – Liitiumioonaku

ADC – Analoog-digitaalmuundur

LiPo aku – Liitium-polümeer aku

LED – Valgusdiod

USB – *Universal Serial Bus*

MOSFET – *metal–oxide–semiconductor field-effect transistor*

VNC – *Virtual Network Computing*

1 Sissejuhatus

Kui esialgu tunti robotika mõistet eelkõige tööstussektoris, siis viimaste aastate jooksul räägitakse sellest mitmes valdkonnas. Robotid osalevad inimeste igapäevaelus üha rohkem, näiteks suudavad praegused robotid muru niita, aknaid pesta, põrandaid puhastada ning kokata. Robotid on muutnud inimeste tegevusi lihtsamaks ja turvalisemaks ning teevad seda ka edaspidi. [1] Seetõttu on ka vajalik, et keegi oskaks neid roboteid valmistada, arendada, hooldada ja parandada. Selleks, et kõiki neid eelnimetatud oskuseid saaks õppida, on vaja õpperoboteid, mille peal kõike seda harjutada.

Renno Raudmäe magistritöö [2] tulemusena valmis avatud robotplatvorm Robotont esimene ning teine versioon. Tegu on õpperobotiga, mille peal saab harjutada erinevaid vajalikke oskusi selles valdkonnas hakkama saamiseks. Robotont kasutab maailmas laialtlevinud tarkvaraarendusplatvormi ROS – *Robot Operating System*, mistõttu saab saadud teadmisi rakendada ka teiste sarnaste masinate peal. Robotondi platvorm on kõigile kättesaadav ja seda saavad edasi arendada nii projekti meeskonna liikmed kui ka iga inimene, kellele antud valdkond huvi pakub.

Tartu Ülikool korraldab eelnimetatud õppeplatvormi najal huvilistele koolitusi, mille käigus antakse ülevaade robotika ja ROS platvormi baasteadmistest. [2] Hetkel kasutatakse õppimiseks Robotondi kolmanda põlvkonna robotit ning kasutatakse uut ROS2 raamistikku. Robotondi toiteallikana kasutatakse standardset Makita 18 V liitiumioonakut, mis suudab väljastada 15 A voolutugevust [3]. Antud versioonis peab aku täislaetuse taseme lugemiseks vajutama akul olevat nuppu, mis kuvab kasutajale valgusdiodide abil aku laetuse oleku. Selline lahendus on piiratud resolutsiooniga ning roboti töö ajal raskesti kasutatav.

Voolu mõõtmine elektroonikaseadmetes aitab tuvastada võimalikke vigu ning aitab säilitada seadme stabiilse töö. Enamasti kasutatakse robotites voolu mõõtmist alalisvoolu mootorite kontrolli jaoks ning halvasti ehitatud süsteem võib muuta mootorite töö ebakindlaks [4]. Kuna autonoomsed robotid töötavad akutoitel, siis on kriitiliseks komponendiks tarbevoolu mõõtmine, millest saab arvutada tarbitud energia ning aku eeldatava järelejäänud kestvuse [5]. Voolu monitoorimisel saab püsivaras teha ka mitmeid otsuseid, et vähendada seadme kahjustuste või kasutaja vigastuste riski. Robotont 2-l tuli kasutajal aku pinget monitoorimiseks külge ühendada eraldi LiPo aku alarm, seega oli see täielikult roboti operaatori vastutada.

Robotont 3-l toimub voolu ja pinge monitoorimine juba aku sees, kuid kasutajal ei ole pidevat ülevaadet aku olekust.

Autonoomsed pinge ja voolu monitoorimissüsteemid lahendaksid eelkirjeldatud probleemid ning suurendaksid ohutust ja kasutajamugavust. Kasutajal oleks pidev ülevaade aku olekust ja ta saaks oma tööd paremini organiseerida. Kui aku on saamas kriitiliselt tühjaks, siis annaks robot sellest märku. See tähendab, et kasutaja saaks, kas oma töö salvestada ja sulgeda, viia robot laadimispunkti või ühendada külge väline toiteadapter. Samuti annab see võimaluse koguda järgmisteks edasiarendusteks statistikat ja energiatarbimismustreid, näiteks selgitamaks välja milline pardaarvuti on parima jõudluse ja efektiivsuse suhtega.

Samuti tuleb luua vastav püsivara, et voolu ja pinge mõõtmiste tulemused kasutajale arvuliselt esitada. Püsivara peab endas hõlmama kogu roboti tööks ja mõõtmisteks vajalikke funktsioone. Seejuures ei tohi ära unustada kasutajamugavust ning kasutajaga suhtlust läbi heli, LED-ide, nuppude või edasisaadetud sõnumite.

Bakalaureusetöö eesmärk on luua kasutajale informatiivsed toitepinge ning tarbevoolu monitoorimise lahendused, täiendades ja testides toitesüsteemi elektroonikalahendust ning arendades välja toitehalduskontrollerile sobiliku püsivara.

2 Kirjanduse ülevaade

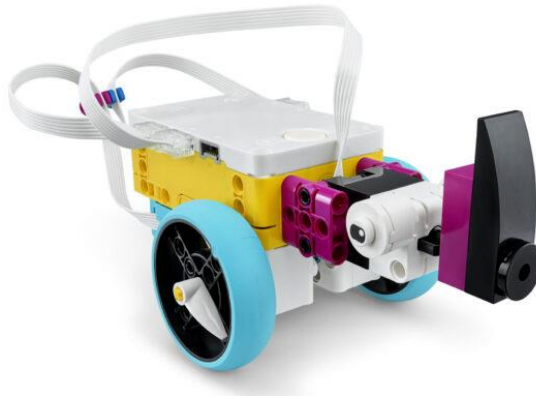
2.1 Haridusrobotika olulisus

Robotika on kasvav trend ja meid ümbritsevad üha rohkem erinevad robotid. Puudu on aga inseneridest, kes neid roboteid arendaks ja valmistaks. Uute arendajate meelitamiseks peab tekitama huvi valdkonna vastu ning eriti efektiivne on seda huvi üles kutsuda noorte õppurite seas. Seetõttu korraldatakse erinevaid robotitega seotuid üritusi erineva vanuseklassi inimestele. [6]

Üheks selliseks on näiteks Robotex, mis sai alguse juba 2001. aastal Tallinna Tehnikaülikoolist. 22 aastaga on võistlus kasvanud niivõrd suureks, et üritust korraldatakse mitmepäevaliselt ning rahvusvaheliselt. Ürituse raames saab võistelda erinevatel aladel ning samuti käia huvilistele suunatud töötubades ja tehnoloogiaäitusel. [7] Robotexi 2017-2019 aasta mõju-uuringust selgub, et kolme aasta peale on osalenud 7000 võistlejat, vanuses 8 kuni 64 aastat [8].

Lisaks robotikaga seotud oskustele arendab robotika lastel probleemi lahendamise oskust ning kriitilist mõtlemist ja otsustusvõimekust. Need on vajalikud, et lapsed tuleksid tulevases elus paremini toime. Samuti saab roboteid edukalt kasutada ka matemaatika ja füüsika õpetamisel. [9]

Algklasside tasemel on populaarseks robotiks LEGO Education Spike Prime (Joonis 1). Sellel on küljes palju erinevaid andureid, seega saab sellega teha juba lihtsamaid robotikaprojekte, mis arendavad laste oskusi ja mõtlemist. Kuna tegu on robotiga, mis ehitatakse valmis legoklotsidest, siis saab iga kasutaja rakendada enda loovust ning konstrueerida just sellise roboti nagu ise soovib. Robotil kasutatakse micro USB-ga laetavat Li-ion akut, mille mahtuvuseks on 2000 mAh ning see võimaldab robotit 4 tundi järjest kasutada. Aku staatuse näitamiseks kasutatakse RGB valgusdioode. Kuna tegu on laialt levinud tootega, siis veebist on leitavad mitmed õpetused ja abistavad materjalid, kuidas antud robotiga midagi arendavat ette võtta. Roboti programmeerimiseks mõeldud rakenduses on võimalus vaadata protsendiliselt aku olekut. Ligipääsetavus on ka aku oleku muutujale, mis annab kasutajale informatsiooni aku allesjäänud mahtuvusest protsentides, kuid pinget või voolu kohta informatsioon puudub. [10]



Joonis 1. Lego Spike [11]

Lego on loonud ka energiamõõtja, mida müüakse Lego robotitele lisaseadmena. Päikesepaneeliga ühendades saab seda kasutada lisaenergia allikana, sest sellel seadmel on energia talletamise, vabastamise kui ka mõõtmise võimalus. Üheks mõõtmise osaks on ekraan, kuhu kuvatakse nii sisendi kui ka väljundi pinge ja vool. Samuti kuvatakse ekraanile talletatud energia maht. [12]

Rohkem edasijõudnute projektiks on Duckietown, tegu on õppeplatvormiga, mille peal saab õppida nii robotikat kui ka tehisintellekti. Platvormiga kaasnevad ka erinevad õppematerjalid, demod ja korralik dokumentatsioon. Projekti raames kasutatakse robotit nimega DuckieBot (Joonis 2). Tegu on kahehatalise ROS tarkvaraplatvormil põhineva robotiga, mille pardaarvutiks on NVIDIA Jetson Nano. Robot kasutab spetsiaalselt disainitud Li-Ion akut, millel on 2 USB väljundit. [13] Esimene neist on mootorite, LED-ide ja andurite toitmiseks ning teine on pardaarvutiga suhtlemiseks. Tänu suhtlusvõimekusele on olemas ka reaajaline diagnostika. See tähendab, et kasutajal on võimalik saada pidevat informatsiooni aku erinevate parameetrite kohta nagu näiteks, temperatuur, sisend- ja väljundpinge, sisend- ja väljundvool. Kuna robot kasutab ROS platvormi, siis kantakse pardaarvuti poolt vastuvõetud andmed vastavatesse olekumuutujatesse, mida on võimalik juba kasutajale kuvada. Samuti on akule lisatud erinevad indikaator LED-id, mis kirjeldavad aku olekut. [14]



Joonis 2. Duckiebot [15]

Robotondiga sarnaseks robotiks ja üheks peamiseks konkurendiks on TurtleBot. See on avatud platvormiga ROS-i põhine robot ning seda on arendatud juba aastat 2010. Projekti eesmärk on näidata, et on võimalik vähendada roboti suurust ja hinda nii, et ei loobuks funktsionaalsusest ja kvaliteedist. Platvormi kasutatakse enamasti õppetöös, hobideks ning uuringuteks. [16] TurtleBot 4 (Joonis 3) kasutab 26 Wh Li-Ion akut ning pardaarvutiks on Raspberry Pi 4B [17]. Aku näitade kasutamiseks hoitakse andmeid BatteryState sõnumis, mis kuulub sensor_msgs paketti. Vastavalt aku laetusele kuvatakse kasutajale RGB LED-il selle staatus. [18] Kuna TurtleBot 4 on võimeline sõitma spetsiifilisse kohta, siis kontrollitakse ka BatteryState *percentage* olekumuutuja abil, kas robot tohib sinna sõita või peab ennast laadima minema [19].



Joonis 3. TurtleBot 4 [17]

Kuna edasijõudnute õppurite jaoks mõeldud robotid töötavad kõik ROS-i põhiselt, siis võib öelda, et iga tõsiseltvõetava spetsialisti haridusteel peaks olema kokkupuude taolise robotiga.

Samuti neil robotitel on tavaliselt võimekus automaatseks dokkimiseks ning võimalus pääseda tarkvaraliselt ligi aku laetuse infole.

2.2 Voolu mõõtmise tehnoloogiad robotites

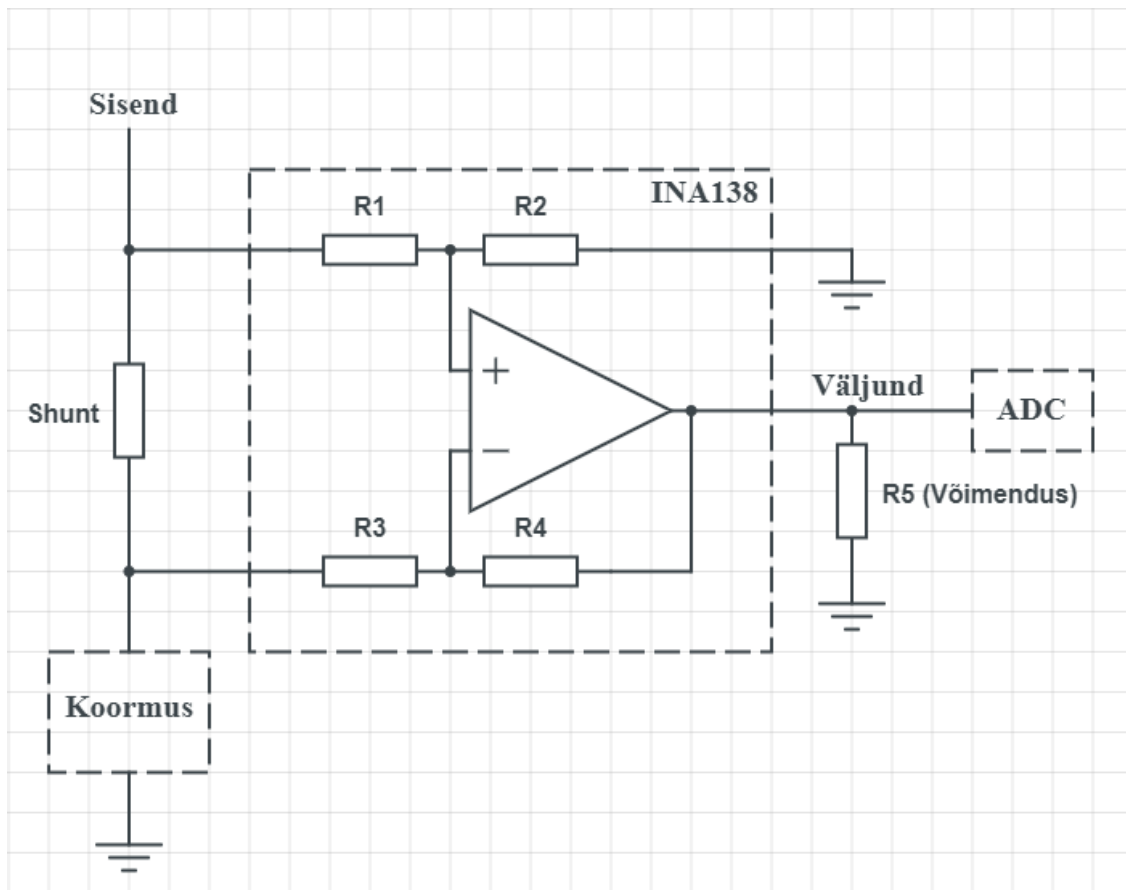
Antud töö üheks eesmärgiks on luua Robotondile voolu mõõtmise võimekus. See on oluline, sest annab roboti kasutajale informatsiooni robotis toimuvast. Antud lahendus annab võimaluse tuvastada erinevaid elektroonilisi probleeme. Näiteks kui mootorite voolutarve on tavapärasest suurem, siis võib eeldada, et mingi mootor on vigane ja vajab väljavahetust. Samuti annab see aluse statistika kogumiseks, mille järgi saaks leida Robotondile optimaalseimad pardaarvutid ja elektroonikalahendused.

Voolu mõõtmiseks on mitmeid lahendusi, nii pardaväliseid kui ka pardapealseid. Üheks pardaväliseks mõõtemetodiks on näiteks multimeetriga mõõtmine, kuid sageli on seda ajakulukas või keeruline külge ühendada. Teiseks pardaväliseks seadmeks on labori toiteplokk, mille roboti toiteallikasse külge ühendades ning toiteallika käivitades näeme kogu roboti tarbevoolu. Mõlema eelmainitud lahenduse miinuseks on see, et tihti on mõõtesüsteemi tülikas üles seada ning kuna puudub otsene suhtlus robotiga, siis ei saa teha reaajalisi kontrollloogika otsuseid.

Pardapealse voolu mõõtmise puhul on aga mitmeid eeliseid. Nimelt saab ise valida, milliste komponentide või ahela osade voolu me soovime mõõta. On võimalik lihtsamalt koguda statistikat ja selle endale kuhugi salvestada ning samuti ei vaja see kasutajapoolset pingutust mõõtekomponentide külge ühendamisel. Integreeritud lahenduse suurimaks puuduseks on aga see, et mõõteahela lahendus on kindlalt määratud ning puudub võimalus seda lihtsalt ümber seadistada. Roboti pardapealseks voolu mõõtmiseks on kaks põhilist viisi: üks neist põhineb elektri põhiteoorial, Ohmi seadusel, ning teine tugineb elektromagnetismile.

Suur osa tänapäevaseid ampermeetreid töötavad Ohmi seaduse põhjal [20]: „vooluahela lõiku läbiva elektrivoolu tugevus on võrdeline selle lõigu otste vahelise pingega ja pöördvõrdeline lõigu takistusega“ [21]. Teisisõnu, teades takisti väärtust ja sellel tekkinud pingelangu saame arvutada seda läbivat voolu. Voolu mõõtmise süsteemi valitakse tavaliselt võimalikult väike takisti, et avaldada minimaalset mõju kogu ülejäänud elektrialelale. [20] Seejuures peab aga takistil tekkinud pingelang olema piisavalt suur, et seda registreerida ning müra-st eristada. Antud meetod on lihtsam ja odavam, sest koosneb peamiselt vaid takistist ja pinge mõõtjast.

Tööpõhimõte seisneb selles, et mõõdetakse šundi takistil tekkivat pingelangu, mis omakorda võimendatakse üles vastavalt mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduri mõõtepiirkonnale (Joonis 4). Pärast seda arvestatakse ahela võimendust, šundi takistust, ADC resolutsiooni ning teisendatakse mõõdetud tulemus ühikutesse, mis kirjeldab šunti läbivat voolu.



Joonis 4. Ohmi seadusel põhinev voolu mõõtmise süsteem

Antud meetodi mõõtemääramatust suurendab takisti täpne väärtus, nii selle tolerants kui ka temperatuurist muutuv takisti reaalne väärtus. Mida suurem on takisti temperatuur ehk seda läbiv vool, seda suurem on tema takistus [22]. Selle kirjeldamiseks on olemas ka takistuse temperatuurikoefitsient, mis lähendab selle suhte lineaarseks ning kirjeldab takistuse tõusu 1 kraadi Celsiuse temperatuuri kasvu korral [23].

Takisti muudu arvutamiseks saab kasutada valemit 1:

$$TCR * R * \Delta t = \Delta R, \quad (\text{Valem 1})$$

kus TCR on takisti temperatuurikoefitsient (ppm/°C),

R on takisti väärtus (Ω),

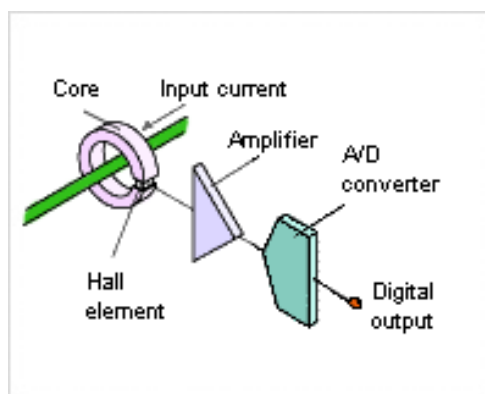
Δt on temperatuuri muutus ($^{\circ}\text{C}$),

ΔR on takisti muutus (Ω).

Näiteks kui kasutatakse $5\text{ m}\Omega$ takistit, mille temperatuurikoefitsent on $\pm 50\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, siis toatemperatuurilt maksimaalse töötemperatuurini toimub $170\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ muutus.

Seega takisti väärtus muutub $\frac{50}{1000000} * 5\text{ m}\Omega * 150\text{ }^{\circ}\text{C} = 0,0375\text{ m}\Omega$. Seega, maksimaalselt suureneb takisti väärtus 0,75 % võrra. Kuna takisti väärtus ja mõõdetud tulemus on võrdelises seoses, siis muutub 0,75 % võrra ka kasutajani jõudnud tulemus.

Teine voolu mõõtmise meetod tugineb Hans Christian Ørsted'i avastusele, et elektrivool tekitab magnetvälja [24]. Süsteemi tööpõhimõte seisneb selles, et elektrivool liigub läbi madalatakistuslikust elektrijuhist seejuures tekitades magnetvälja, mida mõõdab seadmesse integreeritud Halli andur. Seejärel võimendatakse tulemus, ning läbi analoog-digitaalmuunduri saadakse tulemus, mida on võimalik tõlgendada elektrijuhti läbivaks vooluks [25]. Kogu eelnevat kirjeldab ka visuaalselt Joonis 5.



Joonis 5. Halli sensori põhine voolu mõõtmise süsteem [26]

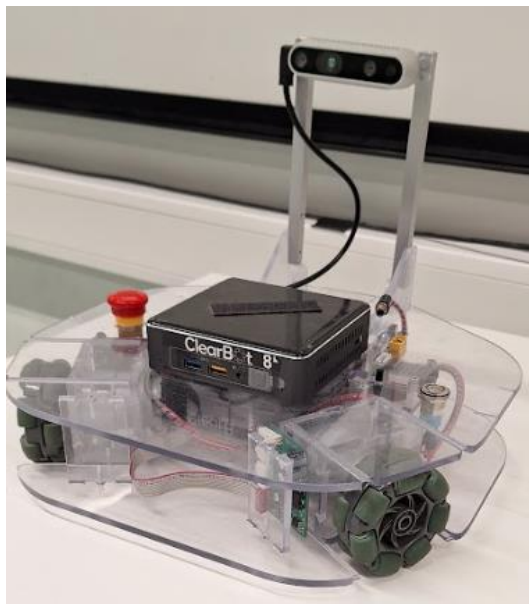
Eelkirjeldatud meetod on kasulik tundlikes süsteemides, sest on muust ahelast isoleeritud ning tulemus ei sõltu takisti pingelangust. Seetõttu sobib see hästi suuremate voolude ja pingete mõõtmiseks. Tavaliselt on see lahendus kallim, sest vaja on rohkemat kui lihtne takisti ja pinge mõõtja. Samuti võivad halli andurid vajada kalibreerimist, et saavutada täpne mõõtmistulemus. [27]

Texas Instruments on soovitanud kasutada kuni 100 ampriste voolude ja alla 100 voldiste pingete korral just šunt takistit, sest see võtab vähem ruumi, on täpsem ning sõltub vähem temperatuurist kui magneetilise lähenemisega variant. [28]

2.3 Robotont

Robotont roboti esimene ning teine põlvkond (Joonis 6 a) loodi Renno Raudmäe magistritöö raames. Tegu on omniliikuva õpperobotiga, mis on loodud ROS-i toega, et anda õppuritele selle tarkvararaamistiku kasutamise kogemus. Kuna tegu on avatud robotplatvormiga, siis Renno Raudmäe magistritöös pandi suurt rõhku ka dokumentatsioonile, et huvilistel oleks võimalus kõike järgi proovida. [2]

Robotont 3 (Joonis 6 b) on edasiarendus Robotont 2-st. Robot jäi üldjoontes samadesse mõõtmesse ja säilitati sarnane välimus. Varasemast polükarbonaadist toodetavast kerest loobuti ning mindi üle 3D printitavale kerele, sest see on kättesaadavam ning ei vaja erioskusi nagu freesimine. Samuti loobuti modulaarsest elektroonikalahendusest ning kogu elektroonika pandi ühe trükkplaadi peale.



(a)



(b)

Joonis 6. (a) – Robotont 2, (b) – Robotont3

2.3.1 Toitelahendus

Kui Robotont 2-l kasutati veel nelja elemendiga LiPo akut, siis kolmanda põlvkonna Robotondil mindi üle standardsele makita 18 V akule. Valik tehti eelkõige arvestades hinda ning järgmise viie aasta kättesaadavust.

Aku vahetusega muutus roboti kasutamine ohutumaks, sest Makita aku laadimisel ei pea omama laadimiseks vajalikke spetsiifilisi teadmisi nagu LiPo aku puhul. Samuti kadus kolmanda põlvkonnaga LiPo aku alarm, mis varasemalt andis kasutajale heliliselt märku, et aku pinge on langenud alla sätestatud limiidi. Makita akul on sisseehitatud pingejälgija ning ühe nupuvajutusega kuvatakse aku paneelil LED-ide abil aku täislaetuse tase. Puudujäägiks oli aga see, et selle oleku teadasaamine ei ole kasutajale mugav ega lihtne ning puudus võimalus reaalselt seda näitu kuskilt lugeda.

2.3.2 Töö alguspunkt

Käesolevat tööd alustati seisust, kus Robotont 3.0 oli olemas, kokkupandud ning testitud. Robotont 3.1 oli toitehalduskontroller vahetatud ATtiny88 vastu, väljatulnud elektroonika vead olid parandatud. Kuid Robotont 3.1 elektroonikaplaati ei olnud veel tellitud ning seetõttu sai autor jätta 3.1 elektroonikaplaadi arendusse oma panuse pinge ning voolumõõtmise osas. Toitehalduskontrolleriga on ühendatud ka väikene kõlar, et programmi siluda ja kasutajale tagasisidet anda. Samuti tehti vastavad ühendused, et põhiprotsessori STM32 ning toitehalduskontrolleri vahel saaks hakata toimuma I²C suhtlus. Roboti pardaarvutis oli töö alguses modulaarne ROS2 dariver, kuhu sai funktsionaalsuse lisamiseks juurde integreerida pistikprogramme. Pardaarvuti suhtles trükkplaadil oleva põhiprotsessoriga üle USB.

3 Töö eesmärk ja nõuded lahendusele

Bakalaureusetöö eesmärk on luua kasutajale informatiivsed toitepinge ning tarbevoolu monitoorimise lahendused, täiendades ja testides toitesüsteemi elektroonikalahendust ning arendades välja toitehalduskontrollerile sobiliku püsivara.

Nõuded pardapealse voolu ja pinge mõõtmislahendusele:

- voolu mõõdetakse kahest füüsilisest punktist, mis võimaldavad eraldi registreerida;
 1. mootorite tarbitavat voolu;
 2. pardaarvuti ning väliste seadmete poolt tarbitavat voolu;
- pinget mõõdetakse kahest füüsilisest punktist: aku toiteallika sisendist ning välise toiteallika sisendist;
- mootorite voolu mõõtepiirkond on 0 - 15 A;
- pardaarvuti ning väliste seadmete voolu mõõtepiirkond on 0 - 5 A;
- roboti kasutajal peab olema võimalik lugeda voolu ja pinge näite pardaarvutist standardsete ROS vahendite abil.

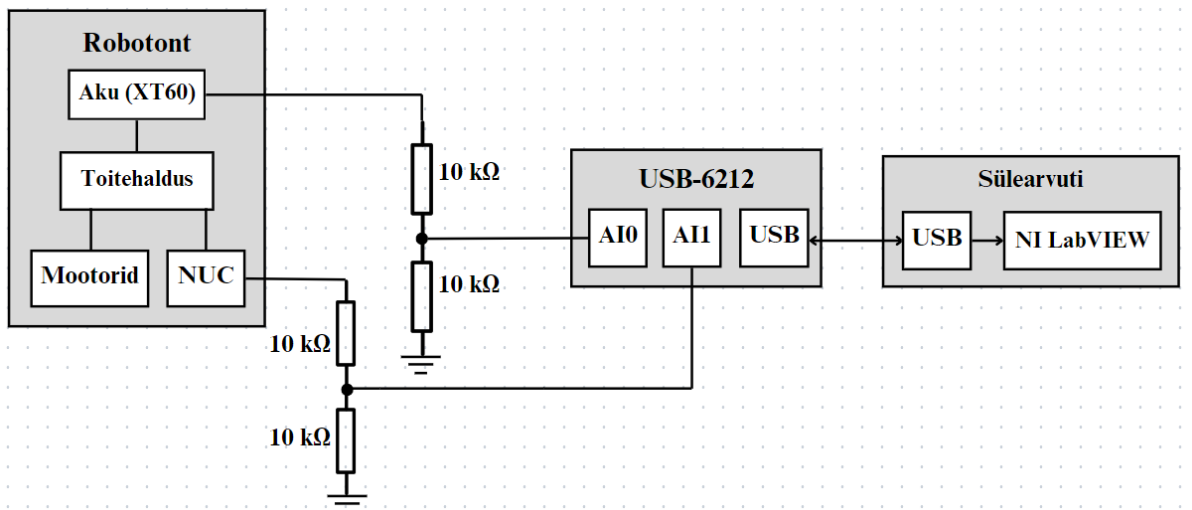
Nõuded toitehalduskontrolleri püsivarale:

- stopp-nupp, mis katkestab mootorite toite mistahes hetkel;
- edastab olekuinfot põhiprotsessorile;
- sisse- ja väljalülitades antakse kasutajale heliliselt märku, et on toimunud üks eelmainitud sündmustest;
- peab andma kasutajale märku kui aku pinge on langenud alla referentsväärtuse 14 V;
- peab andma kasutajale märku kui stopp-nupp on vahetanud olekut;
- püsivara peab suutma teostada pingete mõõtmist piisava kiirusega, et vajadusel võimaldada toiteallika vahetuse juhtimist nii, et pardaarvuti ega süsteem välja ei lülituks.

4 Roboti elektrilised karakteristikud

Töö käigus tuli uurida ja tuvastada roboti väljalülitamise pinged. See oli vajalik, et järgmistes Robotondi versioonides saaks ära parandada välisele toitele ümberlülitamise elektroonika, mis teeks roboti kasutamise mugavamaks.

Mõõtmiste sooritamiseks kasutati National Instruments LabVIEW 2012 tarkvara ning sama ettevõtte USB-6212 seadet. Kuna USB-6212 kanali maksimaalne sisendpinge on 10 V, siis konstrueeriti ahelasse ka pingejagur. Kuna roboti maksimaalne toitepinge võib täis aku korral ulatuda 21 V-ni, kuid USB-6212 kanali maksimaalne sisendpinge on 10 V, siis konstrueeriti mõõteahelasse pingejagur kahest 10 k Ω -sest takistist, et saaks mõõta kuni 20 V-seid pingeid. USB-6212 maksimaalne sãmplimissagedus on küll 250 kHz, kuid seda ainult juhul, kui kasutuses on üks kanal korraga. All kirjeldatud mõõtmised on kõik tehtud kasutades AI0 ja AI1 kanaleid RSE režiimis ning seega on maksimaalseks sãmplimissageduseks 125 kHz. Graafikute loomiseks on võetud tulemustest iga 100. element. Samuti on graafikute loetavuse parandamiseks kasutatud vaid selle kanali tulemusi, mis oli ühendatud aku XT60 pesa klemmidega. Eelkirjeldatut aitab visualiseerida allolev joonis (Joonis 7).

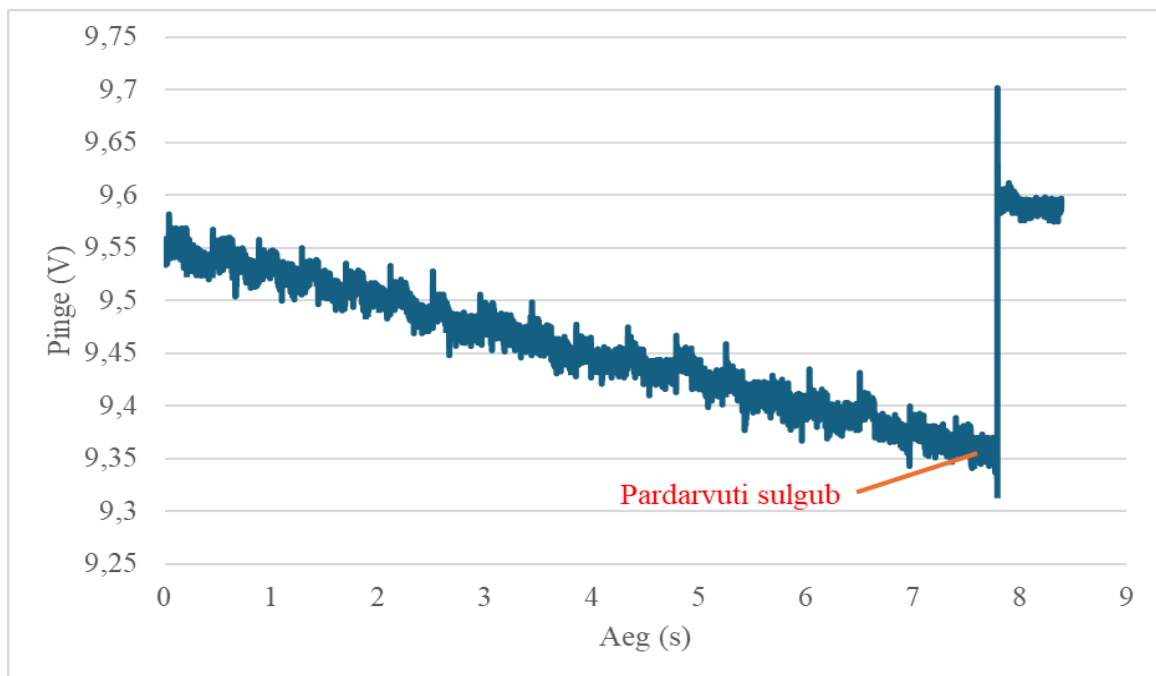


Joonis 7. Mõõtmiste sooritamiseks kasutatud ahel

Elektriliste karakteristikute uurimisküsimused:

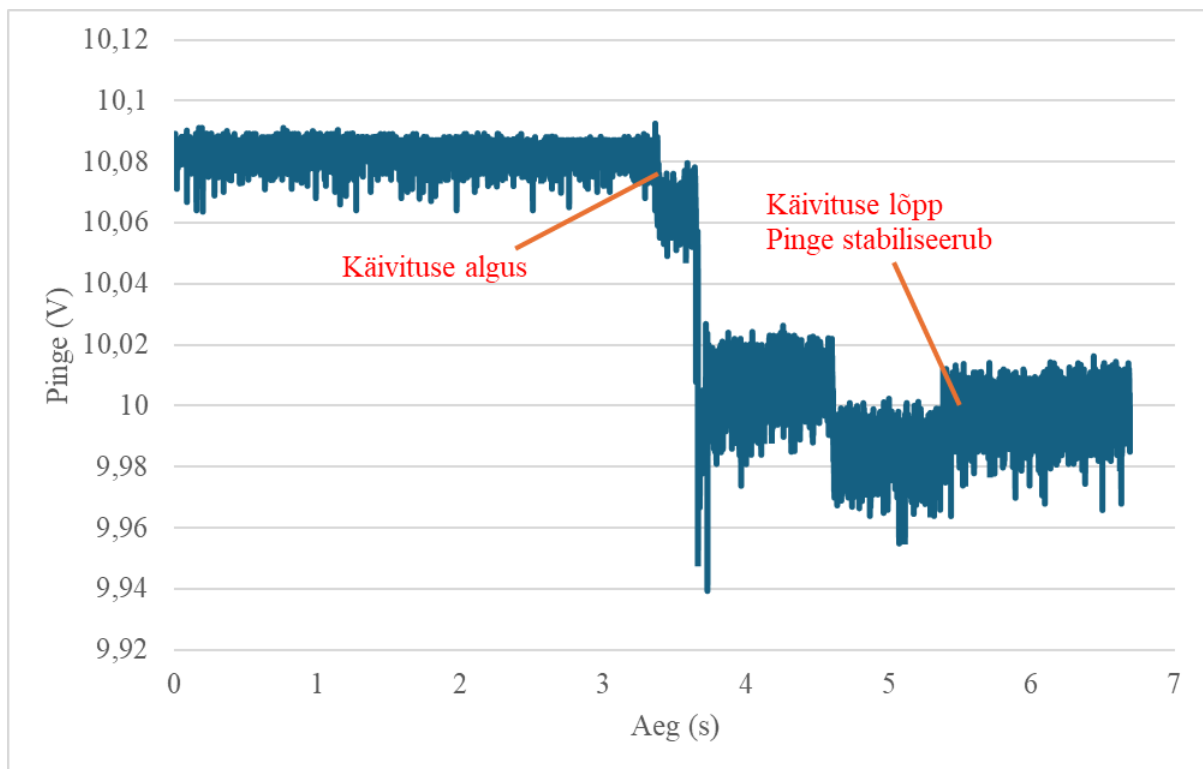
- millise pingega juures pardaarvuti Intel NUC ennast välja lülitab maksimaalse jõudluse korral;
- mis on minimaalne pingega, mille korral pardaarvuti Intel NUC käivitub;
- kui kiiresti Intel NUC, jõudeolekus töötades, ennast välja lülitab kui toiteallikas eemaldada;
- kui kiiresti Intel NUC, täisjõudlusega töötades, ennast välja lülitab kui toiteallikas eemaldada.

Esimesel mõõtmisel tuvastati pingega, mille juures lülitab pardaarvuti ennast välja (Joonis 8). Katse oli eelkõige vajalik selleks, et teada saada, kas võib tekkida selline olukord, kus pardaarvuti võib ennast välja lülitada, kui aku pole täielikult tühi. Mõõtmine on sooritatud maksimaalse koormuse juures. See tähendab, et pardarvutis Intel NUC 12 Pro Mini PC NUC12WSKi5 käitati sysbench programmi, mis pani arvuti täisjõudlusega tööle. Mõõtmise tegemiseks tuvastati esmalt pinget järk-järgult alandades välja piirkond, mille juures pardaarvuti ennast välja lülitab. Seejärel sätestati toiteallikast paarsada millivolti suurem pingega ning hakati seda ligikaudu 0,05 V/s vähendama. Pinget vähendati nii kaua kuni pardaarvuti ennast välja lülitas ja pingega stabiliseerus. Graafikult on näha, et toiteallika pingega langemisel alla 9,5 V lülitub pardaarvuti välja. Katset sooritati 4 korda, keskmiseks tulemuseks saadi 9,4 V, minimaalseks tulemuseks 9,3 V ja maksimaalseks tulemuseks 9,5 V. Saadud tulemuste põhjal otsustati edaspidiseks kasutuseks valida suurim pingetase 9,5 V.



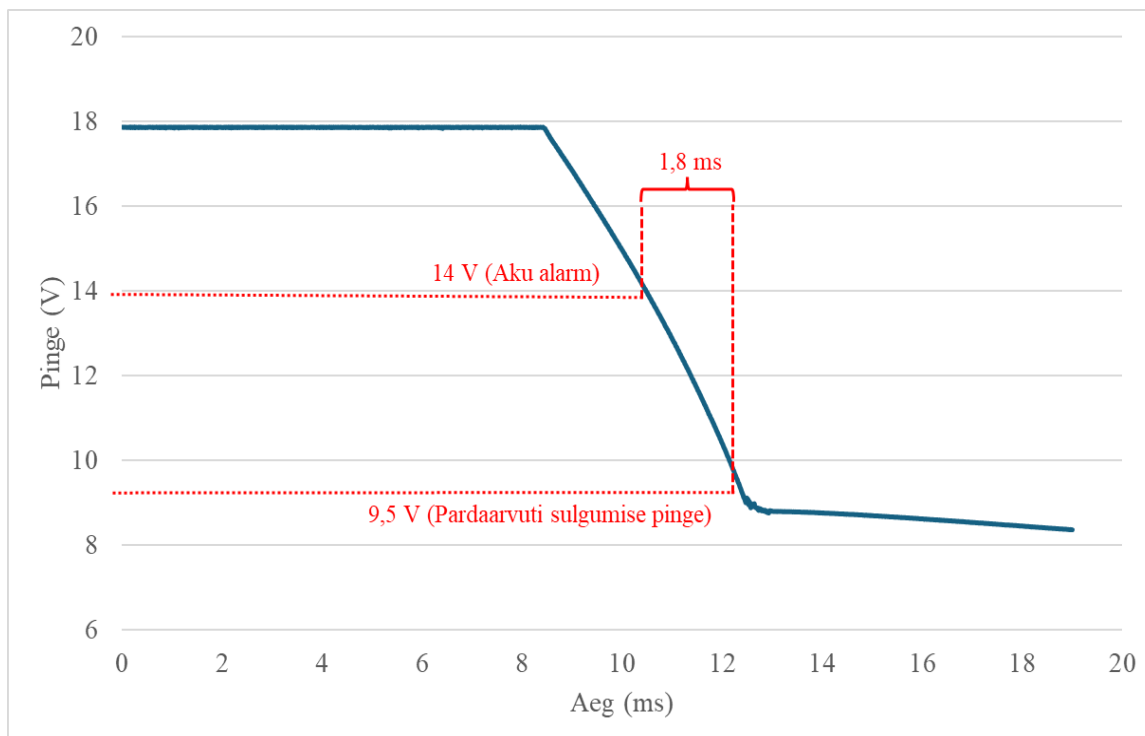
Joonis 8. Pardarvuti Intel NUC sulgumine täisjõudluses töötades

Järgmises katses uuriti, mis pinget juures suudab pardarvuti Intel NUC täielikult käivituda. Katse oli vajalik, et näha kui palju erinevad pardarvuti avanemis- ja sulgumispinge. Lisaks käivituspingele on allolevalt graafikult (Joonis 9) näha ka pinget käitumine avanemise järgselt. Esimesena prooviti käivitada pardarvutit eelmises mõõtmises leitud pingega 9,5 V. See aga jäi liiga väikeseks ning pinget hakati 100 mV haaval tõstma kuni jõuti tulemuseni 10,1 V, mille korral ka pardarvuti esimest korda käivitus. Iga katset sooritati 3 korda, et veenduda selle õnnestumises või ebaõnnestumises. Graafikult nähtava katse kordussooritustel saadi iga kord tulemuseks 10,1 V. Tulemuste põhjal saab öelda, et tegu on süsteemis kriitilise kohaga, sest kui aku pinge on langenud 10 V peale, siis pole enam pardarvutile taaskäivituse tegemine võimalik, sest pinge on liiga madal.



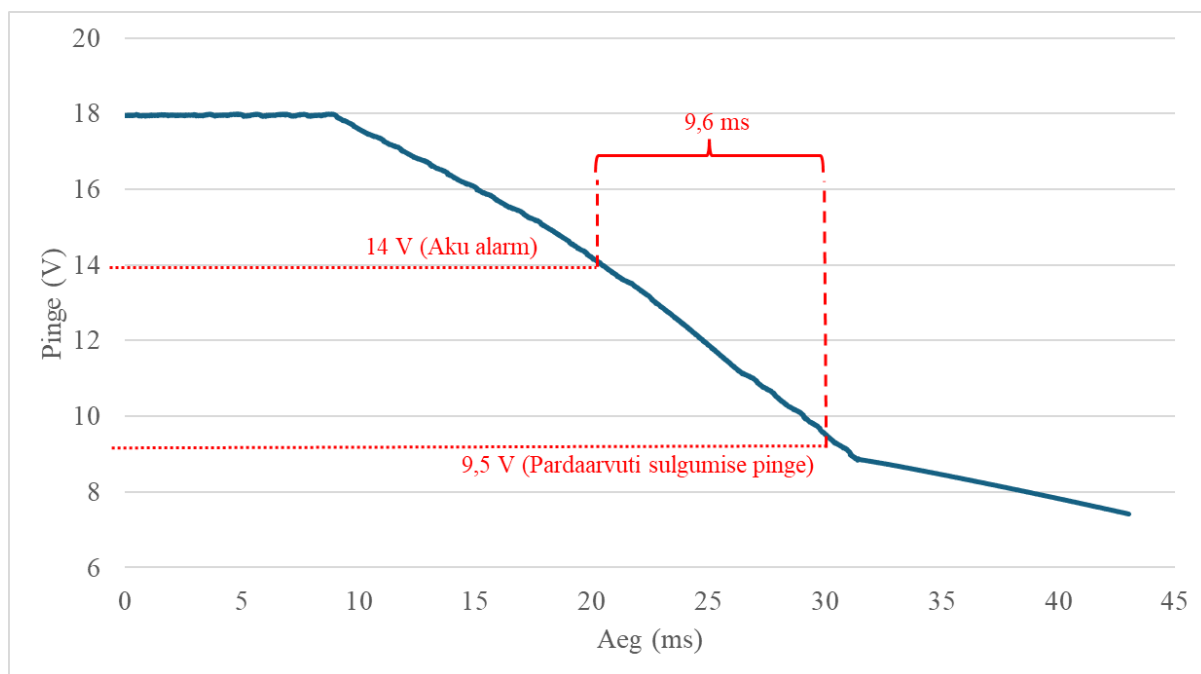
Joonis 9. Pardaarvuti Intel NUC käivitamine minimaalse võimaliku ping juures

Järgmiseks sooritati mõõtmise, mille käigus uuriti kui kaua suudab robot pardal oleva mahtuvuse abil toiteallika lahtiühendamisel töötada enne kui ping alla kriitilise taseme langeb ja pardaarvuti end välja lülitab. Selleks mõõdeti aega hetkest kui toiteallikas lahti ühendatakse kuni selle hetkeni, millal pardaarvuti ennast välja lülitab (Joonis 10). Siinkohal arvestati halvima juhuga ehk sellega, et aku ping on 14 V ning kasutajale antakse juba märku, et aeg on aku laadima panna. Samuti on teada eelmise mõõtmise tulemusena, et pardaarvuti lülitab ennast välja kui ping on alla 9,5 V. Seega tuleb ära mõõta aeg, mis kulub pingel langemiseks 14 voldist 9,5 voldini. Kuna mõõdeti 125 kHz-iga, siis see tähendab, et iga mõõtepunkti vaheline aeg on 8 μ s. Eelnevalt kirjeldatud vahemikku jääb 228 mõõtmist, mis tähendab, et selleks kulub 1824 μ s ehk ligikaudu 1,8 ms. Eelkirjeldatud olukord on aga äärmuslik ning tavakasutuses vähetõenäoline, sest pardaarvuti töötas selles katses täisjõudlusele.



Joonis 10. Pinge langemise aeg 14 V-st 9,5 V-ni täisjõudluseel töötades

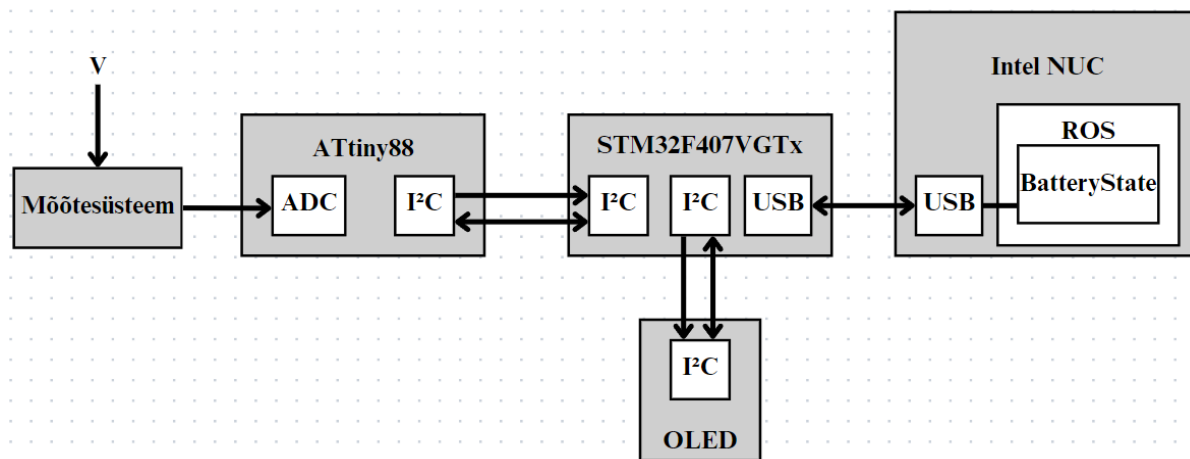
Sooritades sama katset nii, et pardaarvuti töötas jõudeolekus, saadi tulemuseks, et vahemikku jääb 1200 mõõtmist, mis tähendab, et selleks kulub 9,6 ms (Joonis 11). Tüüpilisel kasutusjuhul võib eeldada 9,6 ms-st väiksemat ajaakent, sest erinevatele taustprotsessidele on lisaks töös näiteks roboti ja sügavuskaamera ROS draiverid, veebiserver, juhtprogrammid, jne. Lahenduse disainimisel tuleb arvestada siiski halvima juhuga, et süsteem suudaks toiteallika vahetuse sooritada ka maksimaaljõudluseel töötades. Kummaski katses ei arvestatud mootorite vooluga, sest toiteallika vahetus toimub enamasti statsionaarses olekus. Kui lülitatakse välisest toiteallikast aku peale, siis on mootorid ohutuse tagamiseks nii kui nii suletud.



Joonis 11. Pinge langemise aeg 14 voldist 9,5 voldini jõudeolekus töötades

5 Lahendus

Alloleval joonisel (Joonis 12) on näha töös väljatöötatud lahenduse kogu ahel. Esimeseks osaks on elektrooniline mõõtesüsteem, mis jaguneb kaheks erinevaks alamosaks: pinge mõõtmine ning voolu mõõtmine. Mõõtmised teostatakse toitehalduskontrolleri ATtiny88 püsivaras, mis saadab tulemused edasi läbi STM32F407VGT6 põhiprotsessori Intel NUC pardarvutisse. Parदारvutis ROS-il põhineva draiveri pistikprogramm.



Joonis 12. Lahenduse üldine ülesehitus

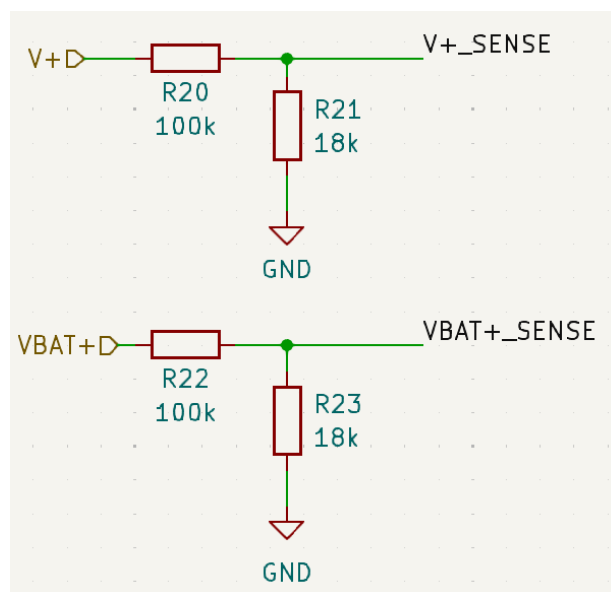
Tarbevoolu mõõtmine toimub kahest füüsilisest punktist: üks asub mootoritele mineva voolu ahelas ning teine paikneb pardaarvuti ja välisesse seadmetesse mineva voolu ahelas. Pinge mõõtmine toimub samuti kahest punktis, esimene neist mõõdab aku toitepinget ning teine mõõdab välise toiteallika pinget. Mõlema mõõtesüsteemi lahenduse implementeerimiseks on kasutatud vaba tarkvara KiCad.

Mõlemad eelnimetatud mõõtmised tehakse roboti toitesüsteemi haldava protsessori Attiny88 poolt kasutades sinna sisseehitatud 10 bitist analoog-digitaalmuundurit. Edasi saadetakse mõõdetud tulemused põhiprotsessorisse kasutades suhtlusprotokolli I²C. Põhiprotsessoris toimub mõõtmiste teisendamine vastavatesse ühikutesse. Pärast teisendamist saadetakse tulemused USB kaudu pardaarvutisse, mis andmed vastu võtab ning ROS-i programmis vastavad olekuparameetrid nendega täidab ja need ka teistele sõlmedele kuulutab. Samuti on võimalus põhiprotsessorist saata valitud andmed OLED ekraanile, et kuvada kasutajale informatiivne tagasiside toitesüsteemis toimuvast.

5.1 Mõõtesüsteemi lahendus

5.1.1 Pinge mõõtmise elektrooniline lahendus

Mõlemad pinge mõõtmised on teostatud pingejaguriga, mis koosneb ühest 100 k Ω ja ühest 18 k Ω takistist (Joonis 13). Kuna aku maksimaalne pinge on 20,6 V [29], siis disainis on eeldatud, et maksimaalne sisendpinge on 21,6 V, mis tekitab toitehalduskontrolleri Attiny88 ADC jalale 3,3 V. Samuti prooviti ahelasse lisada 18 k Ω takistiga rööbiti 3,3 zeneri diodi, mis pidanuks kontrolleri jalga ülepinge eest kaitsema. Paraku selle lekkevool osutus liiga suureks ning rikkus ära mõõtmistulemused, mistõttu eemaldati see skeemist kui ka elektroonikaplaadilt. Kuna toitehalduskontrolleri ADC on 10 bitine, siis mõlema pinge mõõtmise resolutsiooniks on $21,6 / 1024 = 21 \text{ mV}$.



Joonis 13. Pingete mõõtmiseks kasutatud pingejagurid

5.1.2 Tarbevoolu mõõtmise elektrooniline lahendus

Mõlema tarbevoolu mõõtmise lahenduse keskmeks on Texas Instruments-i voolu jälgimise kiip INA138. Seade valiti arvestades selle sobilikkust ahelasse, hinda, kättesaadavust ja suurust. Seadme tööpõhimõte seisneb selles, et jälgitakse šunt takistil tekkivat pingelangu, mis seejärel võimendatakse, et toitehalduskontroller tulemuse saaks mõõta. Takistite valikul ja võimenduse korduse valimisel on arvestatud, et toitehalduskontrolleri jalale langev pinge ei tohi ületada 3,3 V. Kuna maksimum voolutugevuse ületamisel on võimalik see pinge ületada, siis prooviti ahelasse lisada kontrolleri jalga ülepinge eest kaitsvat 3,3 V zeneri diodi. Paraku osutus ka

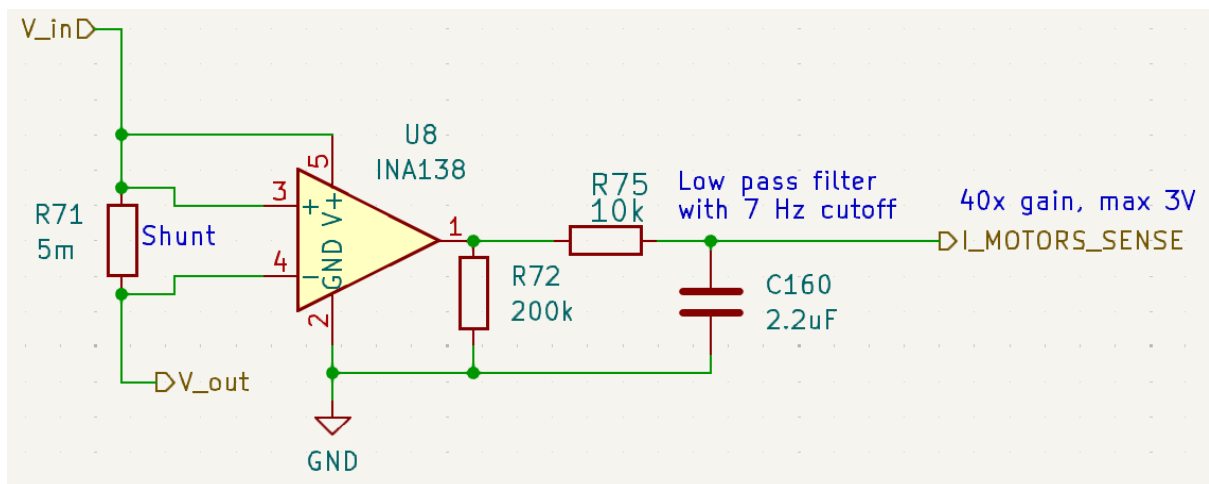
siin ahelas selle lekkevool liiga suureks ning rikkus ära mõõtmistulemused, mistõttu eemaldati see skeemist kui ka elektroonikaplaadilt. Samuti on ahelatesse lisatud 7 Hz madalpääsfiltrid, et tagada ühtlasem mõõtmistulemus. Joonisel 15 tähistatud R72 ja joonisel 16 tähistatud R74 määravad väljundi võimenduse. Kummagi vahetamisega saab muuta vastavat mõõdetavat voolupiirkonda ning seepärast on see pandud 0603 pakendiga, et kasutajal seda mugavam teha oleks. Kuid seda tehes tuleb jälgida, et ei ületataks INA138 andmelehes väljatoodud maksimaalset šundi pingelangu 0,5 V, sest vastasel korral ei luba kiibi tootja täpseid tulemusi. Varasema arutluse käigus leiti, et 5 m Ω takistiga 150 °C temperatuuri muutuse korral muutub takisti väärtus 0,75% ning sama palju ka mõõtetulemus, mis kasutajani jõuab. Kuna tegu on ekstreemjuhuga ja reaalselt muutub takisti temperatuur vaid paarkümmend kraadi, siis antud töö käigus arvestatakse temperatuuri mõju takisti väärtusele olematuks. Seda seetõttu, et takisti enda tolerants on protsentuaalselt suurem kui temperatuuri mõju ning soojusülekanne arvutustega kompenseerides ei jõutaks ikkagi täpse tulemuseni, sest need arvutused sõltuvad väga palju ümbritsevast keskkonnast ja jahutusest.

5.1.2.1 Mootorite tarbevoolu mõõtmine

Kuna Robotont 3-l kasutatakse akut, mis peab suutma väljastada kuni 15 A voolu ning ühe mootori maksimaalne voolutarve on 5 A, siis mootorite tarbevoolu elektroonilise lahenduse (Joonis 14) puhul on arvestatud, et süsteem peab suutma mõõta kuni 15 ampriseid voolusid.

Šundi valik tehti selle järgi, et INA138 suudab täpseid mõõtmisi teha, kui sisendpingete erinevus ei ületa 0,5 V. Samuti taheti hoida takistil eralduvat võimsust võimalikult madalana. Mootorite tarbevoolu mõõtmiseks kasutatakse 5 m Ω šunt takistit, mis tekitab maksimaalseks pingete erinevuseks 0,075 V ning maksimaalseks eralduvaks võimsuseks 1,125 W.

Turvalisuse huvides taheti, et toitehalduskontrolleri ATtiny88 ADC jalale ei langeks rohkem kui 3 V. INA138 tekitab väljundisse 200 μ A/V kohta, seega maksimum juhul ehk 15 A korral jookseb väljundisse 15 μ A voolu. Paigutades väljundisse 200 k Ω takisti, tekitab see maksimumvoolu korral mikrokontrolleri jalale 3 V. Kuna toitehalduskontrolleri ADC on 10 bitine, siis mõõteresolutsiooniks on $15 / 1024 = 15$ mA.



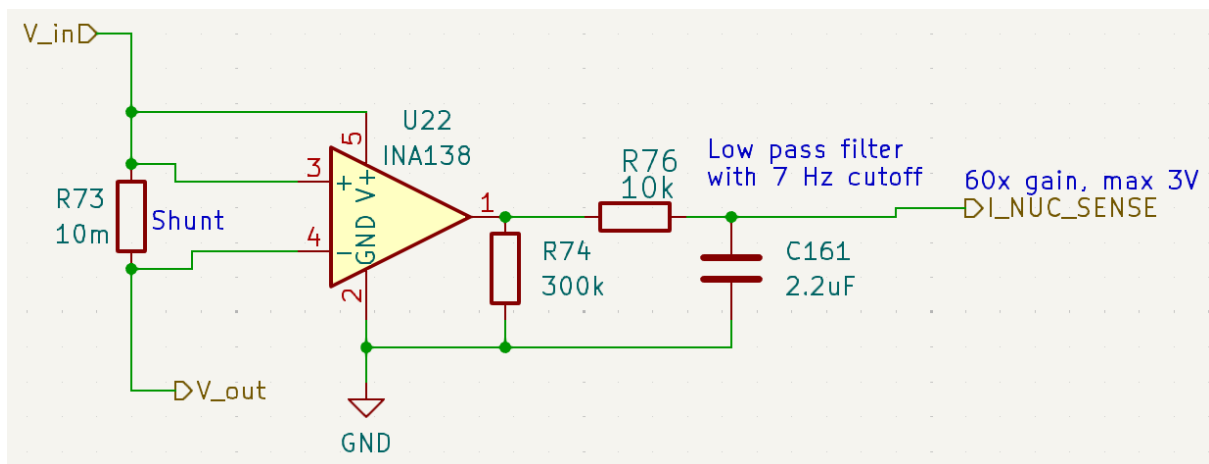
Joonis 14. Mootorite voolu mõõtmise elektroonika lahendus

5.1.2.2 Välisseadmete ja pardaarvuti tarbevoolu mõõtmine

Välisseadmete ja pardaarvuti tarbevoolu mõõtmise lahendusel on eeldatud (Joonis 15), et maksimaalne mõõdetav vool on kuni 5 A. Eeldus on tehtud mõõtetulemuse põhjal, et 18 V toitepinge juures koormustesti ajal jäi pardaarvuti tarbevool alla 5 A.

Šundi valik tehti samade põhjuste järgi nagu mootorite tarbevoolu mõõtmise disainis. Välisseadmete ja pardaarvuti tarbevoolu mõõtmiseks kasutatakse 10 mΩ šunt takistit, mis tekitab maksimaalseks pingete erinevuseks 0,05 V ning maksimaalseks eralduvaks võimsuseks 0,25 W.

Turvalisuse huvides taheti, et toitehalduskontrolleri Attiny88 ADC jalale ei langeks rohkem kui 3 V. INA138 tekitab väljundisse 200 $\mu\text{A/V}$ kohta, seega maksimum juhul ehk 5 A korral jookseb väljundisse 10 μA voolu. Paigutades väljundisse 300 k Ω takisti, tekitab see mikrokontrolleri jalale 3 V. Kuna toitehalduskontrolleri ADC on 10 bitine, siis mõõteresolutsiooniks on $5 / 1024 = 5 \text{ mA}$.



Joonis 15. Pardaarvuti ja väliste seadmete voolu mõõtmise elektroonika lahendus

5.2 Toitehalduskontrolleri püsivara

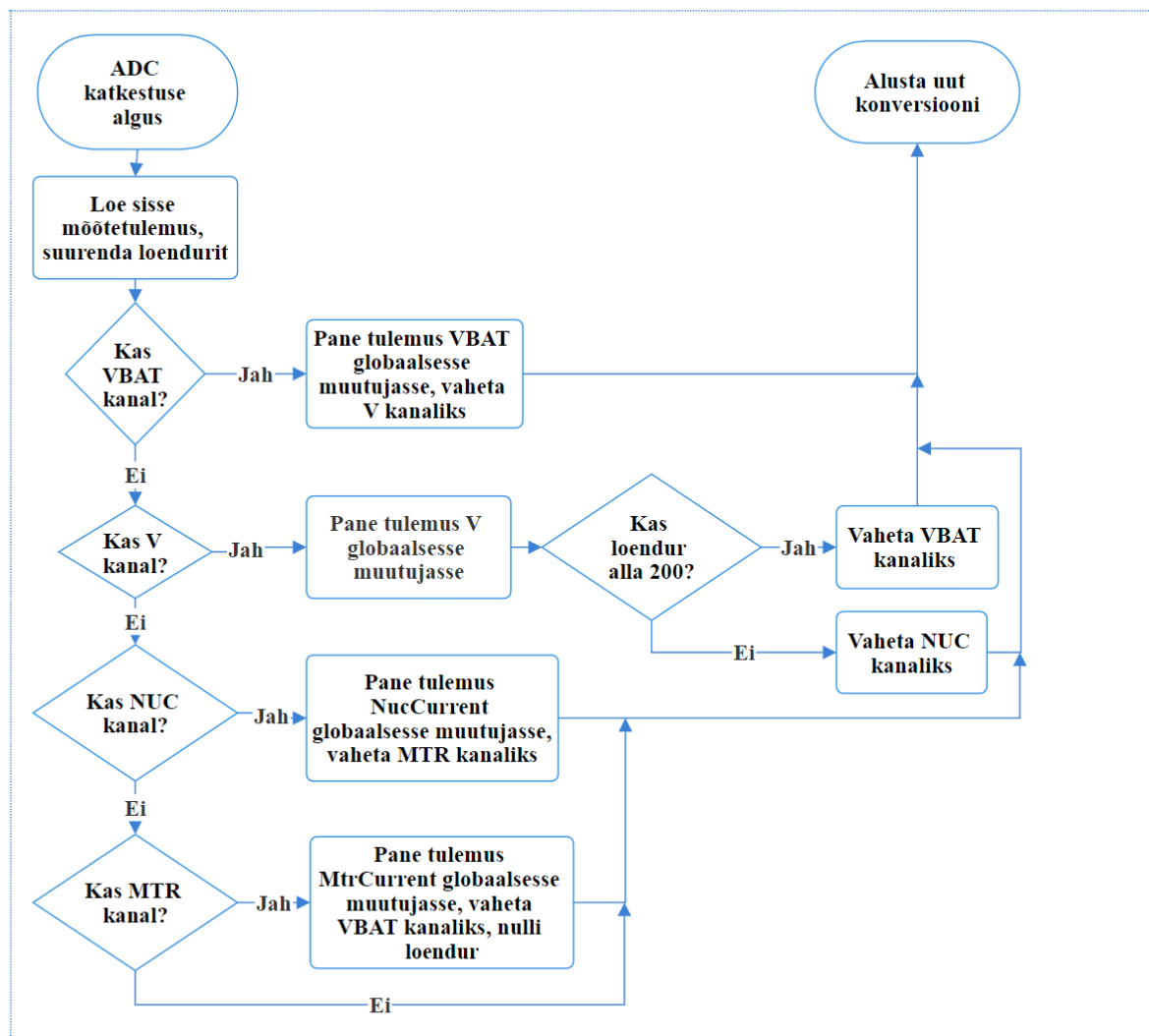
Kuna robotil uuendati ka toitehalduskontrollerit ennast, siis otsustati töö osana luua ka tervenisti uus püsivara. Toitehalduskontrolleri ATtiny88 on programmeeritud kasutades Arduino IDE tarkvara, sest see oli kiiresti ja lihtsasti kättesaadav ning ühilduv olemasolevate programmaatoritega.

Lahendus hõlmab endas:

- tarbevoolu ja toitepinge mõõtmist;
- tarbevoolu ja toitepingete tulemuste saatmist põhiprotsessorile;
- roboti sisse ja väljalülitamist;
- valmidust toiteallika vahetuseks;
- STOP nupu käsitus.

5.2.1 Toitepinge ja tarbevoolu mõõtmine toitehalduskontrolleris

Toitepinge ja tarbevoolu mõõtmised sooritatakse kontrollerisse sisseehitatud analoog-digitaalmuunduriga. Lahendus on üles ehitatud katkesuse peale, et vähendada protsessori koormust (Joonis 16). Katkestusrutiini on üles seatud olekumasin, mis vahetab perioodiliselt ADC kanalit, kust tulemust loetakse. Kasutatud on katkestust, sest muidu blokeeruks programm igas kohas, kus on vaja sooritada mõõtmine. See aga oleks ebaoptimaalne ning protsessor jääks programmis kasutavate sageduste juures ajahätta. Saadud tulemused kirjutatakse globaalsestesse muutujatesse, et teised funktsioonid saaksid neid kasutada.



Joonis 16. Analoo-digitaalmuunduri katkestusrutiini voodiagramm

5.2.2 Tarbevoolude ja toitepingete tulemuste saatmine põhiprotsessorile

Tarbevoolude ja toitepingete tulemuste saatmine põhiprotsessorile toimub üle suhtlusprotokolli I²C. Saatmise funktsiooni kutsutakse perioodiliselt välja peatsükli läbides 10 Hz sagedusega. Toitehalduskontroller ATtiny88 on suhtluse peremees ning põhiprotsessor STM32F407VGT6 on alamseade, sest sellisel lähenemisel ei ole võimalik põhiprotsessoril toitehalduskontrollerit päringutega üle koormata.

5.2.3 Roboti sisse- ja väljalülitamine

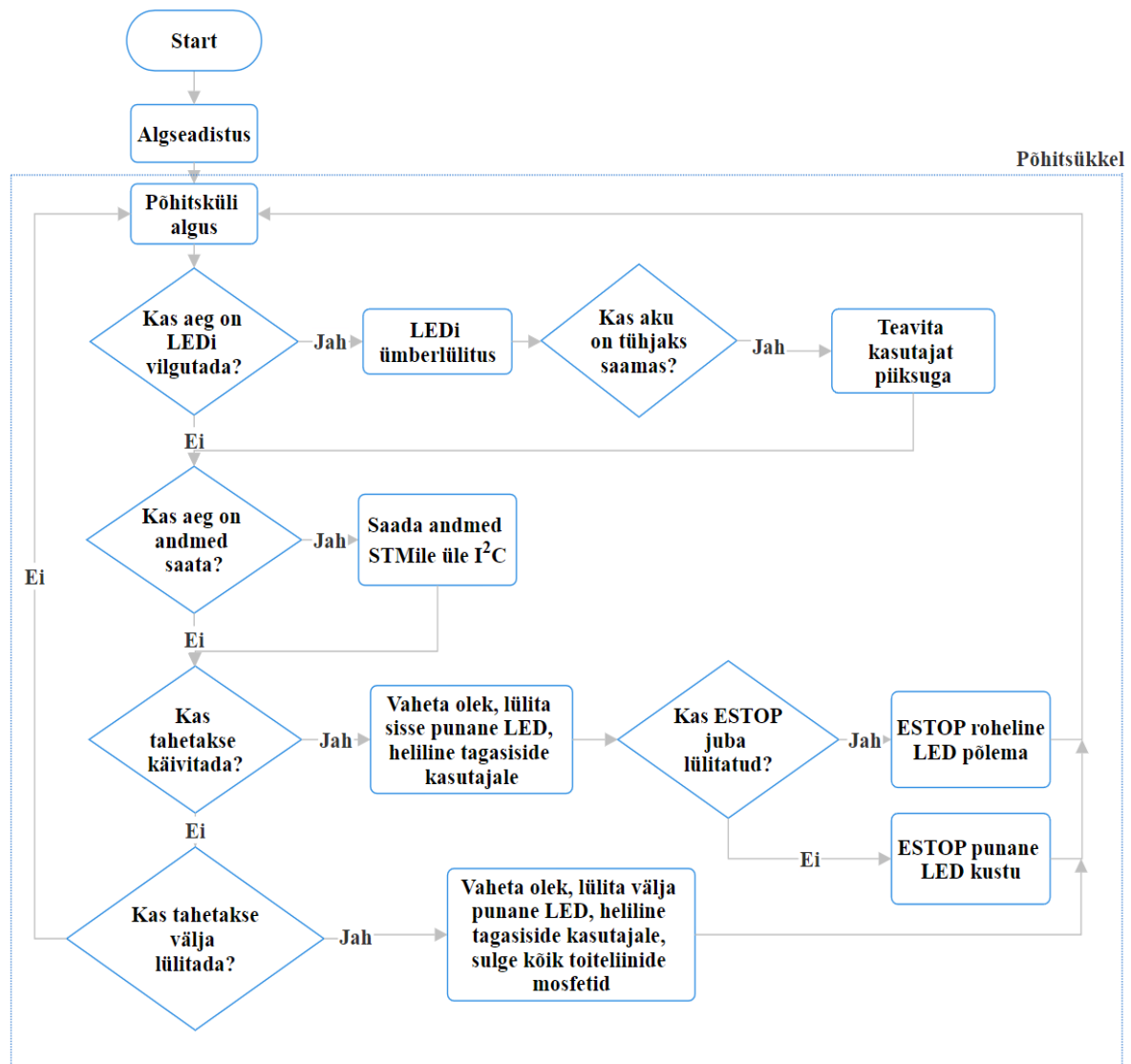
Roboti sisse- ja väljalülitamisloogika paikneb programmi põhitsükklis (Joonis 17). Nii kui toitehalduskontrolleri ATtiny88ni jõuab 3,3 V toide, siis hakkab roheline LED vilkuma 1 Hz-se sagedusega. Kui see LED ei vilgu või vilgub vale sagedusega, siis annab see märku, et süsteemis on midagi valesti.

Roboti sisselülitamiseks tuleb toitenupp all hoida 600 ms ning väljalülitamiseks 1200 ms. Mõlemal korral antakse kasutajale heliliselt märku, kui toimub sisse- või väljalülitus. Kui süsteem on sisselülitatud, siis süttib ka punane LED indikeerimaks süsteemi aktiivset olekut. Kui roboti toiteallikaks on aku ja süsteem lülitatakse sisse, siis avatakse süsteemi ja mootori siinidel paiknevad transistorid, mis kontrollivad voolu pääsemist sihtpunkti.

Kui roboti toiteallikaks on väline toiteseade ja süsteem lülitatakse sisse, siis avatakse ainult süsteemi siinil paiknev transistor. Mootori siinil paiknev transistor jäetakse suletuks vältimaks kahjustusi nii robotile, roboti kasutajale kui ka ümbritsevale keskkonnale.

Robotil on ka stopp-nupp, mis kontrollib mootorite siinil olevat transistorit, kui nupp on alla vajutatud, siis on mootorid välja lülitatud ning kui nupp on vabastatud, siis on mootorid sisse lülitatud.

Roboti väljalülitamisel suletakse kõik toiteahelat kontrollivad transistorid olenemata süsteemi olekust.



Joonis 17. Põhitsükli voodiagramm

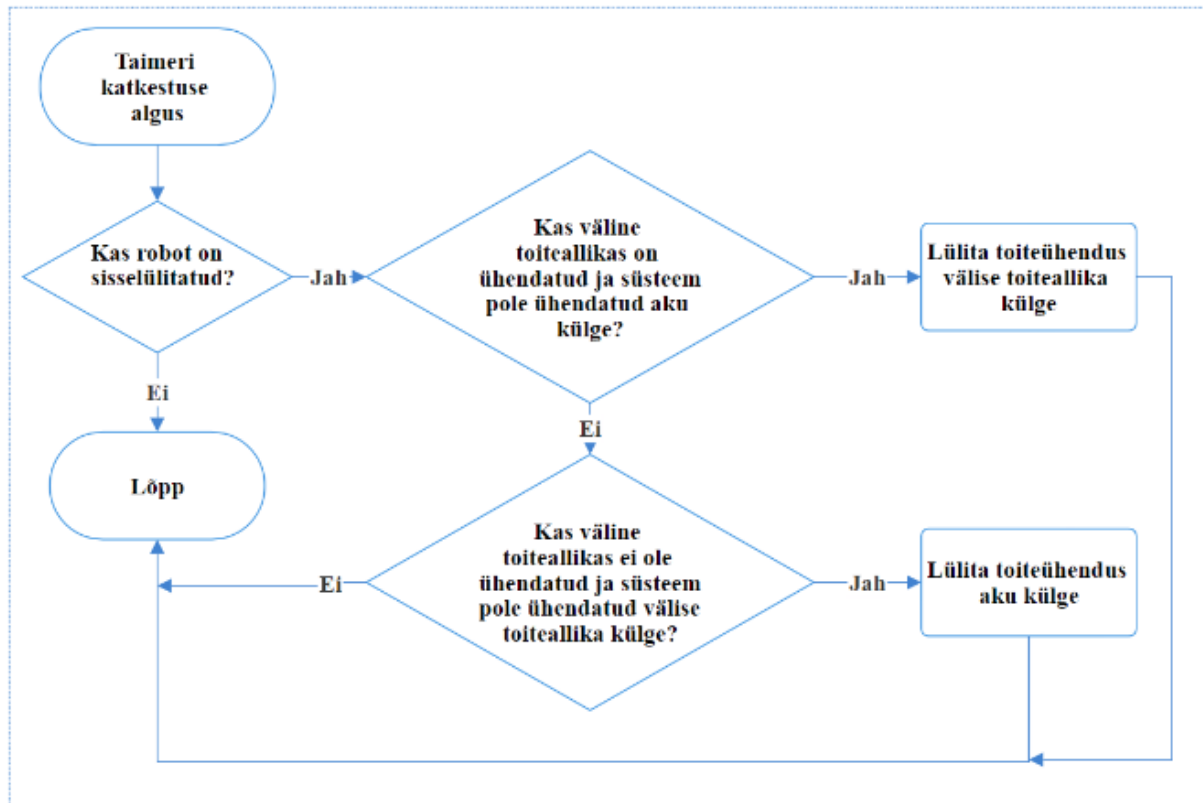
5.2.4 Valmidus toiteallika vahetuseks

Toiteallika vahetus on üles ehitatud toitehalduskontrolleris oleva taimeri katkestuse peale (Joonis 18), mis toimub 3 kHz sagedusega. Aku energia säästmiseks eelistatakse võimalusel alati välist toiteallikat, seega toimub ümberlülitamine järgnevalt:

- kui välise toiteallika pinge on suurem (on ühendatud) kui referentsväärtus, siis lülitatakse välise toiteallika peale;
- kui välise toiteallika pinge on väiksem (pole ühendatud) kui referentsväärtus, siis lülitatakse aku peale.

Vastavalt sellele juhitakse toitesisendeid tarbima ainult ühest toiteallikast korraga. Toiteallika vahetuse katkestus peab toimuma suure sagedusega, sest süsteemi töö ei tohi selle vahetuse ajal

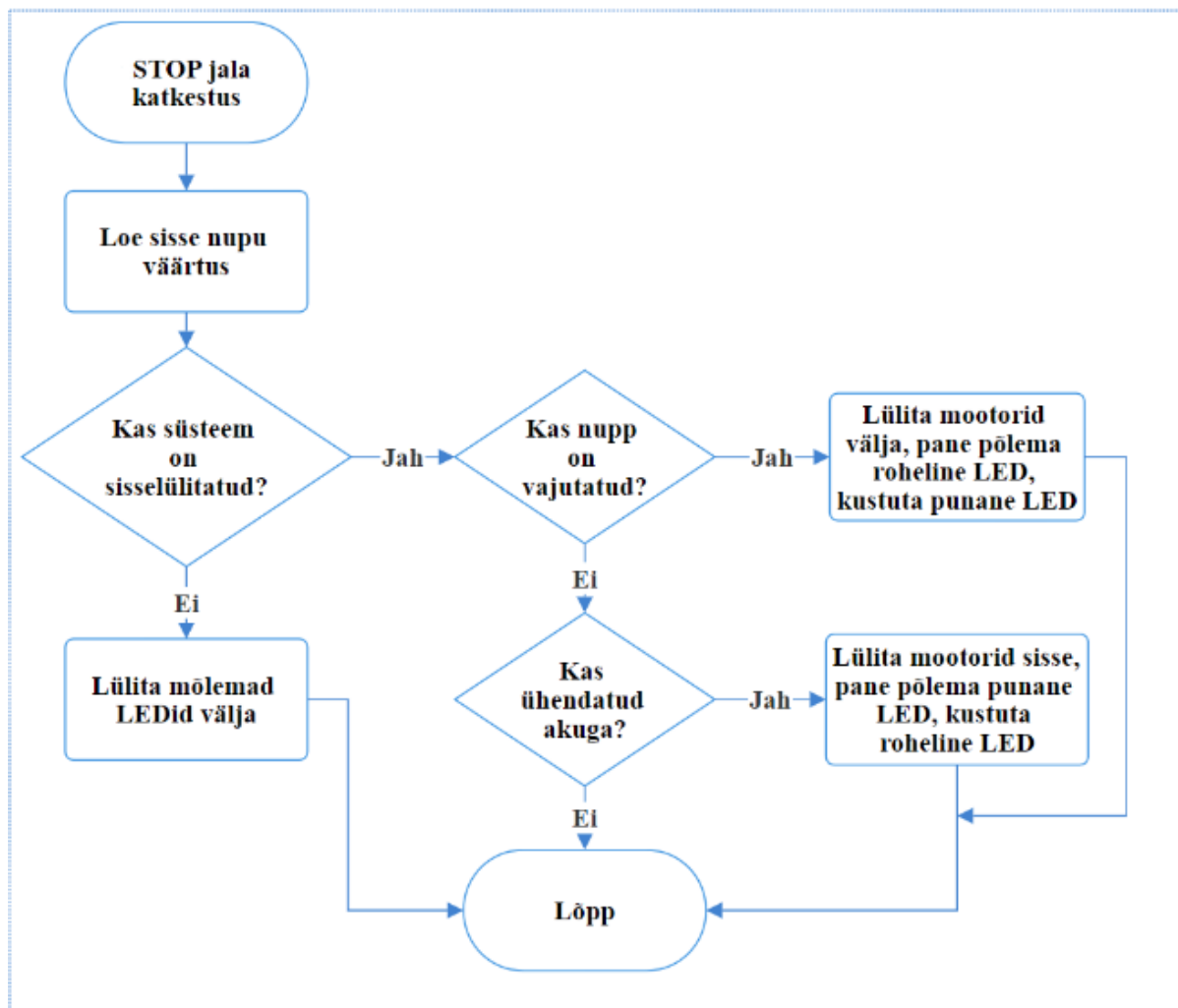
katkeda. Selleks sooritati ka mõõtmine, et kui kiiresti pärast toiteallika eemaldamist lõpetab süsteem oma töö. Halvima juhu tulemuseks saadi 1,8 ms, seega on 3 kHz-ne katkestus piisav, et tuvastada pinge langemine ning sooritada toiteallika vahetus nii, et süsteem oma tööd ei lõpetaks.



Joonis 18. Taimeri katkestusrutiini voodiagramm

5.2.5 Stopp-nupu käsitus

Stopp-nupp hoolitseb selle eest, et kui nupp on alla vajutatud, siis peavad mootorid seiskuma ükskõik, mis olekus robot parasjagu on. Peatsükli stopp-nupu käsitlemine tekitaks ohuolukorra, kus peatsükli hangudes mootorite olek ei oleks kontrollitav. Seetõttu kasutatakse lahenduses ESTOP jala külge seadistatud katkestust (Joonis 19), mis tagab kiire reaktsiooni nupu vajutamisele või vabastamisele. Katkestus kutsutakse välja, kui ESTOP jalal tuvastatakse väärtuse muutus. Katkestusrutiinis loetakse sisse nupu oleku väärtus, kus vastavalt sellele tehakse MOSFET-i ja LED-ide ümberlülitused. Kui nupp on alla vajutatud, siis põleb nupul roheline LED ja kui nupp pole alla vajutatud, siis põleb punane LED. Nupu oleku muutusel kinnitatakse seda helimärguandega kasutajale.



Joonis 19. Stopp-nupu katkestusrutiini voodiagramm

5.3 Põhiprotsessori püsivara

Põhiprotsessori püsivara loomine on Leonid Tšigrinski bakalaureusetöö, mille käigus lõi ta põhiprotsessori püsivarale arhitektuuri ning struktuuri. Käesoleva töö tulemusena ehitati Leonidi tehtud arhitektuuri peale I²C vastuvõtja ning toitehalduskontrollerilt saabunud mõõtmiste teisendamine.

Põhiprotsessori püsivaras luuakse ühendus toitehalduskontrolleriga üle suhtlusprotokolli I²C. STM32F407VGT6 on selles suhtluses alluv ning võtab vastu andmeid, siis kui ATtiny88 neid saadab. Vastuvõtmine on üles ehitatud katkestuste peale, et vähendada programmi blokeerumist.

Selle eest vastutavad kolm katkestust:

- “HAL_I2C_AddrCallback”, mis kutsutakse välja, kui STM-i aadress kattub toitehalduskontrolleri poolt saadetud aadressiga. Seal käivitatakse järjestikuse lugemise funktsioon, et lugeda sätestatud arv baite, mida ATtiny88 saadab;
- “HAL_I2C_SlaveRxCpltCallback”, mis kutsutakse välja, kui andmete vastuvõtmine on lõpuni jõudnud. Selles katkestuses kutsutakse välja “processData” funktsioon, kus konverteeritakse saadud andmed vastavatesse ühikutesse ning seejärel saadetakse need pardaarvutisse. Konverteeritud andmed paigutatakse ka teistele protsessidele kättesaadavatesse muutujatesse, et neid vajadusel kasutada saaks, näiteks OLED ekraanile saatmiseks;
- “HAL_I2C_ListenCpltCallback”, mis kutsutakse välja, kui STM32F407VGT6 on täielikult lõpetanud I²C kuulamisrežiimist tekkinud katkestuste töötlemise. Selles katkestuses aktiveeritakse uuesti kuulamisrežiim, et suhtlus saaks edaspidi jätkuda.

5.4 Pardaarvuti Intel NUC ROS-i pistikprogramm

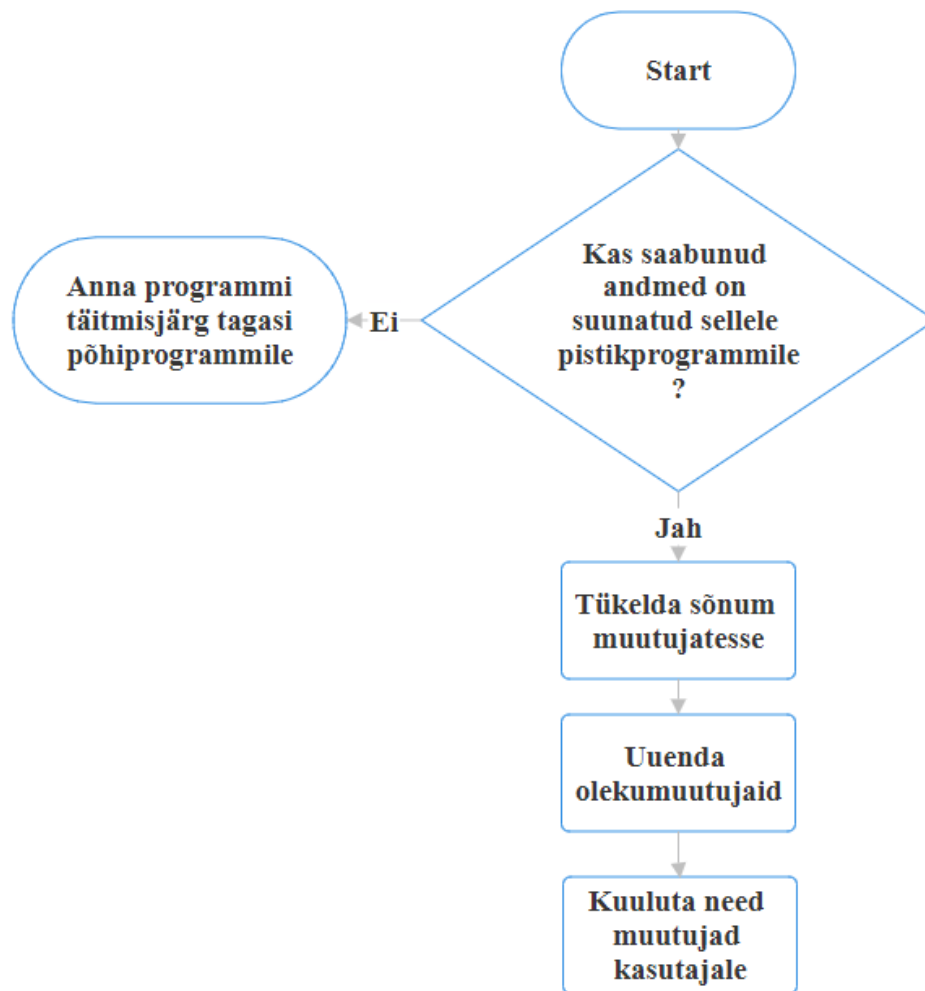
Kui mõõdetud pinged ja voolud on jõudnud põhiprotsessorisse STM, siis sealt saadetakse need üle USB pardaarvutisse Intel NUC. Selleks, et neid andmeid pardaarvutist lugeda ja neid ka kasutajale kuvada, loodi ROS-il põhinevale draiverile pistikprogramm, mille käigus täidetakse ära `sensor_msgs` paketi `BatteryState` sõnumi olekumuutujad.

ROS sisaldab mitmeid eri mooduleid ja pakette. Üks neist on `sensor_msgs` pakett, mis hõlmab endas `BatteryState` sõnumit. See on hulk olekumuutujaid ja konstante, mis kõik kirjeldavad toiteallikaga seotut informatsiooni. Kui sõnumi olekumuutujad avalikustatakse, siis on võimalik kasutajal neid lugeda. Seda lähenemist kasutatakse ka antud lahenduses ning ära täidetakse: pinge (*voltage*), voolu (*current*) ning aku olemasolu (*present*) muutujad.

STM32F407VGT6 saadab andmed kujul: `"BATSTATE:{Mootori vool}:{Pardaarvuti vool}:{Välise toiteallika pinge}:{Aku pinge}"`. Esmalt vaadatakse, kas sissetulnud sõnum sisaldab “BATSTATE” identifikaatorit ning kas sõnum koosneb viiest paketist. Kui üks nendest pole tõene, siis pole sõnum mõeldud sellele pistikprogrammile ning sõnumit ei võeta antud programmi poolt töötlusesse. Kui aga mõlemad on tõesed, siis on sõnum mõeldud sellele programmile. Seejärel tükeldatakse saabunud sõnum ning täidetakse ära `BatteryState` *current*, *voltage* ja *present* olekumuutujad. mis omakorda kuulutatakse, et lõppkasutaja neid pardaarvutist lugeda saaks. *Current* muutujasse pannakse koguvool ehk mootorite voolu ja

pardaarvutisse ning välistesse seadmetesse mineva voolu summa. *Present* muutuja indikeerib, kas aku on süsteemi ühendatud. Kui robotil on aku küljes, siis *Voltage* muutujasse paigutatakse akupinge, vastasel korral aga välise toiteallika pinge.

Eelkirjeldatut kujutab ka programmi vooskeem Joonis 20.



Joonis 20. ROS pistikprogrammi voodiagramm

6 Tulemus

Bakalaureusetöö raames valminud pinge ning voolu mõõtmise ahelate kontrolliks ja funktsionaalsuse visualiseerimiseks viidi läbi erinevad testkatsed.

6.1 Mõõtetäpsuse hindamine

Esmalt teostati pardapealse voolu mõõtmise lahenduse täpsuse kontroll. Selleks võrreldi loodud lahenduse voolu mõõtetulemusi QPX600D toiteplokiil kuvatava voolutarbega. Katsed teostati kasutades pardaarvutis Intel NUC olevat sysbench programmi, kus tehti koormusteste kasutades eri arv lõimesid. Mõõtmised sooritati toiteplokiist sätestatud 18 V pingega. Katse tulemusena (Tabel 1) selgus, et keskmiselt erinevad mõõdetud moodid 1 % võrra. Kuna lahenduse eesmärgiks on rohkem voolu suurusjärgu hindamine kui täppismõõtmiste teostamine, siis keskmine 1 % erinevus on aktsepteeritav ning püsivaralist kompenseerimist ei ole tarvis sooritada. Üles märgiti ka miinimum- ja maksimumväärtused ning kuna pardapealse lahenduse äärmused jäävad toiteploki äärmuste piiridesse, siis võib hinnata antud lahenduse eesmärgi saavutamiseks sobivaks.

Tabel 1. Pardaarvuti ja väliste seadmete voolu mõõteahela täpsuse kontrollimine (kus andmed on esitatud kujul robotondi näit / toiteploki näit)

Lõimede arv →	1	2	4	8	16
Miinimum (A)	1,60 / 1,57	2,09 / 2,06	2,29 / 2,24	3,17 / 3,12	3,42 / 3,33
Mood (A)	1,62 / 1,60	2,11 / 2,09	2,32 / 2,30	3,22 / 3,18	3,49 / 3,45
Maksimum (A)	1,65 / 1,64	2,12 / 2,14	2,34 / 2,38	3,25 / 3,26	3,50 / 3,51
Moodide erinevus	1,2 %	1 %	0,9 %	1 %	1 %

Samasugune katse teostati ka mootorite voolu mõõtelahenduse jaoks. Katse käigus rakendati mootoritele eri suuruses koormust, kuid kuna ühtlase koormuse rakendamist oli keeruline saavutada, siis piirduti madalama koormusega. Kuna katse katab ära ainult väikese osa selle ahela mõõtepiirkonnast, siis tehakse eeldus, et leitud täpsus on samasugune ka suuremate voolude korral. Katse tulemusena (Tabel 2) leiti, et keskmine moodide erinevus on 3,3 %. Antud juhul ei saaks teha isegi püsivaralist kompenseerimist, sest toitehalduskontrolleri mõõteresolutsioon on 15 mA, mis katse number 1 juures tähendaks juba üle 5 % erinevust.

Mõlema mõõteseadme katsetes mõõdetud tulemuste moodide erinevused jäävad alla 5 %, mis on piisav pardapealse pinge ja voolu hindamiseks.

Tabel 2. Mootorite voolu mõõteahela täpsuse kontrollimine (kus andmed on esitatud kujul robotondi näit / toiteploki näit)

Katse number →	1	2	3	4
Miinum (A)	0,30 / 0,30	0,55 / 0,55	1,00 / 1,02	1,10 / 1,00
Mood (A)	0,31 / 0,32	0,58 / 0,60	1,06 / 1,10	1,20 / 1,24
Maksimum (A)	0,32 / 0,33	0,60 / 0,63	1,08 / 1,16	1,24 / 1,35
Moodide erinevus	3,1 %	3,3 %	3,6 %	3,2 %

Mõõtetäpsuse hindamise katse teostati ka pardapealsete pingete mõõtmisahelatele. Katse käigus lülitati toiteploki erinevaid pingeid, mis võivad roboti kasutamisel mõõdetavad olla - 9,5 V juures sulgub pardaarvuti, 14 V korral antakse kasutajale märku, et aku on tühjas saamas, 18 V on aku nominaalpinge ning 20,6 on aku maksimaalne pinge. Mõlema pinge mõõteahelad on elektroonika disaini poolest identsed ning toitehalduskontrolleri mõõteresolutsiooniks on 21 mV. Katse tulemusena (Tabel 3) leiti, et maksimaalseks moodide erinevuseks saadi 0,3 % ning arvestades takistuse tolerantsi, mõõteresolutsiooni ning juhtmel tekkivat pingelangu, saab öelda, et lahendus on pinge suurusjärgu hindamiseks piisav ning püsivaralist kompenseerimist ei ole vaja teha.

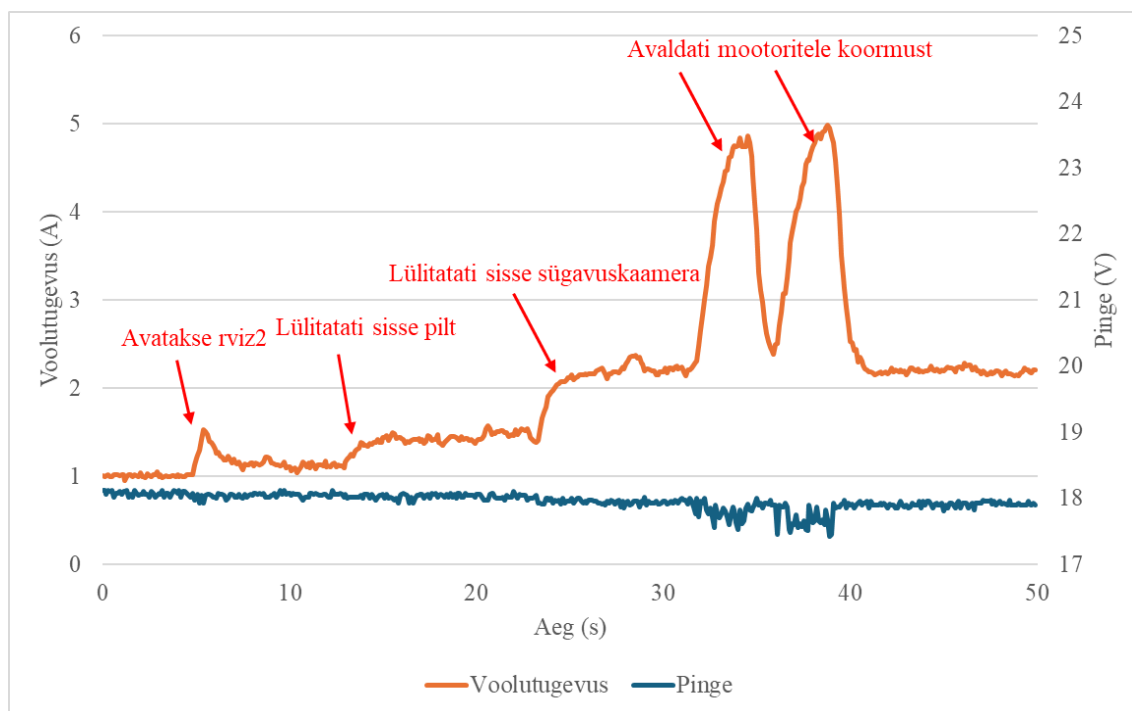
Tabel 3. Aku ning välise toiteallika pinge mõõteahela täpsuse kontrollimine (kus andmed on esitatud kujul vastava mõõtepunkti miinum/mood/maksimum)

Toiteploki näit	Aku mõõtepunkt (V)	Välise toiteallika mõõtepunkt (V)	Moodide erinevus aku mõõtepunktis	Moodide erinevus välise toiteallika mõõtepunktis
9,5 V	9,42 / 9,47 / 9,49	9,41 / 9,47 / 9,49	0,3 %	0,3 %
14 V	13,92 / 13,96 / 14,01	13,92 / 13,96 / 13,99	0,3 %	0,3 %
18 V	17,92 / 17,96 / 18,00	17,89 / 17,94 / 17,98	0,2 %	0,3 %
20,6 V	20,49 / 20,56 / 20,62	20,47 / 20,56 / 20,60	0,2 %	0,2 %

6.2 Mõõtelahenduse kasutamine robotiga

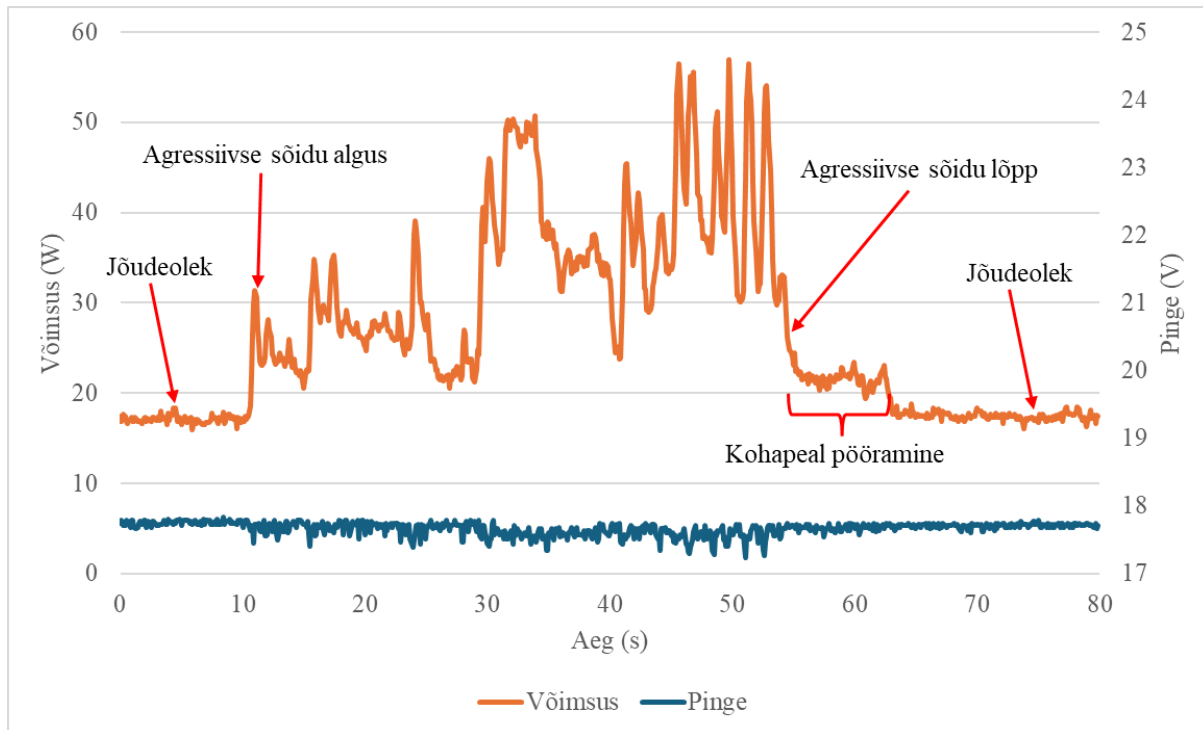
Funktsionaalsuse demonstreerimiseks sobib alltoodud graafik (Joonis 21), kus on näha roboti kogu voolutarve erinevate toimingute korral. Sülearvutiga, mis oli ühendatud VNC abil pardaarvutiga, loodi katsest ekraanisalvestus. Samuti loodi pardaarvutisse ROS programm, mis salvestas vastuvõetud pinget ja voolu andmed csv faili.

Demokatse algas sellega, et pardaarvutis Intel NUC 12 Pro Mini PC NUC12WSKi5 jooksis Robotondi ROS draiver ning plotjuggler, kuhu kuvati põhiprotsessori STM32F407VGT6 poolt saadatud pinget ja voolu andmed. Algseadistuses tarbis robot keskmiselt 1 A voolu. Esimeseks toiminguks avati rviz2 programm ning voolu stabiliseerudes võttis robot 1,15 A voolu ehk rviz2 programm tarbis $1,15 - 1 = 0,15$ A. Seejärel lülitati rviz2 programmist sisse kaamera pilt, mis tõstis kogu voolutarbe 1,4 A-ni. Pärast seda aktiveeriti roboti sügavuskaamera, mis kergitas voolutarbe 2,2 A-ni. See aga tähendab, et ainuüksi sügavuskaamera kasutamine nõuab $2,2 - 1,4 = 0,8$ A voolu. Demonstreerimaks ka mootorite voolu mõõtmise ahelat, avaldati mootoritele koormust ning graafikult on selgelt näha eralduvad voolupiigid, mis seda kirjeldavad. Antud demokatse tulemusena saab öelda, et kogu ahel alates mõõtmise elektroonikast kuni ROS-i pistikprogrammideni on toimiv ning roboti kasutaja saab informatiivset tagasisidet ning, et selle lahendusega on võimalik koguda statistikat roboti edasiste arenduste jaoks.



Joonis 21. Demokatse demonstreerimaks mõõteahela funktsionaalsust

Tehti ka katse, kus koguti andmeid nii, et robot aktiivselt suure kiirusega sõidab ja manööverdab. Tulemus pandi võimsuse graafikule (Joonis 22). Aktiivne sõit algab ajahetkest 10 ning lõpeb ajahetkel 63, sinna jäävast vahemiksut arvutati võimsuse keskmine, milleks saadi 32 W. Kuna kasutusel oleva Makita 5,0 Ah aku energiavõimsus on 90 Wh, siis see tähendab, et sellise pideva ja agressiivse sõidu korral saaks robotit kasutada ligikaudu 3 tundi.



Joonis 22. Roboti pideva ja agressiivse sõidu võimsuse graafik

7 Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö raames arendati avatud platvormiga õpperobotile Robotont 3-le pinge ja voolu mõõtmise lahendused. Selleks loodi vastav elektrooniline võimekus ja arendati välja uus püsivara toitehalduskontrollerile. Põhiprotsessorile implementeeriti võimekus vastu võtta toitehalduskontrollerilt saabuval andmeid ning ROS-il põhinevasse draiverisse integreeriti pistikprogramm, mis võtab vastu ning seejärel kuulutab põhiprotsessorist saabunuid andmeid. Samuti uuriti Robotondi elektrilisi karakteristikuid, mis on oluline informatsioon toiteahela lülituse disainimiseks.

Töö käigus loodi ülevaade erinevatest võimalustest pardapealseks voolu mõõtmiseks. Välja valiti Ohmi seadusel põhinev šunt takistit hõlmav süsteem, mille keskmeks paigutati INA138 kiip, mis valiti arvestades selle hinda, kättesaadavust, suurust ja sobivust süsteemi. Pardarvuti ja välise seadmete voolu mõõtesüsteem erines võrreldavast toiteploki näidust keskmiselt 1 % ning mootorite voolu mõõtesüsteem erines keskmiselt 3,3 %. Kuna reaalses kasutuses nähti, et mootorite ahelat läbiv maksimaalne vool ei ületa 5 A, siis parema mõõteresolutsiooni saamiseks soovitas autor edaspidiseks lahenduseks arvestada maksimaalseks mootorite vooluks 5 A. Pinge mõõtmine otsustati üles ehitada kahest takistist koosneva pingejaguri peale, sest tegu on lihtsa kontseptsiooniga ning ei võta plaadil palju ruumi. Pinge mõõtmise pardapealne näit erines toiteploki näidust keskmiselt 0,3 %.

Mõõtmiste teostamine implementeeriti toitehalduskontrolleris ATtiny88 püsivaras. Lisaks sellele integreeriti sinna kasutajaga suhtlus, ohutuse tagamine läbi mootorite stopp-nupu ning mõõtetulemuste edastamine kasutades suhtlusprotokolli I²C. Lahenduse tegemisel arvestati sellega, et stopp-nupp peab alati katkestama mootorite töö ning programm peab töötama nii kiiresti, et vajadusel oleks võimalik sooritada ka toiteallika vahetus 1,8 ms-iga.

Töö tulemusena valmisid kasutajale mugavad ning informatiivsed pinge ja voolu mõõtesüsteemid, mille tulemusi on võimalik lugeda nii pardaarvutist kui robotil olevalt OLED ekraanilt. Loodud süsteemidega on võimalik koguda roboti energiatarbe kohta statistikat, mis on oluliseks aluseks Robotondile optimaalsemate pardaarvutite valimisel ja elektroonikalahenduste väljatöötamisel.

Tänuavaldused

Täna oma juhendajat Veiko Vunderit meeldiva koostöö ja abivalmi juhendamise eest.

R. Valge

Viited

- [1] D. Elyon, „23 Benefits Of Robotics: How They Can Be Used In Everyday Life“, Codeant Technology Hub. [Võrgumaterjal] <https://codeant.org/benefits-of-robotics-in-everyday-life/> (Vaadatud: 11. märts 2024).
- [2] R. Raudmäe, „Avatud robotplatvorm Robotont“, Thesis, Tartu Ülikool, 2019 [Võrgumaterjal] https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/64341/Raudmae_MSc2019.pdf (Vaadatud: 11. märts 2024).
- [3] M. Muro, „Robotondi akulahenduse ning 12V pingeregulaatori prototüüpimine“, Thesis, Tartu Ülikool, 2023. [Võrgumaterjal] https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/93429/_Muro_BSc2023.pdf (Vaadatud: 11. märts 2024).
- [4] Hioko, „Why is it necessary to measure current? Reasons, methods, and precautions“ [Võrgumaterjal] <https://www.hioki.com/us-en/learning/methods/current-measurement-methods.html> (Vaadatud: 11. märts 2024).
- [5] PowerTech Systems, „Lithium-Ion State of Charge (SoC) measurement“ [Võrgumaterjal] <https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-state-of-charge-soc-measurement/> (Vaadatud: 6. mai 2024).
- [6] Digigeenius, „Intervjuu: haridusrobotika loob teed homsele tööstusrobotikale“, 2016. [Võrgumaterjal] <https://digi.geenius.ee/blogi/teadus-ja-tulevik/intervjuu-haridusrobotika-loob-teed-homsele-toostusrobotikale/> (Vaadatud: 14. märts 2024).
- [7] Robotex International, „Robotex ajalugu“. [Võrgumaterjal] <https://robotex.international/et/robotex-ajalugu/> (Vaadatud: 4. aprill 2024).
- [8] Balti Uuringute Instituut, „Robotexi mõju-uuring 2017-2019“, Tartu, 2022 [Võrgumaterjal] <https://www.ibs.ee/wp-content/uploads/2022/07/Robotexi-uuringu-aruanne.pdf> (Vaadatud: 4. aprill 2024).
- [9] A. Koray ja B. H. Uzuncelebi, „The effect of educational robotics applications in science education on students' academic achievement and problem-solving skills.“, Journal of Education in Science, Environment and Health (JESEH), 9(4), 2023, lk 317–329, DOI: <https://doi.org/10.55549/jeseh.1381251>
- [10] The LEGO Group, LEGO® Education SPIKE™ Prime Technical Specifications, 2019 [Võrgumaterjal] <https://assets.education.lego.com/v3/assets/blt293eea581807678a/bltf512a371e82f6420/5>

- f8801baf4f4cf0fa39d2feb/techspecs_techniclargehub.pdf?locale=en-us (Vaadatud: 8. aprill 2024).
- [11] Estrotech OÜ, „LEGO Education SPIKE Prime baaskomplekt LAENUTUSEKS!“, 2019 [Võrgumaterjal] <https://www.robomiku.ee/toode/spike-prime-baaskomplekt/#9> (Vaadatud: 8. aprill 2024).
- [12] The LEGO Group, LEGO® Energy Meter, 2016 [Võrgumaterjal] <https://assets.education.lego.com/v3/assets/blt293eea581807678a/blt21e1cd3678c5cdd1/5ebad86513d9ed370e3efbea/element-guide.pdf?locale=en-us> (Vaadatud: 8. aprill 2024).
- [13] Duckietown, Technology Platform“, 2024 [Võrgumaterjal] <https://duckietown.com/platform/> (Vaadatud: 22. aprill 2024).
- [14] Duckietown, „Duckiebattery“, 2024 [Võrgumaterjal] <https://get.duckietown.com/products/duckiebattery> (Vaadatud 22. aprill 2024).
- [15] Estrotech OÜ, „Duckietown MOOC Founder’s Edition Kit 4GB Jetson nano“, 2022 [Võrgumaterjal] <https://www.robomiku.ee/toode/duckietown-mooc-founders-edition-kit-4gb-jetson-nano/#1> (Vaadatud: 22. aprill 2024).
- [16] ROBOTIS, „TurtleBot3 Overview“, 2024 [Võrgumaterjal] <https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/overview/> (Vaadatud: 6. mai 2024).
- [17] Clearpath Robotics, „TURTLEBOT 4 ROBOTICS LEARNING PLATFORM“, 2022 [Võrgumaterjal] https://www.generationrobots.com/media/turtlebot4/Turtlebot_4_OverviewBrochure.pdf (Vaadatud: 6. mai 2024).
- [18] „Turtlebot 4 common packages“, 2024 [Võrgumaterjal] <https://github.com/turtlebot/turtlebot4/tree/humble> (Vaadatud: 6. mai 2024).
- [19] M. Silliman, „Monitor the Netbook’s Battery Status“, 2015 [Võrgumaterjal] <https://learn.turtlebot.com/2015/02/01/15/> (Vaadatud: 6. mai 2024).
- [20] NATIONAL INSTRUMENTS CORP , „Current Measurements Guide - How is Current Measured?“, 2023 [Võrgumaterjal] <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/21/current-measurements-how-to-guide.html> (Vaadatud 14. märts 2024).
- [21] OÜ Trinity Capital, „Ohmi seadus“ [Võrgumaterjal] <https://www.valem.ee/et/ohmi-seadus> (Vaadatud: 14. märts 2024).
- [22] Rideon, „A Resistor Primer“ [Võrgumaterjal] <https://riedon.com/technical/a-resistance-primer> (Vaadatud: 4. aprill 2024).

- [23] Riedon, „Understanding Resistors and Temperature“ [Võrgumaterjal]
<https://riedon.com/technical/understanding-temperature> (Vaadatud: 4. aprill 2024).
- [24] Encyclopaedia Britannica, „Hans Christian Ørsted“, 2024 [Võrgumaterjal]
<https://www.britannica.com/biography/Hans-Christian-Orsted> (Vaadatud: 14. märts 2024).
- [25] Texas Instruments, „TMCS1101 1.5% Precision, Basic Isolation Hall-Effect Current Sensor With ± 600 -V Working Voltage“, 2021 [Võrgumaterjal]
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmcs1101.pdf> (Vaadatud: 4. aprill 2024).
- [26] Shenzhen VICORV technology Co., Ltd, „Hall Current Sensors: A Comprehensive Comparison with Shunt Resistors and Rogowski Coils“, 2023 [Võrgumaterjal]
<https://www.hallsensorchip.com/news/hall-current-sensors-a-comprehensive-comparison-with-shunt-resistors-and-rogerski-coils/> (Vaadatud: 8. aprill 2024).
- [27] Texas Instruments, „Hall-effect current sensing“, 2021 [Võrgumaterjal]
https://www.youtube.com/watch?v=F_GUbKJQQug (Vaadatud: 14. märts 2024).
- [28] S. Hill, „Integrating the Current Sensing Signal Path“, 2021 [Võrgumaterjal]
<https://www.ti.com/lit/ab/sboa167b/sboa167b.pdf?ts=1709201206199> (Vaadatud 4. aprill 2024).
- [29] P. Rooden, „Autonoomse laadimislahenduse väljatöötamine õpperobotile Robotont“, Thesis, Tartu Ülikool, 2023 [Võrgumaterjal]
<https://dSPACE.ut.ee/server/api/core/bitstreams/d2e55f74-2fd5-457c-80ba-2c224b7f0e19/content> (Vaadatud: 28. aprill 2024).

Lisad

Töö raames arendati välja toitehalduskontrolleri ATtiny88 püsivara, pinge ning voolu mõõtmise skeemid, põhiprotsessori STM püsivara I²C vastuvõtmiseks ning mõõtmiste teisendamiseks, ROS2 põhise draiveri pistikprogramm. Kõik eelnimetatu leiab järgmiselt aadressilt:

<https://github.com/ut-ims-robotics/valge-thesis-2024-robotont-power-management/tree/main>.

Robotont-electronics-mainboard repositooriumis asuvad toitepinge ja voolu mõõtmise skeemid.

Robotont-firmware repositooriumis asub põhiprotsessorile loodud püsivara.

Robotont-firmware-power-management repositooriumis asub toitehalduskontrolleri ATtiny88 püsivara.

Robotont_driver repositooriumis asub ROS2 põhise draiveri pistikprogramm.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Robert Valge

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
**“Toitepinge ja tarbevoolu monitoorimine ning toitehalduse püsivara loomine
õpperobotil Robotont”**
mille juhendaja on Veiko Vunder

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace
kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks
Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu Creative
Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost
reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja
kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Robert Valge

20.05.2024