

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Tehnoloogiainstituut

Arvutitehnika eriala

Alar Kume

**SENSORTALLA JUHTPLAADI v.2.0 ARENDAMINE JA
TESTIMINE**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad:

vanemteadur Tarmo Tamm

insener-tehnik Tõnis Terasmaa

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

allkiri, kuupäev

Tartu 2015

Resümee

„SENSORTALLA JUHTPLAADI v.2.0 ARENDAMINE JA TESTIMINE“ on alamosa Sensortalla projektist, mille eesmärk on valmistada rõhutundlik jalatsi sisetald, millega oleks võimalik koguda andmeid jala koormusjaotuse kohta erinevate funktsionaalsete tegevuste käigus. Käesolev bakalaureusetöö on edasiarendus olemasolevale talla juhtplaadile ning tingitud kasutatava juhtplaadi puudustest. Töös antakse ülevaade tallast ja olemasolevast juhtplaadist ning põhjendatakse vajadust uue põlvkonna juhtplaadi järele. Praktiline töö kätkeb endast sensortalla teise põlvkonna juhtplaadi disainimist, valmistamist, programmeerimist, testimist ning testimise tulemuste esitamist. Osaliselt käesoleva töö materjalidele toetub aktsepteeritud teadusartikkel [1].

Sisukord

Resümee	2
Jooniste loetelu	6
Tabelite loetelu	8
Lühendid, konstandid, mõisted	9
1 Sissejuhatus	11
1.1 Probleemi tutvustus	11
1.2 Töö eesmärk	13
2 Ülevaade probleemist	14
2.1 Juhtplaat 1.0	14
2.1.1 Ülevaade	14
2.1.2 Esimese juhtplaadi edasiarendus	15
2.1.3 Juhtplaadi 1.0 versiooni puudused	16
2.2 Tulemused 1.0 sensortalla ja 1.0 juhtplaadiga	17
3 Metoodika	20
3.1 Sensortald	20
3.1.1 Andurite trükkplaat	20
3.1.2 Juhtplaat	22
3.1.3 Silikoon	23
3.2 Elektroonikakomponendid	23
3.2.1 Mikrokontrolleri valik	24

3.2.2	Välkmälu kiibi valik.....	25
3.2.3	<i>Bluetooth</i> kiibi valik.....	26
3.2.4	Kiirendusandur.....	27
3.2.5	Toitesüsteem.....	28
3.3	Tarkvara.....	29
3.3.1	Andmehõivemoodul.....	29
3.3.2	Suhtlusmoodul.....	30
4	Tulemused.....	34
4.1	Mõõtmistulemused.....	34
4.1.1	Kõnnisamm.....	35
4.1.2	Jooksusamm.....	37
4.1.2	Paigalthüpe.....	39
4.2	Voolutarve.....	40
5	Tulemuste analüüs ja järeldused.....	45
5.1	Anduritelt saadud andmed.....	45
5.1.1	Kõnnisammu test.....	45
5.1.2	Jooksusammu test.....	45
5.1.3	Kohapealt hüppe test.....	46
5.1.4	Järeldused anduritelt kogutud tulemustest.....	47
5.2	Voolutarve.....	47
	Kokkuvõte.....	48
	The development and testing of control board v.2.0 for the smart insole system.....	49
	Viited.....	50
	Lisad.....	55
	Lisa 1 – Valatud sensortald ilma juhtplaadita.....	55
	Lisa 2 – Painduv talla v 1.0 trükkplaat andurite järjestusega.....	56

Lisa 3 – Juhtplaadi skeem	57
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	58

Jooniste loetelu

Joonis 1.1: Sensortalla projekti funktsionaalsed osad ja nendevahelised seosed.....	12
Joonis 2.1: Esimese juhtplaadi pilt	15
Joonis 2.2: Esimese juhtplaadi struktuurskeem. Joonis: Karel Pärlin [8]	15
Joonis 2.3: Esimese juhtplaadi painduva trükkplaadiga eksemplar (suuruse võrdluseks on kõrval CR2032 tüüpi nööppatarei).....	16
Joonis 2.4: Ühel jalal paigalthüpe Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarsel platvormil.....	18
Joonis 2.5: Ühel jalal paigalthüppe sensortallaga saadud tulemuse graafik.....	19
Joonis 3.1: Talla materjalide ristlõige muutkondensaatori kohalt.....	21
Joonis 3.2: Multivibraatori skeem	22
Joonis 3.3: Riistvara struktuurskeem	23
Joonis 3.4: Andmepakett	31
Joonis 3.5: Andmepaketi algus.....	31
Joonis 3.6: Reaalajakella väärtuse kuju andmepaketis.....	31
Joonis 3.7: Andurite lugemite paiknemine andmepaketis.....	32
Joonis 3.8: Kiirendusanduri lugemine paiknemine andmepaketis	33
Joonis 4.1: Kõnnisammu testimine	35
Joonis 4.2: Kõnnisamm Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarsel platvormil	36
Joonis 4.3: Uue juhtplaadiga kõnnisammul saadud tulemus.....	37
Joonis 4.4: Jooksusamm Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarsel platvormil	38
Joonis 4.5: Uue juhtplaadiga jooksusammul saadud tulemus	38
Joonis 4.6: Ühe jala peal paigalthüpe Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarsel platvormil.....	39
Joonis 4.7: Uue juhtplaadiga ühe jala peal saadud hüppe tulemus	40

Joonis 4.8: Voolutarve jõudeolekus, BT ühenduse ootamise ajal.....	41
Joonis 4.9: Voolutarve jõudeolekus, väline seade on üle BT ühendunud.....	42
Joonis 4.10: Voolutarve mõõtmisel, väline seade on üle BT ühendunud	42
Joonis 4.11: Voolutarve väikmälu kustutamisel, väline seade on üle BT ühendunud.....	43
Joonis 4.12: Keskmise voolutarbe graafik erinevate sisendpingete juures ja programmi olekutes.....	44

Tabelite loetelu

Tabel 3.1: Cortex-M3 seeria mikrokontrollerite tehniliste parameetrite võrdlus.....	25
Tabel 3.2: Erinevate tootjate väikmälud	26
Tabel 3.3: BLE kiipide võrdlus	27
Tabel 3.4: Erinevate tootjate kiirendusandurid	28
Tabel 4.1: Keskmine voolutarve erinevate sisendpingete juures ja programmi olekutes	43

Lühendid, konstandid, mõisted

ARM – (*Advanced RISC Machines*) 32-bitine vähendatud käsustikuga protsessoriarhitektuur, mida arendab ettevõtte ARM Holdings [2].

BT – (*Bluetooth*) IEEE 802.15.1 standard [3] seadmete juhtmevabaks ühenduseks.

BLE – (ingl *Bluetooth low energy, Bluetooth Smart*) *bluetooth* tehnoloogia edasiarendus, mis vanema tehnoloogiaga võrreldes võimaldab oluliselt väiksemat voolutarvet juhtmevaba ühenduse ajal [4].

EEPROM – (ingl *Electrically Erasable Programmable Read-only Memory*, ee elektriliselt ümberprogrammeeritav püsिमälu) püsिमälu, mis võimaldab baidihaaval mällu kirjutamist ja kustutamist.

FLASH - (ingl *Flash memory*, ee välkmälu) püsिमälu, mis võimaldab baidi- või lehehaaval mällu kirjutamist. Enne kirjutamist peab kirjutatav mäluipiirkond olema kustutatud. Andmeid saab mälust kustutada lehe kaupa või terve mälu kustutamise teel.

FR4 – klaaskiududest kokku liimitud isoleeriv jäik materjal. „FR“ tähendab, et materjal on tulekindel ning „4“ tähendab vastavust UL 94 standardile [5]. FR-4 on tüüpiline materjal trükkplaatide valmistamisel [6].

High byte – mitmebaidise arvu puhul suurima kaaluga bait.

IIC – (ingl *Inter-Integrated Circuit*) sünkroonne kahesuunaline kahe liiniga järjestiksiin, mida kasutatakse intergraalskeemidevahelise ühenduslülina.

Low byte – mitmebaidise arvu puhul väikseima kaaluga bait.

MCU – (ingl *Microcontroller Unit*, ee mikrokontroller) mikroprotsessor, millesse on integreeritud mälu ja sisend-/väljundseadmed.

Multiplekser – (ka multipleksor) kommutaator ehk valikulülitus, millel on mitu sisendsignaali ja üks väljundsignaal. Vastavate sisendviikudega on võimalik valida, milline sisendsignaali väljundisse ühendatakse.

Multivibraator – elektroonikalülitus, mille väljund võngub kahe oleku vahel

RTC – (ingl *Real-time Clock*, ee reaalajakell) spetsiaalne loendur, mis on mõeldud kuupäeva ja kellaaja jälgimiseks.

SPI – (ingl *Serial Peripheral Interface*) sünkroonne kahesuunaline nelja liiniga järjestiksin, mida kasutatakse intergraalskeemidevahelise ühendusülina.

UART – (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) asünkroonne kahesuunaline kahe liiniga järjestiksin, mida kasutatakse intergraalskeemidevahelise ühendusülina.

1 Sissejuhatus

Käesolev bakalaureusetöö on koostatud projekti *Soft materials for miniaturizable wearable sensory and feedback applications and sports and rehabilitation (Softsense, SLOTI12166T)* raames. Sensortalla projekti eesmärgiks on valmistada jalatsi sisetalla prototüüp, milles paiknevatelt rõhuanduritelt oleks võimalik koguda andmeid jala koormusjaotuse kohta erinevate funktsionaalsete tegevuste (kõndimine, jooksmine, hüppamine jne) käigus. Sensortalla tulemused peavad täpsuselt olema võrreldavad statsionaarse rõhutundliku platvormi peal saadavate tulemustega. Talla kasutamisest saaksid abi nii sportlased kui ka taastusravi patsiendid [7]. Käesolev lõputöö käsitleb sensortalla uue põlvkonna juhtplaadi kujundamist, valmistamist ja programmeerimist. Lisaks juhtplaadi arendamisele, hõlmab lõputöö ka talla testimist Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika laboris statsionaarse rõhutundliku platvormi peal, testide tulemuste võrdlemist ning voolutarbe hindamist. Käesolev töö toetub Karel Pärlini bakalaureusetööle „Digitaalse signaali genereerimine ja mõõtmine mahtuvuslikelt sensoritelt sensortallas“ [8] ja Dmitri Grištšenko bakalaureusetööle „Materjalitehnoloogia projekti Softsens sensortalla kommunikatsioonimooduli loomine“ [9] ning on nende edasiarendus.

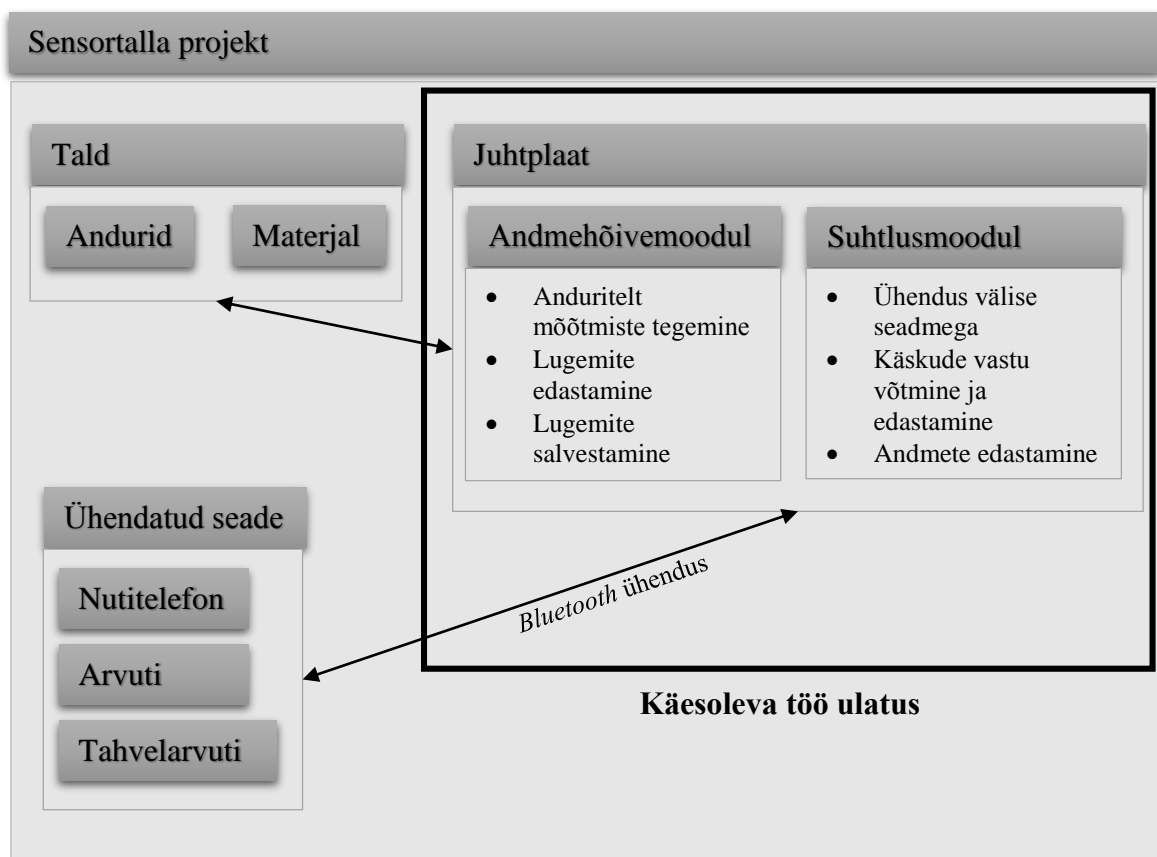
1.1 Probleemi tutvustus

Sensortalla Softsense projekt on mahukate funktsionaalsete osadega arendustöö. Projekt on jagatud kolmeks sõltumatuks osaks:

1. talla arendamine – siia alla kuuluvad talla valmistamiseks materjalide valimine, andurite disainimine ja talla valmistamine;
2. talla juhtplaadi arendamine – anduritelt andmete kogumine, salvestamine ja edastamine;

3. anduritelt saadavate andmete hindamine - analüüsitakse, kas katsete käigus saadud tulemused on võrreldavad Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarse rõhutundliku platvormi peal saadavate tulemustega.

Talla 1.0 versiooni juhtplaadi juht-mikrokontroller ei ole võimeline anduritelt andmeid koguma piisava sagedusega. Madala mõõtmisageduse tõttu jäi mõõtmise ajal anduritelt kogutavatest andmetest väheseks, et saada jala rõhujaotusest täielik ülevaade. Sellest tingituna oli tarvis arendada uus juhtplaat, millele käesolev töö keskendubki (2. punkt) sh *bluetoothi* ühenduse loomise võimaldamisele ja andmete edastamisele välisele ühendatud seadmele. Projekti funktsionaalseid osasid kirjeldab joonis 1.1.



Joonis 1.1: Sensortalla projekti funktsionaalsed osad ja nende vahelised seosed.

1.2 Töö eesmärk

Töö eesmärk on valmistada sensortalla uue põlvkonna juhtplaat, mis:

- suudab üle *bluetoothi* ühenduda välise seadmega, saata ning võtta vastu andmeid ja juhtkäskusid;
- on võimeline teostama mõõtmisi sagedusel 100 Hz;
- on võimeline tulemusi salvestama plaadil paiknevasse mälli;
- tarbib piisavalt vähe voolu, et seda saab nõõptüüpi patarei või akuga toita;
- on võimeline katkematult teostama mõõtmisi vähemalt 3 tunni vältel [8];
- saab kiirendusandurilt andmeid koguda;
- võrreldes 1.0 juhtplaadiga võtab vähem ruumi;
- töötab võrreldes vana juhtplaadiga madalamal toitepingel, et võimaldada voolutarbe optimeerimist.

Eesmärgi saavutamiseks on antud lõputöö jagatud suuremateks funktsionaalseteks osadeks:

1. elektroonikakomponentide valimine:
 - MCU valimine;
 - MCU võimalustest/puudustest tingitud elektroonikakomponentide valimine;
 - lisaelektroonikakomponentide valimine;
2. juhtplaadi kujundamine/valmistamine;
3. juhtplaadi programmeerimine;
4. juhtplaadi töö analüüs sh andmete esmane hindamine, tulemuste esitamine.

2 Ülevaade probleemist

2.1 Juhtplaat 1.0

2.1.1 Ülevaade

Karel Pärlini ja Dmitri Grištšenko bakalaureusetööde [8] [9] tulemusena valmis esimene sensortalla andurite elektroonika ja juhtplaadi jäiga trükkplaadiga versioon (joonis 2.1). Prototüübi põhjal avaldati ka konverentsiartikkel [10].

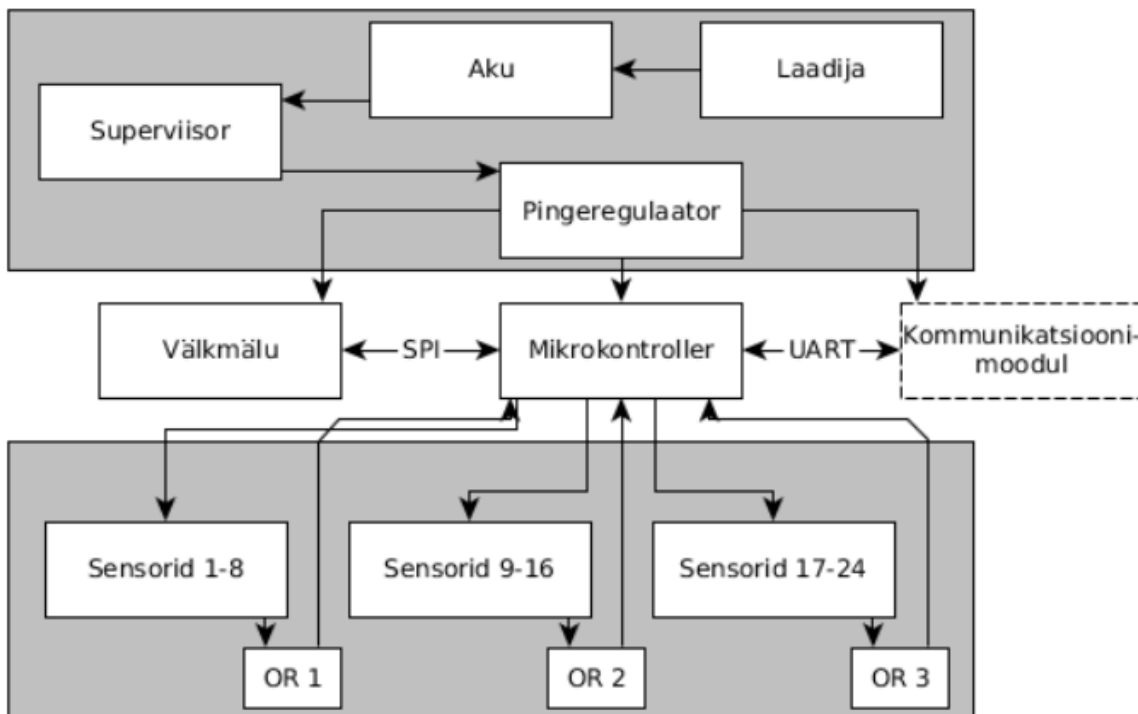
Juhtplaadi juht-mikrokontrollerina kasutati ATxmega32A4 MCUd. *Bluetoothi* ühendust võimaldas Nordic Semiconductori BLE moodul nRF51822. Andmete salvestamiseks kasutati Spansioni väikmäluikiipi S25FL256S. Andurite valimiseks mikrokontrolleri sisenditesse oli kasutusel kolm multiplekseri kiipi.

Juhtplaadi toiteallikana kasutati LIR3048 liitiumioonakut ja aku laadimiseks oli plaadil MCP73831 laadimise kontroller. Juhtplaadi toitepinge oli 2,7 V, mille väljastas Texas Instrumentsi pingeregulaator TPS709. Keskmiseks voolutarbeks mõõtmise ajal hinnati 100 mA. Aku pingetaseme jälgimiseks oli plaadile lisatud superviisor LTC2955, mis aku pinge alanemisel alla seatud nominaalväärtuse (3 V) lülitas süsteemi toite välja.

Talla trükkplaadi andmeliinid olid juhtplaadiga ühendatud Molexi FPC *edge-connector* pistikuga. Juhtplaadi struktuurskeemi kirjeldab joonis 2.2.



Joonis 2.1: Esimese juhtplaadi pilt



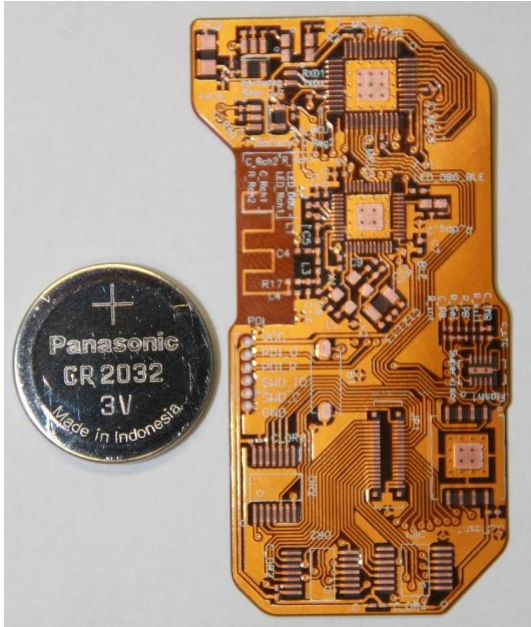
Joonis 2.2: Esimese juhtplaadi struktuurskeem. Joonis: Karel Pärlin [8]

2.1.2 Esimese juhtplaadi edasiarendus

Esimene juhtplaat oli kujundatud jäigale trükkplaadile, kuna see võimaldas kiiremat arendust sh plaadi tellimine ja plaadi valmistamisele kuluv aeg. Jäik trükkplaat aga ei võimaldanud tallal keskkohast painduda ning FPC *edge-connector* pistikud ei olnud painduvad.

Komponentide jäikus tähendas seda, et rõhu rakendumisel ja talle paindumisel paindusid pistikud koos ühenduskontaktidega juhtplaadi küljest lahti.

Edge-connector tüüpi ühendused asendati Molexi *Board-to-Board stacking connector* pistikuga (joonis 2.3).



Joonis 2.3: Esimese juhtplaadi painduva trükkplaadiga eksemplar (suuruse võrdluseks on kõrval CR2032 tüüpi nööppatarei)

2.1.3 Juhtplaadi 1.0 versiooni puudused

Vanal juhtplaadi versioonil oli mitmeid puudusi, mis kokkuvõtvalt tingisid vajaduse uue põlvkonna juhtplaadi arendamise järele:

Mõõtmisagedus – juhtplaadi olulise puudusena ilmses asjaolu, et mõõtmisi oli võimalik maksimaalselt teha 50 korda sekundis. Mõõtmisageduse suurendamisel ei olnud mikrokontroller enam võimeline stabiilselt kõikidelt anduritelt mõõtmisi tegema ning neid ka samal ajal salvestama.

Lisakomponendid – anduritelt lugemite saamiseks kasutati MCU taimereid. Juhtmikrokontrolleril ei olnud piisavalt taimereid ega taimerite kanaleid, et iga anduri väljundiga saaks eraldi MCU viik ühendada. Puuduse lahendamiseks kasutati kolme multiplekserit – 24 andurit olid jaotatud kolmeks grupiks ning igal multiplekseril oli sisendisse ühendatud

kaheksa anduri väljundit. Mõõtmise ajal valis mikrokontroller järjest, millist signaali mõõta. Lahendus tähendas, et korraga ei olnud võimalik teostada mõõtmisi rohkem kui kolmelt andurilt, programmikood oli keerulisem ning lisakomponendid suurendasid süsteemi voolutarvet ja ka kogu skeemi pindala.

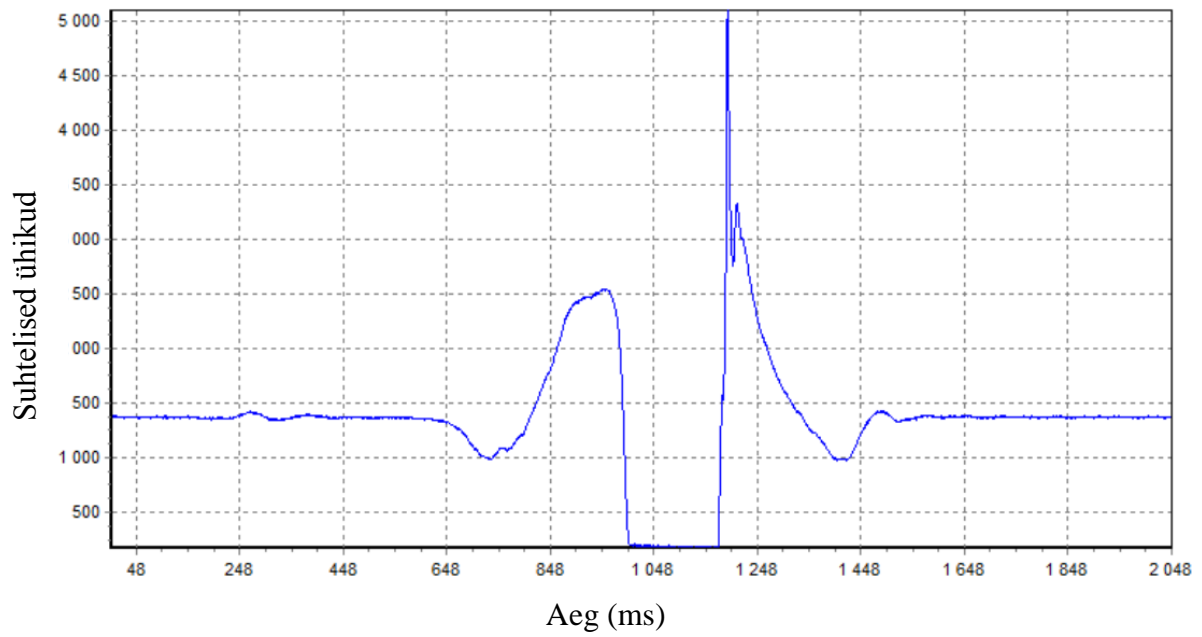
Kasutamata mikrokontroller – BLE ühenduse jaoks kasutati Nordic Semiconductori kiipi nRF51822. nRF51822 kiipi on sisse ehitatud riistvara BLE ühenduse jaoks ja Cortex-M0 seeria mikrokontroller [11]. Sisseehitatud mikrokontrollerit kasutati ainult keskse mikrokontrolleri ATxmega32A4 ja BLE ühenduse vahendamiseks, mis tähendas, et MCU ise ja selle pakutav potentsiaalne funktsionaalsus oli peamiselt kasutamata [9].

2.2 Tulemused 1.0 sensortalla ja 1.0 juhtplaadiga

Võrdlemaks sensortalla mõõtetulemusi statsionaarse platvormi mõõtetulemustega, viidi läbi katsetuste seeria, kus teostati sensortallaga katseid kõndimissammuga, jooksusammuga ja ühel jalal paigalthüppega. Katsetuste seerial oli kaks eesmärki: saada sensortalla ja statsionaarse platvormi vahel võrreldavad tulemused ning leida kalibreerimistegurid, mis võimaldaks talla mõõtmistulemusi njuutoniteks, paskaliteks jt füüsikalisteks ühikuteks teisendada. Katsed tehti rõhutundliku platvormi peal nii, et samal ajal oli sensortald jalatsis. Statsionaarse platvormi hüppe tulemusi esitab joonis 2.4 ning sama katse tallaga saadud tulemusi esitab joonis 2.5. Paigalthüpe ühel jalal on valitud võrdluseks sellepärast, et selle keerulisema liigutuse graafikul on kõige selgemini eristatavad etappide karakteristikud [12]. Tulemustes on kõige olulisem graafiku kuju, kuna järeldused tehakse graafiku kujust ja etappide karakteristikute põhjal.

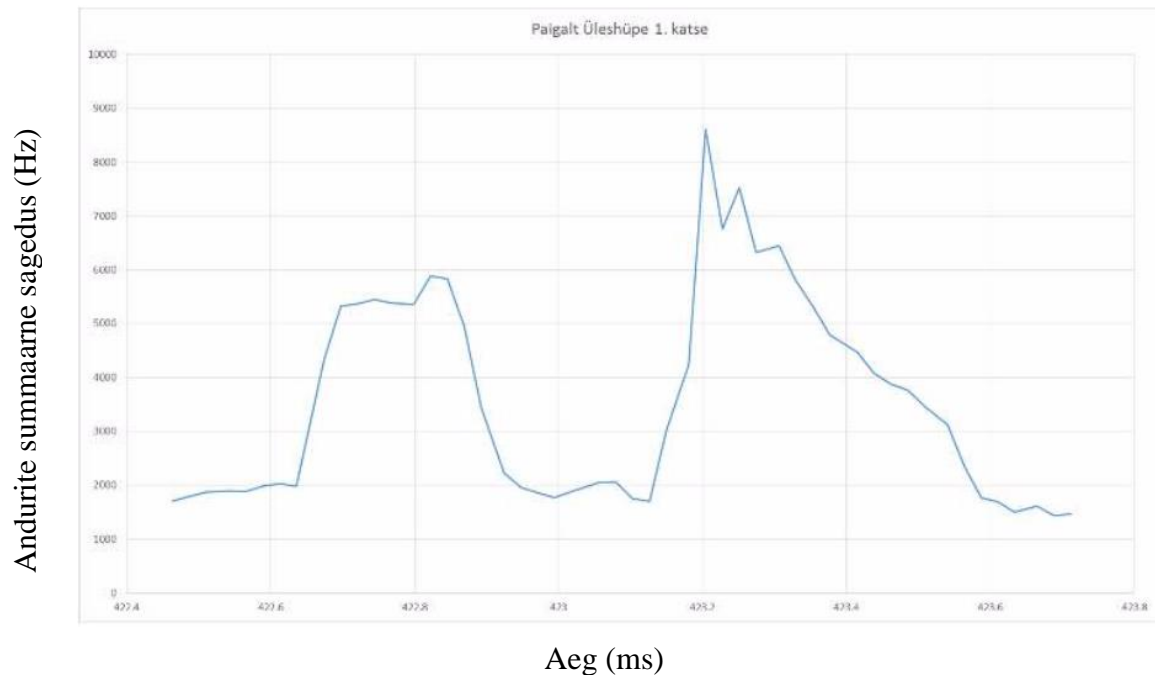
Statsionaarse platvormi tulemuste graafikul (joonis 2.4) on selgesti eristatavad hüppe etapid:

- enne hüpet on rõhk ühtlane;
- 648. ms algab hoovõtt kerge rõhu langusega;
- 848. ms surutakse tõuke käigus raskus maha ja avaldatav rõhk suureneb;
- 1000. ms on keha õhus ning avaldatav rõhk puudub;
- 1150. ms toimub maandumine järsu ja lühiajalise rõhu kasvamisega;
- enne rõhu ühtlaseks tagasiminekuks toimub veel väike pörge 1400. ms juures.



Joonis 2.4: Ühel jalal paigalthüpe Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarsel platvormil

Sensortallaga saadud tulemuste graafikul (joonis 2.5) on signaali käik üldjoontes sama - eristatavad on tõuge ja maandumine. Õhusolek ei ole eristatav - rõhujoon on sel hetkel samal tasemel hoovõtueelsega ja maandumisjärgsega.



Joonis 2.5: Ühel jalal paigalthüppe sensortallaga saadud tulemuse graafik

3 Metoodika

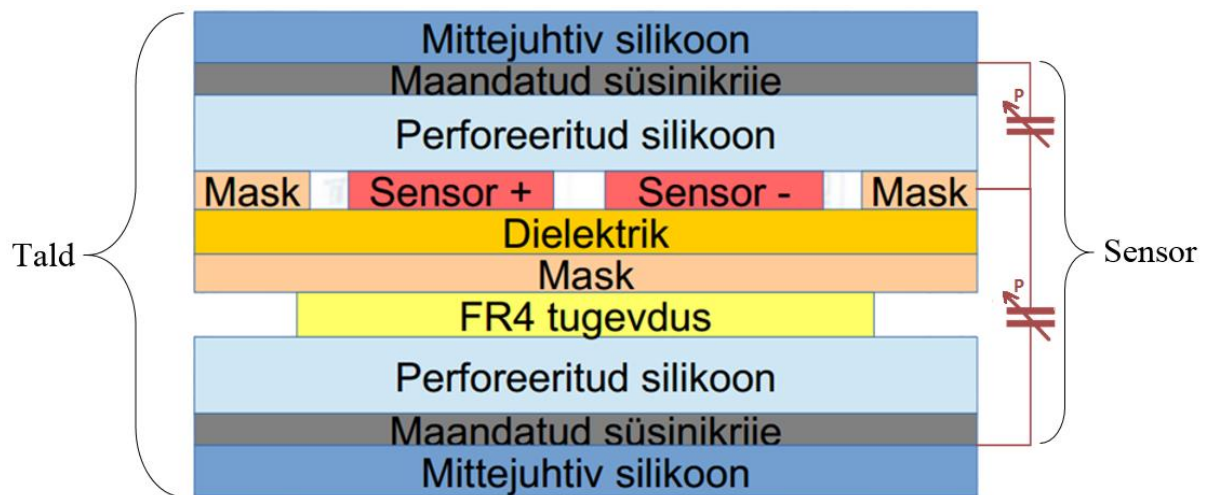
3.1 Sensortald

Tald koosneb kolmest suuremast osast – andurite elektroonika trükkplaat, juhtplaat ning andurite trükkplaati ja juhtplaati ümbritsev silikoon. Valmis talla prototüübi pilt on toodud lisas 1.

3.1.1 Andurite trükkplaat

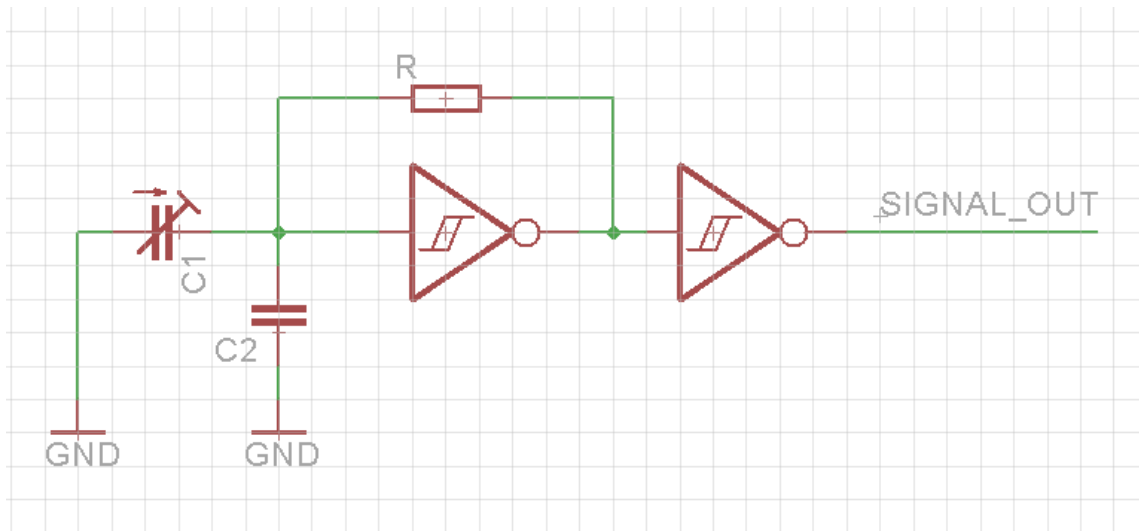
Kasutusel on painduv trükkplaat, millel asuvad andurite elektroodid ja signaaligeneraatorid. Sensorid on paigutatud vastavalt liikumisel rakenduva rõhu olulistele punktidele. Iga elektroodi all teisel pool trükkplaati on paigutatud FR-4 tugevdused, et vältida elektroodi deformeerumist rõhu rakendumisel. Trükkplaadi pilt on toodud lisas 2. Andurid koosnevad kahest osast:

Sensor - mahtuvusliku sensori moodustavad positiivse laenguga tajuv elektrood ja negatiivse elektroodi eesmärki täitev maandatud süsinikriie. Maandatud süsinikriie on üks vahekihtidest tallas, mis on ühendatud toiteallika negatiivse poolusega. Positiivne elektrood ja süsinikriie on eraldatud perforatsiooniga silikooniga (perforeerimine võimaldab silikooni kokku suruda), mille paksus rõhu rakendumisel väheneb. Võimaldamaks paremat stabiilsust signaali genereerimisel, on perforatsiooniga silikooni kihid ja süsinikriie trükkplaadi mõlemal poolel. Talla ristlõiget kujutab joonis 3.1. Sensorplaadi varasematest versioonides on trükkplaadile jäänud null-laenguga elektrood, mis enam ei ole kasutusel ning on ühendatud maaga. Null-elektrood on trükkplaadi 2.0 versioonil eemaldatud.



Joonis 3.1: Talla materjalide ristlõige muutkondensaatori kohalt

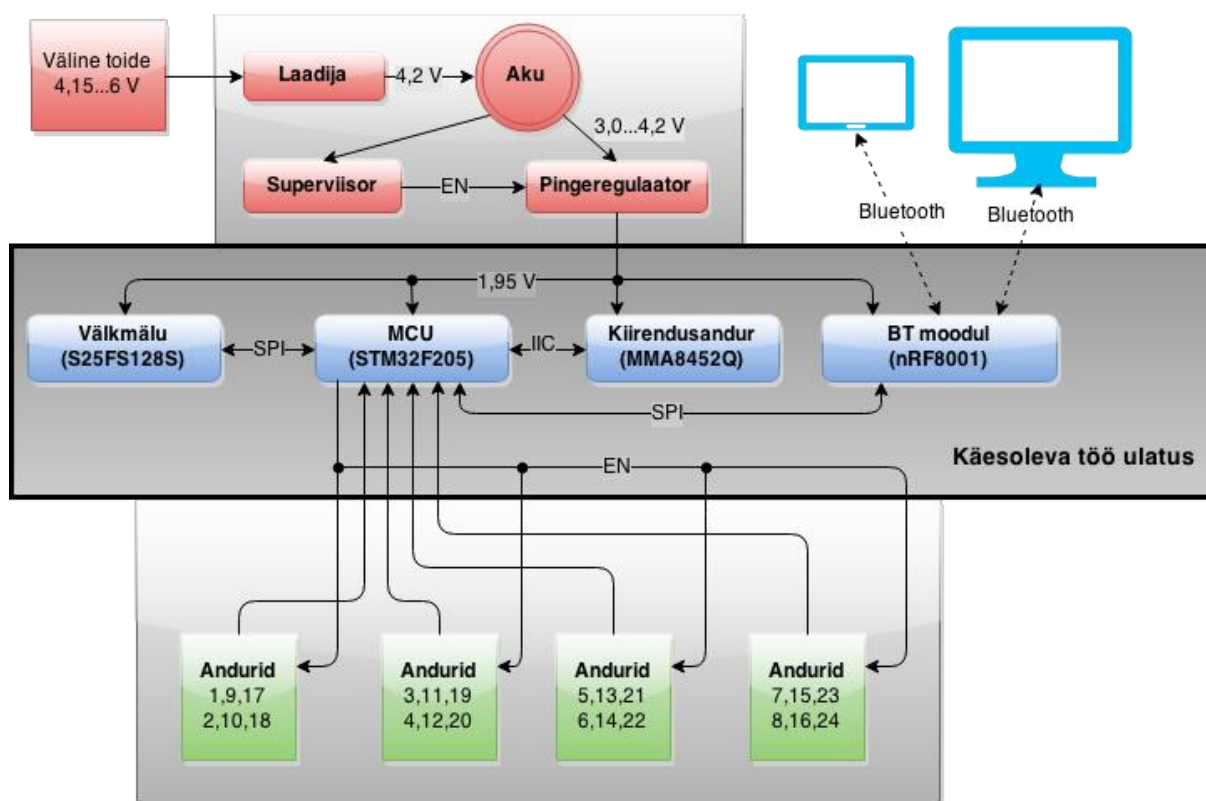
Signaaligeneraator - rõhu rakendumisel väheneb positiivse laenguga elektroodi ja maandatud süsinikriide kihtide vahekaugus ning tänu sellele suureneb sensori mahtuvus. Sensori vahetus läheduses on multivibraator (joonis 3.2), mis tekitab mahtuvusest sõltuva sagedusega ruutsignaali. Multivibraator koosneb invertteerivast Schmitti trigerist, takistist ja kondensaatorist, mille laadumise astmest sõltub väljundsignaali sagedus. Multivibraator on paigutatud sensori vahetusse lähedusse, sest väljundsignaali muundamine digitaalseks sensori läheduses parandab oluliselt signaal-müra suhet [8]. Kasutatavad trigeri mikroskeemid (74AUP2G14) sisaldavad kahte trigerit ühes korpuses ning teine neist on kasutusel lahtisidestusena. Multivibraatori skeemi kujutab joonis 3.2. Anduri väljundsagedus ilma rakendatud rõhuta on iga anduri puhul mõnevõrra erinev, jäädes vahemikku 73...80 kHz.



Joonis 3.2: Multivibraatori skeem

3.1.2 Juhtplaat

Juhtplaadi ülesanne on koguda sellega ühenduvalt andurite plaadilt andmeid rõhkude kohta ja salvestada need juhtplaadil olevasse välmällu. Mõõtmistulemused saab soovi korral saata üle *bluetoothi* ühenduse välisele seadmele, näiteks kas nutitelefoni või arvutisse. Lisaks on juhtplaadil ka kiirendusandur, et hinnata jala asendit, liikumiskiirust ja -suunda. Juhtplaadi riistvara struktuurskeemi kirjeldab skemaatiliselt joonis 3.3.



Joonis 3.3: Riistvara struktuurskeem

3.1.3 Silikoon

Talda ümbritseb ja kaitseb välise keskkonna eest poolläbipaistev QM 240T A silikoon. Antud silikoon on mehaaniliselt väga vastupidav, mittejuhtiv ning loodud prototüüpide arendamiseks [13].

Maandatud süsinakriide ja elektroodide vahel olev perforatsioon silikoon on ühtlase paksusega harilik tööstuslik rull-silikoon, mis on talle rakenduse jaoks laser-augustatud.

3.2 Elektroonikakomponendid

Uue juhtplaadi üheks eesmärgiks on süsteemi toitepinge alandamine. See seab elektroonikakomponentide valikule üldise nõude – minimaalne toitepinge kõigil kasutatavatel komponentidel peab olema alla 2,7 V ning soovitatavalt alla 2V. Valmis elektroonikaskeem on toodud lisas 3.

3.2.1 Mikrokontrolleri valik

Kuna tegemist on prototüübiga, siis on protsessori juures oluline erinevate omaduste paindlikkus. Nõnda saab katseid sooritada mitut erinevat parameetrit jälgides.

Nõuded:

- võimalus määrata laia taktsagedusvahemikku ja seda minimaalse tööpinge juures – mida suurem on taktsagedus, seda täpsemalt on võimalik mõõta andurite genereeritavat sagedust. Suur taktsagedusvahemik võimaldab leida kui suurt töösagedust on vaja, et protsessor jõuaks oma töö ära teha nii, et anduritelt andmete kogumine ei kannataks funktsionaalsuse lisamisel. Suurem töösageduse valikuvahemik võimaldab ka optimaalsema taktsageduse ja voolutarve suhte leida;
- piisav arv taimereid või taimerite kanaleid et saaks kõikidelt anduritelt korraga mõõtmisi teostada – see hoiab programmikoodi lihtsamana ning vähendab lisakomponentide arvu, tänu millele on võimalik vähendada voolutarvet ja kogu skeemi mõõtmeid;
- 32-bitine – üle 8-bitiste arvudega tehete tegemine, ei kuluta ülemäära palju ressursse;
- vähemalt 16 viiku teiste seadmete jaoks: 4...8 viiku andurite toiteks, 12 viiku kiirendusanduri, välgmälu ja BT liidese jaoks eeldusel, et nad kasutavad suhtlemiseks SPI liidest (kasutab kuni 4 andmeliini);
- väiksed mõõtmed – soovitatavalt maksimaalselt 13x13 mm.

Talla esimese versiooni juhtplaadi mikrokontrolleeril (ATxmega32A4) ei ole piisavalt jõudlust, et teostada mõõtmisi ja saadud tulemusi salvestada kiiremini kui 50 korda sekundis. Projekti eesmärgina ja TÜ kinesioloogia spetsialistide hinnangul saab vajaliku ülevaate rõhu muutustest liikumisel siis, kui teha mõõtmisi vähemalt 100 korda sekundis. Mõõtmisageduse piirang tingis vajaduse suurema jõudlusega MCU järele, millega seoses otsustati kasutada ARM Cortex-M seeria mikrokontrolleerit. Cortex-M seeria mikroprotsessorid on kujundatud manussüsteemide jaoks, võttes arvesse voolutarvet, jõudlust ja tükihinda [14]. Erinevate tootjate vastavate mikrokontrolleerite tehniliste parameetrite võrdlust esitab tabel 3.1. Vaadeldud on just Cortex-M3 mikroprotsessoriga kontrollereid, kuna need on esimesed Cortex-M seeria protsessorid, millel on summaarselt vähemalt 24 taimerite kanalit, mida korraga ka kasutada saab.

Tabel 3.1: Cortex-M3 seeria mikrokontrollerite tehniliste parameetrite võrdlus

Tootja	Atmel Corporation	NXP	Silicon Labs	STMicroelectronics	Texas Instruments
Seeria/toode	ATSAM3S8 [15]	LPC175x [16]	EFM32L [17]	STM32F2 [18]	F28M35 [19]
Maksimaalne taktsagedus	64 MHz	120 MHz	48 MHz	120 MHz	100 MHz
Toitepinge	1,62...3,6 V	2,4...3,6 V	1,98...3,8 V	1,8...3,6 V	3,3 V
Taimereid	6	4	4	14	6
Taimerite kanaleid kokku	18	8	12	32	10

Mikrokontrolleriks valiti STMicroelectronics poolt toodetava Cortex M3 seeria parima jõudlusega MCU STM32F205RG. Selle MCU 64 viiguga variandi mõõtmed on 10x10 mm, minimaalse toitepinge – 1,8 V – juures suudab töötada oma maksimaalse taktsagedusega - 120 MHz [18]. Madalatel taktsagedustel on valitud MCU töö ajal voolutarbelt samaväärne mikrokontrolleritega, mille maksimaalne taktsagedus ei ületa 32 MHz. Viimane märkus kehtib ka spetsiaalselt madala voolutarbega M3 seeria mikrokontrolleritega võrreldes. Näiteks STM32L100RC madala voolutarbega mikrokontroller tarbib 32 MHz taktsagedusel töötades voolu 8,25...9,4 mA ja seda juhul, kui tema sisseehitatud seadmed on välja lülitatud [20]. Valitud mikrokontroller 30 MHz taktsagedusel töötades 7...14 mA voolu sõltuvalt sellest, kui palju selle sisseehitatud seadmetest on sisse lülitatud ja kasutusel [21]. Sellel mikrokontrolleril on summaarselt kokku rohkem kui 24 taimerite kanalit, mis tähendab, et ühegi anduri signaali mõõtmiseks pole vaja kasutada multiplekserit.

3.2.2 Välmälu kiibi valik

Kuna mõõtmistulemuste maht ulatub megabaitidesse, siis on juhtplaadile vaja eraldi mälu kiipi. Mällu salvestatud andmed peavad säilima ka juhtplaadi toite puudumisel. Viimase nõude tõttu on kõige sobilikumad EEPROM ja FLASH mälad. EEPROM mälu välistavad kaks peamist põhjust: maksimaalne mälu maht ühe kiibi kohta on 1 megabait ja FLASH mäladest oluliselt aeglasem kirjutamiskiirus, mis võib andmete kogumist takistada [22]. Erinevate tootjate välmälu kiipe tehnilisi andmeid kirjeldab tabel 3.1.

Nõuded:

- peab olema 64 MB mälu mahtu – üksiku mõõtmise maht on kokku 58 baiti. Tehes mõõtmisi sagedusega 100 Hz kolme tunni jooksul, tekib andmeid kokku 62 MB andmeid. Lähim kahe astmega arv sellele on 64;
- suhtlusliides peab olema jadaliides – seda tüüpi liidestel on väike arv andmeliine, mis võimaldab mikrokontrolleri viikuseid kokku hoida. Hoides kokku mikrokontrolleri viikuseid, on võimalik valida vähemate viikude arvuga MCU, mis võimaldab säästa juhtplaadi ruumikasutust.

Tabel 3.2: Erinevate tootjate välmälud

Tootja	Spansion	Micron	Adesto technologies
Seeria/toode	S25FS-S [23]	N25QxxxA11E [24]	AT45DB641E [25]
Toitepinge	1,7...2,0 V	1,7...2,0 V	1,7...3,6 V
Mahu variandid	128 Mb, 256 Mb	64 Mb, 128 Mb	64 Mb
Suhtlusliides	SPI	SPI	SPI

Valiti Spansioni toodetav S25FS seeria mälu, kuna sellel on teistest suurima mahuga variant - 256 Mb (32 MB). Nõutud 64 MB saavutamiseks saab neid kiipe mitu tükki lisada.

3.2.3 Bluetooth kiibi valik

Väliste seadmetega suhtlemiseks on kõige universaalsem ja paindlikum kasutada *bluetooth* juhtmevaba ühendust, täpsemalt BLE tehnoloogiat, mis on arendatud just piiratud vooluallikaga mobiilsete seadmete jaoks [4]. *Bluetoothi* liides on enamikul kaasaegsetel telefonidel, tahvel-, süle- ja lauaarvutitel.

Nõuded:

- peab toetama BLE tehnoloogiat – selle ühenduse ajal tarbitakse vähe voolu, ka võimaldab see ühenduda korraga rohkem kui ühe sensortallaga. Sensortaldadega suhtleval seadmepool on siis ühe tallapaari korral eraldi ühendus mõlema tallaga ning viimaste töö on teineteise suhtes sõltumatu;
- peab olema ainult BT ühendust võimaldav kiip, st mitte moodul või eraldi *bluetoothi* ühenduvusega mikrokontroller;

Nõuetele vastavaid BLE ühendust võimaldavaid kiipe toodavad kaks ettevõtet: Texas Instruments ja Nordic Semiconductor. Nende ettevõtete seadmete tehnilisi andmeid kirjeldab tabel 3.3.

Tabel 3.3: BLE kiipide võrdlus

Tootja	Nordic Semiconductor	Texas Instruments
Seade	nRF8001 [26]	CC256x [27]
Toitepinge	1,9...3,6 V	2,2...4,8 V
Keskmine voolutarve jõudeolekus	2 mA	4 mA
Keskmine voolutarve andmevahetuse ajal	12,7...14,6 mA	38,4...39,2 mA
Suhtlusliides	Laiendatud SPI (5 andmeliini)	UART
Lisanõuded	Lisaks standardsele 4 SPI andmeliinile vajab seade suhtluseks veel ühte väljundviiku.	Vajab, et mikrokontroller eraldaks oma mälu kiibi tööks.

Bluetooth suhtluse kasutamiseks valiti Nordic Semiconductori poolt toodetav BLE kiip nRF8001. See kiip on disainitud mobiilsete seadmete jaoks, mis peavad tarbima minimaalset voolu ja töötavad madala pinge juures ning see toetab BT versiooni 4.0 [28].

3.2.4 Kiirendusandur

Paremate tulemuste ja ülevaate saamiseks liikumisel, on talle 2.0 versioonil varvaste ja kannu juurde planeeritud kiirendusandurid. Nende abil saab kindlaks määrata jala asendi mõõtmise ajal ja hinnata inimese liikumiskiirust, võimaldades sellega hiljem täpsemalt liikumist modelleerida. Lisaks annab kiirendusandur võimaluse optimeerida MCU programmikoodi voolutarbe suhtes: kui liikumist ei registreerita pikema aja jooksul, saab mikrokontroller lülitada mittevajalikud seadmed välja. Erinevate tootjate väikmälu kiipe tehnilisi andmeid kirjeldab tabel 3.4.

Nõuded:

- suuteline mõõtma kolme ristkoordinaadi suhtes;
- võimeline teostama mõõtmisi ja edastama neid sagedusega 100 Hz.

Tabel 3.4: Erinevate tootjate kiirendusandurid

Tootja	Freescale Semiconductor	Analog Devices	ST Microelectronics
Seeria/toode	MMA8452Q [29]	ADXL344 [30]	LIS2DH [31]
Toitepinge	1,95...3,6 V	1,7...2,75 V	17,1...3,6 V
Suhtlusliides	IIC	IIC, SPI	IIC, SPI
Mõõtetulemuse suurus	12 bitti	10...13 bitti	12 bitti

Kiirendusanduriks valiti Freescale Semiconductori toodetav kiip MMA8452Q. See võimaldab suhtluskiirust kuni 800 Hz sh telgedele uute mõõtmise tegemine. Kiip võimaldab ka seadistada katkestusi, mis saavad mikrokontrollerile liikumise registreerimisest märku anda. [29]

3.2.5 Toitesüsteem

Talla juhtplaadi toitesüsteemis kasutatakse jätkuvalt samu komponente, mis olid kasutusel juhtplaadi esimesel variandil. Erandiks on pingeregulaator (TPS709), mis on asendatud kõrgema efektiivsusega pingeregulaatoriga TPS62260.

Talla toiteallikana on mõeldud 3,3 V nõõptüüpi patarei või 3,6 V nominaalpingega liitiumioonaku. Kasutusel on LIR3048 liitiumioonaku, mille pinge täislaetuna on 4,2 V, nominaalpinge 3,6 V ja mahutavus 200 mAh [32]. Kasutatava aku mahutavust peab juhtplaadi voolutarbe juures silmas pidama – juhtplaadi voolutarve peab olema nii väike, et täis akuga oleks võimalik 3 tundi katkematult mõõtmisi teha. Ruumiliste piirangute tõttu peab toiteallikas olema CR2032 patarei mõõtmete suurusjärgus (diameetriga 20 mm ja paksusega 3,2 mm).

Aku laadimiseks on skeemis MCP73831 liitiumioonaku laadimise kontrolleri. Selle eelised on, et sellel on väikesed mõõtmed (3,2 x 3,1 mm), sellel on vaja vähe väliseid komponente, muudetav laadimise voolutugevus kuni 500 mA ning tööpingevahemikuks on 3,75...6 V. [33] Juhtplaadi skeemis on fikseeritud laadimisvool 115 mA.

Süsteemile 1,95 V (kiirendusanduri minimaalne tööks vajalik sisendpinge) toitepinge väljastab Texas Instrumentsi mobiilsete seadmete jaoks kujundatud kiip TPS62260. TPS62260 on pingeregulaator, mille sisendpinge võib olla vahemikus 2...6 V ning

maksimaalne väljundi voolutugevus kuni 600 mA. Valitud regulaatori eelisteks on veel väikesed mõõtmed – 2,75 x 1,4 mm – ja väike vajalike väliste komponente arv [34].

Aku pingetaseme jälgimiseks on skeemis toite jälgimise kontrolleri LTC2955, mis võimaldab toite olemasolul lülitiga anda käsu süsteemile toidet anda ning sisendpinge alanemisel alla fikseeritud väärtuse toite automaatselt välja lülitada. Samuti saab see kontrolleri protsessorile anda märku toitepinge vähenemisest ning võimaldab protsessoril toite süsteemilt välja lülitada [35]. Skeemis toimub toite väljalülitamine sisendpinge alanemisel alla 3 V. Toite sisselülitamise lülitina on kasutusel keelrelee ehk magnetlülit (ingl *reed switch*), mis on tavaolekus avatud ning seda saab magnetiga sulgeda.

3.3 Tarkvara

Käesolevas töös on tarkvara kirjutatud programmeerimiskeeles C, lähtudes C99 standardist. Programmeerimiskeskkonnana on kasutatud Keil uVision 5 tarkvara. Silumiseks ja mikrokontrollerisse koodi laadimiseks on kasutatud Seggeri silumisseadet J-Link EDU.

Tarkvara jaotub vastavalt ülesannetele ja mahule kaheks suuremaks mooduliks: andmehõivemoodul ja suhtlusmoodul. Mõlema mooduli keskseks osaks on ühine STM32F205 Cortex M3 mikrokontroller. Juhtplaadile toitepinge lubamisel seadistatakse mikrokontroller: töötaktsagedus 30 MHz, sisend-/väljundviigud, kasutatavad taimerid, SPI liides, IIC liides, reaaliajakell. Algseadistuste järel seadistatakse nRF8001 kiip ning tehakse andurite esmane kalibreerimine, pärast mida jääb mikrokontroller ooteolekusse.

Tarkvara kirjutamisel ei ole spetsiaalselt tähelepanu pööratud voolutarbe vähendamisele, v.a MCU töötaktsagedus, mis on sel põhjusel jäetud 30 MHz peale. Juhtplaadi arendamise käigus oli seadme keskmine voolutarve 9...11 mA, millest võis järeldada, et 200 mAh mahutavusega LIR3048 akuga suudab juhtplaat töötada pikemalt kui eesmärkides seatud kolm tundi.

3.3.1 Andmehõivemoodul

Andmehõivemooduli moodustavad keskne mikrokontroller, andurid, mälu ja kiirendusandur. Mõõtmise ajal kogub mikrokontroller anduritelt andmeid ning salvestab tulemused väikmällu. Töö lõppedes on võimalik andmed üle *bluetoothi* ühenduse välisele ühendatud seadmele saata, milleks võib näiteks olla arvuti või nutitelefon.

Andurid väljastavad rõhule vastava sagedusega signaali. Sageduse mõõtmiseks on igale anduri väljundile määratud taimer kanal. Iga kanal fikseerib taimer loenduri väärtuse sel hetkel, kui signaali väärtus kõrgeks (süsteemi toitepinge tasemele) muutub. Kahe kõrge signaali vahelise taktide arvu erinevus salvestatakse iga vastava anduri jaoks eraldatud mälumassiivi. Stabiilse tulemuse saamiseks keskmistatakse igalt andurit 10 lugemist.

Andurite väljundsignaali sagedus on ehituslike iseärasuste tõttu erinev ning erinevus võib olla kuni 10 kHz. Ühtsete tulemuste saamiseks on seega enne mõõtmistulemuste salvestamist vajalik andurite kalibreerimine. Kalibreerimise käigus sooritatakse iga anduriga 40 mõõtmist, mille keskmistatud väärtus võetakse normiks. Mõõtmistulemuste salvestamisel lahutatakse iga anduri tulemuste keskmisest kalibreeritud normi väärtus ning salvestatakse muutus (rõhu rakendumisel anduri väljundsagedus väheneb ning taimer teeb rohkem takte kahe kõrge signaali vahel). Kalibreerimist teostatakse siis, kui tallale ei ole rakendatud rõhku.

Andmete kogumise sagedus on eraldi töötava taimeriga paika pandud. Selle taimer perioodi jooksul kogutakse igalt andurilt väärtused ja salvestatakse iga anduri jaoks määratud massiivi. Sammu iseloomustavate nüansside registreerimiseks peab mõõtmisi tegema vähemalt 100 korda sekundis, statsionaarsete rõhumattide korral teostatakse mõõtmisi isegi kuni 200 korda sekundis. Taimer tööperiood on valitud selliselt, et mõõtmisi tehakse ja salvestatakse iga 10 ms järel, mis tagab mõõtmisageduse 100 Hz.

3.3.2 Suhtlusmoodul

Suhtlusmooduli moodustavad keskne mikrokontroller ja BT kiip. Üle BT ühenduse toimub juhtplaadi ja ühendatud seadme vaheline suhtlus, käskude andmine ning salvestatud andmete ülekandmine. Muust suhtlusest erinevalt toimub treeningandmete saatmine üle *bluetoothi* ühenduse. Mõõtmistulemuste andmed ulatuvad megabaitidesse, mistõttu on vigade vältimiseks andmete ülekandmisel tarvis andmed struktureerida. Selleks, et andmepakett oleks BT protokolliga pakettist sõltumatu, on saatmiseks võetud kasutusele eraldi treeningandmete pakett. Eraldi paketi peamiseks eelisteks on, et seda võib vastavalt vajadusele poolitada, vigaste pakettide tuvastamine on lihtne ning poolikud paketid võib välja visata.

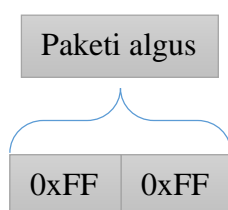
3.2.2.1 Andmepakett

Paketi kogupikkus on 58 baiti ning see koosneb 4 osast. Paketi ülevaatlikku kuju kirjeldab joonis 3.4.

Paketi algus 2 baiti	RTC väärtus 2 baiti	Andurite lugemid 48 baiti	Kiirendusanduri lugemid 6 baiti
-------------------------	------------------------	------------------------------	------------------------------------

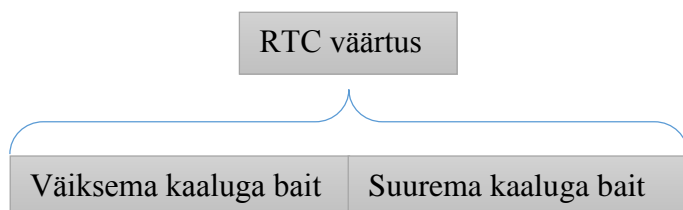
Joonis 3.4: Andmepakett

1. Paketi algus – paketi algust kirjeldab joonis 3.5. Algust tähistavad 2 baiti, mõlemad väärtusega 0xFF. Määratud tähistus on sobilik, sest pakettis olevad lugemid nii suurt väärtust ei omanda.



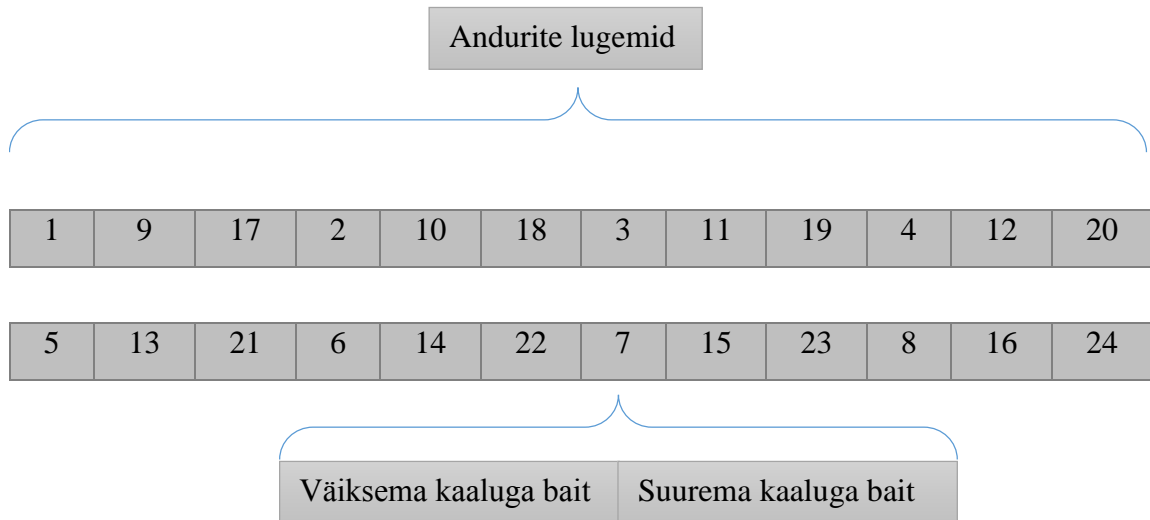
Joonis 3.5: Andmepaketi algus

2. RTC väärtus – RTC väärtust kirjeldab joonis 3.6. Reaalajakella hetkeväärtus, mis on esitatud kahebaidise arvuna. Kell pannakse käima iga uue mõõtmisseeria alguses, ning kella väärtus muutub iga millisekundi möödudes. Lugemi väiksema kaaluga (ingl *low byte*) bait on eespool ja selle järel on suurema kaaluga (ingl *high byte*) bait.



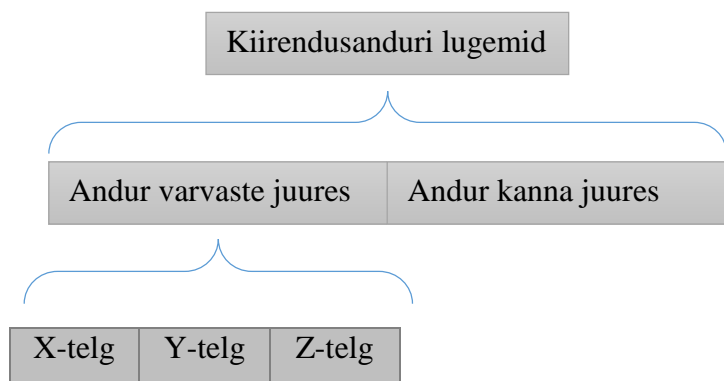
Joonis 3.6: Reaalajakella väärtuse kuju andmepaketis

3. Andurite lugemid – andurite lugemite järjestust kirjeldab joonis 3.7. 24 anduri lugemite maht on 48 baiti. Üksik lugem on pakettis järjestatud nii, et väiksema kaaluga bait on eespool.



Joonis 3.7: Andurite lugemite paiknemine andmepaketis

4. Kiirendusanduri lugemid – lugemite paiknemist kirjeldab joonis 3.8. Sensortalla varvaste juurde ja kannaoossa planeeritud kiirendusandurite hetkeväärtused. Kuna juhtplaadi 2.0 arendus põhineb talla 1.0 versioonil, siis on kasutusel üks kiirendusandur, mis asub juhtplaadi plaadi peal. Ühe anduri kohta on 3 ristkoordinaati, millest igaüks esindab ühebaidine arv. Kokku on kiirendusandurite maht 6 baiti. Lugemid paiknevad pakettis nii, et varvaste juures olevad on eespool ning nende järel on kannu juures paikneva anduri lugemid. Telgede järjestus on vastavalt: X-telg, Y-telg, Z-telg.



Joonis 3.8: Kiirendusanduri lugemine paiknemine andmepaketis

4 Tulemused

4.1 Mõõtmistulemused

Uue juhtplaadi saadavate mõõtmistulemuste hindamiseks testiti seda Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika statsionaarse tensodünamograafilise platvormi peal (joonis 4.1 on pilt kõnnisammu testimisest). Dünamograafiline platvorm on piesoelektrilisel sensoril põhinev seade, mille abil on võimalik mõõta rakenduvat rõhku ajasmillisekundilise täpsusega. Testimist viidi läbi samaaegselt sensortallaga ja platvormiga ning testiti kõnnisammu, jooksusammu ja paigalthüpet.

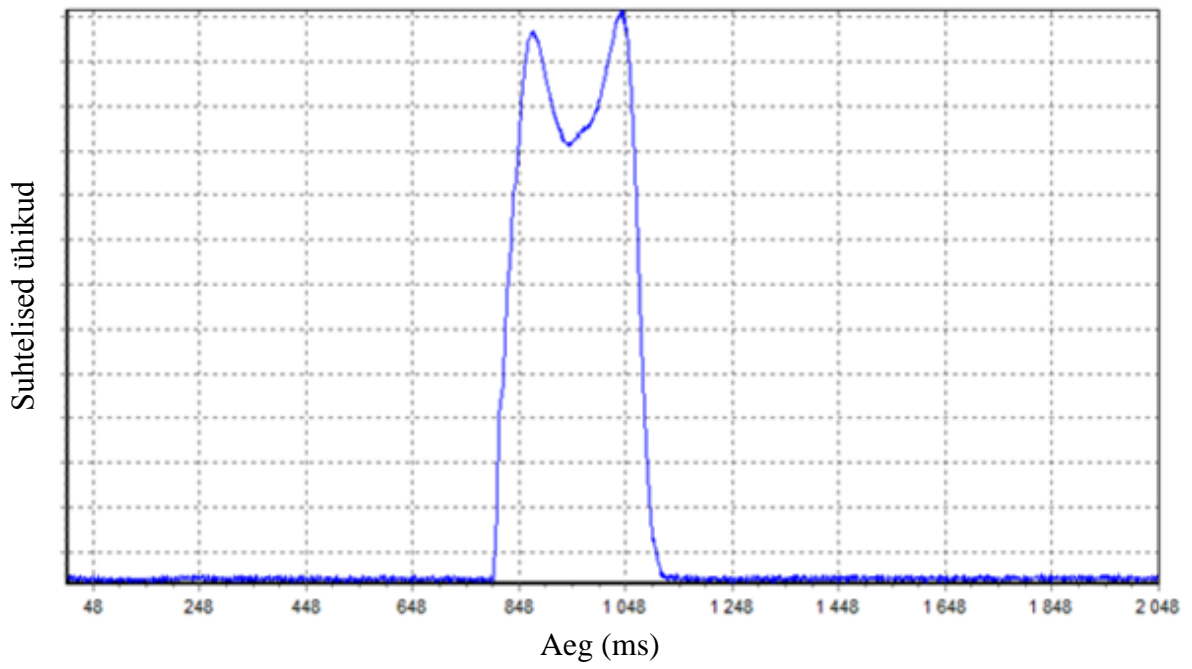
Üksikutelt anduritelt saadud tulemused liideti kokku, mille tulemusel saadi üks liikumist kirjeldav graafik. Summeeritud väärtuste põhjal on müra vähendamiseks arvatatud ka silutud graafik. Silumiseks on tulemuste peal rakendatud lähimate naabrite keskmise leidmist. Lähimate naabrite leidmisel on arvestatud 4 lähimat naabrit. Tulemustest saab järeldada, et juhtplaat on võimeline tegema mõõtmisi piisava sagedusega, et registreerida sammu ja hüppe etapid ja karakteristikud.



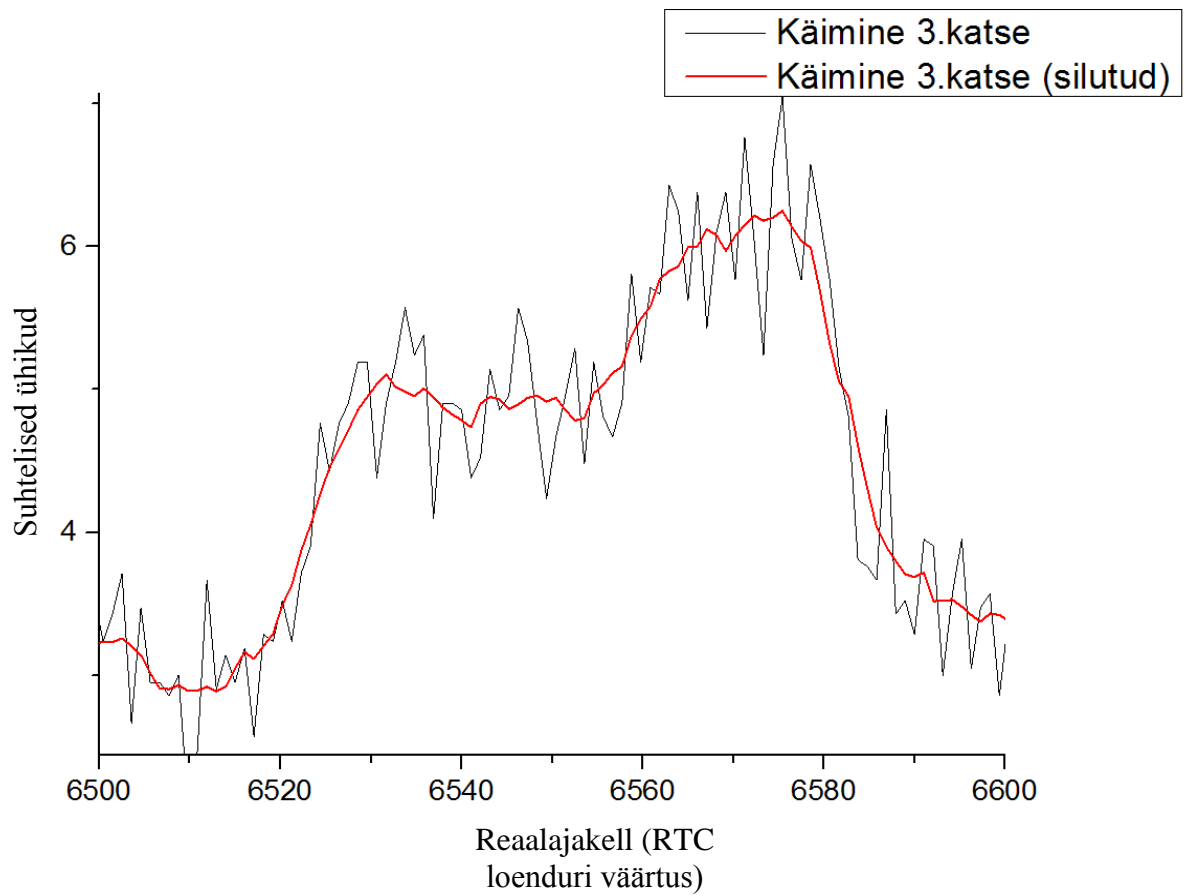
Joonis 4.1: Kõnnisammu testimine

4.1.1 Kõnnisamm

Kõnnisammuga statsionaarsel platsvormil saadud surve ajalist käiku kujutab joonis 4.2 ning sama katse ajal uue juhtplaadiga saadud tulemusi kujutab joonis 4.3.



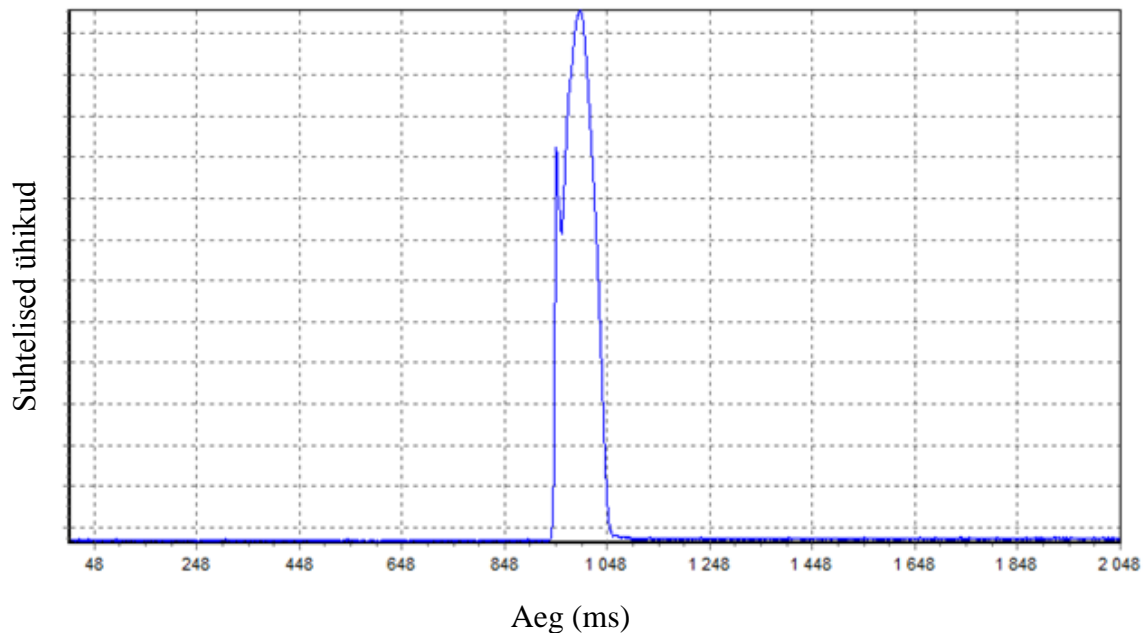
Joonis 4.2: Kõnnisamm Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarsel platvormil



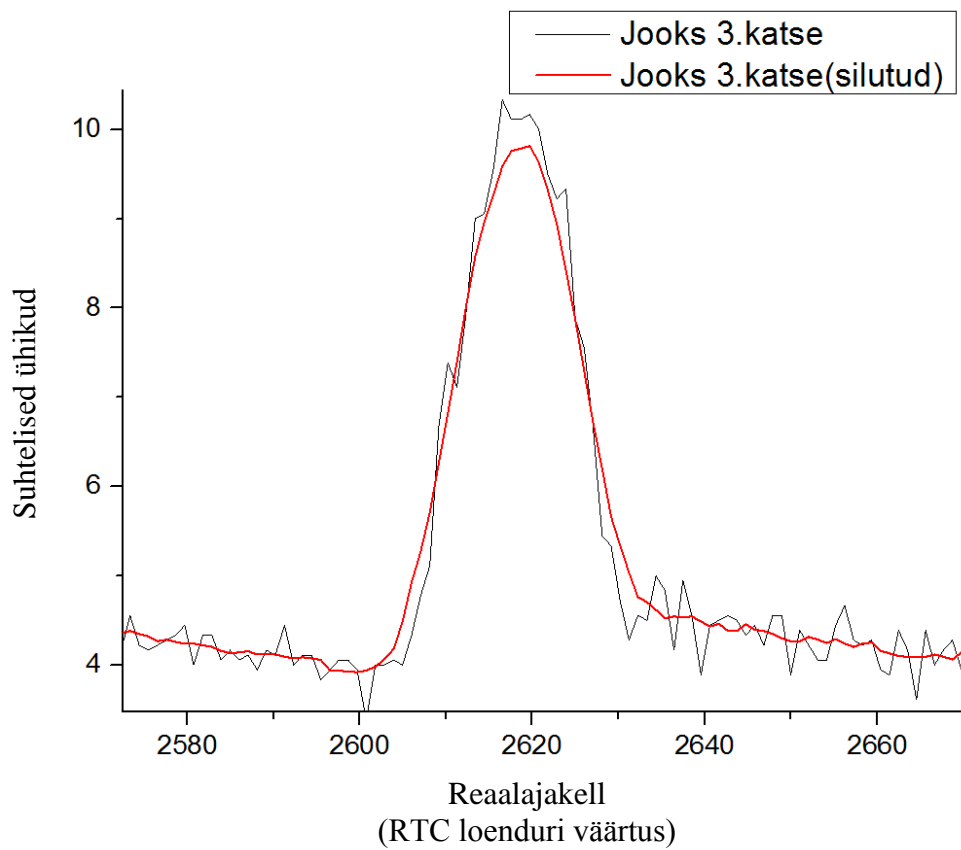
Joonis 4.3: Uue juhtplaadiga kõnnisammul saadud tulemus

4.1.2 Jooksusamm

Jooksuammuga statsionaarsel platvormil saadud surve ajalist käiku kujutab joonis 4.4 ning sammu sensortallaga mõõdetud tulemust kujutab joonis 4.5



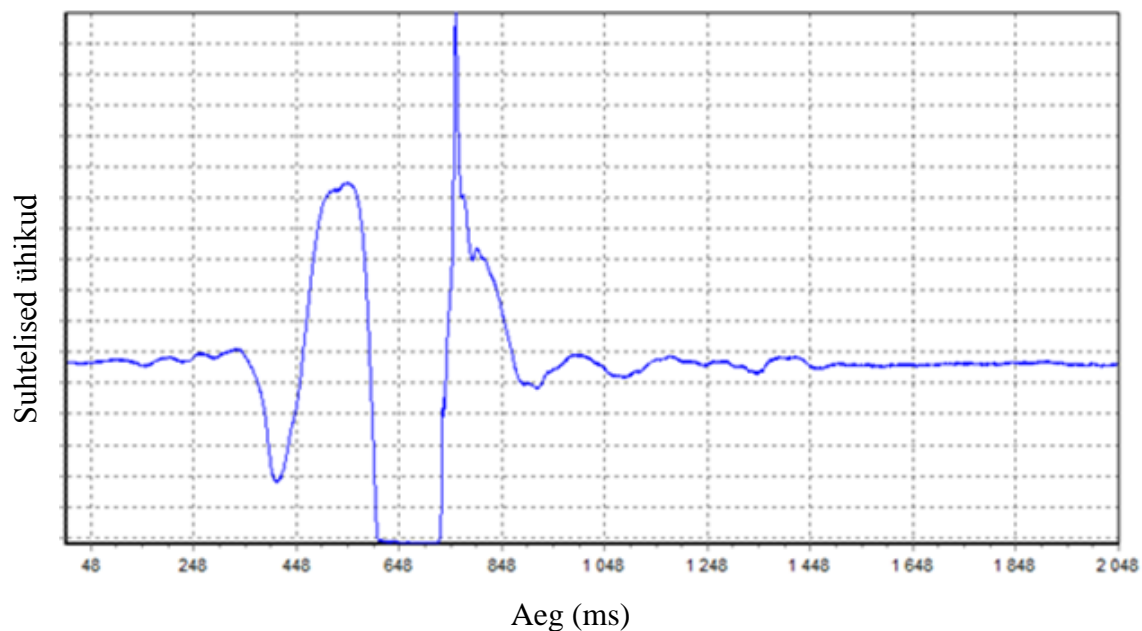
Joonis 4.4: Jooksusamm Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarsel platvormil



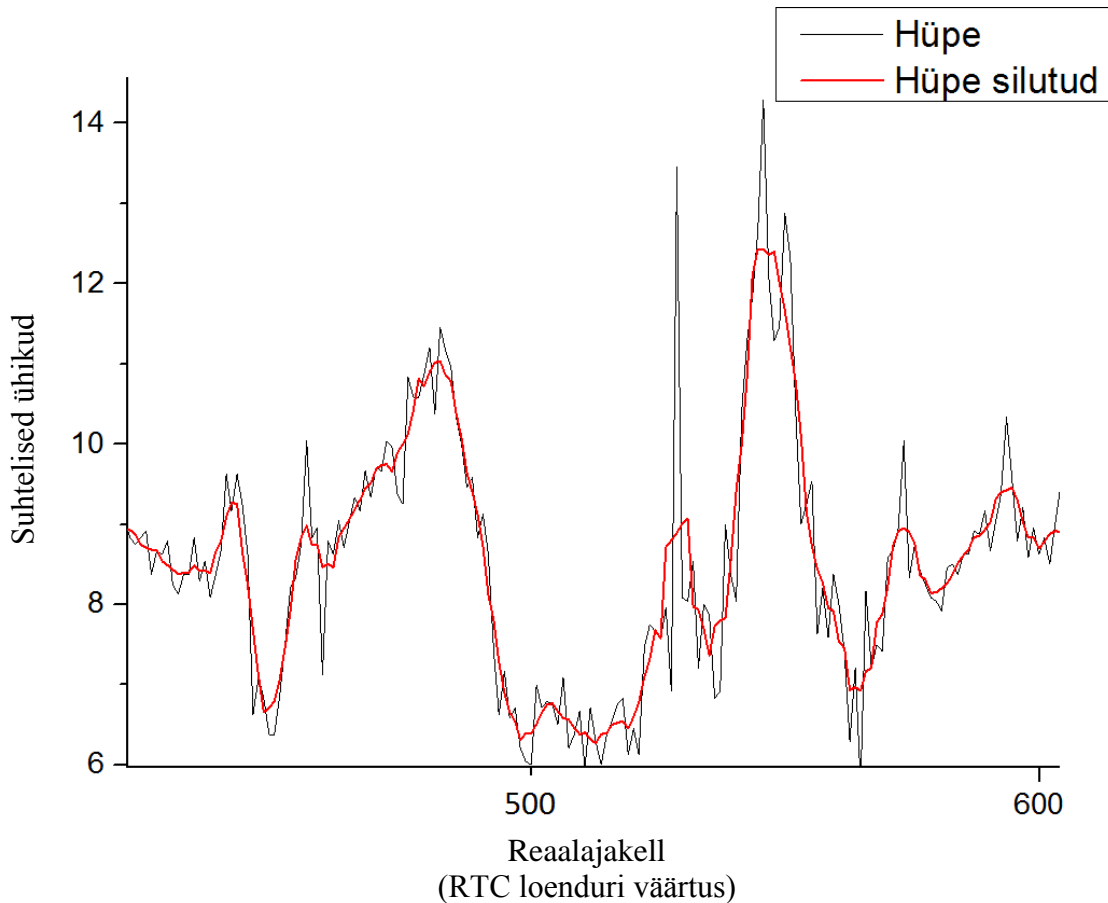
Joonis 4.5: Uue juhtplaadiga jooksusammul saadud tulemus

4.1.2 Paigalthüpe

Statsionaarse platvormi kohapealt hüppel saadud surve ajalise käiku kujutab joonis 4.6 ning sama testi tallaga saadud tulemusi kujutab joonis 4.7.



Joonis 4.6: Ühe jala peal paigalthüpe Tartu Ülikooli kinesioloogia ja biomehaanika labori statsionaarsel platvormil



Joonis 4.7: Uue juhtplaadiga ühe jala peal saadud hüpe tulemus

4.2 Voolutarve

Voolutarbe mõõtmiseks teostati katseseeria, mille käigus mõõdeti juhtplaadi voolutarvet erinevates programmi seisundites. Igas seisundis teostati mõõtmine umbes viieminutilise töötamise vältel v.a kustutamine, mille mõõtmine kestab mälu kustutamine vältel (umbes 31 sekundit). Katsete teostamiseks kasutati toiteallikana reguleeritava väljundpingevahemikuga toiteplokki ja voolutugevuse mõõtmiseks multimeetrit. Programmi seisundid:

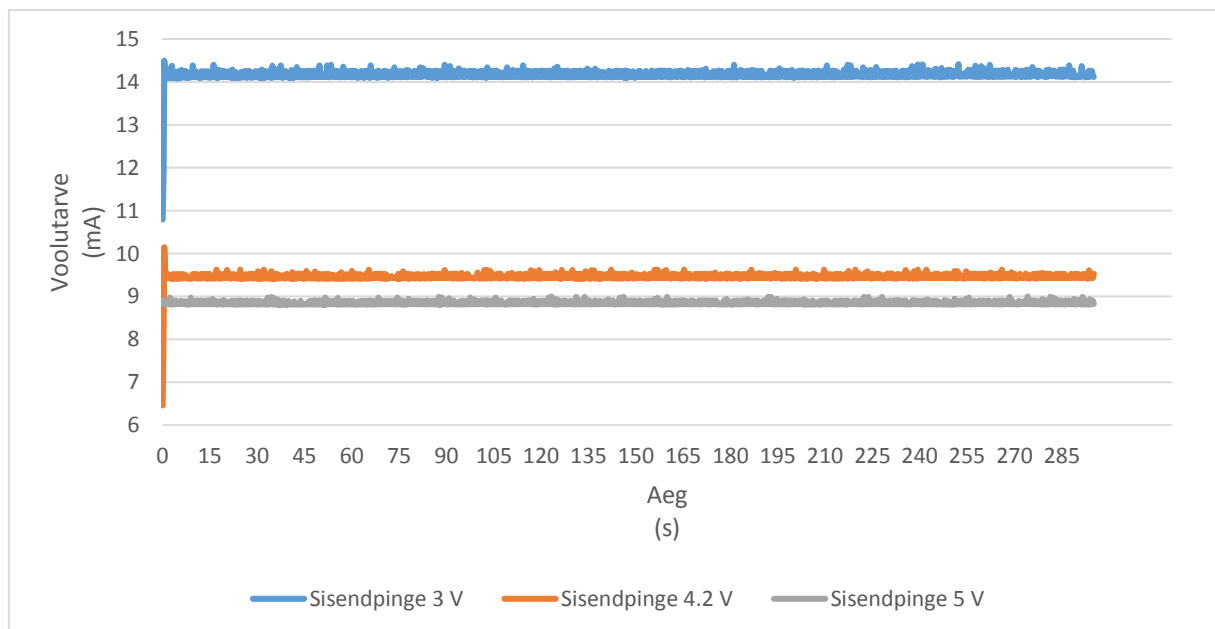
- jõudeolek, juhtplaat ootab, et väline seade ühenduks üle BT. Graafikut kujutab joonis 4.8;
- jõudeolek, väline seade on ühendatud üle BT. Graafikut kujutab joonis 4.9;
- anduritelt andmete kogumine ja salvestamine ehk mõõtmine. Graafikut kujutab joonis 4.10;

- väikmälu kustutamine. Graafikut kujutab joonis 4.11.

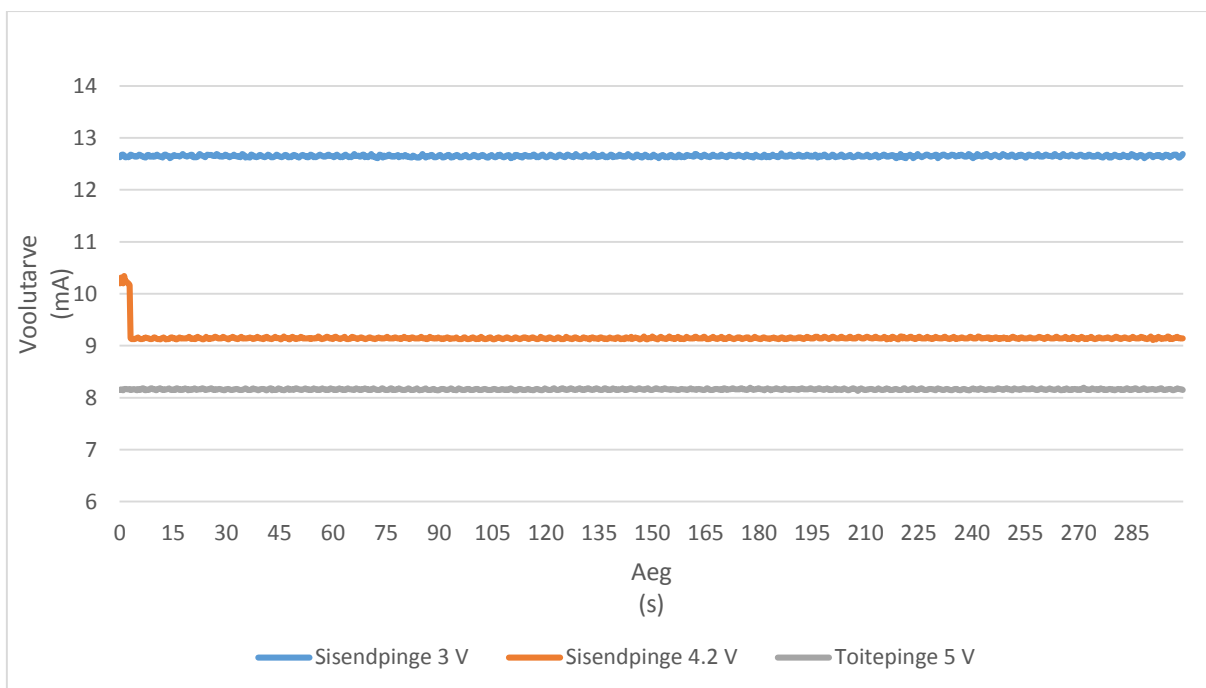
Igat mõõtmist on teostatud kolme sisendpinge juures:

- 3.01 V – vahetult enne seda, kui superviisor lülitab süsteemi toitepinge madala sisendpinge tõttu välja;
- 4.2 V – aku on täis laetud;
- 5 V – juhtplaadi voolutarve, kui sellele näiteks USB liidesest toitepinget anda.

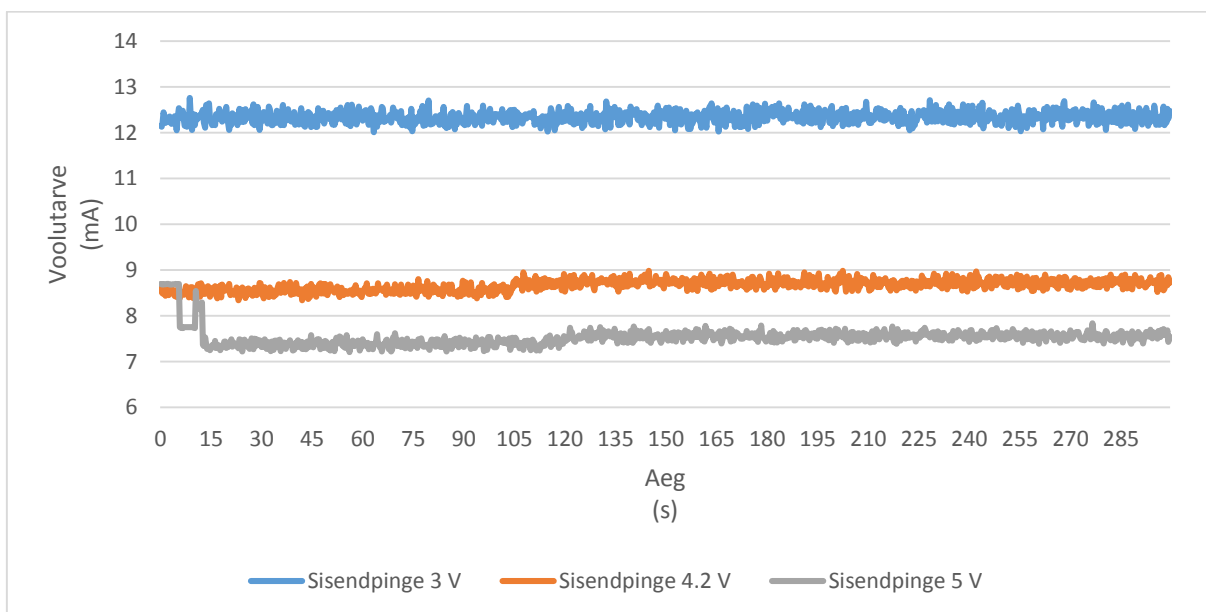
Voolutarbe keskmised väärtused erinevatel eelmainitud mõõtmistel koos vahepealsete sisendpingetega esitab tabel 3.1 ja kujutab graafiliselt joonis 4.12.



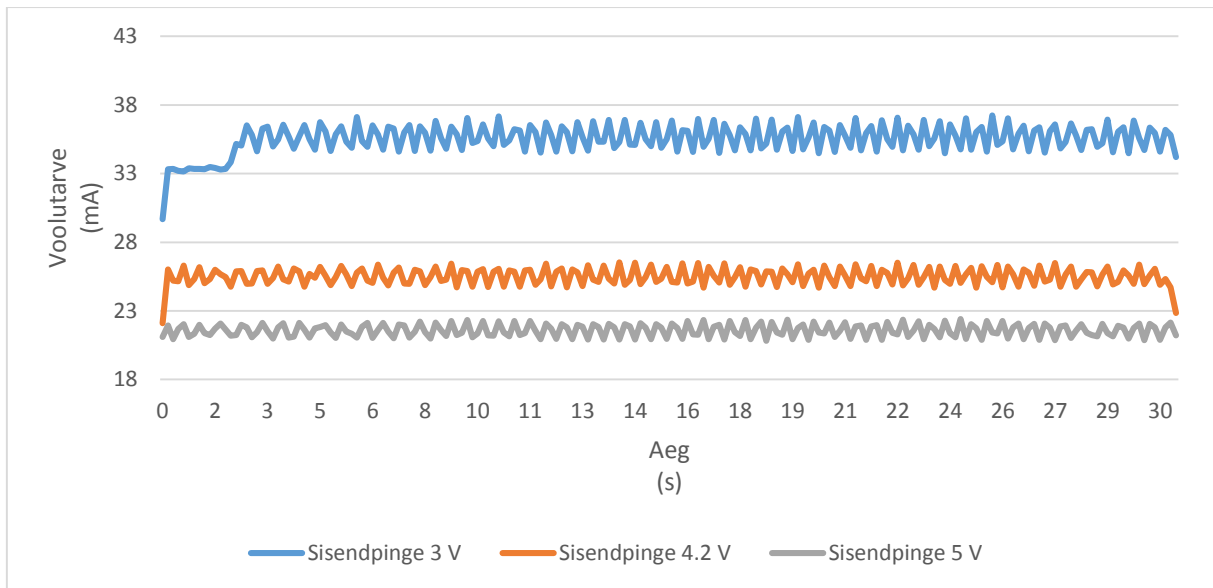
Joonis 4.8: Voolutarve jõudeolekus, BT ühenduse ootamise ajal



Joonis 4.9: Voolutarve jõudeolekus, väline seade on üle BT ühendunud



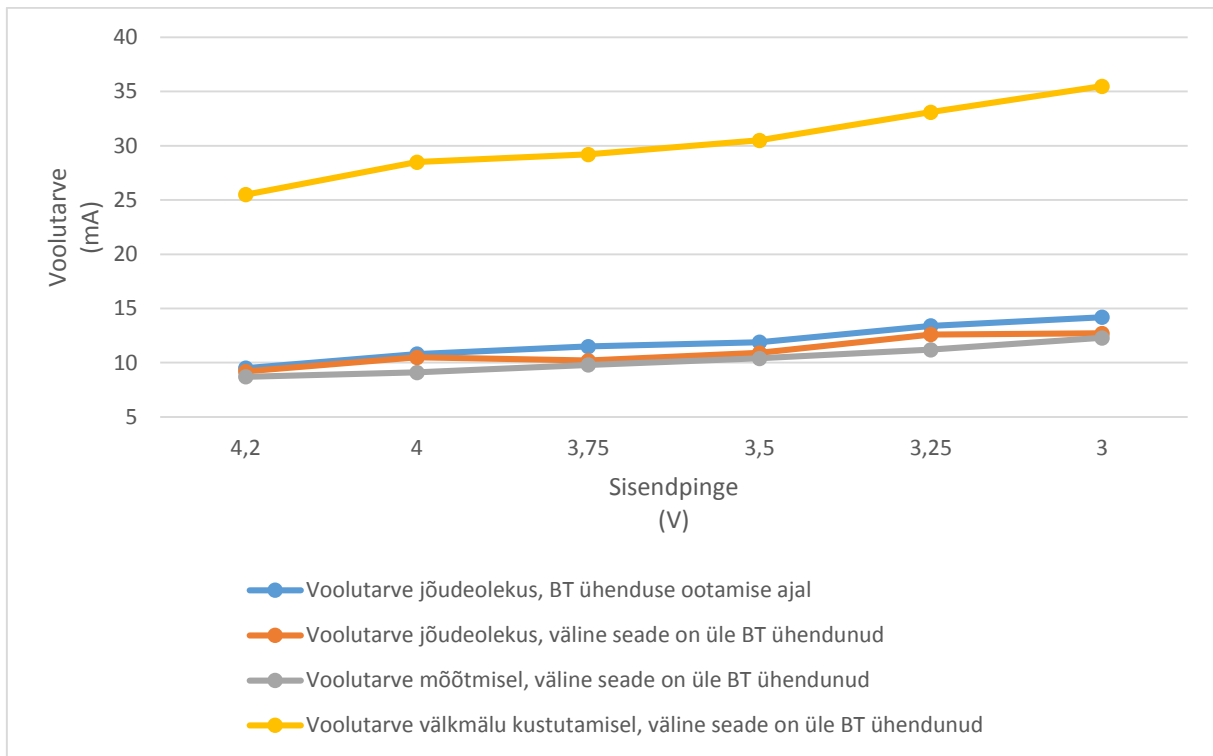
Joonis 4.10: Voolutarve mõõtmisel, väline seade on üle BT ühendunud



Joonis 4.11: Voolutarve väikmälu kustutamisel, väline seade on üle BT ühendunud

Tabel 4.1: Keskmise voolutarve erinevate sisendpingete juures ja programmi olekutes

Sisendpinge (V)	Voolutarve jõudeolekus, BT ühenduse ootamise ajal (mA)	Voolutarve jõudeolekus, väline seade on üle BT ühendunud (mA)	Voolutarve mõõtmisel, väline seade on üle BT ühendunud (mA)	Voolutarve väikmälu kustutamisel, väline seade on üle BT ühendunud (mA)
4,2	9,5	9,2	8,7	25,5
4,0	10,8	10,5	9,1	28,5
3,75	11,5	10,2	9,8	29,2
3,5	11,9	10,9	10,4	30,5
3,25	13,4	12,6	11,2	33,1
3,01	14,2	12,7	12,3	35,5



Joonis 4.12: Keskmise voolutarbe graafik erinevate sisendpingete juures ja programmi olekutes

5 Tulemuste analüüs ja järeldused

5.1 Anduritelt saadud andmed

Juhtplaadi testide graafikute (joonis 4.3, joonis 4.5 ja joonis 4.7) telgedel on taimerite loendurite väärtused, kuna mõõtmiste ajaskaala on täpsemalt määramata ja anduri väljundsagedusele on määramata rõhu vaste. Tulemuste hindamisel on oluline graafiku kuju – graafikutel peavad esinema statsionaarsel platvormil saadavate vastavate tulemuste graafikute etapid.

5.1.1 Kõnnisammu test

Statsionaarse platvormi tulemuste graafikult (joonis 4.2) on näha, et sammu kestus on umbes 300 ms ja sammu iseloomustab kolm etappi:

- 1 kannalöök, mis algab järsu rõhu tõusuga;
- 2 üleminek, mis väljendub keskosas rõhu langusena;
- 3 päkalt tõuge, enne sammu lõppu toimub rõhu tõus.

Sensortalla kõnnisammu tulemuste silutud graafikul (joonis 4.3) on eristatav rõhu järsk tõus sammu alguses, väike rõhu langus keskosas ning rõhu tõus sammu lõpus. Selgelt on eristatav kannal- ja päkalöök, millest on näha, et kõnnisammu graafikud langevad kokku. Eristada ei ole aga võrreldes platvormi tulemustega talla tulemuste graafikul üleminekuetappi, kuna kannalöök läheb sujuvalt üle päkalöögiks.

5.1.2 Jooksusammu test

Statsionaarse platvormi tulemuste graafikult (joonis 4.4) on näha, et sammu kestus on umbes 100 ms ja sammu iseloomustab kolm etappi:

- 1 kannalöök, mis algab järsu rõhu tõusuga;
- 2 üleminek, mis väljendub väikse rõhulangusena enne rõhu maksimumväärtust;

3 pökalöök, mille käigus on rõhu väärtus kõige suurem.

Sensortalla jooksusammu tulemuste silutud graafikul (joonis 4.5) on selgelt eristatav ainult rõhu järsk tõus ja sellele järgnev järsk rõhu langus sammueelsele tasemele. Summeeritud tulemuste graafikul on eristatav väike rõhu langus enne maksimumväärtuse saavutamist. Arvestades selle suurust ja võrreldes graafiku väärtuste kõikumisega, võib see olla lihtsalt müra ning andurid ei ole suutnud nii väikest muutust registreerida. Kuna nii sensortalla tulemuste graafikul (joonis 4.5) ja platvormi tulemuste graafikul (joonis 4.4) on eristatav järsk rõhu tõus ja sellele järgnev rõhu langus saab järeldada, et jooksusammu testi tulemused sobivad kokku statsionaarse platvormi tulemustega.

5.1.3 Kohapealt hüppe test

Statsionaarse platvormi hüppe tulemuste graafikult (joonis 4.6) on näha, et hüppe kestus on umbes üks sekund ja hüpet iseloomustavad etapid:

- 1 umbes 300. ms juures toimub hoovõtu eel rõhu langus;
- 2 350. ms toimub jalaga tõuge, mis avaldub rõhu järsu tõusuna;
- 3 umbes 600. puudub rõhk, mis tähendab, et keha on õhus;
- 4 750. ms toimub maandumine, mida iseloomustab järsk lühiajaline rõhu tõus. Rõhu tõus on suurem kui hoovõtul avaldatud rõhk;
- 5 pärast maandumist toimub kaks väikest põrget, vastavalt 950. ms ja 1100. ms.

Sensortalla kohapeal hüppe tulemuste silutud graafikul (joonis 4.7) on eraldatavad hoovõtueelne rõhu langus, tõuke ajal rõhu tõus ja rõhu oluline vähenemine õhus olemise ajal. Maandumisel on kas andurite mõõtmisveana või mürana sisse sattunud rõhu vähenemine õhusoleku ja maandumist kirjeldava graafiku maksimumpunkti vahel. Maandumisel on eraldatavad ka sellele järgnevad kaks väikest põrget.

Võrreldes uue juhtplaadi graafikut (joonis 4.7) vana juhtplaadi graafikuga (joonis 2.5), on hüppe etapid sarnasemad statsionaarse platvormi tulemuste graafikuga (joonis 4.6). Selgemini on eristatavad hoovõtu eelne rõhu langus, õhus viibimisel langeb rõhk alla hüppe-eelse väärtuse ning maandumisel on eristatavad kaks väikest põrget. Vana juhtplaadi graafikul (joonis 2.5) on maandumisjärgsed kaks põrget eraldamatud ning silumisel ühtlustatud ühtlaseks rõhulanguseks. Silutud hüppe joonest on selgelt on eristatav hüppe-eelne hoovõtt,

õhusviibimine, väikse müraga maandumine ning maandumisel kaks väikest põrget. Uue juhtplaadi tulemused on vanaga võrreldes detailsemad, kuna mõõtmisi tehakse suurema sagedusega. Tänu sellele on mõõtetulemusi rohkem, liikumise etapid paremini eristatavad ning tulemuste silumise käigus ei siluta järske olulisi muutuseid ühtlaseks.

5.1.4 Järeldused andurilt kogutud tulemustest

Sensortallaga tehtud testide tulemuste graafikutelt on eristatavad funktsionaalsete tegevuste käigus selged rõhumuutused. Tehtud kolme funktsionaalsete tegevuste statsionaarse rõhutundliku platvormi ja sensortallaga saadud tulemuste graafikute etapid on üldjoontes sarnased ning mõlematel on selgesti eristatavad ja võrreldavad rõhumuutused tegevuste vastavatel etappidel. Mõned erinevused on tingitud jalatsi ja talla enda elastsusest, mistõttu platvorm tunnetab rõhkusid tallaga võrreldes väikese viivitusega.

5.2 Voolutarve

Voolutarbe pikema mõõtmise graafikutel (joonis 4.8, joonis 4.9, joonis 4.10 ja joonis 4.11) on näha, et vastavates olekutes on juhtplaadil ühtlane voolutarve ilma järskude kõikumisteta. Kõige väiksem on voolutarve täis laetud akuga (4,2 V sisendpinge juures) ning keskmiste väärtuste tabeli (tabel 4.1) ja graafiku (joonis 4.12) põhjal on näha, et aku tühjenedes voolutarve suureneb ühtlaselt, mis on oodatav, kuna selleks, et tarbitav võimused jääks samaks, suureneb voolutarve (võimsuse valemi $P=U \cdot I$ järgi).

Mõõtmiste tulemustest (joonis 4.11, joonis 4.12, tabel 4.1) näha, et kõige rohkem tarbitakse voolu välkmälu kustutamise ajal: vahemikus 25,5...35,5 mA. Kustutamisel tarbitakse peaaegu kolm korda rohkem voolu kui teiste programmi olekute ajal, kuid arvestades, et kustutamine kestab umbes pool minutit (joonis 4.11) ja mõõtmise käigus tuleb seda ühe korra teha, siis ei mõjuta see umbes pooleminutiline suurem voolutarve aku kestvust (vajab kokku umbes 0,21...0,3 mAh).

Jättes välja välkmälu kustutamisel tarbitava voolu, siis keskmise voolutarbe tabeli (tabel 4.1) põhjal on minimaalne ja maksimaalne voolutarve vastavalt 8,7 mA ja 14,2 mA ning 200 mAh mahtuvusega LIR3048 akuga suudab sensortald töötada 14...22 tundi, mis on üle 4 korra pikem aeg kui eesmärkides seatud 3 tundi.

Kokkuvõte

Käesolev bakalaureusetöö kirjeldab jala koormusjaotuse mõõtmiseks erinevate füüsiliste tegevuste korral mõeldud sensortalla juhtplaadi arendamist.

Töös anti ülevaade olemasoleva sensortalla juhtplaadist, selle tulemustest ja toodi põhjendused, miks tekkis vajadus uue põlvkonna juhtplaadi järele. Töö käigus disainiti sensortallale uus juhtplaat: valiti uus elektroonika, disainiti trükkplaat ja kirjutati juhtplaadile programmikood. Juhtplaat suudab ühenduda ja suhelda väliste seadmetega BLE üle ühenduse. Mõõtmisi tehakse sagedusega 100 Hz, mis sisaldab anduritelt andmete kogumist ja salvestamist välmällu. Uue juhtplaadi tööd mõõtmise ajal testiti tallaga Tartu Ülikooli spordihoone kinesioloogialaboris statsionaarse rõhutundliku platvormi peal. Testimise tulemusena oli näha, et uue juhtplaadiga 100 korda sekundis kogutud andmed olid stabiilsed ning mõõtmisagedus oli piisav, et registreerida funktsionaalsete tegevuste etappe. Sensortallaga saadud tulemused olid võrreldavad statsionaarse platvormi peal saadud tulemustega, mis täidab sensortalla integraalse režiimi töö eesmärgid. Testiti ka juhtplaadi voolutarvet ning arvutuste tulemuste kohaselt töötab juhtplaat 200 mAh akuga katkematu töö käigus vähemalt 14 tundi, mis ületab nõutud minimaalselt kolmetunnise tööaja.

The development and testing of control board v.2.0 for the smart insole system

The aim of this Bachelor thesis is to design and construct a control board for the light-weight, soft, robust, and low-cost pressure sensory system integrated into an elastic silicone insole. The purpose of the insole integrated with sensory system is to provide a mobile device to allow assessing for example the ergonomics of the technique applied in running or to help monitoring the recovery from leg or feet injuries.

An overview of the previous control board and its results are given. Also presented are reasons why a new control board generation was needed. In the development, new electronic parts were chosen, a new PCB board was designed and a program code for controlling the board was written. A BLE capable device can connect and communicate with the control board. Measurements can be made with a sampling rate of 100 Hz, which includes reading sensor values and writing them to the FLASH memory on board. The insole with the new control board was tested on a pressure sensitive stationary platform in the kinesiology laboratory of Tartu University. The results of testing proved that the data from the insole is stable and is comparable with the data acquired from the stationary platform in the kinesiology laboratory, which fulfills the goals set for integral working regime of the insole. The current consumption of the control board was also tested and from the calculations it was determined that with a 200 mAh battery, the control board should be able to work continuously for at least 14 hours. This is three times longer compared to minimum of three hours defined in the requirements of the control board.

Viited

- [1] K. Leemets, T. Terasmaa, P. Jaakson, A. Kume ja T. Tamm, „Development of A Smart Insole System for Gait and Performance,“ kogumikus *Material Science and Application (ICMSA 2015)*, Suzhou, China, 2015, accepted.
- [2] „ARM, koduleht,“ ARM, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.arm.com/about/index.php>. [Kasutatud 17 05 2015].
- [3] „802.15.1-2002, IEEE Standards Association,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.1-2002.html>. [Kasutatud 03 05 2015].
- [4] „The Bluetooth SIG, Bluetooth Smart,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Smart.aspx>. [Kasutatud 05 16 2015].
- [5] „UL Standards - UL 94,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://ulstandards.ul.com/standard/?id=94_6. [Kasutatud 10 05 2015].
- [6] „Sunstone circuits - FR-4 PCB Materials,“ Sunstone circuits, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.sunstone.com/pcb-capabilities/pcb-manufacturing-capabilities/pcb-materials/fr-4-material>. [Kasutatud 10 05 2015].
- [7] J. Maaros, R. Kuik ja A. Pintsaar, „Jala koormusjaotuse mõõtmise ning selle kasutusvõimalused taastusravis,“ *Eesti Arst*, p. 161–165, 2003.
- [8] K. Pärlin, „DIGITAALSE SIGNAALI GENEREERIMINE JA MÕÕTMINE MAHTUVUSLIKELT SENSORITELT SENSORTALLAS,“ bakalaureusetöö, Tartu Ülikool (2014).

- [9] D. Grištšenko, „MATERJALITEHNOLOOGIA PROJEKTI „SOFTSENS“ SENSORALLA KOMMUNIKATSIOONIMOODULI LOOMINE,“ bakalaureusetöö, Tartu Ülikool (2014).
- [10] T. Tamm, K. Pärlin, T. Tiimus, K. Leemets, T. Terasmaa ja I. Must, „Smart insole sensors for sports and rehabilitation,“ kogumikus Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems (2014), San Diego, California, 2014.
- [11] „Nordic Semiconductor, Bluetooth Smart/Bluetooth low energy, nRF51822,“ Nordic Semiconductor, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-Smart-Bluetooth-low-energy/nRF51822>. [Kasutatud 19 05 2015].
- [12] M. S. Orendurff, E. S. Rohr, A. D. Segal, J. W. Medley, J. R. Green ja N. J. Kadel, „Regional Foot Pressure During Running, Cutting, Jumping, and Landing,“ *Am. J. Sports, Med.*, 36, 566 (2008).
- [13] „QSi | Quantum Silicones - QM 240T,“ QSi | Quantum Silicones, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.quantumsilicones.com/qm-240t/>. [Kasutatud 10 05 2015].
- [14] „ARM, tooted, Cortex M seeria,“ ARM, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/>. [Kasutatud 17 05 2015].
- [15] „Atmel, SMART ARM mikrokontrollerid, SAM3S8 andmeleht,“ Atmel Corporation, [Võrgumaterjal]. Available: http://www.atmel.com/Images/Atmel-11090-32-bit%20Cortex-M3-Microcontroller-SAM-3S8-SD8_Datasheet.pdf. [Kasutatud 16 05 2015].
- [16] „NXP, mikrokontrollerid, LPC175x andmeleht,“ NXP, [Võrgumaterjal]. Available: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC1759_58_56_54_52_51.pdf. [Kasutatud 16 05 2015].
- [17] „Silicon Labs, mikrokontrollerid, EFM32L andmeleht,“ Silicon Labs, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/EFM32LG940.pdf>.

[Kasutatud 16 05 2015].

[18] „ST mikrokontrollerid, STM32F20x seeria andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00237391.pdf>.

[Kasutatud 03 05 2015].

[19] „TI, mikrokontrollerid, F28M3x seeria andmeleht,“ Texas Instruments, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/gpn/f28m35h52c>. [Kasutatud 16 05 2015].

[20] „ST mikrokontrollerid, STM32L100RC andmeleht, p. 49,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00090183.pdf>. [Kasutatud 10 05 2015].

[21] „ST mikrokontrollerid, STM32F20x seeria andmeleht, p.76,“ [Võrgumaterjal]. Available:

<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00237391.pdf>.

[Kasutatud 10 05 2015].

[22] „Differencebetween.net, Difference Between EEPROM and Flash,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.differencebetween.net/technology/hardware-technology/difference-between-eprom-and-flash/>. [Kasutatud 03 05 2015].

[23] „Spansion Flash Memory, S25FS-S Family andmeleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.spansion.com/Support/Datasheets/S25FS-S_00.pdf. [Kasutatud 03 05 2015].

[24] „Farnell, väikmälud, N25Q128A11E andmeleht,“ Micron, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1674444.pdf>. [Kasutatud 22 05 2015].

[25] „Adesto, väikmälud, AT45DB641E andmeleht,“ Adesto Technologies, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.adestotech.com/wp-content/uploads/DS-45DB641E-027.pdf>. [Kasutatud 22 05 2015].

[26] „Nordic Semiconductor, Bluetooth Smart/Bluetooth low energy, nRF8001 andmeleht,“ Nordic Semiconductor, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download_resource/17534/16/78465071.

- [Kasutatud 17 05 2015].
- [27] „TI, Bluetooth / Bluetooth Low Energy, CC2560 andmeleht,“ Texas Instruments, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/gpn/cc2560>. [Kasutatud 17 05 2015].
- [28] „Bluetooth Smart Connectivity IC - nRF8001,“ Nordic Semiconductor, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-Smart-Bluetooth-low-energy/nRF8001>. [Kasutatud 03 05 2015].
- [29] „Freescale, kiirendusandurid - MMA8452Q,“ Freescale Semiconductor, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=MMA8452Q. [Kasutatud 03 05 2015].
- [30] „Analog Devices, kiirendusandurid, ADXL344 andmeleht,“ Analog Devices, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL344.pdf>. [Kasutatud 21 05 2015].
- [31] „ST Microelectronics, kiirendusandurid, LIS2DH andmeleht,“ ST Microelectronics, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00042751.pdf>. [Kasutatud 21 05 2015].
- [32] „LIR3048 liitiumioonaku andmeleht,“ EEMB, [Võrgumaterjal]. Available: <http://disti-assets.s3.amazonaws.com/tlcelectronics/files/datasheets/18594.pdf>. [Kasutatud 20 05 2015].
- [33] „Microchip Technology, MCP73831/2 datasheet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001984g.pdf>. [Kasutatud 11 05 2015].
- [34] „Texas Instruments, DC/DC Switching Regulator, Step-Down (Buck) Converter, TPS62260 andmeleht,“ Texas Instruments, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ti.com/lit/gpn/tps62260>. [Kasutatud 11 05 2015].
- [35] „Linear Technology, Power Management, System Supervisor, Monitor and Control, Push

Button Controllers, LTC2955 andmeleht,“ Linear Technology Corporation,
[Võrgumaterjal]. Available: <http://www.linear.com/docs/41161>. [Kasutatud 05 11 2015].

Lisad

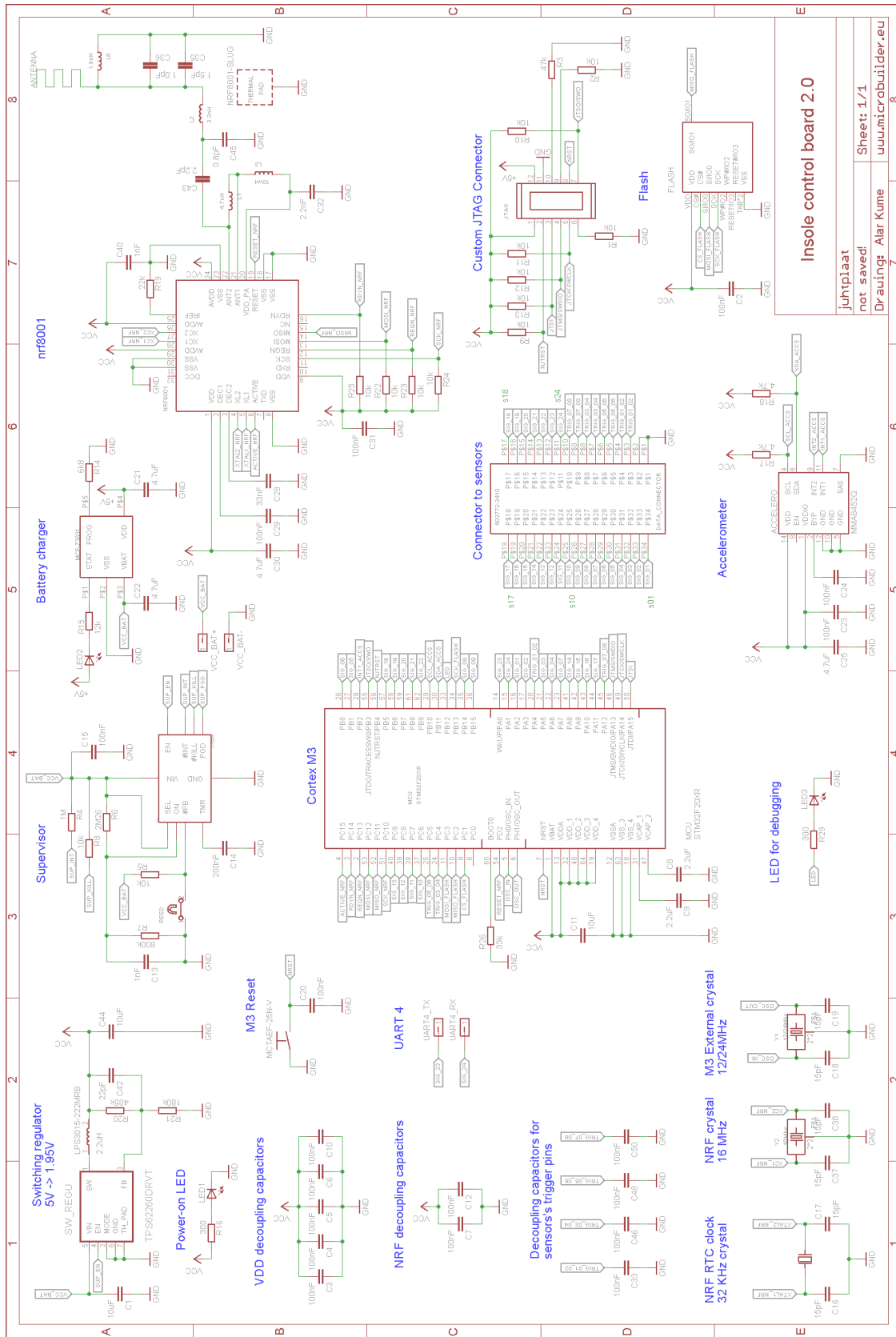
Lisa 1 – Valatud sensortald ilma juhtplaadita



Lisa 2 – Painduv talla v 1.0 trükkplaat andurite järjestusega



Lisa 3 – Juhtplaadi skeem



Insole control board 2.0

Juhtplaat
not saved!
Drawing: Alar Kume
uuuimicrobuilder.eu

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Alar Kume

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

„SENSORTALLA JUHTPLAADI v.2.0 ARENDAMINE JA TESTIMINE“

mille juhendajad on Tarmo Tamm ja Tõnis Terasmaa

- 1 reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **28.05.2015**