

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tehnoloogiainstituut

Taavet Joonas Jukola

GESPA surveanduri edasi arendamine

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendajad:

spetsialist Jaanus Kalde

spetsialist Teet Tilk

Tartu 2021

Resümee/Abstract

GESPA surveanduri edasi arendamine

X-jalgsuse korrigeerimiseks puudusid efektiivsed mitteinvasiivsed meetodid. Selleks loodi alternatiivne vahend GESPA, mis koosneb retuuside külge paigutatud elastsetest lintidest ja surveanduritest. Loodud surveandur oli aga raskesti toodetav ja seda oli võimalik täiustada. Käesoleva töö raames arendati GESPA surveandurit edasi. Selleks loodi uus sama eesmärki täitev seade, mis on kergemini toodetavam, väiksem ja lisatud soovitud mugavustega.

CERCS: T115 Meditsiinitehnika, T171 Mikroelektronika

Märksõnad: GESPA, surveensor, X-jalgsus, Bluetooth

Improving the force sensor of GESPA

There was a lack of effective noninvasive treatments for knocked knees and because of that GESPA was developed. It consists of garments attached with elastic straps and pressure sensors. The developed pressure sensor was hard to manufacture and it was possible to improve it. The aim of this thesis was to improve the force sensor of GESPA. For that a new force sensor was developed, which has the same functions as its predecessor but is easier to manufacture, is smaller and is equipped with the wanted add-ons.

CERCS: T115 Medical technology, T171 Microelectronics

Keywords: GESPA, pressure sensor, knocked knees, Bluetooth

Sisukord

Resümees/Abstract.....	2
Jooniste loetelu	4
Tabelite loetelu	5
Lühendid, konstandid, tähised.....	6
Sissejuhatus	7
1 Kirjanduse ülevaade	8
1.1 Räsasjalgsuse ülevaade.....	8
1.2 Korrigeerimise meetodid.....	8
2 Varasem töö.....	10
2.1 Prototüüp	11
3 Probleemi tutvustus	12
3.1 Töö eesmärk	12
3.2 Nõuded lahendusele	12
4 Töö käik.....	13
4.1 Riistvara arendus	13
4.1.1 BLE moodul EYAGJNZXX	14
4.1.2 Survesensor FMAMSDXX005WCSC3	15
4.1.3 Toitesüsteem.....	16
4.1.4 Aku kestvus	17
4.1.5 USB C	18
4.2 Tarkvara testimine.....	19
4.3 Korpuse loomine	20
5 Võimalikud tegevused tulevikuks	21
Kokkuvõte	22
Viited	23
Lisad	26
Lisa 1 Surveanduri elektriskeem	26
Lisa 2 Trükkplaadi vasekihid	27
Lisa 3 Korpuse mudel	29
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	30

Jooniste loetelu

Joonis 1 Räsasjalgsus	8
Joonis 2 Süsteemi skeem.....	11
Joonis 3 Surveanduri ühendused	14
Joonis 4 BLE mooduli ühenduste elektriskeem	15
Joonis 5 Survesensori ühenduste elektriskeem	16
Joonis 6 Toitesüsteemi elektriskeem.....	17
Joonis 7 USB C pesa ühenduste elektriskeem	19
Joonis 8 32 MHz taktsageduse ümberseadistus püsivaras	19
Joonis 9 Surveanduri elektriskeem.....	26
Joonis 10 Trükkplaadi vasekiht #1 (pealmine)	27
Joonis 11 Trükkplaadi vasekiht #2.....	27
Joonis 12 Trükkplaadi vasekiht #3.....	28
Joonis 13 Trükkplaadi vasekiht #4 (alumine)	28
Joonis 14 Korpuse põhja mudel	29
Joonis 15 Korpuse kaane mudel.....	29

Tabelite loetelu

Tabel 1 EYAGJNZXX spetsifikatsioon	14
Tabel 2 FMAMSDXX005WCSC3 spetsifikatsioon	15

Lühendid, konstandid, tähised

GESPA – (*Garment with Elastic Straps and Pressure Applicator*) ehk survetundlike elastsuskomponentidega retuusid.

BLE – (*Bluetooth Low Energy*) ehk alates Bluetooth 4.0 versioonides olev madala energiatarbega Bluetoothi spetsifikatsioon.

USB – (*Universal Serial Bus*) ehk universaalne järjestiksiin.

SPI – (*Serial Peripheral Interface*) ehk sünkroonse järjestiksuhtluse liidese standard.

I/O – (*Input/Output*) ehk sisend/väljund.

SWD – (*Serial Wire Debug*) järjestikühendusega silumisliides.

Sissejuhatus

Noores eas võib jalgade arenemisel esineda kõrvalekaldeid, mille tulemusena võib lastel tekkida püsiv X-jalgsuse asend. Selle kujunemine võib olla füsioloogiline või patogeeniline ja viimasel juhul võib korrigeerimine olla vajalik. [1]

Kasutusel olevad mitteinvasiivsed korrigeerimismeetodid ei ole tõhusad ja peamisteks ravimeetoditeks on hemiepifüsiodees ja osteotoomia, mis on mõlemad invasiivsed ning nendega võivad kaasnedä tüsistused [1]. Seetõttu loodi alternatiivseks mitteinvasiivseks korrigeerimise vahendiks GESPA.

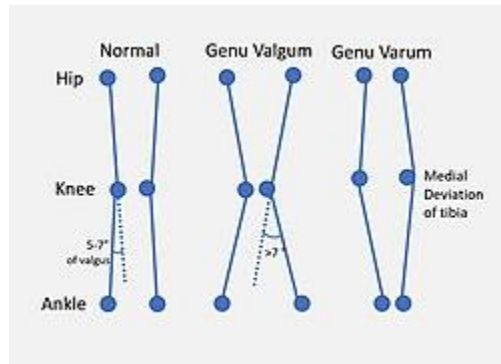
GESPA koosneb retuusidest, millele on lisatud alajäsemeid toetavad elastsed lindid ja surveandur. Surveanduri eesmärgiks on mõõta lintide poolt jalgadele avaldatud survet ja kasutajale teada anda, kui need vajavad reguleerimist. Kasutaja teavitamiseks suudab surveandur suhelda kasutaja mobiiltelefoniga läbi raadioside. Loodud surveandur koosnes komponentidest, mis olid raskesti kättesaadavad ja ei võimaldanud masinladumist. Lisaks oli võimalik muuta seda mugavamaks ja efektiivsemaks.

Käesoleva töö eesmärgiks on luua surveandur, mis täidab eelneva versiooniga samu eesmärke ja on kergemini toodetavam. Lisaks vähendatakse seadme mõõtmeid ning muudetakse see kasutajasõbralikumaks.

1 Kirjanduse ülevaade

1.1 Räsasjalgsuse ülevaade

Räsasjalgsus jaguneb oma olemuselt O-jalgsuseks, ehk *genu varum*, ja X-jalgsuseks, ehk *genu valgum* (joonis 1). O-jalgsust iseloomustab jalgade kõverdumine keskteljest väljapoole, mille tulemusena jääb pahkluid kokku surudes põlvede vahele vahe, ja X-jalgsuse puhul esineb jalgade kõverdumine sissepoole, mille tõttu tekib põlvede kokku surumisel pahklude vahele vahe. Füsioloogiliselt esineb lastel O-jalgsus kuni teise eluaastani, pärast mida võib välja kujuneda X-jalgsus. Jalad peaksid hakkama sirgenema viiendaks eluaastaks. Kui üks eelnimetatud vormidest peaks püsima jääma või kõverdumine on normist suurem, võib tegemist olla patogeenilise seisundiga, mille puhul võib korrigeerimine olla vajalik. [2]



Joonis 1 Räsasjalgsus [3]

Patogeenilise X-jalgsuse puhul ei pruugi jalgade kõverdumine olla sümmeetriline ja seisund võib ajaga halveneda. Tekkepõhjuste järgi jagatakse see peamiselt idiopaatseks, traumajärgseks, ainevahetuslikuks, neuromuskulaarseks ja põletikust tingituks. Kõrvalekalle kujuneb tavaliselt välja noores eas, kui skelett ja lihased veel arenevad. Nende arengu häirimisel võib üheks tulemuseks olla X-jalgsus. [1]

1.2 Korrigeerimise meetodid

Korrektseks X-jalgsuse korrigeerimiseks on tähtis teada, kas tegemist on füsioloogilise või patogeenilise vormiga ja viimase puhul tuvastada ka tekkepõhjus. Füsioloogiline X-jalgsus tavaliselt sekkumist ei vaja ja piisab seisundi jälgimisest, et tuvastada, kas seisund paraneb ise. Olukorra halvenemisel või püsima jäämisel võib korrigeerimine olla vajalik. [1]

Patogeeniliste vormide puhul võivad jalgade kõverdumised olla ajutised või taanduvad pärast tekkepõhjuse ravi. Näiteks traumajärgne X-jalgsus tekib tavaliselt aasta jooksul pärast traumat ja taandub enamasti ilma sekkumiseta. Ka ainevahetuslikel põhjustel tekkinud kõverdumine võib taastuda pärast vastavat ravi. [4]

Otsesteks X-jalgsust korrigeerivateks võteteks on peamiselt hemiepifüsiodees ja osteotoomia. Hemiepifüsiodeesi puhul juhitakse jala skeleti arengut nii, et see kasvaks ise sirgeks. See eeldab, et patsiendi skelett on veel arenemise faasis ja arengu kiirus ning etapp tuleb protseduurile eelnevalt täpselt määratleda. Juhtimiseks kasutatakse implantaate, milleks sobivad nii kruvid, plaadid kui ka klambrid. Implantaadid eemaldatakse ravi lõpus, et vältida X-jalguse kujunemist O-jalgsuseks. Osteotoomia, ehk luustiku korrigeerimine, sobib ka patsientidele, kelle skeleti areng on lõppenud. Kuna mõlemad meetodid on invasiivsed, võivad nendega kaasneda ka tüsistused. Neiks on näiteks füüsilised kahjustused, liiga suur või väike kõverduse reguleerimine ja põletikud. [4]

Mitteinvasiivseteks korrigeerimisvõteteks on näiteks ortopeedilised toed ja jalgu toetavad klambrid. Antud vahendid ei mõjuta aga jala arengut olulisel määral ja seeläbi ei anna märkimisväärset ravitulemust. [1] Ortopeedilised jalanõud võivad leevendada valu ja jala väsimust, mis võivad kaasneda X-jalgusega [5].

2 Varasem töö

X-jalgsust korrigeerivate invasiivsete meetodite kõrvale on vaja leida ka tõhusaid mitteinvasiivseid meetodeid. Selleks uurisid Tamm *et al* koostöös Tartu Tervishoiu Kõrgkooli ja Tartu Ülikooliga, kuidas oleks võimalik X-jalgsust korrigeerida ja ennetada mehhanoteraapiliselt. [6]

Loodi retuusid, millele lisati alajäsemeid toetavad elastsed lindid. Esimesed katsetused X-jalgsust põdevatel lastel toimusid aastatel 2012 ja 2013. Retuusid osutusid küll mugavaks, kuid need kaotasid ajaga oma elastsuse ja survet, mida nad liigestele osutasid, ei olnud pärast esialgset seadistamist võimalik mõõta ega reguleerida. Järgmised katsetused toimusid perioodil 2014 kuni 2015. Varasemalt testitud retuuse arendati edasi ja loodi GESPA. Selleks lisati retuusidele mõlema jala jaoks takistuslikud surveandurid ja võimalus põlvedele osutatavat pinget reguleerida. Lisatud surveandurid andsid selle külge ühendatud valgustitega märku, kui reguleerimine oli vajalik. Kolmandal uurimisperioodil otsustati valgussignaalidega märguanded asendada helisignaalidega, kuna põlema süttinud tuled jäid tihti märkamata. Viimast arendust katsetati aastatel 2016 kuni 2017. [6]

Katsetuste käigus pidid patsiendid kandma retuuse kolm kuud, iga päev vähemalt kaheksa tundi. Seejärel lõpetati korrigeerimine ja jälgiti patsientide seisundit järgneva kolme kuu jooksul. Kuigi tulemused olid iga patsiendi jaoks erinevad, tuvastati kõigil X-jalguse vähenemine pärast GESPA kandmist. Seejärel hakkas alates GESPA eemaldamisest kõigil seisund halvenema, mis näitas jäsemete suutmatust korrigeeritud positsiooni hoida. Korrigeerimise tulemus oli aga suurem kui viimase kolme kuu jooksul mõõdetud seisundi tagasipöördumine. [6]

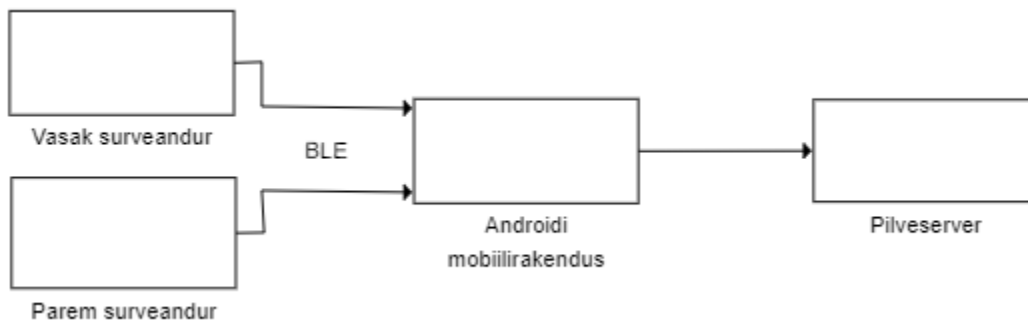
Põhjuseid, mis GESPA raviefekti vähendasid, võis olla mitmeid. Üheks neist oli patsiendi ebakorrektnes GESPA kasutus. Kui teises katsetuste faasis kasutatud valgussignaalid võisid jääda märkamatuks, siis kolmandas faasis kasutatud helisignaalid hakkasid mõningaid patsiente häirima. Seetõttu lülitati seade välja ja see, kas põlvele avaldatud surve oli sel perioodil korrektne, jäi uurijatele teadmatuks. Selliste probleemide vältimiseks tulevikus, sooviti GESPA-l kasutatav elektroonika muuta juhtmevabaks. [6]

2.1 Prototüüp

Esimese juhtmevaba lahenduse GESPA-le arendas Tartu Ülikooli spetsialist Teet Tilk. Loodud seade kasutas Raytac Corporation-i toodetud MDBT40-ANT [7] BLE moodulit ja mõõtis selle külge ühendatud survesensoriga seadmele avaldatud survet. Mõõtmistulemused logiti mooduli mälli ja saadeti kasutaja mobiiltelefoni pärast raadioside ühenduse loomist. Seadmel kasutatava programmi koostasid Tartu Ülikooli spetsialistid Jaanus Kalde ja Teet Tilk.

Projekti raames Android operatsioonisüsteemile loodud mobiilirakendus kogus ja töötles raadioside kaudu saadud andmeid ning saatis need edasi serveris asuvasse veebirakendusse. Andmete põhjal andis rakendus kasutajale teada, kui GESPA vajab reguleerimist või surveanduri akud laadimist. Kui andmete saatmine veebirakendusse polnud ühenduse puudumise tõttu võimalik, salvestati andmed mobiiltelefoni kuni ühenduse taastamiseni. Ühtlasi sai kasutaja mobiilirakendusest vaadata viimaseid mõõtmistulemusi ja seadetest märguande tüüpi ning lubatud mõõtetulemuste vahemikku määrata. [8]

Loodud pilverakendus oli autenditud kasutajate jaoks ligipääsetav veebist ja kuvas kogutud andmeid graafikute ja tabelitena. Vaadeldavaid andmeid sai kasutaja ka filtreerida ning vaadata mõõtmistulemuste keskmist. Kogu süsteemi struktuur on näidatud joonisel 2. [8]



Joonis 2 Süsteemi skeem

3 Probleemi tutvustus

Pärast prototüübi valmimist tulid ilmsiks mõningad puudujäägid. Esiteks leidis seadmel selliseid komponente, mis olid halva saadavusega või mida ei olnud võimalik masinladuda. Teiseks esinesid mugavusprobleemid – seadme aku laadimiseks kasutati USB Micro-B pesa ja seadme mõõtmel oleksid võinud olla väiksemad.

3.1 Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on edasi arendada GESPA jaoks loodud digitaalset surveandurit. Loodaval seadmel on survesensor surve mõõtmiseks ja BLE moodul väliste seadmetega suhtlemiseks. Kasutatav BLE moodul sisaldab samast perekonnast mikrokontrollerit, mis eelkäija, tänu millele ei ole vaja kogu püsivara uuesti arendada. Seadme aku kestab vähemalt kaheksa tundi ja laadimine käib läbi USB C pesa. Uuendatud seadme mõõtmel on väiksemad.

3.2 Nõuded lahendusele

1. Koostada seade komponentidest, mis võimaldavad masinladumist.
2. Aku laadimiseks kasutada USB C pesa.
3. Kasutada mikrokontrollerit, mis võimaldab varasemalt loodud tarkvara kasutust.
4. Vähendada seadme mõõtmeid.
5. Aku kestab vähemalt kaheksa tundi.

4 Töö käik

Töö käigu võib jagada kolmeks osaks:

1. Riistvara arendus,
2. Tarkvara testimine,
3. Korpuse loomine.

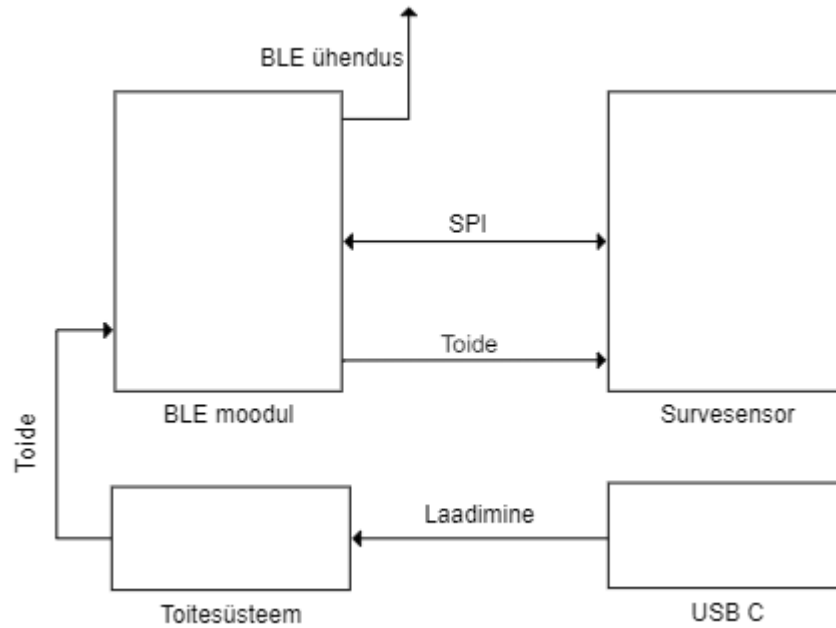
Töö esimeses faasis tuli analüüsida Teet Tilga loodud prototüüpi, et loodava seadme funktsionaalsus jääks samaks ja tagada parem ühilduvus juba varem loodud tarkvaraga. Analüüsi tulemusena selgus, et prototüüp sisaldas nRF51422 mikrokontrollerit ja lisaks BLE võimekusele ning survesensori olemasolule, oleks vaja uues lahenduses mikrokontrolleriga ühendada ka valgusdiodid ning luua võimalus akupinge mõõtmiseks. Prototüübi programmeerimine käis läbi SWD liidese. Pärast analüüsi teostamist oli vaja leida uued komponendid, mis vastaksid töö nõuetele, ja disainida uus elektriline skeem ning trükkplaat.

Teises etapis tuli kontrollida, kas varem loodud tarkvara töötab uuel lahendusel ja kolmandaks etapiks jäi uuele disainile sobiva korpuse loomine.

4.1 Riistvara arendus

Uue seadme loomisel kasutatud trükkplaat oli nelja kihiline ja komponendid paiknesid plaadi mõlemal poolel. Kõik kasutatud komponendid on masinlaotavad. Seadme elektrilise skeemi ja trükkplaadi disainimiseks kasutati Altium Designer [9] tarkvara. Täielik elektriskeem on näidatud lisas 1 ja kõik trükkplaadi kihid lisas 2.

Tähtsamad alamgrupid seadmepoolsetel olid raadiosidemoodul, survesensor, toitesüsteem ja USB C pesa. Nende ühendused on kuvatud joonisel 3 ja on täpsemini kirjeldatud järgnevatel peatükkidel.



Joonis 3 Surveanduri ühendused

4.1.1 BLE moodul EYAGJNZXX

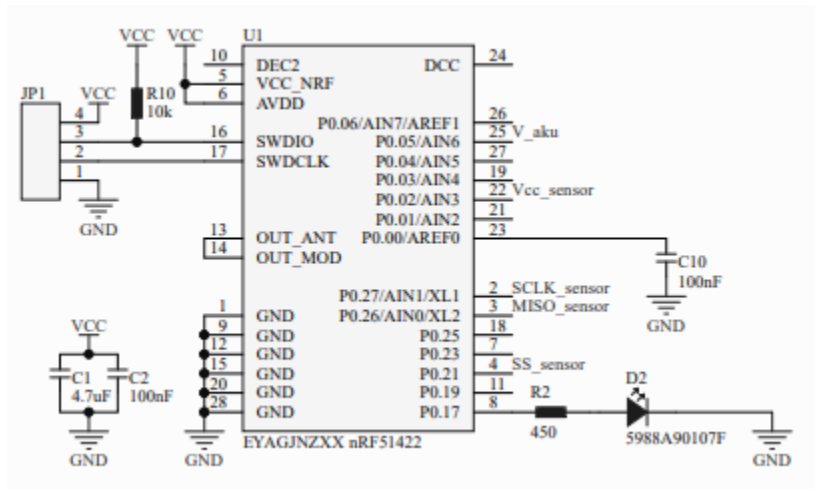
Seadme südamikuks on Taiyo Yuden CO moodul EYAGJNZXX [10]. Komponenti spetsifikatsioon on kirjeldatud tabelis 1.

Tabel 1 EYAGJNZXX spetsifikatsioon [10][11]

Mikrokontroller	nRF51422
Toitepinge (VCC)	1,8 V – 3,6 V
Tühivoolutarve	3,8 μ A
I/O väljundpinge kõrges olekus	VCC-0,3 V – VCC V
I/O väljundvool <i>high-drive</i> olekus	5 mA
Taktsagedus	32 MHz
Töötemperatuur	-25 °C – +85 °C
Mõõtmed	11,3 mm x 5,1 mm x 1,3 mm

Väliste seadmetega suhtlemiseks on moodulil integreeritud antenn ja ANT (ingl *Adaptive Network Topology*) ning Bluetooth 4.2 *low energy* võimekus. Programmeerimiseks kasutab moodul SWD

standardit, millega ühendamiseks on plaadil 1,27 mm jalavahega pistik. Lisaks on seadmel mooduli külge ühendatud üks sinise valgusega valgusdiod [12], rada toitesüsteemi akupinge mõõtmiseks sisemise analoog-digitaalmuunduri abil ja survesensor. Mooduli külge on ühendatud ka survesensori toitepinge väljaviik, sest mooduli jalgade väljundpinge ja väljundvool *high-drive* režiimis on sensori jaoks piisavad. Sellise lahendusega on võimalik tarkvaraliselt survesensor voolutarbe vähendamiseks välja lülitada ja nii kadus vajadus voolu lülitava transistori lisamiseks plaadile. Mooduli ühendused on kuvatud ka joonisel 4.



Joonis 4 BLE mooduli ühenduste elektriskeem

4.1.2 Survesensor FMAMSDXX005WCSC3

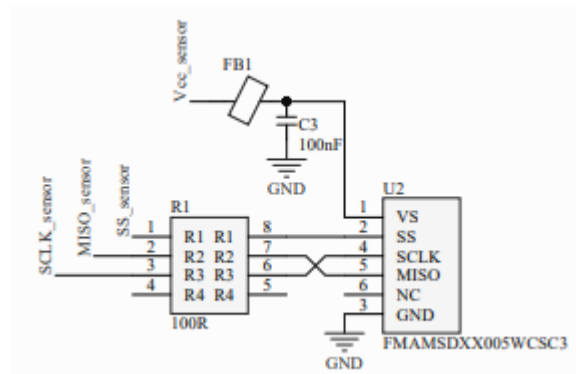
Survesensorina kasutati Honeywelli FMAMSDXX005WCSC3 [13] sensorit, mille spetsifikatsioon on kuvatud tabelis 2. Välja toodud väärtused kehtivad kui komponendi toitepinge on ligikaudu 3.3 V.

Tabel 2 FMAMSDXX005WCSC3 spetsifikatsioon [13]

Toitepinge	3,0 V – 3,6 V
Voolutarve	kõrgeim 3,9 mA
Töötemperatuur	-40 °C – +85 °C
Mõõdetav jõuahemik	0 N – 5 N
B-tüüpi mõõtemääramatus	8 %
Mõõtmed	4,5 mm x 5 mm x 2,45 mm

Andmevahetus sensori ja mikrokontrolleri vahel käib kasutades SPI protokoll. Selleks on ühendatud kolm paari väljaviike signaalide SS (ingl *slave select*), SCLK (ingl *serial clock*) ja MISO (ingl *master in slave out*) jaoks. Liinide vahele on paigutatud jadamisi 100 oomi terminaatorit, mis tagavad kõrge sagedusega signaalide jaoks liinisobituse [14] ja ühtlasi aitavad kaitsta raadiosidemoodulit staatilise elektri eest [15].

Kuna sensoril endal puudus võimalus voolutarbe vähendamiseks tarkvaraliselt, ühendati komponendi toiteliin mikrokontrolleri väljundi külge. See on võimalik, kuna mikrokontrolleri väljaviigid väljastavad ligikaudu 3 V ja kuni 5 mA, mis on andmelehe järgi sensorile sobivad. Selleks et mõõtetulemused ei oleks valed ebastabiilse toitepinge tõttu, lisati antud toiteliini vahele ferriitpärlist ja kondensaatorist koosnev filter. Järjestikku ühendatud ferriitpärl ja rööbiti olev kondensaator stabiliseerivad pinget vähendades kõrgsageduslikku müra [16]. Survesensori ühendused on kuvatud ka joonisel 5.



Joonis 5 Survesensori ühenduste elektriskeem

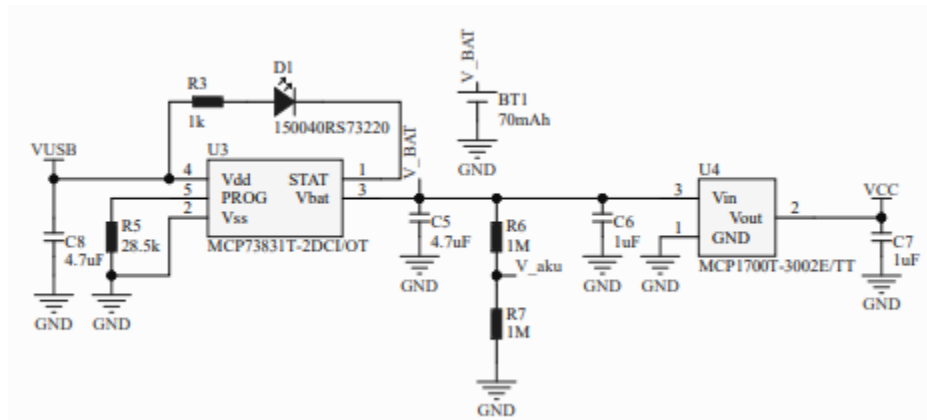
4.1.3 Toitesüsteem

Toitesüsteem koosneb akust, akulaadija kiibist ja lineaarsest pingeregulaatorist. Akut saab laadida läbi USB C pesa ja aku pinget on võimalik mõõta mikrokontrolleri analoog-digitaalmuunduri abil.

Kasutatud aku on Cellevia Batteries toodetud L401520 [17]. See on ühe elemendiga liitiumioonaku mahutavusega 70 mAh. Soovituslikeks töötemperatuurideks on $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja laadimistemperatuurideks $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Väljundpinge vahemik on akul 2,75 V – 4,2 V ja maksimaalne lubatud laadimisvool on 70 mA. Akul on ka integreeritud kaitsekiip, mis takistab aku üle- ja alatäitmist ning liigvoolu.

USB pesa ja aku vahele on lisatud Microchipi MCP73831T-2DCI/OT [18] laadimiskontroller, mis sobib ühe elemendiga liitiumioonakude laadimiseks. Kontrollerile on lisatud punase valgusega valgusdiod [19], mis süttib aku laadimisel ja kustub laadimise katkestamisel või aku täitumisel. Aku laadimine on piiratud voolule 35 mA, mis on aku tootja poolt testitud kiirlaadimise vool [17].

Akust tuleva pinge reguleerimiseks on seadmel Microchipi MCP1700T-3002E/TT [20] lineaarne pingeregulaator. Komponenti soovituslik sisendpinge on kuni 6 V ja see omab sisemist pingelangu kuni 350 mV. Väljundpingeks on 3 V, seega vajaliku pinge saamiseks peab aku väljundpinge olema vähemalt 3,35 V. Kolme voldine väljundpinge sai valitud, kuna see oli kasutatud BLE mooduli soovituslik toitepinge [10] ja ka survesensorile on see sobiv [13]. Antud pingeregulaatori soovituslik töötemperatuur on $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - +125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kulutatav tühivool on $1,6\text{ }\mu\text{A}$. Toitesüsteemi elektriskeem on kuvatud joonisel 6.



Joonis 6 Toitesüsteemi elektriskeem

4.1.4 Aku kestvus

Aku kestvuse hindamiseks programmeeriti seade varasema versiooni jaoks loodud tarkvaraga ja mõõdeti seadme poolt tarbitavat voolu. Voolu mõõtmise hetkel oli seadmel BLE sisse lülitatud, kuid ühendust sellega ei loodud. Lisaks ei olnud survesensor sisse lülitatud. Mõõtmiseks kasutati Fluke 289 [21] multimeetrit ja keskmiseks voolutarbeks kümne minuti jooksul mõõdeti $65,6\text{ }\mu\text{A}$. Mõõtmisi tehti alalisvoolu μA režiimis $5000\text{ }\mu\text{A}$ mõõtevahemikuga, mille B-tüüpi mõõtemääramatus on multimeetri andmelehe järgi 0,075% tulemusest pluss 2 madalaima tüvenumbri ühikut. Saadud voolutarve täpsus on seega $\pm 0,249\text{ }\mu\text{A}$ ja leitud aku kestvus jääb vahemikku 1063 kuni 1071 tundi ehk ligikaudu 44 päeva.

Survesensori mõju leidmiseks voolutarbele võeti arvesse selle kõrgeimat voolutarvet, käivitusaega ja ühe mõõtmistulemuse saatmise aega, milleks olid vastavalt 3,9 mA, 3 ms ning 0,84 ms [13]. Kui sooritada mõõtmisi korra sekundis, nagu tehakse eelnevale versioonile arendatud püsivaras [22], suureneks seadme keskmine voolutarve 0,015 mA võrra. Arvestades eelnevalt arvutatud mõõtemääramatust, kulutaks seade kokku 80,4 μ A kuni 80,8 μ A ja aku kestaks 866 kuni 871 tundi ehk ligikaudu 36 päeva. Leitud aku kestused on arvutuslikud ja praktikas võivad olla erinevad.

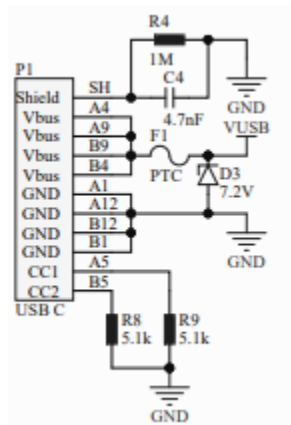
4.1.5 USB C

Üheks töö nõudeks oli kasutada aku laadimiseks USB C pesa, sest see võimaldab mugavamalt juhtme ühendamist. Vastavaks komponendiks sai valitud Hirose CX70M-24P1 [23], mis on 24 väljaviiguga ja monteeritakse trükkplaadi sisse. Trükkplaadi sisse käiv pesa valiti selleks, et vähendada seadme kõrgust ja muuta survesensor seadme kõrgeimaks punktiks.

USB pesa kasutatakse vaid seadmel oleva aku laadimiseks. Selleks et luua ühendus ühendatava toiteadapteriga, on pesa CC1 ja CC2 viikude külge ühendatud 5,1 k Ω takistid. [24]

USB pesast tulenev toiteliin läbib taastuvat termotakistit 0ZCM0010FF2G [25], mis katkestab vooluühenduse, kui vool on üle 250 mA. Reaktsioonikiirus 700 mA puhul on komponendil 0,1 sekundit. Lisaks sellele on toiteliini ühendatud rööbiti Zeneri diod BZX384-C6V8 [26], mis avaneb vähemalt 7,2 voldi juures ja kaitseb süsteemi sellest kõrgema pingest eest.

Pesa maanduse jaoks on selle korpusega seotud viigud ühendatud maaga paralleelselt takisti ja kondensaatoriga. Nii tekib sagedusfilter, mis väldib ühendatud laadimiskaabli muutumist antenniks. [27] Kõik pesa ühendused on kuvatud ka joonisel 7.



Joonis 7 USB C pesa ühenduste elektriskeem

4.2 Tarkvara testimine

Jaanus Kalde ja Teet Tilga loodud püsivaraga tutvumiseks ja muutmiseks kasutati Keil μ Vision [28] tarkvara. Kuna kasutatud raadiosidemoodul töötas programmi jaoks valel taktsagedusel, tuli testimiseks püsivara vastavalt muuta. Mooduli andmeleht soovitas selleks lisada faili system_nRF51.c funktsiooni SystemInit lõppu 32 MHz taktsagedusse ümberseadistuse, mis on kuvatud joonisel 8.

```

if (*(uint32_t*)0x10001008 == 0xFFFFFFFF)
{
    NRF_NVMC->CONFIG = NVMC_CONFIG_WEN_Wen << NVMC_CONFIG_WEN_Pos;
    while (NRF_NVMC->READY == NVMC_READY_READY_Busy){}
    *(uint32_t*)0x10001008 = 0xFFFFFFFF00;
    NRF_NVMC->CONFIG = NVMC_CONFIG_WEN_Ren << NVMC_CONFIG_WEN_Pos;
    while (NRF_NVMC->READY == NVMC_READY_READY_Busy){}
    NVIC_SystemReset();
    while (true){}
}

```

Joonis 8 32 MHz taktsageduse ümberseadistus püsivaras [10]

Pärast taktsageduse muutmist püsivaras surveandur programmeeriti ja testiti raadiosidemooduli suutlikust suhelda väliste seadmetega. Testimiseks kasutati Nordic Semiconductor ASA Androidi mobiilirakendust nRF UART 2.0 [29], millega suudeti edukalt luua Bluetooth side mooduliga, sellele andmeid edastada ja ka mooduli saadetud andmed vastu võtta.

4.3 Korpuse loomine

Korpus disainiti kasutades Fusion 360 [30] tarkvara ja toodeti Original Prusa i3 MK3S [31] 3D-printeriga musta värvi polüpiimhappe plastmassist. Korpuse mõõtmeteks on 43 mm x 24 mm x 7,3 mm. Teet Tilga loodud seadme korpuse mõõtmeteks olid 50 mm x 30 mm x 7 mm, seega vähenes seadme ruumala ligikaudu 28 %.

Korpus koosneb kahest osast, milleks on karbi põhi ja kaas. Pildid mudeli osadest on lisas 3. Kõik karbi seinad on 1 mm paksud ja kõik välised servad on ümardatud. Põhja küljel asub väljalõige, mis tagab ligipääsu USB C pesale ja trükkplaadi alla jäävad toetuspinnad seadme stabiliseerimiseks ning varuruum aku ühendamiseks. Kaanel on samuti seinas paiknev väljalõige USB pesale ligipääsu tagamiseks ja lisaks on pinnale väljalõikega tekitatud vetruv keel, mis kannab sellele avaldatud surve edasi survesensorile. Mõlemal osal on igas nurgas augud kruvide paigaldamiseks, et komponendid ühendada. Kaanel on kruvipeade peitmiseks süvendid. Kasutati Bossardi 3351564 [32] kruve, mille läbimõõt ja pikkus on vastavalt 1,4 mm ning 4 mm.

5 Võimalikud tegevused tulevikuks

Töö tulemusena valmis GESPA jaoks uus edasi arendatud surveandur ja anduri jaoks loodi ka korpus. Püsivara käesoleva töö raames ei loodud kuna varasema versiooni jaoks arendatud tarkvara on võimalik uue lahenduse jaoks kohandada ja kasutada. Tulevikus on võimalik vajalikud muudatused püsivaras ellu viia, täpsemalt tuleks ümber seadistada mikrokontrolleri väljundid ja sisendid ning lisada SPI suhtlus survesensoriga.

Tulevikus on võimalik edasi arendada ka korpust, et veelgi vähendada seadme mõõtmeid. Näiteks võib leida uue viisi korpuse kaane ja põhja sidumiseks, sest praeguses lahenduses on kasutatud kruve, mille tõttu suurenes seade kruvipesade mõõtmete jagu.

Kokkuvõte

GESPA jaoks loodud esialgne surveandur oli raskesti toodetav ja seda oli võimalik edasi arendada. Käesoleva töö eesmärgiks oli luua uus seade, mis omaks vanaga võrreldes sama funktsionaalsust, kuid täidaks ka järgnevaid töö nõudeid:

1. Seade koosneb komponentidest, mis võimaldavad masinladumist.
2. Aku laadimiseks kasutada USB C pesa.
3. Kasutada mikrokontrollerit, mis võimaldab varasemalt loodud tarkvara kasutust.
4. Vähendada seadme mõõtmeid.
5. Aku kestab vähemalt kaheksa tundi.

Töö tulemusena valmis surveandur, mille kõik komponendid on masinlaotavad. Aku laadimiseks paigaldati seadmele USB C pesa ja valitud raadiosidemoodul sisaldab nRF51422 mikrokontrollerit, mida kasutati ka eelneval versioonil. Uue seadme mõõtmeteks koos korpusega on 43 mm x 24 mm x 7,3 mm, ehk seadme ruumala vähenes võrreldes vana versiooniga 28 % ja aku kestab seadmel ligikaudu 36 päeva.

Viited

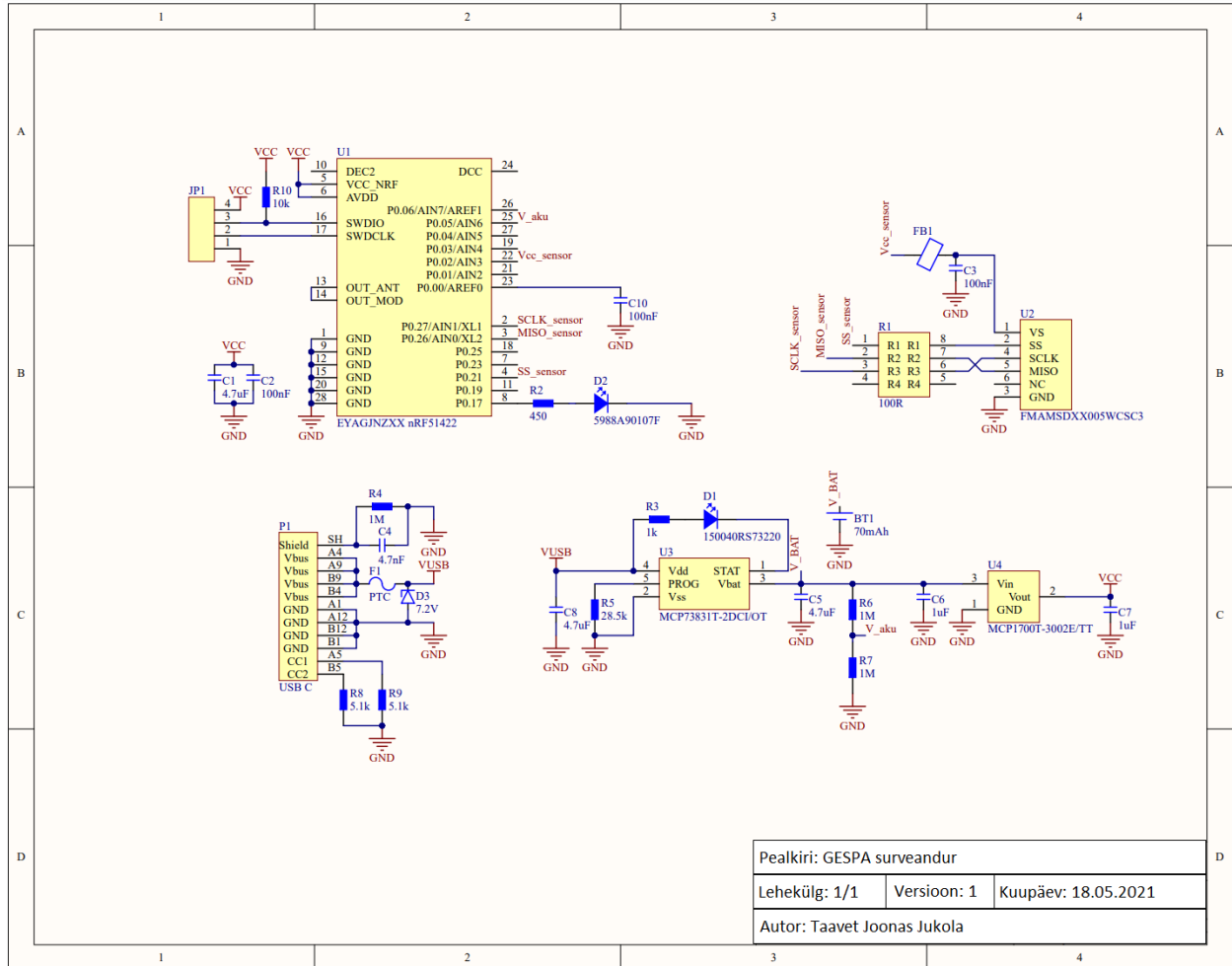
- [1] G. A. Mencia, G. R. White, „Genu Valgum in Children: Diagnostic and Therapeutic Alternatives“, *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **3**, 1995, 275-283.
- [2] Ü. Utsal, K. Viigand, „O- ja X-jalad“, Tartu Ülikooli Kliinikum, 2012. Kasutatud: 19.05.2021, https://www.kliinikum.ee/wp-content/uploads/2019/12/o_ja_x_jalad.pdf
- [3] V. Chandar, „Genu valgum and Genu Varum“, *Wikipedia Commons*, 2018. Kasutatud 19.05.2021, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Genu_valgum_and_Genu_Varum.jpg
- [4] R. Nelson, M. Patel, „Genu Valgum“, *Treasure Island (FL): StatPearls Publishing*, 2020. Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559244/>
- [5] T. Baghdadi, R. Espandar, S. M.-J. Mortazavi, „Angular Deformities of the Lower Limb in Children“, *Asian journal of sports medicine*, 2010. Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3289162/>
- [6] L. Laanesaar, R. Linkberg, M.-L. Luukas, K. Pertel, M. Pielberg, A.-L. Tamm, I. Vaher, E. Nigulas, K. Satsi, A. Vain, „Development of garment with elastic straps and pressure applicator in mechanotherapy to correct children’s genu valgum“, *International Physical Medicine & Rehabilitation Journal*, **3**, 2018, 198-202, DOI: 10.15406/ipmrj.2018.03.00101.
- [7] Raytac Corporation, „MDBT40-ANT & MDBT40-ANT-P Series Approval Sheet“, 2015. Kasutatud 19.05.2021, <https://www.verical.com/datasheet/raytac-corporation-bluetooth-mdbt40-256rv3-6118393.pdf>
- [8] T. Tilk, „BLE jõuanduri mobiili- ja pilveserverirakenduse kirjeldus“, 2019.
- [9] Altium, „Altium Designer“, (i.a). Kasutatud 19.05.2021, <https://www.altium.com/altium-designer/>
- [10] Taiyo Yuden CO, „EYAGJNZXX“, 2019. Kasutatud: 19.05.2021, https://www.yuden.co.jp/jp/product/category/module/cms/wp-content/uploads/2020/01/TY_BLE_EYAGJNZXX_DataReport_V2_0_20190227E.pdf
- [11] Nordic Semiconductor ASA, „nRF51422“, 2014. Kasutatud 19.05.2021, https://www.nordicsemi.com/-/media/DocLib/Other/Product_Spec/nRF51422PSv32.pdf?la=en

- [12] Dialight, „SM LED 0402 package“, (i.a). Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.farnell.com/cad/2817990.pdf>
- [13] Honeywell, „FMA SERIES MicroForce Sensors, Compensated/Amplified“, 2020. Kasutatud: 19.05.2021, <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/siot/en-us/products/sensors/force-sensors/microforce-fma-series/documents/sps-siot-force-fma-series-datasheet-32347833-ciid-181799.pdf>
- [14] J. Metzler, „Clock Termination Techniques and Layout Considerations“, CTS Electronic Components, 2007. Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.ctscorp.com/wp-content/uploads/2015/10/AN1025.pdf>
- [15] J. Colby, C. Marak, „Tips for Enhancing ESD Protection“, Littelfuse, 2009. Kasutatud: 19.05.2021, https://m.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/esd/littelfuse_tips_for_enhancing_esd_protection_application_note.pdf.pdf?fbclid=IwAR1kHBWC9DYZeuwyDNKsFmAKbzZ8N_7jTKDlItj7nfIyVd8G2AinFktc_Cg
- [16] Altium Designer, „How to Use a Ferrite Bead in Your Design to Reduce EMI“, 2017. Kasutatud: 19.05.2021, <https://resources.altium.com/p/how-use-ferrite-bead-your-design-reduce-emi>
- [17] Cellevia Batteries, „CELLEVIA BATTERIES LP401520“, 2016. Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.tme.eu/Document/a8fffa9e632d8bdc1e27457bf7a47048/cel0061.pdf>
- [18] Microchip Technology Incorporated, „MCP73831/2“, 2014. Kasutatud: 19.05.2021, <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/MCHP/MCHPS05673/MCHPS05673-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>
- [19] Würth Elektronik, „150040RS73220“, 2018. Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.farnell.com/cad/2723065.pdf>
- [20] Microchip Technology Incorporated, „MCP1700“, 2013. Kasutatud: 19.05.2021, <http://www.farnell.com/datasheets/1784514.pdf>
- [21] Fluke Corporation, „287/289“, 2007. Kasutatud 19.05.2021, https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/287_289_umeng0200.pdf

- [22] J. Kalde, T. Tilk, „xjalg“, (i.a). Kasutatud:19.05.2021, <https://bitbucket.org/jaanuskalde/xjalg/>
- [23] Hirose Electric Company, „USB Type-C Connector“, 2018. Kasutatud: 19.05.2021, <http://www.farnell.com/datasheets/2691033.pdf>
- [24] USB 3.0 Promoter Group, „Universal Serial Bus Type-C Cable and Connector Specification“, 2019. Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type-C%20Spec%20R2.0%20-%20August%202019.pdf?>
- [25] Bel Fuse Incorporated, „Surface Mount PTC 0ZCM Series“, 2019. Kasutatud: 19.05.2021, <https://belfuse.com/resources/datasheets/circuitprotection/ds-cp-0zcm-series.pdf>
- [26] NXP Semiconductors, „BZX384 series Voltage regulator diodes“, 2016. Kasutatud: 19.05.2021, <http://www.farnell.com/datasheets/2174101.pdf>
- [27] Atmel Corporation, „Atmel AVR1017: XMEGA - USB Hardware Design Recommendations“, 2011. Kasutatud: 19.05.2021, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/doc8388.pdf>
- [28] ARM Incorporated, „µVision® IDE“, (i.a). Kasutatud: 19.05.2021, <https://www2.keil.com/mdk5/uvision/>
- [29] Nordic Semiconductor ASA, „nRF UART 2.0“, 2013. Kasutatud: 19.05.2021, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.nordicsemi.nrfUARTv2&hl=et&gl=US>
- [30] Autodesk Incorporated, „Fusion 360“, (i.a). Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR>
- [31] Prusa Research, „THE ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+ 3D PRINTER“, (i.a). Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-mk3/>
- [31] Bossard, „BN13577“, (i.a). Kasutatud: 19.05.2021, <https://www.tme.eu/Document/131d25a393ace3dbb293190677f152f7/BN13577.pdf>

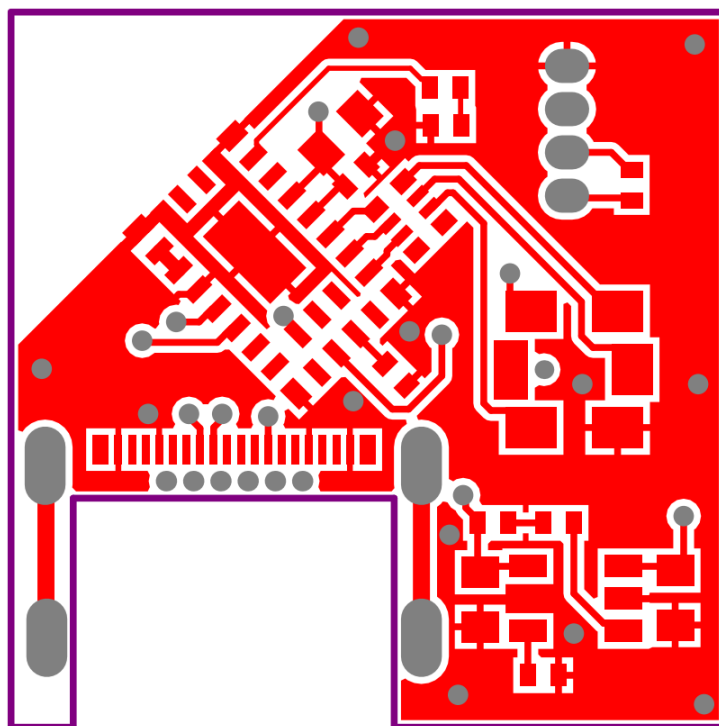
Lisad

Lisa 1 Surveanduri elektriskeem

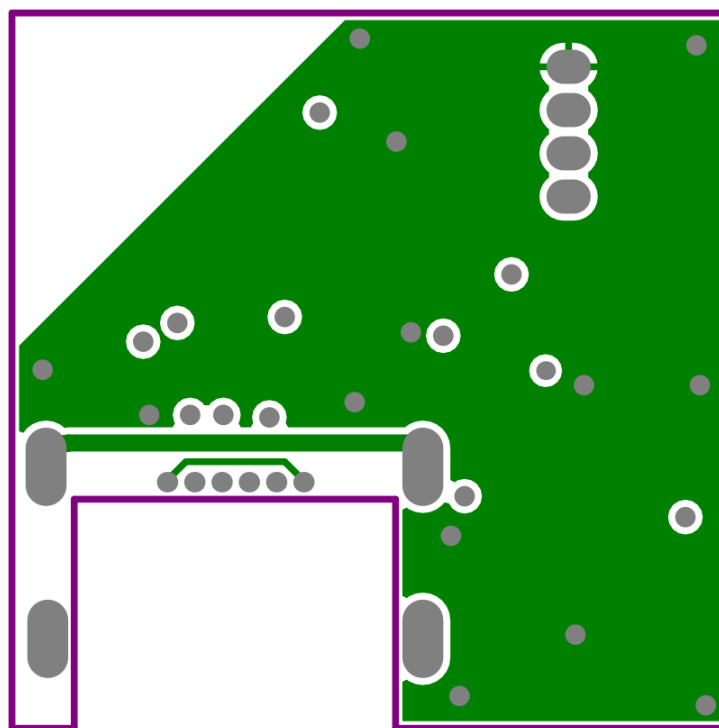


Joonis 9 Surveanduri elektriskeem

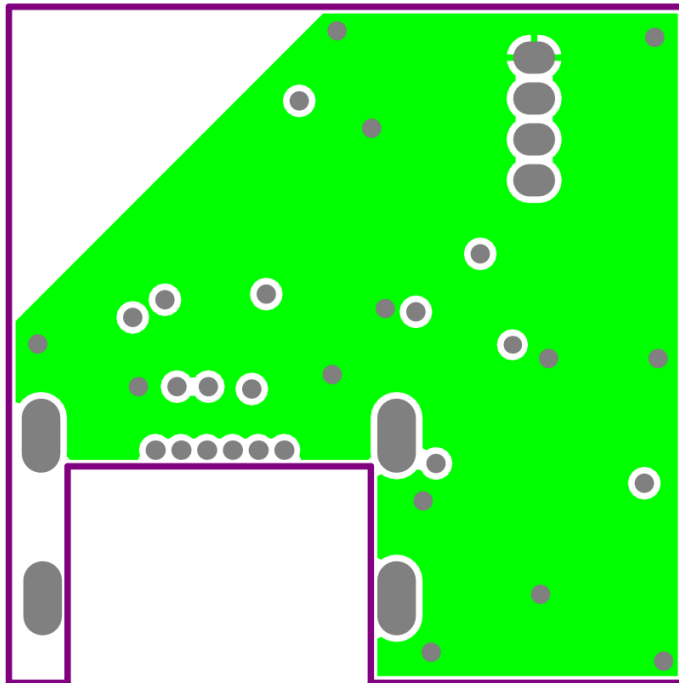
Lisa 2 Trükkplaadi vasekihid



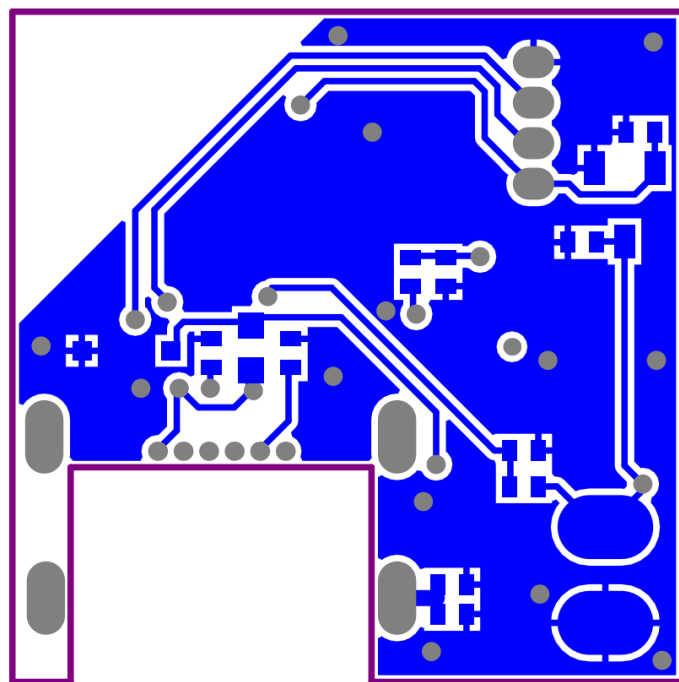
Joonis 10 Trükkplaadi vasekiht #1 (pealmine)



Joonis 11 Trükkplaadi vasekiht #2

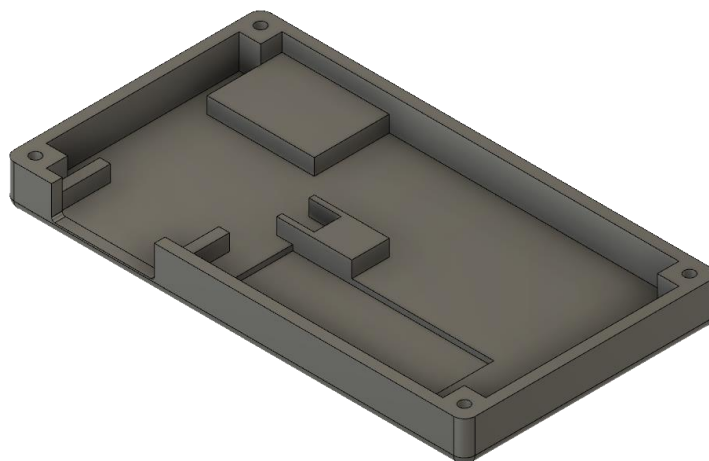


Joonis 12 Trükkplaadi vasekiht #3

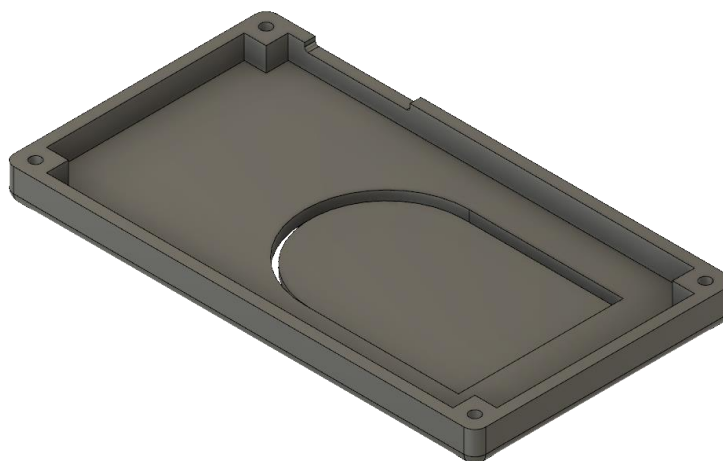


Joonis 13 Trükkplaadi vasekiht #4 (alumine)

Lisa 3 Korpuse mudel



Joonis 14 Korpuse põhja mudel



Joonis 15 Korpuse kaane mudel

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Taavet Joonas Jukola,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „GESPA surveanduri edasi arendamine“, mille juhendajad on Teet Tilk ja Jaanus Kalde, 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 kaudu Creative Commons'i 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.

Taavet Joonas Jukola

19.05.2021