



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

AIRSOFT PÜSSI ELEKTROONIKAOSALE UUE LAHENDUSE PROJEKTEERIMINE

NEW ELECTRONIC ARCHITECTURE DESIGN FOR AIRSOFT REPLICARIFLE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Renat Pissarev

/nimi/

Üliõpilaskood: 193610

Juhendaja: Tanel Jalakas, vanemteadur

/nimi, amet/

Tallinn 2023

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikad ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____ **Renat Pissarev** _____ (autori nimi)

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

_____ **AIRSOFT PÜSSI ELEKTROONIKAOSALE UUE LAHENDUSE
PROJEKTEERIMINE** _____

,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on _____ **Tanel Jalakas** _____,

(juhendaja nimi)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

1. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

2. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (kuupäev)

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Renat Pissarev	<i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö
<i>Töö pealkiri:</i> Airsoft püssi elektroonikaosale uue lahenduse projekteerimine	
<i>Kuupäev:</i> 18.05.2023	56 lk (<i>lõputöö lehekülgede arv koos lisadega</i>)
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool <i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> vanemteadur Tanel Jalakas	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on välja selgitada ning kõrvaldada airsofti relvade elektromehaanilise ja elektroonilise osa puuduseid, arendada aku energiataseme kontrollsüsteemi ning uurida elektriajami rekuperatsiooni võimalust airsofti relvade jaoks, parandamaks nende elektromehaaniliste ajamite dünaamilisi omadusi.</p> <p>Lõpptulemusena tehtud prototüüp sisaldab endas mootori juhtahelat ilma pidurdussüsteemita ja aku laetuse jälgimissüsteemi. Analüüsitud info mootori pidurduse kohta aitas edasi arendada ja projekteerida elektriskeemi H-sildi ja pull-down riiviga, mis võimaldab ümber lülitada pingenihood kiirete siirdeprotsessidega ja peatada mootorit. Pidurduse aeg reguleeritakse mikrokontrolleri abil ja peab olema esialgu katsetatud ja seadistatud.</p>	
<i>Märksõnad:</i> airsoft, mootor, mikrokontroller, juhtahel, aku.	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Renat Pissarev	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> New electronic architecture design for airsoft replica rifle	
<i>Date:</i> 18.05.2023	<i>56 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Senior researcher Tanel Jalakas	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The aim of this bachelor's thesis is to identify and eliminate shortcomings in the electromechanical and electronic parts of airsoft guns, develop a battery energy level control system, and explore the possibility of recuperative drive for airsoft guns to improve their electromechanical drive dynamics.</p> <p>As a result, the prototype created includes a motor control circuit without a braking system and a battery charge monitoring system. The analyzed information about motor braking helped to further develop and design an electrical circuit with an H-bridge and pull-down latch, allowing for switching voltage flows with fast transition processes and stopping the motor. The braking time is adjusted using a microcontroller and needs to be initially tested and configured.</p>	
<i>Keywords:</i> airsoft, motor, microcontroller, driver, battery.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Airsoft püssi elektroonikaosale uue skeemilahenduse projekteerimine**

Lõputöö teema inglise keeles: **New electronic architecture design for airsoft replica rifle**

Üliõpilane: **Renat Pissarev, 193610**

Eriala: **Mehhatroonika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **Tanel Jalakas**

Lõputöö kaasjuhendaja:
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande
kehtivusaeg: **12.01.2023 - 18.05.2023**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2023**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Sportlased ja airsofti mängijad tahavad võistelda kõikides ilmastikutingimustes ning mitte muretseda relva hooldusprobleemide pärast. Enamiku airsoftrelvade põhiprobleemiks on mootori juhtimissüsteemi puudumine, mis suurendab süsteemi reageerimisaega ja põhjustab suurt energiakadu. Lisaks võib juhtuda, et mängu või võistluse ajal saab aku ootamatult tühjaks ja tavaliselt ei ole aega aku kiireks asendamiseks.

2. Töö eesmärk

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on välja selgitada ning kõrvaldada airsofti relvade elektromehaanilise ja elektroonilise osa puuduseid, arendada akuenergiataseme

kontrollsüsteemi ning uurida elektriajami rekuperatsiooni võimalusi airsofti relvade jaoks, parandamaks nende elektromehaaniliste ajamite dünaamilisi omadusi.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Millest koosneb airsofti relv ja millised on tema peamised puudused?
- 2) Kuidas saab optimeerida ajami tööd ja tõsta süsteemi reageerimisvõimet?
- 3) Kuidas üles ehitada aku energiataseme jälgimise süsteemi?
- 4) Kas on võimalik kasutada mootori jääkenergiat aku laadimiseks?

4. Lähteandmed

Aluseks on võetud selles valdkonnas sooritatud arendus- ja uurimistööd (kõige töökindlamad ja lihtsamad seadmed ning skeemilahendused), seotud tööstusharude arengud (alalisvoolumootori juhtimine) ning info akude tühjenemiskarakteristikute kohta.

5. Uurimismeetodid

Turul saadaolevate ajamite analüüs, nende puuduste tuvastamine, leidmaks sobivaimat alalisvoolumootoriga pidurdamise viisi, võrreldes omavahel erinevaid lahendusi. Aku laetuse indikaatori ja väljatöötatud juhtimissüsteemi katseline testimine ning katseandmete põhjal otsustamine, kuidas süsteem saaks kõige efektiivsemalt/ergonoomilisemalt anda seda infot edasi kasutajale.

6. Graafiline osa

Joonis 2.1, joonis 3.1.1, joonis 4.1.9, joonis 4.2.4, joonis 4.2.6, tabel 2, tabel 3, tabel 4

7. Töö struktuur

1. AIRSOFT RELVADE ÜLEVAADE

2. ELEKTRIAJAMIGA AIRSOFT RELVA ÜLESEHITUS

- 2.1 Mehaaniline ülekanne
- 2.2 Hammasrattade versioonid
- 2.3 Etteandemehanism

3. ELEKTRILINE OSA

- 3.1 Mootorite tüübid ja valik
 - 3.1.1 Harjadega mootorid

- 3.1.2 Harjadeta mootor airsoftis
- 3.1.3 Mootori parameetrite arvutamine
- 3.2 Mootori juhtimissüsteem
 - 3.2.1 Dünaamiline pidurdamine
 - 3.2.2 Vastulülituspidurdus
 - 3.2.3 Regeneratiivpidurdus
- 3.3 Akud
 - 3.3.1 Liitiumi baasil tehtud akud
 - 3.3.2 Liitium akude tühjendamise karakteristik

4. PRAKTIINE OSA

- 4.1 Mootori juhtahel esimene versioon
 - 4.1.1 Esimese juhtahela versiooni katsetamine
- 4.2 Mootori juhtahel, teine versioon
 - 4.2.1 Teise juhtahela versiooni katsetamine
- 4.3 Aku laetuse jälgimissüsteemi arendus MAX17263 baasil
- 4.4 Pidurdussüsteemi rakendamine

KOKKUVÕTE

8. Töö etapid ja ajakava

Teoreetilise osa kirjutamine (Veebruar 2023)

juhtahela katseskeemi projekteerimine ja valmistamine (Aprill 2023)

Praktilise osa kirjutamine (Aprill 2022)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
LÜHENDID	10
SISSEJUHATUS	11
1. AIRSOFT RELVADE ÜLEVAADE	13
2. ELEKTRIAJAMIGA AIRSOFT RELVA ÜLESEHITUS	14
2.1 Mehaaniline ülekanne	14
2.2 Hammasrattade versioonid	15
2.3 Etteandemehanism	16
3. ELEKTRILINE OSA	17
3.1 Mootorite tüübid ja valik	19
3.1.1 Harjadega mootorid	19
3.1.2 Harjadeta mootor airsoftis	21
3.1.3 Mootori parameetrite arvutamine	22
3.2 Mootori juhtimissüsteem	24
3.2.1 Dünaamiline pidurdamine	25
3.2.2 Vastulülituspidurdus	26
3.2.3 Regeneratiivpidurdus	26
3.3 Akud	27
3.3.1 Liitiumi baasil tehtud akud	28
3.3.2 Liitium akude tühjendamise karakteristik	30
4. PRAKTILINE OSA	33
4.1 Mootori juhtahel esimene versioon	33
4.1.1 Esimese juhtahela versiooni katsetamine	36
4.2 Mootori juhtahel, teine versioon	38
4.2.1 Teise juhtahela versiooni katsetamine	41
4.3 Aku laetuse jälgimissüsteemi arendus MAX17263 baasil	43
4.4 Pidurdussüsteemi rakendamine	44
KOKKUVÕTE	46
SUMMARY	47
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	49
Lisa 1	54
Lisa 2	55
Lisa 3	56

LÜHENDID

AEG - Automaatiline elektriline relv (eng. *Automatic Electric Gun*)

EMI - elektromagnetiline interferents

PDN - Power Delivery Network

RPM - Revolutions Per Minute

SOA - Safe Operating Area

SOC - System-on-a-Chip

SISSEJUHATUS

Airsoft - see on taktikaline meeskonnamäng, mis muutub üha populaarsemaks kogu maailmas. Mängu jaoks kasutatakse spetsiaalseid relvamudeleid, mida nimetatakse airsofti ajamiteks. Airsofti ajamid on kolme tüüpi: mehaanilised, elektromehaanilised ja gaasiajamid. Selles töös käsitletakse eelkõige just elektromehaanilisi relvasid, kuna nende üheks kõige aktuaalsemaks kasutamiseiga seotud probleemiks on elektroonilise osa probleem.

Kaasaegsetes airsofti elektromehaanilistes relvades on juhtimise eest vastutav elektrooniline osa liiga primitiivne ja koosneb lihtsast aku-nupu-mootori ahelast. Selline jõuosade struktuur ei sobi süsteemi parameetrite alla, kuna keskmine mootori tarbitav võimsus on üle 100W pinge juures 8,5–12,5 volti (sõltuvalt kasutatavast akust). Väga sageli põhjustab see ka kontaktgrupi põlemist, kontakti kadumist ahelas või selle sulamist kuumuse tõttu ning harvadel juhtudel piirnevate elementide sulamist või kogu relva põlemist.

Pärast lasku takistab mootori inertsus selle kohese peatamise, mis halvendab päästiku mehhanismi reageerimiskiirust. Inertsiooni probleem seisneb selles, et pärast kiirete üksikute tulistamiste sarja ei jõua mootor alati õigesse asendisse ja juba enne järgmist lasku tõmbab kolbi natuke tagasi. See viib vedru enneaegse kulumiseni ja takistab kiirete järgnevate laskude sooritamist. Mõistetavalt on oluline, et mootor peatuks kiiresti õiges kohas, nii et selle mootorit tuleb pidurdada. Kõik järelejäänud energia võiks olla hajutatud soojuseks ja kuna praeguses maailmas püütakse teha kõike maksimaalselt energiatõhusaks ja ökoloogiliseks, siis otsustati proovida kirjeldada, kuidas saab airsofti mootorisse lisada regeneratiivse pidurisüsteemi. See lahendus suudab lahendada kohe 2 probleemi: mootori kiire pidurduse tõttu võimalike tulistamiste arvu suurendamise ning järelejäänud energia tagastamise süsteemi tagasi (eriti oluline üksikute laskute tulirežiimide korral).

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on välja selgitada ning kõrvaldada airsofti relvade elektromehaanilise ja elektroonilise osa puuduseid, arendada aku energiataseme kontrollsüsteemi ning uurida elektriajami rekuperatsiooni võimalusi airsofti relvade jaoks, parandamaks nende elektromehaaniliste ajamite dünaamilisi omadusi.

Eesmärgi saavutamiseks on püstitatud järgmised uurimisülesanded:

1. Analüüsida rahvusvahelisi teaduslikke uuringuid airsoft relva ülesehituse kohta.

2. Sünteesida teooriat ning teha järeldusi ja ettepanekuid airsoft õhkrelvade elektroonilise osa muudatuste kohta.

3. Luua süsteemi prototüüp, millest saab tulevikus teha lõpptoode.

Töö raames viiakse läbi teoreetiline uuring, siis tehakse süsteemi kirjeldav plokk skeem ja pärast seda valmistatakse võimalikult odav prototüüp.

Lõputöö koosneb neljast peatükist. Esimeses peatükis antakse teoreetiline ülevaade airsoft relvade olemusest, ajaloolisest taustast. Teises peatükis analüüsitakse relva mehaanilist ülesehitust, et aru saada kuidas relv töötab ja miks seal on üldse elektronika vajalik. Kolmandas peatükis analüüsitakse relva elektrilist osa, mis tavaliselt kasutuses on, millised akud on populaarsed airsoftis ja miks ning kuidas saab projekteerida vajalikku juhtimissüsteemi. Neljandas peatükis on kirjeldatud praktiline osa: mida ja kuidas oli tehtud, mida saab parandada tulevikus ja kuidas teha süsteemi veel paremaks.

1. AIRSOFT RELVADE ÜLEVAADE

Airsoft relv on reaalsete relvade baasil tehtud õhupüss, mis kopeerib täielikult originaal relva välimust. Nende laskekaugus on suurem, tabamus täpsem, kui paintballi relvadel. Põhiliseks erinevuseks on kasutatav laskemoon - airsoft relvad tulistavad 6 mm plastikkuulidega koonu energiaga kuni 1.5 J automaatse relva puhul. Airsoftis on olemas 4 relva liiki.

1. Vedru relv - see relva tüüp on tavaliselt kõige odavam ja lihtsama konstruktsiooniga (välja arvatud, kui see on käsilukk-snaipri relva koopia). Vedru venitamine toimub kasutades mängija lihasjõudu. Reeglite järgi on selle relva tüübi lubatud koonu energia kõige suurem, kuna tavaliselt see on snaipri varustus.

2. Elektriline relv (AEG) - kõige levinum relva tüüp. Sees on reduktor ja elektrimootor, mis võimaldavad teha laske automaatrežiimis üsna suure kiirusega. Puudus on vaid selles, et elektromehaaniline lülitusosa on tavaliselt väga lihtne, mille tõttu on palju probleeme. Ilma mootori draiverita, mis võimaldab mootorit ka pidurdada, ei saa teha täpsed ja ühesugused laskusid, kuna mootor ei peatu samas kohas.

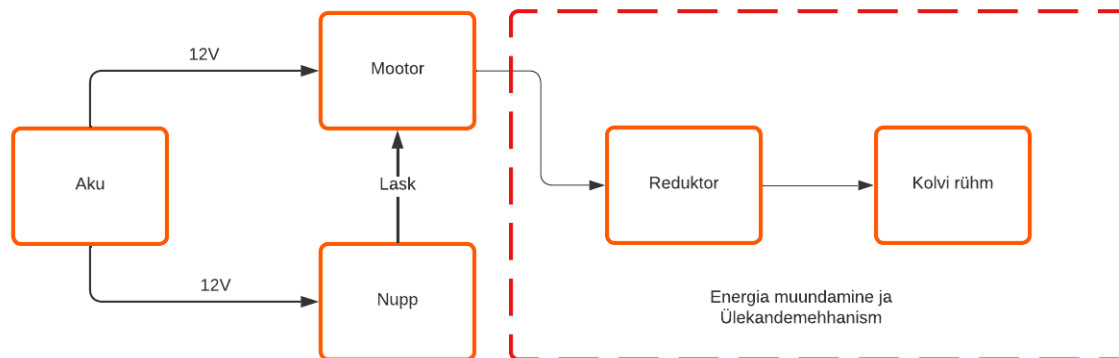
3. Gaasirelv - tavaliselt kasutab kas CO₂ gaasi või mingi gaasi segu propaani alusel. Peamine puudus peale hinna on see, et nendega ei saa talvel hästi mängida, kuna tihendid muutuvad miinustemperatuuri tõttu väiksemaks ja tugevamaks ning gaas hakkab seetõttu lekkima.

4. Suruõhu relv - tööpõhimõte on selline, et on solenoidi klapp ja suruõhu balloon, mille rõhk on 4500 psi või umbes 310 bar. Relva süsteem annab kõige parema lasu tulemuse ja on väga vaikne võrreldes AEG süsteemiga, kuid selle hind algab tavaliselt 1200-st eurost. AEG relvade hinnad algavad 100-st eurost, kuid relvad, millega saab juba mugavalt mängida, maksavad umbes 250-600 eurot.

Vedru relvas ei ole elektroonikat ning töötab mehhanism täna oma lihtsa konstruktsioonile suhteliselt hästi. Samamoodi on suruõhu relvas - elektromagnetiline klapp annab väga hea süsteemi reageerimiskiirust. Sellepärast uurimisobjektina oli võetud just AEG relv, kuna nad on kõige populaarsemad relvatüübid, kuid samal ajal on nendel palju puudusi, mis on vaja parandada.

2. ELEKTRIAJAMIGA AIRSOFT RELVA ÜLESEHITUS

Elektril töötavate airsoft relvade toide tuleb relvade küljes olevatest akudest. Aku paneb pöörlema elektrimootori ja kompressori mehhanism, mis omakorda paneb liikuma plastikkuuli. Lihtsa elektriajamiga airsoft relva süsteemi tööpõhimõte on olemas joonisel 2.1.



Joonis 2.1 Lihtsa AEG süsteemi tööpõhimõte

Reduktor on airsofti relvade elektropneumaatiline mehhanism, mis elektrienergiat mehaaniliseks energiaks muutes tekitab surve, et anda kuulile torus edasi liikumise impulss. Reduktorit ennast võib tehniliselt jagada mitmeks sõlmeks:

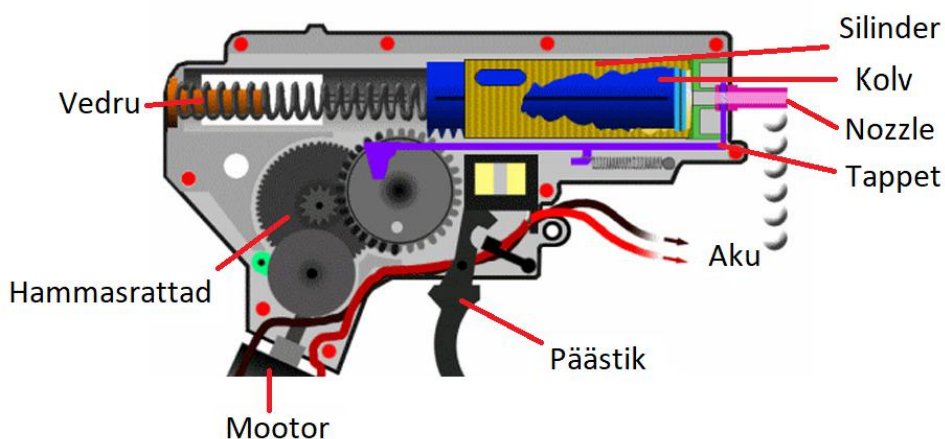
1. Silindri-kolvi rühm vedruga
2. Hammasrattad
3. Etteandemehhanism

Protsesside paremaks mõistmiseks tasub iga sõlme üksikasjalikult uurida, kuna reduktor on üsna keeruline seade, millel on montaaži käigus palju pisidetaile ja peensusi.

2.1 Mehaaniline ülekanne

Vedru, kolb, kolvipea, silinder, silindripea, nozzle ja tappet on silindri-kolvi koostises peamised elemendid. Seda koostist on vaja kuulile surve avaldamiseks, kus hammasrattad tõmbavad kolvi tagasi, keerates vedru üles ja tekitades sellega vedrule pinget. Teatud hetkel vabastab mehhanism vedru ja kolb läheb suurel kiirusel läbi

silindri, tekitades töökambris rõhu, misjärel kogu õhk väljub läbi otsiku, kandes energia kuulile.



Joonis 2.1.1. Teise versiooni reduktor [33]

Mootor pöörab hammasrattaid, millest viimane nendest on tehtud sektorina (Joonise 2.1.1 peal kolmas hammasratas. Päriselt neid musti hambaid reduktoris ei ole). Kui kolb jõuab hammasteta sektorini, tekib lask.

Kuna Eestis ja paljudes maailma riikides ei peeta airsofti relvaks ega isegi pneumaatikaks, kasutatakse enamikus relvades vedrusid, mis täielikult ohutusnõudeid järgides ei suuda airsofti üritusel osalevatele inimestele tõsist tervisekahjustust tekitada. Enamike automaatsete vintpüsside puhul piirab airsoft energia väljundvõimsust kuni 1,5 džauli, mis on ligikaudu võrdne 120–130 njuutoni vedruga ja hea kokkusurumisega ilma õhuleketeta erinevate osade ristmikel.

Enamik kaasaegseid relvasid, isegi kallimas segmendis, on varustatud lihtsa messingsilindriga ning kolb ja silindripea on valmistatud peamiselt plastikust, mis muudab suruõhu rõhu näidu ebastabiilseks ja väljundenergia näitajad võivad varieeruda kiirusest kuni 5 meetrit sekundis. Hetkel on disaini täiustamiseks järelturu lahendused, kus osad on töödeldud alumiiniumist, mis teoreetiliselt peaks andma positiivse tõusu väljundenergias ja mürsu lennu stabiilsuses.

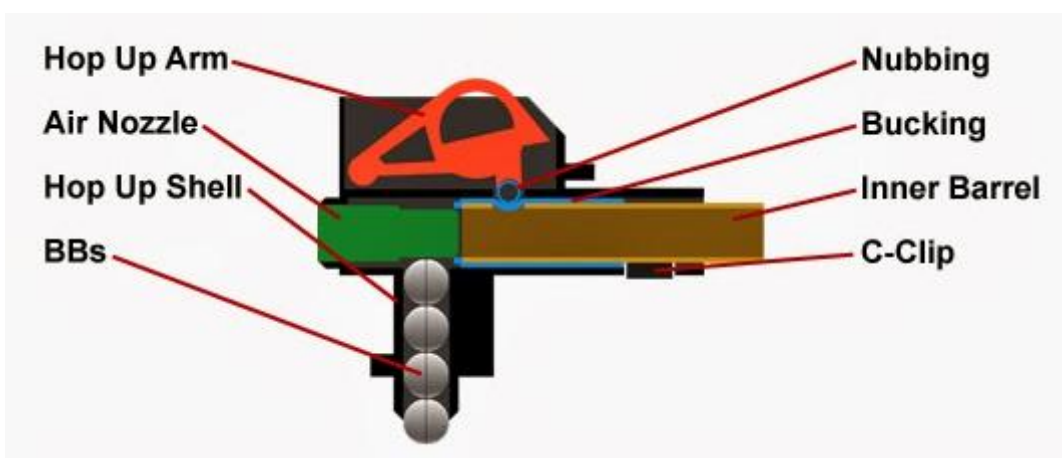
2.2 Hammasrattade versioonid

Kaasaegsetes relvade koopiates kasutatakse reduktor, mis koosneb kolmest hammasrattast ja ühesuunalist liikumist tagavast seadmest. Sageli on nende

ülekanadesuhe 18:1, hammasratastel sirged hambad ja need on valmistatud silumiinist. Turul on ka järelturu reduktorid, mille ülekandearvud on 100:200, 100:300, 1:32, 1:16 jne. Huvipakkuv on spiraal- ja kalasabahammasrataste kasutamine, nende eelis tavaliste ees, aga ka käigukasti optimaalne ülekandearv.

2.3 Etteandemehanism

Reduktorist väljaspool on relva ainult välimine kest, aku ja *hop-up* sõlm. Hop-up on palli pöördliikumise andmise süsteem, mis võimaldab pallil kaugemale lennata. Kambriil on täiustatud reguleerimissüsteem, mis võimaldab täpsemat kontrolli kuuli trajektoori üle ja seega selle stabiilsemat lendu ning suuremat tõhusust. Niipea, kui pall torust välja lendab, hakkab gravitatsioon sellele mõjuma ja peagi hakkab kuul, kaarega liikuma, langedes teatava vahemaa järel maapinnale. Kui tulirelva analoogide puhul pole see probleem nii kriitiline ja lahendatakse suures osas suurema laengu ja raulõike keermega, siis airsoftis toob väljundenergia suurenemine kaasa mängijate füüsilised vigastused.



Joonis 2.1.2. M4 airsoft versiooni kuuli etteandemehanism [34]

Kuul, läbides raua, puudutab raua sees olevat silikoon kummiga ja keerdub palli maapinnast vastassuunas. Seega tekib selle alla kõrgendatud õhurõhu ala ja selle kohale haruldane ala. See aitab pallil lennata piisavalt kaugele mehhanismi enda madala väljundenergia, suurendades seeläbi kuuli ulatust poolteist või isegi kaks korda.

3. ELEKTRILINE OSA

Elektrilised airsoft relvad on kõige levinumad ja realistlikumad tulirelvade koopiad ning tänu elektrimootorile on neil automaatse tulistamise funktsioon. Siiaamaani, aastani 2023, kasutatakse paljudes relvades lihtsat juhtahelat aku-lüliti-mootorit. Arvestades sellega, et mootori voolutarve on 6-12 A (sõltub vedrust ja aku pingest) ning käivitusvoolud alalisvoolumootoritel on kuni 5 korda suuremad nimivoolust, toimub lülituse hetkel suur vooluimpulss. Peale selle toimub igal väljalülitamisel mootori induktiivsusest põhjustatuna elektrikaar, mis vähendab kontaktide eluiga.

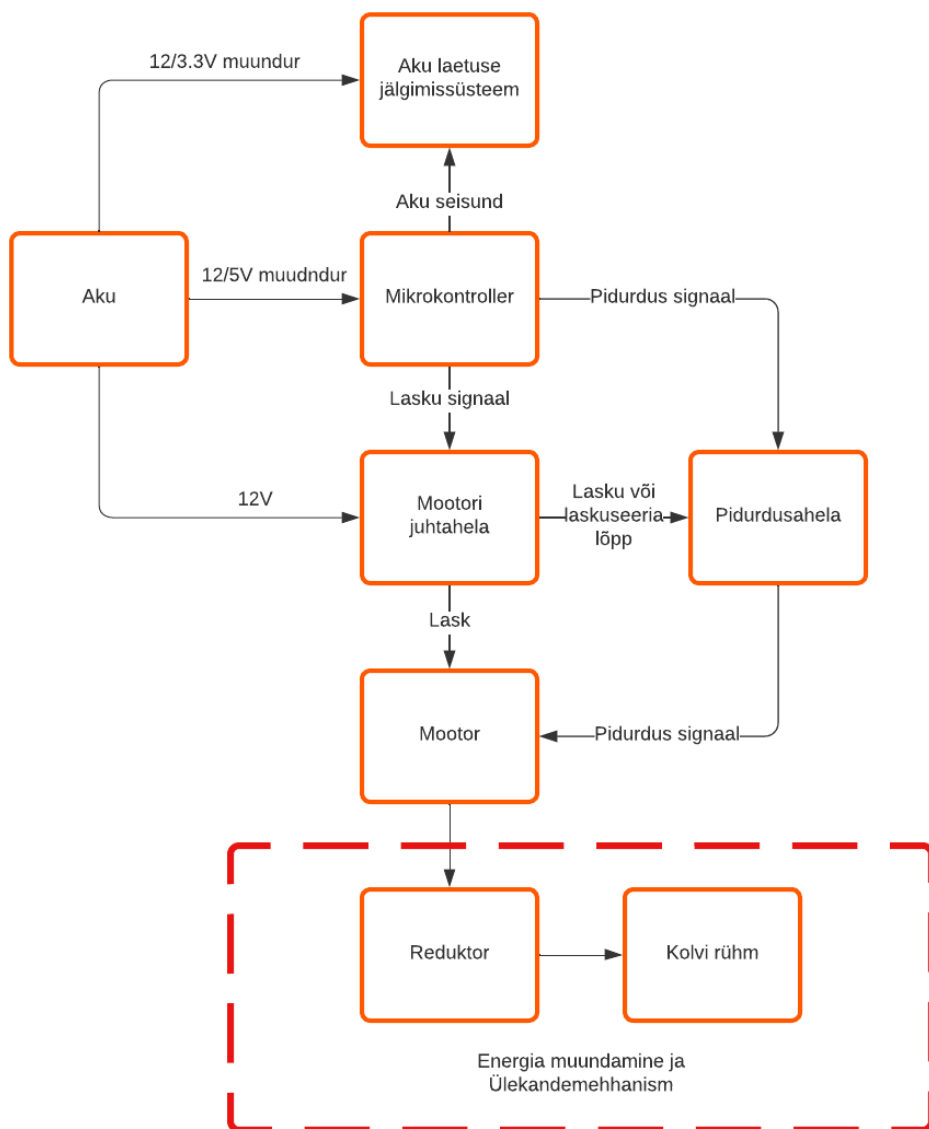
Tavaliselt odavamates airsoft relvades hakkab kontaktrühma ümbritsev plastmass elektrikaare tõttu sulama ja umbes aasta pärast on vaja reduktor lahti võtta ja asendada vana kontaktrühm uuega.

Kuna ülekoormuse protsessis eraldub ka palju soojust, siis suureneb ka tulekahju oht. Arvestades sellega, et tavaliselt mängud toimuvad kevadel ja suvel kuivas metsas, siis selline olukord võib tuua kaasa fataalsed probleemid.

Sellisel nõrgal elektroonikasüsteemi konstruktsioonil on ka selline puudus, et ta vajab sagedast kontrolli, remonti ja hooldust. See kõik võtab palju aega, kuna lüliti konstruktsioon imiteerib päästikut ning seal on palju vedrusid ja mehaanilisi detaile, mis muudavad remondi keerukaks. Tavaliselt seetõttu ei riski inimesed ise midagi remontida ja hooldustööd annavad teha oma relva hooldusfirmale, mis teeb sellist tööd suure tasu eest. Sellepärast on vaja üle vaadata airsoft ajamite elektriline osa ja otsustada, mida saab parandada väikeste kuludega.

Selle probleemi võib lahendada lihtsa mootori juhtahela lisamisega, mis on tehtud pooljuhtide baasil. See võimaldab kommuteerida suurt vooluhulka ilma elektrikaare tekkimiseta. Kuna airsoft mootori võimsus on umbes 100-130W, tarbib ta palju voolu ning omab ka suhteliselt suurt inertsi. Inertsitõttu ei saa mootorit vajalikus kohas peatada ja sellepärast väheneb ka mehaanilise osa eluiga, lisaks halvendab see mootori ja kogu süsteemi dünaamikat, kuna mootor peatub alati erinevates kohtades ning ei saa kiiresti uut lasku teha.

Seoses sellega sai välja pakutud uus elektriskeemi lahendus, mis peaks kõrvaldama mootoriga seotud puudusi. Et anda airsoft valdkonnale edasisamm, on ka integreeritud aku laetuse jälgimissüsteem.



Joonis 3.1.1 Pakutud süsteemi tööpõhimõte.

Võrreldes joonisega 2.1 käib juhtimine läbi mikrokontrolleri, mis koos mootori kontrolleriga võimaldab mootorit täpsemini juhtida ja parandada kogu süsteemi dünaamikat ja efektiivsust.

Süsteemi projekteerimise ajal tuleb arvestada ka sellega, et airsoftil on kasutuses 2 mootori tüüpi. See info on väga oluline, kuna nende mootoride tööpõhimõte on täiesti erinev.

3.1 Mootorite tüübid ja valik

Airsoft relva koopiates on võetud kasutusele 2 mootori tüüpi: harjadega alalisvoolumootor ja harjadeta alalisvoolumootor. Harjadega mootor on väga lihtne oma konstruktsiooni poolest ja sellepärast on see ka palju odavam võrreldes teise mootoriga.

Tema juhtimiseks ei ole vaja spetsiaalset juht-elektronikat, kuid tal on üks suur miinus seotud kadudega kommutaatoril. Harjadeta alalisvoolumootoris omakorda ei ole neid probleeme ning seetõttu on nad palju energiasäästlikumad, aga nende sees on kolmefaasiline inverter, mis muundab alalisvoolu kolmefaasiliseks vooluks. Kolmefaasiline inverter teeb mootori ülesehituse keerulisemaks ja ei anna võimalust juhtida mootorit sama juhtahelaga. Lisaks sellele toodab alalisvoolu harjadeta mootoreid hetkel ainult üks airsoft relvade firma. Sellepärast maksavad nad ka umbes 8-10 korda rohkem, kui tavaline, harjadega, mootor.

3.1.1 Harjadega mootorid

High-speed ja *High-torque* mootorid on ühe ja sama mootori erinevad variatsioonid. Vaikimisi on relvaga kaasas harjadega alalisvoolumootor. Tavaliselt airsoft mootorites kasutatakse 3 poolust ja mootor koosneb kahest osast: staatorist ja rootorist.

Staator on mootori fikseeritud osa, mis omakorda sisaldab konstantse magnetvälja allikat - püsिमagnetit või ergutusmähist, harju ja korpust.

Rootor on mootori pöörlev osa, milles on mootori mähis ja kollektor. Mähis koosneb mitmest segmendist. Segmentide elektriväljundid on ühendatud kollektori plaatidega.

Kollektor omakorda on metallplaatide komplekt, mis on asendatud silindrilisele pinnale üksteisega paralleelselt, kuid plaatide paarid ei puuduta üksteist. Iga plaat on ühendatud rootori mähise väljundiga. Mootori pöörlemisel sellised metallplaadid kommuteerivad uued mähisesektsioonid ning selle tõttu pöörleb mootor edasi ilma peatuseta.

Harjad vahetavad mootori pöörlemisel mähiste sektsioone ja võimaldavad ühendada rootori mootorimähise mootori korpuse klemmidega [10]. Harjad võivad olla erinevat tüüpi:

- **Süsinikgrafiitharjad** on valmistatud ülitugevast materjalist, ja vanasti kasutati aeglasematel masinatel, kuna nende harjade voolutihedus oli väike. Süsinikgrafiidist harjade hõõrdetegur on üsna suur ning see muudab tänapäevasel suure kiirusega masinatel selle kasutamise kommutaatoritel sobimatuks.
- **Elektrograafiliste süsinikuharjade** tugevus ja tihedus on nende harjade peamiseks eeliseks. Tulemuseks on suurepärase kommuteerimisvõime kõrgel temperatuuril ja madala õhuniiskuse korral ning selle tulemusena on eluiga pikem.
- **Grafiit süsinikuharjasid** iseloomustavad suurepärase libisemisomadused kommutaatoritel. Grafiitharjade kiire kiletamise omadus kaitseb kommutaatorit töötamisel saastunud keskkonnas.
- **Metallgrafiidist söeharjad** sobivad ideaalselt paljudeks rakendusteks tänu madalale takistusele. Metallgrafiitharju kasutatakse madala pinge ja suure harja voolutihedusega generaatorite kommutaatoritel [11].

Airsoftis nii suure pöörlemiskiirusega kui ka suure pöördemomendi mootorid on tehtud püsिमagnetitega. See lihtsustab konstruktsiooni ja teeb ka mootori odavamaks. Püsिमagnetid võivad olla tehtud ferriidist ja neodüümist. Ferriitmagneteid kasutatakse odavamates lahenduses ja kuna nendel on nõrgemad omadused võrreldes neodüüm-magnetitega, on nende väljundvõimsus palju väiksem.



Joonis 3.1.2 Airsofti mootori rootor [35]

Mootori valmistamise ajal jälgitakse lihtsat reeglit: mida rohkem traadi keermeid rootoril, seda suurem on mootori pöördemoment ja väiksem maksimaalne pöörlemiskiirus. Antud seos on kirjeldatud selles valemis:

$$\tau = 2 \cdot B \cdot l \cdot r \cdot I \quad (1)$$

kus τ on pöördemoment, B on magnetinduktsioon, l on keerde arv, r on rootori raadius, I on elektrivoolu tugevus.

Sama valem võib väljendada pöörlemiskiiruse jaoks:

$$P = \tau \cdot \omega, \Rightarrow \omega = \frac{P}{\tau} = \frac{UI}{2BNlrI} = \frac{U}{2BNlr} \quad (2)$$

Kuna korpus kõikidel mootoritel on üks ja sama, siis on olemas ka mehaanilised piirangud mootori valmistamiseks. Ei saa kasutada liiga palju keerde või sama keerdude arvu jämedama juhtmega, et saada maksimaalset pöördemomenti. Samas ei tohiks keerdude arv olla liiga väike, sest siis vool suureneb ja on vaja jämedamat juhett, mis ei mahu jällegi korpuse sisse.

3.1.2 Harjadeta mootor airsoftis

Harjadeta mootori ülesehitus on natuke teine, mis on harjadega mootoril. Ankrus on püsimagnet, milles on kas üks või rohkem pooluspaari. Staatoril on kolmefaasiline mähis ning temale rakendatakse kolmefaasiline pingeline, tekib pöörlev magnetväli, mis mõjutab rootorite püsimagneteid ja paneb need liikuma. Rootori pöörlemisel pöörleb selle magnetvälja vektor staatori magnetvälja suunas.

Harjadeta mootori juhtimiseks kasutatakse elektroonikat. Selline kontrolleri asendab vanasti kasutatud harjadega mootorites harja-kollektorit. Nende mootorite eelis on ka selles, et saab kasutada nii puhta sinusoidi kujuga pingeline-, kui ka teiste kujuga signaale. Tööpõhimõte on selline, et toide antakse läbi kolmefaasilise inverteri, mida juhib kontrolleri tagasisidega. Kontrolleri piirab voolu ja pinget selle väärtuseni, mis on vaja antud pöördemomendi rakendamiseks. Selleks, et õigeks ajaks mähiseid vahetada, kasutatakse spetsiaalseid asendiandureid (näiteks Halli andur).

Airsoftis hakati kasutama harjadeta mootorid alates aastast 2020. Nad sisenesid airsoft turule absoluutse tipptasemega kõiges: nendel on väiksem energiakulu, mis on keskmiselt 0.2 mAh ühe lasu kohta (tavalistel harjadega mootoritel see on umbes

0.9-1.2 mAh ühe lasu kohta), suurem maksimaalne pöörlemiskiirus (52 000 rpm vs 40 000 rpm) [9].

Nende pluss on ka selles, et nad tekitavad vähem elektrilist müra, kuna puudub säde, mis tekib harjade ja kollektori kontaktide vahel. Harjadeta mootori kiiruse-momendi karakteristik on tasane, sest ei toimu mehaanilist kadu kollektoril ja suurem reageerimiskiirus, mis airsoftil annab suured taktilised eelised. Tavakasutaja jaoks suur boonus on ka see, et neid ei ole vaja hooldada ja harjasid vahetada. Väga tihti inimesed, kes ei tea, kuidas mootorit hooldada ja ei tea, kus võivad probleemid olla, ostavad uued mootorid, selleasemel, et remontida.

Kokkuvõttes saab öelda, et ikka harjadeta mootor on palju efektiivsem, kui tavaline mootor. Aga siin tuleb täheldada, et tema hind on ka mitu korda suurem. See on peamine põhjus, miks siiaaani kasutatakse peaaegu ainult harjadega mootorid. Seega sellisel tööol oli otsustatud teha juhtahelat just harjadega mootori jaoks.

3.1.3 Mootori parameetrite arvutamine

Tavaliselt airsoft mängudes on ette määratud piirangud. Automaatrelva kohta on tavaliselt maksimaalne kuuli energia 1.5 J ja maksimaalne laskekiirus 16 lasku sekundis või 960 lasku minutis. See arv on analoogiline reaalsete relvade laskekiirusega. Kui võtta tavaline hammasrattade suhe 18:1, siis mootori pöörlemiskiirus koormusega peab olema 17 280 pöörlemist minutis.

Kuuli energia mõõdetakse kronograafi kaudu. Tavaliselt on kuuli kiirus 105-110 m/s kuuli massiga 0.25g. On olemas ka teised kuulid teise massiga, üks näide on näha joonisel 3.1.3. Joonisel oli testitud AEG relv plastkuuliga, mille mass on 0.3g.



Joonis 3.1.3 Kronograaf. Pildi tegi autor

Kuuli energia arvutamiseks kasutab kronograaf valemit 3. Sama valemiga võime ise arvutada kuuli energia erinevate kuuli masside ja kiiruse jaoks.

$$E_{kuul} = mv^2/2 = (0.25g \cdot (110m/s)^2)/2 = 1.51 J \quad (3)$$

Kuuli energia tavaliselt sõltub kompressioonist ja vedru tugevusest. Kahjuks, tootjad ei kirjuta vedru tugevust, kuid aga on olemas vedrukonstant 1.2N/mm. Sellega saame ise arvutada Hooke'i seaduse järgi, kui palju jõudu on vaja, et vedru kokku pressida. Silindri käik on tavaliselt umbes 70 mm, ehk saame:

$$F = k\Delta l, \text{ kus } k \text{ on vedrukonstant ja } \Delta l \text{ on nihkekaugus} \quad (4)$$
$$F = 1.2 N/mm \cdot 70mm = 84 N$$

Arvutame mootori poolt tehtud tööd ja rakendav võimsust:

$$A = F \cdot s = 84 N \cdot 0.07m = 5.88 J \quad (5)$$

$$P = A/t = 5.88 J / \frac{1}{15}s = 88.2W \quad (6)$$

Analüüsid mootorite andmelehte saab jõuda järelduseni, et airsofti mootorite kasutegur on tavaliselt umbes 70%. Sellepärast mootori poolt rakendatud võimsus peab olema $88.2W/0,7 = 126 W$. Et seda saavutada on parem võtta 12V aku, mitte 9V.

$$P = U \cdot I, \Rightarrow I = P/U \quad (7)$$

$$I_{12.5V}/I_{8.5V} = 10A/14A = 0.71 \quad (8)$$

Niimoodi saime, et tõstes aku pinget 12.5V-ks, saame suurema mootori pöörlemiskiiruse (järeldus on tehtud valemi 2 järgi) ja samamoodi võime vähendada voolu tarbimist 29% võrra.

Tabel 1. Mootori parameetrid

Aku pinge, V	Vool, A	Pöördemoment, Nm	Pöörlemiskiirus koormusega, p/min
12,5	10	0,07	17 300
9	14	0,07	17 300

3.2 Mootori juhtimissüsteem

Redukti systeemil on tanu kaignustile vaga suur inerts, mis ei lase mootoril koheselt seiskuda. Lisaks sellele, kuna mootoril on suur induktiivsus ja kaignitamise ajal tarbib ta usna palju voolu, tekivad kontaktgrupil ja mootori harjadel alati sademed, mis pohjustavad energiakadusid. Sademe olemasolu pohjustab ka seda, et kontaktgrupp poleb umbes peale 50 000 laskmist ara (see on umbes uks aasta aktiivset mangu). Kui see tekib trenni ajal, siis ei ole see suur probleem. Kui aga selline olukord tekib suurel mangul, kus osalevad kuni paar tuhat inimest, siis selline olukord voib loogi alla jatta terve meeskonda. 21. sajandil ei maksa pooljuht komponendid eriti palju, selleparast on hea motte integreerida neid sinna, kus nad on eriti vajalikud.

Pooljuhtseadme abil saab kontaktgrupist ara votta kogu koormuse, suunata selle labi transistori ning jatta nupp ainult systeemi kaignitamiseks. Sellisel juhul on pingelang nupu peal vaike ja seal ei eraldu peaaegu uldse soojust ja voolutarbimine on ka minimaalne.

Airsoft mootorid on usna voimsad ning nende induktiivsus ja kaignitusvoolud on ka paris suured (kuni 5 korda suurem nimivoolust). Mootori kommuteerimivoime parandamiseks ja induktiivsuse vahendamiseks on voimalik lisada kondensaator. Siluv kondensaator saab vahendada mootori poolt tekkivat mura ja vahendada sademe tekkimise toenosust.

Et parandada systeemi koguefektiivsust, on vaja midagi teha mootori inertsiga. Parast lasku takistab mootori inertsus selle kohese peatamise, mis halvendab pasttiku mehhanismi reageerimiskiirust. Inertsi probleem seisneb selles, et parast kiirete uksikute tulistamiste jada ei joua mootor alati oigesse asendisse ja juba enne jargmist lasku tombab kolbi natuke tagasi. See viib vedru enneaegse kulumiseni. Lisaks sellele on systeem ebastabiilne, kuna uks lask on siis kiirem, aga teine votab rohkem aega. See voib pohjustada probleeme, kuna siis mangija ei tunne oma relva ja ei saa ennustada selle kaitumist. On voimalik ka, et parast lasku tombab mootor oma inertsusega kuuli saatja mehhanismi tagasi ja raua sisse lahevad mitu kuuli. See voib tuua kahju rauale. Paremal juhul need kuulid ei lenda nii kaugele, nagu nad oleksid pidanud (umbes 7-8 meetrit 40 meetri asemel).

Pakutud süsteemi plokk skeem ja tööpõhimõtte on toodud lisas 1 ja 3. Juhtimine käib läbi mikrokontrolleri mooduli, mis annavad signaali juhtahelasse, kui on vaja lask teha ning pärast lasku või laskude seeriat lülitab sisse pidurdusahela, mis peatab mootori ning kõik ülejäänud energia suunab tagasi akusse.

Mikrokontrolleri abil saab tõsta kogu süsteemi turvalisust. Plokk skeemil on näidatud, et mikrokontroller skanneerib ka kaitseriivi asendit ja kui ta on sees, siis ta blokeerib kõik väljundid ja teeb kõik, mis on võimalik, et ei juhtuks juhuslikku lasku.

Et vältida probleeme mootoriga on vaja teda pidurdada. Sel juhul ta peatub just selles kohas, kus on vaja. Mootori pidurdamise meetodeid on palju, aga nad baseeruvad energia jäävuse seadusel ning sellepärast on nendel sarnane põhimõtte - on vaja kasutada mootori jääkenergiat ja see kuhugi suunata või kuidagi muundada.

3.2.1 Dünaamiline pidurdamine

Dünaamiline pidurdus on meetod mootori kiireks peatamiseks pöörates voolu suunda mootori mähistes. See paneb mootori töötama generaatorina, muundades selle kineetilise energia elektrienergiaks, mis hajutatakse pidurdustakistusena soojusena. Dünaamiline pidurdus võimaldab mootorit peatada kiiremini ja täpsemalt, kui mehaanilise piduriga ning seda kasutatakse sageli rakendustes, kus täpne peatamine on oluline.

Harjadega alalisvoolu mootoris on mitmeid meetodeid dünaamilise pidurduse rakendamiseks. Üks levinumaid meetodeid on kasutada ahelat, mis lülitab mootori mähised pidurdustakistusele, kui mootor on välja lülitatud. Teine meetod on kasutada ahelat, mis võimaldab mootoril pärast väljalülitamist lühikest aega edasi pöörelda kasutades mootori pidurdamiseks tagasiefekti tekitatud elektromotoorjõudu.

Dünaamiline pidurdus võib olla efektiivne viis harjastega alalisvoolu mootori peatamiseks, kuid sellel on mõningaid piiranguid. Üks piirang on see, et see võib tekitada suure hulga soojust, mis võib olla probleem kõrge võimsusega rakendustes. Lisaks võib dünaamiline pidurdus põhjustada mehaanilist kulumist mootorile, eriti rakendustes, kus mootorit sageli peatatakse ja käivitatakse [25, 26, 27].

3.2.2 Vastulülituspidurdus

Vastulülituspidurdus on meetod alalisvoolu mootori pidurdamiseks, kui mootor pöörleb endiselt, pöörates mootori polaarsust vastupidiseks. See põhjustab mootori kiire peatamise, kusjuures pidurdusjõud on võrdne mootori täiskoormuse jõumomendiga. Meetodit nimetatakse vastulülituspidurduseks, kuna see hõlmab mootori voolusuuna pööramist, mida võib võrrelda mootori pistikupessa valesti ühendamisega.

Kuigi vastulülituspidurdus võib olla tõhus viis alalisvoolu mootori kiireks peatamiseks, võib see olla ka mootorile väga kahjulik, kui seda õigesti ei tehta. See on seetõttu, et kui vool pööratakse ümber, voolab mootori mähiste kaudu suur vooluhulk, mis võib neid üle kuumendada ja isegi läbi põletada. Lisaks ülekuumenemise riskile võib selle tüübi pidurdus ka tekitada kõrgeid elektromagnetilisi häireid ja põhjustada mehaanilist stressi mootori võllile ja laagritele.

Vastulülituspidurduse ohutuks kasutamiseks on oluline tagada, et mootor oleks pidurduseks märgistatud ja tuleks piirata pidurdusaja kestust, et vältida ülekuumenemist. Lisaks soovitatakse kasutada pidurdustakistit, et neelata pidurduse käigus tekkinud liigenergiat. [22, 28]

3.2.3 Regeneratiivpidurdus

Alalisvoolumootori regeneratiiv pidurdus on pidurdusmeetod, mida kasutatakse DC-mootorites, et taastada mootori kineetiline energia pidurduse ajal ja kasutada seda aku laadimiseks või soojuse hajutamiseks pidurdustakisti kaudu. See pidurdusmeetod on tõhusam, kui traditsioonilised mehaanilised pidurid, kuna see vähendab energiakadu ja võib suurendada mootori eluiga.

Regeneratiiv pidurduse korral on mootor ühendatud DC toiteallikaga ja töötab generaatorina, et muundada mootori kineetiline energia elektrienergiaks. See elektriline energia tagastatakse seejärel toiteallikasse, kus seda saab salvestada või hajutada.

DC mootori regeneratiiv pidurdust saab rakendada erinevate tehnikatega, nagu vastulülituspidurdus, dünaamiline pidurdus ja impulsside laiuse modulatsioon (PWM). Iga tehnikal on omad eelised ja puudused, mis saab näha tabelis 2. [28, 29, 30]

Tabel 2. Pidurdusmeetodite võrdlemine regeneratiiv pidurduse jaoks

Pidurdusmeetod	Eelised	Puudused
Vastulülituspidurdus	Lihtne ja kerge rakendada. Võib rakendada suurt pidurdusmomenti.	Suur vooluhulk võib põhjustada mootori ülekuumenemist ja kahjustusi. Samaks võib põhjustada mehaanilist stressi ja kulumist mootorile. Pole sobilik kõrge kiirusega mootoritele.
Dünaamiline pidurdus	Tagab täpse ja kontrollitud pidurduse. Sobib kõrge kiirusega mootoritele.	Võib tekitada olulise koguse soojust, mis võib mootorit kahjustada või nõuda täiendavat jahutussüsteemi. Vajalikud on täiendavad komponendid, näiteks pidurdustakisti.
PWM	Tagab sujuva ja kontrollitud pidurduse. Saab reguleerida, et teha erinevaid pidurdusmomente. Võib taastada suure hulga energiat.	Vajalikud on täiendavad ahelad, nagu H-sild või tšopperahel. Võib vajada mikrokontrollerit või muud edasijõudnud juhtimissüsteemi.

Rohelise tendentsi jätkamiseks oli valitud regeneratiivne PWN pidurdusmeetod H-sildi topoloogia baasil. See meetod võimaldab täpset peatumist ja on võimalik kontrollida pidurduse signaali kestvust.

Kolmas suur moodul, mis peab tegema AEG relva veelgi kasutajasõbralikumaks, on aku laetuse jälgimissüsteem, aga enne seda on vaja aru saada, mis akud on kasutusel, sest erinevatel akudel on erinevad tühjenemise karakteristikud.

3.3 Akud

Et projekteerida süsteemi, millega saab jälgida aku laetuse taset, on vaja esialgu aru saada, mis akud on kasutusel airsoftis ja kuidas nendel muutub pinge tühjendamise ajal. Samuti on ka vaja teada, kuidas muutuvad akude parameetrid ajaga (nt NiMH akudel on üsna suur isetühjenemise näitaja ja kui relv selle akuga seisab näiteks nädal aega, siis pole mõtet metsa minna, kuna suure tõenäosusega ei saa teha mitte ühtegi lasku), et süsteem saaks iseendast kalibreerida ja anda märku relva kasutajale, kui midagi on valesti.

Seisuga 2023 aastal kasutatakse airsoftis 3 tüüpi akusid: NiMH, Li-Ion ja LiPo. Varem oli kasutuses ka NiCd akud, aga NiMH asendasid need täielikult. NiMH sama gabariididega võivad anda 2-3 korda suurema mahtuvuse tänu sellele, et nende anood on tehtud erinevatest metalli sulamitest, mitte puhtast kaadmiumist, kuid see mahtuvus ei ole suur võrreldes teiste akudega [14]. Sellele lisandub veel kiire isetühjenemise protsess ja nad kannatavad tavaliselt umbes 500 laadimise tsükli. Lõikepinge on tavaliselt umbes 1,2V.

Airsoftis on see tsükli arv veel väiksem, sest tühjendamise voolud on tavaliselt 2-20C (sõltub sellest, kas mootor töötab püsivas režiimis või teeb üksikud laske), mitte 0.3C, mida soovitavad tootjad, samas on ka vale temperatuurirežiim ja see, et enamus inimestest ei jälgi eksploatatsiooni reeglid. Selline väike maksimaalne vool NiMH akudest põhjustab suhteliselt väikse energiatiheduse, mis moodustab umbes $60 W \cdot h/kg$ [15].

3.3.1 Liitiumi baasil tehtud akud

Li-Ion akud on väikese kaaluga, mida NiMH akude kohta öelda ei saa. Nende geomeetriline kuju on tavaliselt silindriline ja sellepärast nad inimestele ka meeldivad. Sellise kujuga aku võib panna kaba või korpuse sisse AK või AR-15 baasil tehtud relvade kooptatel. Li-Ion akud omavad ka suurimat mahtuvust ja nende energiatihedus on tavaliselt vahemikus 110-270 $W \cdot h/kg$. Voolud, mis kannatavad Li-Ion akusid on palju suuremad, kui NiMH akudel. Maksimaalne impulssvool erinevatel akudel on erinev, kuid tavaliselt on see vahemikus 12-16C. Tundub, et ei ole väga suur, aga nende mahtuvus on palju suurem, kui teistel akudel ja on see tavaliselt umbes 3000 mAh, ehk maksimaalne impulss vool on sel korral 48A. Püsiv vool on umbes 5C ehk kuskil 15A. Sellest piisab isegi väga tugevate DMR-püssidesse jaoks, mille vedrujõud on 240 N.

Peaaegu alati on aku korpuse sisse ehitatud spetsiaalne kontrollier. PCM-plaat (Eng. Protection Circuit Module), mis juhib laadimist ja kaitseb akut ülelaadimise, tühjenemise ja ületemperatuuri eest, kuna need 3 efekti põhjustavad enneaegset kahjustumist või aku täielikku hävimist. Samuti piirab see kontrollier voolu tarbimist ja kaitseb lühiste eest.

Liitium akudel on erinõuded mitme elemendi järjestikusel ühendamisel. Selliste mitmeelemendiliste akude laadijate sees või tihti isegi akude sees on sisse ehitatud elementide tasakaalustusahel. Selle ahela nimi on BMS-plaat (en. Battery Management System). BMS-plaat šunteerib laetud elementi nii, et laadimisvool läheb sellest mööda. Samamoodi tasakaalustab ta elementide pingeid tühjendamise ajal. Elementide tasakaalustamine põhimõtte on selles, et elementide elektrilised omadused võivad erineda ja mõni element jõuab 100% tasemeni laadida või vastupidi, 0% tasemeni tühjendada kiiremini, kui teised. Siis on vaja lõpetada selle elemendi laadimine (kuna ülelaadimine võib tuua suure kahju akule) ja jätkata teiste elementide laadimisega. [16] Kui jälle rääkida airsofti puhul, siis BMS plaadid on seal laadijate sees, kuna akud ise on tehtud selle põhimõttega, et olla maksimaalselt väiksed.

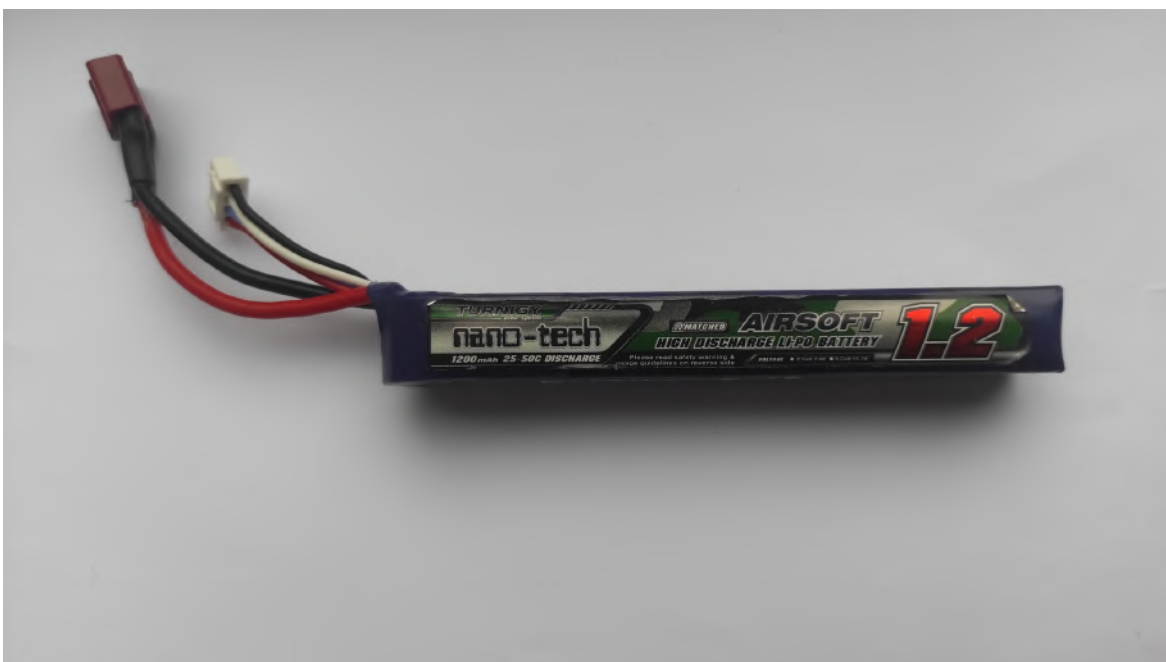
On Li-Ion akudel aga üks suur miinus seotud tuleohutusega. Kui neid üle koormata, siis võivad nad süttida. Samasugune asi juhtub ülelaadimise juhul. Liitiumaku iseeneslikku süttimist on traditsiooniliste vahenditega väga raske kustutada. Vigase või kahjustatud aku põlemise käigus ei vabane ainult salvestatud elektrienergia, vaid ka hakkavad toimuma mitmed keemilised reaktsioonid, mille käigus eralduvad põlemist toetavad ained, elektrolüüdist põlevad gaasid ja ka mitte-LiFePO₄ elektrodide puhul - hapnik. Viimase tõttu on põlema läinud aku võib põleda isegi ilma õhu juurdepääsuta ja õhuhapnikust eraldamise vahendid ei sobi selle kustutamiseks. Veelgi enam, metalliline liitium reageerib aktiivselt veega, moodustades põleva vesinikgaasi, mistõttu liitiumakude kustutamine veega on efektiivne ainult seda tüüpi akude puhul, kus liitiumelektroodi mass on väike. Üldiselt on liitiumaku tulekahju kustutamine ebaefektiivne. See tähendab, et kui põlemine toimub metsas mängu ajal talvel, seda on võimalik ainult isoleerida või proovida kustutada suure hulga lumega. Kui aga see toimub mõnel muul aastaajal, siis seda on peaaegu võimatu kustutada [17, 20].

Erinevalt Li-Ion, mis asuvad jäikades metallkorpustes, on Li-Po valmistatud painduva struktuuriga polümeerlaminaadist. Seega saab neid kohandada kõikidele erinevatele elektroonikaseadmete vormidele. Geelikujulise polümeeri elektrolüüdiga rakke peetakse üldiselt ohutumaks kui enamikke liitiumioonakusid, kuna nende elektrolüüt ei ole nii aktiivne ja tal on väiksemad kaod. Li-Po akudel on iseloomulik kõrge energiatihedus (kuni 155 Wh/kg) ja kõrged C väärtused (airsoftis on 20-50C). Laadimistsüklite arv on umbes sama, nagu teistel liitiumi baasil tehtud akudel - kuni 1000. Tootjate poolt deklareeritud info on selline, et laadimistsüklite arv on 1500, kuid aga reaalses elus kasutatakse neid väga keerulistes ilmastikutingimustes, kus soovitatud temperatuurirežiimi ei ole üldse võimalik jälgida, nii et tavaliselt võib

laadimistsüklite arvu julgelt jagada 2-ga. Pealegi on nendel rakkudel madal isetühjenemise määr ($\leq 5\%$ kuus) ja need ei kasuta toksilisi ega kahjulikke materjale [19].

Airsoft Li-Po ja Li-Ion akudes BMS plaati ei ole, aga tal on olemas laadija. Akust tulevad 2 või 3 juhet iga elemendi jaoks ja üks *common* juhe. Juhtmete arv sõltub sellest, kui palju elemente sees on. Kui aku on 7.4V, siis on 2 elementi ja kui 11.1V, siis on 3 elementi sees.

Tuleohu vältimiseks Li-Po akude puhul kehtivad samad reeglid ja printsiibid nagu Li-Ion akudel. Kui jälgida seda, mida tootja soovitab, siis tõenäosus, et aku hakkab põlema, on väga väike. Kõige suurem tuleoht on aku laadimise ajal ja tavaliselt on see oht tekkinud inimeste poolt. Oht tekib siis, kui tarkadel laadijatel valida vale programm. Sel juhul tekib liiga suur vool/pinge või kandub üldse kogu laadimisvõimsus ühele elemendile. Teine oht tekib siis, kui aku valesti ühendada - siis relva korpus võib isolatsiooni ära lõhkuda ja tekib lühise oht.

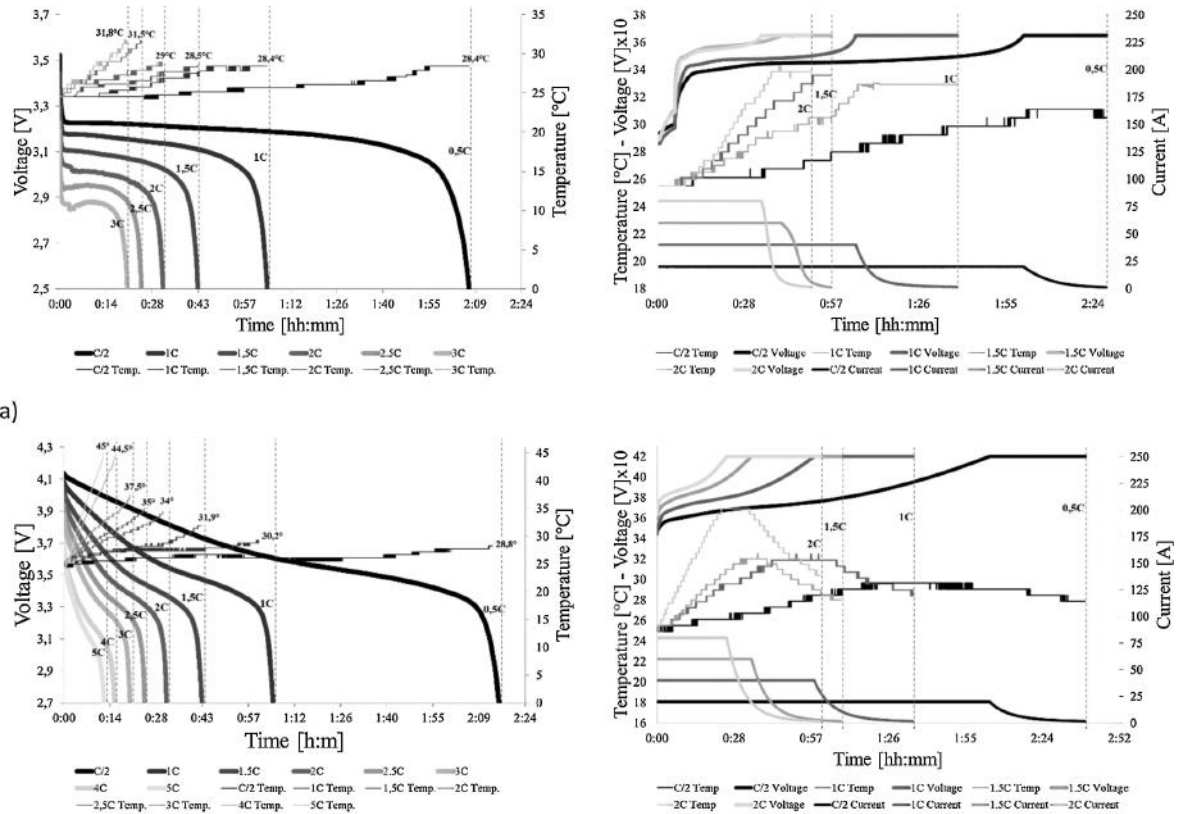


Joonis 3.3.1 Airsoft Li-Po aku

3.3.2 Liitium akude tühjendamise karakteristik

Li-Ion ja Li-Po akudel on olemas üks väga oluline erinevus tühjendamise karakteristikus. Kui vaadata joonist 3.3.2 ja võrrelda graafikuid a ja b, siis võime

märgata, et Li-Ion akudel (antud juhul see oli LiFePO₄) on lineaarse trendiga pinge tühjendamise graafik väikese pinge muutumisega. Sama saab näha, et suure vooluga (1,5C ja rohkem) tühjenemise ajal ei võimalda elektrokeemilise protsessi kiirus tühjendada aku kogumahtuvust. See nähtus põhjustab energia ja amperomeetrilise efektiivsuse vähenemist. Sama printsiib on Li-Po akudel ka, kuna see on seotud füüsiliste protsessidega.



b) **Joonis 3.3.2** Li-Ion (a) ja Li-Po (b) akude tühjendamise näidiskarakteristiku graafik

Li-Ion akudel on suhteliselt lame tühjenemiskõver, mis tähendab, et nende pinge püsib enamiku tühjenemistsüklist suhteliselt stabiilsena, enne kui see lõpus järsult langeb. Li-Ion akude tühjenemiskõverat võivad mõjutada tegurid nagu temperatuur, voolutugevus ja tühjenemissügavus. Li-Ion akudel on tavaliselt lõikepinge umbes 2,5-3,0 V raku kohta, mille all akut ei tohiks tühjendada, et vältida kahjustusi.

Li-Po akudel on veidi erinev tühjenemiskõver võrreldes Li-Ion akudega. Alustades sarnase pinge tasemega, langeb nende pinge aga tühjenemistsükli lõpus kiiremini. Li-Po akude tühjenemiskõverat mõjutavad samuti tegurid nagu temperatuur, voolutugevus ja tühjenemissügavus. Li-Po akudel on tavaliselt lõikepinge umbes 3,0-3,3 V raku kohta, mille all akut ei tohiks tühjendada, et vältida kahjustusi. [23, 24, 31, 32]

Tabel 3. Aku karakteristikute koondtabel

Aku tüüp	Lõikepinge, V	Energia tihedus, Wh/kg	Laadimistsük lite arv	Maksimaalne vool, A
Li-Po	3,0	155	1500	25-50C
Li-Ion	2,5	110-270	1000	5-15C
NiMH	1,2	60	500	kuni 20C

4. PRAKTILINE OSA

Selles peatükis kirjeldatakse airsofti mootori juhtimissüsteemi tegemise etappidest, mis tulemused tulid välja, mis töö oli tehtud ja mida saab teha tulevikus, et parandada süsteemi efektiivsust ja dünaamikat.

Juhtimissüsteem koosneb mitmest osast: mootori juhtahelast ja aku laetuse taseme jälgimissüsteemist. Iga osa täidab oma funktsiooni ning mõlemad juhitakse mikrokontrolleri abil. Selle töö raames oli kasutusel tavaline arduino micro, kuna nad on kergesti saadaval, odavad ning tema funktsionaalsust ja võimsust on rohkem, kui piisavalt.

4.1 Mootori juhtahel esimene versioon

Esimese versiooni skeem ja katseplaat oli projekteeritud tarkvaras Altium Designer. Juhtahela jõuosa on tehtud MOSFET-i PSMN1R1-40BS alusel, mis kannatab kuni 120A voolu ja 40V pinget. SOA karakteristik järgi 1 ms impulsiga saab läbi selle MOSFETI lasta umbes 105A voolu. Mida väiksem on impulsi aeg, seda suurem on maksimaalne võimalik vool. Näiteks impulsil kestvusega 500 μ s on maksimaalse voolu väärtus ca 500A. Selle MOSFET-il SOA karakteristik (joonis 4.1.1) sobib väga hästi selle juhtplaadi jaoks ja ei ole vaja lisa voolu juhtimissüsteemi. See säästab aega katseskeemi projekteerimisel, teeb seda lihtsamaks ning vähendab kogu süsteemi hinda.

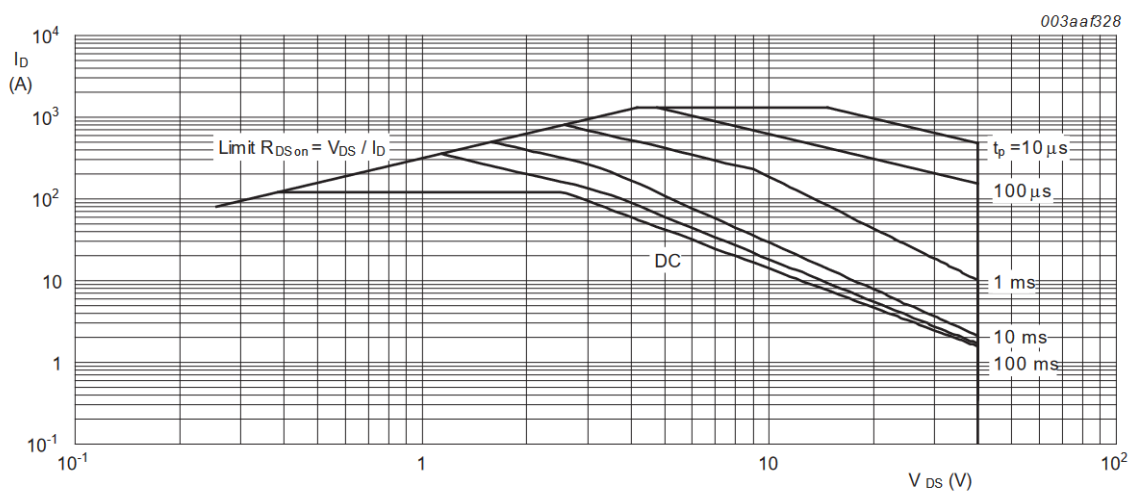
Paralleelselt on mootorile pandud Schottky diodid, et ennetada skeemi komponentide riket mootori eneseinduktsiooni tõttu. Eneseinduktsiooni elektromotoorjõu summutamiseks skeemil on ühendatud paralleelselt mootorile 1 μ F keraamiline kondensaator. Maksimaalne diodi ja kondensaatori pinge oli võetud varuga, kuna mootori induktsiooni tõttu võib tekkida palju suurem pinge, mida akule anda võib. Tema maksimaalne vastandpinge on 60V ja tipp impulss-vool on 50A impulsi kestvusega 8.3 ms.

Kondensaatori teine ülesanne on ära hoida sädemete teke kommutaatori harjadel, üldkommuterimisvõime parandamine ja see aitab kaitsta ka vooluahelat pöördvoolu eest. Maksimaalne kondensaatori pinge oli võetud sama põhimõttega - et oleks varu.

Kuna nüüd suurim koormus on transistori peal, siis ei pea lüliti kannatama suurt võimsust ja voolu. Kuna läbi lüliti läheb 120 mA voolu ($12V/100\Omega = 0.12A$), siis saab panna ka väiksema lüliti, millel on parem tunnetatav tagasiside.

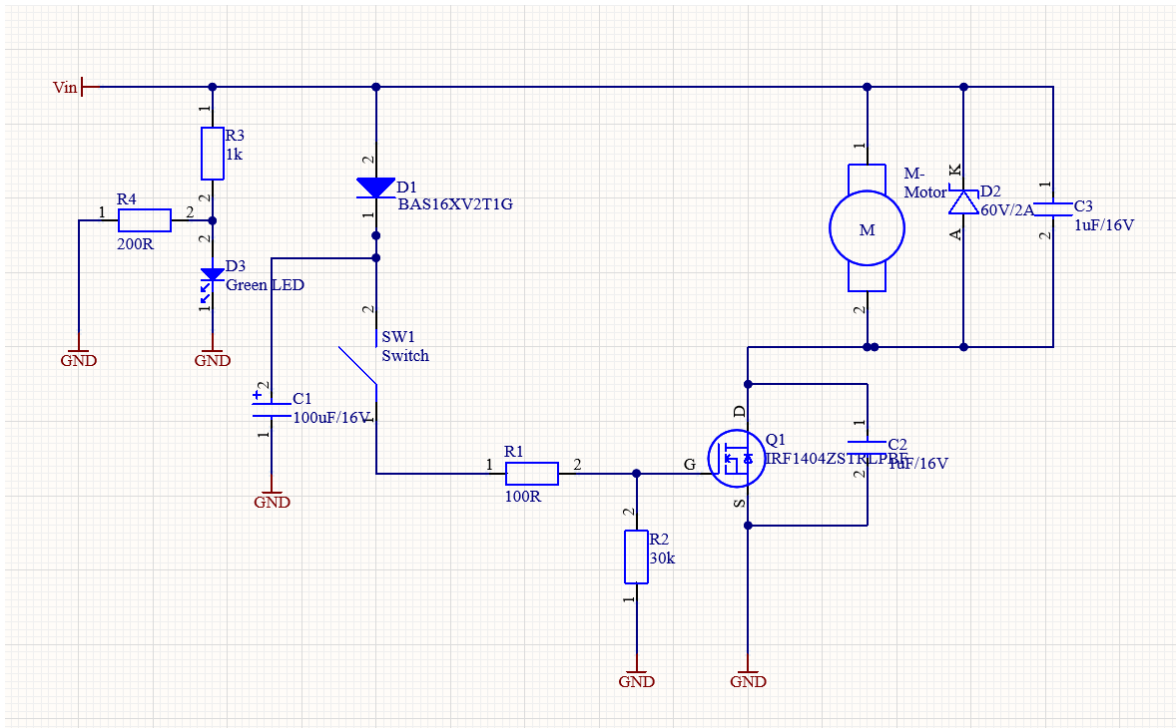
Airsoft mängudes juhtub vahepeal nii, et ajam ei tööta enam ning lahingu ajal ei ole võimalik kiiresti aru saada, kas viga on kuskil relva sees või probleem on akus. Selleks on pandud valgusdiod pingejaguriga. Kui aku pinge on liiga väike, siis LED ei põle ja on arusaadav, et probleem on toites. Andmelehes on näha, et LED-i tööpiirkond on 2-2,2V. Sellepärast on pingejagur suhega 0.17.

Katseplaadi eesmärk on parandada mootori kommuteerimisvõimet ja vähendada lülituskadusid. Mootori pidurdamise rakendus on liiga kallis ja keeruline selle töö jaoks, kuna see vajab liiga palju lisakomponente. Isegi, kui teha selle jaoks prototüüp, pole võimalik seda relva sisse panna, kuna relva sees lihtsalt ei ole ruumi. See lahendus nõuab lisaks mehaanika projekteerimisele palju lisakatsetusi, mis ei ole bakalaureuse töö raames mõistlikud teha. Kuid selline projekteeritud skeem on olemas lisas 3.



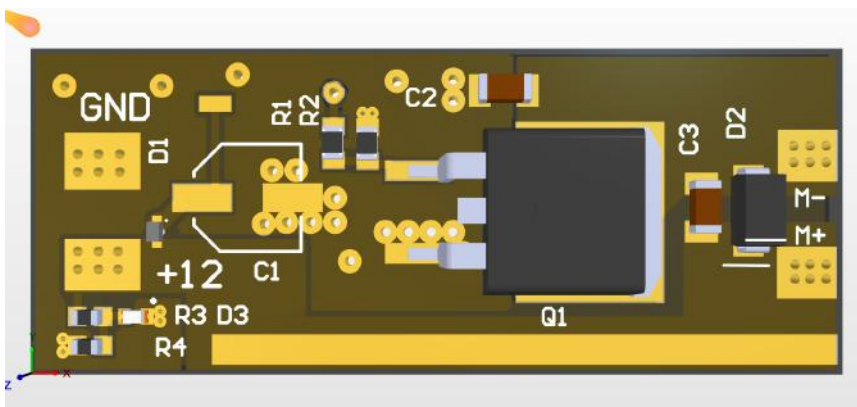
$T_{mb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; I_{DM} is a single pulse; Capped at 120 A due to package

Joonis 4.1.1 PSMN1R1-40BS SOA karakteristik. Horisontaalteljel on pinge D ja S vahel, vertikaalteljel on vool, mis läheb läbi MOSFET-i.

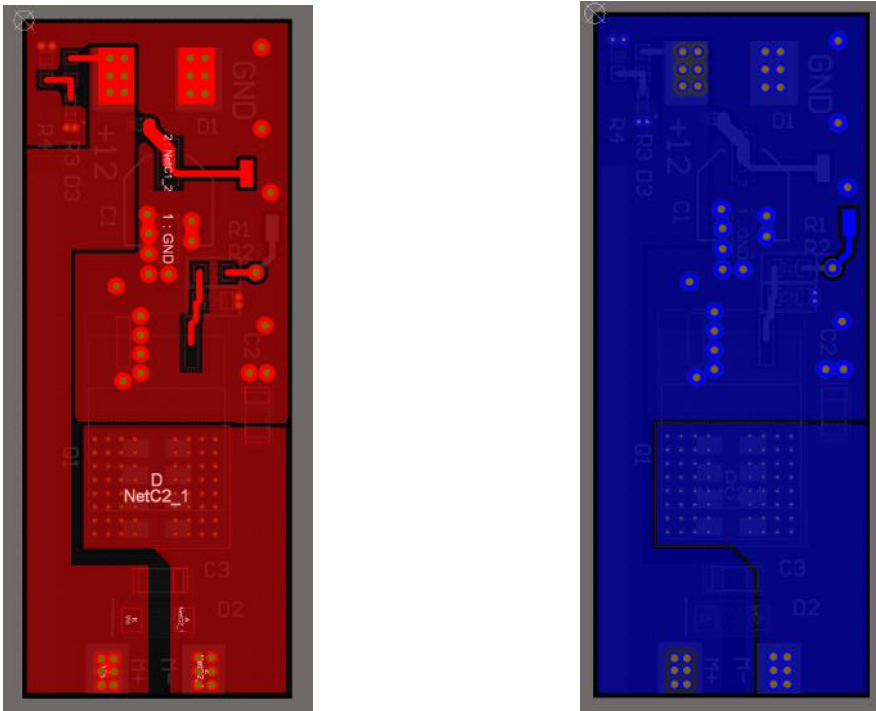


Joonis 4.1.2 Mootori juhtahela skeem. IRF1404Z oli edaspidi vahetatud. V_{IN} on aku sisend, pinge on 12V

Trükkplaat oli tehtud tavalise FR4 lamineeritud tekstoliitplaadi tükist, mille suurus on 50x20mm ja kogupaksus 1.54 mm. Välisfoolium ja sisefoolium on paksusega 35 μm . Eialgu oli mõeldud projekteerida 4-kihiline plaat, kus PDN on veetud läbi 3 kihi: esimesel, kolmandal ja neljandal, signaalid on esimesel kihil ning teine kiht ja kõik ülejäänud vaba ala on GND, mis on ühendatud omavahel läbiviikude abil. Pärast hinnapakkumise saabumist tehti otsus muuta plaat kahekihiliseks ja sai välja freesitud CNC pingis. 3-kihilise toitepolügoni asemel oli peale joodetud 3 mm² juhe, mis andis lisa pindala ja suurendas maksimaalset voolu.



Joonis 4.1.3 Trükkplaadi 3D mudel



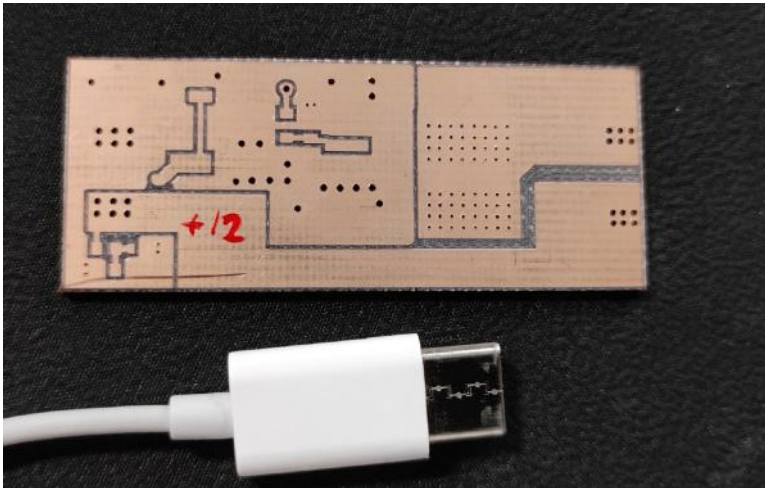
Joonis 4.1.5 Trükkplaadi kihid. Esimene pilt (punane) on plaadi ülemine kiht. Teine pilt (sinine) on trükkplaadi alumine kiht

4.1.1 Esimese juhtahela versiooni katsetamine

Tulemus on näidatud joonisel 4.7, 4.8 ja 4.9. Kuna plaat oli freesitud CNC pingil, siis tuli läbiviike teha ka käsitsi: esialgu oli puuritud 1 mm augud, kuhu sisse läksid peenikesed traadid, mis oli joodetud vastava signaali raja või polügoniga. Nupu imiteerimiseks oli joodetud 2 juhet, mis lühistasid omavahel ahelad.

Seade sai testitud spetsiaalsel stendil (joonis 4.10), mis saab piirata tarbimisvoolu. Esimese katse jooksul selgus, et transistori all jahutusplats, mis D2PAK korpusel on ühendatud väljavooluga, on lühistatud GND-ga. Seega hakkas plaat peaaegu põlema ja pärast testi oli võimalik näha mustad piirkonnad plaadi peal ja ära sulanud vase foolium transistori all (joonis 4.1.9).

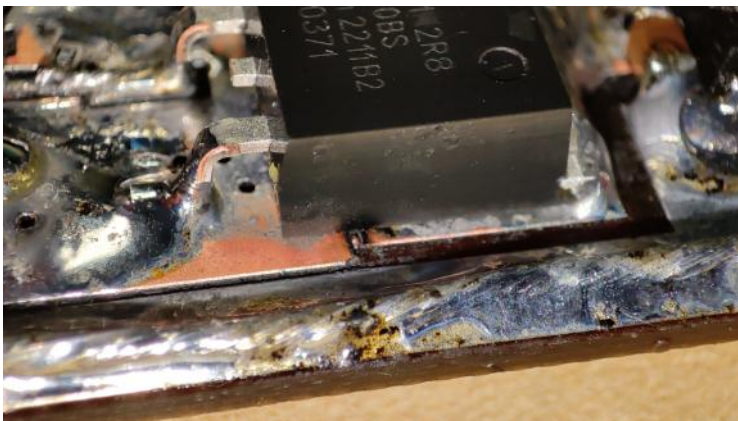
Veel üks projekteerimisviga oli selles, et pingejaguri arvutuse käigus ei olnud võetud arvesse see, et valgusdiod nõuab 20 mA voolu. Tekkis selline olukord, kui pingejagurile jõuab ainult $12.5V/1000\Omega = 12.5mA$ voolu, aga kuna valgusdiodi lähedal on veel üks takisti, mille pingelang on 2V ja tema takistus on 200Ω , siis saame, et valgusdiodile läheb ainult $12.5mA - 2V/200\Omega * 1000 = 2.5mA$, mis kindlasti ei ole piisavalt, et LED-i põlema panna.



Joonis 4.1.7 Freesitud PCB mootori juhtahela katsetamiseks



Joonis 4.1.8 Kokku joodetud prototüüp



Joonis 4.1.9 Prototüüp pärast testimist



Joonis 4.1.10 Testiseade integreeritud amper- ja voltmeetriga

4.2 Mootori juhtahel, teine versioon

Teine versioon oli joonistatud CadInt programmis ja seal esinevad mõned parandused. Terve skeem on olemas lisas 3. Et vältida vigasid, siis skeemi funktsionaalsus oli simuleeritud online tarkvaras Falstad.

Esialgul oli parandatud toitesisendi indikaator. Nüüd ühendatakse LED otse, ilma pingejagurita, läbi takisti, mille väärtus saab arvutada valemi 9 abil.

$$R = (V_{in} - V_F) / I_F, \text{ kus } V_{in} - \text{toitepinge, } V_F - \text{LED pinge, } I_F - \text{LED vool} \quad (9)$$

$$R = (12.5V - 2V) / 0.02A = 525 \Omega \quad (10)$$

Tulemuseks saame, et sel juhul on vaja takistit nominaaliga 525 Ω . Prototüüp oli plaanis teha maksimaalselt odav ja saada kätte kiiresti, sellepärast oli ka enne ostmist kontrollitud, kas on olemas enam vähem sarnased nominaalid varus või mitte. Sellepärast oli võetud 560 oomine takisti. Selle takistusega on valgusdiodi vool $(12.5V - 2V) / 560\Omega = 18.7 \text{ mA}$. Takisti võimsus peab olema sellel juhul vähemalt $12.5V \cdot 0.02A = 0.25W$. Sobib 1206 või 1210 korpus SMD kujul. SMD korpuste suurused on antud inglise mõõdusüsteemi ühikutes.

Vahetatud sai ka peamine MOSFET, kuna eelmine ei olnud enam kättesaadav seisuga 24.04.2023. Valitud oli MOSFET PSMN4R2-80YSEX, sest tal on mugav ja väike korpus

SO8, aga samal ajal tal on väga suur maksimaalne vool - 170A pingega 10V ja sisendtakistus R_{DSon} on 4.2 mΩ.

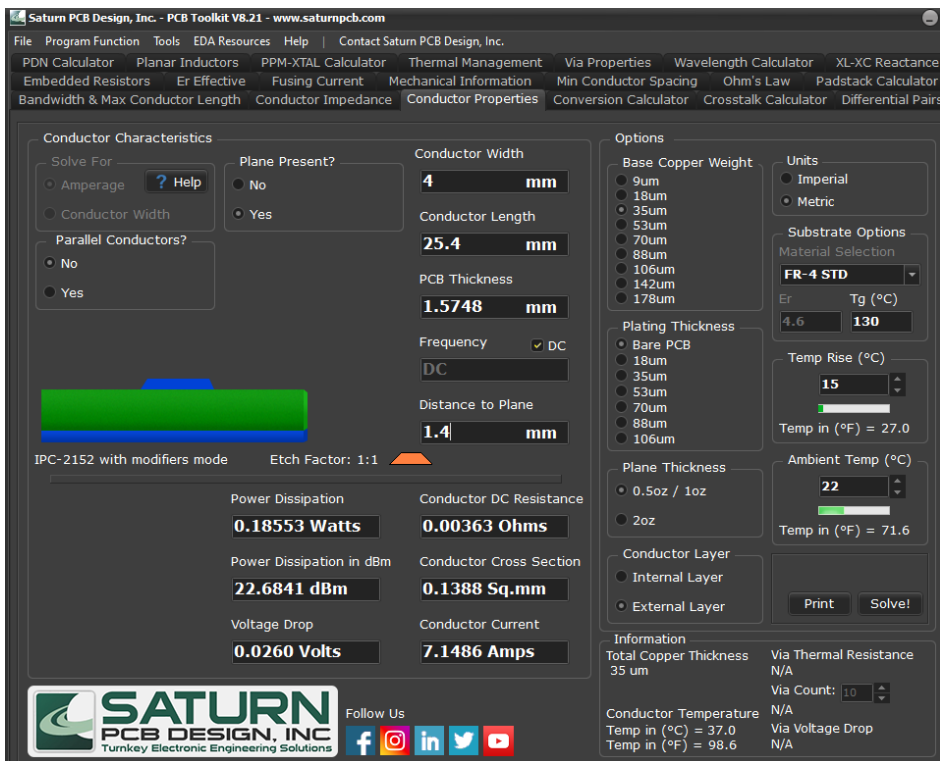
Juhtimine ja relvast laskmine käib nüüd läbi mikrokontrolleri (signaal SW_EN skeemi peal). Aga kuna arduino annab 5V väljundis ja PSMN4R2-80YSEX lävipinge on 2.6V, ei suuda arduino MOSFET-i täielikult avada. Selle probleemi lahendamiseks tuli lisada veel üks MOSFET, mis saadab PSMN4R2-80YSEX paisule toitepinge, mis on piisavalt, et transistori avada. Et vältida juhuslikku avamist oli pandud pull-down takistid mõlemale MOSFET-ile. Pull-down takistused oli arvutatud niimoodi, et MOSFET-id saaksid oma minimaalse voolu ja takisti, mis läheb GND-le, on 100 korda teisest suurem.

Trükkplaadil oli suurendatud platside suurusi, et oleks mugavam joota ja nüüd see plaat sai ikkagi neljakihiline. Toiterada on tehtud nüüd niimoodi, et +12V on esimesel, kolmandal ja neljandal kihil ning on ühendatud 18-ne (9 on rada alguses ja 9 on rada lõpus) 0.9 mm läbiviiguga. Teine kiht sai tehtud terve GND polügonina, et ennetada erinevaid EMI probleeme. Plaadi ülesehitus on kujutatud pildil 4.1.3.

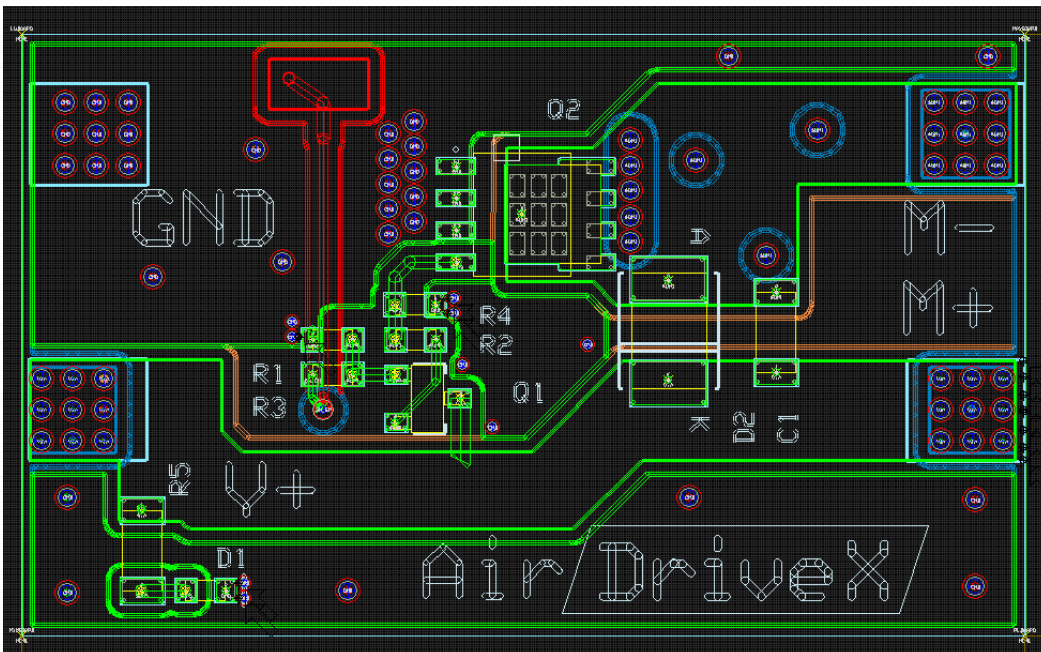
Kolme toiteraja maksimaalne vool 4-kihilises plaadis 15 °C temperatuuri tõusuga on: $8A + 7.3A + 7.3A = 22.6A$. Radade maksimaalsed voolud erinevad omavahel sellepärast, et võrdlustasapind (eng. reference plane) asub teisel kihil (plaadi ülesehitus on kujutatud joonisel 4.2.1). Suurendades vahet GND ja signaali vahel transistori kõhu all me vähendame lühiseohtu, mistõttu eelmine prototüüp põlema läks. Kõik trassid olid arvutatud programmis SaturnPCB Toolkit. Valemid, mida programm kasutab, on kirjeldatud standardis IPC-2152B [36]. Arvutuse näidist saab näha joonisel 4.1.4. Samuti on lisas 3 olemas skeem regeneratiivse pirdurdusega.

#	Name	Type	Thickness	#	Thru 1:4
	Top Overlay	Overlay			
	Top Solder	Solder Mask	0.0254mm		
1	Top Layer 1	Signal	0.035mm	1	
	Dielectric 2	Prepreg	0.18034mm		
2	Top Layer	Signal	0.035mm	2	
	Dielectric 1	Core	0.9906mm		
3	Bottom Layer	Signal	0.035mm	3	
	Dielectric 3	Prepreg	0.18034mm		
4	Bottom Layer 1	Signal	0.035mm	4	
	Bottom Solder	Solder Mask	0.0254mm		
	Bottom Overlay	Overlay			

Joonis 4.2.1 Trükkplaadi ülesehitus



Joonis 4.2.2 SaturnPCB Toolkit UI. Joonisel on näha parameetrite näidis. Prototüübile tuleb lisaks 18 µm galvaaniline vask, mis ka suurendab voolutaluvust.



Joonis 4.2.3 Mootori juhtahela trükkplaat, teine versioon

4.2.1 Teise juhtahela versiooni katsetamine

Katsetulemused näitasid, et valitud transistor 4N7002 ei ava täiesti 3.3V pingega, kuid olukord on palju parem, kui anda 5 või 12V, sellepärast on vaja vahetada see loogika taseme mosfetiga lävipingega kuni 1.5V. Muu funktsionaalsus töötab väga hästi. Pinge andmisel reageerib kohe LED. R1 takisti on 1206 korpuses (inglise moodsüsteem) võimsusega 0.25W. Antud juhul on tema poolt hajuv võimsus $P = (19mA)^2 \cdot 560\Omega = 0.20W$. Mitte midagi soojaks siin ei läinud, töötab nagu peab.

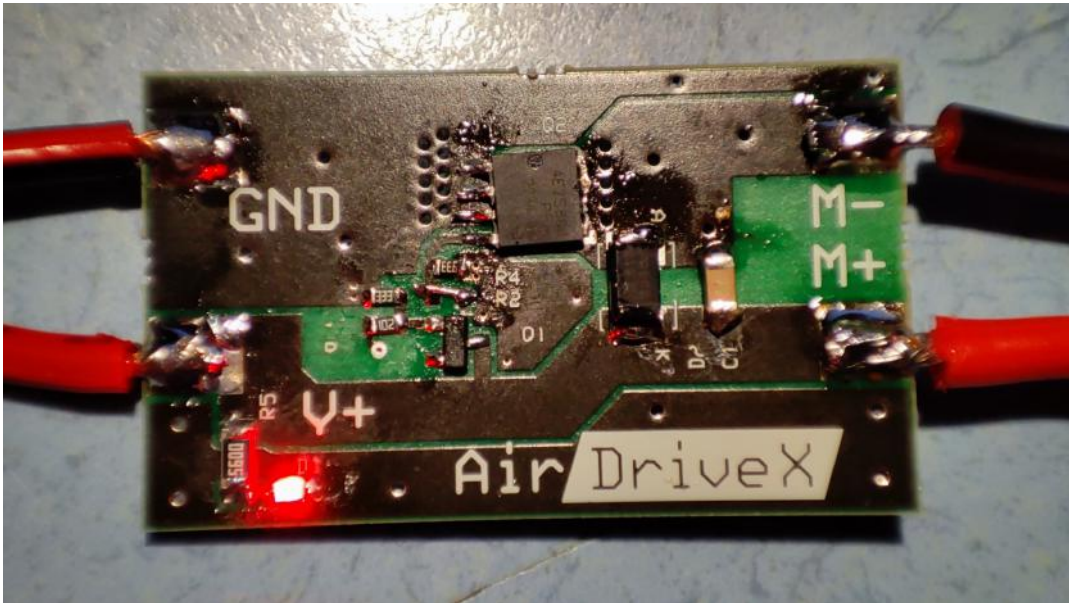
Jõutransistor näitas samuti head tulemust. Kui mikrokontrolleri poolt juhitud transistor on täiesti avatud, siis tekib kogu pingelang umbes 1-1.5V (see on koos juhtmete pingelanguga) ja ka tema ei lähe soojaks. On näha, et GND polügoni pindala on piisavalt suur, et hajutada kogu soojus.

Võetud Arduino Microl ei ole 12V sisend, vaid ühendamiseks toitega on 2 võimalust: USB pesa või anda otseselt 5V vastavale klemmile. Testimise jaoks oli pandud USB pesa, aga skeemi peal (lisa 2) on selle jaoks olemas pingeregulaator, mis võtab 12V akust ja muudab seda +5V-ks. See oli tehtud selleks, et kui teha reaalne prototüüp, ei ole võimalik kuskil relvast võtta USB pesa, mis annaks 5V. Pingeregulaatori takistite ja kondensaatorit nominaalid oli võetud LTM8029 andmelehest. Seal on olemas kõik vajalikud valemid ja valmis lahendused erinevate pingete saamiseks.

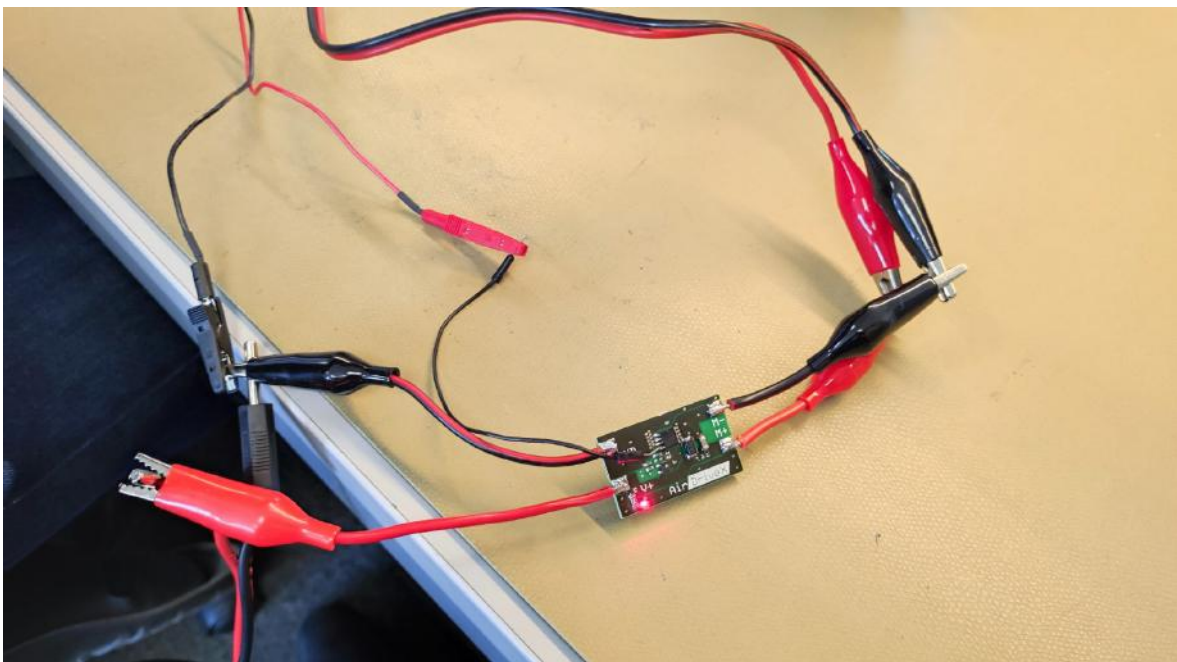
Tabel 3. Katsetulemused

Katse	Sisepinge U_{IN} , V	Väljundpinge U_{OUT} , V	Kogu süsteemi pingelang ΔU_{Sys} , V	MOSFET-i temperatuur t_{FET} , °C	Toiterada temperatuur t_{V+} , °C
esimene prototüüp	12.5	0	MOSFET lühises	72	23
teine prototüüp, vool 5A	12.5	12.4	0.1	25	23
teine prototüüp, vool 9.5A	12.5	11	1.5	34	24

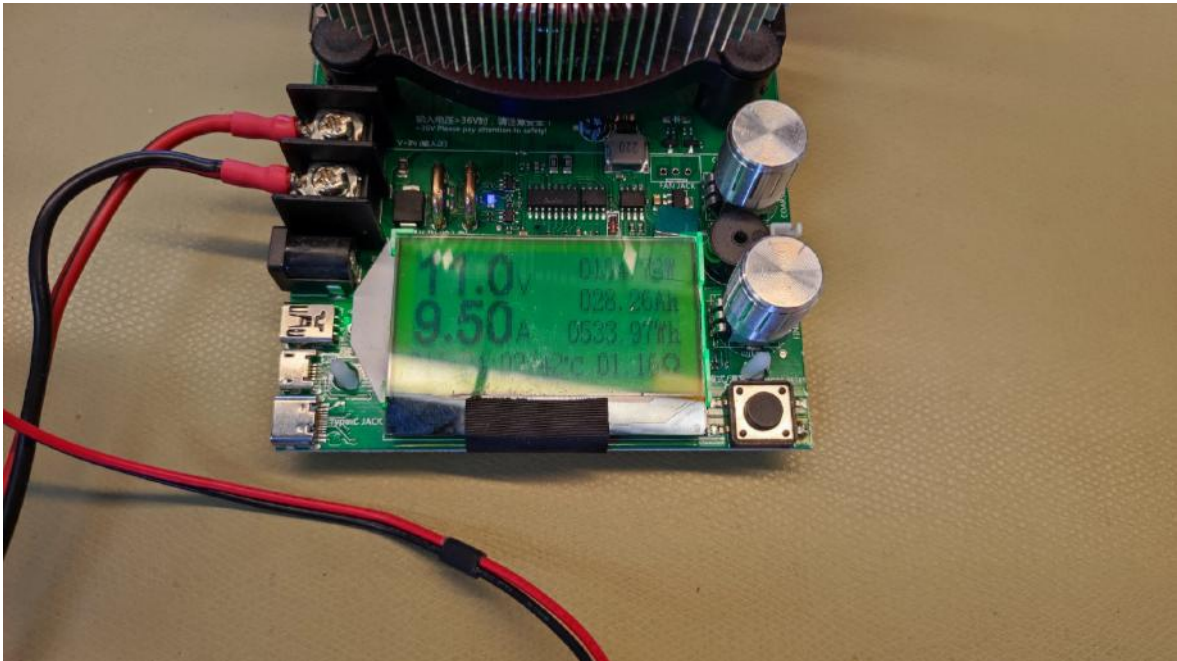
*ruumi temperatuur 23 °C



Joonis 4.2.4 Teise versiooni juhtahela trükkplaat



Joonis 4.2.5 Juhtahela katsetamine. Mikrokontrolleri väljundi asemel oli kasutusel reguleeritav toiteallikas



Joonis 4.2.6 Teise juhtahela versiooni testi tulemused

Juhtahel rakendab vabalt 100W võimsust ilma kuumenemiseta. Rohkem voolu ei saanud panna, kuna toiteallika maksimaalne vool oli 10A.

4.3 Aku laetuse jälgimissüsteemi arendus MAX17263 baasil

MAX17263 töötab, mõõtes erinevaid akuparameetreid, nagu pinge, vool ja temperatuur ning kasutades neid mõõtmisi üherakulise liitiumioonaku oleku (SOC) ja tühjenemisaja (TTE) hindamiseks.

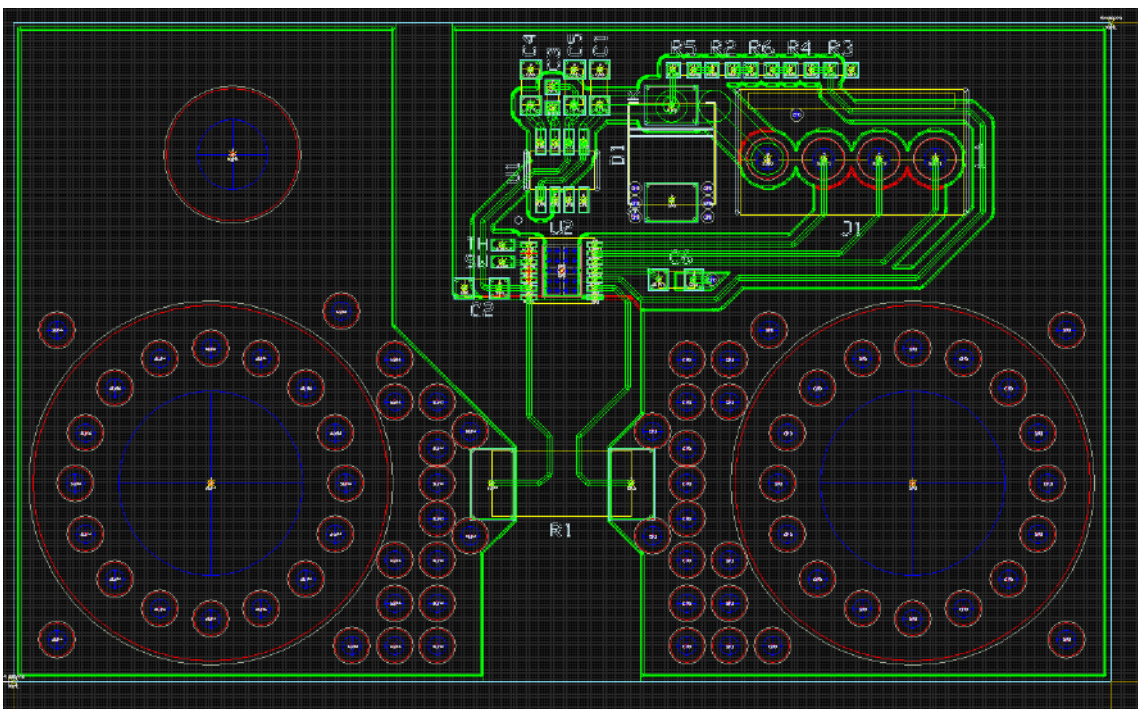
Selleks kasutab MAX17263 meetodit nimega "Coulombi loendamine", mis hõlmab laetud ja tühjendatud laengu mõõtmist ajas. Laengu koguse jälgimisega saab MAX17263 akupakki SOC-i hinnata kõrge täpsusega.

Lisaks Coulombi loendamisele kasutab MAX17263 ka patenteeritud algoritmi nimega "ModelGauge™ m5 EZ", et parandada selle SOC-i ja TTE hinnangu täpsust. Selle algoritmi abil ühendab MAX17263 kuluomi loendamise pinge ja temperatuuri mõõtmistega, et saada aku SOC-i veelgi täpsem hinnang.

MAX17263 suhtleb mikrokontrolleriga I2C liidesel, mis võimaldab mikrokontrolleril lugeda akupaki olekut ja teha otsuseid akupaki haldamiseks. MAX17263 on loodud töötama laias temperatuurivahemikus, mistõttu sobib see erinevateks kaasaskantavateks ja akutoitel seadmeteks.

Kokkuvõttes on MAX17263 kõrge täpsusega aku taseme mõõtur, mis annab täpseid ja usaldusväärseid hinnanguid ühe rakulise liitiumioonaku SOC-i ja TTE kohta, muutes selle paljudes akutoitel seadmetes väärtuslikuks komponendiks.

MAX17263-lt ei saa otseselt võtta 12.5V pinget ja ta töötab vahemikus 2.3V - 4.9V, sellepärast oli tema jaoks lisatud üks pingeregulaator, mis väljundis annab 3.3V. Takistid ja kondensaatorid olid samuti võetud andmelehest.



Joonis 4.3.2 MAX17263 katseplaat

4.4 Pidurdussüsteemi rakendamine

Nagu oli mainitud peatükis 4.1, mootori pidurdamise rakendus on liiga kalline ja keeruline selle töö jaoks, kuna see vajab liiga palju lisakomponente. Kuid vaatame, kuidas töötab antud lisas 4 skeem.

Juhtahel on tehtud H sildi baasil koos loogikaelementidega. Kõik 4 MOSFET-i H-sildis on loogika taseme MOSFET-id ning 5V peaks olema piisavalt, et neid täielikult avada. Uurides skeemi täpsemalt, on näha, et 2 nendest MOSFET-idest on N-tüüpi ja 2 on P tüüpi. P-tüüpi MOSFET-i juhendamiseks on vaja paisule anda negatiivne pinge, sellepärast on pandud signaali-inverterid.

Kui juhtahel saab mikrokontrollerist laskmise signaali (SW_EN) ja ei saa pidurdamise signaali (BRAKING), siis aktiveeritakse Q4 ja Q3 ning mootor hakkab pöörlema päripäeva. Kui tuleb kaasa ka BRAKING signaal, siis lülitatakse välja transistorid Q3 ja Q4 ning avatakse transistorid Q5 ja Q2 mille tõttu mootor hakkab pöörlema vastupäeva. Kuna pidurdusmoment on suhteliselt suur selle süsteemi jaoks, peab BRAKING signaali kestus olema üsna väike, et mootor ei hakkaks pöörlema vastupidi.

Kiire loogikataseme lülitamiseks oli kasutusel elektroonilise lülituse skeem. Tema ülesanne on isoleerida MOSFET-i pais, et ta ei saaks müra lülitist ja samaks peab andma kiir-reageerimise kiiruse.

Tabel 4. Põhikomponentide loetelu

Komponent	1 tk hind, €	Kogus	Kokku, €
NVMFS5113PL	2,60	2	5,2
BUK9609-40B	1,80	2	3,60
SN74LVC2GU04	1,24	1	1,24
74HC1G08	0,40	2	0,8
74HCT1G04GW	0,27	1	0,27
LTM8029	11,97	1	11,97
LT3060HTS8-3.3	10,81	1	10,81
MAX17261	4,16	1	4,16
Arduino micro	21,60	1	21,60
Hind kokku:			59,65

Kogu süsteemi oma hind on 59,65€ mitte arvestades takistid ja kondensaatoreid, sest neid pole alati võimalik tükkidena kätte saada.

KOKKUVÕTE

Airsoft relvades on praegu palju puudusi, mis on seotud elektroonikaga. Relvad, kus on mingi juhtahel, maksavad 2-3 korda rohkem, kui tavalised relvad. Kuid aga väga lihtsa juhtahelaga saab olukorda oluliselt parandada.

Selle töö raames said tehtud katsed, kuidas võiks välja näha lihtne mootori juhtimissüsteem. Testid näitasid, et see süsteem võiks ilusti töötada. Esimesel prototüübil oli aga lühis MOSFET-i all, mistõttu mõned rajad sulasid ära. Oli tehtud suur parandustöö ning tulemusena saadi töötav juhtahela prototüüp, mis kannatab vabalt 10A voolu ilma mingi ülekuumenemiseta.

Töö käigus leiti digitaalne mikroskeem, mida saab siduda mikrokontrolleriga läbi I2C liidese ja analüüsida aku laetuse seisundit, kontrollida tarbitavat voolu, võimsust ja nende andmete baasil arvutada, kui palju ja kui kaua saab veel tulistada. See on suur samm edasi airsoftis ja näitab, et relvad võivad muuta efektiivsemaks ja kasutajasõbralikuks. Samamoodi see võib parandada olukorda, kui mängijal lahingu ajal läheb aku tühjaks ja ta ei saa isegi mingi teavitust selle kohta. Selle lahenduse maksumus on ka umbes 15 eurot (koos kivi ümbruse ja lineaarse pingeregulaatoriga, trükkplaat ja juhtiv mikrokontroller ei ole hinna sees).

Testide raames selgus, et kogu süsteemi omahind on umbes 60 eurot ja see võib teha airsoftis revolutsiooni. Katsed kindlasti tasusid ära, et teha neid ja see idee võiks olla lõpuni viidud. Eesmärgid olid täiesti täidetud ja lõpus saime töötava prototüüpi ja palju uusi ideid töö edasiarendamiseks. Sai palju infot erinevate süsteemi osade kohta, töö andis suur ettekujutust, kuidas töötab elektroonika, kuidas saab siduda erinevaid mooduleid ning kuidas toimub seal omavaheline suhtlus. Hea praktiline kogemus saab aidata uue süsteemi versiooni tegemise protsessi.

Töö lõpus jäi realiseerimata mootori lülitust võimaldav skeem, mis pidi pidurdama mootorit, et saada veel paremat süsteemi dünaamikat, kuid antud töös on välja pakutud selle jaoks skeemilahendus, mida saab kokku panna ja tulevikus testida. Selleks on vaja joonistada trükkplaat ja seadistada see moodul kontrolleriga.

Tulevikuks on mõistlik kokku panna elektrooniline päästikuskeemi MOSFET-i kommuteerimiseks. See annab väga sileda ja kiire lülituskarakteristiku ja parandab siirdeprotsesse. Praegu oli vaja lisada suur kondensaator, et siluda lüliti poolt tekitatavad häired, kuna need võivad väga lihtsalt transistori rikkuda.

SUMMARY

Airsoft guns currently have many drawbacks related to electronics. Guns equipped with some control circuitry cost 2-3 times more than regular guns. However, a simple can significantly improve the situation.

As part of this work, experiments were conducted to determine the design of a simple motor control system. The tests showed that this system could work effectively. However, the first prototype experienced a short circuit under the MOSFET, resulting in a fire hazard and some traces melting. Extensive repairs were carried out, leading to a functional prototype of the control circuit that can withstand 10A current without any overheating.

During the project, a digital microchip was found that can be connected to a microcontroller through the I2C interface to analyze the battery charge status, control the current consumption and power, and calculate the remaining shots and their duration based on these data. This is a significant advancement in airsoft, and if implemented, it can make guns more efficient and user-friendly. Similarly, it can improve the situation when a player's battery runs out during a battle without any notification. The cost of this solution is also approximately 15 euros.

During the testing phase, it was found that the total cost of the entire system is approximately 40 euros, and it has the potential to revolutionize airsoft. The tests were definitely worth the investment, and this idea must be taken to its full completion. The objectives were fully achieved, resulting in a functional prototype and numerous new ideas for implementing the system. A lot of information about different system components was acquired, providing a good understanding of how electronics work, how various modules can be connected, and how they communicate with each other. This practical experience can be valuable in the process of creating a new version of the system.

The implementation of a motor switching scheme, which was intended to provide better system dynamics by braking the motor, was not realized in the course of this work. However, a schematic solution for this purpose is proposed in this work, which can be assembled and tested. In the future, it is necessary to design a PCB for it and configure the module with the controller.

For future development, it is advisable to incorporate an electronic trigger scheme for MOSFET switching. This provides smooth and fast switching characteristics, improving

transition processes. Currently, a large capacitor had to be used to suppress disturbances caused by the button, as they can easily damage the transistor.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] "History of airsoft ". [Online].

<https://sportsmatik.com/sports-corner/sports-know-how/airsoft/history> (24.04.2023).

[2] Иннодрайв, "Бесколлекторный двигатель постоянного тока". [Online].

https://innodrive.ru/articles/beskollektornyi_dvigatel_postoyannogo_toka/

(24.04.2023).

[3] "Airsoft Gun Ultimate Guide: Absolutely All You Need To Know For Airsoft Gun Types and Energy". [Online]

<https://highspeedbbs.com/all-about-airsoft-guns-types-styles-facts-science/>

(24.04.2023)

[4] Sandip Institute of Engineering and Managemen, "BRUSHLESS DC MOTOR".

[Online]. 16.11.2014. [Online]

http://nationalconference.org.in/up_proc/pdf/3-141664793546-50.pdf (24.04.2023)

[5] Планета страйкбола, "Мотор в страйкбольном приводе". [Online]

<https://strikeplanet.ru/stati/masterskaya/motor/> (24.04.2023)

[6] Circuit Globe "Dynamic Braking or Rheostatic Braking of DC Motor". [Online]

<https://circuitglobe.com/dynamic-braking-or-rheostatic-braking-of-dc-motor.html>

(24.04.2023)

[7] For Airsoft, "Airsoft Hop Up". [Online]

https://forairsoft.com/index.php?route=journal3/blog/post&journal_blog_post_id=14

(24.04.2023)

[8] Circuit Globe, "Plugging or Reverse Current Braking". [Online]

<https://circuitglobe.com/plugging-or-reverse-current-braking.html> (24.04.2023)

[9] Warhead Industries, "Airsoft brushless motors". [Online]

<https://www.warheadindustries.com/warhead-industries-brushless-motor>

(24.04.2023)

[10] Иннодрайв, "Коллекторный двигатель постоянного тока". [Online]

<https://innodrive.ru/articles/kollektornyy-dvigatel/> (24.04.2023)

- [11] David Hovard, "What is a carbon brush?". [Online]
<https://www.repcoinc.com/about/blog/What-is-a-carbon-brush-bd.html> (24.04.2023)
- [12] Sang-Hoon Kim, "Electric Motor Control", lk 389-416. 2017. [Online]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128121382000106>
(24.04.2023)
- [13] Kevin M. Lynch, Nicholas Marchuk, Matthew L. Elwin, "Embedded Computing and Mechatronics with the PIC32", lk 399-425. 2016. [Online]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124201651000251>
(24.04.2023)
- [14] Valentina Innocenzi, Nicolò Maria Ippolito, Ida De Michelis, Marina Prisciandaro, Franco Medici, Francesco Vegliò, "A review of the processes and lab-scale techniques for the treatment of spent rechargeable NiMH batteries. Journal of Power Sources, Volume 362", lk 202-218. 2017. [Online]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531730916> (24.04.2023)
- [15] Д.А. Хрусталёв, "Аккумуляторы". 2003. [Online]
https://rusautomobile.ru/wp-content/uploads/dop_materials/books/03.12.2015/1/Akkumuljatory.pdf (24.04.2023)
- [16] И. Е. Сазонов, "Выравнивание заряда в Литий-Ионных аккумуляторных батареях", 2013. [Online]
<https://cyberleninka.ru/article/n/vyравnivanie-zaryada-v-litij-ionnyh-akkumulyatornyh-batareyah/viewer>
- [17] Markham Hislop, "Solid-state EV battery breakthrough from Li-ion battery inventor John Goodenough ". 01.03.2023. [Online]
<http://theamericanenergynews.com/markham-on-energy/solid-state-battery-advance-goodenough> (24.04.2023)
- [18] F. Sergi, A. Arista, G. Agnello, M. Ferraro, L. Andaloro, V. Antonucci, "Characterization and comparison between lithium iron phosphate and lithium-polymers batteries. Journal of Energy Storage, Volume 8", lk 235-243. 2016. [Online] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X16301220>
(24.04.2023)

- [19] Fattal, Jade & bou dib, Paul & Karami, Nabil, "Review on different charging techniques of a lithium polymer battery", lk 33-38. 2015. [Online]
https://www.researchgate.net/publication/283462700_Review_on_different_charging_techniques_of_a_lithium_polymer_battery (24.04.2023)
- [20] David Kohanbash, "Lithium, Lithium-ion, LiPo & LiFePO₄ Battery Safety and Fire Handling" 14.11.2017. [Online]
<https://www.robotsforroboticists.com/lithium-ion-battery-safety/> (24.04.2023)
- [21] O. Veneri, F. Migliardini, C. Capasso, P. Corbo, "Dynamic behaviour of Li batteries in hydrogen fuel cell power trains. Journal of Power Sources, Volume 196, Issue 21", lk 9081-9086. 2011. [Online]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775311003661>
(24.04.2023)
- [22] HOMPAIN, "Мотор в качестве электромагнитного тормоза" 05.01.2020. [Online]
<https://habr.com/ru/post/482882/> (24.04.2023)
- [23] N. Nitta et al., "Li-ion battery materials: present and future. Materials Today, vol. 18, no. 5", lk 252-264, 2015. [Online]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114004118> (24.04.2023)
- [24] P. Ramadass et al., "Aging mechanisms of Li-ion batteries. Journal of Power Sources, vol. 195, no. 15", lk 269-281, 2010. [Online]
https://las493energy.files.wordpress.com/2014/11/2005_vetter_jpowsourc.pdf
(24.04.2023)
- [25] "Dynamic Braking of DC Motors," Control Engineering Practice, Volume 5, Issue 5, May 1997, Pages 659-667.
- [26] "Dynamic Braking in DC Motors," Power Electronics Handbook, Third Edition, Elsevier, 2011, Pages 245-250.
- [27] All About Circuits, "Dynamic Braking of a Brushed DC Motor". [Online]
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/dynamic-braking-of-a-brushed-dc-motor/> (31.03.2023)

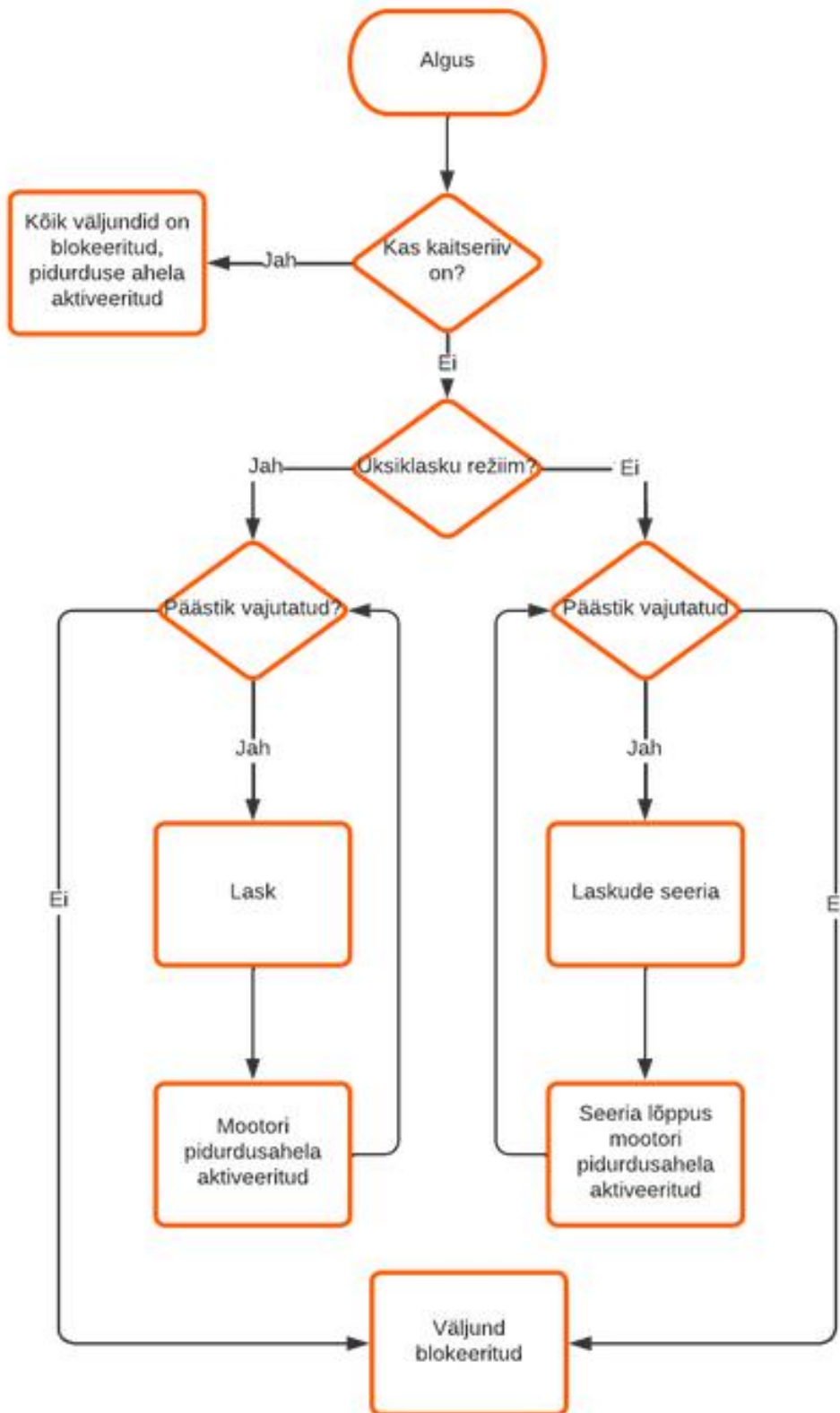
- [28] Theodore Wildi, "Electrical Machines, Drives, and Power Systems. Fifth edition".
[Online]
[https://ia600901.us.archive.org/9/items/ElectricalMachinesDrivesAndPowerSystems5ETheodoreWildi/Electrical%20Machines,%20Drives,%20and%20Power%20Systems%205E%20\(Theodore%20Wildi\)_text.pdf](https://ia600901.us.archive.org/9/items/ElectricalMachinesDrivesAndPowerSystems5ETheodoreWildi/Electrical%20Machines,%20Drives,%20and%20Power%20Systems%205E%20(Theodore%20Wildi)_text.pdf) (24.04.2023)
- [29] Chen, Yu-Chan & Chen-Yu, Chang & Cheng, Jiangfeng & Yu, Wen-Cheng & Lin, Chun-Liang. "Regenerative braking-driving control system", lk 887-892. 2018. [Online]
https://www.researchgate.net/publication/326047575_Regenerative_braking-driving_control_system (24.04.2023)
- [30] Nian, Xiaohong & Peng, Fei & Zhang, Hang, "Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor. Industrial Electronics, IEEE Transactions on. 61.", lk 5798-5808. 2014. [Online]
https://www.researchgate.net/publication/262056408_Regenerative_Braking_System_of_Electric_Vehicle_Driven_by_Brushless_DC_Motor (24.04.2023)
- [31] G. P. Kim et al., "Discharge characteristics of Li-ion and Li-polymer batteries at low temperatures," Journal of Power Sources, vol. 97-98, pp. 703-705, 2001.
- [32] Y. F. Zhang et al., "Investigation of the discharge characteristics of Li-polymer battery under different discharge conditions," Energy Procedia, vol. 16, pp. 71-78, 2012.
- [33] Airrattle Blog, "A Guide To Airsoft AEG Gearbox Parts and How They Work".
16.11.2014. [Online]
<http://blog.airrattle.com/a-guide-to-airsoft-aeg-gearbox-parts-and-how-they-work/>
- [34] Quora Blog, "What causes more accuracy and range in your airsoft gun, a flat top or an H hop?". [Online]
<https://www.quora.com/What-causes-more-accuracy-and-range-in-your-airsoft-gun-a-flat-top-or-an-H-hop>
- [35] AirsoftSociety. [Online]
https://www.airsoftsociety.com/attachments/kwa7_zps45c5031b-jpg.212702/

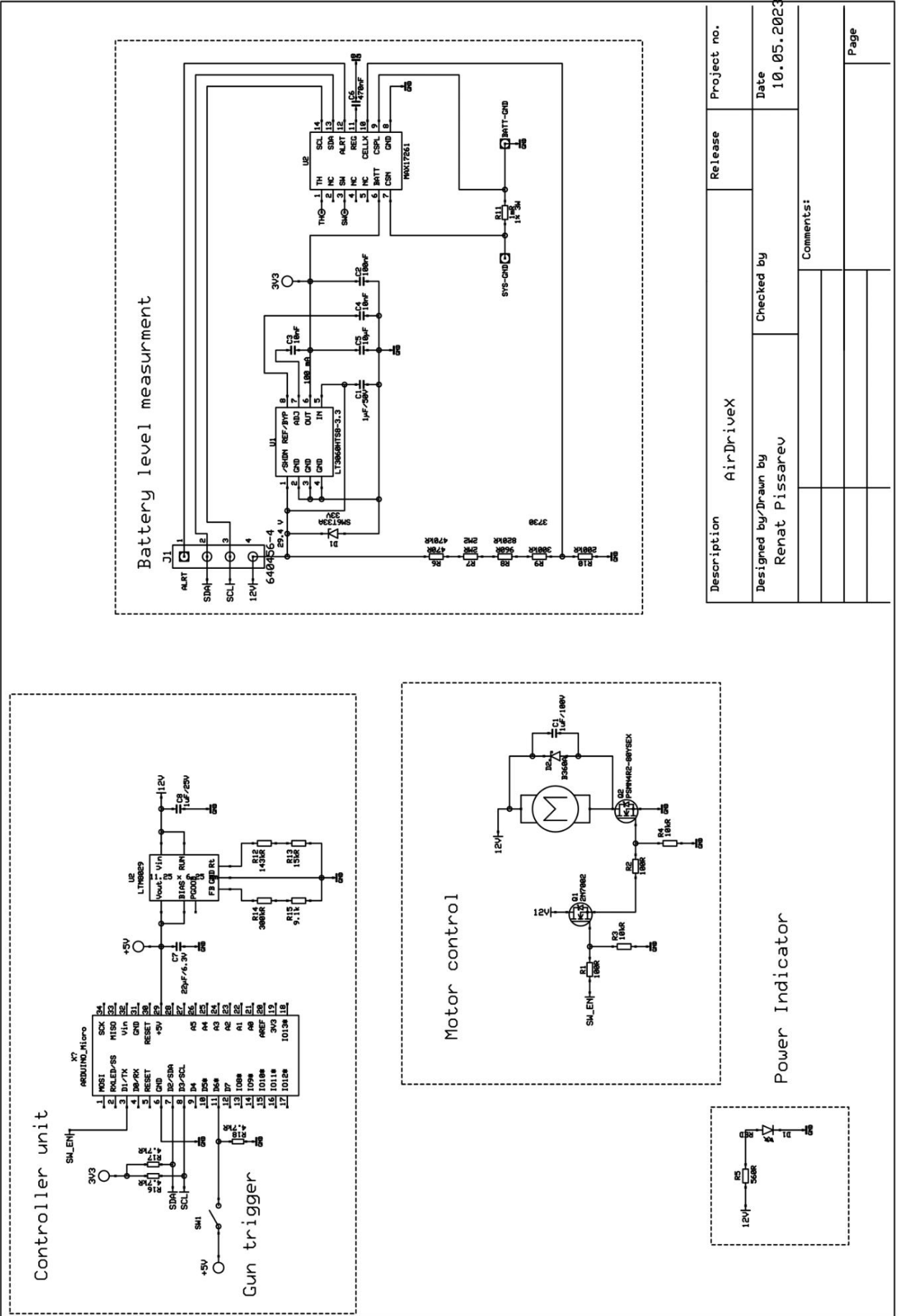
[36] IPC, "Standard for Determining Current Carrying Capacity in Printed Board Design". [Online]

<https://shop.ipc.org/ipc-2152/ipc-2152-standard-only/Revision-0/english>

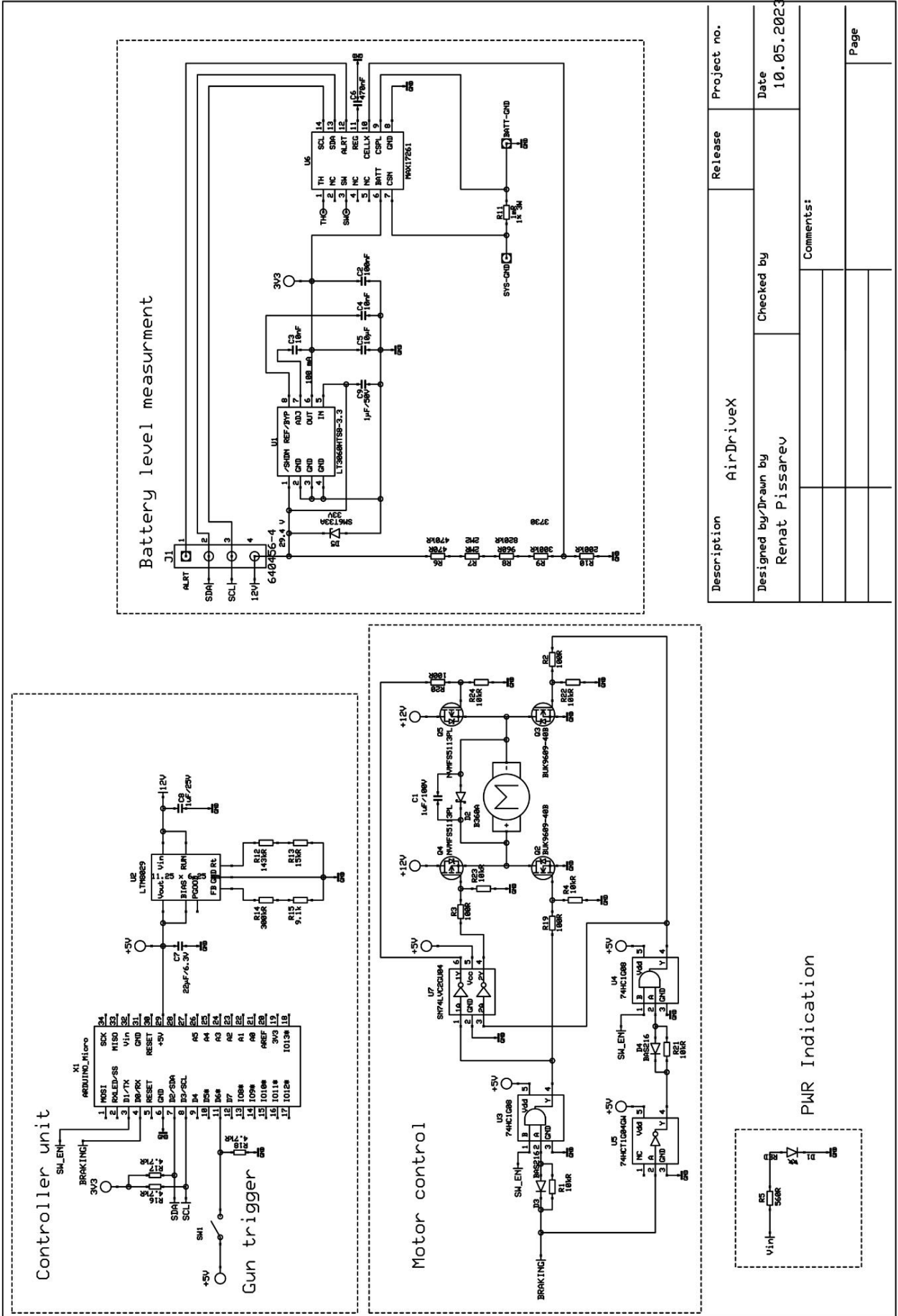
Lisa 1

Süsteemi loogika





Description	AirDriveX	Release	Project no.
Designed by/Drawn by	Renat Pissarev	Checked by	Date
			10.05.2023
Comments:			
			Page



Description	AirDriveX	Release	Project no.
Designed by/Drawn by	Renat Pissarev	Checked by	Date
		Comments:	10.05.2023
			Page

PWR Indication

