

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikan koulutusohjelma

Maaliskuu 2020

Juuso Meri

# SÄHKÖMOOTTORIEN TESTIPENKKI

– Mekaaninen ja sähköinen suunnittelu

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Konetekniikan koulutusohjelma | Koneautomaatiotekniikka

Maaliskuu 2020 | 38 sivua

Juuso Meri

# SÄHKÖMOOTTORIEN TESTIPENKKI

- Mekaaninen ja sähköinen suunnittelu

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Turun ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella ja rakentaa sähkömoottorien testipenkki. Testipenkkiä tullaan käyttämään Turun ammattikorkeakoulussa opetuskäytössä sähkömoottorien ja sen oheiskomponenttien tarkkailuun. Testipenkiltä toivottiin, että sillä voi ajaa kahta sähkömoottoria, joista toinen toimisi kuormana ja toinen ajavana moottorina. Toivottiin myös, että testipenkki olisi edustavan näköinen ja turvallista opiskelijoiden käyttöä.

Opinnäytetyö aloitettiin olemassa olevan keskeneräisen testipenkin tarkastelulla, missä selvitettiin mitä puutteita testipenkissä on. Tarkastelun jälkeen aloitettiin tekemään testipenkin mekaanista- ja sähköistäsuunnittelua. Kun käsitys tarvittavasta kokonaisuudesta vahvistui, alettiin rakentaa testipenkkiä.

Tuloksena saatiin edustava ja turvallinen testipenkki, jolla pystytään ajamaan kahta sähkömoottoria. Moottorit eivät kuitenkaan käyttäytyneet odotetulla tavalla, mutta se on mahdollisesti korjattavissa moottoriohjaimen asetuksia säätämällä.

ASIASANAT:

SolidWorks, CAN-väylä, sähkömoottori

Juuso Meri

## ELECTRIC MOTOR TEST BENCH

- Mechanical and electrical design

The thesis was commissioned by Turku University of Applied Sciences. The objective of this thesis was to design and build a test bench for electric motors. The test bench will be used at Turku University of Applied Sciences for teaching purposes to monitor electric motors and its auxiliary components. It was hoped that the test bench would be able to run two electric motors, one acting as a load and the other as a driving motor. It was also hoped that the test bench would be representative and safe for students to use.

The thesis was started by examining the unfinished test bench, which revealed the shortcomings of the test bench. After the examination, the mechanical and electrical design of the test bench was started. When a clear idea of what to do was established, the construction of a test bench began.

The result was a representative and safe test bench capable of driving two electric motors. Unfortunately, the engines did not behave as expected, but this can possibly be corrected by adjusting the engine driver settings.

### KEYWORDS:

SolidWorks, CAN-bus, electric motor

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>6</b>
<b>2 SÄHKÖKONEET</b>	<b>7</b>
2.1 Epätahtikoneet	8
2.2 Tahtikoneet	9
<b>3 AKKU</b>	<b>11</b>
3.1 Lyijyakkujen toiminta	11
3.2 Litiumakkujen toiminta	12
<b>4 CAN-VÄYLÄ</b>	<b>14</b>
4.1 Perusominaisuudet	14
4.2 Fyysinen kerros	15
4.3 Kehysrakenne	16
<b>5 INVERTTERI</b>	<b>18</b>
<b>6 MEKANIKKASUUNNITTELU</b>	<b>20</b>
6.1 Suunnittelu	21
<b>7 SÄHKÖSUUNNITTELU</b>	<b>27</b>
<b>8 ASENNUS</b>	<b>31</b>
<b>9 YHTEENVETO</b>	<b>35</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>38</b>

## KUVAT

Kuva 1. Oikosulkumoottori [3].	8
Kuva 2. Motenergyn ME1117 kestopagneettimoottori.	9
Kuva 3. Kuva perinteisestä lyijyakusta [4].	11
Kuva 4. Hybrian Li-Ion akku.	13
Kuva 5. Kuva National instrumentsin CAN-liittimestä.	14
Kuva 6. CAN-väylän topologia.	15
Kuva 7. Sanomakehyksen rakenne [5].	16
Kuva 8. Opinnäytetyössä käytetty Sevconin moottorinohjain.	18
Kuva 9. Testipenkin aloitustilanne.	20
Kuva 10. Uusi pohjarakenne.	21
Kuva 11. Teollisuuspyörien kiinnityslevy.	22
Kuva 12. Komponenttien sijoittelu kehikon yläpuolelle.	23
Kuva 13. Komponenttien sijoittelu kehikon sisälle.	23
Kuva 14. Pleksisuojarakenne.	24
Kuva 15. Peltikupusuoja.	24
Kuva 16. Yhdistetty rakenne.	25
Kuva 17. Uusi alumiinirakenne.	25
Kuva 18. Uusi rakenne.	26
Kuva 19. Testipenkin sähköjärjestelmän periaatekuva.	27
Kuva 20. Yksinkertaistettu kuva akun sähkökomponenteista.	27
Kuva 21. Testipenkissä käytetty laturi.	28
Kuva 22. Sähkökaapin vasemmassa alareunassa sulakkeiden vieressä näkyy uusi muuntaja.	29
Kuva 23. Testipenkin CAN-väylän topologia.	29
Kuva 24. Kuva uudesta ohjelmallisesta ohjauksesta.	30
Kuva 25. Kuvassa keskellä ylhäällä näkyy uusi rajakytkin ratkaisu.	30
Kuva 26. Testipenkin peltiosat ennen taittelua.	31
Kuva 27. Pyörät ja pyöränpidikkeet asennettuna testipenkkiin.	31
Kuva 28. Kuva 3D-tulostetuista magneettipidikkeistä.	32
Kuva 29. Kuva moottorista asennettuna testipenkkiin.	33
Kuva 30. Kuva suulakkeista ja kuvuista.	33
Kuva 31. Kuva nimikylteistä.	34
Kuva 32. Kuva valmiista testipenkistä.	35
Kuva 33. Kuva mahdollisesta valomasto ratkaisusta [6].	36
Kuva 34. Kuva Arduino uno mikrokontrollerista.	37

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella ja rakentaa Turun ammattikorkeakoululle opetuskäyttöön tuleva sähkömoottoreiden testipenkki. Testipenkin on tarkoitus toimia alustana, jossa opiskelijat pääsevät tutkimaan sähkömoottoreiden ohjaamista ja käyttäytymistä. Se toimii myös samalla alustana, jossa opiskelijat voivat tutustua, miten täysin sähköllä toimiva ajoneuvo toimii. Koska sähköajoneuvot yleistyvät nopeaa tahtia, on tarpeen tutkia, miten sähkömoottorit toimivat ja käyttäytyvät eri tilanteissa.

Tavoitteena on rakentaa ja suunnitella sähkömoottoreiden testipenkki. Testipenkin pitää pystyä ohjaamaan kahta sähkömoottoria käyttämällä siihen hankittuja moottoriohjaimia, joista toinen moottori toimii kuormana ja toinen ajavana moottorina. Testipenkiltä toivottiin myös, että se olisi ulkoisesti edustavan näköinen ja turvallista opiskelijan käyttöä.

Opinnäyte tehtiin Turun ammattikorkeakoulun tiloissa. Testipenkki on lähes täysin suunniteltu käyttämällä SolidWorks-ohjelmistoa. Kaikki testipenkin teetetyt osat on suunniteltu käyttämällä SolidWorksia. Opinnäytetyössä käytettiin myös aika paljon 3D-tulostinta.

## 2 SÄHKÖKONEET

Sähkökoneet mahdollistavat sähköenergian muuntamisen mekaaniseksi energiaksi. Sähkökoneiden rakenne koostuu pyörivästä ja kiinteästä osasta. Pyörivää osaa kutsutaan roottoriksi ja kiinteää osaa staattoriksi. [1]

Teollisuudessa käytettävistä moottoreista suurin osa on ollut aina vaihtosähkökoneita. Nykyisin myös sähköajoneuvoissa lähes aina käytetään vaihtosähkökoneita. Vaihtosähkökoneiden pyörimisnopeutta voidaan muuttaa joko portaattain muuttamalla staattorikämmityksen napalukua tai portaattomasti säätämällä syöttöjännitteen taajuutta. [1] [2]

Vaihtosähkökoneet voidaan luokitella pitkälti kahteen eri ryhmään, tahti- ja epätahtikoneisiin. Nimitykset epätahti- ja tahtikoneet tulevat siitä, miten roottori pyörii verrattuna syöttöjännitteen taajuuteen. Epätahtikoneessa roottori pyörii aina hieman hitaammalla taajuudella kuin mitä siihen syötetään, toisin kuin tahtikoneissa, joissa roottori pyörii taajuuden mukaan. [2]

Epätahti- ja tahtikoneiden rakenne on lähes samalainen roottoria lukuun ottamatta. Molemmat muodostuvat kolmivaiheisella käämillä varustetulla staattorilla ja sen sisäpuolella pyörivästä roottorista. Tahtikoneen roottori eroaa epätahtikoneen roottorista siten, että siinä on käytetty oikosuljetun häkkikämmityksen sijasta ulkoisella tasasähkölähteellä magnetoitua napapyörää. [1]

Sähkömoottori on usealla tavalla parempi voimalähde kuin polttomoottori. Tässä on muutama esimerkki sähkömoottorin eduista verrattuna polttomoottoriin:

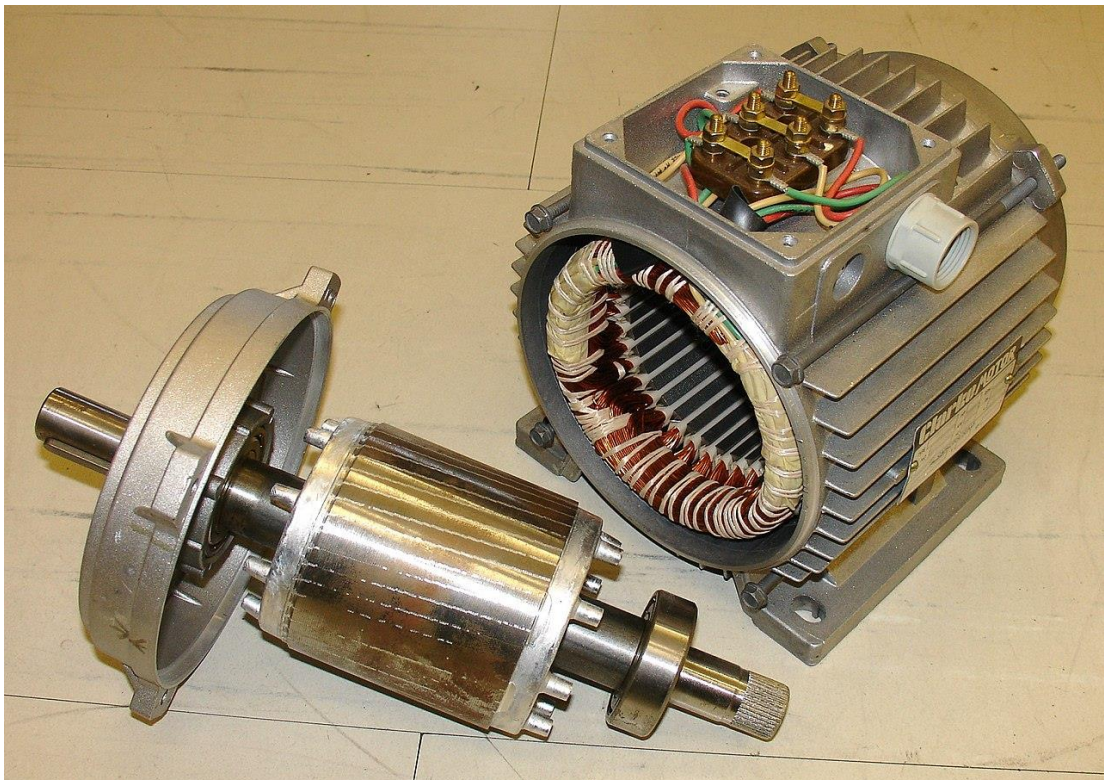
- Polttomoottoreihin verrattuna sähkömoottorilla on paljon parempi hyötysuhde.
- Sähkömoottori on hiljaisempi ja siinä on alhaisempi värinä.
- Käytännössä sähkömoottori on huoltovapaa.
- Sähkömoottori voi toimia myös generaattorina ja sillä voidaan kerätä jarrutusenergia talteen.
- Sähkömoottori ei tarvitse tyhjäkäyntiä, joten siinä ei tarvita mekaanista kytkintäkään.
- Sähkömoottoreissa on tasainen vääntökäyrä.

## 2.1 Epätahtikoneet

Epätahtikone eli oikosulkumoottori on vieläkin ylivoimaisesti yleisin sähkökonetyyppi teollisuudessa. Oikosulkumoottorin nimitys tulee siitä, että roottorin navat on kytketty oikosulkuun. Oikosulkumoottorin perusrakenne on pysynyt lähes muuttumattomana vuodesta 1888. Moottorityypin vahvuuksiin kuuluu sen yksinkertainen rakenne ja että roottorille ei tarvitse erikseen syöttää sähkövirtaa. [2]

Oikosulkumoottorin roottori muodostuu häkkikäämyksestä. Staattorin luoma magneettikenttä indusoi roottoriin virran, minkä takia siihen ei tarvitse erikseen syöttää sähkövirtaa. Roottoriin syntyvä virta saa aikaansa vääntömomentin, joka saa roottorin pyörimään. [2]

Kuvassa 1 näkyy oikosulkumoottori, joka on purettu kahteen osaan. Vasemmalla näkyy oikosulkumoottorin roottori ja oikealla moottorin runko, joka sisältää staattorin. Moottori on käytännössä huoltovapaa laakereita lukuun ottamatta. [3]

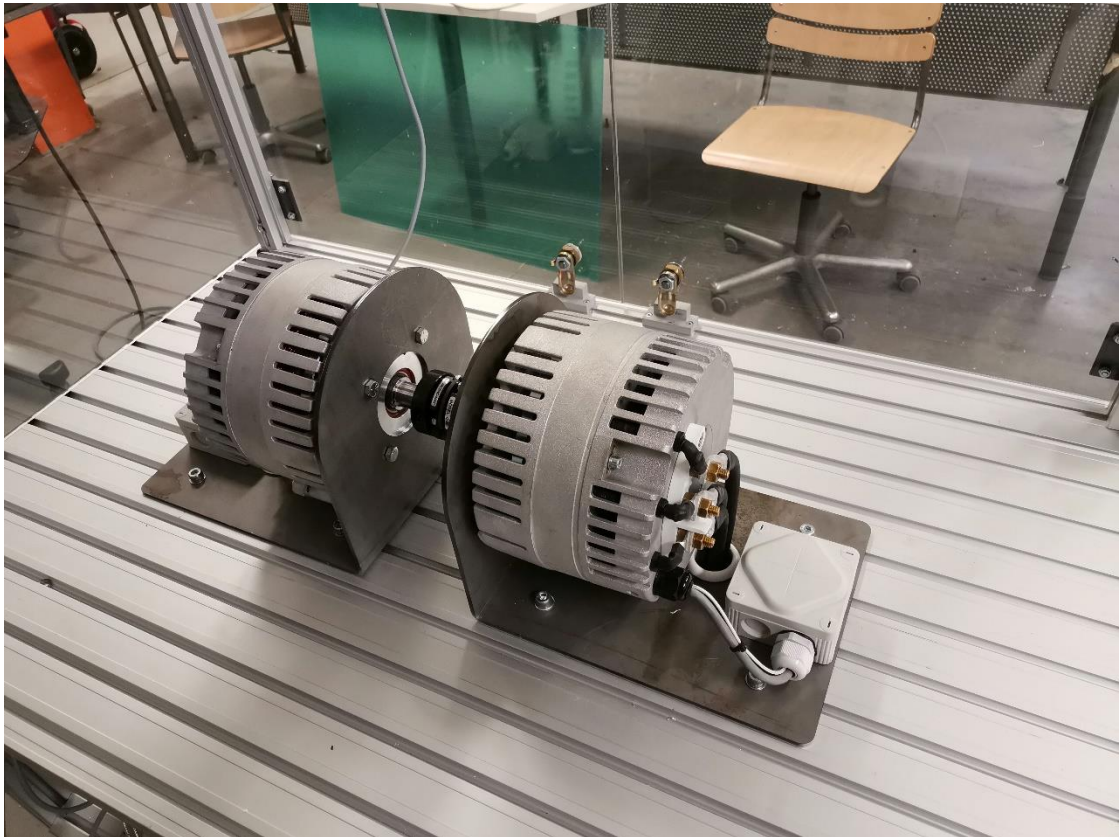


Kuva 1. Oikosulkumoottori [3].



## 2.2 Tahtikoneet

Nykyään uusissa sähköautoissa kestmagneettitahtikoneet ovat yleistyneet, koska niiden vahvuuksiin lukeutuvat suuri hyötysuhde ja vääntömomentti massaa kohden. Kestomagneettitahtikoneet vaativat monimutkaisen ohjauselektronikan roottorin asentoantureineen. Kuvassa 2 näkyy testipenkissä käytetyt kestmagneettimoottorit. [2]



Kuva 2. Motenergyn ME1117 kestmagneettimoottori.

Kestomagneettitahtikoneen ominaisuudet riippuvat äärimmäisen paljon roottorin rakenteesta. Roottoreiden rakenteet luokitellaan joko radiaali- tai aksiaalivuokoneiksi riippuen siitä, missä suunnassa magneettivuo vaikuttaa suhteessa aksellinjaa. [2]

Aksiaalivuokone voi koostua useasta staattori-roottoriryhdistelmästä. Aksiaalivuokoneen rakenne on joko symmetrinen tai epäsymmetrinen. Epäsymmetrisen rakenteen heikkoutena on suuri magneettinen aksiaalivoima, jonka takia akselille on järjestettävä riittävä aksiaalilaakerointi. Jos aksiaalikoneen rakenne on symmetrinen ja ilmaväli on riittävän tarkasti yhtä suuri, niin magneettiset aksiaalivoimat kumoavat toisensa. Aksiaalivoimalla tarkoitetaan voimaa, joka syntyy magneettikentän pyrkimyksestä vetää rautarakennetta

puoleensa. Aksiaalivoima on tyypillisesti moninkertainen vääntömomenttia tuottavaan voimaan nähden. [2]

Radiaalivuokoneissa roottorin rakenne ja magneetit voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Käyttämällä nykyaikaisia kestmagneettimateriaaleja voidaan rakentaa roottori kokonaan ilman rautaa, mutta rakenne vaatii syöttävältä taajuusmuuntajalta suurta kytkentätaajuutta johtuen sen pienistä induktansseista. Raudaton rakenne myös tuhlaa kestmagneettimateriaalia. Kestomagneettiatakoneissa yleensä käytetään rautaosia kestmagneettimateriaalin säästämiseksi. Roottorin rakenne voidaan muodostaa levyrakenteisena tai massiiviosista. Massiiviroottoreissa magneetit ovat liimattu roottorin pinnalle. Levyroottorin rakenne muodostetaan sähkölevyistä samalla tavalla kuin oikosulkumootoreidenkin roottoreissa. [2]

## 3 AKKU

Akut eroavat pattereista sillä, että niitä voidaan ladata. Akut koostuvat negatiivisesta elektrodista (anodista), positiivisesta elektrodista (katodista), ioneja johtavasta elektrolyytistä ja erottimesta. Erotin eristää elektrodit toisistaan. Akut jaetaan kolmeen eri ryhmään niiden akkuteknologian mukaan: lyijy-, litium- ja alkaliakkuihin. Akkujärjestelmät yleensä rakentuvat useista vakiojännitteisistä kennoista. Kytkemällä näitä vakiojännitteisiä kennoja sarjaan saadaan nostettua järjestelmän jännitetasoa. [1]

### 3.1 Lyijyakkujen toiminta

Akkutyypeistä tunnetuin on lyijy Akku (kuva 3). Ne ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja edullisia, mutta niiden heikkoutena on vähäinen hyötösuhde suurilla virroilla ja lyhyt käyttöikä. Lyijyakkuja käytetään monissa eri sovelluksissa, kuten esimerkiksi ajoneuvojen käynnistysakkuina, teollisuuden sähkökäyttöisten kulkuneuvojen voimalähteenä ja vara-voima-akkuina. [1]



Kuva 3. Kuva perinteisestä lyijyakkusta [4].

Negatiivisena elektrodina lyijyakussa toimii huokoinen lyijylevy, positiivisena elektrodina lyijyoksidilevy ja elektrolyytinä toimii veden ja rikkihapon liuos. Lyijyakuissa elektrodit eristetään toisistaan erotinmatolla tai -levyllä, mutta se ei estä ionien kulkua. Lyijyakun purkautuessa, sen positiivisen lyijyoksidilevyn ja negatiivisen lyijylevyn reagoivat rikkihapon kanssa ja muodostavat lyijysulfaattia, vettä ja sähköenergiaa. [1]

Pitkään käyttämättömänä olleen lyijyakun lyijysulfaatti alkaa kiteytyä, jonka takia se ei enää ota osaa kemialliseen prosessiin. Tämä johtaa lyijyakun latauksen heikkenemiseen, kapasiteetin ja virran antokyvyn pienenemiseen. [1]

Lyijyakujen lataus tapahtuu monivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa akun latauslaitte syöttää akkuun vakiovirtaa niin kauan, että kennojännite saavuttaa varausjännitteen maksimiarvon. Toisessa vaiheessa latausvirtaa pienennetään, kunnes akku on täysin varautunut. Kolmannessa vaiheessa ylläpidetään itsestään purkautumista ja säilytetään akun täysi varaus. [1]

### 3.2 Litiumakkujen toiminta

Litiumakkujen käyttö on yleistynyt nopeasti, koska niistä on tullut tehokkaampia ja turvallisempia (kuva 4). Litiumakut yleistyivät aluksi kannettavissa elektroniikkalaitteissa, mutta nykyään niitä käytetään yhä useammin myös sähköajoneuvoissa ja teollisuudessa. [1]

Litiumakkujen edut ovat

- korkea kennojännite
- tasainen purkauskäyrä
- suuri virranantokyky
- pieni itsestään purkautuminen.



Kuva 4. Hybriar Li-Ion akku.

Täyteen ladatussa akussa litiumatomit ovat negatiivisen elektrodin huokoisessa grafiitissa ja tyhjässä akussa positiivisen elektrodin litiummetallioksidissa. Akkua ladattaessa positiivisesti varautuneet litiumionit siirtyvät positiivisesta elektrodista negatiiviseen ja purkautuessa ne siirtyvät päinvastaiseen suuntaan. [1]

Litiumakut luokitellaan kahteen eri ryhmään niiden rakenteen perusteella, litiumioniakkuihin tai litiumpolymeeriakkuihin. Litiumioniakuissa johtavana elektrolyytinä toimii litiumsuolaliuosta ja litiumpolymeeriakuissa on kiinteä elektrolyytti. Akkutyypit on nimetty niiden positiivisen elektrodin metallioksidin mukaan. [1]

## 4 CAN-VÄYLÄ

CAN-väylä on alun perin suunniteltu autojen hajautetun ohjausjärjestelmien tiedonsiirtoon. CAN-väylään käytetään esimerkiksi vaihteistonohjausyksikön, moottoriohjausyksikön ja ABS-jarruysikön välisessä kommunikoinnissa. CAN-väylää soveltaa useat eri ajoneuvovalmistajat, kuten Volvo, Renault, Audi, ja Mercedes-Benz. Vaikka CAN-väylä on alun perin suunniteltu ajoneuvokäyttöön, niin sitä sovelletaan laajasti myös muilla alueilla, kuten kappaletavara-automaatiossa, roboteissa, tekstiilikoneissa, hisseissä ja lääketieteellisissä laitteissa. CAN-väylä sopii siis periaatteessa käytettäväksi mihin tahansa laitteeseen, jossa on lyhyet tiedonsiirtoetäisyydet ja lyhyet viestit. CAN ei sovellu hyvin isojen tiedostojen siirtoon, kuten esimerkiksi videokuvan siirtoon. Kuvassa 5 näkyy opinäytetyössä käytetty CAN-väyläliitin. [5]



Kuva 5. Kuva National instrumentsin CAN-liittimestä.

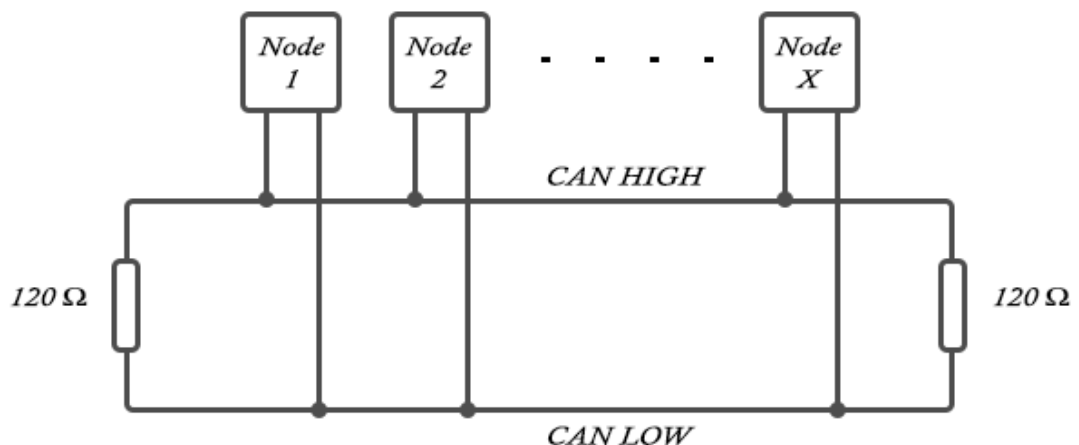
### 4.1 Perusominaisuudet

CAN-väylässä jokainen solmu voi laittaa oma-aloitteisesti sanomaa väylälle. Tämä tekee CAN-väylän luonteesta usean isännän väylän. Väylälle lähetettävät viestit ovat yleisesti

vastaanotettavia, mikä tarkoittaa, että kaikki väylässä olevat laitteet kuulevat viestin, mutta ainoastaan ne ottavat sen vastaan mitkä on määritelty vastaanottamaan niitä. CAN-väylässä siis ei lähetetä sanomaa erityisesti kenellekään. Väylän maksimipituus määräytyy käytetyn väylänopeuden perusteella. Jos väylän nopeus on esimerkiksi 1 Mb/s, niin silloin väylän maksimipituus on 40 metriä, mutta jos väylän nopeus olisi 50 kb/s, niin silloin väylän maksimipituus nousisi 1 000 metriin. [5]

#### 4.2 Fyysinen kerros

CAN-väylässä väyläkaapeli kulkee jokaisen aseman kautta ja se päätetään päätevastukseen, eli CAN-väylä on topologialtaan bus-tyyppiä (kuva 6). Normaalisti CAN-väylässä käytetään parikaapelia, missä on standardin mukaan 40 kierrosta metriä kohden. Voidaan myös käyttää eri ratkaisuja, kuten esimerkiksi optista kuitua. Boschin CAN-spekifikaatiossa ei määritellä sen fyysistä kerrosta, joten myöskään kaapelia ei ole määritetty. Matalissa tiedonsiirtonopeuksissa parikaapelin ei välttämättä tarvitse olla kierrettyä, toisin kuin korkeilla tiedonsiirtonopeuksilla, jolloin kaapeli on yleensä suojattua ja kierrettyä parikaapelia. [5]



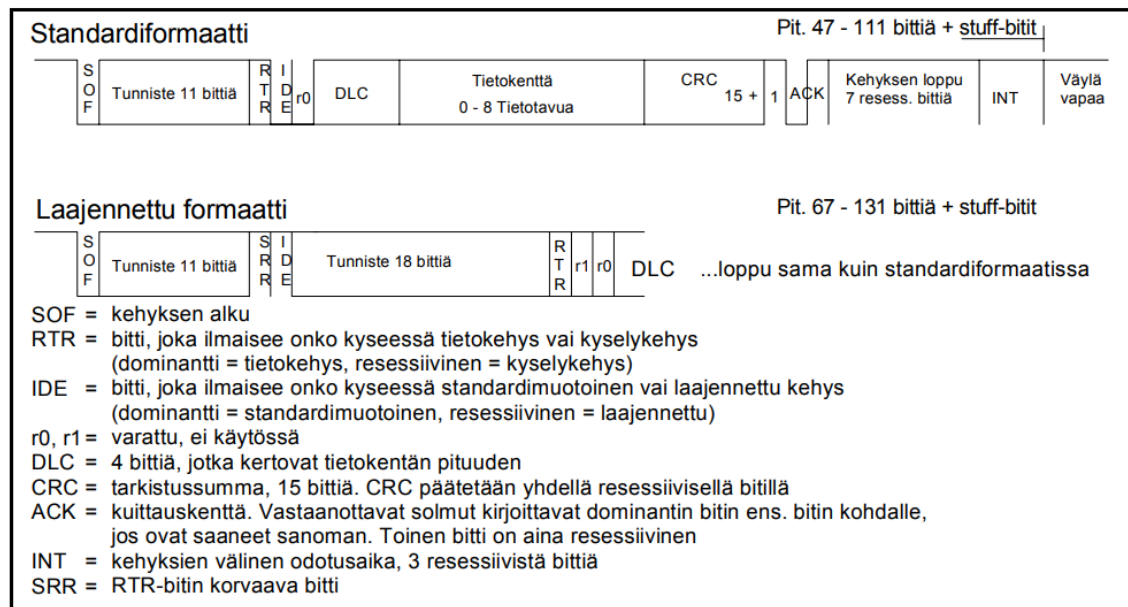
Kuva 6. CAN-väylän topologia.

CAN-väylän käyttämä protokolla perustuu objektorientoituvaa tiedonvälitykseen. Asemissä ei ole osoitteita, vaan väylälle lähetettävät sanomat numeroidaan ja ovat siellä yleisesti vastaanotettavissa. Jos joku laite lähettää tietyllä tunnistenumeraalla väylälle viestiä,

niin mikään muu väylässä oleva laite ei saa lähettää samalla tunnistenumeroilla viestejä. CAN-protokolla ei salli samalla tunnistenumeroilla lähetettäviä sanomia. [5]

### 4.3 Kehysrakenne

CAN-protokollassa määritellään neljä erilaista kehystä: varsinainen sanomakehys, virhekehys, kyselykehys ja ylikuormituskehys. Sanomakehysten pääosat ovat tunnistekenttä, DLC-kenttä ja tietotavukenttä. Tunnistekenttä sisältää sanoman tunnistenumeron, DLC-kenttä ilmaisee tietotavukentän pituuden ja tietotavukenttä sisältää sanoman, jonka maksimipituus on kahdeksan tavua. Sanomakehysten muut kentät ilmenevät kuvasta 7. [5]



Kuva 7. Sanomakehysten rakenne [5].

Kyselykehys on muuten muodoltaan samanlainen kuin sanomakehys, mutta siinä ei ole lainkaan tietotavukenttää ja sen RTR-bitti on resessiivinen [5].

Jos CAN-väylän sanomassa havaitaan virhe, niin silloin lähetetään virhekehys. Virhekehys koostuu kuudesta dominanttisesta bitistä ja kahdeksasta resessiivisestä bitistä. Tämä rikkoo CAN-protokollaa, jonka takia kaikki väylällä olevat solmut toteavat sanoman virheelliseksi ja hylkäävät sen. [5]



Kun halutaan vastaanottavan solmun protokollapiirille saada lisää aikaa, niin voidaan lähettää sanomien välisenä aikana ylikuormituskehys. Ylikuormituskehys ja aktiivinen virhekehys ovat muodoltaan samanlaisia. Ylikuormituskehkyksiä ei juurikaan käytännön järjestelmissä esiinny. [5]

## 5 INVERTTERI

Teollisuudessa invertteriä voidaan kutsua myös taajuusmuuntajaksi tai vaihtosuuntaajaksi ja ajoneuvokäytössä puhutaan myös moottorinohjauslaitteesta (kuva 8). Suurin osa sähköajoneuvoista käyttää vaihtosähkömoottoreita tasasähkömoottoreiden sijasta, koska vaihtosähkömoottorit ovat huomattavasti suorituskykyisempiä ajoneuvokäytössä. Akuista saatava jännite on tasajännitettä, koska sähköenergian varastointi vaihtosähkönä on käytännön sovelluksissa mahdotonta. Sähköajoneuvoissa on oltava aina invertteri, jotta saadaan muutettua akulta tuleva tasasähkö moottorille syötettävään vaihtosähköön. [2]



Kuva 8. Opinnäytetyössä käytetty Sevconin moottorinohjain.

Perusajatus invertterin toiminnasta ei ole monimutkainen: elektronisia kytkimiä ohjataan päälle ja pois käyttämällä mikroprosessoria, niin että saadaan luotua tasasähköstä vaihtosähköä. Oheisella kytkinmallilla voidaan mallintaa invertterin toimintaa. Kytkinmalli sisältää kolme vaihtokytkintä, jotka voivat olla joko positiivisessa tai negatiivisessa kiskossa kiinni. Vaihtokytkimiä ohjaamalla positiivisen ja negatiivisen kiskon välillä voidaan tuottaa vaihtojännitettä. [2]

Invertterin muodostaman vaihtojännitteen taajuus määräytyy pulssin jaksonajasta. Pulssin teho määräytyy sen leveydestä ja amplitudista. Invertterissä käytettyjen komponenttien suorituskyky vaikuttaa suuresti pulssien lukumäärään. Nykyisin kytkiminä käytetään IGBT-transistoreita, koska niiden kytkentätaajuus voi olla 1-16 kHz:n alueella, toisin kun aikaisemmin käytetyillä GTO-tyristoreilla, joiden taajuus oli tyypillisesti alle 1 kHz. [2]

Pulssinleveysmodulaatio eli PWM on yleisin toimintaperiaate inverttereissä. Pulssinleveysmodulaation ideana on katkoa vakiosuuruista syöttöjännitettä pulsseiksi siten, että niistä saadaan integroimalla muodostettua mahdollisimman hyvin siniaaltomaista muodostava syöttöjännite. Pulssinleveysmodulaatiossa kehitettävä pääjännite muodostetaan pulsseista, joilla on vakituinen amplitudi. Tämä toteutetaan ohjaamalla puolijohdekatkoja. Näitä puolijohdekatkoja ohjataan auki ja kiinni siten, että ne muodostavat kamppamaisen pääjännitteen. Pääjännitteen kamman piikkien leveys ja lukumäärä muuttuvat taajuuden muuttuessa. Mitä pienempi taajuus, niin sitä enemmän pulsseja tarvitaan puolijaksoa kohti. PWM-modulaatiossa ohjauselektronikan tulee olla mikroprosessoripohjaista, koska kytkinten ohjaus on hyvin vaativa toimenpide. [2]

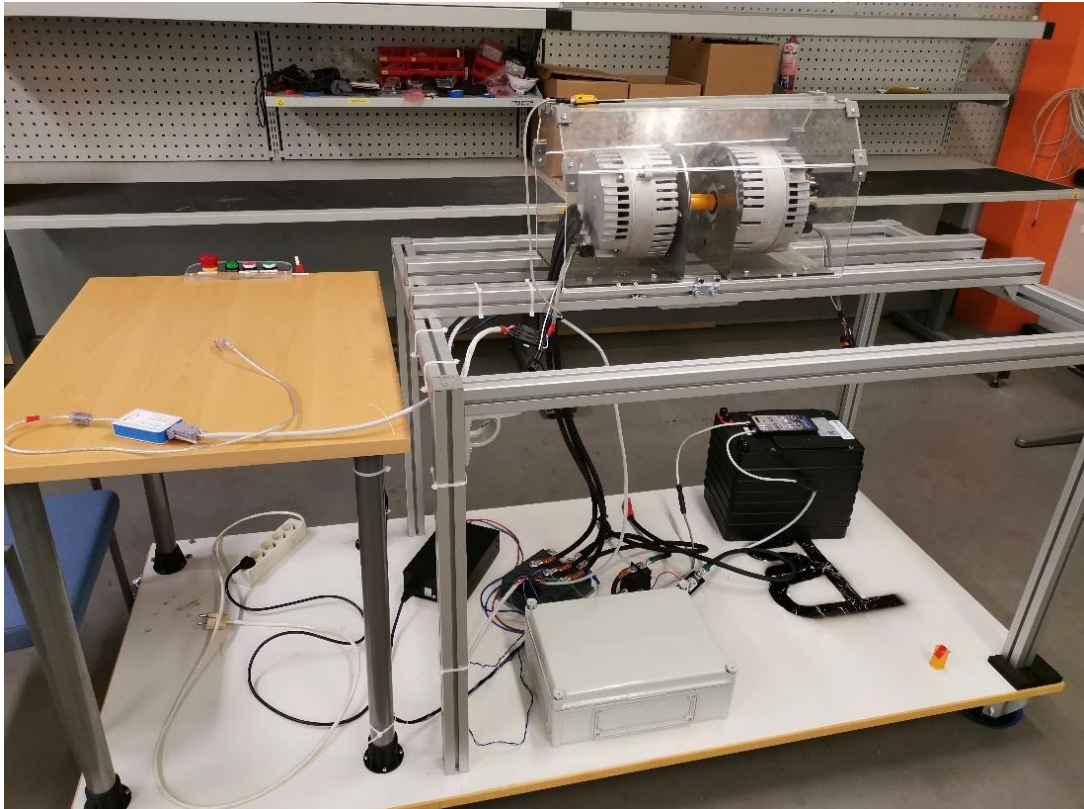
Invertterit käsittelevät suuria tehoja, joten turvallisuuden kannalta on tärkeää tarkistaa sieltä tulevat ja lähtevät johdot, että ne on liitetty kunnolla, koska huono liitos voi aiheuttaa esimerkiksi tulipalovaaran lämmitessään [2].

## 6 MEKANIKKASUUNNITTELU

Tässä osuudessa tarkastellaan testipenkin mekaanista suunnittelua. Työ aloitettiin tutkimaan testipenkin sen hetkinen tilanne, minkä pohjalta tehtiin seuraavat havainnot:

- pohjan rakenne vaikutti heikolta
- sähköistetyt osat kosketeltavissa
- liikkuvat osat kosketeltavissa
- komponenttien sijoittelu jäänyt keskeneräiseksi.

Kun kuvaa 9 tarkastellaan, niin huomataan, että moottoreita lukuun ottamatta mitään muita komponentteja ei suojattu käyttäjältä. Vaikka moottorit on suojattu suojakuvulla, on mahdollista, että käyttäjä pääsee käsiksi moottorin pyöriviin osiin. Suojakupu ei myöskään estänyt käyttäjää pääsemästä käsiksi sähköisiin osiin. Tämän lisäksi myös moottoreiden suojakuvusta puuttui lukitusmekanismi, minkä takia suojakupu saattoi avautua kesken ajon tai testipenkkiä siirrettäessä.



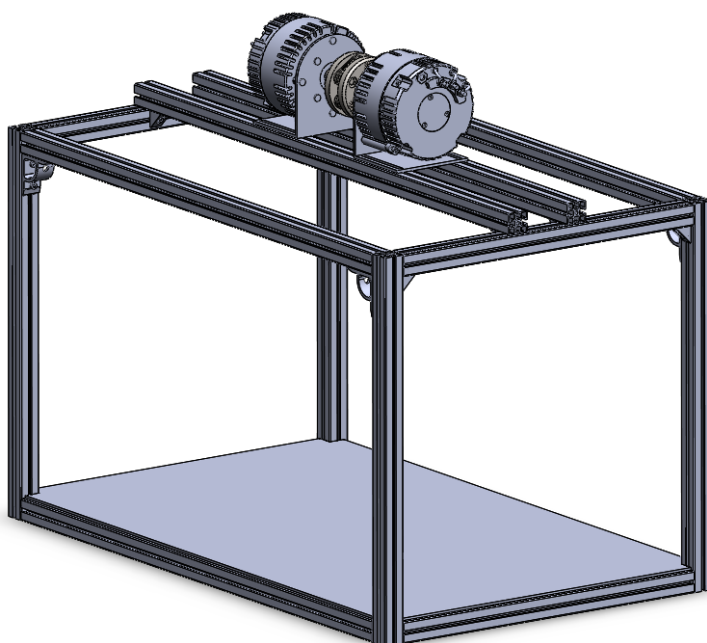
Kuva 9. Testipenkin aloitustilanne.

Kuvasta myös nähdään, että komponentit eivät ole kiinnitettyinä alustaan millään tavalla. Tämä saattaa aiheuttaa vahinkoa niin testipenkin komponenteille kuin käyttäjille, koska testipenkki on liikutettava ja komponentit voivat törmäillä toisiinsa. Pahimmissa tapauksessa akku voi pudota esimerkiksi käyttäjän jalan päälle.

## 6.1 Suunnittelu

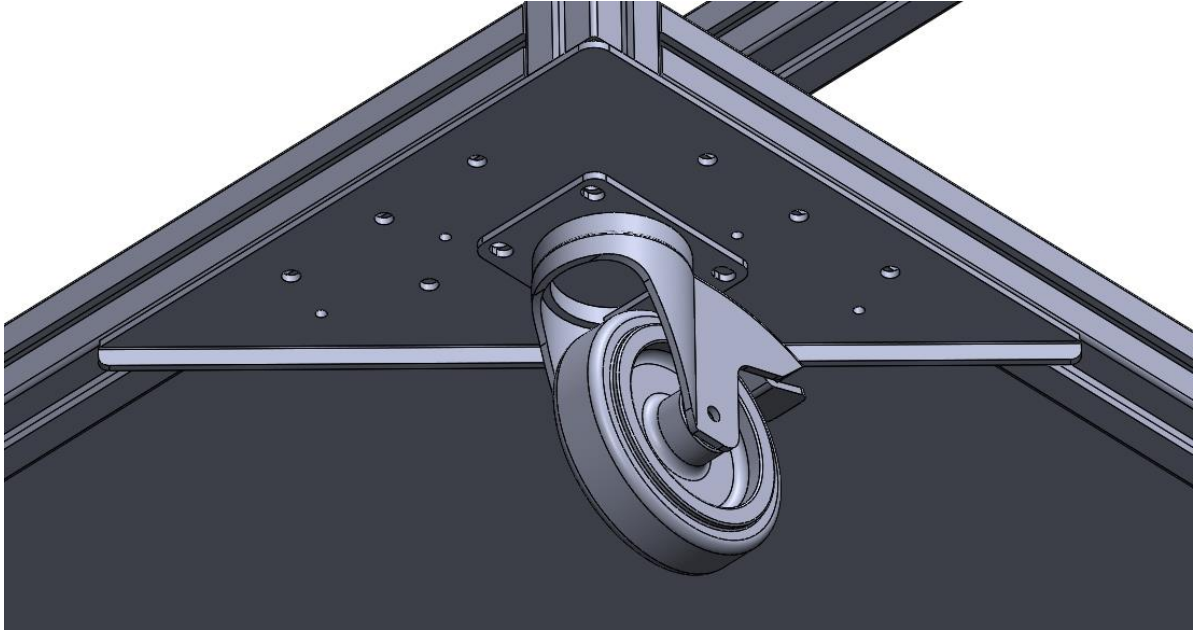
Pohjalevyn rakenteen heikkoutta on vaikea kuvasta nähdä, mutta se oli ilmiselvää paikan päällä. Tämän huomasi, kun testipenkkiä siirsi, niin testipenkki alkoi taipua ja pomppia. Kun testipenkin ympärillä seiso, jalka tuli helposti laskettua pohjalevyn päälle. Tästäkin voisin koitua niin henkilö- kuin myös komponenttivahinkoa.

Testipenkin mekaaninen suunnittelu aloitettiin miettimällä pohjarakenne uusiksi, koska nykyinen pohjalevyratkaisu ei ollut rakenteellisesti tarpeeksi vahva. Pohjalevyä olisi voinut lyhentää noin puoli metriä, että siitä olisi tullut toimiva pohja testipenkkiin, mutta päätettiin toisenlaiseen ratkaisuun. Suunniteltiin pohja kokonaan uusiksi, jotta saatiin testipenkille vähän siistimpi olemus. Alumiinirungon alaosa suunniteltiin samantyyppiseksi kuin yläosa. (Kuva 10.)



Kuva 10. Uusi pohjarakenne.

Pohjalevyn poistuttua piti suunnitella teollisuuspyörien kiinnitys uudestaan. Aikaisemmin teollisuuspyörät oli kiinnitetty suoraan pohjalevyyn, mutta teollisuuspyörien kiinnityslevyn muodon vuoksi sitä ei voitu suoraan kiinnittää alumiinirakenteeseen. Päädyttiin suunnittelemaan teollisuuspyörille suorakulmaisen kolmion muotoisen pidikkeen, joka tulisi alumiinirakenteen pohjaan kiinni. (Kuva 11.)

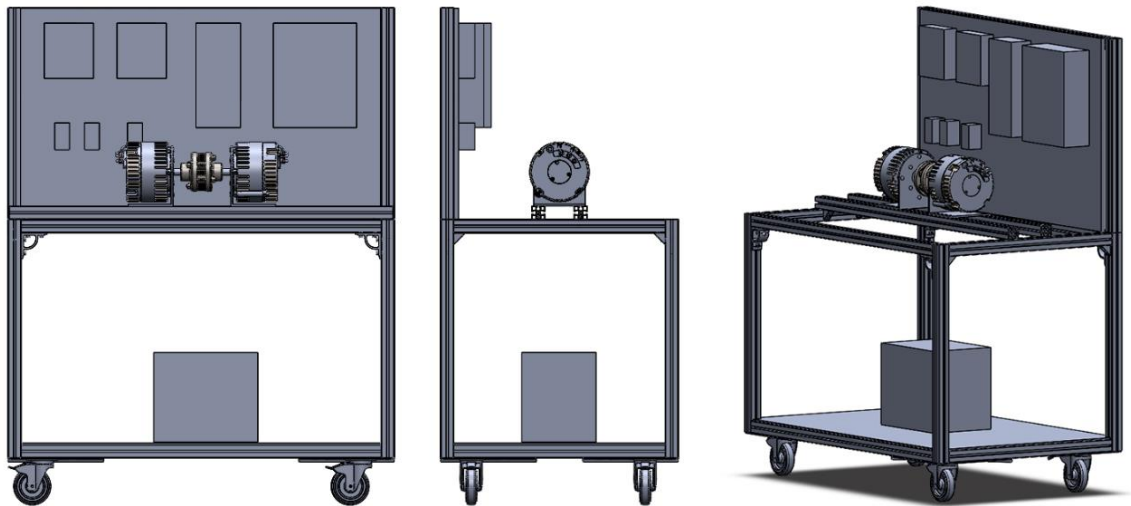


Kuva 11. Teollisuuspyörien kiinnityslevy.

Testipenkki tarvitsi vielä pohjalevyn, jonka päällä komponentit voisivat levätä. Suunniteltiin että leikataan vanhasta pohjalevystä pienempi pala, joka upotettaisiin alumiinikehikkoon. Pohjalevy makaisi teollisuuspyörien kiinnityslevyjen päällä.

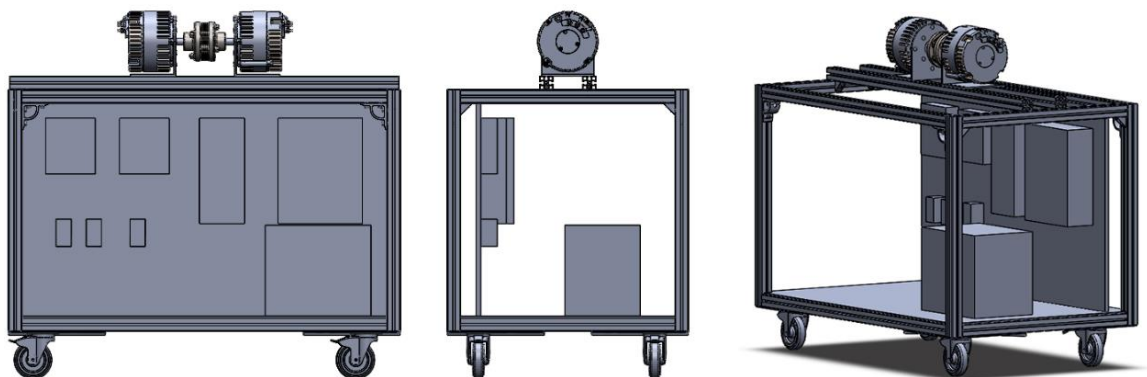
Ennen kuin voitiin miettiä miten suojata komponentit käyttäjän kosketukselta niin piti tietää mihin ne tullaan sijoittamaan. Alun perin testipenkissä oli ajateltu, että kaikki komponentit olisi sijoitettu pohjalevyyn kiinni, mutta päädyttiin kuitenkin suunnittelemaan komponenttien sijoittelun kokonaan uusiksi. Suunniteltiin komponenteille kaksi eri ratkaisua.

Ensimmäisessä ratkaisussa kaikki komponentit akkua lukuun ottamatta tuotaisiin testipenkin rungon yläpuolelle, jotta käyttäjä näkisi lähes kaikki komponentit suoraan. Komponentit asennettaisiin kiinni pystyssä olevaan levyyn. Tämä ratkaisu vaatisi, että levyyn rakennettaisiin jokin kehikko, joka pitäisi sitä pystyssä. Kuvassa 12 näkyy hahmotelma ratkaisusta.



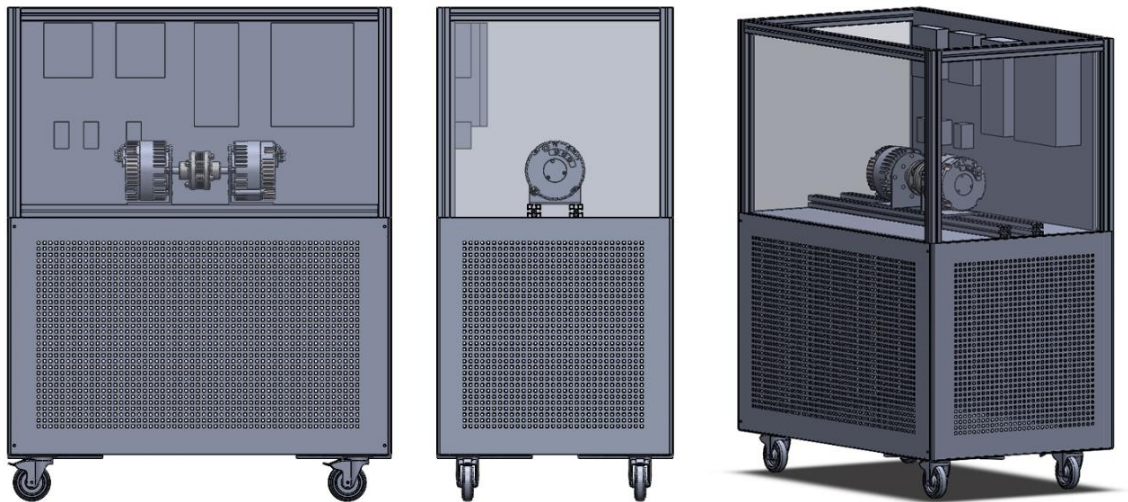
Kuva 12. Komponenttien sijoittelu kehikon yläpuolelle.

Toinen ratkaisu poikkeaa ensimmäisestä siinä, että kaikki komponentit on asennettu alumiinirungon sisälle (kuva 13). Tämä vaihtoehto on helpompi toteuttaa, koska levyille ei tarvitse rakentaa erillistä alumiinikehikkoa, koska voidaan hyödyntää testipenkin runkoa. Huonona puolena ensimmäiseen ratkaisuun on se, että komponentit ovat alumiinikehikon sisällä piilossa eikä käyttäjällä olisi suoraan näköyhteyttä komponentteihin.



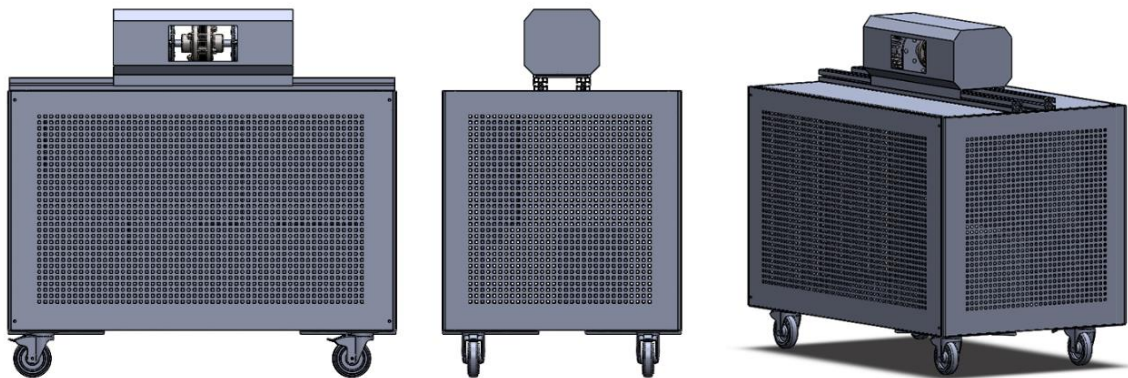
Kuva 13. Komponenttien sijoittelu kehikon sisälle.

Tässä vaiheessa ei vielä päätetty, kumpaa ratkaisua käytetään. Alettiin suunnitella, miten komponentit suojellaan käyttäjän kosketukselta. Komponentit sijoitettiin alumiinikehikon päälle, ja suunniteltiin uutta kehikkoa, jonka ympärille laitettiin pleksilevyt (kuva 14). Pleksilevyt suojaisi komponentteja käyttäjän kosketukselta. Alaosa olisi suojattu kuvioidulla peltilevyllä. Kuvassa 14 näkyy miltä testipenkki näyttäisi tällä hetkellä.



Kuva 14. Pleksisuojarakenne.

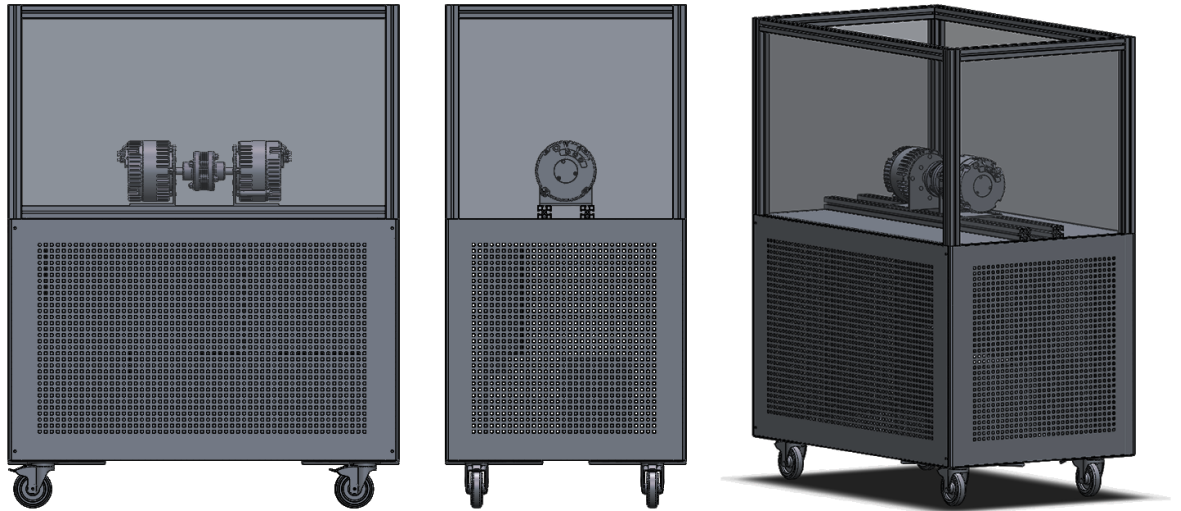
Jos komponentit on sijoitettu alumiinirungon sisälle, niin ei tarvitsisi hankkia uutta alumiinikehikkoa, koska testipenkin alaosa on jo suojattu ohuella peltilevyllä. Moottorin päälle voisi suunnitella yksinkertaisen suojakuvun mikä estää käyttäjä koskemasta vaarallisia osia (kuva 15).



Kuva 15. Peltikupusuoja.

Päädyttiin lopulta yhdistämään molemmat ideat (kuva 16). Luovutettiin moottorin suojakupuihin ideasta, koska se oli ruman näköinen. Päädyttiin käyttämään ideaa missä alumiinirungon päälle tulee toinen kehikko, missä olisi pleksilevyt ympärillä. Siirsimme kaikki komponentit moottoreita lukuun ottamatta alumiinirungon sisälle. Päädyttiin tähän ratkaisuun siksi, että saatiin tehtyä johdotuksista siistimmät, koska johdotukset voi vetää takaseinän taakse piiloon.





Kuva 16. Yhdistetty rakenne.

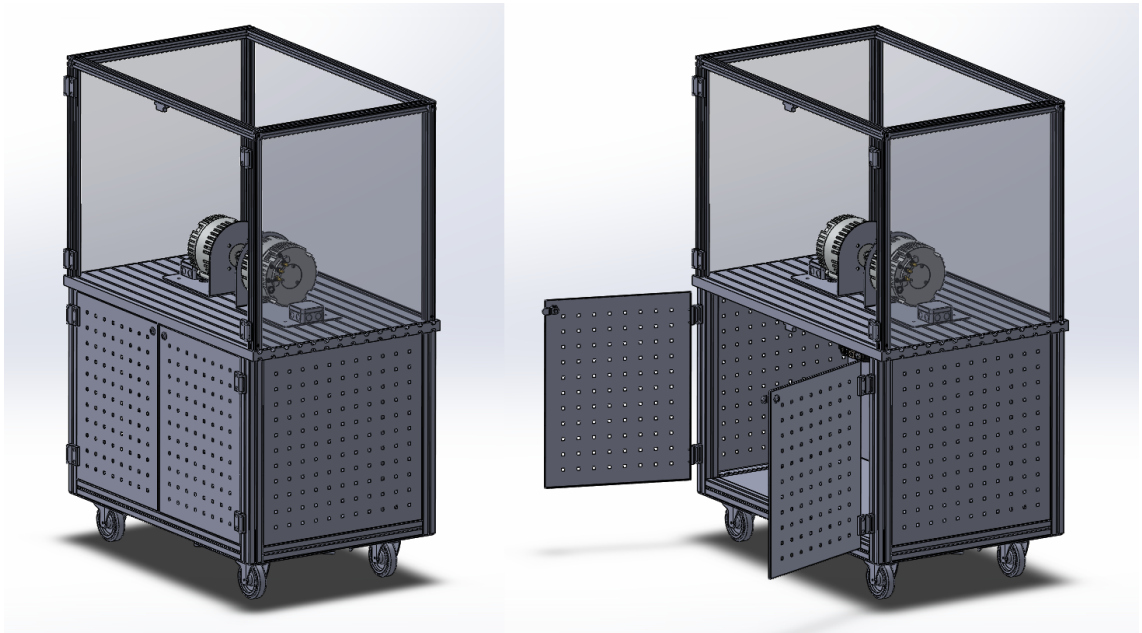
Tässä vaiheessa oli hyvä näkemys millainen testipenkistä on tulossa ja oltiin valmiita tilaamaan osia. Käytiin hyväksyttävässä suunnitelma opettajalta. Ennen kuin lähdettiin tilaamaan osia, niin saatiin opettajalta vinkki käydä tarkistamassa koulun varastosta, jos siellä vaikka olisi jotain mitä voisi käyttää testipenkissä. Varastosta löydettiin täydellinen pohja testipenkiin (kuva 17). Siinä oli samanlainen yläkehikko plekseillä mitä oltiin suunniteltu ja upotettu pohjalevy valmiiksi. Päädyttiin käyttämään löydettyä runkoa.



Kuva 17. Uusi alumiinirakenne.

Koska käytettiin valmista runkoa, niin säästy paljon aikaa ja rahaa. Ylimääräinen aika käytettiin alaosan peltien uudelleen suunnitteluun. Suunnitellut yksinkertaiset suorat pelit vaihdettiin kantattuihin pelteihin. Kantaukset tekivät pelleistä vähän vahvempia ja mahdollisti sen, että ne voidaan upottaa alumiinirakenteeseen. Alaosaan suunniteltiin

avattavat ovet, jotta komponentteja pääsisi tarkastelemaan helpommin. Aikaisimmin olisi pitänyt aina erikseen ruuvata pultit auki, jos olisi halunnut nähdä komponentit (kuva 18).

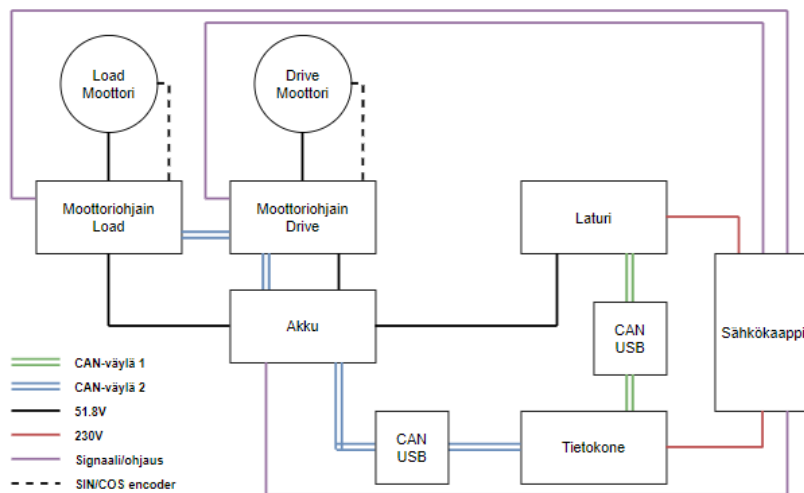


Kuva 18. Uusi rakenne.

Suunniteltiin moottorinpidikkeet uusiksi, koska uuden rungon myötä siihen tuli alumiininen pöytä missä oli valmiit urat kiinnitystä varten, mutta niiden välit eivät täsmänneet meidän kiinnityksien kanssa. Piti myös suunnitella moottorinpidikkeeseen johtojen läpivienti. Läpivienti veisi johdot alumiinipöydän läpi johtokouruun, minkä kautta johdot kulisivat takaseinän taakse.

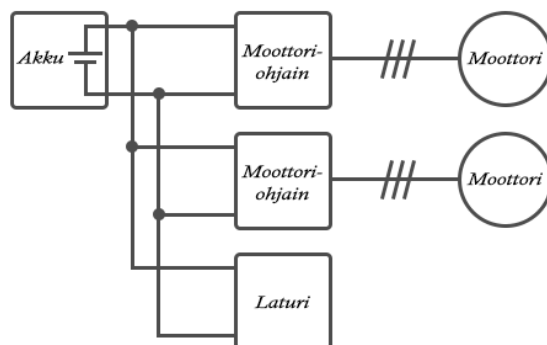
## 7 SÄHKÖSUUNNITTELU

Tässä osuudessa tarkastellaan opinnäytetyön sähkösuunnittelua. Aikaisempi opinnäytetyöryhmä oli tehnyt jo suurimmaksi osaksi sähkökuvat valmiiksi, joten ei tarvinnut kuin tehdä muutamat lisäykset ja muutokset sähkökuviin. Alla olevasta kuvasta nähdään testipenkin sähköjärjestelmien yksinkertainen periaatekuva. Kuvasta 19 näkee miten kaikki sähkökomponentit ovat toisiinsa yhteydessä.



Kuva 19. Testipenkin sähköjärjestelmän periaatekuva.

Aloitettiin lisäämällä akkulaturi (kuva 21). Se oli yksinkertainen projekti, koska ei tarvinnut kuin kytkeä laturi akun kanssa rinnakkain. Tosin myöhemmin kohdattiin ongelma akun ja laturi CAN-väylän yhteensopivuuden kanssa, minkä takia piti rakentaa toinen CAN-väylä pelkästään laturia varten. (Kuva 20.)

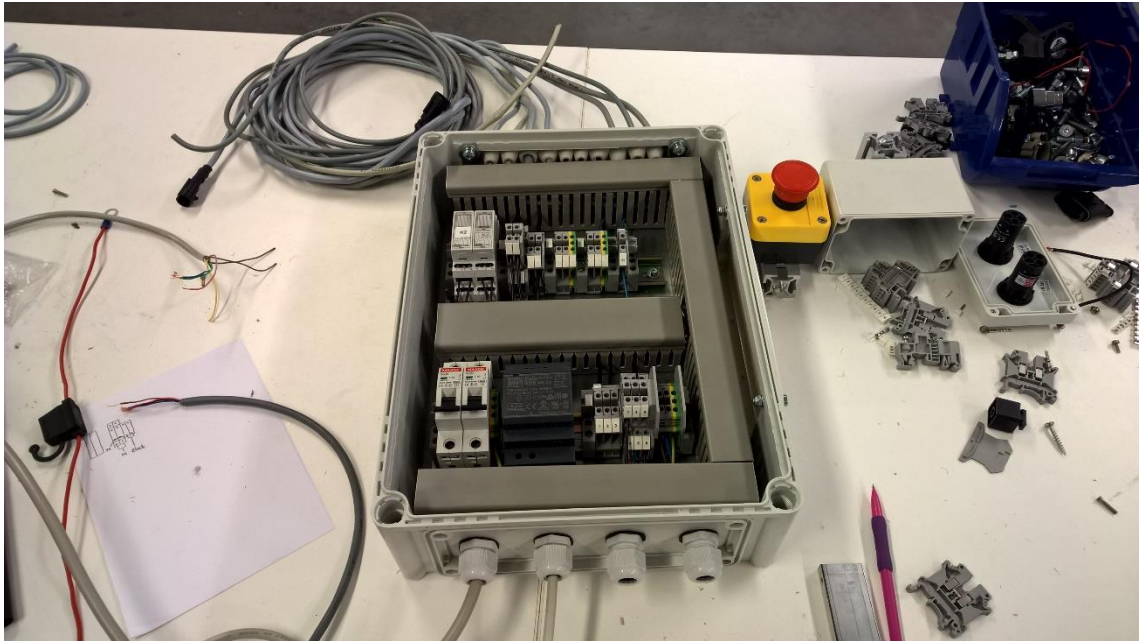


Kuva 20. Yksinkertaistettu kuva akun sähkökomponenteista.



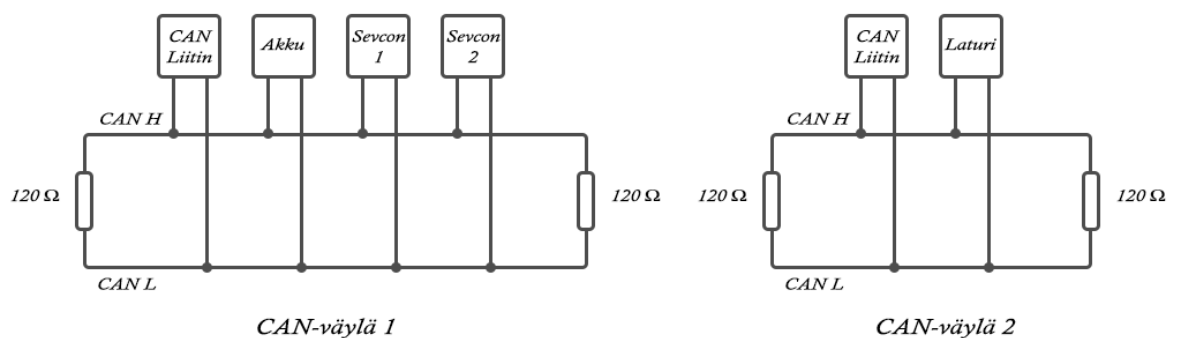
Kuva 21. Testipenkissä käytetty laturi.

Tämän jälkeen vaihdettiin testipenkissä oleva iso ulkoinen 24 voltin muuntaja pienempään, jotta saataisiin se asennettua suoraan sähkökaapin sisälle (kuva 22). Testipenkkiin lisättiin kaksi 10 ampeerin sulaketta turvaamaan käyttäjää vahingoilta, mutta huomattiin myöhemmin sulakkeiden olevan liian pieniä, mikä johti ongelmiin laturin kanssa. Ongelma korjattiin kuristamalla laturin virran syöttöä ohjelmallisesti, mutta sulakkeet on hyvä päivittää myöhemmin suuremmiksi



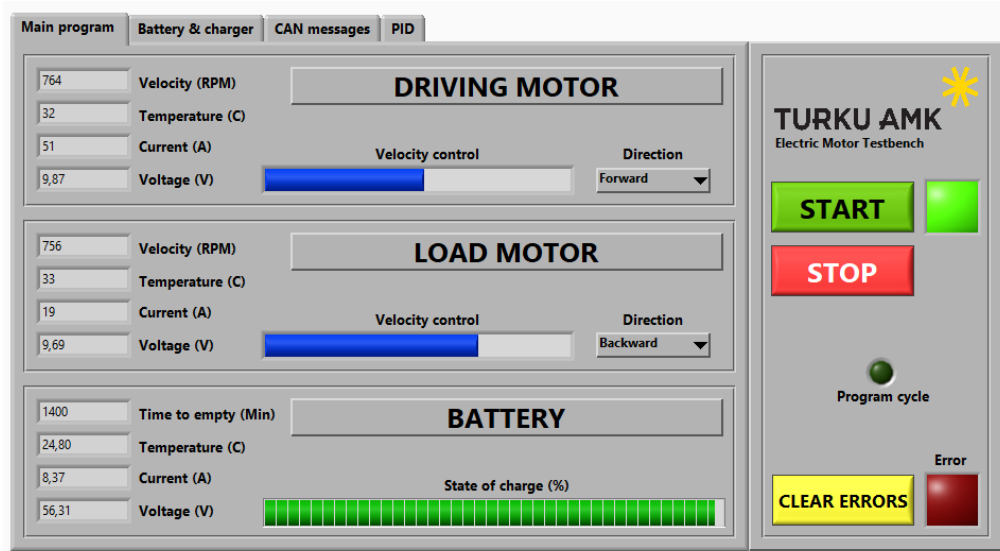
Kuva 22. Sähkökaapin vasemmassa alareunassa sulakkeiden vieressä näkyy uusi muuntaja.

Ensimmäiseen CAN-väylään on kytketty kaikki muut testipenkin komponentit paitsi laturi. Ensimmäinen CAN-väylä sisältää akun, kaksi moottoriohjainta ja CAN liitäntälaitteen. Toisessa CAN-väylässä on vain laturi ja CAN-liitäntälaite. Tarvitsi rakentaa kaksi CAN-väylää, koska akku ja laturi kommunikoivat käyttämällä samaa osoitetta, mikä johti akun suojaan laukeamiseen. Kummankaan laitteen CAN-viestejä ei pystynyt muokkaamaan niin, että ne eivät kommunikoisivat samalla osoitteella. Kuvassa 23 näkyy testipenkin CAN-väylien topologia.



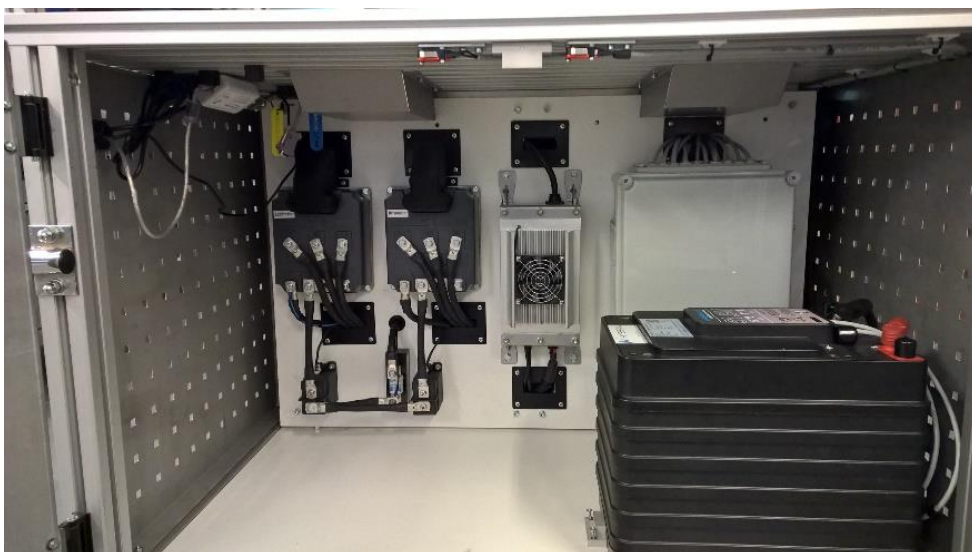
Kuva 23. Testipenkin CAN-väylän topologia.

Alkuperäisessä sähkösuunnitelmassa moottorin nopeudensäätö tehtiin käyttämällä potentiometriä, mutta päädyttiin poistamaan se, koska ohjauksesta tehtiin täysin ohjelmapohjainen. (Kuva 24.)



Kuva 24. Kuva uudesta ohjelmallisesta ohjauksesta.

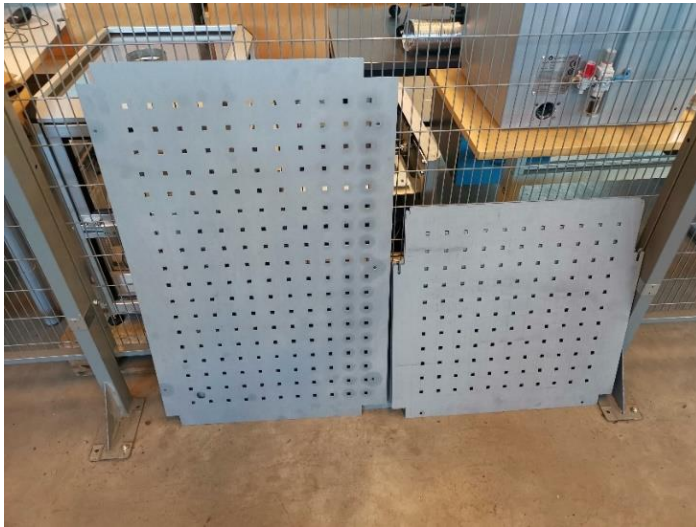
Testipenkkiin laitettiin yhden turvarajakytkimen sijaa neljä, jotta saadaan turvattua käyttäjä vaarallisilta osilta. Hankittiin neljä rajakytkintä tarkkailemaan, että kaikki mekaanisesti liikkuvat ja sähköiset osat ovat suojattujen ovien takana (kuva 25). Sähkökuvien sähköturvapiiri ei juurikaan alkuperäisestä muuttunut, koska yhden rajakytkimen sijasta testipenkissä onkin neljä sarjassa.



Kuva 25. Kuvassa keskellä ylhäällä näkyy uusi rajakytkin ratkaisu.

## 8 ASENNUS

Kun suurin osa suunnittelutyöstä oli saatu tehtyä ja ensimmäiset osat valmistuivat, niin testipenkin asennustyöt aloitettiin. Ensimmäisenä saapuivat koulussa teetetyt metalliosat (kuva 26).



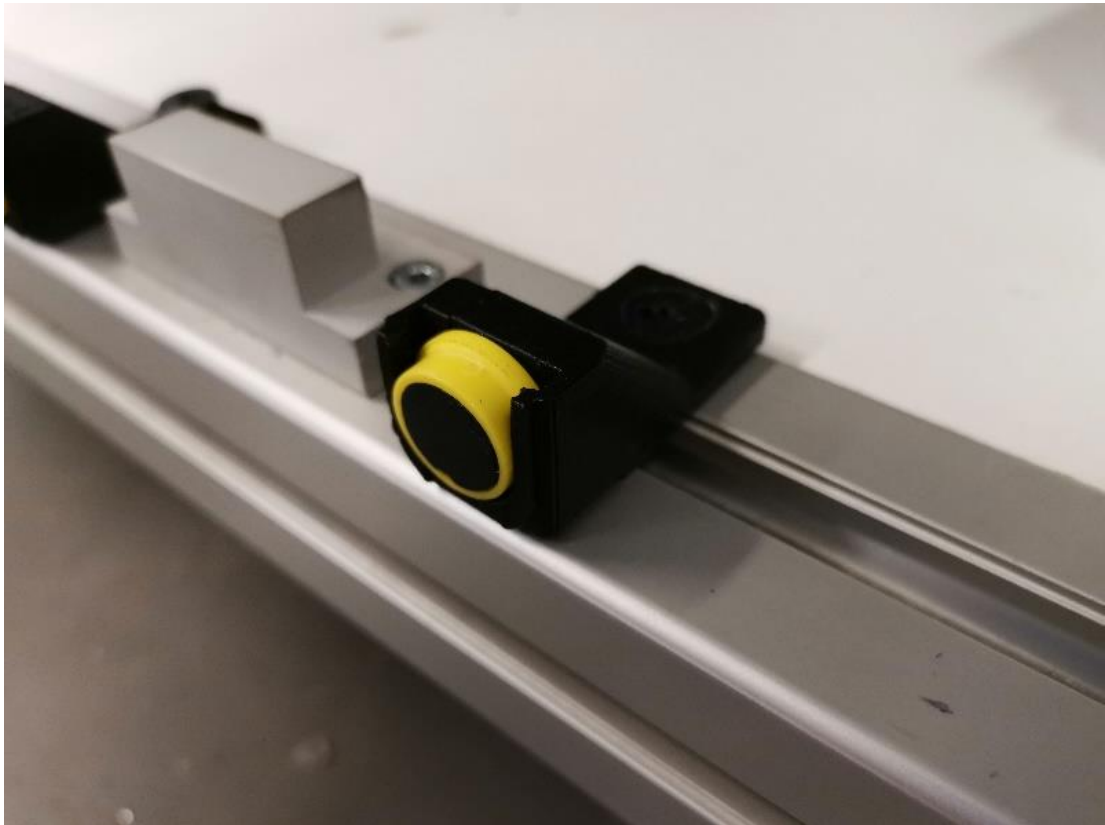
Kuva 26. Testipenkin peltiosat ennen taittelua.

Työt aloitettiin lyhentämällä testipenkin rungon jalkoja 15 senttimetriä. Jalat lyhennettiin, jotta testipenkin tietokonetaso tulisi vähän alemmaksi ja siinä olisi mukavampi työskennellä. Jalat lyhennettiin käyttämällä koulun sirkkeliä. Testipenkin jalkojen lyhennyksen jälkeen siihen asennettiin pyöräpidikkeet ja pyörät (kuva 27).



Kuva 27. Pyörät ja pyöräpidikkeet asennettuna testipenkkiin.

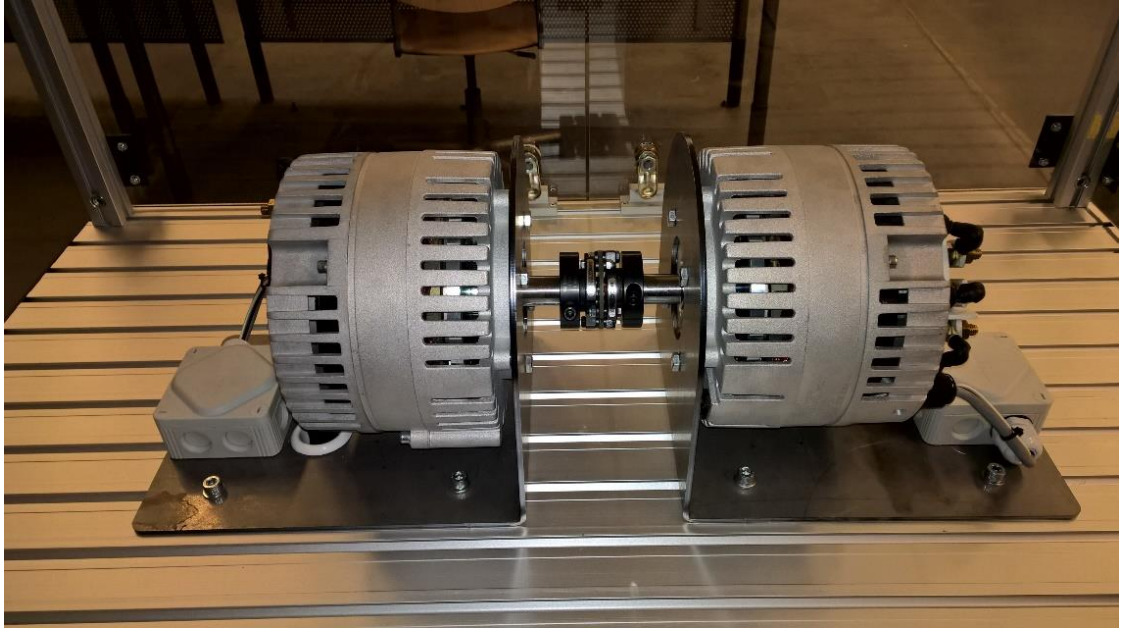
Seuraavaksi tarkistettiin, että kaikki loput teetetyt metalliosat sopivat testipenkkiin ennen kuin sähkökomponenttien asennustyöt aloitettiin. Kaikki osat sopivat muuten hyvin testipenkkiin, mutta ovissa oli ongelma. Ovien rakenne oli liian heikko, minkä takia ne jäivät alhaalta repsottamaan. Ovien yläosassa ongelmaa ei huomannut, koska oven lukitusmekanismi piti sen paikoillaan. 3D-tulostettiin ovien alaosaan kaksi pientä magneettipidikettä mitkä estävät oven alaosan repsottamisen (kuva 28).



Kuva 28. Kuva 3D-tulostetuista magneettipidikkeistä.

Osien sopimisen varmistamisen jälkeen aloitettiin poraamaan testipenkkiin kaapeleiden läpivetoja ja komponenttien kiinnityksiä. Ensimmäiseksi porattiin alumiinipöytään moottorien kaapelireititykset. Kaapelireitityksien poraamiseen käytettiin reikäsahaterää. Kun kaapelireititykset oli porattu, niin aloitettiin kiinnittämään moottoripidikkeitä alumiinipöytään. Alumiinipöydän ja moottoripidikkeiden välissä olisi hyvä olla välimateriaali, mikä estäisi värinästä aiheutuvaa melua. Välimateriaalina voisi toimia esimerkiksi kuminen matto. Asennus vaiheessa ei ollut mitään mitä käyttää välimateriaalina, joten asennettiin kappaleet ilman välimateriaalia. Tästä ei kumminkaan aiheutunut mitään ongelmia, mutta siihen on hyvä jälkikäteen asentaa välimateriaali.





Kuva 29. Kuva moottorista asennettuna testipenkkiin.

Seuraavaksi alakerran puuseinään porattiin komponenttien kiinnitysreiät ja kaapelireiät. Reikien poraaminen ja komponenttien asennus onnistui ongelmitta. 3D-tulostettiin kaapelireitityksille eri kokoisia suulakkeita, jotta johdotuksista tulisi siistimmän näköisiä (kuva 30). Moottorinohjaimen liittimen päälle suunniteltiin kupu, mikä piilottaa moottoriorh-jaimelle tulevat johtimet ja ohjaa ne suulakkeen läpi.



Kuva 30. Kuva suulakkeista ja kuvuista.

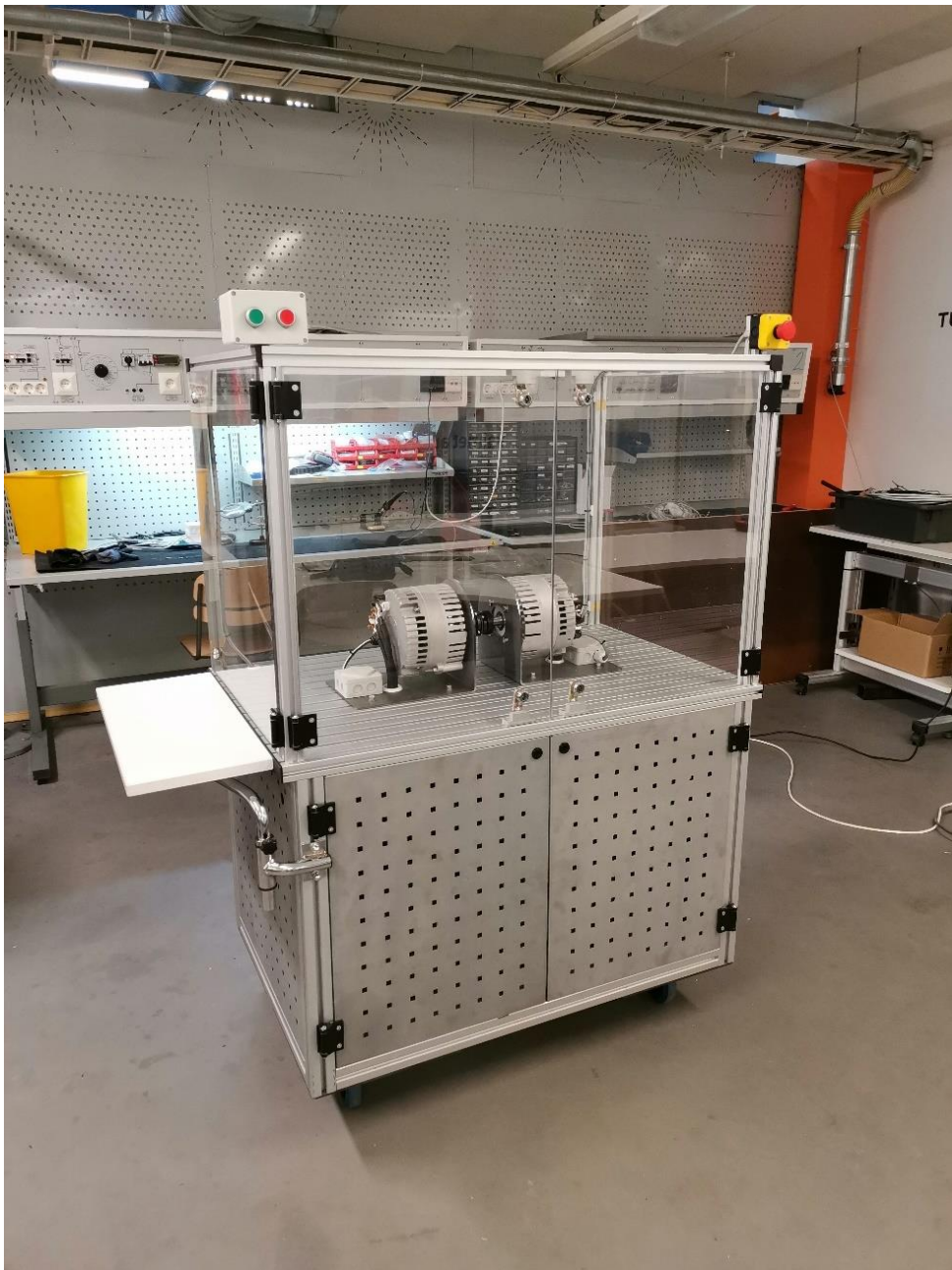
3D-tulostettiin pienet nimikyltit kannettavaan tietokoneeseen meneville johdoille, jotta ne olisit helpompi tunnistaa toisistaan, jos tarvitsee jostain syystä tehdä jotain muutoksia esimerkiksi moottorihjaimen asetuksiin (kuva 31).



Kuva 31. Kuva nimikylteistä.

## 9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoite oli suunnitella ja rakentaa Turun ammattikorkeakoululle sähkömoottoreiden testipenkki. Testipenkiltä toivottiin, että se olisi edustavan näköinen, turvallinen käyttää ja että sillä voi ohjata kahta sähkömoottoria, joista toinen käyttäytyy kuormana ja toinen ajavana moottorina (kuva 32). Opinnäytetyön tekemiseen meni 4-5 kuukautta.



Kuva 32. Kuva valmiista testipenkistä.

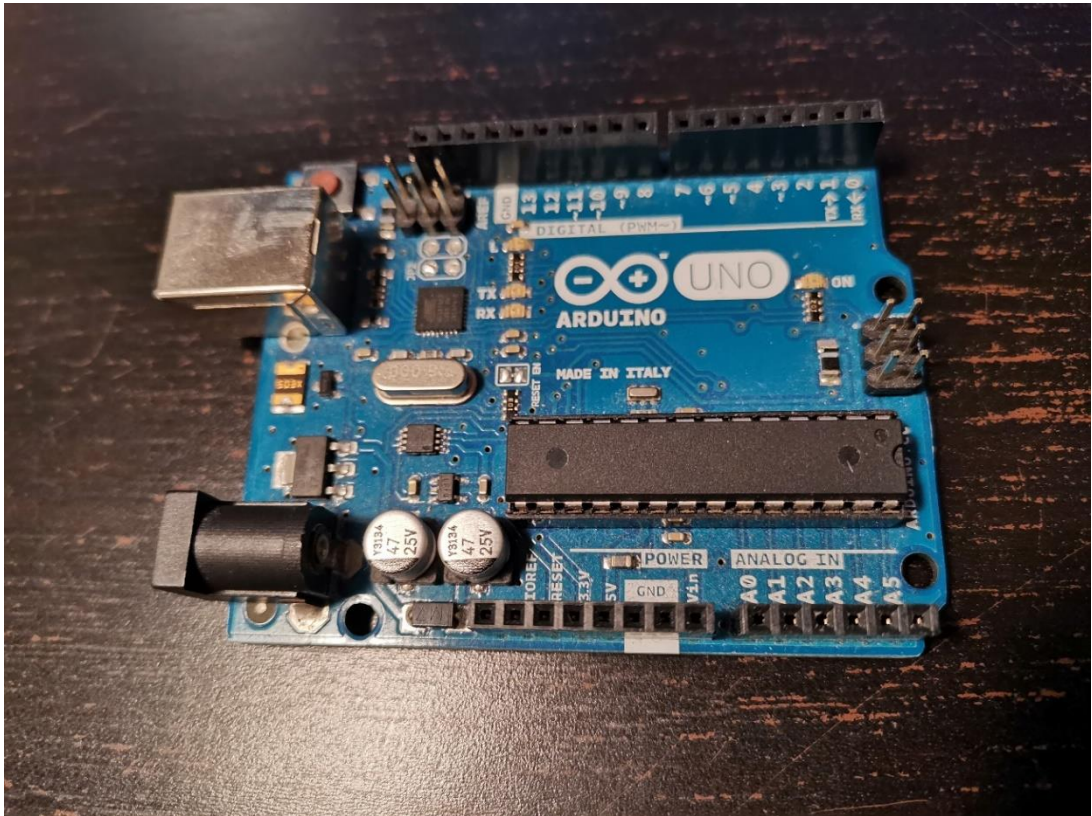
Opinnäytetyö on rakennettu ja suunniteltu Turun ammattikorkeakoulun tiloissa. Lähes kaikki mekaaniset osat teetetty koulun tiloissa kahta pleksi-ikkunaa lukuun ottamatta: ne tilattiin ulkopuolisesta lähteestä valmiiksi leikattuna. Opinnäytetyö onnistui omasta mielestäni hyvin. Onnistuttiin myös karsimaan työstä lähes kaikki havaitut turvallisuus riskit, joten tällä hetkellä käyttäjällä ei pitäisi olla suurta riskiä vahinkoon. Moottoriohjaimien käyttäytymiseen jäi kehitettävää aikataulusta johtuvien rajoitteiden takia, mutta tämä ongelma pystytään korjaamaan moottoriohjaimien parametrien säätämällä. Työ oli äärimmäisen mielenkiintoista tehdä, koska siinä pääsi niin monipuolisesti tekemään kaikkea suunnittelusta rakentamiseen. Saatiin vapaat kädet testipenkin suunnitteluun, kunhan se täytti opettajan vaatimukset.

Opinnäytetyötä tehdessä tuli muutamia eri jatkokehitysideoita ja korjauksia mieleen. Tällä hetkellä testipenkissä on vaikea havaita, ovatko siinä esimerkiksi sähköt kytkettyinä tai onko siellä häiriöitä. Tämä voitaisiin ratkaista asentamalla testipenkkiin valomasto missä olisi vaikka kolme eri väriä, kuten punainen, keltainen ja vihreä (kuva 33). Tämä vaatisi valomajakan lisäksi vielä mikrokontrollerin, jolla voidaan ohjelmallisesti määrittää tiettyjen valojen tilat.



Kuva 33. Kuva mahdollisesta valomasto ratkaisusta [6].

Opinnäytetyötä tehdessä opittiin, että moottoriohjaimia on mahdotonta käynnistää uudelleen ilman fyysistä katkaisijaa, joten tarvitsisi katkaisija asentaa. Jo aikaisemmin mainittu mikrokontrolleri voisi toimia tässäkin ratkaisuna, jos vain pistää sen ohjaamaan relettä mikä kytkee moottoriohjaimeen virrat päälle (kuva 34).



Kuva 34. Kuva Arduino uno mikrokontrollerista.

Moottoripidikkeiden alle on hyvä asentaa joku välimateriaali, kuten esimerkiksi kumi-matto. Tällä hetkellä välimateriaalin puuttumisesta ei aiheudu ongelmia, mutta tilanne voi käytön myötä muuttua. Sulakkeet olisi hyvä vaihtaa suurempiin, jotta laturista saataisiin kaikki tehot irti. Testipenkkiin tilattiin 10 A:n sulakkeet, mutta sulakkeiden mitoitus jäi liian pieneksi, joten jouduttiin kuristamaan akun latausvirtaa. Testipenkissä olisi hyvä olla myös työntökahva, koska tällä hetkellä sitä on vähän epämukava liikuttaa. Opinnäytetyön sähkökuvat jäivät epätarkoiksi. Sähkökuvista näkee miten johdot on kytketty testipenkissä, mutta niistä ei näe tarkasti missä ja miten johdot testipenkissä menevät. Tämä olisi hyvä tulevaisuudessa korjata ja samalla lisätä johtoihin ja riviliittimiin merkintöjä. Mutta kaiken kaikkiaan opinnäytetyö oli omasta mielestä hyvin onnistunut.

## LÄHTEET

- [1] Ahoranta, J. 2015. Sähkötekniikka. 14., uudistettu painos. Sanoma Pro Oy.
- [2] Linja-aho, V. 2012. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen sähköturvallisuus. Autoalan Koulutuskeskus Oy.
- [3] Oikosulkumoottori 2020. Wikipedia. Viitattu 31.1.2020 <https://fi.wikipedia.org/wiki/Oikosulkumoottori>.
- [4] STK = Sähkötekniikan Kaupan Liitto ry. 2020. Akku - TEA023 lyijyakku 38AH/12V – Teknoware. Viitattu 31.1.2020 <https://www.sahkonumerot.fi/7123869>.
- [5] CAN-perusteet. 2019. Oulun Ammattikorkeakoulu. Viitattu 10.12.2019 [https://www.oamk.fi/~eero/OpetusOhjausjarjestelmat/CAN/CAN-perusteet\\_AlaseenMateriaalia.pdf](https://www.oamk.fi/~eero/OpetusOhjausjarjestelmat/CAN/CAN-perusteet_AlaseenMateriaalia.pdf).
- [6] OEM Finland Oy ry. 2020. Valomasto - MODULCOMPACT 70 MM - AUER. Viitattu 31.1.2020 [https://www.oem.fi/tuotteet/keskus/merkinantolaitteet/valomastot\\_-427128/valomasto-modulcompact-70-mm\\_-90704](https://www.oem.fi/tuotteet/keskus/merkinantolaitteet/valomastot_-427128/valomasto-modulcompact-70-mm_-90704).