

Kai Lattu

KUORMITUSTESTIN SUUNNITTELU JA TO- TEUTUS KAHDELLE SÄHKÖMOOTTORILLE

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Huova
Tarkastaja: Kalevi Huhtala
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Kai Lattu: Kuormitustestin suunnittelu ja toteutus kahdelle sähkömoottorille
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Automaatiotekniikan DI-ohjelma
Huhtikuu 2024

Voimansiirtojärjestelmien kehityksessä käytetään kuormitusjärjestelmiä moottoreiden toiminnallisuuden testaamiseen. Kuormittavien testipenkkien on tarkoitus hallitusti ohjata testattavan moottorin kuormaa, jolloin sen toimintaa voidaan testata erilaisilla nopeuksilla, vääntömomentilla ja teholla.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tutkia erilaisia kuormitusjärjestelmiin soveltuvia teknologioita ja suunnitella ja rakentaa kuormittava testipenkki testattavaa järjestelmää varten. Testattava järjestelmä on sähköinen voimansiirtojärjestelmä kahdella sähkömoottorilla, joista molempia on tarkoitus kuormittaa samanaikaisesti. Tavoitteena on löytää sopivat kriteerit testattavan järjestelmän tarpeita varten ja vertailla kuormitusteknologioita niiden avulla. Sopivimman teknologian järjestelmä suunnitellaan yksityiskohtaisesti komponentteja myöden, minkä jälkeen se rakennetaan. Toteutetun testipenkin avulla tehdään yksinkertaisia testejä kuormitettavalle järjestelmälle testipenkin toiminnan verifioimiseksi.

Suunnitelluksi kuormituspenkiksi valikoitui sähköinen voimansiirtojärjestelmä, koska sillä voidaan generoida energiaa kuormituksesta, sitä voidaan pyörittää kahteen pyörimissuuntaan ja sillä voidaan testata karkaavaa kuormaa. Muilla tutkituilla teknologioilla nämä kaikki eivät onnistu. Kuormittavaan testipenkkiin mitoitettiin ja valikoitiin tarvittavat komponentit, joihin kuuluvat sähkömoottorit, taajuusmuuttajat, tehonjakoyksikkö, akut, ohjausjärjestelmä, laturit ja vääntömomenttianturit. Lisäksi testipenkkiä varten suunniteltiin runko komponenttien kiinnitystä varten. Komponenttien valinnassa otettiin huomioon testattavan järjestelmän asettamat vaatimukset kuormittavalle järjestelmälle.

Suunnittelun mukaista kuormituspenkkiä ei voitu tämän työn aikana rakentaa komponenttien liian pitkien toimitusaikojen takia. Rakennettuun versioon piti tehdä muutoksia, mutta sen toiminta-ajatus ja järjestelmäarkkitehtuuri ovat suunnittelun testipenkin mukaisia. Rakennetulla kuormituspenkillä voidaan kuormittaa vain yhtä sähkömoottoria ja pienemmällä teholla kuin oli suunniteltu. Lisäksi siinä on suunnitellusta poikkeava ohjausjärjestelmä ja mittausteijteisto. Toteutetulla testipenkillä tehdyillä yksinkertaisilla mittauksilla kuitenkin voidaan todeta sen toiminnan olevan monella tapaa onnistunut. Sitä voidaan pyörittää molempiin pyörimissuuntiin, sillä voidaan asettaa haluttu vääntömomentti ja sillä voi generoida energiaa kuormituksesta. Karkaavan kuorman toimintaa ei voitu verifioida testattavan järjestelmän rajoitusten takia.

Toteutetun testipenkin pyörimisnopeus ei pysy korkeilla nopeuksilla ohjauksen mukaisena, vaan värähtelee vahvasti. Tämän syyksi voidaan olettaa mekaanisen kytkennän huonon kohdistamisen, järjestelmän rungon heikkouden, tai testattavan järjestelmän takaisinkytkennän väärienlaiset parametrit. Matalalla pyörimisnopeudella nopeus pysyy ohjauksen mukaisena eikä värähtele. Suunnitellulla testipenkillä käytetty runko on stabiilimpi ja mekaaninen kohdistus onnistuu paremmin kuin rakennetulla versiolla, joten samaa ongelmaa ei mahdollisesti tule. Tämän voi kuitenkin vain todeta rakentamalla suunnittelun mukaisen kuormituspenkin.

Suunnittelun mukaisen kuormituspenkin voi rakentaa helposti laajentamalla nykyistä testipenkkiä. Nykyisellä kuormituslaitteella voidaan testata osaa testattavan järjestelmän toiminnallisuudesta, mutta halutun hyödyn saa vain laajentamalla sitä suunnittelun mukaiseksi. Suunniteltua testipenkkiäkin voi laajentaa vielä pidemmälle lisäämällä sen ohjaukseen takaisinkytkennän, jolloin testattavan järjestelmän dynaamisuuttakin voidaan testata helpommin.

Avainsanat: Testipenkki, kuormitusjärjestelmä, sähkömoottori, voimansiirto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Kai Lattu: Load test design and implementation for two electric motors
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Automation Technology
April 2024

In the development of power transmission systems load systems are used to test the functionality of the motors. Load test benches are meant to control the load of the motor to be tested to test the motor's functionality with varying rotation speed, torque and power.

This thesis studies different technologies for load systems after which a load test bench for a specific system is designed and built. The system being tested is an electrical power transmission system with two electric motors, both of which are meant to be under load at the same time. The goal of this thesis is to identify the appropriate criteria for the needs of the tested system and to compare the load system technologies using these criteria. The most suitable technology is used to design the load test bench in detail. The designed test bench is built and simple tests are performed to verify the functionality of the test bench.

The chosen technology for the test bench was an electric power transmission system, because it can be used to generate energy, it is bidirectional and it can be used for runaway load testing. All of these are not possible with the other studied technologies. The components for the test bench are sized and selected. The components include electric motors, frequency converters, batteries, a power distribution unit, chargers, control systems and torque sensors. Also, a rack was designed for the attachments of the components. The selection and sizing of the components was based on the requirements of the system being tested.

During this thesis work it was not possible to build the designed test bench because of long delivery times for the components. The built test bench had to be modified, but the operating idea and system architecture are the same as in the designed version. With the built test bench it is possible to only load one electric motor with a reduced power than what was planned. It also has a different kind of control system and measuring system. However, with the simple tests for the built test bench it can be stated that the functionality is in many ways successful. It is bidirectional, the torque can easily be controlled and it can be used to generate energy. The runaway load could not be tested at this time due to limitations of the tested system.

The rotation speed of the built test bench does not stay constant with the input with a high rotation speed but oscillates strongly. The reason for this could be a bad alignment for the mechanical coupling of the motors, the instability of the rack or the wrong kind of parameters for the feedback loop of the tested motor. With a low rotation speed the speed stays constant with the control signal and does not oscillate. The same problem perhaps does not exist with the designed test bench, because it has a more stable rack and the alignment of the mechanical coupling is easier. However, this can only be tested by building the designed test bench.

The built test bench can easily be extended to the designed test bench. With the currently built load system the functionality of the tested system can partly be tested, but the wanted benefits can only be achieved by extending the built system into the designed test bench. The designed test bench can also be developed further by adding a feedback loop to the control system making it easier to test the dynamics of the tested system.

Keywords: Test bench, load system, electric motor, power transmission

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Hydac Oy:tä mahdollisuudesta kirjoittaa opinnäytetyötä mielenkiintoisesta aiheesta ja saattaa näin opintoni päätökseen. Olen myös kiitollinen kaikista reissuista Saksaan työn merkeissä, joilta koen oppineeni paljon. Lisäksi haluan kiittää Arto Laamasta ja Semjon Gerasymenkoa tuesta ja Mikko Huovaa ja Kalevi Huhtalaa aktiivisesta ohjauksesta tämän työn aikana.

Espoo, 29.4.2024

Kai Lattu

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUTKITTAVA JÄRJESTELMÄ JA KUORMITUSPERIAATTEET	3
2.1 Testattava järjestelmä.....	3
2.2 Hydraulinen kuormituspiiri.....	5
2.3 Moottorigeneraattori.....	8
2.4 Sähkömagneettinen jauhejarru	11
2.5 Valmis dynamometri	13
3. TESTAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU	16
3.1 Kriteerit ja testin tarkoitus.....	16
3.2 Järjestelmien vertailu	19
4. KOMPONENTTIEN VALINTA	24
4.1 Moottori	24
4.2 Taajuusmuuttaja	27
4.3 Akut.....	28
4.4 Tehonjakoyksikkö	34
4.5 Ohjaus	35
4.6 Lataus.....	38
4.7 Momenttianturi.....	40
5. TESTIPENKIN RUNGON SUUNNITTELU	42
6. KUORMITUSLAITTEISTON RAKENTAMINEN.....	46
7. TESTIPENKIN TOIMINNAN VERIFIOINTI.....	50
8. YHTEENVETO.....	56
LÄHTEET	58
LIITE A: SUUNNITELLUN TESTIPENKIN KOMPONENTTIEN SIOJITUS RUNKOON	64

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	engl. Alternating current, vaihtovirta
DC	engl. Direct current, tasavirta
PDU	engl. Power distribution unit, tehonjakoyksikkö

C	energiavaraston kapasiteetti
I	virta
M	pumpun vääntömomentti
n	moottorin pyörimisnopeus
n_{bat}	akkujen lukumäärä
P	teho
p	paine-ero
Q	tilavuusvirta
t	latauksen kesto
U	jännite
v	pumpun pyörimisnopeus
V_g	pumpun kierrostilavuus
w	moottorin pyörimisnopeus
η	kokonaishyötysuhde
η_v	volymetrinen hyötysuhde
τ	moottorin vääntömomentti

1. JOHDANTO

Liikkuvia työkoneita sähköistetään entistä enemmän kasvavien ympäristötavoitteiden myötä. Koneiden sähköistämällä muutetaan voimansiirtoa ympäristön kannalta kestävämpään suuntaan vaihtamalla saastuttavat polttomoottorit sähköisiin voimansiirtojärjestelmiin. Näitä järjestelmiä voidaan ottaa käyttöön muun muassa autoilla, busseilla, kuorma-autoilla ja työkoneilla kuten pyöräkuormaajilla. Tätä kautta koneissa saadaan käytettyä puhtaampaa energiaa.

Vuonna 2023 liikenteen hiilidioksidipäästöt olivat noin 20,2 % koko maailman päästöistä, joten liikkuvien koneiden sähköistämällä olisi huomattavat vaikutukset maailman päästöihin ja ilmastonmuutokseen [1]. Liikenteen päästöjen arvioidaan myös kasvavan nopeammin kuin muiden alojen, joten tulevaisuudessa puhtaamman energian tarve liikenteessä korostuu. Liikenteen päästöjen vähentäminen parantaa myös ilmanlaatua kaupunkiympäristössä, missä liikennettä on runsaasti. [2]

Tämän diplomityön toimeksiantaja on saksalaisen Hydac GmbH -yhtiön suomalainen tytäryhtiö Hydac Oy. Hydac GmbH on kehittänyt liikkuvien työkoneiden sähköistämistä varten eKit48-järjestelmän, jota varten tässä diplomityössä on tarkoitus suunnitella ja rakentaa kuormittava testipenkki.

Uusien teknologioiden testaamista varten voidaan suunnitteluvaiheessa käyttää simulaatioita, mutta tuotteen ollessa valmis simulaatiot eivät ole tarpeeksi luotettavia, joten on tarpeellista suunnitella ja rakentaa testipenkki, eli fyysinen laitteisto toimintojen testaamista varten. Testipenkin rakentaminen on aiheellista tuotteen kehittämisen loppuvaiheessa toimintojen todentamiseksi. Testipenkki tarvitsee kytkentämahdollisuuden testattavaan tuotteeseen, tarvittavat mittauslaitteet testattavaa tuotetta varten ja mahdollisuuden ohjata testattavaa tuotetta halutulla tavalla. [3]

Tässä työssä suunnitellulla testipenkillä kuormitettava eKit48 on kokonaisjärjestelmä, joka voidaan asentaa joko uusiin koneisiin, tai uudeksi tehonlähteeksi jo olemassa oleviin koneisiin. Parhaiten järjestelmä sopii pienikokoisten koneiden ensisijaiseksi tehonlähteeksi tai suurien koneiden aputoimintojen suorittamiseen. Jatkuvaa tehoa järjestelmästä saa vain 14,4 kilowattia, joten se ei sovellu ensisijaiseksi tehonlähteeksi suurten kuormien hallintaan. Käyttökohteita voivat olla esimerkiksi trukit, pienet kaivinkoneet tai betonipumput. [4]

Testattavia moottoreita voi kuormittaa monella eri tavalla. Tässä työssä tutkitaan erilaisia kuormitusmahdollisuuksia ja niiden sopivuutta eKit48-järjestelmän testaamista varten. Testipenkin suunnittelussa käytetään sopivinta kuormitustapaa, jolle valitaan komponentit, runko ja ohjaus. Suunnittelun jälkeen tarvittavat komponentit tilataan niiden toimitusajat huomioon ottaen ja testipenkki rakennetaan käyttövalmiiksi. Lopuksi testipenkillä tehdään yksinkertaisia kuormitustestejä eKit48-järjestelmälle sen toimivuuden todentamiseksi.

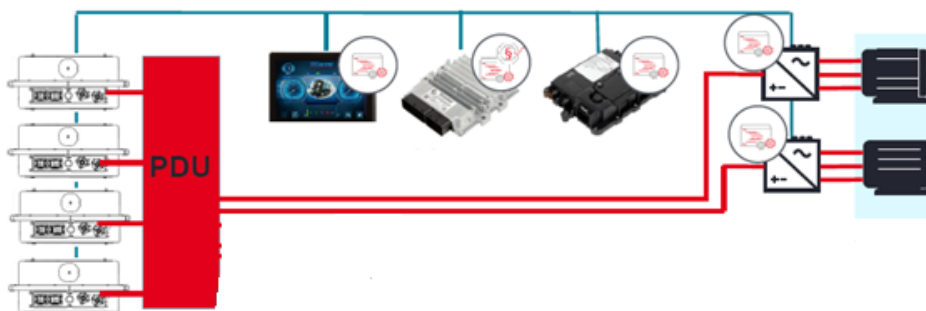
2. TUTKITTAVA JÄRJESTELMÄ JA KUORMITUSPERIAATTEET

Tämän diplomityön tarkoitus on suunnitella kuormittava testipenkki sähköiseen voimansiirtojärjestelmään. Tässä luvussa esitellään testattavan järjestelmän toimintaa ja siihen käytettyä teknologiaa, minkä lisäksi tutkitaan erilaisia teknologioita ja niiden mahdollisuutta testattavan järjestelmän kuormittamiseen.

2.1 Testattava järjestelmä

Kuormitettavalla eKit48-järjestelmällä voidaan toteuttaa sähköinen voimansiirto erilaisiin käyttötapauksiin. Järjestelmä on modulaarinen, eli sillä on erilaisia komponentteja, joita voi helposti yhdistellä isommaksi kokonaisuudeksi. Modulaariset järjestelmät ovat joustavia ja monipuolisia ja niiden räätälöinti asiakkaan tarpeiden mukaan onnistuu sujuvasti [5]. Asiakkaiden tarpeiden perusteella kokonaisuuteen voidaan käyttää yhtä tai kahta keskenään samankokoista tai erikokoista sähkömoottoria, yhdestä neljään kappaletta erilaisia akkuja ja erityyppisiä latureita riippuen halutuista latauspistokkeista. Lisäksi käyttötapauksen perusteella voidaan myös tehdä valinta systeemin jäähdytyksestä ja ohjauksesta. Standardisoitujen moduulien kautta on tarkoitus tarjota asiakkaalle mahdollisimman luotettava ja helppo tapa saada tarvittavat komponentit ja liittää ne toisiinsa. [4]

Tässä työssä suunnitellaan kuormittava testipenkki tehokkaimmalle mahdolliselle eKit48 kokoonpanolle. Siinä on neljä akkua yhdistettynä tehonjakoyksikköön (PDU, power distribution unit), johon on kytketty kahden taajuusmuuttajan kautta kaksi sähkömoottoria. Järjestelmän ohjausyksiköt on kytketty CAN-väylällä taajuusmuuttajiin ja akkuihin. Testattavan kokoonpanon kaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: Testattavan eKit48 järjestelmän kaavio [4]

Järjestelmän toimilaitteena on kaksi sähkömoottoria, joiden toimintaa ohjataan muun järjestelmän avulla. Sähkömoottorit tuottavat käämien ja sähkövirran avulla luodun magneettikentän, joka saa moottorin akselin pyörimään. Sähkömoottorin tyyppiä on erilaisia ja ne eroavat niiden tavasta luoda magneettikenttä moottoriin syötettävän virran avulla. Jotkut moottorityypit toimivat tasaisella sähkövirralla (DC) ja toiset vaihtovirralla (AC). Moottorin koko ja tehokkuus riippuvat pyörimisnopeudesta ja vääntömomentista, jotka moottorilla voi saada aikaan. Pyörimisnopeudelle ja vääntömomentille on nimellisarvot, joilla moottoria voidaan käyttää jatkuvasti, mutta sähkömoottoreita on mahdollisuus käyttää hetkellisesti myös nimellisarvoja suuremmalla teholla. Rajoittavana tekijänä sähkömoottoreilla on jäähdytys, joka estää moottorin ylikuumentumisen ja pitää sen toimintakunnossa. Mahdollisia jäähdytystapoja ovat ilmajäähdytys, joka on toiminnaltaan yksinkertainen ja helppokäyttöinen, sekä tehokkaamman viilentämisen mahdollistava nestejäähdytys. [6]

Sähkömoottoreiden käyttöä ohjataan niihin syötetyn sähkövirran avulla, jonka muuttamiseen tarvitaan taajuusmuuttajaa eli invertteriä. Taajuusmuuttaja muuntaa energiavara-
rastolta saatua tasavirtaista sähköä vaihtovirraksi moottoria varten. Lisäksi taajuusmuuttaja ohjaa virran taajuutta ja jännitettä moottorin halutun nopeuden ja vääntömomentin aikaansaamiseksi. [7]

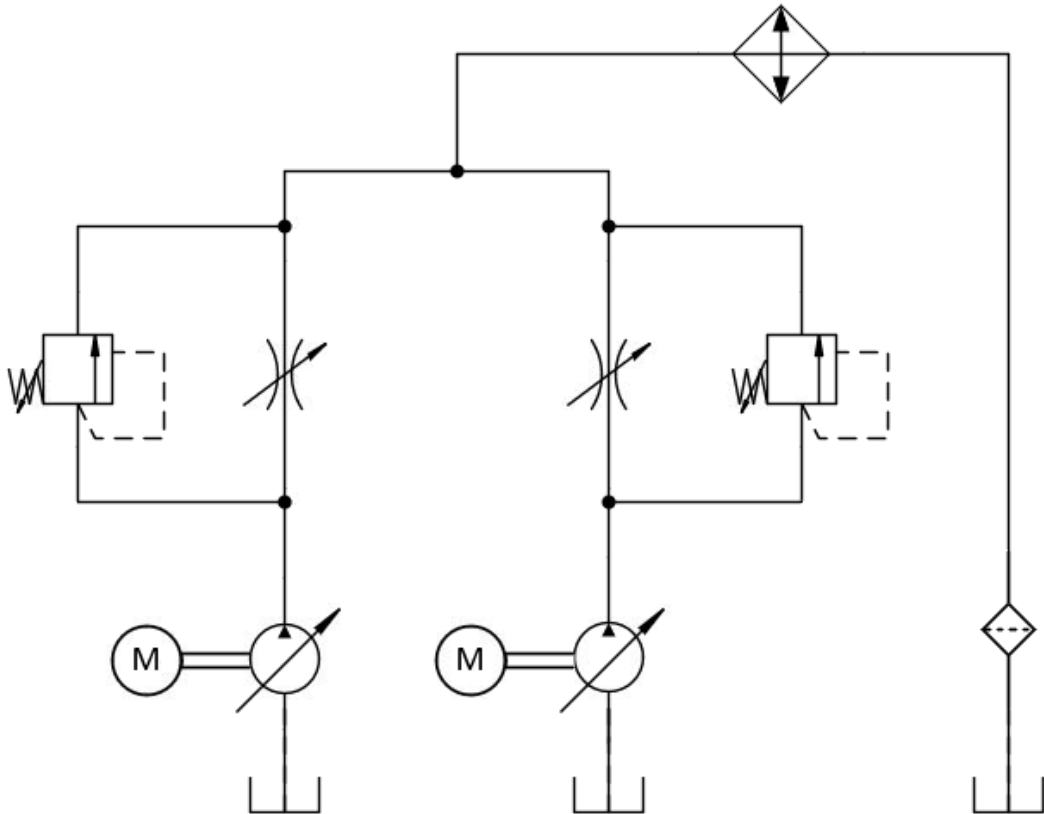
Tehonjakoyksikkö (PDU) mahdollistaa kaikkien sähköisen järjestelmän komponenttien toiminnan yhdistämällä ne toistensa kanssa sähköjakelun kautta. Sitä kautta kulkee järjestelmän kaikki sähköt ja se mahdollistaa sähköjakelun ja sen turvallisuustoimintojen keskittämisen yhteen komponenttiin [8]. PDU:hun voidaan yhdistää monta kappaletta erilaisia energialähteitä, kuten akkuja ja kytkentöjä sähköverkkoon, joiden energia jaetaan tarvittaville toimilaitteille. Yhdistetyt toimilaitteet voivat olla järjestelmän päälaitteet, kuten sähkömoottorit ja niiden taajuusmuuttajat, tai apulaitteet, kuten järjestelmän ohjaus [4]. Tehonjakoyksiköt voivat olla yksinkertaisia, jolloin ohjaus tapahtuu liitettyjen komponenttien kautta, tai älykkäitä, jolloin PDU:n turvallisuustoimintoja voidaan ohjelmoida ja se voi seurata järjestelmän käyttämää virtaa ja jännitettä. [9]

Sähköinen järjestelmä tarvitsee energialähteen, kuten kytkennän sähköverkkoon, mutta liikkuviin koneisiin soveltuu parhaiten sähköakut. Akuilla on käytetyn materiaalin mukaan erilaisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat niiden toimintaan ja joiden perusteella ne valitaan erilaisiin käyttökohteisiin. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi geeliakun kyky kestää hyvin syväpurkauksia ja tärinää, sekä litiumioniakun keveys, pitkäikäisyys ja tehokkuus [10]. Akkupaketteihin on olemassa ohjelmoitavia akun hallintajärjestelmiä, joilla voidaan seurata ja optimoida akkujen energiankäyttöä, arvioida niiden toimintatilaa ja kommunikoida ulkoisen laitteen kanssa [11].

Sähköinen järjestelmä tarvitsee toimiakseen ohjaussignaalin, jonka voi luoda manuaalisesti operaattorin toimenpiteillä tai automaattisen säätimen kautta. Ohjaussignaaleja voi olla erilaisia. Toimilaitteen perusteella signaali voi olla yksinkertainen ja olla päällä ja pois päältä, tai monimutkainen, jolloin ohjauslaitteetkin muuttuvat monipuolisemmiksi [12]. Signaali voi olla valmiiksi määritetty ohjaus, joka ei ota huomioon järjestelmän toimintaa, mutta se voidaan myös ohjelmoida ottamaan järjestelmästä mitattuja arvoja huomioon ohjauksen säädössä [13]. Toinen vaihtoehto on manuaalinen ohjaus, jossa säätö hoidetaan fyysisten kytkinten kautta. Potentiometrillä voidaan säätää signaalin voimakkuutta ja vaihtokytkimellä sen suuntaa [14] [15]. Kytkimen lisäksi tarvitaan ohjausyksikkö muuttamaan signaali kytkimeltä taajuusmuuttajalle sopivaan muotoon, minkä lisäksi niissä voi olla valmiiksi ohjelmoidut turvallisuustoiminnot järjestelmää varten [16].

2.2 Hydraulinen kuormituspiiri

Ensimmäinen tutkittava teknologia kuormittavaa testipenkkiä varten on hydraulinen järjestelmä, jonka toimilaitteina on kaksi testattaviin sähkömoottoreihin kytkettyä hydraulikapumppua. Hydraulisessa kuormitusjärjestelmässä moottorit kytketään hydraulipumppuihin, joilla pumpataan nestettä. Venttiileillä kuristetaan pumppujen tuottama tilavuusvirtaa, mikä puolestaan kasvattaa painetta, joka kasvaessaan vastustaa pumpun liikettä ja kasvattaa sähkömoottorin tehoa. Teho riippuu käytettävän pumpun kierrostilavuudesta, käytettävästä kierrosnopeudesta ja paineesta. Kuormittava hydraulikkajärjestelmä on näytetty kuvassa 2.



Kuva 2: Kuormittava hydraulikkajärjestelmä

Järjestelmässä testattavat sähkömoottorit on kytketty säätötilavuuspumppuun, joka on hyödyllinen tilavuusvirran vaihdellessa paljon [17]. Molempien pumppujen tuottamaa tilavuusvirtaa ohjataan säädettävän virtavastusventtiilin avulla, joka rajoittamalla pinta-alaansa säätelee tilavuusvirtaa ja nostaa siten venttiin yli menevää paine-eroa [18]. Näin molempien pumppujen tehoa voidaan ohjata riippumatta toistensa toiminnasta. Paineenrajoitusventtiileillä rajoitetaan järjestelmän painetta ja estetään painepiikkien syntyminen, mikä suojaa järjestelmän komponentteja [19]. Venttiilien jälkeen eri pumppujen haarat yhdistyvät ja saavat yhteisen jäähdytyksen, minkä jälkeen neste palaa suodattimen kautta takaisin säiliöön.

Hydraulijärjestelmä voi olla joko avoin tai suljettu. Avoimessa järjestelmässä neste palautuu toimilaitteelta säiliöön, josta pumppu jälleen imee sen. Säiliön koko määritellään usein kirjallisuudessa noin 3-5 kertaa järjestelmän käyttämän tilavuusvirran minuutissa mukaan, mutta nykyaikaisilla simuloituilla mitoituksilla päästään huomattavasti pienempiin säiliöihin [20]. Suljetussa järjestelmässä on vähemmän hydraulinestettä ja se pysyy kierrossa koko ajan. Suljettua järjestelmää käytetään yleensä liikkuvissa työkohteissa ja toimilaitteena voi toimia hydraulimoottori. Toimilaitteen suunnan muutos on mahdollinen suljetussa järjestelmässä. [21]

Hydac GmbH:n eKit48-laitteistoa kehittävässä toimipisteessä Saksassa on olemassa hydraulinen kuormitusjärjestelmä, millä järjestelmää voidaan testata. Sen kuormitusmahdollisuus ei kuitenkaan ole testattavalle järjestelmälle riittävä, koska siinä on vain yksi pumppu, mikä mahdollistaa vain yhden moottorin kuormittamisen kerrallaan. Mahdollisuuksien mukaan hydraulista järjestelmää voidaan muokata sopivaksi myös kahden moottorin eKit48-järjestelmän testaamiseen. Tämä helpottaisi kuormitusjärjestelmän suunnittelua ja toteutusta ja nopeuttaisi järjestelmän kokoamista. Käytössä oleva pumppu on säätötilavuuspumppu, jonka tilavuuden voi säätää välillä 27,5 cm³/kierros – 45,7 cm³/kierros [22]. Kuormitusjärjestelmä on avoin järjestelmä. [21].

Pumpun tuottaman tilavuusvirran voi laskea kaavalla

$$Q = n * V_g * \eta_v$$

missä V_g on pumpun kierrostitavuus m³:ssa, n on pumpun kierrosnopeus kierroksissa per sekunti, η_v on pumpun volumetrinen hyötysuhde ja Q on pumpun tuottama tilavuusvirta m³:ssa per sekunti.

Pumpun tuottaman tehon voi laskea kaavalla

$$P = M * v * \eta$$

missä M on pumpun vääntömomentti newtonmetreissä, v on pumpun pyörimisnopeus radiaaneissa per sekunti, η on pumpun kokonaishyötysuhde ja P on pumpun antoteho wateissa.

Tarvittava paine saadaan laskettua kaavalla

$$p = \frac{\eta * P}{Q}$$

missä P on ottoteho wateissa, Q on tilavuusvirta m³:ssa per sekunti, η on pumpun kokonaishyötysuhde ja p on paine-ero pumpun yli pascalleissa.

Hydraulisessa kuormitusjärjestelmässä hyviä puolia ovat sen yksinkertaisuus ja toimintavarmuus. Sillä on mahdollista siirtää suuria voimia pienillä komponenteilla, ja sen toimintaa on helppo säätää. Lisäksi hydrauliset pumput kestävät suuria vääntömomenteja ja paljon tehoa. Monia mittauksia voidaan tehdä suoraan hydraulisten komponenttien ja nesteiden avulla, jolloin erillisiä antureita kuormittavalle puolelle ei tarvita. [23]

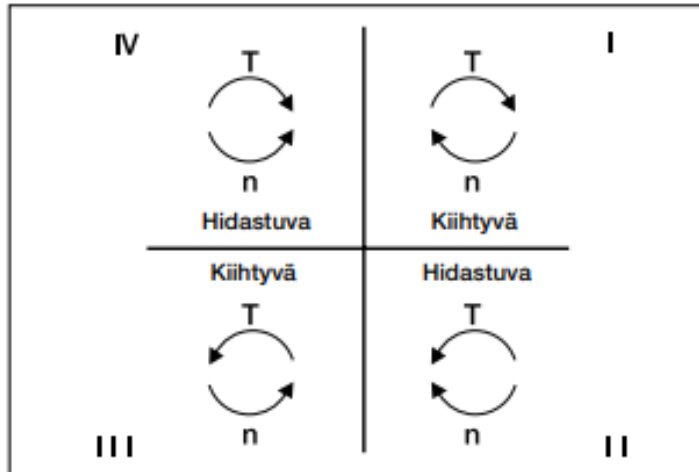
Rajoittavia tekijöitä hydraulisessa järjestelmässä ovat sen jäähdytysvaatimukset ja iso säiliö nesteelle. Hydraulipumppujen pyörimisnopeus ei usein pääse yli 3000 kierroksen minuutissa. Tarvittaessa korkeamman pyörimisnopeuden voi saavuttaa kertojavyönteillä, mikä asennetaan pumpun ja moottorin väliin [24].

Hydraulisella kuormitusjärjestelmällä voi hydraulipumpuilla kuormittaa testattavaa järjestelmää, mutta testipenkistä saa monipuolisemman käyttämällä hydraulipumpun sijaan pumppumootoria. Pumppumoottori voi toimia sekä pumppuna että moottorina. Se kytketään mekaanisesti sähkömoottoriin, joka voi pyörittää sitä pumpun tavoin. Vaihtoehtoisesti pumppumoottorin yli menevät paine-eron seurauksena hydraulineste luo siihen liikettä, jolloin se toimii moottorin tavoin ja pyörittää siihen kytkettyä moottoria [25]. Näin olisi mahdollista testata testattavan järjestelmän moottorin toimintaa jarruttamalla sen luomaa liikettä pumpun avulla, minkä lisäksi sen generaattorin toimintaa voidaan testata pyörittämällä sähkömoottoria hydraulipumpulla. Hydraulisessa paineakussa on korkea tehotiheys, mutta matala energiatiheys, joten siinä olisi mahdollista varastoida vain pieni määrä energiaa [26]. Testattavan järjestelmän generaattorien pyörittäminen onnistuisi siis vain lyhyen hetken ajan, ellei lisätä erillistä pumppua pitämään paineakkujen paine-eroa yllä. Tämä vaatisi myös paine-eroa ylläpitävää pumppua ohjaavan järjestelmän lisäämisen kuormituspenkkiin. Toimiakseen pumppumoottori tarvitsee suljetun järjestelmän, joten toimipisteessä valmiina olevaa hydraulista kuormitusjärjestelmää ei voisi käyttää pumppumoottorin toimintaan [21].

2.3 Moottorigeneraattori

Toinen tutkittava konsepti kuormitusjärjestelmää varten on sähköinen järjestelmä, jonka kuormittavina toimilaitteina ovat moottorigeneraattorit, joiden akselit kytketään mekaanisesti kiinni testattavan järjestelmän moottoreiden akseleihin ja kuormittavat niitä. Sähkömoottoreita voidaan käyttää myös generaattorin tavoin muuttamaan mekaanista energiaa sähköiseksi energiaksi jarruttamalla akselin pyörimistä. Moottoreita ohjataan taajuusmuuttajilla, joista yhdelle moottoreista asetetaan haluttu pyörimisnopeus ja toiselle haluttu vääntömomentti.

Sähkömoottoreiden toiminta voidaan jakaa neljään kvadranttiin. Moottorit voivat joko kiihdyttää tai jarruttaa akselin liikettä ja akseli voi pyöriä sekä myötä- että vastapäivään. Tämä neljän kvadrantin toiminta on kuvattu kuvassa 3. [27]

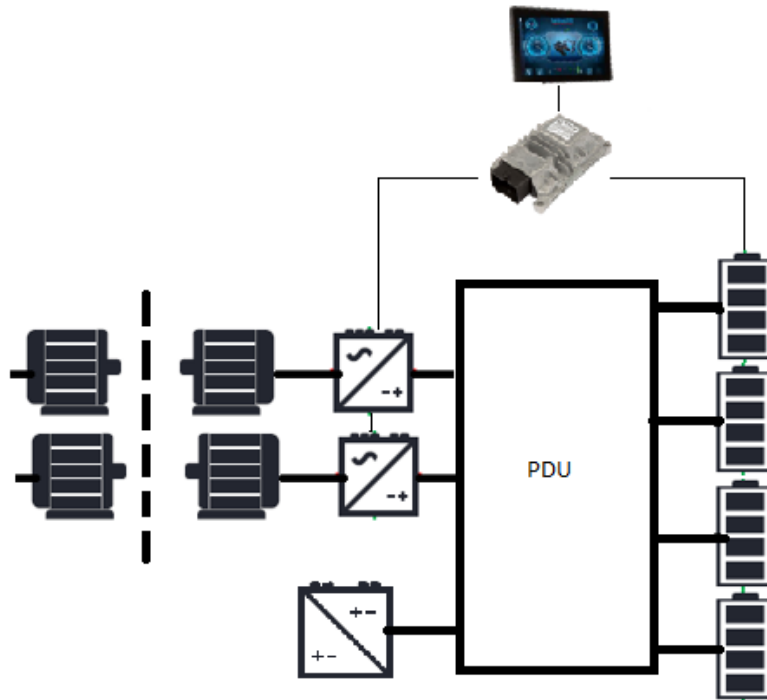


Kuva 3: Moottorigeneraattorin toiminnan kvadrantit [27]

Kun moottorit on kytketty vastakkain, ne pitää ohjata samaan pyörimissuuntaan, mutta vääntömomentti vastakkaiseen suuntaan. Kuormitusilanteessa kuvan 3 kvadrantin mukaan testattava ja kuormittava moottori ohjataan joko kvadrantteihin 1 ja 2 tai 3 ja 4 pyörimissuunnan mukaan. Hidastava moottori kuormittaa kiihdyttävää moottoria ja tuottaa sähköenergiaa.

Kuormittavan moottorin jarruttaessa se tuottaa energiaa, joka tarvitsee energiavaraston tallentamista varten. Tähän soveltuvat akut, jonne energia voidaan varastoida myöhempää käyttöä varten. Vaihtoehtoisesti järjestelmään voidaan liittää ulkoinen vastus, joka kuluttaa tuotetun energian lämmöksi [28]. Tuotetun energian voi myös ohjata takaisin sähköverkkoon. Testipenkin pitkäaikaisessa käytössä on kuitenkin suositeltavaa pyrkiä ottamaan energia talteen suuren energiamäärän tuhlauksen välttämiseksi.

Kuormittava moottori tarvitsee toimiakseen taajuusmuuttajan, ohjauksen ja energiavaraston. Kuormittava järjestelmä kahdelle moottorille näkyy kuvassa 4.



Kuva 4: Kuormittava sähköinen järjestelmä

Kuvassa näkyy testattavat moottorit ja niihin kytketyt sähköiset moottorigeneraattorit, joihin on kytketty niitä ohjaavat taajuusmuuttajat. Taajuusmuuttajat on yhdistetty tehonjakoyksikköön, johon on kytketty neljä akkua energian varastointiin. Ohjausyksikkö on yhdistetty sen ohjaamiin taajuusmuuttajiin ja akkuihin, sekä sitä ohjaavaan käyttöliittymään. Tehonjakoyksikköön on kytketty myös tasavirtalaturi akkujen ulkoista latausta varten. Ulkoinen laturi mahdollistaa sen, että järjestelmää voi käyttää pitkäaikaisesti myös pyörittämään testipenkin moottoreita pelkän jarrituksen sijaan.

Moottorigeneraattorin käyttämistä kuormittavassa järjestelmässä puoltaa testattavien asioiden monipuolisuus. Sillä voidaan saavuttaa suuri vääntömomentti ja suuri pyörimisnopeus ilman ylimääräistä vaihteistoa. Sitä on myös mahdollista pyörittää molempiin suuntiin ja ottaa energiaa talteen, mikä järjestelmän pitkäaikaisella käytöllä johtaa huomattaviin säästöihin. Järjestelmällä voidaan myös tutkia karkaavaa kuormaa, jossa testattava järjestelmä jarruttaa testipenkin luomaa liikettä.

Huonoja puolia kuormittamalla moottorigeneraattorin avulla on sähköisten järjestelmien monimutkaisuus. Pelkkä komponenttien valitseminen ei riitä, vaan ne pitää yhdistää toisiinsa oikeanlaisella johtosarjalla, jonka suunnittelu vaatii tarkkaa yksityiskohtien hallintaa ja virtapiirien ymmärrystä [29]. Samoin sähköisten järjestelmien tarvitsemat ohjelmistot ovat yksityiskohtia myöten työläitä ja oikeanlaisen järjestelmäarkkitehtuurin suunnittelu hankalaa [30]. Nämä molemmat on mahdollista ottaa käyttöön eKit48-

järjestelmästä, jos järjestelmän kokonaisuus ja tarvittavat komponentit ovat siihen sopivia.

Lisähaasteena järjestelmässä on akkujen täytyminen testauksen aikana. Mikäli kuormittava moottorigeneraattori jarruttaa kauan ja tuottaa energiaa akkuihin, ne tulevat täyteen ja niihin ei voida enää ladata lisää sähköä, jolloin testausta ei voida jatkaa. Sähköenergia voidaan tällöin ajaa takaisin testattavan järjestelmän akkuihin, jolloin testipenkin akut tyhjentyisivät. Järjestelmään voidaan myös lisätä ulkoinen vastus, joka muuttaa ylimääräisen energian lämmöksi. Kaksisuuntaisella virtalähteellä on mahdollista ladata ylimääräinen energia takaisin sähköverkkoon akkujen täytyessä [31]. Sillä voidaan myös ladata järjestelmää sähköverkosta, jolloin ulkoinen tasavirtalaturi ei olisi tarpeellinen.

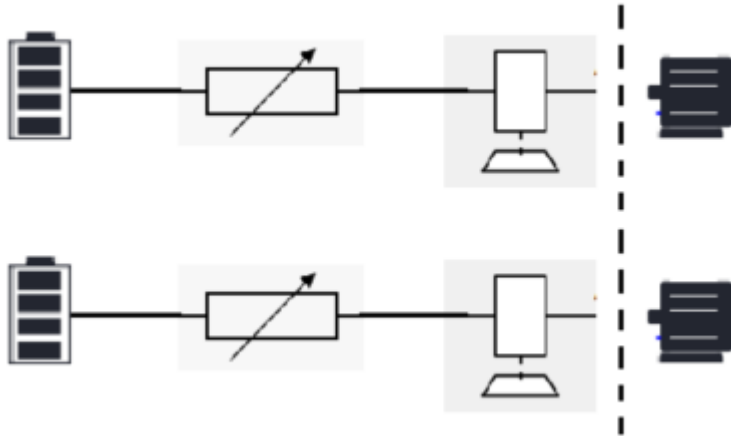
Sähköiselle järjestelmälle on erilaisia ohjausmahdollisuuksia eri tarpeisiin. Järjestelmän toimivuuden ja kokonaisuuden testaamisen kannalta manuaalinen ohjaus on helpoin valinta, koska sillä toimintaa voi helpoiten ohjata haluttuun pyörimisnopeuteen ja vääntömomenttiin. Ohjaussignaalin yhtäkkisellä muutoksella voidaan testata järjestelmän dynamiikkaa ja sen nopeutta muuttaa toimintaansa ja reagoida muutokseen [32].

Ohjauksessa voidaan myös hyödyntää järjestelmän toiminnan mittaamista, jolla voidaan saada selville sen nykytila ja käyttää sitä takaisinkytkennällä ohjaussignaalin muutoksessa [13]. Näin erilaisten häiriöiden vaikutus järjestelmään voidaan minimoida. Takaisinkytkennässä voidaan käyttää hyödyksi testattavan järjestelmän toimintaa, jota testipenkissä on tarkoitus mitata, mutta sitä varten pitäisi mitata myös kuormittavan järjestelmän toimintaa, mikä ei muunlaisessa ohjauksessa ole tarpeellista.

2.4 Sähkömagneettinen jauhejarru

Seuraava tutkittava kuormitusjärjestelmä käyttää toimilaitteenaan sähkömagneettista jarrua, jotka voidaan jakaa jauhejarruihin, pyörrevirtajarruihin ja kitkajarruihin. Sähkömagneettisen jauhejarrun toiminta perustuu jarrun sisältämän jauheen magnetisoinnin luomaan kitkavoimaan. Sähkömagneettisessa pyörrevirtajarrussa jarrutusmomentti muodostetaan jarruakselin ankkurin vuorovaikutuksesta käämin magneettikentän kanssa. Sähkömagneettisen kitkajarrun jarrutuksessa jousi painaa ankkurin jarrulevyä vasten luoden kitkaa, joka heikkenee heräteäämin luoman magneettikentän voimistuksessa, joka työntää ankkurin irti jarrulevystä [33]. Näistä parhaiten testipenkin jarruksi soveltuu sähkömagneettinen jauhejarru sen hyvän ohjauksen takia ja pyörimisnopeuden olemattomasta vaikutuksesta vääntömomenttiin. [34]

Sähkömagneettinen jauhejarru koostuu käämistä, staattorista ja roottorista. Jarrun saadessa herätevirtaa, käämiin luodaan magneettikenttä, jonka suurenee samassa suhteessa herätevirran kanssa. Luotu magneettikenttä vaikuttaa roottorin ja staattorin välissä olevaan magneettijauheeseen, joka asettuu magneettikentän suunnan mukaan ja työntyy staattoria ja roottoria vasten jarruttaen roottorin liikettä. Herätevirran suuruus määrittää luodun magneettikentän kautta jauheen viskositeetin, joka aiheuttaa halutun vääntömomentin roottorin liikkeeseen. [35]



Kuva 5: Sähkömagneettista jauhejarrua käyttävä kuormitusjärjestelmä

Kuvassa 5 on kuvattu sähkömagneettiseen jauhejarruun perustuva kuormitusjärjestelmä. Kuormitettaviin moottoreihin on mekaanisesti kytketty sähkömagneettinen jauhejarru. Jarruun on kytketty reostaatti, joka säätelee jarrun saamaa herätevirtaa. Jarrun tarvitsema virta tulee reostaattiin kytketyistä akuista. Järjestelmän yksinkertaisuus puoltaa sitä, että molemmille testattaville moottorille on toisistaan riippumattomat kuormitusjärjestelmät.

Jauhejarru tarvitsee toimiakseen tasavirtaa, minkä takia akkujen käyttö energialähteenä toimii hyvin [36]. Toinen vaihtoehto on ottaa virtaa sähköverkosta ja muuttaa siitä saatu vaihtovirta tasavirraksi taajuusmuuttajalla.

Magneettijarrun ohjaus riippuu suoraan herätevirran suuruudesta, jonka säätämiseen soveltuu hyvin reostaatti. Reostaatti on säädettävä vastus, jolla voidaan muuttaa virran suuruutta. Reostaatteja voi ohjata manuaalisesti tai digitaalisesti, jolloin jarrua voisi ohjelmoida toimimaan haluamallaan tavalla. [37]

Sähkömagneettinen jauhejarru sopii hyvin moottorien kuormittamiseen, sillä sen luoma vääntömomentti on verrannollinen herätevirran suuruuteen, mikä tekee siitä helposti ja tarkasti ohjattavan. Jarrua voi myös pyörittää molempiin suuntiin. Tämän lisäksi sillä on mahdollista saavuttaa korkea vääntömomentti, eikä jarrun pyörimisnopeudella ole vai-

kutusta siihen. Jarru reagoi nopeasti ohjauksen muutokseen ja sen hyvän lämpökapasiteetin ansiosta pitkäaikainen käyttö on mahdollista. Sähkömagneettisen jauhejarrun tarvitsema järjestelmä on helppo toteuttaa, koska sen toimintaa varten ei tarvita paljon komponentteja. [36]

Huono puoli sähkömagneettisen jauhejarrun käyttämisessä sähkömoottorin kuormitukseen on sen pieni pyörimisnopeus [38]. Tarvittavaan pyörimisnopeuteen pääsemiseksi jarru tarvitsisi vaihteiston. Vaikka jarrulla on hyvä lämpökapasiteetti, jäähdytystavasta ja -tehosta riippuen pitkän käytön jälkeen sen pintalämpötila saattaa lämmentä liikaa haitaten jarrun toimintaa. Pitkän käyttöajan jälkeen myös sen vääntö pienellä herätevirralla voi olla epätarkka. [39]

2.5 Valmis dynamometri

Viimeinen tutkittava kuormitusjärjestelmä on valmiiksi koottu dynamometri. Dynamometri on yleisin tapa kuormittaa moottoreita testitarkoituksena ja sillä halutaan varmistaa moottorin tuottavan tietyllä pyörimisnopeudella, teholla, virralla ja jännitteellä oikeaa vääntömomenttia [40]. Tässä diplomityössä tutkittuja kuormituslaitteistoja voidaan myös kutsua dynamometreiksi, sillä niidenkin tarkoitus on moottorin kuormitus sen väännön ja pyörimisnopeuden testausta varten. Tässä luvussa käsitellään dynamometrejä, jotka ovat olemassa valmiiksi suunniteltuna ja koottuna ja joita on mahdollista ostaa tai vuokrata omaan käyttöön.

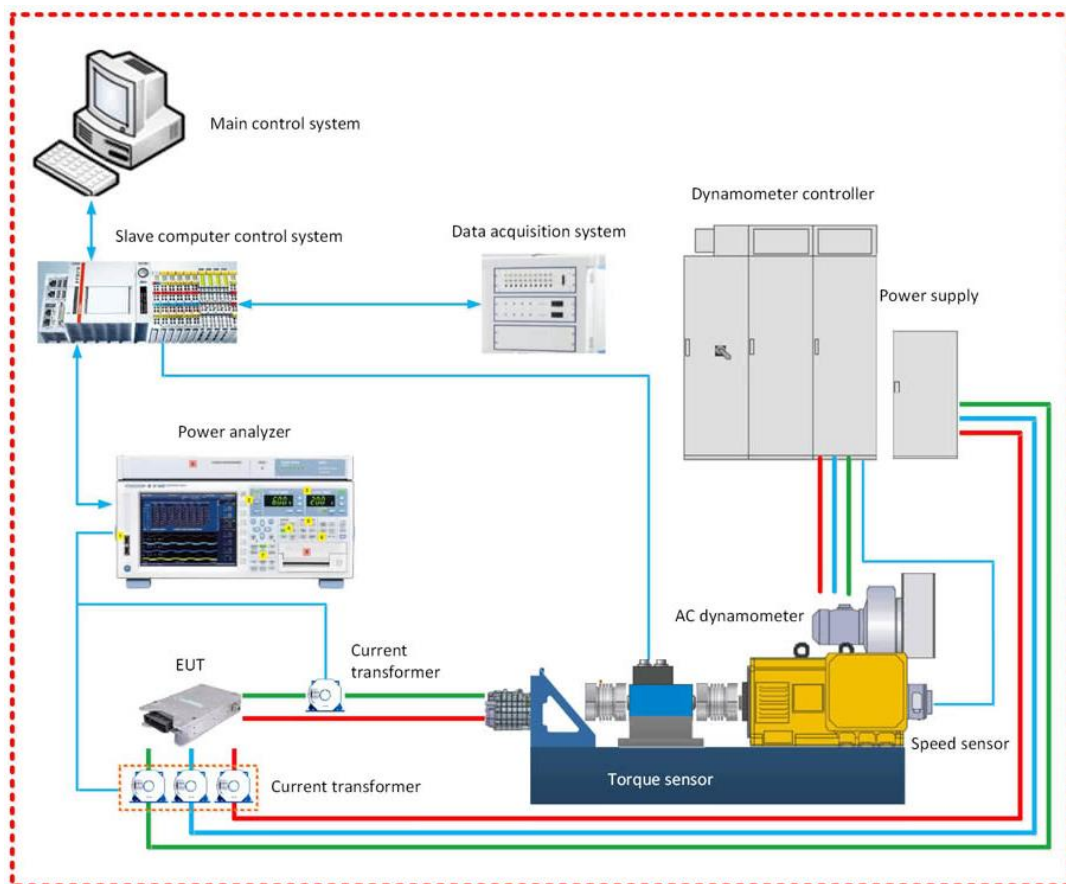
Dynamometriä voi käyttää vain vääntömomentin mittaukseen, mutta monella on mahdollista tutkia testattavaa järjestelmää monipuolisemmin, kuten tarkkaa sähkön kulutusta, kestävyyttä, tärinää ja energiatehokkuutta [41] [42]. Dynamometrejä on montaa erilaista, mutta yleisimmät kuormitustavat ovat vesijarru, pyörrevirtajarru ja vaihtovirtamoottori [43].

Vesijarrulla toimivalla dynamometrillä on toimilaitteena yksikkö, jonka sisällä on akseli roottorilla, vähintään kaksi staattoria ja vesiliitäntä. Testattava moottori on mekaanisesti kytketty pyörittämään akselia. Yksikön ollessa tyhjä roottori voi pyöriä vapaasti, mutta sen täyttyessä vedellä roottori luo liikettä veteen, jota staattorit jarruttavat. Staattoreihin on kiinnitetty anturit, joista voidaan mitata veden vaikutus staattoreihin ja laskea sen avulla kuormitettavan moottorin vääntömomentti. Luotu vääntömomentti riippuu veden määrästä yksikössä. Vesi muuttaa liike-energian lämmöksi ja veden kiehumisen estämiseksi lämmin vesi pitää poistaa ja kylmää vettä lisätä. Ohjaamalla veden tilavuusvirtaa sisään ja ulos yksiköstä voidaan ohjata suoraan dynamometrin luomaa vääntömomenttia. [44]

Dynamometri pyörrevirtajarrulla käyttää pyörrevirtaa jarruttamaan pyöriviä metallilevyjä magneettikentässä. Pyörrevirtajarrulla toimivia dynamometrejä on ilmajäähdytteisenä, jolloin se toimii vain noin kolmen minuutin ajan, minkä jälkeen jarrutuskyky heikkenee ja pitää odottaa sen viilentymistä. Pyörrevirtajarrua voi jäähdyttää myös vedellä, jolloin käyttöaika pitenee huomattavasti. [43]

Vaihtovirtamoottoria käyttävä dynamometri mahdollistaa suurimman skaalan pyörimisnopeudelle ja vääntömomentille. Ne on helpoin muokata tarpeeseen sopiviksi ja niillä voidaan luoda jarruttavaa ja kiihdyttävää vääntömomenttia testattavaan moottoriin, jolloin energiaa voidaan ajaa dynamometriltä takaisin testattavaan järjestelmään. [43]

Dynamometrejä on monia erilaisia, minkä takia niiden kaikkien järjestelmä ja ohjaus eroavat toisistaan myös. Yksi mahdollinen vaihtovirtamoottorilla toimivan dynamometrin järjestelmäarkkitehtuuri näkyy kuvassa 6.



Kuva 6: Dynamometrin järjestelmäarkkitehtuuri [45]

Kuvan 6 dynamometrissä on toimilaitteena vaihtovirtamoottori, jota ohjaa dynamometrin ohjain. Järjestelmään kuuluu myös testattavaa moottoria ohjaava pääohjausjärjestelmä, jonka kanssa kommunikoi tehoanalysaattori, jäähdytysjärjestelmä, testattava moottori ja tiedonkeruujärjestelmä, joka mittaa toimilaitteiden vääntömomentin, pyöri-

misnopeuden, värinän ja lämpötilan. Kerätty tieto voidaan näyttää heti ja kerätä myöhempiä tutkimista varten. [45]

Hyvä puoli valmiina suunnitellussa dynamometrissä on sen monipuolisuus. Dynamometrejä on montaa erilaista ja niitä voi modifioida paremmin sopiviksi omiin tarpeisiin. Lisäksi niillä on muitakin käyttömahdollisuuksia kuin kuormitettavan moottorin vääntömomentin testaus, kuten kestävyuden ja energiatehokkuuden mittaus. Dynamometreissä käytetään usein reaaliaikaista dynaamista ohjausjärjestelmää, jolla voidaan saada aikaan tarkasti haluttu kuorma [45]. Valmiin dynamometrin toimintaan voi luottaa, koska sitä on käytetty jo useasti erilaisissa tilanteissa. Tämän lisäksi siinä tulee mukana siihen sopiva ohjausjärjestelmä ja mittausanturit.

Valmiin dynamometrin käyttöönotto vaatii paljon ohjelmointia ja yksityiskohtien suunnittelua, minkä lisäksi laitteiston monipuolisuus ja koko vaatii paljon tilaa. Dynamometreissä on myös omat heikkoudet erilaisten toimilaitteiden mukaan. Vesijarrudynamometriä on vaikea ohjata nopeasti ja tarkasti. Pyörrevirtajarrulla toimivaa dynamometriä voidaan ohjata helpommin ja tarkemmin kuin vesijarrulla toimivaa, mutta sillä ei voida saada aikaan korkeaa vääntömomenttia pienellä pyörimisnopeudella. Vaihtovirtamoottoria käyttävä dynamometri puolestaan on huomattavasti kalliimpi kuin muut vaihtoehdot. Dynamometrit ovat yleensä valmisteltu vain yhden moottorin testaamista varten ja vaikka niitä voi modifioida, niiden muokkaaminen kahden moottorin samanaikaista testausta varten voi olla hankalaa. Kahta moottoria testaavia vaihtovirtamoottoridynamometrejä on olemassa [46]. Nämä kuitenkin tarvitsevat vielä enemmän tilaa ja mahdollisia lisälaitteita kuin yhden moottorin dynamometri. [43]

3. TESTAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Sopivimman kuormituslaitteiston valintaan vaikuttavat testin tavoitteet ja kuormitusteknologian hyödyt ja haitat. Tässä luvussa käydään läpi testausjärjestelmän kriteerit ja tavoitteet ja niiden tärkeys, minkä lisäksi verrataan eri kuormitusteknologioiden sopivuus ennalta määrättyihin kriteereihin.

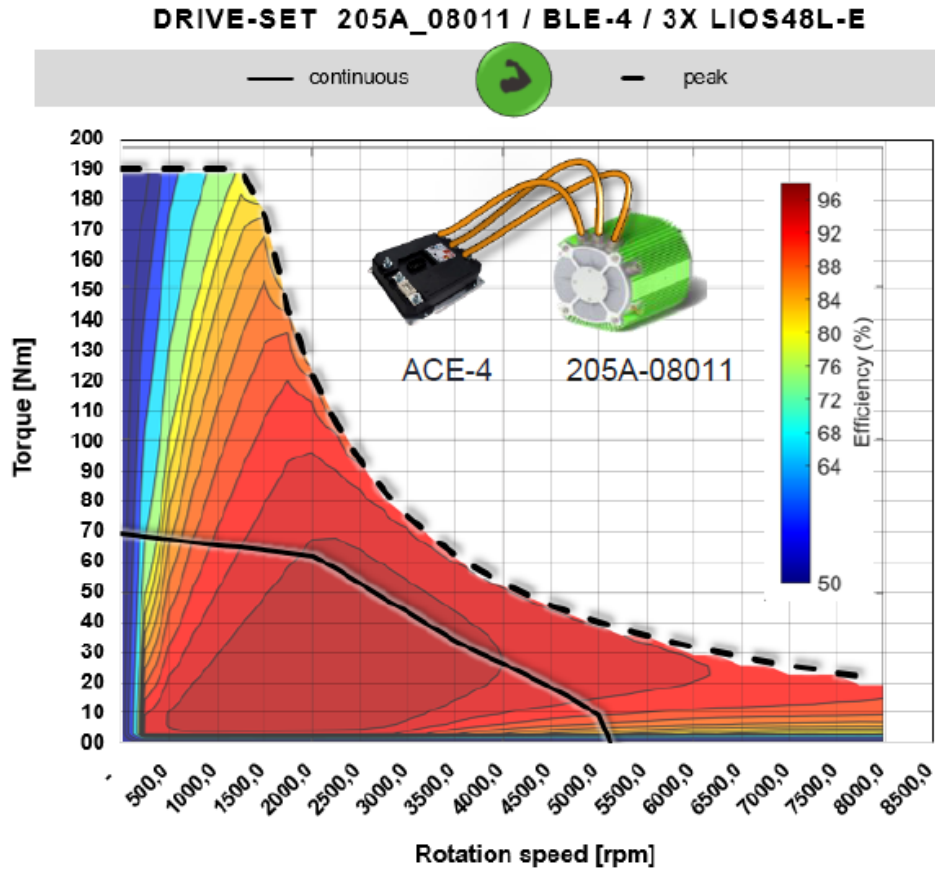
3.1 Kriteerit ja testin tarkoitus

Kuormituslaitteiston avulla tehtyjen testien on tarkoitus verifioida järjestelmän kokonaisuuden toiminta. Yksittäiset komponentit on testattu toimittavan yrityksen puolesta ja eKit48-järjestelmän toiminnallisuus on laskettu toimittavien osapuolien antamien tietojen perusteella.

Hydac GmbH:n nykyinen hydraulinen kuormituslaitteisto ei ole sopiva koko järjestelmän toiminnan testaamiseen. Sillä on mahdollista testata vain yhden sähkömoottorin toimintaa ja siinä käytettävä hydraulipumppu voi kuormittaa testattavaa moottoria vain yhteen pyörimissuuntaan. Lisäksi sillä voidaan saavuttaa vain 2000 kierroksen pyörimisnopeus minuutissa, mikä on huomattavasti vähemmän, kuin mihin testattava järjestelmä pystyy.

Uuden testipenkin ensisijainen tarkoitus on laajentaa mahdollista testattavaa toiminta-aluetta. Sillä pitäisi saada testattua kahden moottorin samanaikaista toimintaa, pyörittää niitä myötä- ja vastapäivään ja testattavaa pyörimisnopeutta pitää saada nostettua nykyisen kuormitusjärjestelmän maksiminopeuteen verrattuna. Testipenkillä pitää saada testattua eKit48-järjestelmän koko toiminta-alue.

Testattavan järjestelmän taajuusmuuttajan ja moottorin energiatehokkuuden ja yhteisten ominaisuuksien arvot ja näkyvät kuvassa 7. Jatkuva viiva kuvaa jatkuvaa vääntöä ja katkoviiva kuvaa huippuvääntöä pyörimisnopeuden funktiona. Värien avulla on kuvattu hyötysuhdetta, jossa punainen on 96 % hyötysuhde ja sininen on 50 %.



Kuva 7: Taajuusmuuttajan ja moottorin energiatehokkuus ja yhteiset ominaisuudet [4]

Kuvassa 7 näkyvä toiminta-alue pitäisi saada testattua kuormitusjärjestelmällä molemmille sähkömoottoreille molempiin pyörimissuuntiin. Kuormittavan järjestelmän on kestettävä testin huippuarvot vähintään 10 sekunnin ajan ja jatkuvia arvoja noin puolen tunnin ajan. Testeissä korkeimmat saavutettavat arvot näkyvät taulukossa 1.

Taulukko 1: Testattavan järjestelmän moottoreiden toiminnan korkeimmat arvot

	Teho	Vääntö	Pyörimisnopeus
Huippuarvot	28 kW	190 Nm	8000 rpm
Jatkuvat arvot	14 kW	70 Nm	5000 rpm

Kuvassa 7 näytetty toiminnallisuus pätee yhdelle moottorille. Testattavassa järjestelmässä moottoreita on kaksi, jolloin tarvittava jatkuva teho molempien jatkuvaan toimintaan korkeimmilla jatkuvilla arvoilla on 28 kilowattia ja huippuarvoilla 56 kilowattia. Testattavan järjestelmän akkujen rajallisen purkautumisvirran ansiosta järjestelmä voi toi-

mia jatkuvasti vain noin 14 kilowatilla ja hetkellisesti noin 31 kilowatilla. Moottorien toiminta riippuu siis toisen moottorin toiminnasta ja jäljellä olevasta käytettävästä tehosta.

Testattavan järjestelmän tehonhallinta on parametrisoitava ja sillä voidaan säätää moottoreiden toimintaa tehon loppuessa. Parametrisointi vaikuttaa moottoreiden priorisointiin ja sillä voidaan määrittää, kuinka iso osuus kokonaistehosta kummallekin moottorille annetaan, mikäli sitä ei ole riittävästi haluttuun toimintaan. Suunnitellulla testipenkillä on tarkoitus testata myös tehonhallinnan parametrisoinnin vaikutus järjestelmän toimintaan.

Testattavaan järjestelmään voidaan lisätä ulkoinen tasavirtalaturi, mitä kautta järjestelmä voi saada noin 12 kilowattia lisää tehoa [4]. Tämän vaikutusta järjestelmään on myös tarkoitus testata kuormitusjärjestelmän avulla.

Yksittäisten komponenttien energiahäviöt ovat tiedossa, minkä lisäksi taajuusmuuttajan ja sähkömoottorin yhteinen energiatehokkuus on laskettu ja esitetty kuvassa 7. Kokonaisjärjestelmän energiatehokkuus, johon kuuluu sähkömoottorien ja taajuusmuuttajien lisäksi akut, tehonjakoyksikkö ja ohjauskomponentit, ei ole vielä tiedossa. Testipenkkiä pitäisi voida käyttää testattavan järjestelmän energiatehokkuuden selvittämiseen.

Testattavaa järjestelmää voidaan käyttää jarruttamaan karkaavaa kuormaa. Tämän testaus vaatii testipenkiltä mahdollisuuden pyörittää testattavan järjestelmän moottoria. Testipenkin pitäisi myös voida ottaa kuormituksessa luotua sähköenergiaa talteen energiantuhlauksen estämiseksi.

Testien aikana sekä kuormittavan puolen että kuormitettavan puolen pyörimisnopeutta ja vääntöä tullaan muuttamaan paljon ja usein. Tämän ohjauksen tekeminen pitää olla helppoa ja nopeaa testien helpottamiseksi.

Testattava eKit48-järjestelmä on modulaarinen ja sen erilaisia yhdistelmiä pitää tulevaisuudessa testata. Suunnitellulla testipenkillä olisi hyödyllistä olla mahdollisuus testata montaa erilaista kokoonpanoa testattavasta järjestelmästä.

Fyysisen testipenkin on suositeltavaa olla liikuteltava pitkäaikaisen käytön ja varastoinnin helpottamiseksi. Sen sijoittamisen puolesta olisi hyödyllistä, jos testipenkki ei tarvitsisi toimintaansa varten jatkuvaa latausta eli kytkentää sähköverkkoon, tai muitakaan rajoituksia sijaintinsa suhteen, kuten vaikeasti liikuteltavat ja painavat osat. Tarvittavien komponenttien hinta ei saisi olla liian suuri ja niiden pitäisi olla nopeasti ja luotettavasti saatavilla. Mahdollisia testien muutoksia varten testipenkin kannattaisi olla käytännöllinen, eli helppo rakentaa, muokata ja ottaa käyttöön muutoksien jälkeen.

Tulevaisuudessa voi tulla tarpeelliseksi testata järjestelmän dynaamisuutta ja sen nopeutta reagoida ohjauksen muutoksiin. Tämän diplomityön testipenkissä sitä tarvetta ei oteta huomioon, mutta testipenkki voidaan suunnitella sen mukaan, että tulevaisuudessa sen ohjauksjärjestelmää voidaan muuttaa dynaamisiin testauksiin sopivammaksi. Muussa tapauksessa testaustarpeiden muuttuessa pitäisi suunnitella ja rakentaa uusi testipenkki.

3.2 Järjestelmien vertailu

Erilaisten kuormitusteknologioiden sopivuus kriteereihin arvioidaan taulukon avulla, jossa on listattu vertailtavat teknologiat ja kaikki kriteerit. Kriteereiden tärkeys on merkitty värikoodilla, joka on selitetty taulukossa 2.

Taulukko 2: Kriteereiden tärkeyden värit

Lyhytaikainen tavoite, joka halutaan täyttää ensimmäisellä versiolla testipenkistä
Pitkäaikainen tavoite, joka halutaan saavuttaa, mutta ei ole tarpeellista ensimmäisellä testipenkin versiolla
Toive, joista halutaan täyttää mahdollisimman monta

Kriteereiden täyttäminen on arvioitu neljän tason asteikolla. Asteikko on selitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Kriteereiden täyttämisen arviointi

++	Erinomainen
+	Hyvä
-	Välttävä
--	Erittäin huono

Vertailua varten valittiin viisi kuormitusteknologiaa. Hydraulipumpuksi nimetty teknologia perustuu toimipisteessä valmiina olevaan hydrauliseen testipenkkiin ja siihen mahdollisesti tehtyihin muutoksiin. Hydraulinen pumppumoottori vaatisi uuden hydraulisen piirin, johon lisättäisi paine-eroa ylläpitävä hydraulipumppu karkaavaa kuormaa varten, jossa testattavaa järjestelmää kiihdytetään. Molemmille hydraulisille järjestelmille voidaan kytkeä hydraulipumppuihin vaihteisto tarvittavaa pyörimisnopeuden muutosta var-

ten. Moottorigeneraattori on testattavan järjestelmän kaltainen sähköinen kuormitusjärjestelmä, jossa toimilaitteina ovat sähkömoottorit. Sähkömagneettinen jauhejarru on kaksi identtistä järjestelmää toimilaitteinaan sähkömagneettiset jauhejarrut, joihin voidaan kytkeä vaihteisto tarvittavan pyörimisnopeuden saavuttamiseksi. Valmiille dynamometrille valittiin toimilaitteeksi pyörrevirtajarru, koska siinä on parempi ohjattavuus kuin vesijarrua käyttävässä ja vaihtovirtamoottorilla toimiva on huomattavasti kalliimpi ja samantyylinen kuin moottorigeneraattoriksi nimetty konsepti testipenkistä. Kuormitusteknologioiden arviointi näkyy taulukossa 4.

Taulukko 4: Kuormitusteknologioiden vertailu

	Hydrauli- pumppu	Hydraulinen pumppumoot- tori	Moottori- generaattori	Sähkömag- neettinen jau- hejarru	Valmis dy- namometri pyörrevirta- jarrulla
Molempien moottoreiden samanaikainen kuormitus	+	+	+	+	+
70 Nm vääntö, 500 rpm pyöri- misnopeus 30 min ajaksi	++	++	++	++	++
15 Nm vääntö, 500 rpm pyöri- misnopeus 30 min ajaksi	+	+	++	+	++
190 Nm vääntö, 1300 rpm pyö- rimisnopeus 10 sek ajaksi	++	++	++	++	++
20 Nm vääntö, 8000 rpm pyö- rimisnopeus 10 sek ajaksi	+	+	++	+	++
Karkaava kuorma	--	+	++	--	--
Ohjattavuus	++	+	++	++	++
Molemmat pyö- rimissuunnat	--	+	++	++	++
Energian tal- teenotto	--	-	++	--	--
Liikuteltavuus	-	-	+	++	-
Hinta	++	-	+	+	--
Saatavuus	+	-	+	-	--
Mahdollisuus käyttöön ilman jatkuvaa lataus- ta	+	-	+	+	+
Käytännöllisyys	--	--	+	+	-
Mahdollisuus käyttöön pienen moottorin tes- tissä	++	++	++	++	++

Taulukosta näkee, että kaikki kuormitustavat täyttävät useimmat kriteerit lyhyen aikavälin tähtäimistä, sillä niillä voidaan kuormittaa kahta moottoria ja niillä voidaan saada aikaan tarvittavat väännöt ja pyörimisnopeudet. Näiden suhteen ainoana eroavaisuutena teknologioiden välissä on hydraulisten järjestelmien ja magneettijarrun tarve lisätä vaihteisto toimilaitteisiin, koska muuten tarvittavaa pyörimisnopeutta ei voida saavuttaa. Karkaavaa kuormaa ei useimmilla kuormitusperiaatteilla voida saavuttaa. Se onnistuu pitkäaikaisesti vain moottorigeneraattorilla ja hydraulisella pumppumoottorilla, jos siihen lisätään erillinen latauspiiri paineakkujen täyttämistä varten.

Pitkäaikaisissa tähtäimissä ohjattavuus on kaikissa teknologioissa varsin helppoa, mutta hydraulinen pumppumoottori tarvitsee ylimääräisen ohjauksen paineakkujen paine-eroa ylläpitävää pumppua varten. Toimilaitteiden pyörittäminen molempiin suuntiin onnistuu kaikilla sähköisillä kuormituslaitteilla, mutta nykyiseen hydrauliseen kuormituspiiriin perustuvassa laitteessa se ei ole mahdollista. Hydraulisella pumppumoottorilla molempiin suuntiin pyörittäminen on mahdollinen, mutta se vaatii paineakkujen paineiden tason muuttamisen pumppaamalla korkeapaineakusta hydraulineestettä matalapaineakkuun, kunnes niiden välinen paine-ero on päinvastainen kuin toiseen suuntaan pyörittäessä. Kuormituksessa käytetyn energian talteenotto onnistuu hyvin vain moottorigeneraattorilla. Hydraulinen pumppumoottori saa osan energiasta talteen täyttämällä paineakkuun, mutta sen täytyessä nopeasti ylimääräinen tilavuusvirta pitäisi ohjata tankkiin, jolloin energiaa ei enää saada otettua talteen. Pitkällä kuormittamisella energiaa ei siis saada suurta määrää talteen. Muilla kuormitustavoilla kaikki energia muutetaan jarruttaessa lämmöksi eikä mitään saada tallennettua.

Kriteereistä viimeisenä ovat toiveet, joita halutaan saavuttaa mahdollisimman monta. Näistä huomattavimmat erot järjestelmien välillä ovat niiden liikuteltavuus, hinta, saatavuus ja käytännöllisyys. Järjestelmän koosta ja painosta riippuu sen liikuteltavuus, joka on paras vähän tilaa tarvitsevassa sähkömagneettisessa jauhejarrussa. Hydraulipumpun kuormituspiirin ja moottorigeneraattorin halpa hinta ja hyvä saatavuus perustuu siihen, että niissä voidaan käyttää paljon komponentteja mitä toimipisteeltä jo löytyy, kuten hydraulisen kuormituspiirin osat tai testattavan järjestelmän komponentit. Paras käytännöllisyys on yksinkertaisissa sähköisissä järjestelmissä kuten magneettijarrussa ja moottorigeneraattorissa niiden yksinkertaisuuden vuoksi, joka tekee niistä helposti muokattavan.

Sopivammaksi kuormitustavaksi valittiin moottorigeneraattori, jolla voidaan ainoana saavuttaa hyvin kaikki tärkeimmät kriteerit, minkä lisäksi sillä voidaan ottaa energiaa talteen myöhempää käyttöä varten. Sillä ei myöskään ole yhtäkään kriteeriä, mitä se ei täytä.

Moottorigeneraattoria käyttävän kuormittavan järjestelmän rakenne on samanlainen kuin testattavan järjestelmän, joten siitä on mahdollista valita testipenkkiin joitakin komponentteja, mikä helpottaa järjestelmän suunnittelua ja rakentamista. On myös suositeltavaa ottaa mahdollisimman paljon komponentteja yrityksen omasta tuotevalikoimasta tutun ja luotettavan teknologian hyödyntämiseksi [47]. Kuormitettavan järjestelmän ohjelmointi ja johtosarja voi myös olla mahdollista ottaa käyttöön kuormittavassa järjestelmässä.

4. KOMPONENTTIEN VALINTA

Suunniteltu testipenkki on sähköinen kuormitusjärjestelmä, joka koostuu monesta eri komponentista. Sen järjestelmäarkkitehtuuri on samankaltainen kuin kuormitettavan eKit48-järjestelmän. Tässä luvussa esitellään kuormitettavan järjestelmän komponentit, minkä lisäksi valitaan ja esitellään testipenkkiin valitut komponentit.

Kuormitettavan testipenkin komponenteiksi pyritään valitsemaan mahdollisuuksien mukaan eKit48-järjestelmän komponentteja, koska niistä suurin osa on yrityksen omia tuotteita ja niiden toimitusaika ja käyttö on hyvin tiedossa. Niiden yhteisen toiminnan vaatima johtosarja ja ohjelmistot ovat myös testattu ja järjestelmän on todettu soveltuvan myös hyvin kuormittavaksi testipenkiksi.

4.1 Moottori

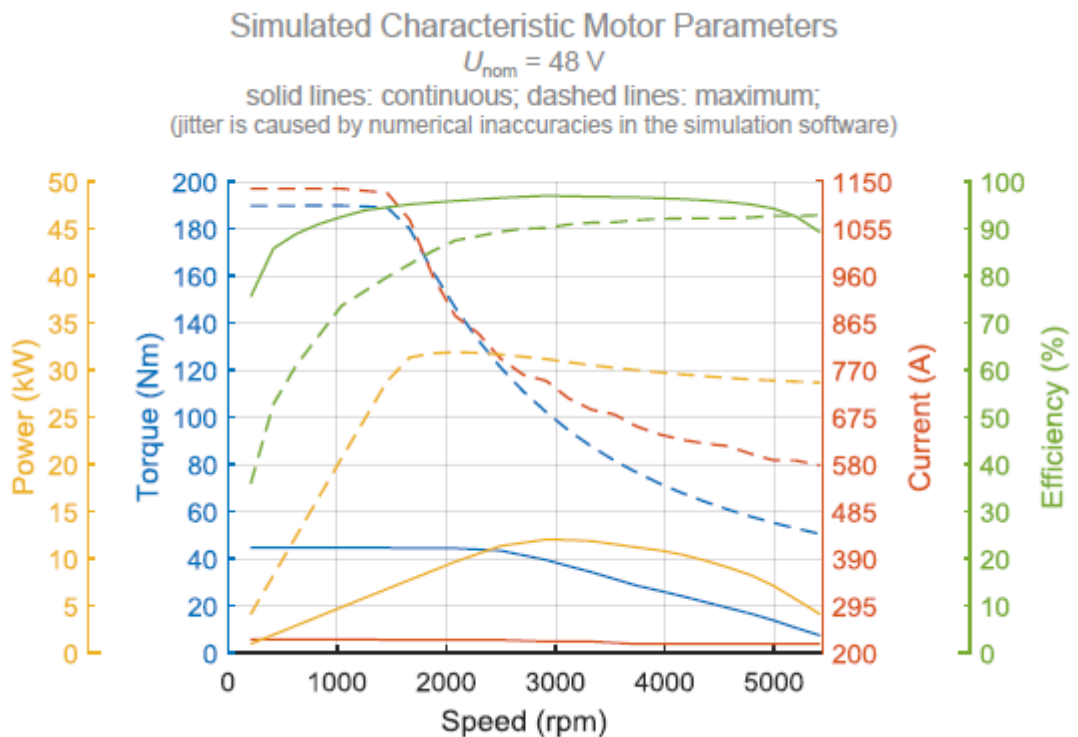
Sähkömoottori on järjestelmän toimilaite, joka muuttaa sähköisen energian mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottorit voidaan jakaa toimintaperiaatteen mukaan eri alaosioihin, jotka ovat tasavirtamoottori, oikosulkumoottori, kestopagneettimoottori ja vaihtoreluktanssimoottori [48].

Kuormitettavassa järjestelmässä on käytössä kaksi kappaletta Engiro GmbH:n sähkömoottoria 205A-08011-ABC, jotka ovat synkronisia kestopagneettimoottoreita ilma- ja jäähdytyksellä. Niitä voidaan pyörittää sekä myötä- että vastapäivään ja niillä voidaan jarruttaa akselin pyörimisliikettä, jolloin ne generaattorin tavoin muuttavat mekaanisen energian sähköenergiaksi. Moottorin tekniset tiedot on esitelty taulukossa 5.

Taulukko 5: Moottorin 205A-08011-ABC tekniset tiedot [49]

	Nimellisarvo	Huippuarvo
Jännite [V]	48	280
Virta [A]	227	1136
Taajuus [Hz]	138	533
Teho [kW]	9,6	32
Vääntömomentti [Nm]	44	190
Nopeus [rpm]	2080	8000

Kuvassa 8 näkyy moottorin ominaisuudet jännitteellä 48 V. Jatkuvat viivat kuvaavat arvoja moottorin jatkuva-aikaisessa käytössä. Katkoviivat kuvaavat korkeimpia huippuarvoja. Moottorin käyttö huippuarvojen alueella on suositeltavaa vain noin 10 sekunnin ajan. Pidempi aika johtaa moottorin kuumenemiseen, mikä laskee moottorin hyötysuhdetta ja käyttöikä. Kuvassa näkyy kierrosnopeuden funktiona keltaisella värillä teho, sinisellä vääntömomentti, vihreällä energiatehokkuus ja punaisella virta.

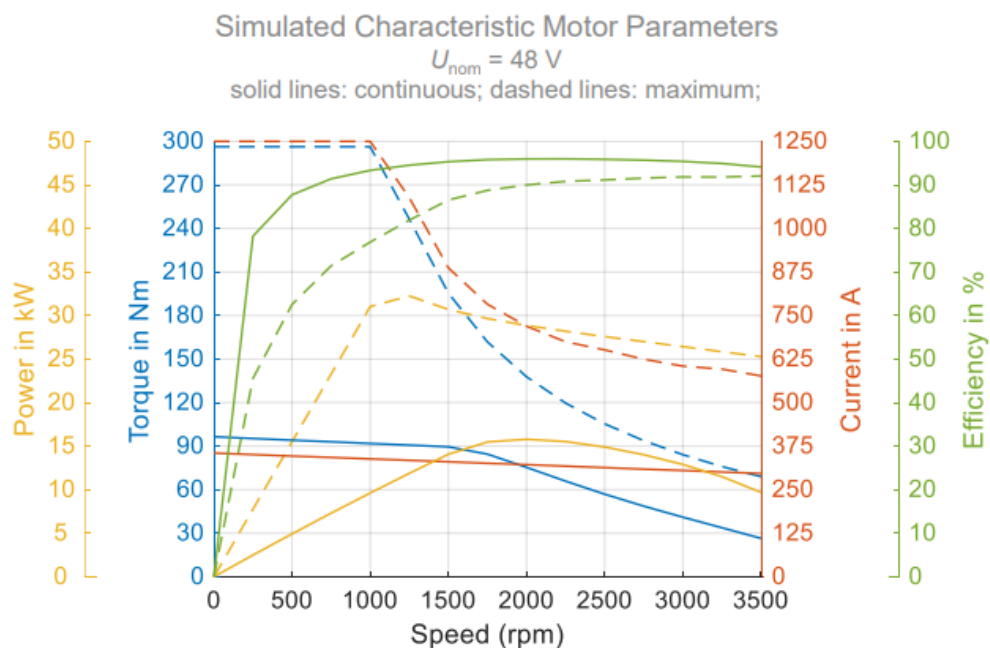
**Kuva 8: Moottorin 205A-08011-ABC ominaisuudet [49]**

Ekit48-järjestelmän modulaarisuuden ansiosta järjestelmään voidaan valita myös pieni-tehoisempi moottori. Moottorin valinta ja niiden määrä riippuu asiakkaan vaatimuksista tehokkuuden ja toimilaitteiden suhteen.

Kuormittavassa testipenkissä luodaan tarvittava vääntö testattavan järjestelmän moottoriin. Tämä tehdään kytkemällä moottorit akseleistaan toisiinsa kiinni ja ohjaamalla yhden moottorin pyörimisnopeutta ja toisen vääntömomenttia. Jotta voidaan varmistaa mahdollisuus luoda testattavalle moottorille tarpeeksi suuri kuorma, sen pitää luoda vähintään yhtä suuri, mutta mieluiten vielä suurempi, teho, kuin kuormitettava moottori [41].

Sopivan kuormittavan moottorin valintaa varten tarkasteltiin Engiro GmbH:n sähkömoottoreita, joihin kuuluu myös testattavan järjestelmän moottori. Kuormitettavan moottorin halutaan olevan suuritehoisempi kuin testattavan moottorin, minkä lisäksi sen pitäisi olla ilmajäähdytteinen vesijäähdytteisen sijaan järjestelmän käytännöllisyyden ja suunnittelun helpottamisen takia. Kuormittavan moottorin halutaan myös toimivan 48 voltin jännitteellä, sillä sitä ei vielä pidetä vaarallisena jännitteenä ja koska silloin on mahdollista hyödyntää testipenkin suunnittelussa kuormitettavaa järjestelmää, joka toimii myös 48 voltin jännitteellä [50].

Testipenkin moottoriksi valittiin Engiro GmbH: moottori 205A-12010-ABC, jonka ominaisuudet 48 voltin jännitteellä on kuvattu kuvassa 9. Katkoviivat näyttävät huippuarvoja ja jatkuvat viivat jatkuvia arvoja. Kierrosnopeuden funktiona näkyy keltaisella värillä teho, sinisellä vääntö, vihreällä energiatehokkuus ja punaisella virta. [51]



Kuva 9: Sähkömoottorin 205A-12010-ABC simuloitut ominaisuudet [51]

Kuormittavaa moottoria täytyy verrata testattavan järjestelmän arvoihin sen sopivuuden arvioimiseksi. Taulukossa 6 näkyy testattavan järjestelmän jatkuvat ja hetkittäiset huippuarvot, joissa on otettu huomioon taajuusmuuttajan ACE-4 ja sähkömoottorin 205A-08011-ABC yhteinen toiminnallisuus, sekä kuormittavan moottorin toiminnallisuus.

Taulukko 6: Kuormitettavan järjestelmän ja valitun kuormittavan moottorin toiminnallisuus [4] [51]

	Testattava ACE-4 ja 205A-08011-ABC	Kuormittava 205A-12010-ABC
Huipputeho [W]	28 000	33 000
Huippupyörimisnopeus [rpm]	8 000	8 000
Huippuvääntö [Nm]	190	290
Jatkuva teho [W]	14 000	16 000
Jatkuva pyörimisnopeus [rpm]	5 000	4 500
Jatkuva vääntö [Nm]	70	100

Taulukosta voi nähdä valitun moottorin 205A-12010-ABC olevan tarpeeksi tehokas testattavan järjestelmän kuormittamiseen. Sillä ei ole mahdollista kuormittaa jatkuvasti 4500-5000 pyörimisnopeuden välillä ilman moottorin kuumenemista, joten tällä välillä eKit48:a voidaan testata vain hetkellisesti. Vaikka valittu kuormitusmoottori ei täytä kaikkia vaadittuja ominaisuuksia, todettiin olevan tärkeämpää valita helposti saatavilla oleva sähkömoottori, joka ei tarvitse vesijäähdytystä, kuin kaikki ominaisuudet täyttävä moottori. Pyörimisnopeuden katvealue, jota ei voida testata jatkuvasti, ei ole tarpeeksi iso ongelma toisenlaisen moottorin valintaa varten.

4.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja, toiselta nimeltä invertteri, on laite, jota käytetään muuttamaan jännitettä ja tasasähköä (DC) vaihtosähköksi (AC), jota tietyt sähkömoottorit tarvitsevat. Lisäksi taajuusmuuttajalla pystyy ohjaamaan sähkömoottorin vääntömomenttia tai kierrosnopeutta. Sillä voidaan saavuttaa moottorille parempi säädettävyyys ja alhaisempi energiankulutus [7].

Testattavan järjestelmän käyttämä taajuusmuuttaja on Atech GmbH:n Zapi ACE-4 invertteri asynkronisille moottoreille. Sitä voi käyttää AC-induktiomoottoreilla, AC-synkronimoottoreilla ja harjattomilla DC-moottoreilla tehon 15 kW ja 30 kW välillä [52].

Moottorin jarruttaessa ja tuottaessa vaihtovirtaista sähköenergiaa, taajuusmuuttajalla on mahdollista muuttaa moottorin tuottama sähkö tasavirraksi, jolloin sen saa varastoitua järjestelmän akkuihin. Taajuusmuuttaja on CAN-väylän kautta yhdistetty ohjausjärjestelmään, jonka perusteella se ohjaa joko moottorin vääntöä tai kierrosnopeutta. Mikäli järjestelmään eKit48 valitaan toinen moottori, myös taajuusmuuttajaksi valitaan eri versio ACE-2 NG, joka sopii paremmin pienitehoisemmille moottoreille. Taajuusmuuttajan tekniset tiedot on kuvattu taulukossa 7.

Taulukko 7: Taajuusmuuttajan ACE-4 tekniset tiedot [53]

Jännite [V]	48
Huippuvirta [A]	800
Jatkuva virta [A]	460
Ympäristön sallittu lämpötila [°C]	-40 - +40
Laitteen korkein sallittu lämpötila [°C]	85
Suojaus	IP65

Kuormittavassa testipenkissä taajuusmuuttajan pitää olla tarpeeksi tehokas sen ohjaaman sähkömoottorin toimintaa varten. Taajuusmuuttajan pitää sopivalla jännitteellä kestää tarpeeksi hetkellistä huippuvirtaa ja jatkuvaa virtaa moottorin tarpeita varten.

Testipenkin sähkömoottori tarvitsee 48 voltilla huipputehoa varten 583 ampeeria ja jatkuvasti 292 ampeeria virtaa. Testattavan järjestelmän taajuusmuuttajan huippuvirta ja jatkuva virta sopii kuormittavan sähkömoottorin tarpeeseen, joten sitä voidaan käyttää testipenkissä. Taajuusmuuttaja ACE-4 on myös sopiva eKit48 johtosarjaan ja sen toiminta ja ohjaus on tuttua, mikä helpottaa testipenkin käyttöönottoa.

4.3 Akut

Energianlähteenä järjestelmissä toimivat usein erityyppiset akut, joiden ominaisuudet riippuvat niissä käytetystä materiaalista. Näistä yleisin sähköisten ajoneuvojen akkutyyppeistä on litiumioniakku sen hyvän energia- ja tehotehokkuuden ansiosta [54]. Akuissa varastoidaan tasavirtaa, minkä taajuusmuuttaja muuttaa vaihtovirraksi moottorin ohjaamista varten.

Yksittäisen akun kapasiteetin ollessa liian pieni järjestelmään voidaan kytkeä useampi akku ja muuttaa näin niistä saatavaa tehoa. Kytkemällä akkuja rinnakkain on mahdollista nostaa energiavaraston kokonaiskapasiteettia ja saada sieltä lisää virtaa. Jännite ei

muutu rinnankytkennän avulla. Energiavaraston jännitteen ollessa liian pieni, akkuja voidaan kytkeä sarjaan, jolloin jännite kasvaa. Sarjakytkennässä kapasiteetti ei muutu, vaan ampeeritunnit pysyvät samana. [55]

Testattavassa eKit48-järjestelmässä käytetään neljää kappaletta rinnankytkettyä Invenox GmbH:n LIOS 48L E litiumioniakkua. Ne on yhdistetty järjestelmän tehonjakoyksikköön ja CAN-yhteydellä järjestelmän ohjaukseen. Niissä on sisäänrakennettu virta- ja lämpötila-anturi. Akuissa on korkea energiatiheys, minkä lisäksi ne ovat ohjelmoitavissa koko energiakapasiteetin tehokkainta käyttöä varten. Järjestelmän lisäkuormitus ulkoisella energialähteellä on mahdollista, jolloin akut on ohjelmoitu säätämään omaa tehonantoaan. Vaikka eKit48-järjestelmässä on neljä rinnankytkettyä 250 ampeerin huippupurkautumisvirran akkuja, ne on ohjelmoitu antamaan korkeintaan 650 ampeeria virtaa 1000 ampeerin sijaan. Yksittäisen akun tekniset tiedot on esitetty taulukossa 8. [56]

Taulukko 8: Akun LIOS 48L E tekniset tiedot [56]

Jännite [V]	48
Kapasiteetti [Ah]	120
Kapasiteetti [kWh]	6,1
Huippu purkautumisvirta [A]	250
Jatkuva purkautumisvirta [A]	75
Huippu latausvirta [A]	80
Jatkuva latausvirta [A]	50
Mahdollisuus kytkeä rinnan [kpl]	6
Yhteinen huippuvirta rinnankytkettynä [A]	650 A
Suojaus	IP6k7
Ohjaus	CAN

Erilaisia akkuvaihtoehtoja eKit48-järjestelmään on neljä: suuremman ja pienemmän kapasiteetin versio suurella energiatiheydellä, sekä suuremman ja pienemmän kapasiteetin versio suurelle tehotiheydelle. Testattavassa järjestelmässä on käytössä suuri kapasiteetti ja suuri energiatiheys. Akkuja voi valita yhdestä neljään kappaletta. Akkujen ja niiden määrän valintaan vaikuttaa käyttökohteen energian- ja tehontarve, mah-

dollisuus ladata akkuja, montako moottoria järjestelmään valitaan ja mahdolliset tilarajoitukset.

Kuormituspenkissä pitää olla energianlähde sähkömoottorien pyörittämistä varten ja energiavarasto, jonne saa ladattua sähkömoottoreiden kuormittavassa toiminnassa generoiman energian. Parhaiten tähän soveltuvat akut, jotka voivat toimia sekä energiavarastona, että energianlähteenä. Järjestelmän voisi myös liittää sähköverkkoon, jolloin sitä voisi käyttää energianlähteenä ja -varastona, mutta siinä tapauksessa kuormituspenkin käyttö on rajoitettu tiloihin, joissa on pääsy sähköverkkoon, mikä halutaan välttää.

Akkujen tarvitsemaa latausvirtaa varten lasketaan sähkömoottoreiden generoima teho testattavan järjestelmän moottoreista. Testattavan järjestelmän eKit48 yksittäisen moottorin tehon saa laskettua kaavalla

$$P_{eKit} = \tau * w \quad (1)$$

jossa P_{eKit} on testattavan moottorin teho wateissa, τ on moottorin vääntömomentti newtonmetreissä ja w on moottorin pyörimisnopeus radiaaneissa per sekunti. Testattavan järjestelmän sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan ottoteho voidaan laskea kaavalla

$$P_{käyt,eKit} = \frac{P_{eKit}}{\eta_{eKit}}$$

jossa $P_{käyt,eKit}$ on käytetty teho wateissa, P_{eKit} on sähkömoottorin teho wateissa ja η_{eKit} on taajuusmuuttajan ja sähkömoottorin laskettu hyötysuhde. Molempien testattavan järjestelmän moottoreiden ollessa käynnissä, molemmilla ei voi olla järjestelmän täyttä tehoa käytössä. Toiselle moottorille jäljelle jäävä teho lasketaan kaavalla

$$P_{jälj,eKit} = I_{eKit,max} * U - P_{käyt,eKit}$$

jossa $P_{jälj,eKit}$ on toiselle moottorille jäljelle jäävä teho wateissa, $I_{eKit,max}$ on testattavan järjestelmän akuista saatava huippuvirta ampeereissa joko jatkuvalla tai hetkittäisellä toiminnalla, U on järjestelmän jännite volteissa ja $P_{käyt,eKit}$ on ensimmäisen moottorin käyttämä teho wateissa.

Testattavaan järjestelmään on mahdollista lisätä ulkoinen lataus, jota kautta sähkömoottorit voivat saada enemmän virtaa, kuin akuilta saatavat 650 ampeeria. Mikäli sähkömoottori ei toimi täydellä teholla rajoitetun virran takia voidaan laskea tarvittu virta haluttua toimintaa varten kaavalla

$$I_{lisä} = -\frac{P_{puut,eKit}}{U}$$

jossa $I_{lisä}$ on tarvittu ulkoinen lisävirta ampeereissa, $P_{puut.eKit}$ on puuttuvan tehon määrä wateissa ja U on jännite volteissa. Kaavalla lasketaan vain, jos virta ei riitä saavuttamaan yhdelle moottorille haluttua toimintaa.

Molempien testattavan järjestelmän moottorien toimintapisteen löydyttyä voidaan laskea testipenkin sähkömoottoreiden generoima teho samoilla toimintapisteillä. Kuormitettavan moottorin ja taajuusmuuttajan tuottama teho voidaan laskea kaavalla

$$P_{test,m+t} = P_{eKit} * \eta_m * \eta_t$$

jossa $P_{test,m+t}$ on yksittäisen testipenkin sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan generoima teho wateissa, P_{eKit} on siihen kytketyn kuormitettavan sähkömoottorin teho wateissa, η_m on testipenkin moottorin hyötysuhde ja η_t on testipenkin taajuusmuuttajan arvioitu hyötysuhde.

Molempien sähkömoottorien generoima teho pitää ladata energiavarastoon. Testipenkin akkuihin ladattava kokonaisvirta lasketaan kaavalla

$$I_{lat,koko} = \frac{P_{test,m1+t1} + P_{test,m2+t2}}{U}$$

jossa $I_{lat,koko}$ on akkuihin ladattava kokonaisvirta ampeereissa, $P_{test,m1+t1}$ ja $P_{test,m2+t2}$ ovat kuormittavan moottorin ja taajuusmuuttajan generoima teho wateissa ja U on jännite volteissa. Yksittäiseen akkuun ladattava virta lasketaan kaavalla

$$I_{lat,yks} = \frac{I_{lat,koko}}{n_{bat}}$$

jossa $I_{lat,yks}$ on yksittäiseen akkuun ladattava virta ampeereissa, $I_{lat,koko}$ on akkuihin ladattava kokonaisvirta ampeereissa ja n_{bat} on akkujen lukumäärä.

Laskuissa on pyritty korkeimman mahdollisen latausvirran selvittämiseen sopivien kuormitusjärjestelmän akkujen valintaa varten. Käytetyt arvot sähkömoottoreiden vääntömomentille, pyörimisnopeudelle ja hyötysuhteelle on otettu silmämääräisesti kuvista 7 ja 9. Laskuissa käytetty kuormitettavan järjestelmän moottorien toimintapiste, siihen käytetty virran suuruus, tarvittava lisävirta ja testipenkin tuottama latausvirta on esitetty taulukossa 9.

Taulukossa näkyy, mikäli toiminta on ollut jatkuvaa tehoa vai hetkellistä huipputehoa, ensimmäisen ja toisen moottorin vääntömomentit, pyörimisnopeudet ja tehot, testattavan järjestelmän käyttämä virta ja mahdollisesti tarvittu lisävirta, sekä testipenkin tuottama latausvirta. Jatkuvan ja huipputehon ensimmäisissä kuormitustapauksissa testattavaa moottoria 1 ajetaan korkeimmalla tehollaan jatkuvan tai hetkellisen tehon alueella ja moottorille 2 ei jää tehoa käytännössä yhtään. Toisessa jatkuvan tehon ja neljännes-

sä huipputehon kuormitustapauksessa kuormitettavalle moottorille asetettiin suuri pyörimisnopeus hyvällä hyötysuhteella. Toisella huipputehon kuormitustapauksessa asetettiin testattavalle moottorille 1 korkein mahdollinen vääntömomentti. Kolmannessa jatkuvan tehon ja huipputehon tapauksissa pyrittiin minimoimaan tehohäviöt ohjaamalla testattavan ja testaavan järjestelmän molemmat moottorit mahdollisimman hyvän hyötysuhteen alueelle korkeimman mahdollisen generoidun latausvirran selvittämiseksi. Kaikissa kuormitustapauksissa riippumatta moottorin 1 toiminnasta moottorin 2 laskettiin käyttävän järjestelmän jäljellä olevan tehon mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella.

Taulukko 9: Testipenkin generoima latausvirta eri tilanteissa

Kuormitustapaus	Jatkuva teho 1	Jatkuva teho 2	Jatkuva teho 3	Huipputeho 1	Huipputeho 2	Huipputeho 3	Huipputeho 4
τ_{M1} [Nm]	43	18	30	170	190	65	20
n_{M1} [rpm]	3000	4500	2000	1550	1300	2500	8000
P_{M1} [kW]	13,5	8,5	6,3	27,6	25,9	17	16,8
τ_{M2} [Nm]	3	30	36	0	0	50	45
n_{M2} [rpm]	50	1500	2000	0	0	2450	2450
P_{M2} [kW]	< 0,1	4,7	7,5	0	0	12,8	11,5
I_{eKit} [A]	300	297	300	650	650	648	647
$I_{lisä}$ [A]	0	0	0	34	59	0	0
$I_{lat,koko}$ [A]	251	239	260	475	445	561	506

Taulukosta näkee kaikissa jatkuvan tehon käyttötapauksissa latausvirran olevan lähellä sen maksimaalista 260 A latausvirtaa. Huipputehon käyttötapauksissa on isoja eroja ja korkeimman hyötysuhteen 561 A latausvirta on huomattavasti suurempi kuin toiseksi suurin 506 A, vaikka niissä käytettyjen hyötysuhteiden erot ovat varsin pienet. Huipputeholla yhden moottorin käyttäessä järjestelmän kokonaistehon latausvirta on pienempi kuin kahden moottorin ollessa käytössä.

Testipenkissä on käytetty yrityksen omia tuotteita, joten halutaan käyttää Hydac GmbH:n tytäryhtiön Invenox GmbH:n akkuja, joita käytetään myös testattavassa eKit48-järjestelmässä. Akuissa on sisäinen valvontajärjestelmä, jonka kanssa kommunikointi on tuttua testattavan järjestelmän käytöstä. Akkuja voidaan kytkeä rinnan korkeintaan 6 kappaletta, jolloin niistä on mahdollista saada lisää virtaa. Taulukossa 10 näkyy In-

venox GmbH:n suurimmat akut, jotka voidaan kytkeä eKit48 -järjestelmään, ja niiden latausvirta eri määrillä rinnankytkettyjä akkuja. [56]

Taulukko 10: Latausvirta mahdollisille testipenkin energiavarastoille [56]

	Määrä	Jatkuva lataus [A]	Huippulataus [A]
LIOS 48L E	4	200	320
LIOS 48L E	6	300	480
LIOS 48L P	4	320	480
LIOS 48L P	5	400	600

Testipenkkiin valittiin 4 rinnankytkettyä LIOS 48L P -akkuja, joilla saa täytettyä jatkuvan latausvirran vaatimukset ja suurimman osan huippulatausvirran vaatimuksista. 5 kappaleella kyseistä akkuja saisi täytettyä kaikki vaatimukset latausvirrasta, jossa korkein laskettu tarve on 561 ampeeria. Yli 4 akun kytkeminen järjestelmään vaatii kuitenkin muutoksia tehonjakoyksikköön, kommunikointiin ja johtosarjaan, joten sitä halutaan välttää. Saavutetulla 480 ampeerin huippulatausvirralla on mahdollista kuormittaa yhtä moottoria täysin, joten ainoa rajoite on kahden moottorin samanaikaisella kuormituksella. Kuormitustestin aikana ei voisi kuormittaa moottoreita niin, että testattavan järjestelmän koko huipputeho on käytössä ja yhtä moottoreista ajetaan parhaimmalla hyötysuhteella. Tämä koettiin olevan hyväksyttävä rajoitus, jotta tehonjakoyksikkö, kommunikointi ja johtosarja eivät vaadi suuria muutoksia. Mikäli latausvirran huomataan käytössä olevan liian pieni, tehonjakoyksikössä on tilaa Rema-pistokkeen tasavirtalatausta varten, johon yhdistämällä ylimääräinen virta voidaan ladata sähköverkkoon [4]. Siinä tapauksessa kaikkea mahdollista energiaa ei enää saada talteen myöhempää käyttöä varten, minkä takia se jätetään testipenkistä ensisijaisesti pois. Valitun energiavaraston yksittäisen akun LIOS 48L P tekniset tiedot on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11: Akun LIOS 48L P tekniset tiedot [56]

Jännite [V]	48
Kapasiteetti [Ah]	90
Kapasiteetti [kWh]	4,5
Huippu purkautumisvirta [A]	350
Jatkuva purkautumisvirta [A]	120
Huippu latausvirta [A]	120
Jatkuva latausvirta [A]	80
Mahdollisuus kytkeä rinnan [kpl]	6
Yhteinen huippuvirta rinnankytkettynä [A]	650 A
Suojaus	IP6k7
Ohjaus	CAN

Neljällä akulla purkautumisvirta on ohjelmoitu korkeintaan 650 ampeerin suuruiseksi, mikä riittää pyörittämään testattavan järjestelmän moottoreita. Testattava järjestelmä voi ladata akkuihin vain 320 ampeerin huippulatausvirralla ja 200 ampeerin jatkuvalla virralla, joten kuormittavan testipenkin akkujen jatkuva 480 ampeerin purkautumisvirta on tarpeeksi suuri myös karkaavan kuorman testaamiseen.

4.4 Tehonjakoyksikkö

Tehonjakoyksikkö (PDU) on sähköisen järjestelmän ydin ja mahdollistaa komponenttien yhtenäisen toiminnan ohjaamalla virtaa energiavarastosta toimilaitteille. Yksikkö toimii väliskappaleena energialähteen ja energiaa tarvitsevien komponenttien välillä ja kaikki sähköenergia kulkee sen läpi. Myös akkujen lataaminen ulkoisen virtalähteen avulla tapahtuu PDU:n kautta. Toimilaitteiden energianjakelun lisäksi myös järjestelmän ohjaus voi saada virtaa tehonjakoyksikön kautta. Järjestelmän turvatoiminnot on toteutettu PDU:ssa, koska sen kautta saa parhaiten vaikutettua koko järjestelmään. [9]

Asiakkaiden tilatessa eKit48-järjestelmän ne voivat valita kahden erikokoisen tehonjakoyksikön välillä käyttötarpeiden perusteella: mini-PDU ja maxi-PDU. Testattavaan järjestelmään valittuun maxi-PDU:hun saa kytkettyä yhden moottorin sijaan kaksi ja kahden akun sijaan neljä. Tehonjakoyksikköön on yhdistetty neljä akkua, joiden antamaa virtaa se jakaa, ja kaksi taajuusmuuttajaa, joiden kautta se jakaa virtaa moottoreille. Li-

säksi siihen on yhdistetty akkujen lataamista ja mahdollisen lisäenergian saamista varten yksi tasavirtalaturi ja kaksi sisäistä vaihtovirtalaturia. [4]

Testattavan järjestelmän ohjausyksikkö on yhdistetty tehonjakoyksikköön saadakseen tarvitsemaansa 13,8 voltin sähköä [57]. Yksikössä on myös integroitu hätäkytkin, jolla voidaan pysäyttää koko järjestelmän toiminta.

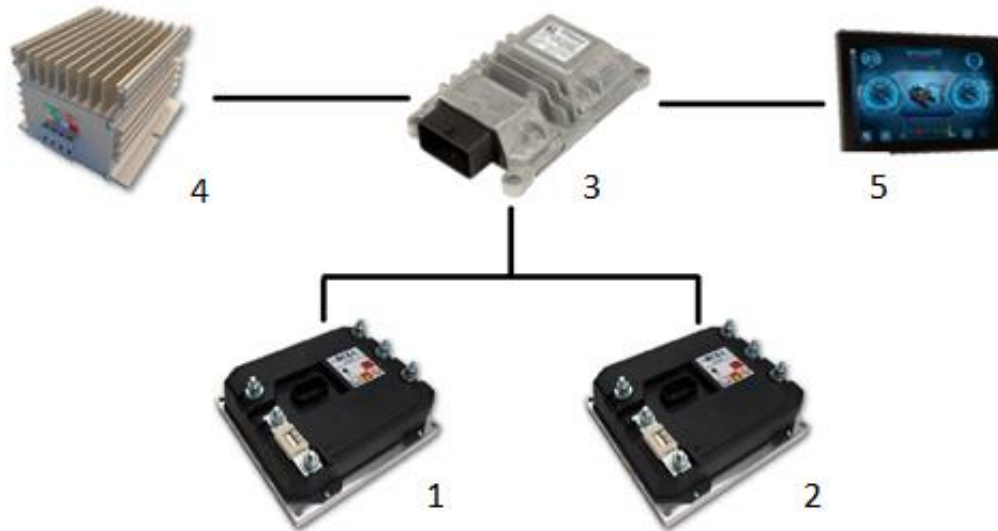
Kuormittava testipenkki tarvitsee toimiakseen vastaavasti tehonjakoyksikön, johon voidaan yhdistää tarvittavat neljä akkua ja kaksi taajuusmuuttajaa. Lisäksi sen kautta olisi hyvä saada tarvittava teho järjestelmän ohjaukseen ja mahdollisuus ladata akkuja tarvittaessa.

Testipenkkiin valitaan siis testattavankin järjestelmän käyttämä Maxi-PDU, joka täyttää nämä kriteerit. Se on yrityksen itse tuottama tehonjakoyksikkö, joka on todettu toimivaksi jo valittujen komponenttien kanssa ja siihen saa yhdistettyä testattavan eKit48-järjestelmän johtosarjan tarvittavaa kommunikointia varten.

4.5 Ohjaus

Sähköinen ohjausjärjestelmä koostuu monesta eri komponentista. Käyttäjän päätökset muutetaan sähköisiksi signaaleiksi joystick-sauvaohjainten tai painikkeiden kautta. Signaalit muutetaan digitaalisiksi tiedoiksi ja käskyiksi säätimessä, joka ohjaa koko järjestelmän toimintaa. Säädin lähettää käskyt eteenpäin toimilaitteille, joilta se myös saa jatkuvasti tietoa niiden tilasta. Järjestelmän toimintatila voidaan nähdä erilaisten siihen kytkettyjen näyttöjen kautta. [58]

Testattavan järjestelmän ohjaus on kuvattu kuvassa 10 ja se on toteutettu viiden komponentin avulla: moottoreita ohjaavat taajuusmuuttajat ovat merkitty numeroilla 1 ja 2, niihin kytketty ohjausyksikkö merkitty numerolla 3, ohjausyksikön virtalähde merkitty numerolla 4 ja käyttöliittymänä toimiva manuaalinen ohjauslaite merkitty numerolla 5.



Kuva 10: Ekit48 ohjausjärjestelmä

Järjestelmän sisääntulo tapahtuu manuaalisen ohjaimen kautta, jossa painikkeiden ja kääntönappien avulla käyttäjä voi hallita järjestelmän toimintaa. Ohjaimessa on painike järjestelmän käynnistämiseen, jokaista sähkömoottoria kohden yksi kääntönappi moottorin pyörimisnopeuden muuttamiseen ja yksi painike yhden moottorin suunnan vaihtamista varten. Toisen moottorin suuntaa on mahdollista muuttaa vain järjestelmän parametrejä muuttamalla. Ohjaimessa on myös merkkivalot, jotka ilmoittavat käyttäjälle järjestelmän häiriöstä ja akkujen latauksen olevan alle 10 % kokonaiskapasiteetista. Sisääntulona järjestelmälle on lisäksi hätäseis-nappi, joka pysäyttää järjestelmän toiminnan. Ekit48-järjestelmälle on myös vaihtoehtoisia sisääntuloja manuaalista ohjausta varten, kuten polkimet tai joystick-sauvaohjaimet.

Manuaalinen ohjain on kytketty järjestelmän säätimenä toimivaan ohjausyksikköön TTC 32S, joka prosessoi ohjaimen signaalin ja ohjaa molempien taajuusmuuttajan toimintaa. Ohjausyksikön tiedot on näytetty taulukossa 12.

Taulukko 12: Ohjausyksikön TTC 32S tekniset tiedot [59]

Proessorin ydin	Infineon xc2267
Proessorin taajuus	80 MHz
Ohjelmisto	C, CODESYS
Käyttöliittymät	2 x CAN 1 x CAN-väylän päätte
Liitin	48 pinniä
Syöttöjännite	8 – 32 V
Kokonaiskuormitusvirta	24 A
Turvallisuusohjelmisto	Watchdog

Ohjausyksikköön on ladattu järjestelmän ohjelmisto, joka kommunikoi järjestelmän komponenttien kanssa. Erillinen tietokone voidaan yhdistää ohjausyksikköön, jolloin on mahdollista muuttaa järjestelmien parametrejä, joita ovat muun muassa järjestelmässä käytössä olevat sähkömoottorit ja niiden lukumäärä, pyörimissuunta, ja maksiminopeus, kuten myös mahdollisuus valita moottoreiden pyörimisnopeuden tai vääntömomentin ohjauksen välillä.

Ohjausyksikön virtalähteenä toimii DC/DC jännitemuunnin DMC WA4812900, joka on kytketty tehonjakoyksikön ja ohjausyksikön väliin. Tehonjakoyksikön sähkön 48 voltin jännite on liian korkea ohjausyksikköä varten, minkä takia tarvitaan tasavirtamuunnin muuttamaan se ohjausyksikölle sopivaksi 13,8 voltin jännitteeksi. Testattavassa järjestelmässä käytössä olevan tasavirtamuuntimen tiedot on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13: Tasavirtamuunnin DMC WA4812900 tekniset tiedot [57]

Nimellissyöttöjännite	36/48 V
Pienin syöttöjännite	29 V
Korkein syöttöjännite	60 V
Ulostulojännite	13,8 V
Teho	900 W
Liitin	Molex Mini-Fit Sr. 42816

Järjestelmän kommunikointi toimii johtosarjan kautta, joka yhdistää järjestelmän kaikki komponentit. Johtosarja toimii eKit48-järjestelmällä riippumatta siihen valituista moduuleista ja niiden määrästä. Johtosarjassa kulkee tieto muun muassa järjestelmän tilasta ja toiminnasta. Siinä on CAN High ja CAN Low johdoista koostuva CAN-väylä, joiden kautta komponentit saavat käskyjä ohjausyksiköltä ja lähettävät informaatiota omasta tilastaan [60].

Toinen tapa ohjata eKit48:n sähkömoottoreita on yhdistää tietokone CAN-väylään ja irrottaa ohjausyksikkö johtosarjasta. Tietokoneen kautta voi hallita taajuusmuuttajien toimintaa Zapi Hd CAN-ohjelmiston kautta. Ohjelmiston avulla saadaan yhteys yhteen taajuusmuuttajaan ja voidaan muuttaa sen parametrejä, kuten korkeinta syöttövirtaa, moottorin huippunopeutta ja vääntömomentin ohjauksen mahdollisuutta, minkä lisäksi sillä voi ohjata ohjelmiston käyttöliittymän kautta moottoreiden toimintaa manuaalisen ohjaimen tavoin. Ohjelmistoa ei tarvita ohjausyksikön ja manuaalisen ohjaimen ollessa kytkettynä. Ohjelmistolla on mahdollista ohjata vain yhtä taajuusmuuttajaa kerrallaan, joten se ei sovellu suunniteltuun testipenkkiin, johon kuuluu kaksi taajuusmuuttajaa ja sähkömoottoria.

Kuormittavassa testipenkissä ohjauksen avulla on tarkoitus ohjata molempien sähkömoottorien vääntömomenttia. Tämä onnistuu eKit48-järjestelmän ohjausjärjestelmän avulla, johon kuuluu ohjausyksikkö TTC 32S, manuaalinen ohjain, DC/DC jännitemuunnin DMC WA4812900 ja kaikkia komponentteja yhdistävä johtosarja. Ohjausyksikön parametrisoinnilla asetetaan vääntömomentin ohjaus molemmille moottorille ja yhden moottoreiden pyörimissuunta vastakkaiseksi kuin niihin kytkettyjen testattavien sähkömoottoreiden pyörimissuunta. Vain yhden moottorin pyörimissuuntaa voi vaihtaa nopeasti ohjaimesta, mutta niin voi myös kuormitettavassa järjestelmässä, joten molempien kuormittavan sähkömoottorien nopea pyörimissuunnan vaihto ei ole tarpeellista.

4.6 Lataus

Sähköisissä järjestelmissä tarvitaan ulkoinen virtalähde akkujen energiavarastojen täyttämiseen. Liikkuvilla ajoneuvoissa on käytössä sisäinen vaihtovirtalaturi, joka muuttaa sähköverkosta saadun vaihtovirran akuille sopivaksi tasavirraksi. Laturit voivat olla ohjelmoitavia, jolloin niiden toimintaa voidaan määrittellä ennalta ja niiden kautta voidaan tarkastella akkujen toimintaa kokonaisuutena [61]. Sisäisen laturin teho vaikuttaa akkujen latauksen nopeuteen, kunhan latauspisteen teho on laturia suurempi. Muussa tapauksessa latauksen nopeuden määrittää latauspiste. [62]

Kuormitettavassa eKit48-järjestelmässä on sisäänrakennettu Zivan SG3 -laturi. Siinä on ohjelmoitava latausprofiili ja sillä voi säätää haluttua lataussykliä [61]. Latureita voi kytkeä rinnakkain kaksi kappaletta ja ne kommunikoivat toistensa ja muun järjestelmän kanssa CAN-väylän kautta [4]. Se kytketään Schuko-pistokkeella sähköverkkoon, josta se lataa akkuja 2,3 kilowatilla vaihtovirtaa [4]. Laturin tekniset tiedot on näytetty taulukossa 14.

Taulukko 14: Laturin Zivan SG3 tekniset tiedot [61]

Tyyppi	Yksivaiheinen
Syöttöjännite [V]	95 – 265
Ulostulojännite [V]	48
Syöttötaajuus [Hz]	50 – 60
Huippu-ulostulovirta [A]	80
Huippuhyötysuhde [%]	93
Suojaus	IP65

Testipenkin akkujen lataus tapahtuu ensisijaisesti testattavan järjestelmän kuormituksessa generoidun energian avulla, jolloin ylimääräisiä latureita ei tarvita. Testipenkkiä kuitenkin on mahdollista käyttää myös testattavan järjestelmän kuormittamiseen, jolloin kuormitusjärjestelmän akuista otetaan virtaa, minkä jälkeen halutaan mahdollisuus ladata akkuja ilman testattavaa järjestelmää. Kuormitustilanteessa on myös energiahäviöitä, joiden takia tarvitaan energian latausta järjestelmän ulkopuolelta. Järjestelmän energiavaraston täyteen lataamisen keston voi laskea kaavalla

$$t = \frac{C}{P}$$

missä C on energiavaraston kapasiteetti Jouleissa, P on laturin teho wateissa ja t on latauksen kesto sekunneissa. Zivan SG3 -laturilla neljän LIOS 48L P akun täyteen lataus kestäisi noin 7,8 tuntia.

Latauksen kesto on pitkä, joten testipenkkiin otetaan kaksi rinnankytkettyä laturia, jolloin latauksen kesto puolittuu alle neljään tuntiin. Latauksen teho on rajoitettu Schuko-pistokkeesta saatuun tehoon, mikä on pienempi kuin joidenkin muiden pistokkeiden. Schuko on kuitenkin yleisin pistoke ja helposti saatavilla oleva liitäntä sähköverkkoon koettiin tärkeämpänä kriteerinä testipenkin liikuteltavuuden takia, kuin mahdollisimman nopea lataus [63]. Latausta käytetään oletuksena yleensä vain energiahäviöiden kom-

pensointiin, mihin valitut laturit sopivat hyvin. Kyseiset laturit sopivat hyvin myös valittuun tehonjakoyksikköön, johtosarjaan ja järjestelmän ohjelmistoon.

4.7 Momenttianturi

Testipenkin avulla pitäisi voida selvittää testattavan järjestelmän energiatehokkuus, jota varten pitäisi selvittää sen kokonaistehohäviöt [64]. Tehohäviöt saadaan selville vertailemalla testattavan järjestelmän sisäänmeno- ja ulostulotehoa [64]. Sisäänmenoteho saadaan selville mittaamalla akuista ja mahdollisesti latureista saatavaa virtaa ja jännitettä. Tätä varten testattavaan järjestelmään pitää lisätä sopivat sähköanturit, mutta se ei ole osa kuormittavaa testipenkkiä, joten sopivien sähköantureiden valintaa ei käsitellä tässä työssä.

Energiatehokkuuden selvittämiseen voisi käyttää myös taajuusmuuttajien antamaa monipuolista tietoa järjestelmän tilasta. Niiden keräämää tietoa pidetään kuitenkin liian epätarkkoina ja epäluotettavina järjestelmän tarkkaa analyysia varten.

Ulostuloteho saadaan selville mittaamalla testattavan järjestelmän sähkömoottoreiden vääntö ja pyörimisnopeus, minkä jälkeen teho lasketaan kaavalla 1. Vääntö ja pyörimisnopeus saadaan mitattua sopivilla vääntömomenttiantureilla, jotka kytketään mekaanisesti kuormittavien ja kuormitettavien moottoreiden väliin.

Testipenkkiin valittiin HBK akselimomenttianturi T210, jolla voidaan jatkuvasti mitata kuormittavan ja kuormitettavan moottorin välisen akselin vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta. Mitatut arvot voidaan tallentaa anturiin yhdistettyyn tietokoneeseen myöhempiä analysointia varten. Vääntömomenttianturin tekniset tiedot näkyvät taulukossa 15.

Taulukko 15: Vääntömomenttianturi T210 tekniset tiedot [65]

Nimellisvääntömomentti [N]	200
Huippunopeus [rpm]	14 000
Mittaustapa	Optinen
Nopeuden mittausta [impulssi/kierros]	512
Syöttöjännite [V]	10 – 30
Ulostulojännite [V]	10
Ulostulosignaali [Hz]	10
Suojaus	IP40
Kytkenä	Bellows
Kytkenän sisähalkaisija [mm]	28

Anturin mukana tulee mekaaninen paljekyllin, millä sen saa kiinnitettyä kuormitettavan ja kuormittavan moottorin akseliin. Tämä kytkentä toimii ainoana kytkentänä moottoreiden välissä ja moottorit kuormittavat toisiaan sen kautta. Molempien moottoreiden akselit ovat halkaisijaltaan 28 millimetriä, joten valitaan kytkennäksi 28 millimetrin halkaisijan paljekyllin [49][51].

5. TESTIPENKIN RUNGON SUUNNITTELU

Komponenttien valinnan lisäksi testipenkin rakentaminen valmiiksi vaatii rungon, johon valitut komponentit voidaan kiinnittää ja luoda niistä yksi helposti hallittava kokonaisuus. Tässä luvussa suunnitellaan runko, esitellään komponenttien asemointi rungossa ja tavat yksittäisten komponenttien kiinnitykselle.

Rungon materiaaliksi valittiin alumiiniprofiili, sillä niistä tehdyt rakennelmat ovat modulaarisia, monipuolisia ja helposti muokattavia. Alumiiniprofiili on kevyt, mutta kestävä materiaali, joihin on profiileissa olevien urien ansiosta helppo kiinnittää komponentteja. [66]

Rungon mitoituksessa huomioitiin valittujen komponenttien mitat ja painot. Kyseiset tiedot on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16: Testipenkin komponenttien mitat ja painot

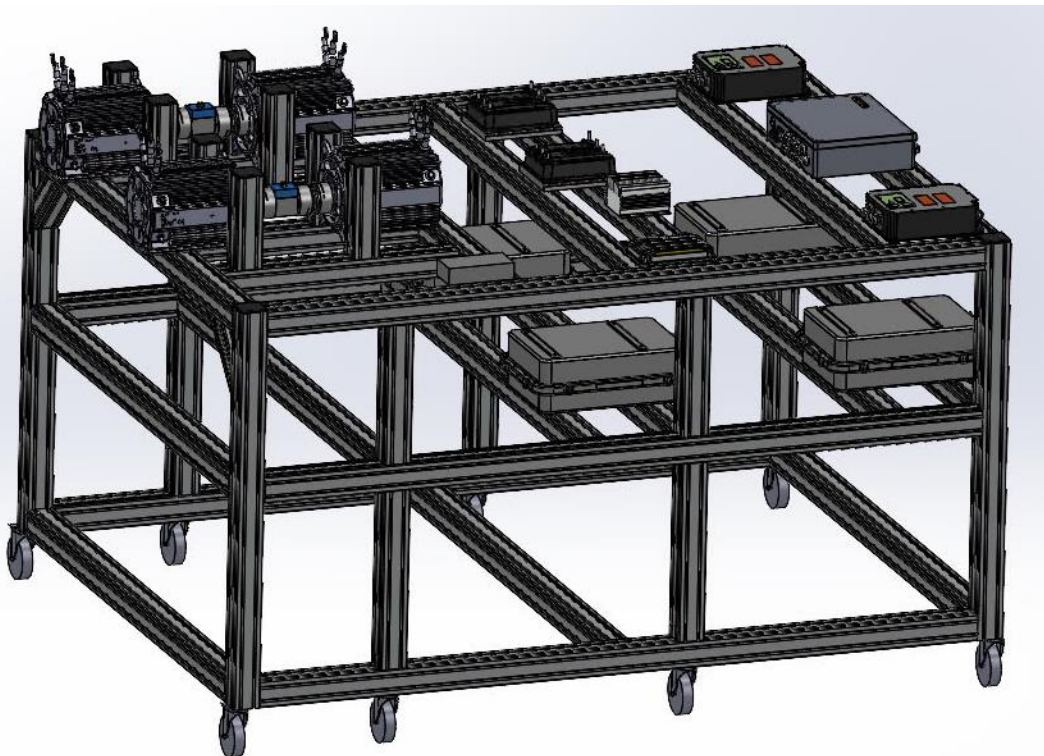
Komponentti	Mitat [mm]	Paino [kg]	Määrä [kpl]
Moottori 205A-08011-ABC	296,5 x 220 x 250	29	2
Moottori 205A-12010-SSE	336,5 x 220 x 250	37	2
Taajuusmuuttaja ACE-4	235 x 204 x 103	4,5	2
Tehonjakoyksikkö Maxi-PDU	400 x 310 x 120	20	1
Laturi SG3	323 x 220 x 140	8	2
Akku LIOS 48L P	511 x 370 x 176	40	4
Jännitemuunnin DMC WA4812900	147 x 90 x 59	3	1
Ohjausyksikkö TTC 32S	147 x 92 x 38	0,33	1
Vääntömomenttianturi T210	170 x 54 x 93,6	1,3	1
Manuaalinen ohjain	200 x 230 x 70	4	1

Komponenttien mittojen lisäksi rungon mitoitukseen vaikuttavat komponenttien välissä olevat kaapelit, joissa johdetaan 48 voltin sähköä. Kaapelit ovat läpimitaltaan noin 12 mm ja niiden arvioitiin tarvitsevan minimissään 300 mm tilaa komponenttien väliin suuren taivutussäteen takia.

Runko suunniteltiin Maycad-ohjelmistolla ja rungon materiaalina käytettiin 80 x 80 mm paksuja palkkeja materiaalista Al Mg Si 0,5 F25. Palkkien kantavuus tarkistettiin ohjelmiston omalla ominaisuudella, joka laskee palkkien taipumisen. Ominaisuuden mukaan kaikki palkit taipuvat alle 0,5 mm komponenttien painon alla osoittaen rungon kestävyden.

Suunniteltu alumiiniprofiilirunko on mitoiltaan 2365 x 1800 x 1605 mm ja sen ominaismassa on 315 kg. Siinä on palkit rungon tukevoittamista ja komponenttien kiinnitystä varten. Suurin osa komponenteista on kiinnitetty kahteen palkkiin tukevaa kiinnitystä varten.

Runkoon on suunniteltu renkaat testipenkin liikuttamista varten. Valituissa renkaissa on jarrut ja ne kestävät 100 kg painon. Renkaita valittiin kahdeksan kappaletta testipenkin kokonaispainon kannatteluun. Suunniteltu kuormittava testipenkki näkyy kuvassa 11 ja tarkemmat kuvat testipenkistä eri näkökulmista löytyvät liitteestä 1.

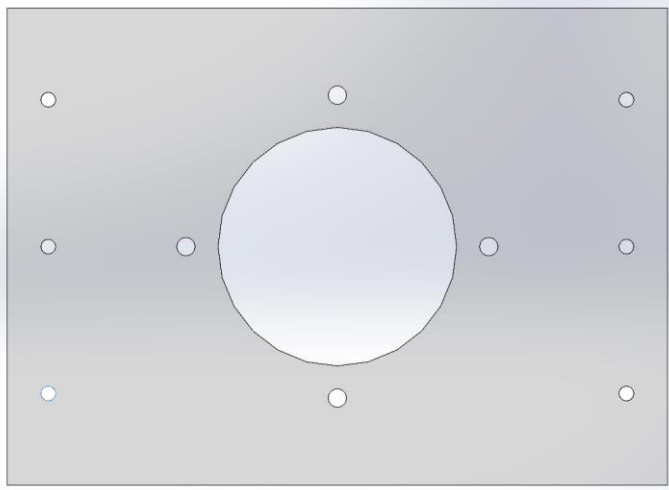


Kuva 11: Suunniteltu kuormittava testipenkki

Järjestelmän akut on sijoitettu keskikorkeuteen runkoa, sillä ne vievät paljon tilaa, eikä niihin ole tarpeellista päästä käsiksi testipenkin käytön aikana. Niiden paino tasapainottaa rungon toisessa päässä olevia painavia moottoreita ja jakaa testipenkin kokonaispainon tasaisesti. Rungon päällä akkujen päädyssä on tehonjakoyksikkö, jotta akut voidaan yhdistää siihen helposti, ja laturit molemmissa kulmissa, joista niillä on lyhyt etäisyys tehonjakoyksikköön ja lyhyin etäisyys mahdollisiin pistokkeisiin. Tehonjakoyksikköön on yhdistetty tasavirtamuuttaja ja molemmat taajuusmuuttajat, jotka ovat sijoitettu ohjausyksikön kanssa keskelle runkoa. Niihin on helppo päästä käsiksi ja ne saadaan suoraan yhdistettyä tarvittaviin komponentteihin, kuten sähkömoottoreihin. Komponenttien asettelulla pyritään pitämään paksut korkean jännitteen johtimet mahdollisimman suorana.

Rungon päädyssä on pystypalkkeja sähkömoottorien kiinnittämiseen. Testipenkkiin on tarkoitus kiinnittää myös testattavan järjestelmän sähkömoottorit, sillä moottoreiden kohdistaminen onnistuu helpommin niiden ollessa asennettuna samassa rungossa. Testattava järjestelmä olisi johdoilla testattavissa moottoreissa kiinni, mutta moottorit kiinnitetään testipenkin runkoon. Pystypalkit on kiinnitetty samoihin palkkeihin vastakkaisen moottorin pystypalkkien kanssa, mikä helpottaa moottoreiden kohdistamista. Pystypalkkeja voidaan myös liikuttaa palkilla, minkä ansiosta testattavia moottoreita voidaan vaihtaa, vaikka ne tarvitsisivatkin eri etäisyyden kuormittaviin sähkömoottoreihin. Sähkömoottorit voidaan myös kytkeä ilman momenttianturia tai erilaisella kytkennällä niiden etäisyyden säädön ansiosta.

Sähkömoottorit kiinnitetään rungon pystypalkkeihin metallilevyjen avulla. Levyt ruuvataan kiinni runkoon ja moottorit ruuvataan kiinni levyyn. Metallilevyn keskellä on reikä moottorin akselia varten. Metallilevyn koko on 360 x 260 x 10 millimetriä. Sähkömoottorin laippa määrittää keskellä olevan reiän koon ja ruuvien paikat. Valitun 205A-12010-SSE sähkömoottorin tarpeisiin mitoitettiin keskelle levyä läpimitaltaan 130 mm reikä, sen ympärille neljä reikää läpimitaltaan 8 mm ja levyn reunoille kuusi reikää läpimitaltaan 8 mm levyn runkoon kiinnittämistä varten [51]. Suunnitelma metallilevystä näkyy kuvassa 12.



Kuva 12: Sähkömoottoreiden kiinnityslevy

Suunnitellun testipenkin rungossa täyttyvät sen kaikki kriteerit. Sitä on helppo liikuttaa pyörien ansiosta ja siinä on myös helppo vaihtaa testattava moottori toiseen, kunhan toiselle moottorille tehdään siihen sopiva kiinnityslevy. Rungon kaikkia palkkeja voidaan irrottaa ja liikutella tarvittaessa, minkä kautta myös muutokset testipenkkiin onnistuvat.

Moottoreiden likimääräinen kohdistus onnistuu varsin hyvin suunnitellulla rungolla. Valittu kytkin kuitenkin asettaa melko tarkat vaatimukset kohdistukselle. Tarkkuus on saavutettavissa suunnitellulla testipenkillä, mutta voi käytännössä viedä paljon aikaa. Tätä varten voisi hyvin olla valmis mekanismi, millä pienet säädöt onnistuisivat kätevästi. Tätä mekanismia ei kuitenkaan koettu tärkeäksi tähän testipenkkiin, sillä ilmankin sitä moottorit ovat kohdistettavissa tarkasti. Mikäli testipenkkiä kehitetään jatkossa pidemmälle, tämän mekanismin lisääminen on suositeltua.

6. KUORMITUSLAITTEISTON RAKENTAMINEN

Kuormittavan testipenkin suunnittelun jälkeen sen toimivuus varmistetaan rakentamalla testipenkki ja kuormittamalla sillä testattavaa järjestelmää. Tässä luvussa käydään läpi testipenkin rakentamisen prosessi, siihen tehdyt muutokset suunniteltuun testipenkkiin verrattuna ja muutoksien syyt, sekä kohdatut ongelmat testipenkin kokoamisessa.

Komponenttien toimitusajat olivat liian pitkiä diplomityön aikataulua varten, minkä takia päätettiin rakentaa yksinkertaisempi versio kuormituslaitteistosta, jota myöhemmin voidaan helposti laajentaa suunnitellun mukaiseksi. Ensimmäisessä vaiheessa toteutettavalla testipenkillä halutaan kuormittaa kahden moottorin sijaan yhtä moottoria. Valitut komponentit ja niiden erot suunnitellussa testipenkissä ja toteutettavassa testipenkissä näkyvät taulukossa 17.

Taulukko 17: Suunnitellun ja toteutettavan testipenkin komponentit

Suunnitellun testipenkin komponentti	Suunniteltu määrä	Toteutettavan testipenkin komponentti	Toteutettava määrä
Sähkömoottori 205A-12010-SSE	2	Sähkömoottori 205A-08011-SSE	1
Taajuusmuuttaja ACE-4	2	Taajuusmuuttaja ACE-4	1
Tehonjakoyksikkö Maxi-PDU	1	Tehonjakoyksikkö Maxi-PDU	1
Laturi SG3	2	Laturi SG3	1
Akku LIOS 48L P	4	Akku LIOS 48L E	2
Jännitemuunnin DMC WA4812900	1	-	0
Ohjausyksikkö TTC 32S	1	-	0
Vääntömomenttianturi T210	1	-	0
Manuaalinen ohjain	1	-	0

Ilmenneen ohjelmistovian takia eKit48-järjestelmän ohjausyksikköä TTC 32S ei voida käyttää kuormittavan laitteiston vääntömomenttiohjaukseen. Kuormittavaa toimintoa varten kuitenkin tarvitaan vääntömomenttiohjaus, joten suunnitellun testipenkin ohjausta ei voida käyttää toteutettavassa testipenkissä. Sen sijaan ohjaus toteutetaan yhdistämällä tietokone taajuusmuuttajaan ja ohjaamalla sitä Zapi Hd CAN-ohjelmistolla. Ohjelmistolla voidaan ohjata vain yhden sähkömoottorin vääntömomenttia, mikä myös puoltaa vain yhden moottorin käyttöä tällä hetkellä toteutettavassa testipenkissä. Kun ohjausyksikön ohjelmisto on korjattu, testipenkkiä voidaan laajentaa suunnitellun mukaiseksi kahta moottoria kuormittavaksi.

Toteutettavaan kuormituslaitteistoon käytetään kahta LIOS 48L E -akkuja, joille voidaan ladata testipenkin generoimaa virtaa jatkuvasti vain noin 4,8 kilowatin teholla ja hetkelisesti noin 7,7 kilowatin teholla. Tämä on huomattavasti vähemmän kuin suunnitellussa testipenkissä ja tarkoittaa sitä, ettei testattavaa sähkömoottoria voida kuormittaa ja testata yhtä monipuolisesti. Kuormituslaitteisto on päätetty kytkeä testattavan järjestelmän pienempään sähkömoottoriin 159AH-06012-EDE, josta voi saada jatkuvaa tehoa 10 kilowattia ja huipputehoa 21 kilowattia [67]. Kuormitustilanteessa pitää siis tarkkailla kuormittavan sähkömoottorin generoimaa tehoa, jotta testipenkien akkujen maksimilatausvirtaa ei ylitetä.

Toteutettavassa testipenkissä käytetään eKit48-järjestelmän johtosarjaa, sillä näin voidaan varmistaa kaiken tarpeellisen kommunikoinnin tapahtuvan onnistuneesti. Lisäksi valmista johtosarjaa käytettäessä testipenkkiä voidaan laajentaa tulevaisuudessa lisäämällä komponentteja eikä muita muutoksia ole tarpeen tehdä.

Testipenkki rakennetaan alumiiniprofiiliin sijaan 800 x 1200 mm kokoiselle trukkilavalle, jotta se ei vie liikaa tilaa. Testipenkkiä laajennettaessa tulevaisuudessa sille voidaan edelleen rakentaa suunnitellun mukainen alumiiniprofiilirunko. Trukkilavaan komponentit on helppo kiinnittää ja sitä on helppo liikuttaa. Rakennettu kuormituslaitteisto näkyy kuvassa 13.



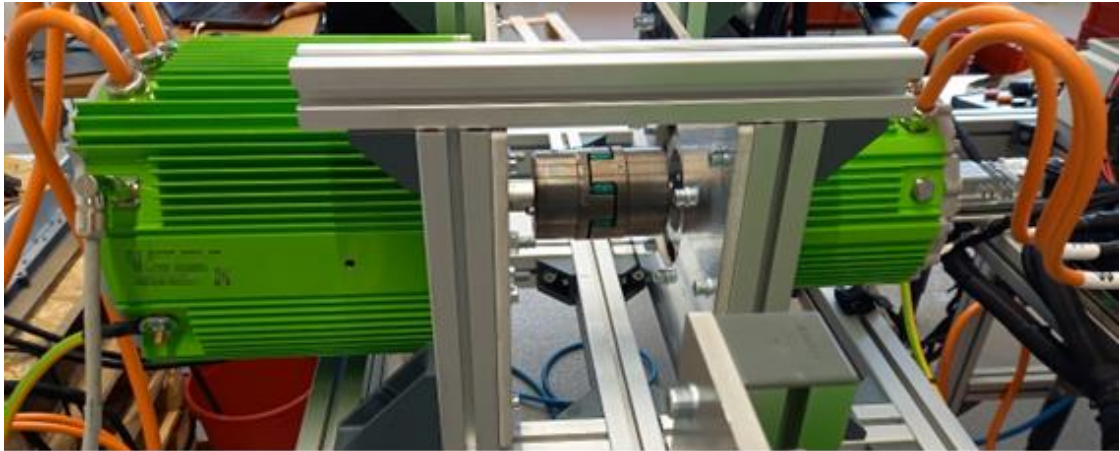
Kuva 13: Rakennettu testipenkki

Rakennetussa testipenkissä sähkömoottoria ei kiinnitetty trukkilavaan muun testipenkin kanssa, vaan se kiinnitetään testattavan järjestelmän runkoon mahdollisimman hyvää kohdistamista varten. Sähkömoottorin ja taajuusmuuttajan väliset kaapelit on jätetty mahdollisimman pitkiksi moottorin helppoa liikuttamista varten.

Kun komponentit on kiinnitetty trukkilavaan ja yhdistetty toisiinsa kaapeleilla ja johtosarjalla, järjestelmä maadoitetaan. Maadoitus parantaa sähköturvallisuutta estämällä vika-tilanteessa kosketusjännitteen esiintymisen [68]. Maadoitusjohdot yhdistetään kaikkiin järjestelmän komponentteihin, minkä jälkeen niistä mitataan maadoitusvastus, jolla varmistetaan maadoituksen resistanssin olevan riittävän alhainen, ja eristysvastus, jolla varmistetaan järjestelmän virtapiirin olevan erittäin hyvin eristetty maadoituksesta eli järjestelmän kestävän ilman turvallisuusuhkia suuremmatkin jännitteet kuin on tarkoitettu [69].

Maadoituksen ja sen tarkistuksen jälkeen sähkömoottori kytketään akselistaan mekaanisesti testattavan sähkömoottorin akseliin. Vääntömomenttianturia ei testipenkin ensimmäiseen versioon lisätä, vaan moottorit kytketään toisiinsa leukakytkimellä. Kuormittava sähkömoottori kiinnitetään testattavan järjestelmän alumiiniprofiilirunkoon. Testattavan järjestelmän runko ei ole niin tukeva kuin olisi suotavaa, sillä sitä ei ole suunniteltu kuormittavaan toimintaan. Suunnitellun testipenkin rungossa toisiinsa kiinnitettävät sähkömoottorit ovat molemmat kiinni samassa palkissa kohdistamisen helpottamiseksi. Tämä ei ole testattavan järjestelmän rungossa mahdollista, vaan moottorit kiinnitetään

eri palkkeihin. Tämän seurauksena moottoreiden kohdistaminen on huomattavasti hankalampaa. Kytkeytyt sähkömoottorit näkyvät kuvassa 14.



Kuva 14: Toisiinsa kytkettynä kuormittava ja kuormitettava sähkömoottori

Mikäli moottoreiden linjauksen virhemarginaalit ylittyvät, käytetty kytkentä saattaa vaurioitua. Kytkenän virhemarginaalit näkyvät taulukossa 18.

Taulukko 18: Käytetyn kytkennän virhemarginaalit [70]

Aksiaalinen siirtymä [mm]	Säteittäinen siirtymä [mm]	Kulmasiirtymä [°]
1,8	0,19	0,8

Moottorien kohdistamisessa käytetään usein laseria niiden täydellisen linjauksen varmistamiseksi. Moottoreiden kiinnittämiseen tarkoitettu runko kannattaa olla mahdollisimman tukeva taipuman minimoimiseksi kuormitustilanteessa. Rakennetussa testipenkissä nämä eivät toteudu, joten kuormituksessa kannattaa noudattaa varovaisuutta pyörimisnopeuden ja vääntömomentin suhteen.

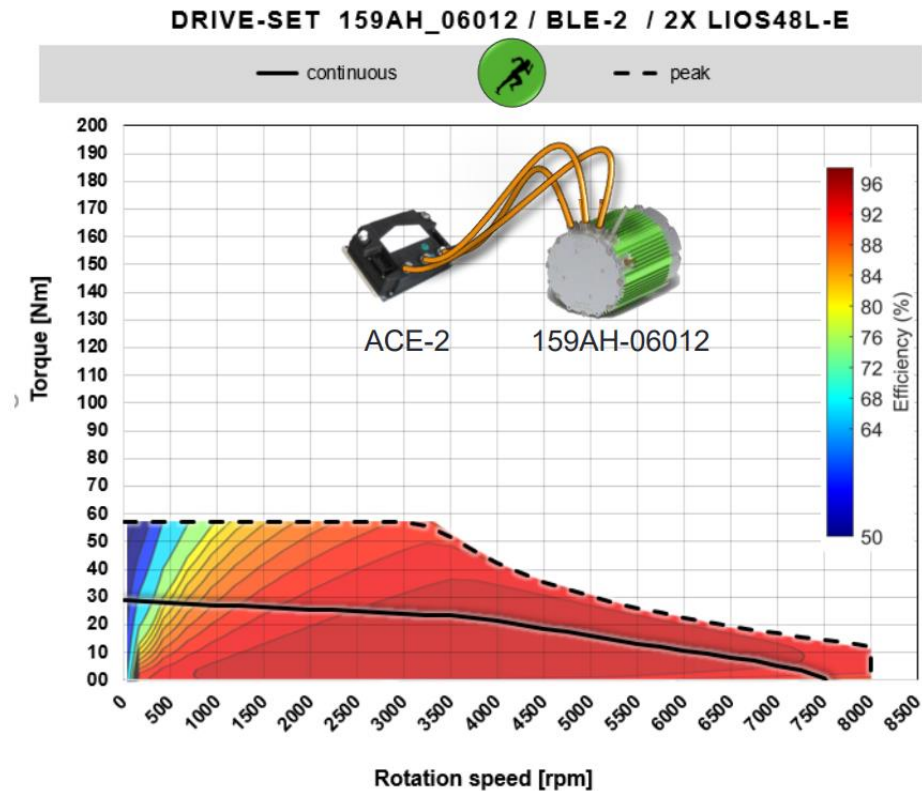
7. TESTIPENKIN TOIMINNAN VERIFIOINTI

Järjestelmien rakentamisen ja mekaanisen kytkennän jälkeen testipenkin kuormittavaa käyttöä voidaan testata testipenkin toiminnan verifioimiseksi. Tässä luvussa tarkastellaan testipenkin toimintaa ja sen kuormituksen vaikutusta testattavaan järjestelmään. Järjestelmien toimintaa mitataan ja tulosten avulla tarkastellaan mekaanisen kytkennän kohdistamisen onnistumista, testipenkin tuottaman kuorman vaikutusta testattavaan järjestelmään ja testipenkin kykyä generoida virtaa kuormituksen kautta.

Järjestelmien testaus tapahtuu kuormitustilanteiden kautta, joiden tapaiseen järjestelmiä on tarkoitus myöhemmin käyttää. Testattavassa eKit48-järjestelmässä pyörimisnopeutta ohjataan manuaalisesti ja testipenkissä ohjataan jarruttavaa vääntömomenttiä. Testattavan ja kuormittavan järjestelmän toimintaa mitataan ja verrataan toisiinsa. Molempien järjestelmien mittaus tehdään taajuusmuuttajien Zapi Hd CAN-ohjelmistolla, jolla myös asetetaan testipenkin vääntömomentti. Testeissä vääntömomentti asetetaan vakioksi eikä sitä muuteta testin aikana, sillä silloin testipenkin mittaukset keskeytyvät.

Taajuusmuuttajan ohjelmiston kautta asetetaan taajuusmuuttajan parametrit, jotka ohjaavat testipenkin toimintaa. Testipenkin parametrusointi perustuu testattavan eKit48-järjestelmän toimivaksi todettuihin parametreihin testipenkin taajuusmuuttajasähkömoottoriparille, joista on muutettu vain tarvittavat parametrit vääntömomenttiohjausta varten. Kuormitettavan järjestelmän taajuusmuuttajassa on erilaiset parametrit kuin testipenkissä johtuen toisenlaisesta taajuusmuuttajasta ja sähkömoottorista.

Testattavan järjestelmän sähkömoottori on pienitehoisempi kuin sähkömoottori, jota varten tässä diplomityössä suunniteltu testipenkki on mitoitettu. Testattava vääntömomentti on siis rajoitettu testattavan sähkömoottorin toiminnallisuuden mukaan, joka näkyy kuvassa 15. Jatkuvaa vääntöä kuvaa jatkuva viiva ja huippuvääntöä kuvaa katkoviiva pyörimisnopeuden funktiona.



Kuva 15: Testattavan järjestelmän toiminnallisuus [4]

Rakennetussa testipenkissä on tässä työssä suunniteltuun testipenkkiin verrattuna pienempi latausvirta akkuihin. Rakennetun testipenkin akkuihin saa ladattua huippuvirtaa 160 A, joka vastaa noin 7,7 kW tehoa, ja jatkuvaa virtaa 100 A, joka vastaa noin 4,8 kW tehoa. Kaavalla 1 lasketut rajat testeille testattavan sähkömoottorin huomioon ottaen on näytetty taulukossa 19.

Taulukko 19: Testipenkin testien rajat

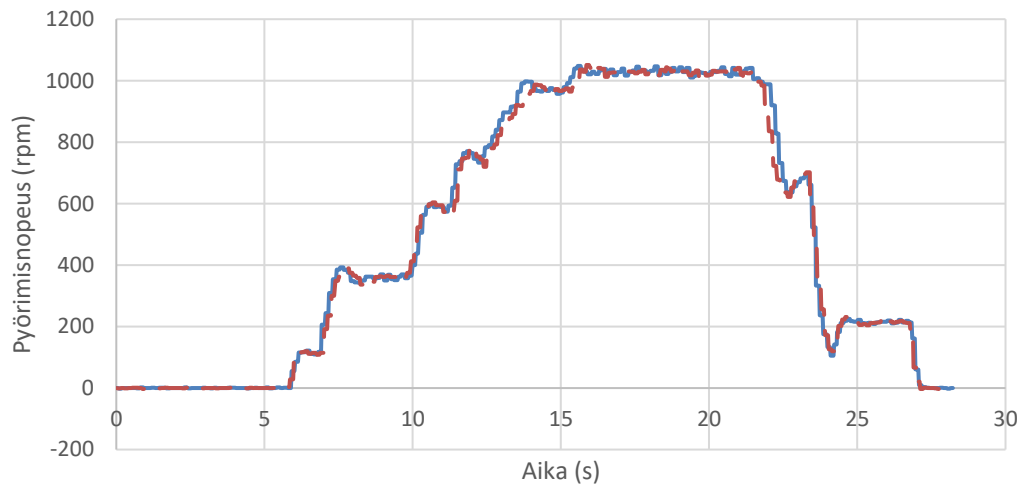
	Vääntömomentti [Nm]	Pyörimisnopeus [rpm]	Teho [kW]
Huipputeho	57	1300	7,7
Jatkuva teho	26	1750	4,8

Testipenkin toiminnan verifiointiseksi tehdään kolme testiä, joista kaikki testaavat testattavaa järjestelmää eri tavalla. Ensimmäisessä testissä ei ole kuormaa, toisessa testataan jatkuvan tehon toimintaa ja kolmannessa huipputehon toimintaa. Jokaisessa testissä on vakiokuorma. Moottorit aloittavat ja lopettavat testin pysähdyksistä ja ne ohjataan asteittain haluttuun tavoitenopeuteen. Testien vääntömomentit ja tavoitenopeudet näkyvät taulukossa 20.

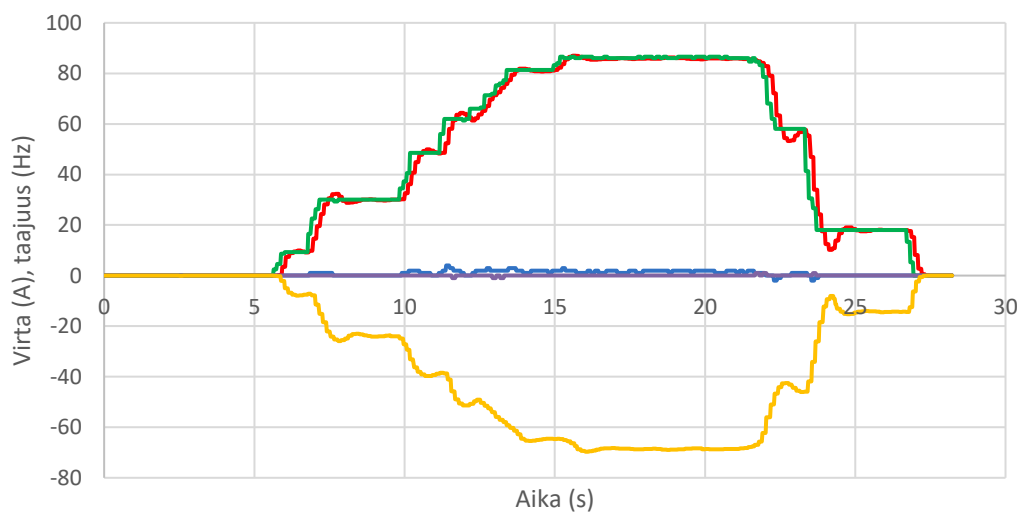
Taulukko 20: Testien tavoitearvot

	Testi 1	Testi 2	Testi 3
Vääntömomentti [Nm]	0	23	55
Tavoitenopeus [rpm]	1000	1600	1300

Testissä 1 haluttiin varmistaa mekaanisen kytkennän onnistuminen ja mittausten luotettavuus. Testin 1 mitatut arvot näkyvät kuvassa 16.



— eKit48 pyörimisnopeus [rpm] — Testipenkin pyörimisnopeuden itseisarvo [rpm]

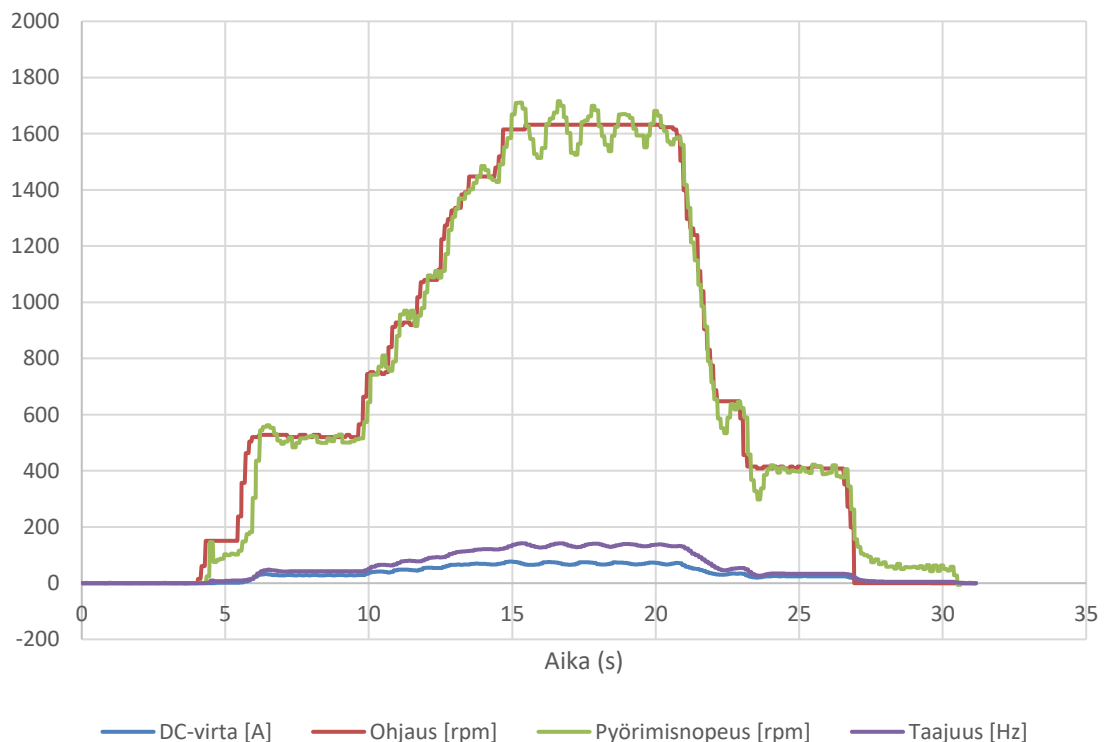


— eKit48 DC-virta [A] — eKit48 taajuus [Hz] — Ohjaus [Hz]
 — Testipenkin DC-virta [A] — Testipenkin taajuus [Hz]

Kuva 16: Testin 1 mitatut arvot vakiokuormituksella 0 Nm

Kuvasta 16 näkyy pyörimisnopeuden käyrän olevan kuormitettavalla ja kuormittavalla järjestelmällä lähes samanlainen, minkä takia voidaan olettaa mittausten olevan luotettavasti vertailtavia kuormittavalla ja kuormitettavalla järjestelmällä. Testipenkin taajuuden negatiiviset arvot johtuvat vastakkaisesta pyörimissuunnasta. Testissä tavoitettu 1000 rpm:n pyörimisnopeus saavutettiin aika tarkasti, kun ottaa huomioon haastavuuden tuottaa tarkkaa ohjausta manuaalisella kääntönupilla. Vaikka kuormittavan ja kuormitettavan järjestelmän mitatut pyörimisnopeudet kierroksissa per minuutti ovat samanlaisia, testattavan järjestelmän taajuus hertseissä on hiukan testipenkkiä korkeampi johtuen moottoreiden eri napojen määrästä. Yksittäisen sähkömoottorin taajuus on verrannollinen sen pyörimisnopeuteen. Testattavan järjestelmän tasavirta on koko testin ajan alle 5 A korkeasta pyörimisnopeudesta huolimatta, koska järjestelmällä ei ole kuormaa. Testipenkki ei generoi virtaa ilman kuormittavaa vääntömomenttia, joten sen tasavirta on 0 A.

Toisessa testissä tarkastellaan kuormituksen vaikutusta testattavan järjestelmän toimintaan jatkuvalla teholla. Kuormittava vääntömomentti asetetaan vakioarvoon 23 Nm. Toisen testin mittausarvot näkyvät kuvassa 17.

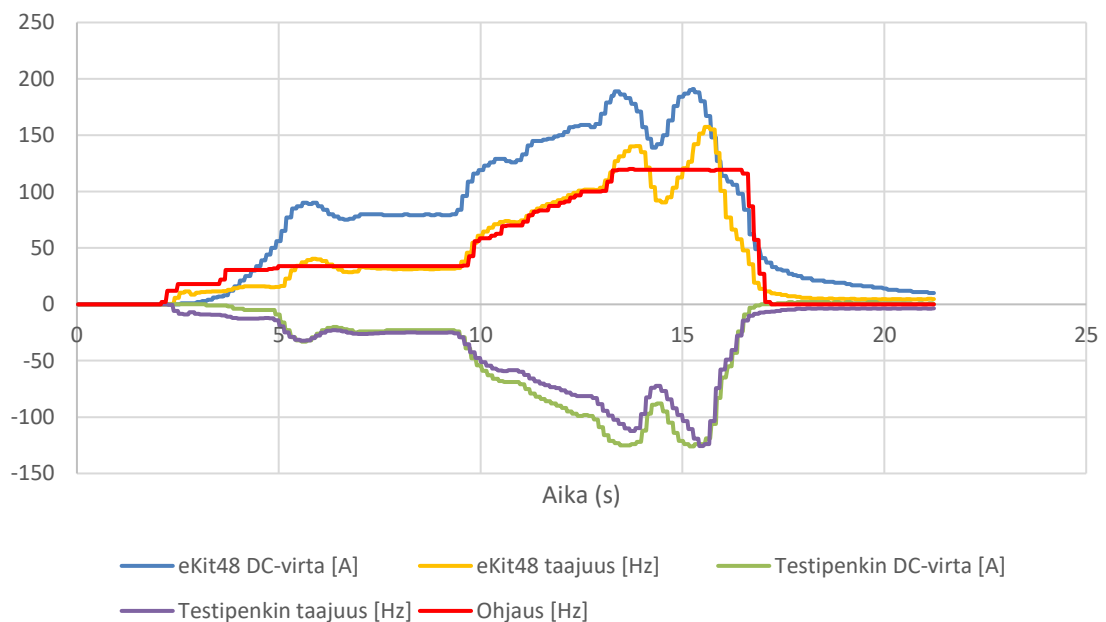


Kuva 17: Testin 2 testattavan järjestelmän mitatut arvot vakiokuormituksella 23 Nm

Kuvaajasta näkee pyörimisnopeuden seuraavan hyvin ohjattua tavoitenopeutta, vaikka se alussa reagoi pienellä viiveellä ohjauksen muutokseen. Yli 1600 rpm nopeudella va-

kio-ohjauksella pyörimisnopeus kuitenkin värähtelee huomattavasti. Tämä voi johtua mekaanisen kytkennän huonosta kohdistamisesta tai huonosta testattavan järjestelmän säätimen parametrisoinnista, mitkä vaikuttaisivat järjestelmän toimintaan. Kuvaajasta näkyy lisäksi järjestelmän tasavirran suuruuden muutoksen olevan verrannollinen pyörimisnopeuteen, kuten oli odotettavissa. Tasavirta on 1600 rpm kohdalla noin 70 A, mikä on testattavan järjestelmän noin 90 % energiatehokkuuden huomioon ottaen sopiva. Voidaan todeta testattavan järjestelmän toimivan kuormituksen alla halutulla tavalla korkean pyörimisnopeuden värähtelyjä huomioon ottamatta.

Kolmannessa testissä tarkastellaan kuormittavan ja kuormitettavan järjestelmän energiankäyttöä kuormitettavan järjestelmän huipputehon toiminta-alueella. Testin tarkoituksena on todeta testipenkin onnistunut virran generointi, mikä oli yksi tärkeistä kriteereistä testipenkin kuormitustavan valinnassa. Kuormittava vääntömomentti asetetaan vakioarvoon 55 Nm. Kolmannen testin mitatut arvot näkyvät kuvassa 18.



Kuva 18: Testin 3 mitatut arvot vakiokuormituksella 55 Nm

Kuvassa näkyy testattavan järjestelmän pyörimisnopeuden seuraavan tarkasti tavoite-nopeutta, mutta 119 Hz tavoitetaajuudella, mikä vastaa noin 1400 rpm pyörimisnopeutta, nopeus ei jatka tasaisena, vaan värähtelee voimakkaasti. Tähän saattaa olla syynä mekaanisen kytkennän epätarkka kohdistaminen tai testattavan moottorin takaisinkytkennän huono parametrisointi. Kuvaajasta näkee testipenkin generoiman virran suuruuden olevan suhteessa taajuuteen eli pyörimisnopeuteen ja myös testattavan järjestelmän käyttämään virtaan. Molempien järjestelmien tehohäviöt huomioon ottaen testi-

penkin generoima virta on sopiva kuormitettavan järjestelmän virrankäyttöön verrattuna.

Testien suunnittelussa rajat pyörimisnopeudelle tehtiin testipenkin akkujen latausvirran perusteella, mutta mitoituksessa ei otettu huomioon järjestelmien tehohäviöitä. Testien tulosten perusteella generoitu latausvirta olisi voinut olla suurempi, eikä rajoja olisi pitänyt asettaa niin matalaksi. Kuitenkin toisesta ja kolmannesta testistä kävi ilmi, ettei korkealla teholla järjestelmä toimi vakionopeudella, vaan nopeus värähtelee suuresti, minkä takia suuremmat pyörimisnopeudet olisivat olleet virhe. Onnistuneesti ja ilman värähtelyä järjestelmä toimi vain ilman kuormaa ja matalalla pyörimisnopeudella kuorman kanssa. Järjestelmän jatkokehityksessä moottoreiden pyörimisnopeuden epätarkkuutta kannattaa tutkia tarkemmin.

Ohjauksen vertailussa pyörimisnopeuteen voi huomata testattavan järjestelmän reagoivan alussa hitaasti ohjauksen muutokseen, mutta alun jälkeen järjestelmä reagoi nopeammin. Tämän testipenkin tarkoituksena ei kuitenkaan ollut järjestelmän dynamiikan testaaminen, joten testipenkkiä pitää jatkossa kehittää pidemmälle sellaisia tutkimuksia varten.

Rajoitetun mittauslaitteiston takia testeissä ei voitu muuttaa käytettyä vääntömomenttia kesken testin. Järjestelmän reagointi kuorman muutokseen on tärkeä testi jatkotutkimuksia varten, mutta siihen tarvitaan parempia mittauslaitteita, kuten suunniteltuun testipenkkiin valittua vääntömomenttianturia.

Tulosten perusteella voidaan sanoa rakennetun testipenkin toiminta-ajatuksen olevan onnistunut, mutta sitä pitää vielä parantaa suuremman hyödyn saamiseksi. Testipenkillä voi nyt testata eKit48-järjestelmän toimintaa kokonaisuutena ja ohjata tarkasti sen kuormaa tietyn toimintapisteen saavuttamiseksi, minkä lisäksi sillä voidaan testata toimintaa molempiin pyörimissuuntiin. Testipenkki generoi virtaa kuormittamalla ja varastoii sen akkuihin myöhempää käyttöä varten. Testipenkki vie vähän tilaa ja sitä voidaan liikuttaa helposti, minkä lisäksi sitä on mahdollista vielä helposti rakentaa suurempi monipuolisempaa käyttöä varten. Tällä hetkellä testipenkin kuormituksessa suuria pyörimisnopeuksia ei vielä voida testata nopeuden suuren värähtelyn takia, mikä voi johtua rungon epästabiiliudesta, mihin sähkömoottorit on kiinnitetty, huonosta parametrisoinnista tai mekaanisen kytkennän epätarkasta kohdistuksesta. Testipenkillä on mahdollista kuormittaa vain yhtä moottoria suunnitellun kahden sijaan, mutta jo olemassa olevan hydraulisen testipenkin kanssa kahta moottoria on mahdollista kuormittaa samanaikaisesti aiemman yhden sijasta.

8. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoitus oli suunnitella ja rakentaa kahta sähkömoottoria samanlaisesti kuormittava testipenkki tämän työn toimeksiantajan kriteereiden mukaan. Neljää erilaista kuormittavassa testipenkissä käytössä olevaa teknologiaa tutkittiin sopivimman kuormitustavan löytämiseksi tähän sovellukseen. Testattava järjestelmä eKit48 esiteltiin ja sen kuormittamiseen tarvittavia kriteereitä tutkittiin. Kriteereiden tärkeys ja kuormitusteknologioiden mahdollisuus täyttää kriteerit arvioitiin ja vertailtiin parhaimman kuormitustavan löytämiseksi.

Paras kuormitusteknologia kriteereiden mukaan oli sähköinen järjestelmä, jossa moottori mekaanisesti kytketään testattavaan moottoriin ja vääntömomenttiohjauksella kuormittaa testattavan järjestelmän sähkömoottoria. Tärkeimmät sen valintaan johtaneet kriteerit muihin kuormitusteknologioiden sijaan olivat mahdollisuus generoida virtaa kuormituksesta, tarkka vääntömomenttiohjaus, mahdollisuus molempiin pyörimissuuntiin ja karkaava kuorma.

Testipenkin sähköiseen järjestelmään tarvittavat komponentit valittiin yksitellen ja verrattiin testattavan järjestelmän komponentteihin. Kuormitusjärjestelmään pyrittiin valitsemaan komponentteja, joiden yhteensopivuus johtosarjan ja ohjelmoinnin osalta on todettu toimivaksi. Komponenttien valinnan jälkeen suunniteltiin testipenkin runko alumiiniprofiilista, johon valitut komponentit voidaan kiinnittää ja luoda yksi helposti hallittava kokonaisuus.

Aikatauluongelmien takia suunnitellun testipenkin sijaan rakennettiin yksinkertaisempi versio, jolla onnistuu vain yhden moottorin kuormittaminen. Rakennettuun testipenkkiin muutettiin akut ja niiden määrä, taajuusmuuttajien ja sähkömoottorien määrä, ohjaus ja mittauslaitteet. Rakentamisen jälkeen testipenkki otettiin käyttöön ja sen kuormitustilanteesta tehtiin mittauksia kuormittavan ja kuormitettavan järjestelmän toiminnan arvioimiseksi.

Mittaustuloksista selvisi testipenkin perusidean toimivan onnistuneesti, mutta siinä olevan myös puutteita. Testipenkillä voidaan hallitusti kuormittaa testattavaa järjestelmää ja ohjata kuorman suuruutta erilaisissa pyörimisnopeuksissa, sähkömoottoreiden toimintaa voidaan testata molempiin pyörimissuuntiin ja kuormituksesta voidaan generoi-

da sähkövirtaa. Karkaava kuorma pitäisi onnistua testipenkillä myös, mutta sitä ei testattavan järjestelmän rajoitteiden takia voitu verifioida.

Rakennetulla testipenkillä kuormitus liian korkealla teholla luo suurta värähtelyä pyörimisnopeuden suhteen, minkä syy on vielä epäselvä. Mahdollisia syitä voivat olla rungon huono vääntöjäykkyys, testattavan järjestelmän takaisinkytkennän huono parametrisointi tai epätarkka mekaanisen kytkennän kohdistus. Tärkeä kriteeri kuormitustavan valinnassa oli suuri pyörimisnopeus, joka ei värähtelyn ansiosta toteudu.

Rakennettua testipenkkiä voi vaihtamalla ja lisäämällä komponentteja parantaa tulevaisuudessa. Siihen kannattaa lisätä toinen sähkömoottori ja taajuusmuuttaja, jotta sillä voi kuormittaa kahta sähkömoottoria, suunnitellun testipenkin mukaiset akut suurempaa generoitua latausvirtaa varten, vääntömomenttianturi tarkempien mittaustulosten saamiseksi ja vahvempi ja tarkempi kiinnitys sähkömoottoreille pyörimisnopeuden värähtelyn estämiseksi. Nämä ominaisuudet toteutuisivat suunnitelman mukaisessa testipenkissä. Lisäksi testipenkillä luotu karkaava kuorma testattavan järjestelmän sähkömoottoreiden pyörittämiseen tulisi testata testattavan järjestelmän ollessa siihen valmis.

Kokonaisuudessaan testipenkin suunnittelu onnistui varsin hyvin. Suurimmaksi ongelmaksi muodostui aikataulu, jonka takia rakennettu testipenkki oli huomattavasti erilainen kuin suunniteltu versio. Rakennetun testipenkin ongelmat, kuten rajoitettu latausvirta, yhden sähkömoottorin puuttuminen ja epäkäytännöllinen mittauslaitteisto olisivat kaikki ratkenneet suunnitellun testipenkin kanssa. Pyörimisnopeuden värähtelykin saattaisi olla ratkaistu, sillä suunniteltu alumiiniprofiilirunko on raskaampi ja tukevampi kuin rakennettu runko ja sähkömoottorien kohdistus onnistuu siinä paremmin. Pyörimisnopeuden värähtelyn syy on kuitenkin jäänyt epäselväksi, joten sen ratkaisulle ei ole takeita. Suunnitellun testipenkin suhteen voi käytännössä ilmetä myös uusia ja vielä tuntemattomia ongelmia. Rakennetun testipenkin jatkokehitys suunnitelluksi testipenkiksi kannattaa toteuttaa parasta mahdollista kuormitusta ja testausta varten ja vasta sen jälkeen testipenkin suunnittelun lopullista onnistumista voi arvioida.

LÄHTEET

- [1] Transportation emissions worldwide – statistics & facts, Statista Research Department, 2024. Saatavissa: <https://www.statista.com/topics/7476/transportation-emissions-worldwide/#topicOverview>
- [2] What is electromobility? Oy Danfoss Ab. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/insights-for-tomorrow/e-mobility/>
- [3] P. J. Ashenden, The Designer's Guide to VHDL, 2008. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/book/9780120887859/the-designers-guide-to-vhdl>
- [4] eKit48, HYDAC International GmbH, 2022.
- [5] N. Reponen, Miksi modulaarinen mittausjärjestelmä on niin mullistava ratkaisu? Vaisala, 2020. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/fi/blog/2020-05/miksi-modulaarinen-mittausjarjestelma-niin-mullistava-ratkaisu>
- [6] Sähkömoottorityytit, Motiva Oy, 2024. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viis_aasti/ajoneuvotekniikka/moottoritteknikka/sahkoautot/sahkomoottorityytit
- [7] Mikä taajuusmuuttaja on, Oy Danfoss Ab. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-an-ac-drive/>
- [8] Power Distribution Unit (PDU), Continental Engineering Services. Saatavissa: (13.3.2024) <https://conti-engineering.com/components/power-distribution-unit-pdu/>
- [9] Jyri Kylä-Kaila, Ponsse Group technology company Epec Oy presents prototype of Power Distribution Unit for NRMM and commercial vehicles electric powertrain, Epec Oy, 2020. Saatavissa: <https://epec.fi/ponsse-group-technology-company-epec-oy-presents-prototype-of-power-distribution-unit-for-nrmm-and-commercial-vehicles-electric-powertrain/>
- [10] Ajovoima- ja teollisuusakut, Suomen Akut Oy. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.suomenakut.fi/akut-ja-paristot/ajovoima-ja-teollisuusakut/c/1/?page=1&f%5BextraProperties%5D%5B4%5D%5B%5D=56>
- [11] What is a Battery Management System? Synopsys Inc., 2024. Saatavissa: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>
- [12] J. Pajarinen, Automaatio- ja systeemitekniikan perusteet, Aalto-yliopisto, 2023. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1954677/mod_resource/content/2/Luentoo06_2023.pdf

- [13] T. Harju, A. Marttinen, Sääätötekniikan koulutusmateriaali, Suomen Automaatioseura ry, 2000. Saatavissa: https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid_kirja_1-1.pdf
- [14] Kuormakytkimet, vaihtokytkimet ja kytkinvarokkeet, Finn Electric Oy, 2014. Saatavissa: https://www.finnelectric.fi/wp-content/uploads/2021/03/TELERGON_Switches_0814.pdf
- [15] Potentiometri, Koneautomaatio, Metropolia, 2011. Saatavissa: <https://wiki2.metropolia.fi/display/koneautomaatio/Potentiometri>
- [16] TTC 30 Family, TTControl GmbH, 2024. Saatavissa: <https://www.ttcontrol.com/products/electronic-control-units/ttc-30-family>
- [17] R. Soudunsaari, Kuormantuntevat hydraulijärjestelmät: Koetulokset, VTT Technical Research Centre of Finland, 1989. Saatavissa: <https://cris.vtt.fi/en/publications/kuormantuntevat-hydraulij%C3%A4rjestelm%C3%A4t-koetulokset>
- [18] H. Paavilainen, Hydrauliiikka 1, Metropolia, 2009.
- [19] Paineenrajoitusventtiilit, Oy Danfoss Ab. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.danfoss.com/fi-fi/products/dhs/differential-pressure-and-flow-controllers/differential-pressure-flow-and-temperature-controllers/pressure-relief-controllers/>
- [20] Tank Optimization Platform, Hydac Oy, 2021. Saatavilla: <https://www.hydac.com/en/tank-optimisation-platform/>
- [21] Järjestelmätyypit, Koneautomaatio, Metropolia, 2009. Saatavilla: <https://wiki2.metropolia.fi/pages/viewpage.action?pagelId=12160528>
- [22] Axial Piston Pump PPV100M, Hydac International GmbH, 2022.
- [23] V. V. Sirén, Hydrauliiikka, Wordpress, 2014. Saatavissa: <https://opiskelekotona.wordpress.com/2014/05/27/hydrauliiikka/>
- [24] HPKM – Kertojavaihde mäntäpumpuille, Salhydro. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.salhydro.fi/fi/kertojavaihteet/hpkm-kertojavaihde-mantapumpuille>
- [25] P. Zhang, Sensors and actuators, Advanced Industrial Control Technology, 2010. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/book/9781437778076/advanced-industrial-control-technology>
- [26] N. Jonathan, P. Duysinx, Y. Louvigny, Comparison of ultra capacitors, hydraulic accumulators and batteries technologies to optimize hybrid vehicle ecoefficiency, IEEE Xplore, 2009. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/224442197_Comparison_of_ultra_capacitors_hydraulic_accumulators_and_batteries_technologies_to_optimize_hybrid_vehicle_ecoefficiency
- [27] Sähköinen jarrutus, Tekninen opas nro 8, ABB Industry Oy, 2001. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/2e30f9c0e2d07b9ac1256d28004152df/Tekninen_opasnro8.pdf

- [28] M. Kuisma, Passiiviset komponentit, 2005. Saatavissa: <https://www.kuisma.eu/elper/3passiivi/2resistanssi.html>
- [29] D. Scott, Improving electrical system and wiring design, Siemens AG, 2020. Saatavissa: <https://blogs.sw.siemens.com/ee-systems/2020/11/23/improving-electrical-system-and-wiring-design/>
- [30] L. N. Nagarajan, 4 Key Challenges of EV Software Development – and How to Overcome Them, Siemens AG, 2022. Saatavissa: <https://blogs.sw.siemens.com/ee-systems/2022/02/22/4-key-challenges-of-ev-software-development-and-how-to-overcome-them/>
- [31] Should You Consider a Bi-Directional Power Supply? Tech Talk Blog, EA Elektro-Automatik Inc. 2022. Saatavissa: <https://www.eapowered.com/2022/06/27/should-you-consider-a-bi-directional-power-supply/>
- [32] S. V. Shalobanov, S. S. Shalobanov, Diagnosing Continuous Dynamic Systems By Changing The Position Of The Input Signal, IEEE, 2021. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9653461/authors#authors>
- [33] Sähkömagneettiset Jarrut, Vee Industry Group. Saatavilla: (13.3.2024) <http://fi.iyongxu.com/wheelchair-brakes/power-wheelchair-brake/electromagnetic-brakes.html>
- [34] Mitkä Ovat Sähkömagneettisten Jarrujen Tyypit, Vee Industry Group. Saatavilla. (13.3.2024) <http://fi.iyongxu.com/info/what-are-the-types-of-electromagnetic-brakes-54491938.html>
- [35] Magnetic Powder Brakes, IBD Wickeltechnik GmbH. Saatavilla: (13.3.2024) <https://www.ibd-wt.de/en/brakes-for-machines/magnetic-powder-brakes/>
- [36] Magnetic Powder Brake Working Principle And Basic Structure, Tianji Transmission, 2019. Saatavissa: http://www.dgtaiji.com/show_42_156.html#:~:text=The%20magnetic%20powder%20brake%20is,driven%20rotor%20has%20been%20fixed.
- [37] Rheostat, EE Power. Saatavissa: (13.3.2024) <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/rheostat/#>
- [38] MB-17.5, Magnetic Brake Systems, 2017. Saatavissa: <https://www.magbrakesystems.com/mb-17-5>
- [39] Five common faults and solutions of magnetic powder brakes, Best Product Page, 2023. Saatavilla: <https://www.bestproductpage.com/magnetic-particle-brakes/five-common-faults-and-solutions-of-magnetic-powder-brakes.html>
- [40] T. Bishop, Load testing of motors: Common methods, procedures, EASA, 2005. Saatavissa: <https://easa.com/resources/resource-library/load-testing-of-motors-common-methods-procedures-1>
- [41] A. Mehrotra, A Brief, Informal Introduction to Motor Testing, MIT Biomimetic Robotics Lab, 2022. Saatavissa: https://evt.mit.edu/textbooks/Dynos_for_Dummies.pdf

- [42] X-Series Electric Motor Test Stand, Power Test, 2023. Saatavissa: <https://powertestdyno.com/product/x-series-electric-motor-test-stand/>
- [43] B. McDonald, Dyno Decisions – Your Test Requirements Should Dictate Your Correct Dyno, Engine Builder, 2017. Saatavissa: <https://www.enginebuildermag.com/2017/03/dyno-decisions-test-requirements-dictate-correct-dy-no/#:~:text=The%20water%2Dcooled%20eddy%20current%20is%20easier%20to%20control%20and,a%20similar%20water%20brake%20dynamometer.>
- [44] Hybrid AC/Water Brake Engine Dynamometer, Operator Manual, SuperFlow, 2018. Saatavissa: https://superflow.com/wp-content/themes/SuperFlow2020/downloads/Hybrid_AC-Waterbrake_Operators_Manual.pdf
- [45] Motor test bench, small motor testing systems, DynoEquip. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.dynoequip.com/motor-test-bench-en/>
- [46] Dual Motor Dynamometer, Interface force measurement solutions. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.interfaceforce.com/solutions/automotive-and-vehicle/dual-motor-dynamometer/>
- [47] 7 benefits of in-house as defined by Europe's Top Marketing Chiefs, Bannerflow, 2024. Saatavissa: <https://www.bannerflow.com/blog/the-7-benefits-of-in-house>
- [48] T. Minav, Zero-Emission Hybrid Mobile Machinery, Tampereen yliopisto, 2023
- [49] 205A-08011-ABC V002, Engiro GmbH, 2019
- [50] Standard Number 1910.303(g)(2)(i), OSHA, 2015. Saatavissa: <https://www.osha.gov/laws-regs/standardinterpretations/2015-09-04#>
- [51] 205A-12010-ABC V010, Engiro GmbH, 2022. Saatavissa: https://www.engiro.com/fileadmin/pdfs/Datenblaetter_engiro/205A/ENGIRO_Dat asheet_205A_12010_ABC_V010.pdf
- [52] ACE-4, Atech GmbH, 2024. Saatavissa: https://www.atech-antriebstechnik.de/en/motiontechnology/zapi-inverters-controller-l-motor-controller-steering-sys-tems/detail?tx_pxaproductmanager_pi1%5Baction%5D=show&tx_pxaproductmanager_pi1%5Bcategory_0%5D=21&tx_pxaproductmanager_pi1%5Bcontroller%5D=Product&tx_pxaproductmanager_pi1%5Bproduct%5D=55&cHash=1343391053c2674d84187333609808dd
- [53] Inverter ACE-4, Zapi Group, 2024. Saatavissa: https://www.atech-antriebstechnik.de/fileadmin/user_upload/Produkte/ZAPI_Inverter_Regler_Impulssteuerungen/Inverter_fu_r_Asynchro motore/Datenblaetter/Datenblatt_ ACE-4_de-en_V9.pdf

- [54] K. A. Vishnumurthy, K. H. Girish, A comprehensive review of battery technology for E-mobility, Journal of the Indian Chemical Society, 2021. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019452221001734>
- [55] Mitä eroa on sarjaan ja rinnakkain kytkettyjen akkujen välillä? Lithium Battery Tech, 2024. Saatavissa: <https://www.lithiumbatterytech.com/fi/batteries-in-series-and-parallel/>
- [56] Lithium-Ionen Batteriesysteme, Invenox GmbH, 2023.
- [57] DC-DC Converters, DMC. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.dmcde.de/dc-dc-converters/>
- [58] HydX – sekä älyä että lihäksiä, HydX AB. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.hydx.se/fi-fi/Ratkaisut/Ohjauksi%C3%A4rjestelm%C3%A4t>
- [59] Hydraulic Safety Control Unit TTC 32S, TTControl GmbH. Saatavissa: (13.3.2024) <https://www.ttcontrol.com/sites/default/files/documents/TTControl-HY-TTC-32S-Datasheet.pdf>
- [60] CAN Bus Explained – A Simple Intro, CSS Electronics, 2023. Saatavissa: <https://www.csselectronics.com/pages/can-bus-simple-intro-tutorial>
- [61] Charger SG3, Atech GmbH, 2024. Saatavissa: https://www.atech-antriebstechnik.de/en/motiontechnology/translate-to-english-neu-zivan-batterielade-und-ent-ladegeraete?tx_pxaproductmanager_pi1%5Baction%5D=show&tx_pxaproductmanager_pi1%5Bcategory_0%5D=25&tx_pxaproductmanager_pi1%5Bcontroller%5D=Prod-uct&tx_pxaproductmanager_pi1%5Bproduct%5D=64&cHash=d59e9af43101dc00cd9b577e103b3dbc
- [62] A. Rantanen, Auton sisäinen AC-laturi ja lataustehot, Laturille, 2020. Saatavissa: <https://www.laturille.com/auton-sisainen-ac-laturi-ja-lataustehot/>
- [63] Yleisimmät pistorasiat Suomessa, Dreamled Oy, 2024. Saatavissa: <https://www.dreamled.fi/pistorasiat/#:~:text=Yleisimm%C3%A4t%20pistorasiat%20Suomessa&text=F%2Dtyypin%20pistorasia%20on%20tyypillisin,my%C3%B6s%20tyypin%C3%A4%20CEE%207%2F4>.
- [64] Power And Efficiency, Shiken, 2024. Saatavissa: <https://shiken.ai/physics/power-and-efficiency#:~:text=Efficiency%20is%20expressed%20as%20a,such%20as%20friction%20and%20heat>.
- [65] T210 Torque transducers, HBM, 2024. Saatavissa: <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B05813.pdf>
- [66] Alumiiniprofiilit Maytec, SKS Group Oy. Saatavissa: (12.3.2024) <https://www.sks.fi/tuotteet/mekaaniset-rakenneosat/alumiiniprofiilit-maytec>

- [67] 159AH-06012-ABC V010, Engiro GmbH, 2022. Saatavissa:
https://www.engiro.com/fileadmin/pdfs/Datenblaetter_engiro/159AH/ENGIRO_Datasheet_159AH_06012_ABC_V010_04.pdf
- [68] Maadoitus, Paneliankosken voima. Saatavissa: (25.3.2024)
<https://paneliankoskenvoima.fi/fi-fi/article/etusivu/maadoitus/45/>
- [69] Eristysvastuksen mittaaminen – takaa turvallisuutesi, Yleiselektroiniikka. Saatavissa: (25.3.2024) <https://www.yeint.fi/uutiset/eristysvastuksen-mittaaminen>
- [70] Spidex Operating/Assembly Instructions, R+L Hydraulics, 2020. Saatavissa:
https://www.rl-hydraulics.com/wp-content/uploads/2022/09/RL_Spidex-Kupplung-EN.pdf

LIITE A: SUUNNITELLUN TESTIPENKIN KOMPONENTTIEN SIJOITUS RUNKOON

