



Sähköisen voimansiirtolinjan hyötysuhde

Tatu Ollikainen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023

Ajoneuvotekniikka
Korjaamotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvotekniikka
Korjaamotekniikka

OLLIKAINEN, TATU:
Sähköisen voimansiirtolinjan hyötysuhde

Opinnäytetyö 39 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Toukokuu 2023

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, minkälainen sähkömoottorin hyötysuhde on, kun sillä pyöritetään toimilaitetta. Lisäksi haluttiin mitoittaa sopiva kokoonpano pienkuormaajalle täyssähköisenä. Hyötysuhteen mittaamista varten oli suunniteltava sopiva kuorma ja sen kiinnitys, jotta saataisiin pienkuormaajan pyörittäjää kuormitettua. Opinnäytetyö tehtiin asentamalla mittausantureita pienkuormaajaan ja arvioimalla saatuja tuloksia. Opinnäytetyö tehtiin Tampereen Ammattikorkeakoululle.

Työssä esiteltiin yleisimpiä pienkuormaajissa olevia sähkömoottorityyppejä. Pää-tavoitteena oli kuitenkin määrittää pienkuormaajan toimilaitesähkömoottorin hyötysuhde. Vaihtoehtoisesta kokoonpanosta kerrottiin tarvittavat komponentit ja sähkömoottorivalinta, jos täyssähköistä pienkuormaajaa lähdetäisiin toteuttamaan.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin kattava kuva sähkömoottorin hyötysuhteesta pienkuormaajassa. Tuloksia voidaan soveltaa tulevaisuudessa sähköisten pienkuormaajien kehityksessä. Opinnäytetyöstä on etenkin hyötyä yrityksille, jotka ovat kiinnostuneita työkoneiden sähköistymisestä mutta ei ole valmiuksia tehdä tuotekehitystä itse.

Asiasanat: sähkömoottori, hyötysuhde, anturi, mittaaminen, pienkuormaaja

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Automotive Engineering
Garage Engineering

OLLIKAINEN, TATU:
Efficiency of an electric transmission line

Bachelor's thesis 39 pages, appendices 2 pages
MAY 2023

The aim of this thesis was to find out what the efficiency of an electric motor is when an actuator is turned with it. In addition, we wanted to dimension a suitable configuration for a small loader as fully electric. In order to measure the efficiency, a suitable load and its attachment had to be planned in order to load a skid steer loader. The thesis was done by installing measuring sensors on the skid steer loader and evaluating the results obtained. The thesis was done for Tampere University of Applied Sciences.

The work presented the most common types of electric motors in small loaders. However, the main goal was to determine the efficiency of the skid steer electric motor. The necessary components and choice of electric motor were combined as an alternative configuration, if a fully electric skid steer were to be implemented.

The result of the thesis provided a comprehensive picture of the efficiency of the electric motor in a skid steer loader. The results can be applied in the future in the development of electric skid steer loaders. The thesis is especially useful for companies that are interested in the electrification of work machines but are not ready to do product development themselves.

Key words: electric motor, efficiency, sensor, measuring, Skid steer loader

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	SÄHKÖMOOTTORIEN OMINAISUUDET	6
	2.1 Oikosulkumoottori	6
	2.2 Harjaton tasasähkömoottori	8
	2.2.1 Reluktanssimoottori	9
3	AVANT E6 -PIENKUORMAAJA	11
	3.1 Sähkömoottori	12
	3.1.1 Vaihteisto	13
	3.1.2 CANBus-väylä	14
4	Hyötysuhteen määrittäminen	16
	4.1 Hydraulimoottori	16
	4.1.1 Mittausmenetelmät	18
	4.1.2 Mittauksen kulku	19
	4.2 Hyötysuhteen laskeminen	21
	4.2.1 Virhearviointi	32
5	POHDINTA	34
	LÄHTEET	36
	LIITTEET	38
	Liite 1. Mittauksen yksi pumpun paineen kuvaaja.	38
	Liite 2. Mittauksen kaksitoista tilavuusvirta.	39

1 JOHDANTO

Polttomoottorikäyttöisistä sovelluksista siirtyminen täysin sähköllä toimiviin työ-koneisiin on ollut vahvasti esillä tällä hetkellä. Osa pienemmistä työkoneista toimii jo litiumioniakuilla, mutta toimilaitteet ovat lähes täysin vielä hydrauliiikan varassa. Hydrauliiikalla toimiva kauha on ollut pitkään käytössä ja sen hyödyt ja haitat ovat hyvin tiedossa. Sähkökäyttöisissä pienkuormaajissa akulta tuleva sähkö pyörittää nykyisin sähkömoottoria, joka pyörittää puolestaan hydraulipumppua. Olisi tärkeää selvittää, onko täysin sähkötoiminen pienkuormaaja, jossa hydrauliiikan sijaan toimilaitetta käyttäisi pelkästään sähkömoottori, hyötysuhteeltaan käyttökel-poinen. Vertaamalla koko laitteen hyötysuhdetta sähkömoottoritoimisena hydrauliseen järjestelmään saataisiin luotettavaa tietoa sähkömoottorin käyttö-kelpoisuudesta.

Sähkömoottori hydrauliiikkapumpun pyörittäjänä on jo todettu toimivaksi konsepteiksi. Sähkömoottori pyörii muuttumattomalla pyörimisnopeudella ja näin ollen se voidaan mitoittaa parhaan hyötysuhdealueen mukaan. Toimilaitteikäytössä sähkömoottori joutuu välillä pyörimään epäsuotuisalla hyötysuhdealueella. Sähkömoottorityypin valinta vaikuttaa hyötysuhdealueeseen ja erilaisilla sähkömoottoreilla on erilaisia ominaisuuksia. Tavallisen sähkömoottorin kierrosnopeus on noin 1500–4000 kierrosta minuutissa ja se on liian nopea pyörivää toimilaitetta käytettäessä. Sähkömoottori ei toimi matalalla kierrosnopeudella optimaalisella hyötysuhteella. Näin ollen sähkömoottorille täytyy asettaa sopiva vaihteisto pyörimisnopeuden saamiseksi oikealle alueelle.

Pienkuormaajissa hydrauliiikan korvaavassa käytössä sähkömoottoreiden hyvistä ja huonoista puolista ei ole vielä paljoa tietoa. Tämän oppinäytetyön tarkoituksena on selvittää minkä tyyppinen sähkömoottori pienkuormaajaan soveltuu, pienkuormaajan vaatimat muutokset ja sähkömoottorin lopullinen hyötysuhde tässä käytössä.

2 SÄHKÖMOOTTORIEN OMINAISUUDET

Sähkömoottorit voidaan jaotella AC- ja DC-moottoreihin ja niitä käytetään monissa eri kohteissa. Teollisuuskäyttöön olevien sähkömoottorien kehityksen rinnalle on tullut uutena sähköautojen sähkömoottorien kehitys. Sähköautot tarvitsevat eri ominaisuuksilla olevan sähkömoottorityypin kuin teollisuus. Molemmilla käyttökohteissa pyritään parempaan hyötysuhteeseen ja pienempiin häviöihin. Yleisimmin käytetyt moottorit ovat oikosulkumoottori ja harjaton tasasähkömoottori. Niiden rinnalle käyttöön on vähitellen tullut myös reluktanssimoottori joka on seuraava kehitysaste oikosulkumoottorin kehityksessä.

2.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori (Kuva 1) on yleisesti käytetty moottorityyppi, jota voidaan käyttää joko suoralla syötöllä mikäli pyörimisnopeuden muuttamiselle ei ole tarvetta tai taajuusmuuntajan kanssa, jolloin nopeutta voidaan säätää. Kolmivaiheisia oikosulkumoottoreita on teollisessa käytössä enemmän kuin muita voiman siirtämistapoja. Oikosulkumoottorien yleiseen käyttöön ovat perusteina yksinkertainen rakenne, korkea toimintavarmuus, matalat kustannukset, korkea ylijännitekestävyys ja vähäinen huollon tarve. Oikosulkumoottoreiden huonoihin puoliin kuuluvat korkea käynnistysjännite ja matala käynnistysmomentti. Kolmivaiheinen oikosulkumoottori muuntaa sähkövirtaa induktioperiaatteen mukaan, ja sitä voi myös kutsua induktiomotoriksi. (Emadi 2005, 1.)

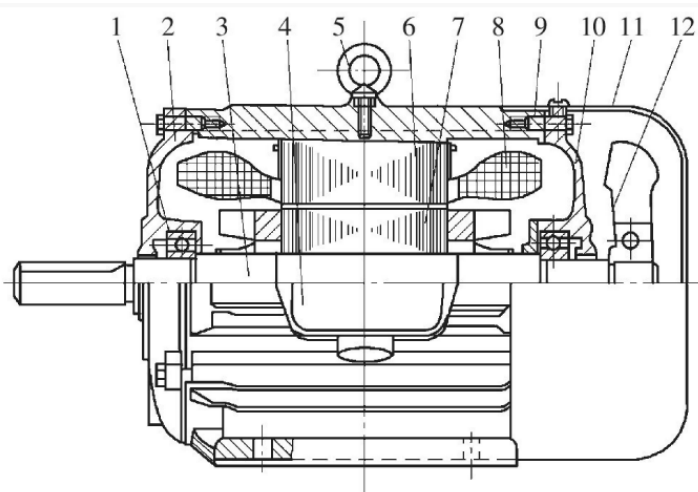


Figure 2.1 Configuration of squirrel cage threephase asynchronous motor. 1, bearing; 2, front end cover; 3, shaft; 4, terminal box; 5, ring; 6, stator core; 7, rotor; 8, stator winding; 9, frame; 10, back end cover; 11, fan housing; 12, fan.

KUVA 1. Oikosulkumoottorin läpileikkaus (Lianping & Wenzhong 2018)

Oikosulkumoottori koostuu pääasiassa staattorista, roottorista, staattorin kuparilangoista ja itse rungosta. Staattorin ytimessä sijaitseva langoitus on eristetty metalliytimeästä (Kuva 2).

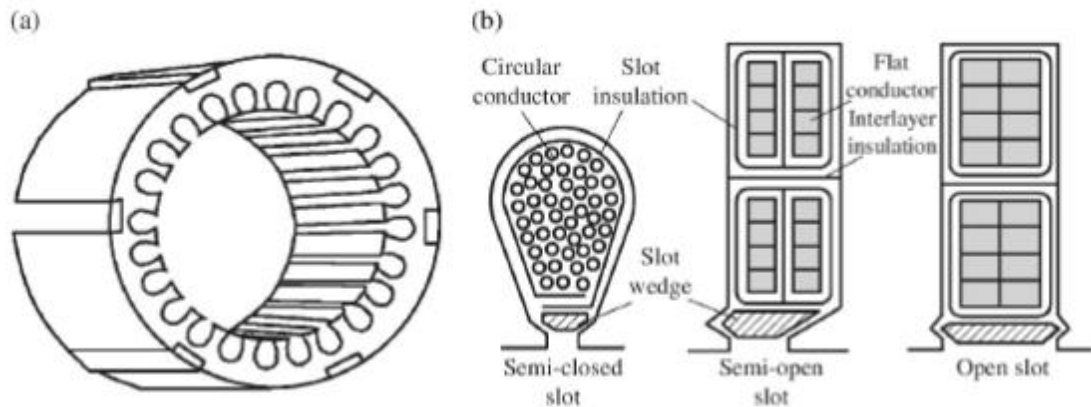


Figure 2.2 (a) Stator core and (b) stator slot types.

KUVA 2. Staattorin ydin ja langoitus. (Lianping & Wenzhong 2018)

Roottori on moottorin keskiosa, jossa magneettinen voima pyörittää roottorin akselia. Roottori voi olla alumiininen valettu kappale, jossa on virtaa johtavat tangot, päätyrenkaat ja puhallinsiivet (Kuva 3). Tämän rakenteen etuna on helppo valmistusmenetelmä ja sitä käytetään usein keskikokoisissa ja pienissä moottoreissa. Toinen yleinen rakennevaihtoehto on roottori, jossa kuparitangot hitsataan päätyrenkaihin kiinni. Tällaisia moottoreita kutsutaan oravanhäkkimoottoreiksi (Eng. Squirrel cage motor) ulkonäön perusteella. (Lianping & Wenzhong 2018, 27–29.)

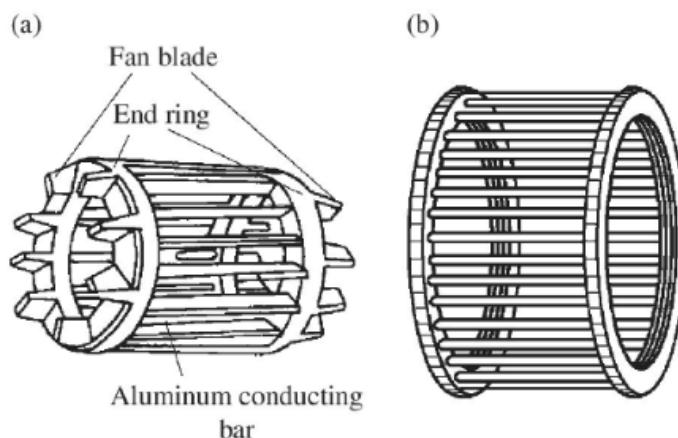
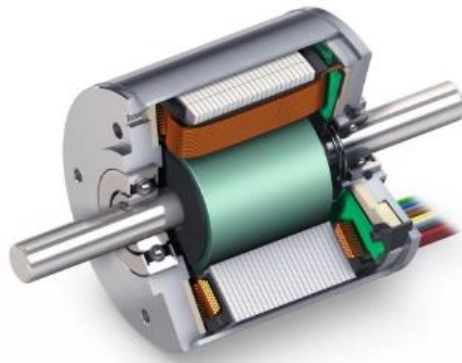


Figure 2.3 The squirrel cage rotor. (a) Cast aluminum rotor winding and (b) copper cage rotor winding.

KUVA 3. Roottorin osat (Lianping & Wenzhong 2018)

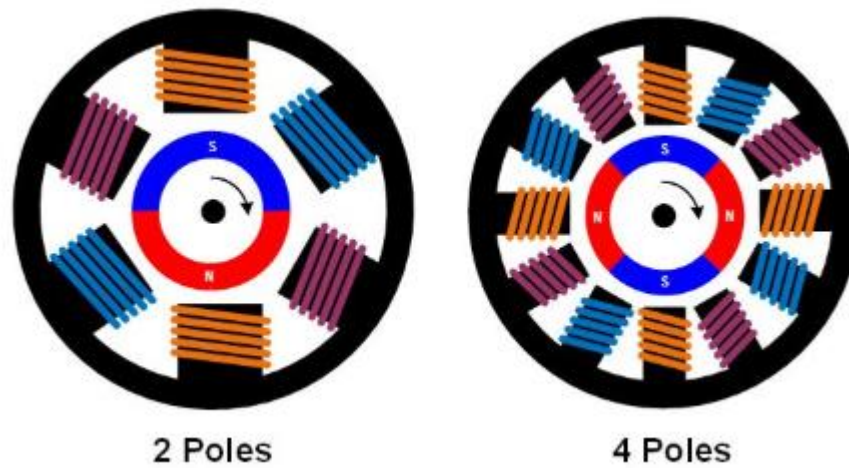
2.2 Harjaton tasasähkömoottori

Harjaton tasasähkömoottori (Kuva 4) käyttää magneettikenttää moottorin pyörittämiseen. Harjattoman moottorin roottorissa on pysyvät kestopagneetit ja staattorissa kuparilangoitus. Käämien määrä määrittää vaiheiden määrän ja kolmivaiheiset moottorit ovat kaikkein yleisimpiä, vaikka useampivaiheisetkin moottorit ovat mahdollisia. Käämit ovat liitetty toisiinsa joko tähti- tai deltakytkennällä. Kummassakin tapauksessa moottoriin liitetään kolme johdinta ja toimintaperiaate pysyy samana. Kolmivaiheisen moottorin roottorissa voi olla kaksi tai useampi magneettista napaa. (Millet n.d.)



KUVA 4. Harjaton tasasähkömoottori (Millet n.d.)

Yksinkertaisimmissa moottoreissa on vain yksi pari pohjois- ja etelänapoja. Useampien napojen käyttö vaatii useampia magneettisia sektoreita roottorille ja useampia käämejä staattorille (Kuva 5) mikä nostaa moottorin valmistuskustannuksia. Useampien napojen käytöllä saavutetaan parempi suorituskyky, vaikka korkeimpiin pyörintänopeuksiin päästäänkin matalammalla napaluvulla. (Millet, n.d.)

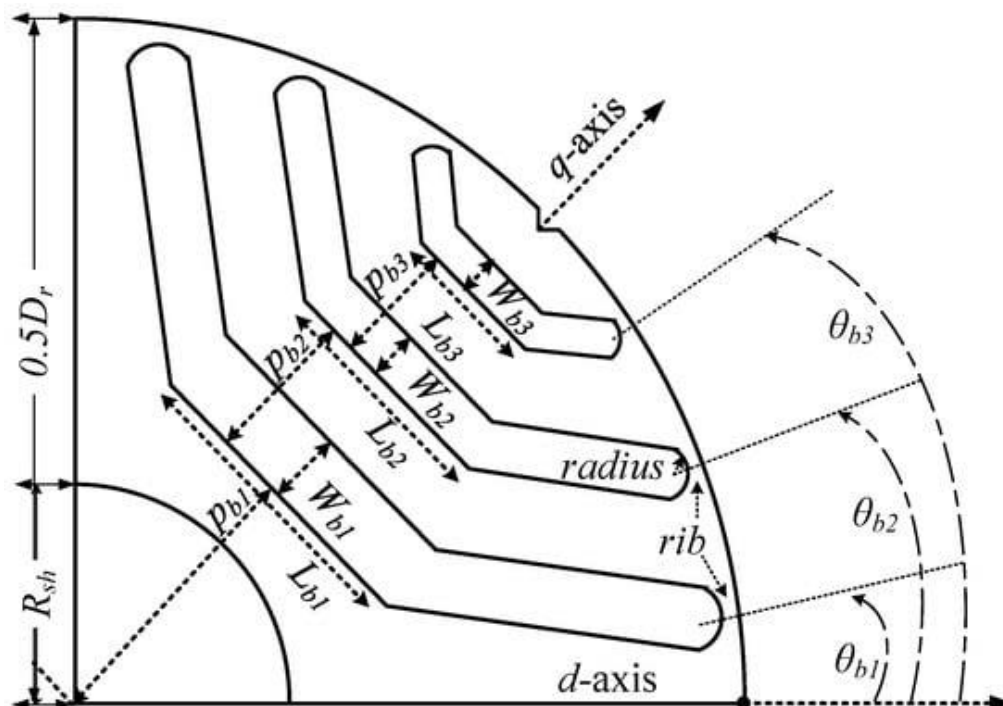


KUVA 5. Harjattoman tasasähkömoottorin napavaihtoehtoja (Millett n.d.)

Syötettäessä 50 Hz:n vaihtojännitettä 2-napaiseen oikosulkumoottoriin moottori pyörii noin 3000 rpm nopeudella. Vastaavasti 4-napainen oikosulkumoottori pyörii noin 1500 rpm nopeudella.

2.2.1 Reluktanssimoottori

Reluktanssimoottoreissa staattorin rakenne on samanlainen kuin oikosulkumoottoreissa mutta roottorin rakenne on erilainen (Kuva 6). Roottori on muotoiltu siten että se kääntyy magneettikentän pienimmän vastauksen mukaan. (Hegazy, 2016.)



KUVA 6. Reluktanssimoottorin roottorin rakenne. (Hegazy 2016.)

Parempaan hyötysuhteeseen pyrittäessä oikosulkumoottorin kuparissa tapahtuu liiallisia häviöitä. Reluktanssimoottoreita on kehitetty tavoiteltaessa parempaa hyötysuhdetta mutta monimutkaisempi roottorin rakenne nostaa valmistuskustannuksia. (Hyunwoo. 2020.)

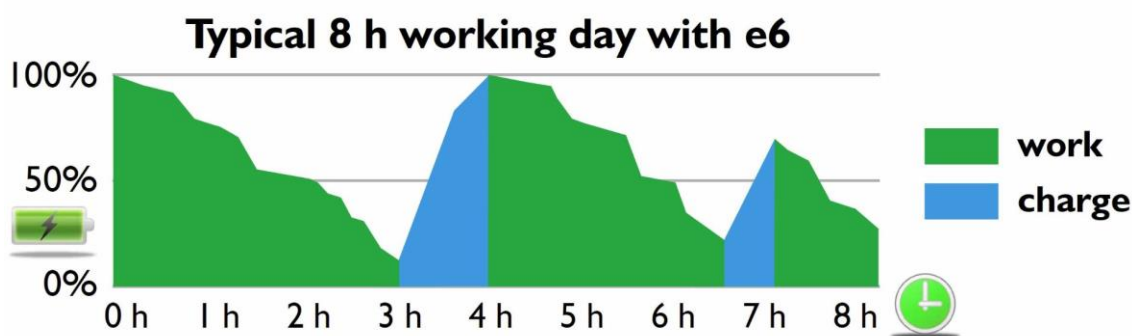
Suurin hyöty reluktanssimoottoreissa saavutetaan minimaalisilla roottorin häviöillä. Roottorin suunnittelulla ja moottorin ohjauksella pystytään saavuttamaan tiukentuvat eurooppalaiset direktiivit (kuten IE4) ilman että tarvitsee käyttää kestomagneetteja sähkömoottorissa. Hukkalämmön pieneminen parantaa vääntöä ja tehoa verrattuna teollisuuden tällä hetkellä käyttämiin oikosulkumoottoreihin. Sähkömoottorien fyysistä kokoa saadaan myös pienennettyä pysyen kuitenkin samassa hyötysuhdeluokituksessa. Roottorin ja staattorin ilmavälin halutaan olevan mahdollisimman pieni magneettikentän takia. Reluktanssimoottorissa roottorin muodon vuoksi ilmaväli saadaan erittäin pieneksi mutta se saattaa aiheuttaa ongelmia valmistustoleranssien kanssa. (Jawaaz 2021).

3 AVANT E6 -PIENKUORMAAJA

Avantin E6 on sähkökäyttöinen pienkuormaaja ja sen virtalähteenä toimii litiumioniakku. Avantin toinen sähkökäyttöinen malli E5 käyttää AGM-tyyppisiä akkuja. Avantiin muu mallisto sisältyy polttomoottorikäyttöisistä pienkuormaajista. (Avant Tecno Oy n.d.)

Avantin mukaan E6 pienkuormaajalla voi työskennellä noin neljä tuntia ennen akkujen uudelleen lataamista, ja täyteen lataamisessa kestää noin puoli tuntia pikalaturia käytettäessä (KUVA 7). Sähköisen kuormaajan etuja on se, että huoltotoimenpiteitä tarvitsee suorittaa vähemmän dieselmoottoriseen verrattuna. (Avant Tecno Oy n.d.)

Avant E6 pienkuormaajassa on 48V litium-rautafosfaattiakku. Tässä akkutyyppissä litium-rautafosfaatti toimii katodina ja grafiitti metallipinnalla anodina. Tämän tyyppinen akku on kustannustehokas, käyttöturvallinen ja myrkytön. Akulla on myös pitkä käyttöikä. Muun tyyppisiä akkuja korkeammat akun purkunopeudet, ovat ideaaleja trukkeihin, sähköpolkupyöriin ja sähköautoihin, kun sähkötehoa tarvitaan paljon nopeasti kiihdyttäessä. (Seghers 2022.)



KUVA 7. Avantin työpäivän kulkua (Avant Tecno Oy. n.d.)

Seuraavissa kappaleissa suunniteltu sähkömoottorin vaihto päätettiin olla toteuttamatta koska hyötysuhde voidaan määrittää olemassa olevasta Avantin 2kW toimilaitteiden sähkömoottorin kytkennästä. Avantissa olevaa sähkömoottoria voitaisiin käyttää toimilaitteiden käyttämiseen, vaikka uudessa kokoonpanossa valitun sähkömoottorin etuna on vaihtoehto nestejäähdytykseen. Nestejäähdytys

alentaa toimintalämpötilaa ja näin ollen vähentää siitä aiheutuvia häviöitä parantaen hyötysuhdetta

Sähkömoottorikäyttöisen toimilaitteen suunnittelu aloitettiin kartoittamalla tarvittavat komponentit. Sähkömoottorin ja sille tarvittavat johdotuksen osalta valinta oli aluksi selkeä, mutta muut komponentit vaativat tarkempaa selvitystä. Pienkuormaajaa tarkastelemalla saadaan selvyys sähkömoottorin kaapeloinnin järjestelystä ja Can-väyläohjauksen järjestämiseen. Sähkömoottoria asennettaessa täytyy myös ottaa huomioon litiumakun kapasiteetti ja akkuvalvonta. Sähkömoottorin pyörintänopeutta voidaan joutua muuttamaan vaihteistolla.

3.1 Sähkömoottori

Sähkömoottorin mitoituksessa lähdettiin liikkeelle tarvittavan tehon perusteella. Pienkuormaajassa on hydraulipumppua pyörittämässä 2kW moottori, jonka pohjalta sähkömoottoria alettiin etsimään. Tämä valittiin kriteeriksi sillä perusteella, että pienkuormaajassa olevaa litiumioniakkua ja muita systeemejä ei haluta kuormittaa liikaa. Muita kriteerejä sähkömoottorille olivat fyysinen koko, kolmivaiheisuus, Can-väyläohjattavuus, helppo saatavuus ja 48 voltin käyttöjännite. Sähkömoottoria valitessa käytiin läpi vaihtoehdot suurimmilta valmistajilta, josta Parkeerin GVM142-050-MPN todettiin sopivimmaksi lähtötietojen perusteella (Kuva 8).

Technical Characteristics

GVM142 Low Voltage Windings - Natural Convection Cooling

Motor	Battery DC Voltage [V]	Rated Torque Mn [Nm]	Rated Power Pn [kW]	Rated Current In [Arms]	Rated Speed Nn [min ⁻¹]	Peak Torque Mp [Nm]	Peak Power Pp [kW]	Peak Current Ip [Arms]	Maximum Speed Nmax [min ⁻¹]
GVM142-050-DPN	24	8.99	3.03	125	3220	40	7.2	691.1	3800
GVM142-050-GPN	36	6.74	3.18	87.1	4500	40	10.4	625.3	4900
GVM142-050-MPN	48	6.33	3.12	64	4700	40	10.9	486.4	5200
GVM142-050-YPN	72	6.74	3.18	42.6	4500	40	10.4	305.4	5000
GVM142-050-ZPN	80	6.12	3.08	37.2	4800	40	11.1	291.8	5200
GVM142-050-EQN	96	6.54	3.15	31.2	4600	40	10.6	230.4	4950
GVM142-050-NQN	120	7.87	3.22	26.1	3900	40	9.0	162.1	4400
GVM142-075-DPN	24	14.3	2.84	129	1890	62	6.7	715.4	2200
GVM142-075-DPN	36	9.36	3.43	87.5	3500	62	11.5	715.3	3500
GVM142-075-GPN	48	7.26	3.04	62.6	4000	62	14.3	647.1	4000
GVM142-075-YPN	72	10.8	3.52	44.3	3100	62	10.4	316.1	3100
GVM142-075-YPN	80	9.36	3.43	38.6	3500	62	11.7	316.1	3500
GVM142-075-ZPN	96	8.13	3.24	32.3	3800	62	13.6	302.0	3800
GVM142-075-EQN	120	8.13	3.24	25.5	3800	62	13.1	238.3	3800
GVM142-100-DPN	24	18.1	2.74	121	1440	85	6.9	742.6	1750
GVM142-100-DPN	36	14.8	3.57	101	2300	85	11.4	742.6	2700
GVM142-100-GPN	48	11.8	3.58	73.6	2900	85	14.2	671.9	3100
GVM142-100-YPN	72	15.5	3.49	46.3	2150	85	10.2	328.1	1350
GVM142-100-YPN	80	14.4	3.61	43.2	2400	85	11.5	328.1	2650
GVM142-100-ZPN	96	12.3	3.62	35.8	2800	85	13.5	313.5	3000
GVM142-100-DQN	120	11.8	3.58	29.2	2900	85	14.1	266.2	3100

KUVA 8. Valitun sähkömoottorin tiedot (GVM Global Vehicle Motor N.d.)

Parkerin GVM142-050-MPN on alun perin pumppukäyttöön tarkoitettu kolmivaiheinen sähkömoottori, joka on suunniteltu pyörimään tasaisella pyörintänopeudella. Sähkömoottori on ilmajähdytteinen mutta se on mahdollista muuttaa nestejähdytteiseksi (GVM Global Vehicle Motor n.d.). Tämä sähkömoottori on luokiteltu 3kW moottoriksi, joka on lähimpänä tavoiteltua 2kW tehoa.

3.1.1 Vaihteisto

Sähkömoottori pyörii maksimissaan 4700 rpm:n nopeudella mikä on liian nopea toimilaitteikäytössä. Hydraulinen toimilaitte pyörii noin 60 rpm:n nopeudella. Sähkömoottori tarvitsee vaihteiston toimiakseen näin matalan kierrosnopeuden vaatimuksen kanssa. Jos sähkömoottoria käytettäisiin ilman välitystä, sähkömoottorin hyötysuhde laskisi merkittävästi ja eikä se välttämättä pystyisi pyörittämään haluttua kuormaa.

Vaihteistoksi valittiin alhaisen pyörimisnopeuden perusteella Parker PS90-010-S2 (Kuva 9), jonka välityssuhde on 70:1: teen. Lisäksi se on suoraan sopiva valittuun Parker moottoriin. Valitulla välityssuhteella sähkömoottorin maksimipyörintänopeus saadaan pudotettua 67rpm pyörimisnopeudeksi. Mekaanisessa välityssuhteessa on vähäiset hyötysuhdehäviöt ja Parker lupaa omille vaihteistoilleen 97 % hyötysuhteen ja minimaalisen välyksen hammaspyörästössä. Välyksen kasvaessa ongelmia muodostuisi toimilaitteen liikkeelle lähtiessä ja suuntaa vaihtaessa. Liiallinen väljyys rattaiden välillä aiheuttaa liiallisia häviöitä ja hammasrattaiden kulumista (High Precision Inline Helical Planetary Gearboxes n.d.).



KUVA 9. Parkerin vaihteisto (High Precision Inline Helical Planetary Gearboxes n.d.)

3.1.2 CANBus-väylä

Canbus on väylätekniikka, joka on suunniteltu viestintäkeinoksi ohjainlaitteiden välille. Väylätekniikka antaa ohjainlaiteille keinon kommunikoida luotettavasti ja siinä pystytään myös päättämään viestien tärkeydestä. Väylätekniikan etuna on se, että kaikki verkossa sijaitsevat ohjainlaitteet pystyvät lähettämään toisilleen viestejä eikä niiden tarvitse kulkea pääohjainlaitteen kautta. CANBus-väylä on laajasti standardisoidusti käytännössä kaikilla autovalmistajilla ja useilla työko-nevalmistajilla (Smith 2021).

Sähkömoottoria ohjataan Can-väylän avulla. Avantissa on pumppujen sähkömoottorien ohjaukseen valmiiksi sopivat väylän liittimet ja johdotus. Korvaamalla hydraulipumppu ja sitä pyörittävä sähkömoottori saataisiin uuden sähkömoottorin ohjaus toteutettua helposti. Uusi sähkömoottori voi siis käyttää samoja kytkentöjä vanhan kanssa. Väylän ohjainlaitetta ohjelmoimalla voitaisiin väylälle kertoa uuden sähkömoottorin ohjaukseen tarvittavista muutoksista ja tällä varmistettaisiin,

että litiumioniakku ei kuormittuisi liikaa. Toinen mahdollinen toteutustapa olisi lisätä sähkömoottori vanhan hydraulijärjestelmän rinnalle testaustarkoituksiin. Tällöin uudelle sähkömoottorille täytyisi asentaa omat johtimet, jos Avantin omassa moottorinohjaimessa on optio useammalle moottorille. Muussa tapauksessa uudelle moottorille täytyy tehdä kokonaan uusi johdotus vanhan järjestelmän rinnalle. Rinnalle tehtävässä versiossa täytyy varmistaa, että uusi ja vanha järjestelmä ei ole samaan aikaan käytettävissä akun ja muiden komponenttien suojaamiseksi. Sen toteuttaminen väylää ohjelmoimalla vaatisi lisätutkimuksia, joita tässä oppinäytetyössä ei lähdetty selvittämään. Samaan aikaan käytön estämisen voisi myös toteuttaa yksinkertaisilla katkaisimilla.

4 Hyötysuhteen määrittäminen

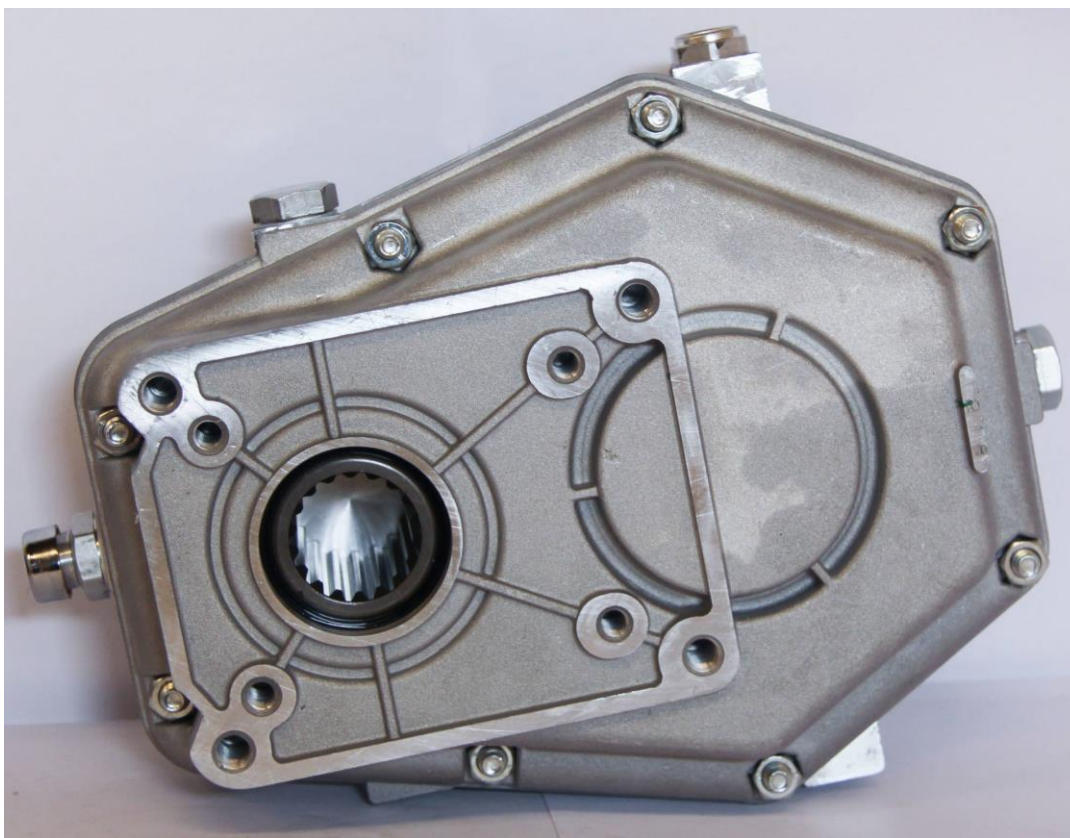
Mittauksessa on tavoitteena määrittää pienkuormaajan sähkömoottorin hyötysuhde. Tätä tarkoitusta varten rakennettiin mittauslaitteisto (Kuva 10), jossa pyörittäjäyksikkö pyörittää hydraulimoottoria. Kuormana toimivalle hydraulimoottorille asennettiin oma hydraulisäiliö ja kuristin. Vastuksena toimiva hydraulimoottori toimii siis omana koneikkonaan, jossa kuorman määrää pystytään säätämään kuristimella sopivaksi. Pyörittäjän akseliin sorvattiin oikealla halkaisijalla reikä johon hydraulimoottorin akseli saatiin upotettua. Osittain sisäkkäin olevat akselit liitettiin toisiinsa pulttiliitoksella.



Kuva 10. Mittausjärjestely (Kuva: Tatu Ollikainen 2023).

4.1 Hydraulimoottori

Hyötysuhteen määrittämiseen käytettiin kuormana hydraulimoottoria 1;3,5 kierto-vaihteella (KUVA 11). Pyörittäjän pyörimisnopeus on liian hidas, joten sitä haluttiin nostaa kuorman hydraulimoottorille sopivammaksi. Hyötysuhteen määrittämiseksi pienkuormaajan pyörittäjää halutaan kuormittaa. Kuormaksi valittiin hydraulimoottori koska pyörittäjän tuottama vääntö on noin 900Nm ja muiden kuormatapojen kuten sähkömoottorien väännönkesto jää liian pieneksi.



KUVA 11. Kiertovaihte (Virhydro n.d.)

Kuorman kiinnitys oli suunniteltava tukevaksi, jotta se ei rikkoudu toimilaitetta pyöriessä. Hydraulimootorin ja pyörittäjän väliin suunnitettiin tukilevy ja hydraulimootoriin sopiva laippa (Kuva 12), jotka laserleikattiin riittävän paksusta levystä tukevan kiinnityksen varmistamiseksi. Tukiraudat kiinnitettiin pyörittäjän runkoon pulttiliitoksella ja hydraulimootorin laippaan ne kiinnitettiin hitsaamalla.



KUVA 12. Tukilaput ja akseli (Kuva: Tatu Ollikainen 2023).

4.1.1 Mittausmenetelmät

Hydraulipiirin nesteen painetta mitattiin useista pisteistä Wika model A-10 painantureilla. Hydraulimoottorin tilavuusvirtaa mitattiin anturilla VC 3 K1 F1 P2 SH, jonka avulla pystyttiin määrittämään hydraulimoottorin pyörimisnopeus. Painantureista yksi sijoitettiin kuorman letkuun, yksi pyörittäjän paineletkuun ja yksi pumppun paineletkuun. Toimilaitteen sähkömoottorin hyötysudetta tarkastellessa pumppua lähimpänä oleva painanturi on tärkein, että saadaan selville sähkömoottorin käyttämä teho. Mitä lähempänä mittauspiste on mitattavaa kohdetta, sitä vähemmän mukana on eri häviölähteiden aiheuttamia mittausvirheitä. Jokaiselle anturille valmistettiin juottamalla tarvittavat johdot. Akustolta tuleva jänniteviesti johdotettiin ohjainkorttiin NI 9219, joka pystyy suoraan mittamaan jänniteeron ja sähkövirran määrä saatiin virtamittarista LEM HTR-100 SB. Mittausjärjestelyssä käytettiin ohjainlaitteena NI 9205 (KUVA 13) analogisignaali moduulia ja ohjainkorttiin liitettiin johtimet jokainen omaan kanavaansa. Ohjainkortille tulevien johtimien väliin lisättiin 250 ohmin vastukset, jotta anturien 4–20 milliampeerin virtaviesti saatiin muutettua 1–5 voltin jänniteviestiksi. Ohjainkortit saavat johtimista mittausdatan jänniteviestinä ja syöttävät sen USB-liittimen kautta tietokoneeseen. Tietokoneella oleva National Instrumentsin Signal express -ohjelma kerää kaikista kanavista tulevan tiedon yhteen, joka saadaan siirrettyä sellaisenaan Excel -ohjelmaan.



KUVA 13. National Instruments-ohjainkortti (Artisan Oy. n.d.)

Kuorman määrän säätämiseksi hydraulimoottorin letkun väliin laitettiin säädettävä kuristin (KUVA 14). Virtausta kuristamalla saadaan kuormaa nostettua ja päästään analysoimaan laitteen toimintaa myös korkeammilla paineilla. Saadaan laajempi kuva hyötysuhteen muuttumisesta, kun kierrosnopeutta ja kuristuksen määrää päästään säätämään. Ilman minkäänlaista kuormaa pyörittäjän hyötysuhde tulokset olisivat epärealistisia verrattuna käyttöön testiympäristön ulkopuolella.



KUVA 14. Tilavuusvirta-anturi ja kuristin (Kuva: Tatu Ollikainen 2023).

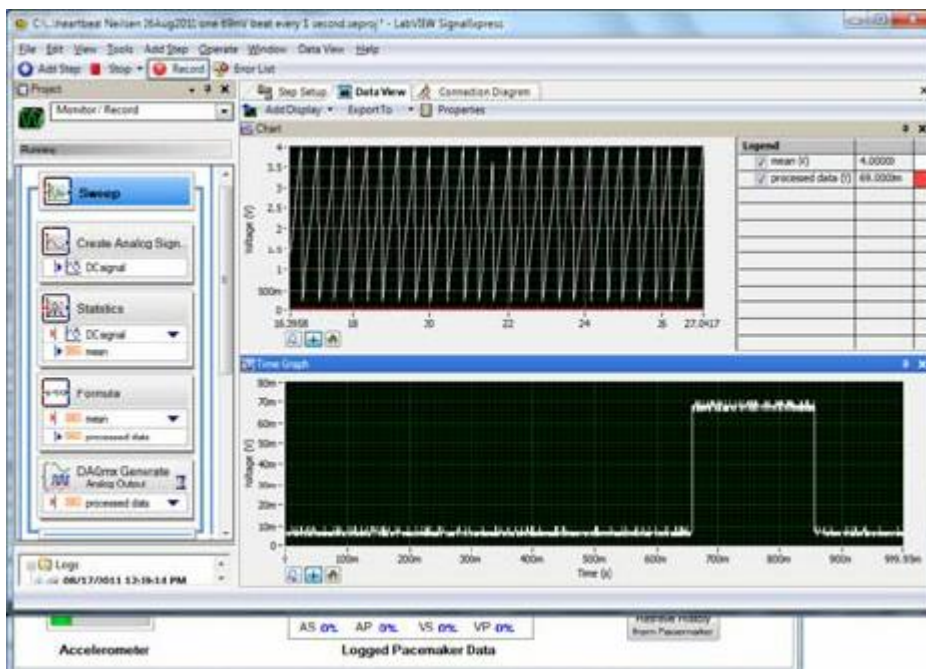
4.1.2 Mittauksen kulku

Ennen mittaamista mittausjärjestely piti kokoonpanna. Kuorman säiliön alle rakennettiin kuormalavoista alusta ja siitä liitettiin hydraulikkaletkut hydraulimoottorille. Hydraulimoottorin ulostuloletku liitettiin kuristimeen ja kuristin liitettiin tilavuusvirta-anturiin. Tilavuusvirta-anturista hydrauliletku meni takaisin säiliölle. Tilavuusvirta-anturin asetuksia muutettiin siten, että se ymmärtää pohjalevyn koon ja asetettiin mittausalue kokoluokaltaan oikeaksi. Paineantureita varten asennettiin t-haarat, jotta anturit saatiin letkujen väliin. Toimilaitepumpulle tuleva 250 baa- rin anturi (KUVA 15) asennettiin 10 cm pitkän letkun päähän koska pumppu on pienkuormaajassa suojattu mekaanisesti metallilaatikolla. Paineanturin asennus oli tällä tavalla helpompi toteuttaa.



KUVA 15. Toimilaittepumpun paineanturi (Kuva: Tatu Ollikainen 2023).

Mittauksessa pienkuormaajan pyörittäjää kiihdytettiin sen omasta nopeudenvälitsemestä, joka on liukukytkin. Näin saatiin portaaton 10 sekuntia kestävä mittaus-tapahtuma. Signal express- ohjelma (KUVA 16) tallensi jokaiselta anturilta tulevan signaalin omaan tiedostoonsa. Ohjelmasta pystyttiin suoraan siirtämään data yhteen Excel-tiedostoon. Mittaus otettiin ensin ilman kuristusta ja sen jälkeen toistettiin kaksitoista kertaa jokaisella kuristimen kierroksella. Kuristin oli kierrettävää mallia, jossa säädintä käännettäessä kuristuksen määrä kasvoi. Mittaus toteutettiin yhden säätimen kierroksen välein.



KUVA 16. Signal express- ohjelma. (Researchgate. n.d)

4.2 Hyötysuhteen laskeminen

Pienkuormaajan voimalinjan määrittämiseen tarvittiin sähkömoottorin otto- ja antoteho. Sähkömoottori ottaa ottotehonsa pienkuormaajan akulta ja pyörittää työhydrauliikan pumppua, jolta saadaan antoteho. Ottotehoa tarkastellaan jokaisesta mittauksesta mahdollisimman laajan kuvan saamiseksi. Yläindeksi tarkoittaa mittauksen numeroa ja alaindeksi ajanhetkeä mittauksessa. Ottoteho voidaan laskea sähkötehona yhtälön yksi mukaisesti:

$$P_{otto} = U * I \quad (1)$$

$$P = \text{Teho}, W$$

$$U = \text{Jännite}, V$$

$$I = \text{Virta}, A$$

$$P_{10s}^0 = 48,513 V * 123,796 A = 6005.715 W \approx 6,0 kW$$

Taulukosta 1 voidaan havaita, että ottoteho kasvaa voimakkaasti, kun kuristus on lähellä maksimia.

TAULUKKO 1. Sähkömoottorin ottotehot kymmenen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Teho, W
P_{10s}^1	5937,595
P_{10s}^2	5713,191
P_{10s}^3	5717,358
P_{10s}^4	5649,486
P_{10s}^5	5614,015
P_{10s}^6	5692,590
P_{10s}^7	5656,597
P_{10s}^8	5695,108
P_{10s}^9	5848,166

P_{10s}^{10}	6405,788
P_{10s}^{11}	8686,010
P_{10s}^{12}	11733,288

Taulukosta kaksi voidaan havaita ottotehon kasvavan samalla tavalla kuin taulukossa yksi. Mittaustulosten vaihtelu eri kuristuksen pisteissä johtuu pyörittäjän epätasaisesta kiihdyttämisestä eri mittaustapahtumien välillä.

TAULUKKO 2. Sähkömoottorin ottotehot viiden sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Teho, W
P_{5s}^0	3171,981
P_{5s}^1	2884,699
P_{5s}^2	3605,751
P_{5s}^3	2660,459
P_{5s}^4	2264,296
P_{5s}^5	3284,732
P_{5s}^6	2663,706
P_{5s}^7	2750,692
P_{5s}^8	2483,076
P_{5s}^9	2293,518
P_{5s}^{10}	2830,160
P_{5s}^{11}	3606,737
P_{5s}^{12}	11603,720

Taulukossa kolme mittauksen lähtöteho pysyy kohtuullisen samana mutta nousee viimeisillä mittauksilla kuristuksen maksiarvoilla.

TAULUKKO 3. Sähkömoottorin ottotehot puolen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Teho, W
$P_{0,5s}^0$	1027,603
$P_{0,5s}^1$	996,080

$P_{0,5s}^2$	1135,586
$P_{0,5s}^3$	963,647
$P_{0,5s}^4$	936,422
$P_{0,5s}^5$	1007,993
$P_{0,5s}^6$	929,503
$P_{0,5s}^7$	941,449
$P_{0,5s}^8$	947,409
$P_{0,5s}^9$	949,929
$P_{0,5s}^{10}$	1070,847
$P_{0,5s}^{11}$	1267,404
$P_{0,5s}^{12}$	3030,949

Antotehon laskemiseksi piti selvittää tilavuusvirta pienkuormaajan työhydrauliikassa. Kuorman hydrauliikkaletkussa oleva tilavuusvirta-anturi antoi mittaustuloksen tilavuusvirran määrästä kuorman puolella. Laskennallisesti saadaan tilavuusvirta pienkuormaajan pyörittäjälle, kun määritetään ensin pyörimisnopeus kuorman ja pienkuormaajan pyörittäjää yhdistävälle akselille. Tulokset täytyy jakaa 3,5 ylennysvaihteen 1:3,5 välityssuhteen vuoksi. Koska kuorman hydrauliimoottorin kierrostilavuus on tiedossa valmistajalta, pyörintänopeus saadaan kaavasta kaksi:

$$V_p = \frac{Q}{n} \quad (2)$$

$$n = \frac{Q}{V_p}$$

$$V_p = \text{Kierrostilavuus}, \frac{l}{r}$$

$$Q = \text{Tilavuusvirta}, \frac{l}{\text{min}}$$

$$n = \text{Pyörintänopeus}, \frac{r}{\text{min}}$$

$$n_{10s}^0 = \left(\frac{9,357 \frac{l}{\text{min}}}{0,042 \frac{l}{r}} \right) / 3,5 = 63,795 \frac{r}{\text{min}}$$

Taulukossa neljä kierrosnopeus pysyy samassa kokoluokassa mittausten välillä. Viimeisissä mittauksissa kuorma kasvaa riittävästi, että pyörimisnopeus alkaa hidastua. Mittauksen kaksitoista tuloksia ei saatu laskettua lähellä nollaa olevan tilavuusvirran mittausrvon takia.

TAULUKKO 4. Pyörittäjän kierrosnopeudet kymmenen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Kierrosnopeus, $\frac{r}{min}$
n_{10s}^1	64,136
n_{10s}^2	64,074
n_{10s}^3	63,870
n_{10s}^4	63,986
n_{10s}^5	63,469
n_{10s}^6	63,687
n_{10s}^7	63,408
n_{10s}^8	62,918
n_{10s}^9	61,333
n_{10s}^{10}	58,442
n_{10s}^{11}	54,108
n_{10s}^{12}	-

Taulukossa viisi pyörimisnopeus pysy mittausten välillä lähellä toisiaan, mutta mittauksessa on havaittavissa samaa vaihtelua epätasaisen kiihdyttämisen vuoksi.

TAULUKKO 5. Pyörittäjän kierrosnopeudet viiden sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Pyörimisnopeus, $\frac{r}{min}$
n_{5s}^0	44,571
n_{5s}^1	41,972

n_{5s}^2	48,517
n_{5s}^3	40,775
n_{5s}^4	40,501
n_{5s}^5	46,578
n_{5s}^6	40,891
n_{5s}^7	41,149
n_{5s}^8	38,680
n_{5s}^9	35,687
n_{5s}^{10}	36,204
n_{5s}^{11}	31,863
n_{5s}^{12}	-

Taulukossa kuusi havaitaan pyörintänopeuden hidastuvan raskaammalla kuormalla.

TAULUKKO 6. Pyörittäjän kierrosnopeudet puolen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Pyörimisnopeus, $\frac{r}{min}$
$n_{0,5s}^0$	20,993
$n_{0,5s}^1$	21,102
$n_{0,5s}^2$	23,170
$n_{0,5s}^3$	20,983
$n_{0,5s}^4$	20,952
$n_{0,5s}^5$	21,204
$n_{0,5s}^6$	20,775
$n_{0,5s}^7$	20,898
$n_{0,5s}^8$	20,394
$n_{0,5s}^9$	19,932
$n_{0,5s}^{10}$	18,326
$n_{0,5s}^{11}$	15,034
$n_{0,5s}^{12}$	-

Pyörintänopeudesta ja pienkuormaajan pyörittäjän kierrostilavuudesta voidaan laskea sen tuottama tilavuusvirta samalla kaavalla kaksi.

$$V_p = \frac{Q}{n} \quad (2)$$

$$Q = V_p * n$$

$$V_p = \text{Kierrostilavuus}, \frac{l}{r}$$

$$Q = \text{Tilavuusvirta}, \frac{l}{\text{min}}$$

$$n = \text{Pyörintänopeus}, \frac{r}{\text{min}}$$

$$Q_{10s}^0 = 0,5 \frac{l}{r} * 63,795 \frac{r}{\text{min}} = 31,897 \frac{l}{\text{min}}$$

Taulukosta seitsemän voidaan havaita pyörittäjän tilavuusvirran tulokset kymmenen sekunnin kohdalla. Tilavuusvirta pysyy samalla tasolla mittausten välillä.

TAULUKKO 7. Pyörittäjän tilavuusvirrat kymmenen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Tilavuusvirta, $\frac{l}{\text{min}}$
Q_{10s}^1	32,068
Q_{10s}^2	32,037
Q_{10s}^3	31,935
Q_{10s}^4	31,993
Q_{10s}^5	31,734
Q_{10s}^6	31,843
Q_{10s}^7	31,704
Q_{10s}^8	31,459
Q_{10s}^9	30,666
Q_{10s}^{10}	29,221
Q_{10s}^{11}	27,054

Q_{10s}^{12}	-
----------------	---

Taulukosta kahdeksan havaitaan tilavuusvirran tulokset viiden sekunnin kohdalla. Mittauksen toteuttavan vuoksi taulukossa havaitaan vaihtelua mittausten välillä.

TAULUKKO 8. Pyörittäjän tilavuusvirrat viiden sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Tilavuusvirta, $\frac{l}{min}$
Q_{5s}^0	22,285
Q_{5s}^1	20,986
Q_{5s}^2	24,258
Q_{5s}^3	20,387
Q_{5s}^4	20,250
Q_{5s}^5	23,289
Q_{5s}^6	20,445
Q_{5s}^7	20,574
Q_{5s}^8	19,34
Q_{5s}^9	17,843
Q_{5s}^{10}	18,102
Q_{5s}^{11}	15,931
Q_{5s}^{12}	-

Taulukosta yhdeksän huomataan tulokset tilavuusvirralle puolen sekunnin kohdalle.

TAULUKKO 9. Pyörittäjän tilavuusvirta puolen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Tilavuusvirta, $\frac{l}{min}$
$Q_{0,5s}^0$	10,496
$Q_{0,5s}^1$	10,551
$Q_{0,5s}^2$	11,585
$Q_{0,5s}^3$	10,491

$Q_{0,5s}^4$	10,476
$Q_{0,5s}^5$	10,602
$Q_{0,5s}^6$	10,387
$Q_{0,5s}^7$	10,449
$Q_{0,5s}^8$	10,197
$Q_{0,5s}^9$	9,966
$Q_{0,5s}^{10}$	9,163
$Q_{0,5s}^{11}$	7,517
$Q_{0,5s}^{12}$	-

Antoteho työhydrauliikan pumpulta saadaan laskettua hydraulisen tehon kaavalla. Yksiköt muutetaan SI-järjestelmän mukaisiksi, jotta tehon yksiköksi saadaan watteja.

$$P_{anto} = p * Q \quad (3)$$

$$P = \text{Teho}, W$$

$$Q = \text{Tilavuusvirta}, \frac{m^3}{s}$$

$$p = \text{paine}, Pa$$

$$P_{10s}^0 = 6824400 Pa * 5,3161616 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} = 3627,960 W$$

Taulukosta kymmenen nähdään tuottoteho kymmenen sekunnin kohdalla,

TAULUKKO 10. Toimilaitepumpun tuottotehot kymmenen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Teho, W
P_{10s}^1	3634,533
P_{10s}^2	3557,548
P_{10s}^3	3533,714
P_{10s}^4	3526,001

P_{10s}^5	3481,114
P_{10s}^6	3491,478
P_{10s}^7	3464,189
P_{10s}^8	3466,991
P_{10s}^9	3509,723
P_{10s}^{10}	3720,758
P_{10s}^{11}	4852,405
P_{10s}^{12}	-

Taulukosta yksitoista nähdään ottoteho viiden sekunnin kohdalla.

TAULUKKO 11. Toimilaittepumpun tuottotehot viiden sekunnin kohdalla

Mittauskerta	Teho, W
P_{5s}^0	1765,083
P_{5s}^1	1581,154
P_{5s}^2	2053,249
P_{5s}^3	1460,932
P_{5s}^4	1439,606
P_{5s}^5	1869,602
P_{5s}^6	1461,156
P_{5s}^7	1481,773
P_{5s}^8	1343,999
P_{5s}^9	1228,490
P_{5s}^{10}	1470,817
P_{5s}^{11}	1732,097
P_{5s}^{12}	-

Taulukosta kaksitoista nähdään ottoteho puolen sekunnin kohdalla.

TAULUKKO 12. Toimilaitteumpumpun tuottotehot puolen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Teho, W
$P_{0,5s}^0$	481,329
$P_{0,5s}^1$	474,742
$P_{0,5s}^2$	555,076
$P_{0,5s}^3$	465,748
$P_{0,5s}^4$	462,341
$P_{0,5s}^5$	468,575
$P_{0,5s}^6$	455,556
$P_{0,5s}^7$	458,281
$P_{0,5s}^8$	441,659
$P_{0,5s}^9$	462,439
$P_{0,5s}^{10}$	484,738
$P_{0,5s}^{11}$	494,250
$P_{0,5s}^{12}$	-

Hyötysuhde lasketaan kaavalla neljä Otto- ja antotehosta:

$$\eta = \frac{P_{anto}}{P_{otto}} \quad (4)$$

$\eta = \text{hyötysuhde}$

$$\eta_{10s}^0 = \frac{3627,960 \text{ W}}{6005,715 \text{ W}} = 0,604085 \approx 0,60 \approx 60\%$$

Taulukossa kolmetoista on tulokset hyötysuhteelle kymmenen sekunnin kohdalla. Hyötysuhde lukemat ovat päälle 60 prosenttia pyöristettynä mutta hyötysuhde laskee alle sen kun kuristusta nostetaan riittävästi. Hyötysuhdelukemat selittyvät sillä, että mittauksessa ei saatu mitattua pelkkää sähkömoottoria vaan

lukemaan sisältyy muitakin laitteita kuten sähkömoottorin pyörittämä pumppu sekä moottoria käyttävä AC-inverteri.

TAULUKKO 13. Sähkömoottorin hyötysuhteet kymmenen sekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Hyötysuhde
η_{10s}^1	0,61212208≈0,61
η_{10s}^2	0,622690192≈0,62
η_{10s}^3	0,618067646≈0,62
η_{10s}^4	0,624127753≈0,62
η_{10s}^5	0,62007565≈0,62
η_{10s}^6	0,613337339≈0,61
η_{10s}^7	0,612415733≈0,61
η_{10s}^8	0,608766506≈0,61
η_{10s}^9	0,600140796≈0,60
η_{10s}^{10}	0,580843137≈0,58
η_{10s}^{11}	0,55864603≈0,56

Taulukosta neljätoista nähdään hyötysuhdetulokset viiden sekunnin kohdalla. Hyötysuhteet ovat pienempiä verrattuna taulukkoon kolmetoista, jotka selityvät sillä, että sähkömoottori toimii alhaisemmillä kierroksilla. Sähkömoottorien rakenne aiheuttaa sen, että niillä on parempi hyötysuhde korkeammilla kierrosnopeuksilla.

TAULUKKO 14. Sähkömoottorin hyötysuhteet viidensekunnin kohdalla.

Mittauskerta	Hyötysuhde
η_{5s}^0	0,556460773≈0,56
η_{5s}^1	0,548117499≈0,55
η_{5s}^2	0,569437268≈0,57
η_{5s}^3	0,549127801≈0,55
η_{5s}^4	0,635785251≈0,64
η_{5s}^5	0,569179464≈0,57
η_{5s}^6	0,548542519≈0,55

η_{5s}^7	0,538690991≈0,54
η_{5s}^8	0,541260114≈0,54
η_{5s}^9	0,535635648≈0,54
η_{5s}^{10}	0,51969394≈0,52
η_{10s}^{11}	0,480239341≈0,48

Taulukosta viisitoista havaitaan hyötysuhde tulokset puolen sekunnin kohdalla. Tässä taulukossa on kaikkein alhaisimmat kierrosnopeudet, joten hyötysuhteet ovat laskeneet lisää.

TAULUKKO 15. Sähkömoottorin hyötysuhteet puolen sekunnin kohdalla.

$\eta_{0,5s}^0$	0,468399761≈0,47
$\eta_{0,5s}^1$	0,4766103120≈0,48
$\eta_{0,5s}^2$	0,488801377≈0,49
$\eta_{0,5s}^3$	0,483318061≈0,48
$\eta_{0,5s}^4$	0,493731459≈0,49
$\eta_{0,5s}^5$	0,464859379≈0,46
$\eta_{0,5s}^6$	0,490107079≈0,49
$\eta_{0,5s}^7$	0,486782609≈0,49
$\eta_{0,5s}^8$	0,466175643≈0,47
$\eta_{0,5s}^9$	0,486814278≈0,48
$\eta_{0,5s}^{10}$	0,452667841≈0,45
$\eta_{0,5s}^{11}$	0,389970365≈0,39

4.2.1 Virhearviointi

Toimilaitteen pumpulle asennetulla paineanturilla, tilavuusvirta-anturilla ja virta-anturilla on omat mittavirhearvonsa. Paineanturilla Model A-10 on mitta-alueella ±0.3 prosentin virhe. Tilavuusvirta-anturilla VC 3 K1 F1 P2 SH on ±0.3 prosentin virhe mitta-alueella. Virtamittarin LEM HTR-100 SB mitta-alueella on ±2 prosenttia.

Mittaukseen käytettyjen antureiden virheet ovat pieniä. Koska anturit ovat mittaussäilyneitä, niiden valmistajat ovat pyrkineet mahdollisimman tarkkaan mittausdatan keräämiseen. Antureiden virheet on kuitenkin otettava huomioon mittausdataa tarkastellessa.

Hydraulisessa voimansiirrossa on aina lämpöhäviötä. Hydrauliöljyn lämpenemistä tapahtuu, kun öljy itsessään vastustaa etenemistä molekyylitasolla syntyvän kitkan vuoksi. Hydraulipumpuissa syntyy kotelovuotoa, jota ei erikseen mitattu tässä mittauksessa. Se kuitenkin vaikuttaa mittaustuloksiin painehäviönä. Hydrauliikkaliittimissä ja venttiileissä on myös painehäviötä, jonka vaikutus pyrittiin minimoimaan mittaamalla mahdollisimman läheltä toimilaitepumppua. Tilavuusvirta-anturilta mitatuissa tuloksiin sisältyy hydrauliikkajärjestelmän häviöt, ja ne vaikuttavat myös toimilaitepumpun tilavuusvirran laskennallisiin arvoihin. Virta ja jännite mitattiin kuitenkin juuri ennen sähkömoottoria ja paine mitattiin suoraan toimilaitteen hydrauliikkaliittimestä.

Mittavirhettä on voinut syntyä mittausohjelman vuoksi. Mittausohjelmassa mitaustapahtumaa käynnistäessä ja lopettaessa neljän sekunnin viive. Jokaisen mittauksen kohdalla täytyi arvioida koska mittausohjelma alkoi tallentamaan dataa. Mittausten pitäminen täysin samanlaisina tämän vuoksi haastavaa. Mittauksiin vaikutti myös se, kuinka tasaisesti mitausten aikana pienkuormaajan kaasua liikutettiin.

5 POHDINTA

Openäytetyön tavoitteena oli suunnitella pienkuormaajalle sähkömoottorikäyttöinen pyörittäjä ja mitata pienkuormaajan sähkömoottorin hyötysuhdetta. Työssä saatiin kattava suunnitelma pienkuormaajan muuttamiseksi täyssähköiseksi ja näiltä osin opinnäytetyön tavoitteisiin päästiin. Sähkömoottori ja muut komponentit mitoitettiin ja valittiin pienkuormaajaan sopivaksi. Opinnäytetyön suunnitelmasta on hyötyä tulevaisuudessa kaikille, jotka haluavat toteuttaa tasasähköisen pienkuormaajan.

Opinnäytetyön mittaus oli onnistunut ja sen suunnittelu tehtiin huolella. Projektin aloituksesta siihen, että päästiin mittaamaan, kului kuitenkin paljon aikaa. Oikeanlaisen mittausprosessin suunnittelu piti tehdä huolella ja sitä ei voinut kiirehtiä. Erilaisten anturien valitseminen ja mittalaitteiston valitseminen piti tehdä huolella. Sopivien anturien löytämiseen ja niiden soveltuminen valitun mittalaitteiston kanssa vaati syvällistä paneutumista. Koko mittausprosessi oli täten haastavampi kuin aluksi ajateltiin.

Mittaustapahtumasta saatu data täytyi käsitellä anturien antamista virtaviesteistä ymmärrettäviksi suureiksi. Excel -ohjelmalla saatiin laskettua ja jäsennettyä saatu mittausdataa. Datan saaminen suoraan Excel -tiedostoon helpotti sen läpikäymistä huomattavasti mutta useiden mittaustapahtumien läpikäynti oli kuitenkin työlästä.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin pienkuormaajan sähkömoottorille hyötysuhdelukemat. Sähkömoottoreille määritettiin joka mittauksesta kolme pistettä, jotta saataisiin mahdollisimman laaja kuva sähkömoottorin toiminnasta. Hyötysuhdetta kuitenkin laski hyötysuhdelaskelmissa mukana olevat vaihtosuuntaaja, vaihtosuuntaajan tekemä kantikas siniaalto ja toimilaitteen hydraulipumppu. Jos sähkömoottorin ottotehoa ja tuottotehoa olisi mitattu suoraan kolmivaihejohtimista ja sen ulostuloakseliilta, olisi sähkömoottorin hyötysuhteen määrittäminen ollut tarkempaa. Tämä ei kuitenkaan ollut mahdollista ilman pienkuormaajan laajaa purkamista.

Opinnäytetyö oli kokonaisuutena onnistunut, siinä oli arvokasta kertausta ja uutta tietoa. Sähköistyminen on ajankohtaista ja juuri tämän tyyppinen tutkimustieto on kiinnostavaa ammattikorkeakoululle. Tutkimusprojekti oli mielenkiintoinen haasteita huolimatta ja opittu tietotaito on tärkeää työelämässä.

LÄHTEET

Aissaoui, A. 2017. Switched Reluctance Motor : Concept, Control and Applications. Croatia: IntechOpen

Artisan Oy. n.d. NI National Instruments NI 9205 32-Channel Analog Input Module. Verkkosivu. Viitattu 17.5.2023 <https://www.artisanq.com/TestMeasurement/75296-4/National-Instruments-NI-9205-32-Channel-Analog-Input-Module-with-Spring-Terminal>

Avant Tecno Oy. n.d. Täyssähköinen, akkukäyttöinen Avant. verkkosivu, Viitattu 25.2.2023
<https://www.avanttecno.com/fi/kuormaaajat/e-sarja#technical-specifications>

Hegazy. R. 2016. Optimal Rotor Design of Synchronous Reluctance Machines Considering the Effect of Current Angle. Verkkosivu. Viitattu 24.2.2023
<https://www.mdpi.com/2227-7390/9/4/344>

Hyunwoo. K. 2020. A Study on the Rotor Design of Line Start Synchronous Reluctance Motor for IE4 Efficiency and Improving Power Factor. Verkkosivu. Viitattu 24.2.2023
<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5774>

Jawaaz. A. 28.12.2021 Selecting The Right Motor For Your Design. Verkkosivu. Viitattu 24.3.2023
<https://www.electronicsforu.com/buyers-guides/selecting-right-motor-your-design>

Lianping, B. & Wenzhong, M. 2018. Energy-Saving Principles and Technologies for Induction Motors. Newark: John Wiley & Sons

Millet, P. n.d. Brushless Vs Brushed DC Motors: When and Why to Choose One Over the Other. Verkkosivu. Viitattu 15.2.2023
<https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors>

Parker. n.d. GVM Global Vehicle Motor. Verkkosivu Viitattu 14.2.2023
https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Electromechanical-Europe/Literature/192_300108_GVM_catalogue.pdf

Parker. n.d. High Precision Inline Helical Planetary Gearboxes - PS Series. Verkkosivu, Viitattu 14.2.2023
<https://ph.parker.com/us/en/high-precision-inline-helical-planetary-gearboxes-ps-series>

Researchgate. n.d. NI Signal Express 69mV pulse at 1Hz. Verkkosivu. Viitattu 17.5.2023. https://www.researchgate.net/figure/NI-Signal-Express-69mV-pulse-at-1Hz_fig3_257298889

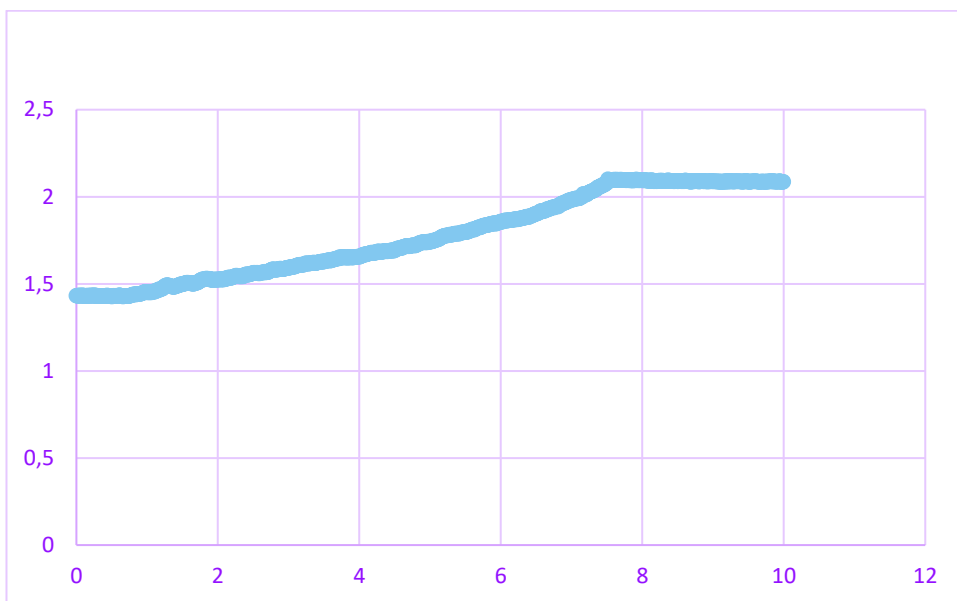
Seghers. N. 20.12.2022. Are Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) Batteries Safe? A Comprehensive Guide. Verkkosivu. Viitattu 28.3.2023
<https://cleversolarpower.com/is-lifepo4-battery-safe/>

Smith. G. 19.2.2021 What Is CAN Bus (Controller Area Network) and How It Compares to Other Vehicle Bus Networks. Verkkosivu. Viitattu 18.3.2023
<https://dewesoft.com/daq/what-is-can-bus>

Virhydro n.d. KERTOJAVAIHDE 3-SRJ PIKALUKITUS 1:3,5 Verkkosivu Viitattu 30.3.2023
<https://www.virhydro.fi/#gref>

LIITTEET

Liite 1. Mittauksen yksi pumpun paineen kuvaaja.



Liite 2 Mittauksen kaksitoista tilavuusvirta.

