



Alexander Beresten

Sähkömoottorin valinta itseohjautuvan Formula Student -auton ohjausjärjestelmään

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

1.4.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Alexander Beresten
Otsikko:	Sähkömoottorin valinta itseohjautuvan Formula Student -auton ohjausjärjestelmään
Sivumäärä:	30 sivua
Aika:	1.4.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Autosähkötekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Sanna Heikkinen

Insinööriyön tavoitteena oli selvittää, millaista sähkömoottoria itseohjautuvan Formula Student -auton ohjausjärjestelmässä tulisi käyttää. Sähkömoottorin valinta tehtiin Metropolia Motorsport Formula Student -tiimille. Aikaisemmissa Metropolia Motorsportin autoissa ei ole ollut itseohjautuvaa järjestelmää, joten tämä insinööriyö tarjoaa mahdollisuuden siirtyä kohti itseohjautuvien ajoneuvojen luokkaa.

Sähkömoottorin valinnan jälkeen Metropolia Motorsport voi jatkaa ohjausjärjestelmän suunnittelua huomioiden sähkömoottorin vaatimukset ja etsien sille sopivan kiinnitysratkaisun.

Ennen sähkömoottorin valintaa tutkittiin muiden itseohjautuvien ajoneuvojen tiimien käyttämiä järjestelmiä. Tämän jälkeen suoritettiin laskelmia, joissa määriteltiin tarvittava vääntömomentti ja kierrosnopeus sähkömoottorille.

Eri sähkömoottorityyppien tutkimisen myötä löydettiin sopivin vaihtoehto tarkoitukseen. Vertailussa otettiin huomioon vääntömomentin ja kierrosnopeuden lisäksi myös moottorin koko. Lopputuloksena saatiin sähkömoottori, joka parhaiten sopii Metropolia Motorsportin itseohjautuvan ajoneuvon ohjausjärjestelmään.

Avainsanat: Sähkömoottori, Formula Student, itseohjautuva

Abstract

Author: Alexander Beresten
Title: The selection of an Electric Motor for the Autonomous Formula Student Car's Control System
Number of Pages: 30 pages
Date: 1.4.2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: Automotive Electrical Engineering
Supervisor: Sanna Heikkinen, Senior Lecturer

The aim of the Bachelor's thesis is to determine what type of electric motor Metropolia Motorsport should use in the new self-driving Formula Student car's control system. Previous Metropolia Motorsport cars have not had a self-driving system, so this thesis provides an opportunity to move towards the class of self-driving vehicles.

After selecting the electric motor, Metropolia Motorsport can continue designing the control system, taking into account the requirements of the electric motor and finding a suitable mounting solution.

Before selecting the electric motor, the systems used by other self-driving vehicle teams were examined. Subsequently, calculations were performed to determine the required torque and rotational speed for the electric motor.

Through the study of different types of electric motors, the most suitable option was discovered. The comparison took into account not only torque and rotational speed but also the size of the motor.

As a result, an electric motor was obtained that best suits the self-driving vehicle control system of Metropolia Motorsport.

Keywords: Electric motor, formula Student, self-driving

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Formula Student kilpailusarja	1
1.2	Tavoite	1
1.3	Metropolia Motorsport ja HPF024	2
2	Sähkömoottorin valinnan keskeiset harkintatekijät	3
2.1	Formula Student Saksan määräämät säännöt	3
2.2	HPF024 ohjaus	5
2.3	Ohjaamo	5
3	Sähkömoottorivaihtoehdot	6
3.1	Tasavirta-- ja vaihtovirtamoottorit	6
3.2	Vaihtovirtamoottorit	7
3.2.1	Induktiomoottorit	7
3.2.2	Synkroninen sähkömoottori	8
3.3	Tasavirtamoottorit	9
3.3.1	Hiiliharjalliset tasavirtamoottorit	9
3.3.2	Hiiliharjattomat tasavirtamoottorit	10
3.3.3	Askelpyörämoottorit	11
3.4	Moottorityypin valinta	12
4	Ohjausvoiman mitoitus	13
4.1	Suurin ohjausvoima	14
4.1.1	Ajoneuvon paino	15
4.1.2	Renkaiden vastustava kitkavoima	16
4.1.3	Pyöränsuuntimakulman säteen vaikutus akselistoon	17
4.1.4	Työntötankoon kohdistuva voima	17
4.1.5	Ohjausakselistossa vaikuttava vääntömomentti	18
4.2	Ohjausnopeuden mitoitus	20
5	Hiiliharjattoman tasavirtamoottorin vertailu	20
5.1	Kaupalliset hiiliharjattomat tasavirtamoottorit	21

5.2	Vaihtoehdot	22
5.3	Neliömuotoiset hiiliharjattomat tasavirtamoottorit	23
5.3.1	EC057A, Haydon Kerk Pittman	24
5.3.2	PBL11035220, Shenzhen Power Motor Industrial Co	24
5.3.3	AM8023-wFyz, Beckhoff Automation Oy	25
5.4	Sylinterimuotoiset hiiliharjattomat tasavirtamoottorit	25
5.4.1	167132, Maxon Group	26
5.4.2	607937, Maxon Group	26
5.4.3	633919, Maxon Group	27
5.4.4	397799, Maxon Group	27
5.5	Hiiliharjattoman tasavirtamoottorin valinta	27
6	Yhteenveto	28
	Lähteet	29

Lyhenteet

- LVMS: *Low Voltage Master Switch*. Pienjännitekytkin, joka hallinnoi ajoneuvon matalajännitepiiriä.
- ASMS: *Autonomous System Master Switch*. Itseohjautuvan ajoneuvon master-kytkin, joka vastaa ajoneuvon pois ja päälle kytkemisestä.
- HPF024: *Helsinki Polytechnic Formula*. Metropolia Ammattikorkeakoulun tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminta projektiajoneuvo.
- AC: *Alternating Current*. Vaihtovirta.
- DC: *Direct Current*. Tasavirta.
- FS: *Formula Student*. Kansainvälinen opiskelijoiden kilpa-ajoneuvo kilpailu.
- CNC: *Computer Numerical Control*. Tietokoneohjattu koneistusjärjestelmä.
- RPM: *Revolutions Per Minute*. Kierrosluku minuutissa.
- TKHJ: Tietokannan hallintajärjestelmä. Ohjelmisto tiedon tehokkaan hakemisen, säilyttämisen ja päivittämisen toteuttamiseksi.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tehtiin sähkömoottorin valinta uuteen Metropolia Motorsport -tiimin itseohjautuvan Formula Student -auton ohjausjärjestelmään.

1.1 Formula Student -kilpailusarja

Formula Student -kilpailusarja on kansainvälinen insinöörikilpailu, jossa suunnitellaan ja valmistetaan formulatyypisiä kilpa-ajoneuvoja. Sarja jakaantuu kolmeen ajoneuvoluokkaan: polttomoottorilla ja sähköllä ajettavat sekä itseohjautuvat autot. Kilpailu on suunnattu yliopistoissa ja ammattikorkeakoulussa opiskeleville. Opiskelijat kilpailevat staattisissa sekä dynaamisissa osioissa. Staattiset kilpailut sisältävät ajoneuvosuunnittelu dokumentaation, kustannuslaskelman ja bisnesidean. Ajoneuvon suunnitteluprosessia esittäessä todistetaan ja osoitetaan tuomareille, että tiimi ymmärtää ajoneuvosuunnitteluprosessin vaiheet. Kustannuslaskelmassa tiimi pyrkii toimia autovalmistajana ja osiossa arvioidaan valmistusprosessien kustannus- ja dokumentaatiotaitoja. Bisnesideassa esitetään liikeidea, jossa esimerkiksi liiketalouden opiskelijat pääsevät esittämään kilpa-ajoneuvoon liittyvän yrityssuunnitelman.

Dynaamisessa osuudessa ajetaan aikaa vasten. Dynaaminen kilpailu koostuu kiihdytyksestä, nopeus- ja kestävyysajosta sekä osiossa, jossa ajetaan kahdeksikkoo muistuttavaa rataa. Kiihdytyksessä ajetaan 75 m:n suora, jossa tavoitetaan mahdollisimman lyhyttä aikaa. Nopeusajossa rata ajetaan muutaman kerran ja tavoitellaan mahdollisimman nopeaa aikaa. Kahdeksikkomuotoista rataa ajettaessa tavoitellaan ajoneuvon sivuttaistuottokykyä. Kestävyysajossa on 22 kilometrin pituinen rata, jossa arvioidaan ajoneuvon taloudellisuutta ja nopeutta.

1.2 Tavoite

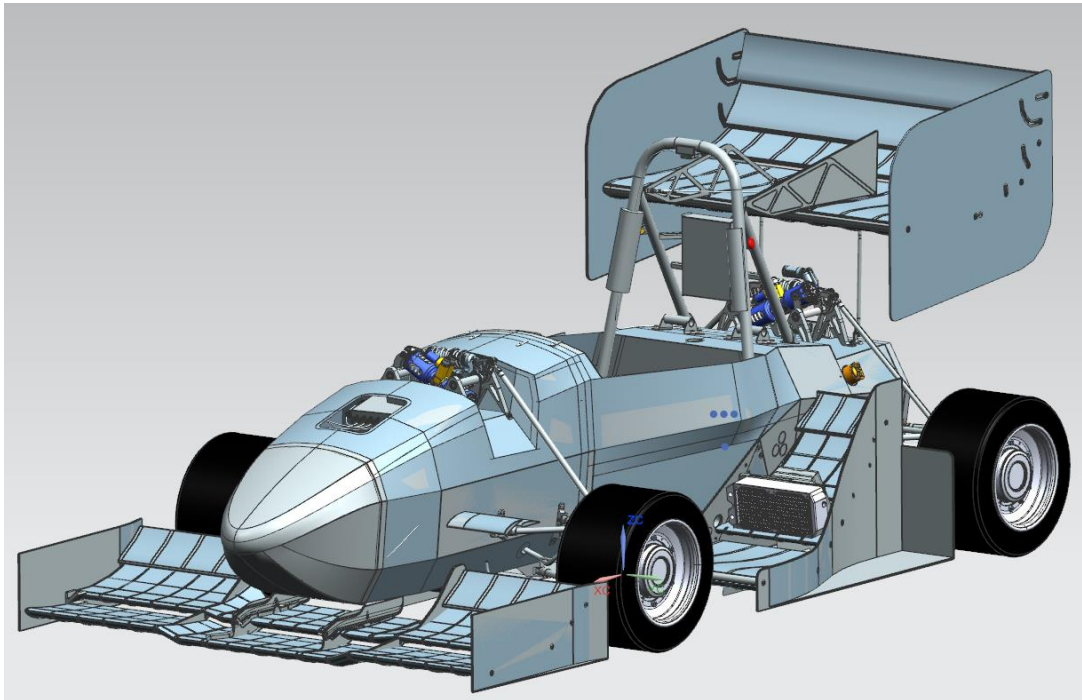
Tämän opinnäytetyö käsittelee opiskelijaformuloiden kilpailusarjan itseohjautuvien ajoneuvojen luokkaa. Sarjassa tarkoitus on suunnitella ja kehittää

ajoneuvo, joka kykenee autonomiseen ajamiseen ilman kuljettajaa suljetulla radalla. Ajoneuvon on kyettävä vastaamaan nopeisiin ajosuunnanmuutoksiin, kiihdytyksiin ja jarrutuksiin hallitusti ja turvallisesti. Opinnäytetyön tavoite oli valita sopiva sähkömoottori Metropolia Motorsportin tulevaan HPF024-sähköajoneuvon ohjausjärjestelmään. Sähkömoottoria valittaessa oli otettava huomioon voimien lisäksi moottorin koko, sillä autossa oleva tila on vähäinen. Sähkömoottori kytketään ajoneuvon suurjänniteakustoon ja sitä operoidaan ajoneuvossa olevalla ohjainlaitteella. Formula Student Saksan itseohjautuvaa järjestelmää koskevat säännöt piti ottaa huomioon sähkömoottoria valittaessa, jotta ajoneuvolla voitaisiin osallistua kisoihin.

1.3 Metropolia Motorsport ja HPF024

Metropolia Motorsport on opiskelijoista koostuva tiimi, joka toimii Metropolia Ammattikorkeakoulun tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminnan projektina. Ajoneuvoja suunnitellaan ja valmistetaan joka vuosi ja kilpaillaan pääosin kesäisin Euroopassa. Tiimi tarjoaa haastetta enemmän tekniikan alan opiskelijoille mutta myös esimerkiksi muotoilijoille ja liiketalouden opiskelijoille. Tiimin ensimmäinen takavetoinen putkirunkoinen sähköformula valmistettiin 2013. HPF024 on nelivetoinen sähköformula, jonka Metropolia Motorsport -tiimi on suunnitellut (kuva 1).

Sähkömoottorit on sijoitettu renkaan napoihin. Neljän sähkömoottorin kokonais-teho on 80 kWh. Akku koostui litiumpolymeerikennoista, joissa teho on 7 kWh ja kokonaisjännite 600 V. Sähkömoottoreilla kierrosnopeus on 20000 kierrosta minuutissa ja auton teho on 120 kWh. Perinteisestä putkirungosta on siirrytty hiilikuituiseen monokokkiin. Ajoneuvon aerodynamiikka on parannettu sekä alustassa on erilliselementeillä toteutettu jousitus.



Kuva 1. Metropolia Ammattikorkeakoulun tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoiminnan projektin sähköajoneuvo HPF024.

2 Sähkömoottorin valinnan keskeiset harkintatekijät

2.1 Formula Student Saksan määräämät säännöt

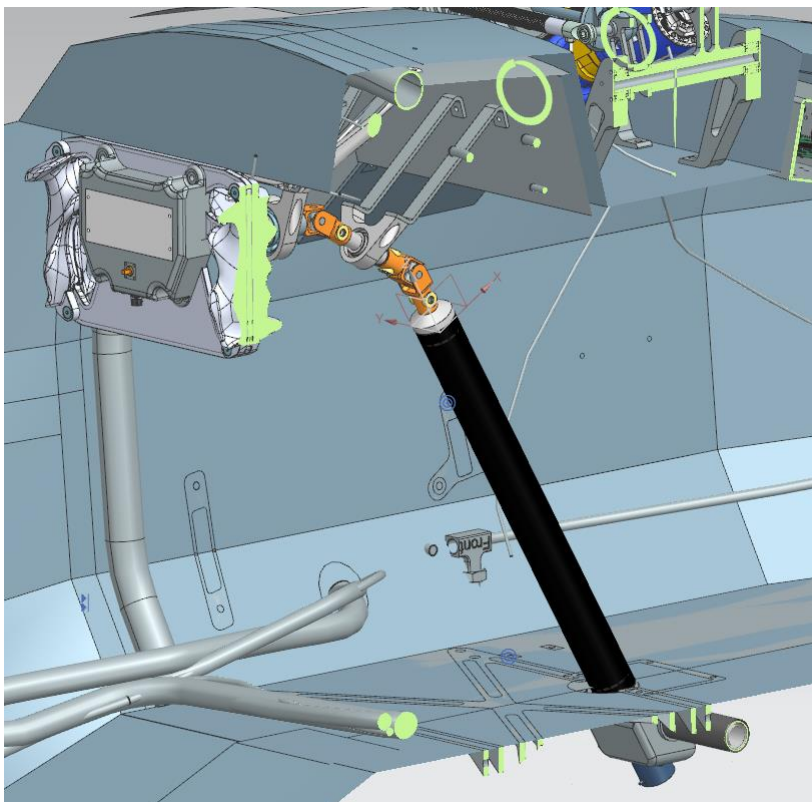
Formula Student -ajoneuvoille on tarkasti määritettyjä sääntöjä, joita ajoneuvon on noudatettava. Ennen osallistumista kilpailuihin ajoneuvo käydään katsastamassa, jolloin varmistetaan sen laillisuus ja turvallisuus. Vasta tämän jälkeen ajoneuvo voi osallistua dynaamisiin kisoihin. Formula Student 2024 -sääntökirja määrää itseohjautuvalle ajoneuvoluokalle säännöt, jotka pitää ottaa huomioon sähkömoottoria valittaessa itseohjautuvaan ajoneuvon ohjaukseen [1]. itseohjautuvan ajoneuvon ohjausjärjestelmää koskevat säännöt on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Formula Student -säännöt, jotka koskevat itseohjautuvan ohjausjärjestelmän sähkömoottoria [1.].

Sääntö	Kuvaus
T2.6.10	Ohjauspyörän ohjausvarren ja ohjausrattaan välisten liitosten on oltava mekaanisia ja näkyvässä teknisessä tarkastuksessa. Liitokset, joissa ei ole mekaanista varmuuskopiota, eivät ole sallittuja. Mekaanisen varmuuskopion on oltava suunniteltu ylläpitämään ohjausjärjestelmän toimintaa yksin.
T2.8.1	Kaapelien tai hihnojen käyttö ohjauksessa on kielletty. Tämä ei koske autonomisia ohjausjärjestelmiä.
T2.8.2	Ohjauspyörän on toimiva suoraan ja mekaanisesti etupyöriin.
T2.8.3	Ohjausjärjestelmän tulee olla varustettu positiivisilla ohjausstoppareilla, jotka estävät ohjauslinkkien jumittumisen. Stopparit on sijoitettava rihmaohjaukseen ja niiden on estettävä renkaiden ja vanteiden koskettaminen muihin osiin. Ohjausliikkeet on oltava mahdollisia myös paikallaan ollessa.
T14.6.4	Ohjaus- ja jarrujärjestelmän virtalähteen on oltava kytketty LVMS:n ja ASMS:n avulla.
T14.7.1	Ohjausjärjestelmän aktivaatio saa tapahtua vain, jos ajoneuvo on kisavalmis.
T14.7.2	Ohjausjärjestelmä saa pysyä aktiivisena hätäjarrutusliikkeen aikana, kun ajoneuvo on liikkeessä.
T14.7.3	Manuaalinen ohjaus on oltava mahdollista ilman manuaalivapautusvaiheita (esim. toimimalla manuaalisilla venttileillä / mekaanisten osien (liitäntä / irrotus) kytkemisellä), kun ASMS on kytketty pois päältä.

2.2 HPF024:n ohjaus

Auton renkaiden kääntö tapahtuu lähes pyöreän ohjauspyörän kautta, jossa välitetään momentti kahden ristinivelen kautta hammaspyörään. Hammastanko on sijoitettu ajoneuvon rungon alapuolelle. (Kuva 2.)



Kuva 2. HPF024-sähköformulan ohjausjärjestelmä ajoneuvon ohjaamossa.

2.3 Ohjaamo

Ohjaamon jalkatila on hyvin kapea ja kuljettajan asento melkein makaava. Ohjauspyörälle on määritetty suurin mahdollinen kääntökulma, josta ajoneuvon on selvittävä pienimmästä säännöissä määritetystä mutkasta. Ohjaukulma on selvitetty käyttäen istuma-asentopenkkiä. Kuljettaja istuu penkkiin, joka vastaa ajoneuvon istuma-asentoa. Kaarteessa on huomattu, että kuljettaja pystyy kääntämään rattia noin 140 asteen verran ilman käsien irrotusta. Ohjaus suunnitellaan mahdollisimman kevyeksi minimoiden kääntöön tarvittavaa voimaa. Hammastangon sekä hammaspyörän on oltava mekaanisesti yhdistetty, eikä siinä saa

käyttää ohjaustehostusta. Sähkömoottoria valittaessa itseohjautuvaan ajoneuvon ohjausjärjestelmään piti ottaa huomioon käytössä oleva tila ja moottorin sijoittaminen tilaan. Sähkömoottori olisi syytä asettaa ajoneuvon matalampaan kohtaan, jotta painopisteen sijainti pysyisi matalana. Kuitenkaan sähkömoottori ei saa haitata kuljettajaa missään ajotilanteessa, joten sen oli oltava kompakti.

3 Sähkömoottorivaihtoehdot

On olemassa laaja valikoima erilaisia sähkömoottoreita, jotka on suunniteltu erityyppisiin käyttötarkoituksiin ja tehtäviin.

3.1 Tasavirta- ja vaihtovirtamoottorit

Sähkömoottorin keskeinen tehtävä on muuntaa sähköenergia tehokkaasti mekaaniseksi liikkeeksi. Tämä liike syntyy vuorovaikutuksessa staattorin ja roottorin välillä, missä magneettikenttä on avainasemassa vääntömomentin tuottamisessa.

Sähkömoottorit voidaan karkeasti jakaa niiden käyttämän virran tyyppin perusteella kahteen pääluokkaan: vaihtovirta AC ja tasavirta DC. Vaihtovirtamoottorit ovat yleisiä ja tehokkaita erityisesti suuritehoisissa sovelluksissa, kun taas tasavirtamoottoreilla on omat vahvuutensa erityisesti tarkkuutta vaativissa tehtävissä. [2.]

Nämä erityyppiset moottorit mahdollistavat monipuolisen valikoiman sovelluksia, jotka kattavat kaiken kodinkoneista teollisuuden monimutkaisiin järjestelmiin. Valinta moottorityypin välillä riippuu useista tekijöistä. Vaikka huomioitavia tekijöitä voi olla lukuisia, ensisijaisesti oli tarpeen tutkia, ilmeneekö moottorin käyttöpaikassa fyysisiä kokorajoituksia, erityisesti kiinnitettäessä moottoria tiiviiseen tilaan. Seuraavassa vaiheessa oli olennaista määrittää saatavilla oleva jännite, huoltotarve, ohjattavuus, hinta sekä käyttöön vaatimat optimaaliset nopeus- ja vääntömomenttiarvot. Näitä tietoja oli tarkoituksenmukaista vertailla eri käytettävissä olevien moottorivaihtoehtojen välillä.

3.2 Vaihtovirtamoottorit

Moottori muuntaa vaihtovirran mekaaniseksi liikkeeksi käyttäen sähkömagneettista ilmiötä, jolloin sitä kutsutaan vaihtovirtamoottoriksi eli AC-moottoriksi. AC-moottorit ovat erityisen tehokkaita suuritehoisissa sovelluksissa ja tarjoavat erinomaisen suorituskyvyn suurilla kierrosnopeuksilla. Niitä käytetään laajasti teollisuudessa ja kodinkoneissa.

AC-moottorin toiminta perustuu magneettisuuteen, jossa on langasta käämitty kela ja kaksi kiinteää magneettia, jotka muodostavat staattorin. Magneetit on sijoitettu roottoriakselin ympärille. Kun sähkövirta kulkee kelan läpi, syntyy magneettikenttä. Staattorissa on kiinteä metallinen sylinteriä muistuttava häkki, jossa on lankakäämi, kela ja akseli. Ulkoisia sähkövirtoja syötetään staattorin käämeihin. Roottorin ja staattorin käämit sitovat vuorotellen energiaa, mikä jatkuvasti muuttaa magneettikenttää ja aiheuttaa akselin pyörimisen. [3.]

3.2.1 Induktiomoottorit

Induktiomoottorit tuottavat mekaanista liikettä vaihtovirtaenergian avulla. Rakenteellisesti ne muistuttavat paljon perinteisiä vaihtovirtamoottoreita. Induktiomoottorissa väännön aikaansaamiseksi roottorin on tuotettava sähkövirtaa, joka syntyy induktion avulla pyörivästä staattorin sähkömagneettisesta kentästä. Induktiomoottorin roottori voi olla joko häkkimäinen tai käämittytyyppinen.

Pyörivä magneettikenttä saavutetaan syöttämällä vaihtovirtaa staattorin käämeihin luoden vaihtelevaa magneettikenttää vaihteittain staattorissa olevien monien vaiheiden ansiosta. Yksinkertaisissa induktiomoottoreissa on kolmivaiheinen siirtyvä magneettikenttä. Roottori on moottorin pyörivä osa, joka sijaitsee staattorin sisällä. Staattorin aiheuttama pyörivä magneettikenttä altistaa sähkövirran induktiomoottorissa. Roottorissa indusoitu virta muodostaa oman magneettikentän, joka reagoi staattorin pyörivän magneettikentän kanssa. Roottorin ja staattorin magneettikentän vuorovaikutus saa aikaan vääntömomentin roottorissa.

Moottori on synkronoimaton, sillä roottorin pyöräminen ei ole tarkasti kytketty staattorin magneettikentän pyöräymiseen. [4.]

Induktiomoottorit ovat monessa sovelluksessa käytössä tehokkuutensa ja kestävyytensä ansiosta. Induktiomoottorit ovat edullisia, mikä johtuu yksinkertaisesta rakenteesta. Rakenteen yksinkertaisuuden ansiosta induktiomoottorit ovat huoltovapaita ja kestäviä. Toiminta on yksinkertaista, sillä roottorissa ei ole sähköistä liitintä, joka syöttää virtaa, vaan virta indusoidaan roottorille. Tämä johtaa moottorin toimimiseen monien vuosien ajan ilman isoja kustannuksia ja huoltoja. Induktiomoottorin merkittävimmät haitat ovat vakionopeus, nopeudensäädön vaikeus, suuri koko ja painavuus. Induktiomoottorin nopeus on vakio, eikä sitä voida käyttää eri nopeuksilla. Lisäksi kolmivaiheiset induktiomoottorit tarvitsevat ulkoisen käynnistäjän, joka tarvitaan moottorin käynnistämiseksi ja liikkeelle saamiseksi. Haitoista huolimatta induktiomoottorit ovat sopivia moniin sovelluksiin; niitä käytetään teollisuudessa esimerkiksi hisseissä ja nostureissa. [5.]

3.2.2 Synkroninen sähkömoottori

Synkronisen moottorin staattorin rakenne on samanlainen kuin induktiomoottoreissa. Kun moottori liitetään virtalähteeseen, syntyy samanlainen pyörivä magneettikenttä. Synkroninen moottori eroaa induktiomoottorista roottorillaan, jossa lieriömäisen häkkiroottorin sijaan on tasavirtakäämi tai kestopagneetti, joiden napaluvut täsmäävät staattorin napalukujen kanssa. Tämä napojen samanlainen määrä mahdollistaa roottorin synkronoitumisen tai lukittumisen staattorin muodostamaan magneettikenttään. Synkronoitumisen jälkeen roottori pyörii samanlaisella nopeudella kuin staattorin magneettikenttä kuormavaihtelusta huolimatta. Nopeus voi muuttua ainoastaan syöttötaajuuden muuttuessa. Synkronisissa moottoreissa on ainoastaan yksi nopeus, joka määrittyy syöttövirran taajuuden ja napojen perusteella. [4.]

Synkroninen moottori vaatii käynnistyäkseen apua. Jossain vaiheessa roottorin ja staattorin navat voivat olla samannapaisia pohjoisnapa-pohjoisnapa tai

etelänapa-etelänapa ja luoda työntävän voiman roottorille. Ne voivat olla myös pohjoisnapa-etelänapa ja luoda vetävän voiman. Roottorin inertian takia se ei pysty liikkumaan mihinkään suuntaan vetävän tai työntävän voiman vaikutuksesta ja roottori pysyy paikallaan. Tämän vuoksi synkroninen moottori ei käynnisty itsestään. Synkroninen moottori voidaan käynnistää ulkoisen moottorin avulla kytkemällä se roottoriin. Kun synkroninen nopeus roottorissa on saavutettu, kytketään virta roottoriin ja ulkoinen moottori pois päältä.

Synkronisilla moottoreilla on alhainen käyttönopeus ja suuri teho. Laitteissa, joissa ei vaadita niin suurta nopeutta, synkroninen moottori olisi hyvä valinta. Kuitenkin koko, paino ja kustannukset ovat erittäin suuret. Esimerkkejä käyttölaitteista ovat kompressorit, valssauslaitteet ja mäntäpumput. [6.]

3.3 Tasavirtamoottorit

Tasavirtamoottorit eli DC-moottorit toimivat tasavirran avulla. Toimintaperiaate perustuu sähköenergian muuttamiseen mekaaniseksi liikkeeksi. DC-moottoreiden peruseriaate perustuu Ampèren voimalakiin, jonka mukaan virtaa kuljettava johdin kokee voiman magneettikentässä. Aina kun virtaa kuljettava johto asetetaan magneettikenttään, se kokee mekaanisen voiman ja saa moottorin liikkeelle. [4.]

3.3.1 Hiiliharjalliset tasavirtamoottorit

Hiiliharjalliset tasavirtamoottorit eli DC-moottorit ovat olleet käytössä monissa elektroniikkalaitteissa jo monia vuosikymmeniä. Moottorin rakenne on hyvin yksinkertainen, ja mekaaninen liike tapahtuu syöttämällä tasavirtaenergiaa. Nämä moottorit ovat kevyempiä ja kompakteja verrattuna vaihtovirtamoottoreihin. Moottoreissa käytetään pysyviä magneetteja, joissa ei tarvita erillistä sähkösyöttöä magneettikentän muodostamiseen. Tämä mahdollistaa sähkömoottorin pienen koon, vaikka kentän voimakkuutta ei voida säätää ja yksi säätömahdollisuus jää pois.

Moottorin rakenne koostuu staattorista, kommutaattorista, roottorista ja sen käämistä sekä hiiliharjoista. Staattori vastaa magneettikentän tuottamisesta, ja se on rakenteeltaan yleisesti pitkänomainen sylinteri. Roottori mahdollistaa moottorin rotaation, kun kommutaattori kääntyy ja aiheuttaa signaalin, jonka avulla roottori kääntyy oikeaan aikaan. Sähkövirta välitetään hiiliharjojen kautta, jotka ovat suorassa kosketuksessa kommutaattorin kanssa. [4.]

Hiiliharjojen fyysinen kosketus aiheuttaa kulumista ja kipinöitä, jotka voivat vaikuttaa moottorin suorituskykyyn. Moottorit ovat yksinkertaisia ja edullisia, mutta ne vaativat säännöllistä huoltoa. Moottorin kulumisen vuoksi käyttöikä on lyhyt, ja hiiliharjat aiheuttavat kitkaa, joka johtaa energiahäviöihin ja alentaa tehokkuutta pitkäaikaisessa käytössä. DC-moottoreissa on usein pyyhkäysjärjestelmä hiiliharjojen puhdistamiseksi, ja tämä voi myös aiheuttaa energiahäviötä. DC-hiiliharjalliset moottorit ovat yleisesti painavia ja suurikokoisia. [4.]

3.3.2 Hiiliharjattomat tasavirtamoottorit

Hiiliharjattomassa moottorissa eli BLDC-moottoreissa rotaatio tapahtuu polaarisuuden vaihtumisen ansiosta: hiiliharjat vaihtavat polariteettia pitääkseen kommutaattorin pyörimisen. Hiiliharjattomilla tasavirtamoottoreilla on sama toimintaperiaate. Rakenteellisesti BLDC-moottori koostuu roottorista ja staattorista.

Roottori, jossa permanenttimagneetit sijaitsevat, välittää pyörittävän liikkeen.

Staattori on paikallaan pysyvä osa, joka sisältää käämin. Perinteisten hiiliharjojen ja kommutaattorin tilalle virran siirtäminen roottorin käämeihin tapahtuu ohjainlaitteen kautta. Ohjainlaite seuraa moottorin tarkkaa asentoa asentoanturin avulla ja säätää sen avulla nopeutta. Tämä vähentää moottorin huoltotarvetta ja lisää moottorin tehokkuutta.

BLDC-moottorit ovat tehokkaampia kuin hiiliharjalliset, sillä harjoista aiheutuvaa kitkaa, mekaanisesti aiheutuvaa energiahäviötä ja melua ei ole. Moottori pystyy jatkuvasti hallitsemaan maksimaalista vääntömomenttia, kun taas hiiliharjallisissa moottoreissa vääntömomentti saavutetaan vain tietyissä kohdissa pyörimistä. Pystyäkseen tarjoamaan samanlaisen vääntömomentin kuin

hiiliharjattomat harjallisen moottorin on käytettävä suurempia magneetteja. Tämän takia jopa pienet hiiliharjattomat moottorit voivat tuottaa suuren vääntömomentin. Hiiliharjattoman ja kestäväen rakenteen ansiosta BLDC-moottori tarjoaa vähemmän huoltoa ja pidemmän käyttöiän. Nämä moottorit pystyvät käynnistämään itsensä, mikä tarkoittaa, että ne voivat aloittaa liikkeen ilman käynnistyslaitetta. Tämä perustuu moottorin ohjaukseen ja anturointiin, jonka avulla voidaan paikantaa moottorin roottorin asento ja ohjata virta oikeille staattorin käämeille oikeaan aikaan. [7.]

3.3.3 Askelpyörämoottorit

Askelpyörämoottorit ovat sähkömoottoreita, joiden pyöriminen tapahtuu askelittain tai askelsarjoina. Tarkan ohjauksen ansiosta ne voidaan pysäyttää tietyllä askeleella, mikä on hyödyllistä sovelluksissa, joissa nopeuden ja tarkan asennon määrittäminen on kriittisen tärkeää. Tätä tarkkuutta ja hallittavuutta hyödynetään järjestelmissä, kuten automaattisissa työstökoneissa ja 3D-tulostimissa, joita ohjataan ohjelmalla. Ajatus pyörimisakselin etenemisestä askeleina voisi kuulostaa kankealta, mutta tämä ajatus on väärä. Askeleet tapahtuvat millisekunnin osissa. Kun toteutetaan pidempi askelsarja, voidaan askelkomentoja toimittaa nopeasti ja toteuttaa tuhansia askeleita sekunnissa. Pyöriminen muuttuu tasaiseksi näillä korkeilla askelnopeuksilla, ja pyöriminen muistuttaa tavallisen moottorin pyörimistä. [4.]

Askelmoottori koostuu staattorista ja roottorista. Staattori on yleensä kehänmuotoinen runkoon kiinnitetty osa, johon on käämitty sähköjohtavaa lankaa sähkömagneettikentän luomiseksi. Roottori on sijoitettu staattorin keskelle, johon myös käämitään sähköä johtavaa lankaa. Liike aikaansaadaan sähkömagneettisen vuorovaikutuksen avulla staattorin ja roottorin välillä. Sähkövirta syötetään roottorinkäämeihin luomalla magneettikenttä, joka reagoi staattorin magneettikentän kanssa ja aiheuttaa pyörimisliikkeen roottorissa. Liikkuminen kestää yhden askeleen verran, kunnes seuraa seuraava asento. [8.]

Askelpyörämoottorin ohjaus on yksinkertaista sillä, askel periaate tekee ohjauksesta suhteellisen suoraviivaista. Jokainen askel vastaa tiettyä kulmaa, ja tämä helpottaa liikkeen ohjaamista ja paikannusta. Askelperiaate kuitenkin rajoittaa moottorin nopeutta ja dynamiikkaa, sillä moottorille syötetään sarja pulssisignaaleja määritetyllä taajuudella ja askeleen koolla, joka vaikuttaa suoraan moottorin liikenopeuteen. Askelpyörämoottori käyttää avoimen silmukan ohjauksen periaatetta, joka tarkoittaa, että ohjausjärjestelmä ei saa moottorin asennosta tietoa. Järjestelmässä ei siis ole antureita seuraamaan ja säätämään moottorin asentoa. Tämä on ongelmana etenkin suurissa nopeuksissa, jolloin moottori voi kohdata värinöitä ja resonanssia. Lisäksi korkeammat nopeudet voivat vaikuttaa askelpyörämoottorin tehokkuuteen. Tämän takia askelpyörämoottorit ovat hyvä vaihtoehto sovelluksille, joissa ei tarvita suurta moottorin nopeutta. [9.]

3.4 Moottorityypin valinta

Moottorin valinnassa otettiin huomioon seuraavat tekijät: käyttöikä, tehokkuus, huolto, hinta, nopeudensäätö, koko ja paino (taulukko 2). Itseohjautuvan formula-auton ohjaukseen haluttiin sähkömoottori, joka pystyy tuottamaan tarpeeksi voimaa ja kierrosnopeutta, jotta ajoneuvo olisi kilpailukykyinen ja selviäisi kaikista ajotilanteista. Koska ajotilanteita on erilaisia, olisi moottorissa syytä olla nopeudensäätömahdollisuus, jossa tavoitellaan tarkkaa ohjausta eri nopeusalueilla. Seuraavaksi vertailtiin moottorin kokoa, sillä moottori asennetaan kilpa-ajoneuvon ohjaamon sisälle, missä tilaa on vähän. Käyttöikä määrittelee sen, kuinka kauan moottori kestää käytössä. Pitkä käyttöikä säästää rahaa, sillä moottorin uusiminen on kallista. Huolto vaikuttaa käyttöikäen ja moottorin suorituskykyyn. Säännöllinen huolto voi pidentää käyttöikäen ja ehkäistä moottorin vaurioitumista. Moottorin tulisi olla yksinkertainen ja helppo huoltaa. Kisa-auton purkaminen ja kokoaminen vie aikaa, joten on tärkeää, että moottorin huolto onnistuu nopeasti ja vaivattomasti. Kun kyseessä on kilpa-ajoneuvo, on tarpeen ottaa huomioon moottorin paino, sillä ajoneuvon halutaan olevan mahdollisimman kevyt. Tarkat, tehokkaat ja kevyet moottorit ovat kalliita, mutta tässä tavoitellaan parasta vaihtoehtoa, ja moottorin hintaa katsottiin valinnassa viimeiseksi. Valitun moottorin odotetaan vastaavan haasteisiin ja tarjoavan

kilpailuedun tiukoissakin kilpailutilanteissa. Tämä päätös pohjautui huolelliseen harkintaan ja pyrkimykseen saavuttaa paras mahdollinen lopputulos kilpailutoiminnassa.

Taulukko 2. Sähkömoottoreiden vertailu.

Ominaisuus	Hiiliharjaton BLDC-moottori	Induktiomoottori	Askelpyörämoottori
Käyttöikä	Yleensä pitkäaikainen	Yleensä pitkäaikainen	Yleensä pitkäaikainen
Tehokkuus	Suuri voimantuotto	Suuri voimantuotto	Vaihteleva voimantuotto, riippuen moottorista
Huolto	Vähähuoltoinen	Vähähuoltoinen	Vähähuoltoinen
Hinta	Usein korkea	Usein edullisempi	Usein edullisempi
Nopeudensäätö	Eri nopeudensäätömahdollisuuksia	Nopeuden säätö on vakio	Ohjataan pulsseittain
Koko ja paino	Yleensä kompakti ja kevyt	Suuri ja painava	Yleensä kompakti ja kevyt

Sähkömoottoreiden taulukosta (taulukko 2) nousi esiin ominaisuuksien sopivuuden perusteella kolme vaihtoehtoa. Hiiliharjaton tasavirtamoottori eli BLDC-moottori, induktiomoottori ja askelpyörämoottori. Ominaisuuksien perusteella parhaiten sopiva oli hiiliharjaton BLDC-moottori. Suuri voimantuotto, nopeudensäätömahdollisuus sekä kompakti ja kevyt moottorin rakenne tekevät hiiliharjattomasta tasavirtamoottorista sopivan vaihtoehdon opiskelijaformulan kilpailukuokkaan itseohjautuvan ajoneuvon ohjaukseen.

4 Ohjausvoiman mitoitus

Kestävyys- ja autosuunnistuskilpailusarjoissa radat ovat mutkikkaita ja kapeita, ja niissä vaaditaan ohjaukselta nopeaa reagoimista tapahtuviin ajosuuntamuutoksiin. Sähkömoottorin kierrosluvun piti olla tarpeeksi suuri ja vääntömomentin

riittävä kääntämään ajoneuvon renkaat, jotta ajoneuvo selviää tiukimmastakin mutkasta.

4.1 Suurin ohjausvoima

Ajoneuvon renkaiden kääntämiseen tarvitaan voimaa. Ohjausakselisto on osa ohjausjärjestelmää, joka mahdollistaa ajoneuvon ohjaamisen. Se koostuu yleensä akseleista, jotka on yhdistetty toisiinsa nivelillä tai hammaspyörillä. Ohjausakselisto välittää ohjauspyörän liikkeen akseleiden kautta renkaille ja saa ajoneuvon kääntymään. Eri ajotilanteissa voimat ja nopeudet ovat erisuuruisia, ja kuljettajan on tuotettava tarvittava vääntömomentti ratin kautta, jotta ajoneuvo ehtii kääntyä.

Kisaosiossa, jossa ajetaan kahdeksikon muotoisella radalla, tavoitellaan ajoneuvon stabiliteettia ja sivuttaispitoa. Ohjauspyörä on suorituksen aikana melko samanlaisessa asennossa, jossa ohjausakselille kohdistuu jatkuva sivusta tuleva voima. Tässä tilanteessa moottorin on tuottava jatkuvaa voimaa pitkällä aikavälillä ja moottorin nimellisen momentin on oltava tarpeeksi suuri pitämään ratti oikeassa asennossa. Metropolia Motorsportin ajoneuvon ohjausakselistoon vaikuttaa suurin mahdollinen voima silloin, kun kuljettaja kääntää renkaita paikallaan. Ajotilanteessa ajoneuvon kääntämiseen tarvittava voima laskee noin 50 %. Ohjausta on pystyttävä kääntämään ajoneuvon ollessaan paikallaan Saksan säännön T2.8.3 mukaisesti (taulukko 1).

Ohjausakselistoon kohdistuva suurin voima ilmenee, kun ajoneuvo on pysähdyksissä ja ohjauspyörää käännetään. Tämä johtuu renkaan ja tien välisestä kitkasta, joka vaikuttaa voimakkaasti tähän tilanteeseen. Kitkavoima saavuttaa maksimiarvonsa, kun ajoneuvon renkaat ovat juuri lähdössä liikkeelle tietä vasten. Tätä vaihetta kutsutaan lepokitkaksi. Yleisesti ottaen tarvittava voima renkaiden kääntämiseen vähenee nopeuden kasvaessa, ja tätä vaihetta kutsutaan liikekitkaksi.

On tärkeää huomata, että tarvittava voima ohjausakselistoon voi vaihdella tienpinnan ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi märällä tai liukkaalla tiellä tarvitaan vähemmän voimaa, sillä renkaan ja tienpinnan välinen kitkakerroin vähenee näissä olosuhteissa. On kuitenkin syytä huomauttaa, että kitkakerroin voi saavuttaa enimmäisarvonsa, joka on 1. Tämä tarkoittaa, että voima on suurimmillaan, kun renkaan ja tienpinnan kitkakerroin on optimaalisella tasolla. Tienpinnan epätasaisuudet ja epämuodostumat voivat vaikuttaa tähän tilanteeseen. Tienpinta ei ole täysin sileä, ja siinä voi ilmetä epämuodostumia. Nämä epämuodostumat mahdollistavat renkaan muokkautumisen ja uppoamisen tienpintaan. Siksi joissakin renkaissa kitkakerroin voi kuitenkin ylittää arvon 1.

4.1.1 Ajoneuvon paino

Seuraavaksi laskettiin ohjaukseen tarvittava vääntömomentti ohjausakseliston kääntämiseen. Metropolia Motorsportin sähköformulaa ohjataan etupyöriä kääntämällä. Vääntömomenttiin vaikuttaa renkaan ja tien välisen kitkan lisäksi ohjaus- ja alustageometria sekä ajoneuvon eturenkailla vaikuttava paino.

Sähköformulan painon mittausta suoritettiin Metropolian tiloissa käyttäen nelipisteveaakaa (kuva 3). Metropolia Motorsportin HPF024-sähköformulan painoksi ilman kuljettajaa saatiin 220 kg.



Kuva 3. HPF024-sähköformulan painomittaus nelipistevaalla.

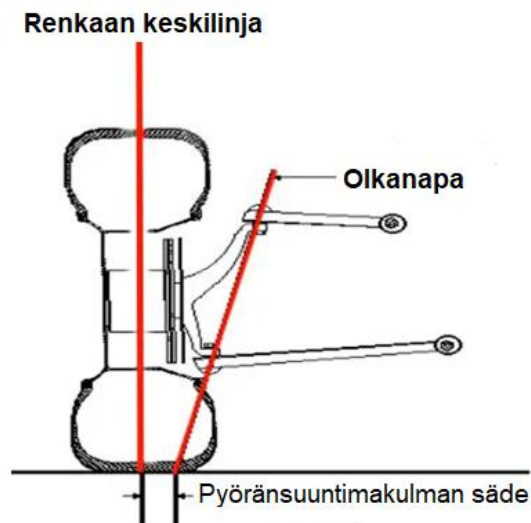
Nelipistevaaka mahdollisti myös ajoneuvon painojakautuman mittaamisen sillä nelipistevaaka mittasi jokaisen renkaan painon. Metropolia Motorsportin HPF024-sähköformulan painojakautuma on edessä 49,8 % ja 50,2 % takana. Etuakselilla vaikuttava paino saadaan ajoneuvon kokonaismassan ja painojakauman tulona: $220 \text{ Kg} \times 0,498 = 109,56 \text{ Kg}$.

4.1.2 Renkaiden vastustava kitkavoima

Pyörän kitkan aiheuttama sivuttaisvoima F_y voidaan laskea kertomalla lepokitka μ_y pystysuuntaisella voimalla m_y ja Maan vetovoiman g kanssa. Fysiikan tunneilla oli opittu, että kuivan asfaltin ja renkaan välinen lepokitkakerroin: $\mu_y = 0,80$. Yhdellä eturenkaalla vaikuttava massa on $m_y = \frac{109,56}{2} \text{ Kg}$ jamaan vetovoima: $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. [10.] Pyörän sivuttaisvoima yhdellä renkaalla on $F_y = 0,80 \times \left(\frac{109,56}{2} \text{ Kg}\right) \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 429,91 \text{ N}$. Tämä 429,91 N suuruinen voima tarvitaan voittamaan lepokitka, jonka jälkeen rengas kääntyy. Ajoneuvon eturenkaan kääntämisen mahdollistaa olkanapa, joka kulkee etuakselin yläpään ja alapään kautta muodostaen suoran (kuva 4). [11.]

4.1.3 Pyöränsuuntimakulman säteen vaikutus akselistoon

Ajoneuvon ohjausjärjestelmän tärkeä ominaisuus, pyöränsuuntimakulman säde (kuva 4), kuvaa olkanavan ja renkaan tien kosketuspinnan keskilinjan etäisyyttä. Suuremmalla säteellä ohjausakseli on kauempana pyörän keskipisteestä. Se vaikuttaa ohjausvoiman suuruuteen sillä, kun pyöränsuuntimakulman säde on suuri, ohjausvoiman tarve vähenee (kuva 4).

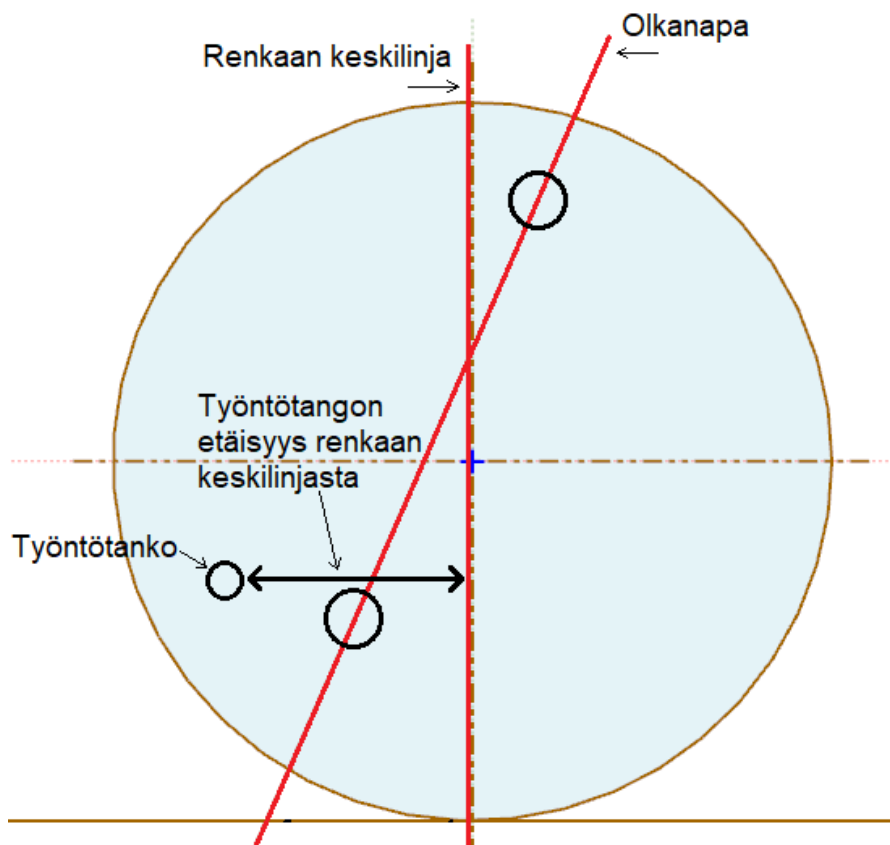


Kuva 4. Eturenkaan olkanapa ja renkaan keskilinja kuvattuna punaisella viivalla [12].

Työntömomentti maasta yhdellä etupyörällä oli yhtä suuri kuin sivuvoiman F_y ja pyöränsuuntimakulman säteen S_r tulo. Metropolia Motorsportin ajoneuvon pyöränsuuntimakulman säteen pituus, joka mitattu ajoneuvon geometriamallista, oli $R_s = 28,3\text{mm}$. Tällöin työntömomentti maasta renkaaseen $T_m = 429,91\text{N} \times 0,0283\text{m} = 12,17\text{Nm}$. [13.]

4.1.4 Työntötankoon kohdistuva voima

Ohjaustangon sivuvoiman aiheuttama työntömomentti oli verrannollinen ohjaustangon päässä vaikuttavaan voimaan F ja etäisyyteen 61mm renkaan keskeltä. Työntötangon ja renkaan keskilinjan etäisyys oli mitattu ajoneuvon geometriamallista (Kuva 7.).

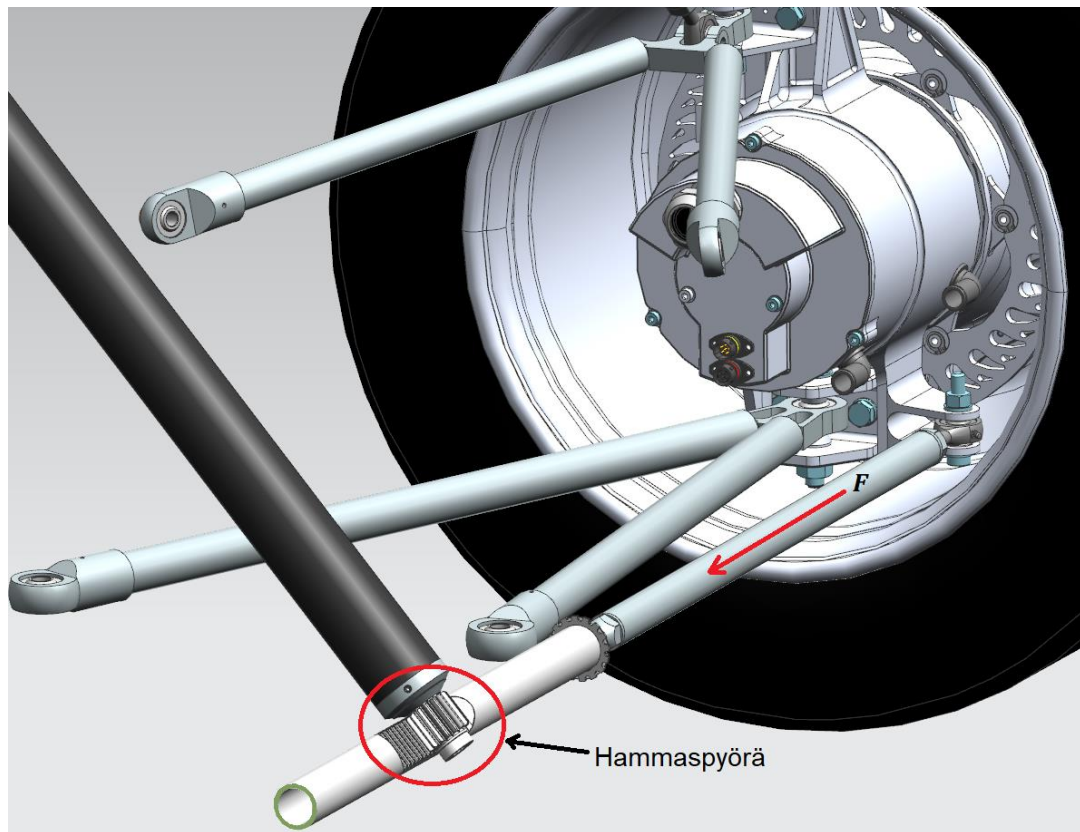


Kuva 5. Työntötangon etäisyys renkaan keskilinjasta kuvattu.

Ohjaustankoon kohdistuva voima renkaasta oli $F = \frac{12,17Nm}{0,061m} = 199,17N$. Tämä voima on ainoastaan yhden puolen ohjaustankoon vaikuttava voima, joten toisen puolen samansuuntainen vaikuttaa voima oli lisättävä. Yhteinen voiman suuruus on $F = 2 \times 199,17N = 398,90N$. [13.]

4.1.5 Ohjausakselistossa vaikuttava vääntömomentti

Työntötanko oli liitetty ajoneuvon hammastankoon, jossa saadaan sivuttaisliike ohjausakseliin pyöriväksi. Tämän työntötangolta tulevan sivuttaisvoiman muuttamisen pyöriväksi liikkeeksi ohjausakselistolle mahdollistaa hammastangossa oleva hammaspyörä (Kuva 6.).



Kuva 6. Hammaspyörä kuvattu HPF024 ajoneuvomallissa.

Hammaspyörällä vaikuttava momentti saadaan, kun kerrotaan työntötangolla vaikuttava voima hammaspyörän säteellä $r = 13,5\text{mm}$. Hammaspyörällä oleva momentti on $M = F \times r = 398,90\text{N} \times 0,0135\text{m} = 5,39\text{Nm}$. [13.]

Tarvittavalle momentille saatiin $5,39\text{ Nm}$, joka oli suurin momentti johtuen suu-
resta lepokitkasta, kun ajoneuvo oli paikallaan. Se koostuu ohjausjärjestelmän
inertialisesta kitkamomentista, etupyörien pystysuoran voiman aiheuttamasta
painovoiman suuntautumismomentista ja renkaan kontaktipinnan liukumismo-
mentista. Tämä staattisen ohjausmomentin arvo laskee lähes 50 % arvostaan,
kun ajoneuvo on ajotilanteessa. Vaikka tämä laskentamenetelmä ei ole tarkka,
se mahdollistaa staattisen ohjausmomentin puolueettoman arvon saamisen, ja
tuloksen havaitaan olevan laskettujen arvojen haarukassa. Metropolia Motor-
sport käyttää Hoosier-rengasvalmistajan renkaita, jotka pystyvät tuottamaan kit-
kakertoimen 1,2. Tämä kitkakerroin johtuu renkaan adheesio-ominaisuudesta,
jonka ansiosta rengas pystyy uppoamaan asfaltin epämuodostumiin ja

kitkakerroin saadaan näin suuremmaksi kuin 1. Tässä käytettiin kitkakerrointa 1,2 sekä lisättiin myös varmuuskerroin 1,5. Joten lopullinen tarvittava vääntömomentti oli $M_{lopullinen} = 12,12Nm$.

4.2 Ohjausnopeuden mitoitus

Tiukimmassa mutkassa ajoneuvon on käännettävä renkaat puolelta toiselle yhdessä sekunnissa. Ratti ei pysty tekemään täyttä pyörähdystä, sillä ajoneuvon hammastangon pituus loppuu eikä kuljettaja pysty fyysisesti kääntämään rattia ilman käsien irrotusta. Ajoneuvo oli suunniteltu niin, että ratin kääntökulma asteissa on 160° , jossa ratin oli käännyttävä $0 - 160^\circ$ yhdessä sekunnissa. Ratin kääntökulma oli $K_s = 160^\circ$ ja ratin kääntämiseen kulunut aika oli $T_K = 1 s$.

Jotta kierrosnopeuden voisi laskea, kuvitellaan, että ratti pystyisikin tekemään täyden pyörähdysten, jossa lasketaan täyteen kierrokseen $K_t = 360^\circ$ kulunut aika. Ratin yhteen kierrokseen kulunut aika saadaan kaavalla $T_s = \frac{K_s \times T_K}{K}$, joten lopulliseksi kuluneeksi ajaksi saatiin $T_s = \frac{360^\circ \times 1 s}{160^\circ} = 2,25 s$.

Ratin käännökseen kului 2,25 sekuntia. Moottorille olennainen arvo oli kierrosnopeus minuutissa, joka saatiin ratin kääntämiseen kuluneen ajan ja 60 sekunnin tulona. Täyskäännökseen kulunut aika oli $T_s = 2,25 s$, ja minuutissa sekunteja on $M_r = 60 s$, joten kierrosluku minuutissa oli $R = 60 s \times 2,25 s = 135$.

Jotta sähkömoottori pystyy tuottamaan tarvittavan nopeuden ja kestämään myös odottamattomia kuormituksia, lisättiin kierroslukuun varmuuskerroin 1,5, jolloin lopullinen tarvittava kierrosluku moottorille oli $R_{lopullinen} = 202,5$.

5 Hiiliharjattoman tasavirtamoottorin vertailu

Kun tiedettiin sähkömoottorityyppi ja tarvittava voima sekä kierrosluku, pystyttiin vertaamaan erilaisia tarjolla olevia kaupallisia moottoreita ja valitsemaan niistä soveltuva.

5.1 Kaupalliset hiiliharjattomat tasavirtamoottorit

Moottorin oli tuotettava vähintään 12,12 Nm vääntöä ja 202,5 kierrosta minuutissa. Lisäksi moottori vaati vaihteiston, sillä näin suurta vääntömomenttia tuotava moottori olisi liian suuri. Vaihteistoksi valittiin planeettavaihteisto, sillä se on yleisesti standardoitu sopimaan moniin sähkömoottoreihin ja tarjoaa kompaktin rakenteen ja helpon asennuksen. Vaihteisto lisää kuitenkin moottorin pituutta. Vaihteiston asennuksen jälkeen vaarana oli myös liiallinen nopeuden aleneminen, sillä väännön kasvaessa nopeus laskee suoraan verrannollisesti. Liian hidas sähkömoottori ei ehtisi kääntämään ajoneuvoa.

Tarkoitukseen sopivia hiiliharjattomia tasavirtamoottoreita etsittiin internetistä. Tarjolla oli monilta eri valmistajilta moottoreita, jotka erosivat toisistaan kooltaan, muotoilultaan, vääntöominaisuuksiltaan ja kierrosluvultaan.

Moottoreiden haussa huomattiin, että ne voidaan jakaa neliönmuotoisiin ja sylinterimuotoisiin. Lisäksi moottorin koko määräytyy vääntöominaisuuksien mukaan. Korkeaa vääntöä tuottavat moottorit olivat yleensä suurempia, ja niillä oli alhaisemmat kierrosluvut. Pienemmät moottorit pystyvät tuottamaan suuremman kierrosluvun, mutta niillä oli matalampi vääntömomentti.

Moottoreita etsiessä huomattiin, että monet vaihtoehdot jäivät pois, koska niiden vääntömomentti ja kierrosluvun tuottokyky olivat alhaisia. Kun vääntömomenttia pyritään kasvattamaan vaihteiston avulla, kierrosluku putosi liian matalaksi, mikä estäisi moottoria kääntämästä ajoneuvoa riittävän nopeasti.

Tästä havainnosta pääteltiin, että moottorin koko ja muoto eivät ole ensisijaisen tärkeitä tekijöitä. Sen sijaan keskityttiin pääasiassa moottorin kierroslukuun. Sähkömoottorin vääntömomenttia voidaan kasvattaa käyttämällä planeettavaihteistoa, jossa oli laaja valikoima välityssuhteita. Metropolia Motorsport voi harvita moottoria, joka tuottaa pienen vääntömomentin, mutta suuren kierrosluvun. On kuitenkin tärkeää varmistaa, ettei kierrosluku laske alle 202,5: *n*. Vaihteistoissa oli ilmoitettu välityssuhde, jolla voidaan suurentaa vääntöä. Tarvittava

välityssuhde $T_{moottori}$ saadaan, kun tiedossa oli sähkömoottorin vääntömomentti M_{alussa} ja vaihteiston jälkeen lopullinen momentti $M_{lopussa} = 12,12 \text{ Nm}$.

$$M_{alussa} \times T_{moottori} = M_{lopussa} \quad (1)$$

$$T_{moottori} = \frac{M_{alussa}}{M_{lopussa}}$$

Tässä tapauksessa oikea ratkaisu oli valita pienempi mutta korkeammalla kierrosluvulla toimiva moottori. Planeettavaihteiston avulla tarvittava vääntömomentti saadaan korjattua, ja ajoneuvo kykenee kääntymään tarvittavalla nopeudella.

5.2 Vaihtoehdot

Jotta moottoreita voitaisiin vertailla, laadittiin taulukko, jossa moottorin ominaisuudet oli korostettu väreillä (taulukko 3). Moottoreiden valmistajien sivuilla annettiin tietoja moottorin mallista, pituudesta, leveydestä, vääntömomentista ja kierrosluvusta. Nämä tiedot kerättiin otsikoiksi taulukkoon, jossa vertailu perustuu moottoreiden pituuteen, leveyteen, vääntömomenttiin ja kierroslukuun.

Taulukko 3. Esimerkki hiiliharjattomien tasavirtamoottoreiden vertailu taulukosta.

Malli	Pituus (mm)	Leveys (mm)	Vääntömomentti (Nm)	Kierrosluku (RPM)
Sähkömoottori	Pitkä	Leveä	Matala	Matala
Sähkömoottori	Lyhyt	Kapea	Korkea	Korkea

- Punainen: pitkä ja leveä
- Vihreä: kompakti
- Punainen: vääntömomentti ja kierrosluku matalat
- Vihreä: vääntömomentti ja kierrosluku korkeat

Esimerkiksi moottori, joka oli pitkä ja leveä, merkittiin taulukkoon punaisella värillä. Moottori, joka oli kompakti, merkittiin vihreällä värillä. Moottori, joka tuotti

paljon vääntömomenttia ja kierroslukua, merkittiin vihreällä värillä. Moottori, joka tuotti vähän vääntömomenttia ja kierroslukua, merkittiin punaisella värillä. Pituus ja leveys merkittiin taulukkoon millimetreissä, jossa leveys viittaa neliönmallisessa moottorissa x- ja y-sivuja ja sylinterimallissa halkaisijaa. Vääntömomentti ilmoitettiin jatkuvana vääntömomenttina sekä suurin kierrosluku, kun vääntömomentti oli suurimmillaan.

Hiiliharjattomia tasavirtamoottoreita tutkiessa huomattiin, että 12,12 Nm tuottava moottori oli liian suuri eikä mahtuisi ajoneuvoon. Olisi syytä käyttää vaihteistoa, jotta moottorin koko säilyisi mahdollisimman pienenä. Näin saataisiin kasvatettua vääntötuottokykyä pienemmässä moottorissa. Vääntöä kasvattaessa vaihteistolla moottorin nopeus laskee suoraan verrannollisesti ja vääntö kasvaa.

Hiiliharjattomia tasavirtamoottoreita saatiin kerättyä vertailuun seitsemän kappaletta. Vertailussa huomattiin, että moottorit jakaantuivat kahteen muotoon, neliömäisiin ja sylinterimäisiin moottoreihin. Neliömäiset olivat yleisesti pidempiä mutta kapeampia ja sylinterimäiset lyhyitä mutta leveitä. Vertailu päätettiin jakaa kahteen taulukkoon, joissa vertailtiin kolmea sylinterimäistä hiiliharjatonta tasavirtamoottoria (taulukko 5) ja kolmea neliömäistä hiiliharjatonta tasavirtamoottoria (taulukko 4).

5.3 Neliömuotoiset hiiliharjattomat tasavirtamoottorit

Neliömuotoisia hiiliharjattomia tasavirtamoottoreita löytyi verkosta yhteensä kolme kappaletta (taulukko 4). Näiden moottoreiden valintaan vaikutti erityisesti niiden suorituskyky ja soveltuvuus tarkoitettuun käyttötarkoitukseen.

Taulukko 4. Neliömuotoisten hiiliharjattomien tasavirtamoottoreiden vertailu.

Malli (Neliö)	Pituus (mm)	Leveys (mm)	Momentti (Nm)	Kierrosluku (RPM)
EC057A	121,9	57,1	0,65	4500
PBL11035220	123	110	2,4	2870
AM8023-wFyz	155,5	58	1,2	3500

Taulukkoon 4 on huolellisesti kirjattu moottoreiden mallinimet, pituus, leveys, momentti ja kierrosluku minuutissa. Keskittyen erityisesti suorituskykyyn ja ominaisuuksiin EC057A, Haydon Kerk Pittman on korostettu vihreällä värillä. Tämä moottori erottui joukosta kompakteimmalla rakenteellaan ja samalla tarjoamalla korkeimman kierrosluvun. Tämä teki siitä houkuttelevan valinnan projektin tarpeisiin sekä tilatehokkuuden että suorituskyvyn korostuessa taulukon vertailussa.

5.3.1 EC057A, Haydon Kerk Pittman

EC057A on Haydon Kerk Pittmanin valmistama hiiliharjaton tasavirtamoottori, joka erottui erityisesti suurella kierrosluvullaan, 4500 kierrosta minuutissa, ja kompaktilla koollaan. Vaikka moottorin vääntömomentti oli neliömuotoisten sähkömoottoreiden vertailussa pienin, vain $0,65 \text{ Nm}$, sen tehokkuus ja suorituskyky tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon moniin sovelluksiin. Vaihteiston välityssuhde laskettiin jakamalla moottorin ja tarvittava vääntömomentti ja tämän jälkeen moottorin kierrosnopeuden arvoksi saatiin $R_{\text{EC057A}} = \frac{4500}{18,65} = 241,34$ kierrosta minuutissa.

5.3.2 PBL11035220, Shenzhen Power Motor Industrial Co

Shenzhen Power Motor Industrial Co:n valmistaman hiiliharjattoman tasavirtamoottorin malli PBL11035220 erottui suurella koollaan: leveys 110 mm ja pituus 123 mm . Tämä massiivinen rakenne mahdollisti suuren vääntömomentin $2,4 \text{ Nm}$. Vaikka moottorin kierrosluku oli vain 2870 minuutissa, suuren väännön ansiosta vaihteiston välityssuhde pysyy matalana. Vaihteiston jälkeen laskettu kierrosnopeus oli $R_{\text{PBL11035220}} = \frac{2870}{5,05} = 568,32$ kierrosta minuutissa. Tämä kierrosnopeus oli vertailun suurin. PBL11035220-moottori osoittautuu siten erinomaiseksi vaihtoehdoksi sovelluksiin, joissa hiiliharjattomilta tasavirtamoottoreilta tarvitaan suurta vääntömomenttia ja tehokasta suorituskykyä.

5.3.3 AM8023-wFyz, Beckhoff Automation Oy

AM8023-wFyz-malli erottui erityisesti pituudellaan sijoittuen pisimmäksi vertailujen moottoreiden joukossa. Leveydeltään se oli vain hieman alle millimetrin suurempi kuin EC057A. Tämän moottorimallin vahvuutena oli vääntömomentin tuottokyky: moottori pystyy tarjoamaan 1,2 Nm:n väännön 3500 kierroksen minuuttivauhdilla. Välytyssuhde laskettiin jakamalla moottorin vääntömomentti ja tarvittava vääntömomentti, joka oli $T_{167132} = \frac{12,12 \text{ Nm}}{1,2 \text{ Nm}} = 10,10$. Tämä tarkoittaa, että moottori vaatisi vaihteiston, jonka välytyssuhde on 10,10, jotta lopullinen vääntö saavuttaisi 12,12 Nm:n. Planeettavaihteisto vähentää kierrosnopeutta, minkä tuloksena moottorin kierrosnopeus ja välytyssuhde jakona tuovat kierrosnopeudeksi $R_{167132} = \frac{3500}{10,10} = 346,53$ kierrosta minuutissa. Tämä teki AM8023-wFyz-mallista tehokkaan ja monipuolisen vaihtoehdon sovelluksiin, joissa tarvitaan pituutta säästävää moottoria voimakkaalla vääntömomentilla.

5.4 Sylinterimuotoiset hiiliharjattomat tasavirtamoottorit

Sylinterinmuotoisia moottoreita saatiin verkosta kerättyä neljä kappaletta taulukoon. Taulukossa 5 esitetyt moottorit kattavat erilaisia sylinterinmuotoisia hiiliharjattomia tasavirtamoottorityyppejä.

Taulukko 5. Sylinterinmuotoisten hiiliharjattomien tasavirtamoottoreiden vertailu.

Malli (Sylinteri)	Pituus (mm)	Leveys (mm)	Momentti (Nm)	Kierrosluku (RPM)
167132	177,3	60	0,768	4960
607937	40	90	1,62	1610
633919	80	52	1,01	3990
397799	162	32	0,804	4670

Sylinterinmuotoisten moottoreiden taulukosta erottui erityisesti Maxon Groupin tuottama hiiliharjaton tasavirtamoottori 633919, joka osoittautui listan kompakteimmaksi ja samalla tehokkaimmaksi vaihtoehdoksi. Tämän moottorin

ainutlaatuinen suorituskyky ja kompakti rakenne tekivät siitä ihanteellisen valinnan sovelluksiin, joissa tila ja tehokkuus ovat keskeisiä tekijöitä.

5.4.1 167132, Maxon Group

Vertailtaessa sylinterimallisia hiiliharjattomia tasavirtamoottoreita otettiin mukaan neljä eri mallia (taulukko 5). Näistä malli 167132, jonka valmistaja on Maxon Group, erottuu pituudellaan ollen vertailun pisin moottori 177,3 millimetrin pituudellaan ja 60 millimetrin halkaisijallaan. Vaikka moottorin suurin kierrosnopeus on vaikuttava 2870 kierrosta minuutissa, sen vääntömomentti jää kohtalaisen alhaiseksi, vain 0,768 newtonmetriin.

Moottorin välityssuhde laskettiin jakamalla moottorin ja tarvittava vääntömomentti $T_{167132} = \frac{12,12 \text{ Nm}}{0,768 \text{ Nm}} = 15,78$. Tämä tarkoittaa, että moottori vaatii vaihteiston, jonka välityssuhde olisi 15,78, jotta lopullinen vääntö saavuttaisi 12,12 Nm:n. Välityssuhde alensi kierrosnopeutta, ja moottorin kierrosnopeus ja välityssuhde jakona tuovat kierrosnopeudeksi $R_{167132} = \frac{4960}{15,78} = 314,30$ kierrosta minuutissa. Näin ollen moottorin kierrosnopeus laskisi tähän arvoon välityksen jälkeen.

5.4.2 607937, Maxon Group

607937-malli, jonka valmistaja on Maxon Group, osoittautui vertailun toiseksi kompakteimmaksi moottoriksi. Moottorin mitat ovat vaikuttavat, koska sen pituus oli vain 24 millimetriä ja halkaisija 87 millimetriä. Tästä huolimatta moottori tarjoaa vahvan suorituskyvyn, sillä sen vääntömomentti on 1,61 newtonmetriin ja kierrosnopeus on 1620 kierrosta minuutissa. Moottorin tarvittava välityssuhde laskettiin jakamalla moottorin ja tarvittava vääntömomentti $T_{B08724N2B} = \frac{12,12 \text{ Nm}}{1,61 \text{ Nm}} = 7,53$. Näin ollen moottori vaatii välityssuhteen, joka olisi 7,53, jotta saavutettaisiin 12,12 Nm:n vääntömomentti. Välityssuhteen myötä kierrosnopeus laskee arvoon $R_{B08724N2B} = \frac{1620}{7,53} = 215,20$ kierrosta minuutissa. 607937-

malli yhdistää tehokkuuden ja kompaktin koon, mikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon sovelluksiin, joissa tila on rajallinen. Moottorin kierrosluku on vertailun pienenin. Kierrosluku ei kuitenkaan alita tarvittavaa arvoa 202,5.

5.4.3 633919, Maxon Group

Maxon Groupin tarjoama 633919-moottori sijoittui keskimääräistä tasoa edustavaksi verrattuna muihin vertailtuihin moottoreihin. Moottori on pitkä mutta samalla kapea. Sen kierrosnopeus vaihteiston jälkeen osoittautui vertailun suurimmaksi. Moottorin kierrosnopeus saatiin laskemalla tarvittava välityssuhde

$$T_{633919} = \frac{12,12 \text{ Nm}}{1,01 \text{ Nm}} = 12,00. \text{ Kierrosnopeudeksi saadaan } R_{633919} = \frac{3990}{12,00} = 332,50$$

kierrosta minuutissa.

Sylinterimallisten sähkömoottorien joukosta Maxon Groupin 633919-malli erottui tarjoamalla suurimman kierrosnopeuden vaihteiston jälkeen. Tämä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon sovelluksiin, joissa korkea kierrosnopeus on keskeinen tekijä.

5.4.4 397799, Maxon Group

Maxon Groupin valmistama hiiliharjaton tasavirtamoottori 397799 erottui erityisellä pitkällä ja kapealla rakenteellaan. Moottorin pituus oli ainoastaan 162 mm, ja halkaisija vain 32 mm tehden siitä vertailun kompakteimman. Moottori tuottaa 4670 kierrosta minuutissa ja vääntömomenttia moottorilla oli 0,804 Nm. Välityssuhde lasketaan kaavalla $T_{633919} = \frac{12,12 \text{ Nm}}{0,804 \text{ Nm}} = 15,07$. Kierrosnopeus vaihteiston jälkeen on siten 309,79 kierrosta minuutissa.

5.5 Hiiliharjattoman tasavirtamoottorin valinta

Kaikkien seitsemän moottorin vertailussa huomattiin, että moottorin kierrosnopeus ja vääntömomentti täyttävät Metropolia Motorsportin itseohjautuvan Formula Student -ajoneuvon ohjauksen vaatimukset. Seuraavaksi tarkasteltiin

moottorin kokoa. Kokoverailussa erityisesti sylinterinmuotoiset moottorit erottuivat niiden tilavuuden ollessa keskimäärin kaksi kertaa pienempiä. Sylinterimuotoisten moottoreiden joukosta erottuivat erityisesti Maxon Groupin valmistamat mallit 607937, 633919 ja 397799.

Suurimmaksi kooltaan osoittautui malli 607937, jonka tilavuus oli 254340 mm^3 . Toiseksi suurin oli malli 633919, jonka tilavuus oli 169811 mm^3 . Tarkemmassa tutkimuksessa moottorista 633919 kävi ilmi, ettei siihen voi asentaa planeettavaihteistoa, sillä moottorin rungossa ei ole valmiita kierteitä eikä niitä voitu lisätä. Moottorin vääntömomentti on $1,01 \text{ Nm}$, joka osoittautui tällöin liian alhaiseksi, eikä moottoria voida käyttää ajoneuvossa.

Kompaktein moottori koko vertailussa oli malli 397799, jonka tilavuus oli 130222 mm^3 . Tämä moottori saavuttaa tarvittavan vääntömomentin, $12,12 \text{ Nm}$, ja samalla moottorin kierrosnopeus laskee arvosta 4670 arvoon 309,79 kierrosta minuutissa. Tämä nopeus on tarpeeksi suuri Metropolia Motorsportin itseohjautuvan Formula Student -ajoneuvon ohjaukseen. Vaihteiston asennuksen myötä moottorin pituus kasvaa $79,9 \text{ mm}$. Kokonaispituudeksi saataisiin $241,9 \text{ mm}$.

Merkittävänä etuna mainittakoon, että moottorissa on valmiiksi asennettu Hall- sensori, joka tarkastaa määrittää moottorin sijainnin. Moottorin kierrosnopeus ja vääntötuotto kyky ovat tarpeeksi suuret, jotta ajoneuvo menestyisi kilpailuradalla. Moottorin koko on kompakti ja paino 860 g . Näin ollen voidaan päätellä, että malli 397799 on ihanteellinen valinta Metropolia Motorsportin itseohjautuvan Formula Student -ajoneuvon ohjaukseen.

6 Yhteenveto

Tavoitteena tässä työssä oli selvittää sopivin sähkömoottori vertailemalla eri vaihtoehtoja. Vertailussa hyödynnettiin taulukoita, joissa ensin arvioitiin sähkömoottoreiden ominaisuuksia, ja todettiin hiiliharjattoman tasavirtamoottorin olevan sopivin valinta. Seuraavaksi tutkittiin saatavilla olevia hiiliharjattomia tasavirtamoottoreita, joita löytyi yhteensä seitsemän kappaletta.

Hiiliharjattomia tasavirtamoottorieta vertailtiin niiden koon ja voimantuottokyvyn perusteella.

Vertailun tulosten perusteella Maxon Groupin 397799-moottori osoittautui kompakteimmaksi ja tehokkaimmaksi vaihtoehdoksi, joka täyttää Metropolia Motorsportin itseohjautuvan Formula Student -ajoneuvon ohjauksen vaatimukset. Kyseinen malli tarjoaa tarvittavan vääntömomentin ja kierrosnopeuden, ja sen kompakti rakenne tekee siitä ihanteellisen valinnan kyseiseen projektiin.

Tämän työn tuloksena saatiin selkeä suositus sähkömoottorin valinnasta, ja Metropolia Motorsport voi nyt jatkaa suunnittelua sähkömoottorin integroimiseksi ajoneuvon sekä itseohjautuvan ohjauksen kehittämistä.

Lähteet

- 1 Formula Student Rules. 2023. Verkkoaineisto. Formula Student Germany. <FSG: Rules & Documents (formulastudent.de)>. Luettu 20.11.2023.
- 2 How Does an AC Motor Work. Verkkoaineisto. eMotors Direct. <How Does an AC Motor Work | eMotors Direct>. Luettu 22.1.2024.

- 3 Engineering Mindset. 2021. Electric Motors: 3 phase AC induction motors ac motor. Verkkoaineisto. <(14) How Electric Motors Work - 3 phase AC induction motors ac motor - YouTube>. 20.1.2021. Katsottu 22.1.2024.
- 4 Hughes, Austin & Drury Bill. 2019. Electric Motors and Drives. 5., 5th Edition. E-kirja. Nwenes Publishing.
- 5 What is an Induction Motor. Verkkoaineisto. ElProCus. <<https://www.el-procus.com/induction-motor-types-advantages/>> Luettu 1.12.2023.
- 6 Synchronous Motors. Verkkoaineisto. Electrical4U. <<https://www.electrical4u.com/synchronous-motor-working-principle/>>. Luettu 3.12.2023.
- 7 What are Brushless DC Motors. Verkkoaineisto. Renesas Electronics Corporation. <<https://www.renesas.com/us/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview>>. Luettu 30.11.2023.
- 8 Engineering Mindset. 2021. Electric motors: Stepper Motor - What's inside?. Verkkoaineisto. <https://www.youtube.com/watch?v=9VQqky7s3xQ&list=PLWv9VM947MKjMtpgoXJ_azxuDdMnlSo69&index=12>. 26.6.2021. Katsottu 1.12.2023.
- 9 Why is My Stepper Motor Skipping Steps or Stalling. Verkkoaineisto. Valin. <<https://www.emotorsdirect.ca/knowledge-center/article/how-does-an-ac-motor-work>>. Luettu 22.1.2024.
- 10 Painovoima. Verkkoaineisto. Peda. <<https://peda.net/oppimateriaalit/e-oppi/lukiot/lahti3/lahden-lyseo/fysiikka/vierinen/arkisto/r1ff2/FY1/luku-6-dynamiikka2/painovoima>>. Luettu 23.1.2024.
- 11 Newtonin 2. laki. Verkkoaineisto. Ursa. <https://www.ursa.fi/yhd/uranus/fysiikka/Isaac_Newton.htm#2%20laki>. Luettu 29.1.2024.
- 12 What is King Pin Inclination (KPI). Verkkoaineisto. Suspension Secrets. <<https://suspensionsecrets.co.uk/king-pin-inclination/>>. Luettu 20.12.2023.
- 13 Momentti. Verkkoaineisto. Peda. <<https://peda.net/oppimateriaalit/e-oppi/lukiot/espoo/eyl/fysiikka/hellsten/arkisto-22-23/kertauskurssi23/ee1f093ccb4f11eaae06509a4c62f386/ce90ea8ecb5111eab23d509a4c62f362>> Luettu 29.1.2024.