



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

SÄHKÖPYÖRÄN VOIMALINJAN KONSEPTOINTI

Integroidulla vaihteistolla varustettu sähköpyörän
keskiömoottori

Iiro Peltola

Opinnäytetyö
Toukokuu 2019
Konetekniikka
Älykkäät koneet



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Älykkäät koneet

PELTOLA, IIRO:
Sähköpyörän voimalinjan konseptointi
Integroidulla vaihteistolla varustettu sähköpyörän keskiömoottori

Opinnäytetyö 50 sivua
Toukokuu 2019

Keskiömoottorilla varustetuissa sähköpyörissä ongelmana on vaihteiden kestävyys. Lisäksi perinteisen polkupyörävaihteiston toiminnan oletetaan heikentävän käyttäjäkokemusta. Opinnäytetyössä tavoitteena on suunnitella konsepti sähköpyörän keskiömoottorista, joka on varustettu integroidulla vaihteistolla. Voimalinjan koko, paino ja suorituskyky haluttiin pitää markkinoilla olevia kilpailijoita vastaavana. Voimalinjan suunnittelussa on monia haasteita polkupyörän useiden käyttötarkoitusten sekä tiukkojen paino- ja kokorajoitteiden vuoksi. Työssä selvitettiin tämän hetken markkinatilanne, jonka perusteella tehtiin suunnitteluvaatimukset voimalinjalle.

Voimalinjaa suunniteltaessa selvitettiin useita eri rakenteita, joilla voimalinjalle asetetut vaatimukset voitaisiin täyttää. Työssä suunniteltujen rakenteiden pohjalta voimalinjan toiminnasta teetetään useita simulaatioita, joissa voimalinjan toimintaa testataan todellista mitattua dataa vastaan.

Työn lopputuloksen oli tilaajalle tehty salattu voimalinjan konseptisuunnitelma integroidulla vaihteistolla varustetusta keskiömoottorista, salattu moottorin suunnittelu määritelmä, alihankkijalta tilattu salattu simulaatioraportti, sekä karkea listaus voimalinjan hintaan vaikuttavista pääkomponenteista. Voimalinjan riittävä suorituskyky onnistuttiin varmistamaan simulaatioiden avulla kaikissa käyttökohteissa. Voimalinjan suunnitelmaa voisi edelleen kehittää selvittämällä miten eri materiaaleista valmistetut osat kestävät voimalinjan komponenteissa, selivttämällä voimalinjan melutasoa, huoltovapautta, kierrätettävyyttä, kustannusrakennetta sekä testata prototyypikappaletta todellisessa ympäristössä.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Smart Machines

PELTOLA, IIRO:
Concept Design of Electric Bike Drivetrain
Electric Bike Drivetrain Equipped with Integrated Gearbox

Bachelor's thesis 50 pages
May 2019

The problem with an electric bike equipped with a central motor is poor durability of transmission components, and traditional transmission components are often seen as making the user experience less ideal. The objective of this thesis was to create a concept level design of a central motor for electric bikes, equipped with an integrated gearbox. The goal was to achieve weight, size and performance that are competitive with the current solutions in the market. In this thesis, current status and performance level of existing central motors were examined to get a primary design specification for the drivetrain.

During the design of the drivetrain, multiple different concept structures were revised so that the design specifications set for the drivetrain could be reached. On basis of these concept structures, multiple computer simulations were performed.

As a result of this thesis, a covered concept design of the drivetrain equipped with integrated transmission, covered simulation report performed by a subcontractor, covered motor design specification and a rough cost estimate of the main components in the drivetrain were provided to the commissioner of this thesis. Sufficient performance of the drivetrain in every use case was verified through simulation. Concept design of the drivetrain could still be continued by making a study of different materials that could be used in the drivetrain components, studying noise levels of the drivetrain component, the amount of required service, recyclability, cost structure and by making tests on a prototype in a real environment.

Key words: electric bike, central motor, drivetrain, CVT

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	VOIMALINJAN VAATIMUSTEN MÄÄRITTELY.....	7
	2.1 Tilaaajan vaatimukset.....	7
	2.2 Markkina-analyysi.....	8
	2.3 Standardit ja normit.....	9
	2.4 Suunnitteluvaatimukset.....	12
3	VAIHEISTOTEKNIIKAN ESISELVITYS.....	15
	3.1 Perinteisten vaihtoehtojen vertailu.....	15
	3.2 Muut CVT vaihteistoperiaatteet.....	18
	3.2.1 Planeettavaihteen toiminta.....	19
	3.2.2 eCVT.....	21
	3.2.3 Hydraulinen.....	22
	3.2.4 Kitkatoiminen CVT.....	23
	3.2.5 Toroidal vaihteisto.....	23
	3.3 Vaihtoehtojen valinta.....	24
4	VOIMANSIIRRON KONSEPTOINTI.....	25
	4.1 Moottorin mitoituksen teoriaa.....	25
	4.2 Ajomoodien määrittely.....	26
	4.3 eCVT planeettavaihteiston kolme toimintaperiaatetta.....	28
	4.4 Elektromekaaninen suunnittelu.....	31
	4.5 Moottorien sijoittelu.....	32
5	VOIMALINJAN SUORITUSKYVYN SIMULOINTI JA OPTIMOINTI	34
	5.1 Ajosyklin määrittely.....	34
	5.2 Rakenteen määrittely.....	37
	5.3 Lopputulos.....	40
6	MEKANIKKASUUNNITTELU.....	41
	6.1 Ratasvoimien laskenta.....	41
	6.2 Valmistusmenetelmät.....	46
7	POHDINTA.....	49
	LÄHTEET.....	50

LYHENTEET JA TERMIT

Sähköjärjestelmä	Sähköpyörän elektroniikka, joka yleensä käsittää moottorin, moottorin kontrollerin, akun, sekä käyttöliittymän
Keskiömoottori	Sähköpyörissä käytetty moottorityyppi, joka on kiinnitetty polkupyörän kampien kohdalle.
Q-kerroin	Polkupyörän polkimien kiinnitysetäisyydestä käytetyn mitan nimitys
Kadenssi	Polkupyöräilyssä käytetty termi, joka vastaa polkimien kierrosnopeutta (1/min)
Vaihtaja	Perinteisen polkupyörän ketjuvaihteistossa käytetty mekanismi, joka vastaa ketjun siirtämisestä suuremmalle tai pienemmälle rattaalle.
CVT	Englanninkielinen lyhenne jatkuvasti muuttuvanopeuksiselle vaihteistolle (Continuously Variable Transmission)

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan konseptitasoinen ratkaisu moderneissa sähköpyörissä käytettävästä keskiömoottorista. Työn tavoitteena on ratkaista sekä käyttökokemusta häiritsevän että teknisesti epäluotettavan vaihteiston toiminta integroimalla vaihteisto osaksi keskiömoottoria. Työssä paneudutaan sekä mekaniikan että elektroniikan ja sähkömoottorien toimintaan. Työn tilaaja on havainnut selkeän tarpeen keskiömoottorille, joka parantaa käyttäjäkokemusta ja parantaa pyörän teknistä toimintaa. Haasteina työssä on löytää toimiva konsepti, joka täyttää riittävät teho- ja vääntövaatimukset, on toiminnaltaan luotettava ja määräyksiä vastaava niin, että moottorin paino, koko ja hinta pysyy siedettävällä tasolla.

Työ rajataan konseptitasoisen suunnittelun toteutukseen, mikä tarkoittaa mekaniikan suunnittelua siihen pisteeseen, että teknisestä toiminnasta on riittävä varmuus eli voimalinjan toimintaa voidaan todentaa teoriassa. Osana työn etenemistä on teknisempää laskentaa ja simulointia, jossa käytetään apuna tilaajan alihankkijan Antti Lehikoisen palveluita. Simulaation avulla selvitetään voimalinjan toiminta teoreettisella tasolla. Luotettavien simulaatioiden tekoa varten työssä tutkittiin sähköpyöräilyssä esiintyviä voimia ja tehoja mittaamalla dataa markkinoilta ostetusta sähköpyörästä SM-tason kilpapyöräilijän polkemanä. Simuloitavien arvojen referenssiksi tehtiin tutkimusta markkinoilta löytyvistä ratkaisuista.

Työssä käydään läpi CVT-vaihteiston toimintaperiaatteen, sekä vaihteiston mitoituksen teoriaa kuten momentteja ja pyörintänopeuksia. Lisäksi työssä selostetaan keskiömoottorin toiminnasta tehtävää simulointia ja sen avulla tehtävää optimointia. Tärkeimpänä lähteenä moottorin simuloinnissa toimii Antti Lehikoisen tekemä raportti.

2 VOIMALINJAN VAATIMUSTEN MÄÄRITTELY

Voimalinjan toiminnan reunaehtoihin määriteltiin tilaajan toiveet voimalinjan toiminnasta ja ominaisuuksista. Lisäksi voimalinjan reunaehtoja varten selvitettiin nykyisten kilpailijoiden suoritusarvot kilpailijanalyysin avulla. Vaatimuksia varten selvitettiin myös standardien ja normien asettamat rajoitukset. Kerätyistä tiedoista koostettiin voimalinjan suunnitteluvaatimukset.

2.1 Tilaajan vaatimukset

Työn tilaaja on pitkään sähköpyörien parissa toiminut yritys, jolla on kokemusta asiakkaiden kohtaamista ongelmista sähköpyörissä. Kokemustensa pohjalta työn tilaaja esitti tuotevaatimuksen suunniteltavalle voimalinjalle, jotka on esitelty taulukossa yksi.

TAULUKKO 1. Tuotevaatimukset asiakasyritykseltä

Tuotevaatimukset (PRD)
Avustaa polkijaa pyöräillessä
Jälleenmyyntihinta ~350 €
Kiinnitetään polkupyörään, mahdollisimman kevyt
Raskas ulkokäyttö, iskuja ym.
Käyttöikä 10 vuotta tai 30 000 km
Huoltovapaa
Kierrätettävä
Markkinoita vastaavia tuotteita suurempi tai yhtä suuri vääntö
Integroitu vaihteisto
Integroituu pyörän runkoon
Hiljainen
Pieni Q-kerroin
Hyvä hyötysuhde
Vastaa EU säännöksiä
Voi polkea myös ilman sähköä

Asiakaskokemus

Polkupyörien jälleemyyjänä toiminut työn tilaaja on todennut polkupyörien ja erityisesti sähköpyörien voimalinjassa keskiömoottoria käytettäessä kestävyysongelmia. Keskiömoottorin aiheuttaman ylimääräisen kuormituksen vuoksi perinteiset polkupyöräkomponentit eivät kestä pitkään jatkuvaa käyttöä. Etenkin kaikissa raskaimmassa käytössä, maastopyörissä käytettävät säälle ja lialle alttiit ketjuvaihteet kuluvat nopeasti. Mekaanisen rakenteen ja kulumisen vuoksi perinteisten ketjuvaihtajien toiminta muuttuu usein epäluotettavaksi ajan kuluessa, jolloin vaihteiden vaihtaminen ei ole enää sujuvaa. Näiden ongelmien välttämiseksi suunniteltavassa sähköjärjestelmässä haetaan konseptia, jossa vaihteisto voitaisiin integroida keskiömoottorin sisään niin, että se toimisi kontrolloidussa ympäristössä ja olisi varmatoimisempi.

2.2 Markkina-analyysi

Voimalinja asennetaan kiinni sähköpyörään, mikä asettaa reunaehdot koolle ja painolle. Tarkkoja reunaehtoja ei määritellä, sillä perinteisesti pyörän runko rakennetaan valitun voimalinjan ympärille. Suunniteltaessa pitää kuitenkin muistaa, että voimalinjan koko tulee pitää mahdollisimman pienenä ja kevyenä paremman integraation saavuttamiseksi.

Vertailukohtana voidaan pitää taulukossa kaksi listattuja, nykyisiä markkinoilla saatavilla olevia keskiömoottoreita yhdistettynä perinteisiin vaihteisto osasarjoihin. Osasarjoissa on pyritty yhdistämään parhaita markkinoilta löytyviä osasarjoja, jotta voimalinjan mitoitukseen saadaan riittävän tiukka tavoite johon suunniteltavaa voimialinjaa voidaan verrata.

TAULUKKO 2. Yleisimmät markkinoilla saatavilla olevat keskiömoottorit ja niiden maksimivääntömomentti, sekä esimerkkejä mahdollisista välityssuhteista.

Malli	Paino (kg)	Maks. avustus (%)	Vääntömomentti (Nm)	Välitykset (min/maks./malli)	Maksimivääntö takarenkaalla (Nm)
Bosch Performance CX	4,0	300	75	1:3/1:0,6/Sram Eagle	125
Shimano E8000	2,88	-	70	1:3,6/1:0,48/Shimano XT	146
Brose S	2,9	410	90	1:3/1:0,6/Sram Eagle	150
Yamaha PWX	3,1	320	80	1:3,6/1:0,48/Shimano XT	167
TQ-Drive	3,9	-	120	1:3/1:0,6/Sram Eagle	200
Bafang Max	3,9	-	80	1:3/1:0,6/Sram Eagle	133
Fazua	3,23	-	60	1:3,6/1:0,48/Shimano XT	125
Continental Revolution	6,4	-	70	1:1,9/1:0,5	140
AEG	-	-	100	1:3/1:0,6/Sram Eagle	167

2.3 Standardit ja normit

-

Tilajayrityksen päämarkkina-alue on Euroopassa, joten voimalinja suunnitellaan vastaamaan EU-säännöksiä. Selvyyden vuoksi tässä tekstissä sähköpyörällä tarkoitetaan pyörää, jonka moottori avustaa ainoastaan polkiessa sekä avustus katkeaa nopeuden noustessa yli 25 km/h. Lisäksi moottorin jatkuva nimellisteho on rajattu 250 wattiin. (European Committee for Standardization 2017)

Periaatteessa kaikki kaksi, kolme tai nelipyöräiset ajoneuvot tulee tyyppihyväksyä EU asetuksen n.o 168/2013 mukaan. Artiklassa kaksi rajataan seuraavat poikkeukset, joita tyyppihyväksyntä ei koske;

- Kilpakäyttöön tarkoitetut ajoneuvot
- Maastokäyttöön suunnitellut ajoneuvot
- Sähköavusteiset pyörät, jotka on varustettu polkemista avustavalla, nimellisteholtaan korkeintaan 250 W moottorilla, jonka toiminta katkeaa nopeuden ylittäessä 25 km/h

Artikla rajaa perinteiset sähköpyörät tyyppihyväksynnän ulkopuolelle. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2013)

Taulukossa kolme on käyty läpi luokat eri sähköajoneuvoille (Bike Europe 2017). Sähköpyörille ei ole omaa luokkaa, sillä se luetaan tavalliseksi polkupyöräksi. L1eA luokka on melko tuore vuoden 2016 alusta voimaan tullut uusi luokka, joka luotiin erilaisten kevyiden sähköajoneuvojen nopeasti yleistyessä. Luokkaan L1e-B luetaan nopeat 45 km/h asti avustavat sähköpyörät. (Euroopan parlamentti ja neuvosto 2013, 10)

TAULUKKO 3. Eri sähköajoneuvojen luokittelu

L-kategoria	Tekniset vaatimukset	Renkaiden määrä
L1e-A	Maks. teho >250 W - <1 kW Maks. nopeus 25 km/h Avustava moottori tai pelkästään moottorilla toimiva	2, 3 ja 4
L1e-B	Maks. teho <4 kW Maks. nopeus 45 km/h Avustava moottori tai pelkästään moottorilla toimiva	2

Nykyisten toimittajien moottorit ovat tyyppihyväksytyjä sopimaan myös tämän luokan pyöriin. Tilaajan kanssa neuvotellessa kuitenkin päätettiin työn selvyuden ja nopeuttamisen vuoksi, että luokan L1e-B erityisvaatimukset jätetään voimalinjaa suunniteltaessa huomioimatta, sillä tämän tyyppin pyörät koostavat hyvin pienen osan

markkinasta. Työssä suunniteltava konsepti ei siis lukeudu mihinkään viralliseen taulukon kolme luokkaan. Taulukon asettamat rajoitukset pitää kuitenkin huomioida voimalinjaa suunnitellessa jotta suorituskykyarvot tai toiminnallisuudet eivät ole sellaisia että voimalinja luettaisiin eri luokkaan.

Tyyppihyväksynnän ulkopuolelle rajattujen sähköavusteisten pyörien tulee täyttää koneturvalisuus- 2006/42/EC, tuoteturvallisuus- 2001/95/EC , matalajännite-2014/35/EU, EMC 2014/30/EU ja RoHS 2011/65/EU normit (Bike Europe 2017). Matalajännitedirektiivissä käsitellään sähkölaitteita, jotka toimivat tasavirralla jännitealueella 75-1000 V, joka todennäköisesti ylittää suunniteltavan voimalinjan jännitealueen. Tällöin voimalinjan tulee noudattaa vain tuoteturvallisuus normia 2001/95/EC (Low Voltage Directive 2014). Sähköpyörille on lisäksi luotu oma standardi EN15194:2017 (Bike Europe 2017). Moottoria suunniteltaessa keskitytään pääasiassa normien ja standardien mekaniikalle asettamiin vaatimuksiin.

EN 15194:2017

EN 15194:2017 on 2017 uudistettu painos ko. standardista, jossa on huomioitu konedirektiivin vaikutukset sähköavusteisiin polkupyöriin. Standardi koskee ainoastaan tyyppihyväksynnän ulkopuolelle rajattuja sähköavusteisia polkupyöriä, joten ko. standardi asettaa suurimmat rajoituksen voimalinjan suunnittelulle. Taulukossa neljä on esitelty standardin vaatimukset sähköpyörän moottorin suunnittelulle.

TAULUKKO 4. EN15194:2017 standardin asettamat vaatimukset voimalinjan suunnittelulle vapaasti suomennettuna (European Committee for Standardization 2017).

Vaatimukset voimalinjan mekaniikalle
Moottorin pitää kytkeytyä pois vikatilanteessa ja takaisinkytkentä vaatii käyttäjän toimenpiteitä. (Polkemista ei lasketa käyttäjän toimeksi.)
Moottorin teho mitoitetaan EN 60034-1 standardin mukaan, jossa moottorin lämpötasapaino saa vaihdella mittausjakson aikana korkeintaan 2 K. Jos teho mitataan suoraan moottorin akselilta, se tulee jakaa 1,10, jotta otetaan huomioon mittauksen epätarkkuus, sekä edelleen 1,05, jotta huomioidaan vaihteiston häviöt, ellei todellisia arvoja ole määritelty.
Kokoonpannun EPAC:n sähkökomponentit tulee testata standardin EN 60529:1991 mukaan ja niiden tulee täyttää IPX4 luokitus.

Sähkökomponenteilla tulee olla riittävä mekaaninen kestävyys, jotta ne kestävät sellaista rajua käsittelyä, jota voi polkupyöräkäytössä esiintyä.
EPAC:n nopeus, jossa moottori avustaa saa poiketa korkeintaan +10 % määritellystä maksimi avustusnopeudesta.
EPAC voidaan varustaa talutusavustimella, joka toimii korkeintaan 6 km/h nopeuteen.
Moottori voi avustaa ainoastaan eteenpäin poljettaessa
Avustus tulee katkaista, kun pyöräilijä lopettaa polkemisen. Moottori ei saa avustaa yli kahta metriä polkemisen lopettamisen jälkeen.
EPAC ajoneuvoa tulee olla mahdollista ajaa vähintään 10 km/h nopeuteen asti, mikäli avustus lakkaa toimimasta tai akku on kytketty irti.
Osat, jotka voivat tulla kosketuksiin polkijan käsien, jalkojen tai muiden ruumiinosien kanssa eivät saa olla teräviä.
Mikäli pyörä on varustettu jalkajarrulla, jarrun tulee kytkeytyä polkijan painaessa poljinta päinvastaiseen suuntaan poljinsuunnasta. Jarrun tulee toimia kaikilla vaihteilla. Poljinasennon ja jarruasennon ero poljinkulmassa ei saa ylittää 60 astetta. Mittaus tulee suorittaa pitämällä kampea kumpaakin asentoa vastaan vähintään 250 N voimalla vähintään minuutin ajan.
Vasen poljin eteenpäin menevässä asennossa, paina poljinta asteittain lisääntyvällä voimalla 1500 N asti. Ylläpidä voima yhden minuutin ajan. Toista mittaus oikea poljin eteenpäin menevässä asennossa. Kuvatun tavan mukaan testatessa voimalinjassa ei tule olla vaurioita, eikä ajokykyä tule menettää.

2.4 Suunnitteluvaatimukset

Tilaajan vaatimusten, markkina-analyysin ja standardien sekä normien asettamien rajoitusten pohjalta koostettiin voimalinjalle suunnitteluvaatimukset. Koostetuissa vaatimuksissa ei huomioitu kaikkia tilaajalta saatuja vaatimuksia kuten kierrätettävyyttä sillä se vaatisi huomattavaa panostusta ja selkeää käsitystä voimalinjan lopullisesta mallista ja materiaalivalinnoista.

Työn tavoitteina oli ensisijaisesti kehittää konsepti, joka ratkaisisi tilaajan kuvaamat ongelmat sähköpyörissä. Konseptista tuli selvittää onko se teknisesti mahdollista toteuttaa eli suoriutuuko keskiömoottori tyypillisistä pyöräilyssä esiintyvistä kuormista.

Osa tavoitteista, kuten voimalinjan lopullista painoa, jälleenmyyntihintaa ja kestävyyttä, ei työssä käsitellä täydessä laajuudessa, sillä ne vaatisivat huomattavaa paneutumista ja tarkemman mekaniikkasuunnittelun toteutusta. Tavoitteet pidetään kuitenkin mielessä konseptitason ratkaisuja valitessa, jotta mekaniikkasuunnitteluvaiheessa olisi paremman mahdollisuudet onnistua myös näiden tavoitteiden kohdalla.

TAULUKKO 5. Suunnitteluvaatimukset voimalinjalle

Lähde	Vaatus	
Tilaaja	Mekaanikka	Käyttöikä 10 vuotta tai 30 000 km
		Hiljainen
		Huoltovapaa
		Integroitu vaihteisto
		Integroitu pyörän runkoon
		Pieni Q-kerroin
		Hyvä hyötysuhde
Tilaaja, EN15194:2017	Mekaanikka	Raskas ulkokäyttö, iskunkestävä
EN15194:2017		Toimii ilman sähköjä
		IPx4
		Ei teräviä kulmia osissa jotka ovat kosketuksissa käyttäjän kanssa
Kilpailija-analyysi	Mekaanikka	Kestää 1500 N voiman polkimella
		Paino 2,88-6.4 kg
Normi	Elektroniikka	Maks. jatkuva teho 250 W
EN15194:2017		Käyttöjännite < 75 V
		Avustaa vain poljettaessa
	Avustaa ainoastaan eteenpäin poljettaessa	
Tilaaja	Teollinen muotoilu	Tyylikkään näköinen
	Muut	Jälleenmyyntihinta ~350 €
Kilpailija-analyysi	Suorituskyky	Vääntö takarenkaalla 125-200 Nm
		Vääntö moottorilta 60-120 Nm
		Maksimiavustus 300-410 %

3 VAIHTEISTOTEKNIIKAN ESISELVITYS

Konseptoinnissa voimalinjalle vaihteiston ratkaisuksi selvitettiin erilaisia vaihtoehtoja tutustumalla jo polkupyörissä käytössä oleviin tekniikoihin, jotta ymmärrettäisiin kunnolla tekniikoiden rajoitukset ja hyödyt. Polkupyörätekniikoiden lisäksi tutkittiin autoissa ja erityisesti hybridiautoissa käytettyjä vaihtoehtoja, sillä autojen hybriditekniikassa käytettyjä sovellutuksia voidaan soveltaa pitkälle myös polkupyörissä. Autoissa polttomoottorin toimintaa pyritään keventämään sähkömoottorilla, kun taas polkupyörissä polkijan tekemää työtä pyritään vähentämään sähkömoottorilla. Lisäksi molemmissa sovellutuksissa yhden akselin kierrosnopeus pyritään pitämään vakiona.

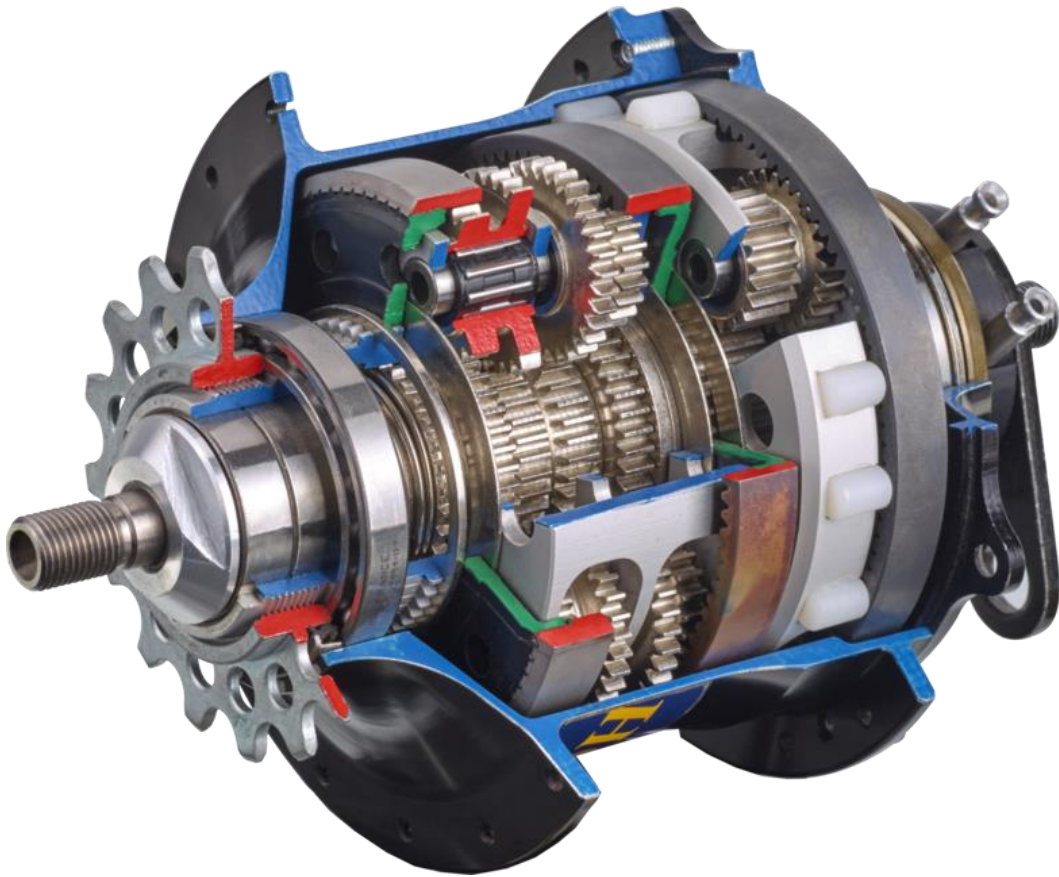
3.1 Perinteisten vaihtoehtojen vertailu

Useimmiten käytössä olevat perinteiset polkupyörrien vaihteistot voidaan jakaa kahteen osioon – ketjuvaihteistot ja napavaihteistot. Näistä löytyy erilaisia variaatioita, joita käydään tarkemmin läpi alla. Lisäksi on olemassa perinteistä auton manuaali - vaihdelaatikkoa muistuttavia vaihteistoja, jotka kiinnitetään polkupyörän keskiöön, mutta tämän tyyppiset ratkaisut ovat tuotantopyörissä edelleen harvinaisia.

Napavaihde

Perinteinen napavaihteisto (kuva 1) on kenties useimmiten polkupyörissä käytetty vaihteiston tyyppi. Napavaihteiston etuina voidaan pitää säältä suojattua rakennetta, kompaktia kokoa, sekä luotettavuutta. Napavaihteistossa välityksen muunnos toteutetaan useille planeettavaihde konstruktiolla, joka on todettu polkupyöräkäytössä erittäin toimivaksi ja huoltovapaaksi ratkaisuksi. (Shimano Europe B.V n.d)

Napavaihteisto ovat kuitenkin melko painavia ketjuvaihteisiin verrattuna ja näin ollen lisäävät täysjousitetuissa pyörissä jousittamatonta massaa, jonka vuoksi niitä harvoin käytetään maastopyörissä. Lisäksi napavaihteella vaihdetta ei voi vaihtaa vedon ollessa päällä. Valmistajasta riippuen napavaihteistoilla voidaan saavuttaa suuriakin välityssuhteita (Rohloff AG n.d).



KUVA 1. Rohloffin valmistama polkupyörän 14-vaihteinen napavaihteisto. (Rohloff AG n.d)

Ketjuvaihte

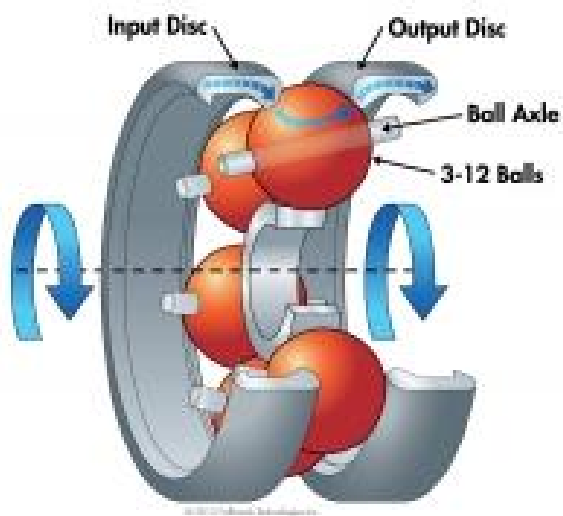
Toinen yleinen, etenkin maasto- ja hybridipyörissä käytetty, vaihteistotyyppi on ketjuvaihte (kuva 2). Ketjuvaihteiden etuina voidaan pitää kevyttä painoa, suuria välityssuhteita, hyvää hyötysuhdetta, sekä mahdollisuutta vaihtaa vaihdetta vedon ollessa päällä (CyclingPowerLab, n.d). Ketjuvaihteet ovat rakenteensa vuoksi kuitenkin erittäin alttiita lialle sekä mekaanisille vaurioille. Työn tilaajaan mukaan etenkin keskiömoottorilla varustetussa sähköpyörässä esiintyvä tyypillinen vika on ketjujen katkeaminen vaihtaessa vaihdetta usea pykälä kerralla.



KUVA 2. Polkupyörän ketjuvaihteisto (Sram LLC 2016)

Nuvinci CVT

Nuvinci on polkupyörän takanapaan integroitu, ulkoisesti napavaihteistoa muistuttava, jatkuvasti muuttuvanopeuksinen vaihteisto. Nuvincissa välityksen muutos on toteutettu toroidal tyypisellä, kahden kehän väliin sijoitettujen kuulien ja kehien kosketuspintojen halkaisijaa muuttamalla. (Nikowitz 2016, 327)



KUVA 3. Nuvinci vaihteiston toimintaperiaate (Fallbrook Technologies n.d)

Nuvinci -vaihteiston etuina on jatkuvasti muuttuvanopeuksinen vaihteisto, joka pitää polkijan kadenssin paremmin optimialueella. Käytetyn mekaniikan ansiosta välityksen muuttaminen on mahdollista myös vedon ollessa päällä. Nuvinciin on saatavilla elektronisesti vaihteistoa ohjaava lisäosa, joka pitää halutun kadenssin nopeuden muuttuessa – eli pyörän vaihteisto toimii täysin automaattisesti. (Fallbrook Technologies n.d)

Perinteisemmän napavaihteiston tapaan kuitenkin myös Nuvinci lisää pyörän jousittamatonta massaa. Lisäksi Nuvincin vaihteistot on mitoitettu korkeintaan 130 Nm hetkelliselle momentille, minkä vuoksi se on heikko vaihtoehto erityisesti raskaassa maastopyöräkäytössä. (Fallbrook Technologies n.d)

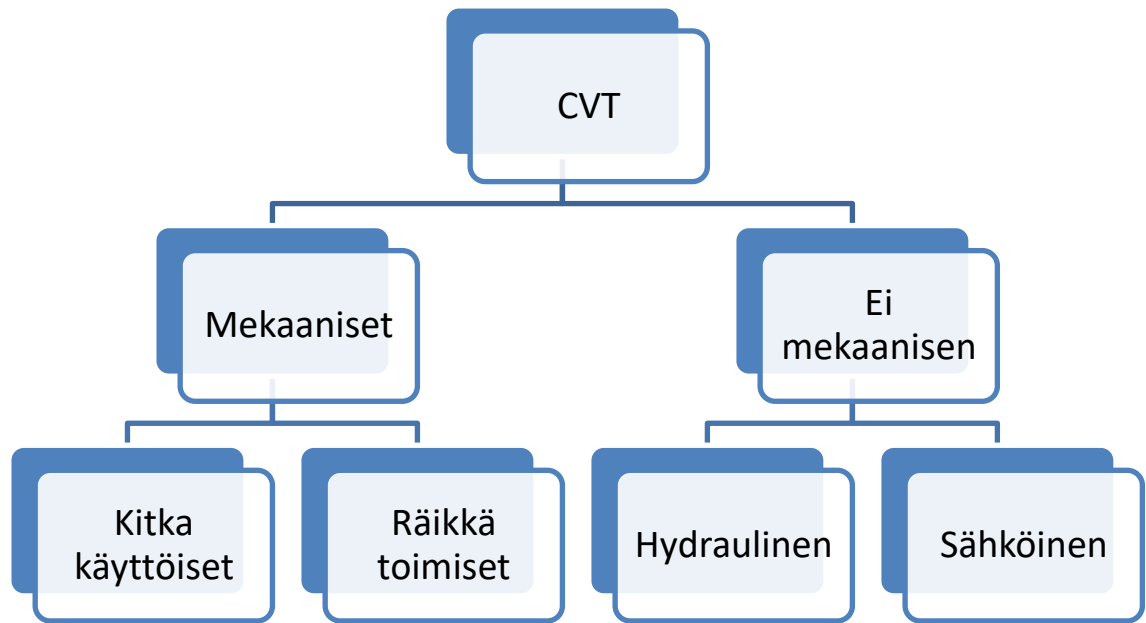
Towards understanding the design of integrated extersion tutkielmassa käsiteltiin käyttäjäkokemusta sähköpyöristä, joiden avustus muuttuu käyttäjän ruumiin liikkeen mukaan. Tällainen automaattinen mekanismi koettiin käyttäjissä lisäävän tunnetta, jossa pyörä koetaan luonnolliseksi kehon jatkeeksi. Voidaan siis olettaa, että vastaavasti automaattisesti toimiva jatkuvasti muuttuvanopeuksinen vaihteisto lisää tätä samaa tunnetta. (Andres, Hoog & Mueller n.d)

Nykyisistä sähköpyörien moottorivalmistajista Continental käyttää Nuvinci -vaihteistoa integroituna Revolution moottoriin (Continental AG n.d). Kokeillessa Continental Revolution moottoria on käyttäjäkokemus huomattavasti parempi verrattuna perinteisillä vaihteistoilla varustettuihin pyöriin. Revolution moottorissa käyttäjä voi asettaa haluamansa kadenssin ja avustustason, jonka perusteella moottori säättää toimintaansa. Portaaton jatkuvasti muuttuvanopeuksinen vaihteisto yhdistettynä polkijan poljinvoiman perusteella ohjattavaan sähkömoottorin luo todella luonnollisen tuntuksen vaikutelman.

3.2 Muut CVT vaihteistoperiaatteet

Omissa kokeiluissa ja muiden käyttäjäkokemuksia lukiessa portaaton jatkuvasti muuttuvanopeuksinen vaihteisto on todettu käyttäjäkokemuksen kannalta parhaaksi vaihtoehdoksi, joten eri vaihtoehtoja toteuttaa tällainen vaihteisto selvitettiin tarkemmin.

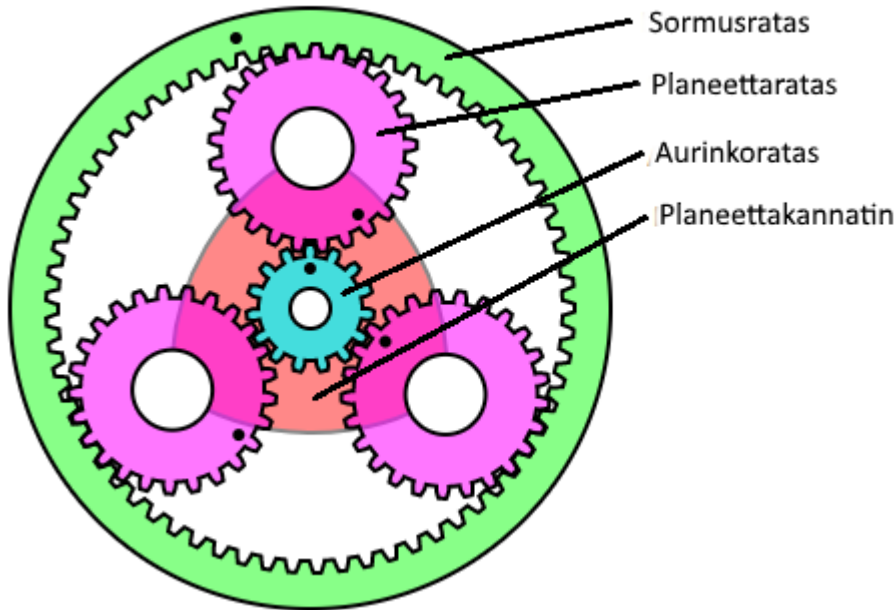
Polkupyöräkäytössä esimerkkejä löytyy Nuvincin ohella vähän, joten eri vaihtoehtoja vertailtiin automaailman esimerkkien avulla. Autoissa erilaisia CVT-vaihteistoja on käytetty jo pitkään, joten kirjallisuutta ja erilaisia konstruktioita on runsaasti saatavilla. Eri periaatteita toteuttaa CVT-vaihteisto löydettiin neljä kappaletta, joilla kullakin on omat ominaispiirteensä ja käyttökohteensa (kuva 4).



KUVA 4. Jaottelu erityyppisistä CVT-vaihteistoista (Mashadi & Crolla 2012, muokattu).

3.2.1 Planeettavaihteen toiminta

Planeettavaihteistolla toteutettu CVT -vaihteisto on tyypillinen useissa automalleissa käytetty vaihteistoratkaisu. Planeettavaihteessa (kuva 5) kolme osaa; aurinkoratas, planeetakannattimeen kiinnitetyt planeettarattaat, sekä sormusratas muodostavat halutun kiinteän välityssuhteen yhden osan ollessa paikallaan. Aurinkoratas, planeetakannatin ja sormusratas pyörivät saman akselin ympäri, mikä tekee planeettavaihteesta kompaktin kokoisen. Erityisen mielenkiintoista planeettavaihteella toteutetussa CVT -vaihteisto ratkaisussa on sen yksinkertaisuus ja perinteisten rattaiden käyttö, jotka on todettu luotettavaksi ja kestäväksi autojen vaihdelaatikoissa jo pitkältä ajalta.



KUVA 5. Kolmella planeettarattaalla varustettu planeettavaihte (The Catalystis n.d, muokattu)

Yhdellä planeettaratas konstruktiolla voidaan tehdä kolme eri kiinteää välityssuhdetta pitämällä yhtä osaa paikallaan. Planeettavaihteen välityssuhde voidaan laskea käyttämällä yhtälöä (1)

$$N_s \omega_s + N_p \omega_p - (N_s + N_p) \omega_c = 0 \quad (1)$$

jossa $\omega_s, \omega_p, \omega_c$ ovat aurinko- ja planeettarataan, sekä planeettakannattimen kulmanopeudet (rad/s), N_s ja N_p ovat aurinko- ja planeettarattaiden hammasten lukumäärä, sekä yhtälöä (2)

$$N_r \omega_r + N_p \omega_p - (N_r + N_p) \omega_c = 0 \quad (2)$$

jossa $\omega_r, \omega_p, \omega_c$ ovat sormus- ja planeettarataan, sekä planeettakannattimen kulmanopeudet (rad/s), N_r ja N_p ovat sormus- ja planeettarattaiden hammasten lukumäärä. Yhtälöiden mukaan välityssuhde voidaan laskea, kun tiedetään kahden rataan hampaiden lukumäärä ja kahden rataan kulmanopeus.

Aurinkorattaan ja planeetakannattimen välityssuhde voidaan nyt laskea hyödyntäen osien kulmanopeuksia kaavalla (3)

$$n = \frac{\omega_s}{\omega_c}, \quad (3)$$

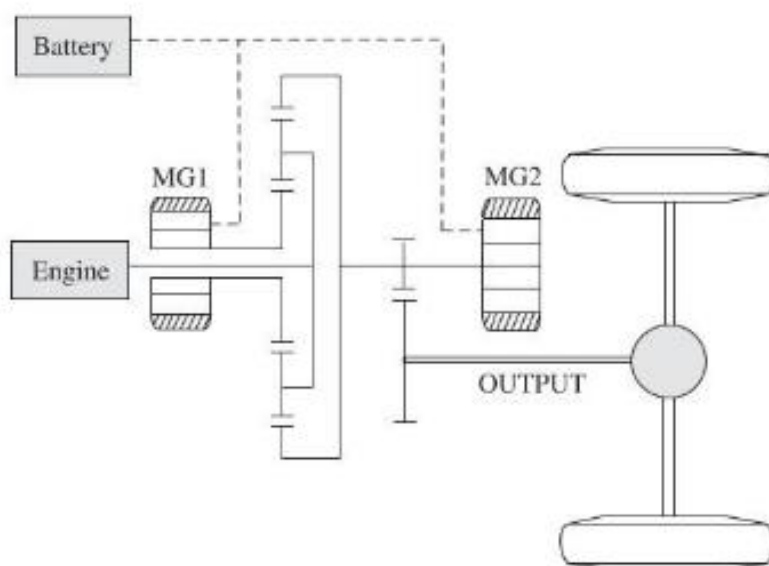
jossa n on välityssuhde, ω_s ja ω_c on aurinkorattaan ja planeetakannattimen kulmanopeus. Välityssuhteen avulla voidaan edelleen laskea eri planeetarattaan osien momentti kaavalla (4)

$$M_1 = nM_2, \quad (4)$$

jossa M_1 on momentti ajavalla rattaalla, M_2 momentti ajettavalla rattaalla ja n välityssuhde.

3.2.2 eCVT

Yksi tapa ohjata planeetta CVT -vaihteistoa on käyttää sähkömoottoria liitettynä ohjaavaan osaan. Toyotan käyttää hybridautoissaan sähköisesti ohjattua eCVT -vaihteistoa, jossa polttomoottori on kiinnitetty planeetakannattimeen, ohjaavana rattaana toimii aurinkoratas, jota ohjaa moottori MG1 ja vetävänä rattaana toimii sormusratas (kuva 6). Lisäksi Toyota on lisännyt voimalinjaansa vielä erillisen toisen sähkömoottorin MG2, joka on kiinnitetty suoraan vetävään rattaaseen. Tällä konstruktiolla Toyotan hybridi voimalinjaa on mahdollista käyttää pelkästään sähköisenä, sähkön ja polttomoottorin yhdistelmällä tai pelkästään polttomoottorilla. Lisäksi konstruktiolla voidaan toteuttaa regeneroiva jarrutus moottorilla MG1 ja akkujen lataus auton seistessä kun MG1 on paikoillaan, polttomoottori pyörii ja MG2 toimii generaattorina. Huomattavaa voimalinjassa on sen yksinkertainen mekaaninen rakenne, jossa yhdellä planeetarattaalla on saatu toteutettua koko vaihdealueen toiminta.



KUVA 6. Toyota eCVT voimalinja (Mi, Masrur & Gao 2011, 74)

eCVT -tyyppisessä vaihderatkaisussa tehoa välitetään perinteisten hammasrattaiden, sekä sähkömoottorien välityksellä, jotka molemmat ovat hyötysuhteeltaan hyvällä tasolla. Nopeudesta ja tilanteesta riippuen Toyotan esimerkkitapauksessa toista moottoria voidaan käyttää generaattorina johtuen auton laajasta nopeusalueesta, mikä laskee kokonaishyötysuhdetta jonkin verran.

Planeettarattaiden käyttö on polkupyöräteollisuudessa yleistä esimerkiksi polkupyörien napavaihteistoissa ja sähköpyörien napamoottoreissa, joista kumpaakin on saatavilla varsin edullisina komponentteina.

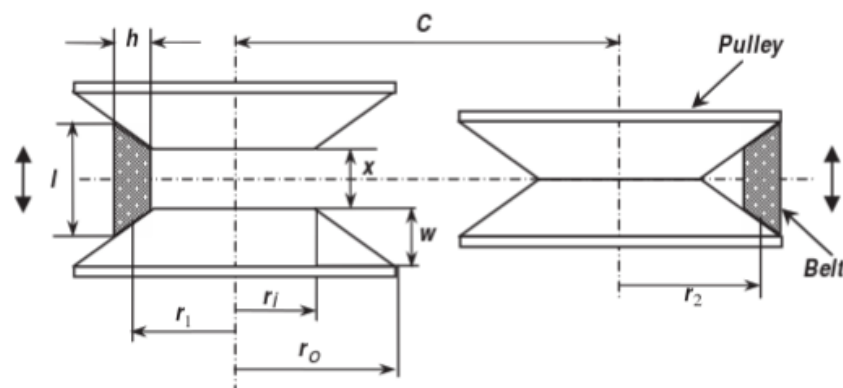
3.2.3 Hydraulinen

Vastaavasti planeetta CVT -vaihteiston voi toteuttaa hydraulisesti ohjattuna, josta esimerkkejä löytyy mm. Agcon traktoreihin suunnitellusta vaihteistosta, jossa ohjainratas ohjataan hydraulimoottorilla, joka saa tehonsa moottorin akselille kiinnitetystä hydraulipumpusta. Traktorikäytössä vaihteiston läpi kulkevat tehot ja momentit ovat suuria etenkin ryömintävaihteilla. Tällöin ohjaavan osan läpi kulkee myös suuri momentti, joka ohjainmoottorin tulee hallita. Tässä tapauksessa hydraulimoottorin käyttö on järkevää, koska sillä on mahdollista hallita suuria momenteja pienellä moottorilla. Lisäksi traktoreissa on muut hydraulikäytön vaatimat toiminallisuudet valmiina.

Pyöräkäytössä hydrauliiikan lisääminen vaatisi paljon osia ja pääsääntöisesti hydrauliiikkakomponentit on mitoitettu huomattavasti suuremmille tehoille, joten valmiita komponentteja ei ole markkinoilla saatavilla.

3.2.4 Kitkatoiminen CVT

Kitkatoimiset CVT-vaihteistot välittävät voimaa kahden pinnan kitkan kautta. Kitkatoimiset CVT:t voidaan edelleen jakaa kahteen alaryhmään hihnatoimiset (kuva 7) sekä toroidal tyyppiset vaihteistot, joka on esitetty kuvassa kahdeksan. Nuvinci -vaihteisto voidaan lukea myös toroidal tyyppiseksi kitkatoimiseksi vaihteistoksi.

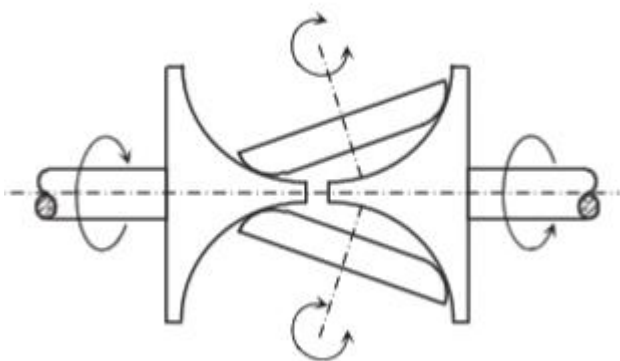


KUVA 7. Tyypillisen variaattori CVT:n rakenne (Mashadi & Crolla 2012, 325)

Kitka CVT-vaihteistoissa saadaan melko yksinkertaisella konstruktiolla rakennettua portaaton vaihteisto, joka kykenisi välittämään polkupyöräilyssä esiintyvät voimat. Yksi kitka CVT -vaihteiston haittapuolia on kuitenkin luistaminen kontaktipintojen välillä, mikä synnyttää lämpöä, edistää kulumista ja heikentää hyötysuhdetta. Efficiency optimization of the push-belt CVT by variator slip control raportin mukaan (2006, 10) kitkatoimisen CVT-vaihteiston hyötysuhde on parhaimmillaankin vain 87%.

3.2.5 Toroidal vaihteisto

Toroidal vaihteisossa (kuva 8) välityksen säätö tapahtuu kahden kartiomaisen osan väliin sijoitetuilla kiekkoilla. Kiekkojen kulmaa muuttaessa välityssuhde muuttuu. Toroidal -tyyppisellä vaihderatkaisulla saadaan toteutettua pieneen tilaan mahtuva CVT -vaihteisto kuten Nuvinci vaihteiston tapauksessa pyörän napaan sijoitettu vaihteisto.



KUVA 8. Toroidal tyyppinen vaihteisto (Mashadi & Crolla 2012, 327)

Toroidal -tyyppisten vaihteistojen valmistaminen suurissa volyyymeissä on kuitenkin kallista, sillä vaadittavat komponentit poikkeavat paljon perinteisistä vaihteistokomponenteista (Bonheur 2017) ja vaativat tarkkaa koneistusta. Heitot toleransseissa aiheuttavat kartioiden väliin sijoitettujen kiekkojen kulmamuutoksia, joista seuraa yksittäisten kiekkojen toimiminen hieman eri välityssuhteilla. Tästä seuraa luistoa ja kulumista vaihteistossa, mikä heikentää vaihteiston hyötysuhdetta. (Walker, Durack & Durack 2014, 8)

3.3 Vaihtoehdon valinta

Monelta kannalta Toyotan eCVT vaihteiston toimintaympäristö muistuttaa pitkälti samaa mitä polkupyöräkäytössä halutaan. Toyotan ratkaisussa polttomoottorin kierrosnopeus halutaan pitää vakiona, kun taas polkupyöräkäytössä polkijan kadenssi pyritään pitämään vakiona. Molemmissa tapauksissa liikkumista avustaa sähkömoottori.

Kun huomioidaan eCVT vaihteiston muut hyödyt, kuten yksinkertainen, kompakti rakenne, pitkälti massatuotanto osista koostuvat komponentit ja hyvä kokonaisyötysuhde päätettiin konseptointia jatkaa eteenpäin tähän ratkaisuun perustuen.

4 VOIMANSIIRRON KONSEPTOINTI

Voimansiirron mitoitusta varten mietittiin käyttöympäristöjä, joissa sähköpyöriä käytetään. Eri sähköpyöristä etenkin maastopyöriä käytetään usein pienillä vaihteilla, jolloin takarenkaalle saadaan hitaan ajon ja jyrkkien mäkien nousemisen mahdollistava korkea momentti. Toisaalta maantiekäytössä pitkissä nousuissa moottorien kokonaisteho saattaa kasvaa suuremmaksi, mikä luo omat haasteensa lämpökuormien hallintaan, moottorien mitoitukseen ja hyötysuhteen mitoittamiseen. Tilaajan on tarkoitus käyttää kilpailijoistaan poiketen yhtä moottorimallia kaikissa eri luokan pyörissä, joten moottorin suunnittelussa tulee huomioida useita eri käyttöympäristöjä.

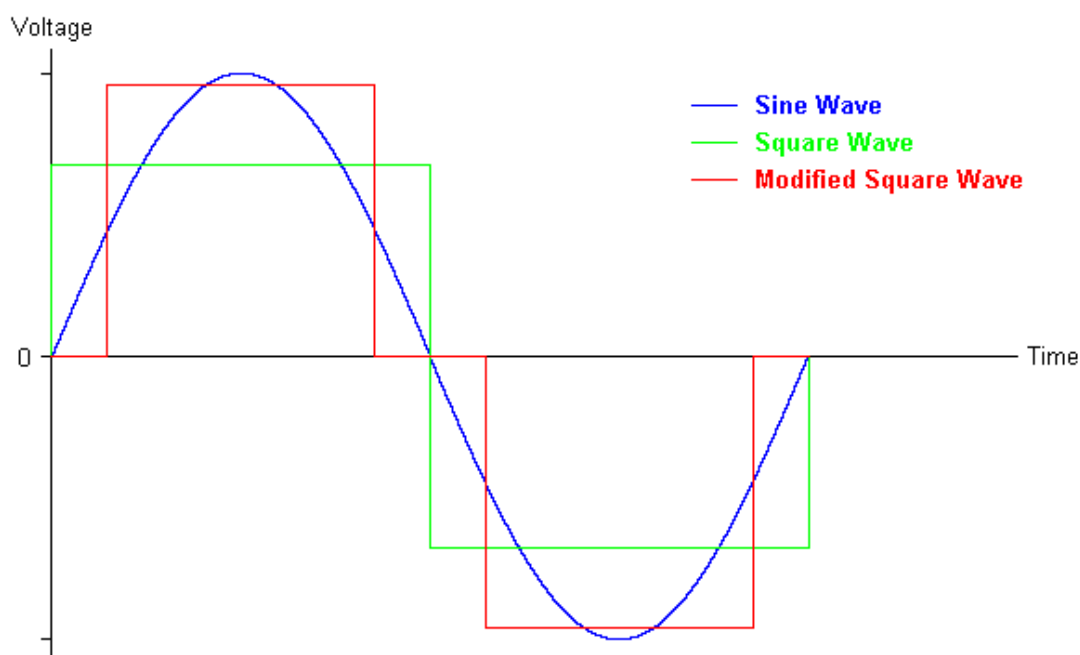
Toytotan hybridimoottorin rakenteeseen perustuen oli selvää, että voimalinja tulisi koostumaan seuraavista pääosista;

- Polkimet ja poljinakseli
- Vaihteiston välitystä ohjaava ohjausmoottori
- Polkijaa avustava avustusmoottori
- Välityksen muuntamisesta vastaava pääplaneettavaihde

Lisäksi voimalinjassa on mahdollista käyttää alennusvaihteita ohjaus- ja avustusmoottoreille.

4.1 Moottorin mitoituksen teoriaa

Voimalinjassa käytetään kaupallisesti saatavilla olevia BLDC -moottoreita eli hiiliharjattomia tasavirtamoottoreita. BLDC -moottoria voi ohjata kuvion yksi mukaisella kanttiaallolla tai sinimuotoisella aallolla eli niin kutsutulla vektoriohjauksella, jolla saavutetaan pienempi käyntiääni ja parempi hyötysuhde (Texas Instruments 2018). Tilaajan tuotteella pyritään premium -markkinaan, jossa moottorin käyntiääni ja hienostunut ohjaus ovat tärkeitä osa-alueita, joten moottorin ohjaus tullaan toteuttamaan vektoriohjauksella.



KUVIO 1. BLDC -moottorinohjauksen eri vaihtoehdot (Collins 2016)

Akkukäyttöön yhdistettynä moottorin tehoa voidaan mitata ja tarkkailla helpommin mittaamalla suoraan akulta otettavaa tasajännitettä ja virtaa, sillä muu elektroniikan vievä teho on häviävän pieni verrattuna moottorin tehoon. Tällöin teho voidaan laskea tasasähkön tehon kaavalla (5)

$$P = UI, \quad (5)$$

jossa U akun jännite ja I akusta otettu virta.

Vastaavasti polkijan tuottamaa tehoa voidaan mitata kaavalla (6)

$$P = M\omega, \quad (6)$$

jossa M on polkijan poljinakselille tuottama momentti ja ω akselin kulmanopeus.

4.2 Ajomoodien määrittely

Moottorin toiminnan pohjalle määritettiin eri moodit, joissa moottoria saatetaan käyttää, sekä näille moodeille tyypilliset piirteet. Hidasajoa käytetään erityisesti maastopyörissä hankalassa maastossa tai jyrkissä nousuissa. Taulukossa kaksi on tutkittu

takarengasmomenteja perinteisillä vaihteistoilla yhdistettynä parhaimpiin kaupallisesti saatavilla oleviin osasarjoihin. Moottorien markkinoinnissa käytetään usein moottorien momenttilukemia, joskin todellisessa ympäristössä pienimmällä vaihteella moottorin ja polkijan tuottama momentti takarenkaalla ylittää usein pidon rajan. Hidasajon ylärajaksi asetettiin 10 km/h. Voimalinjan mitoitus suunniteltaessa moottorin tuottama momentti 1:1 välityksellä takarenkaalle pyritään saamaan markkinoiden tämän hetken parhaan moottorin tasolle 120 Nm polkijan kadensseilla 60-120 rpm.

Matka-ajossa moottorin tuottama momentti on tyypillisesti pienempi, mutta vastaavasti pyörintänopeudet ja kokonaistehot voivat olla suurempia etenkin sähkömoottorin osalta. Muuta huomioitavaa matka-ajossa on tyypillisesti pidempi kesto, mikä asettaa tiukemmat vaatimukset hyötysuhteelle. Voimalinjaa suunniteltaessa hyötysuhdetta pyrittiin mitoittamaan optimiksi yli 10 km/h nopeuksille.

Rullatessa polkija ei pyöritä poljinakselia, eikä standardin mukaan moottori saa avustaa. Rullaavassa tilanteessa voimalina tulee kytkeä irti takarenkaan rullauksesta. Perinteisesti tämä irtikytkentä on toteutettu takanavassa, vaihteiston yhteydessä sijaitsevalla vapaavaihteella. Tässä tapauksessa, kun vaihteisto on sijoitettu moottorin sisään ei perinteistä vapaaratasta pyörän navassa välttämättä tarvita. Polkimet, sekä sähkömoottorin toiminta tulee kuitenkin kytkeä irti takarenkaan pyörinnästä, sillä kestopoljettu BLDC -moottori tuottaa pyöriessään ns. cogging efektin, joka vastustaa pyörivää liikettä ja näin ollen hidastaisi pyörän nopeutta rullatessa. eCVT -konstruktiolla on useita mahdollisuuksia estää polkimien pyörimistä ohjaamalla planeettavaihteen ohjaavaa osaa yhtälön yksi mukaan niin, että akselin jolle polkimet on kiinnitetty nopeus pysyy nollassa. Hahmotellusta konstruktiosta riippuen tämä ei kuitenkaan poista BLDC -moottorin cogging efektiä, mikäli moottori on kiinnitetty suoraan ketjurataan kanssa samalle akselille kuten Toyotan hybridauton tapauksessa.

Kiihdytyksessä sekä moottorien pyörintänopeus, tuottama avustusmomentti, sekä polkijan teho ja momentti ovat kaikki korkeita, mikä asettaa tiukat vaatimukset polkijan kadenssia ohjaavan ohjausmoottorin mitoitukselle. Nopea kiihtyvyys on kuitenkin yksi sähköpyörästä haluttavan tekevä tekijä, joten kiihtyvyyden osaltakin moottorin toiminnan pitää vastata nykyisiä markkinajohtajia. Kiihtyvyydelle ei määritellä tarkkoja arvoja, vaan moottorin toimintaa testataan markkinajohtajan moottorista mitattua dataa vastaan.

Yksi eduista, joita integroidulla eCVT -vaihteistolla yhdistettynä keskiömoottoriin voidaan saavuttaa, on mahdollisuus regeneroivaan jarrutukseen, jossa moottorilla ladataan akkuja pyörää hidastaessa. Tämä vaatii kuitenkin sen, että vapaavaihdetta ei ole toteutettu pyörän takanapaan, mikä taas asettaa omat vaatimuksensa moottorin suunnittelulle kuten on aiemmin kuvailtu. Mahdollisuus regeneroivaan jarrutukseen olisi tilaajalle selvä kilpailuetu, sillä muista markkinoilta löytyvistä keskiömoottoreista tällaista toiminnallisuutta ei löydy. Voimalinjaa suunniteltaessa regeneroivaa jarrutus pidettiin mielessä optiona, mutta sitä ei kuitenkaan asetettu ehdottomaksi tavoitteeksi.

Konseptoinnissa suuri haaste oli ratkaista moottorin toiminta myös tilanteessa, jossa sähköpyörän akku loppuu. Akun loppumista voidaan ehkäistä älykkäillä ratkaisuilla, jotka vähentävät moottorin tuottamaa avustusta automaattisesti pyörän akun varauksen vähentyessä. Pyörällä tulee kuitenkin olla mahdollista polkea myös akun loppuessa. EN15194 standardi määrittelee, että pyörää tulee olla mahdollista polkea akun loppuessa vähintään 10 km/h nopeuteen asti. Pieni hyötysuhteen heikkeneminen on hyväksyttävää verrattuna perinteisellä ketjuvaihteistolla varustettuun pyörään, sillä usein sähköpyöräkäytössä tämä on erikoistilanne.

4.3 eCVT planeettavaihteiston kolme toimintaperiaatetta

Moottoria suunniteltaessa voimalinjan välitys, planeettavaihteen mitoitus ja ohjausmoottorin toiminta voidaan toteuttaa kolmella tavalla. Kussakin tavassa on omat hyödyt ja haitat sekä selvät vaikutukset moottorin mitoitukseen.

Periaate yksi

Tilanteessa yksi pyörässä on suurin vaihde päällä, kun planeettavaihteen ohjaava osa on paikoillaan. Kun välitystä halutaan kasvattaa, pyöritetään ohjaavaa osaa vastakkaiseen, negatiiviseen suuntaan muihin osiin nähden. Negatiivisella nopeudella pyöriessä ohjausmoottori toimii generaattorina halliten ohjaavan osan nopeutta. Tässä tapauksessa toisen moottorin tehoa ei voida millään tavalla hyödyntää osana voimalinjan tuottamaa kokonaistehoa, mikä laskee voimalinjan tehopainosuhdetta. Lisäksi generaattorikäyttö asettaa kovemmat vaatimukset avustavalle moottorille, sillä tämän täytyy tuottaa sekä polkijaa avustava teho, että ohjausmoottorin generoiva teho. Lisäksi ohjaavan osa tulee olla mahdollista pitää paikoillaan avustusmoottorin nopeuden ollessa nolla, mikä vaatisi perinteiseltä BLDC -moottorilta erittäin korkeita vaihevirtoja. Moottorin käyttö akun

loppuessa olisi mahdollista käyttämällä ohjainmoottoria generaattorina sopivan välityksen saavuttamiseksi ja syöttämällä generoitu virta avustavalle moottorille.

Vaihteiston välityssuhde voidaan laskea kaavan yksi, kaksi ja kolme mukaan aurinkorattaan positiivisella pyörintänopeudella. Kun ohjaavana osana toimivan aurinkorattaan kierrosnopeus on $0 \frac{r}{\text{min}}$ ja planeetakannattimeen kiinnitetyn poljin akselin kierrosnopeus on $80 \frac{r}{\text{min}}$ on sormusrattaan kierrosnopeus

$$50 \cdot 0 + 25 \cdot \omega_p - (50 + 25) \cdot \frac{80 \frac{r}{\text{min}}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0$$

$$100 \cdot \omega_r - 25 \cdot \omega_p - (100 - 25) \cdot \frac{80 \frac{r}{\text{min}}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0$$

$$\omega_r \approx 13 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_p \approx 25 \frac{\text{rad}}{\text{s}},$$

Jolloin vaihteiston välityssuhde planeetakannattimelta sormurattaalle on

$$n = \frac{13 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{80 \frac{r}{\text{min}}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \approx 1,6.$$

Jos aurinkorattaan pyörimisnopeus on negatiivinen eli se pyörii vastakkaiseen muiden osien kanssa, vaihteiston välityssuhde on

$$50 \cdot -10 \frac{\text{rad}}{\text{s}} + 25 \cdot \omega_p - (50 + 25) \cdot \frac{80 \frac{r}{\text{min}}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0$$

$$100 \cdot \omega_r - 25 \cdot \omega_p - (100 - 25) \cdot \frac{80 \frac{r}{\text{min}}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0$$

$$\omega_r \approx 18 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_p \approx 45 \frac{\text{rad}}{\text{s}},$$

$$n = \frac{18 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{80}{60} \frac{\text{min}}{\text{min}} \cdot 2 \cdot \pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \approx 2,1.$$

Aurinkorattaan teho voidaan laskea hyödyntäen kaavaa viisi. Aurinkorattaan kulmanopeuden ollessa negatiivinen voidaan todeta myös tehon olevan negatiivinen, jolloin aurinkorattaaseen kytketty ohjainmoottori toimii generaattorina.

Periaate kaksi

Toinen ääripää planeettavaihteen mitoitukselle on toteuttaa välitykset niin, että suurin vaihde on päällä ohjaavan osan ollessa paikoillaan. Tässä tapauksessa polkijalle avustusta voidaan tuottaa sekä avustavalla moottorilla että ohjainmoottorilla, sillä välityssuhdetta pienentäessä ohjaavaa osaa pyöritetään sähkömoottorilla samaan suuntaan muiden osien kanssa. Edellisen vaihtoehdon tapaan ajaminen akun loppuessa olisi mahdollista käyttäen nyt avustavaa moottoria generaattorina ja syöttäen generoidun virta ohjausmoottorille halutun välityksen saavuttamiseksi.

Periaate kolme

Kolmannessa vaihtoehdossa moottori on mitoitettu niin, että ohjaavan osan ollessa paikoillaan pyörä kulkee esimerkiksi 15 km/h kadenssilla 60 rpm. Tässä tapauksessa voimalinjan käyttö olisi mahdollista ilman akkua helposti yksivaihteisena niin, että ohjaava osa lukitaan mekaanisesti paikoilleen, jolloin pyörä toimisi perinteisen yksivaihteisen pyörän tapaan. Lisäksi tällä mitoituksella vaihteiston välityssuhteille ei aseteta selkeää ala- eikä ylärajaa vaan välityksen määrittelee ohjaavan moottorin ja tehoelektroniikan mitoitus. Kun välityssuhdetta halutaan pienentää, ohjaavaa moottoria käytetään generaattorina tilanteen yksi tapaan. Vastaavasti välityssuhdetta kasvattaessa ohjaava moottori syöttää tehoa voimalinjaan. Uhkana on, että ohjaava moottori ei hallitse hidasaajan tilannetta, jossa momentit ovat korkeita. Tällöin polkija polkaisisi ”tyhjää” välityssuhteen muuttuessa äärimmäisen pieneksi. Kuitenkin etu määritellä välityssuhteen ääripäät elektronisesti, sekä mahdollisuus käyttää pyörää yksivaihteisena akun loppuessa johti päätökseen lähteä tutkimaan tätä asetelmaa tarkemmin voimalinjaa suunniteltaessa.

4.4 Elektromekaaninen suunnittelu

Nykyisissä markkinoilla olevissa sähköpyörien keskiömoottoreissa moottori on kytketty poljinakseliin vapaakytkimellä niin, että moottori veto irtaantuu poljinakselin kierrosluvun ollessa moottorin kierroslukua suurempi. Tällä tavoin moottori ei aiheuta ylimääräistä vastusta ilman avustusta poljettaessa. Suunniteltavassa voimalinjassa moottorin tulee toimia myös akun ollessa tyhjä, mikä saattaa edellyttää moottoria käyttöä generaattorina kuten aikaisemmin on kuvattu. Tällöin mekaanista vapaavaihe konstruktiota ei ole mahdollista käyttää, mutta moottorin vastus pitää kuitenkin olla mahdollista minimoida ilman avustusta ajettaessa. Moottorien ohjauksessa käytetään moottorinohjaimia, joissa on ominaisuus moottorin cogging efektin kumoamiseksi. Tällöin moottoria ohjataan hyvin pienellä virralla niin että se pyörii ilman vastusta. Haittapuolena on, että moottori kuluttaa hieman sähköä myös tässä tilanteessa.

Sähköpyörästandardin mukaan moottori ei saa avustaa pyörän nopeuden ollessa yli 25 km/h. Pyörän vaihteiston tulee kuitenkin toimia myös tässä tilanteessa, mikä tarkoittaa että ohjausmoottoria pitää käyttää aktiivisesti halutun välityssuhteen saavuttamiseksi. Konstruktiosta riippuen ohjausmoottori saattaa syöttää tehoa ketjurattaalle, jolloin avustavalla moottorilla pitää generoida vastaava määrä tehoa kokonaisavustuksen pysyessä nollassa. Myös tässä tilanteessa mekaaninen vapaaratas estäisi voimalinjan tarkoituksenmukaisen toiminnan.

Markkinoilla olevia edistyneitä keskiömoottoreita ohjataan polkijan tuottaman poljinmomentin ja kadenssin mukaan. Näillä arvoilla saadaan laskettua polkijan tuottama teho tarkasti kaavan viisi mukaan ja sen perusteella säätää voimalinjan polkijalle tuottamaa avustusta. Perinteisissä moottoreissa, joissa moottori kytketään irti mekaanisesti on käytetty erillistä anturia mittaamaan poljinakselin pyörimisnopeutta. Konseptissa jossa moottori on kytketty jatkuvasti pyörimään poljinakselin mukana, on poljinakselin pyörintänopeus mahdollista mitata sähkömoottoriin integroiduista hall - antureista eikä erillistä pyörintänopeus anturia tarvita, mikä yksinkertaistaa voimalinjan rakennetta. Lisäksi konseptoidussa voimalinjassa poljinvoimaa on mahdollista mitata mittaamalla sekä ohjainmoottorille että avustavalle moottorille meneviä virtoja ja laskea näiden erotuksesta polkijan tuottaman väännön osuus, sillä ohjainmoottorin tulee kyetä hallitsemaan koko moottorin läpi kulkevaa vääntöä kaavan (7) mukaan

$$M_{avustus} + M_{polkija} = M_{ohjaus}, \quad (7)$$

jossa $M_{avustus}$, $M_{polkija}$, M_{ohjaus} on avustusmoottorin, polkijan ja ohjausmoottorin tuottama vääntömomentti. Tilanteessa, jossa ohjainmoottori on paikallaan tällainen mittaustapa ei kuitenkaan tuota tulosta, joten erillinen voimanmittaus todennäköisesti vaaditaan.

4.5 Moottorien sijoittelu

Sähköpyörän keskiömoottorin ulkonäöllä on suuri vaikutus koko pyörän ulkonäköön. Selkeä markkinasuuntaus on piilottaa kaikki sähköpyöräkomponentit kuten akku ja moottori mahdollisimman hyvin pyörän muuhun rakenteeseen. Useissa jo markkinoilla olevissa pyörissä akku on piilotettu pyörän alarunkoputken sisään. Joissakin markkinoilla olevissa järjestelmissä myös moottori on piilotettu alarunkoputken sisään. Moottoria suunniteltaessa myös sen ulkonäkö, sekä integraatio osaksi muuta pyörää tuli pitää mielessä.



KUVA 9. Kilpailevan valmistajan keskiömoottori, jossa moottori ja akku on sijoitettu runkoputken sisään (Fazua GmbH n.d).

Eri mekaanisia vaihtoehtoja hahmotellessa kävi nopeasti selville, että toinen moottoreista kannattaa sijoittaa 90 asteen kulmaan poljinakseliin nähden. Näin moottori voidaan piilottaa osaksi pyörän rakennetta kuvan 10 ja 11 mukaisesti.



KUVA 10. Keskiömoottorin renderöinti malli, johon on merkitty moottorin näkyvä ja piiloon jäävä osa.



KUVA 11. Moottori osana pyörän muuta rakennetta.

Muita huomattavia hyötyjä, joita saadaan sijoittamalla toinen moottoreista 90 asteen kulmaan on kulmavaihteella tarvittaessa saatava korkea välityssuhde, jolloin voidaan välttää ylimääräisiä rattaita keskiömoottorin rakenteessa. Kun alustava hahmotelma moottorien sijoituksesta oli selvillä, lähdettiin suunnittelemaan rattaiden sijoittelua keskiömoottorin sisällä tarkemmin.

5 VOIMALINJAN SUORITUSKYVYN SIMULOINTI JA OPTIMOINTI

Voimalinjan suunnitteluun ja suorituskykyyn vaikuttavia muuttujia on useita, kuten ohjaus- ja avustusmoottorin alennusvaihteen välityssuhde, pääplaneettavaihteen välityssuhde, ohjaus- ja avustusmoottorin sijoittelu moottorin sisällä, sekä kohdassa 4.4 esiteltyjen eri toimintaperiaatteiden käyttö. Pääplaneettavaihte voidaan koostaa neljällä eri tavalla, jossa avustusmoottori, ohjausmoottori ja poljinakseli on kiinnitetty pääplaneettarataan eri osille taulukon viisi mukaan.

TAULUKKO 5. Pääplaneettavaihteen koostaminen eri vaihtoehdot

Vaihtoedot	Rakenne
1	Poljinakseli kiinnitettyä aurinkorattaaseen, ketjuratas kiinnitettyä planeettakannattimeen, sormusrataan nopeutta ohjataan
2	Poljinakseli kiinnitettyä planeettakannattimeen, ketjuratas kiinnitettyä aurinkorattaaseen, sormusrataan nopeutta ohjataan
3	Poljinakseli kiinnitettyä sormusrattaaseen, ketjuratas kiinnitettyä planeettakannattimeen, aurinkorataan nopeutta ohjataan
4	Poljinakseli kiinnitettyä planeettakannattimeen, ketjuratas kiinnitettyä sormusrattaaseen, aurinkorataan nopeutta ohjataan

Muuttujia tarkastellessa on selvää, että eri vaihtoehtoja joista voimalinja voidaan koostaa on useita. Jotta voimalinjan suorituskyvystä saataisiin paras mahdollinen, lähdettiin eri vaihtoehtoja selvittämään tietokonesimulaatioiden avulla yhteistyössä Aalto yliopiston professorin ja Smeklab Oy:n perustaja Antti Lehiköisen kanssa. Simulaatioiden ja optimoinnin tavoitteena on löytää paras mahdollinen muuttujien yhdistelmä, jolla voimalinjasta saataisiin mahdollisimman kevyt, halpa, tehokas ja hyötysuhteeltaan hyvä.

5.1 Ajosyklin määrittely

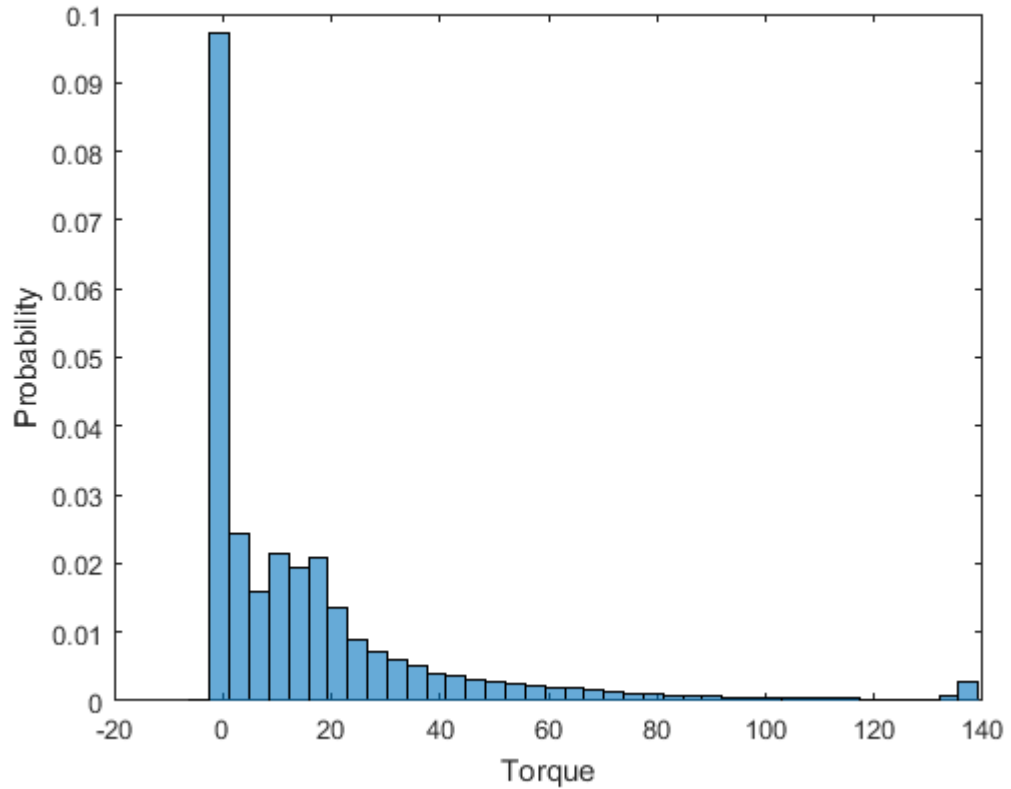
Jotta voimalinjan toimintaa voidaan simuloida, pitää määrittää jonkinlainen ajosykli, jossa voimalinjaa tullaan todennäköisimmin käyttämään. Ajosyklin määrittelyä varten tilaaja hankki tavallisen kilpailevan valmistajan moottorilla varustetun sähköpyörän (kuva 12), johon asenettiin datankeräyslaitteisto. Laitteistolla saatiin kerättyä ajon aikana

polkijan kadenssi, vääntömomentti, sähkömoottorin virrankulutus, pyörän nopeus, nousukulma ja korkeusvaihtelut. Kerätystä tiedosta voitiin edelleen laskea polkijan teho sekä pyörän välityssuhde.

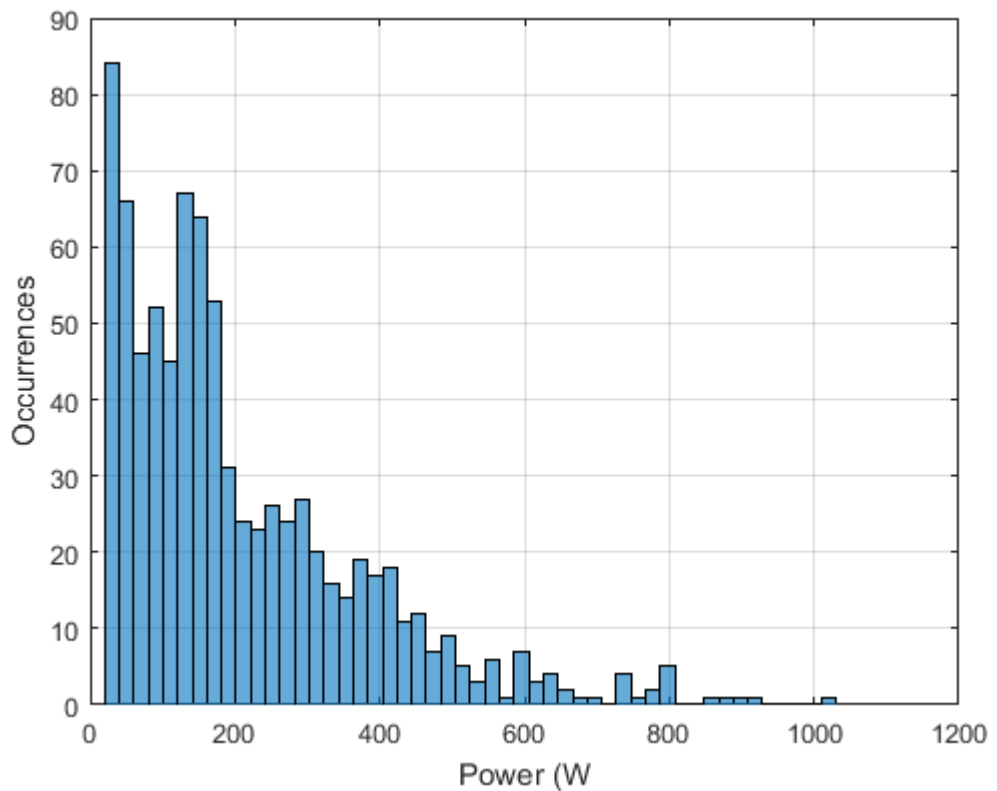


KUVA 12. Datan keräykseen käytetty testipyörä. Akun päällä näkyvissä Raspberry Pi mikrotietokone ja Raspberrystä moottorin sisään kulkevat johdot. (Palonen, 2019)

Testipyörää ajettiin SM-tason kilpapyöräilijän ja tavallisen työmatkapyöräilijän toimesta erityyppisissä ympäristöissä ja data kerättiin talteen Raspberry Pi mikrotietokoneella. Konseptoitavan voimalinjan toimintaa simuloitiin kerättyä dataa vastaan ja vertailtiin onko moottorin suoritusarvot riittävät selviämään kyseisistä ajotilanteista.



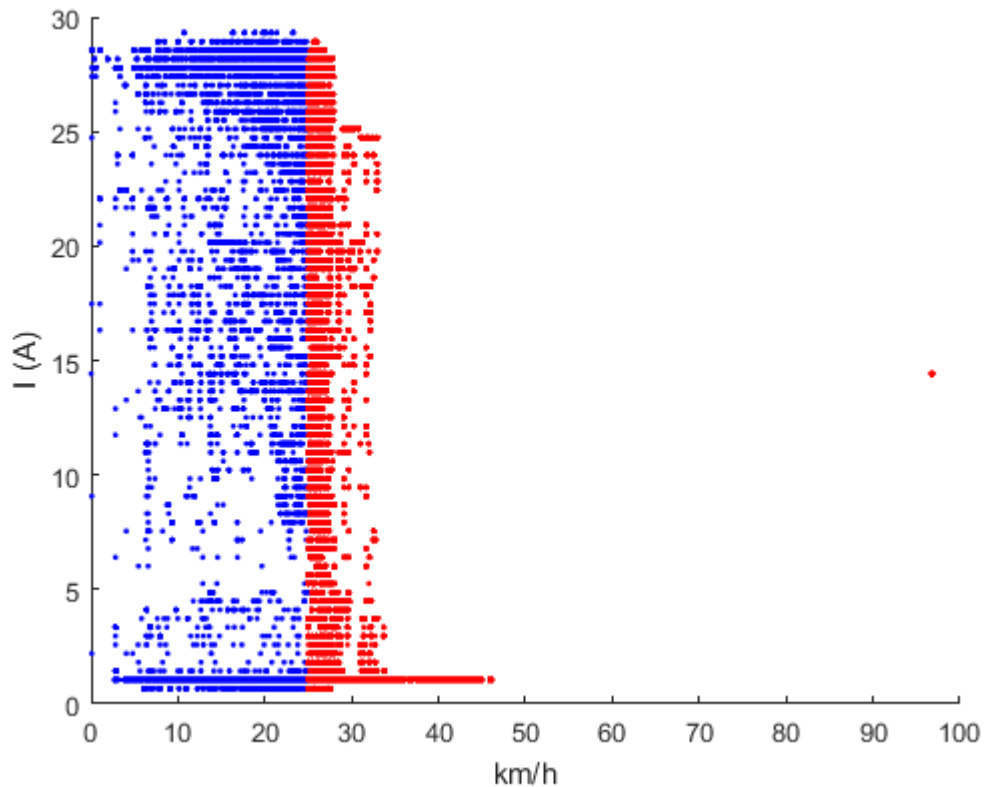
KUVIO 2: Testipyörästä mitattu ajajan poljinmomenttien histogrammi SM-tason kilpapyöräilijän ajoista (Lehikoinen 2018).



KUVIO 3. Työmatkapolkijan ajoista lasketut poljintehot (Lehikoinen 2018).

Mittausten aikana kilpailijan moottorin huomattiin tuottavan suuria hetkellisiä tehoja. Kaavan neljä mukaan laskettaessa kilpailijan 36 V nimellisjännitteisellä akulla (napajännite 42 V) varustettu pyörä tuotti hetkellisesti yli 1000 W tehoa.

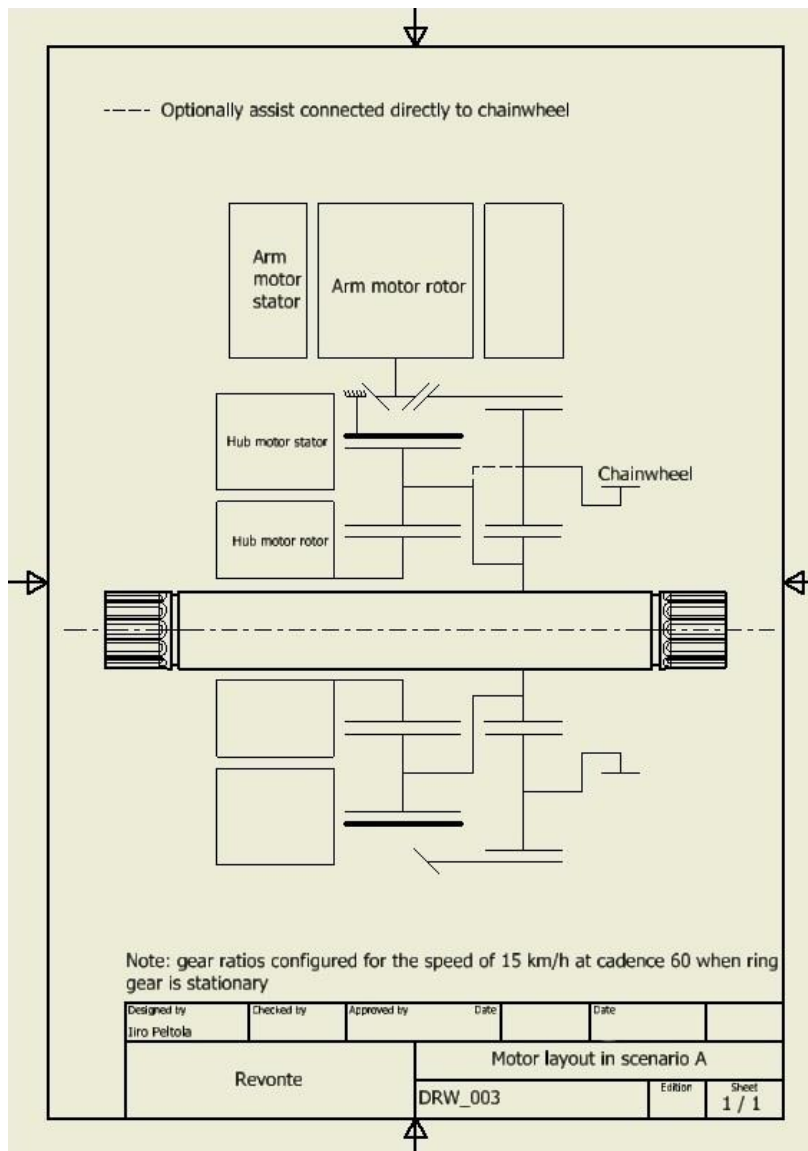
$$P = 36 \text{ V} \cdot 30 \text{ A} = 1080 \text{ W}$$



KUVIO 4. Kilpailijan moottorista mitattu virrankulutus (Lehikoinen 2018).

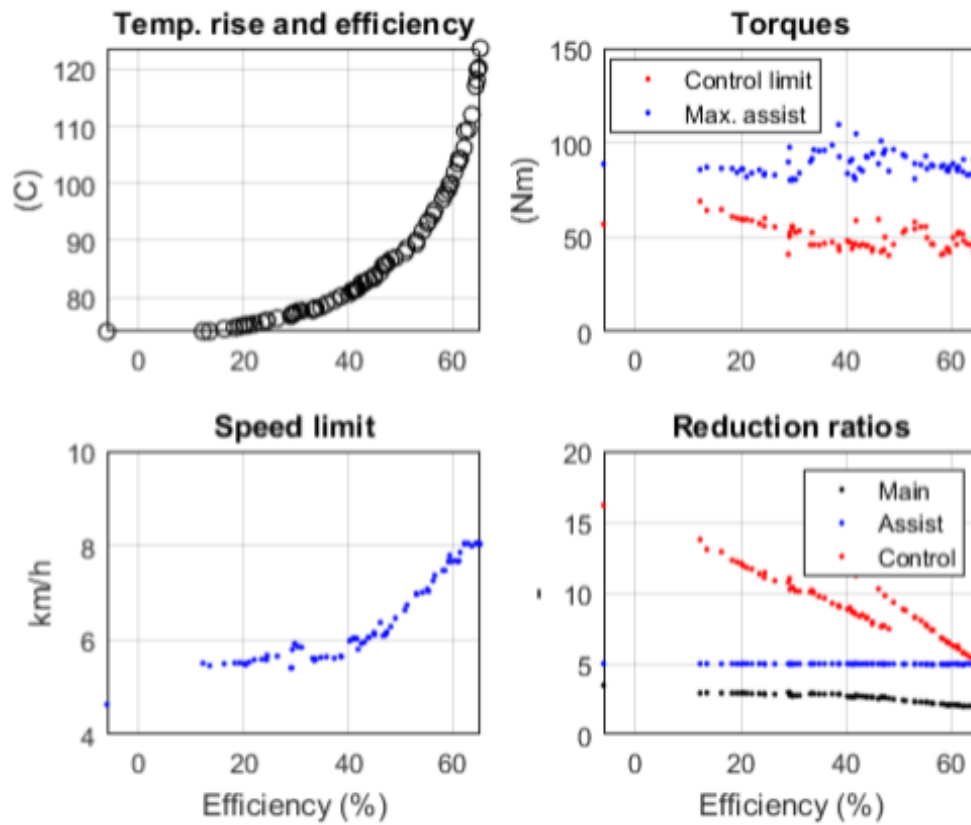
5.2 Rakenteen määrittely

Simulaatioihin suunniteltiin eri konstruktioita, joista tehtiin yksinkertaistettuja rautalankamalleja (kuva 13), sekä määrättiin reunaehdot kyseisellä rakenteella saavutettavissa oleville välityssuhteille. Sähkömoottorien koolle annettiin karkea määrittely kuvan kymmenen tyyppisen rakenteen mukaan käytettävissä olevasta tilasta. Eri konstruktioita joissa osat oli sijoiteltu voimalinjan sisään eri tavalla käytiin läpi yhteensä yhdeksän kappaletta.



KUVA 13: Yksinkertaistettu rautalankamalli voimalinjan rakenteesta.

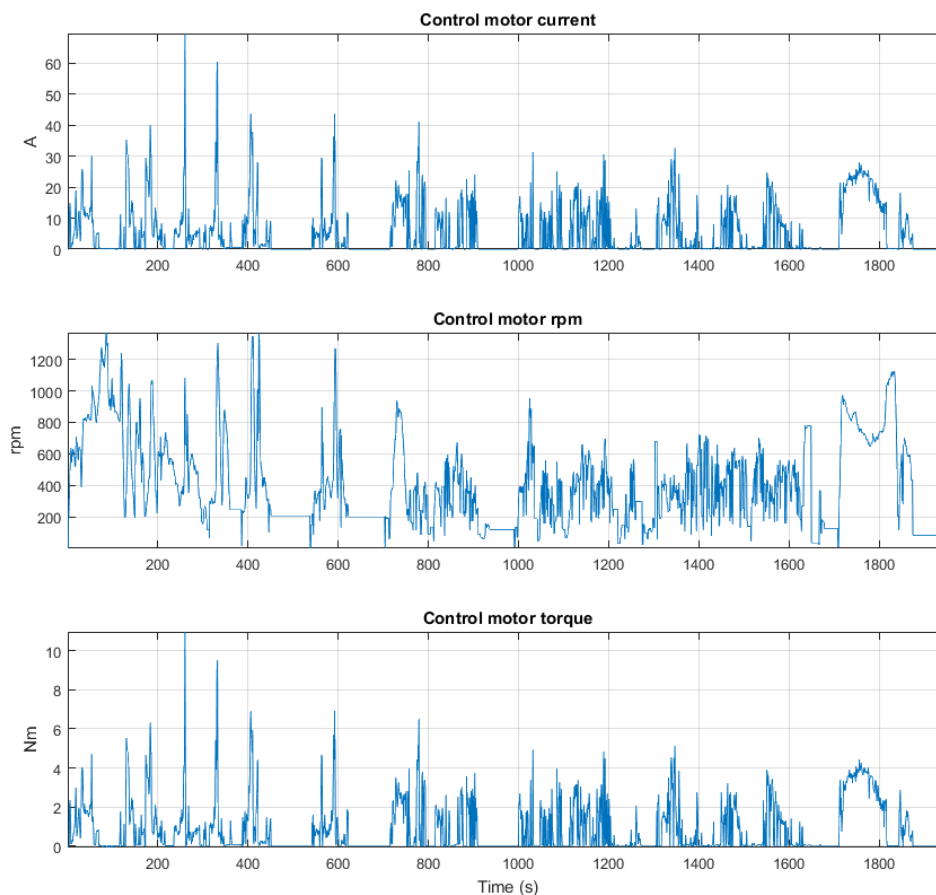
Reunaehdot määrittämällä saadaan pohja simuloinnin tekemiselle. Eri reunaehtojen, kuten alimman ja korkeimman pääplaneettavaihteella saavutettavissa olevien välityssuhteiden välillä on kuitenkin ääretön määrä vaihtoehtoja, joiden vaikutus voimalinjan toiminnan optimoimiseksi tuli myös selvittää. Jotta löydettäisiin paras mahdollinen muuttujien yhdistelmä, tehtiin voimalinjan toiminnasta tietokonesimulaatio, jossa ajettiin satojatuhansia simuloiteja parametrien arvoja hieman muuttaen. Näin saatiin Pareto jakaumaksi kutsuttu kuvaaja (kuvio 5) eri parametreille, josta voitiin selvittää optimaalisimmat vaihtoehdot.



KUVIO 5: Pareto jakauma eri muuttujille (Lehikoinen 2018).

Moottorien mitoitus

Sähkömoottorien toiminnasta tehtiin vastaavat simuloinnit, joissa selvitettiin sähkömoottorien läpi menevät virrat, sekä niiden pohjalta karkea lämpömalli. Moottorien koko rajattiin tiukasti voimalinjan teollisen muotoilun näkökulmasta (kuva 10), joten simulaatiossa tuli selvittää onko moottorien koko riittävä suoriutumaan kuormasta. Lisäksi moottoreiden suunnittelusta tehtiin vastaava optimointi, jossa selvitettiin moottorien optimaalinen käämintä ja napojen määrä.



KUVIO 6. Ohjausmoottorin vaihevirratt, kierrosluku ja vääntökuvaajat testisimulaation aikana (Lehikoinen 2018).

5.3 Lopputulos

Simuloinnin aikana takarenkaalle saatavaa kokonaisvääntömomenttia eli polkijan tuottamaa vääntömomenttia sekä voimalinjan tuottamaa vääntömomentti onnistuttiin kasvattamaan 50 Nm:stä 215 Nm:in eli kasvua oli 430 %. Lisäksi simuloinnin aikana löydettiin mahdollisesti patentoitavia ratkaisuja, joilla voimalinjan suorituskykyä voidaan kasvattaa entisestään.

Aikaansaaduilla suoritusarvoilla voimalinja suoriutuu kaikista tilanteista, joita testipyörällä mitattiin. Lisäksi simulaatio antoi hyvät lähtökohdat mekaaniselle suunnittelulle, sillä optimaaliset välityssuhteet eri vaihteiston osille oli tiedossa.

6 MEKANIKKASUUNNITTELU

Simulaatiosta saatujen riittävien alkutietojen pohjalta (taulukko 6, liite 2), voidaan toteuttaa moottorin mekaniikan tarkempi suunnittelu. Tilaaajan tavoitteena oli selvittää karkeasti moottorin kustannusrakenne, joten mekaniikkasuunnittelussa selvitettiin tärkeimpien pääkomponenttien materiaalivaatimukset, sekä valmistusmenetelmät eri osille, jonka pohjalta laadittiin tilaajalle kustannusarvio voimalinja tuotantokuluista.

TAULUKKO 6. Voimalinjan suunnittelun lähtöarvot.

Ketjurattaiden välityssuhde	2:3
Pääplaneettavaihteen välityssuhde polkimilta ketjurattaalle	2:3
Välityssuhde polkimilta takarenkaalle kun pääplaneetan ohjaava osa on paikoillaan	1
Avustusmoottorin välityssuhde	1:10
Ohjausmoottorin välityssuhde	1:3,5
Ohjausmoottorin maksimivääntö	11 Nm
Avustusmoottorin maksimivääntö	7 Nm
Maksimi poljinmomentti, jonka voimalinja kestää poljettaessa	126 Nm
Avustusmoottorin halkaisija	76 mm
Avustusmoottorin pituus	70 mm
Ohjausmoottorin halkaisija	100 mm
Ohjausmoottorin pituus	40 mm
Q-kerroin	< 160 mm

6.1 Ratasvoimien laskenta

Yhdeksi kriittiseksi osaksi tunnistettiin pääplaneettavaihde ja sen kestävyys etenkin standardin mukaisella 250 Nm vääntömomentilla poljinakselilla. Pääplaneettavaihteen halkaisija oli jo selkeästi määritelty teollisen suunnittelun vaiheessa vastaamaan ohjausmoottorin halkaisijaa. Lisäksi aurinkorattaan piti mahtua poljinakselin päälle, joka asetti minihalkaisijan aurinkorattaalle.

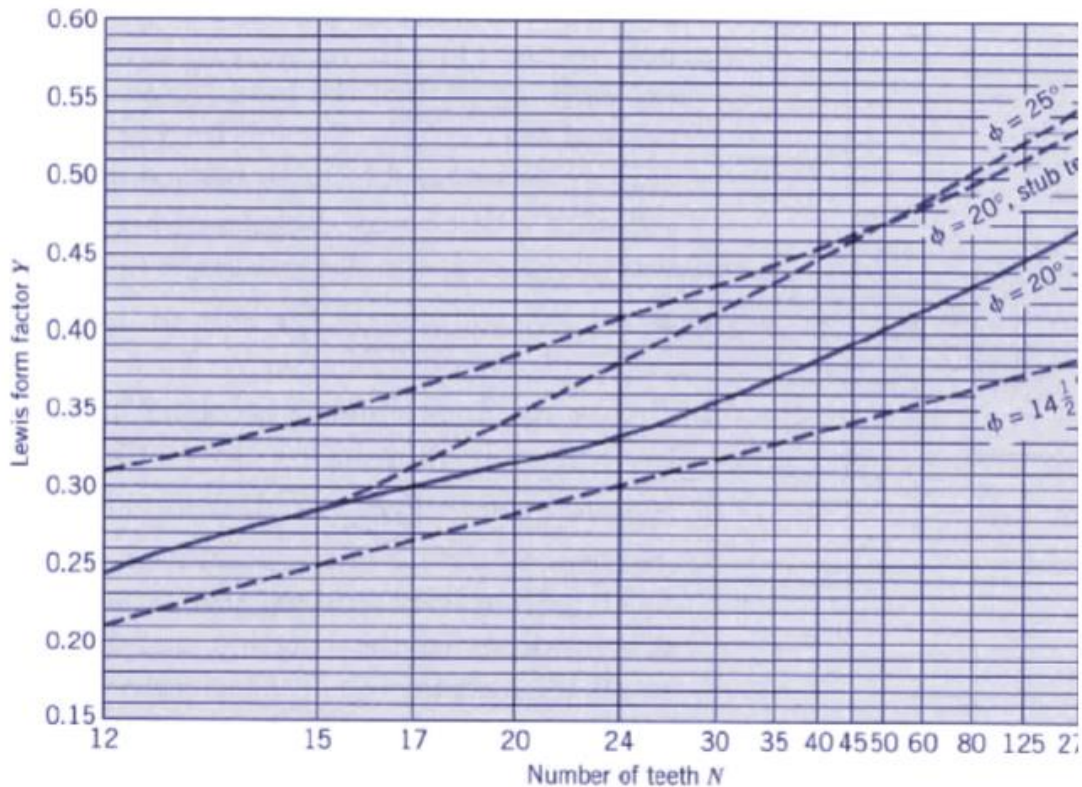
Kun haluttu välityssuhde ja halkaisijat oli tiedossa, ainoat rattaan kestävyysvaikututtavat muuttujat olivat enää rattaan valmistusmateriaali, sekä rattaan hammaskosketuksen leveys. Johtuen rajoitetusta Q-kertoimesta oli voimalinjan

poljinakselin suuntainen tila rajoitettu, joten pääplaneettavaihteen leveys haluttiin pitää myös minimissään.

Hammasrattaiden voimat laskettiin yksinkertaisen Lewisin kaavan (8) mukaan

$$\sigma = \frac{W_t}{FYm} \quad (8)$$

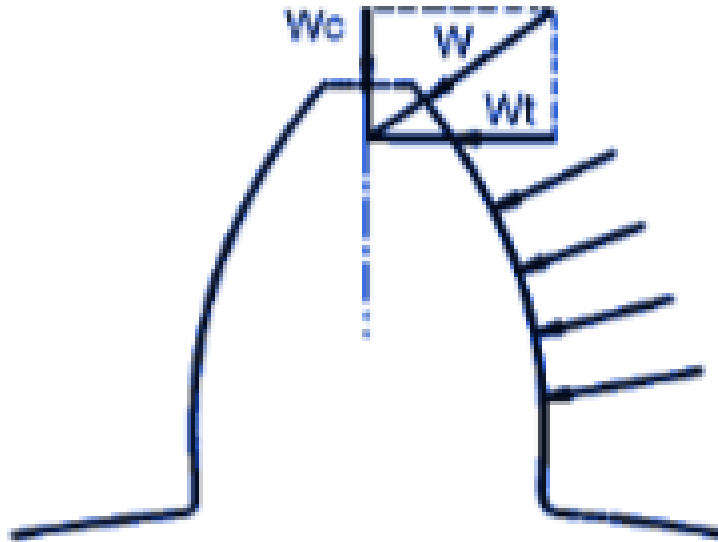
jossa σ on taivutusjännitys, W_t tangenciaalinen kuorma, F hammaskosketuksen leveys, m hammaskosketuksen moduuli, sekä Y Lewisin kerroin (Engineers Edge n.d), joka voidaan selvittää kuviosta setisemän.



KUVIO 7. Lewisin kerroin hammasrattaille eri ryntökulmalla ja hammasmäärällä (Engineers Edge n.d).

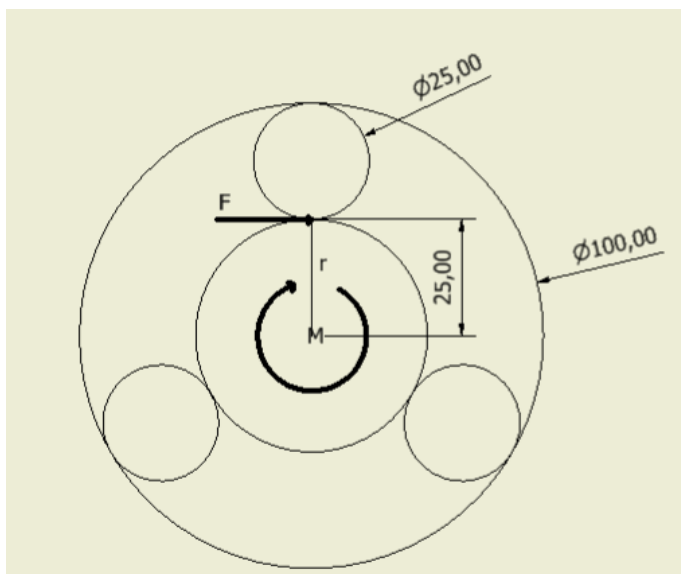
Lewisin kaavassa rattaan hammas kuvitellaan kiinteäksi palkiksi, johon kohdistuu vain tangenciaalinen voima W_t (kuva 14), joka aiheuttaa hampaan juureen jännityksen. Lisäksi Lewisin kaava olettaa, että vain yksi hammas on kosketuksissa kerrallaan (Engineers Edge n.d). Koska rattaisiin kohdistuu suurimmat voimat staattisessa, standardin

mukaisessa testaustilanteessa, voidaan hammasrataan kestävyttä arvioida hyvin yksinkertaisen Lewisin kaavan avulla.



KUVA 14. Hampaaseen kohdistuva Lewisin kaavan mukaiset voimat (Engineers Edge n.d).

Kuvassa 15 on esitetty aurinkorattaaseen syntyvä tangentiaalinen voima standardin mukaisessa testauksessa, kun poljinakselilla lisätään 250 Nm momentti.



KUVA 15. Hammasrattaisiin kohdistuva voima

Voima F voidaan laskea kaavalla (9)

$$M = Fr, \quad (9)$$

jossa M on aurinkorattaalle kohdistuva momentti, F hammasrattaaseen kohdistuva voima ja r taivutusvarren pituus.

Koska planeettavaihteessa momentti jakautuu tasaisesti kolmen rattaan kesken, jolloin yhtä planeettarattaan hammasta kuormittavaksi voimaksi saadaan kaavalla (9)

$$F = \frac{1}{3} \cdot \frac{M}{r} = \frac{1}{3} \cdot \frac{250 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} \approx 3\,300 \text{ Nm}.$$

Lewisin kaavan (8) ja hammasrattaisiin kohdistuvan voiman mukaan selvitettiin vaadittava materiaalin vetolujuus 15 millin hammasleveydellä, jolloin materiaalivaatimukseksi 2.5 moduulilla saatiin

$$\sigma = \frac{3300 \text{ N}}{15 \text{ mm} \cdot 0.317 \cdot 2,5 \frac{\text{mm}}{1}} \approx 277 \text{ Mpa}.$$

Kun laskuun otetaan mukaan varmuuskerroin n , voidaan materiaalin vetolujuus vaatimukseksi

$$\sigma_{vaadittu} = \sigma \cdot n = 277 \text{ Mpa} \cdot 1.5 = 415.5 \text{ MPa}.$$

Muiden planeettarattaan voimia (kuva 16) selvittäessä voidaan todeta, että planeettarattaan eri osien kokemat voimat ovat samat. Vakiomomentti M aiheuttaa aurinkorattaalle voiman

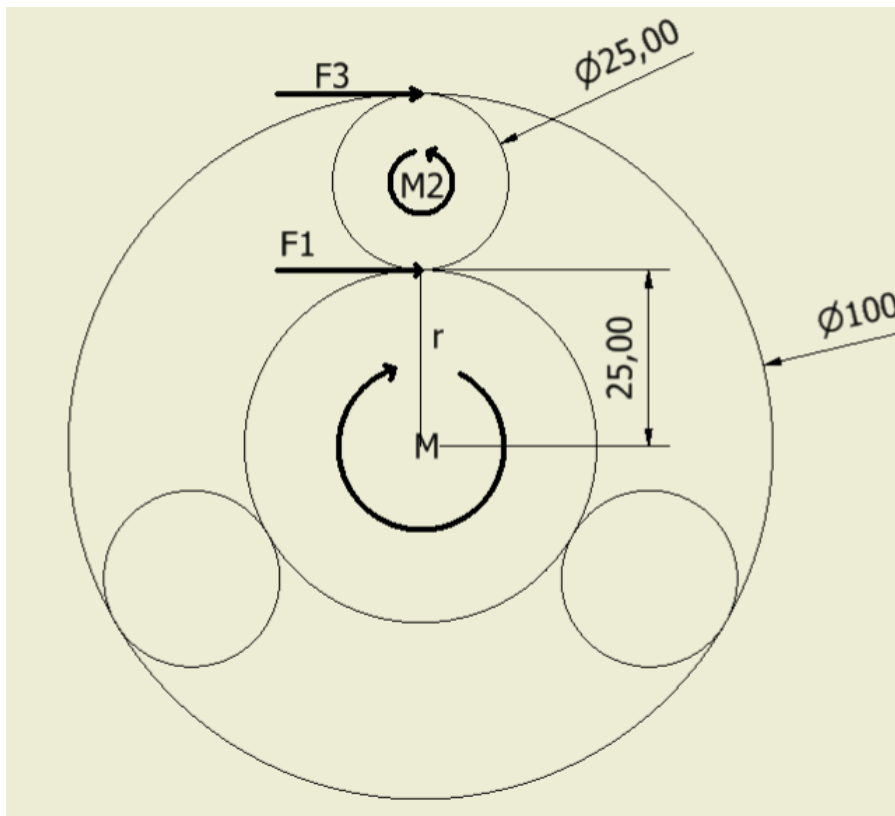
$$F_1 = \frac{250 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 10\,000 \text{ N},$$

joka synnyttää planeettarattaalle momentin

$$M_2 = 10\,000 \text{ Nm} \cdot 0,0125 \text{ m} = 125 \text{ Nm}.$$

Koska planeettavaihte on staattisessa tilassa, aiheutuu sormusrattaalle vastavoima

$$F_3 = \frac{125 \text{ Nm}}{0,0125 \text{ m}} = 10\,000 \text{ Nm}.$$



KUVA 16. Voimat planeettarattaassa

Vastaavalla menetelmällä selvitettiin lujuusvaatimukset myös ohjaus- ja avustusmoottorin alennusvaihteille, jotka on esitelty taulukossa seitsemän. Kuten

taulukosta huomataan on avustusmoottorin alennusvaihteen lujuusvaatimuksen erittäin alhaiset johtuen moottorin pienestä vääntölukemasta.

TAULUKKO 7. Pääplaneettavaiheen rattaiden lujuusvaatimukset.

Ratas	Kuormittava momentti	Kuormittava voima	Hammaskosketuksen leveys	Moduuli	Vetolujuus
Ohjausmoottorin alennusvaihteen rattaat	11 Nm	733 Nm	5 mm	0.55	380 MPa
Avustusmoottorin planeettavaihteen rattaat	7 Nm	140 Nm	10 mm	1	31 Mpa

6.2 Valmistusmenetelmät

Valmistusmenetelmiä tutkiessa pitää huomioida menetelmän sopivuus massatuotantoon, hinta, materiaalivaatimukset, sekä lopputuotteen haluttu ulkonäkö. Taulukossa kahdeksan on esitelty voimalinjan osien karkea listaus, osan vaatimukset sekä suunniteltu tuotantomenetelmä valmistuksessa. Kriittisiksi osiksi hinnan kannalta todettiin vaihteiston rattaiden kustannukset, joten rattaille tuli löytää edullinen valmistusmenetelmä.

Shimanon polkupyörän napavaihdetta (kuva 17) tutkiessa selvisi, että planeettarattaan osat on tehty joko tarkkuusvaluna tai sintraamalla. Sintraamisen etuina on jopa 70 % muita tuotantomenetelmiä halvempi hinta, tarkat toleranssit, osat eivät vaadi jälkikoneistusta ja prosessin hyvä toistettavuus (Allied Sintering n.d). Shimanon polkupyörän vaihdettu tutkiessa selvisi myös, että planeettavaihteen kannattimen valmistusmenetelmä on koneistaminen.



KUVA 17. Shimanon kolmivaihteinen napavaihte

Voimalinjan rungon tulee johtaa lämpöä pois hyvin sähkömoottoreista, joten ainoaksi materiaalivalinnaksi jäi metalli. Polkupyöräkäytössä paino on kriittinen, joten vaihtoehtoiksi jäi joko alumiini tai magnesium. Hinnan vuoksi hyvä vaihtoehto moottorin rungon valmistukseen on valaminen, johon molemmat edellä olevat materiaalit soveltuvat.

TAULUKKO 8. Voimalinjan pääkomponentit

Osat		Vaatimukset	Valmistusmenetelmä
Ohjausmoottori		BLDC, koko 100 mm * 40 mm, vääntö 11 Nm	
Avustusmoottori		BLDC, koko 76 mm * 70 mm, vääntö 7 Nm	
Pääplaneettavaihde	Aurinkoratas	Materiaalin lujuus 416 Mpa	Sintraaminen
	Planeettaratas	Materiaalin lujuus 416 Mpa	Sintraaminen
	Sormusratas	Materiaalin lujuus 416 Mpa	Sintraaminen
	Planeetakannatin		Koneistus
Ohjausmoottorin alennusvaihte	Aurinkoratas	Materiaalin lujuus 380 Mpa	Sintraaminen
	Planeettaratas	Materiaalin lujuus 380 Mpa	Sintraaminen
	Sormusratas	Materiaalin lujuus 380 Mpa	Sintraaminen
	Planeetakannatin		Koneistus
Avustusmoottorin alennusvaihte	Pinion ratas	Materiaalin lujuus 31 Mpa	Koneistus
	Sormusratas	Materiaalin lujuus 31 Mpa	Ruiskupuristus
Moottorin runko		Hyvä lämmönjohtokyky, iskunkestävä	Painevalu
Poljinakseli		250 Nm momentin kesto	Painevalu tai koneistus

7 POHDINTA

Simulaatioiden avulla CVT -vaihteisto saatiin toimimaan kaikissa ympäristöissä, joihin voimalinjaa oli suunniteltu käytettävän. Tämän lisäksi voimalinjan suorituskyky saatiin melko hyvin vastaamaan nykyisin markkinoilla olevia laadukkaimpia keskiömoottoreita, joskin voimalinjan tuottama avustusmomentti takarenkaalla ei vastaa aivan nykyisen markkinakärjen suorituskykyä. Tehtyjen simulaatioiden avulla voimalinjan suunnittelusta onnistuttiin tekemään jo useita eri iteraatioita ja näin säästämään työn tilaajalta huomattava summa tuotekehityskuluja. Moottorin mekaaninen rakenne ja sähkömoottorien rakenne todettiin mahdolliseksi valmistaa nykyisten valmistusmenetelmien ja materiaalien avulla. Tämän lisäksi voimalinjan osien määrä onnistuttiin pitämään kohtuullisena. Voimalinja konseptisuunnitelma yhdistää perinteisen ketjuvaihteiston toimivuuden etenkin raskaassa maastöpyöräkäytössä, napavaihteen luotettavuuden ja pitää samaan aikaan jousittamattoman massan mahdollisimman pienenä.

Eri osien valmistusmenetelmät vaativat tarkempaa selvitystä ja suoria tarjouspyyntöjä valmistajilta, jotta jälleenmyyntihinta voitaisiin varmistaa. Tarkkoja hintoja varten osista tulisi tehdä tarkat CAD mallinnukset työssä selvitettyjen konstruktioiden pohjalta. Valmistettujen prototyyppien pohjalta tulisi tarkemmin selvittää voimalinjan kestoa ja äänekkyyttä todellisessa käyttöympäristössä. Osa voimalinjan rattaista olisi materiaalin kestävyys puolesta mahdollista valmistaa myös muovista. Tämä kuitenkin vaatisi tarkempaa selvitystä materiaaleista ja niiden kestävydestä ko. käyttökohteessa, jossa kierrosalueet ovat laajat ja voitelun määrä rajallinen.

LÄHTEET

Allied Sintering. N.d. Benefits of Powder Metallurgy for High Quality, High Strength Metal Parts to Precision Tolerances. Luettu 2.2.2019. <http://www.alliedsinterings.com/powder-metal-products-benefits.html>

Andres, J., Hoog, J. & Mueller, F. N.d. Towards Understanding the Design of Integrated Exertion.

Bike Europe. 2017. Rules & Regulation On Electric Cycles in European Union. Luettu 30.09.2019. <http://bike-eu.com.s3-eu-central-1.amazonaws.com/app/uploads/2015/09/rules-regulation-on-electric-cycles-in-the-european-union-may-2017.pdf>

Bike Europe. 2017. Revised EN 15194 E-Bike Safety Standard Implemented. Luettu 30.09.2018. <https://www.bike-eu.com/laws-regulations/nieuws/2017/11/revised-en-15194-e-bike-safety-standard-implemented-10132012>

Bonheur, K. 2017. Advantages and disadvantages of continuously variable transmission. Luettu 7.10.2018. <https://www.profolus.com/topics/advantages-disadvantages-continuously-variable-transmission/>

Bonsen, B. 2006. Efficiency optimization of the push-belt CVT by variator slip control Eindhoven. Luettu 10.9.2018. <https://pure.tue.nl/ws/files/1848718/200612241.pdf>

Collins, D. 2016. FAQ: What is trapezoidal back EMF. Luettu 7.10.2018. <https://www.motioncontroltips.com/faq-trapezoidal-back-emf/>

Continental AG. N.d. 48V Revolution Technical Specification. Luettu 17.9.2018. <http://www.continental-bicycle-systems.com/en-gl/eBikes/eBike/48V-eBike-System/48V-Drive-Units/48V-Revolution>

CyclingPowerLab. N.d. Drivetrain efficiency and marginal gains. Luettu 12.04.2019. <https://www.cyclingpowerlab.com/DrivetrainEfficiency.aspx>

Engineers Edge. N.d. Gear Tooth Strength. Luettu 2.2.2019. <https://www.engineersedge.com/gears/gear-tooth-strength.htm>

Euroopan parlamentin neuvoston asetus 15.1.2013. 168/2013.

European committee for standardization. 2017. EN 15194:2017.

Fallbrook Technologies. N.d. NuVinci Technology. Luettu 3.10.2018. <https://www.fallbrooktech.com/nuvinci-technology>

Fallbrook Technologies. N.d. Datasheet N171B. Luettu 3.10.2018. https://www.fallbrooktech.com/sites/default/files/videos/Datasheet_N171B_English.pdf

Fazua GmbH. N.d. Evation. Luettu 2.2.2019. <https://fazua.com/en/>

Lehikoinen, A. 2018. E-Bike Drivetrain Sizing v. 3.2. Voimalinjan suunnittelun simulaatioraportti.

Low Voltage Directive 20.4.2016. 2014/35/EU.

Mashadi, B. & Crolla, D. A. 2012. Vehicle powertrain systems. Oxford: Wiley-Blackwell. Oxford: Wiley-Blackwell.

Mi, C., Masrur, M. A. & Gao, D. W. 2011. Hybrid electric vehicles: Principles and applications with practical perspectives. Chichester: Wiley.

Nikowitz, M. 2016. Advanced hybrid and electric vehicles: System optimization and vehicle integration. Cham:Springer.

Rohloff AG. N.d. Comfort Meets Continuity. Luettu 2.10.2018.
<https://www.rohloff.de/en/products/speedhub/>

Rohloff AG. N.d. Gear Range Comparison. Luettu 2.05.2019.
<https://www.rohloff.de/en/experience/technology-in-detail/gear-range-comparison/>

Shimano Europe B.V. Maintenance Manual. Luettu 12.04.2019. <http://www.koga-signature.com/docs/Maintenance-Manual.pdf>

Sram LLC. 2016. Surviving Rome to Riva. Luettu 2.10.2018.
<https://www.sram.com/stories/surviving-rome-riva>

Texas Instruments. 2018. Field Oriented Control (FOC) Made Easy for Brushless DC (BLDC) Motors Using TI Smart Gate Driver. Luettu 2.2.2019.
<http://www.ti.com/lit/an/slva939b/slva939b.pdf>

The Catalystis. N.d. Gears. Luettu 1.2.2019. <http://www.thecatalystis.com/gears/>

Walker, P., Durack, J. & Durack, M. 2014. Laboratory Testing of New Form of Toroidal CVT.