



HENKILÖAUTON SÄHKÖMUUNNOKSEN VERTAILULASKELMA

Juuso Mentula

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2015
Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka
Älykkäät koneet

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka
Älykkäät koneet

Juuso Mentula:
Henkilöauton sähkömuunnoksen vertailulaskelma

Opinnäytetyö 35 sivua, joista liitteitä 6 sivua
Huhtikuu 2015

Tässä työssä tutkittiin tavallisen polttomoottorilla varustetun vanhemman urheilullisen henkilöauton muuttamista sähkökäyttöiseksi. Tavoitteena oli valita sähkökäyttöä varten auton alkuperäistä suorituskykyä vastaavat sähkökäytön komponentit ja vertailla suorituskykyä alkuperäiseen polttomoottoriin. Laskennassa luotiin auton alkuperäisten arvojen perusteella autosta laskentamalli, jonka avulla voitiin vertailla alkuperäisen polttomoottorin suorituskykyä ja kulutusta sähköiseen voimansiirtoon sekä vaihteiston kanssa, että myös ilman vaihteistoa.

Työssä päädyttiin laskujen ja simulointien jälkeen tulokseen, että sähkömuunnos on varsin kannattava, myös vaihteistoa on hyvä käyttää muunnoksessa, jos käytettävän sähkömoottorin korkean hyötysuhteen alue ei ole kovinkaan laaja. Vaihteiston avulla saadaan sähkömoottori toimimaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteen alueella mahdollisimman paljon ajoajasta, jolloin kulutus vastaamasti myös pienenee ja kiihtyvyys paranee johtuen useammasta mahdollisesta välityksestä. Hyvällä laajaväntöisellä korkean hyötysuhteen moottorilla vaihteisto ei ole tarpeellinen.

Jatkokehityksenä olisi hyvä kokeilla laadukasta AC-moottoria, jolloin vaihteisto voidaan jättää pois ja näin säästää jonkin verran painoa. Toisaalta laadukkaat laajaväntöiset ajoneuvokäyttöön soveltuvat AC-moottorit ovat varsin kalliita ja vaativat myös monimutkaisemman ja kalliimman taajuusmuuttajan ohjaamaan moottoria. Laskemalla ajoneuvon voimansiirron välitykset sähkömoottorille optimaalisiksi, saadaan sähkömoottori toimimaan parhaalla hyötysuhteen alueella mahdollisimman paljon, jolloin ajaminen on mahdollisimman taloudellista.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Automobile and Transport Engineering
Intelligent machines

Juuso Mentula:
Electric car conversion comparative calculation

Bachelor's thesis 35 pages, appendices 6 pages
May 2015

The aim of this study was to compare the electric motor to the original gasoline engine. Both engines performance and consumption was studied in different transmission versions.

After the calculations results were good. The gearbox is good to use if the electric motor efficiency is not good. Gearbox will help the electric motor to operate with good efficiency thus consumption is reduced and the acceleration is improved.

The next thing would be good to try high quality AC motor so that the gear can be removed. High quality AC motors are expensive and require complicated and expensive controller. By changing the transmission gears electric motor operates with good efficiency which enables the economic driving.

Key words: electric car, gearbox, electric motor

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	SÄHKÖAUTON TEKNIikka	6
2.1	Sähköauton määritelmä.....	6
2.2	Sähkömoottorit.....	8
2.2.1	DC -moottorit.....	9
2.2.2	AC -moottorit.....	10
2.3	Akusto.....	11
2.4	Moottorinohjain	12
3	MUUNNETTAVA AJONEUVO.....	13
3.1	Mazda Mx-5 1.6 Na.....	13
3.2	Muutokset autoon	14
4	SÄHKÖISEN VOIMANSIIRRON KOMPONENTIT	15
4.1	Johdanto.....	15
4.2	Moottori	15
4.3	Moottorinohjain	16
4.4	Akusto.....	16
5	TEORIAOSUUS	17
5.1	Johdanto.....	17
5.2	Laskukaavat	17
6	LASKUTULOKSET	20
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	27
	LÄHTEET.....	29
	LIITTEET	30
	Liite 1. Ajoneuvon tekniset tiedot	30
	Liite 2. Kostov K9 HV moottorin tehokuvaaja	31
	Liite 3. Akkukennon tiedot.....	32
	Liite 4. Sähkömoottorin suoritusarvot ja ajoneuvon nopeus vaihteella 4, vastaava välitys kuin ilman vaihdelaatikkoa	33
	Liite 5. Bensiinimoottorin suoritusarvot nelosvaihteella	34
	Liite 6. Vastusvoimat eri nopeuksilla ja sen kumoamiseen vaadittava teho	35

1 JOHDANTO

Työssä tutkittiin miten sähkömoottorin käyttäminen vaikuttaa ajoneuvon suorituskykyyn ja kulutukseen verrattuna alkuperäiseen polttomoottoriin, ja millainen vaikutus vaihteistolla on sähkökäytössä. Jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia keskenään, valittiin sähkömoottoriksi vastaavan tehoinen moottori kuin alkuperäinen polttomoottori oli.

Vääntöominaisuuksiltaan moottorit eroavat toisistaan huomattavasti, joten tavoitteena on tutkia millainen vaikutus suuremmalla väännöllä on ajoneuvon suorituskykyyn. Lisäksi sähkömoottorin, moottorinohjaimen, akuston sekä muiden tarvittavien komponenttien valintaan vaikutti se, että ajomatkaksi saadaan noin 70 kilometriä ja ajoneuvon suorituskyky pysyy mahdollisimman lähellä alkuperäisiä polttomoottorin arvoja.

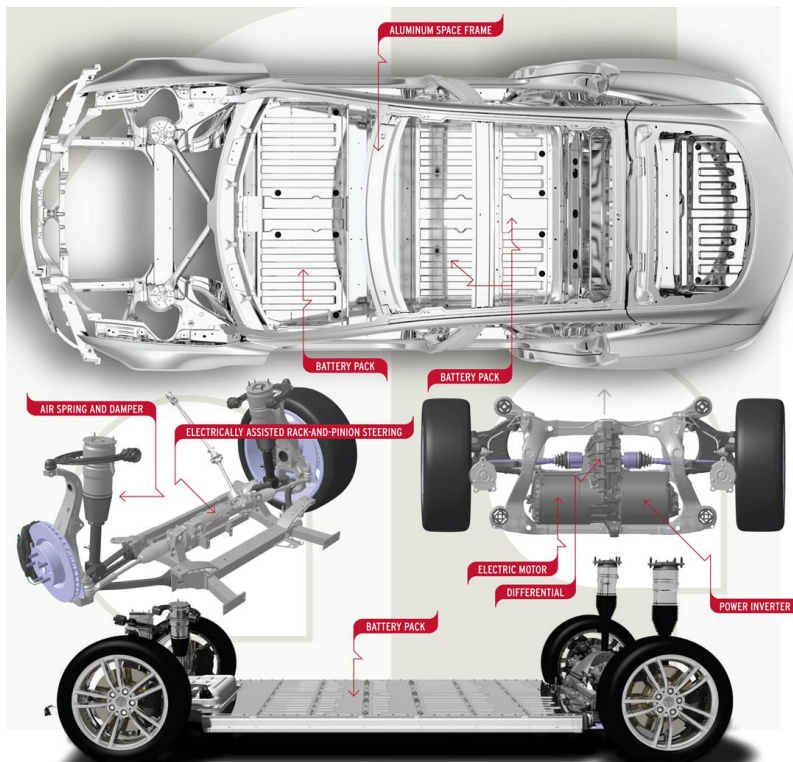
Vaihteiston merkitystä haluttiin tutkia tarkemmin sähkökäytössä, joten se on mukana yhtenä vaihtoehtona sähkömuunnoksessa. Simuloinnit suoritettiin kolmella erilaisella kokoonpanolla: auton alkuperäisellä voimansiirrolla ja polttomoottorilla, sähkömoottorilla ilman vaihteistoa sekä sähkömoottorilla vaihteiston kanssa.

2 SÄHKÖAUTON TEKNIikka

2.1 Sähköauton määritelmä

Sähköauto on ajoneuvo, jonka liikuttamiseen käytetään sähköä. Sähkö voidaan varastoida auton sisäiseen akustoon, jolloin kyseessä on täyssähköauto tai sitten sähkö tuotetaan auton omalla polttomoottorilla, jolloin kyseessä on hybridi. Näistä molemmista löytyy monenlaista erilaista sovellusta ja versiota, mutta pääpiirteittäin sähköautot voidaan jakaa näihin kahteen luokkaan. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2011, 42).

Sähköauto on ulkoisesti tavallisen auton näköinen, kuten alla olevista kuvista 1 ja 2 voi nähdä, ja siinä kaikki samat toiminnot kuin vastaavassa polttomoottorikäyttöisessä ajoneuvossa. Autojen erot tulevat esille ainoastaan voimansiirron ja moottorien osalta. Tärkeimmät sähköauton komponentit ovat akusto, sähkömoottori ja moottorinohjain. Lisäksi autossa on myös jännitteenmuuntajia, latauslaitteita, akuston vahteja ja myös muita erilaisia sähkökomponentteja, mitä ei tavallisesta polttomoottoriautosta löydy (Liikenne- ja viestintäministeriö 2011, 44).



KUVA 1 Sähköauton alustan rakenne. Caranddriver

Sähköautossa on tärkeää saada varastoitua energiaa ja myös käytettyä sitä mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella ja mahdollisimman tehokkaasti vähillä häviöillä. Yleensä sähköautojen akkukapasiteetti on varsin rajallinen. Kun ajoneuvon akkukapasiteettia lähdetään kasvattamaan, nousee koko ajoneuvon massa varsin merkittävästi ja tämä taas vaikuttaa tarvittavaan moottoritehoon varsinkin kiihdyttäessä ja vastaavasti myös tarvittavaan energiaan ajoneuvon liikuttamiseen (Motiva 2011, 44).

Sähköautot ovat nykyään taas suosiossa ja autovalmistajat pyrkivät kehittämään kiinnostavia uudenlaisia sähköautoja, jotka soveltuvat hyvin perinteiseen kaupunki- ja taajama-ajoon, mutta ovat samalla myös erittäin edistyksellisiä ja erilaisia. Sähköautojen ajomatkat ovat useimmiten rajoittuneet maksimissaan muutamaan sataan kilometriin, mutta Tesla on Model S mallillaan pyrkinyt rikkomaan näitä rajoitteita ja sillä päästäänkin isommalla akustolla yli 400 km ajomatkoihin (Tesla 2014).

BMW on myös nykyään suuresti mukana sähköautojen kehityksen kärjessä ja on kehittänyt hyvällä hyötysuhteella olevan tehokkaan ja mielenkiintoisen vaihtosähkömoottorin, jolla päästään korkeisiin pyörimisnopeuksiin, jolloin mekaanisesta vaihteistosta voidaan luopua ja parantaa näin voimansiirron läpi kulkevan energian hyötysuhdetta (BMW 2014).



KUVA 2. Tesla Model S sähköauto. Tesla

2.2 Sähkömoottorit

Sähkömoottorit voidaan jakaa karkeasti kahteen päätyyppiin: tasavirtamoottoreihin ja vaihtovirtamoottoreihin. Tasavirtamoottorit jaetaan vielä hiiliharjallisiin ja harjattomiin. Vaihtosähkömoottoreita löytyy useaa erilaista tyyppiä, mutta yleisimmät ovat induktiomootorit, kestromagneettimoottorit, erilaiset tahtimoottorit ja myös näiden yhdistelmät (Motiva 2011, 44).

Ac- ja dc-moottorit eroavat jonkin verran toisistaan mekaaniselta rakenteeltaan sekä myös teho- ja vääntöominaisuuksiltaan ac-moottoreiden hyväksi. Ac-moottorit ovat varsin soveltuvia ajoneuvokäyttöön niiden laajan kierrosalueensa vuoksi sekä myös niistä saadaan huomattavasti enemmän vääntöä heti käynnistyksestä lähtien. Laaja kierrosalua mahdollistaa vaihdelaatikon pois jättämisen, jolloin ajoneuvosta saadaan kevyempi ja myös mekaaniset häviöt vähenevät huomattavasti, kun ei ole tarvetta muuttaa välitystä ajoneuvon nopeuden suhteen (ABB 2014, 18).

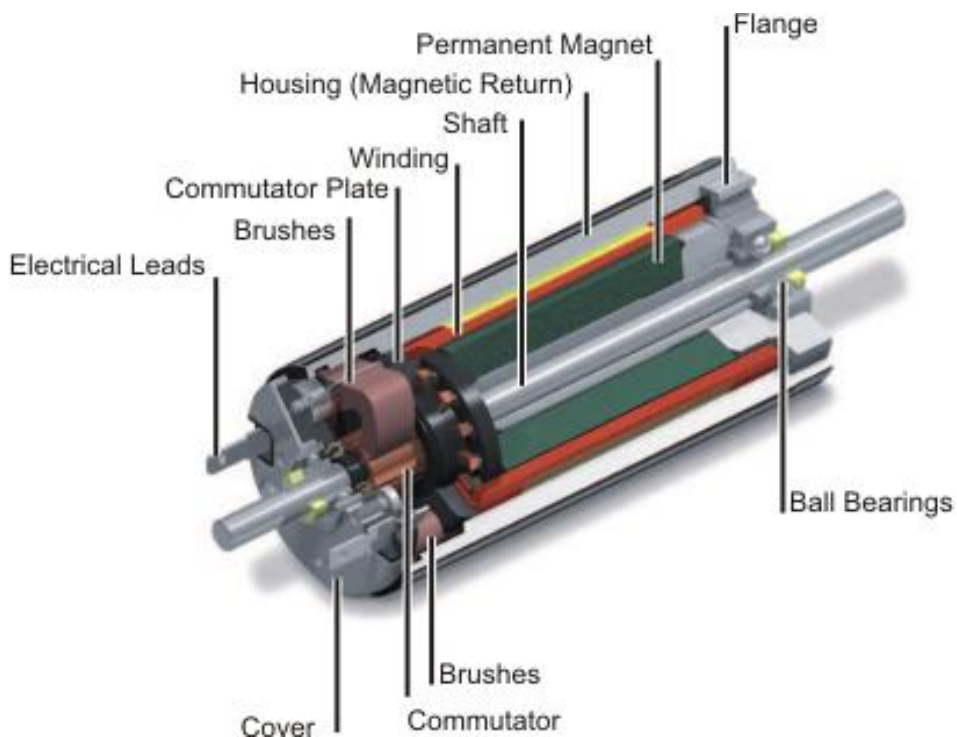
Hyötysuhteeltaan sähkömoottorit ovat huomattavasti parempia kuin polttomoottorit, joiden hyötysuhde rasiuksesta ja käytöstä riippuen jää yleensä noin 20 - 30 % tasolle, mutta Ac-tyyppisillä sähkömoottoreilla on mahdollista päästä yli 93 % hyötysuhteisiin varsin helposti. Elektronisen voimansiirron kokonaishyötysuhde on kuitenkin hieman huonompi, koska moottorinohjain, laturi ja muut komponentit vievät oman osansa niiden läpi kulkevasta energiasta. Mutta silti näistä häviöistä huolimatta sähköä saadaan huomattavasti tehokkaammin käytettyä ajoneuvon liike-energiaksi verrattuna perinteisiin polttoaineisiin (ABB 2014, 19).

Sähkömoottoreissa mekaanisia häviöitä aiheuttavat laakerit, tuulettimet, huono tasapainotus sekä dc-moottoreissa hiiliharjat. Ac-moottoreissa huono geometria magneettivuoissa aiheuttaa myös hyötysuhteen laskua. Näistä kaikista edellemainituista ominaisuuksista aiheutuu hyötysuhteen laskua ja lisäksi yleensä suurimmat syyt turhiin häviöihin ovat heikommista materiaaleista, osista sekä suunnittelun tasosta johtuva heikompi tuotteen valmistuslaatu (ABB 2014, 18).

2.2.1 DC -moottorit

Harjallisissa DC-moottoreissa on hiiliharjat, jotka hankaavat roottorissa olevaa kommunikaattoria vastaan ja tästä aiheutuu moottorin nimi. Hiilet aiheuttavat mekaanista häviötä ja tätä kautta hyötysuhteen laskua verrattuna harjattomaan moottoriin, joissa ei ole ollenkaan hiiliä. Hiilet ja kommunikaattori kuluvat käytössä koko ajan ja niitä pitää vaihtaa ajoittain (Lappeenrannan yliopisto 2007, 3).

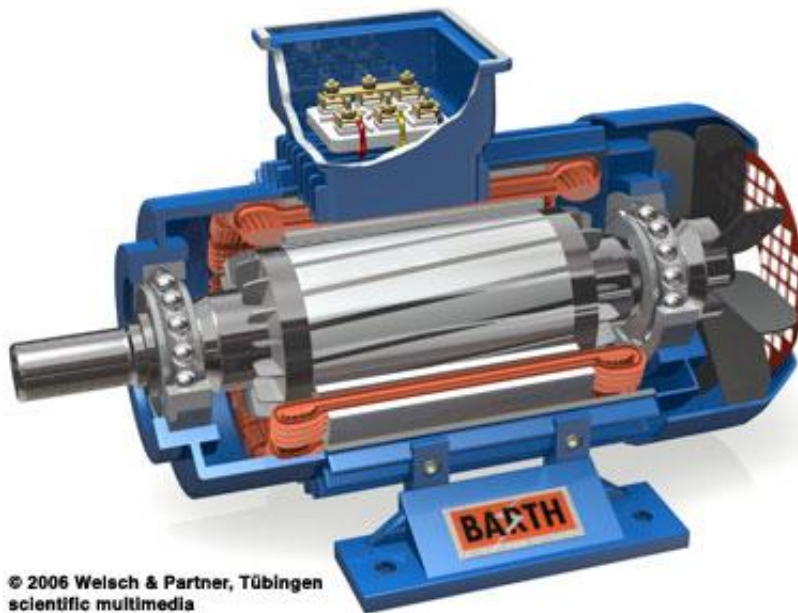
Hiiliharjaton DC-moottori on kestmagnetoitu moottori ja nähtävissä alla kuvassa 3. Siinä ei ole mekaanista yhteyttä staattorin ja roottorin välillä muualta kuin laakereiden kautta, joten sen hyötysuhde on jonkin verran parempi kuin perinteisin hiiliharjallisen moottorin. Mutta tästä syystä se vaatii erilaisen ja monimutkaisemman moottorinohjaimen kuin tavallinen DC-moottori. Vähemmän huollontarpeen takia harjattomat moottorit ovat varsin pitkäikäisiä ja moottorin kestoiän määrittää laakereiden kestoikä. Muita kuluvia osia moottorissa ei ole laakereiden lisäksi (Lappeenrannan yliopisto 2007, 5).



KUVA 3. DC-moottorin rakenne. Maxon motors

2.2.2 AC -moottorit

Oikosulkumoottori on teollisuudessa eniten käytettyjä AC-moottoreita ja tästä syystä ne ovat usein rakenteeltaan painavia ja kestäviä. Oikosulkumoottori kestää hyvin ylikuormitusta ja sitä myös voidaan pyörittää nimellinopeutta nopeammin. Oikosulkumoottorit lämpiävät jonkin verran enemmän kuin muut vaihtovirtamoottorit, johtuen hieman huonommasta moottorin hyötysuhteesta. Roottori pyörii hieman hitaammin kuin staattorin magneettikenttä ja tästä syystä sitä kutsutaan epätahtimoottoriksi, nähtävissä alla kuvassa 4. Oikosulku moottoreissa ei ole magneetteja vaan magneettikenttä luodaan moottoriin roottoriin sähköisesti. (ABB 2014, 6).



KUVA 4. Oikosulkumoottori Welsch

Tahtimoottori pyörii samaan tahtiin ohjaajan signaalin sekä pyörivän magneettikentän taajuuden mukaisesti. Tunnetaan myös nimellä synkronimoottori ja näiden moottoreiden hyötysuhde on pari prosenttia oikosulkumoottoreita parempi. Kestomagneettimoottorit ovat nimensä mukaisesti kestopagnetoitu magneeteilla ja tästä syystä niillä päästään hyvin hyötysuhteisiin, koska niissä ei käytetä erillistä virtaa magneetoinnin ylläpitämiseen. (ABB 2014, 8).

Kestomagneettimoottori muistuttaa suuresti harjatonta DC-moottoria johtuen hyvin samankaltaisesta rakenteesta staattorissa sekä roottorissa. Kestomagneettimoottorit eivät kestä niin kovia lämpötiloja tai pyörimisnopeuksia kuin muut AC-moottorit, johtuen niiden fyysisten magneettiensa kiinnityksistä, jotka pyrkivät irtoamaan kovilla pyörimisnopeuksilla. Toisaalta kestomagneettimoottorit ovat hyviä ajoneuvokäyttöön, koska pystyvät kehittämään paljon vääntöä heti matalilta kierroksilta lähtien ja tästä syystä ne toimivat hyvin ilman vaihteistoa (ABB 2014, 12).

2.3 Akusto

Sähköauton tärkein yksittäinen komponentti on akusto. Akun on oltava mitoitettu ja sovelluttava valittuun käyttötarkoitukseen mahdollisimman hyvin, jotta päästään mahdollisimman korkeaan massankäytön hyötysuhteeseen. Sähköautossa ajoneuvon massalla on huomattavasti enemmän vaikutusta ajoneuvon energiankäytön kokonaisyötysuhteeseen ja ajotapaan kuin bensiinimoottorisella, koska sähköauton akkua ei ole yhtä nopea ladata kuin täyttää polttomoottoriajoneuvon polttoainetankki (Motiva 2011, 54).

Akusto ja sen ominaisuudet vaikuttavat erittäin suuresti koko ajoneuvon ajo-ominaisuuksiin, käytettävään maksimitehoon, jatkuvaan käytettävään tehoon sekä ajomatkaan. Akkutyypistä riippuu kuinka paljon se pystyy luovuttamaan energiaa ulos hetkellisesti sekä kuinka kauan akkua voidaan kuormittaa tasaisella kuormalla, ennen kuin akun jännitetaso laskee liian alas (Motiva 2011, 54).

Erilaisia akkutyyppejä on useita ja niiden väliset ominaisuudet vaihtelevat suuresti. Yleisimmät käytössä olevat akkutyypit nykyään ovat lyijyakku ja erilaiset litium-polymeeriakut ja sen johdannaiset. Näiden lisäksi on käytetty NiHM, NiCd ja muutamia muita akkutyyppejä. Uusissa sähköautoissa käytetään lähes pelkästään enää LiPo -akkuja niiden hyvien ominaisuuksien ja keveyden takia. LiPo-akku pystyy varastoimaan energiaa painoonsa nähden huomattavasti tehokkaammin kuin muut akkutyypit. LiPo-akut kestävät myös tuhansia latauskertoja kapasiteetin laskematta kovinkaan merkittävästi sekä niissä ei esiinny haitallista muisti-ilmiötä, jos niitä ladataan vajaalla kapasiteetilla (Motiva 2011, 56).

2.4 Moottorinohjain

Sähkömoottori vaatii tietyn tyyppisen säätimen riippuen moottorityypistä. Harjaton ja harjallinen DC-moottori vaativat erilaiset säätimet sekä myös AC-moottorille pitää olla omanlaisensa säädin eli taajuusmuuttaja. DC-moottoreiden säätimet ovat toiminnaltaan ja rakenteeltaan huomattavasti yksinkertaisempia kuin AC-moottoreiden taajuusmuuttajat johtuen erilaista moottoreiden teknisistä ratkaisuista sekä niiden käyttämästä jännitemuodosta (ABB 2009, 16).

DC-moottorin ohjaustapana on useimmiten pwm-signaali, jossa säädetään moottoria käyttävän jännitteen pulssin leveyttä. AC-moottorin ohjauksessa käytetään huomattavasti monimutkaisempaa tekniikkaa ja siinä ohjaus tapahtuu signaalin taajuutta, jännitettä ja virtaa yksityiskohtaisesti säätämällä, jolloin pystytään hyvinkin tarkasti ohjaamaan moottoria aina kyseisen pyörimisnopeus- tai vääntötavoitteen mukaisesti. Energian talteenotto ajoneuvonkäytössä on huomattavasti helpompi toteuttaa AC-moottorilla verrattuna DC-moottoriin, johtuen moottorien erilaisista teknisistä ratkaisuista ja AC-moottorin taajuusmuuttajan kehittyneemmistä ominaisuuksista (Motiva 2011, 44).

3 MUUNNETTAVA AJONEUVO

3.1 Mazda Mx-5 1.6 Na

Suunnitelman kohteeksi valikoitui Mazda Mx-5 vuosimallia 1990. Ensimmäisen korimallin Mx-5 on aikanaan ollut hyvin suosittu auto ja sen suosio on tämän jälkeenkin pysynyt hyvänä. Mx-5 on myös varsin hauskan ja omalaatuisen näköinen, johtuen nykyään erikoisista ja harvinaisista luukkulampuista, kuten nähdään kuvasta 5 alla. Se on pieni ja kevyt urheiluauto ja omaa erittäin hyvät ajo-ominaisuudet ja tarkan ohjauksen. Tästä syystä se on suosittu rakentelukohde ja siihen löytyy paljon kaikenlaista viritysosaa.

Mx-5 on kevyt auto, joten se liikkuu pirteästi pienelläkin moottorilla ja myös energian kulutus on kevyellä autolla vähäisempää, joten tämän kokoisen auton energiavarastoksi riittää pienempi akkukennosto. Näistä syistä sähkömuunnos tulee edullisemmaksi, kuin jonkun nykyaikaisen huomattavasti painavamman modernin henkilöauton muuttaminen. Vanha auto on myös helpompi mekaanisesti ja elektronisesti muuttaa, koska vanhoissa autoissa tekniikka on yksinkertaisempaa ja käyttäjän on myös itse helppo päästä siihen käsiksi. Ajoneuvon tiedot on koottu liitteenä 1 olevaan listaan.



KUVA 5. Mazda Mx-5 (Ladyonwheels)

3.2 Muutokset autoon

Muunnettaessa polttomoottorikäyttöinen ajoneuvo sähkökäyttöiseksi, pitää siitä poistaa varsin paljon erilaisia komponentteja. Poistettavia osia ovat polttoainetankki, moottori, apulaitteet ja erilaiset moottorin toimintaan liittyvät komponentit eli jäähdyttimet, polttoainelinjat, pakoputkisto ja muut vastaavat. Vaihdelaatikko voidaan käyttää muunnoksessa tai se voidaan ottaa pois kokonaan, jolloin saavutetaan painonsäästöä.

Tässä projektissa tutkitaan vaihdelaatikon vaikutusta ajoneuvossa, joten toisessa vaihtoehdossa on vaihdelaatikko mukana ja toisessa ei. Alla olevassa taulukossa on listattu poistettavat komponentit painoineen ja laskettu myös saavutettu painonsäästö (TAULUKKO 1). Vaihdelaatikon poistamisesta saadaan pieni painonsäästö, jolla saadaan myös vaikutettua ajoneuvon suorituskykyyn. Seuraavassa kappaleessa on esitelty valittavat sähkökomponentit tarkemmin.

TAULUKKO 1. Lista ajoneuvon muutoksista

Poistettavat osat:

Moottori	126 kg
Moottorin nesteet	10 kg
Moottorin apulaitteet	15 kg
(Vaihdelaatikko)	36 kg
Polttoainetankki	10 kg
Polttoaine, 45 l	33,75 kg
Akku	15 kg
Muuta säälää	10 kg
<hr/>	
yht:	255,75 kg

Lisättävät osat:

Kostov k9hv sähkömoottori	45 kg
Soliton Jr säädin	7 kg
Akut 94 kpl, 40 Ah 1,4 kg	131,6 kg
Johdotukset, jännitteen muunnin yms	10 kg
<hr/>	
yht:	193,6 kg

Ajoneuvon painonmuutos:

Ilman vaihdelaatikkaa	62,15 kg
Vaihdelaatikon kanssa	26,15 kg

4 SÄHKÖISEN VOIMANSIIRRON KOMPONENTIT

4.1 Johdanto

Valitut osat on valittu hinnan perusteella koska on pyritty luomaan edullinen harrastelijatason muunnos, joka on myös mahdollista itse rakentaa valmiiksi ilman erikoistyökaluja. Tästä syystä on päädytty yksinkertaiseen DC-moottoriin ja sitä ohjaavaan moottorinohjaimeseen, jotka molemmat ovat hyvin kilpailukykyisiä hinnaltaan. Akustoksi valikoitui myös kohtuullisen hintaisia kennoja, joilla on tavoitteena päästä noin 70 kilometrin ajomatkaan.

4.2 Moottori

Sähkömoottoriksi valikoitui erilaisissa sähköisissä muunnoksissa varsin suosittu Kostov K9 HV hiiliharjallinen DC-moottori. Valintaan vaikutti moottorin edullinen hinta sekä eurooppalainen valmistaja. Moottori kykenee myös tuottamaan painoonsa ja kokoonsa nähden varsin mukavasti vääntöä ja se vastaa teholtaan melko hyvin alkuperäistä bensiinimoottoria. Moottorilla on laaja kierrosalue, joten ajoneuvolla voidaan ajaa muutoksen jälkeen lähes vastaavasti kuin alkuperäisellä moottorilla. Painoa moottorilla on noin 45 kiloa ja kooltaan se on huomattavasti alkuperäistä polttomoottoria pienempi, joten se mahtuu moottoritilaan erittäin hyvin (Kostov motors 2014).

Moottori toimii 220 voltin jännitteellä ja virtaa se ottaa enimmillään 500 ampeeria, näillä arvoilla se pystyy tuottamaan noin 80 kilowatin tehon sekä 175 newtonmetriä vääntöä. Hyötysuhteessa DC-moottori jää jälkeen vastaavan tehoisista AC-moottoreista, johtuen mekaanisista häviöistä, mutta toisaalta hinnassa se on huomattavan kilpailukykyinen. Laadukkaat AC-moottorit ovat varsin kalliita, joten huomattava osa harrastelijoiden suorittamista sähköajoneuvomuunnoksista on varustettu DC-moottoreilla. Valmistajan antama kuvaaja moottorin ominaisuuksista löytyy liitteenä 2 (Kostov motors 2014).

4.3 Moottorinohjain

Moottoria ohjaamaan valikoitui Evnetecsin valmistama Soliton Jr-säädin joka on myös varsin suosittu vaihtoehto vastaavan kokoluokan DC-moottoreille. Se on täysin käyttäjän ohjelmoitavissa ja muokattavissa erilaisia käyttötarkoituksia varten, joten se taipuu varsin monenlaiseen sovellukseen. Säädin kykenee syöttämään moottorille 340 voltin jännitettä sekä 600 ampeerin suuruista virtaa, jolloin hetkelliseksi maksimitehoksi määräytyy noin 200 kilowattia (Evnetics 2014).

Säätimessä ei ole mahdollisuutta energian talteenottoon, mutta muuten se on varsin oivallinen vaihtoehto ominaisuuksiin ja hintaansa nähden. Säädin painaa noin 7 kg ja se tullaan sijoittamaan moottoritilaan moottorin lähelle, jotta virtakaapeleista saadaan mahdollisimman lyhyet ja jännitehäviöt pysyvät pieninä (Evnetics 2014).

4.4 Akusto

Akkuina projektissa tullaan käyttämään GWL:n Calb 40 Ah LiFePO₄-akkuja. 94:lla sarjaan sijoitetulla akulla saadaan akuston kokonaisjännitteeksi noin 325 voltia riippuen kennoston varaustasosta. Akuston kokonaiskapasiteetiksi muodostuu tällöin noin 12 kilowattia, jolla on tavoitteena suoriutua noin 70 kilometrin ajomatkasta taajamanopeuksilla. Tällä tavoitteella akuston paino ja koko saadaan pidettyä kohtuullisina, ja näin myös ajoneuvon massa on hieman pienempi kuin alkuperäisellä ajoneuvon voimansiirrolla (GWL 2014).

Ajoneuvon pienemmällä massalla päästään parempaan energian hyötykäyttöön, joka taas ilmenee pienempänä kulutuksena ja parempana kiihtyvyytenä. Painoa yhdellä kennolla 1,4 kiloa, joten akuston kokonaispainoksi tulee tällöin 136 kiloa. Tekniset tiedot nähtävissä liitteenä 3 (GWL 2014).

5 TEORIAOSUUS

5.1 Johdanto

Ajoneuvon liikettä vastustaa muutamia erilaisia tyyppisiä voimia, jotka aiheuttavat ajoneuvon vauhdin hidastumista sekä heikompaa kiihtyvyyttä. Vastustavat voimat voidaan jakaa vierintävastukseen, ilmanvastukseen, gravitaatiovoimaan sekä inertiaan eli hitausmassan muutoksia vastustava vaikutus (Lauri Hietalahti, 2009, 3). Kitkahäviöitä aiheutuu myös ajoneuvon voimansiirron ja pyöräntuennan laakereista ja hammasrattaista, joka johtuu osien mekaanisesta kosketuksesta ja liikkeestä toisiaan vasten. Erilaisten vastusvoimien ja häviöiden yhteenlaskettu summa hidastaa ajoneuvoa ja hukkaa energiaa ääneksi, lämmöksi ja liikkeeksi. Näiden voimien summasta aiheutuu varsin merkittävä tehohäviö, jota vastaan moottorin on tehtävä työtä, jotta ajoneuvo pysyy liikkeessä tai vauhtia voi kiihdyttää (Lauri Hietalahti, 2009, 16).

5.2 Laskukaavat

Vierintävastusta ajoneuville aiheuttaa renkaiden vierintä maata pitkin. Renkaat ovat ajoneuvon ainoa osa, joka on kosketuksissa tiehen ajon aikana. Renkaan leveydellä ja kumin seossuhteella on hyvinkin suuri vaikutus ajoneuvon rullautuvuuteen sekä kulutukseen. Vierintävastusta aiheutuu myös renkaiden muodonmuutoksesta niiden pyrkiessä mukautumaan tien muotoihin. Vierintävastuksen hukkaenergia esiintyy rengasmeluna sekä renkaan lämpenemisenä. Vierintävastuksen laskukaava on seuraavaa:

$$F_r = P \cdot f_r \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

P on ajoneuvon pyöräpaine

f_r on ajoneuvon vierintävastus

α on alustan kulma

Pyöräpaine lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$P = m_v \cdot g \quad (2)$$

m_v on ajoneuvon massa

g on putoamiskiihtyvyys

Vierintävastus lasketaan kaavalla:

$$f_r = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{100}\right) \quad (3)$$

v on ajoneuvon nopeus

Ilmanvastus on suurin yksittäinen voima, joka aiheuttaa ajonaikaisia vastustavia voimia. Varsinkin suuremmilla nopeuksilla ilmanvastuksen aiheuttama vastus on huomattavan korkea. Ajoneuvon muodolla on varsin suuri vaikutus ilmanvastuskertoimeen ja miten ilma liikkuu ajoneuvon ympärillä, varsin pienetkin muutokset ajoneuvon korissa vaikuttavat suuresti ilman kulkuun ja pyörteilyyn. Ilmanvastus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$F_\omega = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot (v + v_\omega)^2 \quad (4)$$

ρ on ilman tiheys

A_f on auton otsapinta-ala

C_d ilman vastuskerroin

v on ajonopeus

v_ω ilman vastainen nopeus

Gravitaatiovoima pyrkii vastustamaan ajoneuvon liikettä ja varsinkin ylämäessä sen aiheuttamat vastusvoimat kasvavat huomattavasti. Vastaavasti alamäessä gravitaatiovoimasta saadaan ajoneuvoa kiihdyttävää liikettä. Gravitaatiovoiman kaava on seuraavaa:

$$F_g = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

m_v on ajoneuvon massa

g on putoamiskiihtyvyys

α on alustan kulma

Laskettaessa kaikki edellä mainitut voimat yhteen saadaan kokonaisvastusvoima, joka pyrkii vastustamaan ajoneuvon liikettä liikkeen aikana. Kokonaisvastusvoima F saadaan seuraavalla kaavalla:

$$F = F_r + F_g + F_\omega \quad (6)$$

Riippuen moottorin tuottamasta voimasta verrattuna kokonaisvastukseen tietyllä ajonopeudella, ajoneuvon nopeus pysyy samana, kasvaa tai hidastuu. Vaadittava teho tietyllä ajonopeudella lasketaan kaavalla:

$$P = F \cdot v \quad (7)$$

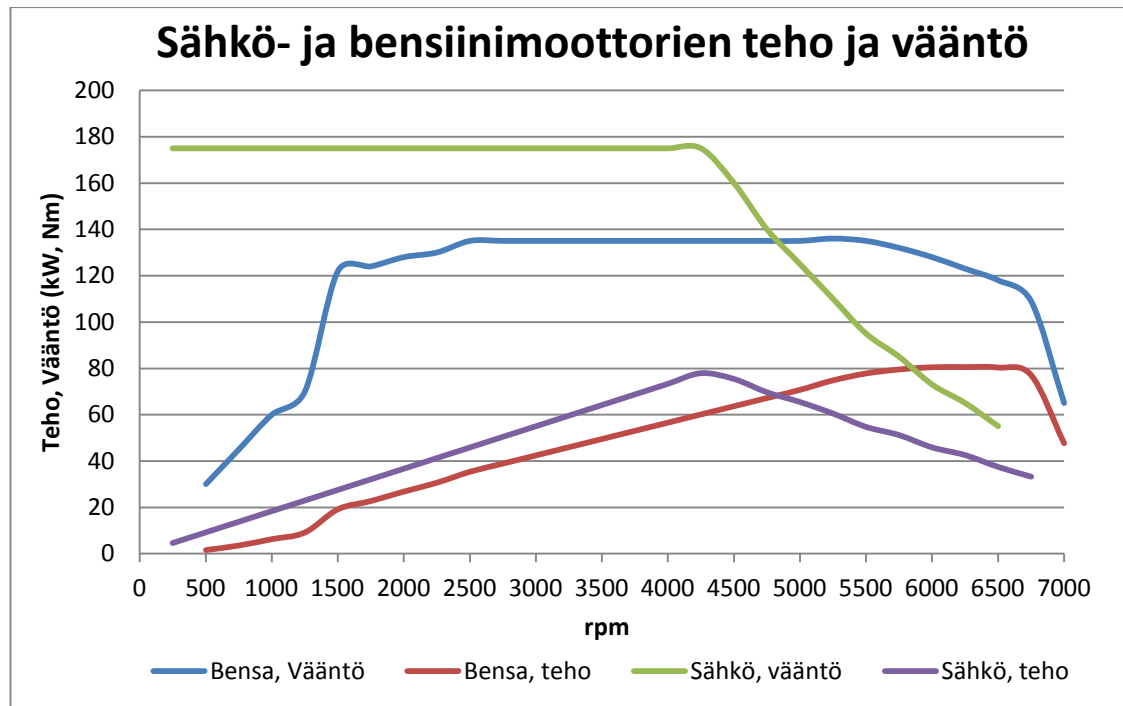
F on kokonaisvastusvoima

v on ajonopeus

6 LASKUTULOKSET

Edellisen kappaleen kaavoilla on laskettu ajoneuvolle liitteistä löytyvien tietojen perusteella kuvaajat, joista selviää ajoneuvon kiihtyvyys väleillä 0 - 100 km/h ja 80 - 120 km/h, teho- ja vääntökuvaaja, voimansiirron hyötysuhteet ja energiankulutus nopeuden suhteen. Laskuissa on otettu huomioon mekaaniset sekä elektroniset häviöt, joilla on suuri vaikutus laskutuloksiin.

Teho- ja vääntökuvaaja on muodostettu liitteenä olevien sähkö- ja polttomoottorin suoritusarvojen perusteella. Kuviossa 1 on esitetty moottorien tuottamat väännöt ja tehot eri kuvaajilla.



KUVIO 1. Sähkö- ja bensiinimoottoreiden tuottama teho ja vääntö

Seuraavaksi laskettiin ajoneuvon kulkua vastustavat voimat eri nopeuksilla kaavan 6 avulla, johon sijoittamalla ajoneuvon tiedot ja ajonopeus saadaan luotua taulukko, josta ilmenee ajoneuvon vaikuttavat vastusvoimat eri nopeuksilla. Avattaessa kaava eri komponentteihin muodostuu siitä seuraavaa:

$$F_{Vastukset} = m_v \cdot g \cdot 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{100}\right) \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot (v + v_\omega)^2 + m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

Tämän jälkeen moottorin tuottama vääntömomentti on muunnettu jokaisella vaihteella ajonopeuden suhteen voimaksi, jonka ajoneuvo pystyy välittämään tiehen. Voimansiirron häviöt on vähennetty moottorin tuottamasta voimasta ja jokaisella eri kokoonpanolla on erilaiset voimansiirron häviöt. Laskun kaava on seuraava, jossa moottorin momentti on kerrottu välityksellä ja tulos jaettu renkaan halkaisijalla, lopputuloksena saadaan ajoneuvon tiehen välittämä voima tietyllä moottorinkierrosluvulla.

$$F_{ajoneuvo} = \frac{M_{moottori} \cdot Kokonaisvälitys}{R_{renkas}} \quad (9)$$

$F_{ajoneuvo}$ on moottorin tuottama voima ajoneuvon liikkumiseen

$M_{moottori}$ on moottorin tuottama vääntömomentti

$Kokonaisvälitys$ on vaihteen välitys kertaa perän välitys, tiedot löydettävissä liitteestä 1

R_{renkas} on renkaan säde, liite 1

Kun $F_{ajoneuvo}$:sta vähennetään $F_{vastukset}$ saadaan ajoneuvon liikeyhtälö, josta ilmenee ajoneuvon nopeuden muutos lasketulla nopeuden hetkellä. Positiivisella arvolla ajoneuvon nopeus kasvaa ja negatiivisella pienenee. Jos laskutuloksena on nolla ajoneuvon nopeus ei muutu. Kun on saatu voima, joka pyrkii muuttamaan ajoneuvon nopeutta, on se muutettu kiihtyvyydeksi seuraavalla kaavalla 10.

$$F = m \cdot A \quad (10)$$

Joka kääntyy kaavaksi 11, josta saadaan lopputulokseksi kiihtyvyys, kun jaetaan kiihdyttävä voima ajoneuvon massalla.

$$A = \frac{F}{m} \quad (11)$$

A on ajoneuvon kiihtyvyys tietyllä ajonopeudella

F on voima, joka vaikuttaa ajoneuvon

m on ajoneuvon massa

Edellä mainittujen laskukaavojen avulla on laskettu taulukkoon arvot ajoneuvolle eri välityksillä jokaiselle omalle kokoonpanolle jokaisella ajovälityksellä. Yhteensä näitä taulukoita on luotu yksitoista kappaletta (bensiinille viisi eri välitystä, vaihdelaatikollinen sähköauto viisi erilaista sekä yksi vaihdelaatikottoman suoravälitys). Näiden arvojen avulla on saatu laskettua kuvaajat kaikkiin myöhempisiin laskutuloksiin ja kuvaajiin.

Näistä taulukoista ilmenee ajoneuvon moottorin kierrosluku, ajonopeus kyseisellä moottorin kierrosluvulla, moottorin teho, moottorin tuottama vääntö, moottorin voimantuotto, vastustavat voimat, voimien erotus sekä kiihtyvyys. Esimerkki nähtävissä alla olevassa taulukossa 2, joka kuvaa moottorin tuottamia arvoja kierrosluvulla 250 – 2500 rpm.

TAULUKKO 2 Ajoneuvon tiedot vaihteellisessa sähköautossa vaihteella 4

kierrokset r/min	V (km/h)	Teho (kW)	Teho (Hp)	Vääntö (Nm)	Voima (N)	Vastukset (N)	Erotus (N)	Kiihtyvyys (m/s)
250	6,33	4,58	6,23	175,00	2605,61	5,16	2600,44	2,67
500	12,66	9,16	12,46	175,00	2605,61	10,33	2595,28	2,66
750	18,99	13,74	18,69	175,00	2605,61	20,14	2585,47	2,65
1000	25,32	18,33	24,92	175,00	2605,61	33,06	2572,55	2,64
1250	31,65	22,91	31,15	175,00	2605,61	49,07	2556,54	2,63
1500	37,98	27,49	37,38	175,00	2605,61	68,18	2537,42	2,61
1750	44,31	32,07	43,62	175,00	2605,61	90,40	2515,21	2,58
2000	50,64	36,65	49,85	175,00	2605,61	115,71	2489,90	2,56
2250	56,97	41,23	56,08	175,00	2605,61	144,12	2461,49	2,53
2500	63,30	45,81	62,31	175,00	2605,61	175,64	2429,97	2,50

Ajoneuvon kiihtyvyydestä on seuraavaksi laskettu kiihdytysaika, joka kuluu käyttäessä eri välityksiä. Tämä on saatu aikaan laskemalla keskiarvo ajoneuvon kiihtyvyydestä vaihteen eri nopeusalueilla ja tällä keskiarvokiihtyvyydellä on tämän jälkeen jaettu nopeusalue, jolla vaihde toimii.

Lopputuloksena on saatu ajalle arvo, joka kuluu kiihdyttäessä vaihteen läpi maksimaalisella moottorin voimantuotolla. Jokaiseen vaihteen vaihtoon on varattu aikaa 0,75 sekuntia. Lopuksi on laskettu yhteen jokaisen vaihteen kiihdytysaika sekä vaihteen vaihtoihin kuluvat ajat ja tästä on saatu kokonaisaika, mikä kuluu kiihdyttäessä kullekin vaihteelle.

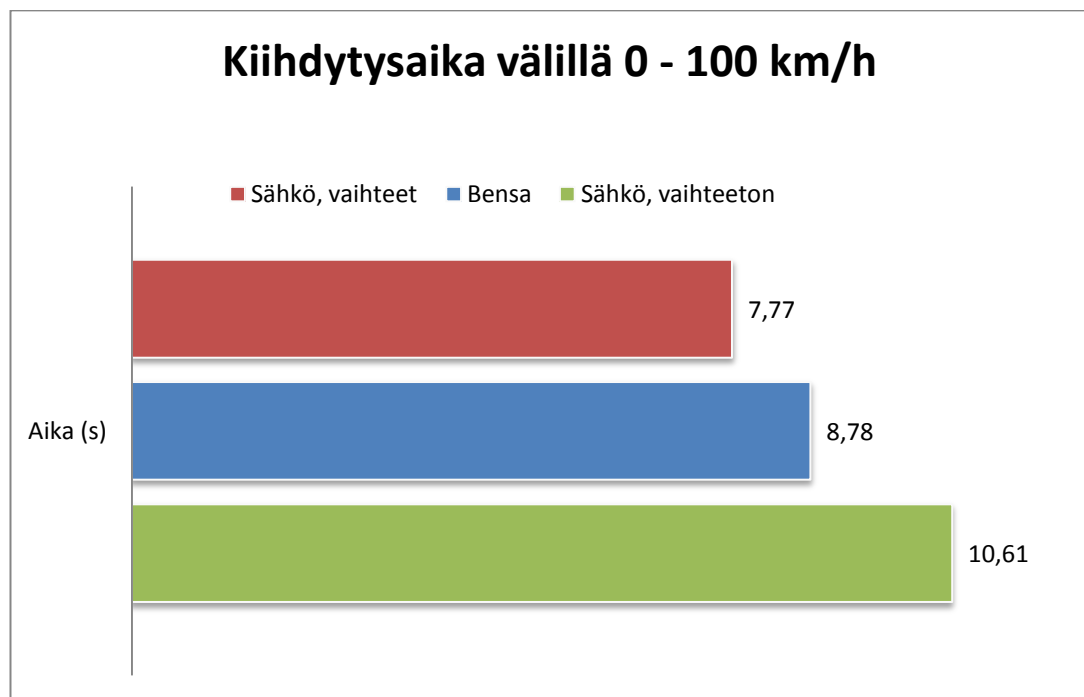
Esimerkin lasku on laskettu vaihteistolla varustetusta sähköautosta ja se on nähtävissä alla taulukossa 3. Kiihtyvyys on laskettu esimerkkitehtävässä välillä 0 – 100 km/h käyttäen kolmea pienintä vaihdetta.

TAULUKKO 3 Vaihdelaatikollisen sähköauton kiihtyvyys 0 – 100 km/h

**Kiihtytys 0 - 100
km/h**

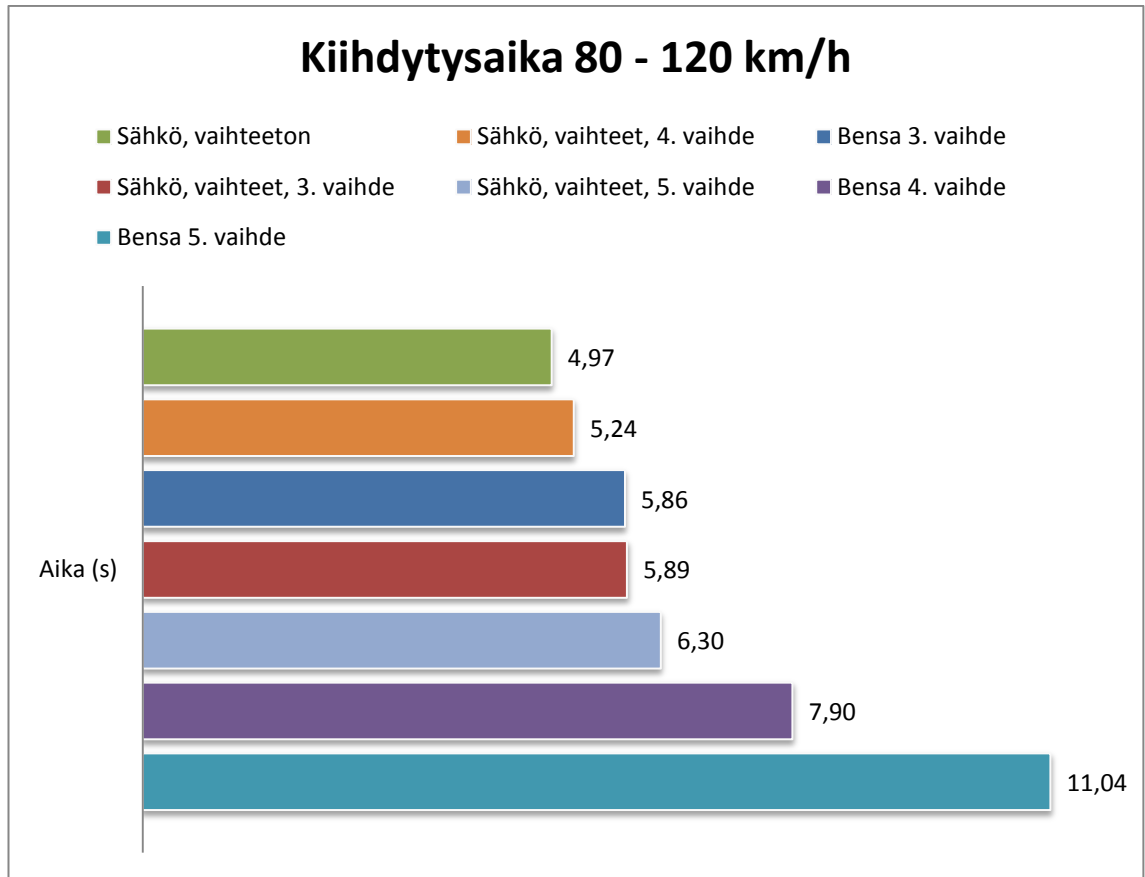
Vaihde			Kiihtyvyys	Aika
1.	0 - 5250	rpm	7,98 m/s	1,46 s
2.	3250 - 5250	rpm	4,37 m/s	1,78 s
3.	2750 - 5250	rpm	2,76 m/s	3,02 s
Vaihteenvaihto 2 x 0,75 s				1,5 s
Kokonaisaika				7,77 s

Edellisen esimerkin mukaisesti on laskettu muillekin vaihtoehdoilla ajoneuvon kiihtyvyydet nopeusalueilla 0 – 100 km/h ja 80 – 120 km/h. Tulokset nähtävissä kuvioissa 2 ja 3. Poikkeuksena laskuissa on kiinteällä välityksellä oleva vaihteeton versio, jossa ei tapahdu vaihteenvaihtoja, joten tässä vaihtoehdossa ei kulu aikaa vaihteenvaihtoon ja myös vaihteistosta aiheutuvia voimahäviöitä ei myöskään ole.



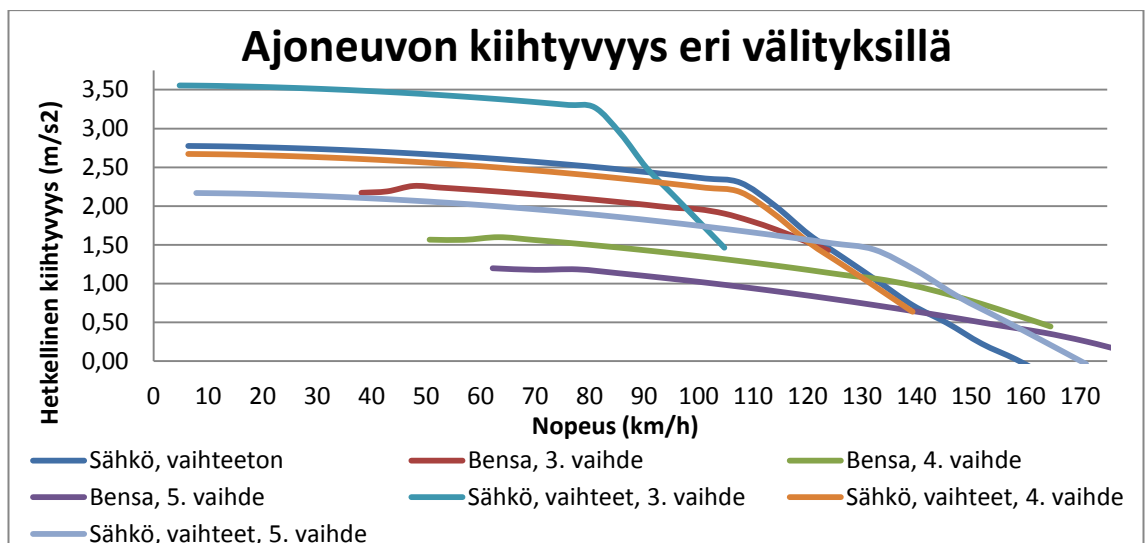
KUVIO 2. Eri kokoonpanojen kiihdytysaika 0 – 100 km/h

Samalla tavalla on myös laskettu aika kiihtyvyydelle eri vaihteilla välillä 80 - 120 km/h. Tulokset nähtävissä alla olevassa kuvaajassa 3.



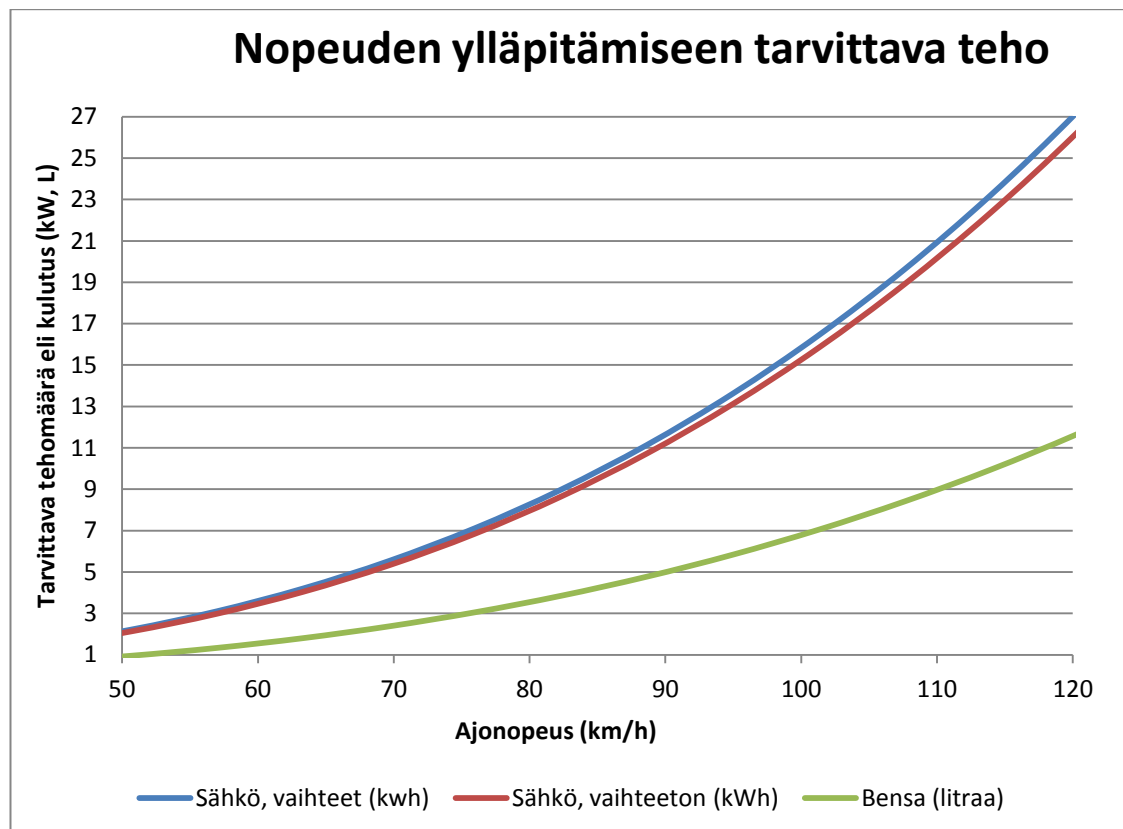
KUVIO 3. Eri vaihtoehtojen ohituskiihtyvyyteen kulunut aika välillä 80 – 120 km/h

Lisäksi taulukon arvoista on myös luotu kuvaaja 4, josta ilmenee eri vaihtoehtojen eri välityksien kiihtyvyydet tietyllä ajoneuvon nopeudella.



KUVIO 4. Kiihtyvyydet eri vaihtoehtoilla ja välityksillä

Seuraavassa kuvaajassa 5 on esitetty vastustavista voimista aiheutuva energiahäviöt, joita vastaan moottorin on tehtävä työtä, jotta ajoneuvon nopeus pysyy vakiona. Näistä arvoista on laskettu energiankulutus sähkölle sekä bensiinille. Ensin on muutettu vastustavat voimat tehoksi. Bensiininkulutuksen laskennassa on käytetty bensiinin energiaenergiämääräksi kiloa kohden arvoa 43 megajoulea, joka on vielä muutettu litramääräiseksi kulutukseksi kertomalla kilomäärä bensiinin tiheydellä 0,75 kg per litra. Lopulliset tulokset nähtävissä alla olevassa kuvaajassa 5. Laskuissa voimansiirron häviöt on otettu huomioon ja näistä myös aiheutuu pientä vaihtelua tuloksiin.



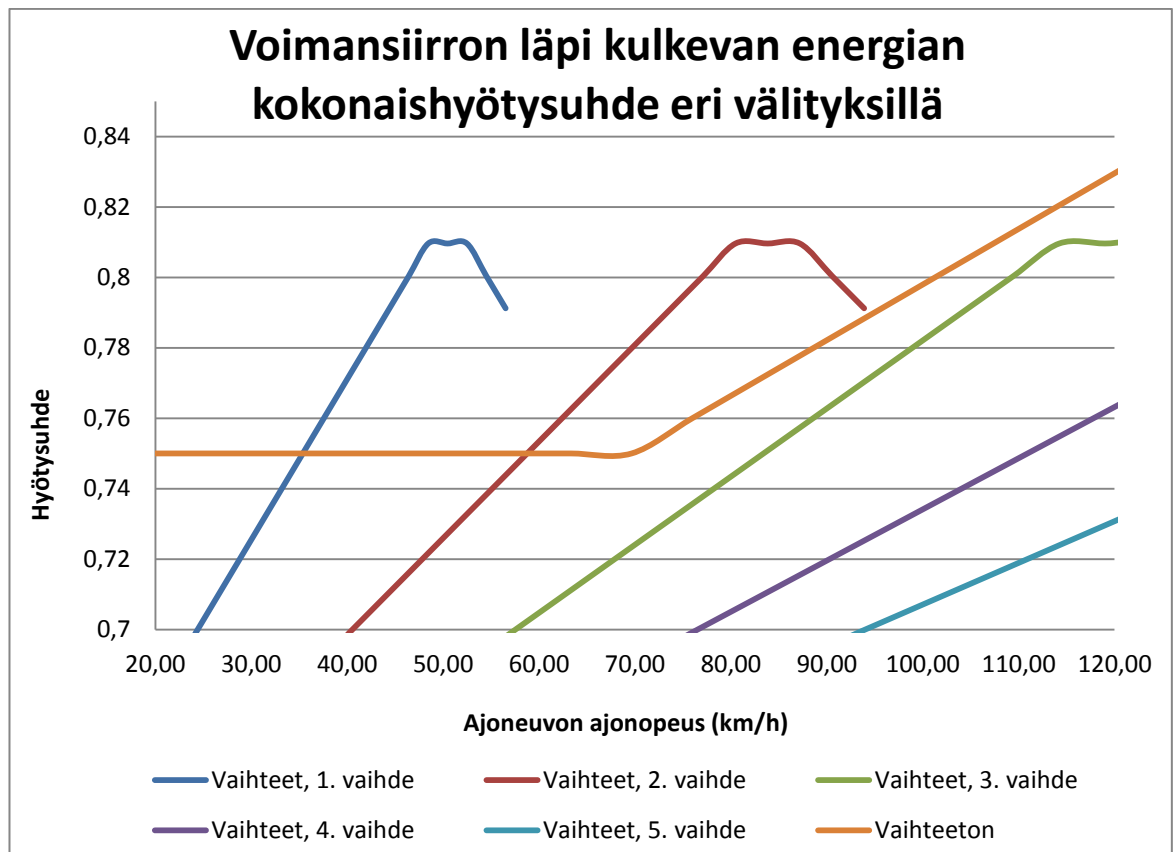
KUVIO 5. Vastustavien voimien voittamiseen kuluva energiamäärä eri ajonopeuksilla

Voimansiirron hyötysuhteet on laskettu kertomalla sähkömoottorin hyötysuhde voimansiirron hyötysuhteella jokaisella eri voimansiirron välityksellä erikseen. Tästä on luotu oheisen esimerkin kaltainen taulukko 4 jokaiselle välitykselle. Tässä esimerkissä on käytetty vaihteistolla olevaa sähköautoa, mutta vastaava taulukko on luotu myös ilman vaihdelaatikkoa olevalle versiolle.

Näiden taulukoiden arvojen perusteella on luotu kuvaaja 6, josta ilmenee nopeuden suhteen voimansiirron energiankäytön kokonaishyötysuhde jokaisella eri välityksellä.

TAULUKKO 4 Hyötysuhteet vaihdelaatikolla

r/min	Moottorin hyötysuhde	Voimansiirron hyötysuhde	Kokonaishyötysuhde
4750	83	92	76,4 %
5000	84	92	77,3 %
5250	85	92	78,2 %
5500	86	92	79,1 %
5750	87	92	80,0 %



KUVIO 6. Voimansiirron hyötysuhteet vaihdelaatikolla sekä ilman vaihteistoa

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työssä asetetut tavoitteet saavutettiin hyvin ja huomattiin, että vaihteistolla on varsin suuri vaikutus ajoneuvon ominaisuuksiin. Simulointien perusteella sai hyvät ja selkeät kuvaajat, mistä pystyi helposti päättämään eri kokoonpanojen hyvät ja huonot puolet.

Projektissa vaihteiston käytöstä saadaan varsin merkittävä hyöty, koska valitun sähkömoottorin hyötysuhde ei ole kovin hyvä laajalla alueella. Käyttämällä aktiivisesti vaihdelaatikon eri välityksiä saadaan sähkömoottori toimimaan aina parhaalla hyötysuhteen alueella. Projektissa käytettävässä ajoneuvossa vaihteistosta saatava hyöty häviää yli 90 km/h nopeuksissa ja tästä eteenpäin kiinteällä välityksellä oleva vaihtoehto pääsee parempiin suorituskyvyn tuloksiin johtuen pienemmistä voimansiirron häviöistä. Vastaavasti taas pienemmissä kaupunkinopeuksissa vaihdelaatikolla oleva versio pääsee paremmin hyödyntämään useaa eri välitystä ja näin sovittamaan sähkömoottorin pyörimisnopeuden paremmalle hyötysuhteen alueelle.

Suorituskyvyssä eri vaihtoehdot ovat melko tasavertaisia, mutta bensiinimoottorilla varustettu vaihtoehto kärsii huomattavasti pienemmästä väännöstään, joka ilmenee heikompana kiihtyvyytenä. Sähköversiossa vaihdelaatikollinen versio on kolmella pienemmällä vaihteella huomattavasti nopeampi kiihtymään kuin kiinteällä välityksellä oleva. Suuremmilla vaihteilla voimansiirron häviöt kasvavat niin suuriksi, että se ei enää pysty vastaamaan kiinteän välityksen suorituskykyyn.

Tuloksien perusteella kannattaa miettiä vaihteiston tarvetta ja minkälaiseen käyttöön ajoneuvo tulee. Kaupunkiajossa ja hiljaisissa nopeuksissa saadaan vaihteistosta enemmän hyötyä ja vastaavasti kovemmissa nopeuksissa ilman vaihteistoa pääsee parempiin tuloksiin kuin vaihteellinen ajoneuvo. Välityksiä säätämällä vaihteettomasta saisi huomattavasti enemmän irti. Kiinteällä välityksellä pääsee parhaimmalle hyötysuhteenalueelle vasta yli 100 km/h vauhdissa, kun taas tiheämmällä välityksellä moottorin paras hyötysuhteen alue olisi käytössä jo alhaisemmissa kaupunkinopeuksissa, jolloin myös energian kulutusta saataisiin huomattavasti tehokkaammaksi.

Jatkokehityksenä olisi hyvä kokeilla AC-moottoria, jolloin päästäisiin vaihteistosta eroon. AC-moottorit toimivat huomattavasti paremmalla energiankäytön hyötysuhteella koko moottorin tuottaman kierrosluvun alueella kuin DC-moottorit. AC-moottoreiden väännön tuotto on myös huomattavasti suurempi heti käynnistyskierroksista lähtien, jolloin vaihteiston tarve on hyvin minimaalista varsinkin kaupunkiajossa, jossa nopeudet pysyvät varsin maltillisina.

Tarpeeksi tiheällä välityksellä saadaan sähkömoottorin tuottamaa vääntöä moninkertaistettua ja myös DC-moottori pääsisi toimimaan optimaalisella parhaimman hyötysuhteensa kierroksilla jo kaupunkinopeuksissa. Jatkokehityksenä olisi varsin mielenkiintoista lähteä laskemaan ja etsimään optimaalista välitystä projektissa käytetylle sähkömoottorille, jotta moottori saadaan toimimaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteen alueella ja pitäen samalla kiihtyvyyden hyvänä.

Työ oli kaiken kaikkiaan varsin mielenkiintoinen ja siinä pääsi hyvin vertailemaan sähkömoottoreiden ja polttomoottorien ominaisuuksia. Molemmissa sovelluksissa on omat hyvät puolensa ja myös heikkoudet, joten näistä syistä ne soveltuvat hyvin hieman erilaiseen käyttöön ja tarkoitukseen. Sähköautojen tekniikan ja akkujen vielä kehittyessä lisää sähköautotkin tulevat varmasti yleistymään ja olemaan varteen otettava vaihtoehto tulevaisuudessa. Tällä hetkellä varsinkin Suomen kaltaisissa talvisissa ja kylmissä olosuhteissa sähköautot soveltuvat lähinnä kaupunkiajoon ja lyhyille matkoille.

Työn aikana pääsin perehtymään ajoneuvotekniikkaan syvemmälle ja laskemaan ajoneuvon suorituskykyä huomattavasti tarkemmin kuin oppituntien ja kurssien aikana, ottaen huomioon myös erilaisia vastustavia voimia ja häviöitä. Työn aikana tuli myös huomattua, miten suuresti ilmanvastus vaikuttaa ajoneuvon kulutukseen ja kiihtyvyyteen suuremmilla nopeuksilla ja sen optimoinnilla saataisiin huomattavia säästöjä ajoneuvon kulutukseen. Uutena asiana tuli opittua, että laakereista vaihteista ja kaikista liikkuvista komponenteista aiheutuu monenlaista hukkahäviötä ja näillä on myös suuri vaikutus ajoneuvon liikuttamiseen käytettävissä olevaan tehoon.

LÄHTEET

Motiva. Sähkömoottorityypit. Luettu 10.11.2014.

http://www.motiva.fi/liikenne/henkilautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit

ABB. Uudet sähkömoottoritekniikat energiasäästöjen tuojana. Luettu 14.10.2014

http://www.google.com/url?url=http://ssty.fi/download/hki2014/014_Antti_Vuorivirta_ABB.ppt.pdf&rct=j&q=&esrc=s&sa=U&ei=-q42VczAC8uQsgG2_YGYDg&ved=0CBUQFjAA&usg=AFQjCNGX3PHbi09jxFyrWkt-WrC0dxDg9Q

EV-Power. GWL Calb 40 Ah cell. Luettu 10.1.2015.

<http://www.ev-power.eu/CALB-40Ah-400Ah/CALB-CA40FI-Lithium-Cell-LiFePO4-3-2V-40Ah.html>

Kostov motors. K9 HV. Luettu 5.2.2015.

[http://kostov-motors.com/tractionmotors/kostovevmotors\(ac-dc\)/seriesdcmotorsforelectricvehicles/k9hv/](http://kostov-motors.com/tractionmotors/kostovevmotors(ac-dc)/seriesdcmotorsforelectricvehicles/k9hv/)

Evnetics. Soliton Jr. Luettu 12.2.2015.

<http://www.evnetics.com/evnetics-products/soliton-jr/>

Lappeenrannan yliopisto. Sähkökäytöt. Luettu 12.1.2015.

<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk60a0001/lisatty/sahkokaytot.pdf>

Hietalahti L. 2013. Sähköiset tehonsiirtojärjestelmät ja hybriditekniikka ajoneuvoissa ja liikkuvissa työkoneissa. Hybriditekniikan-kurssi 2013. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere.

Liikenne- ja viestintäministeriö. Sähköautojen tulevaisuus Suomessa. Luettu 5.2.2015.

http://www.lvm.fi/docs/fi/1551284_DLFE-11701.pdf

Nokian renkaat. Rengastietoa. Luettu 4.12.2014.

<http://www.nokianrenkaat.fi/innovatiivisuus/rengastietoa>

Chang, C. 2013. Performance Analysis of EV Powertrain system with/without transmission. Luettu 17.11.2014.

https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.evsv24.org%2Fwevjournal%2Fphp%2Fdownload.php%3Ff%3Dvol4%2FWEVA4-4090.pdf&ei=HR0uVeGiBOqoygOm5oCYDA&usg=AFQjCNHo-CpZde_HIDsUr5DVWr1kXSGZZg&bvm=bv.90790515,d.bGQ

Grundwall, A. 2013. Systematic Optimisation of Gearboxes for Hybrid and Electric Vehicles in Terms of Efficiency, NVH and Durability. Luettu 12.10.2014

http://www.ricardo.com/PageFiles/20974/GKN_SABR.pdf

Engineerlive. Multi-speed gearbox enhances performance of electric vehicles. Luettu 10.1.2015.

<http://www.engineerlive.com/categories/9-power-transmission>

LIITTEET

Liite 1. Ajoneuvon tekniset tiedot

Mx-5 Na 1.6 90'

Renkaat

Rengaskoko	
Leveys	185 mm
Profiili	60 %
Vanne	14 "
Renkaan halkaisija	0,5776 m
Renkaan säde	0,2888 m
Renkaan ympärysmitta	1,815 m

Massa

Alkuperäinen kokoonpano	1000 kg
Sähkö vaihteistolla	973,85 kg
Sähkö suoravälitys	937,85 kg

Aerodynamiikka

Ilmanvastuskerroin	cd	0,38
Otsapinta-ala	A	1,66 m ²
ilman tiheys	ρ	1,293 kg/m ³

Välityssuhteet, vaihteisto ja perä

1	3,136 :1
2	1,888 :1
3	1,330 :1
4	1,000 :1
5	0,814 :1
Perä	4,300 :1

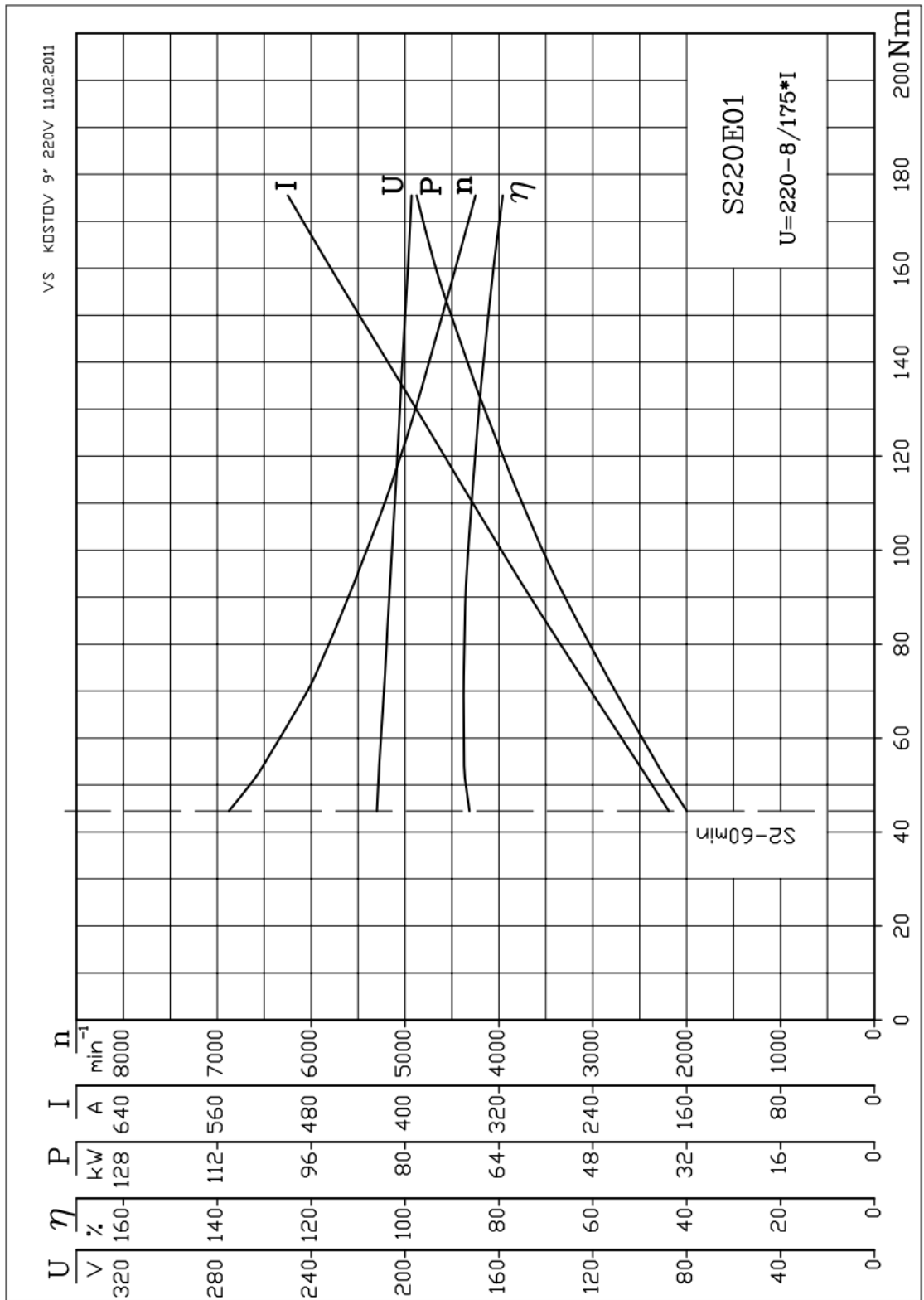
Voimansiirron hyötysuhteet

Pyöränlaakerien hyötysuhde	98 %	0,98
Vetonivelten hyötysuhde	98 %	0,98
Perän hyötysuhde	93 %	0,93
Kardaanin hyötysuhde	98 %	0,98
yht		0,88

Elektroniikan hyötysuhteet

Moottorin hyötysuhde	76 %	0,76
Moottorin ohjaimen hyötysuhde	95 %	0,95
Akuston hyötysuhde	98 %	0,98
Elektroniikan hyötysuhde		0,70756
Energiankäytön hyötysuhde		0,6193

Liite 2. Kostov K9 HV moottorin tehokuvaaja

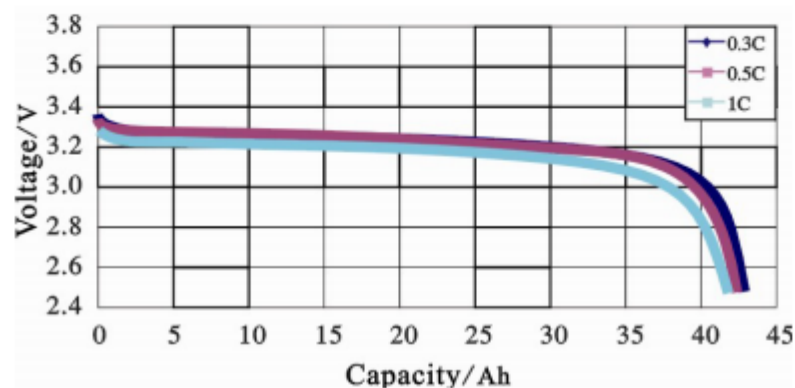
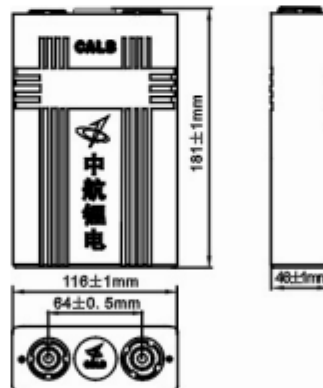


Liite 3. Akkukennon tiedot

GWL/ Power Group Technology Solutions – Stay Powered for the Future

CA40AHA cell specification

Model name	CA40AHA	Alternative product marking CA40BF1
Nominal voltage	3.2 V	Operating voltage under load is 3.0 V
Capacity	40 AH	+/- 5%
Internal impenetrableness	<0,9 mOhm	1kHz AC
Operating voltage	min 2.6V - max 3,6 V	At 80% DOD
Discharging cut-off voltage	2.5 V	The cells is damaged if voltage drops below this level
Charging cut-off voltage	3.65 V	The cells is damaged if voltage exceeds this level
Recommended charging - discharging Current	40 A	1 C
Maximum short-time discharging current	80 A	2 C
Life cycles	2000	0.3C, 80% DDC
Operating thermal ambient - charging	0°C ~ 45°C	The battery temperature should not increase this level
Operating thermal ambient - discharging	-20°C ~ 55°C	The battery temperature should not increase this level
Storage thermal Ambient	-20°C ~ 45°C	The battery temperature should not increase this level
Shell Material	Plactic	flame retardants
Dimensions	181 x 116 x 46 mm	Millimeters (tolerance +/- 1 mm)
Weight	1,4 kg	Kilograms (tolerance +/- 150g)



<http://www.yttrium-power.com/>

Liite 4. Sähkömoottorin suoritusarvot ja ajoneuvon nopeus vaihteella 4, vastaava välitys kuin ilman vaihdelaatikkoa

r/min	V (km/h)	kW	Hp	Nm
250	6,33	4,58	6,23	175,00
500	12,66	9,16	12,46	175,00
750	18,99	13,74	18,69	175,00
1000	25,32	18,33	24,92	175,00
1250	31,65	22,91	31,15	175,00
1500	37,98	27,49	37,38	175,00
1750	44,31	32,07	43,62	175,00
2000	50,64	36,65	49,85	175,00
2250	56,97	41,23	56,08	175,00
2500	63,30	45,81	62,31	175,00
2750	69,63	50,40	68,54	175,00
3000	75,96	54,98	74,77	175,00
3250	82,29	59,56	81,00	175,00
3500	88,62	64,14	87,23	175,00
3750	94,95	68,72	93,46	175,00
4000	101,28	73,30	99,69	175,00
4250	107,61	77,89	105,92	175,00
4500	113,94	75,40	102,54	160,00
4750	120,27	69,64	94,71	140,00
5000	126,60	65,45	89,01	125,00
5250	132,93	60,48	82,25	110,00
5500	139,26	54,72	74,41	95,00
5750	145,59	51,18	69,61	85,00
6000	151,92	45,87	62,38	73,00
6250	158,25	42,54	57,86	65,00
6500	164,58	37,44	50,91	55,00
6750	170,91	33,22	45,18	47,00

Liite 5. Bensiinimoottorin suoritusarvot nelosvaihteella

r/min	V (km/h)	kW	Hp	Nm
500	12,66	1,57	2,14	30
750	18,99	3,53	4,81	45
1000	25,32	6,28	8,55	60
1250	31,65	9,16	12,46	70
1500	37,98	19,16	26,06	122
1750	44,31	22,72	30,90	124
2000	50,64	26,81	36,46	128
2250	56,97	30,63	41,66	130
2500	63,30	35,34	48,07	135
2750	69,63	38,88	52,87	135
3000	75,96	42,41	57,68	135
3250	82,29	45,95	62,49	135
3500	88,62	49,48	67,29	135
3750	94,95	53,01	72,10	135
4000	101,28	56,55	76,91	135
4250	107,61	60,08	81,71	135
4500	113,94	63,62	86,52	135
4750	120,27	67,15	91,33	135
5000	126,60	70,69	96,13	135
5250	132,93	74,77	101,69	136
5500	139,26	77,75	105,75	135
5750	145,59	79,48	108,10	132
6000	151,92	80,42	109,38	128
6250	158,25	80,50	109,48	123
6500	164,58	80,32	109,24	118
6750	170,91	77,05	104,78	109
7000	177,24	47,65	64,80	65

Liite 6. Vastusvoimat eri nopeuksilla ja sen kumoamiseen vaadittava teho

Moottorin kierrosnopeus 4. vaihteella (r/min)	Ajonopeus (km/h)	Vastusvoimat (N)	Vastustava tehomäärä (kW)	Vastustava teho, häviöt huomioiden (kW)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
500	12,66	9,46	0,03	0,05
750	18,99	18,51	0,10	0,14
1000	25,32	30,44	0,21	0,30
1250	31,65	45,25	0,40	0,56
1500	37,98	62,94	0,66	0,94
1750	44,31	83,52	1,03	1,45
2000	50,64	106,97	1,50	2,13
2250	56,97	133,31	2,11	2,98
2500	63,30	162,53	2,86	4,04
2750	69,63	194,62	3,76	5,32
3000	75,96	229,60	4,84	6,85
3250	82,29	267,46	6,11	8,64
3500	88,62	308,20	7,59	10,72
3750	94,95	351,82	9,28	13,11
4000	101,28	398,32	11,21	15,84
4250	107,61	447,70	13,38	18,91
4500	113,94	499,97	15,82	22,36
4750	120,27	555,11	18,55	26,21
5000	126,60	613,14	21,56	30,47
5250	132,93	674,04	24,89	35,18
5500	139,26	737,83	28,54	40,34
5750	145,59	804,50	32,53	45,98
6000	151,92	874,05	36,88	52,13
6250	158,25	946,48	41,61	58,80
6500	164,58	1021,79	46,71	66,02
6750	170,91	1099,98	52,22	73,80
7000	177,24	1181,05	58,15	82,18