



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# SELVITYS AJONEUVON MUUNTAMISESTA SÄHKÖKÄYTTÖISEKSI

Tommi Hassinen

Opinnäytetyö  
Maaliskuu 2017  
Auto- ja kuljetustekniikka  
Työkonetekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Auto- ja kuljetustekniikka  
Työkonetekniikka

HASSINEN, TOMMI:

Selvitys ajoneuvon muuttamisesta sähkökäyttöiseksi

Opinnäytetyö 60 sivua, joista liitteitä 9 sivua  
Maaliskuu 2017

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, mitä toimenpiteitä ja muutoksia tarvitaan, jotta auto voidaan muuttaa sähkökäyttöiseksi. Kohdeajoneuvo on työmaakäytössä oleva Citroën Berlingo. Aluksi selvitettiin auton perustiedot ja suorituskykytavoitteet yhdessä toimeksiantajan kanssa. Autoon mitoitettiin laskennallisesti sopivan kokoinen moottori, ohjainlaite ja akusto. Laskenta suoritettiin Mathcad -laskentaohjelmistolla. Tämän jälkeen selvitettiin varteenotettavien komponenttien hinnat ja painot. Sähköautomuunnoksessa myös jarrutehostin, ohjaustehostin ja jäähdytysjärjestelmä vaativat muutoksia. Näiden muutosten toteuttamiseen haettiin käyttökelpoisia ratkaisuja.

Työssä käsitellään myös sähköauton eri komponentteihin liittyvää teoriaa ja vertaillaan hieman eri tyyppisiä ratkaisuja komponenttivalintojen perustelemiseksi. Työn aikana selvisi, että nykyaikaisella akkuteknologialla muunnossähköautosta ei tule kovin paljon raskaampi kuin polttomoottoriautosta. Toimintasäteestä joudutaan kuitenkin tinkimään, mutta se ei ole merkittävä haitta kyseisen ajoneuvon kohdalla.

Laskennassa täytyi tehdä tiettyjä oletuksia, joten tuloksia ei voi pitää täysin luotettavina. Esimerkiksi eri komponenttien tarkat hyötysuhteet ovat käytännössä mahdottomia tietää jatkuvasti muuttuvissa kuormitustilanteissa. Tulokset ovat kuitenkin riittävän tarkkoja komponenttivalintojen tekemiseksi. Sähköautomuunnoksen hinnaksi tulisi noin 15 000–20 000 €, riippuen valituista komponenteista. Auton toimintasäde lyhenee huomattavasti, mutta muutoin suorituskyky pysyy likimain samalla tasolla kuin alkuperäisellä moottorilla. Käyttökustannuksiltaan sähköauton on huomattavasti edullisempi kuin dieselmoottorilla varustettu auto.

Selvityksen pyysi Mesiel Oy. Mesiel Oy on Kokkolassa ja Pietarsaaren alueella toimiva, noin 40 henkilöä työllistävä, sähkö-, instrumentointi- ja teleasennuksia tekevä yritys. Työt painottuvat teollisuusalueille, joten sähkökäyttöinen työmaa-ajoneuvo on eduksi monessa tilanteessa.

---

Asiasanat: sähköauto, muunnos, konversio, selvitys

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Vehicle Engineering  
Industrial vehicle engineering

HASSINEN, TOMMI:  
Research on Electric Car Conversion

Bachelor's thesis 60 pages, appendices 9 pages  
March 2017

---

The purpose of this thesis was to study what changes must be made to a Citroën Berlingo to convert it into an electric vehicle. The car is primarily used in urban environment and industrial parks. The first step was to determine the performance targets and to gather all necessary technical data of the vehicle. An electric motor, motor controller and battery were sized to fulfill the performance targets. All calculations were made with Mathcad mathematical software. After this a list of potential components was made. The list includes technical specifications and information, such as prices and weights of the components. An electric vehicle conversion also requires modifications to the brake booster, power steering and cooling system. The final step was to find workable solutions to implement these modifications.

This thesis also deals with the theory related to different components of an electric vehicle. Understanding the theory behind the components allows one to analyze different solutions and configuration. With modern battery technology an electric vehicle is not significantly heavier compared to an internal combustion engine vehicle. However, the range of an electric vehicle is considerably shorter than that of an internal combustion engine vehicle. As the vehicle is used in urban environment the shorter range is not an issue.

Some assumptions had to be made on the sizing of the components so the results are not perfectly reliable. For example, it is impossible to know the efficiency of the components in every load situation. The possible errors are minor and the results are accurate enough to be used on selecting suitable components. The conversion will cost approximately from 15 000 to 20 000 € depending on the selected components. The range of the electric vehicle will be shorter but otherwise the performance will remain roughly the same. The report was ordered by Mesiel Oy.

---

Key words: electric vehicle, conversion

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	SÄHKÖAUTO .....	8
3	LÄHTÖTIEDOT JA MITOITUS .....	9
4	MOOTTORI.....	16
	4.1 Yleistä .....	16
	4.2 Tasavirtamoottorit.....	17
	4.3 Epätahtimoottori .....	18
	4.4 Kestomagneettitahtimoottori ja synkronireluktanssimoottori .....	19
	4.5 Moottorivaihtoehdot .....	20
5	MOOTTORINOHJAUS.....	22
	5.1 Moottorinohjain .....	22
	5.2 Kaasupoljin ja ajosuunnan valinta .....	24
6	AKUSTO.....	25
	6.1 Yleiset ominaisuudet.....	25
	6.2 Akkutyypit .....	26
	6.3 Akuston valvontajärjestelmä.....	27
	6.4 Akustovaihtoehdot.....	28
7	JARRUTUSENERGIAN TALTEENOTTO.....	30
8	LATAUS JA LÄMMITYS .....	32
9	MUUT TARPEELLISET MUUTOKSET .....	34
	9.1 Voimansiirto .....	34
	9.2 Ohjaustehostin .....	35
	9.3 Jarrutehostin.....	36
	9.4 Jäähdytys ja moottorin kiinnitys .....	37
10	KUSTANNUSARVIO JA KÄYTTÖKUSTANNUSVERTAILU .....	38
11	KOMPONENTTIEN SIJOITTELU JA KYTKENTÄ.....	41
12	TURVALLISUUS.....	43
13	VIRANOMAISVAATIMUKSET.....	44
14	POHDINTA.....	45
	LÄHTEET.....	47
	LIITTEET .....	52
	Liite 1. BRUSA HSM1-10.18 suoritearvot ja mitat.....	52
	Liite 2. HPEVS AC-20 suoritearvot.....	53
	Liite 3. HPEVS AC-50 suoritearvot.....	54
	Liite 4. HPEVS AC-76 suoritearvot.....	55
	Liite 5. HPEVS AC-35 suoritearvot ja mitat.....	56

Liite 6. HPEVS AC-51 suoritearvot.....	57
Liite 7. Kiihtyvyyden kuvaajat AC-35 moottorilla .....	58
Liite 8. Voimakuvajaajat maksimimomentilla AC-35 moottorilla .....	59
Liite 9. Voimakuvajaajat nimellismomentilla AC-35 moottorilla .....	60

## ERITYISSANASTO

$A_f$	otsapinta-ala, m <sup>2</sup>
$a$	kiihtyvyys, m/s <sup>2</sup>
<i>BMS</i>	Battery management system
$f$	taajuus, Hz
$f_r$	vierintävastuskerroin
$F_r$	vierintävastusvoima, N
$F_d$	Ilmanvastusvoima, N
$F_g$	nousuvastusvoima, N
$F_a$	Kiihdytysvoima, N
$I$	virta, A
$m$	massa, kg
$n$	pyörimisnopeus, 1/min
$n_{nim}$	nimellispyörimisnopeus, 1/min
$P$	teho, W
$P_{nim}$	nimellisteho, W
$P_{max}$	enimmäisteho, W
$R$	resistanssi,
$T$	vääntömomentti, Nm
$T_{nim}$	nimellisvääntömomentti, Nm
$T_{max}$	enimmäisvääntömomentti, Nm
$U$	jännite, V
$v$	nopeus, m/s
$\eta$	hyötysuhde

## 1 JOHDANTO

Nykyisin ympäristöystävällisyys, taloudellisuus ja yleinen energiankulutuksen pienentäminen ovat jatkuvasti esillä ajoneuvoteknologiassa. Yksi ratkaisu päästöjen ja polttoainekustannusten vähentämiseen on muuntaa ajoneuvo sähkökäyttöiseksi. Se ei kuitenkaan aina ole helppoa ja suoraviivaista. Joidenkin ajoneuvojen hallintalaitteisiin ja voimansiirtoon on tehtävä muutoksia, jotta ajoneuvo voidaan muuttaa sähkökäyttöiseksi. Lisäksi sähkömoottorit ja akustot ovat usein varsin painavia, joten muutostyössä on huolehdittava, että ajoneuvon sallitut akselimassat eivät ylitä.

Mesiel Oy on Kokkolassa ja Pietarsaaren alueella toimiva sähkö-, instrumentointi- ja te-leasennuksia tekevä yritys. Yrityksen tekemät työt painottuvat teollisuusalueille, joten sähkökäyttöinen työmaa-ajoneuvo on eduksi monessa tilanteessa, sillä sähköauto on taloudellisempi etenkin kaupunkiajaja vastaavassa käytössä. Yritys on pyytänyt selvityksen, jossa käydään läpi mitä toimenpiteitä vaaditaan, jotta heillä käytössä oleva tila-auto voidaan muuntaa sähkökäyttöiseksi. Kohdeajoneuvo on dieselmoottorilla varustettu, etuve-toinen Citroën Berlingo, vuosimallia 2009. Autolla ajetaan päivittäin paljon lyhyttä mat-kaa, esimerkiksi tehdasalueella. Tarvittavien toimenpiteiden selvittämisen lisäksi työn ta-voitteena on arvioida muutostyön kustannukset, tehdä käyttökustannusvertailua, sekä tuottaa suunnitelma, jonka pohjalta muutostyö voidaan käytännössä toteuttaa.

## 2 SÄHKÖAUTO

Sähköautolla tarkoitetaan autoa, jossa ajamiseen tarvittava energia on varastoitu autossa oleviin akkuihin. 1900-luvun alussa sähköautot olivat suosittuja, mutta polttomoottoreiden kehitys johti siihen, että sähköautoista luovuttiin. Sähköautot ovat jälleen alkaneet kiinnostaa kuluttajia energiatehokkuudensa vuoksi. Tyypillinen sähköauton energian tarve on noin 10–15 kWh 100 km kohti, kun dieselauton energiantarve on noin 50 kWh/100 km. (Sähköautot 2016; Täyssähköauto 2016.)

Akkujen energiatiheys on viimeisen vuosikymmenen aikana moninkertaistunut, mikä mahdollistaa laajemman toimintasäteen ja kevyemmät akustot. Akut eivät kuitenkaan ole vielä kehittyneet niin paljon, että toimintasäde olisi lähelläkään polttomoottorilla varustettuja autoja. Lyhyen matkan ajoon sähköautot kuitenkin soveltuvat hyvin. Sähkömoottorin suuren vääntömomentin ja melko laajan kierrosalueen vuoksi sähköautossa ei välttämättä tarvita moniportaista vaihteistoa. Näin ollen sähköauto on helppokäyttöinen ja huollontarve on pieni. (Sähköautot 2016; Täyssähköauto 2016.)

Suomen käyttöolosuhteet ovat haasteelliset sähköautolle. Polttomoottorin huonosta hyötysuhteesta johtuen se kehittää paljon lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää auton sisätilan lämmittämiseen. Sähköauton sisätilan lämmitys on usein toteutettu sähkölämmityksellä, mikä pienentää auton toimintasädettä kylmällä ilmalla. Lisäksi -20 °C lämpötilassa ilmanvastus on noin 10 % suurempi kuin kesällä, koska kylmä ilma on tiheämpää. Sohjoinen tie voi kasvattaa renkaan vierintävastusta jopa 40 %. Akkujen lataus suurella virralla kylmissä olosuhteissa voi vahingoittaa akkuja, joten latausvirtaa on rajoitettava talvella. (Laurikko 2013.)



### 3 LÄHTÖTIEDOT JA MITOITUS

Työ aloitettiin keräämällä ajoneuvon perustiedot moottorin ja akuston mitoitusta varten. Auton suoritusarvotavoitteista sovittiin työn tilaajan kanssa. Tavoitteellinen toimitusäde on noin 100 km kaupunkiajossa ja huippunopeustavoite on 80 km/h. Auto on työmaakäytössä, joten autossa kuljetaan noin 50–200 kg kuormaa. Taulukossa 1 on esitetty auton perustietoja, joita tarvitaan mitoituksessa ja vertailussa. Taulukon tiedot on kerätty auton rekisteriotteesta, Autodata-tietokantaohjelmistosta ja Carspector-sivustolta (Citroën Berlingo 1.9D. Carspector).

TAULUKKO 1. Berlingo III 1.6 HDi tekniset tiedot

Suure	Arvo	Lähde
Omamassa / enimmäismassa	1429 kg / 1980 kg	Rekisteriote
Sallittu etuakselimassa	1080 kg	Rekisteriote
Sallittu taka-akselimassa	1050 kg	Rekisteriote
Enimmäisteho	55 kW	Autodata
Enimmäisvääntömomentti	175 Nm	Autodata
Akseliväli	2728 mm	Rekisteriote
Otsapinta-ala	2,69 m <sup>2</sup>	Citroën Berlingo 1.9D
Ilmanvastuksen muotokerroin	0,3	Citroën Berlingo 1.9D
Kaupunkikulutus	7 l/100km	Rekisteriote
Rengaskoko	195/70 R15	Rekisteriote
Vierintävastuskerroin	0,013	Oletus

Ajoneuvon liikettä vastustaa renkaiden vierintävastus, ilmanvastus ja nousuvastus. Tasaisella tiellä ja pienessä nopeudessa vierintävastus on suurin liikettä vastustava voima. Ilmanvastus kasvaa nopeuden neliössä, joten tietyssä nopeudessa ilmavastus muuttuu suurimmaksi liikettä vastustavaksi voimaksi. Renkaan vierintävastusvoima lasketaan kaavalla (1).

$$F_r = mgf_r \cos(\alpha) \quad (1),$$

missä  $m$  on auton kokonaismassa,  $g$  on putoamiskiihtyvyys,  $\alpha$  on tien nousukulma ja  $f_r$  on renkaan vierintävastuskerroin. Vierintävastuskerroin riippuu monesta asiasta, kuten renkaan rakenteesta, kuvioinnista, rengaspaineesta ja tienpinnan laadusta. Myös ajonopeus ja renkaan lämpötila vaikuttavat hieman renkaan vierintävastuskertoimeen. Autonrenkaat vierintävastuskerroin asvaltilla on tyypillisesti noin 0,013–0,015. (Ehsani, Gao & Emadi 2010, 20–25.)

Ilmanvastus on merkittävin liikettä vastustava voima. Ilmanvastus lasketaan kaavalla (2). Kuten kaavasta nähdään, ilmanvastus kasvaa nopeuden neliössä.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 \quad (2),$$

missä  $\rho$  on ilman tiheys,  $C_d$  on auton ilmanvastuksen muotokerroin,  $A_f$  on auton otsapinta-ala ja  $v$  on ilmapirran nopeus auton suhteen. (Ehsani ym. 2010, 24.) Nousuvastus lasketaan kaavalla (3). Nousuvastuksen suuruus on riippuvainen auton massasta ja nousukulmasta.

$$F_g = mg \sin(\alpha) \quad (3),$$

missä  $m$  on auton kokonaismassa,  $g$  on putoamiskiihtyvyys ja  $\alpha$  on tien nousukulma. (Ehsani ym. 2010, 24.) Kiihdytykseen tarvittava voima lasketaan kaavalla (4). Tarvittava voima on riippuvainen vain kappaleen massasta ja kiihtyvyydestä.

$$F_a = ma \quad (4),$$

missä  $m$  on auton kokonaismassa ja  $a$  on auton kiihtyvyys. (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2012, 91). Ilmanvastuksen ohella kiihdytys on toinen merkittävä tekijä ajo-suorituksen energiantarpeen kannalta, kuten myöhemmin esitettävistä laskelmista huomataan.

Ajoneuvokäytössä on aina huomioitava tehojärjestelmän hyötysuhde. Hyötysuhdetta heikentävät esimerkiksi vaihteiston ja laakereiden kitkahäviöt. Moottorissa, akustossa ja ohjainlaitteessa syntyy aina hukkalämpöä, eli myös niiden hyötysuhde on alle 100 %. (Hietalahti 2011, 19). Hyötysuhde on erityisen tärkeä akuston mitoituksen kannalta.

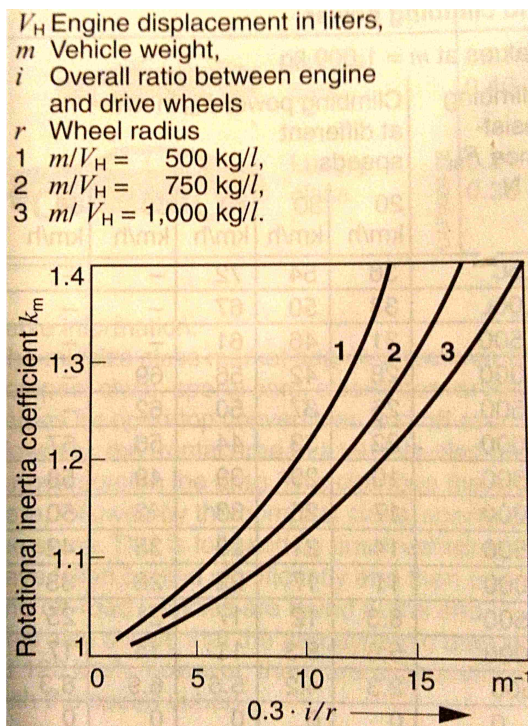
Edellä mainittujen kaavojen ja taulukon 1 lähtöarvojen perusteella mitoitettiin ajoneuvoon sopiva moottori ja akusto. Laskelmat tehtiin Mathcad-laskentaohjelmistolla. Moottorin mitoitukseen liittyvät laskut tuloksineen on esitetty kuvassa 1. Tavoiteltuihin suoritearvoihin pääsemiseksi tarvitaan siis noin 70 kW teho. Tasaiseen 80 km/h ajonopeuteen tarvitaan vain noin 10 kW teho, mutta kiihdytykset ja mäennousu nostavat tehontarvetta. Sähkömoottoreita voidaan usein ylikuormittaa nimellistehoä suuremmalla teholla (Hieta-lahti 2016). On siis järkevää valita moottori, jonka nimellisteho on lähellä 10 kW:a ja maksimiteho noin 70 kW. Käytännössä juuri tällaista moottori ei löydy, vaan nimellisteho on 40–50 kW luokkaa, jos maksimiteho on 70 kW. Hieman pienempikin moottori riittää, sillä asetettu kiihtyvyytsvaatimus on melko suuri auton kokonaismassaan ja käyttöympäristöön nähden.

### Moottorin mitoitus

$v := 80 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$	Haluttu nopeus
$a := \frac{v}{15\text{s}} = 1.481 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Kiihdytys 0-80km/h, 15 s
$\alpha := \text{atan}(0.15) = 8.531\text{-deg}$	Haluttu mäennousukyky, 15%
$m_a := 1429\text{kg} + 200\text{kg}$	Auton massa + 200 kg hyötykuormaa
$A_f := 2.69\text{m}^2$ $C_d := 0.30$	$f_r := 0.013$ $\rho_i := 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $k_m := 1.1$
$F_a := m_a \cdot a \cdot k_m$	
$F_i := \frac{1}{2} \rho_i \cdot v^2 \cdot A_f \cdot C_d$	$F_n := m_a \cdot g \cdot \sin(\alpha)$ $F_r := f_r \cdot m_a \cdot g$ $F_{r2} := f_r \cdot m_a \cdot g \cdot \cos(\alpha)$
$F_{k1} := F_i + F_r = 465.318\text{N}$	Vastusvoima 80km/h ajonopeudessa
$F_{k2} := F_n + F_i + F_{r2} = 2832.764\text{N}$	Vastusvoima 15% mäennousu 80 km/h
$F_{k3} := F_a + F_r + F_i = 3119.984\text{N}$	Maksimivoima, kun kiihdytetään 0 - 80 km/h
$P_{\text{min}} := F_{k1} \cdot v = 10.34\text{-kW}$	Minimiteho, joka tarvitaan 80 km/h nopeuteen
$P_{\text{nousu}} := F_{k2} \cdot v = 62.95\text{-kW}$	Vaadittu teho, jos 15% nousu ajetaan 80 km/h
$P_{\text{kiihd}} := F_{k3} \cdot v = 69.333\text{-kW}$	Vaadittu teho kiihdytykseen

KUVA 1. Moottorin mitoitus tehon perusteella

Moottorin mitoituksessa auton pyörivien osien, kun renkaiden, jarrujen ja voimansiirron osien hitausmomentti otettiin huomioon hitauskertoimen avulla. Kiihdytykseen tarvittavaa voimaa laskettaessa auton massa kerrottiin hitauskertoimella. Hitaukertoimen suuruudeksi arvioitiin 1,1 kuvan 2 perusteella. Kuvassa Y-akselilla on hitauskertoimen arvo, X-akselin arvo lasketaan jakamalla vaihteiston kokonaisvälityssuhde pyörän säteellä ja kertomalla se arvolla 0,3. Tämän jälkeen auton massa jaetaan alkuperäisen moottorin iskutilavuudella, jonka perusteella valitaan, mitä käyrää käytetään. (Dietsche & Reif 2014, 778.)



KUVA 2. Hitaukertoimen määrittäminen (Dietsche ym. 2014, 778)

Seuraavaksi laskettiin moottorilta tarvittava vääntömomentti erilaisissa ajotilanteissa ja eri välityksillä. Vääntömomentin laskemista varten tarvittiin tieto vaihdelaatikon välityssuhteista. Alkuperäisen vaihdelaatikon välityssuhteet on esitetty taulukossa 2. Vaihdelaatikon välityssuhteita tiedusteltiin Citroënin teknisestä tuesta.

TAULUKKO 2. Väilyssuhteet (Kiri 2017)

1. vaihde	$i_1$	3,455
2. vaihde	$i_2$	1,867
3. vaihde	$i_3$	1,156
4. vaihde	$i_4$	0,822
5. vaihde	$i_5$	0,66
Tasauspyörästäön välitys	$i_f$	4,294

Kuvassa 3 on laskettu tarvittavat vääntömomentit eri tilanteissa. Lisäksi laskettiin moottorin pyörimisnopeus 80 km/h nopeudessa kahdella eri väilyssuhteella. Jos valitun sähkömoottorin tuottama vääntömomentti on riittävän suuri, ja pyörimisnopeusalue on riittävän laaja, voidaan käyttää kiinteää väilyssuhdetta. Esimerkiksi jos alkuperäisestä vaihdelaatikosta käytetään vain 2 vaihdetta, moottorilta vaaditaan 127 Nm vääntömomentti ja  $5234 \frac{1}{\text{min}}$  pyörimisnopeus. Liitteissä on esitetty kiihtyvyy- ja voimakuvaajat, jotka on tehty tietyn moottorin suoritearvojen perusteella.

$$R_d := \frac{15 \text{in}}{2} + 0.70 \cdot 195 \text{mm} - 2 \text{mm} = 325 \cdot \text{mm} \quad \text{Renkaan dynaaminen vierintäsäde} \\ \text{(Arvoidaan renkaan painuvan kasaan 2mm)}$$

Momentin tarve ja kierrosnopeus, kun ajetaan 80 km/h 4 vaihteella

$$T_{m1} := \frac{F_{k1} \cdot R_d}{i_f \cdot i_4} = 42.832 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \quad \text{Moottorilta tarvittava momentti}$$

$$n := \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot R_d} \cdot i_f \cdot i_4 = 2305.359 \cdot \frac{1}{\text{min}} \quad \text{Moottorin tarvittava maksimi pyörimisnopeus}$$

Momentin tarve, kun kiihdytetään 1 vaihteella

$$T_{m2} := \frac{F_{k3} \cdot R_d}{i_f \cdot i_1} = 68.355 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

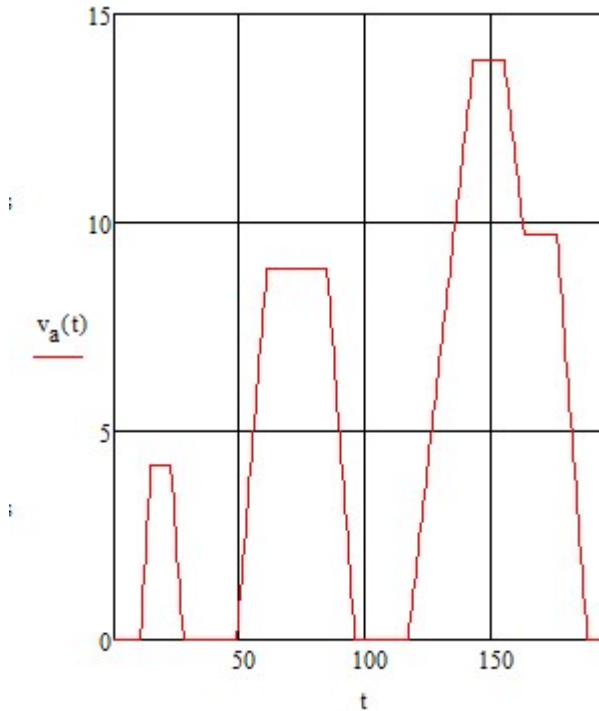
Momentin tarve ja kierrosnopeus, jos lukitaan käyttöön 2 vaihde. (Kiinteä väilyssuhde) Momentin tarve laskettu kiihdytykseen tarvittavan voiman perusteella ja kierrosnopeus 80 km/h perusteella.

$$T_{m4} := \frac{F_{k3} \cdot R_d}{i_f \cdot i_2} = 126.501 \cdot \text{N} \cdot \text{m} \quad \text{Moottorilta tarvittava momentti}$$

$$n_2 := \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot R_d} \cdot i_f \cdot i_2 = 5233.789 \cdot \frac{1}{\text{min}} \quad \text{Moottorin tarvittava maksimi pyörimisnopeus}$$

KUVA 3. Tarvittava vääntömomentti ja pyörimisnopeus

Akuston mitoituksessa lähtökohdaksi otettiin MNEDC-päästömittaajasyklin kaupunkiajoa simuloiva osa. Kuvassa 4 on esitetty sykli nopeuden ja ajan funktiona. Kuvassa nopeus on yksikössä m/s ja aika on sekunteina. Sykli koostuu kolmesta kiihdytyksestä eri nopeuksiin. Maksiminopeus testisyklin aikana on 50 km/h ja syklin kesto on 195 sekuntia. Päästömittaustestissä kuvan mukainen kaupunkiajositykli ajetaan neljä kertaa peräkkäin. (Dietsche ym. 2014, 547.)



KUVA 4. Kaupunkiajositykli

Kuvan 4 funktiosta voidaan integroimalla määrittää syklin ajamiseen tarvittava energia. Laskenta on esitetty kuvassa 5. Kohdeajoneuvolla 100 km kaupunkiajoon tarvitaan noin 15 kWh akusto. Myös ajovalot ja erilaiset pumput tarvitsevat virtaa, mutta niiden tehonlähteenä toimii 12 V akku, joka tarvitaan korkeajänniteakuston lisäksi. 12 V akkuna voidaan käyttää auton alkuperäistä akkua.

$$P_{iv}(t) := F_{iv}(t) \cdot v_a(t) \quad P_{fr}(t) := F_r \cdot v_a(t) \quad P_{a1}(t) := F_{a1} \cdot v_a(t) \quad P_{a2}(t) := F_{a2} \cdot v_a(t) \quad P_{a3}(t) := F_{a3} \cdot v_a(t)$$

$$E_k := 4 \cdot \int_{0s}^{23s} P_{iv}(t) + P_{fr}(t) dt + 4 \cdot \int_{11s}^{15s} P_{a1}(t) dt + 4 \cdot \int_{49s}^{85s} P_{iv}(t) + P_{fr}(t) dt \dots = 1744443.86 J$$

$$+ 4 \cdot \int_{49s}^{61s} P_{a2}(t) dt + 4 \cdot \int_{117s}^{155s} P_{iv}(t) + P_{fr}(t) dt + 4 \cdot \int_{117s}^{143s} P_{a3}(t) dt \dots$$

$$+ 4 \cdot \int_{163s}^{176s} P_{iv}(t) + P_{fr}(t) dt$$

Energiantarve kaupunkiajosyklissä on noin 1,74 MJ kyseisellä autolla

$\eta_{sahko} := 80\%$  Oletettu sähkökäytön hyötysuhde

$$E_{sahko} := \frac{E_k}{\eta_{sahko}} = 2180554.82 J$$

$$S := \int_{0s}^{195s} v_a(t) dt \cdot 4 = 3976.12 m \quad \text{Kaupunkiajosyklin pituus}$$

$$x := \frac{100km}{S} = 25.15 \quad \begin{array}{l} \text{Toimintasäteeksi halutaan noin 100 km.} \\ \text{100 km ajoon tarvitaan noin 25 sykliä} \end{array}$$

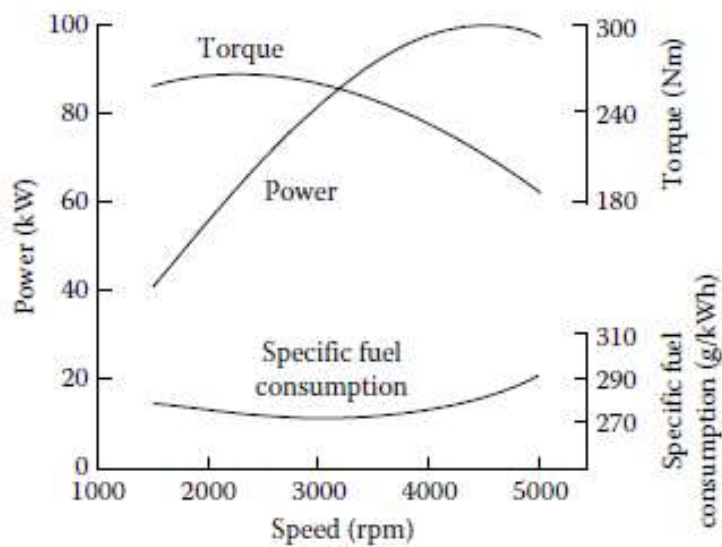
$$Q := E_{sahko} \cdot x = 15.23 \cdot kW \cdot hr \quad \text{Tarvittavan akun kapasiteetti}$$

KUVA 5. Akuston mitoitus

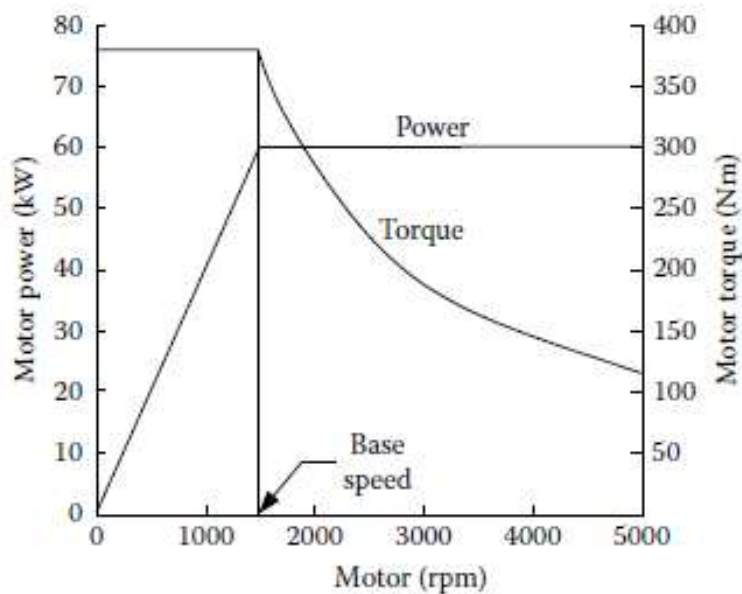
## 4 MOOTTORI

### 4.1 Yleistä

Polttomootorin kehittämä vääntömomentti on riippuvainen moottorin pyörimisnopeudesta, kuten kuvasta 6 nähdään. Sähkömoottorin tuottama vääntömomentti on puolestaan vakio nimellispyörimisnopeudelle asti. Kun sähkömoottori ylittää nimellispyörimisnopeuden, vääntömomentti pienenee, mutta teho pysy vakiona (kuva 7).



KUVA 6. Polttomoottorin teho- ja vääntökuvaaja (Ehsani ym. 2010, 33)



KUVA 7. Sähkömoottorin teho- ja vääntökuvaaja (Ehsani ym. 2010, 34)



Moottori valitaan tarvittavan momentin ja kierrosalueen mukaan. Myös jäähdytysmenetelmä tulee huomioida moottorin valinnassa. (Sähkökäytön mitoitus, 24.) Ulkoisella jäähdytyksellä sähkömoottoria voidaan käyttää myös pienillä pyörimisnopeuksilla, ilman ylikuumenemisen riskiä (Hietalahti 2011, 88). Ulkoisella jäähdytyksellä tarkoitetaan usein käytännössä nestejäähdytystä, eli sähköinen vesipumppu kierrättää jäähdytysnestettä moottorissa ja jäähdytyskennossa.

## 4.2 Tasavirtamoottorit

Tasavirtamoottorin vääntömomenttiominaisuudet ovat hyvät ajoneuvosovelluksia ajatellen. Moottoria voidaan käyttää nimellipyörimisnopeutta suuremmalla pyörimisnopeudella, eli kentänheikennysalueella, jolloin saatava vääntömomentti pienenee, mutta pysyy käyttökelpoisella alueella. Huono puoli tasavirtamoottorissa on sen mekaaninen vaihtosuuntaaja, joka on yleensä toteutettu hiiliharjoilla. Hiiliharjat kuluvat käytössä, joten ne on vaihdettava säännöllisesti. Tasavirtamoottori ei kestä todella korkeita pyörimisnopeuksia rakenteensa vuoksi. Moottorinohjaus on kuitenkin todella yksinkertainen toteuttaa, ohjaukseen tarvitaan vain hakkuritehonlähde, jonka avulla säädetään moottorin tuottamaa vääntömomenttia. (Hietalahti 2011, 37–39)

Kestomagnetoinnin avulla tasavirtamoottori voidaan toteuttaa ilman hiiliharjoja. Kestomagnetoidut tasavirtamoottorit ovat hyötysuhteeltaan todella hyviä, rakenteeltaan kompakteja, sekä luotettavia ja lähes huoltovapaita. Kestomagnetointi kuitenkin nostaa moottorin hintaa huomattavasti ja heikentää korkean pyörimisnopeuden kestoa. Toisin kuin perinteisessä tasavirtamoottorissa, kestmagnetoidussa tasavirtamoottorissa virta syötetään staattoriin, eli moottorin paikallaan pysyvään osaan. Tästä johtuen kestmagnetoitu tasavirtamoottori vaatii roottorin asentoanturin, jonka perusteella virta syötetään tietyille staattorin käämille. (Hietalahti 2011, 40.)

### 4.3 Epätahtimoottori

Epätahtimoottoreita käytetään yleensä kolmivaihevaihtovirralla. Suljetun rakenteen, kestävyuden ja yksinkertaisuuden vuoksi epätahtimoottori on teollisuudessa yleisin sähkökonetyyppi. Yksinkertaisesta rakenteesta johtuen epätahtimoottori on myös edullinen muihin sähkökonetyyppeihin verrattuna. Epätahtimoottori on myös liikennekäytössä yleisin sähkökonetyyppi. (Hietalahti 2011, 42.)

Epätahtimoottorin toiminta perustuu staattoriin syntyvään pyörivään magneettikenttään. Jos moottorin napapariluku on yksi, kenttä pyörähtää yhden kierroksen vaihtovirran jakson aikana, eli 50 Hz vaihtovirran taajuudella magneettikenttä pyörii 50 kierrosta sekunnissa. Jos napapariluku on kaksi, magneettikenttä pyörii 25 kierrosta sekunnissa 50 Hz syöttötaajuudella. Roottorin pyörimisnopeus on hieman pienempi, kuin staattorin magneettikentän pyörimisnopeus. Jos roottorin ja staattorikentän pyörimisnopeus olisivat yhtä suuria, moottori ei tuottaisi vääntömomenttia, koska staattorikenttä pysyisi paikallaan roottorin suhteen. Nimitys epätahtimoottori tuleekin siitä, että roottori pyörii epätahdissa staattorikenttään nähden. Pyörimisnopeuseroa kuvaa jättämä, joka on tyypillisesti 2–5 % täydellä kuormalla. (Hietalahti 2011, 45.)

Koska epätahtikoneen pyörimisnopeus on riippuvainen vaihtovirran taajuudesta, moottoria voidaan ohjata muuttamalla syötettävän kolmivaihevaihtovirran taajuutta. Nimellispyörimisnopeuden alueella epätahtimoottorin hyötysuhde on noin 85–90 % ja nimellispyörimisnopeutta suuremmalla pyörimisnopeudella, eli kentänheikennysalueella, noin 70–80 %. (Hietalahti 2016; Hietalahti 2011, 50.)

#### 4.4 Kestomagneettitahtimoottori ja synkronireluktanssimoottori

Kestomagneettitahtimoottorissa on kestopagneetit roottorissa käämityksen sijaan. Kestomagneettitahtikoneet voidaan jakaa aksiaali- ja radiaalivuokoneiksi, sen mukaan missä suunnassa magneettivuo vaikuttaa. Kestomagneettitahtimoottorin etuna epätahtimoottoriin verrattuna on suurempi vääntömomentti ja parempi hyötysuhde. Ongelmana kestopagneettitahtimoottorissa on se, että jos moottoria käytetään nimellispöörimisnopeutta suuremmalla pöörimisnopeudella, tarvitaan suuri demagnetoiva virta jännitteennousun estämiseksi. Kestomagneettitahtimoottorin hyötysuhde on noin 88–92 %. (Hietalahti 2011, 55–57.)

Synkronireluktanssimoottori (SynRM) on tekniikaltaan hyvin samantapainen, kuin epätahtimoottori. Erona on roottori, joka on magneettisesti epäsymmetrinen. SynRM:n merkittävin ominaisuus on synkroninen käynti, eli roottori pyörii syöttöjännitteen taajuudella. Suorituskyky on hyvin lähellä epätahtimoottoria, mutta saman suorituskyvyn ja hyötysuhteen saamiseksi SynRM:n roottorin ja staattorin välinen ilmapäli on oltava huomattavasti pienempi. Tästä johtuen SynRM:a ei voida pitää ensisijaisena vaihtoehtona soveluksiin, jotka ovat alttiina tärinälle. SynRM:n ohjaus vaatii vektorisäädetyin invertterin. (Hietalahti 2011, 55.)

#### 4.5 Moottorivaihtoehdot

Taulukkoon 3 on kerätty sopivia moottorivaihtoehtoja. Kaikki moottorit ovat tyypiltään vaihtosähkömoottoreita. Moottoreiden suoritearvokuvaajat ovat raportin liitteenä. Brusan HSM1-moottori on nestejäähdytteinen ja sen IP-luokitus on IP67, eli se on todella hyvin suojattu (HSM1-Hybrid Synchronous Motor). Brusan moottori on kevyin, mutta myös kallein. Curtisin moottorin ovat ilmajäähdytteisiä (Curtis 1239e-8521 HPEVS AC-35 Brushless AC Motor Kit 2014). HPEVS:n moottorin ovat painavampia, toimivat pienemmällä jännitteellä ja ovat huomattavasti edullisempia. Ilmoitetut hinnat pitävät sisällään myös moottorinohjainlaitteen, paitsi Brusan moottorin kohdalla. Hinnat ovat suuntaa antavia, sillä ne ovat vain yhden jälleenmyyjän verkkokaupasta. Brusan moottorin tiedot ovat Metric Mind -verkkokaupasta (Price List. 2017. Metric mind corporation), HPEVS:n moottoreiden tiedot ovat EV West -verkkokaupasta ja EVD:n moottorin tiedot ovat EV Drive -sivustolta.

TAULUKKO 3. Moottorivaihtoehdot

Moottori	U (V)	P <sub>max</sub> (kW)	n ( $\frac{1}{min}$ ) nim/max	T <sub>max</sub> (Nm)	Paino (kg)	Hinta
BRUSA HSM1- 10.18.04	360- 450	56	7500 / 13 000	105	25	9 862 €
HPEVS AC-20	96	48	5000 / 10 000	110	27	3172 € *
HPEVS AC-50	96	52	5000 / 10 000	163	52	3617 € *
HPEVS AC-76	144	66	5000 / 10 000	244	82	5026 € *
HPEVS AC-35	144	60	5000 / 10 000	127	52	4180 € *
HPEVS AC-51	144	65	5000 / 10 000	146	52	4310 € *
EVD70VLV-Mcr- 132vdc	132	70	5500 / 6500	180	33	7282 € *

\* Sisältää ohjainlaitteen ja johtosarjan

Moottoria valittaessa tulee myös ottaa huomioon sen IP-luokitus. Ajoneuvokäytössä moottori on alttiina vedelle ja lialle. Esimerkiksi Brusar valmistamien moottoreiden IP-luokitus on IP67, joten se soveltuu ajoneuvokäyttöön erittäin hyvin (HSM1-Hybrid Synchronous Motor). Muut valmistajat eivät ilmoita moottoreidensa IP-luokitusta, mutta sen voidaan olettaa olevan riittävä, jos moottoria markkinoidaan ajoneuvokäyttöön. Taulukosta 4 selviää mitä eri IP lukkien numerot tarkoittavat.

TAULUKKO 4. IP-luokitus (Mikä on IP-luokitus?)

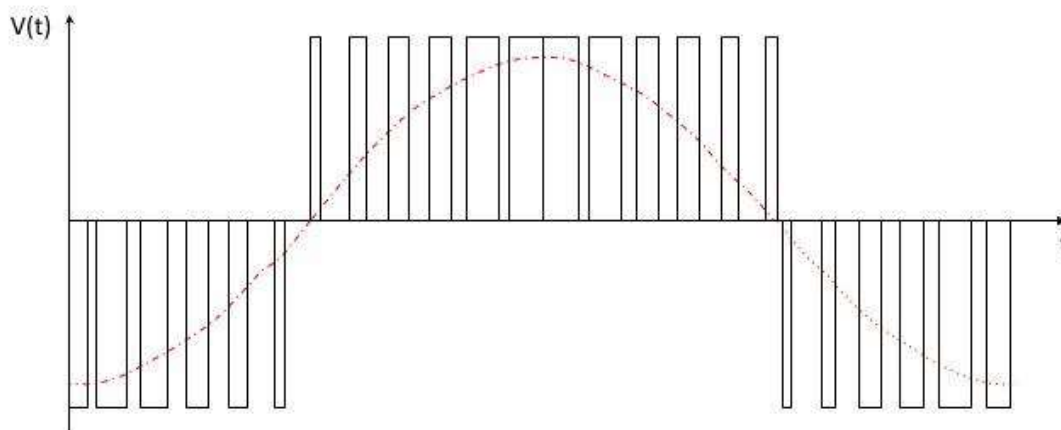
Ensimmäinen numero	Toinen numero
Suojaus kiinteitä kappaleita vastaan	Suojaus vettä vastaan
0: Ei suojausta	0: Ei suojausta
1: Suojattu halkaisijaltaan yli 50 mm vastaan	1: Suojaus suoraan ylhäältä tulevaa vettä
2: Suojattu halkaisijaltaan yli 12 mm vastaan	2: Kestää ylhäältä $\pm 15^\circ$ tulevaa vettä
3: Suojattu halkaisijaltaan yli 2,5 mm vastaan	3: Kestää ylhäältä $\pm 60^\circ$ tulevaa vettä
4: Suojattu halkaisijaltaan yli 1 mm vastaan	4: Roiskeveesisuojattu
5: Pölyltä suojattu	5: Kestää vesisuihkun
6: Täysin tiivis kiinteiltä aineilta	6: Kestää ruiskun kovalla paineella
-	7: Kestää hetkellisen upotuksen
-	8: Kestää upotuksen

Moottoreita ja ohjainlaitteita on saatavana myös Suomesta. Amotec Oy myy taulukossa 3 mainittua AC-35 moottoria ja ohjainlaitetta hintaan 5700 €. Hintaan sisältyy myös johdosarja, ohjainlaitteen jäähdytyslementti ja Curtis 840-näyttö. Sama moottori edullisemmalla ohjainlaitteella, joka toimii 96 V jännitteellä, maksaa 5000 €. Moottori ja ohjainlaite kestävät noin 30 % nimellisjännitettä suuremman jännitteen. Amotec Oy:ltä on saatavana myös akustoja. (Koskimies 2017.)

## 5 MOOTTORINOHJAUS

### 5.1 Moottorinohjain

Vaihtosähkömoottoria ohjataan taajuusmuuttajan avulla. Taajuusmuuttaja, taikka vaihtosuuntaaja, muuttaa akuston tasajännitteen halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Yleisin vaihtosuuntaajien toimintaperiaate perustuu pulssileveysmodulaatioon (PWM, Pulse-Width Modulation), eli vakiosuuruinen tasajännite katkotaan kestoltaan ja leveydeltään sopiviksi pulsseiksi, joista voidaan muodostaa melko tarkasti siniaaltoja muistuttava vaihtojännite (kuva 8). Nykyaikaisilla vaihtosuuntaajilla kytkentätaajuus voi olla jopa 16 kHz. (Hietalahti 2011, 85.)



KUVA 8. PWM-vaihtosuuntaajan toimintaperiaate (McFadyen 2014)

Vaihtosähkömoottoria ohjataan kahdella tavalla: muuttamalla jännitettä, ja muuttamalla vaihtovirran taajuutta. Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että jännitteen muuttaminen muuttaa moottorin tuottamaa vääntömomenttia ja taajuuden muuttaminen muuttaa moottorin pyörimisnopeutta. Jos moottorin momentti halutaan pitää vakiona, täytyy jännitettä pienentää taajuuden pienentyessä. (Husain 2003, 124; Hietalahti 2011, 87.)

Jos moottorin pyörimisnopeus kasvaa suuremmaksi, kuin taajuusmuuttajan syöttämä taajuus, esimerkiksi alamäkeen rullatessa, moottori alkaa toimia generaattorina. Tällöin moottori syöttää energiaa taajuusmuuttajaan. Taajuusmuuttajan ohjauselektronikka havaitsee tämän jännitteen nousuna ja kytkee päälle niin sanotun jarruvastuksen. Jarruvastus

muuttaa ajoneuvon liike-energian häviölämmöksi. Jotkin järjestelmät kykenevät ottamaan talteen ja varastoimaan liike-energian, eli lataamaan akkuja moottorijarrutusta vastaavassa tilanteessa. (Hietalahti 2011, 90.)

Tasavirtamoottoreita ohjataan muuttamalla syötettävää jännitettä. Jännitteensäätö on yleensä toteutettu PWM-ohjauksella, koska se on hyötysuhteeltaan hyvä, kevyt ja kompaktin kokoinen toteuttaa. Yleensä tasavirtamoottorin ohjainlaite pystyy myös kääntämään virran suunnan peruutusominaisuuden toteuttamiseksi. (Ehsani, ym. 2010, 158–164.) Tasavirtamoottorin ohjauksessa PWM-ohjaimella ei tuoteta sinimuotoista jännitettä, vaan jännite säädetään halutulle tasolle pulssileveydellä. Jos sisääntulojännite on 300 V, 50 % pulssisuhteella ulostulojännite on 150 V. Tällöin PWM-ohjain syöttää 50 % jaksonajasta 300 V jännitettä ja toiset 50 % jakson ajasta 0 V jännitettä.

Taulukkoon 5 on kerätty eri moottoreiden kanssa yhteensopivia ohjainlaitteita. Brusin ohjainlaitteen tiedot ovat Metric Mind -verkkokaupasta ja Curtisin ohjainlaitteiden tiedot ovat EV West -verkkokaupasta. Ohjainlaitteet voidaan asettaa ohjaamaan joko pyörimisnopeutta, tai vääntömomenttia. Jos ohjainlaite ohjaa pyörimisnopeutta, ohjainlaite pyrkii pitämään moottorin pyörimisnopeuden vakiona. Kaasupolkimen asento määrittää pyörimisnopeuden suuruuden. Jos ohjainlaite ohjaa vääntömomenttia, kaasupolkimen asento määrittää moottorin tuottaman vääntömomentin suuruuden. (Products: 1239e.)

TAULUKKO 5. Ohjainlaitteet

Ohjainlaite	Jännite (V)	Max. teho (kW)	Paino (kg)	Hinta
BRUSA DMC524	450	105	9	10 595 €
Curtis 1238-7601	96	62,4	5,5	1 860 €
Curtis 1239-8501	144	72	5,5	2 530 €

## 5.2 Kaasupoljin ja ajosuunnan valinta

Sähköauto vaatii sähköisen kaasupolkimen. Vanhoissa autoissa kaasupoljin toimii vaijerin välityksellä, joten joissakin tapauksissa kaasupoljin vaatii muutoksia. Uudemmissa autoissa, kuten myös muunnoksen kohdeajoneuvossa, kaasupoljin on sähkötoiminen. Sähköisen kaasupolkimen toiminta perustuu joko potentiometriin, tai Hall-ilmiöön. Kaasupolkimen asento määrää ulostulosignaalin jännitteen, joka on välillä 0–5 V. (Hall Effect Throttle Box 2011; Evnetics Billet Aluminum Throttle Potentiometer 2013.)

Ohjainlaite määrää moottorin pyörimissuunnan. Suunnan valinta tapahtuu sähköisellä katkaisijalla, joka ohjaa 12 V jännitteen tiettyyn ohjainlaitteen liittimeen. (On-Road AC Motor Controller 2016.) Katkaisijana voidaan käyttää vaihdekepin tapaista valitsinta, tai pientä yksinkertaista katkaisijaa. Peruutusta varten on hyvä olla kaksi erillistä katkaisijaa, mikä estää tahattoman peruuttamisen, jos katkaisija unohtuu, tai vahingossa siirtyy peruutusasentoon. Jos moottori asennetaan alkuperäisen vaihdelaatikon kanssa niin, että vaihteiden vaihtaminen on mahdollista, sähköistä ajosuunnan valintakatkaisijaa ei välttämättä tarvita.



## 6 AKUSTO

### 6.1 Yleiset ominaisuudet

Akku on sähkökemiallinen energiavarasto, johon varastoidaan ajamiseen tarvittava energia. Akuston energiatiheys ilmaisee, kuinka paljon energiaa akustoon voidaan varastoida massayksikköä kohden. Yleisin energiatihedys yksikkö on wattitunti kilogrammaa kohden (Wh/kg). Tehotiheds ilmaisee akuston kyvyn luovuttaa energiaa. Tehotiheds määrittellään huipputehona massayksikköä kohden, yleensä wattia kilogrammaa kohden (W/kg). (Hietalahti 2011, 91.) Akkukennoja, tai kokonaisia akustoja, voidaan kytkeä sarjaan tai rinnan. Sarjakytkenällä saadaan korkeampi jännite ja rinnankytkenällä saadaan puolestaan suurempi kapasiteetti. (Husain 2003, 65.) Esimerkiksi jos kaksi 12 V 60 Ah akkua kytetään sarjaan, saadaan akustosta 24 V jännite ja 60 Ah kapasiteetti. Jos akut kytetään rinnan, saadaan 12 V jännite ja 120 Ah kapasiteetti.

Akun sisäisestä resistanssista johtuen akun napajännite vaihtelee kuormituksen mukaan. Kaavasta (5) nähdään, että mitä suuremmalla virralla akkua kuormitetaan, sen suurempi jännitehäviö tapahtuu akun sisällä.

$$U = E - R_i \cdot I \quad (5),$$

missä  $U$  on akun napajännite,  $E$  on akun lähdejännite,  $R_i$  on akun sisäinen resistanssi ja  $I$  on akusta otettava virta. (Hietalahti 2011, 97.) Akun sisäinen resistanssi aiheuttaa hukkatehoa akusta. Hukkatehon suuruus voidaan laskea kaavalla (6)

$$P = R_s \cdot I^2 \quad (6),$$

missä  $P$  on teho,  $R_i$  on akun sisäinen resistanssi ja  $I$  on akusta otettava virta. (Mäkelä ym. 2012, 120).

Kaavasta (7) puolestaan nähdään, että teho voidaan laskea myös jännitteen ja virran tulona. Koska akun hukkateho riippuu sisäisen resistanssin ja virran suuruudesta, on järkevää käyttää suurta jännitettä ja pientä virtaa moottorin tehon tuottamiseen. Tällöin akustossa syntyy häviötä vähän ja akuston lämpeneminen ei ole niin voimakasta.

$$P = U \cdot I \quad (7),$$

missä  $P$  on teho,  $U$  on jännite ja  $I$  on virta. (Mäkelä ym. 2012, 120).

Korkeajänniteakun lisäksi ajoneuvoon tarvitaan 12 V akku ohjainlaitteita, ajovaloja ja muita pienellä jännitteellä toimivia komponentteja varten. Korkeajänniteakku ja matalajänniteakku voidaan liittää toisiinsa DC-DC-muuttajalla, eli niin sanotulla hakkuritehonlähteellä (Hietalahti 2016). DC-DC-muuttajan toimintaperiaate on PWM-ohjauksen kaltainen, eli korkeajännite pilkotaan sopiviksi pulsseiksi, jotta ulostulojännite saadaan halutulle tasolle (Husain 2003, 162).

## 6.2 Akkutyypit

Lyijyaku on nykyisin käytössä lähes kaikissa autoissa käynnistysakkuna. Lyijyakut ovat edullisia ja luotettavia, mutta ne ovat erittäin painavia verrattuna muihin akkuihin. Lyijyakun energiatiheys on vain noin 35 Wh/kg ja ominaisteho 200 W/kg. Vaikka lyijyakut ovat yleisesti ottaen luotettavia, kylmä heikentää niiden toimintaa huomattavasti ja akun käyttöikä on lyhyt verrattuna nikkeli-metallihybridiakkuun tai litium-ioniakkuun. (Ball & Stone 2004, 498.)

Nikkeli-metallihybridiakku (NiMH) on käytetty esimerkiksi GM EV1 ja Toyota Rav4 -sähköautoissa. Ominaisenergia on varsin hyvä, noin 90 Wh/kg, ja käyttöikä on pitkä. Turvallisuussyistä NiMH akkuja ei enää ole käytetty ajoneuvoissa. Akut sisältävät natriumia, joka räjähtää joutuessaan kosketukseen veden kanssa. Lisäksi akun toimintalämpötila, erityisesti latauksessa, on erittäin korkea, noin 300 °C. (Vaihtoehtoiset polttoaineet ja ajoneuvot 2006.)

Litiumioiniakuilla (Li-ion) on todella suuri ominaisenergia, noin 150 Wh/kg. Akkujen käyttöikä on pitkä, mutta niiden korkea hinta on hidastanut niiden yleistymistä. (Vaihtoehtoiset polttoaineet ja ajoneuvot 2006.) Li-ion-akun kennojännite on 3,6 V, eli 3 kertaa Ni-MH akun kennojännite. Lisäksi akun itsepurkautuminen on vähäistä. Ominaisuuksiltaan Li-ion-akut sopivat hyvin sähköautoon. (Husain 2003, 53.)

Litiumpolymeeriakku (LiPo) on samankaltainen, kuin Li-ion-akku, mutta nestemäinen elektrolyytti on korvattu polymeerillä. Polymeerikerros ei johda sähkö, mutta päästää litiumionit läpi. Polymeerikerros pitää akun elektrodit irrallaan toisistaan, mikä parantaa akun turvallisuutta. Ominaisuuksiltaan LiPo-akku vastaa Li-ion-akkua, mutta energiatiheys on matalampi ja hinta korkeampi. (BU-206: Lithium-polymer: Substance or Hype? 2010.)

Nykyisin lähes kaikki myynnissä olevat sähköautojen akut ovat LiFePO<sub>4</sub> akkuja. Toisin kuin lyijyakut, litiumrautafosfaattiakut (LiFePO<sub>4</sub>) eivät tasaa kennojen välistä jännitettä automaattisesti ladattaessa. Siksi LiFePO<sub>4</sub> akut tarvitsevat aina BMS-järjestelmän valvomaan akun tilaa ja tasamaan kennojännitteitä. LiFePO<sub>4</sub>-akun kennojännite on 3,2 V ja energiatiheys on noin 130 Wh/kg. LiFePO<sub>4</sub> akut ovat turvallisempia ja edullisempia kuin LiPo akut. Lisäksi LiFePO<sub>4</sub> akut kestävät huomattavasti enemmän latausyklejä, kuin muut akut. (How to charge Lithium Iron Phosphate Rechargeable Lithium Ion Batteries 2012.)

### **6.3 Akuston valvontajärjestelmä**

Suuret akut tarvitsevat aina hallintaelektroniikka (BMS, Battery Management System), joka antaa käyttäjälle ja ajoneuvon muille järjestelmille tietoa akun tilasta. BMS parantaa akun käyttöikää ja turvallisuutta tarkkailemalla muun muassa akun varaustilaa, jännitettä, lämpötilaa ja kennojännitteiden tasapainoa. (Hietalahti 2011, 101.)

BMS tarkkailee jokaisen yksittäisen akkukennon jännitettä ja lämpötilaa sekä kuormituksessa että latauksessa. Lisäksi järjestelmä mittaa koko akuston virtaa latauksessa ja kuormituksessa. Tarvittaessa BMS voi katkaista latausvirran ylilataukselta tai liialliselta kuumenemiselta estämiseksi. BMS toimii samoin myös kuormitustilanteessa, eli jos akkukennon jännite laskee liian alas, virtaa rajoitetaan tai se katkaistaan kokonaan. BMS on kytkettynä korkeajänniteakustoon, moottorin ohjainlaitteeseen ja laturiin. Järjestelmä ottaa oman käyttöenergiänsä 12 V akusta. Jotkut järjestelmät voivat myös estää ajamisen, kun auto on kytketty lataukseen. (Lithiumate Lite Overview.)

#### 6.4 Akustovaihtoehdot

Taulukkoon 6 on kerätty eri akustovaihtoehtoja. Taulukon tiedot ovat Brusan akustoa lukuun ottamatta EV West -verkkokaupasta, Brusan akuston tiedot Metric Mind -verkkokaupasta. Akuston jännitteen on oltava yhteensopiva valitun moottorin kanssa. Helpoin ratkaisu on valita valmis akkumoduuli, joka sisältää useita akkukennoja ja akuston valvontajärjestelmän. Akuston voi myös kasata itse kennoista. Tällöin akuston valvontajärjestelmän (BMS) joutuu ostamaan ja asentamaan erikseen. Jos akuston kasaa itse, on huolehdittava myös akuston koteloinnista ja jäähdytyksestä. Taulukkoon 7 on kerätty akunvalvontajärjestelmiä, joita voidaan käyttää, jos akku kasataan itse yksittäisistä kennoista.

TAULUKKO 6. Akustovaihtoehdot

<b>Akusto</b>	<b>Jännite (V)</b>	<b>Kapasiteetti (kWh)</b>	<b>Paino (kg)</b>	<b>Hinta</b>
30x CALB 100 Ah SE Series	96	9,6	96	3810 € + BMS
30x Voltronix 160 Ah	96	15,4	168	5890 € +BMS
30x CALB 180 Ah SE Series	96	17,3	168	6840 € + BMS
Enerdel MP320-049 22 kWh	96	22	170	9 767 €
45x CALB 100 Ah SE Series	144	14,4	144	5715 € +BMS
50x CALB 100 Ah SE Series	160	16,4	160	6350 € +BMS
Enerdel MP320-049 24 kWh	144	24	181	12 500 €
140x CALB 40 Ah CA Series	448	18	196	7103 € +BMS
BRUSA EVB1-400-40	448	16	145	72 267 €

TAULUKKO 7. Akunvalvontajärjestelmät. (Battery Management/Monitoring Systems)

<b>BMS</b>	<b>Liittimet</b>		<b>Hinta</b>
Elithion Lithiumate Lite	40 kennolle		940 €
Elithion Lithiumate Lite	75 kennolle		1 221 €
Orion BMS	36 kennolle		1 080 €
Orion BMS	48 kennolle		1 132 €

Kaikki taulukon 6 akut ovat LiFePO<sub>4</sub>-akkuja. Taulukon akuista voi ottaa virtaa -20 °C...55 °C lämpötilassa, mutta lataus on tehtävä 0 °C...45 °C lämpötilassa (SE200 2011). Talvella akustoa on siis lämmitettävä ennen latausta. Akuston sisäisestä resistanssista johtuen akusto lämpenee ajon aikana. Sekä lämmitys, että jäähdytys voidaan toteuttaa esimerkiksi nestekierrolla. Myös ilmajäähdytys ja säteilyvastuksella, taikka puhaltimella toteutettu lämmitys ovat mahdollisia.

## 7 JARRUTUSENERGIAN TALTEENOTTO

Sähkömoottoria voidaan käyttää myös generaattorina, jolloin kineettinen energia saadaan muutettua takaisin sähköenergiaksi. Eniten hyötyä energian talteenotosta on kaupunkiajossa, sillä kaupungissa jarrutuksia ja kiihdytyksiä tulee paljon. Moottorinohjainlaite ohjaa moottoria siten, että moottori aiheuttaa jarruttavan momentin. Energian talteenotto voi käynnistyä heti kun jalka nostetaan kaasupolkimelta, tai vasta jarrupoljinta painettaessa, ohjainlaite määrittää toimintatavan. Tällöin osa auton liike-energiasta saadaan varastoitua takaisin akustoon. Jarrutusenergian talteenotto ei korvaa ajoneuvon alkuperäisiä jarruja, vaan sitä käytetään jarrujen rinnalla. Moottorin käyttö generaattorina aiheuttaa jarrumomentin vain vetävällä akselilla, toisin kuin jarrut. Lisäksi on syytä huomioida, että ABS-järjestelmä ei rajoita moottorin aiheuttamaa jarrumomenttia. (Ehsani ym. 2010, 411–427.)

Ilmanvastus, renkaiden vierintävastus ja voimansiirron häviöt aiheuttavat energiahäviöitä. Myös moottorin, ohjainlaitteen ja akuston hyötysuhteet pienentävät talteen otettavan energian määrää. Teoriassa noin 55-64 % jarrutusenergiasta saadaan varastoitua takaisin akustoon. Käytännön kokeissa noin 25 % energiasta on saatu otettua talteen. (Regenerative braking efficiency 2016; Solberg 2007.) Auton liike-energiasta osa saadaan siis talteen jarrutuksessa. Liike-energian, eli kineettisen energian määrä lasketaan kaavalla (8)

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (8),$$

missä  $m$  on kappaleen massa kilogrammoina ja  $v$  on kappaleen nopeus yksikössä m/s (Mäkelä ym. 2012, 92).

Kuvassa 9 on laskettu jarrutusenergian talteenoton vaikutus akun kapasiteettiin. Kaupunkiajosityklin aikana saadaan noin 300 kJ energiaa talteen, jos oletetaan, että 25 % liikeenergiasta voidaan varastoida takaisin akkuihin. Tällöin akkujen kapasiteettia voidaan pienentää noin 13 kilowattituntiin. Kaikki EV Westin muunnossarjat tukevat energian talteenottoa (Curtis 1239e-8521 HPEVS AC-35 Brushless AC Motor Kit 2014).

Oletetaan, että regeneroiva sähköauto voi ottaa talteen 25% jarrutusenergiasta

Talteen otettavan energian määrä kaupunkiajosityklin aikana:

$$E_{\text{kiers}} := 25\% \cdot 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( m_a \cdot v_a(23\text{s})^2 + m_a \cdot v_a(85\text{s})^2 + m_a \cdot v_a(155\text{s})^2 + m_a \cdot v_a(176\text{s})^2 \right) = 308380.32 \text{ J}$$

$$E_{\text{sahko\_kiers}} := \frac{E_k - E_{\text{kiers}}}{\eta_{\text{sahko}}} = 1795079.42 \text{ J}$$

$$Q_{\text{kiers}} := E_{\text{sahko\_kiers}} \cdot x = 12.54 \cdot \text{kW} \cdot \text{hr} \quad \text{Tarvittavan akun kapasiteetti, jos käytetään energian talteenottoa}$$

KUVA 9. Akun kapasiteetti, jos käytetään energian talteenottoa

## 8 LATAUS JA LÄMMITYS

Sähköauto ladataan erillisestä latausjärjestelmästä, joka tunnistaa auton ja akuston tyypin. Latausjärjestelmän kautta lataus kestää 1–6 tuntia autosta riippuen. Suomessa latausjärjestelmiä ei juuri ole, joten lataus tapahtuu normaalista pistorasiasta. Auto liitetään pistorasiaan latauskaapelilla, jossa on latausvirran rajoitin. Tämä lataustapa on tarkoitettu tilapäiseen käyttöön, mutta monesti se on ainoa mahdollinen lataustapa. (Hietalahti 2016.)

Muunnossähköauton tapauksessa lataus tapahtuu normaalista pistorasiasta autoon asennetun laturin avulla. Laturi muuntaa sähköverkon 230 V vaihtovirran akustolle sopivaksi tasavirraksi. Normaalista pistorasiasta ladattaessa latausvirtana voidaan käyttää 16 A yksivaihevirtaa, mutta pitkäaikaisessa käytössä tämä aiheuttaa latauskaapelin ja liittimien kuumenemista. Yleensä latausvirta rajoitetaan 8 ampeeriin. (Hietalahti 2016.) Kun kaa-vaan (7) sijoitetaan lukuarvot, saadaan yhtälö (9), jonka perusteella enimmäislatausteho normaalista pistorasiasta on vajaa 1,8 kW.

$$P = 230V \cdot 8A = 1,84kW \quad (9)$$

15 kWh akuston lataaminen kestää hieman yli 8 tuntia normaalin pistorasian kautta 8A virralla ladattaessa. Latureiden tehoissa on eroja, joten enimmillään lataus voi kestää noin 10 tuntia, 1,5 kW laturia käytettäessä. Taulukkoon 8 on kerätty latauslaittevaihtoehtoja. Latureiden tiedot ovat EV West -verkkokaupasta Elconin latureiden osalta. Brusan laturin tiedot ovat Metric Mind -verkkokaupasta ja Eltekin laturin tiedot EV Source -verkkokaupasta. Laturin osto-/tilausvaiheessa on varmistettava laturin ulostulojännitteen suuruus. Latauskaapelin kuumenemisen välttämiseksi ei kannata valita liian tehokasta laturia, vaan tehon tulisi olla lähellä edellä mainittua 1,8 kW:a.



TAULUKKO 8. Laturit

Laturi	Teho (kW)	Sisääntulo (V)	Ulostulo (V)	Paino (kg)	Hinta
BRUSA NLG513	3,7	100–264 AC	200–520 DC	6,3	2 729 €
ELCON PFC1500	1,5	85–265 AC	24–240 DC	6,3	540 €
ELCON PFC2500	2,5	85–265 AC	24–240 DC	6,3	800 €
Eltek Valeo IP67	3	85–275 AC	50–180 DC	5,4	1 165 €
ELCON HF/PFC	3	90–260 AC	72–156 DC	9,5	1 130 €

Korkeajänniteakusto liitetään 12 V akkuun DC-DC muuttajan avulla. Tällöin 12 V akkua ei tarvitse ladata erikseen. Taulukkoon 9 on kerätty muutamia mahdollisia DC-DC muunnimia. DC-DC muuttaja tulee valita korkeajänniteakuston jännitteen perusteella. Elconin DC-DC muuttajien tiedot ovat jälleen EV West -verkkokaupasta ja Brusantiedot ovat Metric Mind -verkkokaupasta.

TAULUKKO 9. DC-DC muuttajat

DC-DC muunnin	Paino (kg)	Hinta
BRUSA BSC623	4,8	4 583 €
ELCON 84/120V-12V	-	245 €
ELCON 128/168V-12V	-	254 €

Kuten aiemmin mainittiin, akuston lämpötilan on oltava yli 0 °C ennen latausta. Välittömästi ajon jälkeen akuston on lämmin, sillä akuston sisäinen resistanssi aiheuttaa hukkatehoa, joka lämmittää akustoa. Akusto voidaan lämmittää esimerkiksi akkukotelon pohjalle asennetulla sähkövastuksella. Autoon voidaan myös asentaa polttoainekäyttöinen lämmitin, kuten Webasto tai Eberspächer. Jos akusto sijoitetaan auton tavaratilaan, sisätilanlämmitin soveltuu hyvin myös akuston lämmitykseen.

## 9 MUUT TARPEELLISET MUUTOKSET

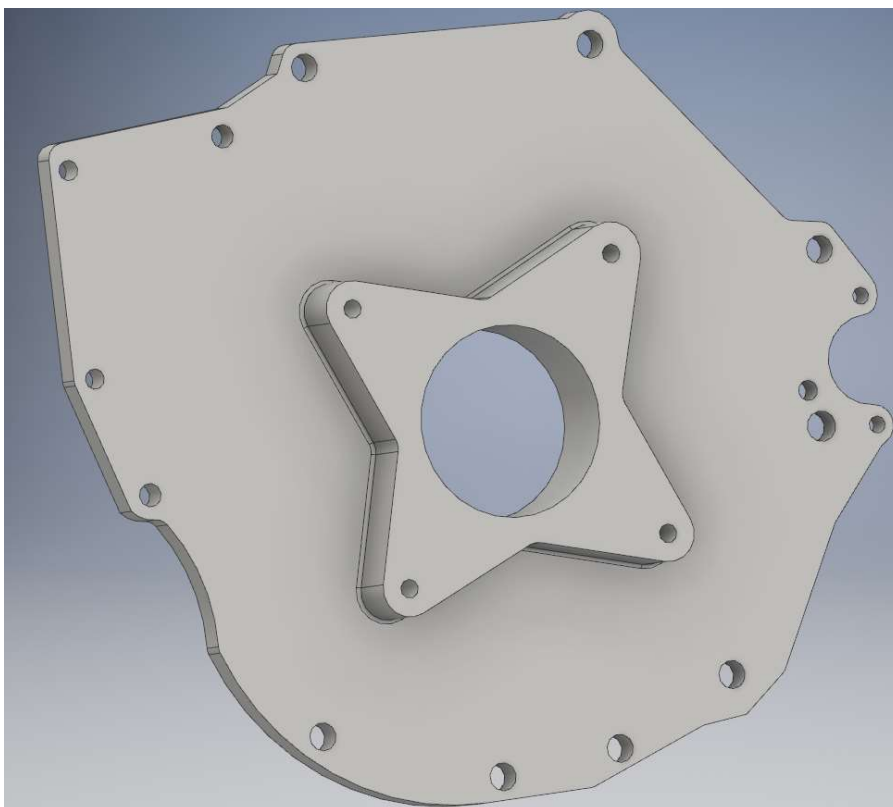
### 9.1 Voimansiirto

Kuten aiemmin todettiin, sähkömoottorin kanssa ei välttämättä tarvita moniportaista vaihdelaatikkoo, koska moottori pystyy tuottamaan suuren vääntömomentin laajalla kierrosalueella, jo nolllanopeudesta saakka. Jos moottorin kanssa ei käytetä vaihdelaatikkoo, peruutusvaihde on toteutettava moottorinohjauksella. Kuvassa 10 on esimerkki sähkömoottorista ilman vaihdelaatikkoo. Moottori on liitetty suoraan tasauspyörästöön.



KUVA 10. Moottori ja tasauspyörästö (EV Tech)

Moottori voidaan asentaa myös alkuperäisen vaihdelaatikon kanssa, jolloin tasauspyörästö ja vetoakselit eivät vaadi muutoksia. Tällöin sähkömoottorin akseliin asennetaan vauhtipyörä, joka kytkimen välityksellä siirtää momentin vaihdelaatikolle. Sähkömoottorin ja vaihdelaatikon väliin on tilattava tai valmistettava sovituskappale (kuva 11). Jos alkuperäisen moottorin vauhtipyörä asennetaan sähkömoottoriin, vauhtipyörää voidaan keventää huomattavasti. (Leitman & Brant 2009, 239.)



KUVA 11. Moottorin ja vaihdelaatikon sovituskappale

Sähkömoottorit eivät käy tyhjäkäyntiä kuten polttomoottorit ja sähkömoottorin vääntömomentti on suuri levosta saakka, joten sähkömoottori voidaan sovittaa vaihdelaatikkoon myös ilman vauhtipyörää ja kytkintä. Tällöin vaihteiden vaihtaminen ajon aikana on erittäin vaikeaa, joten vaihdelaatikosta tulee lukita sopiva vaihde käyttöön. Sähkömoottorin ja vaihdelaatikon akselin väliin on tehtävä soviteholkki. Myös edellä mainittu vaihdelaatikon ja moottorin välinen sovitekappale on tarpeellinen. Vaihdelaatikon kanssa asennettu moottori on luonnollisesti painavampi ja monimutkaisempi kuin ilman vaihdelaatikkoa asennettu moottori. Toisaalta se todennäköisesti edullisempi toteuttaa.

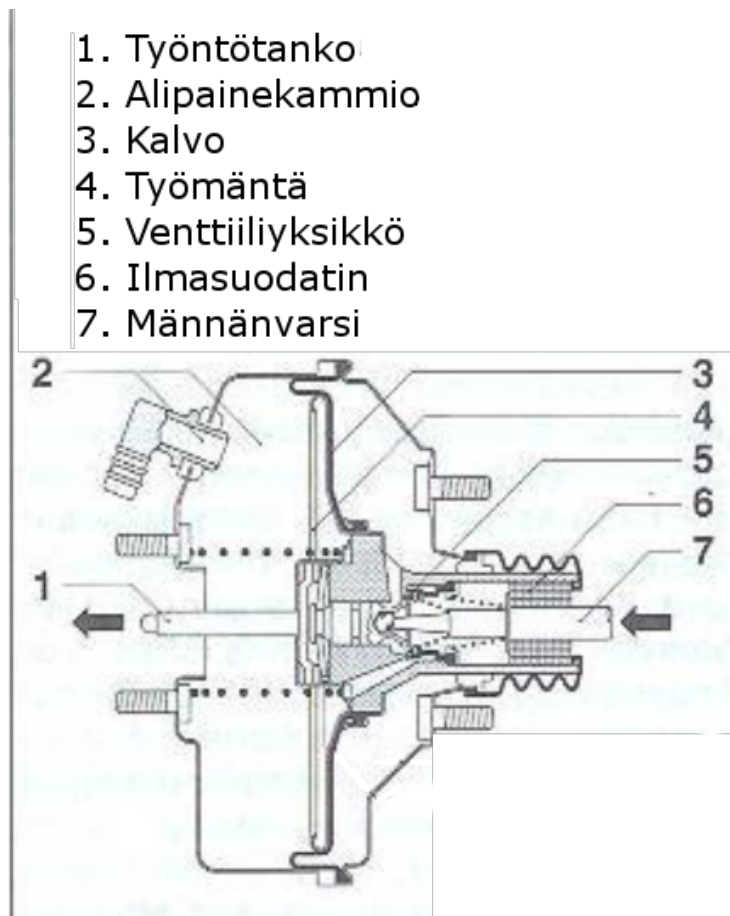
## 9.2 Ohjaustehostin

Ohjaustehostimen avulla ohjaamisen tarvittava voima vähenee ja ohjauspyörän kierros lukua voidaan vähentää. Erityisesti pysäköintitilanteessa ohjaustehostimesta on huomattava apu. (Surakka & Pietola 1992, 40.) Kohdeajoneuvossa on hydraulinen ohjaustehostin, jonka tehonlähteenä toimii polttomoottoriin liitetty hydraulipumppu. Kun polttomoottori poistetaan, hydraulipumppu on korvattava sähkökäyttöisellä pumpulla, tai oh-

jaustehostin on korvattava sähköisellä ohjaustehostimella. Periaatteessa ohjaustehostimen pumppu voidaan jättää pois autosta, mutta tällöin ratin kääntäminen on raskasta ja ajaminen epämiellyttävää, etenkin pysäköintitilanteessa. Esimerkiksi EV Source -verkko-kaupasta on saatavana sähköinen 12 V jännitteellä toimiva ohjaustehostinpumppu noin 930 € hintaan (Electric Power Steering Pump Kit).

### 9.3 Jarrutehostin

Jarrutehostin pienentää jarruttamiseen tarvittavaa poljinvoimaa. Henkilöautojen jarrutehostimen toiminta perustuu alipaineeseen. Kun jarrupoljinta painetaan, jarrutehostimen venttiiliyksikkö (kuva 12) päästää ilmaa tehostimen kalvon toiselle puolelle. Paine-ero kalvon eri puolilla aiheuttaa voiman, joka avustaa työntötangon liikettä. Kun jarrutus päättyy, venttiiliyksikkö tasaa paine-eron kalvon eri puolilla. Dieselmootoreissa on alipainepumppu jarrutehostinta varten. (Dietsche ym. 2014, 930.)



KUVA 12. Jarrutehostin (Dietsche ym. 2014, 929. Muokattu)

Alkuperäinen dieselmoottorin alipainepumppu saa käyttövoimansa mekaanisesti dieselmoottorilta, joten pumppu on korvattava sähköisellä alipainepumpulla. Sähköautomuunnoksia varten on saatavilla sähköisiä 12 V jännitteellä toimivia alipainepumppuja (EV Vacuum pumps).

#### **9.4 Jäähdytys ja moottorin kiinnitys**

Lähes kaikki moottorinohjainlaitteet ovat nestejäähdytteisiä. Lisäksi jotkut sähkömoottorit ovat nestejäähdytteisiä, joten autoon tarvitaan sähköinen vesipumppu. Alkuperäistä jäähdytinkennoa voidaan käyttää uuden moottorin ja vesipumpun kanssa. Myös akustolle on mahdollista rakentaa nestejäähdytyspiiri. Sähköisen vesipumpun hinta on noin 120 € (Davies Craig sähköiset vesipumput).

Koska sähkökäytön hyötysuhde on huomattavasti parempi kuin polttomoottorin hyötysuhde, jäähdytystä vaativaa hukkatahoa syntyy vähemmän, jolloin vesipumppu voidaan mitoittaa pienemmäksi. Ohjainlaitteen alle täytyy asentaa jäähdytyslevy, minkä kautta jäähdytysneste virtaa. Jäähdytyslevyn hinta on noin 150 € (Curtis 1238-1239 Chill Plate Liquid Cooling Kit 2012).

Jos moottori asennetaan alkuperäiseen vaihdelaatikkoon, moottori kiinnitetään adapterilevyllä vaihdelaatikkoon. Lisäksi moottori tulee kiinnittää alkuperäisiin moottorin kiinnityspisteisiin. Kiinnitystä varten on valmistettava sopiva moottorin kannatin esimerkiksi teräsputkesta. Jos moottori asennetaan ilman alkuperäistä vaihdelaatikkoa, uusi tasauspyörästö vaatii myös kannakkeet.

## 10 KUSTANNUSARVIO JA KÄYTTÖKUSTANNUSVERTAILU

Citroen Berlingon vuotuiset huoltokustannukset ovat keskimäärin noin 300 € (Citroen Berlingo määräaikaishuolto hinta). Sähkökäyttö on käytännössä huoltovapaa, sillä moottorissa ei ole öljyä ja liikkuvia osia on vain vähän. Auton ikääntyessä esimerkiksi alustan osat kuluvat, jotain niitä joutuu ajoittain uusimaan. Esimerkiksi jarrupalojen hinta on noin 75 € (Autonosat CITROEN BERLINGO Umpikori 1.6 HDi). Karkeasti voidaan olettaa, että sähköauton huoltokustannukset ovat puolet polttomoottoriauton huoltokustannuksista, eli noin 150 € vuodessa.

Käyttövoimakustannukset ovat myös merkittävästi pienemmät. Kuvassa 13 on laskelma, jonka perusteella kaupunkiajosyklin hinnaksi dieselautolla tulee hieman yli 20 senttiä, kun taas sähköautolla hinnaksi tulee 6 senttiä. Dieselauton hyötysuhteeksi on oletettu 30 % ja sähköauton hyötysuhteeksi 80 %. Dieselin litrahinnan on oletettu olevan 1,35 € ja sähkön hinnan on oletettu olevan 10 snt/kWh siirtomaksuineen. Vastaavasti 10 000 km kaupunkiajoa maksaa sähköautolla noin 155 €, kun dieselautolle se maksaa noin 550€ kulutusyökin perusteella laskettuna. Kohdeauton kaupunkikulutukseksi on ilmoitettu 7 l/100km. Tämä tarkoittaa noin 950 € polttoainekustannuksia 10 000 km kaupunkiajossa. Vuotuiset säästöt huoltojen ja käyttövoimakustannusten osalta ovat siis 540–940 €.

$$F_{iv}(t) := \frac{1}{2} \rho \cdot v_a(t)^2 \cdot A_f \cdot C_d$$

$$P_{iv}(t) := F_{iv}(t) \cdot v_a(t) \quad P_{fr}(t) := F_r \cdot v_a(t) \quad P_{a1}(t) := F_{a1} \cdot v_a(t) \quad P_{a2}(t) := F_{a2} \cdot v_a(t) \quad P_{a3}(t) := F_{a3} \cdot v_a(t)$$

$$E_k = 4 \cdot \int_{0s}^{23s} P_{iv}(t) + P_{fr}(t) dt + 4 \cdot \int_{11s}^{15s} P_{a1}(t) dt + 4 \cdot \int_{49s}^{85s} P_{iv}(t) + P_{fr}(t) dt \dots = 1744443.86 J$$

$$+ 4 \cdot \int_{49s}^{61s} P_{a2}(t) dt + 4 \cdot \int_{117s}^{155s} P_{iv}(t) + P_{fr}(t) dt + 4 \cdot \int_{117s}^{143s} P_{a3}(t) dt \dots$$

$$+ 4 \cdot \int_{163s}^{176s} P_{iv}(t) + P_{fr}(t) dt$$

Kokonaisenergiantarve  
kaupunkiajosityklissä. Huomioitu  
moottorijarrutus.

$$E_k = 1744443.86 J$$

$$\eta_{diesel} := 30\% \quad \text{Dieselmoottori hyötysuhde} \quad M_{diesel} := 10.05 \frac{\text{kW} \cdot \text{hr}}{1} \quad \text{Dieselin lämpöarvo}$$

$$\eta_{sahko} := 80\% \quad \text{Sähkötöön hyötysuhde}$$

$$V_{diesel} := \frac{E_k}{\eta_{diesel} \cdot M_{diesel}} = 0.16 L \quad V_{sahko} := \frac{E_k}{\eta_{sahko}}$$

$$h_{diesel} := 1.35 \frac{\text{€}}{1} \quad \text{Dieselin hinta} \quad h_{sahko} := 0.10 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{hr}} \quad \text{Sähkön hinta} \\ + \text{siirtohinta}$$

Kokonaisen syklin hinta dieselautolla

Kokonaisen syklin hinta sähköautolla

$$H_{diesel} := V_{diesel} \cdot h_{diesel} = 0.217 \text{ €}$$

$$H_{sahko} := V_{sahko} \cdot h_{sahko} = 0.0606 \text{ €}$$

### KUVA 13. Käyttökustannusvertailu energian perusteella

Taulukossa 10 on esitetty muunnoksen hinta-arvio ja komponenttien paino. Hinta-arvioon ja painoon sisältyy myös Elcon PFC2500-laturi, Elcon DC-DC-muuttaja, sähköinen vesipumppu, ohjaustehostimen pumppu, jarrutehostimen alipainepumppu ja adapterilevy. Hinta-arvio ei siis sisällä esimerkiksi mahdollisia työstä aiheutuvia kustannuksia.

### TAULUKKO 10. Kokoonpanovaihtoehtoja

Moottori	Ohjainlaite	Akusto	Hinta	Paino (kg)
HPEVS AC-50	Curtis 1238-7601	CALB 100 Ah SE Series	12 020 €	180
HPEVS AC-50	Curtis 1238-7601	CALB 180 Ah SE Series	15 030 €	250
HPEVS AC-35	Curtis 1239e-8521	CALB 100 Ah SE Series	14 620 €	230
HPEVS AC-35	Curtis 1239e-8521	Enerdel MP320-049 24 kWh	20 220 €	260
HPEVS AC-51	Curtis 1239e-8521	CALB 100 Ah SE Series	14 750 €	230

Muunnoksen hinnaksi tulee siis noin 15 000 €. Verotus on myös merkittävä kustannustekijä. Kohdeajoneuvon verot ovat noin 295 € vuodessa. Saman ajoneuvon verot sähkökäyttöisenä ovat puolestaan 172 € vuodessa. (Ajoneuvoverolaskurit 2015.) Sähköauton verot ovat siis noin 123 € vähemmän vuodessa. Kun sähköauton tuomat käyttökustannussäästöt ja pienempi verotus otetaan huomioon, muunnos maksaa itsensä takaisin 14–16 vuodessa. Hintavertailussa ei ole huomioitu sähköauton akuston mahdollista vanhene- mista. Työhön kuluu aikaa ohjeaikojen (autodata) perusteella arvioituna noin 25 tuntia. Jos työ tehdään korjaamolla, jonka tuntivelotukseksi oletetaan 96 €/h, muunnostyön hin- naksi tulisi noin 2400 €. Valmistajan ilmoittamat ohjeajat ovat usein alakanttiin, joten todellisuudessa työhön kuluu enemmän aikaa.

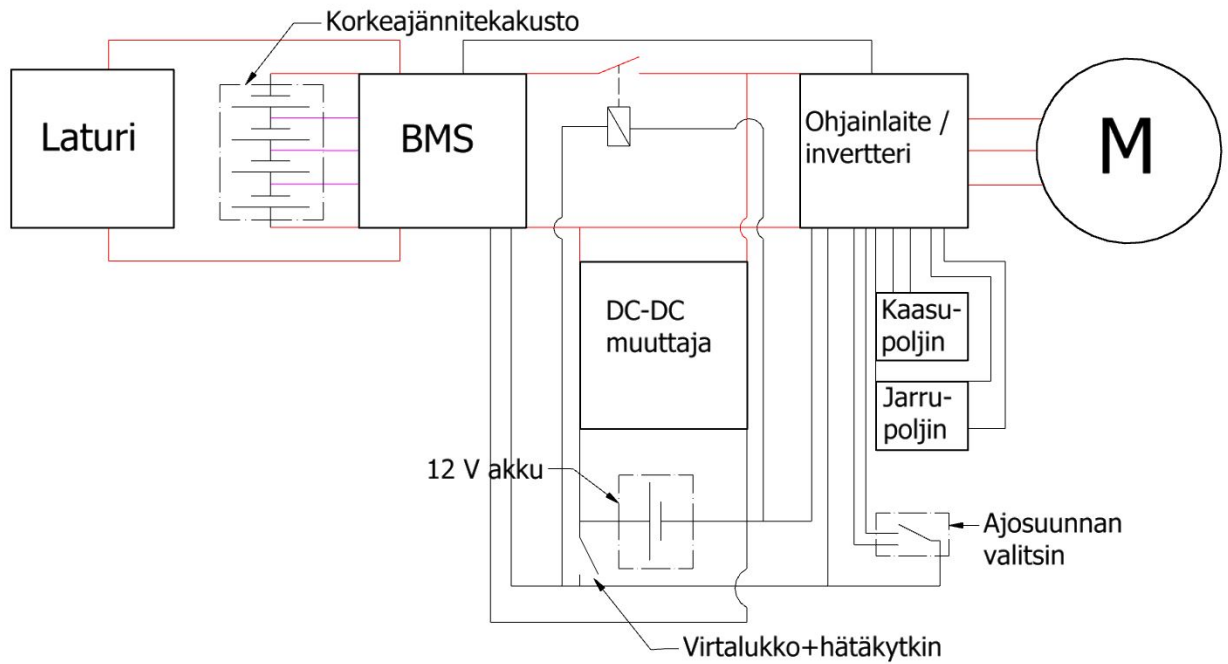


## 11 KOMPONENTTIEN SIOITTELU JA KYTKENTÄ

Alkuperäinen 1,6 litrainen dieselmoottori painaa noin 125 kg ilman vaihdelaatikkoa (DV6C Euro 5 diesel engine). Pakoputkisto poistetaan myös, mikä keventää autoa hie-man. Muunnoskomponenttien massa on noin 200–250 kg akusto mukaan luettuna, eli auton kokonaismassa ei kasva mahdollottoman paljon sähköautomuunnoksen myötä. Sallit-tujen akselimassojen ylittyminen ei siis ole ongelma muunnoksessa.

Auton massakeskipisteen ja akselimassojen muutoksen kannalta kaikki komponentit olisi mielekäästä sijoittaa auton etuosaan konepellin alle. Kun sekä akku, ohjainlaite, että moot-tori sijaitsevat konepellin alla, johtimista voidaan tehdä lyhyempiä, mikä pienentää jän-nitehäviöitä johtimessa. Jos kaikki komponentit sijoitetaan eteen, etuakselimassa kasvaa noin 105 kg, jos muunnoskomponenttien massa on 230 kg (taulukko 10). Koska auto on etuvetoinen, vetopidon kannalta olisi hyvä, jos etuakselimassa kasvaa taka-akselimassaa enemmän. Törmäysturvallisuuden kannalta akustoa ei kuitenkaan kannata sijoittaa auton etuosaan, vaan esimerkiksi tavaratilaan. Jos 144 kg painava akusto sijoitetaan auton tava-ratilaan, puolivälin paikkeille auton akseliväliä, etuakselimassa kasvaa noin 33 kg ja taka-akselimassa kasvaa noin 72 kg. Akusto on koteloitava, mutta yksittäisten akkukennojen väliin on jätettävä ilmarako jäähdytystä varten. Jos akkukotelo valmistetaan metallista, kotelon sisäpuolelle on laitettava eristemateriaali, jotta metallinen kotelo ei aiheuta akus-ton oikosulkua.

Kuvassa 14 on periaatteellinen komponenttien kytkentäkaavio. Korkeajännitejohtimet on piirretty punaisella ja akustosta akunvalvontajärjestelmälle menevät kennonjännitteen tarkkailua varten olevat johtimet on piirretty violetilla. Auton alkuperäistä virtalukkoa voidaan käyttää. Virtalukko ohjaa virran ohjainlaitteelle ja suurtehoreleelle, joka kytkee korkeajänniteakuston ohjainlaitteeseen. Virtalukon kanssa voidaan asentaa sarjaan hätä-katkaisija, josta auto saadaan tehtyä nopeasti osittain virrattomaksi. Kytkentöjä tehdessä on aina noudatettava komponenttivalmistajan ohjeita ja tarkkoja kytkentäkaavioita.



KUVA 14. Kytentäkaavio

Myös johtimet on mitoitettava huolella, jotta niissä ei tapahdu liian suurta jännitehäviötä ja lämpenemistä. Esimerkiksi AC-35-moottori ottaa enimmillään noin 500 A virran (liite 5). Jos akusto on sijoitettu auton tavaratilaan, johtimien pituudeksi voidaan olettaa noin 2 m. Jos johtimessa sallitaan 0,2 V jännitehäviö tällä matkalla, yhtälön (10) perusteella johtimen poikkipinta-ala on oltava vähintään  $86 \text{ mm}^2$ . Tämä tarkoittaa, että johtimen halkaisijan on oltava noin 10,5 mm.

$$A = \frac{\rho l I}{U} = \frac{17,2 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ m} \cdot 2 \text{ m} \cdot 500 \text{ A}}{0,2 \text{ V}} = 86 \text{ mm}^2 \quad (10),$$

missä  $A$  on johtimen poikkipinta-ala,  $\rho$  on johdinmateriaalin resistiivisyys,  $l$  on johtimen pituus,  $I$  on johtimessa kulkeva virta ja  $U$  on sallittu jännitehäviö. (Mäkelä ym. 2012, 120.) 0,2 V jännitehäviö ja 500 A virta tarkoittaa noin 100 W hukkatetta kaavan 7 perusteella. Kun laskettu johtimen poikkipinta-ala pyöritetään ylöspäin, lähin saatavilla oleva johdin on poikkipinta-alaltaan  $95 \text{ mm}^2$  (Asennusjohto-HF REKOCLEAN - MKEM-HF 95 MU K250).

## 12 TURVALLISUUS

Sähköturvallisuuden kannalta auto on erittäin vaarallinen laite. Auton metallinen kori johtaa hyvin sähköä ja johtimet voivat olla tiiviisti pakattuja ja vaikeasti reitittyjä. Lisäksi auto voi olla kostea, mikä lisää sähköiskun vaaraa. Kaikki suurjänniteosat on eristettävä niin, että ihminen ei pääse koskettamaan niitä. Ajoakun virtapiiri on eristettävä auton koriga ja kaikkien metallikoteloiden tulee olla maadoitettuja auton koriin. Kaikki komponentit ja johtimet on kiinnitettävä hyvin, jotta eristeet eivät pääse vaurioitumaan esimerkiksi tärinän ja hankauksen seurauksena. Johtimia ei saa kiinnittää metallisiin kiinnikkeisiin ja kaikki läpiviennit on suojattava kovalla eristysaineella. (Sähköautojen sähköturvallisuus 2014.)

Ajovirtapiiri on merkittävä selkeästi niin, että se erottuu 12 V piiristä. Ajovirtapiirin johtimiin on suositeltavaa käyttää oranssia kaapelia. Myös maadoituspisteiden ja verkkovirtapiiriin on oltava merkitty. Autossa on oltava päävirtakytkin ja hätäkatkaisin, jotta auto saadaan nopeasti virrattomaksi hätätilanteessa. Asennustöissä tulee käyttää eristäviä työkaluja ja jännitetyökäsineitä, suojavaatteita ja kasv suojaa. (Sähköautojen sähköturvallisuus 2014.)

### 13 VIRANOMAISVAATIMUKSET

Sähköautoksi muutettu auto on muutokatsastettava ennen tieliikennekäyttöä, sillä käyttövoiman muutos vaatii aina muutokatsastuksen. Muutokatsastus koskee tapauksia, joissa alle 50 % auton alkuperäisistä osista on vaihdettu. Yleensä auton moottorin ja apulaitteiden osuuden katsotaan olevan 26 %. Muutokatsastuksessa on esitettävä selvitys muunnoksessa käytetyistä osista ja niiden sopivuudesta kohdeajoneuvoon. Jos kohdeajoneuvosta on saatavana rinnakkaismalli, jossa ei ole esimerkiksi ajonvakautusjärjestelmää, se voidaan poistaa kohdeajoneuvosta. Sähköauton komponenttien, joiden käyttäminen on mahdollista vain, kun auto on pysähdyksissä, on oltava EMC-direktiivin mukaisia, eli ne eivät saa aiheuttaa liikaa radiohäiriötä. Käytännössä tämä koskee sähköauton laturia. (Sähköautomuunnoksen viranomaisvaatimukset 2013.)

Jos yli 50 % alkuperäisistä osista on vaihdettu, auto on rekisteröitävä uutena ajoneuvona yksittäishyväksynnän kautta. Yksittäishyväksyttävän auton tulee täyttää lähes kaikki hyväksyntähetkellä voimassa olevat viranomaisvaatimukset. Törmäysturvallisuudesta ei kuitenkaan vaadita näyttöä yksittäishyväksynnässä. (Sähköautomuunnoksen viranomaisvaatimukset 2013; Sähköautojen piensarjatyyppihyväksyntä 2014.)

## 14 POHDINTA

Brusan komponenteilla toteutettu muunnos on kokoonpanovaihtoehtoista kallein. Sen etuna on kuitenkin keveys ja korkea käyttöjännite, jolloin tehohäviöt ovat pienempiä, kuten kaavasta 6 nähtiin. Hyvistä puolista huolimatta yli 100 000 € hankintahinta ei kuitenkaan ole varteenotettava vaihtoehto. Järkevin vaihtoehto on HPEVS AC-35 moottorilla, Curtis 1239e-8521 ohjainlaitteella ja CALBin 100 Ah akustolla toteutettu muunnos. Hankintahinta on alle 15 000 € ja 144 V käyttöjännite mahdollistaa pienemmät virrat ja siten pienemmät häviöt johtimissa ja komponenteissa. Hinta saattaa vaihdelle sen mukaan, mistä komponentit hankitaan.

Kuten aiemmin mainittiin, ohjainlaitetta voi käyttää joko vääntömomentin säätelyyn tai pyörimisnopeuden säätelyyn. Käyttäjän kannalta vääntömomentin säätely kaasupolkimella on tutumpi vaihtoehto, ja siksi suositeltava. Käytännön toteutusta varten on teetettävä sovitelevy moottorin ja vaihdelaatikon välille. Sovitelevyn koneistamista varten tarvitaan vaihdelaatikon tarkat mitat, jotka on helpoin selvittää, kun alkuperäinen moottori on irrotettu. Vaihdelaatikon mitat eivät ole yleisesti jaettavaa tietoa, joten niiden selvittäminen oli käytännössä mahdotonta.

Laskelmat eivät ole täysin luotettavia, sillä esimerkiksi hyötysuhteiden osalta on täytynyt tehdä oletuksia. Moottorin ja akuston mitoituksen osalta laskelmat ovat kuitenkin riittävän luotettavia komponenttivalintojen tekemiseen. Käyttökustannusvertailussa alkuperäisen moottorin laskennallisessa ja ilmoitetussa kaupunkiajokulutuksessa on merkittävä ero. Tämä johtuu osaltaan siinä, että laskennallisessa kulutuksessa on vaikea ottaa huomioon auton kulutus tyhjäkäynnillä. Lisäksi dieselmootorin hyötysuhde voi olla arvioitu hieman yläkanttiin. Kolmas mahdollinen syy eroavaisuuksiin voi olla se, että laskennassa ja kulutusmittauksessa on käytetty erilaista ajosykliä.

Sähköautomuunnos on kallis toteuttaa, mutta se on hyötysuhteeltaan huomattavasti parempi, etenkin kun ajetaan nimellismomentin alueella. Käyttökustannukset ovat siten paljon pienemmät kuin dieselautolla. Myös huoltokustannukset ja verot ovat paljon pienemmät. Käytön osalta sähköauto on myös ympäristöystävällisempi kuin dieselauto, mikä saattaa yrityskäytössä parantaa yrityksen mainetta. Työmaakäyttöä ajatellen sähköauton

suurin etu on se, että sillä voidaan liikkua sisätiloissa, kuten halleissa, missä polttomootorin käyttö on kielletty. Käytettyjä sähköautoja ei juurikaan ole myynnissä ja uudet sähköautot maksavat noin 35 000 € (Täysin sähkötoiminen perheauto LEAF). Suuremmat autot, kuten pakettiautot, ovat vielä tätäkin kalliimpia.

Opinnäytetyö oli mielenkiintoinen ja aiheen laajuuden vuoksi haastava. Muunnossähköauton suunnittelu vaatii perehtymistä mekaaniseen suunnitteluun, ajodynamiikkaan ja erityisesti sähkötekniikkaan. Myös lainsäädäntö ja turvallisuusasiat tulee huomioida muunnossähköautoa suunniteltaessa. Muunnoksen toteuttaminen olisi helpompaa vanhalle autolle, jossa ei ole tehostettua ohjausta. Takavetoisessa autossa moottori voitaisiin liittää suoraan alkuperäiseen tasauspyörästöön tai kardaaniksi ilman vaihdelaatikkoa, mikä myöskin helpottaisi työtä.

## LÄHTEET

Ajoneuvoverolaskurit. 20.1.2015. Trafi. Viitattu 23.1.2017. [http://www.trafi.fi/tielii-kenne/verotus/ajoneuvovero/veron\\_maksaminen/ajoneuvoverolaskurit](http://www.trafi.fi/tielii-kenne/verotus/ajoneuvovero/veron_maksaminen/ajoneuvoverolaskurit)

Asennusjohto-HF REKOCLEAN - MKEM-HF 95 MU K250. Sähkönumerot.fi. Luettu 23.1.2017. <http://www.sahkonumerot.fi/0400543/>

Autodata Workshop. Autodata-ohjelmisto. Luettu 19.12.2016. Vaatii kirjautumisen. <http://www.autodata.fi/workshop/>

Ball, F. & Stone, R. 2004. Automotive Engineering Fundamentals. Warrendale. SAE International.

Battery Management/Monitoring Systems. Ev Source. Luettu 21.1.2017. [http://www.evsource.com/tls\\_bms.php](http://www.evsource.com/tls_bms.php)

Battery Chargers. Ev Source. Luettu 21.1.2017. [http://www.evsource.com/tls\\_charging.php](http://www.evsource.com/tls_charging.php)

BU-206: Lithium-polymer: Substance or Hype? 2010. Batteryuniversity. Luettu 17.1.2017. [http://batteryuniversity.com/learn/article/the\\_li\\_polymer\\_battery\\_substance\\_or\\_hype](http://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype)

Citroën Berlingo 1.9D. Carspector. Luettu 22.12.2016. <http://carspector.com/car/citroen/026634/>

Citroen Berlingo määräaikaishuolto hinta. Autohuoltaja.fi. Luettu 19.1.2017. <https://www.autohuoltaja.fi/hinnat/huolto/maaraaikaishuolto/citroen/berlingo/25/569/1>

Curtis 1238-1239 Chill Plate Liquid Cooling Kit. 2012. EV West. Luettu 18.1.2017. [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?cPath=25&products\\_id=104](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=25&products_id=104)

Curtis 1238-7601 HPEVS AC-20 Brushless AC Motor Kit. 2014. EV West. Luettu 15.1.2017. [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=282](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=282)

Curtis 1238-7601 HPEVS AC-50 Brushless AC Motor Kit. 2011. EV West.

Luettu 15.1.2017. [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=83](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=83)

Curtis 1239-8501 HPEVS AC-76 Brushless AC Motor Kit. 2013. EV West.

Luettu 15.1.2017. [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=176](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=176)

Curtis 1239e-8521 HPEVS AC-35 Brushless AC Motor Kit. 2014. EV West.

Luettu 15.1.2017. [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=261](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=261)

Curtis 1239e-8521 HPEVS AC-51 Brushless AC Motor Kit. 2013. EV West.

Luettu 15.1.2017. [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=172](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=172)

Davies Craig sähköiset vesipumput. Race.fi. Luettu 18.1.2017.

<http://www.race.fi/fi/product/45246a/davies-craig-ewaterpumps>

Dietche, K-H. & Reif, K. 2014. Automotive Handbook. 9. painos. Karlsruhe. Robert Bosch GmbH.

DV6C Euro 5 diesel engine. Peugeot Citroen moteurs. Luettu 23.1.2017.

[http://www.peugeot-citroen-moteurs.fr/cache/docs\\_public/6666cd76f96956469e7be39d750cc7d9/6\\_fr-fr\\_fiche\\_publique.pdf](http://www.peugeot-citroen-moteurs.fr/cache/docs_public/6666cd76f96956469e7be39d750cc7d9/6_fr-fr_fiche_publique.pdf)

Ehsani, M., Gao, Y. & Emadi A. 2010. Modern Electric, Hybrid electric and fuel cell vehicles. CRC Press.

Electric Power Steering Pump Kit. EV Source. 21.1.2017.

[http://www.evsource.com/tls\\_steering.php](http://www.evsource.com/tls_steering.php)

Evnetics Billet Aluminum Throttle Potentiometer. 2013. EV West. Luettu 18.1.2017.

[http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?cPath=25&products\\_id=180&osCsid=4jp7qjefqli5ghaakkhcfpb4](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=25&products_id=180&osCsid=4jp7qjefqli5ghaakkhcfpb4)

EV Vacuum pumps. Metric Mind Corporation. Luettu 11.1.2017. <http://www.metric-mind.com/category/ev-vacuum-pumps/>



EV Tech. Tuotekuva. Viitattu 11.1.2017. <http://evtech.us/product/bldc-motor-for-electrical-vehicle-drive-system/>

Hall Effect Throttle Box. 2011. EV West. Luettu 18.1.2017. [http://www.evwest.com/catalog/product\\_info.php?cPath=25&products\\_id=94&osCsid=4jp7qjegfli5ghaak-khcifpb4](http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=25&products_id=94&osCsid=4jp7qjegfli5ghaak-khcifpb4)

Hietalahti L. 2011. Sähkökäyttö- ja hybriditekniikka ajoneuvo- ja työkonekäyttöön. Tampere. Amk-Kustannus OY Tammertekniikka.

Hietalahti L. 2016. Sähköautot ja sähköinen voimansiirto. Opintojaksomateriaali. Syksy 2016. Tampere: Tampereen Ammattikorkeakoulu.

How to charge Lithium Iron Phosphate Rechargeable Lithium Ion Batteries. 12.12.2016. PowerStream. Luettu 17.1.2017. <http://www.powerstream.com/LLLF.htm>

HSM1-Hybrid Synchronous Motor. BRUSA. Luettu 14.1.2017. [http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA\\_DB\\_EN\\_HSM1.pdf](http://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA_DB_EN_HSM1.pdf)

Husain, I. 2003. Electric and hybrid vehicles design fundamentals. CRC Press.

Kiri, J. 2016. Tekninen asiantuntija. Auto-Bon Oy. Sähköpostiviesti välityssuhteista. 13.1.2017. Luettu 31.1.2017

Koskimies, M. 27.1.2017. Amotec Oy. Sähköpostiviesti moottoreiden saatavuudesta. Luettu 27.1.2017.

Laurikko, J. 2013. TransEco: Suomen talvi on sähköautolle kova pala. Motiva. Luettu 9.1.2017  
[http://www.motiva.fi/ajankohtaista/motivan\\_tiedotteet/2013/transecosuo-men\\_talvi\\_on\\_sahkoautolle\\_kova\\_pala.5876.news](http://www.motiva.fi/ajankohtaista/motivan_tiedotteet/2013/transecosuo-men_talvi_on_sahkoautolle_kova_pala.5876.news)

Leitman, S. & Brant, B. 2009. Build your own electric vehicle. 2. Painos. New York. McGraw-Hill.

Lithiumate Lite Overview. Elithion. Luettu 20.1.2017.

[http://elithion.com/lithiumate\\_lite\\_overview.php](http://elithion.com/lithiumate_lite_overview.php)

McFadyen, S. 2014. How D.C. to A.C. Inverters Work. Luettu 17.12.2016

<http://myelectrical.com/notes/entryid/250/how-d-c-to-a-c-inverters-work>

Mikä on IP-luokitus? Hammarin Sähkö Oy. Viitattu 14.1.2017.

<http://kauppa.hammarinsahko.fi/ip-luokitus>

Mäkelä, M., Soininen, S., Tuomola, S. & Öistämö, j. 2012. Tekniikan kaavasto. Hämeenlinna. Amk-Kustannus OY Tammertekniikka.

On-Road AC Motor Controller. 2016. Curtis. Tuote-esite: 1239e ohjainlaite.

Price List. 2017. Metric mind corporation. Luettu 13.1.2017.

<http://www.metricmind.com/price-list/>

Products: 1239e. Curtis. Luettu 21.1.2017.

<http://curtisinstruments.com/?fuseaction=Products.home#/motorcontrollers/64>

Regenerative braking efficiency. 2016. ProEV.com. Luettu 14.1.2017

<http://proev.com/LLPgs/LLei0005.htm>

Rekisteriote. Trafi. Pakettiauto Citroen Berlingo 1.6 rekisteriote.

SE200. 2011. CALB. Luettu 17.1.2017. <http://en.calb.cn/product/show/?id-648>

Solberg, G. 2007. The Magic of Tesla Roadster Regenerative Braking. Tesla. Luettu 14.1.2017. [https://www.tesla.com/fi\\_FI/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking](https://www.tesla.com/fi_FI/blog/magic-tesla-roadster-regenerative-braking)

Surakka, M., Pietola M. 1992. Hydrauliiikan käyttö autotekniikassa. Espoo. Teknillinen korkeakoulu.

Sähköautot. 6.10.2016. Motiva. Luettu 3.12.2016.

[http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse\\_auto\\_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot](http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot)

Sähköautojen piensarjatyypin hyväksyntä. 2014. Sähköautot -Nyt! Luettu 11.1.2017.

<http://www.sahkoautot.fi/wiki:saehkoeautojen-piensarjatyypinhyvaeksyntae>

Sähköautojen sähköturvallisuus. 2014. Sähköautot -Nyt! Luettu 12.1.2017.

<http://www.sahkoautot.fi/wiki:saehkoeautojen-saehkoeturvallisuus>

Sähköautomuunnoksen viranomaisvaatimukset. 2013. Sähköautot -Nyt! Luettu 11.1.2017.

<http://www.sahkoautot.fi/wiki:saehkoeautokonversion-viranomaisvaatimukset>

Sähkökäytön mitoitus. Tekninen opas nro 7. Helsinki. ABB.

Täysin sähkötoiminen perheauto LEAF. Nissan. Luettu 23.1.2017.

<https://www.nissan.fi/ajoneuvot/henkiloautot/leaf.html>

Täyssähköauto. 6.10.2016. Motiva. Luettu 2.12.2016.

[http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse\\_auto\\_viisaasti/autotyyppi/tays-sahkoauto](http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/autotyyppi/tays-sahkoauto)

Vaihtoehtoiset polttoaineet ja ajoneuvot. 2006. Motiva. Luettu 9.1.2017.

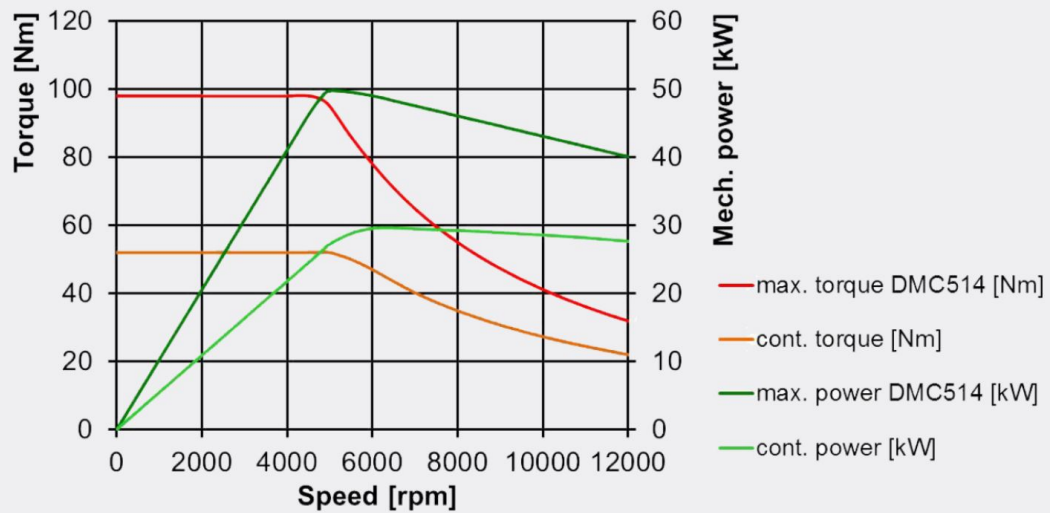
[http://www.motiva.fi/files/2131/Vaihtoehtoiset\\_polttoaineet\\_ja\\_ajoneuvot.pdf](http://www.motiva.fi/files/2131/Vaihtoehtoiset_polttoaineet_ja_ajoneuvot.pdf)

Vuorivirta, A. 2014. Uudet sähkömoottoritekniikat energiasäästöjen tuojana. ABB. Esitys: SSTY Sairaalatekniikan päivät 12.2.2014.

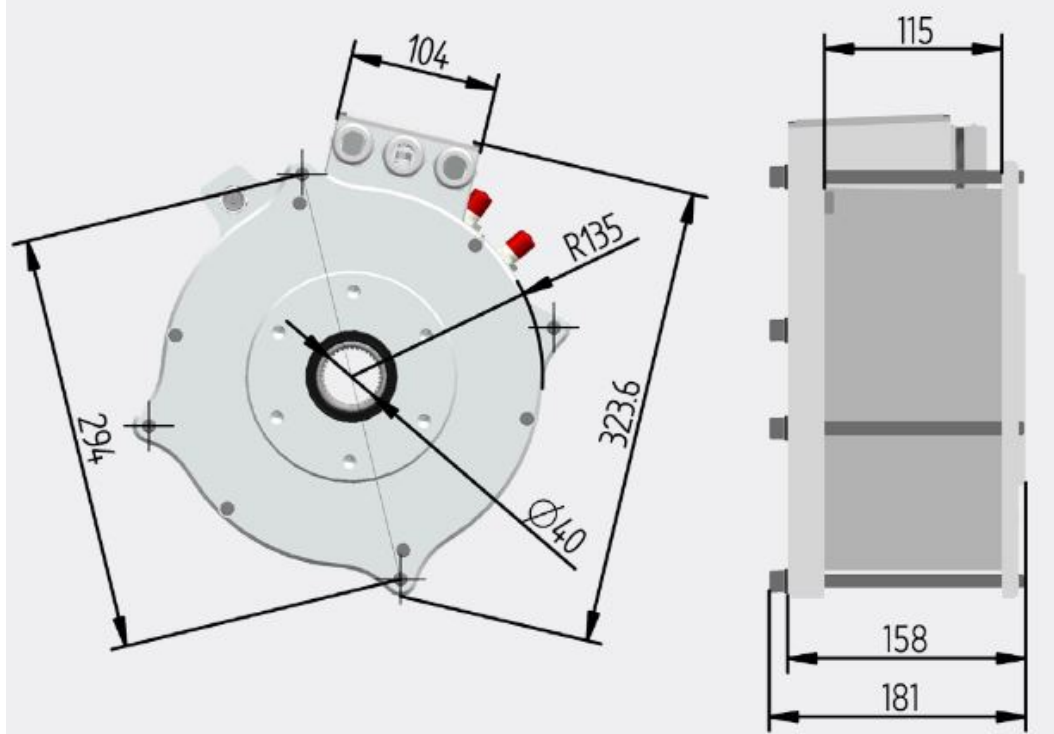
## LIITTEET

Liite 1. BRUSA HSM1-10.18 suoritearvot ja mitat. (HSM1 – Hybrid Synchronous Motor)

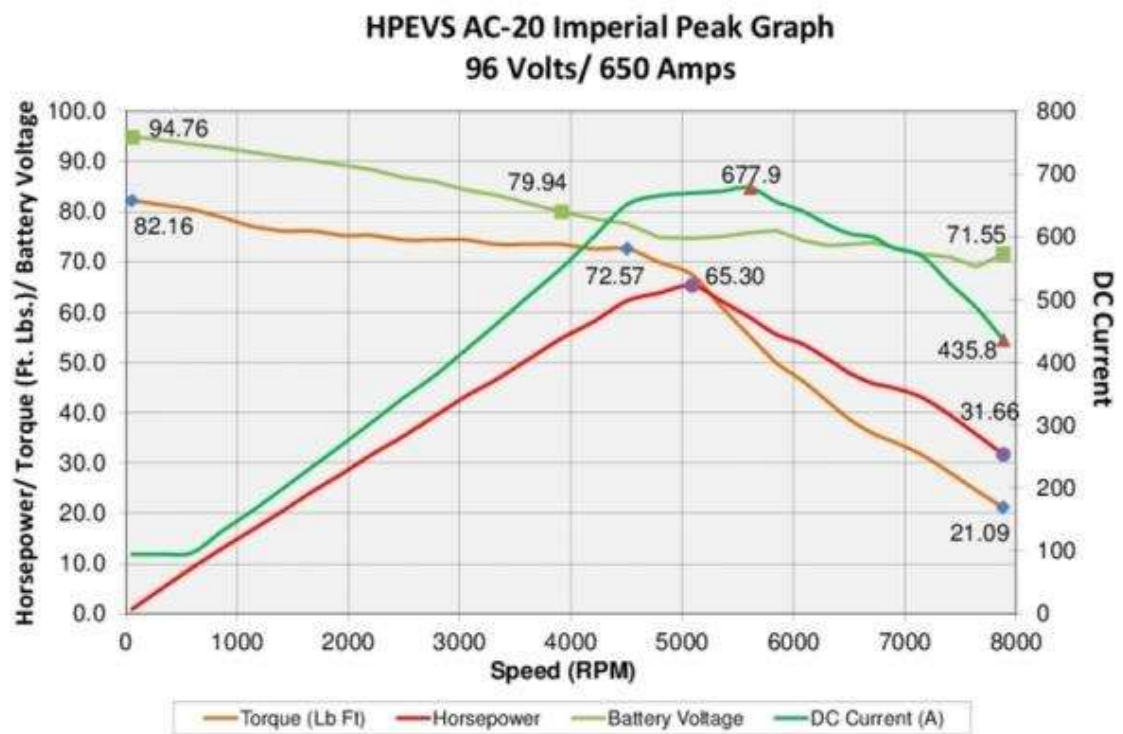
### Power / Torque Depending on Speed



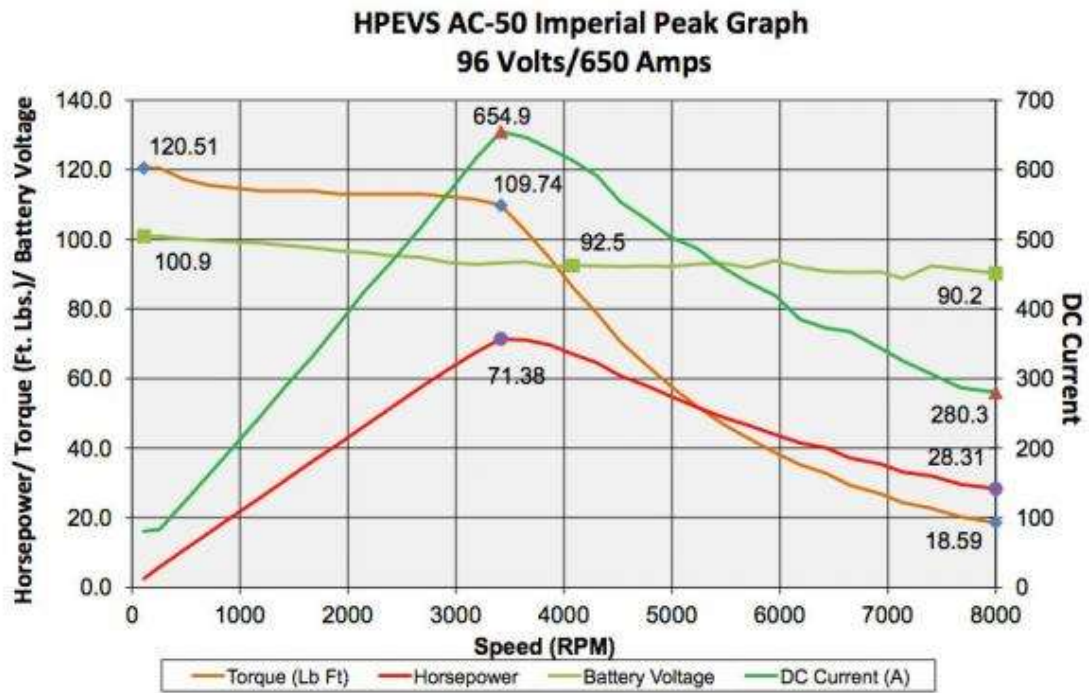
### Dimensions



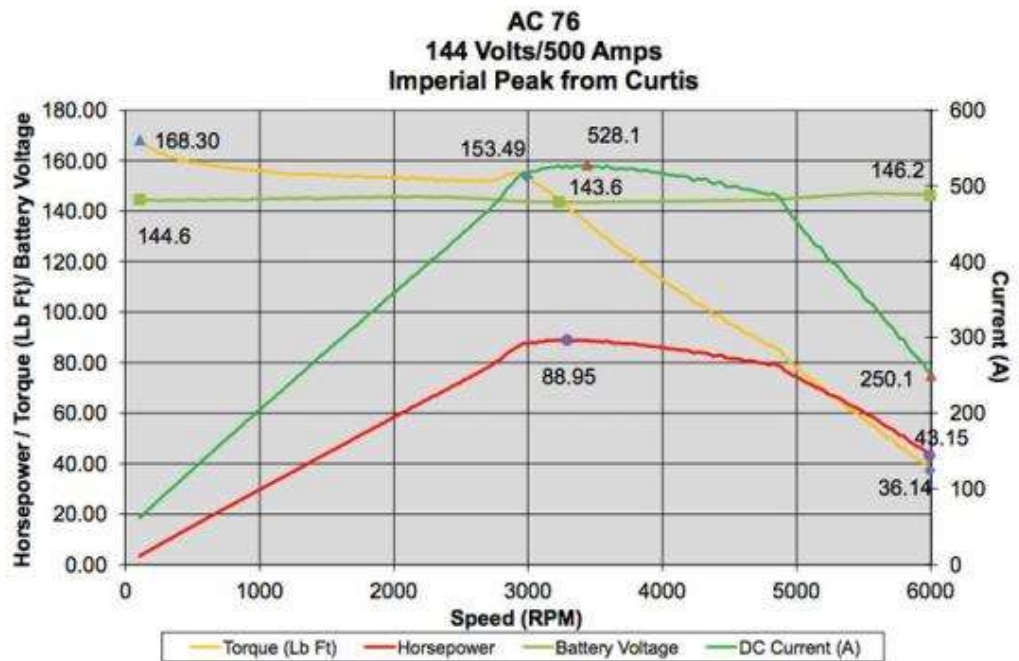
Liite 2. HPEVS AC-20 suoritearvot. (Curtis 1238-7601 HPEVS AC-20 Brushless AC Motor Kit 2014)



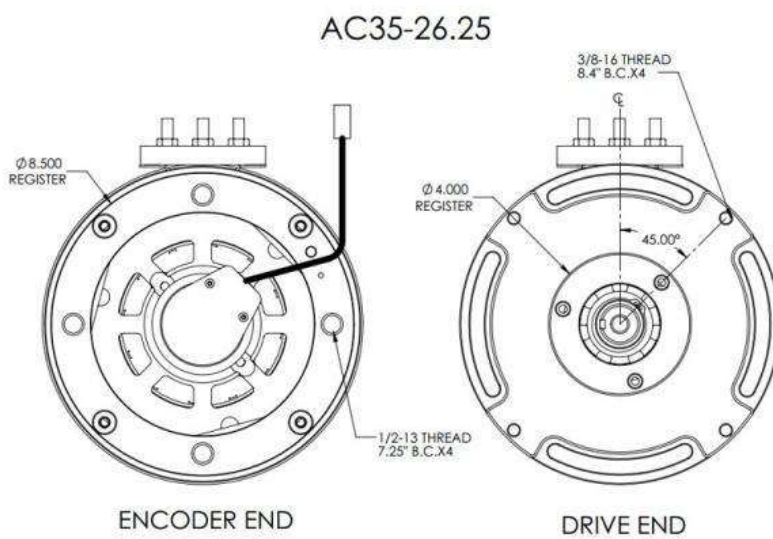
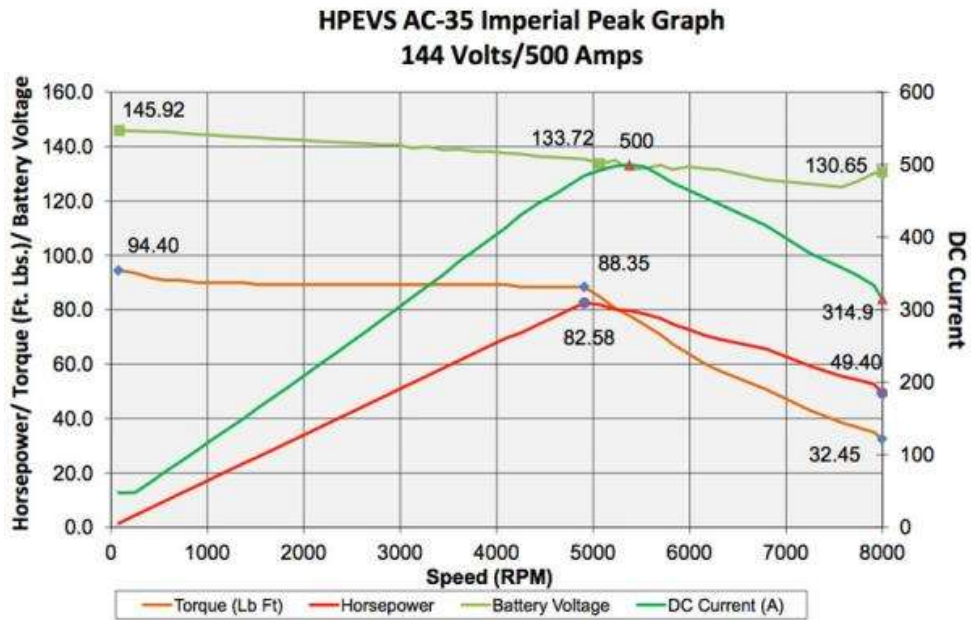
Liite 3. HPEVS AC-50 suoritearvot. (Curtis 1238-7601 HPEVS AC-50 Brushless AC Motor Kit 2011)



Liite 4. HPEVS AC-76 suoritearvot. (Curtis 1239-8501 HPEVS AC-76 Brushless AC Motor Kit 2013)

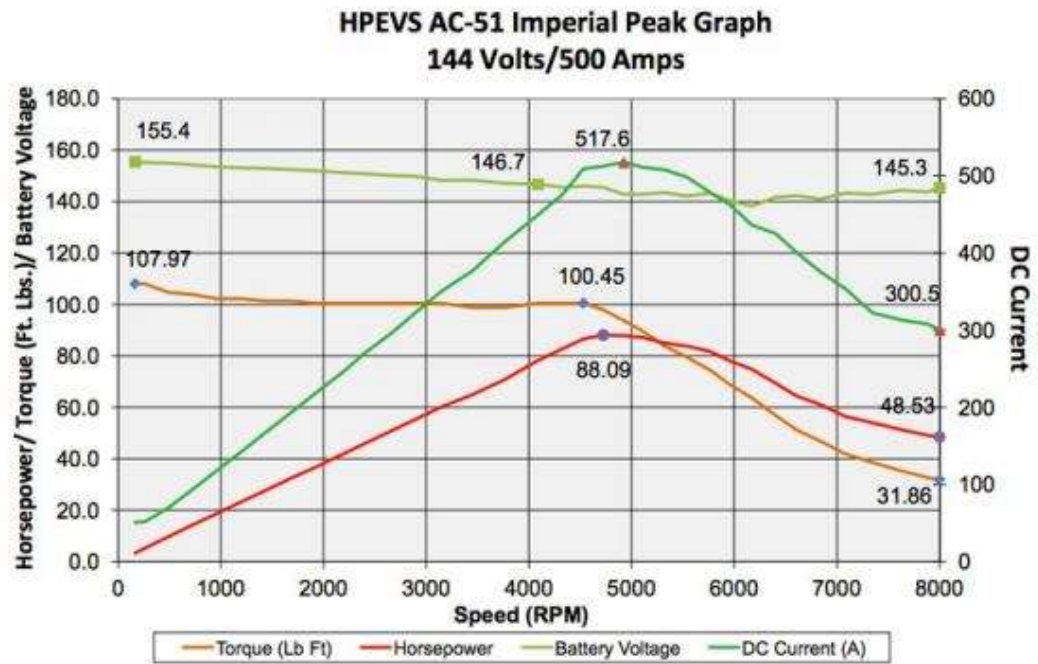


Liite 5. HPEVS AC-35 suoritearvot ja mitat. (Curtis 1239e-8521 HPEVS AC-35 Brushless AC Motor Kit 2014)

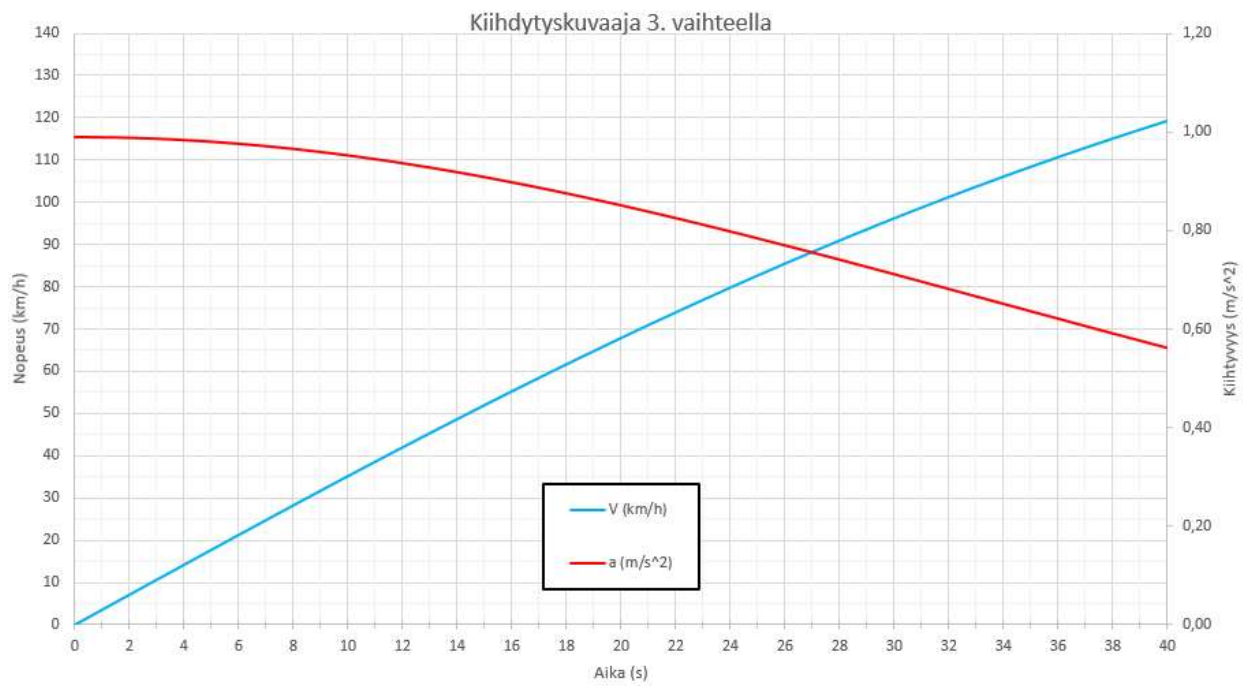
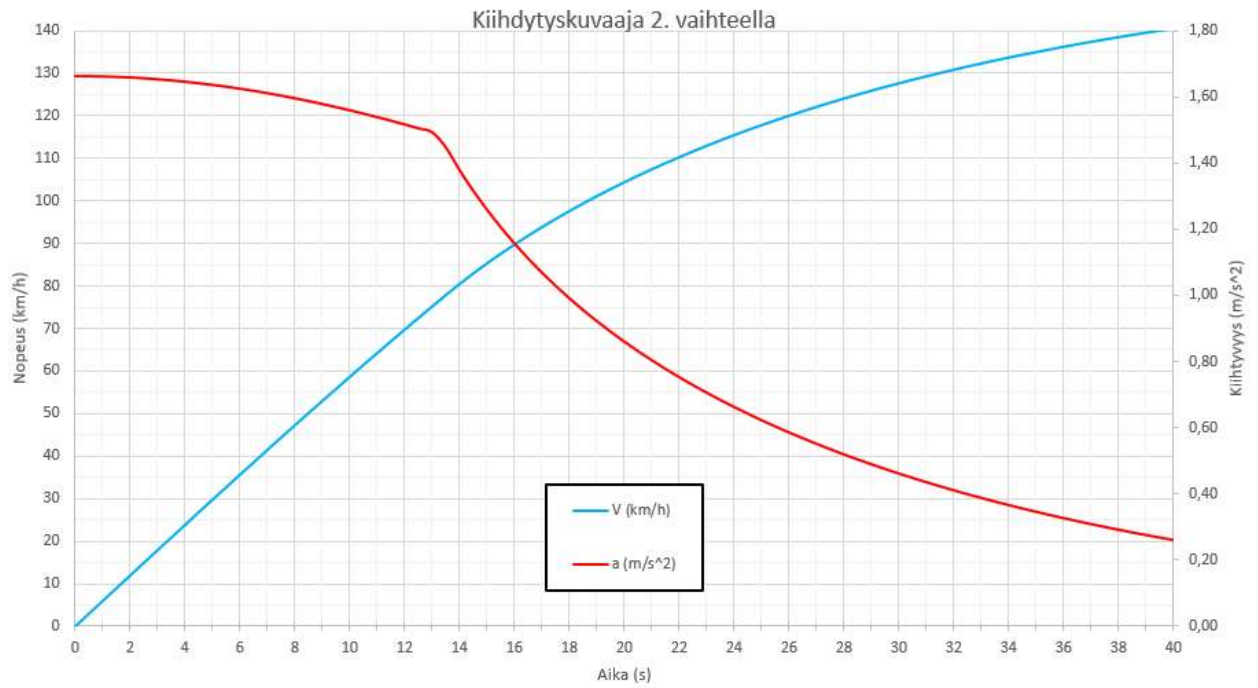




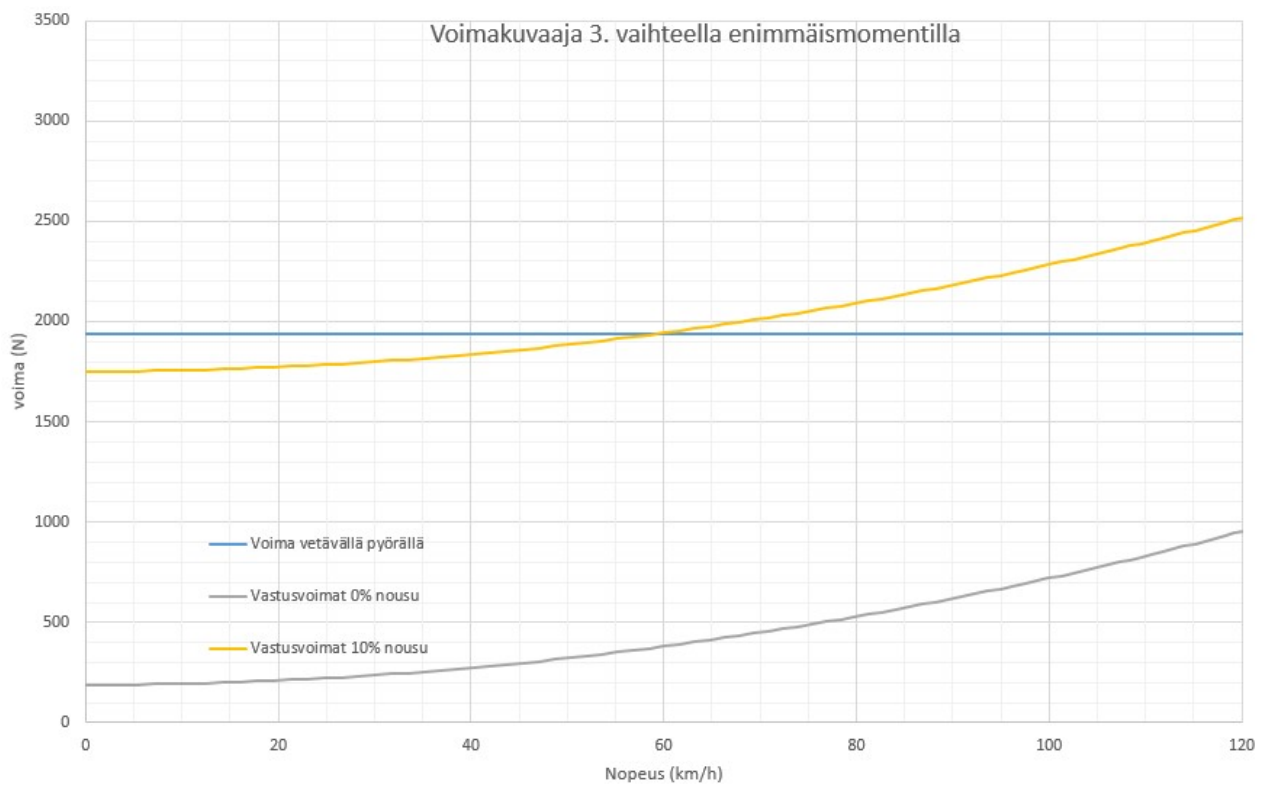
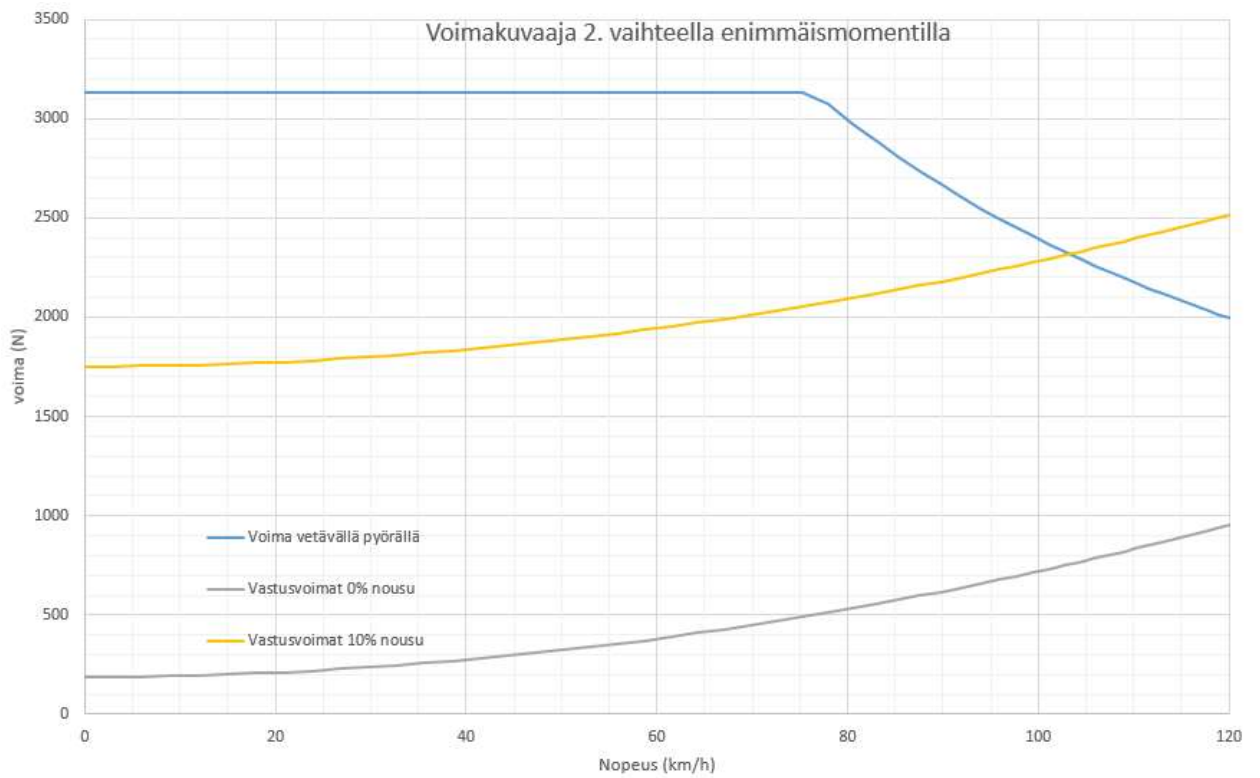
Liite 6. HPEVS AC-51 suoritearvot. (Curtis 1239e-8521 HPEVS AC-51 Brushless AC Motor Kit 2013)



## Liite 7. Kiihtyvuuskuvaajat AC-35 moottorilla



## Liite 8. Voimakuvaajat maksimimomentilla AC-35 moottorilla



## Liite 9. Voimakuvaajat nimellismomentilla AC-35 moottorilla

