

Tapio Pihl

Formula Student Electric–auton moottorin valinta

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri AMK
Automaatiotekniikka
Insinööriyö
10.10.2011

Tekijä Otsikko	Tapio Pihl Formula Student Electric –auton moottorin valinta
Sivumäärä Aika	76 sivua + 7 liitettä 23.11.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaaja	Lehtori Kai Virta
<p>Metropolia Ammattikorkeakoulun Metropolia Motorsport –formulatiimi on toiminut yli 10 vuoden ajan. Tiimin toiminnan tarkoitus on antaa insinööriopiskelijoille hyvät lähtökohdat työelämään. Nyt tiimi on siirtymässä kilpailemaan polttomoottoriautojen sarjasta sähkökäyttöisten Formula Student -autojen sarjaan. Tässä tutkielmassa esitellään erilaisia autokäyttöön sopivia sähkömoottorityyppejä, niiden toimintaa ja säätöperiaatteita sekä käydään hieman läpi Metropolia Motorsportin ensimmäisen sähkökäyttöisen kilpa-auton moottorin valintaprosessia.</p> <p>Yleisesti automaailmassa sähköautotekniikka tekee voimakkaasti tuloaan johtuen lisääntyneestä halusta suojella ympäristöä. Viimeaikainen akkutekniikan kehitys on auttanut sähköautojen tuloa markkinoille. Kehitystä on tapahtunut myös moottoripuolella. Aiempina vuosina sähköautoissa käytetyistä, huonomman hyötysuhteen omaavista harjallisista DC-moottoreista ollaan siirtymässä kestopagneeteilla varustettuihin tahtimoottoreihin, joiden hyötysuhteet ja teho-paino-suhteet ovat parempia. Tällä hetkellä parhaat markkinoilla olevat tahtimoottorit ovat erittäin kevyitä ja tuottavat suuren vääntömomentin.</p> <p>Tahtimoottoreiden vääntömomentin säädössä käytetään teollisuudessa yleisessä käytössä olevien taajuusmuuttajien tekniikkaa. Ajoneuvokäytössä on luontevampaa puhua invertteristä eli vaihtosuuntaajasta, sillä nimitys kuvaa hyvin laitteen tehtävää, joka on muuntaa akusta saatava tasajännite moottorille sopivaksi vaihtojännitteeksi.</p>	
Avainsanat	tahtimoottori, vääntömomentti, säätö, vaihtosuuntaaja

Author(s) Title Number of Pages Date	Tapio Pihl Selecting a motor for the Formula Student Electric car 76 pages + 7 appendices 23 September 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Technology
Specialisation option	
Instructor	Kai Virta, Senior Lecturer
<p>Metropolia Motorsport formula engineering team has existed for over ten years. The primary purpose of the team is to provide students with great skills already during their time as engineering students. Until now, the team has participated in annual competitions with their combustion engine powered cars. Now the team is about to shift from combustion engine powered car to an electric car. In this thesis, some types of electric motors and their operation principles as well as the principles of torque vectoring of a permanent magnet synchronous motor are presented. In addition, the evaluation and selection process of the first electric motor to be implemented in a formula student car designed and constructed by Metropolia motorsport is documented.</p> <p>In general, automotive industry is currently launching the electric car technology to the market due to the growing concern about the environment. Especially recent progress achieved in battery development has boosted the advent of the electric car. Also the progress in electric motor field has contributed in the advent. The industry is shifting from the low-efficiency brushed DC-motors to more efficient and lighter AC-powered synchronous motors. The best automotive electric motor applications in the market today have an excellent efficiency and they produce a lot of torque.</p> <p>The technology used to convert direct current drawn from the battery to alternating current suitable to the synchronous motor is almost similar to that used in frequency converters, which are commonplace elsewhere in the industrial sector. The converting device is, however, called inverter.</p>	
Keywords	synchronous motor, torque, control, inverter

Sisällys

1	Johdanto	8
2	Formula student	9
2.1	Tausta	9
2.2	Tavoitteet	11
3	Moottorityypit	11
3.1	Oikosulku- eli induktiomoottori	11
3.1.1	Oikosulkumoottorin rakenne ja toimintaperiaate	11
3.1.2	Oikosulkumoottorin toiminnan perusteet	12
3.1.3	Oikosulkumoottorin vääntömomentti, vakiovualue ja kentänheikennys	14
3.1.4	Oikosulkumoottorin hyötysuhde ja loistehon kompensointi	17
3.1.5	Oikosulkumoottori käynnistettäessä	20
3.2	Tahtimoottori ja harjaton tasavirtamoottori	21
3.2.1	Tahtimoottorin rakenne	21
3.2.2	Tahtimoottorin toimintaperiaate	24
3.2.3	Tahtimoottorin toiminnan perusteet	26
3.2.4	Tahtimoottorin hyötysuhde ja kentänheikennys	30
3.3	Sähkömoottoreiden toiminnan rajoitukset	32
3.4	Tahtimoottorin anturit	33
3.4.1	Enkooderit	34
3.4.2	Hall-anturi	36
3.4.3	Resolverit	37
3.5	Tahtimoottorin ja oikosulkumoottorin ohjaus	39
3.5.1	Yleistä	39
3.5.2	Vektorisäätö	39
3.5.3	Tehoasteen toimintaperiaate	43
3.5.4	Tehoasteen rakenne	46
3.5.5	Komponentit	51
3.6	AC-moottoreiden häviöt	53
3.6.1	Resistiiviset häviöt ja pyörrevirtahäviöt	53
3.6.2	Suurista taajuuksista johtuvat häviöt ja hystereesihäviöt	54
4	Moottorin valinta	57

4.1	Eri moottorityyppien sopivuus sovellukseen	57
4.1.1	Moottorin yleiset vaatimukset	57
4.1.2	Oikosulkumoottorin, tahtimoottorin ja DC-moottorin vertailu	58
4.2	Markkinoilla olevien moottorien vertailu	61
4.2.1	Markkinoilla olevat vaihtoehdot	61
4.2.2	Suorituskyky- ja hyötysuhdevertailu	62
4.2.3	Vaihtosuuntaajien vertailu	65
4.2.4	Lopulliset vaihtoehdot	66
4.3	Vaihtoehtojen vertailu suorituskykytarkastelun avulla	68
4.3.1	Ajoneuvon massan arviointi	68
4.3.2	Lähtöarvot	69
4.3.3	Vastusvoimat	71
4.3.4	Vastusvoimien laskeminen	75
4.3.5	Kiihtyvyys kiihdytysvoiman perusteella	80
4.3.6	Kiihtyvyys kitkan perusteella	81
4.3.7	Päätelmät	84

Liitteet

Liite 1. Painon arviointi 1

Liite 2. Painon arviointi 2

Liite 3. Kokonaisjovastukset ajonopeuden ja nousukulman funktiona, vaihtoehto 1

Liite 4. Kokonaisjovastukset ajonopeuden ja nousukulman funktiona, vaihtoehto 2

Liite 5. Moottorin pyörimisnopeus, vääntömomentti pyörillä, käyttövoima, kiihdytysvoima sekä kiihtyvyys ajonopeuden funktiona, vaihtoehto 1.

Liite 6. Moottorin pyörimisnopeus, vääntömomentti pyörillä, käyttövoima, kiihdytysvoima sekä kiihtyvyys ajonopeuden funktiona, vaihtoehto 2.

Liite 7. Standardin IEC 60034-1 mukaiset käyttöluokat.

Lyhenteet ja määritelmät

A	pinta-ala
AC	<i>Alternating Current</i> . Vaihtovirta
A/D	<i>Analog to Digital</i> . Analogi-digitaalimuunnos
B	magneettivuon tiheys
BCD	<i>Binary Coded Decimal</i> . Binäärimuotoon koodattu kymmenjärjestelmän luku
BEMF	<i>Back Electro Magnetic Force</i> . Vastasähkömotorinen voima
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i> . Bipolaaritransistori
C	kapasitanssi
CAN	<i>Controller Area Network</i> . Ajoneuvoissa käytetty tiedonsiirtoväylä
CEMF	<i>Counter Electro Magnetic Force</i> . Vastasähkömotorinen voima
c_K	Fourier-kerroin
$\cos(\varphi)$	tehokerroin
$\cos(\varphi_N)$	nimellistehokerroin
C_w	kappaleen muodosta riippuva ilmanvastuskerroin
D	<i>Duty Cycle</i> . Pulssinleveysmodulaation pulssisuhde
DC	<i>Direct Current</i> . Tasavirta
e	indusoitunut jännite
EMF	<i>Electro Magnetic Force</i> . Syöttöjännite
f	taajuus
F_a	ajoneuvon kiihdyttämiseen tarvittava voima
F_i	ilmanvastusvoima
F_k	käyttövoima pyörillä
F_n	nousuvastusvoima
f_N	nimellisvierintävastuskerroin
f_{PWM}	PWM:n kytkentätaajuus
F_R	vierintävastusvoima
f_R	vierintävastuskerroin
f_{RES}	resonanssitaajuus
FSC	<i>Formula Student Combustion</i> . Opiskelijoista koostuvien tiimien välinen formulakilpailu, jossa kilpaillaan polttomoottorikäyttöisillä kilpa-autoilla
FSE	<i>Formula Student Electric</i> . Opiskelijoista koostuvien tiimien välinen

	formulakilpailu, jossa kilpaillaan sähkökäyttöisillä kilpa-autoilla
G	kanavatransistorin hila
g	putoamiskiihtyvyys
G_a	auton paino
G_e	staattinen paino etuakselilla
G_t	staattinen paino taka-akselilla
GTO	<i>Gate Turn Off</i> . Tyristori, joka voidaan sytyttää ja sammuttaa
H	magneettikentän voimakkuus
h	painopisteen korkeus
H_A	koersiivivoima
I	sähkövirran tehollisarvo
i	sähkövirran hetkellisarvo
\hat{i}	sähkövirran huippuarvo
I_D	sähkövirta kolmiokytkennässä
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> . Eristehilatransistori
IM	<i>Induction Motor</i> . Induktio- eli oikosulkumoottori
I_N	nimellissähkövirta
i_v	voimansiirron välityssuhde
I_Y	sähkövirta tähtikytkennässä
I_ϕ	vaihevirta
j	imaginaariyksikkö
JFET	<i>Junction Field Effect Transistor</i> . Liitoskanavatransistori
J_m	moottorin nopeudella pyörivien osien yhteenlaskettu hitausmomentti
J_p	pyörien nopeudella pyörivien osien yhteenlaskettu hitausmomentti
k	kappalekohtainen pyörrevirtavakio
K_E	jännitevakio
K_H	materiaalikohtainen Hall-vakio
K_T	vääntövakio
L	induktanssi
l	johtimen pituus
l_a	akseliväli
l_R	roottorin pituus
L_σ	staattorin hajainduktanssi
m	massa

MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> . Eräs kanavatransistori-tyyppi
m_{red}	reduoitu massa
N	käämin johdinkierrosten lukumäärä
n	nimellispyörimisnopeus
n_{MAX}	maksimipyörimisnopeus
NPN	bipolaaritransistori, joka on tehty kerrostamalla ensin N–tyypin puolijohdetta, sitten P–tyypin puolijohdetta ja vielä N–tyypin puolijohdetta
n_s	tahtinopeus
P	pätöteho
p	napaparien lukumäärä
P_{MAX}	maksimiteho
P_{mek}	mekaaninen teho
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> . Tahtimoottori, jonka roottorissa on kestopagneetit
P_N	nimellisteho
PNP	bipolaaritransistori, joka on tehty kerrostamalla ensin P–tyypin puolijohdetta, sitten N–tyypin puolijohdetta ja vielä P–tyypin puolijohdetta
P_p	pyörrevirtahäviö
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> . Pulssinleveysmodulaatio
P_1	ottoteho
Q_{IND}	induktiivinen loisteho
Q_{KAP}	kapasitiivinen loisteho
q_v	tilavuusvirta
R	resistanssi
r	säde
R_d	dynaaminen vierintäsäde
R_{MOD}	päästötilan resistanssi
R_R	transistorin resistanssi
S	roottorin pyörimisnopeus
s	jättämä
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> . Auto- ja kuljetusalan insinöörien kansainvälinen liitto
S_e	painopisteen ja etuakselin välinen etäisyys vaakasuunnassa

S_N	näennäisteho
T	vääntömomentti
t	aika
T_j	jaksonaika
T_N	nimellistä vääntömomentti
T_{MD}	vääntömomentti kolmiokytkennässä
T_{MY}	vääntömomentti tähtikytkennässä
T_1	PWM:n pulssin kesto
T_{MAX}	maksimivääntömomentti
U	jännitteen tehollisarvo
u	jännitteen hetkellisarvo
\hat{u}	jännitteen huippuarvo
U_{DC}	ns. DC-linkin jännite
U_{fun}	toimintajännitealue
U_N	nimellisjännite
U_{TH}	kynnysjännite
U_{ka}	jännitteen keskiarvo
U_ϕ	vaihejännite
V	tilavuus
v	nopeus
v_{max}	huippunopeus
X_C	kapasitiivinen reaktanssi
X_L	induktiivinen reaktanssi
Z	impedanssi
α	staattorin käämin magneettikentän ja roottorin magneettikentän välinen vaihe-ero, tehokulma
α_{nousu}	nousukulma
α_R	resistiivisyyden lämpötilakerroin
ε	Heavisiden askelfunktio
η	hyötysuhde
η_V	voimansiirron hyötysuhde
ΔG_a	dynaaminen painonsiirto
ΔT	lämpötilan muutos
θ	roottorin kulma

Θ_r	resolverin roottorin kulma
μ	permeabiliteetti
μ_k	ainekohtainen permeabiliteetti
μ_R	suhteellinen permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
μ_T	renkaan ja tien välinen kitkakerroin
ρ	ainekohtainen ominaisresistiivisyys
ρ_i	ilman tiheys
Φ	magneettivuo
Φ_S	staattorivuo
Φ_m	roottorivuo
φ	vaihe, vaihekulma
ψ	hitausvaikutuskerroin
ω	kulmanopeus

1 Johdanto

Metropolia motorsport–formulatiimi on toiminut vuodesta 2000 lähtien aluksi silloisessa Stadia-ammattikorkeakoulussa Stadia Motorsport –nimellä. Pääasiassa autotekniikan AMK–insinööriopiskelijoista koostuva tiimi on vuosittain suunnitellut ja rakentanut formulatyypin kilpa-auton Formula student- ja Formula SAE (Society of Automotive Engineers) –kilpailuliigojen kilpailuja varten. Kyse näissä liigoissa on siitä, että insinööriopiskelijoista koostuvat tiimit eri puolilla maailmaa suunnittelevat ja rakentavat itse formulatyypin kilpa-auton sekä kilpailevat niillä toisiaan vastaan kesäisin eri maissa järjestettävissä osakilpailuissa.

Vuonna 2010 alkoivat kilpailut ensimmäistä kertaa uudenaikaisessa formula student –sarjassa: Saksan Hockenheimissa järjestettiin ensimmäinen FSE (Formula Student Electric) –osakilpailu, jossa ajettiin vain sähkömoottorikäyttöisillä kilpa-autoilla. Metropolia motorsport –formulatiimin on tarkoitus osallistua FSE–sarjan kilpailuihin kaudella 2012. Tähän asti Metropolia motorsport on kilpaillut vain FSC (Formula Student Combustion) –sarjassa, joka on polttomoottorikäyttöisten Formula Student –kilpa-autojen sarja.

Moottoria pidetään usein ajoneuvon ”sydämenä”, sillä monet ajoneuvon ominaisuudet riippuvat moottorin ominaisuuksista. Näin on varmasti asianlaita sähköautojenkin kohdalla. Tämän työn tarkoituksena on toimia dokumenttina ensimmäisen Metropolia motorsport –tiimin rakentaman sähköformula-auton ajomoottorin valintaprosessista. Valintaprosessiin aikana selvitettiin ensin, minkä tyyppinen moottori sopisi ominaisuuksiensa osalta parhaiten sähköformula-auton moottoriksi. Toiseksi kartoitettiin moottorilta tarvittavat suoritusarvot, jotta etsintä osattaisiin kohdistaa oikein. Erilaisia sähkömoottoreita löytyy markkinoilta sekä Suomesta että ulkomailta useita, joten oikea kohdennus oli tärkeää. Myös kilpailuliigan sääntöjen asettamat reunaehdot moottorin suoritusarvoissa ja ominaisuuksissa piti ottaa huomioon valinnassa.

Koko prosessin aikana oli tärkeää, että kaikki kerätyt tiedot dokumentoitiin siten, että tiedot olivat havainnollisessa muodossa ja että eri moottorivaihtoehtojen ominaisuuksia pystyttiin vertailemaan. Kaikista vaihtoehtoista, joita etsinnän aikana löydettiin, otettiin 21 vaihtoehtoa lähempään tarkasteluun. Tarkastelussa vertailtiin moottoreiden teknisiä ominaisuuksia ja kiinnitettiin huomiota myös hinta- ja saatavuusasioihin. Alun alkaen

pyrittiin siihen, että kaudella 2012 käytettävässä autossa olisi kaksi moottoria vetävillä pyörillä parempien ajo-ominaisuuksien takia. Etsintä ja vertailu tehtiin siis myös tätä silmällä pitäen.

Lopulta eri moottorivaihtoehtoista valikoitui kaksi varteenotettavinta vaihtoehtoa. Näistä vaihtoehtoista toinen oli pienempitehoinen, mutta edullinen ja sopivampi kahden moottorin konfiguraatioon. Toinen vaihtoehto oli suoritusarvoiltaan parempi ja teknisiltä ratkaisuiltaan edistyksellinen ja edusti monessa mielessä tämänhetkisen kehityksen parhaimmistoa, mutta oli hankintahinnaltaan suhteessa kalliimpi ja sopiva vain yhden moottorin konfiguraatioon. Näitä vaihtoehtoja vertailtiin vielä suorituskykytarkastelun avulla eli yritettiin ennustaa, kuinka moottorivaihtoehtojen ominaisuudet vaikuttaisivat tulevan auton suorituskykyyn.

2 Formula student

2.1 Tausta

Opiskelijoiden formula-autoliiga perustettiin Yhdysvalloissa Formula SAE –nimisenä 1981. Perustamisen taustalla oli suurten autonvalmistajien Fordin, General Motorsin ja Chryslerin pyrkimys löytää kilpailujen kautta opiskelijoiden joukosta kaikin puolin lupaavimmat tulevat autoinsinöörit ja rekrytoida heidät. Tietysti myös opiskelijat hyötyvät tästä, sillä tiimeissä ja kilpailuissa mukana oleminen kartuttaa opiskelijan kokemusta jo opiskeluaikana ja tutustuttaa tuleviin työnantajiin. Eurooppaan liiga tuli vuonna 1998 Formula Student–nimisenä.

Formula Student –osakilpailuja käydään useissa maissa kesäisin ja rekisteröityneitä tiimejä on maailmalla useita kymmeniä. Tiimejä on sekä yliopistoista että korkeakouluista. Osakilpailuissa on 7 osa-aluetta, joista kolme on niin sanottuja staattisia osioita ja neljä dynaamisia osioita. Staattisiin osioihin kuuluvat auton ja sen tekniikan sekä suunnittelun esitys ja arviointi sekä kustannustehokkuuden esitys ja arviointi. Kilpailuihin osallistuminen mittaa opiskelijoiden osaamista, ymmärrystä ja ryhmätyötaitoja. Dynaamisiin osioihin kuuluvat muun muassa kiihdytyskisa, vakioympyrä, autocross ja kestävyysajo. Lisäksi autot katsastetaan kilpailuissa, jotta järjestäjät voivat varmistua

sääntöjenmukaisuudesta. Kilpailujen säännöt vaihtelevat jonkin verran osakilpailuittain. Metropolia Ammattikorkeakoulun tiimi on menestynyt kilpailuissa melko hyvin. Toistaiseksi sähköformula-autojen kilpailuja on pidetty pelkästään Saksassa. Nämä kilpailut aloitettiin vuonna 2010. Taulukossa 1 on esimerkki erään osakilpailun pisteytyksestä.

Taulukko 1. Pisteytys formula student –osakilpailussa.

Staattiset osiot	
-presentaatio	75
-design event	150
-kustannusanalyysi	100
Dynaamiset osiot	
-kiihdytys (75 m)	75
-vakioympyräko	50
-autocross	150
-polttoaineenkulutus	50
-kestävyysajo (noin 22 km)	350
Yhteensä	1000

Metropolia motorsport formula engineering team toimi aluksi Stadia ammattikorkeakoulussa Stadia motorsport –nimisenä. Kyseessä on itsenäinen, opiskelijavetoinen yhdistys. Tarkoituksena on vuosittain suunnitella ja rakentaa formulatyypinen kilpa-auto formula student/SAE –liigan kilpailuja varten ja osallistua kilpailuihin. Tiimi rekrytoi itse uudet jäsenet opiskelijoiden joukosta ja hankkii rahoituksen itse yhteistyökumppaneilta. Useimmiten rekrytoitavat opiskelijat ovat toisen ja kolmannen vuoden opiskelijoita. Tiimin jäsenmäärä on kasvanut viime aikoina voimakkaasti sähköformula-autokonseptiin siirtymisen myötä.

2.2 Tavoitteet

Kilpailusäännöt asettavat puitteet sille, minkälaista moottoria tulevassa autossa voi käyttää. Säännöissä todetaan moottoreista, että niiden on oltava tietysti sähkömoottoreita, mutta ne voivat olla minkä tyyppisiä tahansa ja niitä voi olla kuinka monta tahansa. Moottorin tai moottoreiden suurin sallittu akusta ottama teho saa olla korkeintaan 100 kW. Korkeajänniteakun suurin sallittu jännite on 600 VDC, mikä vaikuttaa jonkin verran moottorin valintaan. (6, s. 7, 9.) Muuten sääntöihin ei mennä tässä työssä enempää, sillä ne on jo käyty läpi Jouni Ilmaniemen insinööriyössä "Formula Student Electric" (6).

Yleisesti pyrittiin siihen, että löydettäisiin moottori, jonka avulla voisi toteuttaa tulevaan autoon kahden moottorin konfiguraatioon. Yleinen linjaus oli, että kautta 2012 varten koko auton konseptia ei muuteta kovin paljon, koska muuten rajallinen suunnittelu-, rakennus- ja testausaika ei riitä. Siirtymistä polttomoottorista sähkömoottoriin pidetään sinänsä isona askeleena ja haasteena. Moottorin suorituskyvyn osalta pyrittiin löytämään moottorivaihtoehtoja, joiden suurin mekaaninen teho joko yhdellä tai kahdella moottorilla on mahdollisimman lähellä sääntöjen määräämää ylärajaa. Kilpailukäyttöä ajatellen oli ensiarvoisen tärkeää, että moottori on mahdollisimman kevyt, luotettava ja tuottaa riittävän vääntömomentin laajalla kierroslukualueella joko välitettynä tai suora-vetomoottorina. Lisäksi oli toivottavaa, että moottorin käyttöjännite on mahdollisimman alhainen, hankintahinta edullinen ja saatavuus hyvä. Moottorin vaatimuksia on käsitelty tarkemmin Moottorin valinta -osiossa.

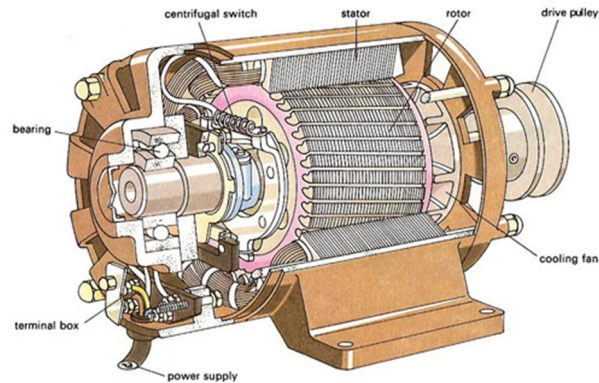
3 Moottorityypit

3.1 Oikosulku- eli induktiomoottori

3.1.1 Oikosulkumoottorin rakenne ja toimintaperiaate

Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa ja vähäisen huollontarpeensa johdosta yleisin eri kohteissa käytössä oleva moottorityyppi. Niitä on sekä yksi- että kolmivaiheisia. Oikosulkumoottorin pääosat ovat roottori ja staattori. Staattori on tavallisesti

valmistettu teräksestä valamalla. Staattorin sisäpinnan urissa sijaitsevat staattorin kupariset käämit. Roottorin rakenne muistuttaa oravanpyörää. Roottorin akselin ympärille on asetettu akselin suuntaisesti paksut sauvat, jotka on yhdistetty molemmista päistään metallilevyllä roottorin akseliin. Oikosulkumoottori on asynkroni- eli epätahtimoottori.



Kuva 1. Oikosulkumoottori.

Oikosulkumoottorin staattorin käämeihin syötetään sinimuotoisesti vaihteleva jännite, joka voi olla yksivaiheista tai tavallisimmin kolmivaiheista. Käämeissä kulkeva virta synnyttää käämien ympärille vaihtojännitteen taajuudella pyörivän magneettikentän. Käämien pyörivä magneettikenttä indusoi roottorin sauvoihin jännitteen jolloin sauvoissa kulkee vaihtovirta. Roottorin pyörivä liike johtuu siitä, että sekä staattorin käämeissä että roottorin häkkikäämityksessä syntyy magnetomotorinen voima. Pyörivän magneettikentän takia staattoriin ja roottoriin syntyvät magnetomotoriset voimat vaikuttavat toisiinsa vastakkaisesti, jolloin roottori pyörii. Voimien vastakkaisuus johtuu siitä, että pyörivä magneettikenttä indusoi toiseen johtimeen aina sellaisen virran, että sen aiheuttaman magneettikentän suunta on vastakkainen indusoituneen virran aiheuttaneelle magneettikentälle (Lenzin laki). Moottorin vääntömomentti johtuu tästä magnetomotoristen voimien interaktiosta, ja sitä syntyy vain, jos roottorin pyörimistaajuus on pienempi kuin staattorin tahtinopeus. (2, s. 276-279.)

3.1.2 Oikosulkumoottorin toiminnan perusteet

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Sähkömagneettisen induktion perusyhtälö on

$$e = B * l * v \quad (1)$$

e on indusoitunut jännite

l on johtimen pituus

v on johtimen ja magneettikentän kohtisuora leikkausnopeus

B on magneettivuon tiheys, joka on määritelty seuraavasti:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2)$$

Φ on magneettivuo

A on pinta-ala, jonka magneettivuo Φ lävistää

Virrallinen johdin aiheuttaa ympärilleen magneettikentän ja vaihteleva virta vaihtelevan magneettikentän. Esimerkiksi käämissä, jossa kulkee virta, magneettivuo on

$$\Phi = \frac{L * I}{N} \quad (3)$$

L on käämin induktanssi

I on käämissä kulkeva virta

N on käämin johdinkierrosten lukumäärä (2, s. 273, 238-239)

Yhtälön (1) mukaan magneettikentän leikatessa johdinta siihen indusoituu jännite, jonka suuruus riippuu leikkaavan magneettivuon tiheydestä, leikkausnopeudesta ja johtimen pituudesta. Leikkausnopeuden v olemassaolo yhtälössä ilmaisee sen, että jännite e indusoituu vain, mikäli magneettivuo on ajan suhteen muuttuva. Oikosulkumoottorin roottorin häkkikäimitykseen indusoituu jännite e , kun staattorin käämien vaihteleva magneettivuo Φ leikkaa niitä pinta-alan A alueella. Magneettivuon Φ suuruus riippuu staattorin käämeissä kulkevasta virrasta I . Koska Ohmin lain mukaan $I = \frac{U}{Z}$ (Z on tässä häkkikäimityksen impedanssi, joka muuttuu lämpötilan ja jännitteen syöttötaajuuden funktiona), on häkkikäimityksen virta sitä suurempi, mitä suurempi indusoitunut jännite e on. Käämissä kulkeva virta aiheuttaa käämiä ympäröivään magneettikenttään tietyn magneettikentän voimakkuuden, jonka suuruutta yleisesti kuvaa seuraava yhtälö:

$$H = I * N \quad (4)$$

H on magneettikentän voimakkuus

I on virta

N on johdinkierrosten lukumäärä käämissä

Mitä suurempi magneettikenttien voimakkuudet staattorilla ja roottorilla ovat, sitä suuremmat ovat syntyvät magnetomotoriset voimat. Koska oikosulkumoottorin tapauksessa jännite ja virta vaihtelevat sinimuotoisesti, on magneettikentän voimakkuuden arvo ajanhetkellä t

$$H(t) = N * \hat{i} * \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

\hat{i} on virran huippuarvo

ω on kulmanopeus $2 * \pi * f$, jossa f on vaihtojännitteen taajuus

ϕ on vaihekulma

Staattori koostuu tavallisesti useasta napaparista, jolloin pyörimisnopeus riippuu syöttöjännitteen taajuudesta f ja napaparien lukumäärästä seuraavasti:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (6)$$

n_s on tahtinopeus eli nopeus, jolla magneettikenttä staattorissa pyörii

p on staattorin käämpareista koostuvien napaparien lukumäärä. Yleisesti roottorin nimellispyörintänopeus on sitä pienempi ja moottorin vääntömomentti sitä suurempi, mitä suurempi napaparien lukumäärä on. (3, s. 310.)

3.1.3 Oikosulkumoottorin vääntömomentti, vakiovoalue ja kentänheikennys

Oikosulkumoottorin kyky tuottaa vääntömomentti riippuu magnetomotorisista voimista ja niiden suuruuksista. Magnetomotoristen voimien suuruudet ovat riippuvaisia sekä staattorin käämien että roottorin häkkikäämitykseen indusoituvien virtojen suuruudes-

ta. Edellä todettiin yhtälön (1) mukaan, että roottorin häkkikäämitykseen indusoituu sitä suurempi jännite ja virta, mitä suurempi on magneettivuon ja johtimen kohtisuora leikkausnopeus v . Tämä leikkausnopeus riippuu paitsi staattorin käämeihin syötettävän vaihtojännitteen taajuudesta f , myös roottorin pyörimisnopeudesta staattorin käämien pyörivään magneettikenttään nähden. Edellä todettiin myös, että roottori voi pyöriä vain, jos staattorin magneettikentän pyörimisnopeus on suurempi kuin roottorin pyörimisnopeus. Muussa tapauksessa yhtälön (1) kerroin v tulisi nolaksi ja koko yhtälön oikea puoli olisi arvoltaan nolla. Yleisesti nimellisyörimisnopeuden n arvolla oikosulkumoottorin vääntömomentti on

$$T = \frac{9550 * P_N}{n} \quad (7)$$

T on vääntömomentti

P_N on nimellisteho (kW)

n on nimellisyörimisnopeus (rpm) (4, s. 10)

Millä tahansa staattorin syöttöjännitteen taajuudella yhtälön (1) kerroin v eli magneettikentän leikkausnopeus on suurin mahdollinen, kun staattorin magneettikenttä pyörii taajuudella f ja roottori on paikallaan (2, s.278). Niinpä oikosulkumoottorin vääntömomentti kasvaa suuremmaksi jättämän kasvaessa. Jättämä määritellään seuraavasti:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (8)$$

s on jättämä

n on nimellisyörimisnopeus

n_s on tahtinopeus

Jättämä kasvaa sitä suuremmaksi, mitä enemmän moottoria kuormitetaan (4, s. 11). Kuvasta 2 nähdään, että vääntömomentti on suurin, kun jättämä on noin 0,9. Oletetaan, että staattorin käämien syöttöjännitteen taajuus ei muutu. Kuormituksen kasvun seurauksena tarvitaan suurempi vääntömomentti, jotta entinen pyörimisnopeus saavutettaisiin. Tämä tarkoittaa sitä, että yhtälön (1) magneettivuo kasvaa ja suurempi jännite e indusoituu roottorin häkkikäämitykseen. Tällöin sekä staattorin että roottorin

vatetaan moottorin pyörimisnopeutta syöttöjännitteen taajuutta lisäämällä syöttöjännitteen amplitudin pysyessä vakiona, sillä moottorin magnetointi vähenee. Mikäli syöttötaajuutta ja moottorin pyörimisnopeutta nostetaan niin paljon, että moottorin tuottama vääntömomentti alittaa mahdollisen moottorin akselille kytketyn kuorman vaatiman vääntömomentin, moottorin sanotaan kippaavan. (22, s. 27-28.)

Se, ovatko staattorin käämit tähti- vai kolmiokytkennässä, vaikuttaa oikosulkumoottorin ominaisuuksiin. Kuvassa käyrä I_D/I_N merkitsee moottorin ottamaa virtaa eri pyörintänopeuksilla suhteessa nimellisvirtaan, kun staattorin käämit ovat kolmiokytkennässä ja käyrä I_V/I_N taas moottorin ottamaa virtaa eri pyörintänopeuksilla suhteessa nimellisvirtaan, kun staattorin käämit ovat tähtikytkennässä. Käyrä T_{MD}/T_N kuvaa moottorin vääntömomenttia suhteessa nimellisvääntömomenttiin kolmiokytkennässä, käyrä T_{MY}/T_N taas vääntömomentin suhdetta nimellisvääntömomenttiin tähtikytkennässä. Voidaan todeta, että moottori ottaa varsinkin käynnistettäessä suuremman virran ja tuottaa suuremman virran, kun staattorin käämit ovat kolmiokytkennässä, kuin silloin, kun staattorin käämit ovat tähtikytkennässä. Suuremmat virrat johtuvat siitä, että kolmiokytkennässä kunkin vaiheen yli vaikuttaa pääjännite, jolloin kunkin vaiheen läpi kulkee päävirta, mutta tähtikytkennässä vain vaihejännite (2, s. 315).

3.1.4 Oikosulkumoottorin hyötysuhde ja loistehon kompensointi

Pyörivää liikettä tuottavan voimalaitteen teho määritellään yleisesti seuraavasti:

$$P_{MEK} = T * \omega \quad (9)$$

ω on tässä mekaaninen kulmanopeus $2 * \pi * f$ (f on pyörimisnopeus 1/s)

T on vääntömomentti

Oikosulkumoottorin nimellishyötysuhde määritellään kolmivaihemoottorin tapauksessa seuraavasti:

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} = \frac{P_N}{\sqrt{3} * U_N * I_N * \cos(\phi_N)} \quad (10)$$

P_N on nimellisteho

P_1 on moottorin ottoteho

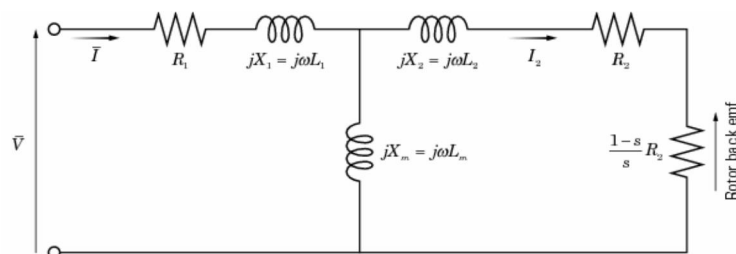
U_N on nimellisjännite

I_N on nimellisvirta

$\cos(\varphi_N)$ on nimellistehokerroin

Oikosulkumoottorissa tapahtuu toiminnan aikana erilaisia häviöitä. Näitä häviöitä ovat ilmapälihäviöt, staattorin ja roottorin resistiiviset häviöt, hystereesihäviöt, pyörrevirtahäviöt ja mekaaniset häviöt lähinnä laakereissa. (3, s. 330.) Staattorin ja roottorin välinen ilmapäli pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, tavallisesti 0,25-2 mm mittaisena (1, s. 35). Tämä johtuu siitä, että ilma johtaa magneettikenttää huonosti (2, s. 236). Oikosulkumoottorin hyötysuhde riippuu edellä mainittujen seikkojen lisäksi kuormituksesta eli toisin sanoen pyörimisnopeudesta. Kun pyörimisnopeus on 75 % tai enemmän nimellispyörimisnopeudesta, toimii moottori likimain nimellishyötysuhteellaan. (3, s. 331-332.)

Oikosulkumoottorin staattorin käämit muodostavat induktiivisen ja resistiivisen kuorman syöttöjännitteelle. Kolmivaiheisen tähtikytkentään kytketyn oikosulkumoottorin staattorin käämit voidaan kuvata sähköisellä vastinpiirillä, joka on esitetty kuvassa 3. Käämien resistanssit johtuvat siitä, että käämit on valmistettu yleensä kuparista, jolla on tietty ominaisresistanssi, vaikkakin se on tavallisesti verrattain pieni. Sähkövirran kulkiessa käämeissä niiden lämpötila nousee, jolloin resistanssi kasvaa. Käämien induktanssi aiheuttaa sen, että syöttöjännitteen vaihdella sinimuotoisesti käämien läpi kulkeva virta on 90 astetta jännitettä jäljessä, koska käämit varastoivat energiaa niitä ympäröiviin magneettikenttiin.



Kuva 3. Tähtikytkentään kytkettyjen staattorin käämien sähköinen vastinpiiri.

Tällöin piiri kuluttaa varsinaisen mekaaniseksi tehoksi muuttuvan pätötehon lisäksi loistehoa, joka nimensä mukaisesti on piirin käyttötarkoituksen kannalta hyödytöntä tehoa. Vaikka loisteho ei ole työtätekevää tehoa piirissä, se kuormittaa mm. siirtokaapeleita sähkötehoa siirrettäessä. Piirin kuluttamaa kokonaistehoa kutsutaan näennäistehoksi, ja symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä se koostuu loistehosta ja pätötehosta seuraavasti:

$$S_N = 3 * U_{\varphi} * I_{\varphi} \quad (11)$$

S_N on näennäisteho

U_{φ} on vaihejännite

I_{φ} on vaihevirta

Pätötehon ja loistehon suuruudet saadaan näennäistehosta tehokertoimen $\cos(\varphi)$ avulla:

$$P = S_N * \cos(\varphi) \quad (12)$$

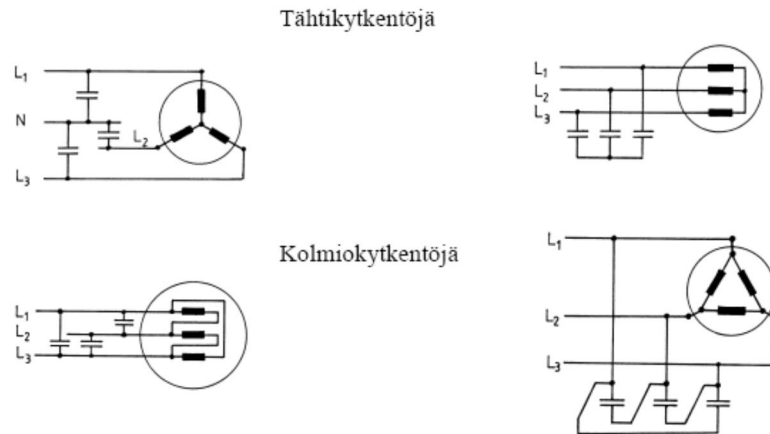
ja

$$Q_{IND} = \sqrt{S_N^2 - P^2} \quad (13)$$

P on pätöteho

Q_{IND} on induktiivinen loisteho

Tehokerroin $\cos(\varphi)$ ilmoittaa siis loistehon ja pätötehon suhteen. Oikosulkumoottoreilla se on tyypillisesti 0,7-0,85, kun täysin resistiivisen kuorman tehokerroin on 1. Kunkin moottorin arvokilpeen on merkitty moottorin nimellistehokerroin nimellistaajuudella. Koska kondensaattorin virta on päinvastoin kuin käämin kohdalla syöttöjännitettä 90 astetta edellä, voidaan moottorin induktiivinen loisteho kompensoida kytkemällä kondensaattoreita staattorin käämien kanssa kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. Kompensointikondensaattoreiden kytkennät tähti- ja kolmiokytketyissä moottoreissa.

Kompensoinnilla pyritään yleensä siihen, että kompensoinnin jälkeen koko piirin tehokerroin on 0,98. Kun tiedetään piirin tehokerroin ennen kompensointia, tarvittavan kapasitiivisen loistehon tarve saadaan lasketuksi seuraavasti:

$$Q_{kap} = \frac{P}{\eta} * (\tan(\cos^{-1}(\cos(\varphi_1))) - \tan(\cos^{-1}(\cos(\varphi_2)))) \quad (14)$$

Q_{KAP} on kapasitiivinen loisteho

$\cos(\varphi_1)$ on tehokerroin ennen kompensointia

$\cos(\varphi_2)$ on tehokerroin kompensoinnin jälkeen, tavallisesti noin 0,98.

Sopiva kondensaattori voidaan valita valmistajan taulukosta kapasitiivisen loistehon tarpeen perusteella. (15, s. 1-4.)

3.1.5 Oikosulkumoottori käynnistettäessä

Aiemmin todettiin, että oikosulkumoottorin kohdalla yhtälön 1 kerroin v voi olla kulloisellakin tahtinopeudella suurimmillaan silloin, kun staattorin käämeissä pyörii muuttuva magneettikenttä tahtinopeudella n_s ja roottori on paikallaan (2, s. 278). Samassa yhteydessä todettiin, että tässä tilanteessa vääntömomentti ja moottorin ottama virta ovat suuria. Näin on asian laita moottoria käynnistettäessä, kun staattoriin on kytketty vaihtojännite mutta roottori ei ole vielä alkanut pyöriä. Kuten kuvasta 2 voidaan nähdä, oikosulkumoottori voi ottaa käynnistymisen yhteydessä jopa 7-kertaisen virran nimellis-

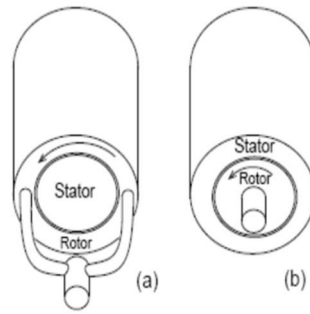
virtaan nähden, jos staattorin käämit ovat kolmiokytkennässä (4, s. 13). Suuri käynnistysvirta lisää voimakkaasti moottorin termistä kuormitusta. Käynnistysvirtaa voidaan pienentää käynnistämällä moottori tähtikytkennässä. Ajoneuvokäytössä akku joutuu suurelle rasitukselle ja häviöt ovat suuria, kun siitä otetaan suuri virta käynnistettäessä. Tässä tapauksessa akun kuormitusta voidaan pienentää käynnistyskondensaattoriin varastoidun sähköenergian avulla. Teollisuudessa käytetään myös pehmokäynnistimiä, jotka rajoittavat moottorin ottaman virran käynnistystilanteessa mutta toisaalta pidentävät moottorin käynnistysaikaa. Ajoneuvokäyttöön nämä eivät sovellu kovin hyvin, koska ajoneuvokäytössä halutaan yleensä moottorin voivan kiihdyttää kuorman eli ajoneuvon matkustajineen haluttuun loppunopeuteen mahdollisimman lyhyessä ajassa. Yksi mahdollisuus käynnistysvirran pienentämiseen muiden lisäksi on kytkeä moottori irti kuormasta käynnistämisen ajaksi kytkimen avulla ja pyörittää roottoria apumoottorin avulla. Roottorin saavutettua tietyn alkunopeuden kytketään kuorma takaisin roottorille.

3.2 Tahtimoottori ja harjaton tasavirtamoottori

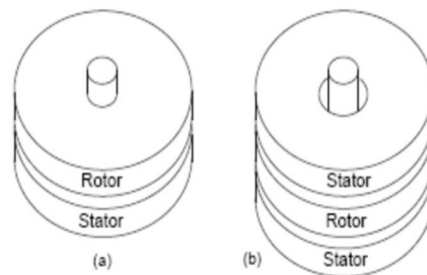
3.2.1 Tahtimoottorin rakenne

Tahtimoottori ja harjaton tasavirtamoottori ovat synkronimoottoreita. Se tarkoittaa sitä, että normaalissa toiminnassa roottori pyörii yhtä nopeasti kuin staattorin magneettikenttä vaihtelee eikä jättämää oikosulkumoottorin tapaan voi periaatteessa esiintyä. Mikäli jättämää esiintyy, kyse on moottorin ohjauksen toimintahäiriöstä eikä moottori kykene tässä tapauksessa tuottamaan vääntömomenttia.

Harjattomia tasavirtamoottoreita ja tahtimoottoreita on monenlaisia, mutta pääsääntöisesti moottorityypit muistuttavat toisiaan hyvin paljon. Toiminnallisesti merkittävin ero näiden kahden välillä on EMF:n (Electro Magnetic Force) eli staattorin käämien syöttöjännitteen aaltomuoto. Tahtimoottorin tapauksessa aaltomuoto on sinimuotoinen, harjattoman tasavirtamoottorin tapauksessa aaltomuoto on niin sanottu kanttiaalto (5, s.439). Nimitys harjaton tasavirtamoottori on siinä mielessä harhaanjohtava, että kanttiaaltomuotoisen syöttöjännitteenkin napaisuus tavallisesti vaihtelee harjattomissa DC-moottorisovelluksissa. Jatkossa puhutaan vain tahtimoottorista.



Kuva 5. Roottori-staattorikonfiguraatio, jossa roottori on staattorin ympärillä (a), sekä tavanomainen konfiguraatio (b).

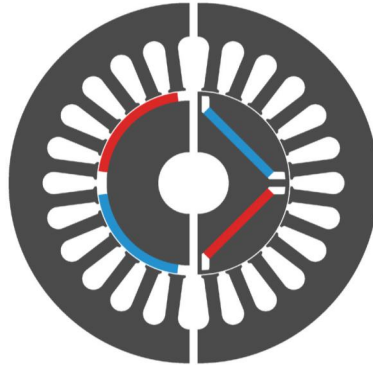


Kuva 6. Staattori voidaan asettaa roottoriin nähden sen pätyyn tai pätyihin. Tällä rakenteella moottori saadaan tuottamaan suuri vääntömomentti halkaisijan pysyessä kuitenkin kohtuullisena.

Tahtimoottorin staattori voidaan valmistaa eri materiaaleista ja eri tavoilla. Käytännössä erilaisia rakennekonfiguraatioita on olemassa lukuisia. On myös mahdollista, että staattori sijoitetaan roottorin sisälle ja roottori pyörii staattorin ympärillä tai että kaksi staattoria sijaitsee roottoriin nähden sen päädissä (kuvat 5 ja 6). Konfiguraatio, jossa staattorit sijaitsevat roottorin päädissä, on yleistymässä, sillä sen avulla saavutetaan hyvä vääntömomentin ja painon suhde.

Staattorin sisäpinnalla roottoria vasten on vaihteleva määrä staattorin käämejä, joihin syötetään vaihtojännite. Roottoreita on kahdenlaisia. Roottorissa voi olla käämitys, joihin johdetaan tasavirtaa liukurenkaiden välityksellä. Tasavirta magnetoi roottorin, jolloin staattorin käämien virran aiheuttamalle magnetomotoriselle voimalle syntyy vastavoima. Roottorissa voi olla myös kestmagneettimateriaalista valmistetut magneetit. Tällöin magnetointivirtaa ei tarvita, sillä roottori tuottaa itsestään tarvittavan magneet-

tivuon ilmaväliin eikä roottoriin liity mitään sähköisiä kytkentöjä. Kestomagneettiroottorit valmistetaan neodyymi-rauta-booriseoksesta. (1, s. 38-39.)

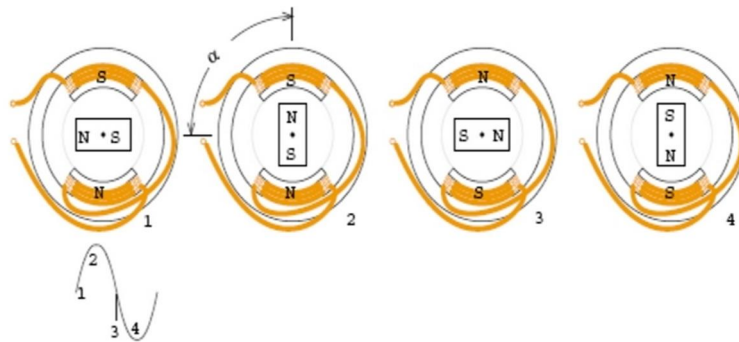


Kuva 7. Kestomagneetit liimattuna roottorin pintaan (vasen puoli) ja upotettuna roottoriin (oikea puoli). Staattoriin on tavallisesti jyrskyttä useita aksiaalisuuntaisia vakoja, joissa staattorin käämit sijaitsevat.

Kestomagneettiroottorin käytöllä saavutetaan parempi hyötysuhde ja yksinkertaisempi moottorin rakenne, kun roottoriin ei tarvitse syöttää virtaa (7, s. 16). Kustannusten säästämiseksi roottoria ei valmisteta kokonaan kestomagneettimateriaaleista, vaan kestomagneetikappaleet kiinnitetään rautametallista valmistetun roottorin pintaan liimaamalla tai hiilikuitupannoilla tai vaihtoehtoisesti upotetaan roottoriin pinnan läheisyyteen. Valmistusvaiheessa kestomagneetikappaleet magnetoidaan tasavirtakämin avulla. Koska neodyymi-rauta-booriseoksella on leveä hystereesisilmukka eli suuri remanenssivuontiheys ja koersiivivoima, se jää tasavirtakämin magneettikentälle altistuttuaan pysyvästi magneettiseksi. Magneettien kiinnitystapa saattaa rajoittaa moottorin suurinta sallittua pyörimisnopeutta: mikäli magneetit kiinnitetään liimaamalla, sallitaan roottorin suurimmaksi pyörimisnopeudeksi vain noin 2000 kierrosta minuutissa. (8, s. 14-16.) Kestomagneettimateriaalin magneettivuo saattaa vaihdella lämpötilan mukaan (18, s. 99). Kuten oikosulkumoottori, myös tahtimoottori pyritään valmistamaan sellaiseksi, että staattorin ja roottorin välinen ilmaväli olisi mahdollisimman pieni, jotta ilman huonosta suhteellisesta permeabiliteetista johtuvat häviöt pysyisivät mahdollisimman pieninä.

3.2.2 Tahtimoottorin toimintaperiaate

Kuvassa 8 näkyy yksinkertaisimman mahdollisen tahtimoottorin toiminta yhden pyörähdyksen aikana. Vaikka todelliset moottorit ovat tätä monimutkaisempia, ilmenee kuvasta hyvin toiminnan periaate. Kuvan 8 moottorin on yksivaiheinen ja yksinapapari-nen. Vaihtojännite syötetään staattorin napoja ympäröiviin käämeihin. Kuvan 8 vasemmassa alalaidassa oleva sinikäyrä kuvaa käämivirran ja magnetomotorisen voiman hetkellisarvoja eri vaiheissa.

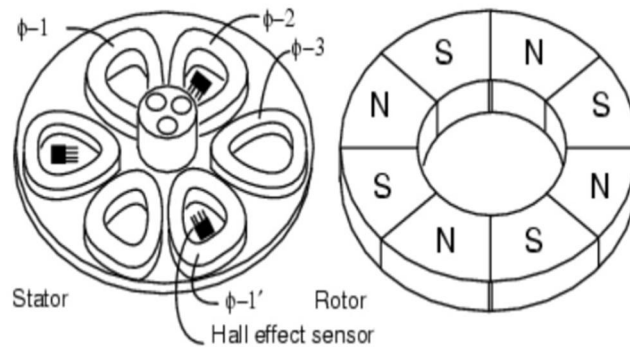


Kuva 8. Yksinkertaisen tahtimoottorin toiminta.

Kohdassa 1 kestopagneettimateriaalista valmistettu roottori on vaakasennossa ja syöttöjännite on huipussaan, mutta käämivirta on vielä nolla, joten mitään ei tapahdu. Kohdassa 2 syöttöjännitteen hetkellisarvo on nolla, mutta käämivirta on positiivisen huippuarvon suuruinen, jolloin staattorin magnetomotorinen voima on suurimmillaan. Tämä saa roottorin kääntymään akselinsa ympäri niin, että roottorin magneettinen etelänapa asettuu staattorin pohjoisnavan kohdalle ja roottorin magneettinen pohjoisnapa asettuu staattorin etelänavan kohdalle, koska erimerkkiset magneetit vetävät toisiaan puoleensa (2, s. 229). Vastaavasti kohdissa 3 ja 4 syöttöjännitteen napaisuus muuttuu, jolloin staattorin navat vaihtavat paikkaa ja roottori pyörähtää vaakasennosta pystyasentoon. Roottori pyörii kuitenkin koko ajan samaan suuntaan, koska *roottorin magneettinen napaisuus pysyy samana, vain staattorin magneettinen napaisuus muuttuu.*

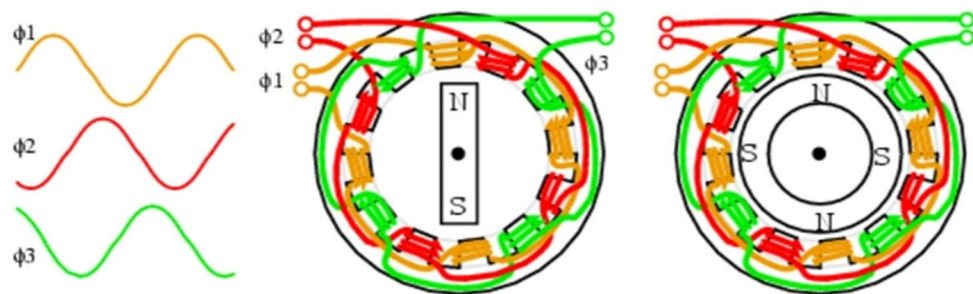
Edeltävässä kuvauksessa oletettiin, ettei roottorin akselilla ole kuormaa, jolloin kuvassa näkyvä kulma α on suuruudeltaan lähes nolla. Kulma α kuvaa roottorin ja staattorin magneettikenttien välistä vaihe-eroa eli tehokulmaa. Käytännössä vaihe-eroa on aina

moottoria kuormitettaessa. Moottorin vaihtosuuntaaja syöttää vaihtojännitettä staattorin käämeihin siten, että jännitteen vaihekulman ja roottorin kulman välinen ero ei pääse kasvamaan yli 90 asteen. Muutoin päädyttäisiin tilanteeseen, jossa moottori ei enää toimi synkronisesti eikä tuota vääntömomenttia. Huomionarvoista on, että kulman α ollessa 90 astetta on moottorin tuottama vääntömomentti suurimmillaan. (5, s. 422.) Koska induktanssin takia staattorin käämin virta ja sen myötä käämin magneettikenttä on 90 astetta jännitettä jäljessä, on roottorin asennon ja staattorin käämin jännitteen oltava 180 astetta suurimman vääntömomentin aikaansaamiseksi.



Kuva 9. Tahtimoottori koostuu tavallisesti useasta staattorin ja roottorin napaparista.

Käytännön moottoreiden rakenteet ovat monimutkaisempia kuin kuvassa 9 esitetty. Staattorit koostuvat useista napapareista ja käämeistä. Samoin roottorit koostuvat useista magneettisista pohjois-etelänapapareista (kuva 9). Käytännön moottorit ovat tavallisesti kolmivaiheisia. Muutkin vaiheiden lukumäärät ovat mahdollisia.



Kuva 10. Tahtimoottorissa tavallisesti useampi staattorin napapari kuuluu sähköisesti samaan vaiheeseen.

Vaiheiden lukumäärä ei ole sama asia kuin napaparien lukumäärä. Useampi napapari voi kuulua samaan vaiheeseen. Tällöin samaan vaiheeseen kuuluvien napaparien käämit on yhdistetty samaan vaihejohtimeen, jolloin napaparien magneettinen napaisuus, jännite ja virta ovat toiminnan aikana keskenään samoja. Samaan vaihejännitteeseen kuuluvat napaparit on valittu sopivasti staattorin kehältä, jolloin ne muodostavat toiminnan aikana pohjois-etelänapapareja roottorin magneettisten napojen kanssa (kuva 10). (5, s.440-442.)

3.2.3 Tahtimoottorin toiminnan perusteet

Kolmivaiheisen tahtimoottorin staattorin käämit on tavallisesti kytketty tähtikytkentään, joten staattorin sähköinen vastinpiiri on kohdassa "Oikosulkumoottorin hyötysuhde ja loistehon kompensointi" esitetyn vastinpiirin kaltainen. Roottorin pyörimisnopeus on yhtä suuri kuin tahtinopeus kaavan (6) mukaan. Kolmivaiheisen tahtimoottorin pyörimisnopeus kierroksina minuutissa saadaan seuraavasta yhtälöstä:

$$S = \frac{n_s * 120}{p} \quad (15)$$

S on roottorin pyörimisnopeus (rpm)

n_s on tahtinopeus (Hz)

p on samaan vaiheeseen kuuluvien staattorin napojen lukumäärä. (5, s. 416.)

Tähtikytkentä ja vaiheiden yhteinen tähtipiste aiheuttavat sen, että ns. nollajärjestelmää ei voi esiintyä, jolloin kaikkien vaihevirtojen summa on joka hetki nolla (18, s. 71). Vaihtosuuntaaja syöttää staattorin käämeihin vaihtojännitettä ja kunkin vaiheen välillä on jännitteessä 120 asteen vaihe-ero. Vaihtosuuntaajan tuottama vaihtojännite ei tarkkaan ottaen ole puhtaan sinimuotoista, vaan pulssinleveysmodulaation avulla approksimoitua vaihtojännitettä. Jännitteiden hetkellisarvot voidaan esittää seuraavasti:

$$\begin{bmatrix} u_{\varphi 1} \\ u_{\varphi 2} \\ u_{\varphi 3} \end{bmatrix} = R_{\varphi} * \begin{bmatrix} i_{\varphi 1} \\ i_{\varphi 2} \\ i_{\varphi 3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} \Phi_{\varphi 1} \\ \Phi_{\varphi 2} \\ \Phi_{\varphi 3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$u_{\varphi 1}$, $u_{\varphi 2}$ ja $u_{\varphi 3}$ ovat eri vaiheiden jännitteiden hetkellisarvot

$i_{\varphi 1}$, $i_{\varphi 2}$ ja $i_{\varphi 3}$ ovat eri vaiheiden virtojen hetkellisarvot

R_{φ} on yhden vaiheen resistanssi, joka on teoriassa sama jokaisessa vaiheessa

$\Phi_{\varphi 1}$, $\Phi_{\varphi 2}$ ja $\Phi_{\varphi 3}$ ovat eri vaihekäämien magneettivuot (16, s. 20.)

Tavallisesti staattorin sisäpinnalle on jysitty useita vakoja (kuva 7), joihin käämit on asetettu. Eri vaiheisiin kuuluvat käämit on asetettu vakoihin siten, että eri vaiheisiin kuuluvat käämit sijaitsevat osittain samoissa vaoissa. Järjestely vähentää toiminnan aikana syntyviä yliaaltoja sekä nykimistä sinimuotoisen vuojakautaman ansiosta (5, s. 418-419). Tällöin eri vaiheet vaikuttavat magneettikenttien välityksellä toisiinsa. Tästä syystä yhtälössä (16) esiintyy termi, jossa ovat eri vaiheiden magneettivuot. Eri vaiheiden magneettivuot noudattavat seuraavaa yhtälöä:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{\varphi 1} \\ \Phi_{\varphi 2} \\ \Phi_{\varphi 3} \end{bmatrix} = L_{\varphi} * \begin{bmatrix} i_{\varphi 1} \\ i_{\varphi 2} \\ i_{\varphi 3} \end{bmatrix} + B_{ROOTT.} * \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(\theta - 120^{\circ}) \\ \sin(\theta - 240^{\circ}) \end{bmatrix}$$

(17)

L_{φ} on yhden vaiheen induktanssi, joka on teoriassa sama jokaisessa vaiheessa

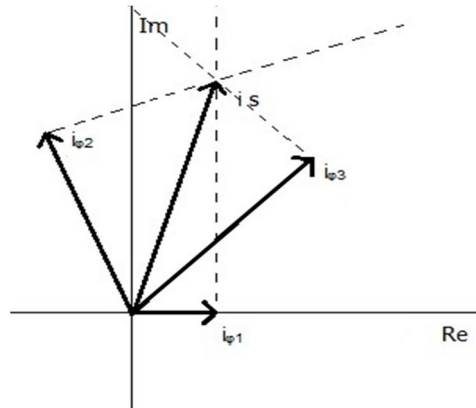
$B_{ROOTT.}$ on roottorin tuottama magneettivuon tiheys

θ on roottorin asentokulma (16, s. 21)

Staattorin käämien virta ja magneettikenttä vaihtelevat sinimuotoisesti, eikä vaiheeroista sekä käämien limittäisestä asettelusta johtuen vääntömomentissa ole äkillisiä vaihteluita kierroksen aikana (5, s. 416). Vääntömomentin suuruus tahtikoneessa riippuu muun muassa staattorivirrasta. Staattorivirta kuvataan vektorina kompleksilukukoordinaatistossa siten, että piirretään kunkin vaiheen virran hetkellisarvot vektoreina oikeassa kulmassa koordinaatistoon ja kullekin vaihevirtavektorille normaaliviiva siten, että normaaliviiva kulkee vaihevirtavektorin kärjen kautta. Kaikki kolme normaaliviivaa leikkaavat tietyssä pisteessä, joka on staattorivirran vektorin kärjen piste. Koordinaatisto on "kiinnitetty" staattoriin. Staattorivirran vektoria piirrettäessä negatiivisen virran (kuvan 11 tapauksessa $i_{\varphi 3}$) vektori piirretään vastakkaiseen suuntaan kuin normaalisti. Staattorivirta voidaan kuvata näin vain symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä, jossa vaihevirtojen summa on kaikkina ajanhetkinä nolla. Vaihevirtojen summana staattorivirta on

$$\vec{i}_S = \frac{2}{3} * (i_{\varphi 1} + i_{\varphi 2} * e^{\frac{j*2*\pi}{3}} + i_{\varphi 3} * e^{\frac{j*4*\pi}{3}})$$
(18)

j on imaginaariyksikkö



Kuva 11. Vaihevirrat $i_{\varphi 1}$, $i_{\varphi 2}$ ja $i_{\varphi 3}$ sekä staattorivirta i_S kompleksilukukoordinaatistossa.

Lisäksi vääntömomentin suuruus riippuu oleellisesti staattorin ja roottorin välisestä ilmavälin magneettivuosta. Koska staattorilla ja roottorilla on tietty yhteinen koneen mitoista riippuva pinta-ala, jolla ne ovat kohdakkain, voidaan puhua ilmavälin magneettivuosta. Ilmavälin magneettivuo riippuu roottorin magneettien magneettikentän vuontihyeydestä ja staattorin käämien johdinkierrosten lukumäärästä:

$$\vec{\Phi}_i = N_S * \vec{\Phi}_R$$
(19)

Φ_i on ilmavälin magneettivuo

N_S on staattorin kaikkien vaihekäämien yhteenlaskettu johdinkierrosten lukumäärä

Φ_R on roottorin magneettien tuottama magneettivuo $\frac{A}{B_{ROOTT.}}$, A on roottorin ja staattorin yhteinen pinta-ala.

Vääntömomentti riippuu napaparien lukumäärästä sekä ilmavälin magneettivuon ja staattorivirran vektoreiden ristitulosta:

$$T = \frac{3}{2} * p * \vec{\Phi}_i \times \vec{i}_S$$
(20)

Koska kolmivaiheisen oikosulkumoottorin staattorin käämien kytkentä on samanlainen kuin tahtimoottorinkin, pätevät edellä esitetyt kaavat myös oikosulkumoottorille lukuun ottamatta ilmavälivuon käyttäytymistä. (18, s. 74-79.)

Kuten aiemmin on todettu, roottorin ja staattorin välinen ilmaväli muodostaa magneettivuolle vastuksen. Eri aineet kuuluvat magneettisessa mielessä eri ryhmiin. Aineet voidaan jaotella kolmeen ryhmään sen mukaan, kuinka ne käyttäytyvät ulkoisen magneettikentän vaikuttaessa niihin: diamagneettisiin, paramagneettisiin ja ferromagneettisiin aineisiin. Diamagneettiset aineet heikentävät ulkoista magneettikenttää, paramagneettiset aineet vahvistavat ulkoista magneettikenttää vain vähän ja ferromagneettiset aineet vahvistavat ulkoista magneettikenttää erittäin paljon. Näin ollen rautametallit kuuluvat ferromagneettisiin aineisiin ja ilma diamagneettisiin aineisiin. (2, s. 230.) Aineen suhteellinen permeabiliteetti μ_R ilmaisee sen, kuinka monta kertaa paremmin aine johtaa magneettikenttää kuin tyhjiö tai ilma. Suhteellinen permeabiliteetti saadaan seuraavasta kaavasta:

$$\mu_R = \frac{\mu_k}{\mu_0} \quad (21)$$

μ_k on ainekohtainen permeabiliteetti

μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti 1,2566371 $\mu\text{H/m}$

Rautametallien suhteelliset permeabiliteetit saattavat olla useiden tuhansien luokkaa. Ilman suhteellinen permeabiliteetti on noin yksi. Staattorin käämissä kulkeva virta saa aikaan käämin ympärille magneettikentän, jonka voimakkuus on

$$H = \frac{I * N}{l} \quad (22)$$

I on käämissä kulkeva virta

N on johdinkierrosten lukumäärä

l on käämin pituus

Magneettikentän voimakkuus riippuu siis paitsi virrasta ja johdinkierrosten lukumäärästä, myös johtimen pituudesta. Esimerkiksi staattorin käämissä magneettikentän voimakkuuden H pisyessä vakiona vakiovirralla magneettivuon tiheys B väliaineessa

$$B = \mu * H \quad (23)$$

koska

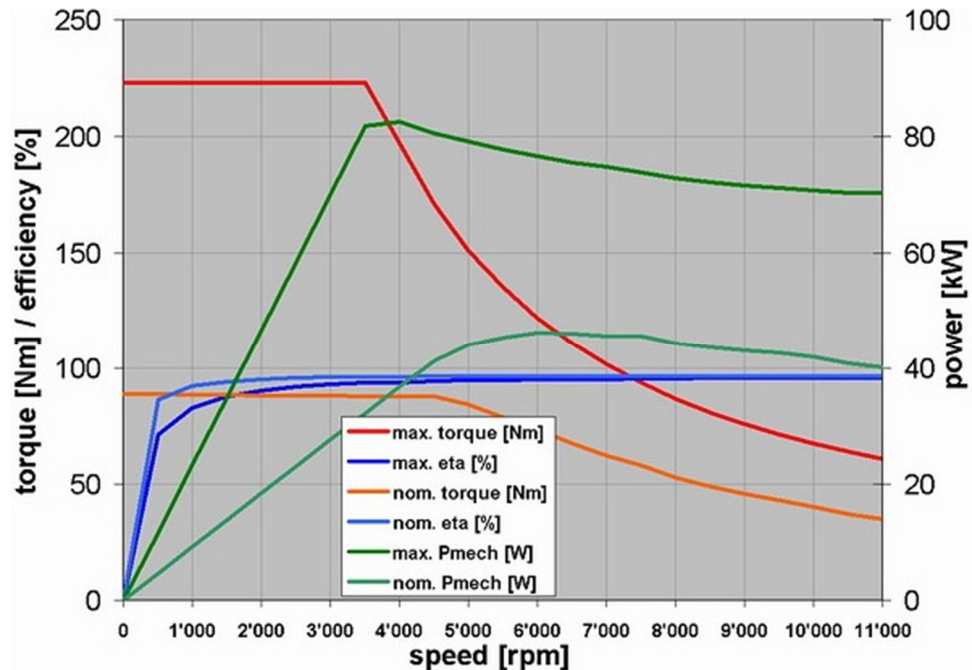
$$\mu = \frac{B}{H} \quad (24)$$

Koska μ on toisena tulon tekijänä edellisessä kaavassa, on magneettivuon tiheys sitä pienempi aineessa, mitä pienempi on suhteellinen permeabiliteetti. Moottorin ilmavälihäviöt johtuvat tästä tekijästä. (2, s. 234-239.)

3.2.4 Tahtimoottorin hyötysuhde ja kentänheikennys

Kuvassa 12 on esitetty erään tahtimoottorin mekaaninen teho, hyötysuhteet ja vääntömomentit pyörimisnopeuden funktiona. Tahtimoottorin roottorissa on kestopagneetit. Kuvasta nähdään, että koska mekaaninen teho on kulmanopeuden ja vääntömomentin tulo, kasvaa mekaaninen teho lineaarisesti pyörimisnopeuden kasvaessa sillä pyörimisnopeusalueella, jolla vääntömomentti on vakio. Mekaaninen huipputeho saavuttaa suurimman arvonsa suurin piirtein sillä pyörimisnopeuden arvolla, jolla moottorin huippuvääntömomentti alkaa laskea. Sitä pistettä, jolla vääntömomentti alkaa laskea, kutsutaan kentänheikennyspisteeksi. Moottorin pyörimisnopeuden kasvaessa roottorin magneettikentän staattorin käämeihin indusoiman syöttöjännitteelle vastakkaisen jännitteen (BEMF tai CEMF) amplitudikin kasvaa (vrt. yhtälö 1). Kentänheikennyspisteessä vastajännitteen amplitudi on likimain yhtä suuri kuin syöttöjännitteen suurin amplitudi, eikä tällöin staattorin käämien läpi kulje virtaa, koska virran kulku edellyttäisi potentiaaliero kahden pisteen välillä. Ainoaksi keinoksi kasvattaa pyörimisnopeutta kentänheikennyspisteestä jää roottorin tuottaman magneettivuon pienentäminen, jotta vastajännitteen amplitudi pienenee. Tällöin myös vääntömomentti pienenee. Mikäli moottorille on kytketty kuorma, syvälle kentänheikennykseen mentäessä moottorin kippausriski kasvaa. Kippauksen seuraukset ovat kuitenkin vakavampia kuin oikosulkumoottorin tapauksessa: kippauksen yhteydessä vaihtosuuntaaja saattaa mennä sekai-

sin ja moottorin synkroninen toiminta menetetään. Tällöin on mahdollista, että roottorin tuottaman magneettivuon palatessa normaalille tasolle kippauksen jälkeen on magneettivuon staattoreihin indusoiman BEMF:n amplitudi vaihtosuuntaajan komponenttien jännitekestoisuuden kannalta vaarallisen korkea.



Kuva 12. Erään tahtimoottorin maksimivääntömometti (punainen), huipputeho (vihreä), huippuhyötysuhde (tummansininen), nimellsvääntömometti (oranssi) ja nimellisteho (vaaleanvihreä) pyörimisnopeuden funktiona.

Kuvan 12 moottorin hyötysuhde on alhainen vain melko alhaisella pyörimisnopeudella ja nousee yli 90 prosentin melko nopeasti kierrosnopeuden kasvaessa. Tahtimoottoreiden hyötysuhteet ovat tavallisesti yli 90 prosenttia. Hyvä hyötysuhde johtuu siitä, että tahtimoottorin roottorin kestopäätteet, joiden aiheuttama magneettikenttä luo staattorin käämeissä kulkevan virran aiheuttamalle muuttuvalle magneettikentälle vastakkaisen magnetomotorisen voiman, on magnetoitu pysyvästi jo valmistusvaiheessa eikä sähkötehoa tarvitse enää käytön aikana käyttää roottorin magnetoimiseen. Magnetoiminen aiheuttaa magneettimateriaalin koersiivivoima H_A (22, s. 19). Niinpä muulloin kuin kentänheikennyksessä tahtimoottorin roottorin aiheuttama magneettivuoto on aina suuri riippumatta siitä, pyöriikö roottori vai ei.

3.3 Sähkömoottoreiden toiminnan rajoitukset

Sähkömoottorin mekaaninen teho ja vääntömomentti eivät voi olla mielivaltaisen suuria, vaan niitä rajoittavat eräät tekijät. Vääntömomenttia rajoittaa ennen kaikkea roottorin ja sitä kautta moottorin koko. Roottori on tavallisesti lieriön muotoinen. Koska moottorin vääntömomentti riippuu magnetomotoristen voimien vaikutuksesta ja roottorin säteestä r eli vääntövarren pituudesta, on moottorin huippuvääntömomentti riippuvainen roottorin tilavuudesta

$$V = \pi * r^2 * l_R \quad (25)$$

V on roottorin tilavuus

l_R on roottorin pituus

Edellä esitetty pätee varsinkin moottoreissa, joissa staattori on roottorin ympärillä. (18, s. 19.) Moottorin, jonka rakenteessa staattorit sijaitsevat roottorin päädyissä, vääntömomentti ei riipu niin oleellisesti tilavuudesta, mutta kaikilla moottoreilla on tietty koosta riippuva maksimivääntömomentti. Moottorin vääntömomentti on riippuvainen myös staattorin käämeissä kulkevasta sähkövirrasta. Staattorivirtaa ei voida kuitenkaan kasvattaa rajatta. Ensinnäkin moottorin rakennemateriaalien magneettinen kyllästys kasvaa staattorinvirran kasvaessa, jolloin ilmavälimagneettivuo pienenee ja staattorin sekä roottorin välinen ekvivalenttinen ilmaväli pitenee. Lisäksi staattorivirta kuumentaa johdinmateriaalia, mikä saattaa johtaa käämijohtimien eristemateriaalin ylikuumenemiseen. (18, s. 19.) Kuumeneminen voi myös johtaa kestmagneettimateriaalin pysyvään demagnetoitumiseen (22, s. 19). Sallittu lämpötilannousu riippuu eristysluokasta, kuten taulukossa 2 on esitetty (22, s. 25). Huippuvääntömomentin ja –tehon kestoaika on aina rajoitettu juuri termisen kuormituksen rajoitusten takia useimmiten 30 sekuntiin. Moottorin kuormitettavuus käyttösyklin aikana riippuu kuormitusprofiilista, joten IEC 60034-1 –standardissa on määritelty moottoreiden käyttöluokat S1-S10 (22, s. 27).

Lisäksi moottorin vääntömomenttia rajoittaa pääasiassa staattorin käämien kierrosluvusta, syöttöjännitteen amplitudista, roottorin magneettivuosta ja pyörimisnopeudesta riippuva kentänheikennyspiste, jonka yli mekaanista tehoa ei juuri voi kasvattaa. Pyörimisnopeuden rajoitukset voivat johtua kestmagneettimoottorin tapauksessa magneettien kiinnitystavasta tai suurimmasta sallitusta käyttöjännitteestä, joka riippuu mm.

staattorin käämien eristemateriaalin paksuudesta. Laakereiden mekaaninen kestävyys asettaa myös rajoituksia maksimipyörimisnopeuteen. Laakereiden elinikään vaikuttavat roottorin pyörimisnopeus ja roottorin akselin, jonka ympärille laakeri asetetaan, halkaisija. Elinikä on sitä alhaisempi, mitä suurempi moottorin pyörimisnopeus on ja mitä pienempi akselin halkaisija on. (18, s. 20.)

Taulukko 2. Moottoreiden eristysluokat ja niiden mukaiset käämitysten sallitut lämpötilat (22, s. 27).

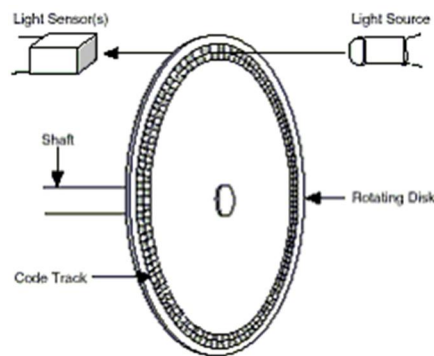
Eristysluokka	Vanha merkintä	Kuumimman pisteen lämmön-sieto (°C)	Sallittu lämmön-nousu (°C) @ 40 °C	Sallittu keskimääräinen resistanssimittauksella määritetty käämityksen lämpötila (°C)
90	Y	90		
105	A	105	60	
120	E	120	75	
130	B	130	80	120
155	F	155	100	140
180	H	180	125	165
200		200		
220		220		
250		250		

3.4 Tahtimoottorin anturit

Tahtimoottorin toimintaperiaatteeseen kuuluu, että moottoria ohjaava vaihtosuuntaaja kytkee ja sammuttaa eri staattorin käämeihin virran sen mukaan, missä asennossa roottori kulloinkin on. Tämä on tahtikoneen toiminnan edellytys. Tästä syystä moottorin rakenteeseen kuuluu erilaisia antureita, sillä ohjain tarvitsee takaisinkytkettyjä tietoja moottorin pyörimisnopeudesta ja roottorin asennosta. Tahtimoottoreissa käytetään erityyppisiä antureita: optisia enkoodereita, resolveita ja Hall-antureita. (5, s. 440.) Pyörivät anturit, optiset enkooderit ja resolverit asetetaan tavallisesti roottorin akselille. Magneettivuon muutoksia tunnistavat anturit, Hall-anturit, asetetaan tavallisesti staattorin sisäpinnalle.

3.4.1 Enkooderit

Enkooderit ovat valosähköisiä pulssiantureita, joita on kahden tyyppisiä: absoluuttienkoodereita ja inkrementtienkoodereita. Näistä yksinkertaisempi on inkrementtienkooderi, joka koostuu roottorin akselille kiinnitettävästä ja roottorin mukana pyörivästä pulssikiekosta, pulssikiekosta noin 0,25 mm etäisyydellä olevasta kiinteästä lukulevystä, valolähteestä ja valoherkästä anturista. Valolähteenä käytetään tavallisesti diodia ja anturina transistoria, jonka emitterivirta kasvaa transistorin valolle altistumisen myötä. Pulssikiekko on tavallisesti valmistettu siten, että sen ulkokehällä on ainakin kaksi reikäkuvioriviä koko kehän pituudella. Reikäkuviossa reikien välinen etäisyys on yhtä suuri ja kunkin reiän välillä on reiän levyinen ehjä alue. Eri riveissä olevat reiät eivät ole toisiinsa nähden kohdakkain vaan limittäin. Lisäksi lukulevyssä, johon valoanturi on kiinnitetty, on reikä valoanturin kohdalla.



Kuva 13. Inkrementtienkooderi.

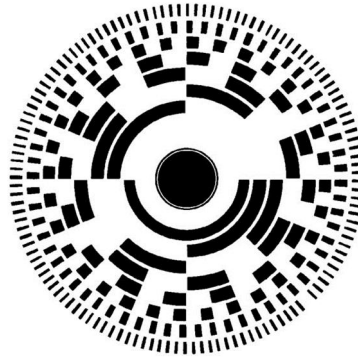
Roottorin ja pulssikiekon pyöriessä pulssikiekon reiät osuvat vuoroin ehjien kohtien kanssa kohdakkain lukulevyn reiän kanssa, jolloin diodin emittoima valo pääsee valoanturille. Tällöin valoanturin ulostulosta lähtee jännitepulssi mittauselektronikalle. Mittauselektronikka tulkitsee jännitteen muutoksen anturin ulostulossa pulssiksi, jos jännite ylittää jonkin ennalta määritellyn tason. Valoantureita on tavallisesti ainakin kaksi kumpaakin reikäriiviä varten. Enkooderin mittauselektronikka voi laskea pulssien määrästä aikayksikössä roottorin kierrosnopeuden ja aseman alkuasemaan nähden. Koska reikärivien reiät ovat limittäin toisiinsa nähden, voi mittauselektronikka päätellä molempien rivien tuottamien pulssien välisestä vaihe-erosta roottorin pyörimissuunnan: reiät ovat limittäin toisiinsa nähden siten, että vaikkapa myötäpäivään pyöriessä vaihe-ero on 90 astetta ja vastapäivään pyöriessä 270 astetta. Inkrementtienkooderin huono puoli on

se, että sen avulla ei voi tietää roottorin asentoa alkutilanteessa, vain roottorin asento alkutilanteeseen nähden, kun roottori on lähtenyt pyörimään.

Inkrementtienkooderin resoluutio eli erotuskyky asteina saadaan, kun jaetaan 360 astetta reikärivin reikien lukumäärällä. Tavallisen inkrementtienkooderin resoluutio on 0,2-0,5 astetta. (9, s. 4:10-4:13.) Suuri erotuskyky on tarpeen tahtimoottorin ohjauksessa, sillä roottorin asento moottorissa pitää tuntea tarkalleen, jotta tehokulma saadaan pidettyä tarkalleen 90 asteessa suurimman vääntömomentin tuottamiseksi (5, s. 420.)

Absoluuttienkooderissa on samoin kuin inkrementtienkooderissakin pulssiekikko, lukulevy ja valolähde sekä -anturi. Pulssiekikossa on säteen suuntaisia reikäjonoja vierekkäin kiekon kehällä. Valoanturissa on useita valoherkkiä transistoreita, jotka lukevat kiekkoa sen säteen suuntaisesti. Kukin reikäjono on yksilöllinen ja vastaa luettaessa yhtä binäärilukua siten, että reikäkohdat vastaavat ykköstä ja ehjät kohdat nollaa. Näin ollen absoluuttienkooderin avulla voidaan tietää roottorin asento staattoriin nähden yksikäsitteisesti heti, kun enkooderiin kytketään virta.

Absoluuttienkooderin resoluution määrää ensisijaisesti reikäjonoja vastaavien binäärilukujen pituus eli bittien lukumäärä. Bittien lukumäärän ollessa esimerkiksi 16 bittiä (= suurinta binäärilukua edustavassa reikäjonossa on 16 reikää peräkkäin) on enkooderin resoluutio $2^{16} = 65536$ eri asentoa. Asteina resoluutio on tällöin $\frac{360}{65536} \approx 0,0055$ astetta. Pulssiekikon pyöriessä mittauselektroniikka voi asennon määrittämisen lisäksi määritellä pyörimisnopeuden lukujen vaihtumistiheyden perusteella, pyörimissuunnan sen perusteella, pienenevätkö vai suurenevatko luvut ja tehdyt kierrokset inkrementtiperiaatteen eli lisäten uuden luvun aina edellisten lukujen summaan. Kierros on suoritettu, kun tietty kokonaissumma tulee täyteen. Luonnollisten binäärilukujen lisäksi pulssiekikon binäärilukujen koodaamisessa voidaan käyttää BCD-lukuja ja Gray-koodia. Absoluuttienkooderi sopii hyvin tahtikoneen anturiksi, koska sen avulla voidaan määrittää roottorin asento heti käynnistystilanteessa. (9, s. 4:13-4:16.)



Kuva 14. Absoluuttienkooderin pulssikiekon reikäkuviointi. Mustat alueet kuvaavat rei'itettyjä sektoreita.

3.4.2 Hall-anturi

Hall-anturi koostuu litteästä, tavallisesti piistä valmistetusta johtimesta ja jännitteen mittausta-, vahvistus- ja suodatuselektronikasta. Hall-anturin toiminta perustuu Hall-ilmioon, jonka Edwin Hall löysi opinnäytetyön teon yhteydessä vuonna 1879. Kun virta kulkee litteässä johtimessa ja johdin asetetaan ulkoiseen magneettikenttään, syntyy johtimen eri puolille jännite seuraavasti:

$$U = I * B * k_H \quad (26)$$

U on syntyvä jännite

I on litteän johtimen virta

B on magneettivuon tiheys

k_H on materiaalista riippuva Hall-vakio

Jännite syntyy siis kohtisuoraan johtimen virtaa vastaan ja se on tavallisesti pieni. (9, s. 4:9.) Magneettikentän aikaansaamaa poikittaista voimaa kutsutaan Lorentzin voimaksi (10, s. 124). Pientä Hall-jännitettä vahvistetaan anturiin kuuluvalla mittauselektronikalla. Tahtimoottorissa Hall-antureita asetetaan moottorin sisään roottorin asennon määrittämiseksi. Hall-anturi on halpa ja sitä käytetään paljon edullisissa sovelluksissa, kuten kellojen ja CD-asemien moottoreissa. Yksinkertaisessa moottorisovelluksessa jännite voidaan jopa kytkeä oikeaan staattorin käämiin suoraan Hall-anturin vahvistetun jännitesignaalin perusteella (5, s. 440).

3.4.3 Resolverit

Resolveri on anturi, jolla voidaan mitata kulmaa ja siten esimerkiksi sähkömoottorissa roottorin asentoa. Resolverin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Resolverin perusrakenne muistuttaa sähkömoottorin rakennetta. Tavallisimmassa rakenteessa roottorilla on yksi käämi, johon syötetään vaihtojännitettä tavallisesti 400–4000 Hz taajuudella. Jännitteen tehollisarvot ovat tavallisesti 12, 26, 90 tai 115 volttia. Jännite syötetään roottoriin hiiliharjojen välityksellä. Harjattomiakin resolvableita on olemassa: tällöin vaihtojännite syötetään roottorille pyörivän muuntajan välityksellä. Staattorilla on tavallisesti kaksi käämiä 90 asteen kulmissa toisiinsa nähden. Roottorille syötettävä vaihtojännite on muotoa

$$u = \hat{u} * \sin(\omega(t)) \quad (27)$$

u on jännitteen hetkellisarvo

\hat{u} on jännitteen huippuarvo

ω on kulmanopeus $2 * \pi * f$ (f on taajuus)

t on aika

Staattorin käämeihin indusoituville jännitteillä on 90 astetta vaihe-eroa toisiinsa nähden, joten ne ovat muotoa

$$u_1 = K_1 * \sin(\theta r) * \sin(\omega(t) + \varphi_1)$$

ja

$$u_2 = K_2 * \cos(\theta r) * \sin(\omega(t) + \varphi_2)$$

(28, 29)

θr on resolverin roottorin kulma

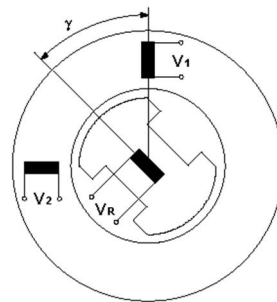
K_1 ja K_2 ovat laitekohtaisia vakioita

φ_1 ja φ_2 ovat signaalien vaihesiirtoja

Ideaalitapauksessa vaihesiirrot ovat nollia ja laitevakiot yhtä suuria, jolloin periaatteessa kulma θr saadaan ratkaistua kaavalla

$$\theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{u_1}{u_2}\right) \quad (30)$$

Resolverin mittauselektroniikka laskee indusoituneiden jännitteiden u_1 ja u_2 suhteista roottorin kulman. (11, s. 3-6.) Jännitteitä voidaan käsitellä analogisina tai digitaalisina, jolloin niille tehdään A/D (Analog to Digital)–muunnos. Shannonin teoreeman mukaan A/D–muuntimen näytteenottotaajuuden on oltava vähintään kaksi kertaa niin suuri kuin syöttöjännitteen taajuuden, jotta laskostumista ei tapahdu. Käytännössä taajuus on vähintään viisinkertainen muunnettavan signaalin maksimitaajuuteen nähden. Tällöin virhe signaalin amplitudissa on noin 5 prosenttia. (18, s. 116.)



Kuva 15. Resolverissa staattorin käämit ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden.

Todellisissa sovelluksissa resolverin mittaustarkkuuteen vaikuttavat roottorin ja staattorin valmistuksessa käytettyjen kuparikäämien ja rautalaminaattien toleranssit, valmistusmenetelmät, resolverin koko ja pyörimisnopeus, sillä pyörimisnopeuteen verrannollisena kasvava BEMF (Back Electro Magnetic Force) tai CEMF (Counter Electro Magnetic Force) eli vastasähkömotorinen voima aiheuttaa mittaukseen epätarkkuutta. Resolveri on rautalaminaatteja ja kuparia sisältävän rakenteensa johdosta tavallisesti raskas ja sillä on melko suuri hitausmomentti kokoonsa nähden. Toisaalta se on mekaanisesti kestävä, luotettava ja sietää hyvin häiriöitä verrattuna muihin analogisiin antureihin. On myös olemassa resolversia, joissa vaihtojännite syötetään staattorille. Tällaisessa resolverissa toinen staattorin käämi on oikosuljettu ja roottorissa on kaksi käämiä. Roottorin käämin indusoitunut vaihtojännite johdetaan hiiliharjojen välityksellä mittauselektronikalle. Sopivalla elektronikalla toteutettuna resolverin avulla voi mitata paitsi roottorin asentoa, myös pyörimisnopeutta ja –suuntaa. (11, s. 3-11.)

3.5 Tahtimoottorin ja oikosulkumoottorin ohjaus

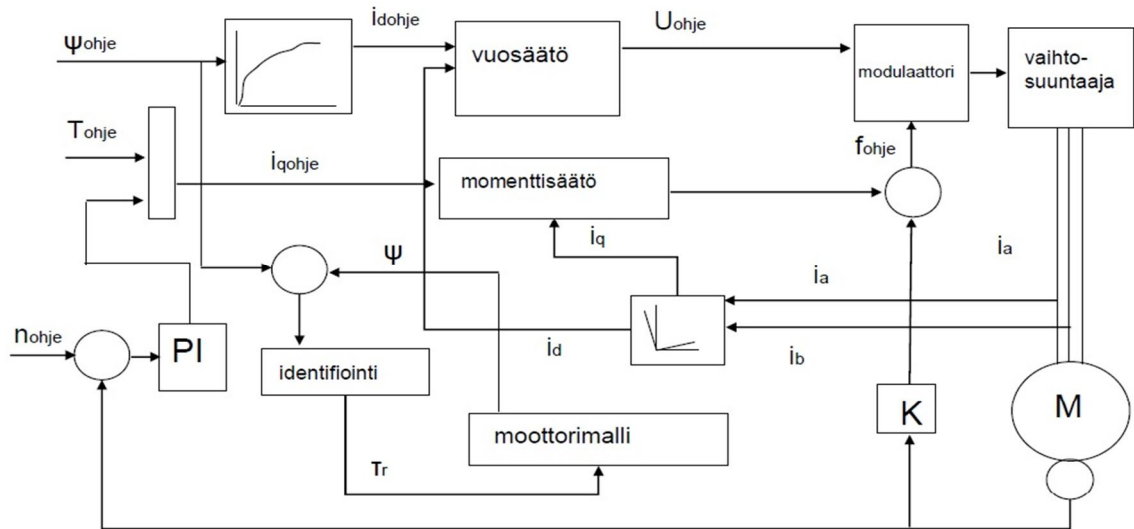
3.5.1 Yleistä

Käytettäessä oikosulkumoottoria tai tahtimoottoria ajoneuvon voimanlähteenä tarvitaan korkeajänniteakun ja ajomoottorin väliin invertteri eli vaihtosuuntaaja, joka muuttaa akusta otettavan tasajännitteen ja -virran moottorille sopivaksi vaihtojännitteeksi ja -virraksi. Moottorin vääntömomenttia säädellään kaasupolkimen asentoa muuttamalla, joten vaihtosuuntaajan tulee voida myös muuttaa ajomoottorille syötettävän jännitteen taajuutta ja amplitudia näin säätäen moottoriin kulkevaa virtaa ja moottorin tuottamaa vääntömomenttia. Vaihtojännitteen ja -virran aaltomuoto voi olla kanttiaaltomuotoista kuten ns. harjattoman DC-moottorin tapauksessa, mutta tavallisimmin vaihtosuuntaajan tuottamaa siniaaltoa.

3.5.2 Vektorisäätö

Ajoneuvokäytössä moottorin säädöltä vaaditaan enemmän kuin mihin yksinkertainen skalaariohjaus kykenee. Skalaariohjausta on käytetty perinteisesti yksinkertaisissa sovelluksissa, joissa ollaan lähinnä kiinnostuneita säätämään toimilaitetta pyörittävän oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta eikä sitäkään välttämättä kovin tarkasti. Tällaisia sovelluksia ovat muun muassa pumput, puhaltimet ja kuljettimet. (21, s. 14.) Tahtimoottoreita on toki mahdollista ohjata skalaarisäädöllä, mutta ajoneuvokäytössä kiinnostuksen kohteena on ensisijaisesti moottorin vääntömomentin säätö. Moottorin pyörimisnopeus riippuu ajoneuvon ajonopeudesta. Ajonopeus riippuu puolestaan kuormituksesta eli ajovastusvoimista ja mahdollisesta kiihdytysvastuksesta sekä moottorin tuottamasta vääntömomentista. Näin ollen useimmat ajoneuvokäyttöön tarkoitetut vaihtosuuntaajat toimivat vektorisäätöperiaatteella. Toisin kuin skalaarisäädössä, jossa säädettäviä suureita ovat taajuus ja syöttöjännitteen amplitudi, säädetään vektorisäädössä moottorin vääntömomenttia. Vektorisäädöllä saavutetaan hyvä säädön dynamiikka muutostilanteissa. (21, s. 15.) Tämä tarkoittaa, että kuormituksen vaihdella tavalla, jota ei kyetä ennakoimaan, voidaan moottorin vääntömomenttia säätää vastaamaan kulloistakin kuormitustilannetta. Vektorisäädön huono puoli on se, että laskennassa tarvittavat parametrit, kuten käämien resistanssit, muuttuvat käytön aikana.

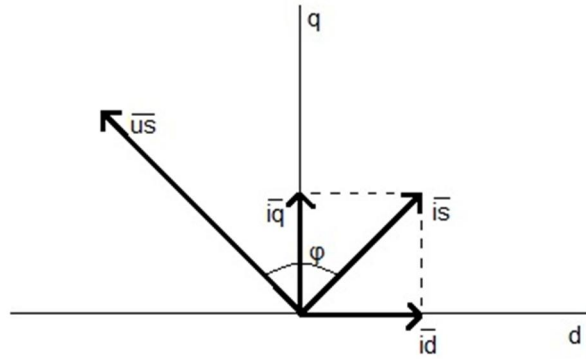
Sekä oikosulkumoottoreilla että tahtimoottoreilla nopeat vääntömomentin muutokset ovat mahdollisia vain staattorin magneettivuota muuttamalla (18, s. 79).



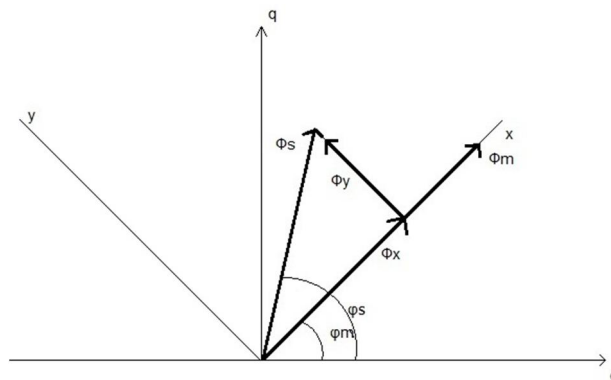
Kuva 16. Vektorisäädön lohkokaavio.

Vektorisäätö vaatii ainakin vaihevirtojen sekä roottorin pyörimisnopeuden ja aseman tarkkaa mittausta eli takaisinkytkentöjä prosessista säätimelle. Vaihtosuuntaajan toimintaa ohjaavan mikro-ohjaimen muistissa on moottorin matemaattinen malli, johon mittaustiedot syötetään. (21, s. 15.) Lisäksi mikro-ohjaimen muistissa on moottorin parametrit, jotka sinne on syötetty käyttöönoton yhteydessä. Kuvassa 16 on esitetty vektorisäädön lohkokaavio. Moottorin pyörimisnopeus voidaan mitata sopivalla anturilla, jotka on esitelty aiemmin. Vaihevirrat i_a ja i_b mitataan, jolloin vaihevirta i_c voidaan laskea melko helposti mitattujen virtojen perusteella, kun muistetaan, että virtojen summa on nolla. Virtojen d- ja q-komponentit selvitetään koordinaatistomuunnoksen avulla ja niitä verrataan vääntömomenttiohjeen mukaisiin arvoihin.

Matemaattisessa mallissa moottorin magneettivoita, virtoja ja jännitteitä tarkastellaan kompleksilukukoordinaatistossa, niin sanotussa dq-koordinaatistossa, joka on "kiinnitetty" roottoriin. Aiemmin esitetty staattorivirta \vec{i}_s voidaan jakaa imaginaari- ja reaali-komponentteihin \vec{i}_q ja \vec{i}_d . Moottorin vääntömomentti voidaan esittää myös siten, että kaavan (20) ilmevälin magneettivuon ja staattorivirran ristitulo korvataan tulon tekijällä $(\Phi_{SD} * i_q - \Phi_{SQ} * i_d)$. Magneettivuot Φ_{SD} ja Φ_{SQ} johtuvat käämijohtimien induktansseista. (18, s. 100–103.)



Kuva 17. Staattorivirran muodostuminen i_q - ja i_d -komponenteista.



Kuva 18. Staattorin magneettivuon muodostuminen x - ja y -komponenteista.

Tahtimoottorin vektorisäätö eroaa hieman oikosulkumoottorin vektorisäädöstä, jossa moottorin magneettivuota ja vääntömomenttia säädetään erikseen staattorivirran d - ja q -komponenteilla. Koska tahtimoottorissa staattorin magneettivuon tarkoituksena ei ole indusoida roottoriin virtaa, vektorisäädön ajatuksena on säätää staattorin käämivuota Φ_s säätämällä komponentteja i_q ja i_d . Komponenttien suuruudet voidaan ratkaista dq -koordinaatistossa käyttämällä apuna xy -koordinaatistoa.

Vääntömomenttiohje muunnetaan vastaavaksi staattorin käämivuon vektoriksi Φ_s , jolla on dq -koordinaatistossa tietty pituus ja kulma φ_s . Dq -koordinaatistoon on lisätty xy -apukoordinaatisto siten, että sen x -akseli kulkee samojen pisteiden kautta kuin roottorivuon vektori Φ_m dq -koordinaatistossa. Myös sekä dq -koordinaatiston että xy -koordinaatistojen origojen tulee sijaita samassa pisteessä. Roottorivuon vektorin Φ_m pituus ja kulma φ_m tunnetaan jo etukäteen mikro-ohjaimen muistiin syötettyjen parametrien ja roottorin asennon mittaustiedon perusteella. Vektori Φ_s muodostuu xy -

koordinaatistossa komponenteista Φ_X ja Φ_Y . Niitä vastaavat virrat i_X ja i_Y saadaan ratkaistuksi ennalta tunnetun staattorin hajainduktanssin L_σ avulla kaavoista

$$i_X = \frac{\Phi_X - \Phi_m}{L_\sigma}$$

ja

$$i_Y = \frac{\Phi_Y}{L_\sigma}$$

(31, 32)

Kun virtakomponentit i_X ja i_Y on ratkaistu, voidaan virtakomponentit \vec{i}_q ja \vec{i}_d , tai tarkemmin niitä edustavien vektorien pituudet, ratkaista kaavoista

$$\vec{i}_q = i_X * \sin(\varphi_m) + i_Y * \cos(\varphi_m)$$

ja

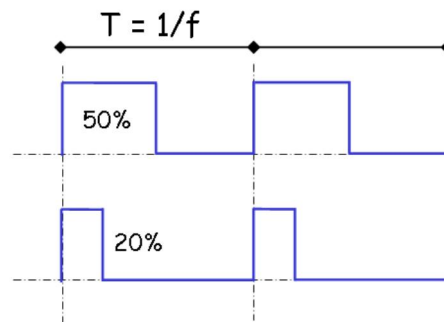
$$\vec{i}_d = i_X * \cos(\varphi_m) - i_Y * \sin(\varphi_m)$$

(33, 34)

Kuvassa vektorien Φ_S , Φ_X ja Φ_Y muodostaman kolmion pinta-ala on verrannollinen vääntömomenttiohjeen ja sitä kautta vääntömomentin suuruuteen. Kolmiolla on tietty suurin mahdollinen pinta-ala eli suurin mahdollinen moottorin tuottama vääntömommentti. Pinta-ala riippuu paitsi vektorien pituuksista, myös kulmien φ_S ja φ_m erotuksesta eli tehokulmasta. Tehokulman kasvaessa liikaa kolmion pinta-ala eli vääntömommentti alkaa pienentyä. Niinpä vääntömomenttiohje rajoitetaan siten, että edellä mainittu kulmien erotus ei pääse kasvamaan liian suureksi. (18, s. 106-109.) Käytännössä kulman kasvaminen liian suureksi tarkoittaisi kohdassa "Tahtimoottorin toimintaperiaate" kuvailtua tilannetta, jossa kulma α kasvaa yli 90 asteen, jolloin moottorin synkroninen toiminta menetetään. Kulma kasvaa liian suureksi myös silloin, kun vääntömommentti pienenee kuormituksen edellyttämää vääntömomenttia pienemmäksi kentänheikennyksessä ja moottori kippaa. Kuten kuvasta 16 nähdään, halutun vääntömomentin perusteella laskettu virtaohje muutetaan lopulta taajuus- ja jänniteohjееksi, jonka perusteella tehoasteen transistoreita ohjataan.

3.5.3 Tehoasteen toimintaperiaate

Vaihtosuuntaajia on jännite- ja virtavälipiirillisiä (21, s. 11). Tyypillisessä 230 V 50 Hz sähköverkkoon kytkettävässä taajuusmuuttajassa on tavallisesti tasasuuntaus-, DC-välipiiri- ja vaihtosuuntausosiot. Koska ajoneuvokäytössä vaihtosuuntaajan syöttöjännite otetaan akusta tasajännitteenä, ei tasasuuntausosiota tarvita. Tavallisimmin vaihtosuuntaajan toiminta perustuu pulssinleveysmodulaation (PWM) käyttöön muutettaessa tasajännite vaihtojännitteeksi. Pulssinleveysmodulaatiolla voidaan alentaa tasajännitettä hyvällä, tavallisesti yli 90 % hyötysuhteella. Vaihtosuuntaajien hyötysuhteet ovatkin yleensä jopa 95–97 %. Pulssinleveysmodulaatiossa tasajännitteen aaltomuoto on kanttiaaltoa (kuva 19).



Kuva 19. Pulssinleveysmodulaatio eri pulssisuhteilla.

Kuvan 19 prosenttilukuja kutsutaan pulssisuhteeksi D (Duty Cycle). Pulssisuhde on PWM:ssä keskeinen: alennettaessa jännitettä PWM:llä kuorma, jolle jännite syötetään, "näkee" jännitteen siten, että alennetun jännitteen keskiarvo U_{ka} on

$$U_{ka} = D * U_i \quad (35)$$

ja

$$D = \frac{T_1}{T_j} \quad (36)$$

U_i on alennettava jännite

U_{ka} on alennetun jännitteen keskiarvo

T_1 on pulssin kesto

T_j on jaksonaika

PWM:ää tuotetaan transistorien avulla saattamalla transistorit vuoroin johtavaan ja vuoroin johtamattomaan tilaan niitä ohjaavan modulaattorin avulla. PWM:llä on hyvä hyötysuhde siksi, että jännitettä katkotaan sen mukaan, mikä jännitetaso halutaan, jolloin sähkötehoa otetaan lähteestä vain sen verran kuin tarvitaan. Syntyvät häviöt ovat lähinnä transistorien kytkentä- ja päästötilahäviöitä. PWM-signaalin taajuus eli transistorien kytkentätaajuus f on tavallisesti 3-30 kHz, jolloin yhden jakson jaksonaika T_j on

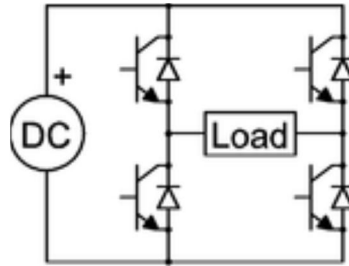
$$T_j = \frac{1}{f} \quad (37)$$

PWM-signaalin jaksonaika on tavallisesti 0,3-0,03 ms. Vaikka signaali koostuu jaksoista, jolloin jännite on huipussaan, ja jaksoista, jolloin jännite on nolla, tapahtuu vaihtelu niin nopeasti, että kuorma "näkee" signaalista vain sen tehollisen arvon. Nopea katkomistaajuus pienentää häviöitä (17, s. 18-19). Jos halutaan, että signaalista jäävät nopeat jänniteenvaihtelut pois, se johdetaan LC-alipäästösuodattimen läpi. Tämä aiheuttaa kuitenkin jonkin verran häviöitä.

Vaihtojännitteen olemukseen kuuluu, että se on jaksollinen ja että jännitteen napaisuus vaihtuu kerran yhden jakson aikana. Koska ajoneuvokäytössä akun napaisuus ei voi vaihtua missään vaiheessa, tarvitaan kytkentä, jolla virta saadaan kulkemaan kuorman läpi yhden jakson aikana kahdesta suunnasta. Kuorma on monivaiheisen ja -napaisen moottorin tapauksessa staattorin käämien muodostama kuorma, joka voidaan ajatella käämin induktanssin ja resistanssin sarjaankytkennäksi. Tarkkaan ottaen staattorin käämin vastinpiiriin kuuluu induktanssin ja resistanssin lisäksi vielä rinnankytketty kapasitanssi, sillä käämillä on aina hieman hajakapasitanssia. Napaisuuden vaihtelun mahdollistaa se, että virran kytkevät ja sammuttavat transistorit on kytketty kuormaan nähden niin sanottuun H-siltaan, joka on yksinkertaisimmillaan esitetty kuvassa 20.

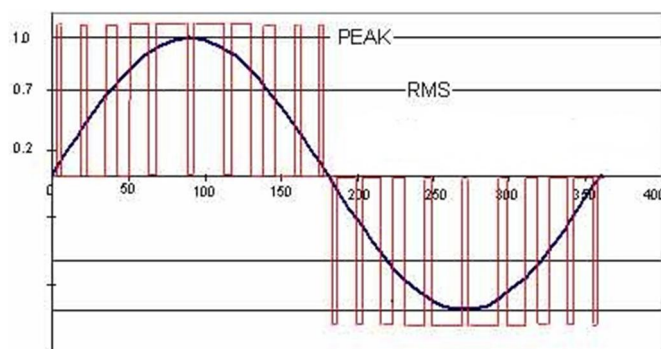
Kuvan 20 kuorma, johon halutaan syöttää vaihtojännite, on kytketty neljään transistoriin. Vaihtojännitteen ensimmäisen puolijakson aikana kuormasta katsottuna vasemmalla ylhäällä ja oikealla alhaalla olevat transistorit ovat kytkettyinä johtavaan tilaan, jolloin virran ajatellaan kulkevan kuormassa oikealta vasemmalle. Kaksi muuta transis-

toria ovat johtamattomassa tilassa koko puolijakson ajan. Toisen puolijakson alussa, kun napaisuus vaihtuu, kytketään ensimmäisen puolijakson aikana johtavassa tilassa olleet transistorit kokonaan johtamattomaan tilaan ja vasemmalla alhaalla ja oikealla ylhäällä olevat transistorit johtavaan tilaan, jolloin virta kulkee kuormassa oikealta vasemmalle. Näin on suoritettu kuormasta katsottuna yksi vaihtojännitteen jakso.



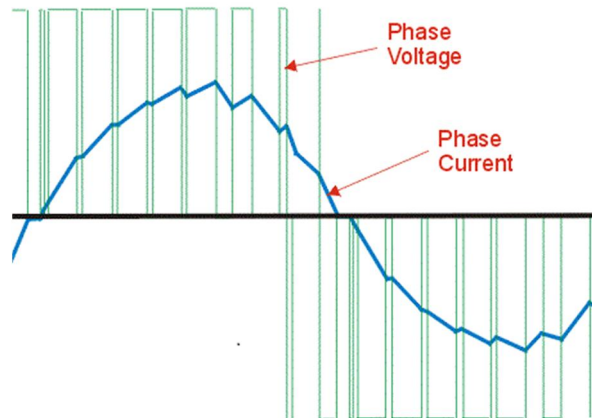
Kuva 20. Yksinkertainen H-siltakytkentä.

Edellä mainitun lisäksi moottoria ohjattaessa halutaan, että kuorman eli staattorin käämien yli oleva jännite ja niissä kulkeva virta vaihtelevat ajan suhteen sinimuotoisesti. Kuten aikaisemmin on todettu, jännite ei ole puhtaasta sinimuotoista vaihtojännitettä vaan PWM:n avulla approksimoitua. Tämä tarkoittaa, että tuotettaessa yksi vaihtojännitejakso muutetaan PWM:n pulssisuhdetta ajan suhteen "sinimuotoisesti" eli siten, että kullakin ajanhetkellä jännitteen keskiarvo U_o vastaa sellaisen sinimuotoisen jännitteen hetkellisarvoa, jota halutaan jäljitellä. Kuva 21 selventää asiaa.



Kuva 21. PWM:n avulla jäljitely siniaalto. PWM:n pulssisuhde muuttuu ajan suhteen siten, että jännitteen keskiarvoarvo vastaa kullakin ajanhetkellä vastaavan sinimuotoisen vaihtojännitteen hetkellisarvoa.

PWM:n avulla voidaan säätää kuormaan syötettävän vaihtojännitteen taajuutta ja amplitudia. Vaikka jännitteessä on nopeita vaihteluita, staattorien käämien läpi kulkeva virta on lähes sinimuotoista. Tämä johtuu käämien induktanssista, joka vastustaa nopeita virran muutoksia ja pyrkii pitämään käämien läpi kulkevan virran jatkuvana jännitteen alentuessa käämejä ympäröivän magneettikentän energian avulla (kuva 22).

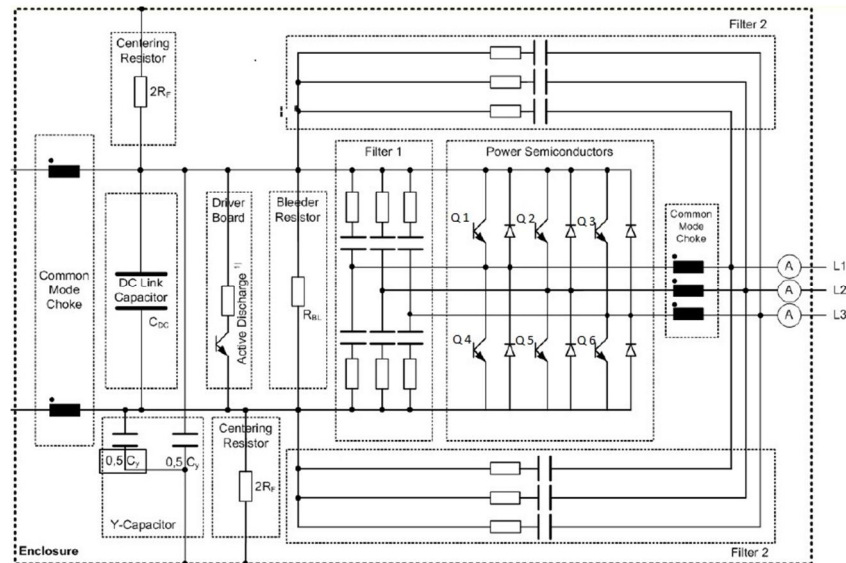


Kuva 22. PWM:n avulla approksimoitu vaihtojännitejakso (vihreä) ja staattorien käämin virta (sininen).

3.5.4 Tehoasteen rakenne

Kuvassa 23 on esitetty erään kolmivaihemoottorin jännitevälipiirillisen vaihtosuuntaajan tehoasteen rakenne. Tehoasteeseen liittyy kondensaattorilla toteutettu välipiiri (DC link capacitor), jonka tehtävänä on pitää jännite tasaisena. Tehoasteessa tarvitaan vähintään kuusi kytkintransistoria (Q1-Q6), joiden avulla ohjauselektronikka tuottaa symmetristä kolmivaiheista vaihtojännitettä. Kytkintransistorit muodostavat niin sanotun puolislittakytken. Jännite syötetään moottorin vaihejohtimiin L1, L2 ja L3. Jännitteiden välinen vaihe-ero on 120 astetta. Symmetriselle kolmivaiheiselle vaihtojännitteelle on voimassa, että millä tahansa ajanhetkellä t $u_{L1}(t) + u_{L2}(t) + u_{L3}(t) = 0$, joten ns. nolla- tai paluujohdinta ei tarvita, sillä siinä ei kulkisi virtaa (13, s. 4). Kuvan 23 kytkintransistorien Q1...Q6 rinnalle kytkettyjen diodien tehtävä on suojata transistoreita virran katkaisuhetkellä staattorien käämien yli indusoituvalta jännitteeltä. Virran katketessa käämin induktanssi aiheuttaa sen, että käämin yli pyrkii vaikuttamaan syöttöjännitteelle napaisuudeltaan vastakkainen jännite, jolloin virta pyrkii siis kulkemaan transistoreita kohti. Koska transistori on tällöin johtamattomassa tilassa, syntyy ilman ohitusdiodeja

transistorin emitterin ja kollektorin välille jännite, joka saattaa olla riittävän korkea tuhoamaan transistorin.

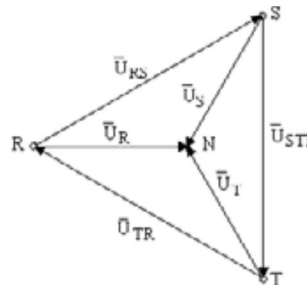


Kuva 23. Kolmivaihemoottorin vaihtosuuntaajan tehoaste.

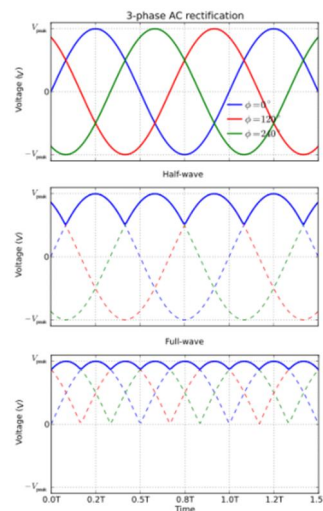
Näistä diodeista on eräs toinenkin hyöty. Moottorijarrutustilanteessa, kun moottori pyörii eikä siihen syötetä virtaa vaan se itse tuottaa kolmivaihejännitettä, virta alkaa kulkea moottorilta transistoreille ja välipiiriin päin. Ohitusdiodit tasasuuntaavat tämän jännitteen kätevästi tasajännitteeksi, jolla voidaan jarrituksen aikana ladata akkua. Tasasuunnattu jännite on muodoltaan sykkivää, mutta DC-välipiirin kondensaattori tasaa jännitettä jonkin verran. Vaihejännitteiden amplitudit riippuvat pääasiassa roottorin pyörintänopeudesta ja staattorien käämien johtimien kierrosluvuista sähkömagneettisen induktion kaavojen mukaisesti. Moottoriin siis sekä syötetään kolmivaiheista vaihtojännitettä että se tuottaa sitä itse aina roottorin pyöriessä. Tasajännitteen huippuarvo on

$$\hat{u} = U_{RMS} * \sqrt{2} \quad (38)$$

jossa U_{RMS} on pääjännitteen tehollisarvo. (12, s. 10-12.)



Kuva 24. Symmetrisen kolmivaihejärjestelmän vaihejännitteet U_R , U_S ja U_T sekä pääjännitteet U_{RS} , U_{ST} ja U_{TR} vektoreina.



Kuva 25. Kolmivaiheisen vaihtojännitteen tasasuuntaus. Ylimpänä kolmivaiheinen vaihtojännite, keskellä kolmivaihejännite puolialtotasasuunnattuna ja alimpana kolmivaihejännite kokoaaltotasasuunnattuna.

Tuottaessa sinimuotoista vaihtojännitettä PWM:n avulla syntyvät useita korkeataajuisia ja sinimuotoisia jännitekomponentteja, kuten kohdassa "Suurista taajuuksista johtuvat häviöt ja hystereesihäviöt" on esitetty. Näiden transienttien pääsy vaihtosuuntaajasta siirtokaapeleita pitkin halutaan estää, sillä ne saattaisivat aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä. Häiriösuojaukseen käytetään yhteismuotokuristimia (kuvassa 23 common mode choke) ja vaimentimia (snubber, kuvassa 23 filter 1 ja filter 2). Yhteismuotokuristimia on kuvan 23 vaihtosuuntaajassa kaksi ja yleisesti ne koostuvat vähintään kahdesta rinnankytketystä käämistä. Yhteismuotokuristimien toiminta perustuu kelojen induktanssiin, joka hidastaa virran kulkua käämin läpi. Yhteismuotokuristin päästää erimuotoiset virrat lävitseen mutta estää samanmuotoisten virtojen kulun.

Kuvan 23 suodattimet (filter 2) sekä transistorikytkinten ja ulostulonapojen väliin sijoitettu yhteismuotoinen kuristin muodostavat ulostulolle LC-sarjaresonanssisuodattimen, jonka tarkoitus on suodattaa ulostulojännitteestä suuritaajuiset komponentit pois. Sarjaresonanssisuodattimen toiminta perustuu sarjaankytkettyjen kondensaattorin ja käämin resonanssitaajuuteen, jolla piirin impedanssi on pienimmillään. Käämin induktanssi pyrkii hidastamaan sen läpi kulkevan virran muutoksia sitä enemmän, mitä nopeammin käämin yli oleva jännite vaihtelee. Tätä kutsutaan induktiiviseksi reaktanssiksi:

$$X_L = j * \omega * L \quad (39)$$

X_L on induktiivinen reaktanssi

ω on kulmanopeus eli $2 * \pi * f$

j on imaginaariyksikkö

L on induktanssi

Taajuuden kasvaessa induktiivinen reaktanssikin kasvaa ja on myös riippuvainen induktanssista. Toisaalta kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi pienenee taajuuden kasvaessa, sillä se on kulmanopeuden ja kapasitanssin C tulon käänteisarvo:

$$X_C = \frac{1}{-j * \omega * C} \quad (40)$$

Piirin impedanssi Z lasketaan Pythagoraan kaavalla piirin resistanssin sekä kapasitiivisen ja induktiivisen reaktanssin erotuksen summasta:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (41)$$

Z on impedanssi

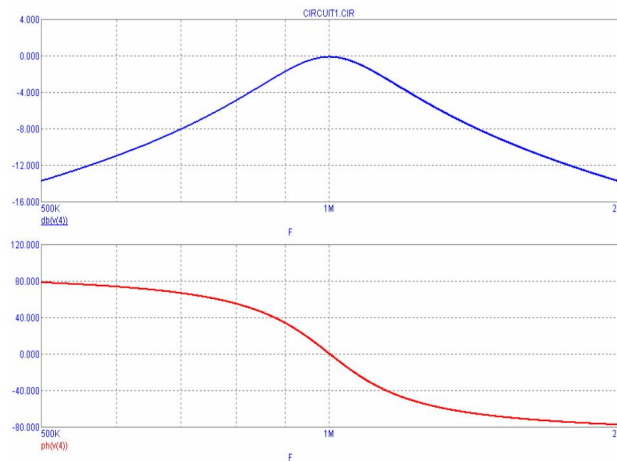
R on resistanssi

Koska induktanssi vastustaa virran kulkua sitä enemmän ja kapasitanssi sitä vähemmän, mitä suurempi taajuus on, impedanssi on tietyllä komponenttiarvoista riippuvalla resonanssitaajuudella f_{RES} pienin mahdollinen:

$$f_{RES} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

(42)

Sarjaresonanssipiirin läpi kulkee suurin mahdollinen virta resonanssitaajuudella. Kuvassa on esitetty sarjaresonanssipiirin amplitudi ja vaihevasteet taajuuden funktiona. Resonanssitaajuudella piirin vaihesiirto on nolla. LC–sarjaresonanssipiirejä käytetään suodattimina, koska hyötysignaali vaimenee suodattimen läpi kulkiessaan vain vähän käämin pienen resistanssin ansiosta. (2, s. 192-194.)



Kuva 26. LC –sarjaresonanssipiirin amplitudivaste (sininen) ja vaihevaste (punainen) taajuuden funktiona.

Kuvan 23 kaksi niin sanottua balansointivastusta (centering resistor) huolehtivat siitä, että välipiirin ja vaihtosuuntaajan metallikuoren potentiaaliero pysyy samana eikä pääse muuttumaan. Jarrukatkoja ja –vastus (active discharge) huolehtivat siitä, että välipiirin jännite ei pääse nousemaan niin korkeaksi, että se voisi tuhota välipiiriin liitettyjä komponentteja. Jännitteen noustessa hälyttävälle tasolle vaikkapa moottorijarrutustilanteessa, kun akkuun ei ehkä kyetä varastoimaan moottorin tuottamaa sähköenergiaa, jarrukatkojatransistorin toimintaa ohjaava elektroniikka havaitsee jännitteen nousun ja kytkee transistoria vuoroin johtavaan ja johtamattomaan tilaan. Tällöin virta pääsee kulkemaan jarruvastuksen läpi ja sähköenergia muuttuu vastuksessa lämmöksi. Laitteen käytön loputtua välipiirin kondensaattoriin jäänyt sähkövaraus pääsee purkautumaan purkuvastuksen (bleeder resistor) läpi. Purkuvastuksen resistanssi on niin suu-

ri, että käyttöjännitteellä sen läpi kulkee vain pieni virta ja normaalikäytön aikana sen aiheuttama tehohäviö jää pieneksi.

3.5.5 Komponentit

Vaihtosuuntaajissa varsinaisen työn tekevät tehotransistorit. Eräissä taajuusmuuttajissa käytetään myös tyristereja, erityisesti GTO (Gate Turn Off)-tyristereja, mutta siihen ei mennä tässä yhteydessä. Ajoneuvokäytössä akkujen napajännite on satoja voltteja ja moottorit ovat suuria. Niiden vääntömomentit ovat satojen newtonmetrien luokkaa ja moottoreiden ottamat virrat saattavat olla useita satoja ampeereja. Tästä syystä tehotransistoreilta vaaditaan suurta virran- ja jännitteenkestoa. Esimerkiksi kuvan 23 tehoasteessa voitaisiin jokaista kuvassa näkyvää transistoria kohti käyttää todellisuudessa esimerkiksi kolmea rinnankytkettyä transistoria suuremman virrankeston takaamiseksi.

Käytännön laitteissa käytetään tavallisesti transistorimoduuleita (kuva 27) joihin transistorit on kytketty valmiiksi rinnakkain. Tehoasteissa käytettäviksi transistoreiksi sopivat parhaiten MOSFET-transistorit (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ja IGBT-transistorit (Insulated Gate Bipolar Transistor). Käytännössä IGBT-transistori on yleisin transistorityyppi, jota käytetään näissä sovelluksissa.



Kuva 27. IGBT-transistorimoduuli.

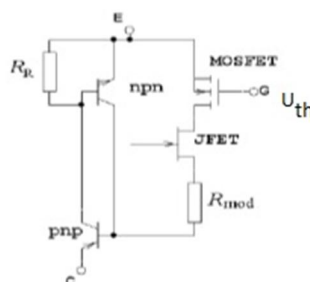
IGBT-transistori on tavallaan bipolaaritransistorin (BJT, Bipolar Junction Transistor) ja MOSFETin yhdistelmä. IGBT-transistori on syrjäyttänyt MOSFETin vaihtosuuntaajien tehoasteissa siitä syystä, että sen päästötilan resistanssi R_{mod} on pienempi kuin MOS-

FETilla (12, s. 16). Koska lämpötehon P määrä komponentissa riippuu komponentin resistanssista R ja virran I neliöstä kaavan

$$P = R * I^2 \quad (43)$$

mukaan, on pienikin ero päästötilan resistanssiarvoissa kahden komponentin välillä merkittävä operoitaessa suurilla virroilla. Tehoasteiden komponenttien lämmönkesto ja kuumeneminen sekä hukkalämmön poiston rajallinen kapasiteetti ovat merkittävimmät vaihtosuuntaajien suorituskykyä ja komponenttien kestoikää rajoittavat tekijät. Tällä hetkellä tehokkaimmat IGBT-transistorit kestävät yli 1000 ampeerin virran ja yli 3000 voltin jännitteen. IGBT-transistori kuluttaa hyvin vähän ohjausvirtaa MOSFETin tapaan ja kytkeytyy päälle ja pois nopeasti kuten MOSFET. (12, s. 16.) Häviöt kasvavat sitä suuremmiksi, mitä nopeammin transistoria sytytetään ja sammutetaan. Kuvassa 28 on esitetty IGBT-transistorin sijaiskytkentä.

Kytettäessä IGBT johtavaan tilaan tuodaan kynnysjännitteen U_{th} ylittävä jännite MOSFET-osan hilalle G . Kuten MOSFETilla, hila muodostaa tavallaan kondensaattorin toisen levyn, joten ohjausvirtaa ei varsinaisesti kulje transistoriin lainkaan lukuun ottamatta pientä vuotovirtaa. Hilan kapasitanssi on pieni, tavallisesti pikofaradiluokkaa, joten hilan muodostama "levy" varautuu nopeasti ja transistori alkaa johtaa. MOSFETin lisäksi rakenteeseen kuuluvat JFET-kanavatransistori sekä PNP- ja NPN -bipolaaritransistorit. MOSFET-osa puolestaan ohjaa PNP-transistorin kantavirtaa.



Kuva 28. IGBT-transistorin sijaiskytkentä.

Tällöin transistorin virta kulkee pääasiassa vastuksen R_{MOD} sekä NPN- ja MOSFET-transistorien kautta, jolloin syntyy tehohäviö päästötilan resistanssin R_{MOD} takia. Resis-

tanssi R_R on riippuvainen rungon geometriasta. Päästötilan resistanssin lisäksi tehohäviöitä syntyy kytkettäessä transistori johtavaan tai johtamattomaan tilaan. Nämä kytkentähäviöt johtuvat siitä, että kytkentähetkillä transistoriin vaikuttavat osittain samanaikaisesti sekä suuri jännite että suuri virta. (12, s. 17.)

3.6 AC-moottoreiden häviöt

3.6.1 Resisttiiviset häviöt ja pyörrevirtahäviöt

Resistiivisiksi häviöiksi eli kuparihäviöiksi kutsutaan niitä häviöitä, jotka johtuvat kuparisen käämilangan resistanssista virran kulkiessa sen läpi. Kullakin aineella on tietty resistiivisyys, jolloin kyseisestä aineesta tehdyn johtimen resistanssi riippuu paitsi resistiivisyydestä, myös johtimen pituudesta, poikkipinta-alasta ja lämpötilasta seuraavasti:

$$R = \Delta T * \alpha_R * \rho * \frac{l}{A} \quad (44)$$

α_R on resistiivisyyden lämpötilakerroin

ρ on aineen ominaisresistiivisyys

l on johtimen pituus

A on johtimen poikkipinta-ala

ΔT on lämpötilan muutos

Näin ollen resistanssi on sitä suurempi, mitä korkeampi lämpötila on, mitä pidempi johdin on ja mitä pienempi sen poikkipinta-ala on. (2, s. 40-44.)

Pyörrevirtahäviöt johtuvat siitä, että roottorin pyöriessään aiheuttama liikkuva magneettikenttä lävistäessään staattorin sähköä johtavia rakenteita indusoi sähkömagneettisen induktion yhtälön mukaisesti niihin sähkövirtoja, joiden aiheuttama magnetomotorinen voima pyrkii vaikuttamaan induktion aiheuttaneen magneettivuon magnetomotorisen voiman vastaisesti Lenzin lain mukaan. Näin osa moottorin tuottamasta vääntömomentista joudutaan käyttämään pyörrevirroista aiheutuvien vastavoimien voittamiseen. Pyörrevirtahäviöitä kuvaa seuraava yhtälö:

$$P_p = k * B^2 * f^2 * m \quad (45)$$

P_p on pyörrevirtahäviö

k on johtavan kappaleen ainevakio, joka riippuu kappaleen rakenteesta

B on magneettivuon tiheys

f on magneettivuon vaihtelutaajuus

m on johtavan kappaleen massa.

AC-moottoreissa pyörrevirtahäviöitä pienennetään rakentamalla roottori ja staattori ohuista levyistä yhtenäisen kappaleen sijaan, jolloin kerroin k saadaan pienemmäksi. Pyörrevirtahäviöitä syntyy sekä oikosulkumoottorissa että tahtimoottorissa. (2, s. 280-285.)

3.6.2 Suurista taajuuksista johtuvat häviöt ja hystereesihäviöt

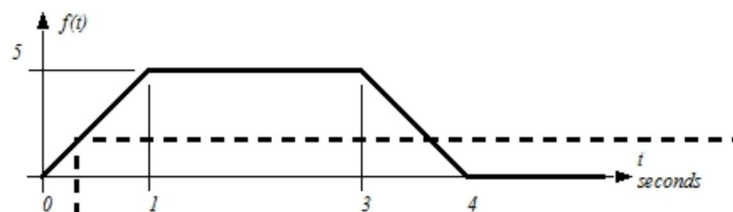
Aikaisemmin on todettu, että AC-moottorin vääntömomenttia ja/tai pyörimisnopeutta ohjaava vaihtosuuntaaja tuottaa staattorin käämeihin syötettävää vaihtojännitettä PWM:n avulla, joka on kantiaaltomuotoista. PWM-signaalin yksi jakso voidaan kuvata Heavisiden askelfunktion muunnoksella esimerkiksi kuvan 29 tapauksessa seuraavasti:

$$f = 5t * (\varepsilon(t) - \varepsilon(t - 1)) + 5 * (\varepsilon(t - 1) - \varepsilon(t - 3)) + 5 * (4 - t) * (\varepsilon(t - 3) - \varepsilon(t - 4)) \quad (46)$$

5 on jännitteen huippuarvo

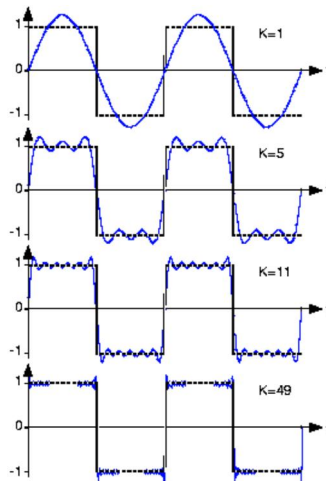
t on koko jakson kesto

ε on Heavisiden askelfunktio



Kuva 29. PWM-signaalin yksi jakso jännitteen nousu- ja laskuaikoineen.

Fourierin muunnoksesta tiedetään, että mikä tahansa jaksollinen funktio, kuten edellä esitetty Heavisiden askelfunktion ja kahden pengerfunktion summa, voidaan esittää sinimuotoisten funktioiden integraalina. Tämä tarkoittaa sitä, että kanttiaaltomuotoinen jännite koostuu useasta tavallaan päällekkäin olevasta siniaallosta, joiden taajuudet ovat perusaallon taajuuden monikertoja. Kuva 30 selventää asiaa. Fourier-analyysin avulla voidaan selvittää minkä tahansa signaalin tapauksessa, mistä taajuuskomponenteista kyseinen signaali koostuu ja mikä kunkin signaalin amplitudi on ja mikä kunkin signaalin vaihe-ero on verrattuna perusaallon vaiheeseen. Kuvassa 30 esiintyvä luku K, joka ilmaisee signaalin jokaisen komponentin taajuuden suhteessa perusaallon taajuuteen, voi saada arvoja väliltä $-\infty \dots \infty$. Kunkin komponentin kohdalla eli millä tahansa kirjaimen K arvolla komponentti voidaan esittää kompleksilukuna, jolloin tämän kompleksiluvun itseisarvo on puolet kyseessä olevan komponentin amplitudista ja kulma perustaajuuden ja kyseessä olevan komponentin välinen vaihe-ero.



Kuva 30. Kanttiaalto koostuu useasta siniaallosta, joiden taajuudet ovat perusaallon (ylimpänä) harmonisia monikertoja. Kirjain K ilmaisee, montako kertaa kyseisen komponentin taajuus f on perusaallon ($K=1$) taajuutta suurempi.

Kullekin K :n arvolle saadaan kompleksinen Fourier-kerroin integroimalla ja koko signaali voidaan esittää näiden Fourier-kertoimien summana ns. Fourier-sarjana. Integrointi tapahtuu seuraavasti:

$$c_K = \frac{1}{T} * \int_0^{T_j} f(t) * e^{-j * K * \frac{2 * \pi}{T} dt}$$

(47)

c_k on Fourier-kerroin

T_j on signaalin jaksonaika

$f(t)$ on signaalia kuvaava funktio, esimerkiksi edellä esitetty pengeri-askelfunktio

j on imaginaariyksikkö

Koska moottorille syötettävä signaali koostuu suuritaajuisesta kanttiaaltojännitteestä, jonka taajuus f voi olla jopa 30 kHz, se sisältää edellä esitetyn perusteella suuritaajuisia sinimuotoisia signaaleja. Aiemmin on todettu, että staattorin käämit, joihin signaali syötetään, ovat induktiivisia ja resistiivisiä kuormia. Vaihtosähköllä induktiivisen kuorman impedanssi Z_L kasvaa taajuuden kasvaessa, koska induktiivinen reaktanssi X_L kasvaa, mikä merkitsee, että staattorin käämi vastustaa virran kulkua sitä enemmän, mitä suurempi taajuus on. Näin ollen kanttiaaltosignaalin suuritaajuiset komponentit aiheuttavat ylimääräisiä häviöitä staattorin käämeissä, ellei niitä suodateta ennen moottorille syöttämistä. Kukin komponentti aiheuttaa oman häviönsä, jonka suuruus riippuu kunkin komponentin taajuudesta ja amplitudista. (14, s. 1-3.) Lisäksi suuritaajuiset komponentit saattavat aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä (16, s. 24).

Hystereesihäviöt johtuvat aineen magneettisista ominaisuuksista. Kun ferromagneettinen aine halutaan magnetoida esimerkiksi virrallisen johtimen aiheuttamalla ulkoisella magneettikentällä, kysymys on itse asiassa siitä, että aineen magneettisten alkeisalueiden magneettikentät, joista jokaisella on sekä pohjois- että etelänapa, halutaan saada asettumaan samansuuntaisiksi. Ulkoisen magneettikentän hävittyä alkeisalueiden magneettikentät jäävät vielä vähäksi aikaa samansuuntaisiksi, kunnes ne hajaantuvat itsensä. Se, kuinka nopeasti alkeisalueiden magneettikentät hajaantuvat, riippuu aineesta. Magneettisesti pehmeiden materiaalien kentät hajaantuvat nopeasti. Kun aineen magneettikentän suuntaa halutaan vaihtaa nopeassa tahdissa AC-moottorin toimiessa, muutetaan ainetta magneetoivan virran kulkusuuntaa jaksollisesti edestakaisin. Virran kulkusuunnan vaihduttua aineen magneettisten alkeisalueiden kentät ovat vielä hetken "väärän" suuntaisia. Ne joudutaan järjestämään sähkövirran aiheuttaman magneettikentän avulla "oikean" suuntaisiksi, kunnes virran kulkusuunta vaihtuu uudelleen. Tämä kuluttaa sähkötehoa, joka on pois varsinaisen mekaanisen tehon tuottamisesta. (2, s. 246-247.)

4 Moottorin valinta

4.1 Eri moottorityyppien sopivuus sovellukseen

4.1.1 Moottorin yleiset vaatimukset

Metropolia Motorsport –formulatiimin siirtyessä rakentamaan sähkökäyttöistä Formula Student –kilpa-autoa kausien 2011 ja 2012 välissä pyritään siihen, että koko konsepti muuttuisi kerralla mahdollisimman vähän. Mahdollisimman pienten muutosten teko polttomoottoriautoon verrattuna mahdollistaa sen, että suunnitteluun käytettävä aika riittää auton suunnitteluun ja auto saadaan rakennettua ajoissa ennen kilpailukautta, jolloin kilpailukautta edeltävänä aikana ehditään testaamaan uutta autoa riittävästi ja tekemään autoon tarvittavia muutoksia. Tämä mahdollisimman pienten muutosten vaatimus asetti tietyt reunaehdot sille, minkälainen sähkömoottori autoon valittaisiin.

Taulukko 3. Formula Student Electric –kilpa-auton moottorin vaatimuksia.

<i>Formula Student Electric –kilpa-auton moottorin vaatimukset</i>
<i>Keveys</i>
<i>Pieni koko</i>
<i>Luotettavuus</i>
<i>Hyvä hyötysuhde</i>
<i>Riittävä teho</i>
<i>Riittävä vääntömomentti</i>
<i>Suurin vääntömomentti laajalla kierroslukualueella</i>
<i>Suurin vääntömomentti heti käynnistyksestä alkaen</i>
<i>Vaatii mahdollisimman vähän huoltoa</i>
<i>Laaja kierroslukualue</i>
<i>Alhainen käyttöjännite</i>
<i>Pieni virrankulutus</i>
<i>Yksinkertainen rakenne</i>
<i>Edullinen hankintahinta, ei lisäkuluja</i>
<i>Tehokas jäähdytys</i>

Uudessa Formula Student Electric –kilpa-autossa käytettävälle moottorille asetettiin useita vaatimuksia. Todettiin, että mieluiten pyrittäisiin kahden moottorin konfiguraatioon, jossa auto olisi takavetoinen kuten aiempinakin vuosina ja kumpaakin takapyörää pyörittäisi oma moottorinsa. Tällöin tarvittaisiin kummallekin moottorille myös oma vaihtosuuntaajansa. Kahden moottorin konfiguraatioon pyritään, jotta ei tarvitsisi enää käyttää mekaanista tasauspyörästä vaan saataisiin aikaan niin sanottu virtuaalinen tasauspyörästä. Virtuaalinen tasauspyörästä tarkoittaa tilannetta, jossa molempia takapyöriä pyörittää oma moottorinsa ja ajoneuvon ajotietokone säätää kaarreaajossa molempien moottorien vääntömomentit sopiviksi kaarteeseen kaarevuussäteen ja muiden parametrien perusteella. Virtuaalisen tasauspyörästä käytöllä voidaan pienentää voimansiirron häviöitä kaarreaajossa ja kaarreaajo-ominaisuudet paranevat. Tämä on merkittävää formula student –kilpa-auton tapauksessa, sillä kilpailuissa ajettava kestävyysosio sisältää paljon mutkia ja suoria osuuksia on vain vähän.

Formula Student –kilpa-auton yleisiä vaatimuksia on lueteltu taulukossa 3. Voidaan pitää selvänä, että aivan kaikki vaatimukset eivät voi toteutua saman moottorin kohdalla, sillä jotkut vaatimukset ovat ristiriitaisia keskenään. Esimerkiksi moottori ei voi kuluttaa vähän virtaa matalalla käyttöjännitteellä ja olla samaan aikaan suuritehoinen, sillä sähkömoottorin ottoteho on aina jännitteen ja virran tulo. Niinpä Formula Student –kilpa-auton moottorinkin valinta on lopulta kompromissi, joka riippuu siitä, mitä auton ja sitä kautta moottorin ominaisuuksia pidetään tärkeimpinä.

4.1.2 Oikosulkumoottorin, tahtimoottorin ja DC–moottorin vertailu

Yleisten vaatimusten määrittelyn jälkeen voitiin päättää, minkä tyyppinen moottori autoon valittaisiin. Vertailu tehtiin oikosulkumoottoreiden ja tahtimoottoreiden välillä. Myöhemmässä vaiheessa harkintaan otettiin myös yksi perinteinen harjallinen DC–moottori. Taulukossa 4 on vertailtu DC–moottoreita, oikosulkumoottoreita ja tahtimoottoreita eräiden oleellisten ominaisuuksien osalta. Taulukosta käy ilmi muutamia seikkoja, joiden takia myöhemmässä vaiheessa tarkasteltiin lähinnä tahtimoottoreita. Ensinnäkin tahtimoottorin hyötysuhde on parempi, koska kestopagneetit tuottavat käytön aikana moottorin magneettivuon ilman ulkoista energiaa. Sitä vastoin oikosulkumoottoria käytettäessä osa tehosta kuluu moottorin magnetoimiseen, jolloin vääntömomentin ja sitä kautta mekaanisen tehon tuottamiseen jää vähemmän sähkötehoa.

Toinen seikka on se, että autosovelluksessa pyritään siihen, että moottorin tai moottoreiden akusta ottama virta olisi mahdollisimman pieni. Mahdollisimman pieneen virrankulutukseen pyritään ensinnäkin siitä syystä, että akun sisäisessä resistanssissa ja siirtokaapeleiden resistanssissa lämmöksi muuttuvan hukkatehon suuruus on suoraan verrannollinen virran neliöön kaavan (43) mukaan. Toiseksi suuret akun purkuvirrat asettavat haasteita akun suunnittelulle ja johtavat tavallisesti siihen, että akusta tulee raskas. Akut koostuvat tavallisesti kennoista, joita on kytketty sarjaan ja rinnan sopivasti sen mukaan, mikä jännite ja suurin sallittu purkuvirta sekä energiasisältö koko akulla halutaan olevan.

Taulukko 4. Oikosulkumoottorin, tahtimoottorin ja harjallisen DC-moottorin vertailua.

	Oikosulkumoottori	Tahtimoottori	DC -moottori
Vääntömomentti	Korkea laajalla kierroslukualueella	Korkea laajalla kierroslukualueella	Yleensä pieni
Kierroslukualue	Laaja, mahdollisuus kentänheikennykseen	Riippuu moottorista, mahdollisuus kentänheikennykseen	Yleensä laaja
Hankintahinta	Vaihtelee suuresti, pääsääntöisesti halvempi	Korkeahko	Melko edullinen
Hyötysuhde	Melko huono, tyypillisesti 75-85 % parhaimmillaan	Hyvä, tyypillisesti 93 – 95 % parhaimmillaan	Melko huono, tyypillisesti 75-85 % parhaimmillaan
Rakenne	Yksinkertainen	Hieman monimutkaisempi kuin oikosulkumoottori	Monimutkaisempi kuin oikosulkumoottori
Saatavuus	Hyvä	Huonompi kuin oikosulkumoottoreiden saatavuus	Melko hyvä
Jäähdytys	Tavallisesti ilmajäähdytteisiä	Tavallisesti nestejäähdytteisiä	Tavallisesti ilmajäähdytteisiä
Paino	Tavallisesti raskaita, tarkoitettu teollisuussovelluksiin	Vaihtelee, saatavilla erittäin kevyitä moottoreita ajoneuvokäyttöön	Melko kevyitä
Virrankulutus	Käynnistettäessä moninkertainen nimellisvirtaan nähden	Melko hyvä momentintuoton ja virrankulutuksen suhde	Tavallisesti suuret virrat

Kullekin kennolle on valmistaja ilmoittanut suurimman sallitun hetkellisen purkuvirran, jonka kennosta saa ottaa. Suuret purkuvirrat edellyttävät, että akussa on useita sarjaankytkettyjen kennojen ryhmiä kytkettyinä rinnakkain, jolloin kennojen määrä ja sitä kautta akun paino nousevat suuriksi. Niinpä oikosulkumoottoria varten auton akku pi-

täisi mitoittaa suuren käynnistysvirran takia normaalikäyttöä ajatellen tarpeettoman suureksi.

Yksi mahdollisuus olisi käyttää superkondensaattoreita, joista saataisiin ulos suuri hetkellinen käynnistysvirta. Superkondensaattorit ovat kuitenkin raskaita ja kalliita. Tämä järjestely ei välttämättä toimisi muutenkaan, jos ajoprofiili sattuisi olemaan sellainen, että siinä olisi paljon hidastuksia ja kiihdytyksiä joko lähes tai kokonaan paikaltaan. Tällöin superkondensaattori ei välttämättä ehtisi latautua riittävästi paikaltaan lähtöjen välissä. Loistehon kompensointia varten tarvittaisiin joka tapauksessa kondensaattoreita rinnan oikosulkumoottorin kanssa, kun taas tahtimoottorin kanssa sitä ei tarvita. Kytkimen ja apumoottorin käyttö käynnistettäessä lisäisivät huomattavasti järjestelmän monimutkaisuutta ja painoa, joten niiden käyttö ei tule kysymykseen. Myös se, että tahtimoottorit ovat usein kevyempiä ja pienempikokoisia sekä nestejäähdytteisiä, johti siihen, että myöhemmässä vaiheessa tarkasteltiin enimmäkseen tahtimoottoreita.

Tavallisilla DC-moottoreilla on tiettyjä hyviä puolia autokäytössä. Ne ovat tavallisesti melko edullisia hankkia ja niiden ohjaus on yksinkertainen. Niillä on kuitenkin tiettyjä huonoja puolia, joiden takia ne jäivät myöhemmässä vaiheessa pois tarkasteluista. Tavallisten harjallisten DC-moottoreiden hyötysuhde on 75-80 % eli huonompi kuin kestomagnetoitujen tahtimoottoreiden. Harjallisen DC-moottorin kohdalla huonompi hyötysuhde johtuu siitä, että osa moottoriin syötettävästä sähkötehosta kuluu staattorin magnetoimiseen. Tosin sellaisiakin harjallisia DC-moottoreita valmistetaan, joiden staattori on valmistettu kestomagneeteista, jolloin hyötysuhde on parempi, kun osaa kokonaissähkötehosta ei tarvitse käyttää staattorin magnetoimiseen. Näiden moottoreiden hyötysuhde voi olla yli 90 %. Lisäksi harjalliset DC-moottorit vaativat enemmän huoltoa kuin oikosulkumoottorit ja tahtimoottorit hiiliharjojen takia. Harjallisissa moottorin magnetointivirta johdetaan pyörivän moottorin ankkurikäännytykseen hiiliharjojen kautta, jotka kuluvat käytössä. Samoin harjallisten DC-moottoreiden tehon ja painon sekä vääntömomentin ja painon suhde on huonompi kuin tahtimoottoreiden. Lisäksi markkinoilta on vaikea löytää riittävän suorituskykyistä DC-moottoria, jolla olisi riittävän suuri vääntömomentti. Harjallisten DC-moottoreiden käyttöjännitteet ovat tavallisesti matalampia kuin AC-moottoreiden, ja niiden kuluttamat virrat suuria, mikä on huono asia häviöiden ja akun suunnittelun kannalta, kuten edellä on esitetty. Tämän lisäksi harjalliset DC-moottorit ovat tavallisesti ilmajäähdytteisiä. Tämän hetkinen säh-

köautotekniikka on muutenkin kehittymässä yleisesti siihen suuntaan, että DC-moottoreista ollaan siirtymässä pois ja auton voimanlähteeksi valitaan tahtikone-vaihtosuuntaajajhdistelmä, johon syötetään akusta tasavirtaa (1, s. 138).

4.2 Markkinoilla olevien moottorien vertailu

4.2.1 Markkinoilla olevat vaihtoehdot

Lähtökohtana oli alussa se, että pyritään etsimään moottoreita, joiden mekaaninen huipputeho on mahdollisimman lähellä suurinta sääntöjen sallimaa akusta otettavaa sähkötehoa, joka on 100 kW. Eri lähteistä sekä internetistä etsittiin moottorivalmistajia sekä Suomesta että ulkomailta. Taulukkoon 5 on koottu merkittävimpiä moottorivaihtoehtoja ja niiden keskeisiä ominaisuuksia. Suurin osa moottoreista on tahtimoottoreita, mutta joukossa on myös muutama oikosulkumoottori ja tavallinen harjallinen DC-moottori. Erilaisia moottoreita ja valmistajia on maailmalla useita, joten taulukkoon 5 on koottu vain osa kaikista mahdollisista vaihtoehdoista.

Taulukko 5. Eri valmistajien julkaisemia moottoreiden teknisiä tietoja.

Valmistaja	Maa	Moottori	Tyyppi	P_{max} (kW)	P_N (kW)	U_{DC} (V)	T_{max} (Nm)	T_N (Nm)	n_{max} (rpm)	m (kg)
AMK-antriebe	Saksa	DPE10-110	PMSM	41	90	370	200	97	12000	44
AMK-antriebe	Saksa	DPE13-150	PMSM	70	110	370	250	147	12000	60
AMK-antriebe	Saksa	DPE13-210	PMSM	48	120	370	310	191	12000	80
UQM Technologies	USA	PP 125	PMSM	125	45	400	300	150	8000	41
Zytek	Iso-Britannia	IDT 120-55	PMSM	55	43	278	120	95	12000	60
Zytek	Iso-Britannia	IDT 300-70	PMSM	70	55	278	300	250	8000	105
Magnetmotor	Saksa	M70	PMSM	100	50	750	1050	500	3210	34
Mars motors	USA	EMC-SM300	DC	63	26	48-144	90	45	4000	92
Agni Motors	Intia	R-95	DC	30	16	84	54		6000	11
Lynch Motor Company	Iso-Britannia	D135RAG	DC	34	16	96	81	39	4000	11
Mars motors	USA	DS-PMAC	PMSM	30	12	72	94	53	5000	17,7
Perm motor	Saksa	PMS-156	PMSM	17	7	96	80	48	6000	28,5
Brusa	Sveitsi	6.17.12	PMSM	88	57	320	220	85	11000	43
EVO Electric	Iso-Britannia	AFM-140	PMSM	167,5	75	600	600	220	5000	40
EVO Electric	Iso-Britannia	AF-130	PMSM	162	54	320	350	173	8000	26
Oxford YASA Motors	Iso-Britannia	DD-500	PMSM	100	50	360	780	400	2000	25
Enstroj	Slovenia	Emrax	PMSM	60	35	300	220	120	3000	11,9
Sineton	Slovenia	A0911	PMSM	100	62	450	321	297	4000	27
Sineton	Slovenia	A37K154-F	PMSM	42	37	270	240	149	3600	18
MES-DEA	Sveitsi	M2-AC30-L	IM	59	30	288	200	113	8000	60
MES-DEA	Sveitsi	M2-AC25-AS	IM	37	25	96	125	69	6000	60

Osa taulukossa 5 esitetyistä moottorivaihtoehdoista ei ollut saatavissa erinäisistä syistä. Syitä saattoi olla esimerkiksi se, että tilaajia oli liikaa eikä valmistajilla ollut kapasiteet-

tia valmistaa enempää moottoreita tai huolehtia moottorikauppaan kuuluvasta teknisestä tuesta tai että valmistajat eivät ole kiinnostuneita myymään moottoreita yhden tai kahden kappaleen erissä vaan keskittyvät valmistamaan suuria eriä esimerkiksi autotehtaille. Näin ollen vain osa taulukon 5 vaihtoehdoista otettiin lähempään tarkasteluun. Melko pian ratkaisevaksi tekijäksi tuli myös moottorin ja vaihtosuuntaajan hankintahinta.

Käytännössä moottorin hankinnassa on huomioitava moottorin teknisten ominaisuuksien lisäksi paljon muutakin. Kaikki moottorit tarvitsevat jonkinlaisen ohjainlaitteen, jonka avulla moottorin vääntömomenttia säädetään. Joissakin tapauksissa moottorin valmistaja valmistaa ja toimittaa moottorille sopivan ohjainlaitteen, jolloin sen ja moottorin hinta sisältyvät kokonaishankintahintaan. Tavallisesti näin ei kuitenkaan ole, vaan useimmiten moottori ja ohjainlaite tulevat eri valmistajilta.

Tahtimoottoreiden tapauksessa moottoria ohjataan vaihtosuuntaajan avulla. Vaihtosuuntaajan valmistaja toimittaa tavallisesti laitteen mukana ohjelmiston, jonka avulla voidaan muuttaa useita vaihtosuuntaajan parametreja siten, että moottori ja vaihtosuuntaaja saadaan yhteensopiviksi. Usein on niin, että ohjelmisto on voimassa vain tietyn ajan, ja jotta parametreja voidaan muuttaa myöhemminkin, on ohjelmisto päivitettävä tietyin väliajoin. Tästä aiheutuu ylimääräisiä kuluja.

4.2.2 Suorituskyky- ja hyötysuhdevertailu

Taulukossa 6 on esitetty moottorivaihtoehtoja, joita haluttiin harkita tarkemmin. Kaikki vaihtoehdot ovat tahtimoottoreita, joiden roottoreissa on kestomagneetit. Kestomagneetit sisältävän tahtimoottorin teho-paino-suhde on tavallisesti erittäin hyvä. Myös vääntömomentti-paino-suhde on näillä moottoreilla erittäin hyvä: tällä hetkellä yleisyydessä oleva kestomagneettitahtikoneiden rakennekonfiguraatio on niin sanottu panukakkurakenne, jossa staattorit on sijoitettu roottorin pätyihin. Tämä rakenne mahdollistaa sen, että moottori voi tuottaa suuren vääntömomentin ilman, että moottorin halkaisija ja sitä kautta massa kasvaa suureksi.

Taulukko 6. Tahtimoottoreiden suorituskykyvertailu.

Moottori	P_{\max} (kW)	T_{\max} (Nm)	m (kg)	P_{\max} / m	T_{\max} / m
UQM PP 125	125	300	41	3,05	7,32
Brusa 6.17.12	88	220	43	2,05	5,12
YASA DD-500	100	780	25	4,00	31,20
Enstroj Emrax	60	220	11,9	5,04	18,49
Sineton A0911	100	321	27	3,70	11,89
Sineton A37K154-F	42	240	18	2,33	13,33

Taulukossa 7 on esitetty eri tahtimoottoreiden maksimipyörimisnopeudet, vääntövakiot ja jännitevakiot. Vääntövakio ilmoittaa, kuinka suuren vääntömomentin moottori tuottaa suhteessa moottoriin syötettyyn virtaan. Kohdassa "Tahtimoottorin toiminnan perusteet" todettiin, että staattorin ja roottorin välinen magnetomotorinen voima riippuu muun muassa staattorin käämeissä kulkevasta sähkövirrasta. Vääntövakiot eivät tarkkaan ottaen ole kiinteitä vakioita, vaan ne useimpien moottoreiden kohdalla vaihtelevat hieman kierrosnopeuden ja kuormituksen muuttuessa. Taulukossa 7 esitettyjen vääntövakioiden avulla eri moottoreiden eroavuuksia niiltä osin voi kuitenkin arvioida ja vertailla keskenään.

Taulukko 7. Eräiden moottoreiden maksimipyörimisnopeudet, vääntövakiot ja jännitevakiot.

Moottori	n_{\max} (rpm)	K_T (Nm/A)	K_E (V/rpm)
UQM PP 125	8000	0,82	0,04
Brusa 6.17.12	11000	0,80	0,03
YASA DD-500	2000	2,81	0,18
Enstroj Emrax	3000	1,00	0,10
Sineton A0911	4000	1,44	0,11
Sineton A37K154-F	3600	1,54	0,08

Jännitevakio ilmoittaa, kuinka suuren vastasähkömotorisen voiman (BEMF tai CEMF) eli vastajännitteen moottori tuottaa kierrosnopeuden kasvaessa. Aiemminhan on todettu, että aina roottorin pyöriessä moottori toimii myös generaattorina ja sen tuottaman kolmivaiheisen vaihtojännitteen amplitudi riippuu enimmäkseen moottorin kierrosnopeudesta. Myös moottorin käyntilämpötilalla on merkitystä amplitudin suuruuteen, sillä roottorin magneettien tuottama vuo saattaa vaihdella lämpötilan mukaan (18, s. 99-100).

Taulukko 8. Eräiden moottoreiden hyötysuhteiden vertailu.

Moottori	Tyyppi	P _{MAX} (kW)	U _{DC} (V)	I _{DC max} (A)	η (%)
UQM PP 125	PMSM	125	320 - 370	367	94
Brusa 6.17.12	PMSM	88	320	275	95
YASA DD-500	PMSM	100	360	278	94
Enstroj Emrax	PMSM	60	300	220	94
Sineton A0911	PMSM	100	270 - 450	222	94
Sineton A37K154-F	PMSM	42	200 - 270	156	94
LMC D135 RAG	DC	34	96	400	91
Agni R-95	DC	30	84	220	93

Tahtimoottoreiden ja vertailun vuoksi eräiden DC-moottoreiden hyötysuhteita, käyttöjännitteitä ja virtoja on vertailtu taulukossa 8. Taulukossa 8 U_{DC} merkitsee sitä jännitettä, joka kytketään vaihtosuuntaajan DC-napoihin, eikä se saa olla pienempi kuin akun tyhjäkäyntijännite silloin, kun akku on täydessä latauksessa. Virta I_{DC max} merkitsee sitä virtaa, jonka vaihtosuuntaaja enimmillään ottaa akusta. Tahtimoottorin hyötysuhde on erittäin hyvä, tavallisesti 93-95 %. Taulukossa 8 vertailun vuoksi esitetyn kahden DC-moottorin hyötysuhteet ovat myös melko korkeita, mikä johtuu siitä, että niiden staattorit on valmistettu kestopagneettimateriaalista.

Syötettäessä sähköenergiaa akusta vaihtosuuntaajan ohjaamaan tahtimoottoriin kokonaistehohäviöstä osa tapahtuu vaihtosuuntaajassa ja osa moottorissa. Koko vaihtosuuntaaja-tahtimoottori-yhdistelmän hyötysuhde on tällöin

$$\eta_{KOK} = 100 * \frac{\eta_{INV.}}{100} * \frac{\eta_{MOOTT.}}{100}$$

(48)

η_{KOK} on kokonaishyötysuhde (%)

η_{INV.} on vaihtosuuntaajan hyötysuhde (%)

η_{MOOTT.} on moottorin hyötysuhde (%)

Vaihtosuuntaaja-tahtimoottoriyhdistelmän hyötysuhde on tavallisesti 85-92 %. Pelkkä moottorin hyötysuhde ei siis vielä kerro kaikkea, vaan myös vaihtosuuntaajan hyötysuhde pitää ottaa huomioon koko järjestelmän hyötysuhdetta arvioitaessa. Käytän-

nössä tehohäviöitä tapahtuu myös akussa, siirtokaapeleissa ja kontaktoreissa. Pääsääntöisesti eri tahtimoottoreiden hyötysuhteissa ei ollut merkittäviä eroja, kuten taulukosta 8 voi todeta.

4.2.3 Vaihtosuuntaajien vertailu

Kunkin moottorin tapauksessa moottorin valmistaja määrittelee, mitä vaihtosuuntaajaa moottorin kanssa voi käyttää. Osa vaihtosuuntaajista on yleiskäyttöisiä, toiset taas on tarkoitettu käytettäväksi vain tietyn moottorin kanssa. Yleiskäyttöisten vaihtosuuntaajien useita parametreja on mahdollista muuttaa ja useissa vaihtosuuntaajissa on auto-tuning-toiminto, jonka avulla vaihtosuuntaaja määrittelee itse mittaamalla moottorin parametrit. Yleiskäyttöisillä vaihtosuuntaajilla voidaan ajaa paitsi kolmivaiheisia tahtimoottoreita myös kolmivaiheisia oikosulkumoottoreita. Taulukoissa 9 ja 10 on vertailtu eräiden yleiskäyttöisten vaihtosuuntaajien keskeisiä ominaisuuksia.

Taulukko 9. Jännite U_{DC} tarkoittaa jännitettä, jonka saa kytkeä vaihtosuuntaajan DC -napoihin. Jännite U_{fun} tarkoittaa jännitealuetta, jolla vaihtosuuntaaja normaalisti toimii.

Valmistaja	Laite	U_{DC} (V)	U_{fun} (V)	P_N (kW)	P_{max} (kW)	$I_{out max}$ (A)
Brusa	DMC 514	120 - 460	130 - 450	40	53	150
Brusa	DMC 524	120 - 460	130 - 450	80	106	300
Brusa	DMC 534	121 - 460	130 - 450	120	159	450
Piktronik	SAC 40	75 - 360	96 - 300	60	100	280
Tech/Ops Sevcon	EVO 5	0 - 450	80 - 400	80	144	360
Rinehart Motion Systems	PM100DX	0 - 500	100 - 360	100	180	500
MES-DEA	TIM 300W	0 - 450	80 - 400	56	84	210
MES-DEA	TIM 400W	0 - 450	80 - 400	74,4	112	280
MES-DEA	TIM 600W	0 - 450	80 - 400	94,4	160	400

Taulukko 10. Tilavuusvirta q_v tarkoittaa vaadittua jäähdytysnesteen minimi-tilavuusvirtaa, taajuus f_{PWM} PWM:n kytkentätaajuutta.

Kaikki taulukoissa 9 ja 10 mainitut vaihtosuuntaajat ovat nestejäähdytteisiä, joskin ilmajäähdytystä on mahdollista joissakin tapauksissa käyttää luotettavuuden kustannuksella. Valmistaja on tavallisesti määrittänyt jäähdytysnesteen minimi-tilavuusvirran jäähdytysnesteseokselle, joka koostuu vedestä ja glykolista suhteessa 1:1. Kaikissa mainituissa vaihtosuuntaajissa on liitännät CAN-väylään ja RS 232 -kaapelille vaihtosuuntaajan kytkemiseksi tietokoneeseen parametrien konfigurointia varten. Lisäksi laitteissa on

vaihteleva määrä I/O-nastoja. Vääntömomenttia voidaan säätää CAN-väylän kautta tai analogisen jännite- tai virtasignaalin avulla. CAN-väylän käyttö on suositeltavaa, koska tällöin tiedonsiirto ei ole niin altis häiriöille kuin käytettäessä analogisia signaaleja ja ajoneuvon tiedonkeruulaitteeseen voidaan käytön aikana kerätä moottorin ja vaihtosuuntaajan toimintaan liittyviä tietoja joko tietyin väliajoin tai pyydettyä. Kaikki mainitut vaihtosuuntaajat toimivat vektorisäätöperiaatteella.

Valmistaja	Laite	m (kg)	η (%)	kotelointi	q_v (l/min)	f_{PWM} (kHz)
Brusa	DMC 514	6,5	97	IP65	6	24
Brusa	DMC 524	9,5	97	IP65	6	24
Brusa	DMC 534	12,5	97	IP65	6	24
Piktronik	SAC 40	11	97	IP54	6	
Tech/Ops Sevcon	EVO 5	10		IP66		16 - 24
Rinehart Motion Systems	PM100DX	10	97			
MES-DEA	TIM 300W	6,9	95	IP54	8	3 - 9
MES-DEA	TIM 400W	6,9	95	IP55	8	3 - 9
MES-DEA	TIM 600W	7,5	95	IP56	8	3 - 9

4.2.4 Lopulliset vaihtoehdot

Moottorivalintaa tehtäessä asiaa oli tarkasteltava kokonaisuutena. Suorituskyky-, hyötysuhde-, saatavuus- ja hinta-asiat huomioon ottaen päädyttiin kahteen vaihtoehtoon, joita molempia verrattiin vielä keskenään tulevan auton suorituskykytarkastelun avulla myöhemmässä vaiheessa. Ensimmäinen vaihtoehto oli alun perin lentokonekäyttöön tarkoitettu, vesijäähdytteinen, huipputeholtaan 60 kW ja nimellisteholtaan 35 kW keskomagnetoitu tahtimoottori, joita hankittaisiin yksi kummallekin vetävälle pyörälle. Tällöin moottoreille tarvittaisiin tietysti kaksi sopivaa vaihtosuuntaajaa. Vaihtosuuntaajia ohjattaisiin CAN-väylän avulla. Yhden moottorin nimellisvääntömomentti, jonka se kestää toimintatilassa S1, on 120 Nm. Huippuvääntömomentiksi valmistajan tiedoissa on ilmoitettu 200 Nm jopa 2 minuutin ajan. Toisaalta valmistajan toimittamien testitietojen perusteella moottorilta on saatu enimmillään 250 Nm vääntömomentti. Huipputehon kestoaika on rajattu minuuttiin. Yhden moottorin paino on 11,9 kg ja vaihtosuuntaajan 11 kg, jolloin kahden moottorin ja niihin kuuluvien vaihtosuuntaajien yhteismassa on 45,8 kg. Tähän massaan eivät vielä kuulu kaapeleiden, johtojen sekä jäähdytysputkien ja -letkujen massat, mutta ne ovat marginaalisia eikä niitä voidakaan vielä tietää tarkkaan. Moottorin maksimipyörimisnopeus on 3000 rpm, ja siinä voidaan käyttää jäähdytukseen tavanomaista veden ja glykolin seosta.

Toinen vaihtoehto on ajoneuvokäyttöön tarkoitettu, niin ikään kestmagnetoitu tahti-moottori, jonka huipputeho 30 sekunnin ajan on 100 kW ja nimellisteho 50 kW. Moottori on eräiltä ratkaisuiltaan innovatiivinen, ja sen erityinen ominaisuus on erinomainen vääntömometti-paino-suhde: 25 kg painoisen moottorin tuottama huippuvääntömometti on jopa 780 Nm. Myös moottorin virta-vääntömometti-suhde on hyvä. Tätä moottoria käyttäen toteutettaisiin tavanomaisempi yhden moottorin ja mekaanisen tasauspyörästön konfiguraatio, jolloin tarvittaisiin vain yksi CAN-väylän kautta ohjattu 10 kg painava vaihtosuuntaaja. Moottori-vaihtosuuntaaja-yhdistelmän massaksi tulisi tällöin 35 kg. Tasauspyörästön, jäähdytysputkien ja -letkujen massoja ei ole tässä huomioitu. Moottorin nimellisivääntömometti on 500 Nm ja maksimipyörimisnopeus 2000 rpm. Moottori on öljyjäähdytteinen: samaa öljyä, jota käytetään moottorin laakeiden jäähdyttämiseen, käytetään myös staattorin jäähdyttämiseen. Moottori on testattu vain yhdelle öljymerkille, eikä siinä saa käyttää muuta öljyä. Valitettavasti tämä öljy on harvinaista, ja sen hinta sekä toimituskulut kohoavat melko korkeiksi.

Taulukko 11. Lopulliset vaihtoehdot

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 1 x 2	Vaihtoehto 2
P_{\max} (kW)	60	120	100
P_N (kW)	35	70	50
T_{\max} (Nm)	240	480	780
T_N (Nm)	120	240	500
P_{\max} / m	5,0		4,0
T_{\max} / m	18,5		31,2
η_{\max} (%)	94		94
$I_{AC \max}$ (A)	280	560	360
$I_{DC \max}$ (A)	220	440	300
U_{\max} (V)	300		360
n_{\min} (rpm)	1800		1125
n_{\max} (rpm)	3000		2000
m (kg)	11,9	23,8	25
K_T (Nm/A)	1-1,5		2,9
K_E (V/rpm)	0,1		0,18
q_v (l/min)	12	24	6-8

4.3 Vaihtoehtojen vertailu suorituskykytarkastelun avulla

Suorituskykytarkastelun tavoitteena oli tutkia mahdollisimman tarkasti, kuinka valituilla moottoreilla varustettu formula student –auto käyttäytyisi eri tilanteissa. Läheskään kaikkia lähtöarvoja tai muita parametreja ei voitu tietää suorituskykytarkastelua tehtäessä, koska monet niistä liittyvät tulevaan sähkömoottoriautoon, jota ei vielä ollut olemassa. Niinpä lähtöarvoja ja parametreja jouduttiin arvioimaan joko aikaisemmin rakennettujen autojen vastaavien arvojen perusteella tai muilla tavoilla. Sama suorituskykytarkastelu tehtiin molemmille moottoreille erikseen, tai tarkemmin sanottuna tulevan auton kahdella eri moottorilla varustetuille malleille. Vaikka suorituskykytarkastelu sisältää epätarkkuuksia, voi sen avulla arvioida molemmilla moottoreilla varustettujen autojen eroavaisuuksia eräissä käyttötilanteissa, kun moottorit on asennettu kahteen muuten melko samanlaiseen autoon.

4.3.1 Ajoneuvon massan arviointi

Ajoneuvon massa vaikuttaa oleellisesti auton suoritusarvoihin. Ajoneuvon massa vaikuttaa osaltaan vierintävastusvoiman suuruuteen (19, s. 22). Samoin ajoneuvon massa vaikuttaa osaltaan nousuvastusvoiman suuruuteen (19, s. 37). Kasvatettaessa ajoneuvon nopeutta lisätään sekä suoraviivaisesti liikkuvan massan liike-energiaa että pyörivien osien pyörimisenergiaa. Koska liike-energia riippuu nopeuden lisäksi massasta, on ajoneuvon massalla suuri vaikutus kiihdytysvastuksen suuruuteen. (19, s. 41.) Tulevan formula student –auton massaa on erittäin vaikea arvioida tarkasti etukäteen. Koska auton suunnittelu on vasta alkuvaiheessa, ei tiedetä läheskään kaikkea tarvittavaa auton rakenteesta ja autoon sijoitettavien komponenttien massoista. Laskuissa käytetyt auton massaa koskevat luvut ovat pessimistisiä arvioita.

Lisäksi massan arviointiin liittyy dilemma. Tulevan formula student –auton korkeajänniteakku, josta otetaan sähköenergia ajomoottoreille, pitää mitoittaa suurimman sähköenergian tarpeen mukaan. Tehtävä on siltä osin helppo, että auton käyttötarkoitus on hyvin rajattu ja tiedetään, että suurin energiankulutus tapahtuu kilpailun kestävyysosion aikana. Ongelma on siinä, että energiankulutusta kestävyysosion aikana on ensinnäkin melko vaikea laskea etukäteen, kun ajoprofiilia ei tiedetä tarkasti ennalta. Aiemmin ajettujen kestävyysosioiden perusteella tiedetään, että ajoprofiili sisältää paljon

kiihdytyksiä ja hidastuksia mutta hyvin vähän ajoa tasaisella nopeudella. Aiemmin ajettujen kestävyysosioiden lokitietoja käytetäänkin energiankulutuksen arvioinnissa. Toiseksi energiankulutus riippuu suuresti auton massasta, joka taas riippuu suuresti juuri akun painosta. Näin ollen on mahdotonta tietää auton ja akun painoa tarkasti etukäteen, vaan on tyydyttävä arvioihin. Muuta vaihtoehtoa ei ole, sillä ennen suunnittelun alkua on oltava jotain tietoja tarvittavan akun koosta ja energiantarpeesta.

Tiedossa oli, että auton rungon rakenne ei tule radikaalisti muuttumaan siirryttäessä polttomootorikäyttöisestä autosta sähkökäyttöiseen, joten massan arviointi aloitettiin siten, että laskettiin kolmen edellisen tiimin rakentaman auton omamassoista keskiarvo. Keskiarvosta vähennettiin niiden komponenttien massat, joita ei tarvita sähkökäyttöisessä autossa ja lisättiin sähköauton vaatimien komponenttien massat tai massojen arviot. Akun massan ja energiasisällön arvioinnissa käytettiin tällä hetkellä yleisimmin käytetyn akkukennon tietoja sekä tietoa, että kestävyysajon ajamiseen tarvitaan keskimäärin 6-8 kWh energiaa. Massan arvion tulokset on esitetty liitteissä 1 ja 2. Kahdella eri moottorivaihtoehdolla varustetulle autolle saatiin omamassat 245 kg ja 253 kg. Kuten liitteistä 1 ja 2 voidaan havaita, massan arvioinnissa on pyritty huomioimaan lähinnä sellaisten komponenttien massat, joita voidaan pitää merkittävinä kokonaisuuden kannalta. Suorituskykylaskuissa on käytetty massan arvona kokonaisuutta eli omamassaan on lisätty kuljettajan massa, jonka oletetaan olevan 68 kg.

4.3.2 Lähtöarvot

Vastusvoimien ja suorituskyvyn laskemista varten tarvittiin useita lähtöarvoja tulevasta autosta ja ympäristöstä. Lähtöarvot on ilmoitettu kummallekin vaihtoehdolle erikseen. Tien ja renkaan välinen kitkakerroin vaikuttaa varsin suurelta, mutta kitkakertoimen suuruus selittyy siten, että se on sileäpintaisen, kilpailukäyttöön tarkoitetun erikoisrenkaan ja asfaltin välinen kitkakerroin.

Taulukko 12. Vaihtoehdon 1 lähtöarvot.

Suure	Arvo	Yksikkö	Tunnus
Voimansiirron välityssuhde	2,13		i_v
Putoamiskiikkyvyys	9,81	m/s^2	g
Renkaan dynaaminen säde	0,2667	m	R_d
Haluttu huippunopeus	140	km/h	V_{max}
	46,7	m/s	V_{max}
Painojakauma etu	0,432		
Painojakauma taka	0,568		
Ajoneuvon paino	3148	N	G_a
Staattinen kuorma etuakselilla	1359,8	N	G_e
Staattinen kuorma taka- akselilla	1787,9	N	G_t
Ilman tiheys	1,293	kg/m^3	ρ_i
Otsapinta-ala	1	m^2	A
Ilmanvastuskerroin	0,65		C_w
Kitkakerroin (tie-rengas)	1,4		μ_T
Voimansiirron hyötysuhde	0,97		η_v
Vierintävastuskerroin	0,0325		f_r
Akseliväli	1,5	m	l_a
Painopisteen korkeus	0,3	m	h
Nimellisvierintävastuskerroin	0,009325		f_N

Taulukko 13. Vaihtoehdon 2 lähtöarvot.

Suure	Arvo	Yksikkö	Tunnus
Voimansiirron välityssuhde	1,43		i_v
Putoamiskiikkyvyys	9,81	m/s^2	g
Renkaan dynaaminen säde	0,2667	m	R_d
Haluttu huippunopeus	140	km/h	V_{max}
	46,7	m/s	V_{max}
Painojakauma etu	0,432		
Painojakauma taka	0,568		
Ajoneuvon paino	3042	N	G_a
Staattinen kuorma etuakselilla	1314,0	N	G_e
Staattinen kuorma taka-akselilla	1727,7	N	G_t
Ilman tiheys	1,293	kg/m^3	ρ_i
Otsapinta-ala	1	m^2	A
Ilmanvastuskerroin	0,65		C_w
Kitkakerroin (tie-rengas)	1,4		μ_T
Voimansiirron hyötysuhde	0,97		η_v
Vierintävastuskerroin	0,0325		f_r
Akseliväli	1,5	m	l_a
Painopisteen korkeus	0,3	m	h
Nimellisvierintävastuskerroin	0,009325		f_N

4.3.3 Vastusvoimat

Ajoneuvon nopeuden pitämiseksi tasaisena ajoneuvon moottorin tulee kehittää riittävästi voimaa, jolla kyetään voittamaan ajoneuvon liikettä vastustavia voimia. Liikettä vastustavia voimia ovat nousuvastus, ilmanvastus, vierintävastus, ja voimansiirron kitkoista johtuvat vastukset. Ajettaessa suurella nopeudella ylämäkeen suhteellisesti suurimpia vastuksia ovat nousuvastus ja ilmanvastus. Pienillä nopeuksilla tasamaalla ajettaessa suurin vastusvoima aiheutuu vierintävastuksesta. Voimansiirron kitkoista johtuvat voimat aiheuttavat sähköformula-auton tapauksessa hieman pienemmät häviöt kuin polttomoottoriauton tapauksessa, koska sähköformula-autossa ei tarvita kytkintä tai vaihteistoa, vaan pelkkä alennusvaihte riittää. Voimansiirron hyötysuhde on tällöin 97 % luokkaa. Ajoneuvon nopeutta kiihdytettäessä tarvitaan tehoa paitsi voittamaan

liikettä vastustavat voimat, myös lisäämään ajoneuvon suoraviivaisesti liikkuvien osien liike-energiaa sekä pyörivien osien pyörimis- ja liike-energiaa.

Ajoneuvon ilmanvastus jakautuu painevastukseen, hankausvastukseen ja ajoneuvon sisäiseen ilmanvastukseen. Painevastuksen osuus koko ilmanvastuksesta on 60–70 %. Painevastus kasvaa verrannollisena ajonopeuden neliöön. Painevastus johtuu siitä, että ajoneuvon ollessa liikkeessä sen etupuolelle syntyy korkeamman ilmanpaineen vyöhykkeitä ja takapuolelle matalamman ilmanpaineen vyöhykkeitä. Kulkiessaan ilman läpi ajoneuvo joutuu sysäämään ilmamassaa tieltään. Ajonopeuden kasvaessa ilmamassa ei siirry ajoneuvon tieltä riittävän nopeasti. Tällöin ajoneuvon etupuolelle syntyy tihentymiä, joissa ilmanpaine on hieman ympäristöä korkeampi. Vastaavasti ajoneuvon takapuolella ilmamassa ei ajonopeuden kasvaessa palaudu riittävän nopeasti alkuperäiseen asemaansa, jolloin ajoneuvon taakse syntyy pyörteisiä alueita, joissa vallitsee ympäristöä matalampi paine. Painevastus johtuu siis etu- ja takapään paine-erosta. Se riippuu ajonopeuden lisäksi kappaleen muodosta, kulkusuuntaa vastaan olevasta pinta-alasta ja ilman tiheydestä:

$$F_i = \frac{\rho_i}{2} * C_w * A * v^2 \quad (49)$$

F_i on ilmanvastusvoima

ρ_i on ilman tiheys

C_w on kappaleen muodosta johtuva ilmanvastuskerroin

A on kappaleen kulkusuuntaa vastaan oleva pinta-ala

v on ajonopeus

Hankausvastus on luonteeltaan kitkavastus. Ajoneuvon liikkuessa aivan ajoneuvon pinnassa oleva ilmakerros on turbulenttisessa tilassa, ja tässä rajakerroksessa ajoneuvon pinnan ja rajakerroksen ilmamassan välinen nopeusero on nolla. Ilman ja auton pinnan välisestä hankauksesta aiheutuu vastusvoima, jonka osuus kokonaisilmanvastuksesta on kuitenkin vain noin 10 %. Ajoneuvon sisäinen ilmanvastus johtuu ajon aikana ajoneuvon sisälle tavallisesti moottorin jäähdytystä varten johdetun ilman aiheuttamasta vastuksesta, joka on luonteeltaan sekä paine- että hankausvastusta. Ajoneuvon sisäisen ilmanvastuksen osuus kokonaisilmanvastuksesta on noin 15–25 %. (19, s. 25–27.)

Vierintävastus johtuu tien ja renkaan välisestä vuorovaikutuksesta. Ajoneuvolla ajettaessa sekä tien pinnassa että renkaan muodossa tapahtuu muodonmuutos. Muodonmuutos on tietysti selkeämmin havaittavissa renkaassa, koska rengas on valmistettu kumista. Koska kumi on elastista materiaalia, palaa se takaisin muotoonsa, kun siihen vaikuttava muotoa muuttava voima lakkaa vaikuttamasta. Materiaalin sisäisestä kitkasta johtuen alkuperäiseen muotoon palaaminen tapahtuu kuitenkin viiveellä, jolloin osa muodon muuttamiseen kuluneesta energiasta ei kulukaan muodon palauttamiseen, vaan se muuttuu lämmöksi.

Renkaan vierinessä alustalla renkaan ja alustan välisessä tukipinnassa pintapainejakauma ei ole symmetrinen renkaan pyörimisakselin suhteen, vaan epäkeskinen siten, että alustan renkaaseen kohdistaman tukivoiman huippu sijaitsee tukipinnan etuosassa renkaan pyörimisakselin etupuolella. Epäkeskisyys johtuu juuri renkaan materiaalin hystereesistä. Koska tukivoiman huippu sijaitsee pyörimisakselin etupuolella, aiheuttaa tukivoima renkaan vierimisliikettä vastustavan momentin. (19, s. 17–18.) Momentin "varren" pituus on pyörimisakselin ja tukivoiman huipun pisteen välinen vaakasuuntainen etäisyys, kun ajatellaan tukivoiman keskittyneen tiettyyn pisteeseen renkaan pyörimisakselin etupuolelle, vaikka se todellisuudessa on jakautunut renkaan ja tien väliselle pinnalle (20, s. 282). Ajoneuvon moottorin pitää tuottaa riittävän suuri vastamomentsi vierintävastusmomentin voittamiseksi, jos ajoneuvon halutaan pysyvän senhetkessä liikeillassaan tai halutaan lisätä ajoneuvon nopeutta. Renkaan ja tien välisen vierintävastuksen lisäksi ajoneuvon kokonaisvierintävastukseen katsotaan kuuluvaksi laakereiden kitkasta johtuvat vastukset. Vierintävastusvoima on ajoneuvon painon ja vierintävastuskertoimen tulo, jonka suuruuteen vaikuttavat renkaan rakenne ja materiaali, rengaspaine, ajonopeus, renkaan auraus tai haritus sekä alustan kovuus:

$$F_R = m * g * f_R \quad (50)$$

m on ajoneuvon massa

g on putoamiskiihtyvyyys

f_R on vierintävastuskerroin (19, s. 21–22.)

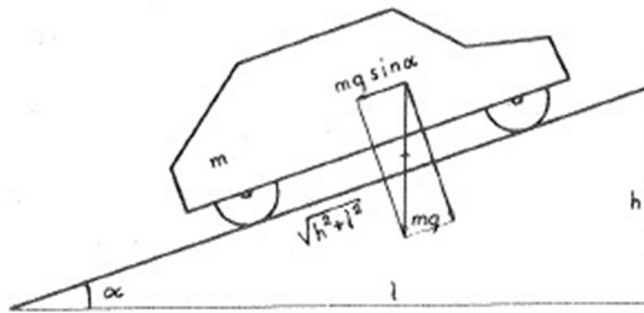
Ajoneuvon nousuvastus johtuu ylämäkeen ajettaessa ajoneuvon painon vaakasuuntaisesta komponentista, joka suuntautuu ajosuuntaa vastaan. Nousuvastuksen suuruus

riippuu siis ajoneuvon massasta ja mäen jyrkkyydestä. Mäkien jyrkkyydet ilmoitetaan yleensä prosentteina: metrin siirtymän matkalla siirtymän alku- ja loppupään korkeusero on ilmoitettu prosenttiluvun mukainen osuus siirtymästä. Näin ollen 100 prosentin mäki vastaa 45 asteen nousukulmaa. Prosenttilukuja käytettäessä nousuvastuksen suuruus on

$$F_n = m * g * \sin(\tan^{-1}(\frac{p}{100}))$$
(51)

F_n on nousuvastusvoima

p on mäen jyrkkyys prosentteina (19, s. 37-38.)



Kuva 31. Nousuvastus F_n johtuu ajoneuvon painon taaksepäin suuntautuvasta komponentista.

Toisaalta vierintävastusvoima pienenee ylämäkeen ajettaessa, sillä ylämäessä ajoneuvon painon tien pintaa kohti suuntautuva komponentti $m * g * \cos(\alpha)$ on pienempi kuin paino tasamaalla eli $m * g$. Vierintävastus ylämäessä on

$$F_R = m * g * f_R * \cos(\tan^{-1}(\frac{p}{100}))$$
(52)

Nousuvastus lisää ajoneuvon liikettä vastustavaa voimaa melkoisesti, joten vaikka vierintävastus pieneneekin ylämäkeen ajettaessa hieman, kasvaa ajoneuvon kokonaisvastusvoima huomattavasti. (19, s. 23.)

Ajoneuvon nopeutta kiihdytettäessä lisätään ajoneuvon liike-energiaa. Ajoneuvo ei kuitenkaan ole yksi kiinteä suoraviivaisesti liikkuva kappale, vaan pyörivien ja suoraviivai-

sesti liikkuvien massojen yhdistelmä. Tietyn kiihtyvyyden saamiseksi kappaleelle tarvitaan ajovastusvoimien voittamiseen tarvittavan voiman lisäksi voima

$$F_a = a * m_{red} \quad (53)$$

a on kiihtyvyys

m_{red} on redusoitu massa

Redusoidun massan käytöllä tulon tekijänä kaavassa (53) huomioidaan se, että ajoneuvo sisältää sekä pyöriviä että suoraviivaisesti liikkuvia massoja. Redusoitu massa saadaan kertomalla ajoneuvon massa hitausvaikutuskertoimella:

$$m_{red} = \psi * m \quad (54)$$

Hitausvaikutuskertoimen suuruuteen vaikuttavat pyörivien osien hitausmomentit ja voimansiirron välityssuhteet, ja sähköauton tapauksessa se saadaan kaavasta

$$\psi = 1 + \frac{J_p + i_v^2 * J_m}{m * R_d^2} \quad (55)$$

J_p on pyörien nopeudella pyörivien osien yhteenlaskettu hitausmomentti

J_m on moottorin nopeudella pyörivien osien yhteenlaskettu hitausmomentti

i_v on voimansiirron välityssuhde

R_d on renkaan dynaaminen vierintäsäde

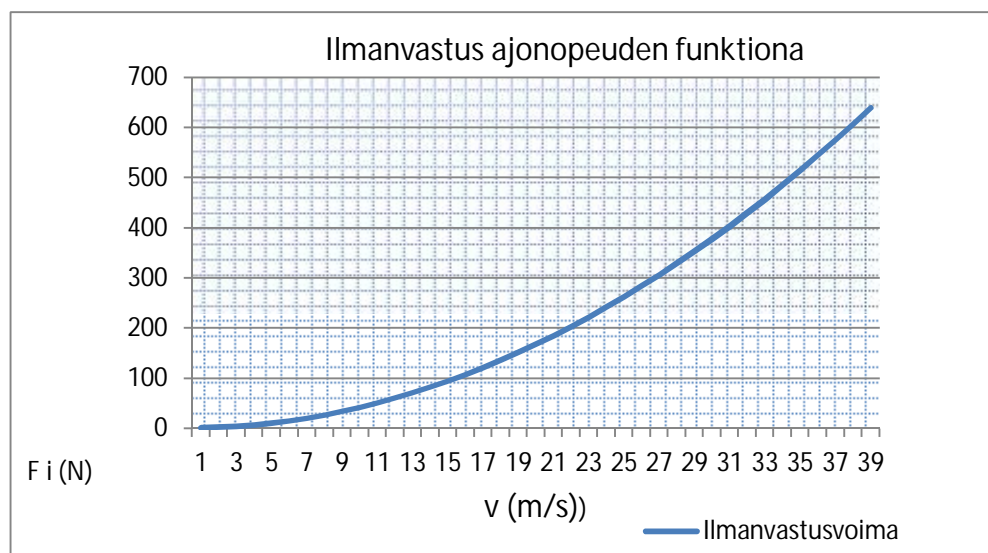
Hitausvaikutuskertoimen kertoo, kuinka moninkertainen ajoneuvon massan tulisi olla, jotta se edustaisi yhtä suurta hitautta kuin ajoneuvon todellinen massa ja pyörivät osat yhdessä. (19, s. 41–42.)

4.3.4 Vastusvoimien laskeminen

Kahdella eri moottorilla varustettujen autojen ilmanvastusvoimien välillä ei periaatteessa ole eroavuutta, koska ilmanvastusvoima riippuu ilman tiheydestä, otsapinta-alasta,

auton muodosta ja ajonopeudesta. Formula student –auton ilmanvastuskertoimen arvoksi on määritetty coastdown–testissä 0,65 silloin, kun katteet on kiinnitetty autoon, ja 0,61 ilman katteita (6, s. 24). Kaikki lähtöarvot on lueteltu taulukoissa 12 ja 13. Taulukossa 14 ja kuvassa 32 on esitetty formula student –auton ilmanvastusvoima ajonopeuden funktiona laskettuna kaavan (49) avulla.

Molemmille malleille kaavan (50) mukaan lasketut vierintävastusvoimat tasamaalla on esitetty taulukossa 15. Vierintävastuskerroin 0,0325 on myös saatu aiemmin suoritetun coastdown–testin tuloksista. Tarkkaan ottaen vierintävastuskerroin muuttuu nopeuden kasvaessa, jolloin vierintävastuskin kasvaa. Coastdown–testin avulla saatu vierintävastuskerroin sisältää renkaiden ja laakereiden vierintävastuksen. Vierintävastuskertoimen määrittäminen muuten kuin kokeellisesti on haastavaa. Vierintävastuksen muutokset nopeuden funktiona ovat kuitenkin pieniä ilmanvastuksen kasvuun verrattuna, joten niitä ei huomioida. (6, s. 24.) Esimerkiksi nopeuden muuttuessa nolasta metrissä sekunnissa 27,8 metriin sekunnissa eli 0-100 km/h muuttuu käytettyjen renkaiden nimellisvierintävastuskerroin arvosta 0,00922 arvoon 0,00943. Tällöin vierintävastusvoima kasvaa arvosta 31,07 N arvoon 31,78 N, kun auton massa on 310 kg ja rengaspaine on 1,7 bar. Edellä mainitulla nopeuden lisäyksellä ilmanvastusvoima kasvaa arvosta 0 N arvoon 324 N, jolloin vierintävastusvoiman lisäys on vain noin 0,2 % ilmanvastusvoiman lisäyksestä.



Kuva 32. Ilmanvastus ajonopeuden funktiona.

Taulukko 14. Ilmanvastusvoimat ajonopeuden funktiona.

Ilmanvastusvoima F_i ajonopeuden v funktiona		
v (m/s)	v (km/h)	F_i (N)
1	3,6	0
2	7,2	2
3	10,8	4
4	14,4	7
5	18	11
6	21,6	15
7	25,2	21
8	28,8	27
9	32,4	34
10	36	42
11	39,6	51
12	43,2	61
13	46,8	71
14	50,4	82
15	54	95
16	57,6	108
17	61,2	121
18	64,8	136
19	68,4	152
20	72	168
21	75,6	185
22	79,2	203
23	82,8	222
24	86,4	242
25	90	263
26	93,6	284
27	97,2	306
28	100,8	329
29	104,4	353
30	108	378
31	111,6	404
32	115,2	430
33	118,8	458
34	122,4	486
35	126	515
36	129,6	545
37	133,2	575
38	136,8	607
39	140,4	639
40	144	672

Taulukko 15. Molempien vaihtoehtojen vierintävastusvoimat.

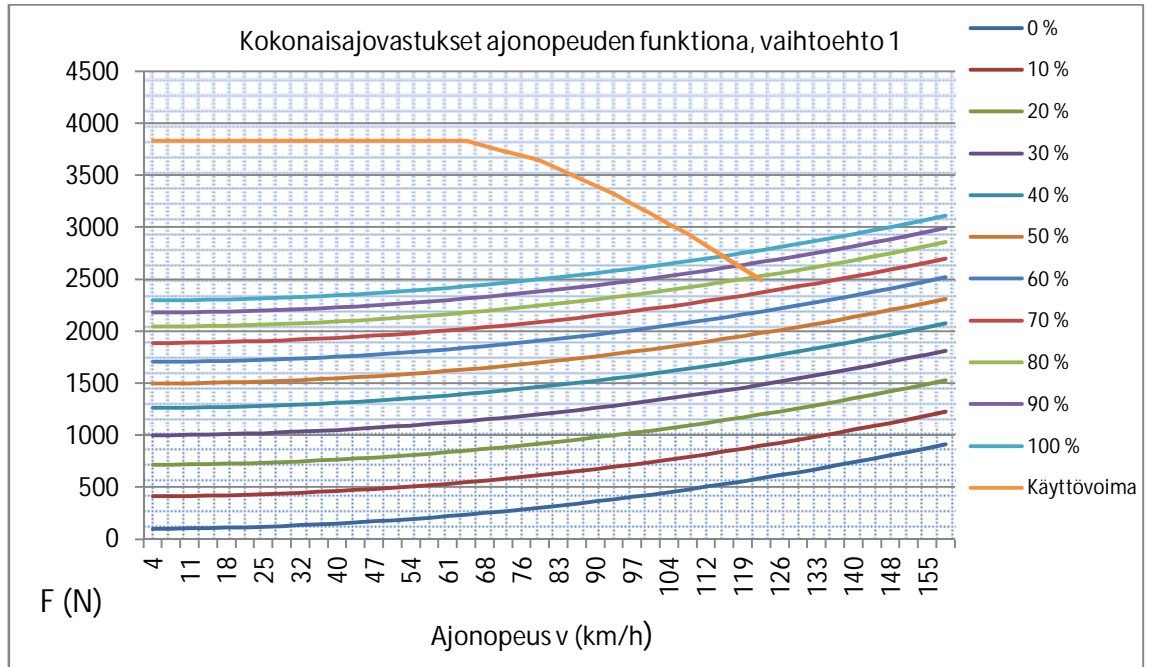
Vierintävastusvoima F_r (N)		
	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2
Etuakseli	44	43
Taka-akseli	58	57
Yhteensä	102	100

Kaavan (51) avulla lasketut nousuvastusvoiman suuruudet mäen jyrkkyyden funktiona on esitetty taulukossa 16. Mäen jyrkkyys on ilmoitettu prosentteina. Samalla on esitetty myös kaavan (52) avulla lasketut vierintävastusvoimien suuruudet eri jyrkkyyksillä, sillä vierintävastusvoima pienenee mäen jyrkkyyden kasvaessa.

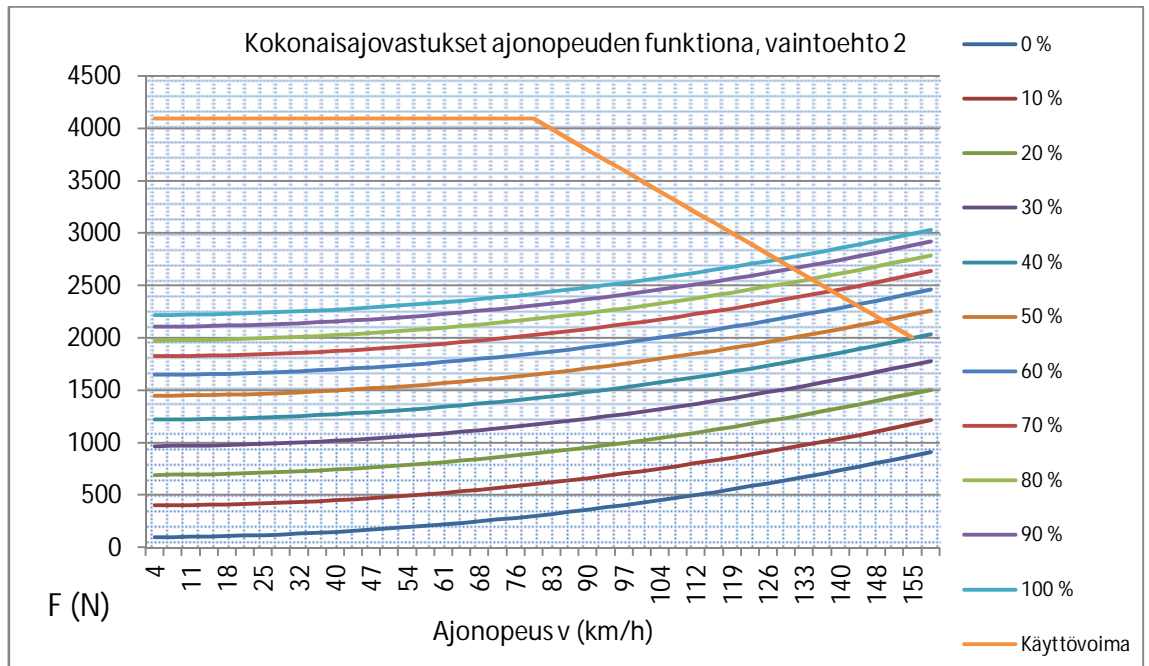
Taulukko 16. Molempien vaihtoehtojen nousuvastusvoimat ja vierintävastusvoimat mäen jyrkkyyden funktiona.

Nousuvastus F_n ja vierintävastus F_r mäen jyrkkyyden funktiona					
		Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2	
Nousu (%)	α_{nousu} (rad)	F_n (N)	F_r (N)	F_n (N)	F_r (N)
5	0,050	157	102	153	100
10	0,100	313	102	305	99
15	0,149	467	101	455	99
20	0,197	617	100	601	98
25	0,245	763	99	744	97
30	0,291	904	98	881	95
35	0,337	1040	97	1013	94
40	0,381	1169	95	1139	93
45	0,423	1291	93	1258	91
50	0,464	1407	91	1371	89
55	0,503	1517	90	1477	87
60	0,540	1619	88	1577	85
65	0,576	1715	86	1671	84
70	0,611	1805	84	1758	82
75	0,644	1888	82	1839	80
80	0,675	1966	80	1915	78
85	0,704	2038	78	1985	76
90	0,733	2105	76	2051	74
95	0,760	2168	74	2111	72
100	0,785	2225	72	2168	70

Ajettaessa tasaisella nopeudella ajovastusvoima on eri ajovastusvoimien summa. Liitteissä 3 ja 4 on esitetty molempien mallien lasketut kokonaisajovastukset sekä ajonopeuden että mäen jyrkkyyden funktiona.



Kuva 33. Vaihtoehtoon 1 kokonaisajovastukset ajonopeuden funktiona.



Kuva 34. Vaihtoehtoon 2 kokonaisajovastukset ajonopeuden funktiona.

Huomionarvoista on, että kuvissa 33 ja 34 esitetty käyttövoima edustaa suurinta mahdollista käyttövoimaa vetävillä pyörillä. Tällöin moottoreilta otetaan suurin mahdollinen vääntömomentti ja moottorit ovat hetkellisessä ylikuormitusstilassa, jonka keston valmistaja on rajoittanut tietyn pituiseksi. Todellisuudessa kuvissa 33 ja 34 esitetty käyttövoima ei siis välttämättä ole aina käytettävissä hetkellisen ylikuormituksen rajoitusten vuoksi. Kuitenkin teoreettinen käyttövoimareservi on ajovastusvoimiin nähden huomattavasti suurempi vaihtoehdon 2 kuin vaihtoehdon 1 kohdalla, koska vaihtoehdon 2 maksimivääntömomentti on paljon suurempi kuin vaihtoehdon 1. Toisaalta vaihtoehdon 2 maksimipyörimisnopeus on noin 2000 kierrosta minuutissa, kun vaihtoehdon 1 maksimipyörimisnopeus on noin 3000 kierrosta minuutissa. Vääntömomentti alkaa alentua kentänheikennyksen takia vaihtoehdolla 1 pienemmällä ajonopeudella kuin vaihtoehdolla 2 suuremmasta voimansiirron välityssuhteesta johtuen.

4.3.5 Kiihtyvyys kiihdytysvoiman perusteella

Kaikkien ajovastusvoimien laskemisen jälkeen voitiin laskea auton teoreettinen maksimikihtyvyys suurimman mahdollisen käyttövoiman perusteella eri ajonopeuksilla. Auton kiihdyttämiseen jäävä reservivoima on yleisesti käyttövoiman ja ajovastusvoimien erotus:

$$F_a = F_k - (F_i + F_r + F_n) \quad (56)$$

F_k on käyttövoima vetävillä pyörillä

Käyttövoima pyörillä on pyörille välitetyn vääntömomentin ja renkaan dynaamisen vierintäsäteen osamäärä:

$$F_k = \frac{T * \eta_v * i_v}{R_d} \quad (57)$$

η_v on voimansiirron hyötysuhde. (19, s. 41.)

Kiihtyvyys saadaan, kun jaetaan kiihdyttämistä varten jäänyt reservivoima redusoidulla massalla. Redusoidun massan laskemista varten tarvittiin eri pyöriä osien hitaus-

momentit. Koska tulevan auton eri osien hitausmomenteja ei voi tietää ennalta, tyydyttiin laskuissa käyttämään aiempia autoja varten valmistettujen komponenttien keskimääräisiä hitausmomenteja. Kaavan (55) avulla laskettiin kummallekin vaihtoehdolle hitausvaikutuskertoimet ja edelleen kaavan (54) avulla saatiin molemmille vaihtoehdoilla laskettua redusoidut massat, jotka on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Vaihtoehtojen 1 ja 2 redusoidut massat.

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2
Redusoitu massa (kg)	343	350

Havaitaan, että vaikka vaihtoehdon 2 massa on pienempi kuin vaihtoehdon 1, on vaihtoehdon 2 redusoitu massa kuitenkin suurempi. Tämä johtuu toisen moottorivaihtoehdon roottorin suuremmasta hitausmomentista. Liitteissä 5 ja 6 on esitetty molempien vaihtoehtojen lasketut teoreettiset maksimikihtyvyydet kiihdytysvoiman perusteella eri ajonopeuksilla. On huomattava, että nämä kiihtyvyydet eivät välttämättä vastaa todellisuutta varsinkaan pienillä ajonopeuden arvoilla, koska renkaan ja tien väliseen kitkaan liittyviä asioita ei ole vielä tässä vaiheessa huomioitu. Käyttövoimareservin ja redusoidun massan avulla saatiin vaihtoehdon 1 suurimmaksi mahdolliseksi kiihtyvyydeksi $10,89 \text{ m/s}^2$ ja vaihtoehdon 2 suurimmaksi mahdolliseksi kiihtyvyydeksi $11,44 \text{ m/s}^2$.

4.3.6 Kiihtyvyys kitkan perusteella

Auton kiihtyvyyteen kiihdytystilanteessa vaikuttaa moottorin suorituskyvyn lisäksi renkaan ja tien välinen kitkavoima, jonka suuruuteen vaikuttavat ajoradan laatu, renkaan ominaisuudet, ajonopeus sekä mahdollinen luisto. Mikäli pyörien käyttövoima ylittää kitkavoiman, rengas luistaa. Myös auton painon siirtyminen kiihdytystilanteessa vaikuttaa kitkavoiman suuruuteen. Kiihdytystilanne aiheuttaa dynaamisen painonsiirron tak akselille. Dynaaminen painonsiirto on suurin sillä hetkellä, kun autoa aletaan kiihdyttää paikaltaan, jolloin nopeus ja sitä kautta ilmanvastusvoima eivät ole vielä ehtineet kasvaa merkittäviksi. Tällöinhän ainoan ajovastusvoiman muodostaa vierintävastus, jolloin suurempi käyttövoimareservi jää kiihdytykselle. Mikäli renkaan pito ja moottorin tuottama vääntömomentti ovat riittäviä, aiheuttaa kiihdytys dynaamisen painonsiirron, joka voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$\Delta G_a = \frac{G_a}{g} * \frac{h}{l_a} * a \quad (58)$$

ΔG_a on dynaaminen painonsiirto

G_a on auton paino eli $m * g$

h on painopisteen korkeus

l_a on akseliväli

a on kiihtyvyys

Dynaaminen painonsiirto on etu takavetoisen auton kiihtyvyyttä ajatellen, sillä painon siirtyessä kiihdytyksessä taka-akselille renkaan ja tien välinen kitkavoima kasvaa. Mikäli käyttövoimareserviä on, voidaan suurempi voima välittää ajorataan, mikä mahdollistaa suuremman kiihtyvyyden. Tällöin takavetoisen auton teoreettinen maksimikihtyvyys tasaisella maalla renkaan ja tien välisen vierintäkitkakertoimen, painopisteen paikan sekä akselivälin perusteella on

$$a_{max} = \frac{\mu_T * \frac{S_e}{l_a} - f_N}{1 - \mu_T * \frac{h}{l_a}} * g \quad (59)$$

a_{max} on teoreettinen maksimikihtyvyys

μ_T on renkaan ja tien välinen vierintäkitkakerroin

S_e on painopisteen ja etuakselin välinen etäisyys vaakasuunnassa

f_N on nimellisvierintävastuskerroin

Rajatapauksessa, jossa käyttövoima on kasvatettu niin suureksi, että se on kitkavoiman suuruinen ja vetävien pyörien renkaat ovat juuri alkamassa luistaa, on voimassa

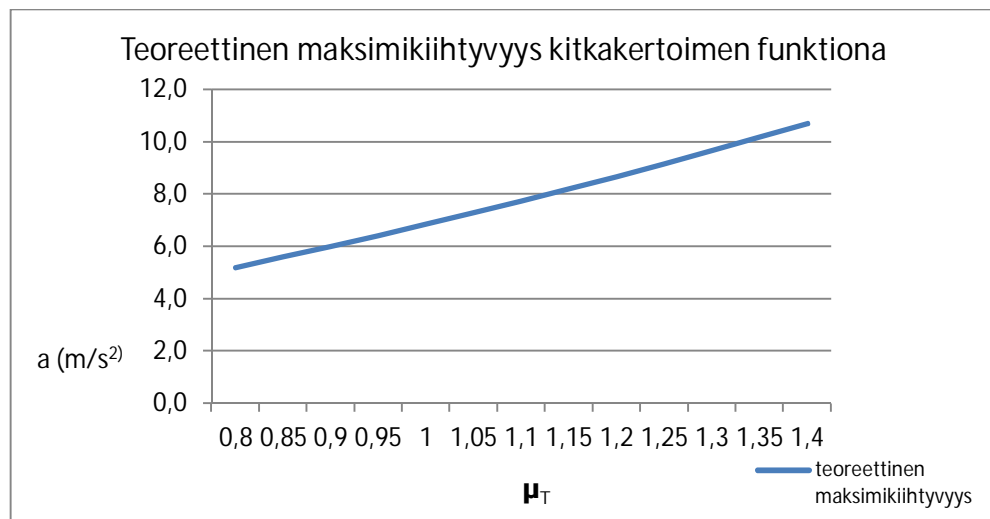
$$\mu_T * (G_t + \Delta G_a) = F_a + F_r \quad (60)$$

G_t on auton painosta ja painojakaumasta riippuva staattinen paino taka-akselilla. (19, s. 115-116.)

Lähtöarvojen, edellä laskettujen käyttövoimien sekä kaavojen (58) ja (60) avulla voidaan laskea, kuinka suuri ajoradan ja renkaan välisen kitkakertoimen olisi oltava molempien vaihtoehtojen tapauksessa, jotta rengas ei ala luistaa lähtökiihdytyksessä. Tällöin oletetaan, että kiihtyvyys on suurin mahdollinen käyttövoimareservin avulla laskettu kiihtyvyys. Koska tulevan auton akseliväliä, painopisteen etäisyyttä etuakselista tai painopisteen korkeutta ei voida tietää, tyydytään laskuissa käyttämään aiemmin valmistettujen autojen keskimääräisiä vastaavia arvoja. Kaavaa (60) hieman muuttamalla saadaan

$$\mu_T = \frac{F_k}{(G_t + \Delta G_a)} \quad (61)$$

jolloin saadaan tuloksiksi, että vaihtoehdon 1 tapauksessa vierintäkitkakertoimen pitäisi olla noin 1,54 ja vaihtoehdon 2 tapauksessa noin 1,68. Vaadittavat kitkakertoimet ovat melko suuria, joten todellisessa tilanteessa voidaan pyörien olettaa luistavan. Teoreettiseksi maksimikiihtyvyydeksi lähdössä saadaan kaavan (59) avulla $10,75 \text{ m/s}^2$, jos kitkakertoimen oletetaan olevan 1,4. Tämäkin on melko suuri arvo. Kuvassa 35 on esitetty teoreettisen maksimikiihtyvyyden riippuvuus kitkakertoimesta.



Kuva 35. Teoreettinen maksimikiihtyvyys renkaan ja tien välisen vierintäkitkakertoimen funktiona.

4.3.7 Päätelmät

Edellisissä kolmessa kohdassa saatujen suuntaa-antavien tulosten perusteella toisen moottorivaihtoehdon avulla toteutettu yksimoottorinen auto olisi noin 10 kg kevyempi kuin ensimmäisen vaihtoehdon avulla toteutettu kaksimoottorinen auto. Toisaalta ensimmäisen vaihtoehdon laskettu redusoitu massa on hieman pienempi kuin toisen vaihtoehdon johtuen toisen moottorivaihtoehdon roottorin suuremmasta hitausmomentista. Toisen vaihtoehdon käyttövoimareservi ja sen perusteella laskettu maksimikiikkyvyys ovat suurempia kuin ensimmäisen vaihtoehdon. Oletettavasti renkaan ja tien välinen kitka ei kuitenkaan riitä kaiken voiman välittämiseen, jolloin toisen vaihtoehdon suuremmasta vääntömomentista ja käyttövoimareservistä ei ole merkittävää lisähyötyä. Kuten taulukosta 16 ilmenee, ei nousuvastusvoiman ja vierintävastusvoiman suuruudessa vaihtoehtojen välillä ole suuria eroavaisuuksia vaihtoehdon 2 hyväksi. Toisen vaihtoehdon asemaa vertailussa huononsi myös se, että se on öljyjäähdytteinen.

Edellisissä kolmessa kohdassa saadut tulokset koskevat lähinnä maksimikiikkyvyyttä paikaltaan lähdettäessä. Tulokset eivät kerro mitään vaihtoehtojen keskinäisistä eroista kaarreajossa. Kuitenkin tiedetään, että kahdella moottorilla toteutettu konfiguraatio on parempi käytännön ajotilanteissa, kun ajetaan suorilla tieosuuksilla sekä kaarteissa. Järjestelmä, jossa molemmilla vetävillä pyörillä on oma erikseen ohjattu moottori, on huomattavasti edistyneempi kuin yhdellä moottorilla ja mekaanisella tasauspyörästöllä toteutettu perinteisempi ratkaisu.

Lähteet

- 1 Michael H. Westbrook. 2001. The Electric Car. Lontoo, Iso-Britannia: The Institution of Electrical Engineers.
- 2 Jukka Ahoranta. 1995. Sähkötekniikka. Porvoo: WSOY.
- 3 Lauri Aura. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka. Porvoo: WSOY.
- 4 Oikosulkumoottorit, teknistä perustietoa. PDF-dokumentti. ABB Motors. Luettu 14.5.2011.
- 5 Tony R. Kuphaldt. Lessons in Electric Circuits Volume II-AC. PDF -dokumentti. <http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/2.html>. 25.6.2007. Luettu 15.5.2011.
- 6 Jouni Ilmaniemi. Formula Student Electric. Opinnäytetyö. 2011. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 7 48550 Electrical Energy Technology, Chapter 6, Synchronous Machines. PDF -dokumentti. <http://services.eng.uts.edu.au/cempe/subjects_JGZ/eet/eet_ch6.pdf>. Luettu 16.5.2011.
- 8 Hanne Jussila. 2005. Napakäämityn murtovakokeestomagneettitahtikoneen suunnittelu. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 9 Mauri Airila. 1993. Mekatroniikka. Helsinki: Otatieto.
- 10 Pentti Inkinen. 2002. Momentti 2. Insinöörifysiikka. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.
- 11 Mikko Viinikainen. Resolverit aseman mittauksessa –tutkielma. PDF –dokumentti. Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.ele.tut.fi/teaching/ele-3350/resolverit.pdf>> Luettu 10.6.2011.
- 12 Mika Ikonen. 2004. IGBT:n kytkentäviiveiden mittaaminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 13 Vaihtosähkön perusteet. PDF –dokumentti. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/liite1.pdf>. Luettu 13.6.2011.
- 14 Pirkka Peltola. Fourier–analyysin perusteet –luentomoniste. PDF –dokumentti. Luettu 13.6.2011.
- 15 Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus. PDF –dokumentti. <http://heikki.pp.fi/abb/090_0007.pdf> Luettu 26.6.2011.
- 16 Alex Joseph Skorcz. 2007. Performance Evaluation of an Active Filter Non-Regenerative AC Drive. Diplomityö. Texas A&M University.

- 17 Jani Takala ym. 2009. Tasasähkönjakeluverkon vaihtosuuntaaja galvaanisella erotuksella. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 18 Jouko Niiranen. 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki: Ota-tieto.
- 19 Olavi Laine. 1985. Autotekniikka 1. Jyväskylä: Gummerus.
- 20 Kari Suvanto. 2003. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita.
- 21 Tuomo Hakola. 2008. Taajuusmuuttajakäytön testausjärjestelmän käyttöönotto. Insinöörityö. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 22 Jesse Kokkonen. 2007. Sähkökäytön valintaperiaatteet ja monimoottorikäytöt malmin laaduntasauksessa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Liite 1.

HPF 12 –auton massan arviointi, vaihtoehto 1.

Aikaisempien 3 auton omamassojen keskiarvo		
HPF09:n massa	201	kg
HPF10:n massa	197	kg
HPF11:n massa	198	kg
Keskiarvo	199	kg
Vähennettävät massat		
moottori Yamaha R6	-55	kg
kuivasumppu pumppu	-1,6	kg
ilmanottokanava	-3,2	kg
kuivasumppusysteemi	-1,3	kg
kuivasumpputankki	-0,8	kg
catch cans	-0,08	kg
pakoputki & äänenvaimennin	-3,8	kg
PA-säiliö	-1	kg
PA muut	-2	kg
polttoaine	-3,6	kg
öljy	-2,4	kg
tasauspyörästö	-2,5	kg
Lisättävät massat		
ylimääräinen ketjusuoja	0,5	kg
TSAL	0,4	kg
kontaktorit	0,72	kg
moottori 1 x 2	23,8	kg
vaihtosuuntaaja x 2	22	kg
HV-kaapelit	5	kg
HV muut	2	kg
LV-komponentit + muut	10	kg
muu massan lisäys	10	kg
akku	57	kg
Omamassa	253	kg
Kuljettaja	68	kg
Kokonaismassa	321	kg

Liite 2.

HPF 12 –auton massan arviointi, vaihtoehto 2.

Aikaisempien 3 auton omamassojen keskiarvo		
HPF09:n massa	201	kg
HPF10:n massa	197	kg
HPF11:n massa	198	kg
Keskiarvo	199	kg
Vähennettävät massat		
moottori Yamaha R6	-55	kg
kuivasumppu pumppu	-1,6	kg
ilmanottokanava	-3,2	kg
kuivasumppusysteemi	-1,3	kg
kuivasumpputankki	-0,8	kg
catch cans	-0,08	kg
pakoputki & äänenvaimennin	-3,8	kg
PA-säiliö	-1	kg
PA muut	-2	kg
polttoaine	-3,6	kg
öljy	-2,4	kg
Lisättävät massat		
ylimääräinen ketjusuoja	0,5	kg
TSAL	0,4	kg
kontaktorit	0,72	kg
moottori 2	25	kg
vaihtosuuntaaja	10	kg
HV-kaapelit	5	kg
HV muut	2	kg
LV-komponentit + muut	10	kg
muu massan lisäys	10	kg
akku	57	kg
Omamassa	245	kg
Kuljettaja	68	kg
Kokonaismassa	313	kg

Liite 5.

Moottorin pyörimisnopeus, vääntömomentti pyörillä, käyttövoima, kiihdytysvoima sekä kiihtyvyyden ajonopeuden funktiona, vaihtoehto 1.

v (m/s)	v (km/h)	n _{mt.} (rpm)	T (Nm)	F _k (N)	F _a (N)	a (m/s ²)
0	0	0	1022	3834	3731	10,89
1	3,6	76	1022	3834	3731	10,89
2	7,2	153	1022	3834	3730	10,89
3	10,8	229	1022	3834	3727	10,88
4	14,4	305	1022	3834	3724	10,87
5	18	381	1022	3834	3721	10,86
6	21,6	458	1022	3834	3716	10,85
7	25,2	534	1022	3834	3711	10,83
8	28,8	610	1022	3834	3704	10,81
9	32,4	686	1022	3834	3697	10,79
10	36	763	1022	3834	3689	10,77
11	39,6	839	1022	3834	3680	10,74
12	43,2	915	1022	3834	3671	10,71
13	46,8	991	1022	3834	3660	10,68
14	50,4	1068	1022	3834	3649	10,65
15	54	1144	1022	3834	3637	10,61
16	57,6	1220	1022	3834	3624	10,58
17	61,2	1297	1022	3834	3610	10,54
18	64,8	1373	1022	3834	3595	10,49
19	68,4	1449	1022	3834	3580	10,45
20	72	1525	1022	3834	3563	10,40
21	75,6	1602	1022	3834	3546	10,35
22	79,2	1678	1022	3834	3528	10,30
23	82,8	1754	1022	3834	3509	10,24
24	86,4	1830	1017	3814	3469	10,13
25	90	1907	1004	3764	3399	9,92
26	93,6	1983	990	3714	3327	9,71
27	97,2	2059	977	3664	3255	9,50
28	100,8	2135	964	3614	3182	9,29
29	104,4	2212	950	3564	3108	9,07
30	108	2288	937	3514	3033	8,85
31	111,6	2364	924	3464	2958	8,63
32	115,2	2440	911	3414	2881	8,41
33	118,8	2517	897	3364	2804	8,18
34	122,4	2593	884	3314	2726	7,96
35	126	2669	871	3264	2647	7,73
36	129,6	2746	857	3214	2567	7,49
37	133,2	2822	844	3164	2487	7,26
38	136,8	2898	831	3114	2405	7,02
39	140,4	2974	817	3064	2323	6,78

Liite 6.

Moottorin pyörimisnopeus, vääntömometti pyörillä, käyttövoima, kiihdytysvoima sekä kiihtyvyyden ajonopeuden funktiona, vaihtoehto 2.

v (m/s)	v (km/h)	n _{mt.} (rpm)	T (Nm)	F _k (N)	F _a (N)	a (m/s ²)
0	0	0	1093	4099	4000	11,44
1	3,6	51	1093	4099	3999	11,44
2	7,2	102	1093	4099	3998	11,43
3	10,8	154	1093	4099	3996	11,43
4	14,4	205	1093	4099	3993	11,42
5	18	256	1093	4099	3989	11,41
6	21,6	307	1093	4099	3985	11,40
7	25,2	358	1093	4099	3979	11,38
8	28,8	410	1093	4099	3973	11,36
9	32,4	461	1093	4099	3966	11,34
10	36	512	1093	4099	3958	11,32
11	39,6	563	1093	4099	3949	11,29
12	43,2	614	1093	4099	3939	11,27
13	46,8	666	1093	4099	3929	11,24
14	50,4	717	1093	4099	3917	11,20
15	54	768	1093	4099	3905	11,17
16	57,6	819	1093	4099	3892	11,13
17	61,2	870	1093	4099	3878	11,09
18	64,8	922	1093	4099	3864	11,05
19	68,4	973	1093	4099	3848	11,01
20	72	1024	1093	4099	3832	10,96
21	75,6	1075	1093	4099	3814	10,91
22	79,2	1126	1092	4096	3794	10,85
23	82,8	1178	1066	3996	3675	10,51
24	86,4	1229	1039	3897	3556	10,17
25	90	1280	1013	3797	3436	9,83
26	93,6	1331	986	3698	3315	9,48
27	97,2	1382	960	3598	3193	9,13
28	100,8	1434	933	3499	3070	8,78
29	104,4	1485	907	3399	2947	8,43
30	108	1536	880	3299	2822	8,07
31	111,6	1587	853	3200	2697	7,71
32	115,2	1638	827	3100	2571	7,35
33	118,8	1690	800	3001	2444	6,99
34	122,4	1741	774	2901	2317	6,63
35	126	1792	747	2802	2188	6,26
36	129,6	1843	721	2702	2059	5,89
37	133,2	1894	694	2603	1928	5,52
38	136,8	1946	668	2503	1797	5,14
39	140,4	1997	641	2404	1665	4,76

Liite 7.

Standardin IEC 60034-1 mukaiset käyttöluokat.

Käyttöluokka	Selitys
S1	Jatkuva vakiokuormitus niin kauan, että loppulämpötila saavutetaan.
S2	Lyhytaikainen vakiokuormituskäyttö loppulämpötilaa saavuttamatta. Moottori ehtii jäähtyä ennen uutta käyttöä.
S3	Jaksottainen ajoittaiskäyttö. Koostuu sarjoista samanlaisia jaksoja, joissa vakiokuormitus- ja seisonta-aika. Loppulämpötilaa ei saavuteta.
S4	Jaksollinen käynnistyskäyttö. Koostuu sarjoista samanlaisia jaksoja, joissa käynnistys-, vakiokuormitus- ja seisonta-aika. Loppulämpötilaa ei saavuteta.
S5	Jaksollinen käynnistys- ja jarrutusikäyttö. Koostuu sarjoista samanlaisia jaksoja, joissa käynnistys-, vakiokuormitus-, jarrutus- sekä seisonta-aika. Loppulämpötilaa ei saavuteta.
S6	Pysähtymätön ajoittaiskäyttö. Koostuu sarjoista samanlaisia jaksoja, joissa vakiokuormitus- ja tyhjäkäyntiaika. Loppulämpötilaa ei saavuteta.
S7	Pysähtymätön käynnistys- ja jarrutusikäyttö. Koostuu sarjoista samanlaisia jaksoja, joissa käynnistys-, vakiokuormitus- ja jarrutusaika. Loppulämpötilaa ei saavuteta.
S8	Pysähtymätön määräjaksolliskäyttö. Koostuu sarjoista samanlaisia jaksoja, joissa vakiokuormitus erilaisilla pyörimisnopeuksilla. Loppulämpötilaa ei saavuteta.
S9	Käyttö vaihtelevalla kuormalla. Käyttö muodostuu sallitulla käyttöalueella tapahtuvista kuorman ja nopeuden vaihteluista, jotka yleensä eivät ole jaksollisia.
S10	Käyttö vaihtelevalla vakiokuormalla. Käyttöjakso muodostuu enintään neljästä osajaksosta erisuurella vakiokuormalla. Käyttöaika kullakin vakiokuormalla on niin pitkä, että loppulämpötila saavutetaan.