

Vassiliy Taran

Robottiparkin sähkömoottorikäytön mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

20.10.2018

Tekijä Otsikko	Vassiliy Taran Robottiparkin sähkömoottorikäytön mitoitus
Sivumäärä Aika	52 sivua + 2 liitettä 20.10.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	Lehtori Jukka Karppinen
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä sähkömoottorikäytön mitoitus robottiparkkia varten. Aiheen lähtökohta on teoreettinen ja valittu oman ajatuksen ja mielikuvituksen perusteella. Tämän työn tavoite tehdä mitoitus, jossa voimansiirtoelimenä toimii taajuusmuuttajalla ohjattu oikosulkumoottori. Aikaisemmin vastaava tarkansäädön käytännönsovelluksissa käytettiin yleisesti tasavirtamoottoria.</p> <p>Teorian osuudessa käsitellään sähkömoottorikäytön mitoitusprosessia, eli millä periaatteella tehdään sähkömoottorikäytön mitoitus sekä siihen liittyviä käsitteitä ja komponentteja. Teorian osuudessa puhutaan yleisesti moottorin ja kuorman momenteista. Puhutaan moottorin ja taajuusmuuttajan rakenteesta ja perustoiminnasta. Sen tarkoitus palauttaa lukijan mieleen niiden laitteiden ja käsitteiden tarkoitus ja toiminta joita sisältää sähkömoottorikäytön mitoitus ennen varsinaista mitoitusta.</p> <p>Käytännön osuudessa tehdään ensin prosessin konseptin arviointi, sen jälkeen tehdään varsinainen mitoitus arvioitujen ja oletettujen kuormitusten vastamomenttien nojalla. Jos aikaa riittää mitoitetaan tähän sähkömoottorikäyttöön kaapelit ja lasketaan liittymistehon tarve. Se tarkoittaa siitä että prosessi on teoreettinen mutta mitoitus pyritty toteuttaa käytännönkohtaisesti. Moottorin ja taajuusmuuttajan valinta tehdään sekä käsin, että laskentaohjelman Drivesize:n 4.4 avulla.</p>	
Avainsanat	Sähkömoottorikäyttö, oikosulkumoottori, taajuusmuuttaja

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkömoottorikäytöt	3
2.1	Sähkömoottorikäytön mitoitusprosessiin liittyvät käsitteet	3
2.2	Sähkömoottorit	7
2.3	Taajuusmuuttajat	14
3	Sähkömoottorikäytön käytännön mitoitus	21
3.1	Sähkömoottorikäytön mitoitus	21
3.2	Mitoitus	23
3.2.1	Kuorman vastaanotto nosto-lasku vaihe	23
3.2.2	Kuorman siirto vaakasuorassa tasossa	28
3.2.3	Kantavan alustan pyörivän liikkeen toteuttava sähkömoottorikäyttö	33
3.2.4	Nostimen noston ja laskun mitoitus	36
4	Standardit ja direktiivit	40
5	Yhteenveto	42
	Lähteet	43

Liitteet

Liite 1. Sähkömoottorikäytön mitoitus DriveSize:ssa

Liite 2. Taulukko 1. Pyörimisliikkeeseen ja eteneväliikkeeseen liittyvät suureet ja kaavat

Lyhenteet

CENELEC	European Committee For Electrotechnical Standardization. Eurooppalainen sähköalan standardisoimisjärjestö
DTS	Direct Torque Control. Suora momenttisäätö.
DOL	Direct On Line. Suoraan verkkokäyttö.
HD	Harmonization Document. Yhdenmukaistamisasiakirjat.
IE	International Efficiency. Hyötysyhdeluokka.
IEC	International electrotechnical commission. Kansainvälinen standardoimisjärjestö.
IGBT	Insulated-gate Bipolar Transistor. Eristetty-hila bipolaaritransistori
IGC	Integrated Gate-commutated Thyristor. Integroitu hila-kommutoitu tyristori.
GTO	Gate Turn-off Thyristor. Tyristori

1 Johdanto

Opinnäytetyössä käsitellään sähkömoottorikäyttöä. Tehdään sähkömoottorikäytön mitoitus robottiparkkia varten. Tässä työssä ei käsitellä mikä on robottiparkki vaan rajataan sähkömoottorikäytön mitoitukseen. Sana robottiparkki tarkoittaa mitä sovellusta varten tehdään sähkökäytön mitoitus. Robottiparkkia mainitaan vain johdannossa.

Työn tavoite saada selville kuinka paljon voisi tarvita moottorikäyttöä robottiparkkia varten ja tehdä jokaista sähkömoottorikäyttöä varten mitoitus. Mitoituksen aikana arvioidaan prosessissa mahdolliset syntyvät liikkeet, kappaleen siirrot ja aiheuttavat vastavoimat. Näiden arvioitujen alkutietojen perusteella valita sopivat moottorit ja taajuusmuuttajat.

Sähkömoottorikäyttö on nopeussäädetty käyttö, jolla voi säätää halutulla tavalla pyörimisnopeutta ja momenttia, jotta täyttää prosessin vaatimuksia. Kun pyritään mahdollisimman tarkasti säätää sähkömoottoreiden momenttia ja pyörimisnopeutta sekä mahdollisimman pienillä ja yksinkertaisimmilla säätötavoilla, sitä paremman saadaan sähkömoottorikäytön tulos. Aikaisemmin tarkkasäätösovelluksessa enimmäkseen käytettiin tasasähkömoottoreita, eli tasasähköllä toimivia sähkökoneita. Nykyään tehoelektronikan kehitys on mahdollistanut taajuusmuuttajan avulla säätää vaihtovirralla toimivia sähkökoneita.

Tehoelektronikan kehitys on mahdollistanut oikosulkumoottorin käyttö nopeussäädetyssä sovelluksissa. Taajuusmuuttajan avulla oikosulkumoottoria voidaan käyttää nelikvadranttikäyttönä. Taajuusmuuttajan DTC-säädöllä päästään oikosulkumoottorien yhtä tarkkaan säätöön kuin tasavirtamoottorien. Toisin sanoen taajuusmuuttajalla ohjattu oikosulkumoottori voi olla yhtä luotettava, kuin tasavirtamoottorikäyttö.

Robottiparkki on automatisoitu sähkömekaaninen pysäköintilaitos. Se voi olla hissi tai autonosturi, joka pysäköi ajoneuvon tiiveimmin pysäköintipaikalle. Täysin automatisoidulla pysäköintilaitoksessa itse pysäköintijärjestelmä hoitaa auton sijoittaminen pysäköintipaikalle. Ajoneuvon kuljettajan pitää vain asettaa auto sisäkäynninkohdalle [8].

Automatisoitu parkkipaikkalaitos merkittävä hyöty on siitä, että se vie noin 50 % vähemmän verrattuna perinteiseen parkkipaikkalaitokseen tilaa, koska siinä ei tarvitse tilaa ajokujille eikä rampeille. Pysäköinnin hakuliikennettä optimoi automatiikka valitsemalla lyhyin reitti parkkipaikan sijaintiin [8].

Sen heikkopuolet ovat siinä, että se on huomattavasti kalliimpi ratkaisu ja hidas verrattuna perinteiseen parkkipaikkalaitokseen, sekä se vaatii huoltotoimenpiteet ja kunnossapitotoimenpiteet [8].

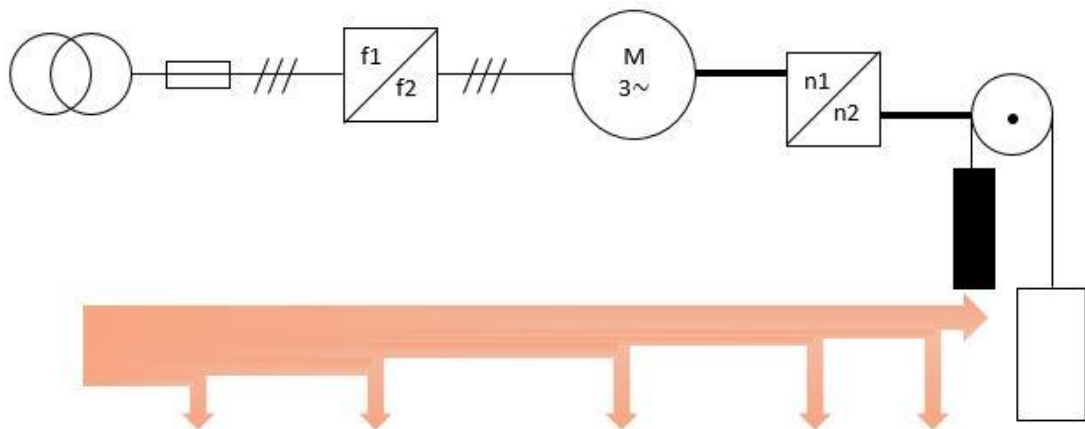
Kuvassa 1 näkyy erään robottiparkin rakenne.



Kuva 1. Robottipakki "<https://www.autoevolution.com/news/how-automated-parking-systems-work-19523.html>"

2 Sähkömoottorikäytöt

Kuvasta 2 havaitaan miten sähköenergia muuttuu ja välittyy mekaaniseksi energiaksi. Se alkaa muuntajasta ja päättyy prosessiin. Kuten näkyy kuvasta, jokaisessa seuraavassa energian muutoskohdan porrastuksessa sekä kaapeleissa tapahtuu energian häviöitä. Sähkökäytön tavoitteena ja tehtävänä on suunnitella ja toteuttaa energiaan kannalta mahdollisimman tehokas mitoitus. Mitoitus toteutetaan oikealta vasemmalle, eli ihan vastakkaiseen suuntaan kuin sähköenergian siirto. Aloitetaan prosessin arvioimisesta, jos se etukäteen ei ole määritetty, sitten valitaan tarpeen mukaan vaihteisto, seuraavaksi valitaan sopiva moottori ja tälle moottorille taajuusmuuttaja. Sen jälkeen valitaan tähän sovellukseen kaapelit ja niille riittävän luotettava ja toimintavarma suojaus. Viimeiseksi kokonaisenergian tarpeen perusteella mitoitetaan syöttävä muuntaja. Sähkömoottorikäytön varsinainen mitoitus sisältää vaihteen, moottorin, taajuusmuuttajan tai jokin muun laiteen, joka toteuttaa nopeuden ja momentin säädön.



Kuva 2. Sähkömoottorikäyttö [2, s.3].

2.1 Sähkömoottorikäytön mitoitusprosessiin liittyvät käsitteet

Mitoituksen ensimmäisenä vaiheena on saada kaikki tarpeelliset lähtötiedot, joista prosessin toteutus riippuu. Nämä ovat suorituskykyvaatimukset, liikuteltavat massat ja erilaiset pyörien tai köysipumppujen säteet. Suorituskykyvaatimukset sisältävät maksimi-

nopeudet, kiihtyvyydet ja hidastuvuudet sekä ajoprofiilin. Liikuteltavat massat ovat esimerkiksi hyötykuorma, kori ja laitteet. Silloin kun lähtötietoihin liittyvät tiedot on selvitetty, seuraavaksi on otettava huomioon liikkeeseen vaikuttavat muut voimat. Nämä ovat esimerkiksi kitka, ilmavastus ja vierintävastus. Kolmannessa vaiheessa analysoidaan voimat ja liiketilat käytön eri tilanteissa. Usein se tehdään momentin käyttäytymisenä pyörimisnopeuden funktiona. Samalla on otettava huomioon vaihteen välityssuhde. Silloin kun kaikki yllä mainitut seikat otettu huomioon, tehdään laitteiden valinta niin, että ne ovat keskenään yhteensopivia ja kykenevät suorittamaan tehtävänsä. Viimeisenä vaiheena tehdään sähköinen mitoitus eli valitaan sopivat kaapelit, suodattimet, suojaukset, kompensointilaitteet ja muuntaja.

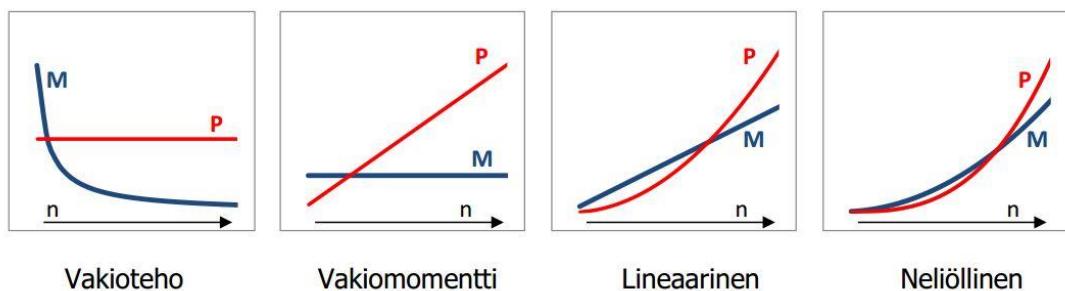
Tyypillisiä kuorman vastamomentteja

Kuvassa 3 näkyy tavallisimmat kuorman vastamomentit pyörimisnopeuden funktiona.

Vakioteholla nimeensä mukaan tarkoitetaan kuorma jonka teho pysyy vakiona pyörimisnopeuden kasvaessa ja momentti silloin laskee kääntäen verrannollisesti ja muistuttaa hyperbeliä. Tämä kuorman momenttikäyrää ilmenee rullaimissa, kun materiaalia rullataan ja rullan halkaisija muuttuu sen tuloksena. Rullakäyttöjä on kaapelin- ja langanvalmistuksessa ja erilaisissa rullainprosesseissa.

Vakiomomentti

Vakiomomentilla tarkoitetaan kuorman vastamomenttia, jonka momentti on sama kierrosluvuista riippumatta ja teho kasvaa lineaarisesti nopeuden mukaan. Tällaista kuormi-



Kuva 3. Tyypillisiä kuorman momenttia [2, s.20].

tusta aiheuttavat nostimet, hissit, kuljettimet, syöttölaitteet ja ruuvikompressorit. Joissakin tapauksissa sovellus saattaa kuitenkin vaatia käynnistyäkseen suuremman irrotusmomentin.

Lineaarinen momentti

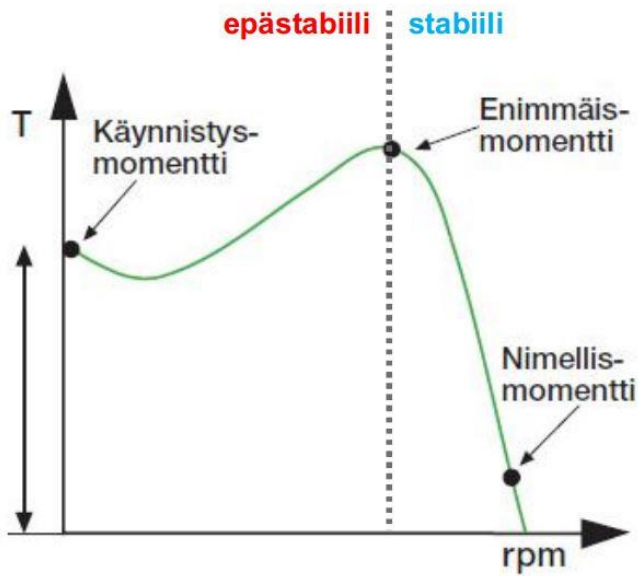
Käytöissä, joissa momentti kasvaa lineaarisesti nopeuden mukaan ja teho nopeuden neliön mukaan sanotaan lineaariseksi momentiksi. Tätä tyyppistä kuormaa tyypillisesti aiheuttavat muodonmuutostyötä tekevät sovellukset/ työstökoneen esim. valssaimet, kalanterit, leikkurit, sahat.

Neliöllinen momentti

Neliöllinen momenttikäyttö on kaikkein yleisin käyttötyyppi. Sen momentti nimeensä mukaan muuttuu neliöllisesti nopeuden kasvun mukaan ja teho samanaikaisesti nopeuden kuution mukaisesti. Tällaisia käyttöjä ovat keskipakopumput ja keskipakopuhaltimet. [2, s.20—21.]

Moottorin momentti

Suoraan verkkoon kytketyn oikosulkumoottorin momenttikäyrä on usein kuvan 4 mukainen.

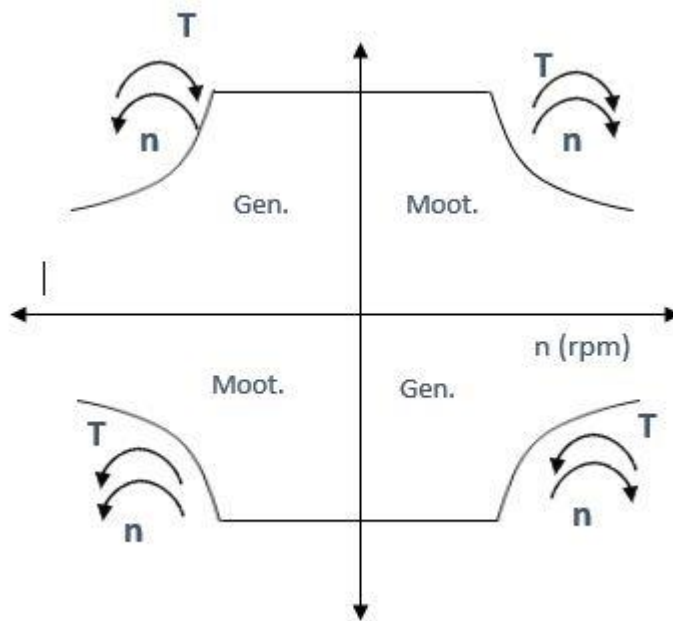


Kuva 4. Oikosulkumoottorin momenttikäyrä DOL-käytössä [3, s.8].

Käynnistysmomentti T_k on oikosulkumoottorin lähtömomentti silloin kun pyörimisnopeus on nolla, eli $n = 0$.

Käynnistysajan aikana pienintä momenttia merkitään T_s , ja sitä nimitetään sattelmomentiksi. Maksimi momentti on T_{max} , normaalisti sen pitää olla 1,6 kerta suurempi kuin moottorin nimellinen momentti. Moottorin nimellismomentti on T_N .

Säädetyissä käytöissä, silloin kun induktiomoottoria syötetään taajuusmuuttajan kautta, moottorin momenttikäyrä on kuvan 5 mukainen. [1, s.28].



Kuva 5. Neljän-kvadrantin käyttö [1, s.147].

Taajuusmuuttajan ohjattu induktioakone on mahdollista käyttää sekä generaattorina että moottorina molempiin pyörimissuuntiin koko pyörimisnopeus alueella. Asiaa havainnollistaa kuva 5. Esimerkiksi nostureissa, nostimissa voi toteuttaa prosessin niin että kuorman laskeessa mekaaninen potentiaalienergia muunnetaan sähköiseksi. Tällainen tilanne näkyy kuvassa, silloin kun moottoriin akseliin aiheuttaa ulkoinen momentti vastakkaisen suuntaan moottorin pyörimissuuntaan nähden[2, s.20].

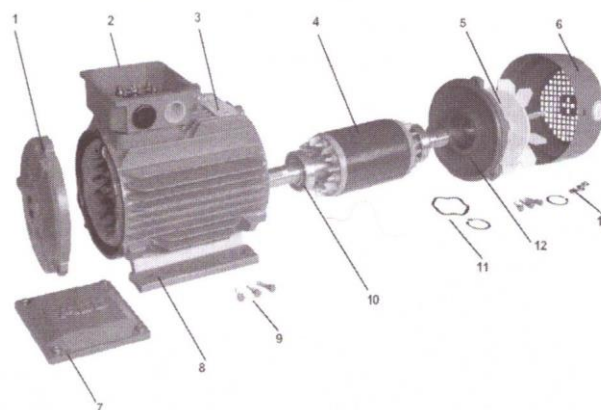
2.2 Sähkömoottorit

Sähkömoottori on pyörivä kone, joka toimii sähkömekaanisen energian muuttajana. Periaatteessa jokainen sähkömoottori voi toimia generaattorina, jos ulkoinen mekaaninen voima aiheuttaa moottoriakselille pyörivä momentti. Kuitenkin generaattorina käytetään juuri tähän sovellukseen suunniteltu sähkökonetta mahdollisimman hyvän hyötysuhteen saamiseksi. Sähkömoottorit jaetaan sähköominaisuuden perusteella kahteen ryhmään, tasasähkömoottoreihin (DC, direct current) ja vaihtosähkömoottoreihin (AC alternative

current). Vaihtosähkömoottori jakautuu vielä kahteen eri tyyppiin, tahtimoottoriksi ja epätahtimoottoriksi. Mikä tahansa sähkömoottorin koneelliseen rakenteeseen kuuluu kaksi osaa: staattori (seisoja) ja roottori (pyörijä). Sekä staattorissa että roottorissa on käämitys, johon sähkövirta luo magneettikenttiä, jotka aiheuttavat pyörivää momenttia. Sähköinen magneetti toki voidaan korvata kestomagneetilla, mutta kuitenkin vain toisen, eli vain staattorin tai roottorin. Kaikista koneista löytyy magneettiipiiri. Mekaaninen yhteys välittyy moottoriakselin kautta. [1, s.34–35.]

Oikosulkumoottorin rakenne

Oikosulkumoottori, jota kutsutaan myös induktiomoottoriksi sekä epätahtimoottoriksi, on sähköllä toimiva sähkömekaaninen kone, joka muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi pyörivän akselin avulla. Oikosulkumoottoria voi myös käyttää generaattorina, mutta yleisin käyttö on kuitenkin moottorina. Koska se on rakenteeltaan yksinkertainen, mikä tekee sen halvemmaksi verrattuna tasavirtamoottoriin, sekä huoltovapaa, se on yleisin teollisuudessa käytetty sähkökone. Oikosulkumoottorinimitys johtuu siitä, että sen roottorin käämitys on oikosuljettu. Induktiomoottoriksi sitä kutsutaan siksi että jännite joka ylläpitää virran kulku roottoriin indusoidaan sähkömagneettisen induktion avulla. Nimi epätahtimoottori on tuullut siitä että roottori pyöri staattorin magneettisen kentän nähden epätahdissa. Tämä on pää edellytys sille että roottoriin syntyisi virta. [1, s.34.]



1	D-pään kilpi	8	Staattori
2	Liitäntäkotelon runko	9	Pultti
3	Nimikilpi	10	Laakeri
4	Roottori	11	Aksiaalijousi
5	Tuuletin	12	N-pään kilpi
6	Tuuletinsuojus	13	Ruuvi
7	Liitäntäkotelon kansi		

Kuva 6. Oikosulkumoottorin rakenneosat [1, s.34].

Kuvassa 6 näkyy valurautarunkoisen kolmivaiheisen oikosulkumoottorin räjäytyskuva.

Oikosulkumoottorin käyttö on rajoitettu kuitenkin sellaisiin sovelluskohteisiin, joilla ei vaadita nopeussäätöä eikä momentin säätöä.

Oikosulkumoottorin käyttötavat

Sähkökoneiden normaalikäyttötavat on määritelty sen vuoksi, että voitaisiin valmistaa sarjamootoreita, joilla voidaan peittää mahdollisimman laajat käyttöalueet.

Eri käytöt vaativat moottorilta erilaisia ominaisuuksia. Jotta jokaista käyttöä varten ei tarvitsisi valmistaa omaa juuri siihen sopivaa moottoria, eri käyttötavat on pyritty ryhmittelemään sopivasti niin, että yhden ryhmän käyttötapauksiin sopii ominaisuuksiltaan samanlainen sähkömoottori. Normaalikäyttötavat on pyritty valitsemaan siten, että moottoreiden tarve voitaisiin tyydyttää mahdollisimman vähälukuisella määrällä erilaisia moottoreita. Normaalikäyttötavat ovat

- S1 jatkuva käyttö
- S2 lyhytaikainen käyttö
- S3 ajoittainen käyttö, käynnistys ei vaikuta lämpenemiseen
- S4 ajoittainen käyttö, käynnistys vaikuttaa lämpenemiseen
- S5 ajoittainen käyttö, käynnistys ja jarrutus vaikuttavat lämpenemiseen
- S6 jatkuva käyttö, ajoittaiset kuormitusjaksot
- S7 keskeytymätön käyttö käynnistyksineen ja jarrutuksineen
- S8 keskeytymätön käyttö ja napavaihto
- S9 käyttö vaihtelevalla kuormalla ja nopeudella.[1, s.20.]

Oikosulkukoneiden nimellistehot ja eristysluokat

IEC-72 on sähkökonestandardeita sarjan standardit, jossa määritetään sähkökoneiden yleiset ominaisuudet kuten mitat ja tehosarjat. IEC-72 suosituksen mukaan oikosulkumoottoreiden nimellistehot ovat tietyn normin määritellyn sarjan mukaiset. Esimerkiksi kun pyörimisnopeus on 1500 rpm, tehosarjan alku on seuraava:

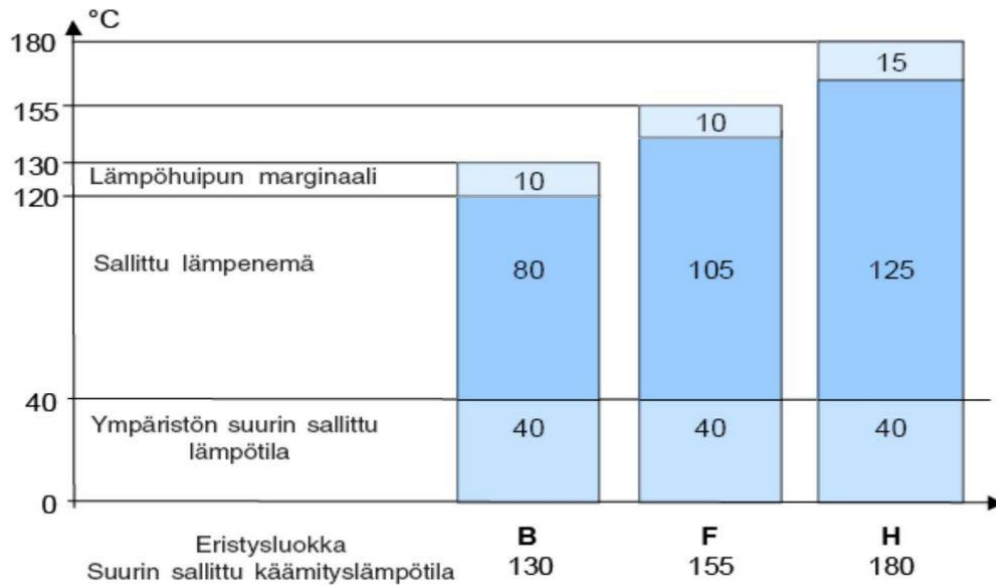
$$P /kW = 0,06; 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15$$

HD 231 on CENELEC:n yhdenmukaistamisasiakirja, jossa nämä tehot on sidottu moottorin runkokokoon. Runkokoot, lähinnä moottorin asennusmitat, ovat myös standardisoitu normisuosituksin. Asennusmittatunnuksena käytetään normeissa jaloilla varustetuissa koneissa akselitapin keskiviivan korkeutta asennustasosta millimetreissä ilmaistuna.

Laippamoottoreilla asennusmittatunnus on sama kuin laipassa olevien kiinnitysruuvien reikien sijaintiympyrän halkaisija. Usein samaan runkokokoon liittyy kaksi erikoista moottoria, joiden asennusmitat ovat samat. Nämä erotetaan toisistaan kirjaintunnuksella S (lyhyt paketti) ja L (pitkä paketti). Tunnuksia ovat esim. 71, 80, 90 ja F165. [1, s.25.]

Sähkökoneiden eristysmateriaalit on jaettu eristysluokkiin normin IEC 85 pohjalta. Jokaisella eristysluokalla on tunnuksensa, joka ilmaisee eristysmateriaalin käyttölämpötila-alueen ylärajan normaaleissa käyttöolosuhteissa.

Moottorin käämin eristyksen toimivuus riippuu moottorin lämpenemästä ja ympäristön lämpötilasta. Yleensä moottorin lämpimimmän pisteen eristys mitoitetaan nimellistehon ja 40 °C ympäristön lämpötilan mukaan. Tällöin moottori antaa akseliltaan arvokilvessä kerrotun tehon ja käämin lämpötilan nousu on enintään normeissa määrityn arvon suuruisen. Jos ympäristön lämpötila on yli 40 °C, nimellistehoa on tavallisesti pienennettävä.



Kuva 7. Yleisimmät moottorin eristysluokat [3, s.24]

Kuvassa 7 ovat vaihtovirtakoneiden eristysluokkien B, F ja H sallitut keskimääräiset lämpenemät resistanssimittauksille mitattuna. Ylimääräinen 10^o:n lämpenemä on normin mukainen käämin kuumimman pisteen ja sallitun keskimääräisen lämpenemän erotus.

Sähkökoneelle ilmoitetut tehoarvot ovat voimassa jatkuvassa S1 käytössä kun ympäristön lämpötila ei ylitä + 40° C ja asennuspaikka on korkeintaan 1000 m merenpinnan yläpuolella. [1, s.25–26.]

Hyötysuhdeluokitukset

Moottoreiden hyötysuhde kuvaa sen kykyä muuttaa sähköinen energia mekaaniseksi energiaksi. EU:n alueella on luotu 1998 hyötysuhteiden luokittelujärjestelmä, jossa oikosulkumoottorin on jaoteltu kolmeen eri luokkaan: EFF3, EFF2 ja EFF1. Eri maiden välillä hyötysuhdeluokittelu on vaihdellut. Tätä tarvetta varten IEC on standardissaan IEC 60034–30:2009 harmonisoinnut hyötysuhdetaulukkoja maailmanlaajuisesti ja luonut epätahtikoneelle IE1, IE2 ja IE3 hyötysuhdeluokat 0,75–375 kW moottorille. Luokkien vastaavuudet aikaisempaan nähden ovat seuraavat.

- IE1, standardin mukainen hyötysuhde, verrattavissa EFF2:een

- IE2, korkean hyötysuhteen moottorit, verrattavissa EFF1:een
- IE3, premium luokan hyötysuhde.

Mitä korkeampi on koneen hyötysuhdeluokka, sitä enemmän valmistuksessa on tyypillisesti käytetty materiaaleja. Vastaavasti koneen hinta on korkeampi kuin matalan hyötysuhteen koneen hinta. Hankinta on pääsääntöisesti kannattavaa, koska verrattuna säävutettavaan energiasäästöön elinikänsä aikana investointi korkean hyötysuhteen moottorin hintaeroon saadaan takaisin säästyneinä energiakustannuksina. [1, s.28–29.]

Häviöt ja lämpeneminen

Sähkömoottoreiden häviöt syntyvät koneen käämityksessä virtalämpöhäviöinä sekä rautarakenteessa hystereesi- ja pyörrevirtahäviöinä. Häviöt johtavat moottorin lämpenemiseen siten, että suuri kuin tehon siirtyminen moottorista sitä jäähdyttävään ympäristöön. Mitä korkeampi on moottorin ja ympäristön lämpötilaero, sitä suurempi on häviöiden siirtyminen. Edelleen tilannetta voidaan parantaa erilaisilla jäähdytysrakenteilla, kuten riparakenteella sekä parantamalla tuuletusta. Tästä johtuen esimerkiksi standardoitujen epätahtikoneiden rungot on valmistettu riparakenteisella ja koneiden päässä on oma tuuletin. Jäähdytymisen kannalta on oleellista koneen sisäinen rakenne eli kuinka hyvin häviöteho siirtyy syntymäkohdastaan koneen sisältä ulos. [1, s.29.]

Moottorin ottama virta on suoraan verrannollinen moottoriakselin kuormitukseen, eli verkosta ottama virta riippuvainen siitä miten paljon kuormitetaan moottorin akselia. Karkeasti ottaen voi olettaa, että moottorin lämpenemä on verrannollinen moottorin käämeissä syntyvien häviöihin. Käämeissä syntyvät häviöt ovat virran neliöön verrannollisia. Seuraava yhtälö kuvaa tilannetta

$$I_s \propto P_M, P_M = f(T) \Rightarrow P_h \propto I_s^2 \Rightarrow \theta \propto P_h \quad (1)$$

Sähkömoottoreiden hyötysuhde riippuu pyörimisnopeudesta, joten lauseke pätee nimenomaan moottorin nimellisellä toiminta-alueella. Oikosulkukoneessa edellinen lauseke pitää paikkaansa silloin kun jättämä on pieni.

Yhden aikavakion lämpenemismalli on yleisin malli jolla voi mallintaa moottorin lämpenemä. Malli on virheellinen silloin kun moottorin tehomuutokset ovat suuret ja nopeat.

Tehon muuttuessa askelmaisesti (ΔP) on muutos vastaavasti lämpenemisessä yhtälön 2 mukainen.

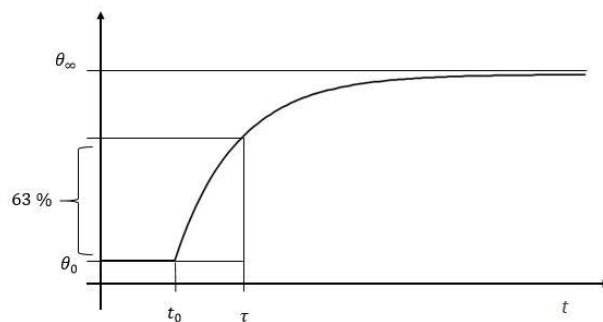
$$\Delta\theta(t) = (\theta_\infty - \theta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \theta_0 \quad (2)$$

τ on lämpenemäaikavakio

θ_0 on moottorin lähtökohtainen lämpenemä

θ_∞ on moottorin loppulämpötila

Kuvassa 8 tilanne on havainnollistettu graafisesti.

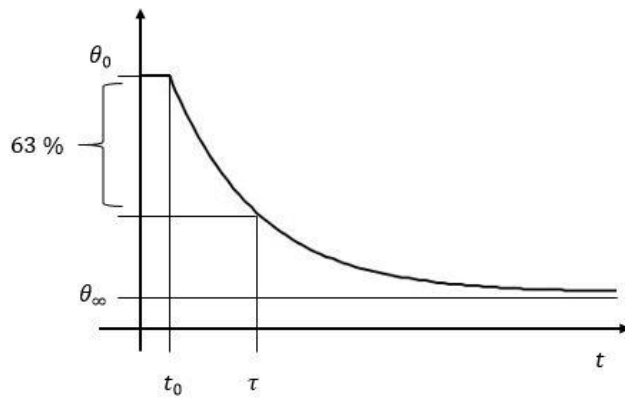


Kuva 8. Lämpenemän kasvu häviöiden syntyessä koneessa.

Jos kone pysähtyy eli häviöiden synty lakkaa, noudattaa jäähtyminen yhtälö 3.

$$\Delta\theta(t) = (\theta_0 - \theta_\infty) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_\infty \quad (3)$$

Kuvassa 9 on graafinen esitys tilanteesta, jossa kone jäähtyy.



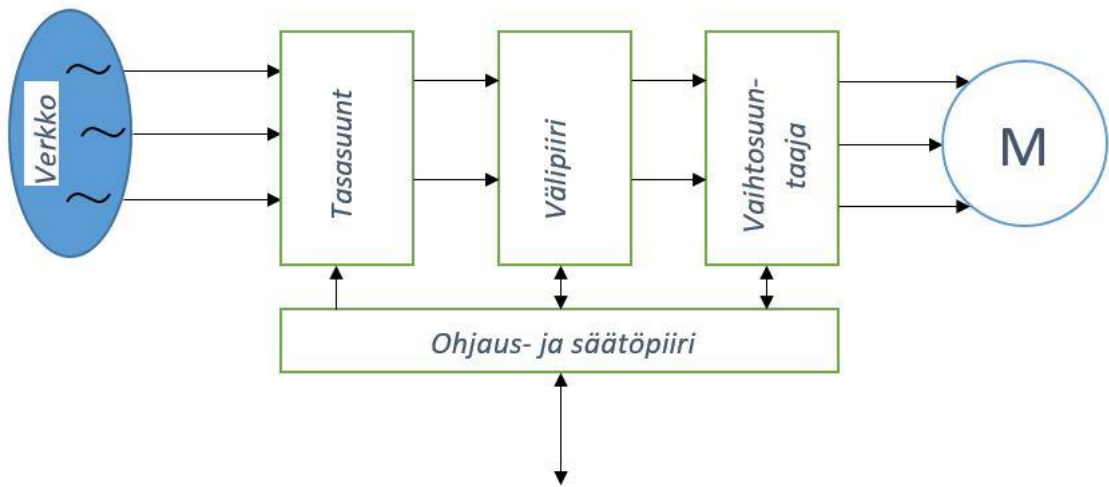
Kuva 9. Lämpenemän pientyminen häviöiden poistuttua koneesta

[1, s.29–30.]

2.3 Taajuusmuuttajat

Vuosi vuodelta taajuusmuuttajat ovat kehittyneet voimakkaasti ja tehokkaasti tehoelektronikan ja mikroprosessorin kehityksestä johtuen ja sen rinnalla. Vaikka taajuusmuuttajat kehittyvät koko ajan, niitä kaikkia kuitenkin yhdistää sama perusperiaate.

Kuvassa 10 on esitetty taajuusmuuttajan neljä pääosaa.



Kuva 10. Taajuusmuuttajan periaatekaavio [6, s.11].

Kuten kuvassa 10 näkyy, taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä, vaihtosuuntaajasta ja ohjaus- ja säätöpiiristä.

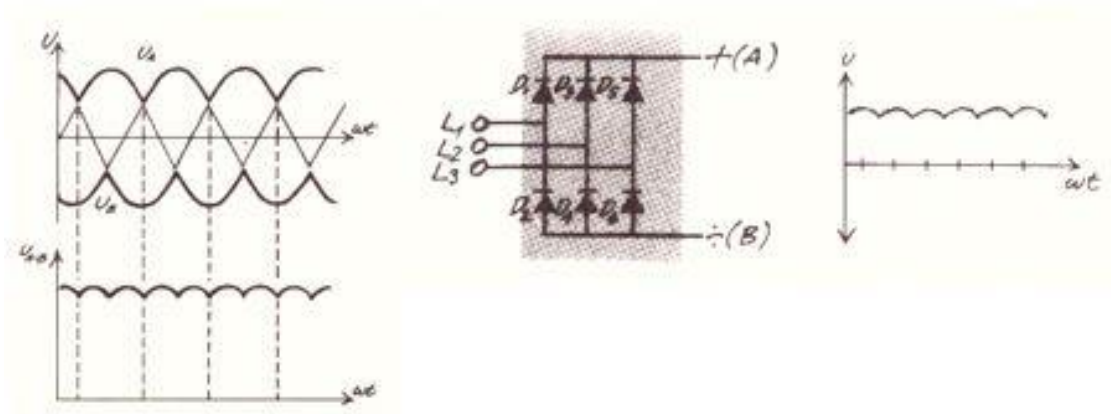
Tasasuuntaaja

Tasasuuntaaja muuttaa verkon vaihtojännitteen tai virran sykkiväksi tasajännitteeksi tai -virraksi.

Taajuusmuuttajan tasasuuntaajassa on joko diodit, tyristori tai IGBT-transistorit, suuritehoisissa sähkömoottorikäytöissä käytetään GTO- tai IGC-transistoreita. Tasasuuntaaja, jossa on vain diodi, nimitetään ohjaamattomaksi. Jos tasasuuntaajassa on IGBT-transistorit, tasasuuntaaja on kokoaalto-ohjattu.

Kolmivaihejärjestelmässä *ohjaamattomassa tasasuuntaajassa* on kuusi diodia.

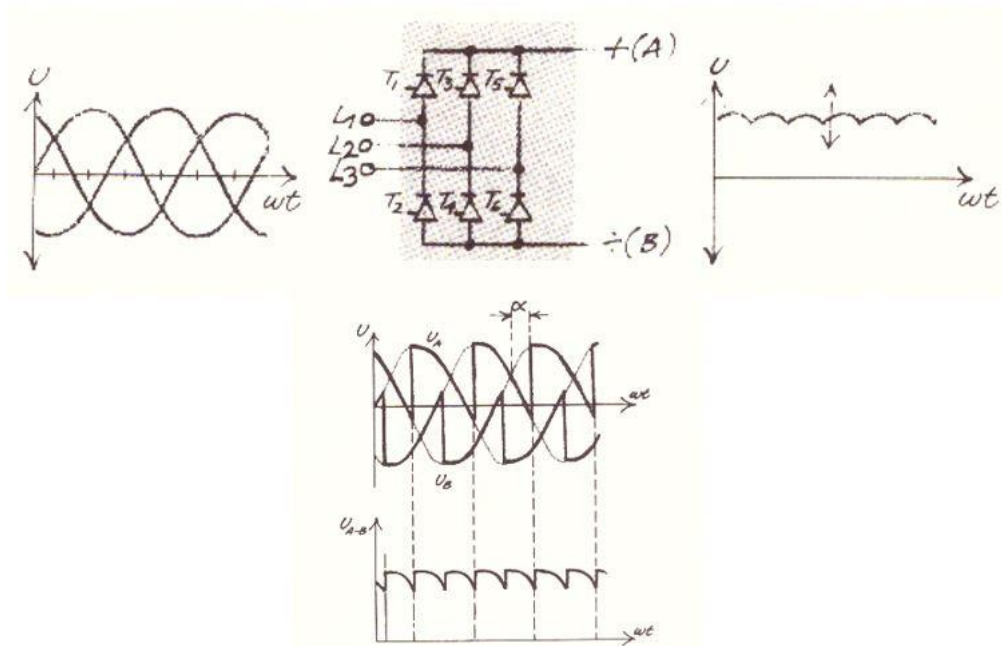
Diodin toiminta perustuu yhdensuuntaan johtavuuteen, eli se toimii päästösuuntaan ja estää virrankulku estosuunnassa. Diodin lävitse virta kulkee anodista katodiin. Tasasuunnattu kolmivaihejännite on edelleen sykkivä.



Kuva 11. Ohjaamaton kolmivaiheinen tasasuuntaaja [6, s.14].

Kuvassa 10 näkyy kolmivaiheinen ohjaamaton tasasuuntaaja. Koska diodi johtaa vain yhteen suuntaan, diodiryhmästä D1, D3, D5 yksi aina johtaa ja pisteessä A on aina positiivinen potentiaali. Toinen diodiryhmä D2, D4, D6 huolehtii siitä, että solmupisteessä B on aina negatiivinen potentiaali. Jokainen diodi johtaa ajan $\frac{1}{3} \cdot T$ eli 120° . Koska samassa ryhmässä johtaa vain yksi diodi kerrallaan, kaksi diodia jokaisesta ryhmästä ylläpitävät potentiaaliero, ja seurauksena on kuorman kiinnittämisessä virrankulkua. Näiden kahden diodin johto aika on $\frac{1}{6} \cdot T$ eli 60° . Ohjaamattoman tasasuuntaajan ulostulojännite on kahden diodiryhmän jännitteiden erotus, sen keskiarvo on $1,35 \cdot$ verkkojännite [6, s.14].

Ohjatussa kokoaaltotasasuuntaajassa on diodien asemesta tyristorit tai tehotransistorit [6, s.15]. Tämäkin puolijohde päästää virtaa vain yhteen suuntaan samoin kuin diodeissa. Ero on kuitenkin siinä, että se johtaa vain silloin, kun sille annetaan signaali eli käsky johtamaan. Aikaviive, kun tyristori tai tehotransistori muuttaa tilaansa johtavaksi, merkitään alfalla α ja se ilmoitetaan asteina.



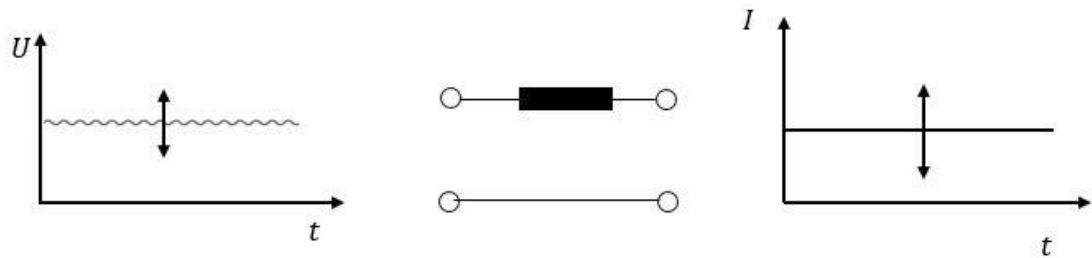
Kuva 12. Ohjattu kokoaaltotasasuuntaaja [6, s.15–16].

Kuvassa 12 nähdään tyristorilla toteutettu ohjattu kokoaaltotasasuuntaus ja kulman alfa vaikutus ulostulojännitteeseen. Kun α on $0^\circ \dots 90^\circ$, tyristorikytkentää käytetään tasasuuntaajana. Kun α on $90^\circ \dots 300^\circ$, kytkentää käytetään vaihtosuuntaajana. Tasasuunnattua jännitettä voidaan vaihdella muuttamalla kulmaa α . Ohjattu kokoaaltotasasuuntaaja tuottaa tasajännitteen, jonka keskiarvo on $1,35 \cdot \text{syöttöjännite} \cdot \cos \alpha$. [6, s.15–16.]

Ohjaamattomaan tasasuuntaajaan verrattuna ohjattu tasasuuntaaja aiheuttaa suuria häiriöitä ja häviöitä syöttöverkossa. Tämä johtuu siitä, että tasasuuntaaja ottaa suuren loisvirran, kun tyristorit ovat johtavina lyhyin aikavälein. Tämä on yhtenä syynä siihen, että tyristoreja käytetään pääasiassa taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajassa. Ohjatun tasasuuntaajan etuna on, että välipiiriin syötetty jarrutusenergia voidaan siirtää takaisin verkkoon. [6, s.16.]

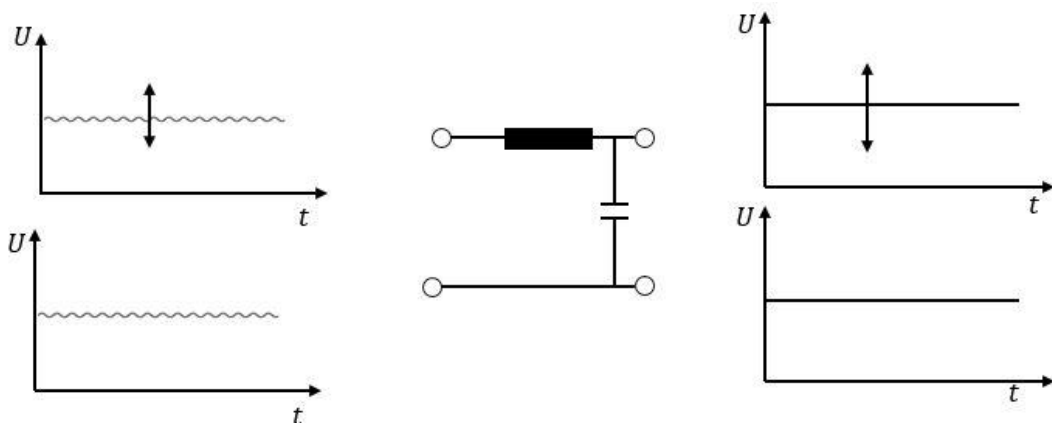
Välipiiri

Välipiirin rakenne riippuu tasasuuntaajasta ja vaihtosuuntaajasta. Välipiiri voidaan toteuttaa kolme eri tavalla. Jos välipiiri koostuu suuresta kelasta, (kuvassa 12), tasasuuntaajan on oltava ohjattu. Välipiirin käämi muuttaa muuttuvan jännitteen tasavirraksi. Moottorin jännite määräytyy kuorman mukaan. Tällä välipiirillä jarrutusteho voi johtaa takaisin syöttöverkkoon ilman lisälaitteita.



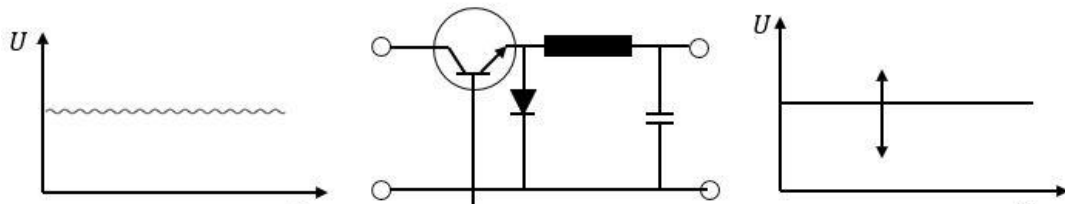
Kuva 13. Muuttava tasavirtapiiri [6, s.16.].

Välipiiri, jossa on rinnankytketty kela ja kondensaattori, voidaan yhdistää molempiin tasasuuntaajatyyppeihin. Muodostanut suodatin tasaa sykkivän tasajännitteen, joka tulee tasasuuntaajasta. Vaihtosuuntaajaan johdettu jännite on siten amplitudiltaan vaihteleva tasoitettu tasajännite. Jos tasasuuntaaja on ohjaamaton, vaihtosuuntaajan sisäänmenojännite on tasajännite, jonka amplitudi on vakio. Tässä välipiirissä moottorin virta määräytyy kuormituksesta. Kuvassa alla on esitetty tämän välipiirintyyppi.



Kuva 14. Vakio- tai muuttuvajännitteinen välipiirikuva [6, s.17.].

On mahdollista suodattimen eteen sijoittaa hakkuri (chopper), tilanne näkyy oheisessa kuvassa.

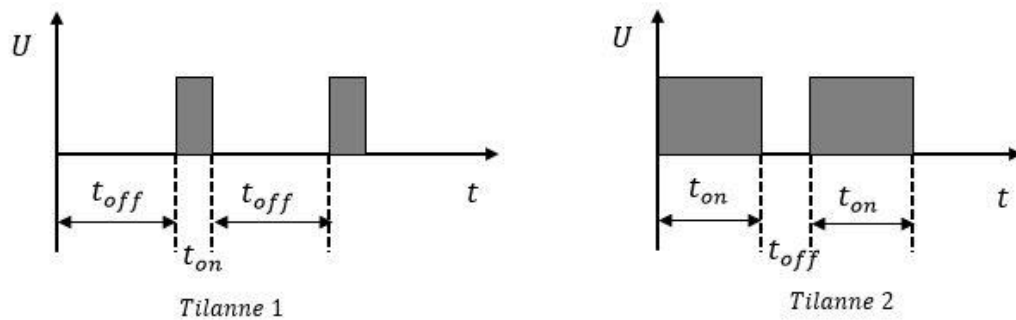


Kuva 15. Muuttuvajännitteinen välipiiri [6, s.17.].

Hakkurilla on transistori, joka vuorotellen kytkee tasasuunutun jännitteen päälle ja pois. Ohjauspiiri mittaa muuttuvaa jännitettä suodattimen jälkeen ja vertaa sitä tuloviestiin. Jos ne poikkeavat toisistaan, aikojen t_{on} (johtava) ja t_{off} (estävä) suhdetta säädetään. Näin tasajännite muuttuu, ja U_v riippuu siitä, miten kauan transistori on avoinna (yhtälö 4):

$$U_v = U \cdot \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (4)$$

Kun hakkuritransistori katkaisee virran, suodatinkäämi pyrkii nostamaan transistorin jännitteen erittäin suureksi. Tämän estämiseksi hakkuri on suojattu ohitusdiodilla. Kuvassa 16 näkyy, miten jännite riippuu pois ja päällä pituudesta. Pinta-ala merkitsee jännitteen suuruutta yhden jakson aikana. Tilanteessa 2 jännite on suurempi tilanteeseen 1 verrattuna. [6, s.16–18.]



Kuva 16. Hakkuritransistori muuttaa välipirin jännitettä [6, s.18.].

Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajassa (invertterissä) on viimeinen aste, jossa tapahtuu sähköenergian muokkaus, jonka jälkeen se on käyttökelpoinen sähkömoottoria varten.

Välipiiristä vaihtosuuntaaja saa joko

- muuttuvan tasavirran
- muuttuvan tasajännitteen tai
- vakiotasajännitteen.

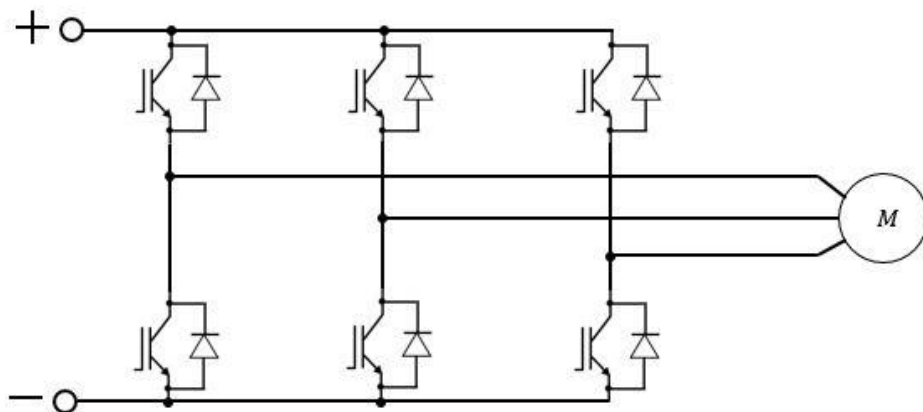
Vaihtosuuntaajan on tuettava moottorille vaihtojännitettä tai vaihtovirtaa, eli sen pitää ylläpitää taajuutta. Jos ja kun vaihtosuuntaaja saa vaihtovirtaa tai -jännitettä, sen tarvitsee vaikuttaa vain taajuuteen. Silloin kun vaihtosuuntaaja saa tasavirtaa tai tasajännitettä, sen pystyttävä ohjaamaan sekä taajuutta että amplitudia.

Nykyisin transistorit ovat syrjäytyneet tyristorit. Transistorin etuna on että se voi muuttaa sekä johtavaan että suljettuun tilan milloin tahansa. Tämä ominaisuus mahdollistaa kytkentätaajuuden huomattavan suurentamisen.

Vaihtosuuntaajan puolijohteet kytkeytyvät toimintaan ja pois ohjauspiirin viestien perusteella. Viestiä voidaan ohjata eri periaatteella.

Jos vaihtosuuntaaja toimii virtaperiaatteella, tarvitaan enemmän komponentteja kuin jänniteperiaatteella.

Kuvassa 17 on kuusipulssinen vaihtosuuntaaja, jossa on kuusi IGBT-transistoria.

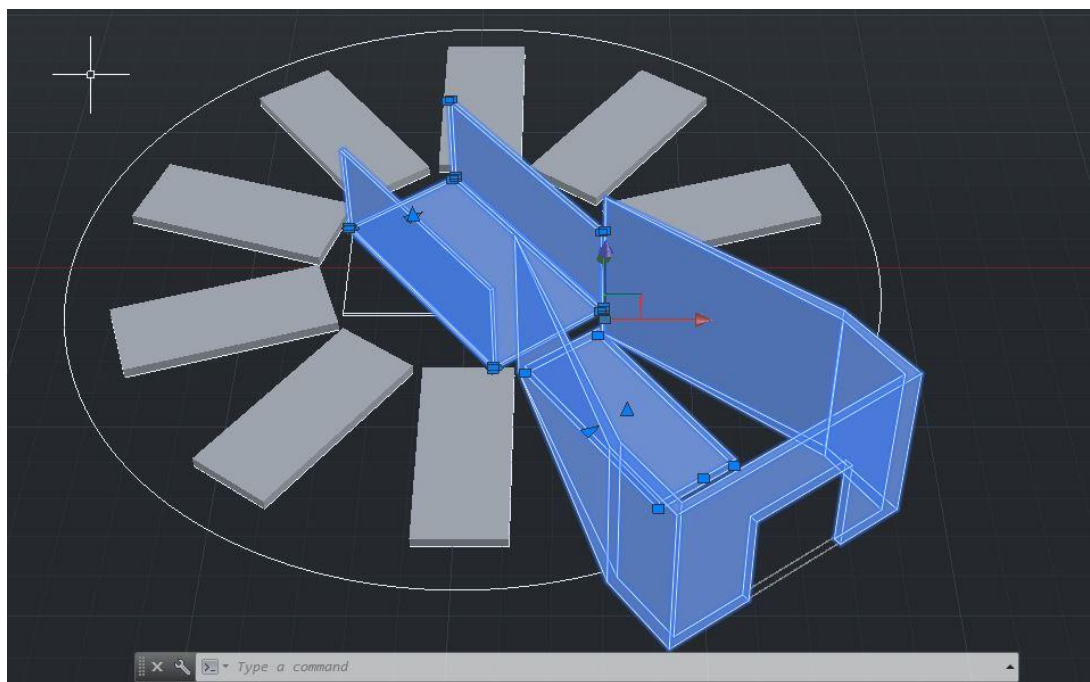


Kuva 17. Vaihtosuuntaaja.

3 Sähkömoottorikäytön käytännön mitoitus

3.1 Sähkömoottorikäytön mitoitus

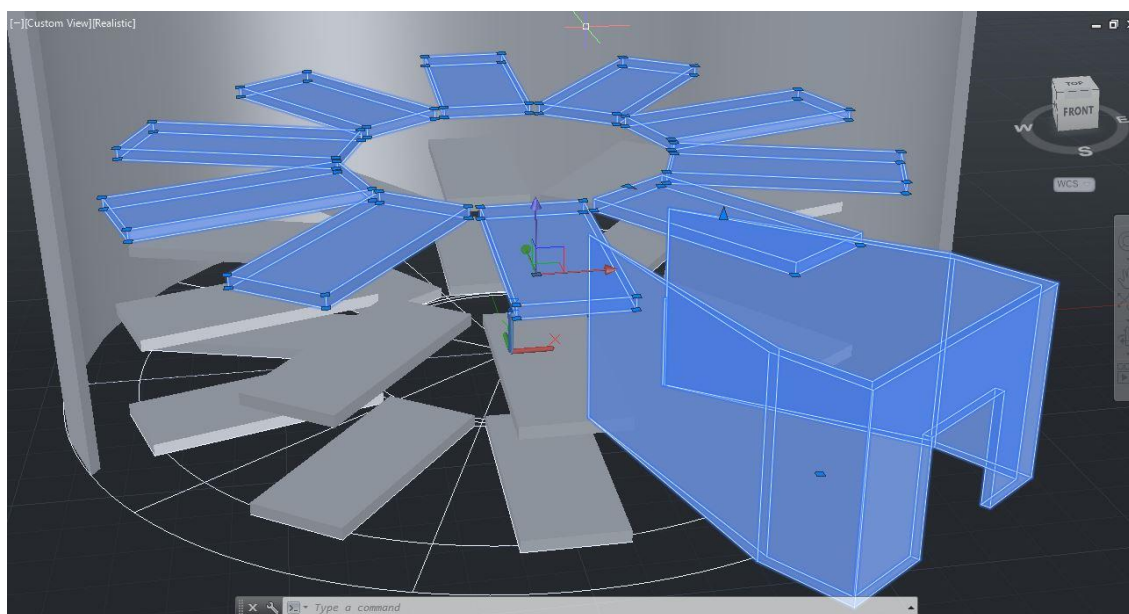
Kaikki lähtötietojen arvot, jotka liittyvät koneistojen fyysisen rakenteeseen ja niiden massoja sekä kappaleiden väliset kitkat liiketilassa, ovat arvioituja, eli silloin kun opinnäytetyössä puhutaan pituudesta, massoista ne ovat tähän sähkömoottorikäytön mitoitukseen arvioituja arvoja, taas sähkötekniikkaan ja sähkömoottorikäyttöön mitoitukseen liittyviä arvoja ovat reaalisia esim. moottoreiden ja taajuusmuuttajien tekniset tiedot. Toisin sanoen niihin pitää suhtautua niin vakavasti että sähkötekniisesti se pitää toimia oikein.



Kuva 18. Rakennusten periaatteellinen rakenne

Tämä prosessi, jolla toteutetaan auton siirto sijaintipaikalle, sisältää neljä eri sähkömoottorikäyttöä, joten jokaista varten tehdään oma mitoitus.

Prosessin toteuttaminen on oletettu sellaiseksi, että keskellä on nosturi joka muistuttaa hissiä. Se kulkee ylös, alas tavallisen nostimen tapaan, mutta tähän lisäksi se pyöri keskiakselinsa ympäri, jotta järjestä autot parkkipaikoilleen. Autot järjestetään ympyrämuotoisesti. Koneisto joka ottaa vastaan auto ja sitten laittaa sen vapaalle paikalle suoritta edestakaisin liike, joka toimi molempiin suuntiin keskiakselista. Tästä johtuen nostimen ei tarvitse pyöriä akseli ympäriinsä enemmän kuin 90 astetta kulmassa. Kuva 18 ja 19 havainnollistaa rakennusten periaatteellinen rakenne..



Kuva 19. Rakennusten periaatteellinen rakenne

Edestakaisin liikkeen lisäksi siinä koneistossa on sähkömoottori käyttö, joka toteuttaa auton nosto ja lasku. Sen mekanismin joka toteuttaa auton nosto ja lasku vastaanotossa täysin symmetrinen silloin kun auto laitetaan sijoituspaikalle. Se koneiston osa jossa seisoo auto, nimitetään kantava alusta.

3.2 Mitoitus

Mitoituksessa käytetyt suureet ja yksiköt ovat yleispäteviä ja niiden erottamiseen käytetään alaindeksiä. Jokaista käyttöä varten laitetut alaindeksit selitetään tekstissä mitoitusta tehtäessä. Mitoituksessa kaikilla hyötykuormilla on vakiomomentin vaikutus.

3.2.1 Kuorman vastaanotto nosto-lasku vaihe

Mitoitus aloitetaan sähkömoottorikäytöstä joka toteuttaa auton vastaanotto. Koska auton vastaanoton ja auton parkkipaikalle järjestäminen on täysin symmetrinen, sähkömoottorikäytön vastaanoton mitoitus päde sekä paikalle järjestäminen että auton tuonti tulohalliin takaisin. Auton vastaanotossa on rinnakkain kaksi sähkömoottorikäyttöä. Toinen niistä suorittaa edestakaisin -liikkeen ja toinen noston ja laskun.

Aloitetaan noston ja laskun mitoituksesta. Auton maksimimassa on $m_{auto_max} = 3000 \text{ kg}$. Teräspalkkialustan massa on $m_{palkki} = 100 \text{ kg}$. Teräspalkkialustaksi olen nimennyt sen konerakenteen osa, joka kantaa autoa. Kokonainen nostettavan massa on täten $m_{palkki_auto} = 3100 \text{ kg}$. Nostokorkeuden oletetaan olevan $h = 40 \text{ cm} = 0,40 \text{ m}$. Sen aiheuttava voima on siten seuraava:

$$F_{palkki_auto} = m_{palkki_auto} \cdot g = 3100 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 31000 \text{ N}$$

Kun otetaan huomioon kitkan aiheuttamat häviöt $F_{\mu} = 31000 \text{ N} \cdot 0,0050 = 155 \text{ N}$, tässä tapauksessa $\mu = 0,0050$, tulee yhteensä

$$F_{palkki_auto} + F_{\mu} = 31000 \text{ N} + 155 \text{ N} = 31155 \text{ N}$$

Ilmanvastusta ei oteta huomioon siksi, että nopeudet ja kiihtyvyydet ovat pienet. Moottorin oman hitausmomentti ei oteta huomion koska se suhteellisesti pieni kuormituksen nähden.

Seuraavaksi lasketaan dynaamisen voiman vaikutus. Ensin vastakuorma kiihtyy ylöspäin 2 s:ssa matkan 0,2 m, aikahetkessä 2,0 s kiihtyvyys on nolla, sen jälkeen se hidastuu ja pysähtyy 2,0 s:n kuluttua kohdassa 0,4 m. Kiihtyvyydeksi saadaan tällöin

$$a_k = \frac{2 \cdot 0,2 \text{ m}}{(2,0 \text{ s})^2} = 0,1 \text{ m/s}^2$$

Hidastuvuus on

$$a_h = \frac{(0,4 \text{ m} - 0,22 \text{ m} - 0,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2 \text{ s}) \cdot 2}{2^2 \text{ s}^2} = -0,1 \text{ m/s}^2$$

Kiihdytyksen aikana kokonaisvoima on

$$\begin{aligned} F_{k_tot} &= F_{palkki_auto} + F_k = 31155 \text{ N} + m_{palkki_auto} \cdot a_k = 31155 \text{ N} + 3100 \text{ kg} \cdot 0,1 \text{ m/s}^2 \\ &= 31465 \text{ N} \end{aligned}$$

Hidastuvuuden aikana kokonaisvoima on

$$\begin{aligned} F_{h_tot} &= F_{palkki_auto} + F_h = 31155 \text{ N} + m_{palkki_auto} \cdot a_h = 31155 \text{ N} + m_{palkki_auto} \cdot a_h \\ &= 31155 \text{ N} + 3100 \text{ kg} \cdot (-0,1) \text{ m/s}^2 = 30845 \text{ N} \end{aligned}$$

Muunnetaan vaikuttavat voimat momentiksi. Oletetaan liike muuttuu pyörän välityksellä, jonka halkaisija $d = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$, siten säde on $r = 0,075 \text{ m}$.

Kiihdytyksen aikana aiheuttava vastamomentti on

$$M_k = F_{k_tot} \cdot r = 31465 \text{ N} \cdot 0,075 \text{ m} \approx 2359,875 \text{ Nm} \approx 2359,9 \text{ Nm}$$

Hidastuvuuden aikana aiheuttava vastamomentti on

$$M_h = F_{h_tot} \cdot r = 30845 \text{ N} \cdot 0,075 \text{ m} \approx 2313,375 \text{ Nm} \approx 2313,4 \text{ Nm}$$

Muunnetaan tasainen tasaisesti kiihtyvä liike ja tasaisesti hidastuva liike pyöriväksi liikkeeksi. Niiden vastaavat kulmakiihtyvyys ja kulmahidastuvuus ovat

$$\alpha_k = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d v/r}{dt} = \frac{1}{r} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{1}{r} \cdot a_k = \frac{0,1 \text{ m/s}^2}{0,075 \text{ m}} \approx 1,333 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \approx 1,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\alpha_h = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^v/r}{dt} = \frac{1}{r} \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{1}{r} \cdot a_h = \frac{-0,1 \text{ m/s}^2}{0,075 \text{ m}} \approx -1,333 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \approx -1,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Maksimi pyörimisnopeus on

$$\omega_{max} = \alpha_k \cdot t_k = 1,333 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot 2,0 \text{ s} \approx 2,667 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \approx 2,7 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow n_{max} = \frac{60 \cdot \omega_k}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 2,667 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{2 \cdot \pi} \approx 25,4648 \text{ rpm} \approx 25,5 \text{ rpm}$$

Lasketaan seuraavaksi tehon tarve.

$$T_m = 9,55 \cdot 10^3 \cdot \frac{P [\text{kW}]}{n [\text{rpm}]} [\text{Nm}]$$

$$P = \frac{T_m [\text{Nm}] \cdot n [\text{rpm}]}{9,55 \cdot 10^3} [\text{kW}]$$

$$P_k = \frac{M_k [\text{Nm}] \cdot n_k [\text{rpm}]}{9,55 \cdot 10^3} = \frac{2359,9 \text{ Nm} \cdot 25,5 \text{ rpm}}{9,55 \cdot 10^3} \approx 6,3 \text{ kW}$$

Koska teho vaihteen yli ei muutu mihinkään, moottoriakselin on tuotettava akselitehoa 6,3 kW.

Auton noston ja laskun toteuttavaan käyttöön valitaan 6-napainen sähkökone. Moottori-
luettelossa seuraava moottori on 7,5 kW [4, s.26]. Koska halutaan olla varmoja, että va-
littu moottori jaksaa suoritta tehtävänsä otetaan tähän käyttöön seuraava luettelossa 11
kW:n moottori [4, s.26]. Oikosulkumoottorin arvot ovat oheisessa taulukossa.

Taulukko 1. Oikosulkumoottorin nimellisarvot [4, s.26].

		Hyötysuhde					
--	--	------------	--	--	--	--	--

Akseli- teho, $P_N[kW]$	Pyöri- mis- no- peus, $n[rpm]$	load 100 %	load 75 %	load 50 %	Te- ho- ker- roin $\cos \varphi$	Ni- melli- nen virta $I_N[A]$	Vään- tömo- mentti $T_N[Nm]$	Hitaus- mo- mentti $J [kgm^2]$	Massa $m[kg]$
11	972	89,3	90,6	90,5	0,76	22,5	108	0,114	172
1000 r/min = 6 napainen, 400 V 50 Hz									
IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B									
IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014									

Taajuusmuuttajan tehoelektroniikkakomponenttien aikälämpövakiot ovat pitempiä moottoriin verrattuna ja lämpötilaan altistuksen paljon herkempiä. Tästä syystä taajuusmuuttajan on valittava moottorin nimellisvirtaan luokkaa isompi. Tässä tapauksessa on valittava kaksi luokkaa isompi, koska luettelossa seuraava olisi 25 A:n taajuusmuuttaja, ja se on aika pieni marginaali moottorin nimellisvirran 22,5 A nähden. Sitä seuraava perheessä ACS880-1 taajuusmuuttajanluettelossa löytyy 32 A:n taajuusmuuttaja, joten valitaan 32 A:n taajuusmuuttaja. Taulukossa 2 on esimerkinotettuun taajuusmuuttajan nimellisarvot.

Taulukko 2. Taajuusmuuttajan nimellisarvot [7, s.12].

$U_N = 400 V$ (jännitealue 380–415 V). Tehoarvot pätevät, kun nimellisjännite on 400 V (0,55–250 kW) ACS880-01

Nimellisarvot			Normaali käyttö		Raskas käyttö		Häviöteho	Ilmavirta	Runkokoko
$I_N [A]$	$I_{\max} [A]$	$P_N [kW]$	I_{Ld}	P_{Ld}	I_{Hd}	P_{Hd}	[W]	m^3/h	
32	42	15	30	15	25	11	457	134	R3

Tässä vaiheessa voi valita vaihde. Moottorin nimellinen pyörimisnopeus on $n_1 = 972 \text{ rpm}$ ja kuorman puoleisen pyörän pyörimisnopeus on $n_2 = 25,5 \text{ rpm}$. Tällöin i on

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{972 \text{ rpm}}{25,4648 \text{ rpm}} \approx 38,17$$

Tehdään tarkastus silloin kun $M_k = 2359,875 \text{ Nm}$

Moottorin akselilla on voima

$$M_{\text{akseliteho}} = \frac{M_k}{i} = \frac{2359,875 \text{ Nm}}{38,17} = 61,8248 \text{ Nm} \approx 62 \text{ Nm}$$

Tehdään vielä pieni korjaus koska unohtui häviöt jotka syntyivät vaihteessa. Ottamalla huomioon vaihteen hyötysuhde 0,95 saadaan tehoksi

$$P_{\text{tot}} = \frac{6,3 \text{ kW}}{0,95} = 6,63 \text{ kW}$$

Tällöin momentiksi tulee

$$M_{\text{akseliteho}} = \frac{9550 \cdot 6,63 \text{ kW}}{972 \text{ rpm}} \approx 65,14 \text{ Nm} \approx 65 \text{ Nm}$$

Moottori ottama virta on suoraan verrannollinen momenttiin. Täten moottorissa kulkeva virta on

$$\frac{I_N}{I_M} = \frac{M_N}{M_{\text{akseliteho}}} \Rightarrow I_M = \frac{M_{\text{akseliteho}} \cdot I_N}{M_N} = \frac{65 \text{ Nm} \cdot 22,5 \text{ A}}{108 \text{ Nm}} = 13,541667 \text{ A} \approx 14 \text{ A}$$

Tarkistetaan vielä tarvittava teho maksimi pyörimisnopeuden perusteella, eli tutkitaan kuorman tasaisesti pyörivä liike. Ottamalla huomioon hyötykuorma, kitkan aiheuttava momentti ja lisäksi vaihteessa tapahtuvat häviöt saadaan

$$M_{\text{akseliteho}} = (31155 \text{ N} + 31155 \text{ N} \cdot 0,05) \cdot 0,075 \text{ m} = 2453,45625 \text{ Nm}$$

Tehoksi tulee

$$P = M_{\text{akseliteho}} \cdot \omega_{\text{max}} = 2453,45625 \text{ Nm} \cdot 2,7 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 6624,331875 \text{ W} \approx 6,6 \text{ kW}$$

Tämä on laskutapa pätee myös siksi että, kiihtyvyydestä aiheuttava vääntömomentti on pieni.

Auton laskun vaiheessa eli paikalle sijoittamisessa energia siirtyy toiseen suuntaan, toisin sanoin mekaaninen energia muuttuu sähköiseksi energiaksi. Tämä osuus jää työn ulkopuolelle, joten tätä tilannetta ei katsota eikä tarkisteta.

3.2.2 Kuorman siirto vaakasuorassa tasossa

Edestakaisessa liikkeessä ilmenee tasaisesti kiihtyvä, tasainen ja tasaisesti hidastuva liike. Jotta muodostaa ajoprofiili ja olettaa kiihtyvyyden, nopeudet jne. oletetaan tarvittavat etäisyydet ja pituudet. Kauemmas sijoitettavien autojen pyörien etäisyys tulo-ovesta on maksimissaan $l = 4000 \text{ mm} = 4 \text{ m}$. Tämän perusteella oletetaan, että kantavan alustan pituus on $l_{k.a} = 6000 \text{ mm} = 6 \text{ m}$. Koska kantavan alustan pituus on oletettu 6 m , sisemmän ympyrän halkaisijan oletetaan $d = 8,1 \text{ m}$, josta säde on $r = 4,05 \text{ m}$. Sen alustan on ajettava sisemmästä ympyrästä 4 m ulospäin, joten yhden suuntaan kokonaismatkan tulee olla $\left(4 + \frac{8,1-6}{2}\right) \text{ m} = 5,05 \text{ m} = 5050 \text{ mm}$. Oletetaan että tasainen liike on $v = 1,5 \text{ m/s}$ ja kantava alusta kiihtyy kahdessa sekunnissa, tällöin kiihtyvyys on

$a_{kiihdytys} = 1,5 \text{ m/s} / 3 \text{ s} = 0,5 \text{ m/s}^2$. Kolmessa sekunnissa se ehtii edetä välimatkan
 $s_{kiihdytys} = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \text{ m/s}^2 \cdot 3^2 \cdot \text{s}^2 = 2,25 \text{ m}$. Jarrutukseen kuuluu samat arvot,
 paitsi sen etumerkki on negatiivinen eli $a_{hidastus} = -0,5 \text{ m/s}^2$, sekä $s_{hidastus} = 2,25 \text{ m}$.
 Tasaisen liikkeen välimatka on $(5,050 - 2 \cdot 2,25) \text{ m} = 0,55 \text{ m}$. Kantavan alustan liike välittyi laakereiden kautta joten tasaisen liikkeen vastavoima on

$$F_{\mu} = \mu \cdot N$$

jossa N on normaalivoiman vaikutus

μ on kitkakerroin

Laakerikirjasta löytyy suurin kitkakerroin jonka arvo on 0,0050, joten käytetään tätä suurinta arvoa [5, s. 57]. Lasketaan ensi normaalivoiman vaikutus

$$N = m_N \cdot g \cdot \sin \alpha$$

Ei katsota tilannetta, jossa kantava alusta menee hakemaan auton ilman rahtia, vaan tilannetta jossa se liikkuu kuormitettuna. Oletetaan, että kaikki kuorman aiheuttavat massat ovat tasaisesti jakautuneet koko kantavalle alustalle. Olkoon, että se pystyy kantamaan kuorman massa jos kantavan alustan massa on $65 \text{ kg}/1 \text{ m}$. Tämän oletuksen nojautuen kantavan alustan kokonaismassaksi tulee $m_{k.a} = 6 \text{ m} \cdot 65 \text{ kg}/1 \text{ m} = 390 \text{ kg}$.

Massa m_N nimitetään normaalimassaksi, se koostuu kantavan alustan $m_{k.a}$, palkin m_{palkki} , auton m_{auto} ja niiden moottoreiden massasta m_{moot} , jotka nostavat auton. Tällöin normaalimassa m_N on

$$\begin{aligned}
 m_{k.a.N} &= (m_{auto} + m_{palkki} + m_{k.a} + m_{moot}) = (3000 + 100 + 390 + 207) \text{ kg} = 3697 \\
 &\approx 3700 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Koska aiheuttavan vastakuorman voima on vaakatasoon nähden kohtisuora, sen kulma alfa on nolla, eli $\sin 90^\circ = 1$. Nyt voidaan laskea kitkan aiheuttama vastavoima, kun oletetaan myös se että $g \approx 10 \text{ m/s}^2$

$$F_{k.a.\mu} = \mu \cdot N = \mu \cdot m_N \cdot g \cdot \sin \alpha = 0,0050 \cdot 3700 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 1 = 185 \text{ N}$$

Seuraavaksi lasketaan kiihtyvyydestä aiheuttama vastavoima.

$$F_{k.a.\alpha} = m \cdot a = 3700 \text{ kg} \cdot 0,5 \text{ m/s}^2 = 1850 \text{ N}$$

Kokonais voima joka aiheuttaa kantava alusta $F_{k.a}$ moottorin akselille on

$$F_{k.a} = F_{\mu} + F_{\alpha} = 185 \text{ N} + 1850 \text{ N} = 2035 \text{ N}$$

Jos tämä voima muuttuu pyöriväksi liikkeeksi pyörän kautta, jonka halkaisija on $d = 150 \text{ mm} = 0,150 \text{ m}$, saadaan vääntömomentiksi

$$M_{k.a} = F_{k.a} \cdot r = 2035 \text{ N} \cdot 0,075 \text{ m} = 152,625 \text{ Nm} \approx 153 \text{ Nm}$$

Lasketaan pyörivän liikkeen suureiden arvot

$$\alpha_{k.a.kiihtyvyys} = \frac{a_{kiihdytys}}{r} = \frac{0,5 \text{ m/s}^2}{0,075 \text{ m}} = 6,66 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Tasaisesti hidastuvassa liikkeessä numeerinen arvo on itseisarvoltaan yhtä suuri mutta toiseen suuntainen eli negatiivinen

$$\alpha_{k.a.hidastus} = \frac{0,5 \text{ m/s}^2}{0,075 \text{ m}} = 6,66 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Tasaisen liikkeen pyörimisnopeus on

$$\omega_{k.a.max} = \frac{v}{r} = \frac{1,5 \text{ m/s}}{0,075} = 20 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$n_{k.a.max} = \frac{20 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2 \cdot \pi \text{ rad}} = \frac{600}{\pi} \text{ rpm} = 190,9859 \text{ rpm} \approx 191 \text{ rpm}$$

Koska vaihteen välityssuhde ei vaikuttaa tehoon, voidaan laskea tässä vaiheessa jo moottorin akselista tarvittava teho maksimipyörimisnopeuden nojalla.

$$P_{k.a} = \frac{M_{k.a} [Nm] \cdot n [rpm]}{9550} = \frac{152,625 Nm \cdot 190,9859 rpm}{9550} \approx 3,05 kW$$

Vaihteen yli tehon tarve nousee vaihteessa tapahtuvien häviöiden takia. Oletetaan hyötysuhdekertoimeksi olevan 0,95, tällöin

$$P_{k.a} = \frac{3,05 kW}{0,95} = 3,2 kW$$

Valitaan moottori tehon perusteella.

Taulukko 3. Oikosulkumoottorin nimellisarvot [4, s.26].

Akseli- teho, $P_N [kW]$	Pyöri- mis- no- peus, $n [rpm]$	Hyötysuhde			Teho- ker- roin $\cos \varphi$	Ni- melli- nen virta $I_N [A]$	Vään- tömo- mentti $T_N [Nm]$	Hitaus- mo- mentti $J [kgm^2]$	Massa $m [kg]$
		load	load	load					
		100 %	75 %	50 %					
5,5	965	86,1	86,5	85,4	0,71	12,9	54,4	0,0487	86
1000 r/min = 6 napainen, 400 V 50 Hz									
IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B									
IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014									

Moottorin akseliin aiheuttama vastavääntömomentti on

$$M_{k.a.1} = \frac{9550 \cdot P_{k.a.}}{n_N} = \frac{9550 \cdot 4,67 \text{ kW}}{965 \text{ rpm}} = 46,21 \text{ Nm}$$

Lasketaan seuraavaksi tarkistusta vuoksi moottorin tarvitsema akseliteho kuorman aiheuttaman momentin ja välityssuhteen avulla. Lasketaan ensin vaihteiston välityssuhde.

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{965 \text{ rpm}}{190,9859 \text{ rpm}} = 5,05273 \approx 5,053$$

Moottorin akselilta tarvitsema vääntömomentti on tällöin seuraava

$$M_1 = \frac{M_{k.a.}}{i \cdot \eta} = \frac{222 \text{ Nm}}{5,05273 \cdot 0,95} = 46,2485 \text{ Nm} \approx 46,25 \text{ Nm}$$

Tuloksessa on pieni heitto, mutta se kuitenkin olematon joten voi todeta että laskut on tehty suurenpirtein oikein.

Katsotaan vielä tilannetta kun liikkeeseen vaikuttaa vain tasainen liike eli ei oteta huomion kiihtyvyyden aiheuttama voima.

$$P_{k.a.\omega} = F_{k.a.\mu} \cdot r \cdot \omega_{k.a.max} = 185 \text{ N} \cdot 0,075 \text{ m} \cdot 20 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 277,5 \text{ W} = 0,3 \text{ kW}$$

Tuloksesta voidaan tehdä johtopäätös, että tässä käytössä pelkällä tasaisella pyörimisnopeuden nojalla ei voi tehdä mitoitusta. Se tarkoittaa sitä, että huomattava voiman vaikutus tulee kuorman kiihtyvyydestä.

Valitaan taajuusmuuttaja ja luettelosta löytyy 17 A:n taajuusmuuttaja vaikka siellä olikin 12,9 A:n muuntaja [7, s.12]. Siitä huolimatta, kuten aikaisemmin on todettu, taajuusmuuttajan virran kestoisuuden pitää olla yhtä luokkaa isompi. Valitaan 17 A:n taajuusmuuttaja, jonka nimellisarvot löytyvät taulukosta 4.

Taulukko 4. Taajuusmuuttajan nimellisarvot [7, s.12].

$U_N = 400 \text{ V}$ (jännitealue 380–415 V). Tehoarvot pätevät, kun nimellisjännite on 400 V (0,55–250 kW) ACS880-01									
Nimellisarvot			Normaali käyttö		Raskas käyttö		Häviöteho	Ilmavirta	Runkokoko
$I_N [A]$	$I_{\max} [A]$	$P_N [kW]$	I_{Ld}	P_{Ld}	I_{Hd}	P_{Hd}	[W]	m^3/h	
17	21	7,5	16	7,5	12,6	5,5	232	88	R2

3.2.3 Kantavan alustan pyörivän liikkeen toteuttava sähkömoottorikäyttö

Pyörivän liikkeen mitoitus varten pitää tietää sen kantavan alustan kokonaismassa ja sen lisäksi muut kokonaisuuteen liittyvät massat.

Ensiksi otetaan massan $m_{N.k.a.kierto} = 3700 \text{ kg}$, joka oli edellisessä mitoituksessa kokonaismassana. Lisätään moottorin massa 86 kg ja kahden vaihteen massa, esim. 100 kg . Siitä tulee 3886 kg . Kuten edellisissä mitoituksissa laakereiden vierintäkitkan kitkakerroin oletetaan olevaan $\mu = 0,0050$.

Tässä vaiheessa lasketaan kitkasta aiheuttava vastavoima. Normaalivoima on

$$F_{N.k.a.kierto} = g \cdot m \cdot \sin \varphi = 10 \frac{m}{s^2} \cdot 3886 \text{ kg} \cdot 1 = 38860 \text{ N}$$

$$\Rightarrow F_{\mu k.a.kierto} = \mu \cdot F_N = 0,0050 \cdot 38860 \text{ N} = 194,3 \text{ N}$$

Tässä prosessissa ilmenee vain pyörivä liike, joten muutetaan kaikki voima momentiksi jo alkuvaiheessa. Jos maksimi kulmanopeus on $\omega_{k.a.kierto} = 0,2 \frac{rad}{s}$, kulmakihtyvyydeksi saadaan $\alpha_{k.a.kierto} = \frac{0,2 \frac{rad}{s}}{1 s} = 0,2 \frac{rad}{s^2}$. Oletetaan että kitkaa aiheuttava voima sijaitse etäisyydellä $r = 3 m$ keskiakselista, tällöin vääntövastamomentti on

$$M_{\mu.k.a.kierto} = F_{\mu} \cdot r = 194,3 N \cdot 3 m = 582,9 Nm$$

En keksinyt muuta keinoa laskea kantavan alustan hitausmomenttia kuin olettamalla, että se on $6 m : n$ pituinen tangon muotoinen kappale.

$$J_{k.a.kierto} = \frac{1}{12} m \cdot l^2 = \frac{1}{12} \cdot 3886 kg \cdot 6^2 m^2 = 11658 kgm^2$$

Dynaaminen momentti on

$$M_{\alpha.k.a.kierto} = J_{k.a} \cdot \alpha_{k.a.kierto} = 11658 kgm^2 \cdot 0,2 \frac{rad}{s^2} = 2331,6 Nm$$

$$M_{tot.k.a.kierto} = M_{\alpha.k.a.kierto} + M_{\mu.k.a.kierto} = 2331,6 Nm + 582,9 Nm = 2914,5 Nm$$

Tarvittava akseliteho on

$$P_{k.a.kierto} = M_{tot.k.a.kierto} \cdot \omega_{k.a.kierto} = 2914,5 Nm \cdot 0,2 \frac{rad}{s} = 582,9 W \approx 0,6 kW$$

Ensin lasketaan välityssuhde ja sitten moottoriakselilla vaikuttava vastavääntömomentti.

$$i_{k.a.kierto} = \frac{n_{1.k.a.kierto}}{\omega_{2.k.a.kierto} \cdot 60 / 2 \cdot \pi} = \frac{1000 rpm}{\frac{0,2 \frac{rad}{s} \cdot 60 \frac{s}{min}}{2 \cdot \pi rad}} = \frac{500 \cdot \pi}{3} \approx 523,6$$

$$M_{1.k.a} = \frac{M_{tot.k.a.kierto}}{i} = \frac{2914,5 Nm}{\frac{500 \cdot \pi}{3}} = \frac{2914,5 \cdot 3}{500 \cdot \pi} Nm = \frac{17,487}{\pi} Nm \approx 5,6 Nm$$

Tehdään tarkastus ja lasketaan moottorin tarvitsema teho moottorin akseliin aiheuttaman momentin nojalla.

$$P_{k.a.kierto} = \frac{5,6 \cdot 1000}{9550} kW = 0,583 kW \approx 0,6 kW$$

Taas todettiin, että teho on sama vaihteen yli ja pysyy muuttumattomana.

Moottoriluettelosta valitaan moottori, jonka nimellisarvot ovat taulukossa 5.

Taulukko 5. Moottori nimellisarvot [4, s.26].

Akseli- teho, $P_N[kW]$	Pyöri- mis- no- peus, $n[rpm]$	Hyötysuhde			Teho- ker- roin $\cos \varphi$	Ni- melli- nen virta $I_N[A]$	Vään- tömo- mentti $T_N[Nm]$	Hitaus- mo- mentti $J [kgm^2]$	Massa $m[kg]$
		load	load	load					
		100 %	75 %	50 %					
0,75	960	78,7	77,2	72,5	0,58	2,3	7,4	0,00491	25
1000 r/min = 6 napainen, 400 V 50 Hz									
IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B									
IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014									

Valitaan tälle moottorille taajuusmuuttaja kuten aina virran perusteella. Valitun muunta-
jan tiedot ovat taulukossa 6.

Taulukko 6. Taajuusmuuttajan nimellisarvot [7, s.12].

$U_N = 400 \text{ V}$ (jännitealue 380–415 V). Tehoarvot pätevät, kun nimellisjännite on 400 V (0,55–250 kW) ACS880-01									
Nimellisarvot			Normaali käyttö		Raskas käyttö		Häviöteho	Ilmavirta	Runkokoko
$I_N [A]$	$I_{\max} [A]$	$P_N [kW]$	I_{Ld}	P_{Ld}	I_{Hd}	P_{Hd}	[W]	m^3/h	
3,3	4,1	1,1	3,1	1,1	2,4	0,75	40	44	R1

Tässä mitoituksessa olisi hyvä ottaa huomioon vierintävastuksesta aiheuttava momentti. Fyysisen rakenteen puitteissa se oli mahdotonta arvioida. Tämä tarkoittaa, että tähän käyttöön todennäköisesti tarvitaankin suurempitehoinen moottorin.

3.2.4 Nostimen noston ja laskun mitoitus

Kuten edellisissä mitoituksissa kerätään kaikki tiedot massoista, joita muodostavat vastakuorma ja tässä tapauksessa myös hyötymassa eli vastapainon vaikutus. Edellisen mitoituksen kokonaisuudessaan päälle tulee lisäksi sen rungon massa, jonka pitää kestää sen vastaanottokoneiston.

Ensin annetaan nimi rakenneosalle, joka toimii pohjana ja kantajana edellä mainittujen koneosien ja kuorman yhteislaskettuna, olkoon sen nimi ”nosturin kori”. Oletetaan, että sellainen rakenne jonka massa $m_{\text{nosturin kori}} = 500 \text{ kg}$ terästä kykenee kantamaan 3886 kg. Massa 3886 kg koostuu vastaanottomekanismista, joka toteuttaa vastaanoton

ja kierron sekä hyötykuormasta. Kun otetaan huomioon vielä moottorin ja vaihteen (vaihte: 50 kg) massat, jotka toteutuvat pyörimistä, saadaan massaksi $m_{n.k.+muu} = 3886 \text{ kg} + 500 \text{ kg} + 50 \text{ kg} \cdot 2 + 25 \text{ kg} \cdot 2 = 4536 \text{ kg}$. Tähän tulee lisätä vielä vaijerin massa. Olkoon vetoköysi, jonka 1 m:n massa on 14 kg/m , kestää lujuudeltaan $4536 \text{ kg} \cdot 2$ vaikuttavan paino. Tästä seuraa, että jos oletetaan vaijerin pituudeksi 10 m, sen massa on $10 \text{ m} \cdot 14 \text{ kg/m} = 140 \text{ kg}$. Vastakuorma haetaan seuraavalla periaatteella. Nosturin korin puolella vaikuttavan voiman minimi tilanne silloin kun se on tyhjänä ja ihan ylhäällä. Se tekee $m_{n.k.+muu} - m_{auto} = 4536 \text{ kg} - 3000 \text{ kg} = 1536 \text{ kg}$. Sen toisella puolella on vastakuorman massa ja köyden massa. Se tarkoittaa, että vastapainon puolella on ylijäämä $vastapaino + 140 \text{ kg} - 1536 \text{ kg} = \text{ylijäämä}$. Massa 1536 kg on nosturin korin massa ilman autoa (hyötykuorma). Silloin kun nosturin kori on kuormitettuna suurimmalla kuormalla ja kun se on ihan alhaalla, se muodostaa seuraavan tilanteen $4536 \text{ kg} + 140 \text{ kg} - vastapaino = \text{ylijäämä}$, eli nyt ylijäämä on nosturin korin puolella. Kun ratkaistaan yhtälöpari, vastapainoksi tulee 3036 kg ja ylijäämäksi tulee 1640 kg .

Oletetaan köysirummun säteen olevan $r_{köysirummu} = 0,5 \text{ m}$, tällöin vastakuorma aiheuttaa seuraavan vääntömomentin

$$M_{vääntö} = 1640 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,5 \text{ m} = 8200 \text{ Nm}$$

Sekä noston että laskun nopeus on $v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Muutetaan se pyöriväksi liikkeeksi $\omega = \frac{v}{r} = \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,5 \text{ m}} = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Pyörimisnopeus on sitten $n_2 = \frac{2 \cdot 60}{2 \cdot \pi} \text{ rpm} = 19,1 \text{ rpm}$. Tässä käytössä käytetään taas kuusinapainen moottori ja koska sen synkroninen nopeus on 1000 rpm, pitää käyttää seuraava vaihte

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1000 \text{ rpm}}{19,1 \text{ rpm}} = 52,36$$

Redusoidaan vääntömomentti moottorin akselille, ottamalla huomioon vaihteen hyötysuhde 95 %

$$M_1 = \frac{M_{vääntö}}{i} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{8200 \text{ Nm}}{52,36} \cdot \frac{1}{0,95} = 165 \text{ Nm}$$

Lasketaan kiihdytyksestä aiheutuva momentti

$$M_{1,\alpha} = (J_1 + J_m + J_{1.köysirumppu}) \cdot \alpha$$

jossa J_1 on kuorman hitausmomentti redusoituna moottorin akselille.

$$J_1 = \frac{1}{i^2} \cdot J_2 = \frac{1}{52,36^2} \cdot 1134 \text{ kgm}^2 = 0,4136 \text{ kgm}^2$$

J_2 on se kuorman hitausmomentti joka näkyy köysirummussa

$$J_2 = m_{n.k.+muu} \cdot r_{köysirumppu}^2 = 4536 \text{ kg} \cdot 0,5^2 \text{ m}^2 = 1134 \text{ kgm}^2$$

J_m on moottorin hitausmomentti, ja kun ei vielä tietoa, mitä moottoria käytetään tässä käytössä, oletetaan, että se ei ole isompi kuin 30 kW. 30 kW:n moottorin hitausmomentti on $J_m = 0,663 \text{ kgm}^2$. Oletetaan vielä lisäksi että köysirummun hitausmomentti redusoituna moottorin akselille on $J_{1.köysirumppu} = 0,005 \text{ kgm}^2$

Taas valitaan kuusinapainen moottori, joten tiedetään sen synkroninen nopeus, se on $n_s = 1000 \text{ rpm}$. Kulmanopeutena se on $\omega_s = 1000 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} = 104,72 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Tähän nopeuteen sen pitää kiihtyä 4 s:ssä, tällöin kulmakiihtyvyys on $a = \frac{\omega_s}{t} = \frac{104,72 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{4 \text{ s}} \approx 26,7 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$

Kiihdytyksestä aiheuttava momentti on siten

$$M_{1,\alpha} = (0,4136 \text{ kgm}^2 + 0,663 \text{ kgm}^2 + 0,005 \text{ kgm}^2) \cdot 26,7 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 28,88 \text{ Nm}$$

Tässä käytössä kokonaisvääntömomentti on

$$M_{tot.nosturin_kori} = M_1 + M_{1,\alpha} = 165 \text{ Nm} + 28,88 \text{ Nm} = 193,88 \text{ Nm} \approx 194 \text{ Nm}$$

Moottorin teho silloin on oltava

$$P_1 = M_{tot.nosturin_kori} \cdot \omega_s = 194 \text{ Nm} \cdot 104,72 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 20315,68 \text{ W} \approx 20,32 \text{ kW}$$

Moottoriluettelosta löytyy 22 kW:n tehoinen moottori, mutta kun mitoituksessa on paljon huomioon ottamattomia vastavoimia, otetaan seuraava luettelossa eli 30 kW:n moottori [4, s.26]. Sen nimellisarvot ovat taulukossa 7.

Taulukko 7. Moottorin nimellisarvot [4, s.26].

Akseli- teho, $P_N[kW]$	Pyöri- mis- no- peus, $n[rpm]$	Hyötysuhde			Teho- ker- roin $\cos \varphi$	Ni- melli- nen virta $I_N[A]$	Vään- tömo- mentti $T_N[Nm]$	Hitaus- mo- mentti $J [kgm^2]$	Massa $m[kg]$
		load 100 %	load 75 %	load 50 %					
30	986	92,6	93,3	92,8	0,83	56,2	290	0,663	266
1000 r/min = 6 napainen, 400 V 50 Hz									
IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B									
IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014									

Kuten aikaisemmin tätä sähkömoottorikäyttöä varten valitaan taajuusmuuttaja teholuokan yhtä porrasta isompi, jonka arvot ovat taulukossa 8.

Taulukko 8. Taajuusmuuttajan nimellisarvot [7, s.12].

$U_N = 400 \text{ V}$ (jännitealue 380–415 V). Tehoarvot pätevät, kun nimellisjännite on 400 V (0,55–250 kW) ACS880-01									
Nimellisarvot			Normaali käyttö		Raskas käyttö		Häviöteho	Ilmavirta	Runkokoko
$I_N [A]$	$I_{\max} [A]$	$P_N [kW]$	I_{Ld}	P_{Ld}	I_{Hd}	P_{Hd}	[W]	m^3/h	
72	104	37	68	37	61	30	1117	280	R5

4 Standardit ja direktiivit

Tässä opinnäytetyössä ei sovelleta mitään standardeja koska se on täysin teoreettinen mitoitus. Käytännössä rakennettaessa mitä tahansa konetta olisiko se täysin automatisoitu, puoliautomatisoitu tai ihmisen ohjaama kone, sille koneelle on asetettu tietyt määräykset, standardit, normit jne. Ovat myös omat standartit taajuusmuuttajille, moottorille, sähköasennuksia koskevia standardeja sekä tarvittavaa liittymistehoa varten on omat

suositukset. Täten tässä luvussa oli tavoite mainita standardeja joihin voi nojata suunniteltaessa robottiparkkia.

Konedirektiivi 2006/42/EY

Kone direktiivi on otettu Suomen lainsäädäntöön valtioneuvoston antamalla asetuksella koneiden turvallisuudesta VNa 400/2008 ”koneasetus”. Koneasetus sisältää kaikki valmistajaa koskevat konedirektiivin vaatimukset samanlaisina kuin ne ovat konedirektiivissä [9, s.2].

SFS-EN 60204- Koneturvallisuus

Koneiden sähkölaitteisto IEC 60204 tätä osaa sovelletaan koneiden (lukuun ottamatta käytön aikana kannettavien koneiden) sähkö-, elektrooniikka- ja ohjelmoitavien elektroniikkalaitteiden ja järjestelmien sovelluksiin mukaan lukien koneryhmiin, jotka toimivat yhdessä koordinoitusti.

SFS-EN 13135 Nosturit

Tämä standardi on standardin EN ISO 12100 tarkoittama C-tyyppin standardi.

Tämä eurooppalainen standardi on tarkoitettu tarjoamaan yhden toteutustavan nosturien laitteistolle konedirektiivin olennaisten terveys- ja turvallisuusvaatimusten täyttämiseksi.

Tämän standardin soveltamisalassa ilmoitetaan, mitä koneita se koskee ja missä laajuudessa vaarat, vaaratilanteet ja vaaralliset tapahtumat otetaan siinä huomioon.

Kun tässä C-tyyppin standardissa esitetyt vaatimukset poikkeavat A- tai B-tyyppin standardissa esitetyistä vaatimuksista, tässä C-tyyppin standardissa esitetyt vaatimukset ovat ensisijaisia muissa standardeissa esitettyihin vaatimuksiin nähden koneiden osalta, jotka on suunniteltu ja rakennettu tämän C-tyyppin standardin vaatimusten mukaisesti.

Moottoristandardeja

Sähkömoottoreita sääteleviä kansainvälisiä standardeja ovat IEC-standardit, VDE- ja DIN-normit sekä muut standardit ja luokituslaitosten vaatimukset. EN direktiivit pohjautuvat IEC-standardeihin.

Sähkökonestandardeista tärkeimmät ovat IEC 34- ja 74-sarjan standardit, joissa määritetään sähkökoneiden yleiset ominaisuudet, pyörimissuunnat ja liitännät, lämpösuojaukset, mitat ja tehosarjat, koteloitiluokitukset, ra-

kenteet ja asennusasennot sekä lieriömäiset akselipäät. Edelleen standardisarja määrittää jäähdytystavat eli IC-koodit, koneiden mekaaniset värinät ja äänitasot. [1, s.18.]

5 Yhteenveto

Opinnäytetyön tekeminen oli haastava, koska olen vallinnut aihe josta ei ollut aikaisempaa kokemusta. Myös en osannut arvioida opinnäytetyön rajat. Alkuperäisesti oli suunnitelmissani käsitellä sähkötekniisiä osa-alueita laajemmin.

Opinnäytetyön tehtäessä olen ymmärtänyt syvemmin ne vaiheet ja tehtävät jotka pitää tehdä suunniteltaessa sähkömoottorikäyttöä, sekä ne käsitteet, jotka liittyvät nopeussäädettyihin sähkömoottorikäyttöihin.

Lähteet

- 1 Hietalahti, Lauri. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Hansaprint Oy Direct Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka
- 2 Kupila, Eero. 2015. Sähkömoottorikäytön mitoitus. Metropolia ammattikorkeakoulun moniste.
- 3 Kupila, Eero & Karppinen, Jukka. 2016. Taajuusmuuttajakäytön mitoitus. Metropolia Ammattikorkeakoulun moniste.
- 4 Catalog Low voltage Process performance motors. 2016. Power and productivity for a better world. ABB.
- 5 SKF Laakerikirja. 1991. Tornio: Stamperia Artistina Nazionale.
- 6 Erkinheimo, Harry; Käyhkö, Kalevi; Niemelä, Hannu; Pullola, Erkki; Saloriutta, Juha; Tuomainen, Martti. 1997. Taajuusmuuttajat. Tampere. Tammer-Paino Oy.
- 7 Tuoteluettelo ABB:n teollisuustaajuusmuuttajat ACS880-taajuusmuuttajat 0,55–3200 kW. 2015. Power and productivity for a better world. ABB.
- 8 Ville Keskisaari, Matti Jäntti. 2010. Selvitys mekaanisista pysäköintilaitoksista. Ramboll Finland Oy.
- 9 Matti Sundquist. 2009. Uusi konedirektiivi 2006/42/EY ja koneen valmistajan tehtävät. Sundcon Oy.

Sähkömoottorikäytön mitoitus DrivrSize:ssa

1. Kuorman nosto ja lasku vaihe.

Taulukko 2. Moottorin arvot

Specifications :		Catalogue data :	
Name	Vastaanotto/nosto/lasku	Voltage [V]	400
No.of motors	1	Frequency [Hz]	50
Motor type	IEC 34 catalog	Power [kW]	11
FrameMaterial	Not specified	Poles	6
Family	Not specified	Speed [rpm]	970
Polenumber	Automatic	Max mech.speed [rpm]	4500
Efficiency	IE2	Current [A]	22,3
Design	CENELEC	Torque [Nm]	108
Connection	Not specified	Tmax/Tn	3,3
IP class	IP55	Power factor	0,79
IC class	IC411 self ventilated	Efficiency [%]	88,7
IM class	IM1001, B3(foot)	Temperature rise class	B
Max. speed rule	Standard	Insulation class	F
Temp. rise	B (<80 K)	Temperature rise [°C]	57
Temp reserve	Keep	Inertia [kgm ²]	0,119
Tmax margin	43 %		

Taulukko 3. TAMU:n arvot

Specifications :		Catalogue data :	
Name	Vastaanotto/nosto/lasku	Voltage [V]	400
No.of Inverters	1	Nominal power [kW]	15
Type	ACS550	Nominal current [A]	31
IP Class	IP21	I2hd [A]	23
Switching freq.	4 kHz	Phd [kW]	11
		Imax [A]	41,4
		Frame type	R3

2. Kuorman siirto vaakatasossa.

Taulukko 4. Moottorin arvot

Specifications :		Catalogue data :	
Name	Siirto_vaakasuoratasossa	Voltage [V]	400
No.of motors	2	Frequency [Hz]	50
Motor type	IEC 34 catalog	Power [kW]	4
FrameMaterial	Not specified	Poles	8
Family	Not specified	Speed [rpm]	728
Polenumber	Automatic	Max mech.speed [rpm]	4500
Efficiency	IE2	Current [A]	10,2
Design	CENELEC	Torque [Nm]	52,4
Connection	Not specified	Tmax/Tn	2,6
IP class	IP55	Power factor	0,66
IC class	IC411 self ventilated	Efficiency [%]	84
IM class	IM1001, B3(foot)	Temperature rise class	B
Max. speed rule	Standard	Insulation class	F
Temp. rise	B (<80 K)	Temperature rise [°C]	57
Temp reserve	Keep	Inertia [kgm2]	0,068
Tmax margin	43 %		

Taulukko 5. TAMU:n arvot

Specifications :		Catalogue data :	
Name	Siirto_vaakasuoratasossa	Voltage [V]	400
No.of Inverters	2	Nominal power [kW]	15
Type	ACS550	Nominal current [A]	31
IP Class	IP21	I2hd [A]	23
Switching freq.	8 kHz	Phd [kW]	11
		Imax [A]	41,4
		Frame type	R3

3. Pyörivän alustan kierto akseliinsa ympäri.

Taulukko 6. Moottorin arvot

Specifications :		Catalogue data :	
Name	Pyriväliike	Voltage [V]	400
No. of motors	3	Frequency [Hz]	50
Motor type	IEC 34 catalog	Power [kW]	1,1
FrameMaterial	Not specified	Poles	8
Family	Not specified	Speed [rpm]	695
Polenumber	Automatic	Max mech. speed [rpm]	6000
Efficiency	IE2	Current [A]	3,1
Design	CENELEC	Torque [Nm]	15,1
Connection	Not specified	Tmax/Tn	2,2
IP class	IP55	Power factor	0,65
IC class	IC411 self ventilated	Efficiency [%]	75,9
IM class	IM1001, B3foot)	Temperature rise class	B
Max. speed rule	Standard	Insulation class	F
Temp. rise	B (<80 K)	Temperature rise [°C]	53
Temp reserve	Keep	Inertia [kgm ²]	0,008
Tmax margin	43 %		

Taulukko 7. TAMU:n arvot

Specifications :		Catalogue data :	
Name	Pyöriväliike	Voltage [V]	400
No. of Inverters	3	Nominal power [kW]	5,5
Type	ACS550	Nominal current [A]	11,9
IP Class	IP21	I _{2hd} [A]	8,8
Switching freq.	8 kHz	Phd [kW]	4
		I _{max} [A]	15,8
		Frame type	R1

4. Nostimen nosto ja lasku

Taulukko 8. Moottori arvot

Specifications :		Catalogue data :	
Name	Nosto_lasku	Voltage [V]	400
No.of motors	4	Frequency [Hz]	50
Motor type	IEC 34 catalog	Power [kW]	30
FrameMaterial	Not specified	Poles	8
Family	Not specified	Speed [rpm]	742
Polenumber	Automatic	Max mech.speed [rpm]	3600
Efficiency	IE2	Current [A]	66
Design	CENELEC	Torque [Nm]	386
Connection	Not specified	Tmax/Tn	2,4
IP class	IP55	Power factor	0,71
IC class	IC411 self ventilated	Efficiency [%]	91,2
IM class	IM1001, B3(foot)	Temperature rise class	B
Max. speed rule	Standard	Insulation class	F
Temp. rise	B (<80 K)	Temperature rise [°C]	74
Temp reserve	Keep	Inertia [kgm ²]	1,4
Tmax margin	43 %		

Taulukko 9. TAMU:n arvot

Specifications :		Catalogue data :	
Name	Nosto/lasku	Voltage [V]	400
No.of Inverters	4	Nominal power [kW]	132
Type	ACS550	Nominal current [A]	246
IP Class	IP21	I _{2hd} [A]	192
Switching freq.	4 kHz	Phd [kW]	110
		I _{max} [A]	346
		Frame type	R6

Taulukko 1. Pyörimisliikkeeseen ja eteneväliikkeeseen liittyvät suureet ja kaavat

Pyörimisliike	Eteneväliike
Kulma-asema, $\varphi = \frac{s}{r} [rad]$	Asema, $s [m]$
Kulmanopeus, $\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v}{r} \left[\frac{rad}{s} \right]$	Nopeus, $v = \frac{ds}{dt} = \omega \cdot r \left[\frac{m}{s} \right]$
Kulmakiikkyvyys, $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{a}{r} \left[\frac{rad}{s^2} \right]$	Kiihtyvyys, $a = \frac{dv}{dt} = r \cdot \alpha \left[\frac{m}{s^2} \right]$
Kulmanopeuden muutos, $\Delta\omega = \omega_0 + \alpha \cdot \Delta t$	Nopeuden muutos $\Delta v = v_0 + a \cdot \Delta t$
Kulmasiirtymä, $\Delta\varphi = \varphi_0 + \omega_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \Delta t^2$	Matka, $\Delta s = s_0 + v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2$
Hitausmomentti, $J [kgm^2]$	Massa, $m [kg]$
Vääntömomentti, $M = J \cdot \alpha = F \cdot r [Nm]$ <i>r on vääntömomentin varsi</i>	Voima, $F = m \cdot a [N]$
Teho pyörivä liike, $P = M \cdot \omega [W]$	Teho etenevä liike, $P = F \cdot v [W]$
Tehon muistikaava, $P [kW] = \frac{M [Nm] \cdot n [rpm]}{9550}$	
Momentin muistikaava $M [Nm] = \frac{9550 \cdot P [kW]}{n [rpm]}$	
Pyörimisenergia, $E_{rot} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$	Liike-energia, $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
Vaihteen välityssuhde, $i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{M_2}{M_1} = \sqrt{\frac{J_2}{J_1}} \Rightarrow i^2 = \frac{J_2}{J_1}$ Välitys suhde ei vaikuttaa tehoon: $P_1 = P_2$	