



**TURUN
YLIOPISTO**

Mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmät

Konetekniikan
kandidaatintutkielma

Laatija:
Jarmo Hannula

22.4.2024
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

Oppiaine: Konetekniikka

Tekijä: Jarmo Hannula

Otsikko: Mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmät

Ohjaaja: Turun yliopiston lehtori Jani Heikkinen

Sivumäärä: 21 sivua

Päivämäärä: 22.4.2024

Voimansiirtojärjestelmät ovat kriittinen osa mobiilirobottien kustannuksissa, tehokkuudessa, tarkkuudessa ja liikkuvuudessa, joten voimansiirtojärjestelmien teknologisella kehityksellä on erittäin suuri merkitys mobiilirobottien yleistymisessä. Tämän tutkielman tarkoituksena on tutkia tyypillisiä mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmien ratkaisuja, selvittää miten ratkaisuja voidaan soveltaa erilaisiin mobiiliroboteihin ja havainnoida uusia innovaatioita mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmissä. Tutkielmassa tarkastellaan tyypillisiä mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmien ratkaisuja käyttäen kirjallisuutta ja voimansiirtojärjestelmien komponenttien parametreja. Tutkielmassa tarkastellaan myös pienen, keskikokoisen, suuren ja erittäin suuren mobiilirobotin voimansiirtojärjestelmät, joiden perusteella pystytään havainnoimaan voimansiirtojärjestelmien soveltamismahdollisuudet erityyppisissä mobiiliroboteissa.

Avainsanat: Mobiilirobotti, Voimansiirtojärjestelmät

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Mobiilirobotit yleisesti	5
3	Voimansiirtojärjestelmät	6
3.1	Voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot	6
3.2	Akusto	7
3.3	Moottori	9
3.4	Vaihteisto	10
4	Voimansiirtojärjestelmien ratkaisut eri mobiiliroboteissa	12
4.1	Mobiilirobotit kotien siivoamisessa	12
4.1.1	Robotti-imurin voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot	12
4.1.2	Robotti-imurin akusto	13
4.1.3	Robotti-imurin moottori	13
4.2	Mobiilirobotit kulkuvälineinä	14
4.2.1	Teslan voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot	15
4.2.2	Teslan akusto	15
4.2.3	Teslan moottorit	16
4.3	Mobiilirobotit kaivoksissa	17
4.3.1	Kaivosrobotin voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot	17
4.3.2	Kaivosrobotin akusto	18
4.3.3	Kaivosrobotin moottori	18
4.3.4	Kaivosrobotin vaihteisto	19
4.4	Mobiilirobotit kauppaostosten kotiinkuljettajina	19
4.4.1	Kuljetusrobotin voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot	20
4.4.2	Kuljetusrobotin akusto	20
4.4.3	Kuljetusrobotin moottori	21
4.4.4	Kuljetusrobotin langaton lataus	21
5	Yhteenveto	23
6	Lähteet	25

1 Johdanto

Mobiilirobotit, kuten autonomisesti liikkuvat robotit, ovat viime vuosikymmeninä yleistyneet merkittävästi monilla eri teollisuuden aloilla. Mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmien teknologisen kehityksen ja autonomisen ajon tekoälyn edistymisen ansiosta mobiilirobotit ovat kasvattaneet suosiotaan. Tämä tutkielma keskittyy mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmiin, joihin kuuluvat akusto, moottori, vaihteisto ja järjestelmät, jotka siirtävät energiaa mobiilirobotin ulkopuolisesta lähteestä akustoon ja akustolta moottoriin.

Voimansiirtojärjestelmät, kuten akusto ja moottori, ovat suuri kuluerä mobiilirobottien valmistuksessa. Täten voimansiirtojärjestelmien soveltamismahdollisuudet eri käyttötilanteisiin sekä niiden teknologinen kehitys ovat tulevaisuudessa merkittäviä tekijöitä mobiilirobottien yleistymisessä. Voimansiirtojärjestelmien valinta vaikuttaa paitsi mobiilirobottien kustannuksiin, myös niiden tehokkuuteen, tarkkuuteen ja liikkuvuuteen. Mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmien valmistuskustannusten pienentäminen voi lisätä mahdollisuuksia käyttää mobiilirobotteja kaikilla teollisuuden aloilla. Mobiilirobottien tehokkuuden, tarkkuuden ja liikkuvuuden parantaminen voi laajentaa niiden käyttömahdollisuuksia eri teollisuuden aloille. Nykyään mobiilirobotit ovat käytössä esimerkiksi siivouksessa, ihmisten kuljetuksessa, kaivoksissa ja tavarankuljetuksessa. Tulevaisuudessa on hyvin mahdollista, että mobiilirobottien käyttökohteita voitaisiin laajentaa edellä mainittujen työtehtävien lisäksi esimerkiksi maanviljelyyn, rakennusteollisuuteen, kunnossapitoon ja autoteollisuuteen.

Tutkielman tavoitteena on vastata seuraaviin avainkysymyksiin: minkälaisia voimansiirtojärjestelmien ratkaisuja tyypillisesti käytetään mobiiliroboteissa, miten voimansiirtojärjestelmien ratkaisuja voidaan soveltaa erilaisiin mobiilirobottien käyttöympäristöihin ja minkälaisia uusia innovaatioita voidaan odottaa mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmissä.

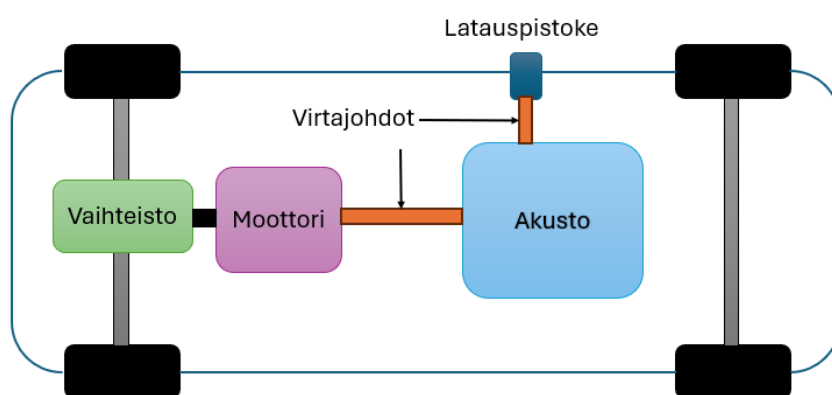
2 Mobiilirobotit yleisesti

Mobiilirobotit ovat esimerkiksi autonomisesti liikkuvia robotteja ja niihin lasketaan myös etäohjausta tai ennalta ohjattua liikerataa käyttävät robotit. Mobiilirobotit käyttävät liikkumisen suunnitteluun tallennettua tietoa ja sensoreita, kuten tutkaa, kameraa, laseretäisyysmittaria tai lidaria, eli valotutkaa. Liikkumisen suunnittelussa tarvitaan myös tekoälyä tai koneoppimista, jotta robotti osaa liikkua ja tehdä työtehtäviä autonomisesti. Mobiilirobottien liikkumiseen käytetään pyöriä, teloja tai jalkoja, ja näiden käytön mahdollistavat voimansiirtojärjestelmät. Mobiilirobotteja on monenlaisia ja niitä voidaan suunnitella erilaisiin työtehtäviin, kuten kiinteistöjen siivoamiseen, henkilöiden kuljettamiseen, tavaroiden varastointiin tai tavaran toimitukseen. [1]

Tutkielmassa käsiteltäviin mobiilirobotteihin kuuluvat robotti-imurit, autonomisella ajolla varustetut autot, kaivosrobotit ja kuljetusrobotit. Robotti-imurit käyttävät autonomiseen liikkumiseen useita sensoreita ja tallennettua karttaa, joten robotti-imurit ovat mobiilirobotteja [2]. Teslan autonomisella ajolla varustetut autot voidaan luokitella mobiiliroboteiksi, sillä ne pystyvät liikkumaan lähes autonomisesti sensorien avulla ja tarvitsevat vain harvoin ihmisen avustusta [3]. Kaivoksissa käytössä olevat kaivosrobotit luokitellaan mobiiliroboteiksi, sillä ne pystyvät liikkumaan autonomisesti ja suorittamaan yksinkertaisia tehtäviä, vaikka kaikkein vaativimpiin tehtäviin tarvittaisiinkin ihmisen avustusta [4]. Tavaran toimitukseen käytettävät kuljetusrobotit ovat mobiilirobotteja, sillä ne liikkuvat autonomisesti sensorien ja GPS:n avulla [5]. [1]

3 Voimansiirtojärjestelmät

Mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmien tärkeimmät komponentit ovat virtajohtot, akusto, moottori ja vaihteisto, joiden tyypillistä rakennetta havainnollistetaan ensimmäisessä kuvassa. Mobiilirobotin virtajohtojen avulla sähköenergia siirretään latauspistokkeelta akustolle ja sieltä edelleen moottorille. Moottori muuntaa sähköenergian mekaaniseksi liikkeeksi ja tämä liike välitetään tarvittaessa vaihteiston kautta. Mobiilirobottien välillä voi olla suuria eroja näiden komponenteissa, vaikka voimansiirtojärjestelmissä onkin joitain tyypillisiä piirteitä. Näitä mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmien tyypillisiä piirteitä ja eroavaisuuksia tarkastellaan seuraavissa luvuissa tarkemmin.



Kuva 1. Itse valmistettu kuva, jossa havainnollistetaan tyypillisen mobiilirobotin voimansiirtojärjestelmien rakenne.

3.1 Voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohtot

Mobiiliroboteissa käytetään joko korkea- vai matalajännitteisiä voimansiirtojärjestelmiä. Näissä molemmissa vaihtoehdoissa on omat etunsa ja molempia ratkaisuja käytetään mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmissä. Korkeajännitteisten virtajohtojen ansiosta suurta määrää tehoa voidaan siirtää pienellä virralla, mikä johtaa pienempiin virtajohtojen kokoon ja painoon [6]. Tämä vähentäisi mobiilirobotin valmistuskustannuksia, mutta korkeajännitteisten voimansiirtojärjestelmät taas lisäävät kustannuksia [6]. Korkeajännitteisissä voimansiirtojärjestelmissä on myös turvallisuusriskinsä, kuten sähköiskujen vaara mobiilirobotin kokoonpanossa ja kolareissa [7]. Kolaroinnin turvallisuusriskejä pystytään merkittävästi vähentämään korkeajännitehallintajärjestelmillä, kuten automaattisilla jännitteen katkaisijoilla, manuaalisilla katkaisijoilla, maadoituksilla ja lukitusjärjestelmillä [7].

Matalajännitteisillä virtajohtoilla pystytään siirtämään vain pieniä tehomääriä suurella virralla, mikä johtaa suurempiin virtajohtojen kokoon ja painoon. Tämä johtaisi kustannusten nousuun, mutta matalajännitteiset voimansiirtojärjestelmät ovat edullisemmat valmistaa. Yleisimmin suurikokoisissa ja suuritehoisissa mobiiliroboteissa käytetään korkeajännitteisiä voimansiirtojärjestelmiä, kun taas pienemmissä ja vähemmän tehoa tarvitsevilla mobiiliroboteissa käytetään matalajännitteisiä voimansiirtojärjestelmiä. [6]

Mobiilirobottien virtajohtojen materiaaleissa on eroavaisuuksia, ja yleisimmät materiaalit ovat kupari, alumiini sekä näiden kahden materiaalin yhdistelmät. Kuparia käytetään virtajohtojen materiaalina erityisesti korkeatehoisissa ja korkeajännitteisissä mobiiliroboteissa. Kupari on yleisesti käytetty materiaali sen erittäin hyvän sähkönjohtavuuden, kohtuullisen pienten kustannusten ja ruosteenkestävyyden ansiosta. Alumiinia voidaan käyttää virtajohtojen materiaalina sen hyvän sähkönjohtavuuden, pienen painon, pienten kustannusten ja ruosteenkestävyyden takia. Kuparia ja alumiinia yhdistämällä voidaan luoda virtajohtoja, jotka ovat kustannuksiltaan halvempia kuin pelkät kuparijohdot ja sähkönjohtavuudeltaan tehokkaampia kuin pelkät alumiinijohdot. [8]

3.2 Akusto

Mobiilirobottien akuston valinta on kriittinen tekijä mobiilirobotin kustannusten, toiminta-ajan, tehokkuuden ja liikkuvuuden kannalta, ja näissä akustoissa on eroavaisuuksia niin koossa, jännitteessä kuin materiaaleissa. Yleisimmin mobiiliroboteissa on käytössä litiumioniakku niiden korkean energiatihedyyden takia [9]. Mobiiliroboteissa käytettävissä litiumioniakuissa on tietyt yleisimmin käytetyt materiaalit, mutta materiaaliratkaisuissa voi kuitenkin olla joitain eroavaisuuksia mobiilirobotin käyttötarkoituksen ja budjetin perusteella.

Litiumioniakkujen yksi yleisimmistä anodimateriaaleista on grafiitti sen saatavuuden, alhaisten valmistuskustannusten, pitkän käyttöiän ja tehokkuuden takia [10]. Lämpövakaa titaanioksidi olisi yksi vaihtoehto akuston anodimateriaalille, mikäli akustossa haluttaisiin painottaa turvallisuutta enemmän kuin energiatihedyyttä [10]. Matalan energiatihedyyden takia titaanioksidi ei kuitenkaan yleensä ole käytössä akustojen anodimateriaalina. Perinteisesti

käytetyin anodimateriaali grafiitti on menettämässä suosiotaan, sillä merkittävästi suuremman kapasiteetin omaavan piin käyttömahdollisuudet ovat kasvamassa. Piin käyttömahdollisuudet ovat kasvamassa sillä yritykset ovat tehneet merkittäviä investointeja piin kustannustehokkaaseen valmistukseen. Investointien takia piin valmistuskustannukset ovat laskeneet tasolle, jolloin on mahdollisesti järkevämpää piitä grafiitin sijasta. Piillä on myös erittäin suuri laajeneminen, jonka haittavaikutuksia pystytään vähentämään akustojen rakennemuutoksilla. Ensimmäisestä taulukossa esiteltyjen piin ja grafiitin kapasiteettien vertailun perusteella, pii tarjoaa merkittävästi suuremman kapasiteetin sekä massalla että tilavuudella laskettuna. Tulevaisuudessa on hyvin mahdollista, että innovaatioiden avulla piin valmistuskustannukset jatkavat laskua, jonka myötä pii voisi korvata grafiitin yleisimpänä anodimateriaalina. [11]

Taulukko 1. Litiumioniakkujen anodimateriaalit

Taulukossa on esitelty mobiilirobottien litiumioniakkujen kahden yleisimmän anodimateriaalin kapasiteetit massalla ja tilavuudella laskettuna, sekä materiaalien oleelliset ominaisuudet. (Taulukko pohjautuu artikkeliin ” Comparison of Silicon and Graphite Anodes: Temperature-Dependence of Impedance Characteristics and Rate Performance” [11])

Anodimateriaali	Kapasiteetti mAh/g	Kapasiteetti Ah/l	Oleelliset ominaisuudet
Pii ($\text{Li}_{15}\text{Si}_4$)	3579	2194	Korkea kapasiteetti massalla, sekä tilavuudella laskettuna
Grafiitti (LiC_6)	372	719	Helppo saatavuus, alhaiset valmistuskustannukset, pitkä käyttöikä

Mobiilirobottien litiumioniakuissa on monia eri katodimateriaalien vaihtoehtoja, kuten kobolttioksidi (LCO), mangaanioksidi (LMO), nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA), nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC) ja rautafosfaatti (LFP). Akkujen katodimateriaali valitaan mobiilirobotin käyttökohteen ja katodimateriaalien ominaisuuksien perusteella, jotka ovat esitetty toisessa taulukossa. Yksi yleisimmistä katodimateriaaleista on rautafosfaatti, koska tällä katodimateriaalilla on tasainen purkautuminen, pitkä käyttöikä ja hyvä tehokkuus yhdistettynä kohtuulliseen hintaan. Toinen yleinen katodimateriaali on nikkeli-mangaani-kobolttioksidi, jolla on pitkä käyttöikä, suuri tehokkuus ja suurempi energiatiheys kuin rautafosfaatilla. Kuitenkin nikkeli-mangaani-kobolttioksidin käytössä on ylikämmenemisen turvallisuusriski, jonka takia nikkeli-mangaani-kobolttia sisältävässä akustossa joudutaan

käyttämään lämpöhallintajärjestelmiä ja jäähdytysjärjestelmiä. Rautafosfaattia käytetään yleisemmin akustojen katodimateriaalina pienissä sekä keskikokoisissa mobiiliroboteissa, kun taas nikkeli-mangaani-kobolttioksidia käytetään yleisemmin suurissa tai erittäin suurissa mobiiliroboteissa. Tämä johtuu siitä, että suuremmissa mobiiliroboteissa on tarve priorisoida akuston energiatihyyttä pienten kustannusten ja tasaisen purkautumisen edellä [9]

Taulukko 2. Litiumioniakkujen katodimateriaalit

Taulukossa on esitelty mobiilirobottien litiumioniakkujen yleisimpien katodimateriaalien oleelliset parametrit sekä ominaisuudet. (Taulukko pohjautuu artikkeliin ”Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications — An overview” [9])

Katodi-materiaali	Kapasiteetti [mAh/g]	Nimellis-jännite [V]	Energia-tiheys [Wh/kg]	Käyttöikä [sykliä]	Oleelliset ominaisuudet
LCO	140	3.7	110–190	500–1000	Korkea turvallisuusriski, kohtuullinen käyttöikä
LMO	146	3.8	100–120	1000	Halpa, turvallisempi kuin LCO
NCA	180	3.6	100–150	2000–3000	Korkea energia, korkea tiheys, kallis
NMC	145	3.6	100–170	2000–3000	Korkea jännite, hyvä kapasiteetti, korkea turvallisuusriski, hyvä käyttöikä
LFP	170	3.3	90–115	> 3000	Pitkä käyttöikä, tasainen purkautuminen, kohtuullinen hinta

3.3 Moottori

Moottorin valinta on kriittinen tekijä mobiilirobotin kustannusten, toiminta-ajan, tehokkuuden ja liikkuvuuden kannalta. Useimmissa mobiiliroboteissa käytetään sähkömoottoreita polttomoottorien sijaan monesta syystä, joista tärkeimpänä on sähkömoottorien parempi hyötysuhde verrattuna polttomoottoreihin [12]. Sähkömoottorit ovat myös hiljaisempia, vähäpäästöisempiä sekä tilavuudeltaan pienempiä, jotka parantavat mobiilirobottien

soveltamismahdollisuuksia eri työtehtäviin [12]. Osassa suuren energiakulutuksen mobiiliroboteissa kuitenkin käytetään polttomoottoreita niiden pitkän toiminta-ajan takia.

Mobiiliroboteissa käytetään monia eri sähkömoottorityyppejä, joiden koossa, tehossa ja jännitteessä on eroja. Harjattomat tasavirtamoottorit ovat yksi yleisimmistä sähkömoottorityypeistä mobiiliroboteissa niiden yksinkertaisuuden, hyvän tehokkuuden ja erinomaisen hyötysuhteen takia [13]. Kaksi muuta yleistä sähkömoottorityyppiä ovat induktiomoottori ja kestmagneettisynkronoitu moottori. Harjattomat tasavirtamoottorit ja kestmagneettisynkronoidut moottorit ovat tekniseltä rakenteeltaan hyvin samanlaisia, mutta pienet rakenteelliset eroavaisuudet johtavat erilaisiin ominaisuuksiin. [14]. Näiden kahden moottorin erilaiset ominaisuudet johtavat siihen, että tyyppillisesti kestmagneettisynkronoidut moottorit optimoidaan tuottamaan korkeaa tehoa, kun taas harjattomat tasavirtamoottorit alhaisia valmistuskustannuksia [14]. Kestomagneettisynkronoitu moottori on hyvä valinta sähkömoottoriksi sen suuren vääntömomentin ja hyvän hyötysuhteen takia.

Kestomagneettisynkronoidun moottorin huonoina puolina ovat korkeat valmistuskustannukset ja alhainen moottorin mekaaninen lujuus [15]. Induktio moottori on hyvä valinta sähkömoottoriksi sen moottorin suuren mekaanisen lujuuden, pienissä kuormituksissa toimivan hyvän hyötysuhteen ja pienten valmistuskustannusten takia [15]. Ongelmia kuitenkin tuottaa induktio moottorin alhainen hyötysuhde suurissa kuormituksilla, joka johtuu tehohäviöistä moottorissa [15]. Tätä ongelmaa yritetään ratkaista kehittämällä kuparista moottorin kehikkoa, jonka avulla induktio moottorien yleisyys voisi kasvaa tulevaisuudessa [15]. Yleisimmin induktio moottoreita ja kestmagneettisynkronoituja moottoreita käytetään suurikokoisissa ja suuritehoisissa mobiiliroboteissa [15], kun taas harjattomia tasavirtamoottoreita käytetään tyyppillisesti pienemmissä mobiiliroboteissa [14]. Harjalliset tasavirtamoottorit ovat vanhempaa teknologiaa eivätkä ole enää yhtä suosittuja, mutta niitä voidaan yhä käyttää pienissä mobiiliroboteissa, mikäli halutaan laskea valmistuskustannuksia [13].

3.4 Vaihteisto

Useimmissa mobiiliroboteissa ei käytetä vaihteistoja, sillä ne eivät ole yhtä tarpeelliset sähkömoottoreissa kuin polttomoottoreissa. Tosin myös sähkömoottorilla toimiviin mobiilirobotteihin voidaan lisätä vaihteet, mikäli mobiilirobotin käyttötarkoitus sitä vaatii.

Vaihteiston asentaminen sähkömoottorilla toimivaan mobiilirobottiin parantaa sen tehokkuutta, mutta yksivaihteisten sähkömoottorien yksinkertaisuus ja pienet valmistuskustannukset johtavat niiden yleiseen suosioon. Polttomoottorilla toimivissa mobiiliroboteissa käytetään eri vaihteistotyyppisiä mobiilirobottien käyttötarkoituksen perusteella. [16]

4 Voimansiirtojärjestelmien ratkaisut eri mobiiliroboteissa

Mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmissä sovelletaan ratkaisuja mobiilirobottien käyttötarkoituksen, koon ja tehon perusteella. Yrityksien valmistamista uusista mobiiliroboteista ei yleensä tehdä tieteellisiä artikkeleita, eivätkä yritykset myöskään yleensä julkisesti tiedota heidän uusimmista voimansiirtojärjestelmien teknologioista. Täten käytössä olevien mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmien arvioimiseen joudutaan käyttämään yrityksien virallisesti julkaisemaa rajattua tietoa, eri lähteistä saatavilla olevaa epävirallista laajempaa tietoa, tieteellisiä artikkeleita vastaavista mobiiliroboteista ja yleisiä voimansiirtojärjestelmien ratkaisuja kunkin koko- ja teholuokan mobiiliroboteissa. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan yleisimpien mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmien ratkaisut, syyt ratkaisuiden valintaan ja ratkaisuiden vaikutukset kyseisten mobiilirobottien toimintaan.

4.1 Mobiilirobotit kotien siivoamisessa

Robotti-imureita on monia eri tyyppisiä ja tässä kappaleessa tarkastellaan artikkelissa ”Development of a vacuum cleaner robot” esitelty robotti-imuri, joka kuvastaa hyvin kaikkien robotti-imureiden voimansiirtojärjestelmien ominaisuuksia. Esitellyssä robotti-imurissa on yksi vapaasti pyörivä etupyörä, sekä kaksi vetävää tasavirtamoottoriin kytkettyä takapyörää. Samanlainen rengassysteemi on yleinen muissakin robotti-imureissa, sillä tämä mahdollistaa vain kahden vetävän pyörän käytön robotti-imurissa ilman, että sen liikkuvuus heikkenee merkittävästi. Robotti-imurien elektronisten järjestelmien pitää olla rakennettu kompaktisti, ensisijaisesti rajoitetun mobiilirobotin koon takia, mutta myös robotti-imurin ajon aikaisen heilumisen vähentämiseksi. Esitellyssä robotti-imurissa elektroniset voimansiirtojärjestelmät on rakennettu robotti-imurin keskiosaan imumoottorin päälle, mikä vähentää mahdollisia vaurioita törmäyksistä. [2]

4.1.1 Robotti-imurin voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot

Pienikokoisissa ja hitaiden nopeuksien mobiiliroboteissa on tyypillistä käyttää matalajännitteisiä voimansiirtojärjestelmiä, sillä pienen tehon takia korkeajännitteisille voimansiirtojärjestelmille ei ole tarvetta [6]. Robotti-imurissa ei myöskään olisi mahdollista

käyttää korkeajännitteisiä voimansiirtojärjestelmiä turvallisuussyistä, sillä robotti-imurit usein törmäilevät huonekaluihin sekä seiniin [7]. Esitellyn robotti-imurin akuston jännitteen on kerrottu olevan 28.8 V ja on hyvin mahdollista, että myös muiden robotti-imurin voimansiirtojärjestelmien jännite on 28.8 V [2]. Tämä johtuu siitä, että samansuuruinen jännite voimansiirtojärjestelmissä yksinkertaistaisi robotti-imurin voimansiirtojärjestelmien rakennetta.

Esitellyssä robotti-imurissa ei ole kerrottu matalajännitteisten virtajohtojen materiaalia, mutta yleensä robotti-imurien virtajohtojen materiaalina ovat kupari, alumiini tai näiden kahden yhdistelmä. Kuparijohdoilla saataisiin robotti-imurien virtajohtoille korkea sähkönjohtavuus, kun taas alumiinijohdoilla saataisiin robotti-imurin valmistuskustannuksista pienemmät. [8]

4.1.2 Robotti-imurin akusto

Esitellyssä robotti-imurissa käytetään litiumioniakkuja niiden matalan painon ja korkean energiatiheyden takia [9]. Robotti-imurin akuston kolmen litium-polymeeriakun yhteenlaskettu kapasiteetti on 2200 mAh ja sen pitäisi artikkelin mukaan kestää robotti-imurin kahden tunnin käyttö ennen lataustarvetta [2]. Esitellyn robotti-imurin akkujen materiaalia ei tarkemmin kerrottu, eikä robotti-imurien akkujen materiaaleista voida tehdä arvioita sillä anodi- ja katodimateriaalivaihtoehtoja on monia.

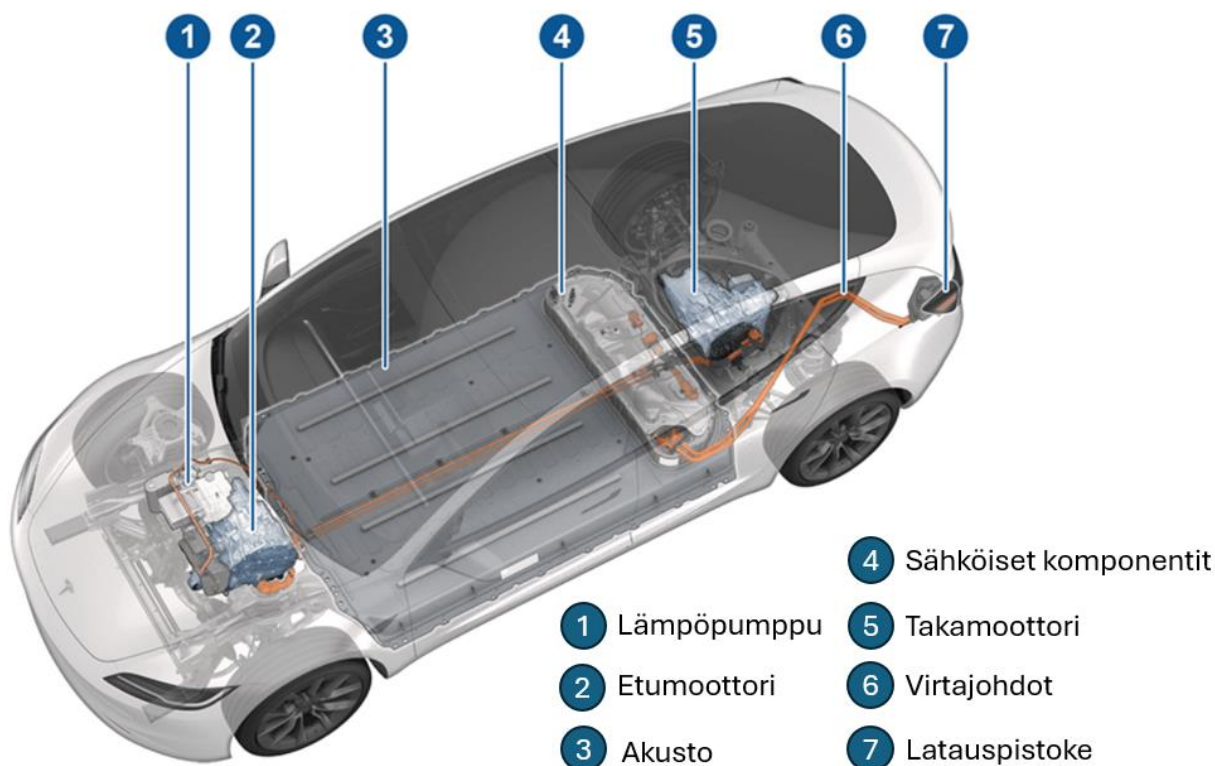
4.1.3 Robotti-imurin moottori

Esitellyssä robotti-imurissa käytetään tasavirtamoottoria liikkumista varten, mutta artikkelissa ei kerrota onko kyseinen tasavirtamoottori harjallinen vai harjaton [2]. Harjattomat tasavirtamoottorit ovat yksi yleisimmistä sähkömoottorityypeistä mobiiliroboteissa niiden yksinkertaisuuden, korkean tehokkuuden ja erinomaisen hyötysuhteen takia [13]. Tämän perusteella ei kuitenkaan voida tehdä oletuksia robotti-imurin sähkömoottorityypistä, sillä pienikokoisessa ja pienitehoisessa robotti-imurissa voitaisiin käyttää harjallisia tasavirtamoottoreita valmistuskustannusten laskemiseksi [13]. Robotti-imureissa voidaan

käyttää pienitehoisia sähkömoottoreita, sillä kevyen robotti-imurin hidas liike tasaisella lattialla ei vaadi suurta tehoa [2].

4.2 Mobiilirobotit kulkuvälineinä

Autoilun nopean sähköistymisen ja autonomisen ajamisen kehityksen myötä autonomisten sähköautomallien määrä on kasvanut merkittävästi. Autonomisia sähköautomalleja on monia ja tässä kappaleessa keskitytään Tesla Model 3 autoon, jonka voimansiirtojärjestelmien rakenne näkyy toisessa kuvassa. Tesla Model 3 auton voimansiirtojärjestelmiä pystytään arvioimaan käyttämällä virallista Teslan julkaisemaa yleistä tietoa autosta, Teslan julkaisemaa akkujen tiedotusesitettä sekä yleisiä käytäntöjä suurien mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmissä. Teslan akkujen tiedotusesite julkaistiin 22.9.2020, joten pieni osa tiedotusesitteen tiedoista voi olla jo muuttunutta ottaen huomioon akkujen nopean teknologisen kehityksen [17]. Tiedotusesite kuitenkin kertoi Teslan autojen akkujen suunnitelmista tulevina vuosina, joten tiedotusesitteen tietojen pitäisi vielä olla hyvin relevanttia nykyisissä Teslan autoissa [17]. Tesla itse valmistaa merkittävän osan heidän autojensa voimansiirtojärjestelmistä, kuten akuston [17].



Kuva 2. Muokattu vapaasti saatavilla oleva Tesla Model 3 auton huoltokirjan kuva, josta nähdään auton voimansiirtojärjestelmien rakenne. (Alkuperäisen kuvan lähde [18])

4.2.1 Teslan voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot

Suurikokoisissa mobiiliroboteissa on tyypillistä käyttää korkeajännitteisiä voimansiirtojärjestelmiä suuren tehon tarpeen takia [6]. Tesla Model 3 auto tarvitsee erityisesti kiihdytyksissä suurta tehoa, jonka takia siinä on korkeajännitteiset voimansiirtojärjestelmät [15]. Korkeajännitteiset voimansiirtojärjestelmät autoissa johtavat turvallisuusriskeihin kolaroidessa, mutta näitä riskejä voidaan monin tavoin vähentää [7]. Teslan autoissa turvallisuusriskit ovat todennäköisesti hallinnassa korkeajännitehallintajärjestelmillä, kuten automaattisilla jännitteen katkaisijoilla, manuaalisilla katkaisijoilla, maadoituksilla tai lukitusjärjestelmillä [7].

Tesla ei ole kertonut, mistä materiaalista Model 3 auton korkeajännitteisten virtajohdot ovat valmistettu, mutta sähköautojen virtajohtojen materiaalina voidaan käyttää kuparia, alumiinia tai näiden kahden yhdistelmää. On kuitenkin todennäköistä, että Tesla käyttää Model 3 auton virtajohtojen materiaalina kuparia, sillä kuparijohtojen suuri sähkönjohtavuus olisi erittäin hyödyllinen Model 3 auton korkean tehon voimansiirtojärjestelmissä. [8]

4.2.2 Teslan akusto

Toisesta kuvasta nähdään Teslan Model 3 auton akuston olevan asennettu auton pohjaan, jonka avulla saadaan autolle alhainen painopiste ja parempi turvallisuus. Sähköautoissa on tarve suurelle teholle ja pitkälle toimintamatkalle, jonka takia Tesla Model 3 automalleissa on korkeatehoiset akustot. Epävirallisten tietojen mukaan Tesla Model 3 auton korkeajännitteisen akuston käytettävä teho on perusmallissa 57.5 kWh [19] ja pitkän toimintamatkan mallissa 75 kWh [15].

Tesla käyttää kaikissa autoissaan litiumioniakkuja, joiden materiaaleissa on eroavaisuuksia automallien välillä. Kaikissa Teslan autojen litiumioniakuissa käytetään anodimateriaalina piitä, koska se varastoi yhdeksän kertaa enemmän litiumia kuin grafiitti. Tesla on kehittänyt oman silikonin kustannustehokkaan valmistusmenetelmän ja Teslan kertoo sen valmistaman

piin olevan merkittävästi kustannustehokkaampi ratkaisu verrattuna perinteisiin piin valmistusmenetelmiin. Teslan mukaan sen itsevalmistaman piin hinta on 1.2 \$/kWh, kun taas pii liitettynä oksidilasiin on 6.6 \$/kWh, pii liitettynä grafiittiin on 10.2 \$/kWh ja piinanolanka on >100 \$/kWh. Täten Teslan itsevalmistaman piin valmistusmenetelmä on erittäin kustannustehokas, vaikka huomioitaisiin, että 22.9.2020 julkaistuissa hinnoissa voi olla pieniä eroavaisuuksia nykyhetkeen. [17]

Lähes kaikissa Teslan automalleissa käytetään katodimateriaalina nikkeli-mangaani-kobolttia sen erittäin hyvän energiatiheyden ja suuren tehokkuuden takia [9]. Teslan Model 3 auton perusmalli on kuitenkin kooltaan ja tehokkuudeltaan Teslan pienimpiä automalleja, jonka takia perusmallissa käytetään katodimateriaalina rautafosfaattia. Rautafosfaatin avulla Model 3 auton perusmallin akustolle saadaan pitkä käyttöikä, hyvä tehokkuus ja tasainen purkautuminen [9]. [17]

4.2.3 Teslan moottorit

Molemmissa Tesla Model 3 auton malleissa on takaosassa takamoottori ja pitkän toimintamatkan mallissa on myös etuosassa etumoottori [18]. Takamoottorina toimii vaihtovirtakäyttöinen kestopagneettisynkronoitu moottori, jossa on nestejäähdytys ja taajuusmuuttajaohjaus [18]. Kestopagneettisynkronoitu moottori on hyvä valinta korkeatehoisen sähköauton moottoriksi sen korkean vääntömomentin ja hyötysuhteen takia, mutta roottorin alhainen mekaaninen lujuus voi aiheuttaa ongelmia [15]. Pitkän toimintamatkan mallin etumoottorina toimii vaihtovirtakäyttöinen induktiomoottori, jossa on nestejäähdytys ja taajuusmuuttajaohjaus [13]. Induktiomoottori on hyvä valinta auton lisämoottoriksi sen pienen valmistuskustannusten ja roottorin korkean mekaanisen lujuuden takia [15].

Tesla kertoo mallikohtaisesti yksimoottorisen Tesla Model 3 perusmallin 0–100 km/h kiihtyvyyden olevan 6.1 s ja toimintamatkan 438 km [17]. Vastaavasti kaksimoottorisen Tesla Model 3 pitkän toimintamatkan mallin 0–100 km/h kiihtyvyyden kerrotaan olevan 4.4 s ja toimintamatkan 548 km [17]. Vertaamalla kiihdytysaikoja ja ottamalla huomioon pitkän

toimintamatkan mallin suuremmasta akustosta johtuva painoero, huomataan, että lisäämällä auton etuosaan induktiomoottori saadaan merkittävä parannus auton tehokkuuteen. Tehokkuuden lisäksi yhdistämällä etu- ja takamoottori autoon, saadaan pidemmän toimintamatkan mallista nelivetoinen, kun yksimoottorinen perusmallin auto on vain takavetoinen [17]. Takamoottorin ja mahdollisen etumoottorin sijainnit näkyvät kappaleen alussa esitetyssä kuvassa. Moottorit pystytään sijoittamaan yksinkertaisesti akselien läheisyyteen, sillä Tesla Model 3 autossa ei ole käytössä vaihteistoa [14].

4.3 Mobiilirobotit kaivoksissa

Kaivosrobotteja on monia erilaisia perustuen niiden käyttötarkoitukseen ja tässä kappaleessa tarkastellaan osittain autonominen Epiroc Scooptram ST14 SG. Autonomiset kaivosrobotit ovat yleensä akkukäyttöisiä, kuten myös Epiroc Scooptram ST14 SG [4]. Täten kyseisen kaivosrobotin voimansiirtojärjestelmät kuvaavat hyvin yleisiä käytäntöjä kooltaan ja teholtaan suurissa kaivosroboteissa. Epiroc on julkaissut sivuillaan tarkan tietoesitteen Scooptram ST14 SG kaivosrobotin voimansiirtojärjestelmistä ja seuraavat luvut kaivosrobotin voimansiirtojärjestelmistä perustuvat vahvasti tähän tietoesitteeseen. Myös joitain arvioita on tehty perustuen yleisiin voimansiirtojärjestelmien ratkaisuihin kooltaan ja teholtaan erittäin suurissa mobiiliroboteissa.

4.3.1 Kaivosrobotin voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot

Erittäin suurissa mobiiliroboteissa, kuten kaivosroboteissa, käytetään korkean jännitteen voimansiirtojärjestelmiä tehon maksimoinniksi [6]. Esitellyn Kaivosrobotin voimansiirtojärjestelmissä on kerrottu olevan enimmillään 850 voltin tasavirta ja moottorit käyttävät 400 voltin vaihtovirtaa, joten myös virtajohdoissa kulkee useamman sadan voltin jännitteet [4]. Kaivosrobotit pystyisivät työskentelemään yksinäisesti kaivoksissa tarkoittaen, että kaivosroboteilla ei ole välttämättä yhtä suurta törmäyksistä johtuvaa korkeajännitteisten sähköiskujen riskiä ihmisille kuin muilla mobiiliroboteilla. Kuitenkin kaivosrobottiin tarvitsee asentaa korkeajännitehallintajärjestelmiä, sillä kaivosrobotilla pitää olla mahdollisuus työskennellä myös ihmisohjattujen koneiden kanssa [7].

Kaivosrobotin korkeaajännitteisten virtajohtojen materiaalia ei ole kerrottu, mutta kaivosrobottien virtajohdoissa voitaisiin käyttää materiaaleja, kuten kuparia, alumiinia tai näiden kahden yhdistelmää. On kuitenkin todennäköistä, että esitellyn kaivosrobotin virtajohtojen materiaalina on kupari, sillä sen suuri sähkönjohtavuus olisi erittäin hyödyllinen kaivosrobotin voimansiirtojärjestelmissä. [8]

4.3.2 Kaivosrobotin akusto

Akkukäyttöiset kaivosrobotit vaativat suuren kokonsa ja korkean tehovaatimuksen vuoksi erittäin tehokkaan akun. Tämän vuoksi esiteltyssä kaivosrobotissa on akku, jonka kapasiteetti on 300 kWh ja paino 4200 kg. Akuston paino on erittäin suuri, vaikka otetaan huomioon kaivosrobotin painavan kokonaisuudessaan 42000 kg. Akuston anodimateriaalia ei ole kerrottu, mutta katodimateriaali on nikkeli-mangaani-koboltti. Nikkeli-mangaani-koboltti on hyvä katodimateriaali kaivosrobotille sen erittäin suuren energiatiheyden, suuren tehokkuuden ja hyvän käyttöiän takia [9]. Kuitenkin nikkeli-mangaani-kobolttioksidilla on suuri turvallisuusriski verrattuna muihin katodimateriaaleihin [9]. Täten nikkeli-mangaani-kobolttiakustoihin on asennettava turvallisuusjärjestelmiä, vaikka miehittämättömissä kaivosroboteissa ihmisiin kohdistuvat turvallisuusriskit olisivatkin rajalliset. Esitellyn kaivosrobotin Nikkeli-mangaani-koboltti-akuston ylikuumentumisen estämiseksi on akustoon integroitu lämpöhallintajärjestelmä ja nestepohjainen jäähdytysjärjestelmä. Näiden järjestelmien avulla kaivosrobotin turvallinen käyttölämpötila on kerrottu olevan 0 °C – 40 °C. [4]

4.3.3 Kaivosrobotin moottori

Kaivosrobotit vaativat suuren teholuokan moottorit liikkumiseen suuren kokonsa, haastavan työskentely-ympäristön ja vaativan käyttötarkoituksen takia. Esiteltyssä kaivosrobotissa on käytössä ABB:n valmistama 200 kW tehoinen korkeaajännitteinen sähkömoottori. Moottorin vaihtovirtajännitteen on kerrottu olevan 400 voltia ja nimellisvääntömomentin 1100 Nm. Kaivosrobottien moottorit tarvitsevat kestää haastavien olosuhteiden takia pölyä ja kosteutta, jonka takia esiteltyssä kaivosrobotissa on IP65-luokan sähkömoottori. Kyseisen sähkömoottorin pitäisi kestää kaivosrobotin olosuhteita, sillä IP65-luokan perusteella se

kestää pölyä ja vesisuihkuja. Vaikka suurikokoisissa kaivosroboteissa olisi mahdollisesti järkevää käyttää polttomoottoria toiminta-ajan parantamiseksi, uusien kaivosrobottien on kuitenkin toistaiseksi kerrottu olevan sähkömoottorilla toimivia. [4]

4.3.4 Kaivosrobotin vaihteisto

Korkeaa tehoa vaativiin sähköisiin kaivosrobotteihin on hyödyllistä asentaa vaihteisto sähkömoottorin tueksi, jonka takia esiteltyyn kaivosrobottiin on asennettu vaihteisto [16]. Esitellyssä kaivosrobotissa on Danan valmistama ERTE32-vaihteisto, joka on täysin moduloitu neljävaihteinen automaattivaihteisto [4]. Vaihteiston lisääminen kaivosrobottiin monimutkaistaa voimansiirtojärjestelmien rakennetta ja lisää valmistuskustannuksia, mutta vaihteistosta saatava tehohyöty on erittäin tärkeä korkeaa tehoa vaativissa työtehtävissä [16].

4.4 Mobiilirobotit kauppaostosten kotiinkuljettajina

Viime vuosina kauppaostoksia kuljettavien mobiilirobottien suosio on kasvanut merkittävästi ja tätä suosion kasvua on edistänyt maailman johtava kuljetusrobotteja valmistava yritys Starship Technologies. Myös Suomessa nähtävät S-Ryhmän kuljetusmobiilirobotit ovat Starship Technologies yrityksen valmistamia ja tässä kappaleessa keskitytään juuri kyseisiin kuljetusrobotteihin. Starship Technologies ei ole virallisesti julkaissut tarkkoja tietoja heidän kuljetusrobottiansa voimansiirtojärjestelmistä. Arvio kuljetusrobottien akustosta, moottoreista ja virtajohdoista voidaan tehdä Starship Technologies yrityksen julkaisemien rajallisten kuljetusrobotin yleistietojen, epävirallisen kuljetusrobotin laajemman tietoesitteen, pienien mobiilirobottien yleisien voimansiirtojärjestelmäratkaisujen sekä artikkelin ”Energy Demand Analysis and Powertrain Design of a High-Speed Delivery Robot Using Synthetic Driving Cycles” laskemien perusteella. Myös artikkelin laskuissa on käytetty Starship Technologies kuljetusrobotin epävirallista tietoesitettä laskemaan voimansiirtojärjestelmien parametrejä [21].

4.4.1 Kuljetusrobotin voimansiirtojärjestelmien jännite ja virtajohdot

Keskikokoisissa mobiiliroboteissa on tyypillistä käyttää matalajännitteisiä voimansiirtojärjestelmiä, koska pienen tehon myötä korkeajännitteisille voimansiirtojärjestelmille ei ole tarvetta [6]. Kuljetusrobottien koon perusteella voidaan olettaa, että kuljetusrobottien voimansiirtojärjestelmät ovat matalajännitteisiä. Kuljetusrobotit voivat helposti törmätä esteisiin ja ne liikkuvat ihmisten läheisyydessä, joten myöskään turvallisuussyiden takia ei olisi järkevää käyttää kuljetusroboteissa korkeajännitteisiä voimansiirtojärjestelmiä [7].

Kuljetusrobottien matalajännitteisten virtajohtojen materiaalia ei ole julkaistu, mutta todennäköisimmät vaihtoehdot ovat kupari, alumiini tai näiden kahden yhdistelmä. Kuparijohdoilla saataisiin virtajohtoille hyvä sähkönjohtavuus, kun taas alumiinijohdoilla saataisiin kuljetusrobotin valmistuskustannuksista pienemmät. [8]

4.4.2 Kuljetusrobotin akusto

Sähkömoottorilla varustetuissa mobiiliroboteissa on yleisimmin käytössä litiumioniakut niiden korkean energiatiheyden takia [9]. Myös kuljetusrobotin epävirallisessa tietoesitteessä on kerrottu kuljetusrobottien käyttävän litiumioniakustoja, joten voidaan olettaa kuljetusrobotissa olevan litiumioniakusto [22]. Kuljetusrobotin epävirallisessa tietoesitteessä on myös kerrottu litiumioniakkujen olevan litium-polymeeriakkuja [22]. Kuljetusrobotin akuston materiaaleista ei ole saatavilla tietoa ja mobiiliroboteissa nähdään monia eri anodi- ja katodimateriaaleja, joten kuljetusrobotin akuston materiaaleista ei voida tehdä oletuksia.

Artikkelissa on tehty kaksi laskelmaa akustojen parametreille Monte Carlo simulaatioiden avulla. Ensimmäisessä laskelmassa on laskettu kuljetusrobotin pienimmän mahdollisen akuston parametrit ja toisessa laskelmassa on laskettu kuljetusrobotin 12 tuntia ajoa kestävä akuston parametrit. Starship Technologies kertoo virallisissa yleistiedoissa kuljetusrobottien akkujen kestävänsä koko päivän ennen yöllistä latauksen tarvetta, joten voidaan olettaa artikkelin laskelman 12 tuntia kestävästä akuista olevan lähimpänä totuutta kuljetusrobottien akustosta [5]. Artikkelin laskelman perusteella kuljetusrobottiin tarvittaisiin kahdeksan

sarjaan kytkettyä 4500 mAh litium-polymeeriakkua, jotta päästäisiin kuljetusrobotin 12 tunnin toiminta-aikaan. Kyseinen akusto painaisi 9 kg ja sen kapasiteetti olisi 1065 Wh. [21]

4.4.3 Kuljetusrobotin moottori

Mobiilirobottien yksi yleisimmistä sähkömoottorityypeistä ovat harjattomat tasavirtamoottorit niiden yksinkertaisuuden, korkean tehokkuuden ja erinomaisen hyötysuhteen takia [13]. Myös kuljetusrobotin epävirallisessa tietoesitteessä kerrotaan kuljetusrobottien käyttävän harjattomia tasavirtamoottoreita, joten voidaan olettaa kuljetusroboteissa olevan harjattomat tasavirtamoottorit [22].

Kuljetusrobotin sähkömoottorien lukumäärästä tai tehosta ei ole saatavilla tietoa, mutta arvio sähkömoottoreista voidaan tehdä artikkelin laskelmien perusteella. Artikkelin laskelmissa on päädytty kahteen 350 W harjattomaan sähkömoottoriin, joiden pitäisi hyvin riittää kuljetusrobottien käyttötarkoitukseen [21]. On kuitenkin hyvin mahdollista, että kuljetusroboteissa on käytössä alhaisemman tehoiset sähkömoottorit kustannuksissa säästämiseksi. Artikkelin laskelmien mukaan kuljetusrobotin suurin tehon tarve tasaisella maalla kiihdyttäessä on 440 W, joten kuljetusrobotissa voisi hyvin olla kaksi 300 W sähkömoottoria tai jopa kaksi 250 W sähkömoottoria [21]. Nämä pienemmän tehon sähkömoottorit olisivat järkevä valinta kuljetusrobottiin, koska nopea kiihtyvyys ylämäessä ei ole yhtä tärkeää kuin pienet valmistuskustannukset.

4.4.4 Kuljetusrobotin langaton lataus

Starship technologies on rajoitetusti käyttöönottamassa langattoman latauksen uusissa kuljetusroboteissaan George Mason yliopistossa, tehdäkseen kuljetusroboteista enemmän autonomisia [23]. Yleisimmin mobiilirobottien lataukseen käytetään joko automaattista tai manuaalista latausliitintä, joista molemmat tarvitsevat ainakin ajoittaista ihmisen avustusta. Automaattisen latausliitännän täysin autonominen toiminta vaatisi jatkuvaa erinomaista tarkkuutta, jota mobiiliroboteilla ei vielä ole. Automaattisen latausliitännän tarkkuuden

vaatimus pohjautuu siihen, että väärä kulma tai etäisyys laturiin aiheuttaa latauksen epäonnistumisen. [24]

Langattoman latauksen kuljetusrobotti voi ilman erityistä tarkkuutta ajaa latausalustalle, jonka jälkeen latausalusta lähettää sähkömagneettisen kentän [25]. Tämä sähkömagneettinen kenttä indusoi sähkövirran kuljetusrobotin latauspiirin ja tämä sähkövirta lataa akun [25].

Langattoman latauksen hyviä puolia ovat turvallisuus, helppokäyttöisyys ja autonomisuus.

Langattomassa latauksessa ei myöskään ole pöly- tai kontaktihäviötä, mekaanista kulumaa tai sähkökipinöitä. Langaton lataus mahdollistaa kuljetusrobottien latauksen täysin autonomisesti toimitusten välissä, mikä laskee kuljetusrobottien käyttökustannuksia. [24]

5 Yhteenveto

Yhteenvetona eri mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmissä on paljon eroja, mutta monissa mobiiliroboteissa on tyypilliset voimansiirtojärjestelmät niiden tehonsa ja kokonsa puolesta. Eri kokoluokkaisten mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmissä on kuitenkin yhtäläisyyksiä, esimerkiksi lähes kaikissa mobiiliroboteissa käytetään sähkömoottoreita ja litiumioniakkuja.

Mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmät ovat joko matala- tai korkeajännitteisiä; matalajännitteiset voimansiirtojärjestelmät ovat turvallisempia ja halvempia, kun taas korkeajännitteiset voimansiirtojärjestelmät ovat tehokkaampia. Mobiilirobottien virtajohtojen materiaalina käytetään yleensä kuparia tai alumiinia; kuparijohtojen on korkeampi sähköjohtavuus, kun taas alumiinijohtojen on halvempia valmistuskustannukset. Mobiilirobottien akuissa käytetään anodimateriaalina yleensä grafiittia tai piitä. Pii on tehokkaampi anodimateriaali kuin grafiitti, mutta piin suuri laajeneminen ja valmistuskustannukset aiheuttavat haasteita. Akustojen katodimateriaaleissa on enemmän eroavaisuuksia, mutta rautafosfaatti ja nikkeli-mangaani-kobolttioksidi ovat yleisimmät. Rautafosfaatilla on halvempia valmistuskustannukset ja tasaisempi purkautuminen, kun taas nikkeli-mangaanikoboltilla on suurempi energiatiheys. Yleisimpiä mobiilirobottien sähkömoottoreita ovat harjattomat tasavirtamoottorit, induktiomoottorit ja kestopagneettisynkronoidut moottorit. Induktiomoottorit ja kestopagneettisynkronoidut moottorit ovat tehokkaampia ja harjattomat tasavirtamoottorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia. Vaihteisto lisää mobiilirobotin tehokkuutta, mutta toisaalta se myös lisää valmistuskustannuksia ja monimutkaistaa voimansiirtojärjestelmien rakennetta.

Tutkielmassa tutkittiin robotti-imurin, kuljetusrobotin, Tesla Model 3 auton ja kaivosrobotin voimansiirtojärjestelmät, jotka hyvin kuvastavat pienien, keskikokoisten, suurien ja erittäin suurien mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmiä. Pienissä mobiiliroboteissa on tyypillisesti matalajännitteiset voimansiirtojärjestelmät, ja virtajohtojen materiaalina voidaan käyttää joko alumiinia tai kuparia. Pienien mobiilirobottien litiumioniakkujen anodimateriaalina voidaan käyttää grafiittia tai piitä, ja katodimateriaalina käytetään yleisimmin rautafosfaattia. Pienien mobiilirobottien moottorit ovat tyypillisesti harjattomia tasavirtamoottoreita, eikä niiden yhteydessä yleensä käytetä vaihteistoja.

Keskikokoisissa mobiiliroboteissa on yleensä matalajännitteiset voimansiirtojärjestelmät ja virtajohtojen materiaalina voitaisiin käyttää alumiinia tai kuparia, kuitenkin yleisin materiaali on kupari. Keskikokoisten mobiilirobottien litiumioniakkujen anodimateriaalina voidaan käyttää grafiittia tai piitä, ja katodimateriaalina käytetään yleisimmin rautafosfaattia. Keskikokoisten mobiilirobottien moottorit ovat tyypillisesti harjattomia tasavirtamoottoreita, eikä niiden yhteydessä yleensä käytetä vaihteistoja.

Suurissa mobiiliroboteissa on korkeajännitteiset voimansiirtojärjestelmät ja virtajohtojen materiaalina käytetään kuparia. Suurien mobiilirobottien litiumioniakkujen anodimateriaalina voidaan käyttää grafiittia tai piitä, ja katodimateriaalina käytetään yleisimmin joko rautafosfaattia tai nikkeli-mangaani-kobolttia. Suurien mobiilirobottien moottorit ovat yleisimmin joko induktiomoottoreita tai kestromagneettisynkronoituja moottoreita. Suurissa mobiiliroboteissa voitaisiin käyttää vaihteistoja, mutta se ei kuitenkaan ole yleistä.

Erittäin suurissa mobiiliroboteissa on korkeajännitteiset voimansiirtojärjestelmät ja virtajohtojen materiaalina käytetään kuparia. Suurien mobiilirobottien litiumioniakkujen anodimateriaalina voidaan käyttää grafiittia tai piitä, ja katodimateriaalina käytetään yleisimmin nikkeli-mangaani-kobolttia. Suurien mobiilirobottien moottorit ovat yleisimmin joko induktiomoottoreita tai kestromagneettisynkronoituja moottoreita, ja moottorien yhteydessä yleensä käytetään vaihteistoja.

Tulevaisuudessa mobiilirobottien voimansiirtojärjestelmissä odotetaan merkittäviä muutoksia teknologisen kehityksen myötä. Esimerkiksi pii todennäköisesti syrjäyttää grafiitin käytön anodimateriaalina, sillä pii on kapasiteetiltaan moninkertaisesti grafiittia parempi ja piin valmistuskustannuksien odotetaan jatkavan laskua. Harjattomat tasavirtamoottorit todennäköisesti jatkavat harjallisten tasavirtamoottorien syrjäyttämistä, sillä harjattomien tasavirtamoottorien tehon ja hyötysuhteen odotetaan paranevan entisestään. Langattoman latauksen teknologisen kehityksen myötä, se tulee todennäköisesti yleistymään täysin autonomisesti toimivien mobiilirobottien latausratkaisuna, sillä se on paljon autonomisempi ratkaisu verrattuna automaattiseen latausliitäntään.

6 Lähteet

- [1] S. G. Tzafestas, ‘Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview’, *J Intell Robot Syst*, vol. 91, no. 1, pp. 35–58, Jul. 2018, doi: 10.1007/s10846-018-0805-9.
- [2] T. B. Asafa, T. M. Afonja, E. A. Olaniyan, and H. O. Alade, ‘Development of a vacuum cleaner robot’, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 2911–2920, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.aej.2018.07.005.
- [3] ‘Design Your Model 3 | Tesla’, Design Your Model 3 | Tesla. Accessed: Feb. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.tesla.com/model3/design>
- [4] Epiroc, ‘Scooptram ST14 SG’, Epiroc. Accessed: Feb. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.epiroc.com/en-fi/products/loaders-and-trucks/electric-loaders/scooptram-st14-battery>
- [5] ‘Starship Robots - Your Local, Community Helpers’, Starship Technologies: Autonomous robot delivery. Accessed: Feb. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.starship.xyz/the-starship-robot/>
- [6] A. Gupta, R. Ayyanar, and S. Chakraborty, ‘Novel Electric Vehicle Traction Architecture With 48 V Battery and Multi-Input, High Conversion Ratio Converter for High and Variable DC-Link Voltage’, *IEEE Open J. Veh. Technol.*, vol. 2, pp. 448–470, 2021, doi: 10.1109/OJVT.2021.3132281.
- [7] H. F. Dai, X. Z. Wei, Z. C. Sun, and X. Y. Chang, ‘Studies of a High Voltage Management System in Electric Vehicles’, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 80–81, p. 825, Jul. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.80-81.825.
- [8] J. Guo, C. Li, J. Bian, J. Zhang, and B. Geng, ‘Microstructures and Electrical Resistivity of Aluminum–Copper Joints’, *Metals*, vol. 13, no. 8, p. 1474, Aug. 2023, doi: 10.3390/met13081474.
- [9] A.-I. Stan, M. Swierczynski, D.-I. Stroe, R. Teodorescu, and S. J. Andreasen, ‘Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications — An overview’, in *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Bran: IEEE, May 2014, pp. 713–720. doi: 10.1109/OPTIM.2014.6850936.
- [10] X. L. Yao *et al.*, ‘Comparisons of graphite and spinel $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$ as anode materials for rechargeable lithium-ion batteries’, *Electrochimica Acta*, vol. 50, no. 20, pp. 4076–4081, Jul. 2005, doi: 10.1016/j.electacta.2005.01.034.
- [11] C. Berg, R. Morasch, M. Graf, and H. A. Gasteiger, ‘Comparison of Silicon and Graphite Anodes: Temperature-Dependence of Impedance Characteristics and Rate Performance’, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 170, no. 3, p. 030534, Mar. 2023, doi: 10.1149/1945-7111/acc09d.
- [12] J. D. Madden, ‘Mobile Robots: Motor Challenges and Materials Solutions’, *Science*, vol. 318, no. 5853, pp. 1094–1097, Nov. 2007, doi: 10.1126/science.1146351.
- [13] C. Lancea *et al.*, ‘Design and additive manufacturing of brushless electric motor components’, *MATEC Web Conf.*, vol. 343, p. 01007, 2021, doi: 10.1051/mateconf/202134301007.
- [14] S. Sakunthala, R. Kiranmayi, and P. N. Mandadi, ‘A study on industrial motor drives: Comparison and applications of PMSM and BLDC motor drives’, in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, Chennai: IEEE, Aug. 2017, pp. 537–540. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390224.
- [15] K. Aiso and K. Akatsu, ‘Performance Comparison of High-Speed Motors for Electric Vehicle’, *World Electric Vehicle Journal*, vol. 13, no. 4, p. 57, 2022, doi: 10.3390/wevj13040057.
- [16] T. Hamrayev, A. Kahwa, and Y. Fujimoto, ‘Design and test of 3K planetary gear for electric vehicle’, *JAMDSM*, vol. 17, no. 6, pp. JAMDSM0079–JAMDSM0079, 2023, doi: 10.1299/jamdsm.2023jamdsm0079.
- [17] ‘2020-battery-day-presentation-deck.pdf’. Accessed: Feb. 26, 2024. [Online]. Available: <https://digitalassets.tesla.com/tesla-contents/image/upload/IR/2020-battery-day-presentation-deck>
- [18] ‘Model 3 Owner’s Manual’, Tesla. Accessed: Feb. 26, 2024. [Online]. Available: https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_us/GUID-E414862C-CFA1-4A0B-9548-BE21C32CAA58.html
- [19] ‘Tesla Model 3’, EV Database. Accessed: Mar. 02, 2024. [Online]. Available: <https://ev-database.org/car/1991/Tesla-Model-3>

- [20] 'Tesla Model 3 Long Range Dual Motor', EV Database. Accessed: Mar. 03, 2024. [Online]. Available: <https://ev-database.org/car/1992/Tesla-Model-3-Long-Range-Dual-Motor>
- [21] J. Vepsäläinen, 'Energy Demand Analysis and Powertrain Design of a High-Speed Delivery Robot Using Synthetic Driving Cycles', *Energies*, vol. 15, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15062198.
- [22] 'factsheet-lieferroboter.pdf'. Accessed: Feb. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.post.ch/-/media/post/ueber-uns/medienmitteilungen/2017/factsheet-lieferroboter.pdf?la=en>
- [23] 'Robot delivery leader Starship Technologies raises \$90 million led by Plural and Iconical', Starship Technologies: Autonomous robot delivery. Accessed: Feb. 10, 2024. [Online]. Available: https://www.starship.xyz/press_releases/robot-delivery-leader-starship-technologies-raises-90-million-led-by-plural-and-iconical/
- [24] Y. J. Hou, Y. Cao, H. Zeng, T. Hei, G. X. Liu, and H. M. Tian, 'High efficiency wireless charging system design for mobile robots', *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, vol. 188, no. 1, Oct. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/188/1/012032.
- [25] W.-S. Lee, J.-H. Kim, S.-Y. Cho, and I.-O. Lee, 'An Improved Wireless Battery Charging System', *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 4, pp. 791-, 2018, doi: 10.3390/en11040791.