

Tikkanen Tino

SÄHKÖAUTOJEN VAIHTESTORATKAISUT

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Tino Tikkanen: Sähköautojen vaihteistoratkaisut
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, konetekniikan opintosuunta
Huhtikuu 2023

Tämä opinnäytetyö on kirjallisuuskatsaus markkinoilla olevissa sähköautoissa käytettyihin vaihteistoratkaisuihin ja sähköautojen vaihteistoja käsittelevään tutkimukseen. Pyrkimyksenä on ymmärtää, millaisia vaihteistoratkaisuja tulevaisuuden sähköautoissa voidaan olettaa käytettävän.

Työssä tehdään lyhyt markkinatilanteen selvitys sekä esitellään henkilöautoissa perinteisesti käytettyjä vaihteistomalleja ja niiden peruseräitä. Näiden lisäksi esitellään muutamia kirjallisuudessa ehdotettuja, erityisesti sähköautoihin soveltuviksi arvioituja vaihteistomalleja. Esitettyjen ratkaisujen soveltuvuutta sähköautokäyttöön arvioidaan ja soveltuvaksi arvioituja ratkaisuja vertaillaan keskenään löydetyn tutkimustiedon perusteella. Tarkoituksena on löytää kokonaisuuden kannalta sähköautokäyttöön parhaat ratkaisut.

Tuloksena todetaan, että valtaosassa nykyään tuotannossa olevista sähköautomalleista vääntö välitetään moottorilta pyörille kiinteävälityksisen alennusvaihteen kautta. Markkinoilla on kuitenkin joitakin yksittäisiä vaihteistolla varustettuja kalliimman pään sähköautomalleja. Toisaalta kirjallisuuslähteet ovat melko yksimielisiä siitä, että vaihteistoa hyödyntämällä sähköautojen toimintamatkaa voitaisiin pidentää ja suorituskykyä parantaa. Kaksoiskytkinvaihteisto todetaan jo toimivaksi havaituista ratkaisuista lupaavimmaksi, mutta myös joistakin uudentyyppisistä vaihteistoratkaisuista löydetään lupaavia tutkimustuloksia.

Syyksi vaihteistojen vähäiselle suosiolle sähköautomarkkinoilla arvioidaan muun muassa ajoneuvoluokan ja siihen liittyvän tekniikan tuoreutta, tavoiteltua toimintavarmuutta, sähköautojen jo valmiiksi korkeaa omamassaa sekä valmistus- ja suunnittelukustannuksia. Toisaalta valmistuskustannuksia todetaan voitavan kompensoida esimerkiksi akustoa pienentämällä, sillä parantunut energiatehokkuus mahdollistaa riittävän toimintamatkan saavuttamisen pienemmällä akkukapasiteetilla.

Johtopäätöksenä todetaan muun muassa, että kun tekniikka lähitulevaisuudessa vakiintuu ja kehittyä, voidaan markkinoille odottaa ilmestyvän lisää vaihteistolla varustettuja sähköautoja.

Avainsanat: sähköauto, voimansiirto, vaihteisto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	1
2 KATSAUS MARKKINATILANTEESEEN	2
3 ERILAISET VAIHTEISTORATKAISUT	3
3.1 Kiinteä välityssuhde	3
3.2 Manuaalivaihteisto	4
3.3 Automaattivaihteisto momentinmuuntimella.....	6
3.4 Variaattori	7
3.5 Puoliautomaattivaihteisto	9
3.6 Kaksoiskytkinvaihteisto	9
3.6.1 2-vaihteinen kaksoiskytkinvaihteisto.....	10
3.6.2 Nelivaihteinen vaihteisto kahdella moottorilla	11
3.7 Muut vaihteistoratkaisut	12
4 VAIHTEISTORATKAISUJEN VERTAILU SÄHKÖAUTOKONTEKSTISSA	13
4.1 Soveltuvimpien ratkaisujen valinta	13
4.2 Soveltuvimpien ratkaisujen vertailu	14
5 YHTEENVETO	17
LÄHTEET	19

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Esimerkkejä manuaalivaihteiston rakenteesta. Vasemmalla yksivaiheinen ja oikealla kaksivaiheinen vaihteisto. (perustuu lähteeseen Naunheimer & al. 2010 s. 166–168)</i>	<i>4</i>
Kuva 2.	<i>Planeettavaihteen rakenne. Vasemmalla havainnekuva ja oikealla kaavio. (perustuu lähteeseen Crolla & al. 2012, s. 259).....</i>	<i>6</i>
Kuva 3.	<i>Havainnekuva CVT:n toimintaperiaatteesta (perustuu lähteeseen Zhang & Mi 2011, s. 94).....</i>	<i>8</i>
Kuva 4.	<i>Havainnekuva kaksoiskytkinvaihteiston toimintaperiaatteesta (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2010, s. 173).</i>	<i>10</i>
Kuva 5.	<i>Neljän vaihteen ja kahden moottorin vaihteistomallin havainnollistus (perustuu lähteeseen Holdstock et al. 2012).....</i>	<i>12</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AMT	engl. Automated Manual Transmission, puoliautomaattivaihteisto
CVT	engl. Continuously Variable Transmission, variaattori
DCT	engl. Dual Clutch Transmission, kaksoiskytkinvaihteisto

1 JOHDANTO

Lisääntynyt tietoisuus ympäristömme tilasta sekä fossiilisten polttoaineiden rajallisuudesta ovat johtaneet tilanteeseen, jossa fossiilisia polttoaineita energianlähteenään käyttäville henkilöautoille yritetään aktiivisesti löytää vaihtoehtoisia ratkaisuja. Autoteollisuuden panos näyttää keskittyneen tässä ensisijaisesti akkukäyttöisten sähköautojen kehittämiseen, ja lähes jokainen merkittävä autovalmistaja onkin viime vuosina joko esitellyt tai kertonut lähiaikoina esittelevänsä sähköenergialla kulkevia automalleja. Muun muassa akkuteknologian kehittyminen on tehnyt sähköautoista monella tavalla tarkasteltuina kilpailukykyisiä vaihtoehtoja perinteisille polttomoottoriautoille.

Vaikka sähköautot valtaavatkin markkinoita tasaisella tahdilla, eivät kaikki autonomistajat ole vielä läheskään valmiita luopumaan polttomoottorista. Kenties suurimpia ongelmia sähköautoissa ovat tyypillisesti polttomoottoriautoja lyhyempi toimintamatka ja pidempi latausaika.

Akkujen kasvattamisen ja kehittämisen ohella toimintamatkiaan voidaan vaikuttaa muun muassa auton ilmanvastusta tai vierintävastusta pienentämällä, tai moottorin ja voimansiirron hyötysuhdetta parantamalla eli häviöitä vähentämällä. Tässä kandidaatintutkielmassa keskitytään siihen, minkälaisia voimansiirto- ja vaihteistoratkaisuja tämänhetkissä markkinoilla olevissa sähköautoissa käytetään, millaista tutkimusta asiasta on tehty ja millaisia teknologioita tulevaisuuden sähköautomalleissa voidaan odottaa esiintyvän.

Tutkielman aluksi käsitellään yleisimpiä sähköautoissa käytettyjä sekä tutkimuksissa usein ehdotettuja vaihteistomalleja ja esitellään niiden perustoiminnallisuus ja ominaispiirteet. Tämän jälkeen vertaillaan eri ratkaisujen soveltuvuutta sähköautoihin sekä niiden keskinäisiä eroja saatavilla olevien tutkimustulosten pohjalta. Tutkielman lopuksi tehdään löydetyn informaation pohjalta johtopäätöksiä sekä arvioidaan, millaisia voimansiirtoratkaisuja lähivuosina esiteltävissä sähköautomalleissa voidaan odottaa esiintyvän.

2 KATSAUS MARKKINATILANTEeseen

2000-luvulla valmistettujen sähköautomallien voimansiirto on lähes poikkeuksetta perustunut moottorin ja pyörien väliseen kiinteään välityssuhteeseen. Vuonna 2021 tuotannossa oli vain kaksi sähköautomallia, jotka hyödynsivät vaihteistoa: samaan alustarakenteeseen perustuneet Volkswagen-konsernin Porsche Taycan sekä Audi E-Tron GT (Nedelea 2021). Porschen mukaan sen Taycan-mallissa etumoottori on yhdistetty etuakseliin kiinteästi, mutta takamoottori välittää voimaa taka-akselille kaksiportaisen vaihteiston kautta. Pienempi välitys on käytössä lähinnä urheilullisemmissa Sport- ja Sport Plus -ajotiloissa, joissa sen noin 15:1 -välityssuhde mahdollistaa autolle nopeamman kiihtyvyyden, kun taas suuremman vaihteen 8:1 -välityssuhde mahdollistaa taloudellisemman moottoritieajon ja urheiluautolle ominaisen huippunopeuden. (Porsche)

Vaihteiston asentamista tuotantosähköautoon on kuitenkin yritetty jo aiemminkin. Esimerkiksi Teslan ensimmäiseen tuotantomalliin, ensimmäisen sukupolven Tesla Roadsteriin, oli varhaisessa tuotantovaiheessa suunniteltu kaksivaihteista vaihdelaatikkoa. Suunnitelmasta kuitenkin peräännyttiin viime hetkillä vaihteistossa ilmenneiden luotettavuusongelmien takia, ja lopulta mallissa päädyttiin käyttämään kiinteävälitteistä voimansiirtoa (Tesla 2008). Autojen toimitusten suuremman viivästymisen välttämiseksi ensimmäiset tuotantomallit varustettiin kuitenkin kaksivaihteisella vaihteistolla, joka oli pysyvästi lukittu suuremmalle vaihteelle. Näihin väliaikaisella vaihteistoratkaisulla toimitettuihin malleihin asennettiin lopullinen voimansiirto jälkikäteen Teslan kustannuksella. (Drori 2007)

3 ERILAISET VAIHTEISTORATKAISUT

Kuten perinteisiin polttomoottoriautoihinkin, myös sähköautoihin on vuosien varrella ehdotettu asennettavan monenlaisia vaihteistoratkaisuja. Toisinaan näillä on tavoiteltu suorituskyvyn parantumista, toisinaan toimintamatkan maksimointia tai jotakin muuta. Osaa ehdotuksista on testattu käytännössä ja jopa viety tuotantoon asti, kun taas osa on jäänyt ehdotuksen tai laskelmien tasolle. Seuraavaksi esitellään joukko polttomoottoriautoissa yleisimmin käytettyjä vaihteistotyyppisiä sekä yleisimpiä kirjallisuudessa erityisesti sähköautokäyttöön ehdotettuja vaihteistoratkaisuja. Kunkin ratkaisun osalta esitellään sen perustoimintaperiaate sekä tyypillisiä vahvuuksia ja heikkouksia yleisellä tasolla.

3.1 Kiinteä välityssuhde

Kiinteä välitys sähkömoottorilta pyörille on tällä hetkellä tuotannossa olevissa sähköautoissa selvästi yleisin voimansiirtoratkaisu. Toisin kuin polttomoottori, sähkömoottori pystyy tuottamaan korkean vääntömomentin hyvin laajalla pyörimisnopeusalueella, eikä tämän vuoksi vaihteiston tai kytkimen asentaminen sähköautoon ole lainkaan välttämätöntä (Ren et al. 2009; Beretta 2010). Tyypillisesti voimansiirtoon kuuluu kuitenkin alennusvaihde, jonka ansiosta pyörille välitettävä vääntömomentti saadaan riittävän suureksi. Lisäksi voimansiirtoon kuuluu usein tasauspyörästä.

Kiinteän välityssuhteen etuja ovat muun muassa keveys, alhaiset suunnittelu- ja tuotantokustannukset sekä yksinkertaisuus, toimintavarmuus ja huoltovapaus (Sorniotti et al. 2011).

Kiinteän välityssuhteen erikoistapauksena voidaan pitää niin sanottuja napamoottoreita, jotka nimensä mukaan sijoitetaan kunkin vetävän pyörän napaan pyörän sisälle. Koska pyörä ja moottori ovat samalla akselilla, on voimansiirto yksinkertaisimmillaan.

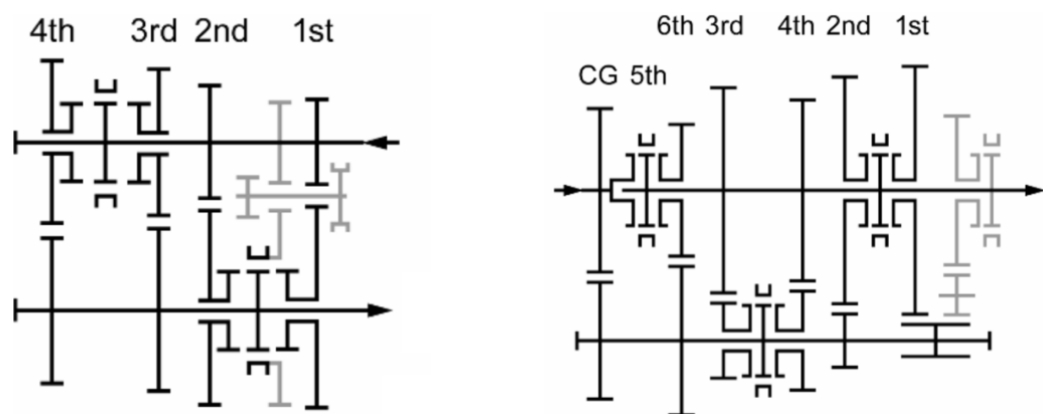
Napamoottori käytännössä minimoi voimansiirtohäviöt ja siten parantaa ajoneuvon hyötysuhdetta. Toisaalta sen yhteydessä ei voida käyttää alennusvaihdetta, joten moottorin on itsessään kyettävä tuottamaan riittävän suuri vääntömomentti esimerkiksi liikkeellelähdön mahdollistamiseksi erilaisissa olosuhteissa. Matala pyörimisnopeus on huomioitava moottorin suunnittelussa muutenkin riittävän hyötysuhteen saavuttamiseksi. (Cai et al. 2022).

Koska moottori on sijoitettu pyörän sisälle, se lisää merkittävästi ajoneuvon jousittamatonta massaa, mikä taas tyypillisesti heikentää ajoneuvon ajo-ominaisuuksia. Suurta jousittamatonta massaa pidetäänkin napamoottorien suurimpana ongelmana. Cain et al. (2022) mukaan vuonna 2022 ei yksikään massatuotannossa olleista sähköautoissa hyödyntänyt napamoottoria. Aiheesta tehdään kuitenkin jatkuvasti tutkimusta ja napamoottoreita saatetaan vielä tulevaisuudessa nähdä sähköautoissa.

3.2 Manuaalivaihteisto

Manuaalivaihteisto on vaihteistomalleista perinteisin, ja sitä on käytetty henkilöautoissa aina siitä asti, kun ensimmäiset polttomoottorilla kulkevat autot kehitettiin. Pitkän historiansa aikana manuaalivaihteistot ovat kehittyneet merkittävästi muun muassa helppokäyttöisyyden ja käyttömukavuuden osalta, mutta peruseriaatteet ovat kuitenkin pysyneet kutakuinkin samoina. (Zhang & Mi 2018, s. 29)

Yksinkertainen malli manuaalivaihteiston toiminnasta on esitetty kuvassa 1 vasemmalla. Esimerkin vaihteisto on yksivaiheinen, eli voima syötetään vaihteistoon yhdeltä akselilta, ja se tulee ulos toiselta. Vääntö siis välittyy kullakin neljästä vaihteesta yhden hammaspyöräparin kautta. Peruutusvaihte on toteutettu kolmen hammaspyörän avulla, jotta ulostuloakselin pyörimissuunta saadaan päinvastaiseksi kuin varsinaisilla vaihteilla. (Naunheimer et al. 2010, s. 165) Peruutusvaihteeseen liittyvät komponentit on merkitty kuvassa harmaalla.



Kuva 1. Esimerkkejä manuaalivaihteiston rakenteesta. Vasemmalla yksivaiheinen ja oikealla kaksivaiheinen vaihteisto. (perustuu lähteeseen Naunheimer & al. 2010 s. 166–168)

Kunkin hammaspyöräparin hammaspyörät ovat jatkuvasti yhteydessä toisiinsa, mutta vain toinen parin hammaspyörästä on yhdistetty akselilleen kiinteästi. Kuljettajan valitessa vaihteen synkronisaattori tasoittaa kyseisen hammaspyöräparin vapaan

hammaspyörän ja sen akselin pyörimisnopeudet yhtä suuriksi, jonka jälkeen ne kytketään mekaanisesti toisiinsa (Crolla et al. 2012, s. 264). Näin vääntö välittyy vaihteiston läpi halutun hammaspyöräparin kautta. Esimerkin vaihteisto on nelivaihteinen, ja siinä on kaksi synkronisaattoria: toinen niistä kytkee vaihteen 1 tai 2 ja toinen vaihteen 3 tai 4.

Kuvassa 1 oikealla taas on esiteltynä kaksivaiheinen manuaalivaihteistomalli. Se eroaa yksivaiheisesta siten, että siinä on kolme akselia ja sisäänmeno- ja ulostuloakselit ovat keskenään peräkkäin. Lähtökohtaisesti kaksivaiheisessa vaihteistossa vääntö välittyy aina kahden hammaspyöräparin kautta. Poikkeuksena tähän on yleensä yksi suora vaihde, jolla synkronisaattori kytkee sisäänmeno- ja ulostuloakselit suoraan toisiinsa. (Zhang & Mi 2018, s. 38). Kuvan kuusivaihteisessa esimerkissä viitosvaihde on suora. Peruutusvaihde toteutetaan kaksivaiheisessa vaihteistossa samaan tapaan kuin yksivaiheisessäkin.

Vaikka esimerkin yksivaihteiseksi vaihteistoksi onkin valittu nelivaihteinen malli, ovat nykyaikana myös yksivaihteiset vaihteistot lähes poikkeuksetta kuusivaihteisia. Yksivaihteisia vaihteistoja käytetään tyypillisimmin etumoottorisissa etuvetoisissa autoissa, joissa vaihteiston yhteyteen on integroitu myös tasauspyörästä. (Naunheimer et al. 2010, s. 167). Tasauspyörästä yhdistyy vaihteiston ulostuloakseliin ja sen toteutus on esimerkiksi selkeyden vuoksi jätetty pois. Taka- ja nelivetoisissa autoissa tasauspyörästä ovat yleensä vaihteistosta erillisiä komponentteja, ja nykyään tällaiset vaihteistot toteutetaan lähes yksinomaan kaksivaihteisina (Naunheimer et al. 2010, s. 168).

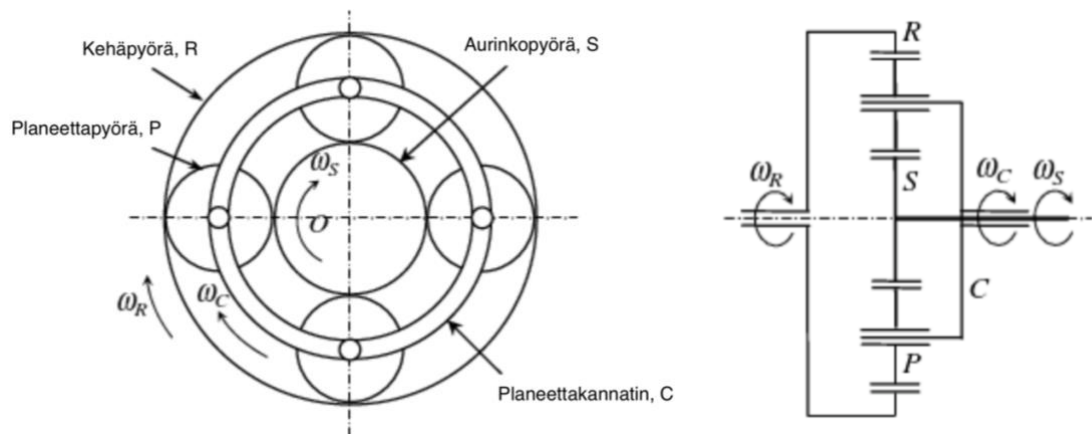
Manuaalivaihteiston ja polttomoottorin välissä käytetään liikkeellelähdön ja sulavan vaihteenvaihdon mahdollistamiseksi kytkintä. Tyypillisimmin kytkin on niin sanottu kuiva kytkin, jonka toiminta perustuu kytkinlevyn luistamiseen vauhtipyörän ja painelevyn välissä. Kun kuljettaja painaa kytkinpoljinta, siihen yhdistetty hydraulisylinteri avaa kytkimen ja katkaisee väännön välityksen vaihteistolle. Kun taas poljin vapautetaan, jousi puristaa kytkinlevyn vauhtipyörän ja painelevyn väliin, jolloin kytkin alkaa luistaa ja lopulta lukittuu. (Crolla et al. 2012, s. 265–266)

Manuaalivaihteiston pitkään jatkunut suosio automaattisten vaihteistoratkaisujen rinnalla johtuu muun muassa sen rakenteellisesta yksinkertaisuudesta, alhaisesta hinnasta ja pienistä vaihteistohäviöistä (Crolla et al. 2012, s. 263). Toisaalta automaattiset vaihteistot tarjoavat kiistatta helpompaa ja huomaamattomampaa vaihtamista, minkä vuoksi manuaalivaihteistot ovat menettäneet markkinaosuutta tasaiseen tahtiin jo vuosien ajan.

3.3 Automaattivaihteisto momentinmuuntimella

Vaikka nykyään henkilöautoista löytyy monenlaisia teknisesti erilaisia automaattisia vaihteistoratkaisuja, termillä automaattivaihteisto viitataan usein erityisesti momentinmuuntimeen ja planeettapyörästäihin perustuviin vaihteistoratkaisuihin. Tämä johtuu siitä, että tällaiset niin sanotut perinteiset automaattivaihteistot, joiden historia ulottuu 1930-luvun lopulle, olivat vuosikymmenien ajan ainoita henkilöautoissa esiintyneitä automaattisia vaihteistoratkaisuja. (Zhang & Mi 2018, s. 137) Niinpä tässäkin työssä termillä automaattivaihteisto viitataan nimenomaan tällaiseen vaihteistoon.

Perinteisen automaattivaihteiston rakenne eroaa merkittävästi manuaalivaihteistosta. Automaattivaihteistossa vääntö välitetään moottorilta vaihteistolle kytkimen sijaan automaattisen hydraulitoimisen momentinmuuntimen kautta. Väliytysuhteen muutokset taas toteutetaan toisiinsa yhdistettyjen niin kutsuttujen planeettapyörästäjien ja niitä ohjaavien automaattisten kytkinten avulla. Toisin kuin nykyisten automaattivaihteistojen, varhaisten mallien ohjausjärjestelmät eivät sisältäneet lainkaan elektronisia komponentteja. (Crolla et al. 2012, s. 314)



Kuva 2. Planeettavaihteen rakenne. Vasemmalla havainnekuva ja oikealla kaavio. (perustuu lähteeseen Crolla & al. 2012, s. 259)

Yksinkertainen esimerkki yksittäisestä planeettavaihteesta on esitetty kuvassa 2. Planeettavaihteeseen koostuu perusperiaatteeltaan hammastetuista aurinkopyörästä, planeettapyörästä ja kehäpyörästä sekä planeettapyöräiden akselit yhdistävästä planeetakannattimesta. Näistä aurinkopyörä, planeetakannatin ja kehäpyörä muodostavat kukin yhden vapausasteen systeemiin. Haluttu väliytysuhde saadaan aikaiseksi valitsemalla yksi pyörivä komponentti ulostuloksi ja yksi sisääntuloksi sekä poistamalla kolmas vapausaste lukitsemalla sitä vastaava komponentti paikalleen. (Crolla et al. 2012, s. 260) Kun esimerkiksi lukitaan planeetakannatin ja käytetään aurinkopyörää sisääntulona ja kehäpyörää ulostulona, saadaan kulmanopeutta

pienentävä välitys. Välityssuhde voidaan laskea, kun tunnetaan hammaspyörien hammasluvut tai halkaisijat.

Vaikka sisääntuloa ja ulostuloa vaihtamalla yhdestä planeettapyörästä voidaan saada lukuisia välityssuhteita, käytännössä yhdellä pyörästä voidaan vaihteistossa toteuttaa vain kolme käyttökelpoista välitystä: kaksi eteen ja yksi taakse (Crolla et al. 2012, s. 260). Tämän vuoksi perinteiset automaattivaihteistot koostuvat tyypillisesti useista yhteen kytkettyistä planeettavaihteista. Välityksen muutokset saadaan aikaan lukitsemalla tietty yhdistelmä eri planeettavaihteiden komponentteja automaattisilla kytkimillä ja jarruilla (Zhang & Mi 2018, s. 140).

Perinteiset automaattivaihteistot yhdistyvät moottoriin momentinmuuntimella, joka mahdollistaa sulavan liikkeellelähdon ja vaihtenvaihdon. Momentinmuunnin on eräänlainen nestekytin, jossa vääntömomentti välitetään nesteen liike-energian avulla sisääntulopuolen pumppupyörältä ulostulopuolen turbiinipyörälle. Momentinmuuntimen erottaa kuitenkin turbiinikytkimestä kolmas pääkomponentti, staattoripyörä, jonka ansiosta momentinmuunnin pystyy tarvittaessa välittämään turbiinipyörälle pumppupyörää suuremman vääntömomentin. (Zhang & Mi 2018, s. 112–113).

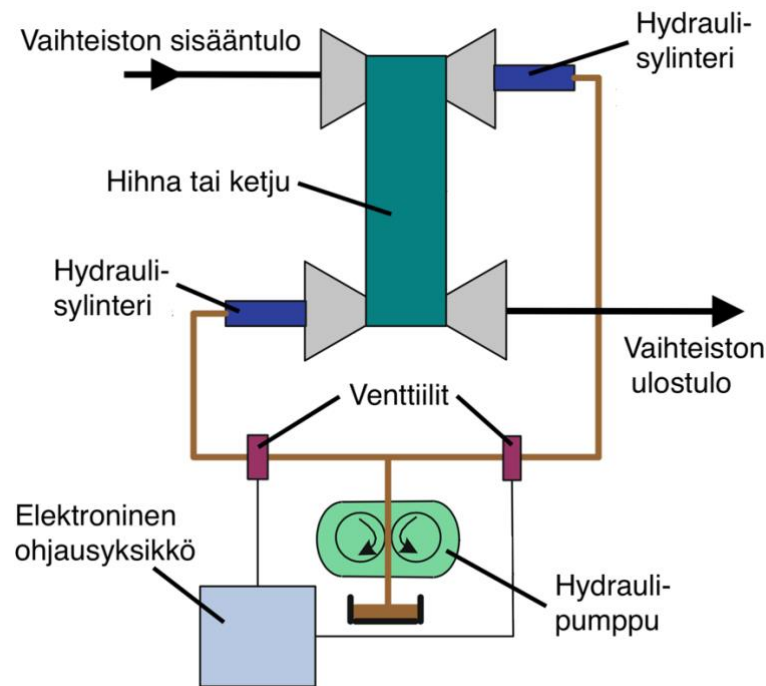
Momentinmuuntokyvyn ansiosta esimerkiksi liikkeelle lähtiessä pyörille voidaan välittää suuri vääntömomentti, vaikka vaihteiston välityssuhde ei olisi merkittävän suuri. Niinpä automaattivaihteistossa tarvittavien erillisten välitysten määrä on usein pienempi kuin esimerkiksi manuaalivaihteistossa. (Naunheimer et al. 2010, s. 176)

Automaattivaihteiston haittapuoliin lukeutuu muun muassa momentinmuuntimen aiheuttama tehohäviö. Momentinmuuntimen ollessa avoinna sen hyötysuhde vaihtelee nollan ja noin 0,9 välillä (Zhang & Mi 2018, s. 127). Tämän tehohäviön vähentämiseksi nykyaikaisiin momentinmuuntimiin on lisätty lukitusmekanismi, joka yhdistää sisään- ja ulostulopuolet mekaanisesti, kun niiden pyörimisnopeus on lähes sama. Lukitus on käytännössä auki vain liikkeellelähdon, ryömityksen tai vaihteidenvaihdon aikana, ja näin momentinmuunnin ei aiheuta tehohäviöitä muina aikoina (Zhang & Mi 2018, s. 127)

3.4 Variaattori

CVT-vaihteisto (engl. Continuously Variable Transmission, variaattori) on vaihteistoratkaisu, joka mahdollistaa välityssuhteen säätämisen portaattomasti vaihteiston mahdollistamien rajojen sisällä. Tyypillisin CVT-ratkaisu koostuu käyttöpuolella ja moottoripuolella kärjet vastakkain olevista kartiopareista, jotka on yhdistetty keskenään leveällä hihnalla tai ketjulla. Välityssuhdetta voidaan muuttaa säätämällä hydraulisylinterien avulla kartioparin kartioiden keskinäistä etäisyyttä: kun

kartioita tuodaan lähemmäs toisiaan, kartioiden ja hihnan välinen kontaktikohta siirtyy kauemmas kartion kärjestä, jossa kehänopeus on suurempi. Näin ollen hihnan nopeus suhteessa kartioiden pyörimisnopeuteen kasvaa. Toista kartioparia lähennettäessä on hihnan kireyden säilyttämiseksi toisen parin kartioita siirrettävä kauemmas toisistaan, mikä osaltaan kaksinkertaistaa välityssuhteen muutoksen. (Zhang & Mi 2011, s. 94) Kuvassa 3 on havainnollistettu kartiopareihin perustuvan CVT:n rakennetta.



Kuva 3. Havainnekuva CVT:n toimintaperiaatteesta (perustuu lähteeseen Zhang & Mi 2011, s. 94).

Koska CVT:n välityssuhteen säätö on portaaton, on sen etuna mahdollisuus ajaa moottoria kussakin tilanteessa tarkalleen sen parhaan hyötysuhteen mahdollistavalla kierrosalueella, riippumatta ajoneuvon kulkunopeudesta. Toisaalta CVT:n yleisenä heikkoutena pidetään esimerkiksi välityksensäätöön tarvittavasta hydraulipumpusta aiheutuvia suuria vaihteistohäviöitä. (Zhang & Mi 2011, s. 94–95) Kitkahäviötä syntyy myös kartioiden ja hihnan välisessä hankauksessa, mikä on ongelmallista myös hihnan kulumisen vuoksi (Crolla et al. 2011).

Huonon hyötysuhteen ohella Zhang ja Mi (2011) kertovat kirjassaan myös käyttäjien vieroksunnan hidastaneen CVT:n yleistymistä: koska CVT mahdollistaa moottorin pyörimisen vaihtelevalla nopeudella riippumatta ajoneuvon nopeudesta, se saattaa kuulostaa perinteiseen vaihteistoon tottuneen käyttäjän mielestä erikoiselta. Lisäksi CVT tarjoaa tasaisen kiihtyvyyden koko kiihdytyksen ajalle, mikä saattaa Zhangin ja Min (2011) mukaan luoda matkustajalle virheellisen vaikutelman hitaammasta kiihdytyksestä

kuin manuaalisella vaihteistolla, jolla hetkellinen kiihtyvyys vaihtelee runsaasti kiihdytyksen aikana.

3.5 Puoliautomaattivaihteisto

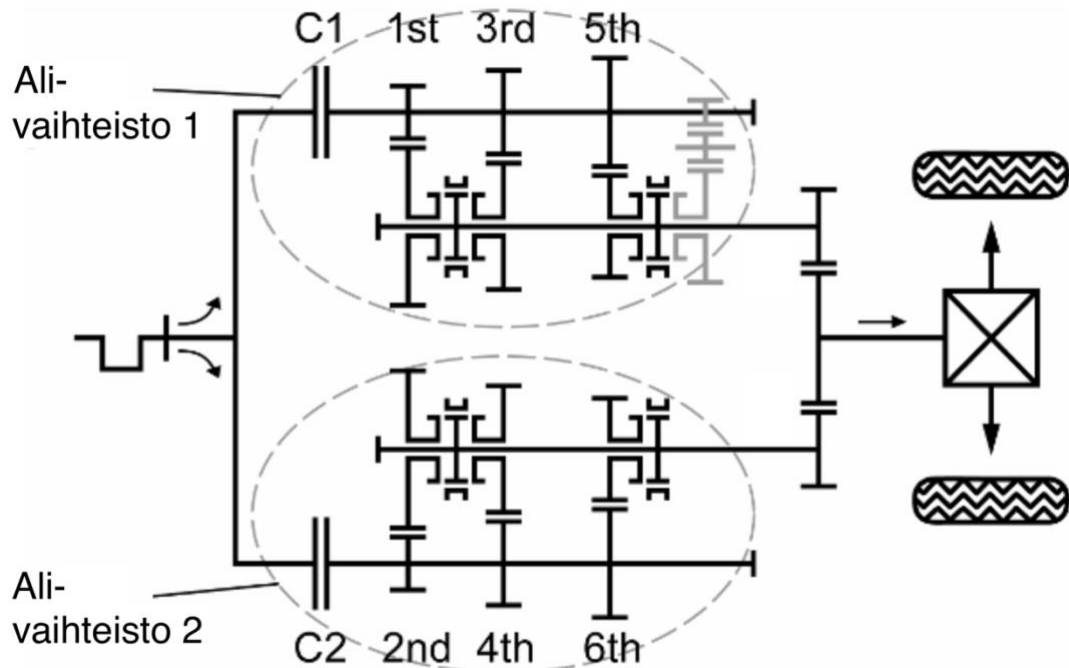
AMT-vaihteisto (engl. Automated Manual Transmission, puoliautomaattivaihteisto tai robottivaihteisto) perustuu englanninkielisen nimensä mukaisesti perinteiseen manuaalivaihteistoon, mutta vaihteistoa kontrolloivat toimilaitteet on automatisoitu. Tämä tarkoittaa käytännössä vaihteidenvaihtoa kontrolloivaa elektronista yksikköä sekä kolmea toimilaitetta: yksi kytkimen käyttöön ja kaksi vaihteiston valitsimien liikuttamiseen (Crolla et al. 2011, s. 318).

Automaattivaihteistoon verrattuna AMT mahdollistaa automaattisen vaihteenvaihdon edut yleensä pienemmillä kustannuksilla, koska automaattiset toimilaitteet voidaan yhdistää jo olemassa olevaan manuaalivaihteistoon. Näin ollen sekä suunnittelu- että tuotantopuolella voidaan säästää merkittävästi resursseja. Lisäksi AMT on usein automaattivaihteistoa kevyempi ratkaisu, mutta saavuttaa manuaalivaihteistoille tyypillisen korkean hyötysuhteen. (Naunheimer et al. 2011, s. 170)

AMT:n suurimpiin haittapuoliin voidaan lukea vaihteenvaihdon yhteydessä aiheutuva suhteellisen pitkä vääntökatkos (Crolla et al. 2011, s. 318), mikä lienee eniten hidastanut AMT:n yleistymistä henkilöautoissa.

3.6 Kaksoiskytkinvaihteisto

DCT-vaihteisto (engl. Dual Clutch Transmission, kaksoiskytkinvaihteisto) on rakenteeltaan manuaalivaihteistoa muistuttava automaattinen vaihteistoratkaisu, joka mahdollistaa väännön katkeamattoman välittämisen koko vaihteenvaihdon ajan. DCT koostuu perinteisesti kahdesta alivaihteistosta, jotka molemmat yhdistyvät moottoriin oman kytkimensä kautta (Naunheimer 2010, s. 173). Toisella alivaihteistolla on parittomat vaihteet 1, 3, 5 ... ja toisella parilliset 2, 4 ..., minkä ansiosta seuraavaksi kytkettävä vaihde voidaan esikytkeä omassa alivaihteistossaan valmiiksi, kun toisen alivaihteiston kautta vielä välitetään vääntöä. Kun vaihteenvaihto alkaa, aletaan molempia kytkimiä luistattaa niin, että väännön välittyminen siirtyy sulavasti tapahtumaan kytkettävänä olevan alivaihteiston puolelta. Lopulta kytkettävä kytkin lukittuu ja toinen vapautuu. (Naunheimer et al. 2010, s. 173; Zhang & Mi 2018, s. 299)



Kuva 4. Havainnekuva kaksoiskytkinvaihteiston toimintaperiaatteesta (perustuu lähteeseen Naunheimer et al. 2010, s. 173).

Kuvassa 4 on havainnollistettu kuusivaihteista kaksoiskytkinvaihteistoa. Alivaihteisto 1 kattaa parittomat vaihteet sekä peruutusvaihteen, kun taas alivaihteisto 2 kattaa parilliset vaihteet. Todellisuudessa alivaihteistot on tilan säästämiseksi yleensä rakennettu sisäkkäin hyödyntäen ontoja akseleita (Zhang & Mi 2018, s. 300).

Ideaalitapauksessa DCT yhdistää manuaalivaihteiston ja perinteisen automaattivaihteiston hyvät puolet, joihin voidaan laskea esimerkiksi katkeamaton väännön välitys, ajamisen helppous ja pienet vaihteistohäviöt. Haasteita DCT:n kehityksessä aiheuttaa esimerkiksi kytkinten toimilaitteiden säätö niin, että vaihteenvaihto tapahtuu saumattomasti ilman nykäyksiä (Naunheimer et al. 2010, s. 172; Zhang & Mi 2018, s. 299). Momentinmuuntokyvyn puutteen vuoksi DCT tarvitsee yleensä suunnilleen yhden välityksen enemmän kuin vastaava perinteinen automaattivaihteisto (Naunheimer et al. 2010, s. 176).

3.6.1 2-vaihteinen kaksoiskytkinvaihteisto

Polttomoottoriin verrattuna sähkömoottori kykenee tuottamaan vääntöä huomattavasti tasaisemmin koko kierrosalueellaan, eikä siksi sähköautojen vaihteistoissa lähtökohtaisesti tarvita yhtä montaa vaihdetta kuin polttomoottorin yhteydessä käytettävissä vaihteistoissa. Esimerkiksi kaksivaihteista kaksoiskytkinvaihteistoa on

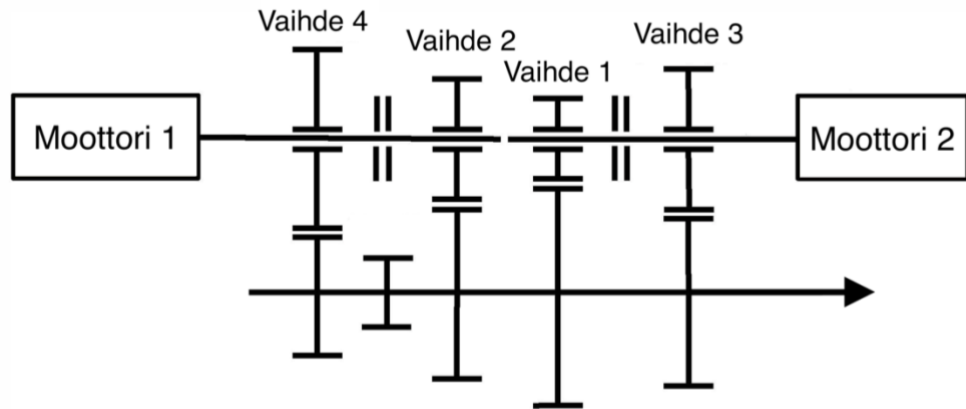
kirjallisuudessa usein ehdotettu sähköautoon soveltuvaksi ratkaisuksi (Sorniotti et al. 2011; Kwon et al. 2021). Sisäkkäisten akselien avulla kaksivaihteinen kaksoiskytkinvaihteisto voidaan rakentaa erittäin kompaktissa muodossa, koska sähkömoottori poistaa myös erillisen peruutusvaihteen tarpeen: peruuttaminen onnistuu moottorin pyörimissuuntaa vaihtamalla.

Sorniotti et al. ehdottavat artikkelissaan (2011) myös ensimmäistä vaihdetta käyttävän kitkakytkimen korvaamista vapaakytkimellä, joka luistaa vapaasti ulostuloakselin pyöriessä nopeammin kuin ulostuloakselilla oleva ensimmäisen vaihteen hammaspyörä. Tällöin pienemmältä vaihteelta suuremmalle vaihdettaessa vain kitkakytkin täytyy kytkeä, jolloin vapaakytkin aukeaa itsestään. Samoin alaspäin vaihdettaessa kitkakytkimen hallittu avaaminen riittää. Lisäksi vapaakytkimeen ehdotetaan lukitusrengasta, jotta myös pienemmällä vaihteella voidaan välittää vääntöä molempiin suuntiin, mikä mahdollistaa moottorijarrutuksen eli liike-energian talteenoton. Lukitusrengas täytyisi siten myös avata ennen vaihtamista suuremmalle vaihteelle.

3.6.2 Nelivaihteinen vaihteisto kahdella moottorilla

Toinen erityisesti sähköautokäyttöön kirjallisuudessa usein ehdotettu ratkaisu on nelivaihteinen kaksi moottoria yhdistävä vaihteisto. Tämä malli esitellään tässä osiossa, sillä se on rakenteellisesti hyvin lähellä nelivaihteista kaksoiskytkinvaihteistoa, vaikkakaan se ei käytä lainkaan kitkakytkimiä.

Kuvassa 5 on esitelty nelivaihteisen vaihteiston toimintaperiaate yksinkertaistettuna. Siitä voidaan havaita vahva yhtäläisyys kaksoiskytkinvaihteistoon, mutta mallissa molempia sisääntuloakseleita pyörittää oma sähkömoottorinsa. Koska sähkömoottorien kierrosluku voidaan säätää tarkasti kulloinkin kytkettävää vaihdetta vastaavaksi, ei luistavia kitkakytkimiä tai synkronisaattoreita tarvita, vaan vaihteet voidaan kytkeä yksinkertaisilla sähkömekaanisilla sakarakytkimillä (Holdstock et al. 2012). Kuvan mallissa toinen sakarakytkin kytkee moottorin 1 vaihteelle 3 tai 4 ja toinen moottorin 2 vaihteelle 1 tai 2.



Kuva 5. Neljän vaihteen ja kahden moottorin vaihteistomallin havainnollistus (perustuu lähteeseen Holdstock et al. 2012).

Edellä kuvattu vaihteistoratkaisu mahdollistaa kahden pienemmän sähkömoottorin käyttämisen yhden suuremman sijaan. Koska moottorit voivat olla kytkettynä samaan aikaan, esimerkiksi vaihteilla 1 ja 2, saadaan niiden tarjoama vääntömomentti yhdistettyä kiihdytystilanteessa. Toisaalta matka-ajossa toinen moottoreista voidaan kytkeä irti ja pysäyttää hyötysuhteen ja toimintamatkan maksimoimiseksi. Kun toisella moottorilla vaihdetaan vaihdetta, toinen moottori voi jatkaa väännön välittämistä, mikä mahdollistaa pehmeät ja huomaamattomat vaihtevaihdot.

3.7 Muut vaihteistoratkaisut

Edellä esiteltyjen vaihteistoratkaisujen lisäksi kirjallisuudessa on ehdotettu myös lukuisia muita ratkaisuja käytettäväksi sähköautoissa. Esimerkkinä tällaisista voidaan mainita ratkaisu, jossa kaksi erikokoista sähkömoottoria yhdistetään planeettavaihteella toisiinsa. Tällaista vaihteistoratkaisua ehdottaneessa tutkimuksessa todettiin ratkaisulla saavutettavan merkittävästi parempi moottorin hyötysuhde ja jarrutusenergian talteenotto kuin kiinteällä välityssuhteella (De Carlo & Mantriota 2020). Myös esimerkiksi kolmivaihteista DCT:tä kahdella moottorilla ja kaksivaihteista DCT:tä kahdella moottorilla on joissain tutkimuksissa ehdotettu sähköautokäyttöön (Xue et al. 2023). Näiden uusien ratkaisujen osalta tarvitaan kuitenkin vielä laajempaa tutkimusta ennen kuin niitä voidaan käytännössä pitää tuotantosähköautoon sovellettavina ratkaisuin.

4 VAIHTEISTORATKAISUJEN VERTAILU SÄHKÖAUTOKONTEKSTISSA

Aiemmassa luvussa esiteltiin henkilöautoissa tyypillisimmin käytettyjä vaihteistoratkaisuja sekä muutamia tutkimuksissa usein esitettyjä erityisesti sähköautoille soveltuvia ratkaisuja. Tässä luvussa valitaan esitetyistä ratkaisuista sähköautokäyttöön lupaavimmat ja keskitytään vertailemaan niiden suorituskykyä sekä energiatehokkuutta saatavilla olevien kirjallisuuslähteiden perusteella.

4.1 Soveltuvimpien ratkaisujen valinta

Manuaalivaihteistoa, jonka suosio on jo vuosien ajan ollut laskussa myös polttomoottoriautojen voimansiirtoratkaisuna, ei voida pitää potentiaalisena ratkaisuna sähköautoon. Koska sähköauton moottori tuottaa vääntöä melko tasaisesti koko kierrosalueellaan, ei vaihteen vaihtaminen yleensä ole välttämätöntä. Lisäksi vaihteen oikea-aikaisella vaihtamisella saavutettavat hyödyt ovat suhteellisen pieniä, esimerkiksi vain muutamien prosenttien energiansäästöjä (Ruan et al. 2016). Siispä ihmiselle olisi ylivoimaisen haastavaa oppia vaihtamaan vaihteita niin, että siitä olisi todellista hyötyä: nykyisten mikroprosessorien laskentateholla ja kehittyneillä algoritmeilla automatisoitu vaihteenvaihto ylittää epäilemättä parempaan optimointiin ja taloudellisuuteen. Lisäksi pelkkä ajatus manuaalivaihteisesta sähköautosta karkottaisi todennäköisesti suuren osan vaihteiston käyttöön tottumattomista kuluttajista.

Toinen manuaalivaihteiston ehdoton ongelmakohta, väännön täydellinen katkeaminen vaihteenvaihdon ajaksi, on epäilemättä myös AMT:n suurimpia ongelmia. Vaihteen vaihdon aikainen vääntökatos sekä pidentää kiihdytykseen tarvittavaa aikaa että heikentää matkustusmukavuutta (Naunheimer et al. 2011, s. 170). Etenkin sähköautojen maailmassa katkeamaton väännön tuotto toteutuu jo nykyhetkellä käytännössä kaikissa malleissa. Siksi kiihdytyksen katkeaminen vaihteen vaihdon ajaksi olisi paitsi epämiellyttävää, myös omiaan pilaamaan vaikutelman ”kätketystä” voimalinjasta, jossa kuljettajan ei ole sen enempää mahdollista kuin tarvettakaan havaita ajaessaan voimalinjan toimintaa. Näiden syiden perusteella myös AMT on syytä sivuuttaa sähköautoon optimaalista vaihteistoratkaisua etsittäessä.

Tarkastelluissa kirjallisuuslähteissä sähköautojen vaihteistoratkaisuiksi on useimmiten esitetty kiinteää välitystä, variaattoria, kaksivaihteista kaksoiskytkinvaihteistoa sekä

nelivaihteista vaihteistoa kahdella moottorilla. Niinpä seuraavaksi keskitytään näiden ratkaisujen tarkempaan vertailuun.

4.2 Soveltuvimpien ratkaisujen vertailu

Vaikka nykyisenkaltaisia sähköautoja on myyty merkittävässä määrin vasta noin vuosikymmenen ajan, on niiden vaihteistoratkaisuja tutkittu ja vertailtu jo pidemmän aikaa. Eräs alan ensimmäisistä perustutkimuksista on ”*Effect of Transmission Design on Electric Vehicle (EV) Performance*” vuodelta 2009. Siinä kirjoittajat Ren et al. vertailevat kiinteällä välityksellä, variaattorilla ja nelivaihteisella vaihteistolla varustettujen sähköautojen energiankulutusta matemaattisen mallin perusteella. Laskelmat tehdään kuudella erilaisella kansallisella standardisyklillä. Tuloksena todetaan nelivaihteisen vaihteiston vähentävän energiankulutusta 4,5–11,0% ja variaattorin 5,3–12,4% kiinteään välitykseen verrattuna.

Huomionarvoista on Renin et al. (2009) tutkimuksessaan käyttämien matemaattisten mallien yksinkertaisuus ja karkeus. Kirjoittajat toteavat artikkelissa itsekkin, että esimerkiksi variaattorin korkeat vaihteistohäviöt, jotka on jätetty huomioimatta laskelmissa, mitätöisivät todellisuudessa paikoin jopa suurimman osan tuloksena saaduista hyödyistä. Huolimatta tutkimuksen heikkouksista ja mallien karkeudesta on tutkimukseen viitattu vuosien aikana kymmenissä myöhemmin ilmestyneissä julkaisuissa, ja sen lupaavat tulokset ovat mahdollisesti innoittaneet tiedeyhteisöä tutkimaan sähköautojen vaihteistovaihtoehtoja tarkemmin.

Aiheesta löytyy myös uudempaa kirjallisuutta. Seuraavaksi esitellään vuosina 2011–2021 julkaistut neljä eri tutkimusta, joissa vertaillaan eri vaihteistoratkaisuja. Näiden tutkimusten perusteella arvioidaan, miten edellä valitut vaihteistoratkaisut vertautuvat toisiinsa. Taulukossa 1 on esitetty, mitä vaihteistoratkaisuja kussakin tutkimuksessa on vertailtu.

Hieman erilaisista lähestymistavoista huolimatta kaikkien neljän tutkimuksen tulokset ovat suhteellisen lähellä toisiaan. Jokaisessa tutkimuksessa todetaan, että vaihteiston lisäämisellä sähköautoon voidaan saavuttaa mitattavia etuja sekä auton suorituskyvyssä että energiatehokkuudessa. Saavutetut edut kussakin mallinnustilanteessa vaihtelivat mitättömän pienistä jopa 41% eroihin asti, riippuen erilaisista testitilanteista ja malleista (Sorniotti et al. 2011; Holdstock et al. 2012; Ruan et al. 2016; Kwon et al. 2021).

Taulukko 1. *Esitellyissä tutkimuksissa vertailut vaihteistoratkaisut*

Tutkimus	Vertailut ratkaisut			
	Kiinteä välitys	DCT 2 vaihdetta, 1 moottori	4 vaihdetta, 2 moottoria	Variaattori
(Kwon et al. 2021)	X	X		
(Ruan et al. 2016)		X		X
(Holdstock et al. 2012)	X	X	X	
(Sorniotti et al. 2011)	X	X		X

Tutkimuksissa todetaan havaittujen erojen selittyvän esimerkiksi sillä, että vaihteiston käyttö mahdollistaa sähkömoottorin pyörimisnopeuden säätämisen kussakin ajotilanteessa lähemmäs sen optimaalista kierrosaluetta (Ruan et al. 2016; Kwon et al. 2021). Lisäksi todetaan, että lyhyestä välityksestä on hyötyä kiihdytystilanteissa ja että pitkällä välityksellä on usein mahdollista saavuttaa korkeampi huippunopeus ja parempi taloudellisuus esimerkiksi moottoriteajossa.

Myös erilaisten vaihteistotyyppien välisissä vertailutuloksissa on havaittavissa yhtenäisyyttä. Variaattori oli yksi vertailtavista ratkaisuista Sorniotin et al. (2011) ja Ruanin et al. (2016) tutkimuksissa. Ensimmäisessä verrattiin variaattoria kaksivaihteiseen DCT-vaihteistoon ja jälkimmäisessä pelkkään kaksivaihteiseen DCT:hen. Molemmat tutkimusryhmät totesivat variaattorin olevan vertailukohtana olleita vaihteistotyyppisiä heikompi ratkaisu, mikä on hyvin linjassa jo Renin et al. (2009) tekemän loppuolettaman kanssa. Kummankin tutkimusryhmän ajamien simulaatioiden ja tekemien testien perusteella variaattori mahdollisti sähkömoottorin ajamisen korkeammalla hyötysuhteella. Ruanin et al. (2016) mukaan variaattoriin yhdistetyn moottorin hyötysuhde oli eri testisykleillä 1,0–4,5 prosenttiyksikköä korkeampi kuin kaksivaihteisen DCT:n ja 4,9–12,0 prosenttiyksikköä korkeampi kuin kiinteän alennusvaihteen kanssa toimivan moottorin. Variaattorin suurten vaihteistohäviöiden todettiin kuitenkin molemmissa tutkimuksissa hävittävän moottorin hyötysuhteessa saadut parannukset. Tulosten perusteella variaattori ei siis ole sähköautoon optimaalinen vaihteistoratkaisu.

Kaksivaihteinen DCT on esiteltyjen tutkimusten perusteella todettu lupaavaksi sähköauton vaihteistoratkaisuksi. Holdstock et al. (2012) ovat ottaneet tekemäänsä vertailuun kuitenkin mukaan myös nelivaihteisen ja kahteen moottoriin perustuvan ratkaisun. Heidän tutkimuksessaan todetaan nelivaihteisella ratkaisulla saavutettavan vielä selvästi kaksivaihteista DCT:tä alhaisempi energiankulutus. Kahdeksalla eri testiskenaariolla simuloituna nelivaihteista vaihteistoa käyttäneen ajoneuvon energiankulutus oli 0,5–23,8% pienempi kuin kaksivaihteisella DCT:llä varustetun ja jopa 3,8–40,5% pienempi kuin kiinteällä välityssuhteella varustetun sähköauton (Holdstock et al. 2012). Tuloksena saadut erot ovat huomiota herättävän suuria. Tutkijat selittävät pienempää energiankulutusta muun muassa nelivaihteisen järjestelmän merkittävästi paremmalla jarrutusenergian talteenotolla. Huippunopeuden ja kiihtyvyyden osalta kaksivaihteinen ja nelivaihteinen ratkaisu ylsivät keskenään suunnilleen samaan, huomattavasti kiinteävälitteistä ratkaisua parempaan suorituskyykyyn.

Yksittäisen tutkimuksen perusteella on vaikea arvioida nelivaihteisen kaksimoottorisen vaihteiston todellisia hyötyjä, mutta tutkimuksen perusteella sillä voidaan todeta olevan potentiaalia mahdollisena tulevaisuuden sähköautojen vaihteistoratkaisuna.

Vaihteiden optimaalista määrää on tutkinut myös Fang tutkimusryhmineen vuonna 2017. Ryhmä vertaili ajoneuvosimulaatioiden avulla kaksi-, kolme- ja nelivaihteisen vaihteiston vaikutusta sähköauton voimansiirron hyötysuhteeseen ja suorituskyykyyn. Tutkimuksessa ei niinkään keskitytty vaihteistotyyppien ominaisuuksiin, vaan yksinkertaisesti sopivaan välitysten määrään. On tulkittavissa, että käytetyt vaihteistomallit voisivat olla tyypiltään esimerkiksi DCT:itä. Tuloksena Fang et al. (2017) toteavat, että vaihteiden määrän kasvattaminen kahta suuremmaksi parantaa yleensä ajoneuvon taloudellisuutta ja suorituskyykyä, mutta suurempien valmistuskustannusten takia kaksivaihteinen vaihteisto on tavallisia reittejä ajettaessa kuitenkin yleensä kokonaisuutena järkevin ja edullisin ratkaisu.

5 YHTEENVETO

Käytännössä kaikki tarkastellut kirjallisuuslähteet ovat yksimielisiä siitä, ettei kiinteävälityksinen voimansiirto ole sähköautoon optimaalinen ratkaisu suorituskyvyn tai energiankulutuksen kannalta. Energiankulutuksella taas on merkittävä vaikutus eräänlaisena sähköautojen sudenkuoppana pidettyyn toimintamatkaan. Kuitenkin nykyhetken markkinatilanteessa erilaiset kirjallisuudessa kehitetyt vaihteistoratkaisut edustavat minimaalista vähemmistöä. Voidaan siis havaita lievää ristiriitaa kirjallisuuden ja markkinatilanteen välillä.

Sähköautot ovat teknisesti vielä suhteellisen tuore ajoneuvoluokka, ja ne sisältävät paljon teknisiä ratkaisuja, joiden käytöstä ei vielä ole vuosikymmenten kokemusta. Saattaa siis olla, että liikaa monimutkaisuutta on niissä pyritty vähentämään ja vikaantumisalttiit komponentit minimoimaan. Sähköautojen yhtenä myyntivalttina on pidetty nimenomaan toimintavarmuutta ja huoltovapautta: esimerkiksi sähkömoottori vaatii merkittävästi vähemmän säännöllistä huoltoa kuin polttomoottori. Myös kiinteävälityksinen alennusvaihte on huoltovapaampi ja toimintavarmempi ratkaisu kuin monimutkainen vaihteisto lukuisine mekaanisine ja elektronisine toimilaitteineen.

Toinen vaihteistojen ongelma on niiden tuoma lisämassa. Sähköautot painavat suurten akustojen vuoksi muutenkin usein jopa yli 2000 kg, mikä aiheuttaa jo haasteita alustarakenteen suunnittelussa. Esimerkiksi painavan auton voimansiirto- ja pyöränripustus on mitoitettava suuremmille kuormille, ja hyvien ajo-ominaisuuksien saavuttaminen vaatii enemmän suunnittelutyötä ja testausta.

Ajoneuvoa suunniteltaessa on luonnollisesti myös kustannuksilla painoarvoa. Suunnittelun ja valmistuksen kustannukset vaikuttavat lähtökohtaisesti ajoneuvon myyntihintaan, mutta ajoneuvon taloudellisuuteen vaikuttavat ratkaisut heijastuvat kuluttajalle myös auton käyttökustannusten muutoksina. Ruan et al. toteavat tutkimuksessaan (2016), että vaihteistolla varustettu sähköauto tulee elinkaarikustannuksiltaan merkittävästi edullisemmaksi kuin kiinteävälityksinen verrokki. Tutkijaryhmän mukaan kaksivaihteisen DCT:n valmistamisesta syntyvät kustannukset voidaan jopa kokonaan kompensoida varustamalla auto pienempikapasiteetisellä akulla: vaihteiston tuoman paremman taloudellisuuden ansiosta toimintamatka pysyisi kuitenkin samana. Lisäksi vaihteiston mahdollistama parempi energiatehokkuus näkyy kuluttajalle myös pienempinä latauskustannuksina.

Ei voida myöskään sivuuttaa sitä tosiasiaa, ettei autoteollisuuden tutkimus ole kovinkaan avointa. Autoteollisuudella on maailmanlaajuisesti miljardiluokan markkina-arvo, ja yritykset tekevät merkittävän määrän omaa tutkimustaan, jota luonnollisesti ei haluta julkaista kilpailijoiden käyttöön. Voidaan siis pohtia myös, ovatko autovalmistajat mahdollisesti päätyneet omissa tutkimuksissaan erilaisiin ratkaisuihin kuin avoimesti saatavilla oleva tutkimus.

Tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan odottaa, että jo lähitulevaisuudessa julkaistavissa sähköautomalleissa tulee esiintymään aiempaa enemmän erilaisia vaihteistoratkaisuja. Yleistyminen alkaa todennäköisimmin korkeamman hintaluokan autoista, jotka jo muutenkin sisältävät kehittyneempää ja hienostuneempaa tekniikkaa. Volkswagen-konsernin kaksivaihteiset urheiluautomallit Porsche Taycan ja Audi e-Tron GT voidaankin nähdä eräänlaisina pioneereina vaihteiston hyödyntämisessä.

Todennäköisimmin sähköautoihin liitettävät vaihteistot perustuisivat kaksoiskytkimen ja mahdollisesti myös useamman moottorin käyttöön. Vaihteistojen toteutuksessa voidaan odottaa tavoiteltavan täysin automaattisesta ja mahdollisimman huomaamatonta toimintaa. Kirjallisuuden perusteella optimaalinen vaihteiden lukumäärä sijoittuisi luultavasti kahden ja neljän välille.

LÄHTEET

Beretta, J. (2010). *Automotive Electricity: Electric Drives*. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavilla: <https://doi.org/10.1002/9781118557549>

Cai, S., Kirtley, J. L., & Lee, C. H. T. (2022). Critical Review of Direct-Drive Electrical Machine Systems for Electric and Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(4), 2657–2668. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/TEC.2022.3197351>

Crolla, D., Mashadi, B. & Mashhadi, B. (2012). *Vehicle Powertrain Systems: Integration and Optimization*. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavilla: <https://doi.org/10.1002/9781119958376>

De Carlo, M., & Mantriota, G. (2020). Electric vehicles with two motors combined via planetary gear train. *Mechanism and Machine Theory*, 148, 103789. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103789>

Drori, Z. (2007). *A Letter to Customers from Ze'ev Drori*. Tesla. Saatavilla: <https://www.tesla.com/blog/letter-customers-zeev-drori> Viitattu 28.2.2023.

Fang, Y., Ruan, J., Walker, P., & Zhang, N. (2017). Comparison of effect on motor among 2-, 3- and 4-speed transmission in electric vehicle. *2017 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 455–459. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/ICMECH.2017.7921150>

Holdstock, T., Sorniotti, A., Everitt, M., Fracchia, M., Bologna, S., & Bertolotto, S. (2012). Energy consumption analysis of a novel four-speed dual motor drivetrain for electric vehicles. *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 295–300. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2012.6422721>

Kwon, K., Jo, J., & Min, S. (2021). Multi-objective gear ratio and shifting pattern optimization of multi-speed transmissions for electric vehicles considering variable transmission efficiency. *Energy*, 236, 121419. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121419>

- Naunheimer, H., Bertsche, B., Novak, W., & Ryborz, J. (2011). *Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application* (1. Aufl.). Springer-Verlag. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16214-5>
- Nedelea, A. (2021). *Company Argues Its Two-Speed EV Gearbox Is Better Than A Single-Speed*. InsideEVs. Saatavilla: <https://insideevs.com/news/511495/two-speed-ev-gearbox-inmotive/> Viitattu 23.2.2023
- Ren, Q., Crolla, D. A., & Morris, A. (2009). Effect of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1260–1265. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289707>
- Ruan, J., Walker, P., & Zhang, N. (2016). A comparative study energy consumption and costs of battery electric vehicle transmissions. *Applied Energy*, 165, 119–134. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.081>
- Sorniotti, A., Subramanyan, S., Turner, A., Cavallino, C., Viotto, F., & Bertolotto, S. (2011). Selection of the Optimal Gearbox Layout for an Electric Vehicle. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 1267–1280. Saatavilla: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0946>
- Porsche. *Porsche Taycan – Powertrain*. Saatavilla: <https://media.porsche.com/mediakit/taycan/en/porsche-taycan/der-antrieb> Viitattu 23.2.2023.
- Tesla Finland (2008). *Tesla Motors Selects BorgWarner for Production of New Gearbox for Tesla Roadster*. Saatavilla: https://www.tesla.com/fi_fi/blog/tesla-motors-selects-borgwarner-production-new-gearbox-tesla-roadster Viitattu 28.2.2023.
- Xue, Q., Zhang, X., Teng, T., & Yue, M. (2023). Dynamic coordinated control strategy of power on gear shifting for novel dual motor electric vehicle. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102941. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102941>
- Zhang, X., & Mi, C. (2011). Vehicle Power Management: Basic Concepts. In X. Zhang & C. Mi (Eds.), *Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization* (pp. 13–48). Springer. Saatavilla: https://doi.org/10.1007/978-0-85729-736-5_2
- Zhang, Y., & Mi, C. (2018). *Automotive Power Transmission Systems*. John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavilla: <https://doi.org/10.1002/9781118964897>