



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖPYÖRÄN MEKATRONIIKKA

Arttu Pesola

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö

Elokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Sähköpyörän mekatroniikka

Arttu Pesola

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 31 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia sähköpyörän mekatroniikan eri osa-alueita ja niiden vaikutusta pyörän toimintaan ja suorituskykyyn. Työssä keskityttiin erityisesti mekaniikan, elektroniikan ja tietotekniikan yhdistämiseen saumattomaksi kokonaisuudeksi, joka mahdollistaa sähköpyörien tehokkaan ja älykkään toiminnan.

Kandidaatintyö suoritettiin kattavalla kirjallisuuskatsauksella, joissa analysoitiin sähköpyörien moottoreita, akkuja, voimansiirtoa ja antureita. Kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltiin sähköpyörien historiallista kehitystä ja nykytilaa, sekä alan ajankohtaisia innovaatioita ja haasteita.

Tulokset osoittivat, että sähköpyörän mekatroniikka on ratkaiseva tekijä pyörän suorituskyvyssä ja käytettävyydessä. Erilaiset moottorit ja akut tarjoavat erilaisia etuja ja haittoja, ja optimaalinen valinta riippuu pyörän käyttötarkoituksesta ja ajo-olosuhteista. Lisäksi voimansiirto ja anturit vaikuttavat merkittävästi pyörän ajettavuuteen, joten niiden suunnittelussa ja toteutuksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Asiasanat: sähköpolkupyörä, mekatroniikka, sähkömoottori, akku

ABSTRACT

Electric Bicycle Mechatronics

Arttu Pesola

University of Oulu, Degree Program of Mechanical Engineering

Bachelor's Thesis 2023, 31 pages

Supervisor(s) at the university: Yrjö Louhisalmi

The aim of this Bachelor's thesis was to investigate various aspects of electric bicycle mechatronics and their impact on the performance and functionality of the bicycle. The focus of the study was on seamlessly integrating mechanics, electronics, and information technology to enable efficient and intelligent operation of electric bicycles.

The research was conducted through an extensive literature review, which involved analyzing electric bicycle motors, batteries, power transmission, and sensors. The literature review also examined the historical development and current state of electric bicycles, along with the latest innovations and challenges in the field.

The results demonstrated that electric bicycle mechatronics plays a crucial role in determining the performance and usability of the bicycle. Different types of motors and batteries offer various advantages and disadvantages, and the optimal choice depends on the specific purpose and riding conditions of the bicycle. Furthermore, power transmission and sensors significantly influence the rideability of the bicycle, emphasizing the need for careful design and implementation.

Keywords: electric bicycle, mechatronics, electric motor, battery

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	7
2 Mekatronikka	8
3 Sähköpolkupyörä	9
3.1 Sähköpolkupyörän historia.....	10
3.2 Moottorit	11
3.2.1 Napamoottori	17
3.2.2 Keskiömoottori	18
3.3 Voimansiirto.....	19
3.4 Akut.....	20
3.4.1 Lyijyakut.....	23
3.4.2 Nikkelikadmiumakut (NiCd).....	24
3.4.3 Nikkelimetallihydridiakut (NiMH).....	24
3.4.4 Litiumioniakut (Li-ion).....	24
3.4.5 Akunhallintajärjestelmä.....	25
3.5 Anturit	26
3.5.1 Poljinanturit	26
3.5.2 Nopeusanturi.....	27
4 Yhteenveto	28

LÄHDELUETTELO

1 JOHDANTO

Sähköpyörät ovat yleistyneet viime vuosina merkittävästi ja niistä on tullut suosittu liikkumisväline niin kaupungeissa kuin maaseudullakin. Sähköpyörä on perinteinen polkupyörä, jossa on moottori ja akku, jotka mahdollistavat avustetun liikkumisen. Sähköpyörän mekatroniikka yhdistää mekaanisia, elektronisia ja tietoteknisiä järjestelmiä, jotka tekevät sähköpyörästä innovatiivisen ja monipuolisen kulkuneuvon.

Sähköpyörän historia juontaa juurensa 1800-luvulle, jolloin sähköpyörän prototyyppi kehitettiin. Sähköpyörän suosio kasvoi 1900-luvun lopulla, mutta se jäi perinteisen polkupyörän varjoon, kunnes viime vuosikymmeninä niiden suosio on kasvanut uudelleen. Nykyään sähköpyörän tekniset ominaisuudet ovat edistyneet huomattavasti ja markkinoilla on erilaisia sähköpyörän malleja, jotka sopivat erilaisiin käyttötarkoituksiin.

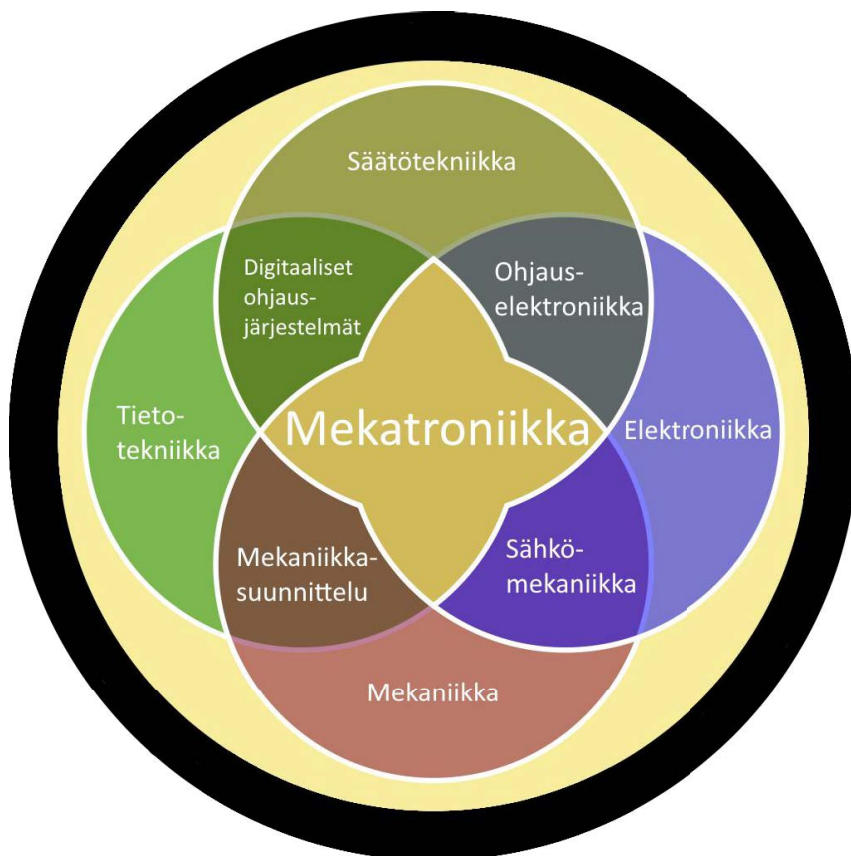
Sähköpyörän mekatroniikkaan kuuluvat erilaiset tekniset tiedot, kuten moottorin tehokkuus, akun kestoikä, latausnopeus ja jarrujärjestelmä. Sähköpyörien moottorit voivat olla navassa, keskiössä tai takapyörässä, ja niiden tehokkuus voi vaihdella eri valmistajien välillä. Akun kestoikä riippuu akun kapasiteetista ja sen käyttötavasta, ja latausnopeus vaihtelee latauslaitteen ja akun kapasiteetin mukaan.

Erilaisia sähköpyörän vaihtoehtoja ovat muun muassa kaupunkipyörät, maastopyörät, hybridipyörät ja taittopyörät. Jokaisella sähköpyörän tyypillä on omat tekniset ominaisuutensa ja ne soveltuvat eri käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi kaupunkipyörät ovat suunniteltu kaupunkiliikenteeseen, kun taas maastopyörät sopivat maastoajoon.

Sähköpyörän mekatroniikka on kehittynyt huimasti viime vuosina ja sähköpyörien suosio kasvaa edelleen. Sähköpyörä on ympäristöystävällinen ja edullinen liikkumisvaihtoehto, sekä se sopii kaikenikäisille ja -kuntoisille liikkujille.

2 MEKATRONIIKKA

Mekatroniikka on jokseenkin uusi monitieteinen tekniikan ala, joka keskittyy mekaanisten, elektronisten ja sähkötekniisten järjestelmien yhdistämiseen. Mekatroniikka on siis tietokoneohjattujen sähkömekaanisten järjestelmien suunnittelua. Mekatroniikassa mekaaniset järjestelmät toimivat synergiassa tietokoneohjauksen, elektroniikan ja säätöjärjestelmien kanssa muodostaen toimivan järjestelmän (Kuva 1). CD- tai DVD-soitin, tietokoneen kiintolevyasema ja lukkiutumattomat jarrut (ABS) ovat joitakin esimerkkejä mekatronisista järjestelmistä. Jokainen näistä tuotteista on luonteeltaan pääosin mekaaninen, mutta ne eivät voisi toimia ilman niihin yhdistettyjä sähkö- ja tietokoneohjausjärjestelmiä. (University of Waterloo 2022)



Kuva 1. Mekatroniikkadiagrammi (mukaillen Wikimedia Commons 2022, vapaa materiaalipankki).

3 SÄHKÖPOLKUPYÖRÄ

Polkupyörä on ihmisen keksimä liikenneväline, joka on kehitetty noin 200 vuotta sitten. Se koostuu rungosta, jossa on kaksi pyörää, ja se liikkuu eteenpäin ihmisen polkiessa polkimilla. Polkupyörä on erittäin monipuolinen liikenneväline, jota voidaan käyttää monilla eri tavoilla. On olemassa erilaisia polkupyörämalleja, kuten esimerkiksi maastopyörät, maantiepyörät, kaupunkipyörät, sähköpyörät ja taitopyörät. Näitä eri malleja käytetään erilaisiin tarkoituksiin ja tilanteisiin. Polkupyörää voidaan käyttää sekä liikuntaan että liikkumiseen paikasta toiseen. Se on ekologinen ja terveellinen vaihtoehto autolle tai julkiselle liikenteelle. Polkupyörällä ajaminen kehittää kestävyyttä ja lihaksia, ja se voi olla myös hauska harrastus. (Tilastokeskus 2023)

Suomessa laki edellyttää, että polkupyörässä tulee olla soittokello äänimerkinantolaitteena. Lisäksi polkupyörässä on oltava etuvalo ja etu-, sivu- ja takaheijastimet. Mikäli polkupyörällä liikutaan pimeän tai hämärän aikana tai näkyvyysolosuhteet ovat huonot sään tai muun syyn takia, eteenpäin valkoista tai valkeankeltaista valoa näyttävä ajovalo on pakollinen tieliikennelain 36 §:n 2. momentin mukaisesti. Lisäksi pyörän huolto ja kunnossapito ovat tärkeitä, jotta pyörä pysyy turvallisena ja toimivana. (Ajoneuvolaki 15.1.2021/82, 28§)

Sähköpolkupyörä tai lyhemmin sähköpyörä on sähkömoottorilla varustettu polkupyörä, jossa moottori toimii vain poljettaessa ja jossa moottori kytkeytyy pois käytöstä, kun suurin nopeus saavutetaan. Sähkömoottorien tehot vaihtelevat tavallisesti 250 W:n (watti) ja 1000 W:n välillä, mutta Suomessa suurin teho liikennevakuuttamattomalle sähköavusteiselle ajoneuvolle on 250 W. (Ajoneuvolaki 15.1.2021/82, 28§)

Sähköpyöriä ovat myös sellaiset moottorilla varustetut L1e-A luokan polkupyörät, joiden suurin nopeus on 25 km/h ja moottorin teho enintään 1000 W ja L1e-B luokan nopeat sähköpyörät, joiden suurin nopeus on 45 km/h ja moottorin teho enintään 4000 W. (Larunpyörä, 2022)

3.1 Sähköpolkupyörän historia

Sähköpolkupyörien varhainen historia on hieman epäselvä, mutta dokumenttien mukaan ensimmäiset sähköpolkupyörät ovat olleet olemassa jo 1890-luvulla. Ohiossa 19. syyskuuta 1895, Ogden Bolton Jr. jätti patenttihakemuksen akkukäyttöisestä polkupyörästä, jossa oli takapyörään asennettu tasavirtanapamoottori. Vaihteita ei ollut ja moottori saattoi ottaa jopa 100 ampeeria virtaa 10 voltin akusta. (Bolton 1895)

Kaksi vuotta myöhemmin 8. marraskuuta 1897 Bostonissa Hosea W. Libbey jätti toisen patenttihakemuksen sähköpyörästä, jota pyöritti kaksoissähkömoottori. Moottori oli suunniteltu poljinkeskiön navan sisään. (Libbey 1897)

Vuonna 1898 Mathew J. Steffens patentoi takavetoisen sähköpyörän, joka käytti vetohihnaa takapyörän ulkoreunaa pitkin. (Steffens 1898)

Vääntömomenttianturit ja tehonsäätimet kehitettiin 1990-luvun lopulla. Esimerkiksi japanilainen Takada Yutky haki patentin vuonna 1997 sellaiselle pyörälle, jossa sähkömoottoriin oli liitetty takaisinkytkentäsilmuksia. Vuonna 1992 Vector Services Limited tarjosi ja myi Zike-nimistä sähköpyörää (Kuva 2), jossa vääntömomenttianturit toimivat takaisinkytkentäsilmuksissa tehonsäätimien kanssa. Zike-sähköpyörä näytti jo siltä, mitä olisi voinut odottaa nykyaikaiselta sähköpyörältä (We Love Cycling 2016). Polkupyörässä oli nikkelikadmiumakut, jotka oli rakennettu runko-osaan, ja 0,85 kg kestopagneettimoottori. Zike-sähköpyörästä huolimatta vuonna 1992 kaupallisia sähköpyöriä ei ollut juurikaan saatavilla. (Zikebike 2009)



Kuva 2. Sinclair Zike (Wikimedia Commons 2016, vapaa materiaalipankki).

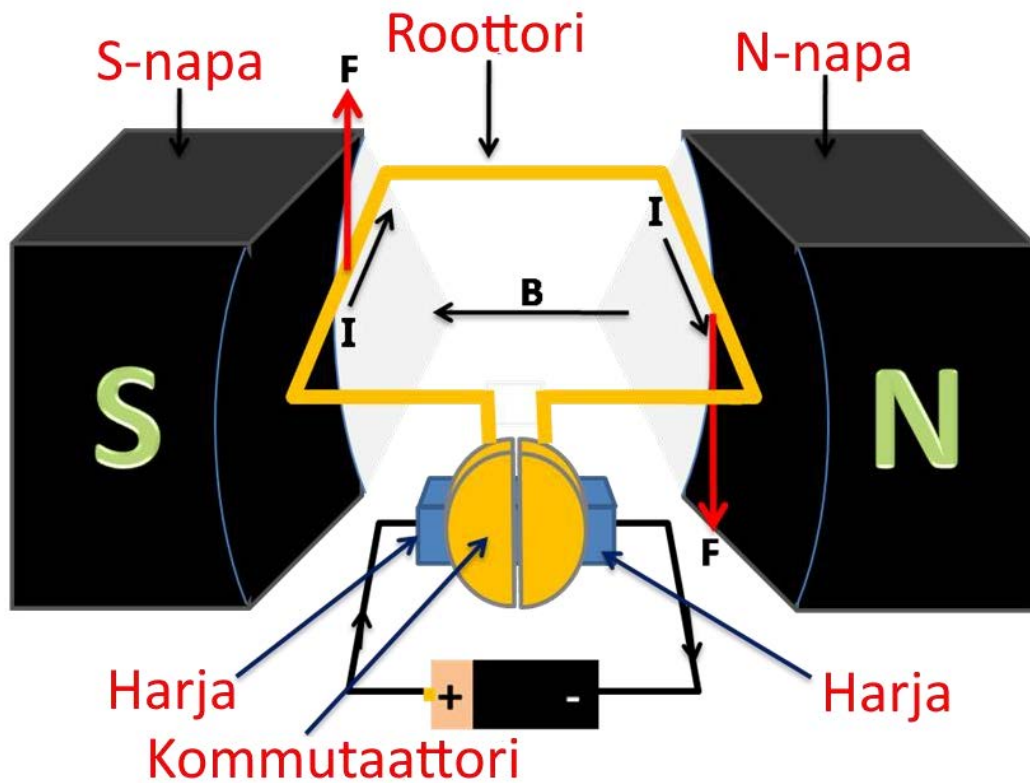
Kun 90-luvulta siirryttiin vuoteen 2000, akut alkoivat pienentyä ja niistä saatiin enemmän tehoa. Suuret ja raskaat lyijyakut korvattiin nikkelikadmium- tai litiumioniakuilla, ennen kuin nikkelimetallihydridiakuilla saavutettiin kompromissi pitkän käyttöiän ja painon välillä. Nykyaikaiset akut ovat vakiintuneet litiummalliin, mutta tekniikan voi odottaa kehittyvän edelleen. (We Love Cycling 2016)

3.2 Moottorit

Tasavirtamoottori (DC-moottori) on sähkökone, joka muuntaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Tasavirtamoottorit käyttävät nimensä mukaan tasavirtaa, jossa sähkövirran suunta ei muutu. Tasavirta muunnetaan roottorin mekaaniseksi pyörimisliikkeeksi magneettikenttien avulla, jotka syntyvät sähkövirran avulla staattisissa käämeissä. DC-moottorit koostuvat kahdesta avainkomponentista, staattorista ja roottorista. Staattori on moottorin paikallaan oleva osa, kun taas roottori pyörii. Moottorin tuottama vääntö ja pyörimisnopeus riippuvat sähköisestä syötteestä ja moottorin suunnittelusta. (Radionics 2023)

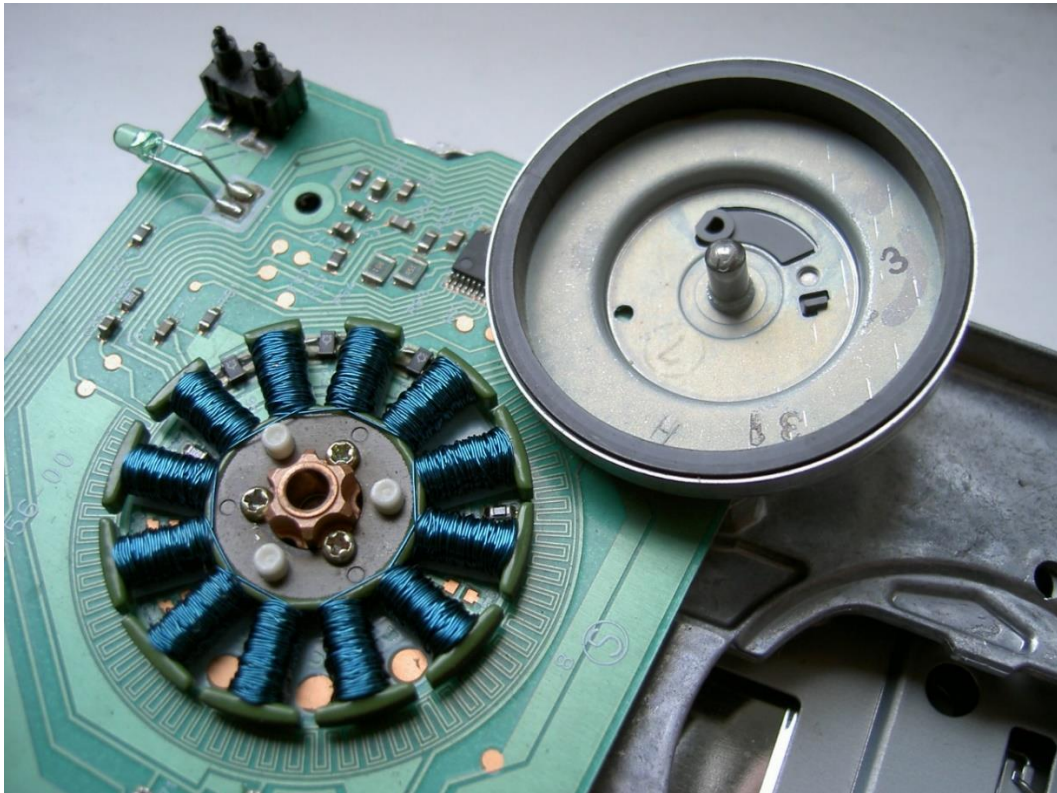
On olemassa kahden tyyppisiä yleisesti käytettyä tasavirtamoottoreita, hiiliharjalliset moottorit ja harjattomat moottorit (tai BLDC-moottorit). Niiden nimet antavat ymmärtää, että hiiliharjallisissa tasavirtamoottoreissa on hiilet, joita käytetään moottorin kommutointiin sen saamiseksi pyörimään. Kommutointi tarkoittaa tasavirtamoottorin toimintaa, jossa vaihdetaan virran suuntaa moottorin käämeissä. Kommutointi on välttämätöntä, jotta moottori voi pyöriä jatkuvasti samaan suuntaan. Harjattomat moottorit korvaavat mekaanisen kommutointitoiminnon elektronisella ohjauksella. Useissa sovelluksissa voidaan käyttää joko hiiliharja- tai harjattomia tasavirtamoottoreita. Molemmat toimivat yksinkertaistetusti siten, että käämien ja pysyvien magneettien välillä tapahtuu vetovoimaa ja hylkimistä. (Millet 2021)

Kuvassa 3 on esitetty sähkömoottorin toimintaperiaate. Kuvan alaosan paristosta tuleva sähkövirta muodostaa roottoriin magneettikentän. Roottorin ollessa magneettikentässä kuvan laidoilla olevien kestopagneettien välissä, roottorikäämi pyörittää vetovoiman ja hylkimisen seurauksena. Roottorikäämin päässä olevan kommutaattorin pyörittäessä sähkövirran suunta vaihtuu käämissä, joka kääntää myös siinä olevan magneettikentän mahdollistaen pyörimisliikkeen jatkumisen. Kommutaattoriin on painettuna vähäkitkaiset grafiittiharjat, jotka ovat harjallisen sähkömoottorin kuluvat osat. (Millet 2021)



Kuva 3. Sähkömoottorin toimintaperiaate (mukaiillen Wikimedia Commons 2020, vapaa materiaalipankki).

Harjattomat tasavirtamoottorit, tai BLDC-moottorit, toimivat samalla periaatteella magneettisen vetovoiman ja hylkimisen avulla kuin hiiliharjalliset moottorit, mutta niiden rakenne on hieman erilainen. Mekaanisen kommutaattorin ja hiiliharjojen sijaan, staattorin magneettikenttää käännetään elektronisen kommutaation avulla. Tämä vaatii aktiivisen ohjauselektronikan käyttöä. Harjattoman moottorin roottorissa on kestmagneetit kiinnitettynä ja staattorissa on käämit. Harjattoman moottorin käämityksessä käytettyjen käämien määrää kutsutaan vaiheiden määräksi. Vaikka BLDC-moottoreita voidaan rakentaa eri vaihemäärillä, kolmivaiheiset harjattomat moottorit ovat yleisimpiä. Kuvassa 4 on esillä levykeaseman harjaton moottori, jossa vasemmassa laidassa näkyy staattorin paikallaan olevat käämit ja oikeassa laidassa pyörivä roottori, jonka ulkokehällä sijaitsee kestmagneetti. Harjattomia moottoreita on kahta erityyppiä, sellaisia, joissa roottori on staattorin ulkopuolella ja sellaisia, joissa roottori on staattorin sisäpuolella. (Millet 2021)



Kuva 4. Harjaton moottori levykeasemassa (Wikimedia Commons 2007, vapaa materiaalipankki).

Taulukossa 1 on esitetty yksinkertaistetusti moottorien eroja. Kun vertaillaan harjallisen ja harjattoman moottorin käyttöikä, harjattomalla moottorilla se on pidempi, koska siinä ei ole harjoja tai kommutaattoria, jotka kuluisivat mekaanisen hankauksen vaikutuksesta. Harjallisten moottorien huoltovälissä on otettava huomioon harjojen ja kommutaattorin kuluma, koska moottori ei enää toimi, kun ne ovat kuluneet liikaa. Harjojen ja kommutaattorin kontaktin välttämättömyys myös rajoittaa harjallisen sähkömoottorin pyörimisnopeutta, koska korkeilla pyörimisnopeuksilla kontakti saattaa muuttua epävakaaksi. Harjattomat moottorit saavuttavat yleisesti korkeamman nopeuden ja vääntömomentin, sekä tuottavat vähemmän melua, kuin perinteiset harjalliset moottorit. Ne toimivat myös tehokkaammin, koska niissä on vähän tai ei lainkaan tehohäviötä. (Millet 2021)

Taulukko 1. Harjattomien ja harjallisten moottorien vertailu (mukaillen Millet 2021).

	Harjallinen moottori	Harjaton moottori
Käyttöikä	Lyhyt (harjat kuluvat)	Pitkä (ei kuluvia harjoja)
Nopeus ja kiihtyvyys	Keskitaso	Korkea
Hyötysuhde	Keskitaso	Korkea
Sähköinen melu	Meluisa (Harjoissa tapahtuva kipinöinti)	Hiljainen
Akustinen melu ja vääntömomentin aaltoilu	Heikko	Kohtalainen tai hyvä
Hinta	Halvin	Keskitaso

Harjattoman moottorin kokonaiskustannukset ovat korkeammat kuin harjallisella moottorilla, koska harjattomat moottorit vaativat kehittyneempää elektroniikkaa. Harjattoman moottorin valmistaminen on yksinkertaisempaa, koska siinä ei ole harjoja eikä kommutaattoria, mutta harjallisen moottoritekniikan tuntemus on erittäin hyvä ja valmistuskustannukset ovat alhaiset. Tämä kuitenkin muuttuu, kun harjattomat moottorit yleistyvät, erityisesti suurten volyymien sovelluksissa, kuten autoteollisuudessa. Lisäksi elektroniikan kustannusten, kuten mikro-ohjainten, jatkuvan laskun takia harjattomat moottorit tulevat yhä houkuttelevammiksi. (Millet 2021)

Nykypäivän sähköpyörissä käytetään harjattomia moottoreita ja niitä on kolmea erilaista varianttia, keskiömoottorit, suoravetoiset napamoottorit ja vaihteelliset napamoottorit. Keskiömoottorit sijaitsevat pyörän rungon keskellä, missä normaalisti olisi poljinkeksiö (Kuva 4). Napamoottoreita on kahdentyyppisiä, suoravetoisia ja vaihteistolla varustettuja. Napamoottoreita käytävissä sähköpyörissä moottori on joko eturenkaan (Kuva 5) tai takarenkaan (Kuva 6) navassa. Markkinoilla on myös jälkiasennussarjoja, jotka mahdollistavat perinteisen pyörän varustamisen joko keski- tai napamoottorilla. Jälkiasennussarjojen joukossa on kitkamoottoreita, jotka käyttävät pyörivää kiekkoa, joka koskettaa takarengasta luodakseen voimansiirron. (Roe 2022)



Kuva 5. Keskiömoottori polkupyörän poljinkeksiössä (Wikimedia Commons 2015, vapaa materiaalipankki).



Kuva 6. Napamoottori polkupyörän eturenkaan navassa (Wikimedia Commons 2012, vapaa materiaalipankki).



Kuva 7. Napamoottori polkupyörän takarenkaan navassa (Wikimedia Commons 2019, vapaa materiaalipankki).

3.2.1 Napamoottori

Napamoottorin sähkömagneettikentät tuotetaan moottorin paikallaan oleviin käämeihin. Moottorin ulkopuolinen osa seuraa, tai yrittää seurata, näitä kenttiä, pyörittäen liitettyä pyörää. Harjallisessa moottorissa energia siirtyy harjojen kautta moottorin pyörivään akseliin. Harjattomassa moottorissa energia siirtyy elektronisesti, poistaen fyysisen kosketuksen staattisten ja liikkuvien osien väliltä. Vaikka harjaton moottoritekniikka on kalliimpaa, useimmat harjattomat moottorijärjestelmät ovat tehokkaampia ja kestävämpiä kuin harjalliset moottorit. (Roe 2022)

Suoravetoisissa napamoottoreissa ei ole vaihteistoa, vaan niissä moottorin tuottama voima siirtyy suoraan renkaan pyörittämiseen ilman vaihteistoa. Moottori pyörii vain akselinsa ympäri, joka on kiinnitetty polkupyörän rungon takahaarukkaan. Vaihteistolla

varustetut napamoottorit käyttävät useita planeettavaihteita alentaakseen moottorin kierroslukua ja lisätäkseen sen vääntövoimaa. (Roe 2022)

Suoravetoiset napamoottorit ovat yksinkertaisimpia sähköpyörän moottoreita. Moottorin akseli on sama, kuin takapyörän akseli. Koska akseli on paikallaan, moottori (eli napa) pyörii akselin ympärillä työntäen polkupyörää eteenpäin. Suoravetoiset moottorit ovat yleensä suurempia halkaisijaltaan kuin vaihteistolla varustetut napamoottorit. Tämä johtuu siitä, että suuremmat navat saavuttavat suuremman vipuvaikutuksen ja suuremman vääntömomentin, jota tarvitaan riittävän tehon tuottamiseen matalilla kierroksilla. Suoravetoiset napamoottorit voivat myös tuottaa sähköenergiaa jarrutuksen aikana regeneratiivisessa jarrutuksessa. Regeneratiivinen jarrutus hidastaa polkupyörää ja syöttää ylimääräisen energian takaisin akulle. (Roe 2022)

Vaihteistolla varustetut napamoottorit toimivat kuten suoravetoiset napamoottorit, paitsi että navan sisällä on sähkömoottori, joka pyörii huomattavasti suuremmalla nopeudella. Moottorin akseli liittyy planeettavaihteiden sarjaan, jotka liittyvät napaan ja pyörittävät sitä matalammalla pyörimisnopeudella. Tämä menetelmä tuottaa enemmän vääntöä, mutta vähemmän huippunopeutta. (Roe 2022)

Vaihteistomoottorit ovat yleensä halkaisijaltaan pienempiä kuin suoravetomoottorit, koska niille ei tarvita yhtä suurta moottoria väännön tuottamiseksi, mutta planeettavaihteet tekevät navoista leveämpiä. Moottorit sisältävät myös vapautuslaakerin, minkä takia niissä ei ole mahdollisuutta regeneratiiviselle jarrutukselle, mutta ne rullaavat vapaasti pienellä vierimisvastuksella, kun pyöräilijä ei polje, ts. veto on kytketty pois, mikä tekee vaihteistomoottorilla varustetuista sähköpyöristä ajamiseltaan enemmän perinteisten polkupyörien kaltaisia. (Roe 2022)

3.2.2 Keskiömoottori

Keskiömoottori on eräänlainen sähköinen apumoottori, joka sijaitsee sähköpyörän poljinkampien välissä. Keskiömoottori tukee polkemisen voimakkuutta pyörän ketjuvälityksessä sen sijaan, että se lisäisi ylimääräisen voimanlähteen. Tämä eroaa napamoottoreista, jotka on rakennettu vanteeseen ja jotka antavat käyttövoiman suoraan

renkaalle. Koska sähköteho siirretään ketjun ja rataspakan kautta, teho on yleensä rajoitettu, jotta välitysjärjestelmä ei kuluisi liian nopeasti. (Roe 2022)

Yleisesti ottaen keskiömoottorit ovat tehokkaampia ylämäkeen ajettaessa ja nopean ajon aikana, koska ketjun ja rataspakan kautta välitettävä teho käyttää hyväkseen olemassa olevia takavaihteita. Napamoottoreissa, jotka eivät käytä pyörän vaihteistoa, teho on yleensä rajoitettu tietyille nopeusalueelle. (Roe 2022)

3.3 Voimansiirto

Voimansiirto viittaa järjestelmään, joka koostuu yleensä useista pienemmistä osista, jotka toimivat yhdessä, sekä tarjoavat tarvittavan voiman ja väännön polkupyörän pyörien pyörittämiseen. Useimmissa tavallisissa polkupyörissä voimansiirto muodostuu kampisarjasta, ketjusta ja jonkinlaisesta vaihteistosta, joka on lähes aina kiinnitetty takapyörään. Polkupyörissä voi olla joko yksivaihteinen tai monivaihteinen voimansiirto, jotka auttavat muuttamaan kampien pyörittämiseen tarvittavan voiman liikkeelle eteneväksi voimaksi. Sähköpyörien tavoitteena on tarjota tehokasta, kätevää ja helposti saavutettavaa liikkumista ja siksi sähköpyörissä keskitytään erityisesti monivaihteisiin voimansiirtoihin, jotka ovat tärkeässä roolissa auttaessaan pyöräilijöitä selviytymään mäistä ja muista haastavista ajo-olosuhteista. (Evelo 2020)

Hihnavetoinen sähköpyörä on yleistynyt vaihtoehto kaupunkiliikkumiseen. Se tarjoaa useita etuja perinteiseen ketjuvetoiseen sähköpyörään verrattuna, kuten vähäisempi huoltotarve, parempi tehokkuus ja hiljaisempi toiminta. Hihnavetopyörät vaativat vähemmän huoltoa, eivätkä altistu lialle yhtä helposti kuin ketjuvaihteiset. Tehokkaampi voimansiirto tuo enemmän tehoa pyörälle erityisesti mäkisessä maastossa tai pitkillä matkoilla. Hiljaisempi toiminta sopii erityisesti kaupunkialueilla käytettäville pyörille. Kuitenkaan hihnaveto ei sovi kaikenlaisiin polkupyöriin ja se voi olla kalliimpi kuin ketjuvetoiset vaihtoehdot. Siksi hihnavetoisen sähköpyörän valinnassa on otettava huomioon omat tarpeet ja mieltymykset. (Sähköpyöräkeskus 2023)

Valtaosa sähköpyöristä on varustettu perinteisillä avoratasvaihteilla, mutta napavaihteet ovat yleistynyt vaihtoehto. Molemmat vaihtoehdot ovat olleet käytössä jo useiden

vuosikymmenten ajan, joten niiden teknologia on hyvin kehittyntä. Avoratasvaihteita käytetään yleensä ketjuvedon kanssa. Ne ovat kevyitä sekä helposti huollettavissa, mutta avoin ratkaisu on kuitenkin altis lialle ja fyysisille vaurioille. Tehohäviö on pienempi avoratasvaihteistossa, kuin napavaihteistossa, sekä napavaihteistossa on yleensä vähemmän vaihteita. Hihnavetoisessa polkupyörässä napavaihteisto on kuitenkin ainoa vaihtoehto. Napavaihteisto mahdollistaa paikallaan vaihteen vaihtamisen, sekä se on melko huoltovapaa. Napavaihteisto on toteutettu planeettavaihteistona tai portaattomana automaattivaihteistona moderneissa sähköpyörissä. (Peace 2022)

3.4 Akut

Akut ovat luultavasti kaikkein tärkein osa sähköpyörää. Sähköpyörien akut voivat erota toisistaan useilla tavoilla. Tärkeimmät erot ovat akun kapasiteetti, jännite, paino, koko, muoto ja kestoikä. (Cunningham 2023)

Akun kapasiteetti ilmoitetaan yleensä ampeeritunteina (Ah) ja se kertoo, kuinka paljon sähkövirtaa akku voi tarjota. Suurempi kapasiteetti tarkoittaa yleensä pidempää ajomatkaa yhdellä latauksella. Jännite, joka ilmoitetaan voltteina (V), on myös tärkeä tietää, kun akkuja vertaillaan, sillä ampeeritunnit eivät ole vertailukelpoisia, jos jännitettä ei oteta huomioon. Akkuja vertaillessa wattitunnit (Wh) kertovat paljonko energiaa akku voi varastoida. Tyypillinen akun energiamäärä vaihtelee 300 ja 1000 wattitunnin välillä. Akun energia wattitunteina saadaan, kun kapasiteetti kerrotaan akun jännitteellä. Jännite kertoo, kuinka paljon sähköpotentiaalia akussa on. Suurempi jännite tarkoittaa yleensä enemmän tehoa ja nopeampaa kiihtyvyyttä. Sähköpyörän akkuja on saatavilla 36, 48 ja 52 voltisina. Mitä suurempia edellä mainitut tunnusluvut (Ah, V ja Wh) ovat, sitä suurempia ovat yleensä myös akun paino ja koko. Akun kestoikä riippuu monista tekijöistä, kuten käytön intensiteetistä, lataustavasta ja käyttölämpötilasta. (Cunningham 2023)

Sähköpyörän akku kiinnitetään yleensä joko runkoon tai tavaratelineeseen. Runkoon kiinnitetyt akut ovat yleisimpiä ja ne kiinnitetään yleensä alaputken tai satulaputken pintaan. Moderneissa sähköpyörissä akun kiinnityspiste voi olla myös integroituna runkoon tai jopa kokonaan kiinteästi rungossa. Nämä mahdollistavat akun sijoittamisen

mahdollisimman alhaiseen paikkaan, jolloin painopiste pysyy alhaalla ja pyörän ajettavuus on parempi. (Cunningham 2023)

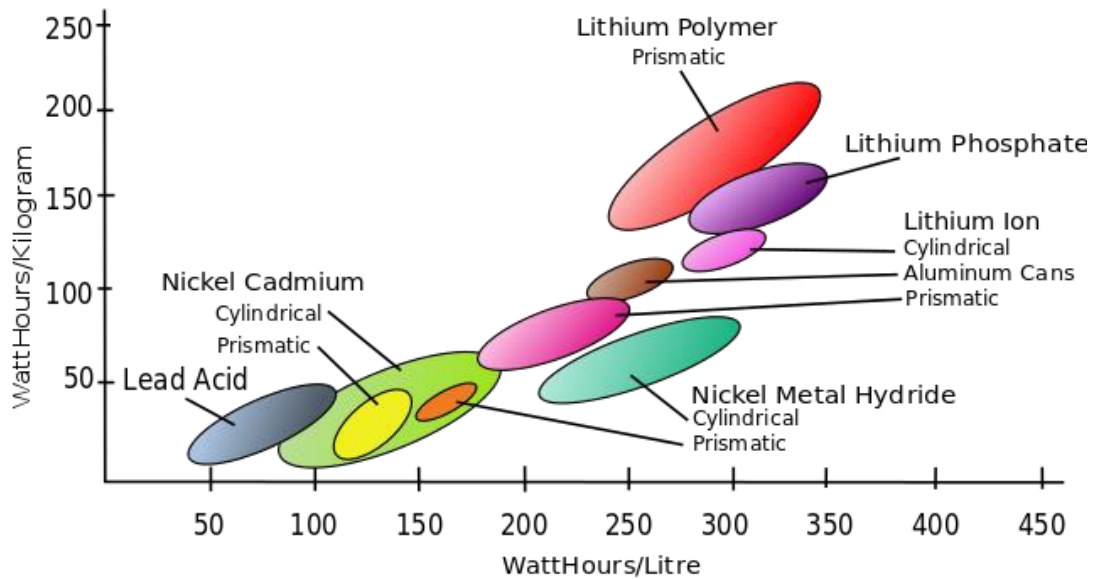
Tavaratelineeseen kiinnitetyt akut ovat toinen yleinen vaihtoehto. Näissä akut kiinnitetään yleensä tavaratelineen yläosaan tai sivulle. Tämä vaihtoehto on kätevä, sillä se mahdollistaa akun irrottamisen helposti, mutta se saattaa nostaa painopistettä ylemmäs ja vaikuttaa pyörän ajettavuuteen. (Cunningham 2023)

Alla olevassa kuvassa (Kuva 7) on AEG SportDrive-keskiömoottori ja akku, molemmat runkoon integroituna. Moottorin teho on 250 W ja akku on jännitteeltään 48 V ja kapasiteetiltaan 12,8 Ah, joista saadaan akun energian määräksi 614,4 Wh. Akku on kooltaan keskiluokkaa ja painaa 3,25 kg. (Sähköpyöräkeskus 2023)



Kuva 8. AEG SportDrive-keskiömoottori ja runkoon integroitu akun kiinnitys (Wikimedia Commons 2022, vapaa materiaalipankki).

Sähköpyörissä käytettyjä akkutyyppejä ovat olleet lyijy-, nikkelikadmium-, nikkelimetallihydridi- ja litiumioniakku. Alla olevassa energiatiheysdiagrammissa (Kuva 9) on esitetty erilaisten markkinoilla olevien akkujen akkukapasiteettia kilogrammaa kohti (Wh/kg) suhteessa akkukapasiteettiin tilavuutta kohti (Wh/l). Jos lyijyakulla haluttaisiin kulkea 32 km matka, se painaisi noin 15 kg, kun taas litiumioniakun massa olisi noin 3 kiloa. (Epic Cycles 2023)



Kuva 9. Energiatiheys (Wikimedia Commons 2006, vapaa materiaalipankki).

3.4.1 Lyijyakut

Lyijyakut ovat tunnettuja erittäin halvasta hinnastaan. Lyijyakut tarjoavat vähemmän tehoa ja ovat hyvin raskaita verrattuna muihin nykypäivän akkuhin. Niillä on vähemmän kapasiteettia verrattuna muihin saman painoluokan ja koon akkutyyppeihin. (Epic Cycles 2023)

Lyijyakkuja käytetään pääasiassa kolmella eri tavalla. Niitä käytetään varavirtalähteinä liikkumattomissa käyttökohteissa, syvän syklin sovelluksissa, kuten golfkärriissä ja saksinostimissa, sekä moottorin käynnistämiseen autoissa. Niitä voidaan käyttää myös sähköpyörissä, mutta niiden paino ja teho eivät kuitenkaan tee niiden käytöstä suositeltavaa. (Epic Cycles 2023)

Lyijyakut ovat kaikista sähköpyörän akkutyypeistä kaikkein raskaampia. Ne ovat kolme kertaa raskaampia kuin litiumioniakut ja kaksi kertaa raskaampia kuin nikkeliakut. Lisäksi lyijyakut tarjoavat vähemmän akkukapasiteettia kuin nikkeliakut tai litiumioniakut. Lyijyakun maksimikapasiteetti on noin puolet litiumioni- ja nikkeliakkujen kapasiteetista. (Epic Cycles 2023)

3.4.2 Nikkelikadmiumakut (NiCd)

Nikkelikadmiumakun virranantokyky on suuri ja asianmukaisella ylläpidolla ne kestävät hyvin pitkään. Niillä on myös enemmän akkukapasiteettia verrattuna lyijyakkuihin, mutta huomattavasti vähemmän kuin litiumioniakuilla. Lisäksi nikkelikadmiumakut tarjoavat erinomaisen kuormituskyvyn. Akku pystyy hetkellisesti antamaan suurempia virtapulsseja, koska sen sisäinen resistanssi on alhainen. Tämän vuoksi ne ovat hyviä laajalti virtaa vaativissa käyttökohteissa, kuten sähköpyörän kiihdytyksessä. (Epic Cycles 2023)

Nikkelikadmiumakuilla on kuitenkin joitain haittoja, kuten itsepurkausaste, joka on erittäin suuri, jopa 70 % täydestä varauksesta ilman käyttöä 24 tunnin kuluttua. Niiden tehotiheys myös on alhainen, eikä niitä siksi käytetä paljoa sähköpyörissä. Lisäksi nikkelikadmiumakut ovat kalliita ja niiden pääkomponentti, kadmium, on vaarallinen saastuttaja. Nikkelikadmiumakut ovat poistumassa markkinoilta ympäristöturvallisuuden ja kierrätysongelmien vuoksi. (Epic Cycles 2023)

3.4.3 Nikkelimetallihydridiakut (NiMH)

Nikkelimetallihydridiakut ovat parempia kuin lyijyakut ja nikkelikadmiumakut. Nikkelimetallihydridiakut voivat säilyttää jopa 45 % enemmän varausta kuin nikkelikadmiumakut. Niiden kestävyys ei kuitenkaan ole ideaali käytettäväksi sähköpyörissä, sekä niiden ylläpitäminen ja lataaminen voi olla monimutkaista. (Epic Cycles 2023)

Nikkelimetallihydridiakut tuottavat nopeasti lämpöä, vaikka niitä käytettäisiin vähän. Tämä aiheuttaa korkean itsepurkautumisnopeuden. Vaikka purkautumisnopeus ei ole yhtä korkea kuin nikkelikadmiumakuilla, niitä ei suositella käytettäväksi sähköpyörissä. Verrattuna nikkelikadmiumakkuihin, nikkelimetallihydridiakut tarjoavat vain vähän parannusta toimintasäteessä, mutta ovat kalliimpia. (Epic Cycles 2023)

3.4.4 Litiumioniakut (Li-ion)

Litiumioniakut ovat automaattisesti tulleet vakioakuksi jokaisen markkinoilla olevan sähköpyörän varusteena. Niitä käyttää noin 90 % sähköpyöristä markkinoilla.

Litiumioniakut tuottavat enemmän tehoa painoonsa nähden ja ovat kestävämpi ratkaisu muihin akkutyyppeihin verrattuna. (Epic Cycles 2023)

Litiumioniakut ovat pieniä ja vaativat toimiakseen muita elektronisia komponentteja, jotta ne eivät syty palamaan tai tuhoudu itsestään. Kalliista hinnastaan huolimatta litiumioniakut ovat ihanteellisia kaikenlaisille sähköpyörille kantaman, painon, kestävyuden suhteen. (Epic Cycles 2023)

3.4.5 Akunhallintajärjestelmä

Accunhallintajärjestelmä (BMS) tarjoaa akkupaketin valvontaa ja suojausta, sekä varmistaa akkujen optimaalisen suorituskyvyn ja käyttöiän. Accunhallintajärjestelmä valvoo akkupaketin sähkövirtaa ja kennojen jännitteitä. Se suojaa akkua toimimasta valmistajan määrittelemien rajojen ulkopuolella ja soveltaa tarvittaessa rajoituksia äkillisissä kuormitusmuutoksissa, kuten esimerkiksi sähköauton äkillisessä kiihdytyksessä. Järjestelmä valvoo myös akun jännitettä ja tekee päätöksiä lähestyttäessä jänniterajoja, kuten vähentää latausvirtaa tai keskeyttää latauksen. Accunhallintajärjestelmä varmistaa myös akun optimaalisen lämpötilan hallinnan, joka on tärkeää akun suorituskyvyn kannalta. Järjestelmä voi käyttää lämmitystä ja jäädytystä akun lämpötilan säätelyyn. Lisäksi BMS tasapainottaa akkupaketin kapasiteettia varmistuen, että kaikki akkukennostot latautuvat samalla tavalla. Tasapainotusprosessi voi olla passiivinen tai aktiivinen. Accunhallintajärjestelmän tarjoama valvonta sisältää yleensä seuraavat toiminnot:

1. Akkujen valvonta
2. Akkujen suojaus
3. Akkujen toimintatilan arviointi
4. Akkujen suorituskyvyn jatkuva optimointi
5. Toimintatilan raportointi ulkoisille laitteille

Tässä yhteydessä "akku" viittaa koko akkupakettiin, kuitenkin valvonta- ja ohjaustoiminnot kohdistuvat erityisesti yksittäisiin kennoihin tai kennojen ryhmiin, jotka muodostavat akkupaketin kokonaisuuden moduuleina. Litiumioni-akkukennostoilla on korkein energiatiheys ja ne ovat standardivalinta monille kulutuselektroniikkatuotteille

aina kannettavista tietokoneista sähköautoihin. Vaikka ne toimivat erinomaisesti, ne voivat olla melko anteeksiantamattomia, jos niitä käytetään yleisesti turvallisen käyttöalueen ulkopuolella. Tämä voi johtaa akkujen suorituskyvyn heikkenemiseen tai jopa vaarallisiin seurauksiin. (Synopsys 2023)

Akunhallintajärjestelmien suunnitteluun sisältyy monia ominaisuuksia ja niistä kaksi keskeistä ominaisuutta ovat akkupaketin suojausten hallinta ja kapasiteetin hallinta. Akkupaketin suojausten hallinnassa on kaksi keskeistä osa-aluetta, sähköinen suojaus, joka tarkoittaa, ettei akun käyttöä sallita sen turvallisen käyttöalueen ulkopuolella, sekä lämpösuojaus, joka sisältää passiivista ja/tai aktiivista lämpötilan hallintaa akkupaketin pitämiseksi tai tuomiseksi takaisin sen turvalliselle käyttöalueelle. (Synopsys 2023)

3.5 Anturit

Anturi on laite, joka mittaa fyysisiä syötteitä ympäristöstään ja muuntaa ne tiedoiksi, joita voidaan tulkita joko ihmisen tai koneen toimesta. Useimmat anturit ovat elektronisia, mutta jotkut ovat yksinkertaisempia, kuten lasinen lämpömittari, joka näyttää visuaalisia tietoja. Antureita käytetään muun muassa lämpötilan mittaamiseen, savun tunnistamiseen ja paineen säätöön. Sähköpyörässä anturit tunnistavat ja mittaavat erilaisia tietoja pyöräilijän toiminnasta. Näihin kuuluvat esimerkiksi polkemisen nopeuden ja voiman tunnistaminen, sekä pyörän nopeuden mittaaminen. Näiden anturien avulla sähköpyörän järjestelmä voi tarjota sopivaa voimanavustusta pyöräilijälle, säätää moottorin tehoa ja parantaa ajokokemusta. Anturit ovat tärkeitä tekijöitä sähköpyörän toimivuuden ja suorituskyvyn kannalta. (Jost 2019)

3.5.1 Poljinanturit

Sähköpyörissä käytetään yleisesti kahden tyyppisiä poljintunnistimia. Ensimmäinen on kadenssitunnistin, joka mittaa polkimien pyörimisnopeutta. Toinen on momenttitunnistin, joka tunnistaa pyöräilijän käyttämän voiman polkemiseen ja säätää moottorin tehoa sen perusteella. (Cope 2022)

Kadenssitunnistimet ovat yleisin käytetty poljinavustuksen tyyppi. Niiden toimintatapa on melko suoraviivainen, kun pyöräilijä polkee, polkimissa oleva magneetti lähettää signaalin moottorille aktivoitakseen sen, jolloin poljinavustus käynnistyy. Koska kadenssitunnistin on yksinkertainen järjestelmä, se voi joskus olla hieman epätarkka. Jotkut sähköpyörät nytkähtävät eteenpäin heti moottorin käynnistyttyä, ja poljinavustustason vaihtaminen voi olla joskus töksähtelevää. Kadenssitunnistimet voivat havaita vain pyöräilijän polkemisnopeuden, mutta ne eivät kuitenkaan pysty havaitsemaan todellista voimaa, jota käytetään kampien pyörittämiseen. Tämä voi olla ongelma maastossa tai mäissä ajettaessa. (Cope 2022)

Momenttitunnistimet ovat kehittyneempiä kuin kadenssitunnistimet, mutta harvinaisempia. Ne tarjoavat mahdollisimman sulavan poljinavustuskokemuksen. Toisin kuin yksinkertaisemmat kadenssitunnistimet, momenttitunnistimet pystyvät havaitsemaan sen voiman määrän, jonka pyöräilijä käyttää polkiessaan. Mitä enemmän voimaa käytetään poljinkampiin, sitä enemmän moottori tarjoaa poljinavustusta. Momenttitunnistimet ovat vähemmän huomattavia ollessaan aktiivisena, koska ne jäljittelevät niin hyvin pyöräilijän omaa panosta polkemiseen. Sen sijaan, että avustustasoa vaihdettaisiin manuaalisesti, momenttitunnistin tietää automaattisesti, milloin tarvitaan enemmän avustusta pelkästään sen perusteella, kuinka paljon voimaa kampiin kohdistuu. (Cope 2022)

3.5.2 Nopeusanturi

Polkupyörän nopeusanturi mittaa pyörän nopeuden ja lähettää tiedot järjestelmälle, kuten näyttöpaneelille tai moottorille. Yleisin tapa havaita pyörän nopeus on käyttää magneettia ja anturia. Magneetti kiinnitetään yleensä pyörän pinnaan ja anturi kiinnitetään pyörän runkoon tai haarukkaan lähelle magneettia. Magneetti voi olla pieni neodyymimagneetti. Kun pyörä liikkuu, magneetti ohittaa anturin, jolloin syntyy magneetikentän muutos. Anturi tunnistaa tämän muutoksen ja lähettää signaalin järjestelmälle. Signaali voidaan muuntaa pyörän nopeudeksi, joka näytetään esimerkiksi näyttöpaneelilla tai hyödynnetään moottorin ohjaamisessa. Nopeus voidaan saada myös suoraan polkupyörän pyörän navasta, jolloin kierrosnopeus muutetaan nopeudeksi, kun renkaan halkaisija tunnetaan. (Jones 2023)

4 YHTEENVETO

Mekatroniikka on tekniikan ala, joka yhdistää mekaniikan, sähkötekniikan ja tietotekniikan kehittämiseen älykkäitä laitteita. Sähköpyörien maailmassa mekatroniikalla on ratkaiseva rooli suorituskyvyn, luotettavuuden ja kokonaisvaltaisen käyttäjäkokemuksen vallankumouksessa.

Sähköpyörän mekatroniikka yhdistää mekaniikan, sähkötekniikan ja tietotekniikan periaatteita luodakseen yhtenäisen järjestelmän, jossa nämä toimivat synergiassa toistensa kanssa optimoiden sähköpyörien suorituskykyä. Yhdistämällä näitä aloja suunnitellaan ja toteutetaan kehittyneitä ratkaisuja perinteisten polkupyörien haasteisiin.

Yksi keskeisistä osista sähköpyörän mekatroniikassa on sähkömoottorijärjestelmä. Moottori tarjoaa voimanavustusta pyöräilijälle, helpottaen polkemista ja mahdollistaen pidemmät matkat. Kehittyneet harjattomat tasavirtamoottorit ovat yleisesti käytettyjä sähköpyörissä niiden korkean tehokkuuden, kompaktin koon ja vähäisen huoltotarpeen vuoksi. Mekatroniset innovaatiot ovat johtaneet kevyempien ja tehokkaampien moottoreiden kehittämiseen, jotka tarjoavat saumattoman voimansiirron ja parantavat kokonaisvaltaista ajokokemusta.

Toinen tärkeä osa-alue sähköpyörän mekatroniikassa on akkuteknologian kehitys. Litiumioniakut ovat suosituin valinta niiden korkean energiatiheuden, kevyen rakenteen ja pidemmän käyttöiän vuoksi. Mekatroniset kehitykset akunhallintajärjestelmissä varmistavat tehokkaan latauksen ja purkamisen, estäen ylilatauksen ja optimoiden akun suorituskykyä. Lisäksi regeneratiiviset jarrujärjestelmät mahdollistavat akun energian talteenoton jarrutuksen aikana, lisäten sähköpyörän kokonaisenergiatehokkuutta.

Mekatroniikka mahdollistaa älykkäiden ohjausjärjestelmien integroinnin sähköpyöriin. Nämä järjestelmät käyttävät antureita havaitsemaan ja säätämään sähkömoottorin tuottamaa voimaa eri parametrien perusteella. Poljintunnistimet, kuten kadenssi- ja momenttitunnistimet, havaitsevat pyöräilijän polkemisen ja tarjoavat suhteellista voimanavustusta. Nopeudentunnistimet varmistavat tarkan moottorin tehonsäädön pyörän nopeuden perusteella, mikä johtaa tasaisempaan ja intuitiivisempaan

ajokokemukseen. Lisäksi kehittyneet anturit voivat havaita maastonmuutoksia ja säätää voimanavustusta sen mukaisesti, parantaen sähköpyörän suorituskykyä ja vakautta.

Sähköpyörän mekatroniikka keskittyy myös ihmisen ja koneen välisen käyttöliittymän parantamiseen käyttäjäkokemuksen tehostamiseksi. Näyttöpaneelit ja ohjausyksiköt tarjoavat pyöräilijöille reaaliaikaista tietoa, kuten nopeutta, akun varaustasoa ja avustustilaa. Näiden käyttöliittymien avulla pyöräilijät voivat seurata ja säätää erilaisia sähköpyörän ominaisuuksia, edistäen personoituja ajokokemuksia.

Sähköpyörien mekatroniikan kehittyminen on tehnyt sähköpyöristä entistä tehokkaampia ja käyttäjäystävällisempiä. Mekaniikan, sähkötekniikan ja tietotekniikan periaatteiden integrointi on johtanut kehittyneisiin moottorijärjestelmiin, optimoituun akkuteknologiaan, älykkäisiin ohjausjärjestelmiin ja parannettuihin ihmisen ja koneen välisiin käyttöliittymiin. Nämä mekatroniset innovaatiot ovat sysänneet eteenpäin sähköpyöräteollisuutta, tarjoten kestäviä ja innovatiivisia liikkumisvaihtoehtoja.

LÄHDELUETTELO

Ajoneuvolaki 15.1.2021/82, 28§ [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2021/20210082#a82-2021> [viitattu 4.8.2022].

Ashley, C. 2016. We Love Cycling,. The Surprisingly Long History of Electric Bikes [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.welovecycling.com/wide/2016/03/08/the-surprisingly-long-history-of-electric-bikes/> [viitattu 4.8.2022].

Bolton, O. 1895. Patentti US552271A. Electrical bicycle [verkkodokumentti]. Washington DC. USA. Saatavissa: <https://patents.google.com/patent/US552271> [viitattu 4.8.2022].

Cope, R. 2022. What is Pedal Assist and How Does it Work? [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.linkyinnovation.com/what-is-pedal-assist/> [viitattu 3.7.2023].

Cunningham, E. 2023. Batteries For E-Bikes Explained [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://electric-biking.com/electric-bike-batteries/> [viitattu 30.5.2023].

Epic Cycles, 2023. How to choose the right battery for your electric bike [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://epiccycles.ca/choose-right-battery-electric-bike/> [viitattu 3.5.2023].

Evelo, 2020. The nuts and bolts: Understanding how electric bikes work [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://evelo.com/blogs/ebike-buyers-guide/the-nuts-and-bolts-understanding-how-electric-bikes-work> [viitattu 7.8.2023].

Jones, R. 2023. Cycling Speed and Cadence Sensors [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://trigearlab.com/cycling-sensors/> [viitattu 3.7.2023].

Larunpyörä 2022. Teholuokat [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://larunpyora.com/teholuokat> [viitattu 17.7.2022].

Libbey, H. 1897. Patentti US596272A. Electric bicycle [verkkodokumentti]. Washington DC. USA. Saatavissa: <https://patents.google.com/patent/US596272> [viitattu 4.8.2022].

Millet, P 2021. Brushless vs. Brushed DC Motors: When and Why to Choose One Over the Other [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://media.monolithicpower.com/mps/cms_document/2/0/2021-brushless-vs-brushed-dc-motors-when-and-why-to-choose-one-over-the-other_r1.0.pdf [viitattu 5.7.2023].

Peace, R 2022. Guide To E-Bike Gearing Systems. Saatavissa: <https://electricbikereport.com/electric-bike-gear-systems-explained/> [viitattu 7.8.2023].

Radionics, 2023. Everything You Need To Know About DC Motors [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://ie.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/dc-motors-guide> [viitattu 10.5.2023].

Roe, D. 2022. Everything You Want to Know About E-Bike Motors, Explained [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.bicycling.com/bikes-gear/a25836248/electric-bike-motor/> [viitattu 15.5.2023].

Sähköpyöräkeskus, 2023. Hihnavetoinen sähköpyörä – Edut ja haitat. Saatavissa: <https://evelo.com/blogs/ebike-buyers-guide/the-nuts-and-bolts-understanding-how-electric-bikes-work> [viitattu 7.8.2023].

Sähköpyöräkeskus, 2023. Prophete Graveler [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://sahkopyorakeskus.fi/tuote/prophete-graveler-e10-8-ht-27-5-demo-2021/> [viitattu 30.5.2023].

Steffens, M. 1898. Patentti US613732A. Bicycle [verkkodokumentti]. Washington DC. USA. Saatavissa: <https://patents.google.com/patent/US613732A> [viitattu 4.8.2022].

Synopsys, 2023. What is a Battery Management System? [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html#> [viitattu 21.7.2023].

Tilastokeskus, 2023. Käsitteet – polkupyörä [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.stat.fi/meta/kas/polkupyora.html> [viitattu 25.3.2023].

University of Waterloo, 2022. What is Mechatronics Engineering? [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://uwaterloo.ca/mechanical-mechatronics-engineering/undergraduate-students/future-students/what-is-mechatronics-engineering> [viitattu 4.8.2022].

Wikimedia Commons 2012. Electric Bicycle. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Electric_Bicycle.jpg [viitattu 7.8.2023].

Wikimedia Commons 2015. Electric Bicycle Japan. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Electric_Bicycle_Japan.jpg [viitattu 7.8.2023].

Wikimedia Commons 2016. Sinclair Zike. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/05/Sinclair_Zike_and_C5_at_Beaulieu_Motor_Museum_20160403.jpg [viitattu 7.8.2023].

Wikimedia Commons 2019. Cowboy 3 pedelec. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Electric_Bicycle.jpg [viitattu 7.8.2023].

Wikimedia Commons 2020. Electric motor working process. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Electric_motor_working_process.png [viitattu 7.8.2023].

Wikimedia Commons 2020. Mecha workaround. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Mecha_workaround.svg [viitattu 7.8.2023].

Wikimedia Commons 2022. Electric bike battery closeup. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Electric_bike_battery_closeup_%2851953605730%29.jpg [viitattu 7.8.2023].

Wikimedia Commons 2022. Mecha workaround. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Mecha_workaround.svg [viitattu 7.8.2023].

Wikimedia Commons 2006. Secondary cell energy density. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c9/Secondary_cell_energy_density.svg/1024px-Secondary_cell_energy_density.svg.png [viitattu 7.8.2023]

Wikimedia Commons 2007. Floppy drive spindle motor open. Saatavissa: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2e/Floppy_drive_spindle_motor_open.jpg [viitattu 7.8.2023]