

LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

TYÖKONEIDEN NESTEJÄÄHDYTETTYJEN AKKUPAKETTIEN MEKAANISET
RAKENNEVAIHTOEHDOT

MECHANICAL DESIGN OF LIQUID COOLED BATTERY PACKS IN MOBILE
MACHINERY

Lappeenrannassa 9.6.2021

Elmeri Seppinen

Tarkastaja TkT Eerik Sikanen

Ohjaaja TkT Eerik Sikanen

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Elmeri Seppinen

Työkoneiden nestejäähdytettyjen akkupakettien mekaaniset rakennevaihtoehdot

Kandidaatintyö

2021

31 sivua, 6 kuvaa, 6 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Eerik Sikanen

Ohjaaja: TkT Eerik Sikanen

Hakusanat: työkone, värähtely, akku

Tässä kandidaatintyössä selvitettiin kirjallisuudesta työkoneiden nestejäähdytettyihin akkupaketteihin kohdistuvia mekaanisia rasituksia, värähtelyn vaimentimia, akkupaketin värähtelyn- ja iskunkestävyyttä parantavia rakenteita ja akkupakettien mekaaniseen testaamiseen käytettävien standardien kokeita ja niiden vaatimuksia.

Merkittävin akkupaketin värähtelyn- ja iskunkestävyyttä parantava tekijä on akkukennojen välisen liikkeen estäminen. Liikettä voidaan estää pitämällä akkukennot paikoillaan kitkalla, sekä käyttämällä kannakkeita ja välikappaleita. Akkupakettiin johtuvia värähtelyitä voidaan vaimentaa yksinkertaisilla passiivisilla ja puoliaktiivisilla vaimentimilla. Vaimentimien valinnassa tulee kiinnittää huomiota siihen, ettei vaimennetun akkupaketin ominaistaajuus ole lähellä työkoneessa käytön aikana esiintyvien herätteiden taajuuksia. Akkupaketin sijoittamisella voidaan vaikuttaa akkupaketin kokemaan värähtelyrasitukseen.

Akkupakettien mekaanista testaamista käsittelevät standardit on kehitetty sähköautoja varten. Työssä tarkasteltiin kuuden eri standardin kokeita. Standardien vaatimuksia verrattiin esiteltyihin mekaanisiin rakenteisiin ja standardien soveltuvuutta työkoneiden akkupakettien testaamiseen arvioitiin.

ABSTRACT

LUT-University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Elmeri Seppinen

Mechanical design of liquid cooled battery packs in mobile machinery

Bachelor's thesis

2021

31 pages, 6 figures, 6 tables

Examiner: D. Sc. (Tech.) Eerik Sikanen

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Eerik Sikanen

Keywords: mobile machinery, vibration, battery

This bachelor's degree was a literature review into mechanical design of liquid cooled battery packs in mobile machinery. Vibration loads and dampers were examined as well as mechanical design solutions that make battery packs more tolerant to vibration and shocks. Standards for mechanical testing of battery packs were reviewed.

One of the most successful strategies to improve battery packs tolerance for vibration and shocks was restricting the relative movement of cells. This can be achieved by keeping cells in place with friction, cell spacers and holders. Transmission of vibrations can be reduced by simple passive or semi-active vibration dampers. Damper's natural frequency should be much less than the forcing frequency. Placement of a battery pack will impact its vibrational loading.

Standards for mechanical testing of battery packs are developed for use in electric vehicles. Six standards and their mechanical tests were reviewed. The requirements of these standards were compared to the mechanical design solutions. The suitability of these standards for use in battery packs for mobile machinery was assessed.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
1 JOHDANTO	5
1.1 Työn tavoitteet ja rajaukset	5
1.2 Tutkimusmenetelmät	6
2 VÄRÄHTELY AKKUPAKETISSA	7
2.1 Värähtelyn vaikutukset työkoneiden akkupaketteihin	10
2.2 Värähtelyn syyt	12
2.3 Akkupakettien värähtelytestaus ja standardit	13
3 VÄRÄHTELYN VAIMENTAMINEN	19
3.1 Akkupaketin sijoittaminen	19
3.2 Passiiviset vaimentimet.....	21
3.2.1 Kumityyny	22
3.2.2 Hydrauliset vaimentimet.....	22
3.3 Aktiiviset ja puoliaktiiviset vaimentimet	23
3.4 Akkupaketin sisäinen rakenne	20
4 STANDARDIEN VAATIMUSTEN VERTAILU VAIMENNUSRATKAISUJEN SUHTEEN	25
5 POHDINTA JA YHTEENVETO	27
5.1 Tulosten yleistettävyys	27
5.2 Jatkotutkimusaiheet	28
LÄHTEET	29

1 JOHDANTO

Pienhiukkas- ja kasviuonekaasupäästöjen rajat kirisyvät Euroopassa liikennesektorilla (EU 2016/1628), mikä on vauhdittanut siirtymistä polttomoottoreista vähäpäästöisempiin voimanlähteisiin, kuten sähköön. Henkilöautojen sähköistyminen näkyy jo liikenteessä, mutta työkonesovelluksissa kehitys on huomattavasti hitaampaa. Osa työkoneista, esimerkiksi sisätiloissa toimivat trukit, käyttävät jo täysin sähköistä voimansiirtoa, mutta useimmissa sovelluskohteissa työkoneet toimivat yhä fossiililla polttoaineilla. Lajunen et al. (2018) mukaan työkoneiden sähköistyminen tulee edistymään hitaasti ja pienin askelin, ja voimansiirron sähköistämisen tuomat hyödyt on perusteltava sovelluskohteittain. Kiristyvät päästörajoitukset ja uusiutuvan energian tuomat muutokset sähkön tuotantoon ja jakeluun voivat kuitenkin vauhdittaa muutosta. (Lajunen et al. 2018, s. 1–3.)

Merkittäviä työkoneiden sähköistymistä hidastavia tekijöitä ovat akkupakettien pieni energiatiheys verrattuna polttoaineisiin, hinta sekä huolet akkupakettien käyttöturvallisuudesta. Tällä hetkellä litiumioniakusto on suosituin energiavarasto muun muassa sähköautoissa sen energiatheyden ja suorituskyvyn vuoksi (Saw et al. 2016, s. 1032). Litiumioniakut ovat kuitenkin suhteellisen alttiita värähtelylle ja iskuille, jotka voivat aiheuttaa väsymisvaurioita akkupaketin rakenteissa ja liittimissä tai vaurioittaa akkukennojen sisäistä rakennetta ja aiheuttaa oikosulkuja (Arora et al. 2016, s. 1324). Oikosulut voivat aiheuttaa eksotermisen reaktion ja lämpöryntäykseen, joka voi pahimmillaan johtaa tulipaloon tai räjähdykseen (Ruiz et al. 2018, s. 1428). Työkoneissa värähtelyä voi esiintyä hyvin merkittäviä määriä, tosin erot sovelluskohteiden välillä ovat erittäin suuria.

1.1 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tässä kandidaatintyössä tavoitteena on etsiä kirjallisuudesta rakenteita ja komponentteja, joilla akkupakettiin johtuvia herätteitä saadaan vaimennettua lisäämättä akkupaketin massaa tai mittoja kohtuuttomasti vastaamalla seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten värähtely johtuu työkoneen rungosta akkupakettiin?
- Miten värähtelyjen johtumista akustoon saadaan vähennettyä?
- Miten impulssimaisia herätteitä saadaan vaimennettua?

Tässä kandidaatintyössä selvitetään työkonsovelluksissa esiintyvien värähtelyiden lähteitä ja herätteiden tyyppejä sekä akkupakettien testaamiseen käytävien standardien vaatimuksia. Lisäksi esitellään työkoneissa tyypillisesti käytetyt akkutyytit, akkupakettien yleinen rakenne sekä komponentteja ja mekaanisia rakenteita, joilla akkupakettien värähtelyn vaimennusominaisuuksia saadaan parannettua. Työssä tarkastellaan standardien mekaanisia kokeita ja vertaillaan niiden vaatimuksia vaimennusratkaisuihin.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Tämä tutkimus on kirjallisuuskatsaus. Lähteinä käytetään LUT Primo- ja Scopus-tietokannoista saatavilla olevia tieteellisiä artikkeleita ja standardeja sekä Google Scholar-hakukoneen kautta vapaasti saatavilla olevia tieteellisiä artikkeleita. Lisäksi lähteinä voidaan käyttää verkkosivustoja, kuten valmistajien kotisivuja.

Tietoa haetaan muun muassa yhdistelemällä hakusanoja: vibration, mechanical design, testing, effect, lithium-ion cell ja electric vehicle. Lähteinä suositaan vuonna 2016 tai myöhemmin julkaistuja vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita, koska litiumioniakkujen kehitys erityisesti sähköautosovelluksissa on ottanut viime vuosina merkittäviä edistysaskeleita. Tieteellisissä artikkeleissa suositaan luotettavien julkaisijoiden kuten Springerin ja Elsevierin julkaisemia vertaisarvioituja artikkeleita.

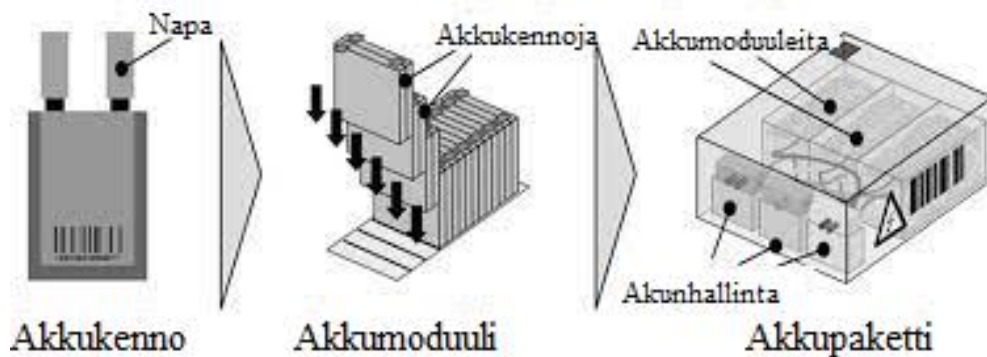
2 VÄRÄHTELY AKKUPAKETISSA

Työkone on käsitteenä varsin laaja, ja kattaa hyvin erilaisia ja -kokoisia koneita aina pienehköistä trukeista ja minikaivureista suuriin kiviautoihin ja kumipyöräisiin satamanostureihin. Yhteistä näillä koneilla kuitenkin on se, että niitä käytetään usein intensiiviseen ja ammattimaiseen toimintaan, joissain toimintaympäristöissä jopa 24 tuntia vuorokaudessa. Työkoneet ovat yleensä pyörillä tai teloilla liikkuvia koneita tai laitteita, jotka on suunniteltu suorittamaan ennalta määritettyjä työtehtäviä tietyissä ympäristöissä mahdollisimman tehokkaasti. Käyttöympäristöt ja niiden asettamat vaatimukset vaihtelevat merkittävästi sovelluskohteittain. (Lajunen et al. 2018, s. 3.) Harvesterit toimivat hyvin epätasaisessa metsämaastossa mutta konttinosturi toimii kovalla ja tasaisella alustalla. Kaivinkoneet liikkuvat vain harvoin kävelyvauhtia nopeammin, mutta aura-autojen ajonopeus voi olla säännöllisesti jopa yli 50 km/h. Kiviautoihin voi kohdistua lastaamisen yhteydessä voimakkaita iskuja, mutta trukeilla voimakkaita iskuja ei pitäisi normaalissa käytössä esiintyä.

Yksittäiset akkukennot eivät kykene vastaamaan työkoneiden vaatimaan tehon tarpeeseen, joka vaihtelee sovelluskohteen mukaan noin 10 kilowatin (kW) ja 3 megawatin (MW) välillä (Lajunen et al. 2018, s. 3). Siksi akkukennoja kytketään sarjaan jännitteen nostamiseksi, ja rinnan virran nostamiseksi. Sähkömoottorit ja kaapeloinnit kuitenkin rajoittavat sähkövirran enintään 500 ampeeriin (Masias 2018, s. 8). Akkukennoista kootaan moduuleita, joiden jännite on tyypillisesti enintään 50 V ja paino enintään 22 kg turvallisuuden ja käsittelyn helpottamisen takia (Saw et al. 2016, s. 1037; Masias 2018, s. 8). Moduulit sisältävät omat lämmön- ja sähköhallintakomponenttinsa (Saw et al. 2016, s. 1034).

Akkupaketti on akkumoduulien mekaaninen kokoonpano, joka sisältää usein myös lämmön- ja sähköhallintalaitteistosta (kuva 1). Akkupaketin massasta jopa 25-50% voi olla ei-sähköä varastoivia osia, kuten johtimia, jäähdytyskanavia ja kokoonpanoon käytettyjä rakenteellisia osia. Akkupaketin rakenne voidaan jakaa kolmeen eri osakokonaisuuteen; mekaaniseen rakenteeseen, lämmönhallintajärjestelmään ja sähköhallintajärjestelmään. (Masias 2018, s. 15.)

Akkupaketin mekaaninen rakenne käsittää kaikki ne osat, jotka tukevat ja suojaavat moduuleita (esimerkiksi runko, kuori ja päätylevyt) tai takaavat paketin turvallisen toiminnan (esimerkiksi kannakkeet, vaimentimet, tiivistimet ja venttiilit). Akkupaketin tulee fyysisesti mahtua työkoneen sisälle. Lämmönhallintajärjestelmä käsittää kaikki ne osat, jotka kontrolloivat akkukennojen lämpötilaa, muun muassa jäähdytysnesteen, lämmönvaihtimet, pumput ja kanavat. Sähköhallintajärjestelmään kuuluvat kaikki ne osat, jotka kuljettavat sähköä akkupaketista tai akkupakettiin, esimerkiksi johtimet, releet, kontaktorit ja sulakkeet. (Masias 2018, s. 15–16; Arora & Kapoor 2018, s. 178)



Kuva 1. Akkukenno, akkumoduuli ja akkupaketti (Mukaillen: Kampker et al. 2016)

Useimmat litiumioni akkukennot toimivat parhaiten noin 25–40 °C lämpötilassa (Saw et al. 2016, s. 1039–1040; Arora & Kapoor 2018, s. 177). Nestejäähdytyksellä akkupaketin lämpötilaa voidaan hallita tarkemmin kuin ilmajäähdytyksellä. Lisäksi nestejäähdytys vie vähemmän tilaa kuin ilmajäähdytys, koska jäähdytysnesteen ominaislämpökapasiteetti on huomattavasti suurempi kuin ilman. (Masias 2018, s. 10.) Vaikka nestejäähdytys on kalliimpi, monimutkaisempi ja painavampi kuin ilmajäähdytys, mahdollistaa se tehokkaiden mutta kompaktien akkupakettien valmistamisen. Jäähdytysjärjestelmän tavoitteena on pitää akkupaketin lämpötila yhtenäisenä sen eri osien välillä, jotta resistanssin muutoksista aiheutuvat jännitevaihtelut saadaan minimoitua (Masias 2018, s. 11).

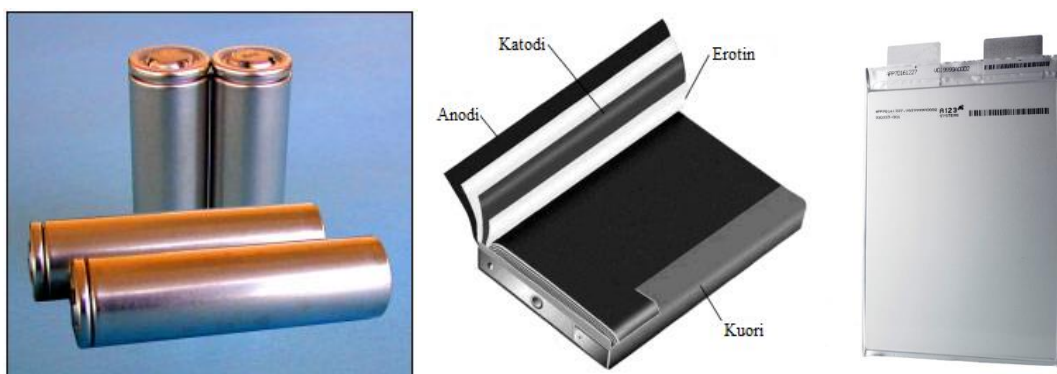
Akkukennon sisäinen lämpötilan vaihtelu pitäisi enintään 5–10 °C ja vaihtelu koko akkupaketissa pitäisi olla alle 5 °C. Suuremmat vaihtelut pienentävät suurinta akkupaketista saatavaa tehoa ja aiheuttavat akkupaketin enneaikaista kulumista. (Saw et al. 2016, s. 1039.)

Kolme yleisintä litiumioni akkukennojen tyyppiä ovat sylinteri-, prismaattinen- ja pussikkenno (kuva 2). Kullakin akkukennolla on hyviä ja huonoja puolia, eikä mikään niistä ole ylivoimaisesti toista parempi. Akkukennojen tyyppiä valitessa täytyy ottaa huomioon sovelluskohteen vaatimukset ja tarpeet, ja ratkaisuja on hyvä verrata toisiinsa kokonaisen akkupaketin tasolla, ei pelkästään kennojen tasolla (Masias 2018, s. 8). Akkukennot vaativat keskenään hyvin erilaisia rakenteita. Akkukennojen ominaisuuksia ja vaatimuksia on esitelty taulukossa 1.

Sylinterikkenno on nimensä mukaisesti sylinterin muotoinen. Kennon navat sijaitsevat sylinterin vastakkaisissa päissä. Sylinterikkennoja valmistetaan suuria määriä, ne ovat tasalaatuisia ja edullisempia verrattuna muihin kennotyyppeihin. Sylinterikennot kestävät hyvin puristusta, kennon sisäistä painetta ja iskuja niiden muodon ja metallisen ulkokuoren ansiosta. Kennojen navat liitetään toisiinsa pistehitsaamalla johdin napojen väliin. Pistehitsi kestää mekaanista rasitusta kuten värähtelyä hyvin, mutta tekee samalla yksittäisten akkukennojen vaihtamisesta vaikeaa. Sylinterikennot sisältävät ylikuormitussuojan ja ylipaineventtiilin. Sylinterikkennojen lämmönhallinta on myös varsin hankalaa, sillä lämpö johtuu kennosta pois parhaiten sen napojen kautta. Sylinterikennot ovat tyypillisesti pieniä ja niitä tarvitaan paljon riittävän kapasiteetin saavuttamiseksi. Kennojen suuren lukumäärän takia akkupaketti vaatii paljon kokoonpanoa eikä siksi sovellu hyvin pieniin tuotantoeriin. (Andrea 2010, s. 2–3; Saw et al. 2016, s. 1041–1043.)

Prismaattiset kennot ovat suurempia ja suorakulmaisen särmiön muotoisia. Niiden ulkokuori on metallia tai jäykkää muovia, mikä tarjoaa suojan iskuja ja pistemäisiä kuormia vastaan. Myös prismaattiset kennot sisältävät ylikuormitussuojan ja ylipaineventtiilin. Prismaattinen kenno ei kuitenkaan kestä puristusta. Prismaattisista kennoista kootun akkupaketin suunnittelu ja kokoonpano on verrattain helppoa kennojen muodon ja suuremman koon ansiosta. Akkukennojen suuren koon ja kiinnitysmekanismien ansiosta vioittuneiden kennojen vaihtaminen on mahdollista. (Andrea 2010, s. 2–3; Saw et al. 2016, s. 1041–1043)

Pussikennot ovat ohuita, usein suorakaiteen muotoisia, pehmeitä pussimaisia kennoja. Ne eivät kestä pehmeän ulkokuorensa takia pistekuormia, puristusta, iskuja, tai sisäistä painetta. Pussikennot vaativat tukilevyt rajoittamaan kennojen laajenemista. Pussikenoissa ei ole samoja turvalaitteita, kuten ylipaineventtiiliä tai ylikuormitussuojaa, kuin sylinteri- ja prismaattisissa kennoissa. Pehmeän ulkokuoren, turvalaitteiden puutteen ja laajenemisen takia pussikennojen käyttäminen akkupaketissa vaatii paljon suunnittelua, eivätkä ne siksi sovellu pieniin tuotantoeriin. Pussikennojen lämmönhallinta on helpompaa verrattuna muihin kennotyyppeihin, koska lämpö johtuu kennosta ulos sen sivuilta. (Saw et al. 2016, s. 1041–1043)



Kuva 2. Sylinterikkenno (vasemmalla), prismaattinen kenno (keskellä) ja pussikkenno (oikealla) (Cadex).

2.1 Värähtelyn vaikutukset työkoneneiden akkupaketteihin

Mekaaninen rasitus voi johtaa akkukennon ennenaikaiseen rikkoutumiseen ja vaarantaa laitteen käyttöturvallisuuden. Akkukennon sisäinen rakenne, erityisesti sen sisäisten osien kiinnitykset, määrittää kuinka hyvin kenno sietää värähtelyä. Brand et al. (2015) testasi sylinteri- ja pussikennon värähtelykestävyyttä. Testattu sylinterimäinen kenno oli altis kennon z-akselin suuntaiselle värähtelylle, eikä läpäissyt pitkän aikajänteen testiä tai impulssimaisen värähtelyn testiä. Pussikennot läpäisivät kaikki testit. Tulokset eivät kuitenkaan ole yleistettävissä muihin saman tyyppisiin akkukennoihin. (Brand et al. 2015, s. 67–68.) Akkukennon sisäiseen rakenteeseen on hyvä kiinnittää huomiota valittaessa akkupaketissa käytettäviä kennoja.

Taulukko 1. Akkukennojen vertailua (Mukaiillen: Andrea 2010, s. 3).

	Pieni sylinteri	Suuri sylinteri	Prismaattinen	Pussi
Muoto	Metallikuori	Metallikuori	Jäykkä muovi- tai metallikuori	Pehmeä alumiinipussi
Liitännät	Hitsatut kupari tai nikkeli johtimet tai levyt	Kierteellinen reikä (pultille) tai nasta (mutterille)	Kierteellinen reikä pultille	Navat jotka puristetaan, hitsataan tai juotetaan
Laajenemisen estäminen täydellä latauksella	Luontainen sylinterimäisestä muodosta	Luontainen sylinterimäisestä muodosta	Vaatii pidätyslevyt kennon päihin	Vaatii pidätyslevyt kennon päihin
Soveltuvuus pieniin projekteihin	Huono: Vaativa suunnittelu, paljon hitsaamista	Hyvä: Vaatii kohtalaisesti suunnittelua	Erinomainen: vaatii vain vähän suunnittelua	Erittäin huono: vaatii erittäin paljon suunnittelua
Soveltuvuus sarjatuotantoon	Hyvä: hitsatut kytkennät ovat luotettavia	Hyvä	Erinomainen	Erinomainen
Kennojen vaihdettavuus)	Ei mahdollista	Mahdollista, mutta ei helppoa	Helppoa	Yleensä ei mahdollista
Turvallisuus	Hyvä, ylikuormitus- suoja ja ylipaineventtiili	Hyvä, ylikuormitus- suoja ja ylipaineventtiili	Hyvä, ylikuormitus- suoja ja ylipaineventtiili	Huono, ei turvalaitteita

Värähtely on haitallista akkupaketille monella eri tavalla. Se aiheuttaa dynaamista räsitusta johtimiin, liittimiin, jotka voivat vaurioitua johtaa sähkökatkoihin. Värähtely aiheuttaa myös väsyttävää kuormitusta akkupaketin mekaanisiin rakenteisiin kuten koteloon, joka voi hajota. Voimakas värähtely tai iskut voivat aiheuttaa akkukennon kerrosten delaminoitumista lyhentäen kennon käyttöikä. Värähtely voi vaurioittaa myös akunhallintajärjestelmän eri osia. Pahimmillaan akkupaketin mekaaninen vaurio voi johtaa tulipaloon tai räjähdykseen. Riittävän värähtelyn vaimentamisen puute on yleisin syy markkinoilla olevien akkupakettien hajoamiseen. (Arora et al. 2016, s. 1324.)

Erilaiset akkukennot sietävät värähtelyä eri määrän. Värähtelykestävyyden tarkastelu kennotasolla ei ole kuitenkaan mielekästä, sillä akkumoduulin ja -paketin mekaanisilla rakenteilla on suuri vaikutus yksikön värähtelynsietokykyyn.

2.2 Värähtelyn syyt

Työkoneissa voi esiintyä sovelluskohteesta riippuen hyvin runsaasti värähtelyä, eikä värähtelyprofiileista ole juurikaan vapaasti saatavilla olevaa kirjallisuutta. Värähtelyä aiheutuu liikkumisesta erilaisilla pinnoilla, töyssyjen ja kuoppien yli ajamisesta, pyörivistä osista sekä työskentelyyn liittyvistä törmäyksistä, iskuista ja muista vastaavista lähteistä. Värähtelyjen taajuus ja amplitudi vaihtelevat merkittävästi sovelluskohteittain ja siksi ne on selvitettävä tapauskohtaisesti. Esimerkiksi sisätiloissa tasaisella betonilattialla käytettävässä trukissa esiintyy huomattavasti vähemmän värähtelyä kuin ulkotiloissa käytettävässä kaivinkoneessa.

Sähköautojen osalta keskeisimmät värähtelyn taajuudet ovat kaupunkiajossa 0-7Hz välillä ja maantieajossa 20-40 Hz välillä. Lisäksi jäähdytysjärjestelmä voi aiheuttaa värähtelyä huomattavasti korkeammilla taajuuksilla. Nämä taajuudet ovat todennäköisesti merkittäviä myös niissä työkonesovelluksissa, joissa liikutaan kumipyörillä kaupunki- tai maantieympäristöön rinnastettavissa olosuhteissa. Akkupaketti voi resonoida jollain koneen normaalissa käytössä esiintyvällä taajuudella ja kasvattaa värähtelyn amplitudia kyseisellä taajuudella. (Hooper & Marco 2013, s. 3–6.)

2.3 Akkupakettien värähtelytestaus ja standardit

Akkukennojen, -moduulien ja pakettien testausta varten on kehitetty standardeja erityisesti sähköautojen yleistyessä. Testausstandardien tavoitteena on varmistaa akuston turvallisuus rasittavan mekaanisen kuormituksen alla sekä normaalista poikkeavissa käyttötilanteissa, kuten törmäyksissä tai onnettomuustilanteissa (Ruiz et al. 2018, s. 1428). Testien tulisi siis jollain tavalla kuvastaa oikeasti mahdollista rasitusta. Nykyiset akkupakettien testausstandardit on kehitetty erityisesti sähköautoja varten, ei työkoneita varten. Standardien pohjana on käytetty erityisesti sähköautojen kokemaa värähtelyrasitusta sekä henkilöautoille tyypillisiä onnettomuustilanteita.

Akkuja voidaan testata kenno, moduuli ja paketti -tasolla. Lisäksi koko ajoneuvoa/työkoneita voidaan testata kokonaisuutena. Yksittäisten akkukennojen testaaminen ei kuitenkaan kuvaa hyvin akkupaketin käyttäytymistä, sillä kennojen välisillä kytkennöillä, lämpö- ja lataustilan eroilla, mekaanisilla kiinnityksillä ja muilla akkupaketin komponenteilla on merkittävä vaikutus akkupaketin todelliseen käyttäytymiseen. Yksittäisten kennojen testaaminen ei ole turhaa, mutta se ei kuvaa käyttäytymistä paketin, moduulin tai koneen tasolla. Akkupaketin testaaminen kuvaa todellista tilannetta paremmin, mutta akkupaketin sijainnilla on merkitystä siihen, millaiselle rasitukselle akkupaketti altistuu ja millaiset onnettomuustilanteessa esiintyvät vauriot ovat hyväksyttäviä.

Taulukossa 2 esitellään eri standardien sisältämät testit ja testattavat yksiköt. Testattavat yksiköt noudattavat standardia SAE J2464:2009. Kenno on energiavarasto, joka koostuu vähintään yhdestä anodista ja katodista sekä muista tarpeellisista sähkökemiallisista ja rakenteellisista komponenteista. Moduuli on joko sarjaan tai rinnan kytketyistä kennoista muodostuva yhtenäinen kokonaisuus. Akkupaketti on sarjaan tai rinnan kytkettyjen moduulien muodostama kokonaisuus, joka sisältää myös kaikki mekaaniset rakenteet sekä apujärjestelmät kuten lämmön- ja sähköhallintajärjestelmät. (Ruiz et al. 2018, s. 1431.)

Taulukko 2. Akkukennojen, -moduulien ja -pakettien testausstandardien sisältämät testit. Testattava yksikkö ilmoitettu kirjaimilla C=kenno, M=moduuli, P=paketti, V=ajoneuvo (Ruiz et al. 2018, s. 1430).

	SAE J2464	SAE J2929	ISO 12405-3	UL 2580	USABC	FreedomCAR
Mekaaninen isku	C M P	C M P V	P	C M* P	M P	M P
Pudotuskoe	P	P	-	C P	P	P
Lävistyskoe	C M P	-	-	-	C M P	C M P
Upotuskoe	M P	P	P	M P	M P	M P
Puristuskoe	C M P	P V	P V	C M P	C M P	C M P
Rollover test	M P	P	-	P	M P	M P
Värähtelykoe	-	C M P	P	C M P	C M* P	C M P

* Moduulitasolla sähköauton akkua suuremmissa energiavarastoissa.

Mekaanisella iskulla simuloidaan normaalin käytön aikaisia impulssimaisia kuormia, kuten töyssyn tai kuopan yli ajamista, ja epänormaaleja raskuuksia kuten törmäys- ja kolaritilanteita. Testin toteuttamisessa on kuitenkin eroja standardien välillä. SAE J2464 asettaa testille vaativimmat raja-arvot: kolme iskua positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan kolmen akselin suuntaisesti. USABC ja FreedomCAR jakaa iskutestin kahdelle tasolle. Matalan tason testissä testattava yksikkö ei saa vaurioitua testin aikana. Keskitason testissä testattava yksikkö ei välttämättä toimi testin jälkeen. Kaikki standardit vaativat puolikkaan siniaallon käyttämistä, mutta USABC ja FreedomCAR sallivat myös muiden – todellista tilannetta paremmin kuvaavien – pulssien käyttämistä. (Ruiz et al. 2018, s. 1431.) Standardien vaatimukset on esitelty tarkemmin taulukoissa 3 ja 4.

Taulukko 3. Standardien SAE J2464, SAE J2929 ja ISO 12405-3 vaatimukset mekaaniselle iskukokeelle kenno (C), moduuli (M) ja paketti (P) tasolla (Ruiz et al. 2018, s. 1432)

	SAE J2464	SAE J2929	ISO 12405-3
Testattava yksikkö	C M P	C M P	P
Iskun suunta	3 akselia, positiivinen ja negatiivinen suunta	Pituus- ja sivuttaissuunta, positiivinen ja negatiivinen suunta	Pituus- ja poikittaissuuntainen
Suurin kiihtyvyys (g)	150 (C), 50 (C > 0,5 kg, M, P > 12 kg) tai 25 (P)	150 (C, M, P), 50 (C > 0,5 kg, M, P > 12 kg) tai 25 (P)	51, ajoneuvoille poikkeavat (matalammat) iskun suunnasta riippuvat arvot
Iskun kesto (ms)	6 (C), 11 (C > 0,5kg, M, P > 12 kg) tai 15 (P)	6 (C, M, P), 11 (C > 0,5kg, M, P > 12 kg) tai 15 (P)	6 tai 80-120
Latausaste (%)	95-100	95-100	50 tai >50

Taulukko 4. Standardien UL 2580, USABC ja FreedomCAR vaatimukset mekaaniselle iskukokeelle kenno (C), moduuli (M) ja paketti (P) tasolla (Ruiz et al. 2018, s. 1432)

	UL 2580	USABC	FreedomCAR
Testattava yksikkö	C M* P	M P	M P
Iskun suunta	3 akselia, positiivinen ja negatiivinen suunta	Vaurioherkin suunta	Vaurioherkin suunta
Suurin kiihtyvyys (g)	51 (C) 25 (M, P)	30 (keski-1) 20 (keski-2) 20 (matala)	30 (keski-1) 20 (keski-2) 20 (matala)
Iskun kesto (ms)	6 (C) 15 (M, P)	≤ 55 (matala) ≤ 65 (keski-1) ≤ 110 (keski-2)	≤ 55 (matala) ≤ 65 (keski-1) ≤ 110 (keski-2)
Latausaste (%)	100	100	100

Standardien SAE J2464, SAE J2929 ja UL 2580 mukaiset pudotuskokeet simuloivat huollon aikana mahdollisesti tapahtuvaa pudotusta. Akkupaketti pudotetaan tasaiselle betonialustalle 1 (UL2580) tai 2 metrin (SAEJ2464) korkeudesta, tai niin korkealta kuin akkupaketti voi huolto-ohjeen mukaisen huollon aikana pudota, kuitenkin vähintään metrin korkeudesta (SAE J2929). Mikäli akkupaketti on tarkoitettu vaihdettavaksi, suoritetaan standardin UL 2580 mukainen koe vähintään kolme kertaa. USABC ja FreedomCAR simuloivat pudotuskokeella törmäystä puhelinpylvääseen tai muuhun vastaavaan esineeseen. Pudotuskoe suoritetaan 10 (USABC) tai enintään 10 metrin (FreedomCAR) korkeudesta terässylinterin (säde 150mm) päälle. (Ruiz et al. 2018, s. 1433.)

Lävistyskokeessa teroitettu terässauva painetaan testattavan yksikön läpi. Kokeen tarkoituksena on simuloida akkukennon sisäistä oikosulkua, mutta se ei kuvaa kyseistä, tai mitään muuta todellisessa käytössä esiintyvää tilannetta hyvin (Ruiz et al. 2018, s. 1433–1434; Lamb & Orendorff 2014, s. 189). Tästä syystä koe ei kuulu useimpiin standardeihin, mutta se on yhä osa standardeja SAE J2464, USABC ja FreedomCAR (Ruiz et al. 2018, s. 1434).

Upotuskoe simuloi tilannetta, jossa akkupaketti joutuu kokonaan tai osittain veden varaan. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi tulvan seurauksena, tai jos työkone ajautuu kanavaan, järveen tai mereen. Upotuskokeen hyödyllisyys on arvioitava sovelluskohteittain, eikä se ole tarpeellinen esimerkiksi kuivissa tiloissa käytettävissä työkoneissa. Upotuskokeessa täyteen ladattu testattava yksikkö upotetaan vähintään 1–2 tunniksi merivettä vastaavaan 25 °C suolaveteen. Standardissa ISO 12405-3 sallitaan upotus myös makeaan veteen. (Ruiz et al. 2018, s. 1434.)

Puristuskokeessa testattavaa yksikköä puristetaan, kunnes haluttu muodonmuutos on saavutettu tai jännite putoaa merkittävästi. Kokeen tarkoituksena on simuloida törmäys-, kolari- ja muissa onnettomuustilanteissa akkupakettiin kohdistuvia kuormia. Standardit SAE J2464, USABC, FreedomCAR ja UL 2580 (kennotasolla) asettavat puristuskuorman enimmäismääräksi 1000 kertaa testattavan yksikön painon, kun taas SAE J2929, ISO 12405-3 ja UL 2580 (moduuli- ja pakettitasolla) asettavat puristuskuorman ylärajaksi 100 kN. Henkilöautojen simuloituissa kolaritilanteissa suurimmat kuormat ovat olleet

tyypillisesti alle 100 kN, mutta työkonesovelluksissa tämä raja on hyvä tarkistaa. (Ruiz et al. 2018, s. 1435.)

Pyörähdyskoe simuloi ajoneuvon kaatumista onnettomuustilanteessa. Standardeissa SAE J2464, UL 2580, USABC ja FreedomCar täyteen ladattua (95–100%) testattavaa yksikköä pyöritetään yhtäjaksoisesti $6^\circ / s$ kokonainen kierros 360° . Standardissa UL 2580 pyörähdyskoe suoritetaan kolmen toisiaan kohtisuorassa olevan akselin ympäri, muissa riittää pyörähdys vain yhden akselin ympäri. Standardeissa SAE J2464, SAE J2929, USABC ja FreedomCAR testattavaa yksikköä pyöritetään myös 90° kerrallaan pitäen tunnin tauko pyörähdysten välillä (standardissa SAE J2929 tauko vain 5 min). Pyörähdyskoe suoritetaan yleensä puristuskokeen jälkeen. (Ruiz et al. 2018, s. 1437.)

Värähtelykokeen tarkoituksena on arvioida värähtelyn vaikutusta akustoon pitkällä aikavälillä, sekä tunnistaa suunnitteluvirheitä. Värähtelykokeessa siniaaltoja käytetään testattavan yksikön resonanssitaajuuksien löytämiseen ja satunnaista värähtelyä simuloimaan käytönaikaista räsitusta. Kokeessa käytettävät värähtelyprofiilit pohjautuvat henkilöautoista – akkupakettien sijoittamiselle suotuisista paikoista – mitattuun värähtelyyn. Standardien SAE J2929, UL 2580 (moduuli- ja pakettitasolla), USABC ja FreedomCar värähtelykokeet pohjautuvat standardiin SAE J2380, minkä takia ne ovat keskenään hyvin saman kaltaisia. Värähtelykokeiden vaatimukset on esitetty taulukoissa 5 ja 6. Henkilöautojen tai työkoneiden värähtelyprofiileista on kuitenkin hyvin vähän julkaistuja tutkimuksia. (Ruiz et al. 2018, s. 1438–1439.) Brand et al. (2015, s. 62–63) totesi työssään, että värähtelykokeet simuloivat lyhyellä aikajänteellä tapahtuvia värähtelyjä, eivät akuston elinkaaren aikaisia värähtelyjä. Standardit eivät myöskään testaa värähtelyä matalilla, alle 7 Hz, taajuuksilla vaikka ajoneuvoissa niitä esiintyy merkittäviä määriä (Hooper & Marco 2013, s. 3–6).

Taulukko 5. Värähtelykokeen vaatimukset kenno (C), moduuli (M), ja paketti (P) tasoilla standardien SAE J2929 ja ISO 12405-3 mukaan (Ruiz et al. 2018, s. 1438)

	SAE J2929		ISO 12405-3
Testattava yksikkö	C M P		P
Värähtelyprofiili	Satunnainen	Sini-aalto	Satunnainen
Taajuusalue (Hz)	10-190	7-200	5-200
Tehospektritiheys ($m\ s^{-2}$) ² /Hz	0,4-11		0,02-5,8
Kiihtyvyys siniaalto ($m\ s^{-2}$)		9,81-19,6 (> 12 kg) 9,81-78,5 (< 12 kg)	
Akseli	Pituus-, pysty- ja sivuttaissuunnassa	Kolme keskenään kohtisuoraa akselia	Pituus-, pysty- ja poikittainen suunta
Lataustaso (%)	95-100		50

Taulukko 6. Värähtelykokeen vaatimukset kenno (C), moduuli (M), ja paketti (P) tasoilla standardien UL 2580, USABC ja FreedomCAR mukaan (Ruiz et al. 2018, s. 1438)

	UL 2580		USABC	FreedomCAR
Testattava yksikkö	C	M P	P	
Värähtelyprofiili	Satunnainen		Satunnainen	
Taajuusalue (Hz)	10-2000	10-190	5-200	
Tehospektritiheys ($m\ s^{-2}$) ² /Hz	0,14-20	0,4-11	0,02-5,8	
Kiihtyvyys siniaalto ($m\ s^{-2}$)			7-49	
Akseli	Pituus-, pysty- ja sivuttaissuunnassa			
Lataustaso (%)	80-100	100 ja 20 (Z-sini, satunnainen) 60 (X- ja Y-sini, satunnainen)		

3 VÄRÄHTELYN VAIMENTAMINEN

Värähtelyn vaimentimien ja -eristeiden tarkoituksena on estää ja vaimentaa värähtelyn siirtyminen kahden eri kappaleen välillä. Vaimennuksen saavuttamiseksi herätteen taajuuden suhde vaimentimen ominaistajuuteen tulee olla vähintään $\sqrt{2}$. Jos herätteen ja vaimentimen ominaistajuuden suhde on pienempi kuin $\sqrt{2}$, vaimennin vahvistaa värähtelyä. Systeemi resonoi, jos sen ominaistajuus on sama kuin herätteen taajuus. Tehokkainta vaimennus on silloin, kun herätteen taajuuden ja systeemin ominaistajuuden suhde on mahdollisimman suuri. Vaimentimen ominaistajuus on käänteisesti verrannollinen staattisen poikkeaman neliöön. Suuri staattinen poikkeama tekee rakenteesta mekaanisesti epävakaa.

Värähtelyn vaimentimet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään; passiivisiin, puoliaktiivisiin ja aktiivisiin vaimentimiin. Passiiviset vaimentimet ovat tyypillisesti edullisia, luotettavia ja ne toimivat hyvin erityisesti korkeammilla taajuuksilla. Aktiiviset vaimentimet käyttävät antureita värähtelyn taajuuden ja amplitudin havaitsemiseen ja mukauttavat toimintansa sensorien keräämän datan perusteella. Ne toimivat hyvin matalilla taajuuksilla, mutta ovat kalliimpia ja monimutkaisia verrattuna passiivisiin vaimentimiin. Puoliaktiiviset vaimentimet toimivat pääosin passiivisinä vaimentimina, mutta niiden ominaisuuksia voidaan muuttaa. Akkupaketin sijainnilla on suuri vaikutus sen kokemaan värähtelyrasitukseen. Akkupaketin sisäisillä rakenteilla voidaan vaikuttaa paketin värähtelyn kestävyYTEEN.

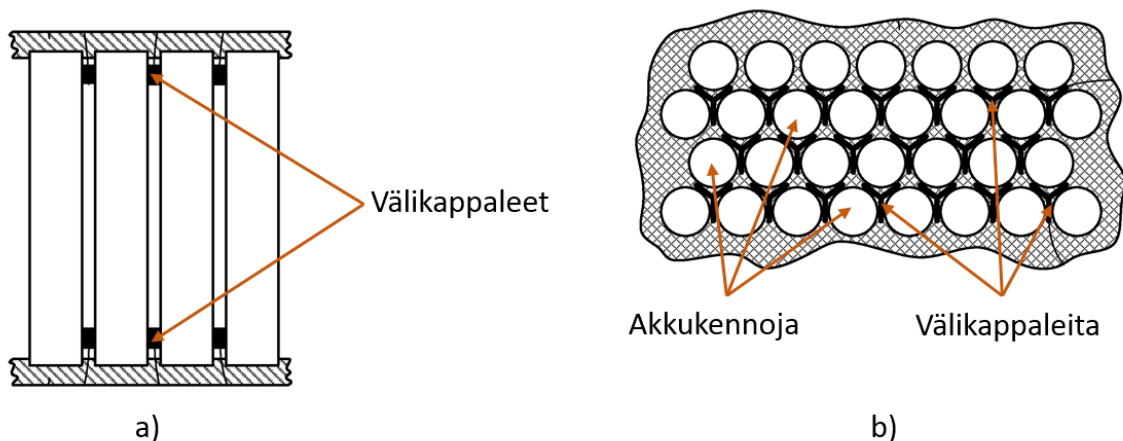
3.1 Akkupaketin sijoittaminen

Helpoin ja edullisin tapa vaimentaa akkupakettiin johtuvia värähtelyjä on sijoittaa akkupaketti sellaiseen paikkaan, jossa värähtelyt ovat mahdollisimman pieniä, ja joka on suojattu hyvin iskuilta. Akkupaketti on usein varsin painava, ja työkoneen painopiste on otettava huomioon akkupaketin sijoittamisessa. Akkupaketin sijoittamisessa on myös hyvä huomioida koneen käyttäjän turvallisuus mahdollisessa vikatilanteessa. Akkupaketti tulee sijoittaa kuljettajalle varatun tilan ulkopuolelle, jotta se ei vaaranna kuljettajan turvallisuutta (Arora et al. 2016, s. 1328).

3.2 Akkupaketin sisäinen rakenne

Akkukennojen välisen liikkeen rajoittaminen on yksi tehokkaimmista keinoista parantaa akkujen värähtelyn kestävyyttä (Arora & Kapoor 2018, s. 198). Välikkappaleilla (eng. cell spacer) rajoitetaan akkukennojen välistä liikettä. Välikkappaleiden tavoitteena on säilyttää akkukennojen väliset etäisyydet myös lämpökarkauksen aikana, ja siten estämään lämpökarkauksen etenemistä kennosta toiseen. Koska välikkappaleiden pääasiallinen tarkoitus on toimia lämpökarkauksen aikana, myös lämpötiloissa, joissa akkukennojen kannakkeet pehmenevät tai mahdollisesti sulavat, täytyy välikkappaleet tehdä materiaaleista, joiden sulamispiste on riittävän korkea. Välikkappaleilla voidaan myös estää kennojen välissä mahdollisesti sijaitsevien jäähdytyskanavien puristuminen. (Arora & Kapoor 2018, s. 181–182; Arora et al. 2016, s. 1321–1323.)

Patentissa US8481191B2 esitetään välikkappale sylinterikennoille (kuva 3). Välikkappaleet ovat matalia, vain noin 1-5% akkukennon korkeudesta, ja ne sijoitetaan akkukennon ylä- ja alaosaan kuvan 3a mukaisesti. Käyttämällä matalia välikkappaleita akkupaketin paino pysyy matalana ja kennojen väliin jää tilaa jäähdytyskanaville. Välikkappaleet ovat erillään akkukennojen kannakkeista. Välikkappaleet ovat muodoltaan kolmisakaraisia ja ne on valmistettu keraamisesta materiaalista, jonka sulamislämpötila on korkea, jopa yli 1000 C. Välikkappaleita sijoitetaan kaikkien akkumoduulissa olevien kennojen välille (Kuva 3b). (Hermann, 2012.)



Kuva 3. Välikkappaleiden sijoittaminen sylinterikennojen kokoonpanossa sivulta (a) ja päältä (b) päin kuvattuna. (Hermann, 2012).

Kannakkeiden tarkoituksena on pitää akkukennot paikoillaan normaaleissa käyttötilanteissa. Kannakkeiden tulee olla helposti ja edullisesti valmistettavissa. Niiden pitää olla myös kevyitä akkupaketin massan minimoimiseksi ja niiden sähköjohtavuuden pitää olla pieni oikosulkujen välttämiseksi. Käytännössä kannakkeet valmistetaan muovista, kuten nylonista. (Arora et al. 2016, s. 1327–1328) Esimerkkejä sylinteri- ja pussikenttien kannakkeista kuvassa 4.



Kuva 4. Erilaisille kannakkeita sylinteri- ja pussikenttien (Saw et al. 2016, s. 1042)

Prismaattiset- ja pussikenttien vaativat ulkoista puristusta, jolla voidaan ehkäistä elektrodikerrosten välistä delaminaatiota. Puristava voima saadaan aikaiseksi esimerkiksi asettamalla akkukenttä kahden jäykän levyn väliin. (Saw et al. 2016, s. 1036)

Vaikka pystysuuntaisen akselin suunnassa esiintyy eniten värähtelyä niin sähköautoissa kuin työkonesovelluksissakin, esiintyy akkupaketissa myös vaakasuuntaista värähtelyä (Arora et al. 2016, s. 1324; Alfaro Degan et al. 2018, s. 93–95). Akkupaketin ja -kenttien pitää olla tuettu myös vaakasuunnassa. Tämä toteutetaan yleensä kohdistamalla puristava voima akkupaketin kuoren yläpintaan. (Arora et al. 2016, s. 1324.) Akkupakettiin kohdistuva puristava kuorma parantaa myös akkupaketin pöly- ja vesitiiveyttä (Arora & Kapoor 2018, s. 191).

3.3 Passiiviset vaimentimet

Passiiviset vaimentimet ovat mekanisme, jotka muuttavat värähtelyn liike-energiaa johonkin toiseen energiamuotoon, yleensä lämmöksi. Passiivisia vaimentimia ovat esimerkiksi kumityyny, eristematot, hydrauliset- ja pneumaattiset vaimentimet. Passiiviset vaimentimet ovat tyypillisesti edullisia ja helppoja valmistaa, mutta niitä ei pystytä ohjaamaan.

3.3.1 Kumityynyt

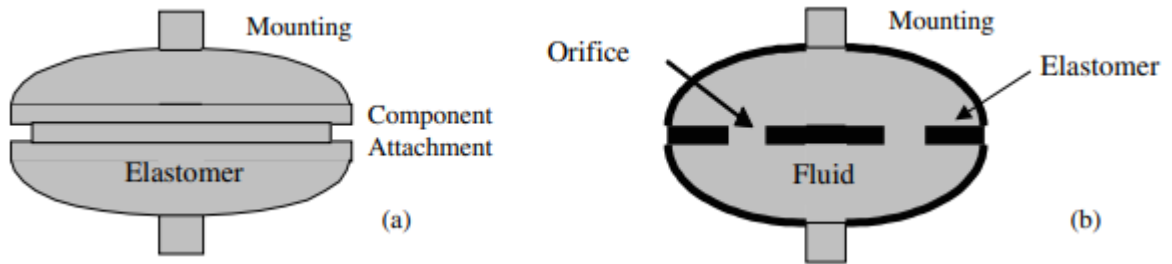
Kumityyny on yksinkertainen ja edullinen värähtelyn vaimennin. Kumityynyjä käytetään nykyisin muun muassa moottorin kiinnikkeissä. Kuvassa 5a on esitetty eräs kumityyny. Tyynyjen vaimennusominaisuuksiin voidaan vaikuttaa materiaalivalinnalla, vaimentimen muodolla ja mitoilla. Vaimentimen valinnassa on huomioitava kullekin vaimentimelle kohdistuva kuormitus, sekä vaimentimen ominaistaajuus.

Kumien ja muiden vastaavien materiaalien kovuutta mitataan Shore A asteikolla (1–100), jossa suurempi arvo tarkoittaa kovempaa materiaalia. Shore A asteikolla kuminauha on noin 25, auton rengas noin 60, trukin rengas noin 95 ja kova rullalaudan rengas noin 98. (Barnwell; J-FLEX.)

Kumityynyjen valinnassa täytyy tietää suurin tyynyyn kohdistuva kuorma. Herätteen taajuuden ja halutun vaimennuksen perusteella voidaan laskea vaimentimelta vaadittava ominaistaajuus, sekä jousivakio. Kun nämä on selvitetty, valitaan vaimennin, jonka suurin sallittu kuorma on yhtä suuri tai suurempi kuin suurin siihen kohdistuva kuorma. Mitä pienempi kuorma kumityynyyn kohdistuu, sitä huonommin se vaimentaa värähtelyä. Vaimentimen ylikuormitus ei kuitenkaan ole suositeltavaa. Vaimentimen jousivakion tulee olla yhtä suuri tai pienempi kuin laskettu jousivakio. Kumityynyjen ja mattojen ominaistaajuus on vaimentimen muodon, materiaalin ja koon mukaan noin 5–30 Hz. (AirLoc Schrepfer 2012; Hutchinson Paulstra; LORD Corporation; Munjal, 2013. s. 84.)

3.3.2 Hydrauliset vaimentimet

Hydraulisessa vaimentimessa neste kulkee vaimentimen sisällä olevan aukon läpi (kuva 5b). Värähtelyn vaimennus perustuu aukon aiheuttamaan virtauksen vastukseen, joka mahdollistaa vaimentimen valmistamisen joustavammasta materiaalista. Hydraulinen vaimennin kestää hyvin kulutusta. Vaimentimen huono puoli on suuremmasta vaimennuksesta aiheutuva suurempi voiman johtuminen vaimentimen läpi. (Stelzer et al. 2003, s. 744–745)

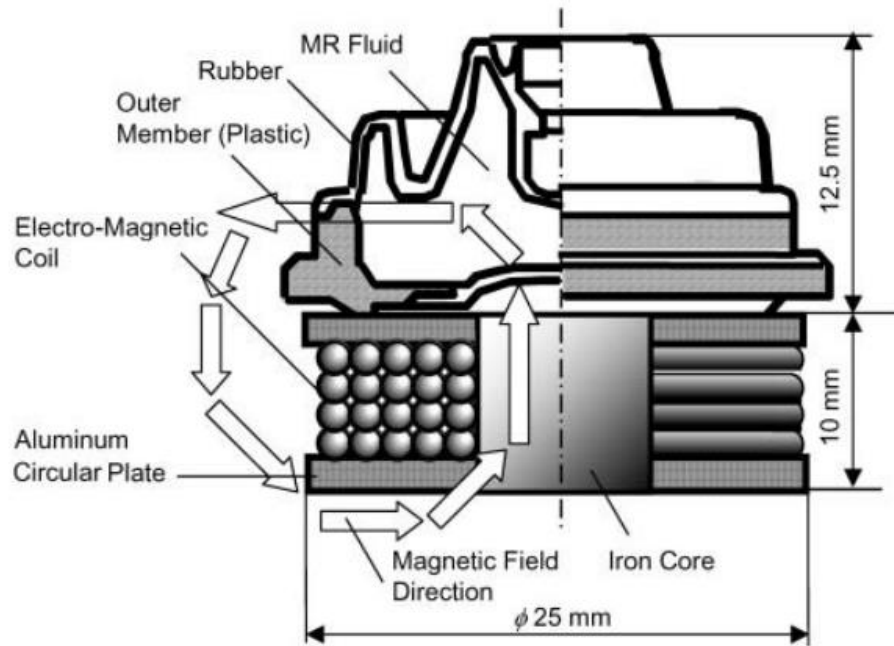


Kuva 5. Kumityyny (a) ja hydraulinen vaimennin (b) (Stelzer et al. 2003, s. 744).

3.4 Aktiiviset ja puoliaktiiviset vaimentimet

Aktiivisia vaimentimia voidaan ohjata antureiden datan perusteella. Aktiivisilla vaimentimilla voidaan lisätä energiaa systeemiin. Vaimentimen tavoitteena on tarjota herätteen kanssa yhtä suuri mutta vastakkainen voima. (Stelzer et al. 2003, s. 746.) Aktiivisilla vaimentimilla ei ole ominaisvärähtelytaajuutta, eli se ei resonoi millään taajuudella (Wang et al. 2019, s. 24). Aktiivisilla vaimentimilla on mahdollista saavuttaa tehokas värähtelyn vaimennus erityisesti matalilla taajuuksilla. Aktiiviset vaimentimet ovat kuitenkin tyypillisesti kalliita ja monimutkaisia verrattuna passiivisiin vaimentimiin. Lisäksi ne vaativat toimiakseen paljon energiaa, eikä niiden käyttö akkupaketeissa ole yleensä perusteltua. (Stelzer et al. 2003, s. 746.)

Puoliaktiiviset vaimentimet toimivat muuten samalla tavalla kuin passiiviset vaimentimet, mutta niiden ominaisuuksia voidaan muuttaa antureiden syöttämän datan perusteella. Puoliaktiivisten vaimentimien ohjaus vaatii vain vähän energiaa. Niillä on mahdollista vaimentaa esimerkiksi jollekin työsyklille ominainen taajuus tai jokin tunnettu resonanssitaajuus. Kuvassa 6 on esitetty Ahnin et al. (2005, s. 128–129) kehittämä puoliaktiivinen vaimennin, jossa nesteen viskositeettia voidaan muuttaa johtamalla vaimentimen alaosaan sijaitsevaan käämiin sähköä. Vaimentimella pystyttiin pienentämään sen läpi johtuvan värähtelyn amplitudia jopa 70% (Ahn et al. 2005, s. 132–133). Toinen esimerkki puoliaktiivisesta vaimentimesta on iskunvaimennin, jonka aukon kokoa pystytään muuttamaan (Stelzer et al. 2003, s. 746).



Kuva 6. Puoliaktiivinen vaimennin (Ahn et al. 2005, s. 129)

4 STANDARDIEN VAATIMUSTEN VERTAILU VAIMENNUSRATKAISUJEN SUHTEEN

Standardien kokeiden tarkoituksena on selvittää akuston käyttäytymistä ja heikkouksia erilaisissa todellisessa käytössä esiintyvissä epänormaaleissa ja rasittavissa käyttötilanteissa kuten kolareissa ja muissa onnettomuustilanteissa (Ruiz et al. 2018, s. 1429). Standardien kokeet suoritetaan lyhyellä aikajänteellä, eivätkä ne kuvasta normaaleja käyttötilanteita tai pitkällä aikajänteellä esiintyvien rasitusten vaikutusta akkukennoihin, -moduuleihin ja -paketteihin. Normaalien, pitkällä aikajänteellä esiintyvien rasitusten vaikutukset akustoon voivat olla erilaisia kuin standardeissa käsiteltyjen onnettomuustilanteiden vaikutukset. (Brand et al. 2015, s. 63.) Standardeissa keskitytään erityisesti tilanteisiin, jotka voivat johtaa lämpökarkaukseen ja siten aiheuttaa vaaraa koneen tai laitteen käyttäjälle. Käyttäjän turvallisuuden keskittyminen heijastuu myös standardien kokeiden tulosten arviointiin. Useimmissa standardeissa testattava yksikkö läpäisee testin, jos se ei syty palamaan, räjähdä, repeä tai vuoda. (Ruiz et al. 2018, s. 1429–1431.)

Työssä tarkastellut standardit on kehitetty pääasiassa sähköautoja varten. Standardien kokeet on suunniteltu henkilöautoista kerätyn datan perusteella. Esimerkiksi henkilöautojen kolaritilanteissa suurimmat kontaktikuormat ovat tyypillisesti enintään 100 kN ja SAE J2929, UL 2580 (moduuli ja pakettitasolla) sekä ISO 12405-3 käyttävät puristuskokeessa enimmäiskuormana noin 100 kN. Toisaalta muut työssä tarkastellut standardit käyttävät puristuskuormana 1000 kertaista testattavan yksikön painoa. Tällöin suurien akkupakettien puristuskokeessa voidaan käyttää huomattavasti suurempaa kuormaa kuin todellisessa tilanteessa esiintyy. Standardiin SAE J2380 pohjautuvat värähtelykokeet (SAE J2929, UL 2580 moduuli- ja pakettitasolla, USABC ja FreedomCAR) on suunniteltu henkilöautoista akkupaketin sijoittelun kannalta suotuisista paikoista mitatun värähtelyn perusteella, ja se vastaa 160 000 kilometrin käyttöä. (Ruiz et al. 2018, s. 1437–1439.)

Akkupakettien sijoittelun kannalta relevanttia tietoa värähtelyistä löytyi henkilöautoista vain vähän ja työkoneista ei ollenkaan. Hooper & Marco (2013, s. 4) havaitsivat tutkimuksessaan, että henkilöautoissa esiintyy merkittäviä värähtelyenergian piikkejä matalilla, 0–7 Hz taajuuksilla. Degan et al. (2018, s. 93–95) mukaan myös

kaivostoiminnassa käytetyissä työkoneissa, kuten kaivinkoneissa ja kiviautoissa, esiintyy voimakasta värähtelyä matalilla taajuuksilla. Mikään työssä esitelty standardi ei kuitenkaan käytä värähtelykokeissaan matalia, alle 5 Hz taajuuksia, koska useimmat värähtelykokeisiin käytetyt tärstimet eivät sovellu näille taajuuksille (Hooper & Marco 2013, s. 4).

Kumityynyjen ominaistaajuus on tyypillisesti noin 5–30 Hz, eli ne soveltuvat hyvin tätä korkeampien taajuuksien vaimentamiseen. Henkilöautoissa kyseisellä taajuusalueella esiintyy muun muassa vaihdelaatikosta ja ajoneuvon rungosta aiheutuvia herätteitä, mitkä saattavat aiheuttaa resonanssia kumityynyillä vaimennetussa akkupaketissa (Hooper & Marco 2013, s. 4–6). Työkoneista vastaavaa tietoa värähtelyistä ei löytynyt tutkimusta tehdessä, mutta on mahdollista, että kyseisen taajuusalueen herätteet asettavat haasteita kumityynyjen ja -mattojen käytölle. Työssä esitellyn Ahnin et al. (2005, s. 132–133) puoliaktiivisella vaimentimella pystyttiin laskemaan ominaistaajuudella vaimentimen läpi johtuvan värähtelyn huippuarvoa noin 70 % ja kasvattamaan resonanssitaajuutta noin 40%. Aktiivisilla vaimentimilla pystytään vaimentamaan akkupakettiin johtuvat värähtelyt hyvin. Ne ovat kuitenkin kalliita ja monimutkaisia järjestelmiä ja vaativat toimiakseen paljon energiaa. Niiden käyttö ei ole tarpeellista tai perusteltua, jos riittävä värähtelyn ja iskujen kestävyys on mahdollista saavuttaa muilla keinoilla

Prismaattisiin ja pussikennoihin kohdistettava puristava voima ehkäisee elektrodien delaminaatiota ja parantaa siten kennon värähtelykestävyyttä (Arora & Kapoor 2018, s. 182–183). Akkupakettiin kohdistettava puristava voima tukee akkukennoja, johtimia ja liittimiä. Tällä voidaan estää sähköisen jatkuvuuden menetys ja ehkäistä akkupaketin kuoren väsymistä. (Arora & Kapoor 2018, s. 186.) Akkukennojen kannakkeet ja välikappaleet pitävät akkukennot paikoillaan, estävät niiden välistä liikettä, ehkäisevät lämpöryntäyksen etenemistä ja säilyttävät jäähdytysjärjestelmälle varatun tilan. Akkukennojen välisen liikkeen estäminen parantaa akkupaketin iskun- ja värähtelyn kestävyyttä, sekä ehkäisee lämpöryntäyksen etenemistä kennosta toiseen (Arora et al. 2016, s. 1330).

5 POHDINTA JA YHTEENVETO

Tutkimuksessa selvitettiin akkupakettien mekaaniseen testaamiseen käytettäviä standardeja, akkupakettien värähtelyn- ja iskunkestävyyttä parantavia mekaanisia rakenteita sekä tapoja vaimentaa akkupakettiin johtuvia värähtelyjä. Työn tarkoituksena oli arvioida mekaanisten rakenteiden toimivuutta suhteessa standardien vaatimuksiin, sekä standardien soveltuvuutta työkoneiden akkupakettien testaamiseen.

Keskeisin akkupaketin värähtely- ja iskunkestävyyttä parantava tekijä on akkukennojen välisen liikkeen estäminen. Tämä saavutetaan käyttämällä kannakkeita, välikappaleita ja kohdistamalla kennoihin puristavaa voimaa, joka pitää ne paikallaan. Akkupaketin sijoittamisella voidaan vaikuttaa pakettiin johtuvien värähtelyiden voimakkuuteen, sekä ylimääräisien iskuilta suojaavien rakenteiden tarpeeseen.

Passiivisilla ja puoliaktiivisilla vaimentimilla saadaan vaimennettua akkupakettiin johtuvia värähtelyitä, kun vaimentimen ominaistaajuus on merkittävästi pienempi kuin herätteen taajuus. Vaimentimet vahvistavat värähtelyä, kun heräte on lähellä niiden ominaistaajuutta. Kumityynyjen ominaistaajuus on tyypillisesti 5–35 Hz. Mikään esitetyistä vaimennusratkaisuista ei toimi hyvin matalilla, alle 10 Hz taajuuksilla, eivätkä työssä esitetyt standardit käytä värähtelykokeissaan alle 5 Hz taajuuksia. Matalilla taajuuksilla värähtelyn vaimentaminen onnistunee parhaiten työkoneen jousituksella. Aktiivisilla vaimentimilla voidaan vaimentaa värähtelyitä tehokkaasti myös matalilla taajuuksilla, mutta niiden käyttö ei ole perusteltua, jos riittävä vaimentamisen ja värähtelyn kestävyys taso voidaan saavuttaa muilla keinoilla.

5.1 Tulosten yleistettävyys

Työssä tarkastellut standardit on suunniteltu sähköautojen testaamista varten. Standardien mukaisten kokeiden suunnittelussa on käytetty henkilöautoille tyypillisiä rasituksia ja onnettomuustilanteita, jotka eivät välttämättä ole samankaltaisia kuin työkonesovelluksissa. Värähtelyn vaimentamiseen käytettävät ratkaisut sekä värähtely- ja iskunkestävyyttä parantavat rakenteet ovat yleistettävissä sovelluksiin, joissa kuormitus- ja onnettomuustilanteet ovat samankaltaisia kuin henkilöautoissa. Mekaanisesti

rasittavammissa sovelluksissa akkupaketin suunnittelussa huomioitavia seikkoja ovat muun muassa värähtelyt, iskut ja onnettomuustilanteissa esiintyvät rasitukset.

5.2 Jatkotutkimusaiheet

Työkoneissa akkupaketin sijoittamisen kannalta suotuisissa paikoissa esiintyvistä värähtelyistä ei löytynyt tietoa tätä tutkimusta tehdessä. Värähtelyprofiilien selvittäminen on tärkeää, jotta voidaan varmistaa värähtelyn vaimennusratkaisujen riittävyys sovelluskohteittain, sekä tarvittaessa kehittää todellisia rasituksia paremmin kuvaavia kokeita.

LÄHTEET

Ahn, Y.K., Yang, B., Ahmadian, M. & Morishita, S. 2005. A Small-sized Variable-damping Mount using Magnetorheological Fluid. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 16: 2. S. 127-133.

AirLoc Schrepfer. 2012. Catalogue. 44 s.

Alfaro Degan, G., Coltrinari, G., Lippiello, D. & Pinzari, M. 2018. A comparison between methods for assessment of whole-body vibration exposure: A case study in a limestone quarry. *International journal of safety and security engineering*. 8: 1. S. 90-97.

Andrea, D. 2010. *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*. Norwood: Artech House. 290 s.

Arora, S. & Kapoor, A. 2018. *Mechanical Design and Packaging of Battery Packs for Electric Vehicles. Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*. Cham: Springer International Publishing. S. 175-200.

Arora, S., Shen, W. & Kapoor, A. 2016. Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles. *Renewable & sustainable energy reviews*. 60. S. 1319-1331.

Barnwell. What is a Shore A Hardness and why is it important? [verkkosivu]. [Viitattu 9.6.2021]. Saatavissa: <https://www.barnwell.co.uk/shore-a-hardness/>

Brand, M.J., Schuster, S.F., Bach, T., Fleder, E., Stelz, M., Gläser, S., Müller, J., Sextl, G. & Jossen, A. 2015. Effects of vibrations and shocks on lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*. 288. S. 62-69.

Cadex. Types of Battery cells. Battery university [verkkosivu]. [Viitattu 16.5.2021]. Saatavissa: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2016/1628. 14.9.2016. [Viitattu 2.5.2021]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj>

Hermann W. A. 2012. Rigid cell separator for minimizing thermal runaway propagation within a battery pack.

Hooper, J.M. & Marco, J. 2013. Understanding Vibration Frequencies Experienced by Electric Vehicle Batteries. Stevenage, UK: IET. 6 s.

Hutchinson Paulstra. Catalog Paulstra Industry 2019. S. 49-167.

J-FLEX. How is Rubber Hardness measured? What does Shore Hardness mean? [verkkosivu]. [Viitattu 9.6.2021]. Saatavissa: <https://www.j-flex.com/how-is-rubber-hardness-measured-what-does-shore-hardness-mean/>

Kampker A., Heimes H., Ordnung M., Lienemann C., Hollah A., Sarovic N. 2016. Evaluation of a Remanufacturing for Lithium Ion Batteries from Electric Cars. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 10: 12. S. 1922-1928.

Lajunen, A., Sainio, P., Laurila, L., Pippuri-Mäkeläinen, J. & Tammi, K. 2018. Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery. Energies (Basel). 11: 5. S. 1184.

Lamb, J. & Orendorff, C.J. 2014. Evaluation of mechanical abuse techniques in lithium ion batteries. Journal of Power Sources. 247. S. 189-196.

LORD. LORD Vibration, Shock and Motion Control Products For Industrial Applications. 124 s.

Masias, A. 2018. Lithium-Ion Battery Design for Transportation. Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. Cham: Springer International Publishing. S. 1-33.

Munjal, M. L. 2013. Noise and vibration control. Singapore: World Scientific Publishing. 294 s.

Ruiz, V., Pfrang, A., Kriston, A., Omar, N., Van den Bossche, P. & Boon-Brett, L. 2018. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. Renewable & sustainable energy reviews. 81. S. 1427-1452.

Saw, L.H., Ye, Y. & Tay, A.A.O. 2016. Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. *Journal of Cleaner Production*. 113. S. 1032-1045.

Stelzer, G.J., Schulz, M.J., Kim, J. & Allemang, R.J. 2003. A Magnetorheological Semi-Active Isolator to Reduce Noise and Vibration Transmissibility in Automobiles. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 14: 12. S. 743-765.

Wang, F., Weng, Z. & He, L. 2019. *Comprehensive Investigation on Active-Passive Hybrid Isolation and Tunable Dynamic Vibration Absorption*. 1. Painsos. Singapore: Springer Singapore. 175 s.