

PÄRNU KOIDULA GÜMNAASIUM

JUHAN RAEDOV

11.A KLASS, MATEMAATIKA-FÜÜSIKA ÕPPESUUND

**TUNTUMATE ELEKTRIAUTODE JA AKUDE ERIPÄRADEST,
KONSTRUKTSIOONIST NING ARENDUSTÖÖST
ALATES 1859. AASTAST**

**LIITIUMMETALL- JA LIITIUM-IOONAKUDE EDASISTEST
ARENGUSUUNDADEST**

JUHENDAJA ELMU MÄGI

SISSEJUHATUS

Naftavarude ammendumisega tõuseb nafta hind ning on tõenäoline, et ühel hetkel on nafta hind nii kõrge, et seda ei jõuta või ei ole otstarbekas osta. Bensiini ja diisli põlemisel eralduvat energiat kasutatakse sõidukite liigutamiseks; bensiin ja diisel on energiakandjad. Üheks laialdaselt kasutatavaks alternatiivseks energiakandjaks võivad tulevikus osutada akud.

Akudes muudetakse keemiline energia elektrienergiaks, kuid sisepõlemismootoriga autodes kasutatakse bensiinis või diislis peituvat keemilist energiat. Selle keemilise energia vabastamisel oksüdatsioonireaktsioonides tekib soojusenergia, mida auto liigutamiseks kasutatakse. Elektrienergia eeliseks soojusenergia ees on see, et hetkel suudetakse elektrienergia 2–3 korda efektiivsemalt muuta mehaaniliseks energiaks kui soojusenergia (st et elektrimootorid on 2–3 korda efektiivsemad kui sisepõlemismootorid). Mehaanilist energiat on vaja sõiduki liigutamiseks.

Võrreldes aga ühe ja sama massiühiku bensiini ning tüüpilise aku energiahulka, mida nad kannavad, ilmneb elektriautode üks suurimaid probleeme. Oletades, et

sisepõlemismootoriga autodes läheb umbes 40% bensiini põletamisel eralduvast energiast sõiduki liigutamisele, peaks elektriautole, millega loodetakse läbida sama vahemaa mis bensiiniautoga, peale panema massilt üle kümne korra rohkem akusid kui bensiiniautole bensiini. Teine akudega elektriautode puudus on pikad laadimisajad.

Ajaloos tagasi vaadates selgub, et elektriautod leiutati mitu aastakümnet enne sisepõlemismootoriga sõidukeid ja elektriautod olid ulatuslikult kasutuses 20. sajandi alguses, sest elektriautosid oli lihtsam korras hoida ja kasutada, kuid bensiinimootoriga autod tegid nendes aspektides kiireid parandusi. Sisepõlemismootoriga sõidukite võidukäiguga seoses puudus vajadus elektriautode järgi, mistõttu akude arendustöö aeglustus.

Viimastel aastakümnetel on akutehnoloogias suuri edusamme tehtud ja akude mahtuvus on kasvanud mitmeid kordi. Esimese laialdaselt kasutatava aku – pliiaku – leiutamisest saati on avastatud palju uusi aineid ja materjale ning uued tehnikaseadmed võimaldavad ehitada paremaid akusid, aga ka kergemaid elektrisõidukeid, mis omakorda avalduvad suuremas läbivuses.

Uurimistöö eesmärk on tutvuda tuntumate ja rohkem kasutuses olevate akutehnoloogiatega, uurides neid leiutamise järjekorras. Välja on toodud erinevate akude eelised ja puudused elektriautol kasutamisest sõltuvalt. Lisaks on peaaegu iga aku tüübi kohta toodud näide koos lühikirjeldusega masstootmisesse viidud elektriauto kohta, mis võimaldab võrrelda ja näha edusamme elektriautode arengus. Põhiline osa uurimuses kasutatavast materjalist on ingliskeelne ja pärineb internetist.

Tasub tähele panna, et akude võrdlemiseks välja toodud tehnilised näitajad (tabelites) võivad üsna laias vahemikus muutuda, sõltuvalt sellest, mis allikaid kasutada ja kui uusi uurimistulemusi omavahel võrrelda. Sellest tulenevalt võivad potentsiaalselt muutuda ka töö järeldused.

Uurimistööd saab edasi arendada, uurides võimalusi, kuidas elektriautosid efektiivsemaks muuta, uurida põhjalikumalt akudes toimuvaid protsesse ja võrrelda elektriautosid teiste bensiini ning diisli asendajatel töötavate sõidukitega, näiteks suruõhumootoriga autodega.

Kuigi termini 'elektriauto' alla mahuvad ka hübriidautod ja kütuseelemendiga autod, kasutatakse selles uurimistöös elektriauto terminit autode kohta, milles elektrienergia saadakse akudelt, st et selles uurimistöös mõeldakse elektriauto all elektri jõul liikuvat autot, mis talletab elektrienergia akudes.

Uurimistöö autor tänab juhendajat Elmu Mägi kaasamõtlemise, nõuannete ning soovitude eest, Tõnu Tamme ja retsensente Mihkel Kama, Rainer Küngast väärtuslike näpunäidete eest.

TERMINID

Aku e elektriakumulaator – korduvalt laetav keemiline vooluallikas ¹

Akupatarei – kõrgema pingese saamiseks jadamisi ühendatud akud ²

Galvaanielement – keemiline elektrivooluallikas, mis ei ole korduvalt laetav ³

Tsükliiga – näitab mitu korda saab akut tühjaks ja täis laadida ⁴

Elektriauto – elektri jõul liikuv auto, mis talletab elektrienergia akudes

Energiatihedus – akumulaatoreid iseloomustav parameeter, mis näitab, kui palju energiat on üks või teine aku võimeline salvestama sama massi või ruumala juures (ehk seadme või eseme energiamahuvuse ja massi suhe)

DOD ehk *depth of discharge* (tühjakslaadumise sügavus) – näitab, kui tühi on aku (100% – täiesti tühi, 0% – täiesti täis)

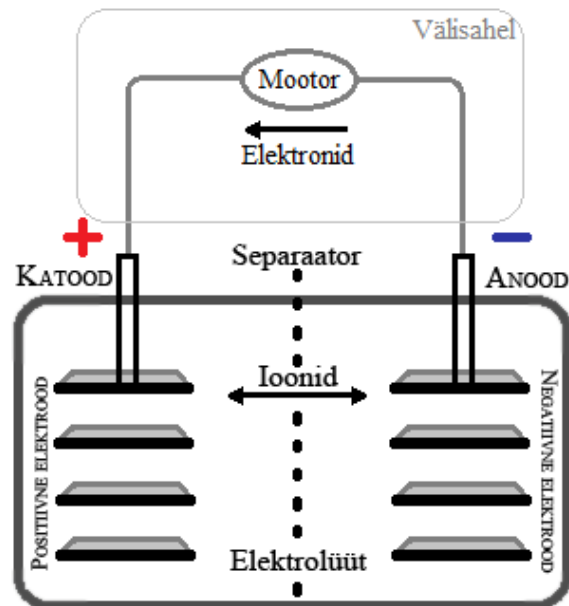
Eri tüüpi akude ehitused alluvad sarnasele skemaatilisele mudelile ja tänu sellele saab akude tööpõhimõtet mudelil kujutada. Elektrivooluga saab tööle panna erinevaid seadmeid (nt antud olukorras elektrimootori). Elektrivool on suunatud laetud osakeste, korrapärane liikumine toimub elektrivälja jõudude mõjul. Laetud osakesteks võivad olla vabad elektronid, positiivsed ja negatiivsed ioonid.

¹ VE 2002 *sub* akumulaator

² EKSS *sub* akupatarei

³ EKSS *sub* galvaanielement

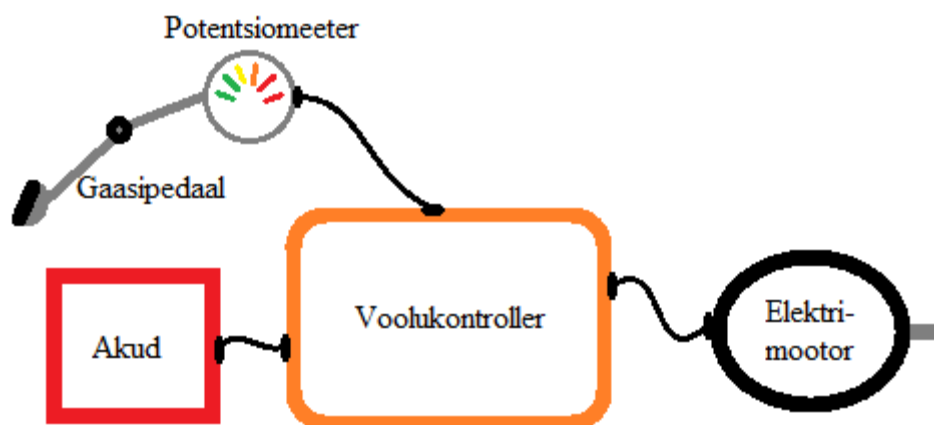
⁴ Energiaallikas: akupatarei



Joonis 1. Aku skemaatiline mudel

Aku osad

1. Positiivne elektrood – oksiid, sulfiid või mõni muu ühend, millel toimub taandamine elemendi tühenemisel. Positiivne elektrood saab elektrone välisahelast elemendi tühenemise ajal. Elektroodi materjalid on tahkised.⁴
2. Negatiivne elektrood – metall või sulam, mis võib oksüdeeruda elemendi tühenemisel. Negatiivne elektrood genereerib elektrone välisahelasse elemendi tühenemisel. Negatiivse elektroodi materjalid on samuti tahkiskujul patarei elemendi sees.⁴
3. Elektrolüüt – keskkond, mis tagabioonjuhtivuse elemendi positiivse ja negatiivse elektroodi vahel. Elektrolüüt peab hästi juhtima ioone, mis võtavad osa elektroodreaktsioonidest, kuid ta peab olema mittejuht elektronidele, et vältida patareide isetühenemist. Elektrolüüt võib olla vedelik, geel või tahke materjal. Elektrolüüt võib olla sõltuvalt patarei liigist happeline või leeliseline.⁴
4. Separaator – elektriliselt isoleeriva materjali kiht, mis eraldab füüsiliselt erineva polaarsusega elektroode. Separaatorid peavad olema läbitavad elektrolüüdi ionidele ja neil võib olla ka elektrolüüdi hoidmise või immobiliseerimise funktsioon. Tänapäeva separaatorid on valmistatud sünteetilisest polümeeridest.⁴



Joonis 2. Elektriauto tööpõhimõte

Üks lihtsamaid reguleeritava sõidukiirusega elektriautosid vajab sõiduks potentsiomeetrit ehk muuttakistit, akusid, voolukontrollerit ja elektrimootorit (vt joonis 2. Elektriauto tööpõhimõte). Potentsiomeeter kontrollib gaasipedaali asendit ja vastavalt potentsiomeetri asendile saadab voolukontroller mootorile sobivas koguses voolu mootorile. Kontroller saab voolu akudelt.⁵

Kontroller töötab kui väga kiire lüliti – et sõiduk liiguks vajaliku kiirusega saadab kontroller mootorile vooluimpulsse. Näiteks kui pedaal on 25% alla vajutatud, siis 25% liikumise ajast saab mootor voolu juurde ja 75% pöörleb inertsist. Kontrolleri nõ lülitused toimuvad väga kiiresti (rohkem kui 15000 korda sekundis) – niiviisi ei tunne inimene lülitusi ja mootor töötab justkui sujuvalt.⁵

1. PLIIAKU – HAPPEAKU

Pliiakku (Pb-aku) leiutas prantsuse füüsik Gaston Planté 1859. aastal ning pliiakust sai esimene elektriakumulaator. Pliiakud on laialdaselt kasutuses autode startermootorite käitamisel.

Tabel 1.1. Pliiakude omadused

| | |
|--------------------------|-------------------------------|
| Erienergia | 30–40 Wh/kg ⁶ |
| Tsükliiga <i>DOD</i> 80% | 500–600 tsükliit ⁶ |
| Eri võimsus | 280 W/kg ⁶ |
| Isetühjenemise kiirus | 3%–20% kuus ⁷ |
| Hind aku mahtuvuse kohta | 80–100 €/kWh ⁶ |

⁵ Marshall, B. How Electric Cars Work (<http://auto.howstuffworks.com/electric-car2.htm>)

⁶ Thompson, M. T. Generic battery technology comparison.

⁷ Sivaram, A. Lead Acid is the cheapest battery: *Conditions Apply.

| | |
|------------------|---|
| Mõju keskkonnale | Pliiaku sisaldab väävelhapet ja pliidi, mis on looduskahjulikud, kuid taaskasutades on pliiaku loodussäästlik. ⁶ |
|------------------|---|

1.1. PLIIAKU AJALUGU

1859. aastal ehitas Planté ekperimendi käigus akumulaatori, mis suutis energiat säilitada. Aku esimene mudel koosnes riideribaga teineteisest eraldatud ja rulli keeratud pliilehest, mis olid asetatud väävelhappega täidetud anumasse.⁸

Edasise arengu käigus on plii ja happe kokkupuutepindu suurendatud, et saavutada suurem mahtuvus. 1881. aastal leiutas prantsuse füüsik Camille Alphonse Faure pliilehtede asendamiseks pliivõrgu-pliipasta konstruktsiooni. Kokkupuutepinna suurendamiseks võttis C. Faure riskülikukujulise pliivõrgu, mille täitis punasest pliist ja 33-protsendilisest väävelhappe lahusest pastaga.⁸ Kaasajal kasutatakse pliiakude tootmisel C. Faure'i väljatöötatud konstruktsiooni.⁸

1.2. PLIIAKUDE EELISED KASUTAMISEL ELEKTRIAUODEL

Esmaostul on pliiakud odavad.⁷ (vt tabel 1.1. Pliiakude omadused) Pliiaku isetühjeneb aeglaselt (3%–20% kuus⁷).

Pliiakud on loodussäästlikud, kui neis olevat pliidi taaskasutada. (USA-s taaskasutatakse üle 97% pliiakudest pärit pliist.)⁷

Pliiakudel on väga suur võimalik voolutugevus ning tänu sellele kõrge erivõimsus, mida saab hästi ära kasutada elektrisõiduki kiirendamisel, mil elektrimootorid tarbivad palju energiat.

1.3. PLIIAKUDE PUUDUSED ELEKTRIAUODEL KASUTAMISEL

Pliiakude laadimistsüklite arv sõltub sellest, kui madalaks aku laadumistase kasutamisel langetatakse (e kui suur on *DOD*). Aku tühjenemisel plaadid (pliivõrgu-pliipasta plaadid) suurenevad, sest plii ja pliidioksiid reageerivad väävelhappega ja muutuvad plii(II)sulfaadiks. Laadumisel toimub vastupidine protsess ja plaadid muutuvad väiksemaks. Plaatide suuruste muutudes eraldub võrkudesse pressitud pasta ja settib aku kesta põhja. Lõpuks puutub pliiisete plaatidega kokku ja aku element lühistub.⁷

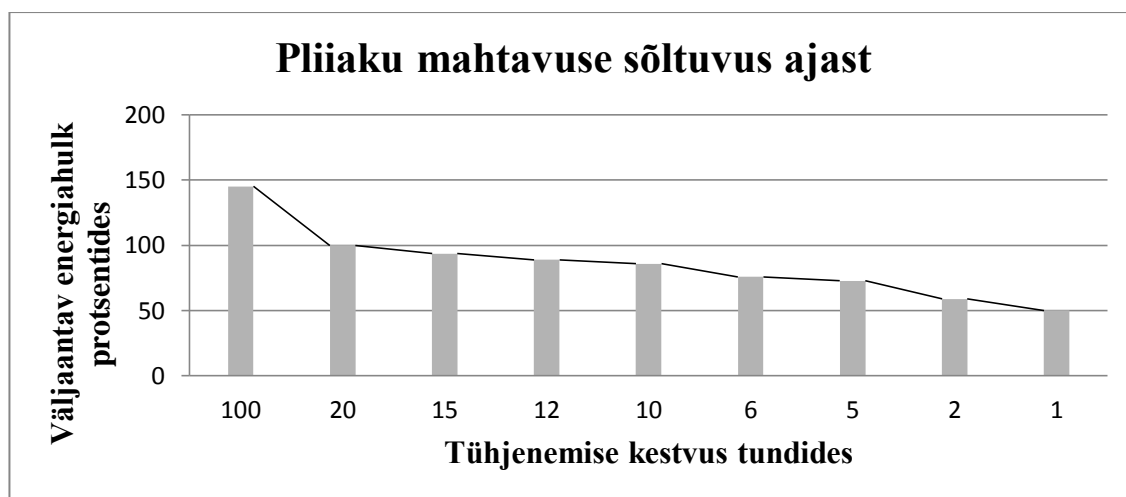
⁸ Roberge, P. R. Gaston Planté (1834–1889).

Optimaalne laadimistsüklite arv ei tohiks *DOD*-s olla suurem kui 80% – see tagaks umbes 600 laadimistsüklit. Kui elektriautoga läbida pikki vahemaid ja sõita akud 100% tühjaks, saab pliiakusid laadida vaid umbes 300 korda, kuid laadimistsüklite arv on praktikas tõenäoliselt väiksem (vt lisa 2. Pliiaku laadimistsüklite arvu sõltuvus *DOD* suurusest). Pikas perspektiivis on pliiakud kallid, eriti siis kui aku igal kasutamisel täiesti tühjaks laadub, sest pliiakudel on võrdlemisi lühike tsükliiga ja seetõttu tuleb pliiakusid tihti uute vastu vahetada.

Pliiakude puhul on oht, et nad lekivad väävelhapet. Väävelhape on söövitava toimega tugev hape ja seetõttu väga ohtlik.

Pliiakud on rasked. Suure massi tõttu on pliiakudel väike energiatihedus. Võrreldes Li-ion-akudega on pliiakude energiatihedus 4–5,3 korda väiksem. Kui Nissan Leaf kasutaks Li-ion-akude asemel massilt sama palju pliiakusid, siis oleks Leafi läbivus 70–170 km asemel umbes 18–45 km. (vt lisa 1. Akude võrdlustabel)

Pliiaku mahtuvus sõltub sellest, kui kiiresti seda tühjaks laetakse. Mida suurem on voolutugevus, seda väiksem on mahtuvus – Peukerti seadus.⁷



Graafik 1.1. Pliiaku mahtavuse sõltuvus ajast⁷

Kasutades pliiakusid elektriautol, kaotab pliiaku suure hulga enda energiast, sest sõiduki vedamisel tühjeneb aku kiiresti. Kui aku tühjeneks kahe tunniga, läheks teoorias kaotsi umbes 40% energiast.

1.4. VENTIILREGULEERITAVAD PLIIAKUD

Ventiilreguleeritavad pliiakud (edaspidi VRLA-akud) on suletud akud, milles tekkinud hapnik ja vesinik suures osas veeks tagasi rekombineerub. Kui akus tekib ülerõhk, eraldub gaas ventiili kaudu väliskeskkonda. VRLA-akudes on happeline elektrolüüt

immutatud separaatorisse, mis takistab happelist elektrolüüti akust välja voolamast, tänu millele on VRLA-akud ohutumad kui tavalised pliiakud. Elektrolüüt võib olla ka geeljas olekus.⁷

1.5. JÄRELDUSED

Arvestades pliiakude väikest mahtuvust ja asjaolu, et pliiakude tsüklicat töstmiseks ei tohi kogu aku mahtuvusest kasutusse võtta, sobiksid pliiakud elektrisõidukitele, mis ei pea pikki vahemaid läbima – näiteks laosõidukitesse või ka odavatesse linnasõiduks mõeldud elektriautodesse.

Pliiakude suur mass ja ruumala võivad kaasa tuua raskusi akude vahetustanklates, sest suurt ja rasket akut on keerulisem auto külge ohutult kinnitada, jättes aku samal ajal hõlpsasti eemaldatavaks.

1.6. PLIIAKUDEGA ELEKTRIAUTOD

1.6.1. 1901 Columbia Electric Runabout



Pilt 1.6.1. 1901 Columbia Electric Runabout⁹

Tabel 1.6.1. 1901 Columbia Electric Runabouti tehnilised andmed⁹

| | |
|--------------------|-----------------------------------|
| Maksimaalne kiirus | 45 km/h |
| Läbivus | 72 km |
| Akude tüüp | Pliiakud |
| Väljalaskeaasta | 1901 |
| Algne müügihind | \$650 (Tänapäeval umbes 13800 €)* |

| | |
|------------------|--------|
| Istekohti | 2 |
| Tühimass akudega | 545 kg |
| Laadimisaeg | 1 öö |

Pope Manufacturing Company alustas jalgrataste tootmist 1877. aastal. Tehases kasutati mitmeid innovatiivseid leiutisi – näiteks kuullaagreid. 1896. aastani oli Pope Manufacturing Company suurim jalgrataste tootja Ameerika Ühendriikides.⁹

Albert Augustus Pope (Pope Manufacturing Company juht ja rajaja) otsustas alles loodava autotööstusega liituda ning ostis ja lõi mitmeid uusi tehaseid, mis tegelesid autondusega. 1897. aastal ehitas Pope Manufacturing Company esimese elektriauto ning kahe aasta möödudes ehitati veel umbes 500 sõiduautot. 1899. aastal eraldus elektriautode divisjon Pope Manufacturing Companyst ja alguse sai Columbia Automobile Company.⁹

Columbia Automobile Company elektrisõidukitest odavaim oli Columbia Electric Runabout. Auto meenutas välimuselt hobusetä tõi, mida juhiti juhthoova (roolipinni) abil (vt pilt 1.4.1. 1901 Columbia Electric Runabout). Auto rataste veljed olid puust, porikaitsmed tehti nahast. Ülekandeks kasutati ketti, mis oli põhimõtteliselt ainuke lärmi tegev auto osa. Ülekandeketi ja mootori vahel oli veel käigukast, millel oli kolm edasikäiku ja kaks tagasikäiku. 20 pliiakupatäreid paigutati auto raami peale laiali, et autot paremini tasakaalustada. Sõiduki pidurid olid varustatud kelladega, mis helisesid, kui auto oli täielikult peatunud.⁹

Columbia Automobile Company lõpetas mootorsõidukite tootmise 1912. aastal.⁹

⁹ Vaughan , D. 1901 Columbia Electric.

* Arvestatud USD väärtuse langust

1.6.2. General Motors EV1 (I generatsioon)



Pilt 1.6.2. General Motors EV1 ¹⁰

Tabel 1.6.2. General Motors EV1 (I generatsioon) tehnilised andmed

| | |
|--------------------|--|
| Maksimaalne kiirus | 130 km/h ¹⁰ |
| Läbivus | Tegelikes tingimustes 70–90 km, Ideaaltingimustes 130–160 km ¹¹ |
| Akude tüüp | Ventiilreguleeritavad pliiakud ¹¹ |
| Väljalaskeaasta | 1997 ¹¹ |
| Algne müügihind | \$33,995 (Tänapäeval umbes 37500 € *) ¹² Mitte ühtegi EV1 ei müüdnud – neid renditi. ¹² |
| Istekohti | 2 ¹² |
| Tühimass akudega | 1350 kg (Millest 594 kg moodustavad akud.) ¹² |
| Laadimisaeg | 3 h ¹² |

General Motorsi EV1 oli üle pika aja esimene masstootetav elektriauto (ajavahemikus 1920ndad kuni 1980ndad olid masstootmises vaid sise põlemismootoriga sõidua autod). Ajavahemikus 1996-1999 toodeti kokku 1117 EV1. ¹¹

¹⁰ Cogan, R. 20 Truths About the GM EV1 Electric Car.

¹¹ Paine, C. Who Killed The Electric Car? (Film).

¹² Keebler, J., Bartlett, J. General Motors EV1–Drivingimpression.

* Arvestatud USD väärtuse langust

2003. aastal hakkas General Motors EV1-d tagasi nõudma ning hävitas suurema osa neist autodest. Ühe teooria kohaselt ostis General Motors elektrisõidukid tagasi, et mitte ohustada naftatööstust.^{10,11}

EV1 oli väga kõrgtehnoloogiline:^{10,13}

- 1) auto oli vihmapiisakujuline, et saavutada võimalikult kõrge aerodünaamilisus. EV1 oli tootmise ajal parima aerodünaamikaga sõiduauto (vt pilt 1.4.2. General Motors EV1);
- 2) EV1 laadimisjuhtmel kasutati ohutuse pärast metallklemmide asemel magneetilist induktsiooni, mis aitas vältida elektrilöögi ohtu, kui laadimisseade ja auto olid märjad;
- 3) sõiduk oli väga kerge – pliiakudega 1350 kg, millest 594 kg moodustasid akud.

EV1 oli varustatud ka kahe indikaatoriga, mis aitasid akude energiataset ja sõiduki läbivust määrata. Üks indikaator näitas, kui palju energiat juht hetkel tarbib ja teine näitas, kui pika vahemaa sõiduk veel läbida saab, kuid arvestas seejuures juhi eelnevaid sõiduharjumusi (st kui palju juht elektrimootorit ja akusid koormas).^{11,13}

EV1 ei olnud sõites täiesti hääletu – mootori müra küll puudus, kuid autosse kostus rehvimüra. Sõiduk oli varustatud 137 hobujõulise elektrimootoriga, mis tagas kiirenduse 0–100 km/h kaheksa sekundiga.^{12,13}

2. NIKKELAKUD – LEELISAKUD

2.1. NIKKEL-KAADMIUMAKU

2.1.1. Nikkel-kaadmiumaku ajalugu

1899. aastal leiutas rootsi füüsik Waldemar Jungner nikkel-kaadmiumakumulaatori (edaspidi NiCd-aku). NiCd-aku suurim konkurent sel ajal oli pliiaku, kuid W. Jungner arendas NiCd-tehnoloogiat edasi ning NiCd-aku mahtuvus suurenes ja ületas pliiaku oma.¹⁴

21. sajandi alguses NiCd-akude hinnad langesid, tuntus kasvas ning NiCd-akusid hakati laialdasemalt kasutama ka elektriautodel. Sel ajal olid NiCd-akude eelised pliiakude ees suurem energiatihedus ja pikem tsükliiga, kuid suureks miinuseks peeti

¹³ Posner, M. 1997 General Motors EV-1 Review.

¹⁴ History of battery invention and development.

mürgist kaadmiumit – ohtlikku raskemetalli. Hiljem NiCd-akude populaarsus langes ning kasutusele võeti uuemat tüüpi akud, eelkõige NiMH-akud tänu nende suuremale erienergiale ning loodussõbralikkusele.¹⁵

Tabel 2.1.1. NiCd-akude omadused¹⁶

| | |
|--------------------------|--|
| Erienergia | 40–80 Wh/kg |
| Tsükliiga DOD 100% | 1200–2000 tsükliit |
| Eri võimsus | 150 W/kg |
| Isetühjenemise kiirus | 20% kuus |
| Hind aku mahtuvuse kohta | 250–350 €/kWh |
| Mõju keskkonnale | Kaadmium on mürgine metall ja seetõttu ei ole NiCd-akud loodussõbralikud |

2.1.2. Nikkel-kaadmiumakude eelised elektriautodel kasutamisel

NiCd-akut saab kasutada nii väga madalatel kui ka väga kõrgetel temperatuuridel – vahemikus –40 kuni +60 °C. NiCd-akut on võimalik laadida madalatel temperatuuridel.¹⁴

NiCd-aku täislaadimiseks kulub umbes tund. NiCd-aku erineb teistest akudest selle poolest, et NiCd eelistab kiiret laadimist aeglasele laadimisele.¹⁴ NiCd-aku on võimalik täis laadida ka umbes 15 minutiga.¹⁷

NiCd-aku tsükliiga on pikk (NiCd-akul on palju võimalikke laadimistsükleid), mis tähendaks, et akusid ei tule kuigi tihti vahetada. NiCd-aku on üks odavamaid akusid, kui võrrelda akude hinna ja tsüklika suhet.¹⁴

NiCd-akut pliikuga võrreldes on NiCd-aku erienergia umbes kaks korda suurem ning erivõimsuse suhe on vaid natuke väiksem.¹⁷ Elektriautode akude suurem erienergia võimaldab elektriautodel saavutada suuremaid läbivusi.

2.1.3. Nikkel-kaadmiumakude puudused kasutamisel elektriautol

NiCd-aku on soovitatav täiesti tühjaks laadida ja alles siis täislaadimist alustada – vastasel juhul ilmneb NiCd-akudel n-ö mälu efekt. „Kui NiCd-akut ei laeta lõpuni täis ega tühjendata päris tühjaks, jätab aku meelde, kui palju temalt energiat küsiti, ja

¹⁵ Electric Car. The Basics.

¹⁶ What's the Best Battery?.

¹⁷ Jaanus, M. Akude tüübid.

mahtuvus väheneb.“¹⁸ Mahtuvuse vähenemise põhjuseks on aku elektrodidele suurte kristallide moodustumine, mis pärsvad akus toimuvaid keemilisi protsesse.¹⁴

NiCd-akud isetühjenevad kiiresti – kuu aja jooksul kaotab aku umbes 20% energiast. Kõrge isetühjenemine tähendaks seda, et kui elektriauto on kaua kasutamata seisnud, ei saa seda enne laadimist uuesti kasutada, sest akud on tühjaks läinud.¹⁴

NiCd-aku erienergia on Li-ion-aku omast 2–4 korda väiksem. Kui Nissan Leaf kasutaks Li-ion-akude asemel massilt sama palju NiCd-akusid, siis oleks Leafi läbivus 70–170 km asemel umbes 35–85 km. (Vt lisa 1. Akude võrdlustabel)

2.1.4. Järeldused

Pidades silmas NiCd-akude pikka tsükliiga, ei ole NiCd-akud kallid – esialgse võrdlemisi kõrge hinna viiks alla NiCd-akude laialdasem kasutamine. Kuna NiCd-akude mahtuvus on suurem kui pliiakude oma, kuid jäädes siiski alla uutele tehnoloogiatele, leiaks NiCd-akud rakendust lühimaasõidukitel.

Kaadmium on mürgine metall – selle metalli tolmu sissehingamine võib põhjustada erinevaid haigusi, näiteks vähki. Euroopa Liidus on kaadmiumi kasutamisele seatud mitmeid piiranguid, mis raskendavad tootmisprotsessi.

2.2. NIKKEL-RAUDAKU

2.2.1. Nikkel-raudaku ajalugu

Waldemar Jungner tegi nikkelakudega edasisi katsetusi ning asendas kaadmiumi rauaga – tulemuseks oli odavam, kuid väiksema mahtuvusega aku, mistõttu W. Jungner loobus nikkel-raudakude (edaspidi NiFe-aku) edasiarendamisest. 1901. aastal töötas Ameerika Ühendriikide leiutaja Thomas Alva Edison samuti välja NiFe-aku ja hakkas neid kasutama elektriautodel, kusjuures väitis, et NiFe-akud on „palju paremad kui akud, mis kasutavad pliiplaate ja hapet“ (pliiakud).¹⁸

Tabel 2.2.1. NiFe-akude omadused¹⁶

| | |
|-----------------------|--|
| Erienergia | 30–50 Wh/kg |
| Tsükliiga | Kahjustub tühjakslaadimisel vähesel määral |
| Erivõimsus | 100 W/kg |
| Isetühjenemise kiirus | 30% kuus |

¹⁸ Soutar, I. Edison's Nickel-iron Battery.

| | |
|--------------------------|---|
| Hind aku mahtuvuse kohta | 80–100 €/kWh |
| Mõju keskkonnale | Loodussõbralikum kui NiCd, sest ei sisalda raskemetalle |

2.2.2. Nikkel-raudakude eelised kasutamisel elektriautol

NiFe-akud on võrdlemisi odavad ning erinevalt NiCd-akudest ei sisalda NiFe-akud raskemetalle ja on tänu sellele loodussõbralikumad.¹⁶

NiFe-aku eluiga on pikem kui pliiakudel ning erinevalt pliiakudest NiFe-akud tühjakslaadumisel oluliselt ei kahjustu. NiFe-aku on väga vastupidav väärkasutamisele (ülelaadimisele, ületühjenemisele, lühistamisele) ja rasketele koormustele, mistõttu sobiks NiFe-aku ideaalselt elektriautodele¹⁸ (vt lisa 1. Akude võrdlustabel).

NiFe-akude hooldamisvajadus on minimaalne – säilitada tuleb aku veetase. Selleks peab aeg-ajalt lisama destilleeritud vett. T. Edison soovitas ka iga 5–10 aasta tagant akude elektrolüüt uue vastu vahetada.¹⁹

2.2.3. Nikkel-raudakude puudused kasutamisel elektriautol

NiFe-aku isetühjeneb väga kiiresti – kuu jooksul 30%, st et nädala jooksul umbes 7,5%.¹⁴

NiFe-aku erienergia on Li-ion-aku omast 3,2–5,3 korda väiksem. Kui Nissan Leaf kasutaks Li-ion-akude asemel massilt sama palju NiFe-akusid, siis oleks Leafi läbivus 70–170 km asemel umbes 20–50 km (vt lisa 1. Akude võrdlustabel).

2.2.4. Järeldused

Kuna NiFe-aku tehnilised omadused on pliiaku omadega peaaegu kõigis aspektides samaväärsed või paremad – vaid erivõimsus on väiksem, siis leiaks NiFe-aku samuti rakendust lühikeste vahemaade läbimiseks mõeldud elektrisõidukitel – näiteks laosõidukitesse või ka odavatesse linnaelektriautodesse, seda muidugi eeldusel, et NiFe-akul jagub säärase otstarbe jaoks võimsust.

NiFe-aku ei sisalda mürgiseid raskemetalle, mis tõenäoliselt aitaks tootmiskulud madalal hoida. Tänu väga pikale tsüklicale on NiFe-aku pikas perspektiivis odavam

¹⁹ Association of Edison Illuminating Companies. Manual on Storage Battery Practise.

kui pliiaaku. NiFe-aku mahtuvus võrreldes kaasaegsemate tehnoloogiatega on aga siiski väga madal.

2.3. NIKKEL-METALLHÜDRIIDAKU

2.3.1. Nikkel-metallhüdriidaku ajalugu

Uurimistöö nikkel-metallhüdriidakudega (edaspidi NiMH-aku) algas 1970ndatel, kui nikkel-vesinikakut loodeti metallhüdriiditehnoloogiaga täiustada – muutes akud kompaktsemaks. Willems ja Buschow demonstreerisid 1987. aastal akut, mis hoidis 84% oma laadimismahust pärast 4000 laadimise ja tühjenemise tsükli. Selle aku koostisse kuulus $\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_{2.5}\text{Co}_{2.4}\text{Si}_{0.1}$. Peagi arendati välja ökonoomsemad sulamid, mis kasutasid lantaani asemel leelismetalle. Tänapäeval kasutuselolevad NiMH-akud põhinevad viimatinimetatud tehnoloogial.²⁰

Tabel 2.3.1. NiMH-akude omadused

| | |
|--------------------------|--|
| Erienergia | 60–120 Wh/kg ¹⁴ |
| Tsükliiga DOD 100% | 500–1000 tsükli ¹⁴ |
| Eri võimsus | 250 W/kg ¹⁴ |
| Isetühjenemise kiirus | 30% kuus ¹⁴ |
| Hind aku mahtuvuse kohta | 500–800 €/kWh ²¹ |
| Mõju keskkonnale | Loodussõbralikum kui NiCd-aku – sisaldab vähemmürgiseid komponente ²¹ |

2.3.2. Nikkel-metallhüdriidakude eelised kasutamisel elektriautol

NiMH-aku energiatihedus on üle 40% kõrgem kui NiCd-akude energiatihedus (vt lisa 1. Akude võrdlustabel). NiMH-aku edasise arendustööga on võimalik saavutada veel kõrgem erienergia.¹⁴

NiMH-akude n-õ mäluefkti mõju on väiksem kui NiCd-akudel, st et NiMH-akut ei pea nii tihti täiesti tühjaks laadima.¹⁴

2.3.3. Nikkel-metallhüdriidakude puudused kasutamisel elektriautol

NiMH-aku vajab perioodiliselt täiesti tühjaks laadimist – vältimaks elektrodidele kristallide tekkimist, kuid teistel juhtudel eelistab NiMH-aku laadimist, kui aku ei ole

²⁰ R & D OF HYDROGEN ABSORBING ALLOYS IN JAPAN.

²¹ Aksen, J. Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008

täiesti tühi. NiMH-aku mahtuvus väheneb kiiresti pärast 200–300 laadimistsükli, eriti siis kui akut tühjendada suurte koormustega.¹⁴ NiMH-aku isetühjeneb kiiremini kui NiCd-aku¹ (vt lisa 1. Akude võrdlustabel).

NiMH-akud on kallid¹⁴ – võrreldes NiCd-akudega umbes kaks korda kallimad, kuid mahutavad massi kohta umbes kaks korda rohkem energiat.

NiMH-aku erienergia on natuke väiksem kui Li-ion-akul – umbes 1,3 kuni 2,6 korda väiksem. Kui Nissan Leaf kasutaks Li-ion-akude asemel massilt sama palju NiFe-akusid, siis oleks Leafi läbivus 70–170 km asemel umbes 50-130 km (vt lisa 1. Akude võrdlustabel).

NiMH-aku laadimine võtab rohkem aega kui NiCd-aku laadimine. NiMH-aku kiirlaadimiseks kulub umbes 2–4 tundi. NiMH-aku eraldab laadimisel palju soojust ning vajab keerulist laadimisalgoritmi, et akut üle ei laetaks.¹⁴

2.3.4. Järeldused

NiMH-aku mahtuvus on kordades suurem pliiaku ja teistest nikkelakude omadest, küündides väiksema mahtuvusega Li-ion-akudeni. NiMH-aku suurim konkurent ongi tõenäoliselt Li-ion-aku, sest Li-ion-aku hind ei ole oluliselt kõrgem NiMH-aku omast, nende tsükliaad on ligikaudu võrdsed (NiMH-aku oma on natuke pikem), kuid Li-ion-aku mahtuvus on märksa suurem.

NiMH-aku võiks leida rakendust pikamaasõidukina, näiteks linnadevaheliste vahemaade läbimiseks – eriti siis, kui kasutada akuvahetustanklaid. NiMH-aku võib Li-ion-akule tõsisemat konkurentsi pakkuda, kui NiMH-aku hind langeks (näiteks NiMH-aku laialdasemal kasutamisel) või kui NiMH-akut edasi arendada ja selle mahtuvust tõsta.

Võrdväärselt hästi saaks NiMH-akut kasutada pliiaku, NiMH-, NiFe- ja NiCd-akude asemel – kuigi esialgne hind on NiMH-akul kõrge, siis pikk tsükliiga võib selle ajapikku osaliselt korvata ja samas võimaldab suur erienergia sõiduki massi kokku hoida, mis omakorda tagaks energiakokkuhoiu.

2.4. NIKKELAKUDEGA ELEKTRIAUTOD

2.4.1. Nikkel-raudakudega elektriauto – Detroit Electric 1914



Pilt 2.4.1. Detroit Electric 1914²²

Tabel 2.4.1. Detroit Electric 1914 tehnilised andmed

| | |
|--------------------|---|
| Maksimaalne kiirus | 32 km/h ¹⁴ |
| Läbivus | 100–130 km (rekord: 340,1 km) – NiFe-akudega ¹⁴ |
| Akude tüüp | Pliiakud (lisatasu \$600 eest NiFe-akud) ¹⁴ |
| Väljalaskeaasta | 1914 ¹⁴ |
| Algne müügihind | \$3130 + \$600 ²² (Tänapäeval umbes 33 000 € + 6 300 €)* |
| Istekohti | 4 ¹⁴ |
| Tühimass akudega | 1650 kg ²² |
| Laadimisaeg | 8 h ²² |

Anderson Carriage Company alustas kaarikute tootmist 1884. aastal. 1885. aastal kolis tehas Detroiti. Nähes autonduse arengut, hakkas 1907. aastal Andersoni Carriage Company tootma Detroit Electric elektriautosid. Esimesel aastal toodeti 125 elektriautot, kuid kolme aasta pärast juba 1500 autot, rekordtoodang saavutati 1914. aastal, kui aastast ehitati 4669 elektriautot. 1911. aastal vahetas firma nime – uueks nimeks sai Anderson Electric Car Company, 1919. aastal muudeti nimi Detroit Electricuks.²²

Detroit Electric autode põhilised ostjad olid jõukad naised ja arstid, sest tolleaegsed sisepõlemismootorid vajasid vändast käivitamist, ei olnud nii puhtad ning

²² Barr, J. 1916 Detroit Electric.

* Arvestatud USD väärtuse langust

vajasid rohkem remonti. Firma Detroit Electric tööjuht palkas firmasse tööle oma tütre just sellepärast, et tütar tutvustaks ja müüks elektriautosid nais klientidele.¹⁴

Detroit Electric elektriautode läbivust väideti selle müügireklaamis olevat 80 miili ehk umbes 130 km, praktikas oli läbivus siiski umbes 100 km. Rekordiliselt läbis auto 211,3 miili ehk umbes 340,1 km. Suur läbivus saavutati tänu NiFe-akudele ja kaasaja mõistes madalale tippkiirusele – 32 km/h, kuid 20. sajandi alguses peeti sellist kiirust linnaliikluses piisavaks.¹⁴

Detroit Electric on olnud paljude tuntud inimeste igapäevasõiduk, näiteks Thomas Edisoni ja Clara Fordi, Henry Fordi naise.²²

Seoses sisepõlemismootoriga autode võidukäiguga esitas Detroit Electric 1929. aastal pankrotiavalduse.¹⁴

2.4.2. Nikkel-metallhüdriidakudega elektriauto – General Motors EV1 (II generatsioon)

Tabel 2.4.2. General Motors EV1 (II generatsioon) tehnilised andmed²³

| | |
|--------------------|---|
| Maksimaalne kiirus | 130 km/h |
| Läbivus | 160–220 km |
| Akude tüüp | NiMH-akud |
| Väljalaskeaasta | 1999 |
| Algne müügihind | Mitte ühtegi EV1 ei müüdnud – neid renditi. Kuurendihind varieerus \$349 kuni \$574. |
| Istekohti | 2 |
| Tühimass akudega | 1292 kg (Millest 520 kg moodustavad akud.) |
| Laadimisaeg | 6 h |

EV1 II generatsioon erines I generatsiooni omast akude poolest – pliiakud vahetati NiMH-akude vastu, mis parandas oluliselt elektriauto läbivust. Maanteel oli EV1 II generatsiooni läbivus 160–220 km, karmides mägistes oludes 120–160 km.²³

EV1 sõiduomadusest, auto eripäradest ja indikaatoritest loe lisa 1.5.2. General Motors EV1 (I generatsioon).

²³ GM Corporation. EV1 Specifications.

3. LIITIUM-IOONAKU

Liitium on kõige väiksema tihedusega metall ja nagu kõik leelismetallid, on ka liitium keemiliselt väga aktiivne. Tänu nendele omadustele sobib liitium akudesse ja patareidesse teoreetiliselt väga hästi.²⁴

Li-ion-akude eluea, hinna ning mahtuvuse määravad nendes kasutatavad tehnoloogiad. Elektroonikaseadmetes on laialdaselt levinud liitiumkoobaltoksiid, mis pakub kõrget erieneergiat, kuid on ohtlikum kui teised tehnoloogiad. Liitiumraudfosfaat-, liitiummangaanoksiid- ja liitiumnikkel-mangaankoobaltoksiid-tehnoloogia pakuvad väiksemat mahtuvust, kuid on pikema elueaga ja tagavad suurema ohutuse. Elektriautodel kasutatakse kõige tihedamini liitiumnikkel-mangaankoobaltoksiidtehnoloogiat.²⁵

3.1. LIITIUM-IOONAKUDE AJALUGU

Esimest liitiumakut tutvustas 1970. aastal M. S. Whittingham Binghamtoni ülikoolist. Selle aku katood oli titaaniumsulfiid ja anood metalliline liitium. 1980. aastal töötas Rachid Yazam välja liitiumaku, milles liitium asus grafiidi osakeste vahel. Esimeste liitiumakudega, mis sisaldasid metallilist liitiumit, kaasnesid ohutusprobleemid.²⁶

Ohutusprobleemide vältimiseks hakati välja töötama akusid, mis kasutaksid metallilise liitiumi asemel materjale, mis sisaldaksid liitium-ioone. 1991. aastal lasi Sony esimesena müüki liitium-ioonaku (edaspidi Li-ion-aku). Sony Li-ion-aku kasutas elektroodina liitiumkoobaltoksiidi. Liitiumkoobaltoksiidi kasutusvõimaluse elektroodina avastas John B. Goodenoughi uurimisrühm 1980. aastal.^{27,28}

Tabel 3.1. Liitium-ioonakude omadused

| Li-ion-akude omadused | |
|-----------------------|---------------------------------|
| Erienergia | 100–220 Wh/kg ²⁹ |
| Tsükliiga DOD 100% | 300–500 tsüklit |
| Tsükliiga DOD 50% | 1200–1500 tsüklit ³⁰ |

²⁴ In search of the perfect battery.

²⁵ HEV Vehicle Battery Types.

²⁶ Delaney, D. History of Lithium Ion Batteries.

²⁷ Brodd, R. J. Comments on the History of Lithium-Ion Batteries

²⁸ History of lithium batteries.

²⁹ Lithium-Ion.

| | |
|--|---|
| Erivõimsus | 250–340 W/kg ²⁹ |
| Isetühjenemise kiirus 21 °C / 40 °C juures | 8% kuus / 15% kuus ³¹ |
| Hind aku mahtuvuse kohta | 500–900 €/kWh ³² |
| Mõju keskkonnale | Kahjulik mõju loodusele on vähene ³³ |

Li-ion-aku tsüklika pikendamiseks on soovitatav seda mitte 100% täis laadida (vt Lisa 3 Liitium-ioonaku tsüklika pikendamine).

3.2. Liitium-ioonakude eelised kasutamisel elektriautol

Võrreldes NiMH-akut Li-ion-akudega selgub, et Li-ion-akude energiatihedus on umbes kaks korda suurem. Suurem energiatihedus võimaldab elektriautol vähem akusid kasutada, mis tähendaks hinna- ning massikokkuvõidu. Li-ion-akude tehnoloogia on veel arengukäigus, st et loodetakse saavutada veel kõrgemaid energiatihedusi.³⁴

Erinevalt NiMH ja NiCd-akudest ei ole Li-ion-akudel mälu efekti, st et elektriauto kasutaja peab akude eluea pikendamise pärast vähem muretsema. Nikkelakudega võrreldes on Li-ion-akude isetühjenemine kordades väiksem.³⁵

Li-ion-akudel on kõrge erivõimsus, mis võimaldab akul toime tulla suurema energiatarbimisega (näiteks siis kui elektriauto kiirendab).

3.3. Liitium-ioonakude puudused elektriautodel kasutamisel

Li-ion-akude tootmine on kallis (40% kallim kui NiCd-akude tootmine).³⁴

Li-ion-aku vajab kaitsekiipi, mis ei lase akut ületühjeneda, ülelaadida ega ülekuumeneda. Ületühjenemise, ülelaadimise ning ülekuumenemise korral võib Li-ion-aku plahvatada.³⁴

3.4. Liitiumpolümeeraku

Liitiumpolümeeraku (edaspidi LiPo-aku) arendustöö algas 1970ndatel. LiPo-aku erineb Li-ion-akust sellepoolest, et vedel elektrolüüt on asendatud tahke või geelitaolise elektrolüüdiga.³⁴

³⁰ How to Prolong Lithium-based Batteries.

³¹ Abea, H. jt. Vapor-grown carbon fiber anode...

³² Electric Car Battery Cost.

³³ Study Finds Environmental Impact of Li-ion Battery for BEVs is Relatively Small.

³⁴ Is Lithium-ion the Ideal Battery?.

LiPo-akul on Li-ion-aku ees mitu eelist: LiPo-aku kuju võib vastavalt vajadusele varieeruda; LiPo-aku on kergem; LiPo-aku on ohutum kui Li-ion-aku, sest LiPo-aku on ülelaadimisele vastupidavam ja elektrolüüdi lekkimise tõenäosus on väiksem.³⁴

Li-ion-aku eelised LiPo-aku ees on pikem tsükliiga, odavus, kõrgem energiatihedus.³⁴

3.5. LIITIUM-METALL- JA LIITIUM-IOONAKUDE EDASINE ARENDUSTÖÖ

3.5.1. Liitium-metallaku

Liitium-metallaku (edaspidi Li-metallaku) erineb tavalisest liitium-ioonakust selle poolest, et liitium-metallakus kasutatakse metallilist liitiumit. Moli Energy oli esimene firma, mis masstootis Li-metallakusid, kuid firma oli sunnitud akud tagasi ostma, sest need olid ohtlikud. 2010. aastal testiti Li-metallakusid uuesti, kuid kasutati liitiummetallpolümeertehnoloogiat; akude energiatihedus oli 300 Wh/kg, kuid säilisid ohutusprobleemid.³⁵

3.5.2. Liitium-õhkaku

Liitium-õhkaku (edaspidi Li-õhkaku) võib teoreetiliselt saavutada energiatiheduse 1300 Wh/kg. Li-õhkakus kasutatakse anoodina liitiummetalli ja katoodina õhku. Õhk on pea kõikjal kättesaadav, mis tähendaks, et seda ei ole vaja akus kinni hoida. Li-õhkaku vajaks töötamiseks õhupumpa, et akut õhuga varustada ja kuna liitium võib veega kokkupuutel süttida, tuleb akusse sissepumbatavat õhku veeaurust puhastada. Õhupump ning õhupuhastaja tarbiksid mõlemad energiat ning oleksid lisaraskuseks, kuid katoodi ei pea Li-õhkakus kaasas kandma, mis hoiaks massi ja ruumi kokku.³⁶

3.5.3. Liitium-räniaku

Liitium-räniaku (edaspidi Li-Si-aku) võib teoreetiliselt saavutada energiatiheduse 550 Wh/kg kohta. Hetkel on Li-Si-akude probleemiks vähene laadimistsükliite arv (umbes 40–50 tsükliit) ning aku ebastabiilsused kõrgetel temperatuuridel. Alates 2007. aastast teevad Standfordi insenerid katseid Li-Si-akude ja nanotraatidega ning saavad lubavaid tulemusi. Li-Si-aku on loodussõbralik – räni on Maa üks põhielemente.³⁵

³⁵ Weird and Wonderful Batteries.

³⁶ Wang, U. Why the lithium air battery is over hyped.

3.5.4. Räni-süsinikliitanoodaku

Räni-süsinikliitanood tehnoloogia võimaldab Li-ion-aku mahtuvust tõsta kuni kümme korda, hoides tootmiskulusid madalad ning aku ohutu. Tehnoloogia probleem on väike laadimistsüklite arv.^{35,37}

3.6. JÄRELDUSED

Tänu kõrgele erienergiale, erivõimsusele ja vähesele keskkonnamõjule on liitiumakud hetkel ühed sobilikumad akud elektrisõidukitele – nii linnasõiduks kui ka linnadevaheliseks sõiduks. Akuvahetustanklaid kasutatakse juba Li-ion-akudega elektriautode puhul (Euroopas Taanis ja Hollandis). Liitiumaku tsükliiga saab pikendada akut mitte täiesti tühjaks ega täiesti täis laadides, st ohverdades natuke aku mahtuvusest.

Liitiumakude puudusena tuleb meeles pidada plahvatusohtu (näiteks ülekuumenemisel), mistõttu võib autol vaja minna akude jaoks jahutussüsteemi – see tarbiks aga lisaenergiat, tõstaks sõiduki massi ja suurendaks tootmiskulusid.

Tuleviku liitiumakude teoreetilised mahtuvused on märkimisväärselt suured, küündides nii kõrgele, et võimaldaksid elektriautodel sisepõlemismootoriga autodega võrdväärset (või suuremat) läbivust ja kasutamismugavust.

3.7. LIITIUM-IOONAKUDEGA ELEKTRIAUTOD

3.7.1. Nissan Leaf



*Pilt 3.7.1. Nissan Leaf*³⁸

³⁷ Fellman, M., Ostman, S. Better Batteries: New Technology Improves Both Energy Capacity and Charge Rate in Rechargeable Batteries.

Tabel 3.7.1. Nissan Leafi tehnilised andmed

| | |
|--------------------|---|
| Maksimaalne kiirus | 145 km/h ^{39,40} |
| Läbivus | Kõrge koormus: 72 km Linnaoludes: 169 km ⁴⁰ |
| Akude tüüp | Lamineeritud Li-ion-akud ⁴¹ |
| Väljalaskeaasta | 2010 ⁴¹ |
| Müügihind | 39900 €. Riiklik toetus Eestis eraisikule 18000 € ⁴¹ |
| Istekohti | 5 ⁴¹ |
| Tühimass akudega | 1531 kg (millest 300 kg moodustavad akud) ⁴¹ |
| Laadimisaeg | Kiirlaadija: 30 minutit Kodulaadija 16-amprine: 8 tundi Autos olev 10-amprine laadija: 12 tundi ⁴¹ |

Nissan Leaf on viiekseline luukpäraga elektriauto, mis lasti tootmisse 2010. aastal. Nimi Leaf on akronüüm: *Leading Environmentally-friendly Affordable Family car* (Juhtiv keskkonnasõbralik taskukohane pereauto).⁴²

Nissan Leafil on 80 kW (u 110 hj) elektrimootor, mis tagab kiirenduse 0–100 km/h umbes 9 sekundiga⁴³. Leafi akude kogumahtuvus on 24 kWh ning akupatareisüsteem koosneb 192 õhkjahutusega Li-ion-akust – iga energiatihedus 140 Wh/kg. Akudelt loodetakse, et see säilitab 70%–80% oma mahtuvusest 10 aasta jooksul, kuid akude eluiga mõjutavad mitmed tegurid: see, kui tihti kasutatakse kiirlaadijat, kliima, sõidustiil.⁴⁴ Leafi akupatareisüsteemil kehtib garantii – akude eluiga peab olema vähemalt 8 aastat ja 160000 km.⁴⁵

Nissan soovib Leafi omanikel akude elua pikendamiseks järgida järgmisi reegleid:⁴⁰

- 1) vältida sõiduki jätmist kõrgemate temperatuuride kui 49 °C kätte üle 24 tunni;
- 2) vältida sõiduki jätmist madalamate temperatuuride kui –25 °C kätte üle 7 päeva;

³⁸ Nissan LEAF unveiled.

³⁹ Loveday, E. Nissan pegs Leaf range between 47 and 138 miles, individual results may vary.

⁴⁰ Nissan Leafi infoleht. Tehnilised andmed.

⁴¹ Nissan Leafi infoleht. Hind.

⁴² Nissan delivers first Leaf in San Francisco

⁴³ Loveday, E. WSJ: Nissan Leaf profitable by year three; battery cost closer to \$18,000.

⁴⁴ Taylor A. Nissan's Leaf up close.

⁴⁵ Nissan to Warranty LEAF Battery for 8 Years, 100,000 Miles.

- 3) vältida aku laaditavustaseme 70%–80% ületamist, kui kasutate kiirlaadijat tihedamini kui kord nädalas;
- 4) laske auto akude laaditavustase langeda alla 80%, enne kui akusid laadima hakkate;
- 5) vältige auto seismajätmist kauemaks kui 14 päeva, kui akud on tühjad või peaaegu tühjad.

„Elektriautoga sõitmine on väga odav. Näiteks kulutab Nissan Leaf kogu sõiduulatus, st 175 km läbimiseks ligikaudu 30 kWh. Kui laadite akut odavamal öisel ajal, siis kulutate selle vahemaa läbimiseks ainult 2 €.“⁴⁰

Nissan Leaf on varustatud kaht tüüpi pidurisüsteemiga: mehaaniline (tavaline) pidurisüsteem ning energiat salvestav pidurisüsteem. Energiasalvestava süsteemi abil talletatakse auto liikumisenergia pidurdamisel akudesse. Akude eluea pikendamiseks ei laeta aga Leafi akusid täiesti täis ning see tähendab, et energiasalvestav pidurisüsteem rakendatakse vaid siis, kui akud on jõudnud piisavalt madala laaditavustasemeni.⁴⁴

Nissan Leafil ei ole sisepõlemismootorit, millelt eralduva soojuste abil sõitjateruumi soojendada. Sõitjateruumi soojendamiseks on Leafil 5 kW elektriline soojendaja, kuid alates 2012. aastast on Leafi standardvarustuses roolisoojendi ning soojendusega esimesed ja tagumised istmed. Istmesoojenduste eelis sõitjateruumi soojenduse ees on see, et istmesoojendajad kulutavad vähem energiat, mis omakorda tagab Leafile enne aku tühjaks saamist pikema sõidu.⁴⁰

3.7.2. Tesla Roadster



Pilt 3.7.2. Tesla Roadster⁴⁶

Tabel 3.7.2. Tesla Roadsteri tehnilised andmed

| | |
|----------------------|---|
| Maksimaalne kiirus | 201 km/h ⁴⁷ |
| Läbivus | Linnaoludes: 372 km Maantee: 360 km Kõrge koormus: u 140 km ⁴⁸ |
| Akude tüüp | Li-ion-akud ⁴⁷ |
| Väljalaskeaasta | 2008 ⁴⁷ |
| Baasmudeli müügihind | 84000 € ⁴⁹ |
| Istekohti | 2 ⁴⁶ |
| Tühimass akudega | 1220 kg (millest akud moodustavad 450 kg) ⁴⁷ |
| Laadimisaeg | Kodulaadija (240 volti, 70 amprit): 4 tundi (u 90 km tunnis) Kaasaskantav laadija (120–240 volti, 40A): 6 tundi (u 51 km tunnis) ⁵⁰ |

Tesla Motors on 2003. aastal rajatud firma, mis töötab välja, toodab ning müüb elektriautosid ja elektriautode osi.⁵¹ „Firma nimekaimuks on geniaalne Nikolai Tesla – leiutaja, elektriinsener ja teadlane.“⁵²

Tesla Motorsi esimeseks toodetavaks sõidukiks oli Tesla Roadster – tollel ajal ainuke masstootmises olev elektriauto, mille läbivus oli üle 200 miili (u 320 km). Tesla Roadsteril on 185 kW (248 hp) võimsusega õhkjahutusega elektrimootor, mis kaalub vähem kui 32 kg. Mootori keskmiseks efektiivsuseks on 90%. Tesla Roadsteril on üks edasikäik. Auto kiirendab 0–100 km/h 3,9 sekundiga.^{53,54}

Tesla Roadsteri *Energy Storage System* ehk ESS (Energia Hoiustamise Süsteem / akupatareidesüsteem) koosneb 6831 Li-ion 18650 tüüpi akust, mida kasutatakse sülearvutite akudes. ESS on vedelikjahutusega, kusjuures vedelikupump töötab siis, kui sõiduk töötab ja ka siis, kui sõiduk seisab, aga akud on üle 90% täis laetud.

⁴⁶ Tuning Up the Tesla Roadster.

⁴⁷ Roadster. Features and Specs.

⁴⁸ Abuelsamid ,S. So whats the downside to the Tesla Roadster? The range!.

⁴⁹ Roadster. Price.

⁵⁰ Roadster. Charging.

⁵¹ About Tesla.

⁵² Why the Name "Tesla"?

⁵³ Tuning Up the Tesla Roadster.

⁵⁴ How the Tesla Roadster Works.

Täiesti täis laetud *ESS* mahutab 53 kWh energiat. Tesla Motors väitis 2009. aastal, et uus *ESS* maksab alla 29000 €. *ESS*-i loodetav eluiga on 7 aastat või 160000 km, säilitades 70% esialgsest mahtuvusest.^{55,56}

Tesla Roadster on sportauto – seda kinnitab fakt, et Roadster on ehitatud Lotus Elise kerele (Lotus Elise on kaheukseline, keskmootoriga sportauto). Elise kerelt on eemaldatud mootor, kütusepaak ja väljalaskesüsteem, sisustus on muudetud luksuslikumaks, kere on tugevdatud ning autole on lisatud uus elektrisüsteem, akud ja elektrimootor. Võrreldes Elisega on Roadsteri juhitavus suurema massi (u 312 kg raskem) tõttu küll halvem, kuid Roadsteril on parem kiirendus ja võimsam mootor.^{53,57}

KOKKUVÕTE

1896. aastal ühe legendi kohaselt andis Thomas Edison õhtusöögil oma sõbrale Henry Fordile märkmekese, millel oli kirjas, et elektriauto on surnud. Usun, et edasise elektriautode ja akude arendustööga ning nafta hinna tõusuga muutuvad elektriautod kasutajasõbralikumaks, praktilisemaks ja populaarsemaks.

Elektriautode väikese läbivuse ja akude pikkade laadimisaegade tõttu ei ole elektriauto nii praktiline kui sise põlemismootoriga auto, kuid läbivust saab tõsta, suurendades akude mahtuvust. Tulevikus võib Li-ion-akudega või liitiumakudega või meile senitundmatu aku tüübiga elektriauto läbivus olla sise põlemismootoriga autoga võrdväärne.

Pikkade laadimisaegade probleemi lahendamiseks on leiutatud kiirlaadimispunktid, mis lühendavad aku eluiga, kuid vajadusel laevad aku mõnekümne minutiga täis. Ettevõtte Better Place pakub enda elektriautode tanklates akuvahetusteenust, mis väidetavalt toimub kiiremini kui tavalise sõiduauto tankimine.

Elektriautode populaarsuse kasv ja suurem nõudlus tooks kaasa ka elektriautode laiema tootmise, mis omakorda langetaks elektriautode hindu ja muudaks need kättesaadavamaks. Kui elektriauto ostuhind on kõrge, siis ehk kompenseerivad selle väiksemad ülalpidamiskulud, kuid puudusena säilib ebapraktilisus (väikese läbivuse tõttu) ning kuna Euroopa akuvahetustanklad asuvad Taanis ja Hollandis, siis Eestis

⁵⁵ Eberhard, M. Lotus Position.

⁵⁶ Toomre, E. The Most Coddled Automotive Battery Ever?.

⁵⁷ 2010 Tesla Roadster vs 2010 Lotus Elise.

sobivad elektriautod hetkel vaid lühikeste vahemaade läbimiseks, näiteks sõitudeks kodust tööle ja töölt koju.

Et muuta elektriautod tanklate infrastruktuurist vähem sõltuvaks, on vaja suurendada elektriautode läbivust, tõstes akude mahtuvust ja elektriautode efektiivsust.

Vanim aku on Pb-aku, mille suurim eelis on odavus, kuid puudusteks väike erienergia (4–5 korda väiksem kui Li-ion-akudel) ja happelise elektrolüüdi lekkeoht. Võrreldes Pb-akut NiFe-akuga selgub, et neil on vaatamata erinevale konstruktsioonile peaaegu võrdne erienergia ja hind. NiFe-aku suurimaks eeliseks Pb-aku ees on pikk tsükliiga. Nikkelakudest uusimad on NiMH-akud, mis erienergia poolest ei pruugi palju alla jääda Li-ion-akudele, kuid NiMH-akud isetühjenevad kiiresti ja NiMH-aku mahtuvus väheneb kiiresti pärast 200–300 laadimistsükli, eriti siis, kui akut tühjendada suurte koormustega.

Liitiumakude edasise arendustööga võidakse akude erienergiat mitmekordistada. Kui kaasaegsete Li-ion-akude erienergia on 100–220 Wh/kg, siis Li-metallakudega on teoreetiliselt võimalik saavutada erienergia 300 Wh/kg, Li-Si-akudega 550 Wh/kg ning Li-õhkakudega 1300 Wh/kg. Li-õhkakude teoreetiline erienergia on pea 10 korda suurem kui kaasaegsete Li-ion-akude erienergia ning tõenäoliselt võimaldaksid Li-õhkakud elektriautodel saavutada sisepeõlemismootoritega autodega võrreldes võrdväärseid läbivusi.

Akude mahtuvuse suurenemist on näha, võrreldes 20. sajandi alguse elektriautot (1901 Columbia Electric Runabout) ja 20. sajandi lõpu elektriautot (I generatsioon GM EV1), mis mõlemad kasutavad pliiakusid. Selgub, et vaatamata sarnasele läbivusele on uuemal autol lühem laadimisaeg, üle kolme korra suurem tippkiirus ja rohkem ohutusvarustust. Võimalik, et General Motors kutsus tagasi ja hävitas peaaegu kõik EV1-d, et mitte ohustada naftatööstust.

Riikliku toetusega on Nissan Leaf üks soodsamaid elektriautosid, mis linnaoludes peaks suutma ühe laadimisega läbida üle 150 km. Nissan Leafil on võrdlemisi luksuslik standardvarustus: alates 2012. aastast on Leafil standardvarustusena kaasas rooli- ja istmesoojendaja, sest sõitjateruumis oleva õhu soojendamine kulutab rohkem energiat kui rooli ja istmete soojendamine.

KASUTATUD MATERJALID

1. A r o , R . Väike entsüklopeedia 2002. Tln: Eesti Entsüklopeediakirjastus 2001
2. - 3. E e s t i K e e l e I n s t i t u u t , Eesti keele seletav sõnaraamat 2009. Kättesaadav: <http://www.eki.ee/dict/ekss/> (21.07.2013)
4. Energiaallikas: akupatarei. Kättesaadav: http://www.eope.ee/_download/euni_repository/file/2234/htmlismaterjal.zip/akud.html (21.08.2012)
5. M a r s h a l l , B . How Electric Cars Work. Kättesaadav: <http://auto.howstuffworks.com/electric-car2.htm> (20.07.2013)
6. T h o m p s o n , M . T . Generic battery technology comparison. Kättesaadav: <http://www.madkatz.com/ev/batteryTechnologyComparison.html> (09.07.2012)
7. S i v a r a m , A . Lead Acid is the cheapest battery: *Conditions Apply. Kättesaadav: <http://saurorja.org/2011/08/30/lead-acid-is-the-cheapest-battery-conditions-apply/> (09.07.2012)
8. R o b e r g e , P . R . Gaston Planté (1834-1889). Kättesaadav: <http://www.corrosion-doctors.org/Biographies/PlantelBio.htm> (09.07.2012)
9. V a u g h a n , D . 1901 Columbia Electric. Kättesaadav: <http://www.conceptcarz.com/vehicle/z16165/Columbia-Electric.aspx> (09.07.2012)
10. C o g a n , R . 20 Truths About the GM EV1 Electric Car. Kättesaadav: <http://www.greencar.com/articles/20-truths-gm-ev1-electric-car.php> (10.07.2012)
11. P a i n e , C . Who Killed The Electric Car? (Film). United States: Plinyminor 2006
12. K e e b l e r , J . , B a r t l e t t , J . General Motors EV1–Drivingimpression. Kättesaadav: http://www.motortrend.com/auto_news/112_9606_general_motors_ev1/viewall.html (10.07.2012)
13. P o s n e r , M . 1997 General Motors EV-1 Review. Kättesaadav: <http://www.thetruthaboutcars.com/2008/07/1997-general-motors-ev-1-review/> (10.07.2012)
14. History of battery invention and development. Kättesaadav: <http://www.allaboutbatteries.com/history-of-batteries.html> (11.07.2012)
15. Electric Car. The Basics. Kättesaadav: <http://thesmartdrive.com/electric-vehicles/> (11.07.2012)
16. J a a n u s , M . Akude tüübid. Kättesaadav: <http://www.arvutikasutaja.ee/artikkel.php?lk=3&id=245> (11.07.2012)

17. What's the Best Battery?. Kättesaadav:
http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery
(11.07.2012)
18. S o u t a r , I. Edison's Nickel-iron Battery. Kättesaadav: <http://www.nickel-iron-battery.com/> (11.07.2012)
19. Association of Edison Illuminating Companies. Manual on Storage Battery Practise. Kättesaadav:
[http://ironedison.com/images/products/Iron%20Edison/Edison%20Manual%20of%20Storage%20Battery%20Practice%20\(c\)%201914_.pdf](http://ironedison.com/images/products/Iron%20Edison/Edison%20Manual%20of%20Storage%20Battery%20Practice%20(c)%201914_.pdf) (11.07.2012)
20. R & D OF HYDROGEN ABSORBING ALLOYS IN JAPAN. Kättesaadav:
<http://www.amse.org.cn/EN/abstract/abstract13633.shtml> (12.07.2012)
21. A x s e n , J. Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008. Kättesaadav:
<http://tinyurl.com/k2hupe4> (11.07.2012)
22. B a r r , J. 1916 Detroit Electric. Kättesaadav:
http://www.forneymuseum.org/FE_Detroit_Electric.html (12.07.2012)
23. 1914 Detroit Electric. Kättesaadav:
http://remarkablevehicles.com/index.php?title=1914_Detroit_Electric
(12.07.2012)
24. GM Corporation. EV1 Specifications. Kättesaadav:
http://www.evchargernews.com/CD-A/gm_ev1_web_site/specs/specs_specs.htm (12.07.2012)
25. In search of the perfect battery. Kättesaadav:
http://www.mitenergyclub.org/assets/2009/9/25/Economist_Batteries2008.pdf
(22.07.2012)
26. HEV Vehicle Battery Types. Kättesaadav:
<http://www.thermoanalytics.com/support/publications/batterytypesdoc.html>
(22.07.2012)
27. D e l a n e y , D. History of Lithium Ion Batteries. Kättesaadav:
<http://ezinearticles.com/?History-of-Lithium-Ion-Batteries&id=3965011>
(22.07.2012)
28. B r o d d , R. J. Comments on the History of Lithium-Ion Batteries
Kättesaadav: <http://www.electrochem.org/dl/ma/201/pdfs/0259.pdf>
(22.07.2012)
29. History of lithium batteries. Kättesaadav:
<http://www.lithiumindustry.com/42/history-of-lithium-batteries/> (22.07.2012)
30. Lithium-Ion. Kättesaadav: <http://www.panasonic.com/industrial/batteries-oem/oem/lithium-ion.aspx> (25.07.2012)
31. How to Prolong Lithium-based Batteries. Kättesaadav:
http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries
(25.07.2012)

32. A b e a , H. jt. Vapor-grown carbon fiber anode for cylindrical lithium ion rechargeable batteries. Kättesaadav: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877539800158X> (25.07.2012)
33. Electric Car Battery Cost. Kättesaadav: http://www.evscroll.com/Electric_Car_Battery_Cost.html (25.07.2012)
34. Study Finds Environmental Impact of Li-ion Battery for BEVs is Relatively Small. Kättesaadav: <http://www.greencarcongress.com/2010/08/notter-20100810.html> (25.07.2012)
35. Is Lithium-ion the Ideal Battery?. Kättesaadav: http://batteryuniversity.com/learn/article/is_lithium_ion_the_ideal_battery (25.07.2012)
36. Weird and Wonderful Batteries. Kättesaadav: http://batteryuniversity.com/learn/article/weird_and_wonderful_batteries (27.07.2012)
37. W a n g , U. Why the lithium air battery is over hyped. Kättesaadav: <http://gigaom.com/cleantech/why-the-lithium-air-battery-is-over-hyped/> (27.07.2012)
38. F e l l m a n , M., O s t m a n , S. Better Batteries: New Technology Improves Both Energy Capacity and Charge Rate in Rechargeable Batteries. Kättesaadav: <http://www.sciencedaily.com/releases/2011/11/111114142047.htm> (27.07.2012)
39. Nissan LEAF unveiled. Kättesaadav: <http://www.ubergizmo.com/2009/08/nissan-leaf-unveiled/> (01.08.2012)
40. L o v e d a y , E. Nissan pegs Leaf range between 47 and 138 miles, individual results may vary. Kättesaadav: <http://green.autoblog.com/2010/06/14/nissan-pegs-leaf-range-between-47-and-138-miles-individual-resu/> (01.08.2012)
41. Nissan Leafi infoleht. Tehnilised andmed. Kättesaadav: <http://www.nissan.ee/EE/et/vehicles/electricvehicles/leaf/charging-and-autonomy/lithium-ion-battery.html#vehicles/electricvehicles/leaf/pricing-and-specifications/specifications> (01.08.2012)
42. Nissan Leafi infoleht. Hind. Kättesaadav: <http://www.nissan.ee/EE/et/vehicles/electricvehicles/leaf/charging-and-autonomy/lithium-ion-battery.html#vehicles/electricvehicles/leaf/pricing-and-specifications/prices-and-government-incentives> (01.08.2012)
43. Nissan delivers first Leaf in San Francisco. Kättesaadav: <http://www.independent.co.uk/life-style/motoring/nissan-delivers-first-leaf-in-san-francisco-2160208.html> (01.08.2012)
44. L o v e d a y , E. WSJ: Nissan Leaf profitable by year three; battery cost closer to \$18,000. Kättesaadav: <http://green.autoblog.com/2010/05/15/nissan-leaf-profitable-by-year-three-battery-cost-closer-to-18/> (01.08.2012)

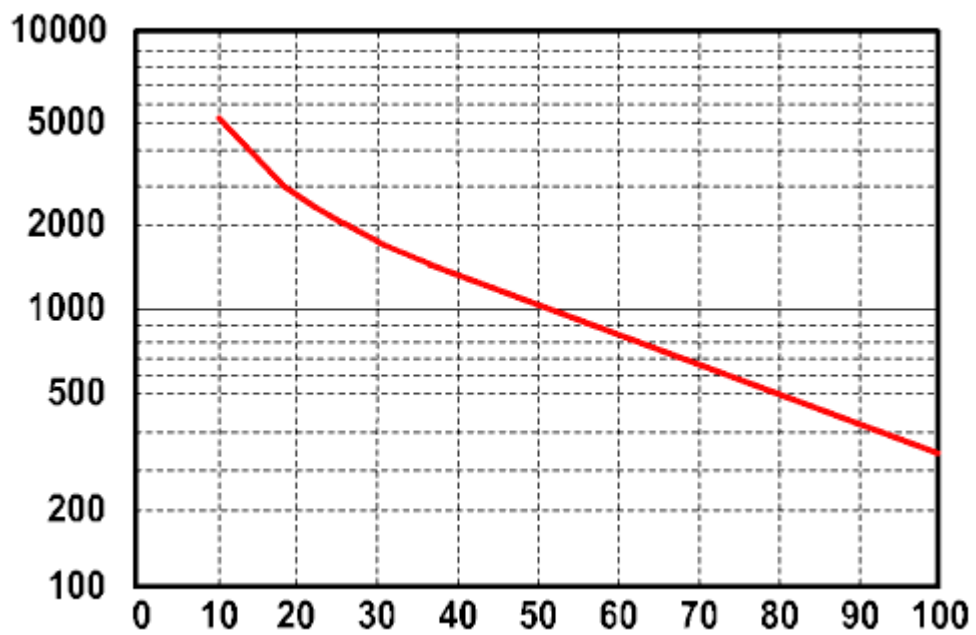
45. T a y l o r , A. Nissan's Leaf up close. Kättesaadav: http://money.cnn.com/galleries/2010/fortune/1002/gallery.nissan_leaf.fortune/index.html (01.08.2012)
46. Nissan to Warranty LEAF Battery for 8 Years, 100,000 Miles. Kättesaadav: <http://www.greencarcongress.com/2010/07/nissan-to-warranty-leaf-battery-for-8-years-100000-miles-.html#more> (01.08.2012)
47. Nissan Leafi infoleht. Kättesaadav: <http://www.nissan-techinfo.com/refgh0v/og/Leaf/2011-Nissan-Leaf.pdf> (01.08.2012)
48. Nissan Leafi infoleht. Kokkuhoid. Kättesaadav: <http://www.nissan.ee/EE/et/vehicles/electric-vehicles/electric-leaf/leaf.html#vehicles/electric-vehicles/electric-leaf/leaf/pricing-and-specifications/cost-savings> (01.08.2012)
49. D y k e s , A. L. Review: A Week In A 2012 Nissan Leaf. Kättesaadav: <http://www.thetruthaboutcars.com/2012/02/review-a-week-in-a-2012-nissan-leaf/> (01.08.2012)
50. Tuning Up the Tesla Roadster. Kättesaadav: <http://www.finesttech.com/cars/tuning-up-the-tesla-roadster-story-by-brabus/> (06.08.2012)
51. Roadster. Features and Specs. Kättesaadav: <http://www.teslamotors.com/roadster/specs> (06.08.2012)
52. A b u e l s a m i d , S. So whats the downside to the Tesla Roadster? The range!. Kättesaadav: <http://green.autoblog.com/2008/01/29/so-whats-the-downside-to-the-tesla-roadster-the-range/> (06.08.2012)
53. Roadster. Price. Kättesaadav: <http://www.teslamotors.com/buy/buyshowroom.php> (06.08.2012)
54. Roadster. Charging. Kättesaadav: <http://www.teslamotors.com/roadster/charging> (06.08.2012)
55. About Tesla. Kättesaadav: <http://www.teslamotors.com/about> (07.08.2012)
56. Why the Name "Tesla"?. Kättesaadav: http://web.archive.org/web/20071016044752/http://www.teslamotors.com/learn_more/why_tesla.php (07.08.2012)
57. How the Tesla Roadster Works. Kättesaadav: <http://auto.howstuffworks.com/tesla-roadster.htm/printable> (07.08.2012)
58. E b e r h a r d , M. Lotus Position. Kättesaadav: <http://www.teslamotors.com/blog/lotus-position> (07.08.2012)
59. T o o m r e , E. The Most Coddled Automotive Battery Ever?. Kättesaadav: <http://www.teslamotors.com/blog/most-coddled-automotive-battery-ever> (21.08.2012)
60. 2010 Tesla Roadster vs 2010 Lotus Elise. Kättesaadav: <http://www.autorivals.net/supercars/2010roadstervs2010elise/2010roadstervs2010elise.htm> (21.08.2012)

LISAD

Lisa 1. Akude võrdlustabel

| Omadus | Pliiaku | NiCd-aku | NiFe-aku | NiMH-aku | Li-ion-aku |
|--------------------------------------|--------------------------------------|---|--|--|---|
| Kasutatava prototüübi leiutamisaasta | 1859 | 1899 | 1901 | 1987 | 1991 |
| Erienergia | 30–40 Wh/kg | 40–80 Wh/kg | 30–50 Wh/kg | 60–120 Wh/kg | 100–220 Wh/kg |
| Tsükliiga | 500–600 tsüklit (<i>DOD</i> 80%) | 1200–2000 tsüklit (<i>DOD</i> 100%) | Kahjustub tühjakslaadimisel vähesel määral | 500–1000 tsüklit (<i>DOD</i> 100%) | 300–500 tsüklit (<i>DOD</i> 100%) 1200–1500 tsüklit (<i>DOD</i> 50%) |
| Erivõimsus | 180 W/kg | 150 W/kg | 100 W/kg | 250 W/kg | 250–340 W/kg |
| Isetühjenemise kiirus | 3%–20% kuus | 20% kuus | 30% kuus | 30% kuus | 8%–15% kuus |
| Hind aku mahtuvuse kohta | 80–100 €/kWh | 250–350 €/kWh | 80–100 €/kWh | 500–800 €/kWh | 500–900 €/kWh |

Lisa 2. Pliiaku laadimistsüklite arvu sõltuvus *DOD* suurusest.



*Pliiaku laadimistsüklite arvu sõltuvus *DOD* suurusest.*⁷*

* Vertikaalteljel laadimistsüklite arv, horisontaalteljel keskmine *DOD*.

Lisa 3. Liitium-ioonaku tsükleia pikendamine

Li-ion laadimistsüklite arvu sõltuvus DOD suuruselt ³⁰

| | |
|------------|--|
| <i>DOD</i> | Võimalikke laadimistsükleid (enne kui aku mahtuvus on alla 70% esialgsest) |
| 100% | 300–500 |
| 50% | 1200–1500 |
| 25% | 2000–2500 |
| 10% | 3750–4700 |

Li-ion-aku eluea pikendamiseks on võimalik seda kasutamisel lasta vähem tühjaks laaduda, kuid tasub meeles pidada, et erinevad Li-ion-akud käituvad erinevalt ning et Li-ion-akudel on piiratud laadimistsüklite arv. ³⁰

Li-ion laadimistsüklite arvu sõltuvus Li-ion-aku laadimisharjumustest ³⁰

| | |
|--|--|
| Laaditavustase, mille juures laadimine lõpetatakse | Võimalikke laadimistsükleid (enne kui aku mahtuvus on alla 70% esialgsest) |
| 100% | 300–500 |
| 90% | 600–1000 |
| 70% | 1200–2000 |
| 50% | 2400–4000 |

Li-ion-aku eluea pikendamiseks ei laadita seda 100% täis – akud ja akulaadijad on tavaliselt varustatud elektriskeemiga, mis hoiab laaditavustaseme teatud vahemikus. Vähem täis laetud Li-ion-aku on ühtlasi ka ohutum, sest ülelaetud Li-ion-aku on plahvatusohtlik. ³⁰

Li-ion-aku pikaks ajaks seisma jättes on soovitatav aku laaditavustase hoida 40% lähedal – nii kaotab aku seistes mahtuvusest kõige vähem, kuid tasub meeles pidada, et erinevad Li-ion-akud käituvad erinevalt. ³⁰

Lisa 4. Uurimuses nimetatud elektriautode võrdlustabel

| | 1901 Columbia Electric Runabout | General Motors EV1 (I generatsioon) | Detroit Electric 1914 | General Motors EV1 (II generatsioon) | Nissan Leaf | Tesla Roadster |
|--------------------|----------------------------------|---|--|---|---|---|
| Maksimaalne kiirus | 45 km/h | 130 km/h | 32 km/h | 130 km/h | 145 km/h | 201 km/h |
| Läbivus | 72 km | Tegelikes tingimustes: 70–90 km, ideaaltingimustes 130–160 km | 100–130 km (rekord: 340,1 km)–NiFe-akudega | 160–220 km | Kõrge koormus: 72 km Linnaoludes: 169 km | Linnaoludes: 372 km Maantee: 360 km Kõrge koormus: u 140 km |
| Akude tüüp | Pliiakud | Ventiilreguleeritavad pliiakud | Pliiakud (lisatasu \$600 eest NiFe-akud) | NiMH-akud | Lamineeritud Li-ion-akud | Li-ion-akud |
| Väljalaskeaasta | 1901 | 1997 | 1914 | 1999 | 2010 | 2008 |
| Müügihind | \$650 (Tänapäeval umbes 13800 €) | \$33,995 (Tänapäeval umbes 37500 €) Mitte ühtegi EV1 ei müüdüd – neid renditi. | \$3130 + \$600 (Tänapäeval umbes 33 000 € + 6 300 €) | Mitte ühtegi EV1 ei müüdüd – neid renditi. Kuurent varieerus \$349 kuni \$574. | 39900 €. Riiklik toetus eraisikule 18000 € | 84000 € |
| Istekohti | 2 | 2 | 4 | 2 | 5 | 2 |
| Tühimass akudega | 545 kg | 1350 kg | 1650 kg | 1292 kg | 1531 kg | 1220 kg |
| Laadimisaeg | 1 öö | 3 h | 8 h | 6 h | Kodulaadija (16 A): 8 h | Kaasaskantav laadija (120–240 volti, 40A): 6 h |

