



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HENRI KASURINEN
LITIUMIONIAKUT JA NIIDEN SOVELTAMINEN
KAPASITANSSIMITTARISSA NCM-20

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Erja Sipilä

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö muodostui yli 9 kuukauden mittaiseksi kiviseksi, mutta opettavaiseksi poluksi. Lopputulos ei ollut ihan suunnitellun lainen, mutta olen kuitenkin ylpeä aikaansaannoksestani. Haluaisin ensimmäiseksi kiittää GE GridSolutions Oy:tä tästä mahdollisuudesta ja mielenkiintoisesta aiheesta. Suurkiitos kuuluu myös Tampereen teknillisen yliopiston Sähkökillalle ja PerinneSeuralle erinomaisista opiskelutiloista ja halvasta kahvista. Suuri kiitos myös kaikille ystäväilleni vertaistuesta ja vanhemmilleni asiantuntijapalveluista. Erityiskiitos myös Laura Karintaukselle henkisestä avunannosta projektin synkimpinä hetkinä.

Tampere, 20. toukokuuta 2018

Henri Kasurinen

TIIVISTELMÄ

HENRI KASURINEN: Litiumioniakut ja niiden soveltaminen
kapasitanssimittarissa NCM-20
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 33 sivua, 5 liitesivua
Toukokuu 2017
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Elektroniikka
Tarkastajat: Yliopisto-opettaja Erja Sipilä
Avainsanat: Litiumioniakut, Litium, TexasInstruments, Latauspiiri

Litiumioniakut ovat nyt jo perustavanlaatuinen osa ihmisten jokapäiväistä arkea ja niiden kysyntä kasvaa jatkuvasti sähköautojen ja energianvarastointiin käytettävien akkujen yleistyessä. Litiumioniakkuja valmistetaan monista eri materiaaleista, joilla kaikilla on erilaisia ominaisuuksia. Kaikkien litiumioniakkujen toimintaperiaate on kuitenkin sama: Akkua ladatessa litiumionit liikkuvat elektrolyytin läpi positiiviselta navalta negatiiviselle ja elektronit liikkuvat päinvastaiseen suuntaan. Akun purkautuessa liikesuunnat ovat päinvastaiset. Litiumioniakkujen ensimmäinen käyttökohde olivat matkapuhelimet, joista niiden käyttö levisi muihin kannettaviin laitteisiin, kuten kameroihin ja kannettaviin tietokoneisiin. Matkapuhelimia enemmän kapasiteettia ja tehoa tarvitsevien käyttökohteiden akut koostuvat yksittäisistä soluista kootuista moduuleista, joita voidaan yhdistää akkupaketeiksi. Suuria akkupaketeista koostuvia järjestelmiä, kuten energiavarastoja kutsutaan akustoiksi. Litiumioniakkujen valmistus aiheuttaa kasvihuonepäästöjä epäsuorasti ja suorasti. Eniten kasvihuonepäästöjä aiheutuu suorasti valmistuksen vaiheista, joissa litiumionisoluja lämmitetään. Litiumioniakkujen pitkän käyttöiän ansiosta valmistuksen aiheuttamat kasvihuonepäästöt ovat kuitenkin esimerkiksi autoteollisuudessa merkityksettömiä, kun niitä verrataan polttomoottorillisten autojen koko käyttöaikanaan aiheuttamiin kasvihuonekaasuihin. Työn kokeellisessa osassa selostetaan pienen litiumioniakkupaketin ja sen latauspiirin suunnittelu- ja rakentamisprosessia. Akkupaketit rakennettiin Samsung 18650 litiumionisoluihin ja latauspiirissä käytettiin TexasInstrumentsin valmistamaa BQ24133 latausyksikköä.

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BDU	Akun erotinyksikkö, (Battery Disconnection Unit)
BMS	akustonvalvontajärjestelmä, (Battery Management System)
C-arvo	Akkujen virran ilmaisemiseen tarkoitettu yksikkö
HVIL	Korkeajännitteen lukitus-piiri, (High-Voltage Interlock Loop)
LCO	Litiumnikkelikobolttioksidi
LED	hohtodiodi, (Light Emitting Diode)
LFP	Litiumrautafosfaatti
Li^+	Litiumioni
LMO	Litiummangaanioksidi
LTO	Litiumtitanaatti
NCA	Litiumnikkelikobolttialumiinioksidi
NMC	Litiumnikkelimangaanikobolttioksidi
QFN	Jalaton pakkausmalli (Quad Flat No-leads)
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
u	Atomimassan yksikkö
UPS	Tilapäinen energiavarasto, (Uninterruptible Power Supply)
UV	Ultraviolettisäteily
YK	Yhdistyneet Kansakunnat

SISÄLTÖ

1. Johdanto	1
2. Litiumioniakut	2
2.1 Teoria	2
2.2 Litiumioniakkujen valmistus, sen haasteet ja tulevaisuudennäkymät	7
2.2.1 Litiumioniakkujen valmistus	9
2.3 Käyttö	11
2.3.1 Kannettavat laitteet	11
2.3.2 Ajoneuvot	11
2.3.3 Energian varastointi	12
2.4 Ympäristövaikutukset	13
2.5 Turvallisuus	17
3. Kokeellinen osuus: Kapasitanssimittarin NCM-20 akkupäivitys	19
3.1 TexasInstruments BQ24133	20
3.1.1 BQ24133 asetukset	22
3.2 Suunnittelu	23
3.3 Prototyypin rakentaminen	25
3.3.1 Piirilevyn valmistus	25
3.3.2 Komponenttien kiinnijuottaminen	25
3.4 Testaus	26
3.4.1 Vianmäärittäminen	31
4. Yhteenveto	32
Lähteet	32
LIITE 1. Gerber-tiedostot	34

1. JOHDANTO

Digitalisoituneessa maailmassa elektronisten laitteiden merkitys tehokkaan yhteiskunnan kulmakivenä on jo vakiintunut ja niiden merkitys korostuu jatkuvasti. Elektroniset laitteet ovat siirtyneet ihmisten koteista heidän taskuihinsa ja merkittäväksi osaksi yhteiskunnan infrastruktuuria. Tämän nyky-yhteiskunnan megatrendin kehityksen suurin riippakivi on ollut kannettavien laitteiden energian varastointi. Viimeisten kymmenen vuoden aikana litiumioniakut ovat ottaneet niskalennkkiotteen akkumarkkinoista ja niiden kehitys on ollut viime vuosina rivakkaa. Täysin sähköisen maailman edessä on kuitenkin vielä paljon haasteita, joiden ylittämiseksi tarvitaan koko tieteellisen yhteisön poikkitieteellisiä ponnisteluja.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on luoda lukijalle kattava kuva nykymaailmassa käytettävistä akuista, akkuteollisuudesta ja akkujen käytännön sovelluksista. Työssä keskitytään erityisesti litiumioniakkuihin ja niiden ominaisuuksia tarkastellaan ensin teoriatasolla, jonka jälkeen siirrytään johdonmukaisesti aina käytännönläheisempiin aiheisiin. Ensin käydään läpi litiumioniakkujen valmistuksen ja litiumioniakkujen eri käyttökohteiden erityispiirteitä. Sitten siirrytään käsittelemään akkuteollisuuden ympäristövaikutuksia, sekä muita litiumioniakkujen aiheuttamia yhteiskunnallisia ongelmia. Tämän jälkeen siirrytään kandidaatintyön kokeelliseen osuuteen, jossa selostetaan pienen litiumioniakuston ja sen latauspiirin suunnittelua ja rakentamista. Työn lähteenä on käytetty laajaa kirjoa tieteellisiä julkaisuja, TTY:n kursseja ja niiden materiaaleja, sekä oppikirjoja. Tässä kandidaatintyössä käsitellään monimutkaisia akkujärjestelmiä, joiden eri osista puhutaan seuraavan jaottelun mukaisesti:

- Solu: Akun rakennuselementti, joka on jo itsessään pieni akku.
- Moduuli: Usean solun muodostama kokonaisuus, jossa solut on kytketty tarpeen mukaan sarjaan tai rinnan, jolloin saadaan haluttu kapasiteetti ja jännite.
- Akkupaketti: Koostuu useammasta toisiinsa kytketystä moduulista.
- Akusto: Yksi tai useampi akkupaketti kytkettynä toisiinsa. Käsite kattaa myös jäähdytysjärjestelmän ja kontrollointijärjestelmän. [1]

2. LITIUMIONIAKUT

Ensimmäistä kertaa vuonna 1991 markkinoille tuotujen litiumioniakkujen käyttö ja merkitys kasvavat jatkuvasti eri sähkökäyttöisten tuotteiden ja innovaatioiden yleistyessä. Niiden dominoiva asema akkumarkkinoilla juontaa juurensa markkinoille tuomisen ajoituksen ja niiden erinomaisen suorituskyvyn summaan. 90-luvun alussa kannettavat elektroniset laitteet, kuten puhelimet, kamerat ja kannettavat tietokoneet yleistyivät ja niiden käyttäjäystävällisyys vaati lyijyakkuja kevyemmän ja kapasiteetiltaan suuremman energianlähteen. Litiumioniakut olivat ominaisuuksiltaan juuri sopivia tähän tehtävään ja niiden kehityksen ympärille muodostui kilpailua, joka taas johti teknologian nopeaan kehittymiseen. [1]

Pienempien akkujen, kuten puhelimissa käytettävien litiumioniakkujen, markkinat ovat jo pitkälti saturoituneet, mutta ajoneuvojen energianlähteeksi ja energianvarastointiin tarkoitettujen akustojen markkinat ovat vasta alkaneet kasvaa. [2]

Litiumioniakkujen asema vaikuttaisi olevan tulevaisuudessakin turvattu. Suurin uhkakuva litiumioniakkujen tulevaisuudelle on epävarmuus siitä, pystytäänkö niitä rakentamaan kyllin nopeasti kysynnän kattamiseksi. Lisäksi jotkin tällä hetkellä litiumioniakkujen valmistukseen vaadittavista malmeista ovat kysyntään nähden harvinaisia tai tietyn rajan jälkeen vaikeasti saatavilla. [1]

2.1 Teoria

Litium on jaksollisen järjestelmän kolmas alkuaine ja sen atomimassa on 6,94 u. Täten se on myös kevyin kiinteä alkuaine ja sille on löytynyt käyttökohteita myös akkuteollisuuden ulkopuolella: esimerkiksi Litiumkarbonaattia $LiCo_3$ käytetään masennuslääkkeenä. Litium on erittäin pehmeää ja sen sulamispiste on alhainen. Luonnossa löydettävien isotooppien 6Li ja 7Li esiintyvyys on suurta ja useimmiten löydökset muodostuvat kummankin isotoopin sekoituksesta. [3]

Paristot on yleensä jaoteltu kahteen kategoriaan: primääri- ja sekundääriparistoihin sen mukaan, voidaanko niitä ladata vai ei. Primääriparistoja ei voida ladata, joten ne ovat kertakäyttöisiä ja sellaisia ovat esimerkiksi alkaliparistot. Sekundääriparistot

ovat taas jälleenladattavia paristoja, eli puhekielisesti akkuja. [4]

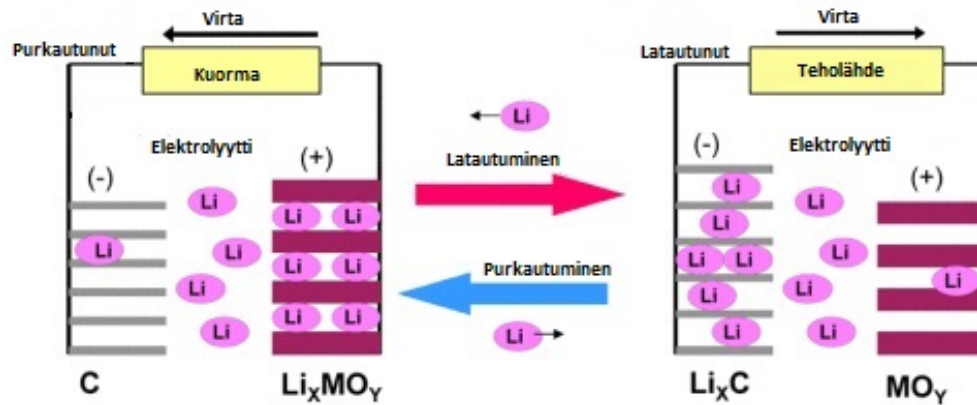
Väyrysen tutkimuksessaan [1] käyttämän määritelmän mukaan akku on laite, johon voidaan varastoida sähköenergiaa muuttamalla se kemialliseksi energiaksi, joka voidaan jälleen muuttaa sähköenergiaksi. Tämä sähkökemiallinen muunnos tapahtuu kahdessa elektrodissa: anodissa ja katodissa.

Akun kapasiteetti mitataan Ampeeritunneissa (Ah) eli käytännössä akkujen kapasiteetti määritellään sen mukaan, kuinka suuren virran akku pystyisi antamaan tunnin ajan. Akkujen sisältämä energia mitataan Wattitunneissa (Wh) ja se määritellään akun kapasiteetin ja sen solujännitteen tulona. [4] Akkujen purkaus- tai latausvirtaa kuvataan useimmiten C-arvon avulla, joka on suure, jolla kuvataan akun virran suhdetta akun kapasiteettiin. C-arvo määritellään virtana, jolla käyttökelpoinen kapasiteetti on käytetty ajan t sisällä akun purkautuessa. Käytännössä C-arvo määritellään aina siten, että aika t on 1 tunti, joten esimerkiksi 1C tarkoittaa virtaa, jolla akku purkautuu yhdessä tunnissa täydestä tyhjäksi tai latautuu tyhjästä täydeksi, 0.5C tarkoittaa vastaavasti virtaa, jolla akku purkautuu 2 tunnissa tyhjäksi tai latautuu täydeksi jne. [2]

Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että paristo koostuu viidestä eri osasta. Katodi on akun positiivinen elektrodi, joka koostuu aktiivisella materiaalilla päällystetystä substraatista. Aktiivinen materiaali on materiaali, joka on sähkökemiallisilta ominaisuuksiltaan halutunlainen. Litiumioniakuissa katodin substraatti on yleensä todella ohut alumiinilevy. Anodi on akun negatiivinen elektrodi ja sen substraattina toimii yleensä kupari. Elektrodien välissä on erotin, joka estää elektrodeja koskemasta toisiinsa ja muodostamasta oikosulun. Nämä kolme osaa on koottu yhteen muodostamaan elektrodiparin, joka on rullattu tai kerrostettu. Pariston neljäs osa on pariston kotelo, joka on yleensä metallinen purkki tai polymeeripussi, jonka sisään elektrodipari asennetaan. Viides osa on elektrolyytti, joka ruiskutetaan kotelon sisään. Elektrolyytti on nestemäinen tai geelimäinen väliaine, jonka läpi ionit voivat liikkua elektrodien välillä. [4]

Akun, eli sekundääripariston teho määrittyy käytettyjen elektrodimateriaalien lisäksi suoraan elektrodien koon mukaan. Akun kapasiteettiin vaikuttaa taas merkittävästi akun aktiivisten materiaalien, eli käytännössä elektrodien, massa ja tilavuus. [1]

Kuva 1 on T. Horiban tutkimuksessaan [2] käyttämä havainnekuva, jossa havainnollistetaan litiumionien ja elektronien liikesuuntaa akun lataus- ja purkaustapah- tumassa. Kuvissa negatiivinen napa on anodi ja positiivinen on katodi.



Kuva 1 Litiumioniakkujen lataus- ja purkaustapahtumat [Muokattu lähteestä 2]

Kuvasta 1 nähdään, että akkua ladatessa positiivinen elektrodi, eli katodi, vapauttaa litiumioneja (Li^+) elektrolyytin kautta negatiiviselle elektrodille eli anodille. Purkautuessa litiumionit liikkuvat vastaavasti päinvastaiseen suuntaan; anodilta katodille. Elektronit liikkuvat vastakkaiseen suuntaan, mutta ne eivät liiku elektrolyytin läpi, vaan ne tarvitsevat johtimen. [2] Tämä on myös reitti, jolle akun kuorma asennetaan ja jossa akun energia saadaan valjastettua.

Elektrolyytti on yleensä nestemäinen tai geelimäinen liuos, joka mahdollistaa litiumionien liikkumisen anodin ja katodin välillä. Elektrolyytti on tyypillisesti vetykloridipohjainen sekoitus eri aineita. Elektrolyytti on solujen valmistajien salainen ainesosa, joten sen koostumus on tarkoin varjeltu salaisuus ja niiden tarkkaa koostumusta on vaikea saada selville kirjallisuuslähteistä. Tyypillisesti elektrolyytit kuitenkin sisältävät alkyylkarbonaatteja, kuten etyleenikarbonaattia, dimetyyliä, dietyyliä ja litiumsuolaa. Elektrolyytin suurin ongelma on se, että se on yleensä tulenarkaa ja reagoi myös ilman kanssa. Ongelmia syntyy etenkin pakkauksen vikaantuessa, jolloin elektrolyytti pääsee kosketuksiin ilman kanssa. [4]

Käytetystä elektrodimateriaalien yhdistelmästä riippuen litiumioniakun yksittäisen solun jännite on 3-4 V, joka on erittäin suuri sekundääriparistoille. Suuri yksittäisen solun jännite mahdollistaa myös suuren ominaistehon. [2]

Litiumioniakut ovat erittäin energiatehokkaita, mikä johtuu kahdesta tekijästä [2]:

1. Coulombinen tehokkuus, eli virtatehokkuus on hyvä. Toisin sanoen elektrodeissa tapahtuvat reaktiot ovat yksinkertaisia, eivätkä aiheuta energiaa kuluttavia sivureaktioita.
2. Jännitetehtokkuus on hyvä, joka johtuu yksittäisen solun korkeasta jännitteestä.

Litiumioniakut ovat muihin akkutyyppeihin verrattuna erittäin pitkäikäisiä, eli kestävät useita lataus/purkaus -syklejä. Pitkäikäisyys johtuu tehokkuuden tapaan akussa tapahtuvien reaktioiden yksinkertaisuudesta ja sivureaktioiden puuttumisesta. Pitkäikäisyyteen vaikuttaa myös se, että elektrodeissa tapahtuva insertioreaktio ei aiheuta ollenkaan rakenteellisia muutoksia akun elektrodeissa. Tämä on sekundaärriparistoille poikkeuksellista, sillä esimerkiksi lyijy-akkuissa solureaktiot sisältävät liukenemista ja saostumista. Solureaktiot ovat siis elektrodien täydellisiä morfologisia, eli rakenteellisia muutoksia. [2]

Litiumioniakkujen elektrodien aktiivisille materiaaleille on olemassa useita eri vaihtoehtoja. Suurin osa litiumioniakuista käyttää anodin materiaalina hiilipohjaista materiaalia, esimerkiksi grafiittia. Anodin materiaaleina käytetään myös joitain metallioksiedeja, kuten litiumtitanaattia ja niobiumpentoksidia. Olennaisin ominaisuus anodimateriaalille on se, että materiaali pystyy vastaanottamaan ja luovuttamaan litiumioneita. Ionien vastaanottamista ja luovuttamista akun lataus- tai purkaustapahtumassa kutsutaan myös insertio- ja ekstruusioreaktioksi. [2] Uusia anodimateriaaleja on tutkittu paljon. Tutkimuksen alla ovat muun muassa pii, tina, germanium, erilaiset nanohiiliputket ja muut nanokomposiitit. Monet edellä mainituista ovat edelleen laboratoriovaiheessa ja mitään niistä ei ole viety markkinoille, mutta niissä on potentiaalia saavuttaa ennennäkemättömän korkea energiatiheys. Ongelmia tuotteellistamisen edessä on kuitenkin edelleen paljon. Esimerkiksi pii- ja tinaanodien ongelmana on se, että niiden tilavuus muuttuu 250 - 300% lataussyklin aikana, joka pienentää akun elinikää huomattavasti. [5]

Anodin tapaan litiumioniakun katodi tulee valmistaa materiaalista, joka sisältää litiumia sellaisessa muodossa, että se voi luovuttaa litiumioneita solureaktioihin anodimateriaalin kanssa. Ensimmäinen kaupallisesti käytetty katodimateriaali oli litiumkoboltti, mutta nykyään yleisimmät katodimateriaalit on yhdisteestä $LiNiO_2$ jatkojalostettuja johdannaisia. [2]

Litiumioniakuissa hyödynnettävissä olevia solukemiavaihtoehtoja on tutkittu paljon ja käsite litiumioniakku kattaa laajan kirjon eri akkuteknologioita. Vuonna 2014 sarjatuotantoon asti oli päässyt muun muassa seuraavat anodi- ja katodimateriaalit [2]:

- Anodin eri materiaalivaihtoehdot: grafiitti, lasihiili ja litiumtitanaatti.
- Katodin eri materiaalivaihtoehdot: $LiCoO_2$, $LiM_xNi_xO_2$, $LiMn_2O_4$ ja $LiFePO_4$.

Taulukossa 1 on esitetty yleisimpien katodimateriaalien ominaisuuksia.

	Litium-rautafosfaatti	Litiummangaani-oksidi	Litiumtitaani	Litiumkoboltti-oksidi	Litiumnikkeli-kobolttialumiini-oksidi	Litiumnikkeli-mangaani-kobolttioksidi
Katodimateriaalin lyhenne	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Ominaisenergia (Wh/kg)	80 - 130	150 - 120	70	120 - 150	80 - 220	140 - 180
Energiatiheys (Wh/L)	220 - 250	250 - 265	130	250 - 450	210 - 600	325
Ominaisiteho (W/kg)	1400 - 2400	1000	750	600	1500 - 1900	500 - 3000
Tehotiheys (W/L)	4500	2000	1400	1200 - 3000	4000 - 5000	6500
Yhden solun jännite	3,2 - 3,3	3,8	2,2 - 2,3	3,6 - 3,8	3,6	3,6 - 3,7
Lataus-purkaussykliä kestävyyden	1000 - 2000	>500	>4000	>700	>1000	1000 - 4000
Itsestäänpurkautuminen (% kuukaudessa)	>1%	5%	2 - 10%	1 - 5%	2 - 10%	1%
Hinta (\$/kWh)	400 - 1200	400 - 900	600 - 2000	250 - 450	600 - 1000	500 - 900
Käyttölämpötila (°C)	-20 - 60	-20 - 60	-40 - 55	-20 - 60	-20 - 60	-20 - 55

Taulukko 1 Taulukko yleisimpien katodimateriaalien ominaisuuksista [Muokattu lähteestä 2]

Tässä kandidaatintyössä ei mennä eri elektrodimateriaalien yksityiskohtiin, mutta alla on eritelty lyhyesti taulukossa esitettyjen katodimateriaalien ominaisuuksia ja niiden käyttökohteita.

LFP, eli litiumrautafosfaatti, on suhteellisen matalan hintansa ja korkean tehonsa ansiosta yksi käytetyimmistä katodimateriaaleista hybridiautoissa. Korkealla teholla tarkoitetaan sitä, että se kykenee varastoimaan esimerkiksi talteenkerätyn jarrutusenergian nopeasti ja pystyy tarjoamaan suuren purkausvirran kiihdytyksissä. Lisäksi LFP on turvallisempi kuin monet muut katodimateriaalit, sillä se kestää monia muita materiaaleja paremmin ylilataamista ja korkeita lämpötiloja. [4]

NMC:n, eli litiumnikkelimangaanikobolttioksidin, käyttö yleistyi täyssähköautojen sarjatuotannon kasvun alkaessa sen korkean energiatihedden ja korkean solujännitteen ansiosta. NMC-katodilla varustettujen akkujen solujännite on n. 3,6 - 3,8 V ja sen energiatiheys on 140 - 180 Wh/kg sarjatuotetuille soluille. Jotkin kokeellisemmat akut ovat päässeet NCM-katodien avulla jopa 200 Wh/kg energiatihyteen. [4]

LCO, eli litiumkobolttioksidia, käytetään useimmiten kannettavissa elektronisissa laitteissa, kuten matkapuhelimissa, kameroissa ja kannettavissa tietokoneissa. LCO-katodeilla varustettujen akkujen energiatiheys on suhteellisen korkea ja sen elinikä on pitkä. Se on kuitenkin herkkä korkeille lämpötiloille. Yli 130°C lämpötilalle altistaminen aiheuttaa lämmönkarkaamisreaktion, joka johtaa akun tuhoutumiseen ja aiheuttaa mahdollisesti vaaratilanteen. 130°C lämpötila on matalampi kuin muilla katodimateriaaleilla. Tästä syystä LCO ei juurikaan ole käytetty suuremmissa käyttökohteissa, kuten sähköautoissa. Lisäksi LCO-katodit ovat suhteellisen kallis katodimateriaali sen sisältämän koboltin takia. [4]

NCA, eli litiumnikkelikobolttialumiinioksidi, on joissakin kannettavissa käytetty

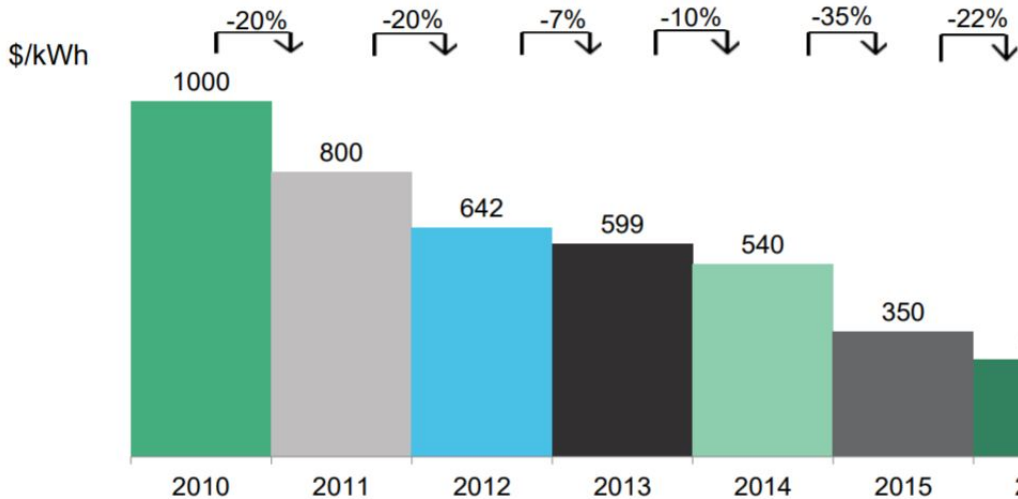
katodimateriaali. Sen käyttö suuremmissakin akustoissa, esimerkiksi autoteollisuudessa, olisi sen korkean tehon ansiosta mahdollista. Se on kuitenkin verrattaen kallista, joten sen käyttö ei ole vielä yleistä. [4]

LMO, eli litiummangaanioksidi, tarjoaa korkean energiatiheyden ja korkean tehon, mutta sen elinikä on suhteellisen lyhyt, joten sen käyttö rajoittuu joihinkin kannettaviin laitteisiin, joissa tarvitaan suurta kapasiteettia, mutta ei kykyä kestää useita lataus-purkaus -syklejä. [4]

2.2 Litiumioniakkujen valmistus, sen haasteet ja tulevaisuudennäkymät

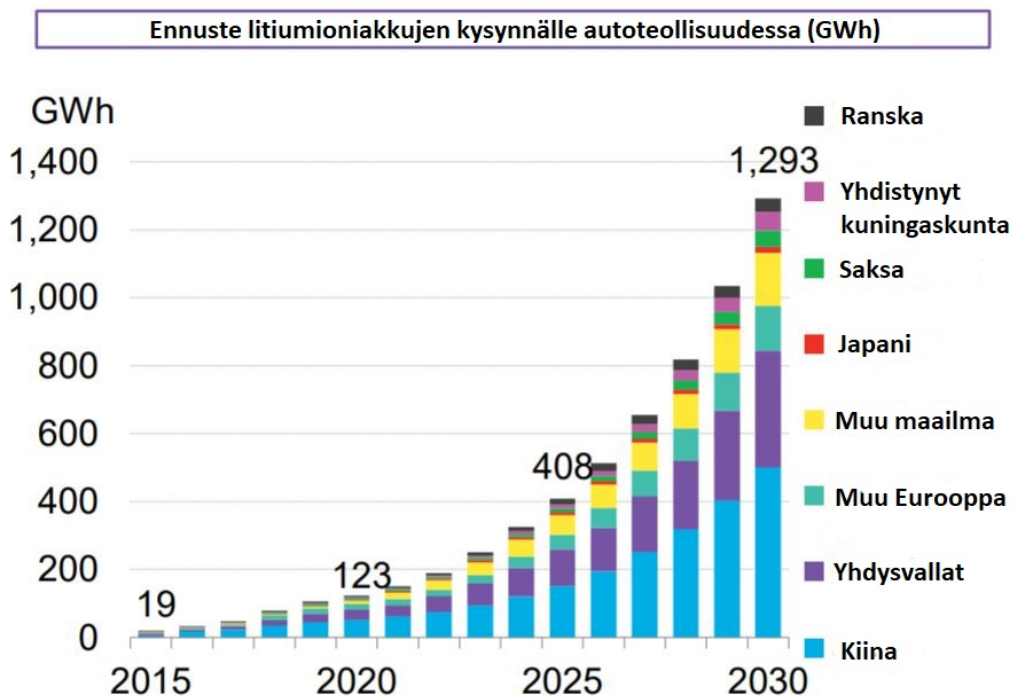
Litiumioniakkujen käyttökohteiden lisääntyminen ja ennen kaikkea energianvarastoinnin sovellusten yleistyminen johtaa litiumioniakkujen valmistuksen kannalta välttämättömien aineiden kysynnän kasvuun. Tällaisia aineita ovat mm. erilaiset malmit. Ajan myötä kaivostoiminnan kannalta helposti saatavissa oleva malmi tulee käytetyksi loppuun. Esimerkiksi koboltin määrä tulee olemaan ongelma tulevaisuudessa. Tästä syystä toimiva akkujen kierrätysjärjestelmä tulee olemaan elintärkeä litiumionitekniikan pitkäkestoisen olemassaolon kannalta. [1] Litiumioniakkujen kierrättämistä käsitellään tarkemmin kappaleessa ”Ympäristövaikutukset ja turvallisuus”.

Raaka-aineiden saatavuuden lisäksi litiumioniakkujen valmistuksen suurimpia haasteita ovat solukemian löytäminen, joka kestää pitkään käyttöä, mutta samalla kykenee varastoimaan suuren määrän energiaa ja tuottamaan suuren tehon. Tämä haaste on usein ratkaiseva tekijä akkuvalmistajien paremmuutta arvioitaessa. Akkujen kilpailukykyyn ja sovellettavuuteen vaikuttaa suorituskyvyn lisäksi myös merkittävästi hinta, joka on ollut litiumioniakkujen yleistymisen suurin hidaste. Vuonna 2012 litiumioniakkujen hinta kapasiteetin mukaan laskettuna oli 1000 USD/kWh, joka on esimerkiksi bensiiniin verrattuna todella korkea. [1] Autojenvalmistajien tavoitteena on 100 USD/kWh, jonka esimerkiksi GeneralMotors on ilmoittanut tavoittavansa vuonna 2021. [6] Kuvassa 2 on esitetty litiumioniakkujen hintakehitys vuodesta 2010 vuoteen 2016.



Kuva 2 Litiumioniakkujen hintakehitys [6]

Kuvasta huomataan, että akkujen hinta on laskenut varsin tasaisesti vuodesta toiseen. Lasku johtuu teknologian kehityksestä, kilpailun lisääntymisestä ja tarjonnan lisääntymisen kautta syntyneistä skaalauseduista. Tulevaisuudessa eniten litiumioniakkuja tullaan tarvitsemaan energian varastointiin, sekä sähköautoihin. Kuvassa 3 on esitetty litiumioniakkujen kysynnän mitattu kehitys ja arvio tulevaisuuden kysynnälle.



Kuva 3 Litiumioniakkujen kysynnän kehitys [Muokattu lähteestä 6]

2.2.1 Litiumioniakkujen valmistus

Litiumioniakkujen valmistus voidaan karkeasti jakaa kahteen osaan: elektrodien valmistaminen ja solun kokoaminen. Seuraavaksi käydään läpi litiumioniakkujen valmistusprosessi päävaiheittain.

Elektrodit koostuvat ohuesta metallifoliosta, joka on päällystetty pulverilla, joka on sekoitus varsinaisesta elektrodimateriaalista, sidosaineista ja liuottimista. Litiumioniakkujen valmistusprosessi aloitetaan sekoittamalla pulverin eri ainesosat keskenään, jonka jälkeen anodin ja katodin foliot päällystetään kunkin elektrodin pulverilla. Elektrodit kuivataan tyhjiöuunissa noin 120 °C lämpötilassa 8 tunnin ajan. Kuivauksen jälkeen pulvereilla päällystetyt foliot leikataan pienemmiksi paloiksi valmistettävien solujen koon mukaan. Leikatut palat puristetaan ohuemmiksi, jonka jälkeen elektrodit kuivataan vielä kerran kaiken kosteuden poistamiseksi. Tämä on koko valmistusprosessin energiantensiivisin osuus. [1]

Valmiit elektrodit asennetaan soluun, joka täytetään elektrodien asennuksen jälkeen elektrolyytillä, jonka jälkeen solu suljetaan. Valmiiden solujen toimintaa testataan yleensä useita kertoja ennen solujen lähettämistä asiakkaalle tai solujen yhdistämistä moduuleiksi. [1, 7] Soluista koottuja moduuleita voidaan yhdistää vielä suuremmiksi kokonaisuuksiksi; akustoiksi. [1]

Merkittävä osa valmiiden litiumioniakkujen hinnasta tulee valmistusprosessin suuresta energiantarpeesta, joten valmistusprosessin energiankulutuksen vähentäminen on merkittävä säästökohde. Energiankulutuksen vähentämiseen tähtääviä toimintamalleja ja teknisiä ratkaisuja on tutkittu paljon. Esimerkiksi Islannin yliopiston dekaani Gudrun Saevarsdottir tutki geotermisen lämmön käyttämisestä valmistusprosessin kuivausvaiheessa. Hänen tutkimuksensa [7] mukaan käyttämällä geotermistä lämpöä akkujen valmistusprosessin energiankulutusta voitaisiin pienentää jopa 90 %. Litiumioniakkujen hinnasta noin 10 % koostuu energiakuluista, joten geotermisen lämmön hyödyntämisellä voitaisiin laskea akkujen hintaa jopa 9 %. Sähkönkulutuksen alentaminen vähentäisi myös akkujen valmistamisen epäsuoria hiilidioksidipäästöjä, sillä merkittävä osa maailmalla tuotetusta sähköstä tuotetaan polttamalla fossiilisia polttoaineita. Euroopan energiasekoituksella, eli Euroopassa käytettävien energiantuotannon muotojen yhdistelmällä, akkujenvalmistuksen hiilidioksidipäästöjä voitaisiin laskea geotermisen energian hyödyntämisellä jopa 2-5 %. [7]

Litiumioniakkujen rakenteesta johtuvien turvallisuusriskien takia akkujen valmistajien on testattava tuotteitaan huolellisesti. Yhdistyneet Kansakunnat on laatinut standardin testeille, joiden mukaan akkuvalmistajien on testattava tuotteensa. Nämä testit sisältävät mm. 9,1 kg panoisen punnuksen pudottamisen akun kyljelle eri

korkeuksilta, lämpötestejä, korkeanpaikan testejä, värinätestejä, sekä akun oikosulkemista ja ylilataamista. [1]

Akkujen turvallisuuteen, kestävyys- ja tehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi solujen lämpötila. Siksi akkuvalmistajien yksi suurimmista haasteista on lämmönhallinta, jonka merkittävyys kasvaa akuston koon ja monimutkaisuuden kasvaessa. Liian korkea toimintalämpötila voi johtaa akkupaketin ennenaikaiseen vanhenemiseen ja turvallisuusongelmiin. Akkupaketit koostuvat usein jopa kymmenistä moduuleista, jotka taas koostuvat jopa sadoista yksittäisistä soluista, joita kaikkia on jäähdytettävä. Akkupaketin sisään ei kuitenkaan useissa käyttökohteissa voi johtaa suoraan ilmaa. Esimerkiksi autoissa jäähdytysilman mukana tuleva kosteus laskisi akuston luotettavuutta. Tällaisiin käyttökohteisiin tarvitaan siksi nestejäähdytys, joka varmistaa tasaisen lämmön jakautumisen koko akuston sisällä vaikuttamatta akuston luotettavuuteen. Myös liian alhainen lämpötila heikentää akkujen suorituskykyä. Siksi erityisen kylmissä olosuhteissa käytettävissä akustoissa pitää olla erillinen lämmitin, joka tarvittaessa lämmittää akkuja. [1]

Litiumioniakkujen käyttölämpötila-alue on suurimmillaan noin -40 °C - 100 °C . Käytännössä akut toimivat parhaiten -20 °C - 60 °C lämpötilassa. Matalan lämpötilan toimintaongelmat johtuvat siitä, että sähkökemialliset reaktiot vaativat tietyn lämpötilan tapahtuakseen ja akuissa käytettävien materiaalien resistanssi nousee lämpötilan laskiessa. [2]

Akustot koostuvat useammista moduuleista ja moduulit koostuvat useista rinnan tai sarjaan kytketyistä yksittäisistä soluista. Tällaisessa asetelmassa yksittäisten solujen väliset kapasiteettierot ja erot sisäisessä resistanssissa johtaisivat ennen pitkää siihen, että osa soluista ylilatautuu ja akkupaketin lämpö jakautuu epätasaisesti. Tämän estämiseksi tarvitaan akustonvalvontajärjestelmä eli BMS (Battery Management System). [1]

Akustonvalvontajärjestelmän yksi tärkeimmistä tehtävistä on solujen välisten jänniteerojen tasaaminen eli balansointi. Balansoinnin voi hoitaa passiivisesti kytkemällä vastus rinnan jokaisen solun välille latausvaiheessa, jolloin jokaisen solun jännite on latauksen jälkeen sama. Se ei kuitenkaan riitä suurissa akustoissa, sillä solut voivat myös purkautua eri tahtiin. Monimutkaisemmissa akustoissa tarvitaan siksi aktiivista balansointia, joka tarkoittaa sitä, että energiaa siirrellään hallitusti yksittäisten solujen välillä. Aktiiviset, kaksisuuntaiset BMS-järjestelmät voivat toimia reaaliaikaisesti solujen jännitteen mukaan tai algoritmin avulla arvioidun kapasiteetin jakautumisen perusteella. [1]

2.3 Käyttö

Litiumioniakkujen korkean solujännitteen, ominaisenergian, eliniän ja tehokkuuden takia ensimmäinen niiden käyttökohde oli matkapuhelimet. Puhelimia seurasivat muut kannettavat elektroniset laitteet, kuten kamerat ja kannettavat tietokoneet. Myöhemmin litiumioniakkuja alettiin käyttämään lähes kaikissa sekundääriparistoja vaativissa sovelluksissa. Teknologian kehitys on johtanut litiumioniakkujen soveltamiseen yhä suurempien energiamäärien varastointiin. Esimerkkejä tällaisista sovelluksista ovat: energian varastointi, sähköajoneuvot, hissit, nosturit, kaivoskoneet ja veneet. [7] Seuraavassa kappaleessa on eritelty litiumioniakkujen yleisimpien käyttökohteiden erityispiirteitä, haasteita ja tulevaisuuden näkymiä.

2.3.1 Kannettavat laitteet

Kannettavien laitteiden energiantarve ei ole kovin suuri, joten esimerkiksi kännyköiden energiavarastoksi riittää yksittäinen litiumionisolukapassi. Tärkeimpiä kannettavan laitteen akun vaatimuksia ovat suuri energiatiheys ja alhainen hinta. Suurin tarvittava purkausvirta on yleensä $3C$ ja normaali vaatimus käyttöiälle on 3-5 vuotta. Kannettavien laitteiden akkujen hinta/kapasiteetti -suhde on usein muita sovelluskohteita suurempi, mutta tarvittava kapasiteetti on verrattaen pieni. Siksi valmiin puhelimen hinnasta vain pieni osa syntyy akun valmistuskustannuksista.[2] Yleisin kannettavissa laitteissa käytetty solutyyppi on 18650, jota käytetään myös tämän kandidaatintyön kokeellisessa osassa. [2]

2.3.2 Ajoneuvot

Autoille ominaisia piirteitä ovat massatuotanto, suuri määrä osia, pitkä käyttöikä, luotettavuus, turvallisuus eri olosuhteissa ja äärimmäinen kulujen karsinta. Nämä samat vaatimukset pätevät myös auton akuille. Akkujen vaatimukseen vaikuttaa myös ajoneuvon tyyppi, johon ne tullaan asentamaan, esimerkiksi sähköautot vaativat erilaiset akut kuin hybridautot. [2]

Täyssähköautoille tarkoitettut akut on yleensä tehty halvemmista katodimateriaaleista, sillä akkuja tarvitaan yhteen autoon suuri määrä. Täyssähköautot käyttävät usein LMO/grafiitti -yhdistelmää akkujen elektrodina, joka on alhaisen hintansa, kapasiteettinsa ja tehokkuutensa ansiosta täydellinen vaihtoehto täyssähköautoille. Täyssähköauton akuilta vaaditaan erityisesti suurta kapasiteettia, eikä niinkään suurta tehoa. [2]

Hybridiautojen akustot ovat erilaisia kuin täyssähköautojen akustot, sillä niiltä vaaditaan hetkellisesti paljon tehoa, mutta niiden kapasiteetin ei tarvitse olla kovin suuri, sillä niihin ei tarvitse varastoida paljoa energiaa. Hybridiautoissa energiaa on varastoitu riittävästi polttoaineeseen pitkän kantomatkan varmistamiseksi ja akun on kyettävä tarjoamaan energiaa auton liikuttamiseen vain lyhyiksi ajoiksi kerrallaan. Yleensä hybridiautojen akkujen elektrodit on toteutettu NCA/lasihiili-yhdistelmällä, sen tarjoaman suuren tehon ja pienen koon takia. [2]

Ajoneuvojen akustoille akustonvalvontajärjestelmät ovat todella tärkeitä, sillä akustojen on täytettävä tarkat turvallisuusmääräykset jopa vakavissa vikatilanteissa esimerkiksi oikosulun sattuessa. Ajoneuvoihin asennettavien akkujen pakkaustenkin on täytettävä kannettavia laitteita kovempia vaatimuksia. Akkupakettien on kestävä mm. kovia iskuja, tärinää ja lämpölaajenemista. Lämmönhallinnan merkitys korostuu ajoneuvojen akustoissa niiden suuren koon ja vaikeampien käyttöolosuhteiden myötä. [2]

Sähköautojen akustot ovat kokonsa ja käyttötarkoituksensa puolesta hyvä lähtökoh- ta litiumioniakkujen energianvarastointisovellusten pohtimiseen. [2]

2.3.3 Energian varastointi

Litiumioniakkujen energianvarastoinnin sovelluksia on tällä hetkellä käytössä kolme [2]:

1. Verkon stabilisointiin tarkoitettu energiavarasto uusiutuvien energianlähteiden rinnalle, esimerkiksi aurinko- tai tuulivoimalan rinnalle.
2. Uninterruptible power supply (UPS), eli tilapäinen energiavarasto hätätapauksia varten. UPS asennetaan yleensä suuriin julkisiin laitoksiin, joiden toiminta sähkökatkoksienkin aikana on yhteiskunnallisesti tärkeää. Yleisiä asennuskohteita ovat esimerkiksi puhelinkeskukset ja sairaalat.
3. Kotikäyttöön tarkoitetut järjestelmät, joko jonkinlaisen generaattorin, kuten tuuliturbiinin rinnalle, tai itsenäiseksi energiavarastoksi.

Energian varastointiin tarkoitetut akkujärjestelmät eivät ole vielä yleisiä, mutta ne ovat saaneet paljon huomiota mediassa ja käytössä olevien järjestelmien määrä lisääntyy jatkuvasti. [2]

Energian varastointiin käytettäville akkujärjestelmille on tyypillistä [2]:

- Kapasiteetti on muutamista kilowattitunneista kymmeneen megawattitunteihin.
- Akusto koostuu suuresta määrästä moduuleita ja soluja.
- Kontrollointijärjestelmän tärkeys korostuu akuston koon ja monimutkaisuuden myötä.

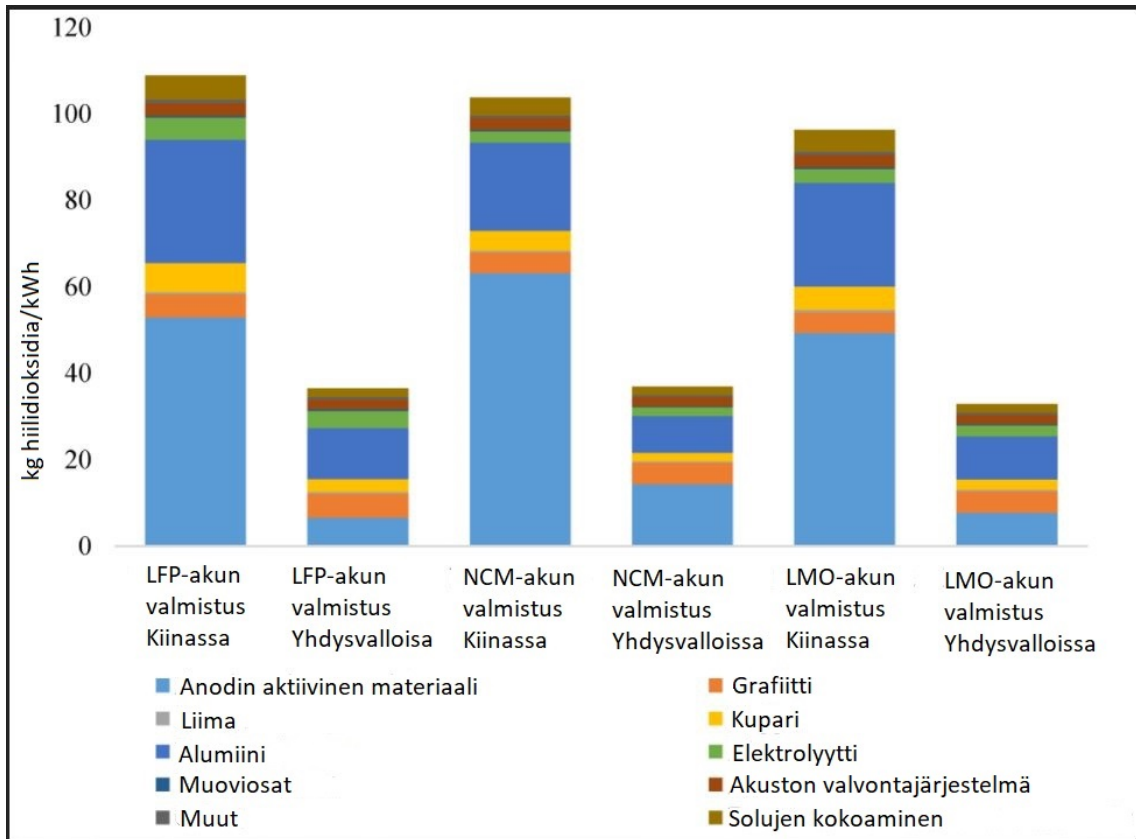
Energian varastointiin käytettävät akkupaketit ovat suuria, joten materiaalikustannusten osuus lopullisesta hinnasta korostuu. Siksi materiaalivalinnoissa merkittävin tekijä on hinta. Lisäksi materiaalivalintaan vaikuttaa akuilta vaadittu pitkä käyttöikä, sekä suuri vaadittava teho, sillä energiavarastoilta vaaditaan usein n. 5C virta. [2]

2.4 Ympäristövaikutukset

Polttomoottorillisen auton valmistaminen aiheuttaa n. 9 tonnia kasvihuonekaasuja ja 28 kWh LFP-akuston valmistus aiheuttaa lähes 3 tonnia kasvihuonekaasuja. Siten 28 kWh sähköauton valmistus aiheuttaa noin 30% enemmän kasvihuonekaasuja, kuin vastaavan polttomoottorillisen auton valmistaminen. [8]

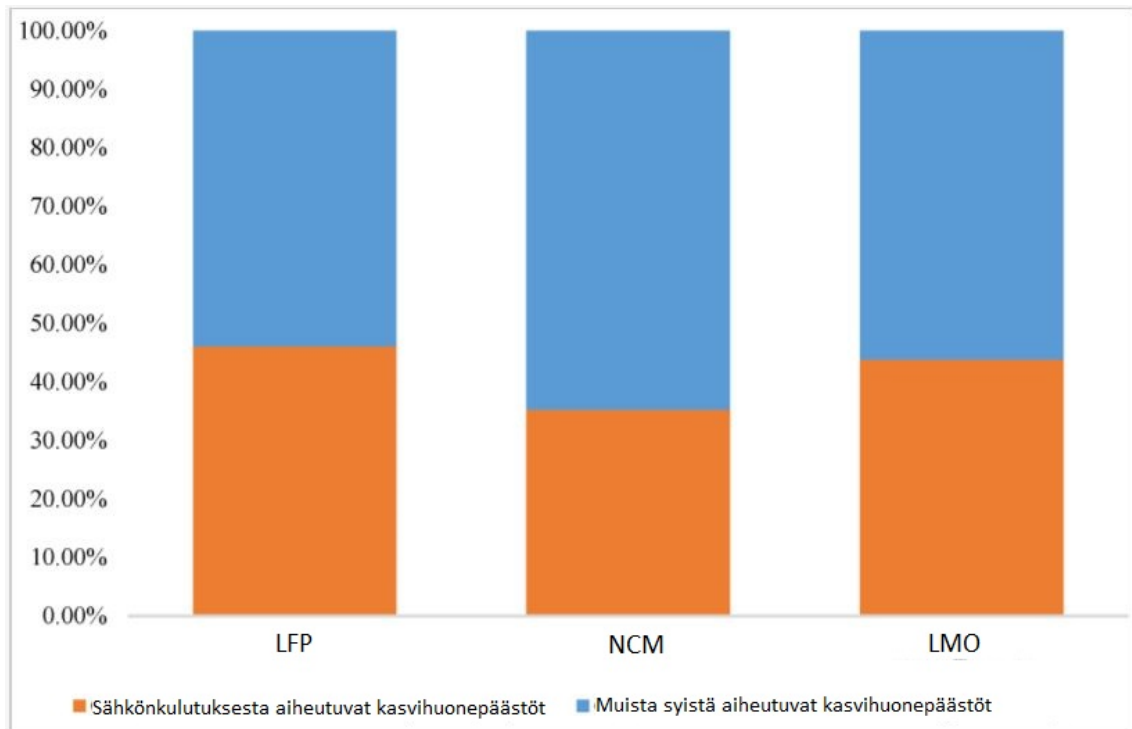
Akkujen valmistusprosessin suurin saastuttaja on elektrodimateriaalien jalostaminen ja katodien sekä erilaisten alumiiniosien valmistus, josta aiheutuu noin kolmeneljäsosaa koko akkupaketin valmistuksessa aiheutuvista kasvihuonekaasuista. [8]

Akkujen valmistuksen aiheuttamien saasteiden lisäksi on huomioitava se, että valmistusmaasta riippuen suurehko osa sähköstä tuotetaan polttamalla fossiilisia polttoaineita. Esimerkiksi Kiinassa litiumioniakkujen valmistamisesta aiheutuvista kasvihuonekaasuista noin 40% aiheutuu valmistuksessa käytetyn sähkön tuottamisesta. Valmistusmaan energiasekoitus vaikuttaa siten todella paljon akkujen valmistuksen aiheuttamiin kasvihuonepäästöihin. [8] Kuvassa 4 on esitetty eri materiaaleja käyttäen valmistettujen litiumioniakkujen valmistamisen aiheuttamat kasvihuonekaasut.



Kuva 4 LFP-, NCM- ja LMO-akun eri osien valmistuksesta Kiinassa ja Yhdysvalloissa aiheutuvat hiilidioksidipäästöt kg/kWh mitattuna. [Muokattu lähteestä 8]

Kuvan kaaviossa on otettu huomioon myös välillisesti sähköntuotannosta aiheutuvat kasvihuonekaasut. Tästä syystä kiinassa valmistettavien akkujen kasvihuonepäästöt ovat huomattavasti Yhdysvaltoja suurempia. [8] Sähköntuotannon ympäristöystävällisyyden merkitystä litiumioniakkujen valmistuksen saasteiden määrään alleviivaa kuva 5, jossa akkujen valmistuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasut on jaoteltu ainoastaan sähköntuotannosta aiheutuneisiin ja valmistuksen muista saastuttajista aiheutuneisiin kasvihuonekaasuihin.



Kuva 5 LFP-, NCM- ja LMO-akkujen valmistuksen aiheuttamat kasvihuonekaasut Kiinassa jaettuna sähköntuotannosta aiheutuneisiin ja muista syistä aiheutuneisiin päästöihin [Muokattu lähteestä 8]

On kuitenkin pidettävä mielessä, että monien litiumioniakkujen käyttökohteiden käyttöikä on verrattaen pitkä, joten akkujen valmistuksen aiheuttamien kasvihuonekaasujen määrä on verrattaen pieni koko käyttöiän aikana aiheutuviin kokonaispäästöihin verrattuna. Esimerkiksi autojen pitkän käyttöiän takia valmistukseen kulunut energia on vain noin 5% koko auton käyttöaikana käytetystä kokonaisenergiasta. Siksi ympäristöystävällisen sähköntuotannon käyttämisen merkitys korostuu entisestään, se on sähköautojen aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta tärkein yksittäinen tekijä. [8]

Litiumioniakkujen aiheuttamien kokonaispäästöjen vähentämisen ja niiden pitkäaikaisen saatavuuden varmistamisen kannalta olennaista on myös niiden kierrättäminen. Litiumioniakkujen kierrättäminen on vielä vahvasti lapsenkengissä, sillä tällä hetkellä ei ole olemassa yhtenäistettyjä vaatimuksia tai määräyksiä asiaan liittyen. Myös käytettyjen litiumioniakkujen jälleenkäyttäminen on haasteellista, sillä jokainen akusto koostuu erilaisista moduuleista ja eri akustoissa on käytetty erilaisia solukemioita. Ongelmia tulee tuottamaan se, että litiumioniakkujen hinnan laskiessa käytettyjen akkujen hyödyntämisen houkuttelevuus hintanäkökulmasta tarkasteltuna laskee. Lisäksi litiumioniakkujen käyttäminen teollisessa mittakaavassa on sen verran tuore ilmiö, ettei kovin suuri osa rakennetuista akuista ole vielä päässyt

käyttöikänsä loppuun. Siten toimivalle kierrätyskäytännölle ei ole vielä ollut tarvetta, eikä sellaista siksi ole muodostettu. Akkujen jälleenkäyttäminen niiden kierrättämisen sijaan olisi erittäin toivottavaa ja se sisältää paljon potentiaalia, sillä normaalisti akut poistetaan niiden alkuperäisestä käyttötarkoituksesta kun niiden teho on laskenut 80%:iin niiden alkuperäisestä tehosta. [4]

Akkujen kierrättämiselle tai jälleenkäytölle yksi vaihtoehto olisi käytettyjen akkujen korjaaminen ja kunnostaminen. Tämä vaihtoehto on usein aliarvostettu, sillä se on erittäin tehokas ja siinä on potentiaalia tulla tärkeäksi osaksi litiumioniakkujen ympärillä toimivaa palvelutoimintaa. Suurilla akkuvalmistajilla, kuten autovalmistajilla, on olemassa infrastruktuuri omien tuotteidensa huoltamiselle, mutta pienemmät alan vaikuttajat tarvitsevat tällaiseen toimintaan ulkoista apua. Käytettyjen akkujen korjaaminen ja kunnostaminen on siis lupaava tulevaisuuden palveluala. [4]

Litiumioniakut sisältävät paljon materiaaleja, joita voidaan kierrättää. Tällaisia ovat mm. litium, koboltti, mangaani, nikkeli, alumiini, kupari, rauta ja erilaiset muovit. Kuten aiemmin on todettu, ei ole kuitenkaan olemassa määräyksiä tai käytäntöjä akkujen kierrättämiseen ja tällä hetkellä kierrättämisen kustannukset ylittävät siitä saatavan hyödyn. Monet akkuvalmistajat ovat kuitenkin päätyneet muodostamaan yhteisiä sopimuksia jätteidenkäsittelystä ja kierrätyksestä. [4]

Yksi akkujen kierrättämisen suurimmista ongelmista on se, että kierrätettävien materiaalien erottelu toisistaan vie enemmän energiaa, kuin mitä kierrättäminen säästää. Tällä hetkellä on jo olemassa useita käytäntöjä litiumioniakkujen tehokkaaseen kierrättämiseen. Akun eri materiaalit saadaan eroteltua mm. altistamalla akut erittäin korkealle tai matalalle lämpötilalle. Korkeita lämpötiloja käytettäessä koko akku sulatetaan, jolloin eri materiaalit voidaan erotella toisistaan. Tämä sulatusprosessi mahdollistaa koboltin, nikkelin ja kuparin keräämisen. Litium, alumiini, tina ja mangaani kuitenkin jäävät sulatuksessa syntyvään sakkaan, joka voidaan vielä jatkokäsitellä siten, että loputkin materiaalit saadaan eroteltua. Tämä on kuitenkin monimutkainen prosessi, eikä se ole vielä taloudellisesti kannattavaa. Sulattamalla kerätyt materiaalit eivät yleensä ole enää kyllin puhtaita käytettäväksi uusissa akuissa, mutta niitä voidaan hyödyntää muissa käyttökohteissa. Kylmiä lämpötiloja hyödyntäessä akut jäädytetään ja sen jälkeen murskataan. Syntyneestä murskasta voidaan erotella eri materiaalit käyttämällä erilaisia suotimia, täristömiä ja muita erottelumenetelmiä. Verrattuna korkeiden lämpötilojen käyttöön tämä tekniikka vaatii paljon vähemmän energiaa. [4]

Yksi vaihtoehto on myös akkujen manuaalinen purkaminen ja eri materiaalien erotelu. Ongelmana kaikissa kierrätysmenetelmissä on eri akkukemioiden kirjo. Jos esimerkiksi litiumioniakku päätyy lyijyakkujen kierrätysprosessiin, tapahtuu erilaisia kemiallisia reaktioita, jotka saattavat johtaa räjähdykseen. [4]

2.5 Turvallisuus

YK:n, eli Yhdistyneiden Kansakuntien vaarallisten aineiden kuljetuksen käsikirjan kappale 38.3 käsittelee litium-metallin ja litiumioniakkujen turvallisuutta ja siinä määrätään testeistä, jotka litiumioniakuille on tehtävä ennen niiden lentokuljetusta. Kappale määrittelee tarkat testit, jotka on tehtävä valtuutetun testaajan toimesta, jotka laadittiin useiden vakavien julkisilla lennoilla tapahtuneiden onnettomuuksien sattumisen jälkeen. [4]

Yhdistyneiden kansakuntien vaatimat testit on kuvattu taulukkoon 2.

Testi T.1: Korkeussimulaatio	Testi simuloi lentokuljetusta matalassa ilmanpaineessa
Testi T.2: Lämpötesti	Testi arvioi solujen ja akuston tiivisteiden kestävyyttä, sekä sisäisiä kytkentöjä nopeissa ja suurissa lämpötilanvaihteluissa
Testi T.3: Tärinä	Testi simuloi kuljetuksen aikana tapahtuvaa tärinää
Testi T.4: Iskut	Testi simuloi kuljetuksen aikana laitteen kokemia iskuja
Testi T.5: Ulkoinen oikosulku	Testi simuloi solun tai akuston ulkoista oikosulkua
Testi T.6: Isku	Testi simuloi kovaa iskuja
Testi T.7: Ylilataaminen	Testi arvioi akun kykyä kestää ylilatausta
Testi T.8: Pakotettu purkautuminen	Testi arvioi akun kykyä kestää täydellistä purkautumista

Taulukko 2 Yhdistyneiden kansakuntien vaatimat testit litiumioniakkujen kuljettamiselle [4]

Kaikkia taulukon testejä ei tarvitse suorittaa, mutta valmistajan on perusteltava päätöksensä jonkin testin poisjättämisestä. Esimerkiksi ylijännitetestin kohdalla YK toteaa, että akut, jotka on suunniteltu käytettäväksi useammista akuista koostuvassa akustossa, ei tarvitse testata erikseen ylijännitetestin mukaisesti. Tämä johtuu siitä, että suurin osa yksittäisistä akkusoluista ja pienistä akustoista eivät läpäisi tätä testiä, koska ne on tarkoitettu käytettäväksi suuremmissa kokoonpanoissa, joihin asennetaan erillinen, solujen yhteinen ylijännitesuoja. [4]

Litiumioniakkujen turvallisuuden kannalta lämmönhallinta on yksi merkittävimmistä asioista, sillä akun terminen epästabiilius tai lämpöryntäys on yksi tuhoisimmista vikaantumismekanismeista. Yli 90 °C lämpötiloissa polymeeripohjainen erotin alkaa sulamaan ja lopulta hajoaa. Solukemiasta riippuen 90 - 140 °C lämpötilassa erotin hajoaa peruuttamattomasti, joka johtaa sisäiseen oikosulkuun anodin ja katodin välille. Tällöin solua uhkaa lämpöryntäys, joka tarkoittaa käytännössä sitä, että solu

on päätynt kierteeseen, jossa se vapauttaa jatkuvasti lisää energiaa nostaen solun lämpötilaa, jonka seurauksena solu vapauttaa jälleen lisää energiaa. Tämä johtaa solun vuotamiseen tai pahimmassa tapauksessa solun räjähtämiseen. Lämpöryntäystä ei voi pysäyttää sen käynnistymisen jälkeen. Lämpöryntäyksen aikaansaava lämpötilaraja vaihtelee eri solukemioiden välillä n. 120°C:sta aina 140°C:een. Erottimen lisäksi lämpöryntäyksen aikana solun anodin ja katodin kemiat muuttuvat, mikä muodostaa happea, joka taas voi kiihdyttää solun palamista. Lämpöryntäyksen aikana solun osat saattavat lämmetä n. 600 - 800°C lämpöisiksi, joten lämpöryntäyksen pysäyttämiseen kykeneviä materiaaleja ei juurikaan ole. [4]

Akkujen turvallisuuden edistämiseksi on olemassa useita erilaisia lisälaitteita. Sellaisia ovat esimerkiksi [4]:

- Korkeajännitteen lukitus-piiri, eli HVIL (High-Voltage Interlock Loop)
- Sulakkeet
- Akun erotinyksikkö, eli BDU (Battery Disconnect Units)

HVIL on usein suurissa energianvarastointijärjestelmissä käytetty turvallisuusmekanismi, joka muodostaa suljetun virtapiirin, kun akusto on täysin suljettu. Jos jokin osa akustoa avautuu tai avataan, esimerkiksi huoltotöiden takia, virtapiiri katkeaa, mikä aiheuttaa sen, että kaikki akun kytkimet avautuvat ja virta ei pääse enää kulkemaan. HVIL ei ole yksittäinen komponentti, joka voitaisiin jälkiasentaa akustoihin, vaan se on osa koko akuston rakennetta ja sen pätehtävänä on mahdollistaa akuston turvallinen huoltaminen. [4]

Sulakkeet ovat helppo tapa suojata akkuja ulkoisilta oikosuluilta ja liian suurilta virroilta. Sulakkeita voidaan käyttää myös yhdessä HVIL-järjestelmän kanssa, jolloin sulakkeen palaminen aiheuttaa HVIL-järjestelmän vahtiman virtapiirin katkeamisen, jolloin sulakkeen palaminen laukaisee myös HVIL-järjestelmän ja virran kulku akustossa keskeytyy. [4]

BDU toimii akkujen ja siitä energiansa saavien laitteiden rajapintana. Sen tehtävänä on irrottaa akku laitteista, mikäli laitteisiin tulee jokin häiriö kuten oikosulku. [4]

3. KOKEELLINEN OSUUS: KAPASITANSSIMITTARIN NCM-20 AKKUPÄIVITYS

Nokian Capacitorsin suunnittelema kannettava kapasitanssimittari NCM-20 on mitaustarkkuudeltaan erinomainen laite, mutta siinä edelleen käytettävät lyijyakut ovat painavia ja epäkäytännöllisiä. Mittareita säilytetään varastossa usein pitkiä aikoja latausten välissä, jolloin lyijyakujen suuri vuotovirta tyhjentää akut ja niiden uudelleen lataamiseen ei usein ole aikaa. Siksi mittarin akkupäivitys olisi jo pitkään ollut kohdallaan. NCM-20 on esitetty kuvassa 6.

Projektin tarkoituksena oli valmistaa prototyyppi litiumioniakuilla varustetusta laitteesta, jonka toimintaa voitaisiin testata kenttäolosuhteissa. Kandidaatintyön tilaajalla on asiakkaita ympäri maailmaa ja heidän laitteitaan on asennettu niin aavikolle, kuin jäätiköillekin. Siksi kenttätesteissä tutkittaisiin etenkin litiumioniakkujen suoriutumista pakkasessa tai erittäin kuumissa olosuhteissa.

Kapasitanssimittari NCM-20 koostuu kuvan 7 mukaisesti kahdesta eri osasta: Signaaligeneraattorista ja virtamittarista. Signaaligeneraattori kytketään tutkittavan kondensaattorin rinnalle ja kondensaattoriin johdetaan signaali (111.86 Hz, 1,4 VAC). [9] Signaalin aiheuttamaa virtaa tutkitaan virtamittarilla ja arvon perusteella lasketaan kondensaattorin kapasitanssi, joka näytetään virtamittarin nestekidenäytöllä. Signaalin taajuus on valittu siten, että samantajuisia signaaleja ei yleensä esiinny mittaussympäristössä. Signaaligeneraattori vaatii 12 V ja virtamittari 6 V käyttöjännitteen. Signaaligeneraattorin akun kapasiteetti on 1,2 Ah ja virtamittarin akun kapasiteetti on 1 Ah. [9] Kummallekin osalle tarvitaan itsenäinen latauspiiri ja akku siksi, että verkkovirran suodatuksi käytettävät kondensaattorit asennetaan suuriin räkkeihin, joissa kondensaattoreita on päällekkäin jopa useita kymmeniä ja johdin, johon virtamittarin saa kytkettyä, voi olla kaukana mitattavasta kondensaattorista. Siksi työtä nopeuttaa huomattavasti se, että mittaamisen voi suorittaa kahden työntekijän voimin, jolloin toinen työntekijä kytkee signaaligeneraattoria kondensaattoreista toiseen ja toinen mittaa kondensaattorin virtaa verkosta. [10]



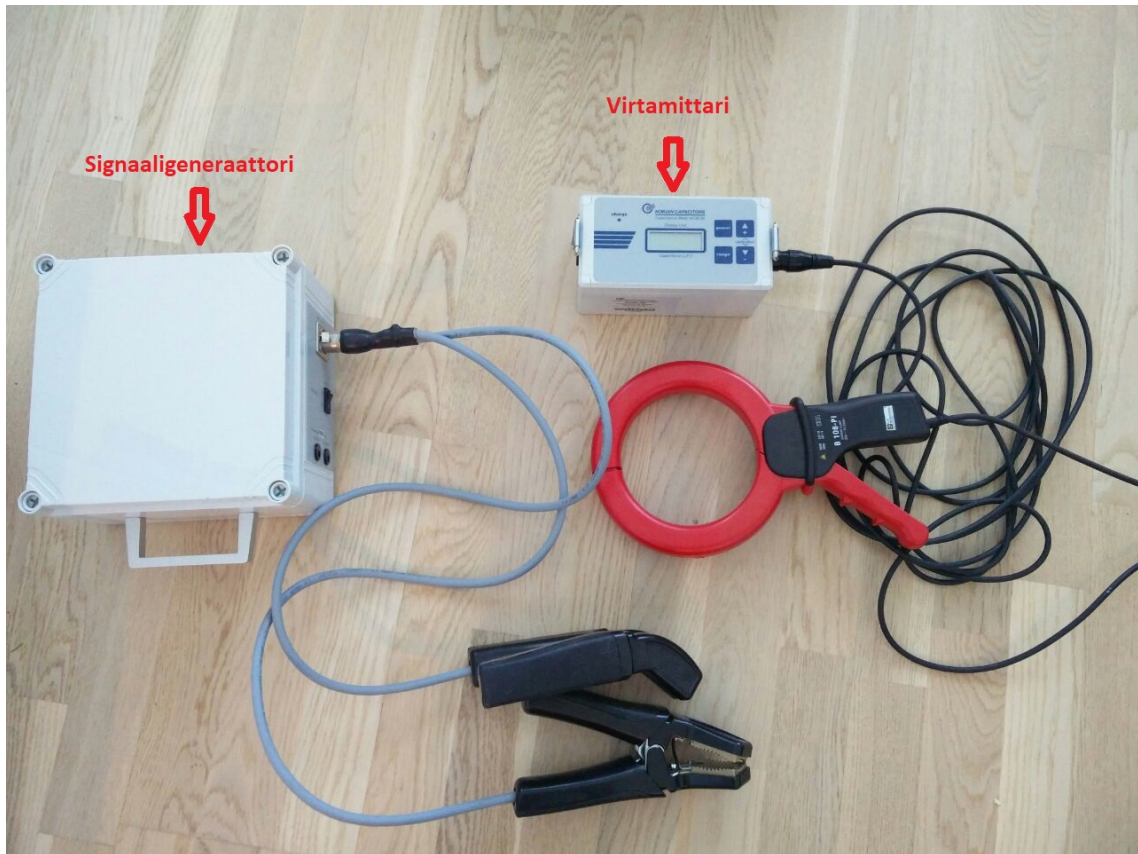
Kuva 6 Kapasitanssimittari NCM-20

Tässä kandidaatintyön kokeellisessa osassa selostetaan projektin etenemistä latauspiirin ja akuston suunnittelusta prototyypin valmistukseen ja sen testaukseen.

3.1 TexasInstruments BQ24133

Latauspiirin suunnittelun ja valmistamisen helpottamiseksi haluttiin käyttää valmiita latausyksikköä, jonka ympärille pystytään rakentamaan pienellä vaivalla toimiva latauspiiri. Siksi latauspiirin keskiöön valittiin TexasInstrumentsin BQ24133.

TexasInstrumentsin BQ24133 on autonominen switch-mode latausyksikkö, jonka latausvirta ja -jännite voidaan asettaa ladattavan akuston vaatimusten mukaan. BQ24133 keskeyttää latauksen automaattisesti, mikäli akun lämpötila ylittää sallitun rajan. BQ24133 valittiin siksi, että kapasitanssimittari NCM-20 käyttää kah- ta erilaista akkua, joille haluttiin kummallekin rakentaa työtaakan minimoimiseksi



Kuva 7 Kapasitanssimittarin NCM-20 eri osat

mahdollisimman samankaltainen latauspiiri. BQ24133 mahdollisti sen, että kummallekin akulle pystyttiin käyttämään yhtä kytkentää lukuunottamatta samaa latauspiiriä. [11]

BQ24133 lataa akun kolmessa vaiheessa: esilataus, vakiovirta ja vakiojännite. Esilatausta käytetään, kun akun akuston jännite on VLOWV-arvon alle. Tämä jännite on kolmea solua käytettäessä 8.7 V ja kahta solua käytettäessä 5.8 V. Raja-arvon saavutettua siirrytään vakiovirtaan, josta siirrytään vakiojännitteeseen kun akun jännite on saavuttanut VBATREG-arvon, joka on kolmen solun akustoa käytettäessä 12,6 V ja kahden solun akustoa käytettäessä 8,4 V. BQ24133 saa 24 pinnisenä QFN (Quad Flat No-leads) pakkauksessa ja sen mitat ovat 5,5 mm x 3,5 mm. [11]

3.1.1 BQ24133 asetukset

Latauspiirin käyttöjännitteenä voidaan käyttää maksimissaan 17 V käyttöjännitettä. Ylärajaa voidaan muuttaa pienemmäksi muuttamalla OVPSET-pinnin jännitettä. Jos latauspiiriin kytketään liian suurijännitteinen teholähde, pysyvät Q1 ja Q2 kiinni, jolloin piirissä ei kulje virtaa, eivätkä sen komponentit pääse vahingoittumaan. Latauspiirin kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 8. [11]

ISET-pinni mittaa latausvirtaa Rsr-vastuksen kautta. Lataus keskeytetään, jos ISET-pinnin jännite tippuu alle 40 mV ja sitä jatketaan, kun ISET-pinnin jännite ylittää 120 mV, siten käytetyn 10 mΩ mittausvastuksen kohdalla pienin sallittu latausvirta on 600 mA. [11]

Jos akun jännite on VLOWV-jännitteen alapuolella, käytetään esilataus-jännitettä, jonka tarkoituksena on ladata syväpurkautuneita akkuja. Jos VLOWV-arvoa ei saavuteta 30 minuutissa latauksen aloittamisesta, lopetetaan lataus ja hohtodiodi, eli LED (Light Emitting Diode) alkaa vilkkua virhetilan indikoimiseksi. Esilatausvirta on BQ24133:ssa valitulla 10 mΩ Rsr-vastuksella 10% pikalatausarvosta. Latauspiirin latausvirta ICharge asetetaan esilatausvirran tapaan ISET-pinnin ja Rsr-vastuksen avulla, mutta se on esilatausvirtaan nähden kymmenkertainen. Esilatausvirran voi laskea kaavan 1 ja latausvirran kaavan 2 avulla. [11]

$$I_{preCharge} = \frac{V_{iset}}{200 * R_{sr}} \quad (1)$$

$$I_{Charge} = \frac{V_{iset}}{20 * R_{sr}} \quad (2)$$

Latausjännite valitaan käytettävien solujen määrän mukaan. Tätä varten latausyksikössä on CELL-pinnin, jonka kytkennän mukaan latausyksikkö päättää latausjännitteen. Kun CELL-pinni on kytketty AGND:hen, on latausjännite 4,2 V, kun CELL-pinni on jätetty kellumaan, on latausjännite 8,4 V ja kun se on kytketty VREF-jännitteeseen, on latausjännite 12,6 V. [11]

BQ24133 pystyy valitsemaan käytettävän reitin virralle tilanteen mukaan käyttämällä sisääntulon NMOS-transistoriparia Q1 ja Q2 ja PMOS-transistoria Q3, jotka näkyvät kuvassa 8. Kun oikeanlainen virtalähde on kytketty, on akun kuorma kytketty suoraan virtalähteeseen, muussa tapauksessa kuorma on kytketty akkuun. Lisäksi akun purkautuminen virtalähteeseen estetään diodilla D1. [11]

3.2 Suunnittelu

Akkupäivitysprojektin alussa päätettiin käyttää litiumioniakkuja niiden alhaisen painon ja suuren ominaisenergian takia. Litiumioniakut tarvitsevat erilaisen latauspiirin kuin lyijyakut, joten latauspiirin suunnittelu nousi projektin monimutkaisimpana osuutena projektin pääosaan.

Akkusoluiksi valittiin Samsung 18650 2500 mAh Litiummangaani-solut niiden alhaisen hinnan, sopivan kapasiteetin ja ominaisuuksien takia. Signaaligeneraattorille rakennettiin kolmesta solusta ja virtamittarille kahdesta solusta valmistettu akusto oikeiden jännitteiden saavuttamiseksi. Akustot rakennettiin kytkemällä solut sarjaan balansointipiiriin kautta.

Yhden Litiummangaanisolun jännite on 3,6 V, joten signaaligeneraattorin akuston energiaksi tulee siten $2500 \text{ mAh} * 3 * 3,6 \text{ V} = 27 \text{ Wh}$ ja virtamittarin akuston energiaksi tulee $2500 \text{ mAh} * 2 * 3,6 \text{ V} = 18 \text{ Wh}$.

Signaaligeneraattorille suunniteltu akkupaketti on 3:n solun sarjakytkentä, jonka jännite on vain 10,8 V, vaikka signaaligeneraattori vaatii 12 V jännitteen. Siksi valmiiseen prototyyppiin tarvitaan todennäköisesti step-up hakkuri akun ja kuorman väliin, jolloin haluttu jännite saavutetaan. Virtamittarin suunnitellun akuston jännite tulee sen sijaan olemaan liian korkea, sillä kahden sarjaan kytketyn solun jännite on 7,2 V. Siksi akun ja kuorman väliin pitää todennäköisesti asentaa regulaattori halutun 6 V jännitteen saavuttamiseksi. Näiden lisäysten tarpeellisuus selviää myöhemmissä testeissä, kun mittarin toimintaa ja mittaustarkkuutta päästään testaamaan uusilla akuilla, eikä niitä käsitellä tässä työssä sen enempää.

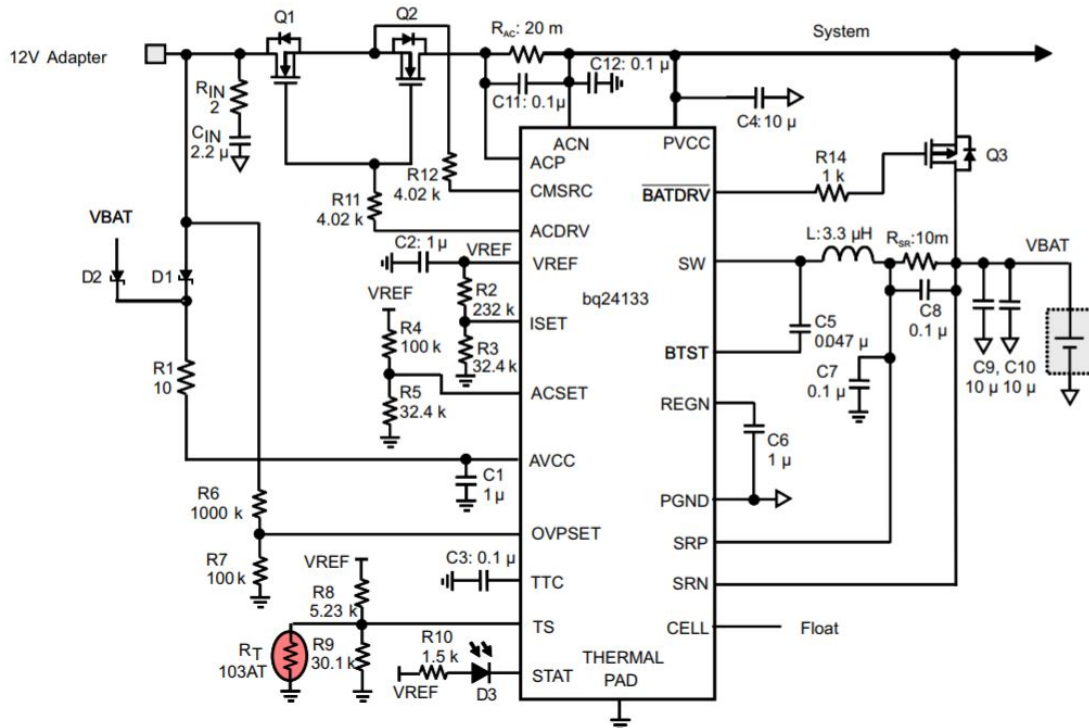
Akkujen datalehden mukaan niiden normaali lataus tapahtuu 1,25 A virralla ja 4,20 V jännitteellä. Akkujen latausvirralle on määritelty myös maksimiarvo pikalataukselle, joka on 4 A. [12] Solujen korkein latausjännite on 4,2 V, joka on myös TexasInstrumentsin BQ24133 käyttämä yhden solun latausjännite kolmen solun akustoa ladatessa. Latausvirta asetettiin käyttämällä 10 mΩ Rsr-vastusta, jolloin korkein käytetty latausvirta on 2,5 A. [11, 12]

Kapasitanssimittari on luokiteltu mittaamaan korkeintaan 2000 μF kondensaattoreita, joten mittarin tarvitsema virta voidaan selvittää käyttämällä yhtälöä 3 reaktanssin laskemiseksi, jonka avulla voidaan laskea signaaligeneraattorin vaatima maksimivirta.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3)$$

Yhtälöstä 3 saadaan mitattavan kondensaattorin maksimireaktanssiksi $0,7114 \Omega$. Tästä voidaan laskea Ohmin lain avulla ($U = ZI$) maksimivirraksi $1,9 \text{ A}$, joka on valittujen akkujen maksimipurkausvirran rajojen sisällä.

Latauspiiri päätettiin toteuttaa käyttämällä TexasInstrumentsin valmista latausyksikköä BQ24133, jonka ympärille suunniteltiin piirin halutun toiminnan kannalta tarvittavat jännitteenjakajat, suodatukseen käytettävät kondensaattorit ja lataustapahtumaa, sekä energianhallintaa ohjaavat transistorit. Latauspiirin piirikaavio ja komponenttienmitoitus otettiin suoraan latausyksikön BQ24133 datalehdeltä suunnitteluvirheiden riskin minimoimiseksi. Piirikaavio on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8 Kytkenän piirikaavio [11]

BQ24133 käyttää CELL-pinniä latausjännitteen määrittämiseksi. BQ24133 käyttää $4,2 \text{ V/solu}$ jännitettä, joten latausjännitteen valinta tulee tehdä ladattavien solujen määrän mukaan. Signaaligeneraattorin akku koostuu kolmesta solusta ja vaatii $12,6 \text{ V}$ latausjännitteen, joten sille tehdyn latauspiirissä CELL-pinni kytkettiin VREF-jännitteeseen. Virtamittarissa taas käytetään kahta solua, joten CELL-pinni jätettiin kellumaan, jolloin latausjännite on $8,4 \text{ V}$. [11]

Piirilevy suunniteltiin käyttämällä Altium PCB Designer -ohjelmaa, koska TexasInstrumentsin verkkosivuilta oli saatavilla kyseiselle ohjelmalle komponenttikirjastoja, joista oli suuri apu suunnittelussa. Altiumin käyttöön saatiin paljon apua myös CAE-elektronikassa kurssin harjoitustyöohjeesta.

Kyseisen piirilevy-suunnitteluohjelman käytöstä oli vain vähän kokemusta, joten virheilä ei välttytty. BQ24133 latausyksikköä varten piti luoda oma komponentti, joka oli vaikeaa ilman aikaisempaa kokemusta. Ongelmiin törmättiin myös siksi, että Altium PCB-design oletusasetuksena piirilevyn alapuolen valotusmaskin värille oli harmaa, jolloin tulostettu valotusmaski päästi liikaa valoa läpi ja yksi piirilevy meni pilalle syövytysvaiheessa.

3.3 Prototyypin rakentaminen

Altiumista tuotujen valmistustiedostojen avulla tulostettiin valotusmaski piirilevyn ylä- ja alapuolelle. Valmistustiedoista leikattiin valotusmaskit Inkscape-ohjelmaan, johon asetettiin oikea dokumentin leveys ja sopiva korkeus. Tiedosto tallennettiin 2400 dpi laatuksena pdf-tiedostona ja varsinainen tulostaminen tehtiin käyttämällä AccuRip-ohjelmaa ja Epson Stylus Pro 4900 -tulostinta. Valotusmaski ja muut valmistustiedostot on esitetty liitteessä 1.

3.3.1 Piirilevyn valmistus

Piirilevyn johdinkuvio syövytettiin käyttämällä fotolitografiaa. Käytetyn piirilevyn kuparoinnin päällä oli fotoresististä ainetta, eli fotoresistiä, joka estää kuparin syöpymisen fotoresistin peittämältä alueelta. Fotoresisti oli ns. positiivista, eli sen rakenne muuttuu ultraviolettisäteilylle, eli UV-valolle altistettaessa siten, että se irtaantaa kuparoinnin pinnasta, kun se tulee kosketukseen kehitteen kanssa. Kehitteenä käytettiin natriumhydroksidia (NaOH) eli lipeää. Valotuksessa käytettiin Altium PCB-designerista saatavaa valotusmaskia, joka peittää alueet, joihin halutaan jättävän kuparia syövytyksen jälkeen. Kun valolle altistunut fotoresisti saatiin poistettua kehitteellä, upotettiin piirilevy suolahaposta ja vetyperoksidista valmistettuun vesiliuokseen. Tällöin kupari syöpyi irti substraatista niiltä alueilta, joista fotoresisti oli liuennut aiemmassa työvaiheessa. Tällöin substraatin pintaan oli jäänyt kuparinen johdinkuvio. Ylimääräinen fotoresisti poistettiin asetonilla ja piirilevyn päälle suihkutettiin juoksutetta sisältävää lakkaa, joka estää kuparointia hapettumasta ja samalla helpottaa komponenttien kiinnijuottamista. Lopuksi levyyn porattiin reiät läpiladottavien komponenttien kiinnittämistä ja läpivientejä varten.

3.3.2 Komponenttien kiinnijuottaminen

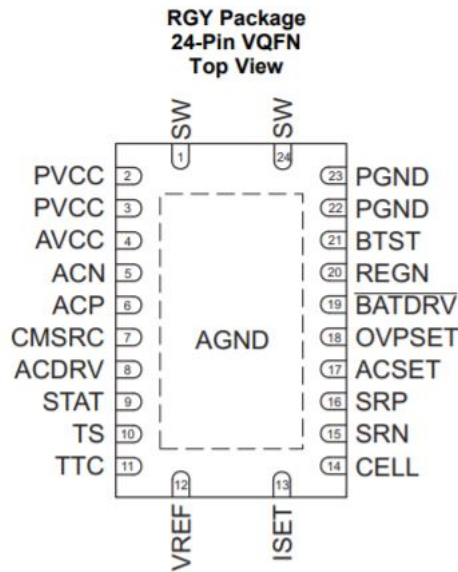
Juottamisessa ongelmia aiheutti Altiumin tehdasasetuksena ollut 0,3 mm väli kuparivaloksen ja johtimien välillä, joka aiheutti oikosulkuja. BQ24133 pinnienvälinen

etäisyys on vain 0,2 mm ja viivaleveys vain 0,3 mm, joten jalkojen juottaminen vaatii erityistä tarkkuutta. Komponentin pakkaus on tyypiltään QFN eli komponentilla ei ole pakkauksen ulkopuolelle ulottuvia jalkoja. Normaalisti tällainen komponentti kiinnitettäisiin pastapaino-menetelmällä, mutta Tampereen teknillisen yliopiston, eli TTY:n oppilaslaboratoriossa ei ole sellaiseen mahdollisuutta. Siksi juottaminen piti toteuttaa siten, että piirilevyn padit päällystettiin ensin tinalla ja sitten asetettiin komponentti paikalleen. Tämän jälkeen padeja lämmitettiin kolvilla varovasti, jolloin padeilla ollut tina sulii ja komponentin jalat kiinnittyivät padeihin. Padien ja komponentin pienen koon takia komponentti siirtyi usein paikaltaan kolvin osuessa siihen vahingossa ja asettelu piti aloittaa alusta. BQ24133 lisäksi käytetyt transistorit olivat QFN-pakkauksessa, joten niidenkin juottaminen oli todella työlästä.

3.4 Testaus

Testauksen alkuvaiheessa huomio kiinnittyi latauspiirin käyttöliittymänä toimivaan hohtodiodiin, eli LED:iin, joka kuvaa latauspiirin toimintaa. Vikatilanteessa, kuten akun puuttuessa LED:in kuuluisi vilkkua, akkua ladatessa sen tulisi palaa yhtäjaksoisesti ja akun ollessa täysi sen tulisi olla sammuksissa. Testaus aloitettiin kytkemällä latauspiiriin käyttöjännite, mutta akku jätettiin kiinnittämättä. Tällöin LED:in tulisi vilkkua vikatilanteen ilmaisemiseksi. Tällöin piirin virheellinen toiminta havaittaisiin heti testauksen alussa.

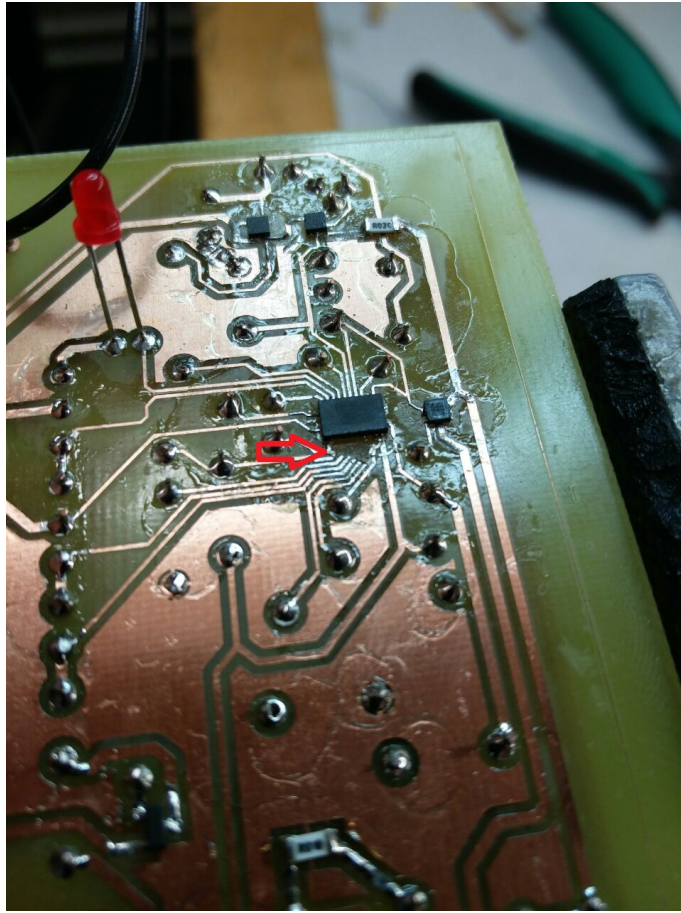
Ensimmäisen version testauksessa huomattiin, että LED ei toiminut halutulla tavalla. Itseasiassa se ei toiminut ollenkaan. LED:in toimimattomuuden syyn uskottiin olevan se, että latauspiirin analoginen maataso jäi epähuomiossa kytkemättä kiinni, sillä sen ulostulona toimii piirin alapinnassa oleva jäähdytyslevy. Siksi kaikki BQ24133:n ulostulojen jännitteet olivat kelluvia, eikä piiri siten toiminut halutulla tavalla. AGND-pinni näkyy kuvassa 9.



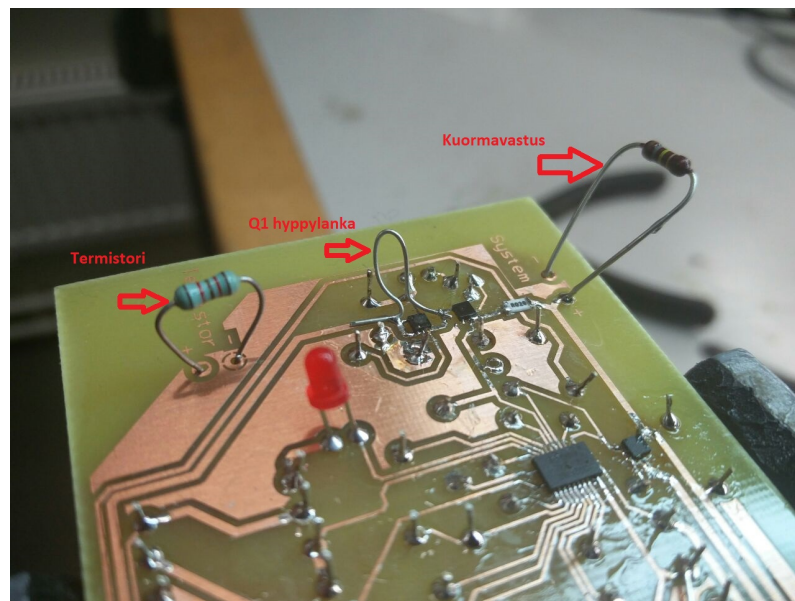
Kuva 9 AGND-pinninä toimii latausyksikön alla sijaitseva lämpölevy [11]

Vikaa yritettiin korjata irrottamalla latauspiiri levystä ja poraamalla sen alle läpivihti, joka kytkettäisiin analogiseen maatasoon. Piiriä irrottaessa kuitenkin BQ24133 pinneille johtavat johtimet katkesivat liian korkean lämpötilan takia. Tästä syystä valmistettiin kokonaan uusi piirilevy, jossa myös kondensaattori C4 siirrettiin datalehden ohjeiden mukaisesti lähemmäksi latauspiiriä. Katkenneet johdot on esitetty kuvassa 10.

Uuden version testauksessa törmättiin samaan ongelmaan, sillä LED ei tälläkään kertaa vilkkunut akun poissaollessa. Samalla huomattiin, että transistori Q1 oli kiinni, vaikka sen kuuluisi olla auki silloin kun sisäänmenojännite on sallitun jännitealueen sisällä, eli 4,5 V - 17 V. LED:in toimimattomuuden syytä selvittäessä Q1 oikosuljettiin hyppylangalla ja analoginen maa AGND kytkettiin tehomaaan PGND, sillä datalehden mukaan niin voi tehdä, mutta ainoastaan BQ24133 lämpölevyn kautta. Samalla akkujen ja latauspiirin kuormaa simuloimaan latauspiirin ulostuloon asetettiin 169 k Ω vastus ja termistoria simuloimaan asetettiin sen kohdalle 12 k Ω vastus, joka vastaa termistorin TA103 resistanssia, kun sen lämpötila on sallitun lämpötila-alueen sisällä. Nämä muutokset tehtiin siksi, että ne olisivat mahdollisesti voineet vaikuttaa LED:in toimintaan. Hyppylanka, latauspiirin ulostuloa simuloiva vastus ja termistorin vastus näkyvät kuvassa 11.

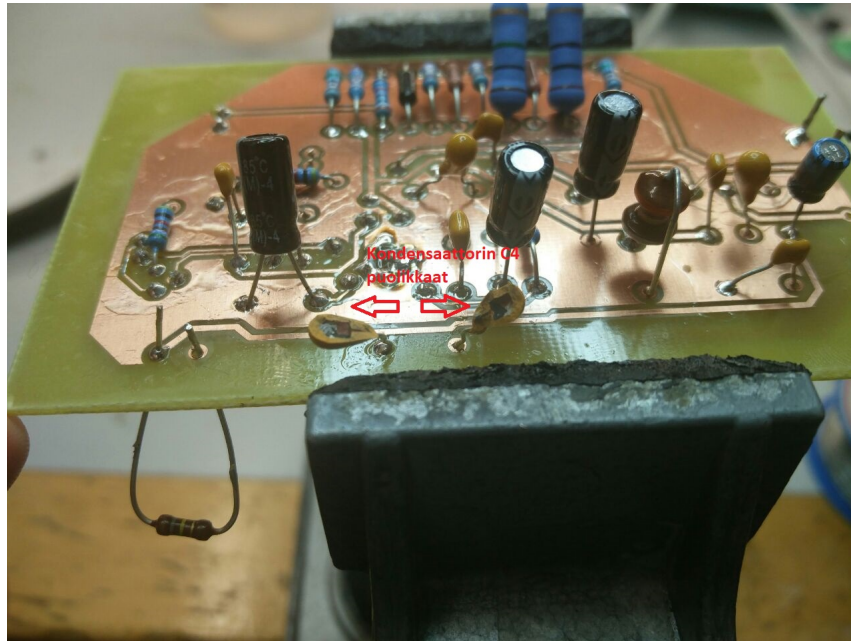


Kuva 10 Liiallisesta lämmöstä katkenneita johtimia

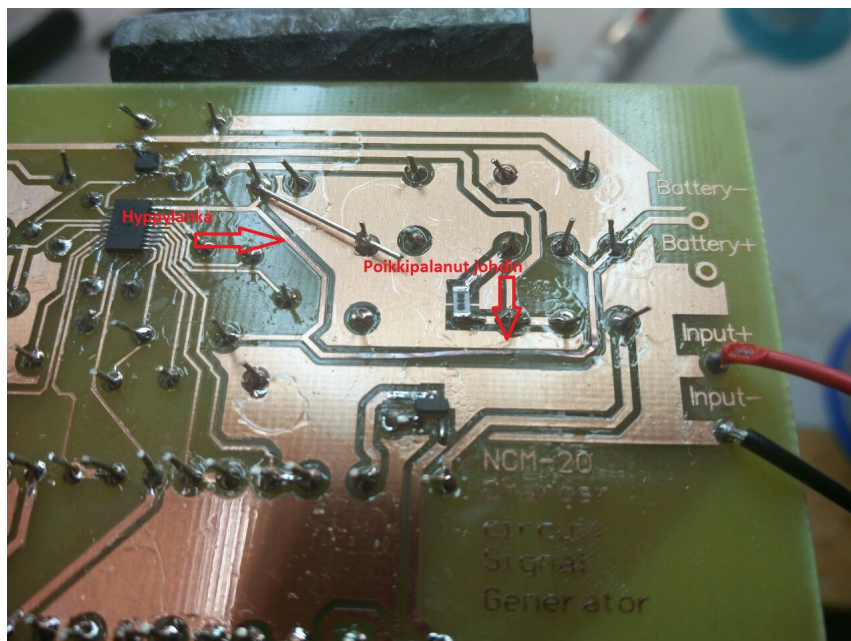


Kuva 11 Q1 oikosuljettiin, kuormaksi 169 k Ω vastus ja termistoriksi 12 k Ω vastus

Muutoksista huolimatta LED ei edelleenkään vilkkunut. Siltä varalta, että piiri ei huomaa akun puuttumisesta johtuvaa vikatilannetta, mutta toimii muuten oikein, päätettiin kytkeä akku kiinni. Akkua kytkettäessä kuitenkin C4 räjähti ja akun negatiiviselta navalta kondensaattorille C10 johtava johdin paloi poikki. Vahingot näkyvät kuvissa 12 ja 13. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että kondensaattori C4 jäi ainoaksi komponentiksi akun positiivisen navan ja maan väliin johtimen palettua poikki.



Kuva 12 Räjähäntynyt kondensaattori C4



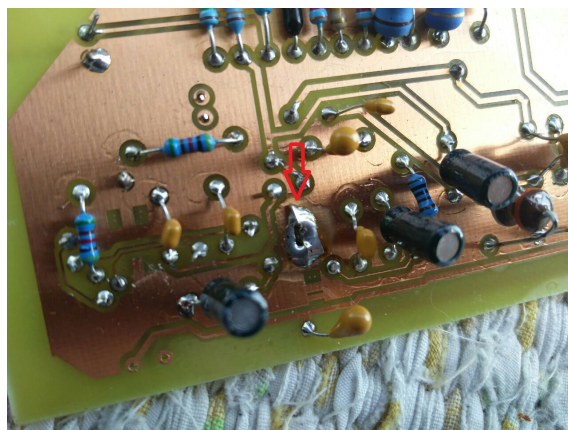
Kuva 13 AGND ja PGND välinen hyppylanka ja poikki palanut johdin

Piirin toimimattomuuden oletettiin edelleen johtuvan latauspiirin maatasen heikosta kytköksestä BQ24133 maadoituslevyyn. Siksi piirilevyyn porattiin komponentin alle suuri kolo, josta maadoitus saatiin kytkettyä varmemmin. Kolo on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14 BQ24133 alle porattu reikä kuvattuna levyn yläpuolelta

BQ24133 juotettiin ensin pinneistään kiinni ja sen jälkeen piirilevyn kääntöpuolelta pujotettiin kaksi johdinta koskettamaan jäähdytyslevyä, eli AGND-pinniä mahdollisimman laajalta alueelta. Valmis juotos näkyy kuvassa 15.



Kuva 15 BQ24133 alle porattu reikä, josta liitetty latausyksikön ja levyn maatasot yhteen

Viimeisimmistä muutoksista huolimatta latauspiiri ei alkanut toimimaan. Tässä vaiheessa piirin rakentamiseen oltiin kuitenkin käytetty niin paljon aikaa, että ei olisi enää ollut mielekästä käyttää siihen enemmän energiaa ja aikaa. Siksi itse tehty latauspiiri ja akusto päätettiin korvata kaupallisella versiolla.

3.4.1 Vianmääritys

Piiri suunniteltiin latausyksikkö-BQ24133:n datalehden ohjeiden mukaan, joten todennäköisesti latauspiirin toimimattomuus ei johtunut suunnitteluvirheestä. Todennäköisin syy toimimattomuudelle on siten piirilevyn valmistus, joka oli käytettävissä olleilla varusteilla todella haasteellista. Transistorien Q1, Q2 ja Q3, sekä latausyksikön BQ24133 kiinnitys olisi QFN-pakkauksen takia vaatinut pastapainomenetelmän, sillä pelkkää kolvia käyttämällä jouduttiin komponentteja lämmittämään todella paljon, mikä saattoi johtaa niiden ylikuumentumiseen. Lisäksi kussakin edellämämainitussa komponentissa maataso on yhdistetty komponentin alapinnassa olevaan lämpölevyyn, joka osoittautui lähes mahdottomaksi saada juotettua kunnolla kiinni. Ainoa vaihtoehto sen kiinnijuottamiseen ilman pastapainomenetelmää oli porata reikä komponentin alle ja yrittää ujuttaa sieltä tinaa tai johdin kiinni lämpölevyyn ja siitä maatasoon. Tämä olisi etenkin transistorien kohdalla ollut todella vaikeaa, sillä lämpölevy on todella pieni, eikä siihen siten olisi saanut yhdistettyä johdinta reiän kautta.

4. YHTEENVETO

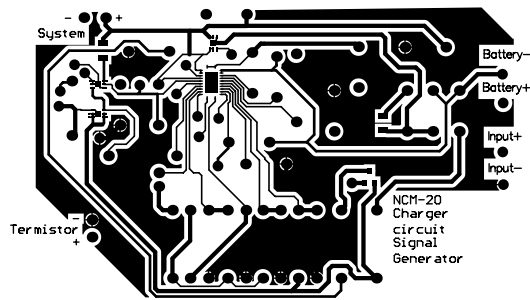
Litiumioniakut ovat lupaava energiavarasto vihreämmälle maapallolle, mutta niihin liittyy useita ongelmia, joiden ratkaiseminen määrittelee sen, onko niistä nykyisten pinttyneiden käytäntöjen korvaajaksi. Litiumioniakkujen käyttöikä on niiden rakentamiseen vaadittavaan energiaan nähden edelleen liian lyhyt, ja ne poistetaan esimerkiksi autoteollisuudessa käytöstä jo kun niiden teho on laskenut 80%:iin alkuperäisestä. Näistä vain hetken käytössä olleista akuista kuitenkin vain pieni osa päätyy kierrätykseen, mikä aiheuttaa ympäristöhaittoja. Lisäksi litiumioniakkujen vaatimien metallien kaivaminen maaperästä on erityisen tuhoisaa maissa, joissa ympäristönäkökulma jää yritystoiminnan voitontavoittelun jalkoihin. Litiumioniakut sisältävät myös suurempia turvallisuusriskejä kuin tavanomaiset energianvarastointitavat, esimerkiksi autoissa. Ei ole myöskään mielekästä rakentaa näennäisesti ympäristöystävällisiä, sähkökäyttöisiä autoja ja energiavarastoja, jos niihin varastoitava energia tuotetaan polttamalla fossiilisia polttoaineita. Litiumioniakkujen tulevaisuus vaikuttaa kuitenkin lupaavalta, sillä niiden kierrättäminen on yleistymässä ja parempia materiaalivaihtoehtoja löydetään jatkuvasti. [4] Lisäksi kansainvälisten ponnisteluiden ansiosta yhä suurempi osa maailman sähköstä tuotetaan ympäristöystävällisesti.


Tämän kandidaatintyön kokeellisen osuuden rakentelutyössä tehtiin virhe heti suunnittelun alussa, sillä siinä ei otettu huomioon komponenttien kiinnittämiseen vaadittavaa tekniikkaa. TTY:n oppilaslaboratorion puitteisiin olisi sopinut paremmin Raspberry Pi:n kaltaisella mikrotietokoneella tai mikrokontrolleripiirillä toteutettu latauspiiri. Tällaisella toteutuksella rakentelutyön pääpaino olisi siirtynyt suunnitteluun, joka olisi ollut oppimisen kannalta toivottavaa. Valmiilla latausyksiköllä toteutetun version tekemisessä suurin osa ajasta meni itse piirin rakentamiseen ja vianmääritykseen, joka ei kuitenkaan ollut kovin opettavaista.

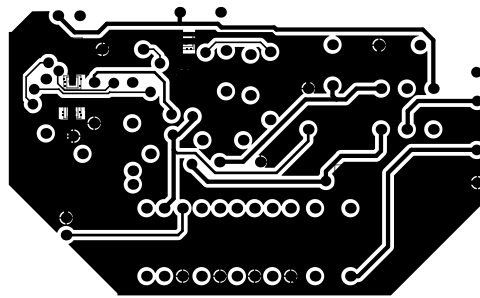
LÄHTEET


- [1] A. Väyrynen and J. Salminen, “Lithium ion battery production,” *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 46, no. Supplement C, pp. 80 – 85, 2012. Thermodynamics of Sustainable Processes.
- [2] T. Horiba, “Lithium-ion battery systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, pp. 939–950, June 2014.
- [3] M. Sittig, “Lithium,” *AccessScience*, 2017.
- [4] “Front matter,” in *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design* (J. Warner, ed.), pp. iii –, Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [5] M. Wang, X. Xiao, and X. Huang, “A multiphysics microstructure-resolved model for silicon anode lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 348, pp. 66 – 79, 2017.
- [6] “Hybrid cars: Gm says li-ion battery cells down to 145/kwh and still falling,” Oct 02 2015. Copyright - Copyright Newstex Oct 2, 2015; Last updated - 2015-10-02.
- [7] G. Saevarsdottir, P. chun Tao, H. Stefansson, and W. Harvey, “Potential use of geothermal energy sources for the production of lithium-ion batteries,” *Renewable Energy*, vol. 61, no. Supplement C, pp. 17 – 22, 2014. World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden.
- [8] H. Hao, Z. Mu, S. Jiang, Z. Liu, and F. Zhao, “Ghg emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in china,” *Sustainability*, vol. 9, no. 4, 2017.
- [9] N. C. Oy, “Ncm-20 käyttöohje,”
- [10] M. Tapper., “Ge gridsolution työntekijöiden haastattelu,”
- [11] T. Ltd., “Texasinstruments ltd. bq24133 1.6-mhz synchronous switched-mode li-ion and li-polymer stand-alone battery charger with integrated mosfets and power path selector - datasheet,” *TexasInstruments*, 2015.
- [12] L. E. B. D. Samsung SDI Co., “Samsung inr18650-25r datasheet,” 2014.

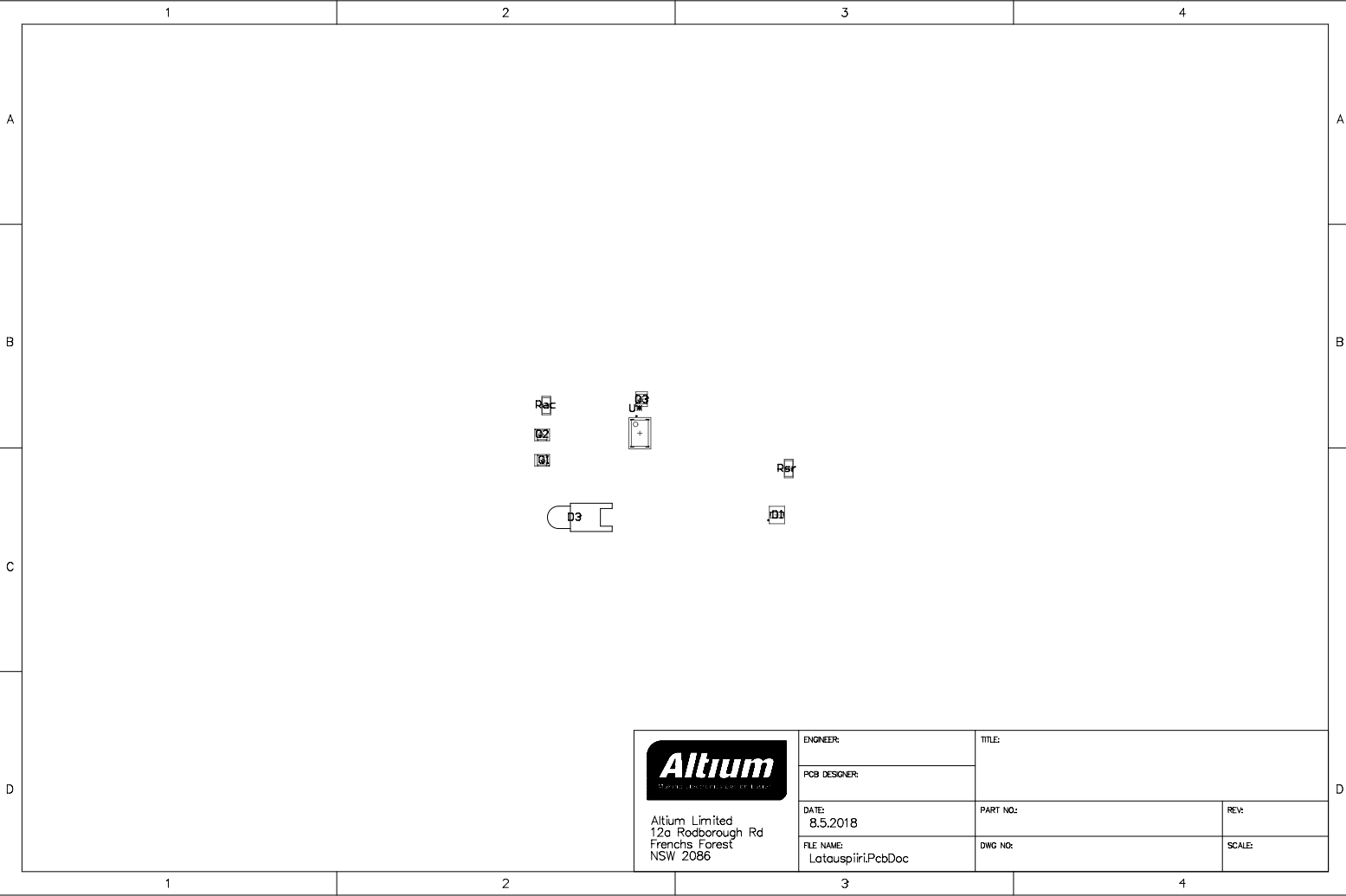
LIITE 1. GERBER-TIEDOSTOT




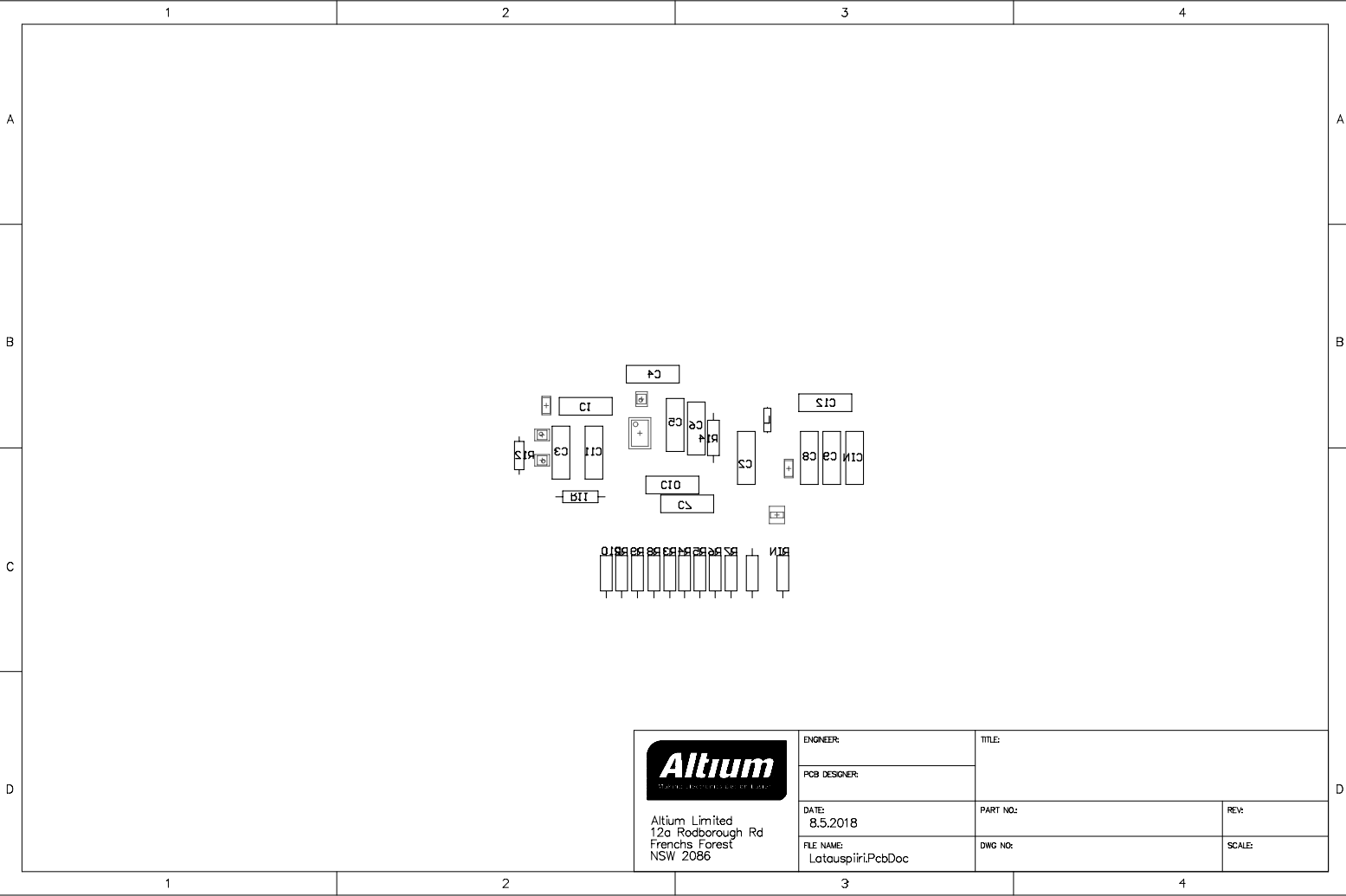
 <p>Altium Limited 12a Rodborough Rd Frenchs Forest NSW 2086</p>	ENGINEER:	TITLE:	
	PCB DESIGNER:		
	DATE: 8.5.2018	PART NO.:	REV:
	FILE NAME: Latauspiri.PcbDoc	DWG NO.:	SCALE:




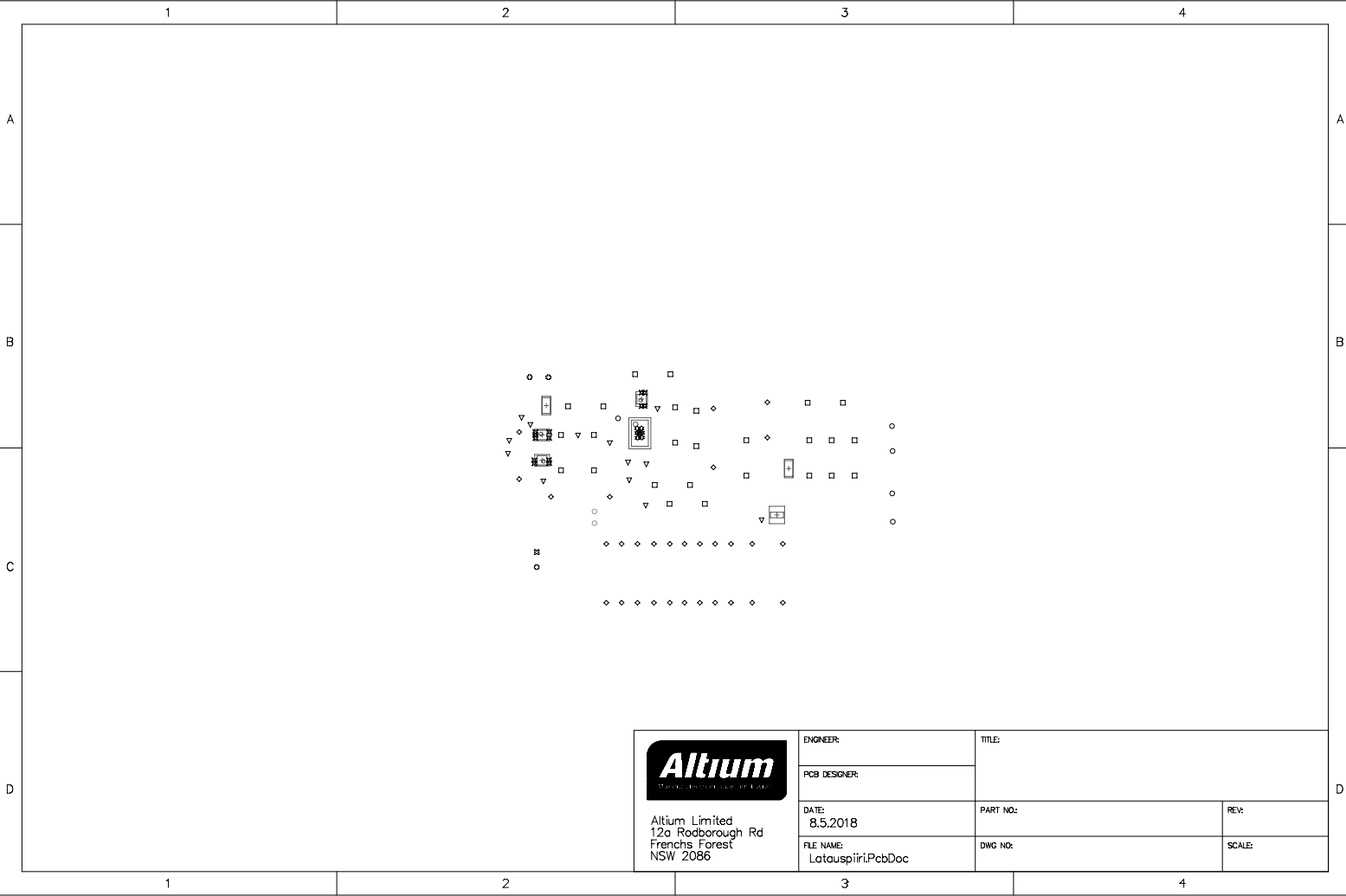
 Altium Limited 12a Rodborough Rd Frenchs Forest NSW 2086	ENGINEER:	TITLE:	
	PCB DESIGNER:		
	DATE: 8.5.2018	PART NO.:	REV:
	FILE NAME: Latauspiri.PcbDoc	DWG NO.:	SCALE:




 <p>Altium Limited 12a Rodborough Rd Frenchs Forest NSW 2086</p>	ENGINEER:	TITLE:	
	PCB DESIGNER:		
DATE: 8.5.2018	PART NO.:	REV:	
FILE NAME: Latauspiri.PcbDoc	DWG NO.:	SCALE:	



 Altium Limited 12a Rodborough Rd Frenchs Forest NSW 2086	ENGINEER:	TITLE:	
	PCB DESIGNER:		
	DATE: 8.5.2018	PART NO.:	REV:
	FILE NAME: Latauspiri.PcbDoc	DWG NO.:	SCALE:



 Altium Limited 12a Rodborough Rd Frenchs Forest NSW 2086	ENGINEER:	TITLE:	
	PCB DESIGNER:		
	DATE: 8.5.2018	PART NO.:	REV:
	FILE NAME: Latauspiri.PcbDoc	DWG NO.:	SCALE: