



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Juho Heijari

AKKUMALLI LTSPICE XVII -OHJELMISTOA HYÖDYNTÄEN

Tekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Juho Heijari
Opinnäytetyön nimi	Akkumalli LTspice XVII –ohjelmistoa hyödyntäen
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	44
Ohjaaja	Jukka Hautala

Opinnäytetyön aiheena on akkujen purkautumiseen liittyvien ilmiöiden demonstrointi eri kytkennöillä hyödyntäen LTspice XVII -ohjelmistoa. Opinnäytetyössä on mitattu Ni-MH-kennojen purkautumisaikaa ja jännitteen muutosta sarjaan, rinnan sekä sarjaan että rinnan kytkettyinä viidellä eri virran arvolla (5000 mA, 2500 mA, 1250 mA, 500 mA ja 250 mA). Lisäksi työssä on LTspice XVII -ohjelmiston käyttöön liittyviä harjoitustehtäviä.

Opinnäytetyö koostuu teoriaosuudesta, jossa käsitellään tutkimuksen kannalta oleellisia asioita akuista, kuten erinäisten kytkentöjen vaikutuksista akkuihin. Teoriaosuudessa käsitellään myös LTspice XVII -ohjelmiston käytön perusteita ja oleellisimpia toimintoja. Työn toisessa osuudessa tutkitaan NiMH-kennon kytkentöjen vaikutusta simuloinnin kautta kennojen purkautumisaikaan.

Tutkimuksesta saadut tulokset olivat odotusten mukaisia, eivätkä näin ollen tuoneet yllätyksiä.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Energiatekniikka

ABSTRACT

Author	Juho Heijari
Title	Stimulating Learning at the Applied Science University
Year	2022
Language	Finnish
Pages	44
Name of Supervisor	Jukka Hautala

The subject of this thesis is to demonstrate the discharge characteristics of Ni-MH battery cells in different connections using the LTspice XVII software. In the thesis, the discharge time and voltage of the cells were measured using series, parallel and series-parallel connections. The measurements were made with five different current values (5000 mA, 2500 mA, 1250 mA, 500 mA, and 250 mA). In addition, the thesis contains some exercises regarding the use of the LTspice XVII software.

The thesis consists of theory section which contains some relevant information about batteries for the study as well as the most common functions of LTspice XVII. The second part of the thesis consists of the models made by using the LTspice XVII and the simulation results.

The simulation results were quite predictable and produced no surprises.

Keywords LTspice XVII, battery and discharge time

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	TEORIAA AKUISTA.....	9
	2.1 Akkujen latautuminen.....	10
	2.2 Akkujen purkautuminen	11
	2.2.1 Purkautumisnopeus	12
	2.3 Ni-MH-akku	12
	2.4 Akkujen kytkennät	13
	2.4.1 Yksittäisen kennon käyttö	14
	2.4.2 Akkujen rinnankytkentä	14
	2.4.3 Akkujen kytkentä sarjassa	15
	2.4.4 Akkujen kytkentä sarjaan ja rinnan.....	16
3	LTSPICE XVII –OHJELMISTO	18
	3.1 LTspice XVII -ohjelmiston käyttö.....	19
	3.2 Yläpalkki	20
	3.3 Control Panel.....	21
	3.4 Waveform	22
	3.5 Valmiiden piirien käyttö LTspice -XVII -ohjelmistossa	22
	3.5.1 Demopiirin lataaminen	23
	3.5.2 Ohjelmiston test fixtureiden hyödyntäminen.....	23
	3.5.3 Opetuksellisten esimerkkien hyödyntäminen	23
4	AKKUMALLIT LTSPICELLA.....	25
	4.1 Mallipohja	25
	4.1.1 Diodi	25

4.1.2	Virtalähde (independent current source)	26
4.1.3	Ni-MH-kenno.....	27
4.1.4	Tulokset.....	28
4.2	Kytkenä sarjassa	30
4.2.1	Tulokset.....	30
4.3	Kytkenä rinnan.....	31
4.3.1	Tulokset.....	32
4.4	Rinnan- ja sarjassa kytkenä	33
4.4.1	Tulokset.....	33
5	HARJOITUSTEHTÄVIÄ.....	34
5.1	Tehtävä 1. Jännitteenjakaja	34
5.1.1	Työn vaiheet.....	35
5.1.2	Vastaukset.....	39
5.2	Tehtävä 2. Akkumallin tuonti netistä LTspiceen ja kennojen rinnankytkentä.	39
5.2.1	Työn vaiheet.....	40
6	YHTEENVETO	42
	LÄHTEET	43

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Akun purkautuessa negatiivinen elektrodi vapauttaa elektroneja, ja positiivinen elektrodi absorboi elektroneja.	11
Kuva 2. Kennojen kytkentä rinnan havainnollistettuna.	15
Kuva 3 Kennojen kytkentä sarjassa havainnollistettuna.	16
Kuva 4 Kennot kytkettynä sarjaan ja rinnan.	17
Kuva 5. Virtapiiri LTspicessä.	19
Kuva 6. Control Panel ikkuna LTspicessä.	21
Kuva 7. Waveform-ikkuna LTspicessä.	22
Kuva 8. Perusmalli.	25
Kuva 9. Muuttujan "n" kertoimet mallissa.	26
Kuva 10. Virtalähteen asetukset.	27
Kuva 11. ENERGIZER NH15-2500 kenno.	27
Kuva 12. Perusmallin pohjalta suoritettujen simulaation tulokset.	28
Kuva 13. Mallissa käytetyn kennon valmistajan ilmoittamat purkautumisajat. ...	29
Kuva 14. Kaksi Ni-MH-kennoa kytkettynä sarjaan.	30
Kuva 15. Simuloinnin tulokset, kun kaksi Ni-MH-kennoa on kytketty sarjaan.	31
Kuva 16. Kaksi Ni-MH-kennoa kytkettynä rinnan.	31
Kuva 17. Simuloinnin tulokset, kun kaksi Ni-MH-kennoa on kytketty rinnan.	32
Kuva 18. Neljä Ni-MH-kennoa kytkettynä sekä sarjaan, että rinnan.	33
Kuva 19. Simuloinnin tulokset, kun neljä Ni-MH-kennoa kytkettynä sekä sarjaan, että rinnan.	33
Kuva 20. Jännitteenjakaja.	34
Kuva 21. New Schematic.	35
Kuva 22. Jännitteen lähteen valinta.	36
Kuva 23. Komponentit kytkettynä.	37
Kuva 24. Simulaation mittaussajan asettaminen.	38

Kuva 25. Cursorin käyttö.....	39
Kuva 26. Akkumallin tallennus.....	40
Kuva 27. Tekstin koon muuttaminen.....	40
Kuva 28. Rinnankytkentä.	41
Taulukko 1. Yläpalkin keskeiset toiminnot ja symbolit.	20

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on akkukennon latautumiseen ja purkautumiseen liittyvien ilmiöiden demonstrointi eri kytkennöillä hyödyntäen LTspiceXVII -ohjelmistoa. Työssä demonstroidaan netistä löytynyttä valmista mallia hyödyntäen eri kytkentöjen vaikutusta akun purkautumisaikaan ja jännitteeseen. Sain tämän insinööriyden aiheen opettajaltani. Opinnäytetyötä on tarkoitus käyttää oppimismateriaalina esimerkiksi Battery Drives -kurssilla.

Työssä käytettävien akkumallien pohjana toimii valmis Ni-MH-kennosta tehty mallinnus, jota muokkaamalla erinäisillä kytkennöillä pyritään saavuttamaan halutut tulokset. Lisäksi työn tavoitteena on tarjota selkeät ohjeet mallien laatimiseen ja käyttöön sekä tarjota harjoitustehtäviä opiskelijoiden ratkaistavaksi.

Työn teoriaosuus koostuu akkujen purkautumisesta, latautumisesta ja eri kytkentöjen vaikutuksista akun toimintaan. Lisäksi teoriaosuuteen kuuluu lyhyt esittely LTspice XVII -ohjelmistosta ja sen oleellisimmista toiminnoista.

Opinnäytetyössä käsitellään kennojen rinnan, sarjassa ja rinnan/sarjassa kytkennät. Simulaatiossa saatuja tuloksia verrataan alkuperäisen mallin pohjalta saatuihin tuloksiin, jotka havainnollistavat kytkentöjen vaikutusta kennojen toimintaan. Purkautumisajat on mitattu viidellä eri virran arvolla (5000 mA, 2500 mA, 1250 mA, 500 mA ja 250 mA).

2 TEORIAA AKUISTA

Akku on kemiallinen laite, jota käytetään sähkön varastointiin. Sähköä voidaan varastoida useilla tavoilla, mutta tässä opinnäytetyössä käsitellään nimenomaan kemiallisen energian varastointia. Akkujen etuina muihin sähkön varastointiin käytettävien tapoihin verrattuna on lukuisia. Akkuissa on esimerkiksi laaja kapasiteettivalikoima, sillä akkuja on olemassa lukuisia eri kokoluokkia. Akkuilla on kyky tarjota sähköä välittömästi, ne ovat liikuteltavia sekä monikäyttöisiä.¹

Lähtökohtaisesti akut jaetaan primääri- ja sekundaariakkuihin, joiden suurin ero on se, että primääriakkuja, joita ovat esim. yleisimmät paristot, ei voi ladata uudestaan. Sekundääri akut, esim. matkapuhelimien akut, taas ovat uudelleen ladattavia.²

Jälkimmäisessä tapauksessa latausprosessi koostuu energian talteenotosta ja kemikaalien muovaamisesta takaisin niiden alkuperäiseen muotoon. Lähtökohtaisesti sekundääriakku on ladattavissa uudelleen niin kauan, kunnes sen kapasiteetti kuluu epäkäytännöllisen pieneksi.³

Elektrolyttinen kenno on sähköä tuottava kemiallinen laite. Kenno koostuu elektrolyytin erottamista negatiivisesta ja positiivisesta elektrodista. Elektrolyytti kykenee johtamaan ioneja kahden elektronin välillä, mutta toimii itse elektronisena eristeenä. Jos elektrolyytti toimisi eristämisen sijaan johtavana komponenttina, kennon purkautuminen nopeutuisi ja kennon sisälle saattaisi muodostua sisäinen oikosulku.⁴

¹ Dell, R. M., and D. A. J. Rand. Understanding Batteries, Royal Society of Chemistry (2001), s.1

² Dell, R. M., and D. A. J. Rand. Understanding Batteries, Royal Society of Chemistry, (2001), s.1-2

³ Dell, R. M., and D. A. J. Rand. Understanding Batteries, Royal Society of Chemistry, (2001), s.2

⁴ Dell, R. M., and D. A. J. Rand. Understanding Batteries, Royal Society of Chemistry, (2001), s.10

Kun kaksi tai useampi kenno on liitetty toisiinsa sähköisesti sarjassa, tai harvemmin sarjassa ja rinnan kytkettynä, tuloksena on akku. Yleisesti määriteltynä akku on useamman kennon yhdistelmä. Yleiskielessä yhtä primäärikennoa kutsutaan patteriksi. Suuremman kokoluokan akuissa on tavanomaista, että yhdessä kennossa on useampi elektrodilevy kennon napaa kohden rinnan kytkettynä (positiivinen levy kytkettynä toiseen positiiviseen levyyn ja päinvastoin). Kyseiset levyt ovat taas upotettuna samaan elektrolyyttiin. Rinnankytketyt levyt ovat akussa lomittain. Kyseinen järjestely kasvattaa akun kapasiteettia, minimoiden samalla akun fyysisen koon. Esimerkiksi tavallisessa 12 voltisessa auton akussa kuusi vastaavaa 2 voltin kennoa on kytketty sarjaan.⁵

2.1 Akkujen latautuminen

Uudelleen ladattavien akkujen lataamisessa sähköä (DC) johdetaan akun läpi purkautumisprosessin kumoamiseksi. Negatiivisessa elektronissa tapahtuu elektrokemiallinen pelkistymisreaktio, kun taas positiivisessa elektronissa tapahtuu aktiivisen materiaalin elektrokemiallinen hapettumisreaktio. Näin ollen akun latautuminen voidaan luokitella sähkökemialliseksi prosessiksi. Akun käyttöiän kannalta akun latauksen aikaiset olosuhteet ovat vähintään yhtä tärkeitä kuin akun käytön aikaiset olosuhteet.⁶

Mikäli akkuun ohjataan vielä latauksen jälkeen virtaa, akku alkaa ylikuormittua. Tällöin akun toisen navan aktiivinen materiaali on kokonaan latautunut. Akuista voidaan valmistus vaiheessa tehdä ”positiivisesti” ja ”negatiivisesti” rajoittuneita, jolloin positiivista tai negatiivista materiaalia lisätään enemmän kuin toista. Esimerkiksi positiivisesti rajoittunutta akkua ladatessa, positiivinen aktiivinen

⁵ Dell, R. M., and D. A. J. Rand. Understanding Batteries, Royal Society of Chemistry, (2001), s.10-11

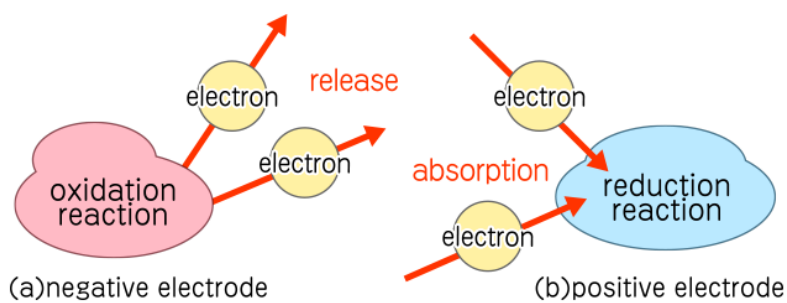
⁶ Dell, R. M., and D. A. J. Rand. Understanding Batteries, Royal Society of Chemistry, (2001), s.34

materiaali saavuttaa täyden latautumisen ennen negatiivista materiaalia. Vastavasti positiivinen elektrodi purkautuu enemmän akun käytön aikana, mikä voi johtaa sen heikentymiseen ja näin ollen lyhentää akun käyttöikä. ⁷

2.2 Akkujen purkautuminen

Purkautumisella viitataan akuista puhuessa tilanteeseen, jossa akku menettää virtaa. Purkautumisessa elektrokemiallisen reaktion seurauksena vapautuu elektroneja akusta. ⁸

Akku koostuu positiivisista ja negatiivisista elektrodeista. Negatiiviset elektrodit luovuttavat elektroneita yhdistyessään hapen kanssa aiheuttaen hapettumisreaktion. Samalla positiivinen elektrodi absorboi elektroneja (kuva 1). Elektrodeissa tapahtuva hapettumis-pelkistymisreaktio vaihtelee elektrodin materiaalista ja elektrolyytistä riippuen. Edellä mainitut reaktiot jatkuvat, kunnes akussa tai paristossa ei ole enää reaktion vaatimia substansseja. ⁹



Kuva 1. Akun purkautuessa negatiivinen elektrodi vapauttaa elektroneja, ja positiivinen elektrodi absorboi elektroneja. ¹⁰

⁷ Dell, R. M., and D. A. J. Rand. Understanding Batteries, Royal Society of Chemistry, (2001), s.34-35

⁸ Matsuada - What happens inside the rechargeable battery during charging and discharging?

⁹ Matsuada - What happens inside the rechargeable battery during charging and discharging?

¹⁰ Matsuada - What happens inside the rechargeable battery during charging and discharging?

2.2.1 Purkautumisnopeus

Akun purkautuminen on jatkuva prosessi, joka tapahtuu kaiken aikaa, vaikka akkua ei olisi edes kytketty mihinkään. Purkautumisnopeus riippuu akun tyypistä ja ympäristön lämpötilasta. Yli 55 °C lämpötilassa purkautuminen nopeutuu. Säilytys siis muodostaa akun eliniän kannalta merkittävän tekijän.¹¹

Yksi tässä tutkielmassa demonstroidun NiMH-kennon heikkouksista on sen purkautuminen verrattain lyhyessä ajassa. Jokainen kenno menettää virtansa ajan kuluessa, myös käyttämättömänä, mutta kyseinen ongelma on erityinen NiMH-akuille. Yleisesti on odotettavissa, että täyteen ladattu kenno purkautuu muutama viikon aikana. Nikkeli-pohjaisilla-kennoilla on yleisesti kaikista suurin purkautumisnopeus, ja muutaman viikon käyttämättömänä ollut akku on ladattava ennen käyttöä. Tyypillinen kenno menettää 10–15 % latauksesta ensimmäisen vuorokauden aikana ja suunnilleen saman verran seuraavan kuukauden aikana.¹²

2.3 Ni-MH-akku

Tässä opinnäytetyössä myöhemmin ilmenevissä LTspice XVII -malleissa käytetään esimerkkinä NiMH-akkua. NiMh-akku määritellään yleisesti ”alkali varastointi akuksi”, koska se käyttää kaliumhydroksidia (KOH) elektrolyyttinä. Uudelleen ladattavien alkaliakkujen suosiota selittävät esimerkiksi seuraavat tekijät:

- Elektrolyytin suuri johtavuus mahdollistaa korkean tehon soveltamisen.
- Akkusysteemin voi sulkea, mikä minimoi ylläpito- ja vuotamisongelmat.
- Toiminta on mahdollista usealla lämpötilalla.
- Pitkäikäisyys kompensoi korkeampaa hintaa muihin teknologioihin verrattuna.

¹¹ YUASA - Battery Discharging & Charging Characteristics

¹² Electronicsnotes - NiMH Battery Self Discharge

- Verrattain suuri energiatiheys ja matalampi hinta wattia kohden.¹³

Elektrolyytti, joka kostuu vesipohjaisesta kaliumhydroksidista, omaa hyvin suuren sähkön johtavuuden. Elektrolyytin konsentraatio säilyy suhteellisen tasaisena koko kennon latautumisen tai purkautumisen ajan. Edellä mainitut tekijät johtavat akkuun, joka pystyy toimimaan korkealla teholla ja jolla on pitkä elinkaari.¹⁴

Aktiiviset materiaalit NiMH-akussa koostuvat metalliyhdisteistä tai metallioksideista, jotka ovat verrattain hyviä johdattimia. Nikkelioksidi – hydroksidielektrodi muuntaa protonin ainoastaan latautumis-purkautumisreaktiossa ja elektronin vaihtuvuus on hyvin nopeaa edesauttaen suurta tehokapasiteettia. Elektroodin koon pieni vaihtelu latauksen ja purkautumisen välillä johtaa myös parempaan mekaaniseen tasaisuuteen ja pidentää täten akun elinkaarta.¹⁵

Ni-MH-akkuja voidaan soveltaa lähes missä kokoluokassa tahansa kymmenistä milliampeeritunneista yli satoihin ampeeritunteihin. Teräksen ja KOH-elektrolyytin yhteensopivuudesta johtuen, akut voidaan valmistaa teräkuoresta, joka taas mahdollistaa hyvän lämmönkeston.¹⁶

2.4 Akkujen kytkennät

Useimpien akkujen jännitteitä ja virranantokykyä on mahdollista kasvattaa kytke-mällä niitä sarjaan sekä rinnan. Piirissä akkujen sijaintia keskeisempää on se, miten ne on sijoitettu suhteessa toisiinsa. Akut voidaan kytkeä toisiinsa rinnan tai sarjassa sekä eri kytkentöjä hyödynnetään erilaisissa tilanteissa.¹⁷

¹³ Cobasys - Inside the Nickel Metal Hydride Battery

¹⁴ Cobasys - Inside the Nickel Metal Hydride Battery

¹⁵ Cobasys - Inside the Nickel Metal Hydride Battery

¹⁶ Cobasys - Inside the Nickel Metal Hydride Battery

¹⁷ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

Heikoin kenno rajoittaa akkujen latautumisen ja purkautumisen, joten on tärkeää saman tyyppisiä akkuja samalla jännitteellä ja kapasiteetilla. Tämä on otettava erityisesti huomioon sarjaan kytkennässä, koska akku on yhtä vahva kuin sen heikoin lenkki. Vaikka heikoin kenno ei välttämättä hajoa välittömästi, se kuluu nopeammin kuin vahvemmat kennot. Ladattaessa heikko kenno täyttyy ennen vahvempia kennoja pienemmän kapasiteettinsa vuoksi, mikä johtaa ylikuormittumiseen. Purkautuessaan heikoin kenno taas tyhjenee ensimmäisenä.¹⁸

2.4.1 Yksittäisen kennon käyttö

Yksittäinen kenno muodostaa yksinkertaisimman akkurakenteen. Kenno ei tarvitse monimutkaista suojaapiiriä. Esimerkkinä yksittäisen kennon käytöstä ovat puhelien ja tablettien akut, joissa on yleisimmin yksi 3.60 V Li-ion kenno.¹⁹

2.4.2 Akkujen rinnankytkentä

Akkujen kennojen ollessa rinnankytkettyinä, kennojen positiiviset ja negatiiviset navat ovat kytkettynä toisiinsa siten, että yksi piuha kytketään positiivisten napojen välille ja toinen piuha negatiivisten napojen välille. Kyseiset navat taas yhdistetään virtapiirin eri osiin. (Kuva 2.)²⁰

Kun akut ovat kytkettynä rinnan, jännite ei kasva. Esimerkiksi jos kaksi 1.5 voltin akkua yhdistetään toisiinsa, kytkennän tuottama jännite on yhä 1.5 voltia. Tämä johtuu siitä, että rinnankytkettynä yksittäinen elektroni voi kulkea vain yhtä vaihtoehtoista reittiä pitkin kerrallaan, mikä johtaa siihen, että elektroni voi saada energiaa vain yhdestä akusta virtapiirissä. Jännitteen määrittää elektronin piirissä

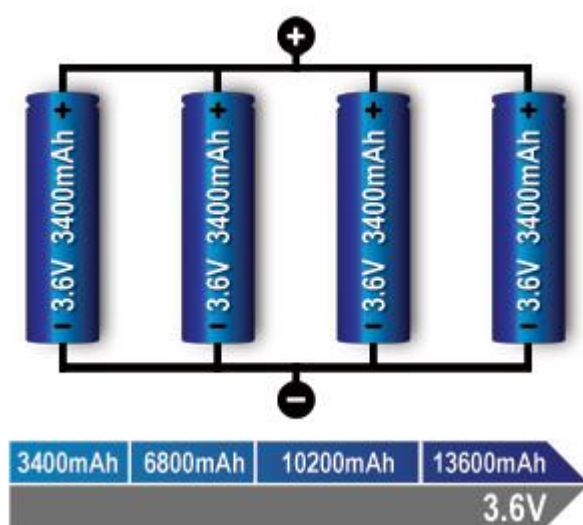
¹⁸ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

¹⁹ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

²⁰ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

säilyttämä energia, josta johtuen elektronin mennessä vain yhden akun läpi, jännitteen kasvu jokaista elektronia kohden on sama.²¹

Kun akut ovat kytkettyinä rinnan, piiriin läpi kulkeva virta kasvaa suhteessa akkujen määrään. Jokainen akku pumppaa ulos piiriin tietyn määrän elektroneja sekunnissa, joten jos kaksi tai useampi akku ovat kytkettyinä rinnan, niiden vapauttamien elektronien tarjoama energia lasketaan yhteen ja näin ollen virtapiirin kokonaisvirta kasvaa.²²



Kuva 2. Kennojen kytkentä rinnan havainnollistettuna.²³

2.4.3 Akkujen kytkentä sarjassa

Akkujen kytkennällä sarjassa tarkoitetaan sitä, että akun positiivinen napa on kytketty toisen akun negatiiviseen napaan (kuva 3). Sarjaan kytkettyinä akut

²¹ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

²² Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

²³ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

tuottavat suuremman jännitteen. Jos esimerkiksi kaksi 1.5 voltin akkua kytketään keskenään sarjaan, saadaan piirin kokonaisjännitteeksi 3 voltia. Tämä johtuu siitä, että sarjaan kytkettynä akut muodostavat jännitteen, joka on yhtä kuin kytkettyjen akkujen määrän ja yhden akun jännitteen tulo. Yli 1.5 voltin akut on valmistettu kennoista, jotka ovat kytkettynä toisiinsa. Esimerkiksi 9 voltin akussa on yhteensä 6 kappaletta 1.5 voltin kennoa.²⁴

Sarjaan kytkettynä elektronien virtaus on sama joka puolella virtapiiriä ja näin olleen virta ei muutu. 9 voltin akku voi siis tuottaa 6 kertaa suuremman jännitteen kuin 1,5 voltin kenno, mutta silti virta pysyy samana. Tämä johtuu siitä, että akut muodostavat keskenään jonon, jolloin jokaisen elektronin tulee kulkea piirin jokaisen akun lävitse samalla vauhdilla. Tästä johtuen virran tulee olla sama jokaisessa akussa ja joka puolella virtapiiriä.²⁵



Kuva 3 Kennojen kytkentä sarjassa havainnollistettuna.²⁶

2.4.4 Akkujen kytkentä sarjaan ja rinnan

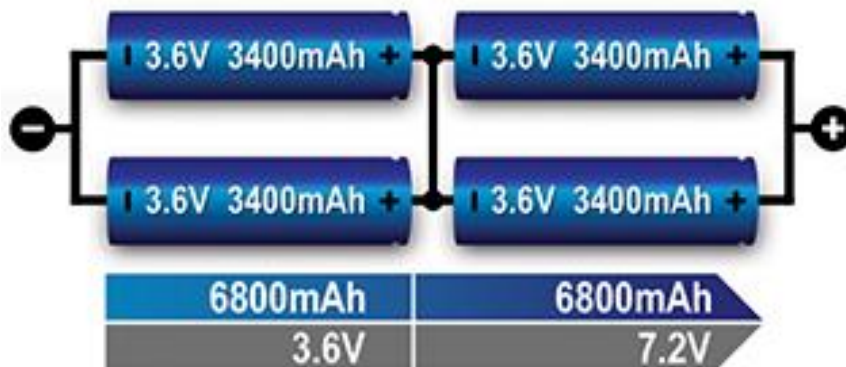
Kennot on myös mahdollista kytkeä toisiinsa hyödyntämällä molempia kytkentöjä yhtäaikaisesti (kuva 4). Tämä tarjoaa mahdollisuuden saavuttaa halutut virran ja jännitteen arvot. Akun teho voidaan laskea kertomalla jännite virralla. Esimerkiksi

²⁴ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

²⁵ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

²⁶ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

laskemalla kuvan esimerkistä $6800 \text{ mAh} \times 7.2 \text{ V}$ saadaan tehoksi 48.96 Wh , tällöin kahdeksan kennon yhdistelmä tuottaisi 97.92 Wh:n tehon.²⁷



Kuva 4 Kennot kytkettynä sarjaan ja rinnan.²⁸

²⁷ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

²⁸ Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations

3 LTSPICE XVII –OHJELMISTO

LTspice XVII -ohjelmisto on Analog devicesin (ADI) ilmainen simulaatio-ohjelmisto, joka mahdollistaa virtapiirien luonnostelemisen, tutkimisen ja analysoimisen. LTspice XVII -ohjelmassa voidaan simulaation avulla tutkia muun muassa piirin rajoitteita ja arvoja. Ohjelmalla pystytään valikoimaan tarkasti, mitä dataa diagrammissa voidaan havaita (aika, jännite, virta, jne.). Ohjelmisto pitää sisällään lukuisia eri komponentteja ja se mahdollistaa myös valmiiden mallien kopioimisen esimerkiksi netistä. Lisäksi ohjelma sisältää myös demonstroimistarkoitukseen tehtyjä piirejä. Ohjelmisto on mahdollista ladata ilmaiseksi analog.com-sivustolta, Windows- ja Mac-käyttöjärjestelmille.²⁹

Tavallisimmin LTspiceä XVII -ohjelmistoa käytetään erityisesti virtapiirien testaamiseen ja tulosten varmistamiseen esimerkiksi matemaattisten virheiden ehkäisemiseksi.³⁰

LTspice XVII -ohjelmisto pitää sisällään laajan valikoiman makromalleja ja passiivisia komponentteja. Ohjelmisto käyttää omia mallintamistekniikoitaan makromalleihin, mikä johtaa nopeisiin ja tarkkoihin simulaatiotuloksiin. Onnistunut simulaatio mahdollistaa virtapiirin rajoitusten ja suorituskyvyn rajojen mittaamisen. Täytyy kuitenkin muistaa, että simulaatioista saadut tulokset eivät koskaan ole täysin verrattavissa piirin todenmukaiseen toimintaan, vaan tarjoavat lähinnä suuntaa-antavaa dataa ideaalisissa olosuhteissa.³¹

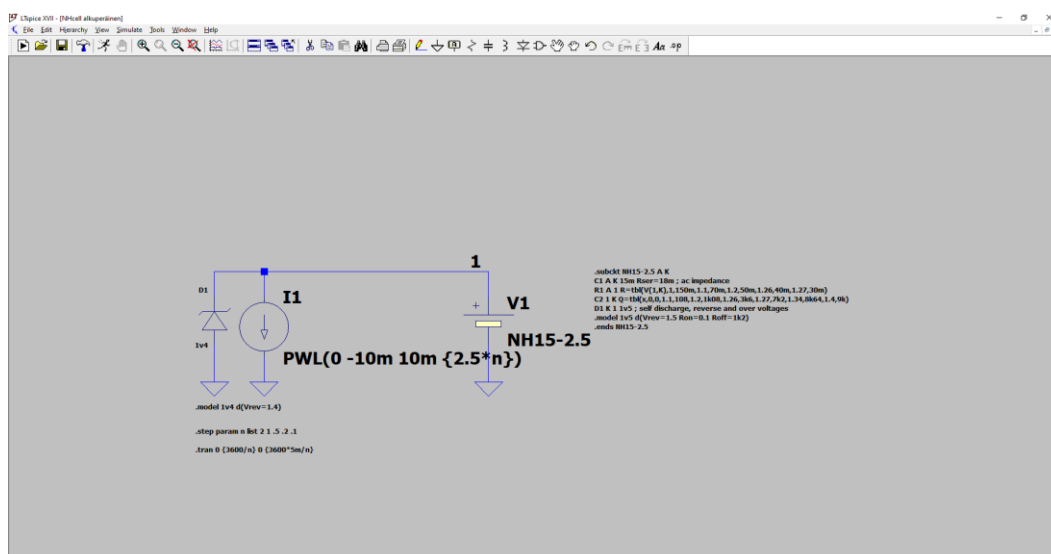
²⁹ analog - LTspice

³⁰LTspice - Getting Started in 8 Minutes

³¹ AnalogDialogue – Get up and running with LTspice

3.1 LTspice XVII -ohjelmiston käyttö

Kun aloitetaan demon luominen LTspice XVII -ohjelmistolla, ensimmäinen vaihe on avata "New Schematic" yläpalkin vasemmasta yläreunasta, jolloin avautuu "Draft", jossa voidaan luoda virtapiirejä. (Kuva 5.)
























Kuva 5. Virtapiiri LTspicessä.

3.2 Yläpalkki

Yläpalkin toimintojen avulla voidaan tehdä yksinkertaisia malleja tai muokata valmiita piirejä. Oheisessa taulukossa on listattu yläpalkin tärkeimmät toiminnot:

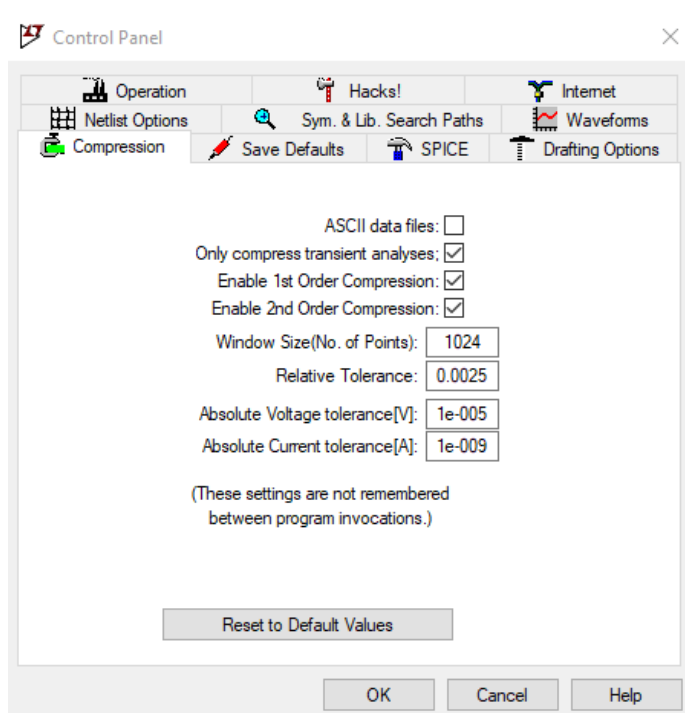
Taulukko 1. Yläpalkin keskeiset toiminnot ja symbolit.

Symboli	Toiminnon nimi:	Käyttötarkoitus:
	New Schematic	Uuden mallin luominen
	Open	Tallennetun mallin avaaminen
	Save	Mallin tallennus
	Control panel	
	Run	Käynnistää simulaation ja avaa wave formin
	Pick Visible Traces	Mahdollistaa halutun datan piirtämisen wave formiin
	Cut	Mahdollistaa esimerkiksi komponenttien leikkaamisen
	Copy	Kopiointi työkalu
	Paste	Liittämistyökalu
	Wire	Mahdollistaa johdon piirtämisen
	Ground	Maadoituksen lisääminen
	Label Net	Mahdollistaa esimerkiksi komponenttien nimeämisen
	Resistor	Vastuksen lisääminen
	Capacitor	Kondensaattorin lisääminen
	Inductor	Käämin lisääminen
	Diode	Diodin lisääminen
	Component	Avaa luettelon, jossa on useita komponentteja
	Move	
	Drag	
	Undo	
	Redo	

3.3 Control Panel

Control Panel mahdollistaa ohjelmiston useiden aspektien säätämisen. Ponnahdusikkunan (kuva 6) voi avata usealla eri tavalla, mutta yksinkertaisimmin sen saa auki klikkaamalla hiirellä yläpalkissa olevaa vasarasymbolia.

Paneelissa on kymmenen valikkoa, joiden avulla voi säätää simulaatiota omaan käyttötarkoitukseen sopivaksi. Esimerkiksi valitsemalla Waveforms, voidaan säätää kuvaajan ominaisuuksia, kuten fonttia ja dataa kuvaavien viivojen paksuutta.³²



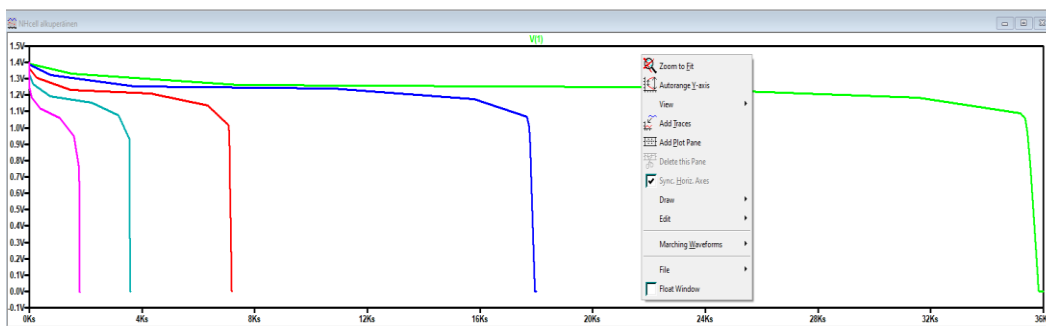
Kuva 6. Control Panel ikkuna LTspicessa.

³² Ltwiki – Control Panel

3.4 Waveform

Waveform-ikkuna avautuu automaattisesti, kun simulointi aloitetaan. Tulokset saadaan näkyville painamalla hiiren oikeaa näppäintä ja valitsemalla ”pick visible traces”, jolloin aukeaa lista mitatuista arvoista. Kun haluttu muuttuja (esimerkiksi V1) on valittu, ohjelmisto piirtää kuvaajat ja määrittää automaattisesti X- ja Y-koordinaatit.

Hiiren oikealla näppäimellä avautuvasta valikosta (kuva 7) voidaan esimerkiksi muuttaa kuvaajien väriä, säätää koordinaatiston arvoja ja asettaa datapointseja.



Kuva 7. Waveform-ikkuna LTspicessa.

3.5 Valmiiden piirien käyttö LTspice -XVII -ohjelmistossa

Ohjelmistossa on lähtökohtaisesti mahdollista hyödyntää valmiita piirejä kolmesta lähteestä: LTspice XVII -ohjelmiston omat demonstraatiopiirit, LTspice XVII -ohjelmiston mukana asennetut testit ja opetukselliset esimerkit. Lisäksi ohjelmistoon on mahdollista tuoda piirejä netin kautta lukuisista muista lähteistä. ³³

³³ AnalogDialogue – Get up and running with LTspice

3.5.1 Demopiirin lataaminen

ADI:lla on kohtuullisen laaja valikoima demopiirejä. Demopiirien tarkoituksena on tarjota hyvät lähtökohdat useimpien piirien mallinnukseen. Demot löytyvät joko verkosta tai ohjelmiston demopiiritietokannasta etsimällä. Piiri ladataan .asc-muodossa.³⁴

3.5.2 Ohjelmiston test fixtureiden hyödyntäminen

Test fixtureita käyttävät pääasiassa ADI:n mallinnustiimit, lähinnä makromallien testaamiseen ja arviointiin. Kyseisiä malleja tarjotaan myös mallipohjiksi piirien laatimista varten. ADI ei kuitenkaan suosittele verkkosivustollaan mallien käyttämistä tuotannolliseen käyttöön, koska ne ovat hyvin yksinkertaistettuja ja käyttävät ideaaleja passiivisia komponentteja tai keskittyvät arvioimaan, kuinka makromalli suoriutuu tietyistä vikatiloista.

Mallit löytyvät luomalla uusi luonnos, menemällä "Edit"-valikkoon ja valitsemalla sieltä "Component". Edellä mainittujen toimenpiteiden jälkeen aukeaa ponnahdusikkuna, jolla on lista eri malleista. Ikkunassa on myös hakukenttä, jonka yläpuolella on "Open this macromodel's test fixture button" -painike. Valittuasi mallin, muuttuu painike aktiiviseksi ja painamalla painiketta malli aukeaa.³⁵

3.5.3 Opetuksellisten esimerkkien hyödyntäminen

Esimerkkien tarkoituksena on auttaa käyttäjää tarkastelemaan simulaatioita ja malleja. Esimerkit löytyvät koneelta avaamalla "LTspiceXVII"-kansio, tämän

³⁴ AnalogDialogue – Get up and running with LTspice

³⁵ AnalogDialogue – Get up and running with LTspice

jälkeen avataan "examples"-kansio ja lopuksi "Educational"-kansio. Seuraavaksi aukeaa lista malleja, joita kaksoisklikkaamalla malli aukeaa LTspicessä.³⁶

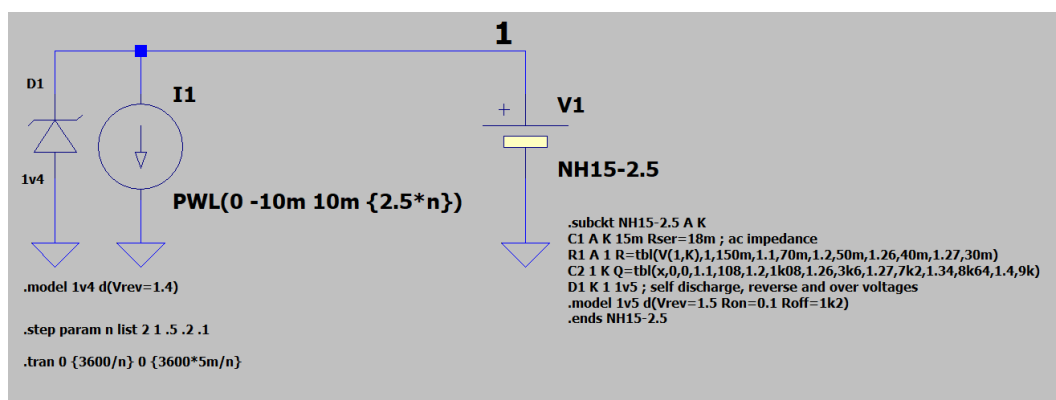


³⁶ AnalogDialogue – Get up and running with LTSpice

4 AKKUMALLIT LTSPICELLA

4.1 Mallipohja

Kaikki tässä työssä esiteltävät akkumallit ovat variaatioita Ni-MH-kennosta, josta on laadittu eräänlainen perusmalli Itwikiin (kuva 8). Mallista löytyvät komponentit on lueteltu alla olevissa kappaleissa vasemmalta oikealle:



Kuva 8. Perusmalli.

4.1.1 Diodi

Diodilla viitataan puolijohtimeen, jonka tehtävä on käytännössä toimia yksisuuntaisena virrankytkimenä. Diodi mahdollistaa virran kulun tiettyyn suuntaan, samalla estäen sen etenemisen vastakkaiseen suuntaan. Diodeja voidaan myös kutsua tasasuuntaajiksi, sillä ne muuntavat vaihtovirran tasavirraksi.³⁷

Diodit koostuvat positiivisesta johtimesta (anodi) ja negatiivisesta johtimesta (kattodi). Valtaosa diodeista antaa virran kulkea siitä läpi vain positiivisen jännitteen kohdistuessa anodiin. Diodia, joka päästää virran kulkemaan läpi, kutsutaan

³⁷ Fluke – Mikä on diodi?

päästösuuntaiseksi. Kun diodin taas estää virran kulkemisen sen läpi, sitä kutsutaan estosuuntaiseksi.³⁸

Yllä olevassa mallissa on käytetty tavallisesta diodista hieman poikkeavaa zenerdiodia. Zenerdiodin toimintaperiaate on muuten sama kuin tavallisella diodilla, mutta jännitteen kasvaessa ennalta määritellyn arvon yläpuolelle, zener-diodi alkaa päästämään virtaa lävitseen.³⁹

4.1.2 Virtalähde (independent current source)

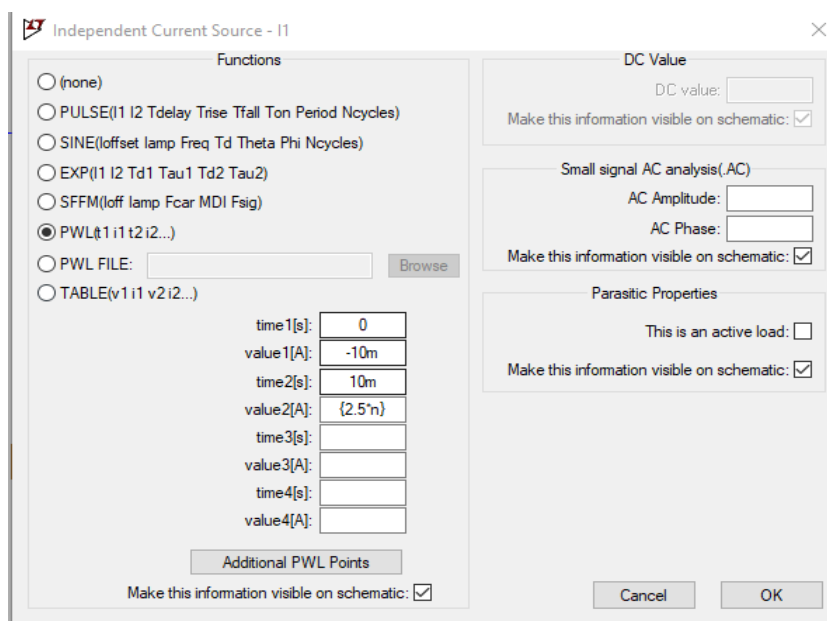
Virtalähdettä käytetään mallissa havainnollistamaan kuorman toiminnallisuutta piirissä. Mallissa käytetään viittä eri virran arvoa (250 mA, 500 mA, 1250 mA, 2500 mA ja 5000 mA). Kuva 10 havainnollistaa virtalähteen asetuksia, huomioitavaa on, että "Value 2" kentässä "2.5" viittaa mallissa käytetyn kennon nimelliskapasiteettiin, ja "n" on kerroin, jolla mainittu kapasiteetti kerrotaan (2, 1, 0.5, 0.2, 0.1). Kerroimet (kuva 9) ovat esillä mallissa (kuva 8) vasemmalla alhaalla.

```
.step param n list 2 1 .5 .2 .1
```

Kuva 9. Muuttujan "n" kertoimet mallissa.

³⁸ Fluke – Mikä on diodi?

³⁹ electronics-tutorials – The Zener Diode



Kuva 10. Virtalähteen asetukset.

4.1.3 Ni-MH-kenno

Esimerkkikennona on tässä opinnäytetyössä käytetty Energizerin nh15-2500 uudelleenladattavaa kennoa (kuva 11). Kennon nimellinen jännite on 1.2 voltia ja sen nimelliskapasiteetti on 2500 mAh.⁴⁰ Mallissa kennoa esittää epälineaarinen kondensaattori.



Kuva 11. ENERGIZER NH15-2500 kenno.⁴¹

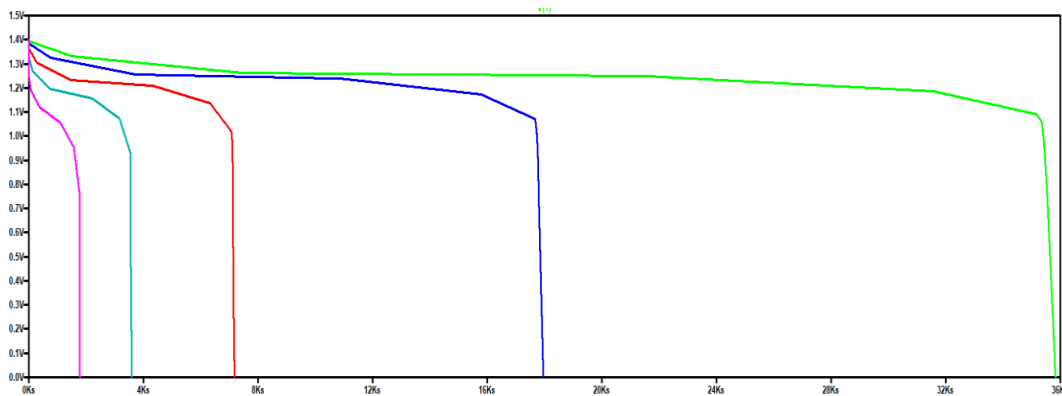
⁴⁰ PRODUCT DATASHEET - ENERGIZER NH15-2500

⁴¹ PRODUCT DATASHEET - ENERGIZER NH15-2500

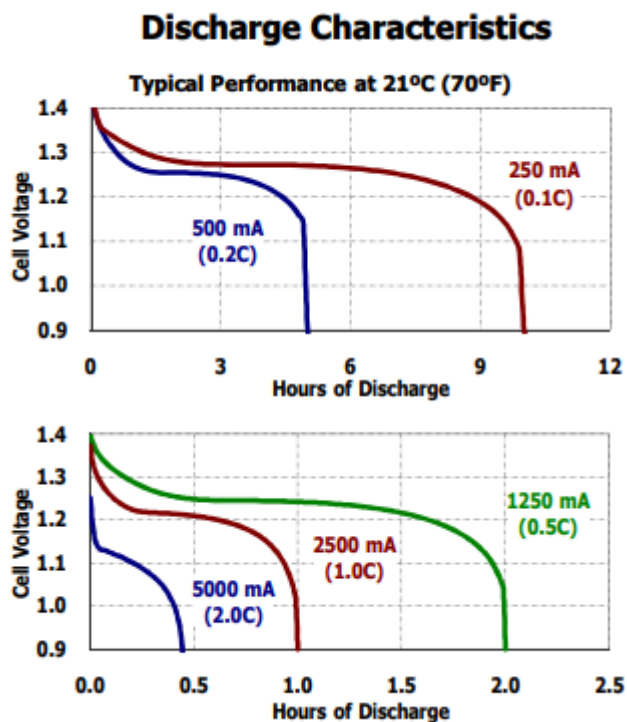
4.1.4 Tulokset

Kun simulaatio ajetaan LTspicessä, voidaan halutut kuvaajat löytää ”add traces” toiminnolla. Tämän työn malleilla havainnollistetaan akun purkautumista 21°C lämpötilassa, jolloin on valittava V1-trace. Eri väriset käyrät demonstroivat akun purkautumiseen kuluvaan aikaan eri virran arvoilla. Ajan yksikkönä on käytetty kilosekuntia, joka vastaa tuhatta sekuntia (esim. 40ks=40 000 s/3600 = 11.1 h). Näin ollen, jos jännite on nolla 40Ks kohdalla, kennon purkautumiseen kuluu noin 11.1 tuntia.

Kuvaajassa akun jännitteen lasku on mitattu viidellä eri virran arvolla (5000 mA, 2500 mA, 1250 mA, 500 mA ja 250 mA), kuvan 12 kuvaajat demonstroivat, kuinka kennon purkautuminen on nopeampaa, jos siihen syötetään suurempaa virtaa. Esimerkiksi 250 mA virralla, purkautuminen kestää jopa 10 tuntia.



Kuva 12. Perusmallin pohjalta suoritettujen simulaatioiden tulokset.



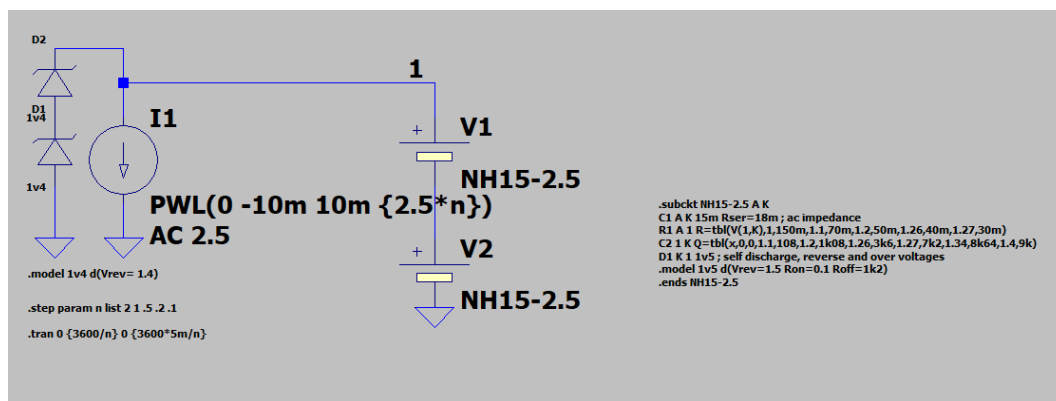
Kuva 13. Mallissa käytetyn kennon valmistajan ilmoittamat purkautumisajat.⁴²

Lopuksi simulaatiosta saatuja arvoja voidaan vielä vertailla tulosten yhdenmukaisuuden vahvistamiseksi kennon valmistajan ilmoittamiin purkautumisarvoihin (kuva 13). Huomioitavaa on, että valmistaja ilmoittaa ajan tunneissa, kun taas tässä työssä ajan yksikkönä on käytetty kilosekuntia, mutta tulokset ovat muuten identtiset ja tarjoavat näin ollen hyvät vertailuarvot myöhemmille simulaatioille.

⁴² PRODUCT DATASHEET - ENERGIZER NH15-2500

4.2 KytKentä sarjassa

KytKettäessä kaksi kennoa sarjaan, kennot sijoitetaan peräkkäin, jolloin ensimmäisen kennon katodi (negatiivinen napa) liitetään toisen kennon anodiin (positiiviseen napaan) kuvan 14 mukaisesti. Koska mallissa käytetään zenerdiodia, on tarpeen lisäksi kaksinkertaistaa diodien määrä, jotta virta ei jännitteen kasvaessa pääsisi kulkemaan vastakkaiseen suuntaan. Kyseiset toimenpiteet voidaan suorittaa LTspicellä yksinkertaisesti kopioimalla halutut komponentit ja liittämällä ne halutulle paikalleen.

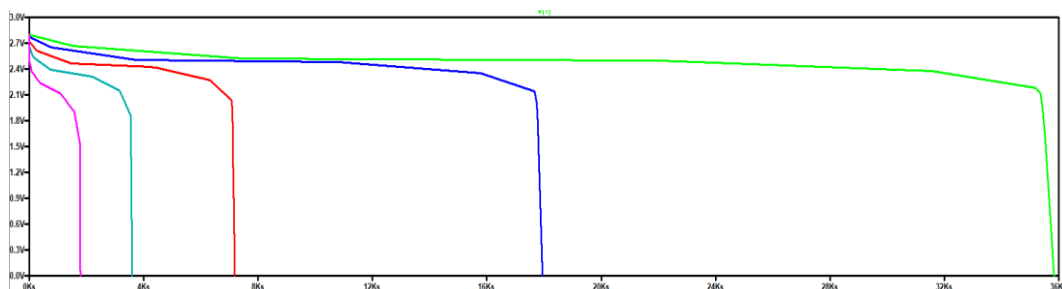


Kuva 14. Kaksi Ni-MH-kennoa kytkettynä sarjaan.

4.2.1 Tulokset

Tuloksista (kuva 15) voidaan huomata, että sarjaan kytkettäessä kytkennän jännite kasvaa. Kennojen purkautumisen nopeudessa ei sen sijaan ole havaittavissa muutosta. Nopealla silmäilyllä voidaan todeta, että jokainen kuvaaja on lähes identtinen mallipohjan simuloimisesta saatujen kuvaajien kanssa.

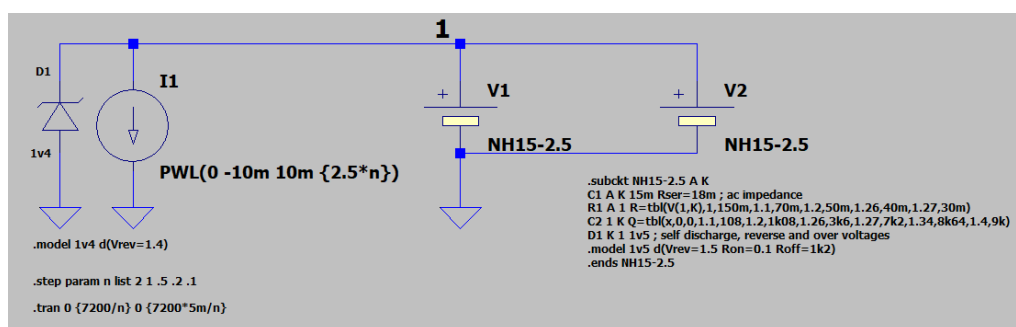
Tulokset ovat odotettuja, sillä akun jännite kaksinkertaistuu alkuperäiseen malliin verrattuna, mutta purkautumiseen kuluva aika ei muutu. Kyseinen reaktio johtuu siitä, että piirissä kulkeva virta pysyy samana jännitteen kasvaessa.



Kuva 15. Simuloinnin tulokset, kun kaksi Ni-MH-kennoa on kytketty sarjaan.

4.3 KytKentä rinnan

Kuten sarjaan kytkennässä, myös rinnankytkennässä voidaan hyödyntää yksinkertaista kopioimista. Rinnankytkennässä kennojen anodit kytketään toisiinsa, kuten myös katodit (kuva 16). Tällä kertaa yksi diodi riittää. Koska akun purkaantumisaika kasvaa (virranarvot pysyvät samoina, kun tavallisesti rinnankytkennässä virta kasvaisi), tulee myös mittaus aika kaksinkertaistaa. Tämä voidaan tehdä muuttamalla mallin vasempaan alareunaan stop time -kenttään " $\{7200/n\}$ " ja Maximum timestep -kenttään " $\{7200*5m/n\}$ ".

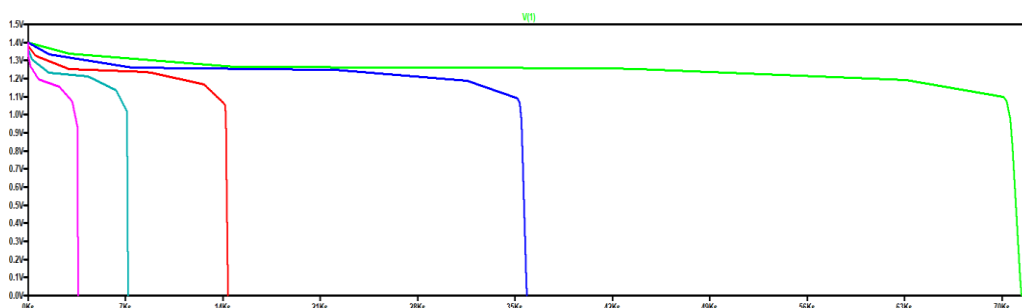


Kuva 16. Kaksi Ni-MH-kennoa kytkettynä rinnan.

4.3.1 Tulokset

Rinnankytkennän simuloinnin tuloksia tarkastellessa (kuva 17), ensimmäinen huomion arvoinen asia on kennojen purkautumiseen kuluvan ajan huomattava kasvu. Jännite ja kuvaajien muodot pysyvät samana kuin mallipohjan simulaatiossa, mutta muutos purkautumisajassa on huomattava.

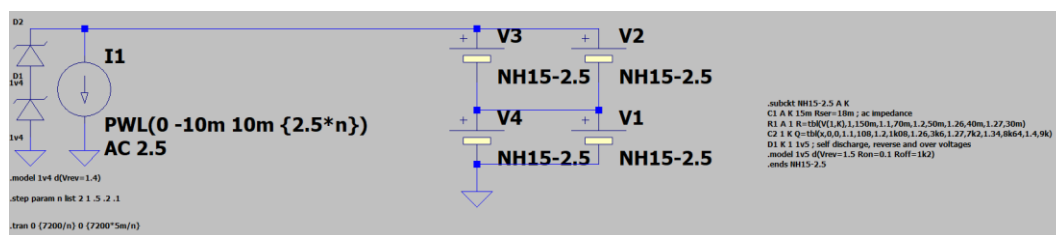
Rinnankytkentää käytetään yleensä akun purkautumisprosessin pitkittämiseksi, joten purkautumisajan kaksinkertaistumista voitiin odottaa. Myös jännitteen muuttumattomuus oli odotettua. Tulokset johtuvat siitä, että yksittäisen elektronin on mahdollista kulkea vain yhden kennon lävitse, jolloin elektroni saa energiaa vain yhdestä kennoista. Käytännössä siis akuston kapasiteetti kasvaa.



Kuva 17. Simuloinnin tulokset, kun kaksi Ni-MH-kennoa on kytketty rinnan.

4.4 Rinnan- ja sarjassa kytkentä

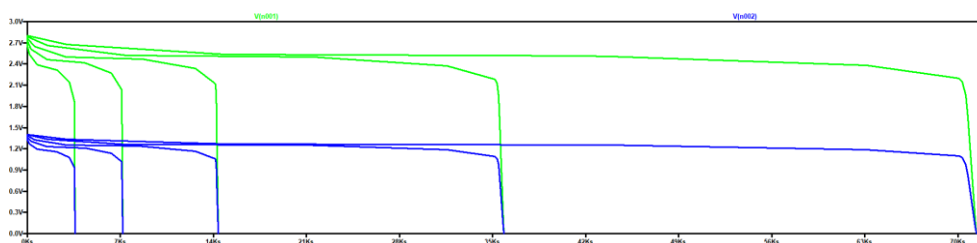
Viimeisessä mallissa havainnollistetaan kennojen kytkentä sekä sarjassa että rinnan. Kytkentä toteutetaan yhdistämällä kaksi kytkentää toisiinsa kuvan 18 mukaisesti. Ensimmäiset kennot kytketään sarjassa kahteen toisiinsa rinnan kytkettyyn kennoon. Tässä mallissa tulee jälleen käyttää kahta diodia ja kaksinkertaistaa mitausaika.



Kuva 18. Neljä Ni-MH-kennoa kytkettynä sekä sarjaan, että rinnan.

4.4.1 Tulokset

V1 on mitattu kaikkien kennojen jälkeen V2 vain ensimmäisen rinnankytkennän jälkeen. Tulokset (kuva 19) demonstroivat jännitteen ja purkautumiseen kuluvan ajan kasvua, kun kaksi rinnankytkentää yhdistetään toisiinsa sarjassa. Tämä ratkaisu yhdistää molempien kytkentöjen tarjoamat edut. Kytkentää hyödyntämällä päästään yhtä suureen jännitteeseen kuin sarjankytkennässä. Samalla saavutetaan yhtä pitkä purkautumisaika kuin rinnankytkennässä.



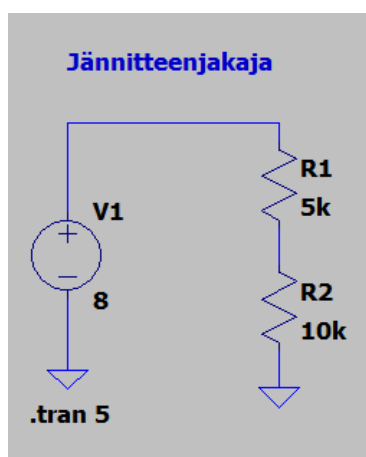
Kuva 19. Simuloinnin tulokset, kun neljä Ni-MH-kennoa kytkettynä sekä sarjaan, että rinnan.

5 HARJOITUSTEHTÄVIÄ

Harjoitustehtävien tavoitteena on tarjota mahdollisuus tutustua LTspice XVII -ohjelmistoon ja oppia käyttämään ohjelmiston perustoimintoja. Tässä opinnäytetyössä on kaksi harjoitusta, joista ensimmäisen tarkoitus on oppia piirtämään yksinkertainen virtapiiri sekä tulkitsemaan ja käyttämään waveformia. Toisessa harjoituksessa tavoitteena on tuoda onnistuneesti malli netistä LTspice XVII -ohjelmistoon ja muokata sitä ohjeiden mukaisesti.

5.1 Tehtävä 1. Jännitteenjakaja

Harjoituksen tarkoitus on tutustua LTspicen käyttöön ja yksinkertaisimpiin toimintoihin luomalla jännitteen jakaja (kuva 20), ja tutkimalla jännitteen ja virran käyttäytymistä, ennen vastuksia, ja niiden jälkeen. Anna jännitteen lähteelle arvoksi 8 V ja vastuksille arvoksi 5000 (5 k) ja 10 000 (10 k) ohmia. Selvitä simuloinnin avulla virta molempien vastusten kohdalla sekä jännite ennen vastuksia ja vastusten välissä.⁴³

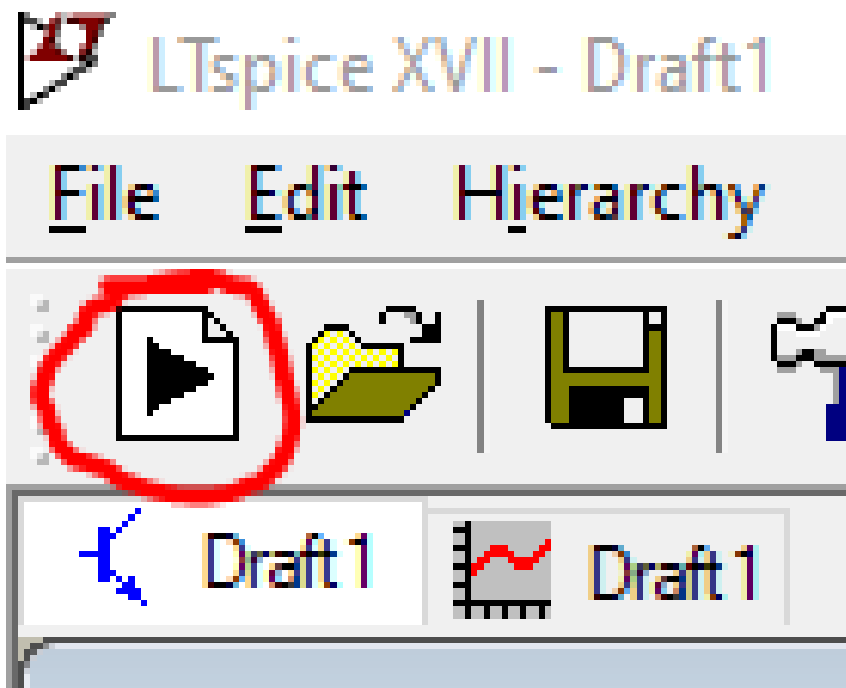


Kuva 20. Jännitteenjakaja.

⁴³ LTSpice Tutorial - EP1 Getting started

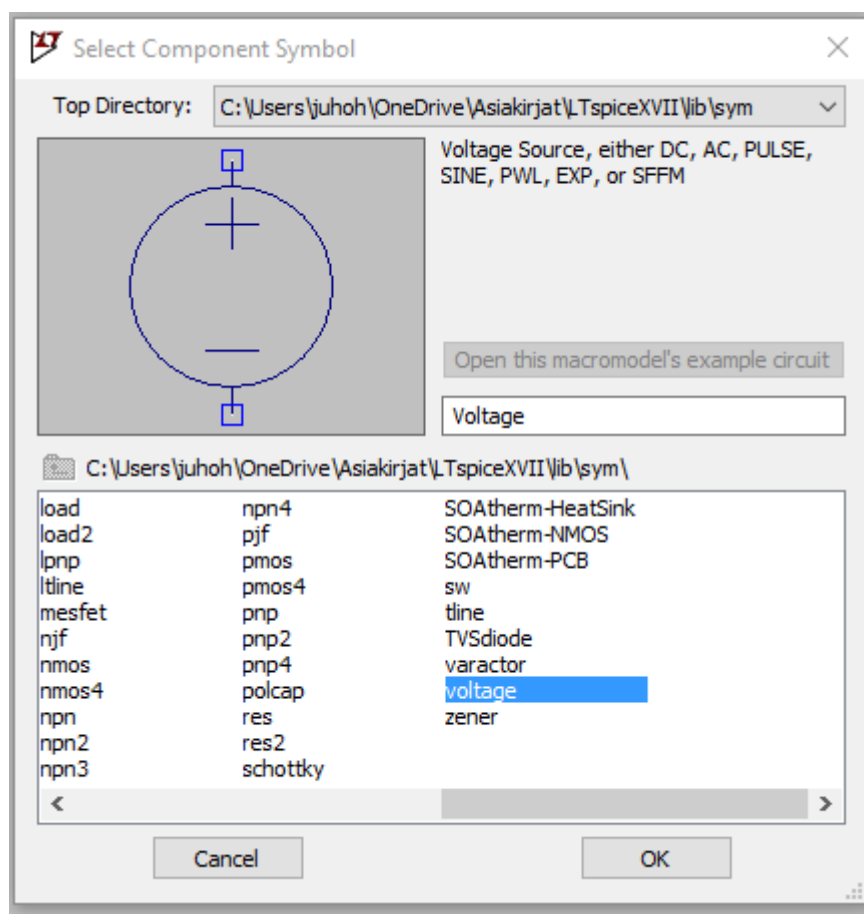
5.1.1 Työn vaiheet

1. Avaa LTspice ja avaa vasemmasta yläkulmasta "New Schematic" (kuva 21).



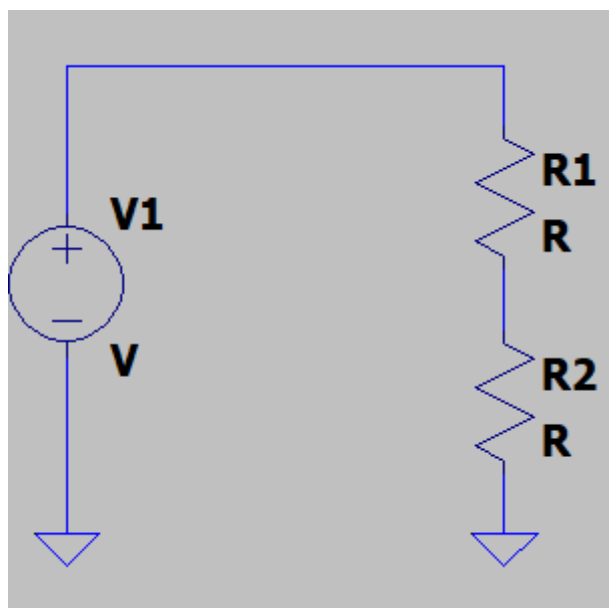
Kuva 21. New Schematic.

2. "Draft1" -niminen ikkuna avautuu.
3. Aloitetaan mallin tekeminen valitsemalla yläpalkista "Resistor" ja hiiren vasenta näppäintä painamalla, sijoitetaan kaksi vastusta peräkkäin. Lopuksi painetaan hiiren oikeaa näppäintä.
4. Seuraavaksi sijoitetaan jännitteen lähde. Valitaan yläpalkista "Component" ja kirjoitetaan hakukenttään (kuva 22) "Voltage". Valitaan siniselle pohjalla oleva komponentti.



Kuva 22. Jännitteen lähteen valinta

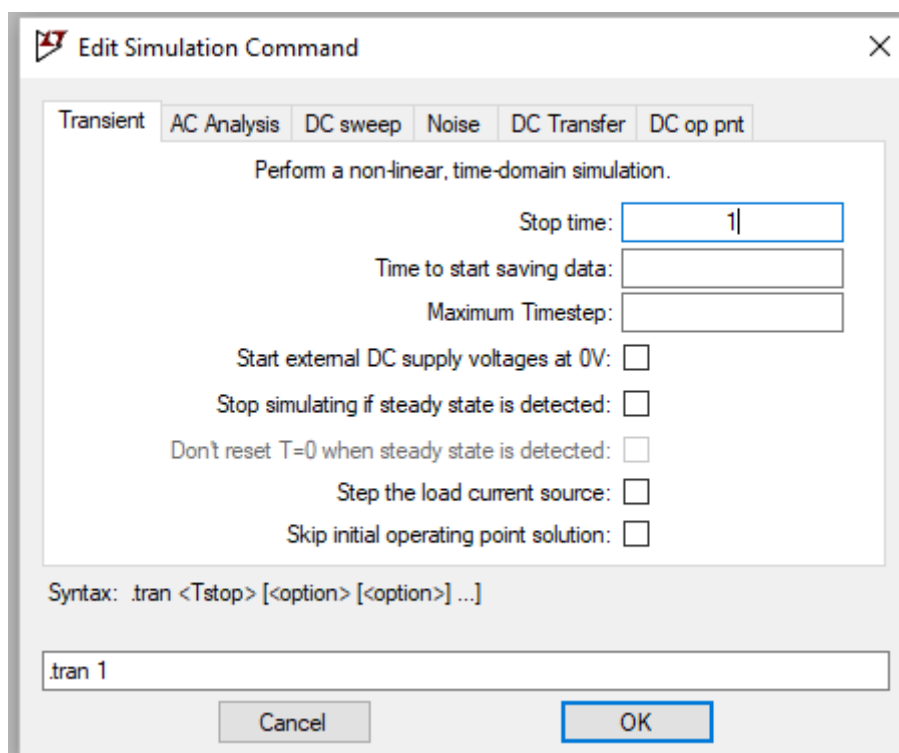
5. Sijoitetaan jännitteen lähde hiiren vasenta painamalla vastusten vierelle. Lopuksi painetaan taas hiiren oikeaa.
6. Lopuksi Lisätään yläpalkista vielä maadoitukset "Ground" alemman vastuksen ja jännitteenlähteen alapuolelle.
7. Seuraavaksi kytketään komponentit toisiinsa yläpalkista löytyvän johdon "Wire" avulla kuvan 23 mukaisesti. Painetaan hiiren vasemmalla kohtaa, johon johto halutaan vetää, viedään hiiri kohtaan, mihin johdon toinen pää halutaan vetää ja painetaan taas hiiren vasenta näppäintä. Lopuksi painetaan hiiren oikeaa näppäintä, joka katkaisee johdon piirtämisen. Piirtämistilasta pääsee pois näppäimistön "ESC"-painikkeen avulla.



Kuva 23. Komponentit kytkettyinä.

8. Seuraavaksi asetetaan arvot komponenteille. Painetaan ensin hiiren oikeaa näppäintä jännitteenlähteen kohdalla ja asetetaan "DC value" -kenttään arvoksi "8". Tämän jälkeen asetetaan vastuksille arvot painamalla taas hiiren oikeaa näppäintä vastusten kohdalla ja asettamalla "Resistance"-kenttään ylemmälle vastukselle "5k" ja alemmalle "10k".
9. Aloitetaan simulointi käyttämällä yläpalkista löytyvää "Run"-komentoa. Tällöin avautuu ponnahtusikkuna (kuva 24), jossa "Stop time"-kenttään

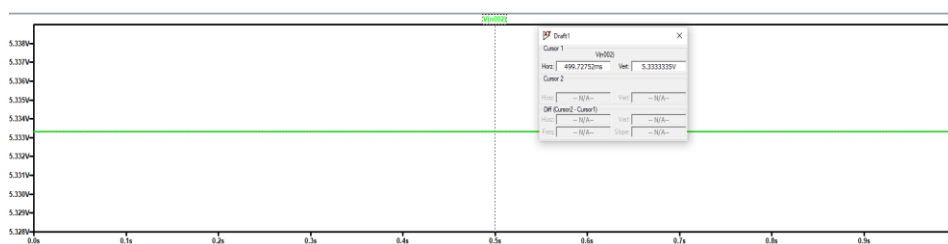
syötetään arvoksi "1". Tämä tarkoittaa, että ohjelma simuloi piirin jännitettä ja virtaa yhden sekunnin ajan. Lopuksi painetaan "OK".



Kuva 24. Simulaation mittausajan asettaminen.

10. "Wave form" avautuu. Haluttuja arvoja voidaan mitata klikkaamalla hiiren vasemmalla, sitä kohtaa piiristä, mitä halutaan mitata. Esimerkiksi virta ensimmäisen vastuksen kohdalla saadaan näkyviin painamalla vastusta "R1". Jännitteen voi taas mitata painamalla johtoa hiiren vasemmalla.
11. Tarkat lukemat saa selville painamalla hiiren vasenta näppäintä mittauksen nimen kohdalta (esimerkiksi "V(n002)"). Tällöin avautuu "cursor" ja ponnahdusikkuna (kuva 25). Ponnahdus ikkunan "Horz"-ikkuna kuvaa mittaus-

aikaa siinä kohdassa kuvaajaa, jossa "cursor" on. Vert-ikkuna taas kuvaa tässä tapauksessa kyseisen hetken jännitettä.



Kuva 25. Cursorin käyttö.

12. Kun arvot on otettu ylös paina mittauksen nimeä hiiren oikealla ja valitse "Delete this Trace". Tämän jälkeen voit toistaa mittauksen toisesta kohtaa piiriä. Yläpalkista löytyvän "Autorange"-toiminnon avulla ohjelmisto valitsee automaattisesti pystypalkkiin järkevät arvot.

5.1.2 Vastaukset

1. Virta vastuksen "R1" kohdalla = 533.33 μ A
2. Virta vastuksen "R2" kohdalla = 533.33 μ A
3. Jännite ennen vastuksia = 8 V
4. Jännite vastusten välissä = 5.33 V

5.2 Tehtävä 2. Akkumallin tuonti netistä LTspiceen ja kennojen rinnankytkentä.

Tehtävän tarkoitus on oppia tuomaan netistä linkin kautta löytyviä malleja LTspiceen ja muokkaamaan niitä kopiointi työkalun avulla. Akkumallina tässä tehtävässä toimii tässä opinnäytetyössä pohjana käytetty akkumalli.⁴⁴

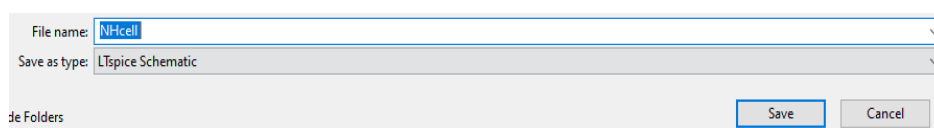
⁴⁴ Modelling a Ni-MH battery with hints on Li-Ion battery modeling

5.2.1 Työn vaiheet

1. Mennään Itwikiin alla olevan linkin kautta:

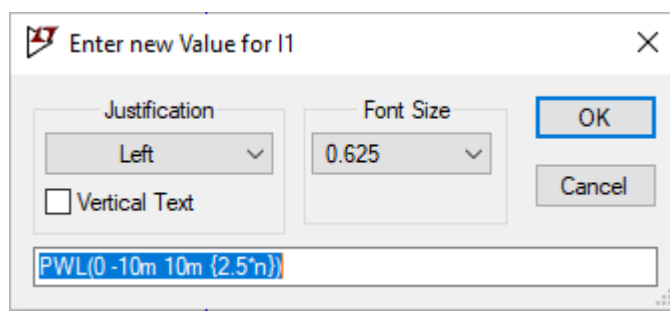
<https://ltwiki.org/index.php?title=File:NHcell.asc>

2. Painetaan sivustolta löytyvää NHcell.asc-linkkiä hiiren oikealla näppäimellä ja tallennetaan se nimellä. Huomioi, että linkki tallennetaan "LTspice Schematic" -tiedostomuotoon (kuva 26).



Kuva 26. Akkumallin tallennus.

3. Seuraavaksi etsitään tiedosto ja tupla klikataan sitä. Akkumalli avautuu LTspicessä.
4. Aletaan muokkaamaan mallia muuttamalla tekstien kokoa pienemmäksi. Klikataan hiiren oikealla "PWL(0 -10m 10m {2.5*n})" ja "NH15-2.5" ja muutetaan "Font Size" 0.625. (Kuva 27.)

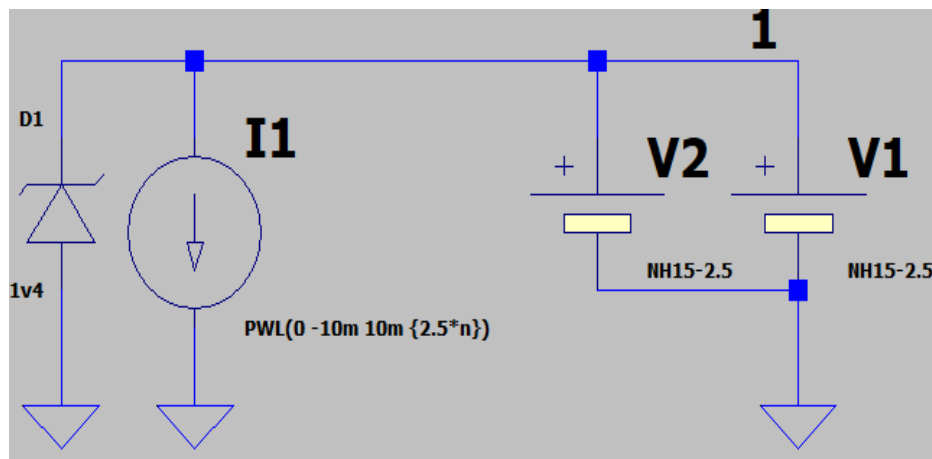


Kuva 27. Tekstin koon muuttaminen.

5. Seuraavaksi käytetään "Cut"-toimintoa ja leikataan hiiren vasenta näppäintä painamalla mallin alapuolella olevat siniset tekstit pois tilan lisäämiseksi. Cut-toiminnon saa pois päältä painamalla hiiren oikeaa näppäintä.
6. Seuraavaksi kopioidaan mallin oikeanpuoleisin komponentti (kenno) käyttämällä yläpalkin "copy"-työkalua. Painetaan komponenttia kerran hiiren

vasemmalla näppäimellä ja viedään kopio kennosta alkuperäisen kennon viereen. Copy-toiminnon saa myös pois päältä painamalla hiiren oikeaa näppäintä.

7. Seuraavaksi kennot kytketään rinnan kuvan 28 mukaisella tavalla "Wire"-toimintoa käyttäen.



Kuva 28. Rinnankytkentä.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarjota oppimismateriaalina käytettävä malli akkujen purkautumisista eri kytkennöillä LTspice XVII -ohjelmistoa hyödyntäen. Simulaatioista saadut tulokset olivat järkeviä ja mallit käyttäytyivät odotetusti. Tämän opinnäytetyön avulla lukijalla on edellytykset luoda samanlainen malli ja tarkastella sitä omatoimisesti. Lisäksi työn teoriaosuus tarjoaa hyvät lähtökohdat LTspice XVII -ohjelmiston alkeiden omaksumiseen.

Simuloinnin tulokset olivat odotettuja kaikilla kytkennöillä. Tuloksista huolimatta tulee muistaa, etteivät simulointitulokset ole aina täysin verrattavissa käytäntöön. Vaikka kytkennän purkautumisaika tämän mittauksen perusteella olisi jopa 10 tuntia, on huomioitava, että käytännössä tulokset voivat vaihdella. Simuloinnissa ei tapahdu yleisiä häiriöitä, kuten esimerkiksi piuhan katkeamisia. Myös lämpötilaolosuhteet vaikuttavat akkujen purkautumisajan kestoihin ja muuttuvan lämpötilan vaikutukset akkujen purkautumisaikaan on otettava huomioon.

Tutkimusta olisi voinut jatkaa pidemmälle erityisesti tutkimalla olosuhteiden vaikutusta purkautumisaikaan. Samat mittaukset voisi myös suorittaa eri kennoa käyttämällä. Jatkotutkimuksena voisikin olla esimerkiksi ”Li-ion-akun mallintaminen LTspicellä”, tai ”Lämpötilojen vaikutus Ni-MH-akun purkautumiseen LTspicellä havainnollistettuna”.

Itse olen tyytyväinen työn lopputulokseen, vaikkakin työtä tehdessä ilmeni erinäisiä haasteita. Alkuperäisen mallin muokkaaminen onnistui suhteellisen hyvin, vaikka yksinkertaisien asioiden tekeminen tuottikin itselleni suhteellisen uudella ohjelmistolla välillä haasteita. Opin opinnäytetyötä tehdessäni paljon LTspicesta ja koen, että työ tarjosi minulle lisää valmiuksia tulevaisuutta ajatellen.

LÄHTEET

AnalogDialogue – Get up and running with LTspice Viitattu 25.01.2022

<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/get-up-and-running-with-ltspice.html>

analog – Ltspice viitattu 02.04.2022

<https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

Battery university - BU-302: Series and Parallel Battery Configurations Viitattu 10.01.2022

<https://batteryuniversity.com/article/bu-302-series-and-parallel-battery-configurations>

Cobasys - Inside the Nickel Metal Hydride Battery. Viitattu 24.02.2022

https://web.archive.org/web/20090227062546/http://www.cobasys.com/pdf/tutorial/inside_nimh_battery_technology.pdf

Dell, R. M., and D. A. J. Rand. Understanding Batteries, Royal Society of Chemistry, 2001 Viitattu 21.11.2021

Electronicsnotes - NiMH Battery Self Discharge. Viitattu 05.12.2021

https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/nimh-nickel-metal-hydride-self-discharge.php

electronics-tutorials – The Zener Diode. Viitattu 10.03.2022

https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_7.html

Fluke – Mikä on diodi? Viitattu 20.01.2022

<https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/blogi/sahko/mika-on-diodi>

Ltwiki – Control Panel viitattu 15.03.2022

https://ltwiki.org/index.php?title=Control_Panel

LTSpice- Getting Started in 8 Minutes. Viitattu 11.04.2022.

<https://www.youtube.com/watch?v=abyxz8jfgK4>

LTSpice Tutorial - EP1 Getting started. Viitattu 20.04.2022

Matsuada - What happens inside the rechargeable battery during charging and discharging? Viitattu 18.12.2021

https://www.matsusada.com/column/battery_chaenge-dischaenge.html

Modelling a Ni-MH battery with hints on Li-Ion battery modeling. Viitattu 01.12.2021

[https://ltwiki.org/?title=Modelling a Ni-MH battery with hints on Li-Ion battery modeling](https://ltwiki.org/?title=Modelling_a_Ni-MH_battery_with_hints_on_Li-Ion_battery_modeling)

PRODUCT DATASHEET - ENERGIZER NH15-2500. Viitattu 14.03.2022

<https://data.energizer.com/pdfs/nh15-2500.pdf>

YUASA - Battery Discharging & Charging Characteristics. Viitattu 03.12.2021

<https://www.yuasa.it/en/information/motorcycle-and-powersport/battery-discharging-charging-characteristics/>