

SUSTAV ZA TESTIRANJE LITIJ-IONSКИH ČELIJA ILI ČLANAKA POMOĆU KONSTANTNE STRUJE OPTEREĆENJA

Sučec, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:020007>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKE

MARIO SUČEC

**SUSTAV ZA TESTIRANJE LITIJ-IONSКИH
ĆELIJA POMOĆU KONSTANTNE STRUJE
OPTEREĆENJA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
dr.sc. Vladimir Tudić prof. v.š.

Karlovac 2022.

SAŽETAK

Zadatak ovog Završnog rada je osmisliti i izraditi elektronički sustav za testiranje kapaciteta litij-ionskih baterijskih članaka ili ćelija, koji će samostalno preračunati kapacitet ćelije i prikazati ga na zaslonu. Kako bi se dobile točne vrijednosti potrebno je provesti testiranje baterijskih članaka odnosno kontrolirano prazniti i mjeriti njihov napon i struju. Kako bi izmjerili kapacitet baterijskih članaka potrebno ih je prvo napuniti, te onda prazniti konstantnom strujom i mjeriti vrijeme, a dobivene vrijednosti na razumljiv način prikazati korisniku. U ovom Završnom radu je razvijen prototip elektroničkog sustava za testiranje baterijskih članaka pomoću Arduino mikrokontrolera. Opisane su sve komponente sustava i objašnjen je rad u cjelini. Testiranje se provodi na baterijskim člancima normiranih brojnomo oznakom 18650 koje su danas jedne od najkorištenijih tipova baterija.

KLJUČNE RIJEČI: litij ion, baterijski sustav, solarni panel, baterijski članak/ćelija, pretvarač napona, kontroler solarnog punjenja

SUMMARY

The aim of this Final work was to design a electronic system for testing the capacity of lithium-ion cells that will independently recalculate the actual capacity of cells. In order to obtain accurate values, it is necessary to perform their testing, ie to discharge in a controlled manner and measure their voltage and current. In order to find out the capacity of the cell, it is necessary to first charge it, then discharge it with constant current and measure the time, and display the obtained values in an acceptable way to the user. In this paper, a prototype battery cell testing system was developed using an Arduino microcontroller. All components of the system are described and the explanation is the work as a whole. Testing is performed on battery cells numbered 18650, which are one of the most used battery types today.

KEY WORDS: lithium ion, battery system, solar panel, battery cell, voltage converter, solar charge controler

SADRŽAJ

SAŽETAK

1. UVOD 1

1.1 POVIJESNI RAZVOJ I PODJELA BATERIJA 2

1.1.1 POVIJEST BATERIJA 2

1.1.2 PODJELA BATERIJA 5

1.2. LITIJ IONSKA ĆELIJA (LI-ION) 8

1.2.1 GRAĐA LITIJ-IONIJSKIH ĆELIJA 10

1.2.2 OSNOVNE KARAKTERISTIKE LITIJ-IONIJSKE ĆELIJE 13

2. TEORETSKI DIO 22

2.1 KARAKTERISTIKE PUNJENJA I PRAŽNENJA LITIJ IONSKE ĆELIJE 22

2.1.1 PUNJENJE 22

2.1.2 KARAKTERISTIKA PRAŽNENJA 23

2.2 BIPOLARNI TRANZISTORI I OPERACIJSKA POJAČALA 25

2.2.1 BIPOLARNI TRANZISTORI 25

2.2.2 OPERACIJSKA POJAČALA 28

3. EKSPERIMENTALNI DIO 30

3.1 SHEMA SKLOPA 30

3.2 KRUG KONSTANTNE STRUJE OPTEREĆENJA 32

3.3 KRUG ZA PUNJENJE POMĆU MODULA TP4056 40

4. ZAKLJUČAK 43

1.UVOD

Baterija ili električna baterija (fra. batterie), u elektrotehnici, najčešće je serijski spoj dvaju ili više istosmjernih i istovrsnih izvora električne energije u kojima se kemijska, toplinska, sunčeva, vodikova ili nuklearna energija pretvara u električnu energiju [1]. Osnovna elektrokemijska jedinica baterije je članak, a sastoji se od pozitivne i negativne elektrode, te medija preko kojeg se ioni prenose između elektroda [2]. Tehnologija izrade baterija se kontinuirano usavršavala kako bi se razvile stabilne baterije. Danas su litij-ionske baterije najrasprostranjenije punjive baterije u svijetu [3]. Najkraće rečeno baterije su uređaji koji pomoću elektrokemijskih reakcija pohranjenu kemijsku energiju pretvaraju u električnu energiju [4]. Može ih se naći u mobitelima, prijenosnim računalima, automobilima i mnogim drugim mobilnim uređajima i robotskim sustavima [4-6].

Među litij-ion ćelijama najpopularnije su „18650“ [9]. Oznaka 18650 označava dimenzije baterije, što će biti pojašnjeno dalje u radu. Godišnje se proizvede gotovo 660 milijuna 18650 baterija. Veliki dio baterija koristi se u autoindustriji, gdje se koriste za pogon električnih i hibridnih vozila [10]. U električnom automobilu Tesla S koristi se više od 7000 baterijskih ćelija [11]. Li-ion 18650 baterije su toliko popularne zbog svojih prednosti: velike specifične energije, niske cijene i dugog životnog vijeka.

Ovaj Završni rad opisuje sustav koji omogućuje testiranje velikog broja 18650 litij-ion ćelija. Nakon određenog vremena autor je skupio velik broj starih baterija koji su se koristili u prijenosnim računalima. Te baterije su bile otpisane i više nisu služile svrsi. Vođen znatiželjom, autor je provjerio koliko su zapravo neispravne. Uspostavilo se da više od pola pojedinačnih ćelija bilo ispravnog napona i kapaciteta ali neuporabljivo za prvobitnu upotrebu.

Zadatak Završnog rada je osmisliti i izraditi sustav za punjenje, mjerenje i prikaz kapaciteta litij-ionske 18650 ćelije. Za taj sustav odabrane su komponente kao što su ArduinoUno mikrokontroler koji detektira napon ćelije dok korisnik odabire režim rada za ćeliju. U praktičnom djelu rada opisana su tri režima tretiranja ćelije:

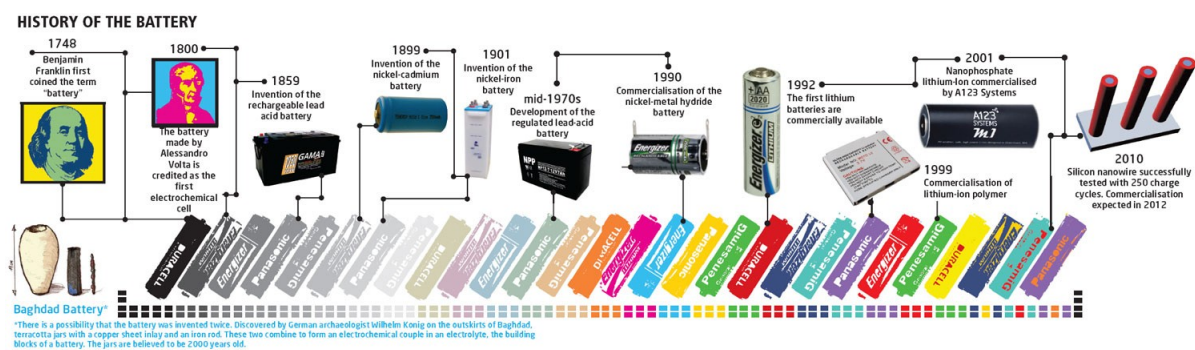
- 1) mjerenje kapaciteta;
- 2) punjenje;
- 3) skladištenje.

Izmjerene podatke i korisničko sučelje mikrokontroler ispisuje na LCD zaslonu.

1.1 POVIJESNI RAZVOJ I PODJELA BATERIJA

1.1.1 POVIJEST BATERIJA

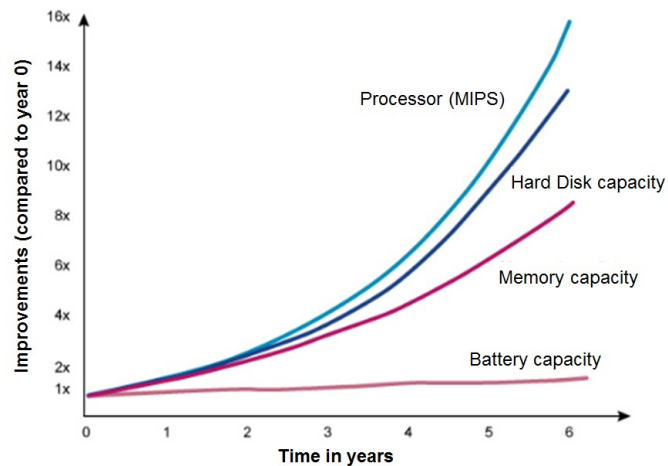
Godine 1938., arheolog Wilhelm Konig otkrio je neobične glinene posude dok je kopao na nalazištu u Khujut Rabuu, nedaleko od današnjeg Bagdada, u Iraku [12]. Pretpostavka je da je posuda od gline predstavljala prvu galvansku ćeliju. Posude koje su dugačke oko 12,5 centimetara, sadržavale su željeznu šipku obloženu bakrom i datiraju iz 200. godine prije Krista. No, ne prihvaćaju svi znanstvenici tu posudu kao izvor energije. Pretpostavlja se da je uređaj služio za galvanizaciju nakita i ostalih predmeta.[11]



Slika 1. Povijesna vremenska linija razvoja baterije. Izvor [11].

U nastojanju da pronađu uređaj za pohranu energije, znanstvenici su u 1700-im godinama usvojili izraz "baterija" za predstavljanje više elektrokemijskih ćelija povezanih zajedno.

Baterija se sastoji od dvije elektrode koje su izolirane separatorom i natopljene elektrolitom kako bi se potaknulo kretanje iona. Svakodnevno se ispituju novi aktivni materijali, od kojih svaki nudi jedinstvena svojstva, ali nijedan ne donosi konačno rješenje. Performanse baterije su se razvijale puno sporije od napretka u elektronici jer mnogi materijali u modernim baterijama dostižu svoja ograničenja.[4]



Slika 2. Napredak baterija u odnosu na računalne tehnologije. Izvor [4].

Godine 1799. talijanski fizičar Alessandro Volta stvorio je prvu bateriju slaganjem naizmjenično sloj cinka, kartona ili tkanine natopljene slanom otopinom i srebrom. Ovaj uređaj je bio prvi koji je isporučivao trajnu i konstantnu električnu energiju. Međutim, postojale su neke mane Voltinog izuma, a to je ograničenje visine na kojoj su se slojevi mogli slagati. Visina je bila ograničena jer bi težina naslaganih dijelova istisnula elektrolit iz kartona ili tkanine. Također metalni diskovi su brzo oksidirali, povećavajući unutarnji otpor baterije.[6]



Slika 3. Voltin elektrostatički stup. Izvor [5]

Kako bi se nadomjestili nedostaci Voltinih baterija uslijedilo je mnogo patenata, a neke od najznačajnijih su:

Daniell Cell Baterija (1820): oksidacija bakra (vodikovi mjehurići) ulonjena je je korištenjem druge otopine elektrolita. Daniell Cell koristio je bakreni sulfat uronjen u „neutabanu“ zemljanu posudu sa cinkovom elektrodom i sumpornom kiselinom. Ovaj tip baterije proizvodio je 1,1 volt i koristio se za napajanje komunikacijskih uređaja.[6]

Gaston Planté (1859:) Sve prethodno izumljene baterije bile su primarne ćelije , pa su se trajno ispraznile nakon kemijske reakcije.Gaston Planté je riješio ovaj problem stvaranjem prve baterije koja se mogla puniti : olovno - kiselinsku bateriju.

Leclanché ćelija (1866): cink-ugljikove baterije; Francuski znanstvenik Georges Leclanché izumio je bateriju sastavljenu od cinkove anode s katodom od mangan-dioksida omotanom unutar poroznog materijala. Ćelija je koristila otopinu amonijevog klorida kao elektrolit.

Waldermar Jungner (1899): znanstvenik porijeklom iz Švedske, izumio je prvu nikal- kadmij bateriju (NiCd). Ovo je punjiva baterija koja sadrži elektrode od nikla i kadmija natopljene otopinom kalijevog hidroksida (NaOH). To je prva baterija koja koristi alkalni elektrolit, što mu zauzvrat daje mogućnost da proizvodi bolju gustoću energije od olovno-kiselinske baterije.

Thomas Edison 1903: poznati američki znanstvenik, Thomas Edison , uzeo je ćeliju od nikla i željeza koju je dizajnirao Jungner i stvorio drugu patentiranu verziju iste. Edison je koristio alkalnu ćeliju sa željezom kao anodom i nikal oksidom kao katodom. Edisonova baterija je u početku bila namijenjena automobilima.

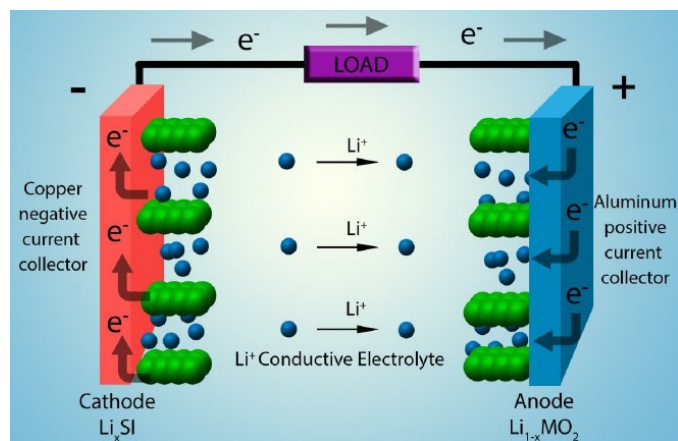
Lewis Urry 1955: inženjeru po imenu Lewis Urry tvrtka Eveready Battery Company dodijelila je zadatak da pronađe rješenje za produljenje vijeka cink-ugljik baterija. Urry je, nakon testiranja brojnih materijala, otkrio da mangan dioksid i čvrsti cink dobro djeluju zajedno s alkalnom tvari kao elektrolitom. Njegov glavni problem bio je što baterija nije mogla dati dovoljno snage. Urry je ovaj problem uspio prevladati korištenjem cinka u prahu.[8]

Litij i litij-ionske baterije 1912: Gilbert Newton Lewis počeo je s eksperimentiranjem litij baterija , ali tek u drugom dijelu stoljeća prve litijeve baterije postale su komercijalno dostupne. Tri važna razvoja bila su ključna za stvaranje ovih baterija: otkriće LiCoO₂ katode od strane **Johna Goodenougha (1980.)**, otkriće grafitne anode od strane **Rachida Yazamija (1982.)** i prototip punjive litijeve baterije koju proizvodi Asahi Chemical, Japan. Sony je komercijalizirao litij-ionsku bateriju 1991. godine. [6]

1.2.1 PODJELA BATERIJA

Baterije su skup jedne ili više ćelija koje kemijskom reakcijom stvaraju protok elektrona kroz neki vanjski uređaj. Baterija se sastoji od dvije elektrode koje su izolirane elektrolitom.

Anoda predstavlja negativni, a katoda pozitivni pol baterije. Kad su anoda i katoda spojene u strujni krug, dolazi do kemijske reakcije između anode i elektrolita. Ta reakcija uzrokuje protok elektrona kroz krug i povratak u katodu.[6]



Slika 4. Tipična litij-ionska baterija koristi grafitnu anodu i litij kobalt katodu, odvojene tekućim elektrolitom koji sadrži litijeve ione. Izvor [6]

Tijekom reakcije pražnjenja ioni se pomiču s anode i ubacuju u šupljine između slojeva katodnih kristala. U procesu punjenja, ioni se pomiču s katode na pozitivnoj strani baterije i ubacuju se u anodu.

Baterije možemo klasificirati na više načina – kao **primarne** ili **sekundarne** te prema kemijskom sastavu, tehnologiji izrade, dimenziji...

Primarne baterije

Baterije koje se ne mogu ponovno napuniti, postaju neupotrebljive i više nije moguće vratiti njihov kapacitet nazivamo primarne baterije. Razlog tome je ireverzibilna kemijska reakcija koja proizvodi strujanje elektrona tj. kemijska energija se nepovratno pretvara u električnu energiju.

Osobito važnu ulogu imaju kada je punjenje nepraktično ili nemoguće, kao što je u vojnim borbama, misijama spašavanja i šumskim vatrogasnim službama.[7]

Regulirano prema IEC 60086 pravilniku, primarne baterije također služe u medicini kod srčanih bolesnika, mjerače tlaka u gumama u vozilima, pametne mjerače, inteligentne bušilice u rudarstvu, praćenje životinja, kao i ručne satove, daljinske upravljače, električne ključeve i dječje igračke.



Slika 5. Primjeri primarnih baterija. Izvor [7].

Visoka specifična energija, dugi rok trajanja i trenutna spremnost daju primarnim baterijama prednost u odnosu na druge izvore energije. Mogu se prenositi na udaljena mjesta i koristiti odmah, lako su dostupne i ekološki prihvatljive kada se odlože. Nedostaci primarnih baterija su: veliki unutarnji otpor i radna temperatura. U niskim temperaturama reakcije su usporene, a pri visokim temperaturama su ubrzane tako da uzrokuju gubitak kapaciteta.

Najpopularnija primarna baterija je alkalna. Ima visoku specifičnu energiju, isplativa je i ekološki prihvatljiva. Alkalne baterije se mogu skladištiti do 10 godina, zadovoljavaju sve „safety“ norme i mogu se nositi u zrakoplovu bez da podliježu posebnim propisima.

Prelazak na veće kapacitete i bolje punjenje dovodi do litij-metalnih baterija. Oni imaju vrlo stroge smjernice zračnog transporta i podliježu propisima o opasnim dobrima koji uključuju opasne materijale klase 9. [9]

Sekundarne baterije

Punjive baterije imaju važnu ulogu u našim životima i mnogi svakodnevni poslovi bili bi nezamislivi bez mogućnosti punjenja. Najčešće punjive baterije su olovne, NiCd, NiMH i Li-ion.

U nastavku ću kratko navesti neke od karakteristika pojedinih:

Olovno-kiselinska - Ovo je najstariji sustav punjivih baterija. Olovno - kiselinska baterija ima dugi vijek trajanja i ekonomski je prihvatljiva, ali ima nisku specifičnu energiju i ograničen broj ciklusa. Olovno-kiselinska baterija se koristi u medicini, manjim vozilima, rasvjeti u slučaju nužde i neprekidnom napajanju (UPS). Olovo je otrovno i ne može se odlagati na odlagališta.

Nikl-kadmij - NiCd se koristi tamo gdje je potreban dug radni vijek, velika struja pražnjenja i rad u ekstremnim temperaturama. NiCd je jedna od najotpornijih i najtrajnijih baterija i jedina kemija koja omogućuje ultra-brzo punjenje. Glavne primjene su električni alati, medicinski uređaji, zrakoplovstvo i UPS. Zbog brige o okolišu, NiCd se zamjenjuje drugim kemijama.

Nikal-metal-hidrid - Služi kao zamjena za NiCd jer ima samo blage toksične metale i daje višu specifičnu energiju. NiMH se koristi za medicinske instrumente, hibridne automobile i industrijske primjene. NiMH je također dostupan u AA i AAA ćelijama za komercijalnu upotrebu.

Litij-ionski - Li-ion zamjenjuje mnoge operacije koje su prije izvršavale olovne i nikalne baterije.[7]

1.2 LITIJ-ION BATERIJA (Li-ion)

Prvi radovi na litij bateriji počeli su 1912. godine pod vodstvom Gilbert Newton Lewis, ali tek su početkom 1970-ih prve nepunjive litijeve baterije postale komercijalno dostupne.

Litij je najlakši od svih metala, ima najveći elektrokemijski potencijal i daje najveću specifičnu energiju po težini i nudi dug životni vijek. Sredinom 1980-ih otkriveno je da cikličko pražnjenje uzrokuje neželjeni sloj kristala na metalnom litiju kao anodi.[10]

Veličina ovog sloja raste i prodire u separator te uzrokuje kratki spoj unutar baterije. Prilikom kratkog spoja, temperatura ćelije naglo poraste i približi se točki taljenja litija. Posljedica toga je toplinski pritisak unutar baterije te njeno „probijanje“ u obliku „ispuštanja plamena“.



Slika 6. Starenje baterije. Izvor [8].

Nestabilnost metalnog litija, proširila je istraživanje na nemetalnu otopinu litijevih iona, a 1991. Sony je komercijalizirao prvu Li-ion bateriju. Li-ion je siguran, pod uvjetom da se poštuju ograničenja napona i struje.

Velika specifična energija dolazi od visokog napona potencijala ćelije od 3,60 V. Nominalni napon ćelije od 3,60 V može napajati mobilne telefone, tablete i digitalne kamere, i pritom ponuditi lakša

dizajnerska rješenja. Nedostaci su potreba za zaštitnim krugovima za zaštitu od prekomjernog punjenja ili pražnjenja, kao i visoka cijena.[10]

Danas 18650 ćelije visoke energetske gustoće isporučuju preko 3000 mAh, a troškovi padaju. Smanjenje troškova, povećana specifična energija i neprisutnost toksičnih materijala postavili su Li-ion bateriju da postane univerzalno prihvaćena baterija za prijenosnu upotrebu, industriju, električne pogone i satelite. 18650 ima promjer 18 mm i duljinu 65 mm.

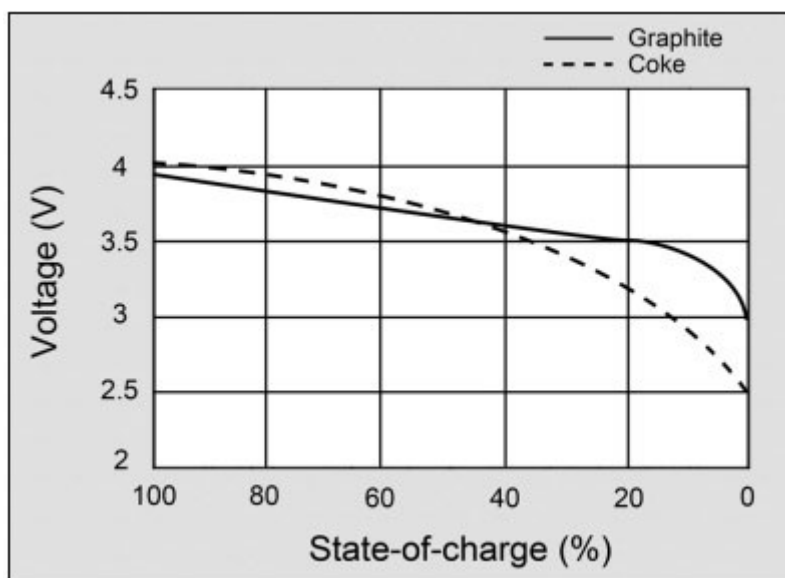
Li-ion je baterija koja ne zahtjeva puno održavanja i to je prednost koju većina drugih baterija nema.

1.2.1 GRAĐA LITIJ-IONIJSKIH ČELIJA

Li-ionske baterije dolaze u mnogim varijantama, iako su na prvi pogled slične, ove baterije se razlikuju u izvedbi, a izbor aktivnih materijala daje im specifična svojstva.

Od 1997. većina proizvođača litij iona, prešla je na grafit umjesto koksa kao anodu, kako bi postigla linearniju krivulju pražnjenja. Grafit je oblik ugljika koji ima dugotrajnu stabilnost ciklusa, a budući materijal koji obećava poboljšanje performansi Li-iona je grafen.

Li-ion baterije se izrađuju u tri oblika: cilindrične, prizmatične i vrećaste, a u nastavku rada ćemo se fokusirati najviše na cilindrične 18650 ćelije.[11]

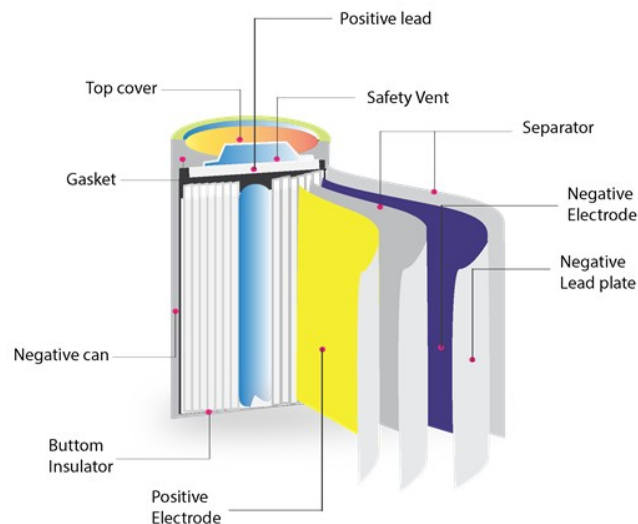


Slika 7. Krivulja pražnjenja litij-iona s grafitnom anodom u odnosu na koks. Izvor [11].

Baterija bi trebala imati linearnu krivulju napona u režimu pražnjenja te grafitna anoda to čini bolje od koksa. Potrebno je šest atoma ugljika (grafita) da se vežu na jedan litijev ion, a jedan atom silicija može se vezati na četiri litijeva iona. Anode od čistog silicija nisu rješenje i samo 3-5% silicija se koristi u anodi kako bi se postigao duži vijek trajanja.

Katoda odnosno pozitivna elektroda određuje napon i kapacitet Li-ion baterije. Katoda Li-ion baterije je litijev oksid, budući da je litij nestabilan u elementarnom obliku. Aktivni materijal sadrži litijeve ione, a elektrolit se dodaje za povećanje vodljivosti.

Katoda ima važnu ulogu u određivanju karakteristika baterije jer su kapacitet i napon određeni tipom aktivnog materijala koji se koristi za katodu. Što je veća količina litija, veći je kapacitet i razlika potencijala između katode i anode, a veći je i napon. [12]



Slika 8. Presjek cilindrične Litij-ion baterije. Izvor [12]

Anoda je također obložena aktivnim materijalom koji omogućuje protok električne struje kroz vanjski krug, a također omogućuje reverzibilnu apsorpciju litijevih iona koji se oslobađaju iz katode.

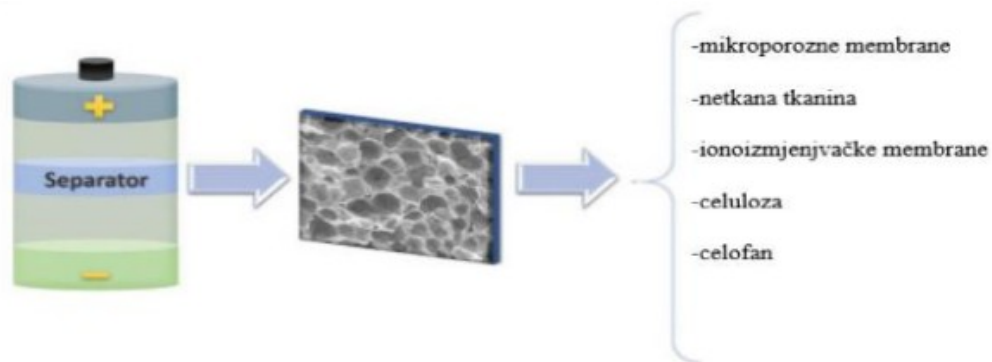
Kada se baterija puni, litijevi ioni se pohranjuju na anodi, a ne na katodi. Kada se stavi u stanje pražnjenja, litijevi ioni teku natrag na katodu kroz elektrolit, a elektroni se odvajaju od litijevih iona i kreću se kroz strujni krug, stvarajući električnu energiju. [2];[3]

Za anodu se koristi grafit jer ima stabilnu strukturu. Njegova svojstva kao što su stabilnost, niska elektrokemijska reaktivnost, skladištenje litijevih iona i niža cijena dovode do široke upotrebe materijala za anodu.[12]

Elektrolit je glavna komponenta Li-Ion baterije jer olakšava kretanje litijevih iona između katode i anode. Elektrolit se općenito sastoji od sintetskih tvari visoke ionske vodljivosti kako bi se olakšalo kretanje litijevih iona. Elektrolit se sastoji od soli koje omogućuju prolaz litijevim ionima, otapala koji otapaju sol, te aditiva koji se dodaju u malim količinama i imaju specifične funkcije. Brzina litijevih

iona također ovisi o vrsti elektrolita. Najčešće korišteni elektrolit sastoji se od litijeve soli, kao što je litijev heksafluorofosfat u organskoj otopini.

Separatori se postavljaju između obje elektrode, ključno svojstvo im je visoka ionska vodljivost, izvrsna mehanička i toplinska stabilnost i mogu se podijeliti u šest glavnih tipova: mikroporozne membrane, netkane membrane, nanofibra membrane, membrane s vanjskom modifikacijom površine, kompozitne membrane i polimerne mješavine. [13]



Slika 9. Vrste separatora u litij-ionskoj bateriji Izvor [13].

Klasična litij-ionska ćelija je tipa „18650“ te ta oznaka predstavlja njenu širinu (promjer) u milimetrima (18 mm) i duljinu (65 mm). Kod nje je separator površine od 0,07 m² do 0,09 m², što je otprilike 4% do 5% ukupne mase ćelije.

1.2.2 OSNOVNE KARAKTERISTIKE KOMERCIJALNE 18650 LITIJ-ION BATERIJE

Punjive litij-ion baterije nude nekoliko prednosti u usporedbi s konvencionalnim tehnologijama, a to su:

1. Visoka gustoća energije (do 150 Wh/kg, 400 Wh/L)
2. Viši napon ćelije (do 4,2 V po ćeliji)
3. Dulji vijek trajanja (od 5 do 10 godina)

Najznačajniji izazovi za širu primjenu Li-ion tehnologija su stabilnost u radu pri povišenim temperaturama i sigurnost. Takve baterije ne smiju biti izložene na temperaturama višim od 70 °.

Li-ion baterije su općenito sigurne, ali može doći do „odzračivanja“ ukoliko su prenapunjene ili zgnječene.[14]

Radni napon baterije	od 4.2V do 2.5V
Specifična energija	100 do 158 Wh/kg
Kontinuirana struja pražnjenja	obično 1C; moguće do 5C
Ciklički vijek trajanja na 100% DoD	do 3000
Starosni vijek trajanja	Preko 5 godina
Samopražnjenje	2-10% mjesečno

Tablica 1. Opće karakteristike Li-ion baterije. Izvor [14].

U trenutnim Li-ion baterijama, problemi s prekomjernim punjenjem, pražnjenjem i prekomjernom temperaturom, riješeni su ugradnjom upravljačkih krugova u baterije (BMS). Osim toga ti krugovi mogu također obavljati funkciju mjerenja napona ili bilježiti povijest potrošnje baterije. Kontroler u upravljačkom krugu obično prati napon svake ćelije ili niza ćelija u bateriji. U takvim upravljačkim krugovima (BMS) može biti integriran termistor ili senzor za kontrolu temperature na ćeliji.[2]

Type	14500	14650	17500	17670	18500	18650	26650	33600
Height, mm	50.0	65	50	67	50	65	65	60
Diameter, mm	14	14	17	17	18	18	26	33
Volume, ml.	7.7	10	11.3	15.2	12.7	16.5	34.5	51.4
Mass, g.	19	26	25	35	31	42	93	125
Capacity (Ah)	.65	.90	0.83	1.25	1.1	1.8	3.2	5.0
Specific energy (Wh/kg)	126	128	123	132	131	155	354	150.4
Energy density (Wh/L)	312	333	273	306	320	410	131	366

Slika 10. Električne i fizikalne karakteristike komercijalnih Litij-ion baterija. Izvor [4].

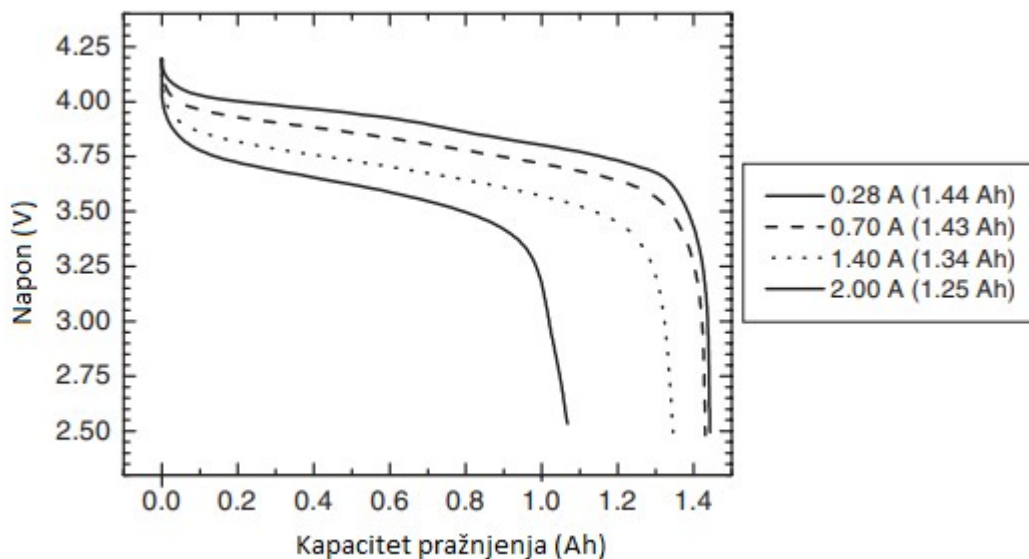
Neki od najbitnijih karakteristika baterija su: kapacitet (mAh), nominalni napon (V), minimalni napon pražnjenja (V), maksimalni napon punjenja (V), unutarnji otpor (Ohm), specifična snaga (W/kg), specifična energija (Wh/kg), C-faktor, stanje napunjenosti baterije (SoC) (%), dubina ispražnjenosti baterije (DoD) (%) [2];[3]

Kapacitet ćelije određen je količinom aktivnih materijala u ćeliji. Energija koju baterija može isporučiti u procesu pražnjenja naziva se kapacitetom baterije. Definira se kao količina električne energije u elektrokemijskoj reakciji, a izražava se u amper-satima.[18]

Amper-sat (Ah) je mjerna jedinica koja opisuje akumulirani električni naboj. Jedan (Ah) jednak je količini naboja (elektrona) potaknut kretanjem struje od jednog ampera u jednom satu.

Kapacitet je ukupna količina **električne energije** i produkt je isporučene jačine struje u nekom vremenskom razdoblju. To znači ako baterija ima kapacitet jedan amper-sat (1Ah), tada može proizvesti jačinu struje od jednog ampera (1A), u sat vremena.[18]

$$C (Ah) = I(A) * t(h)$$

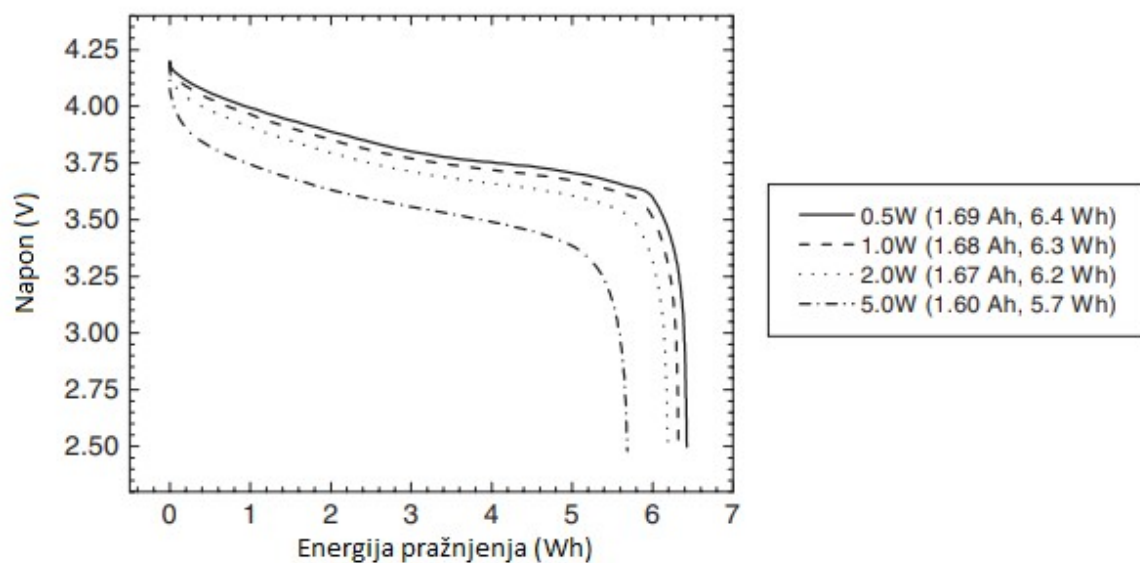


Slika 11. Kapacitet i sposobnost pražnjenja 18650 ćelije uz konstantnu struju opterećenja. Izvor [2].

Kapacitet ćelije se također može izraziti kao akumulirana **energija** u određenom vremenu uzimajući napon i količinu električne energije u obzir. Ova teoretska energetska vrijednost je maksimalna vrijednost koju može isporučiti određeni elektrokemijski sustav:[2]

$$Q(\text{Wh}) = U(\text{V}) * C (\text{Ah});$$

Jedan vat-sat (Wh) je energija rada snage 1W, u razdoblju od 1 sat. To je na primjer, 1 amper na 1 volt za jedan sat, ili 4 amper na 0,5 volt za pola sata, i tako dalje.



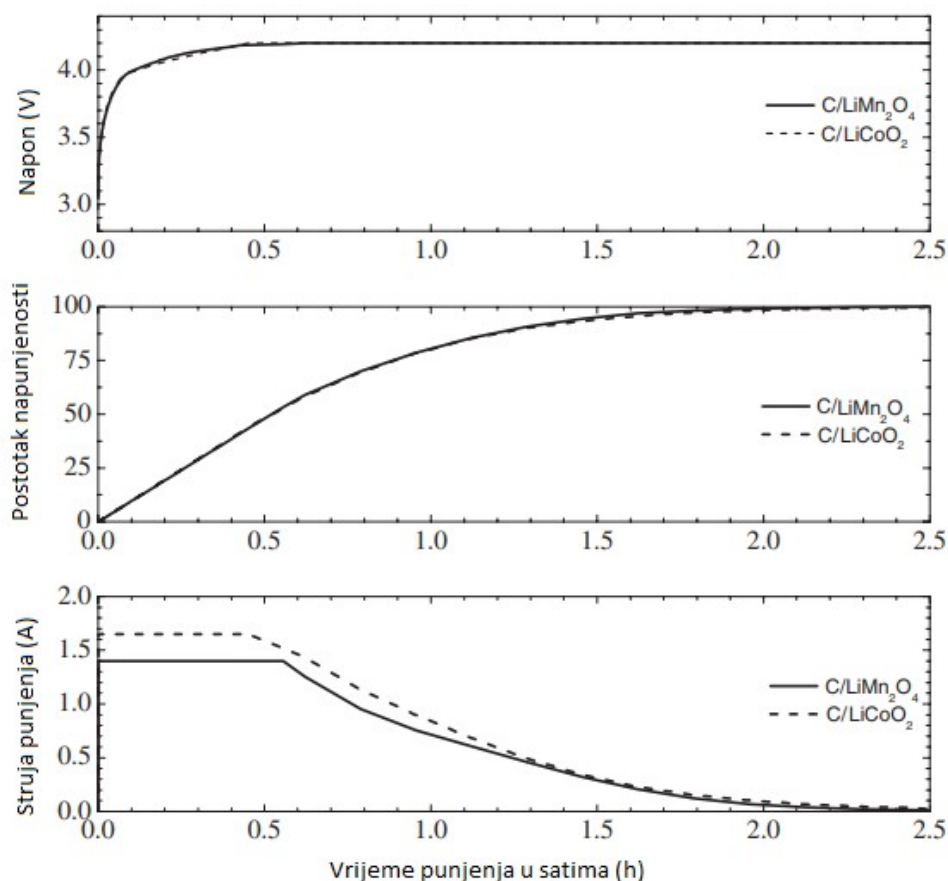
Slika 12. Pražnjenje konstantnom snagom 18650 ćelije. Izvor [2].

Nominalni napon je karakteristični radni napon baterije odnosno napon ćelije u uvjetima nominalnog opterećenja. Ćelije se mogu povezati u seriju kako bi se povećao izlazni napon baterije. Nazivni napon litij-iona je 3,60 V. Neki proizvođači ćelija označavaju svoje Li-ion kao 3,70 V ili više. Proizvođači opreme pridržavaju se nominalnog napona ćelije od 3,60 V za većinu Li-ion sustava kao izvora napajanja. [2];[3]

Nazivni napon je funkcija materijala anode i katode, kao i impedancije. Izračuni napona uključuju mjerenje srednje vrijednosti napunjene ćelije na 4,20 V i prazne ćelije na 3,0 V s konstantnom strujom opterećenja od 0,5C.

Minimalni napon pražnjenja („Cutoff voltage“) je napon pri kojem se baterija smatra potpuno ispražnjenom, nakon čega bi daljnje pražnjenje moglo uzrokovati štetu.[14] Većina mobilnih telefona, prijenosnih računala i drugih uređaja isključuje se kada litij-ionska baterija dosegne 3,00 V pri pražnjenju. U ovom trenutku baterija ima još oko 5 posto kapaciteta. Proizvođači biraju ovaj prag napona kako bi smanjili stres baterije i ostavili prostor za samopražnjenje ako se baterija ne napuni odmah. Razdoblje u praznom stanju može trajati nekoliko mjeseci dok samopražnjenje ne snizi napon Li-iona na oko 2,50 V.[2]

Maksimalni napon punjenja. Li-ionske ćelije se proizvode u ispražnjenom stanju i stoga se moraju napuniti prije upotrebe. Li-ion ćelije se obično pune pomoću konstantne struje (CC) ili konstantnom strujom i naponom (CCCV). Li-ionske ćelije obično se pune na 4,1 V ili 4,2 V [14]

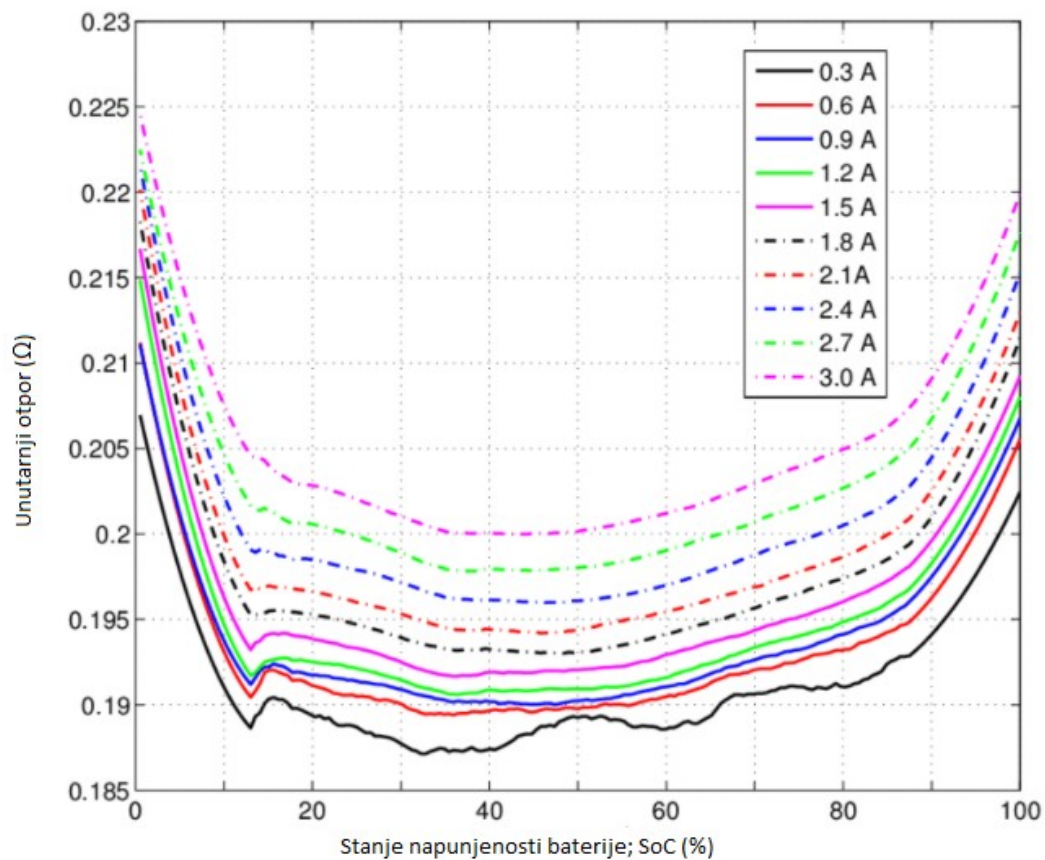


Slika 13. Napon, stanje napunjenosti i struja punjenja 18650 ćelije. Izvor [14].

Unutarnji otpor baterije se pojavljuje jer elementi od kojih su sastavljeni nisu savršeni vodiči. Elektrode i elektroliti nisu 100% vodljivi i dolazi do opiranja prolaska električne struje. U

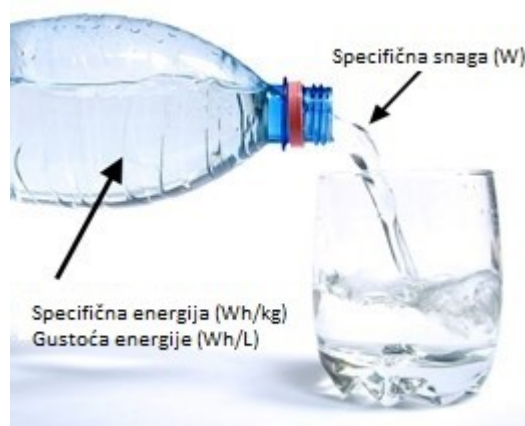
idealnom slučaju, baterija bi trebala imati unutarnji otpor od 0. Unutarnji otpor ovisi o stanju napunjenosti baterije. Na slici možemo vidjeti ponašanje unutarnjeg otpora 18650 ćelije tijekom punjenja.[18]

Razine otpora su najveće pri niskom stanju napunjenosti i odmah nakon punjenja. Najbolje performanse baterije se ne postižu odmah nakon punjenja, već nakon razdoblja mirovanja od nekoliko sati. Tijekom pražnjenja, unutarnji otpor baterije se smanjuje, doseže najnižu točku na pola kapaciteta i ponovno počinje rasti (isprekidana linija).



Slika 14. Varijacije unutarnjeg otpora za različite struje pražnjenja i stanje napunjenosti 18650 ćelije. Izvor [17].

Specifična snaga (W/kg), ili gustoća snage, opisuje nam sposobnost ćelije na opterećenje. Baterije za električne alate izrađene su za veliku specifičnu snagu i dolaze sa smanjenom specifičnom energijom (kapacitetom). Slika 15. prikazuje odnos specifične energije (voda u boci) i specifične snage (izljevanje kroz otvor).[18]



Slika 15. Prikaz odnosa specifične energije i specifične snage. Izvor [18].

Voda u boci predstavlja specifičnu energiju odnosno kapacitet ćelije a izljevanje vode predstavlja specifičnu snagu (opterećenje).

Specifična energija (Wh/kg) definira kapacitet baterije u odnosu na težinu (Wh/kg). **Gustoća energije**, ili volumetrijska gustoća energije, izražava se u volumen u litrama (**Wh/l**). Proizvodi koji zahtijevaju dugo vrijeme rada pri umjerenom opterećenju optimizirani su za visoku specifičnu energiju; sposobnost isporuke velikih strujnih opterećenja može se zanemariti.[18]

Sposobnost brzine punjenja i pražnjenja. Brzine punjenja i pražnjenja baterije definirane su *C-faktorom*. Kapacitet baterije obično je označen kao 1C, što znači da bi potpuno napunjena baterija kapaciteta 1Ah trebala osigurati 1A u jednom satu. Ista baterija koja se prazni na 0,5C trebala bi isporučivati 500mA dva sata, a na 2C isporučuje 2A u vremenu od 30 minuta.[2]

C-faktor koji iznosi 1C možemo nazvati jednosatno pražnjenje; 0,5C ili C/2 je dvosatno pražnjenje, a 0,2C ili C/5 je 5-satno pražnjenje. Neke baterije visokih performansi mogu se puniti i prazniti iznad 1C. Slika 16 prikazuje nam vremena punjenja/pražnjenja za različit C-faktor. [2];[3]

C-FAKTOR	VRIJEME
5C	12 min
2C	30 min
1C	1h
0,5C ili C/2	2h
0,2C ili C/5	5h
0,1C ili C/10	10h
0,05C ili C/20	20h

Slika 16. C-faktor i vrijeme punjenja i pražnjenja baterije od 1Ah(1000mAh). Izvor [19].

Stanje napunjenosti ili „State of Charge (SoC)“ označava kapacitet koji je trenutno dostupan u odnosu na nazivni kapacitet. Vrijednost SoC-a izražava se između 0% i 100%. Ako je SOC 100%, tada se smatra da je ćelija potpuno napunjena, dok SoC od 0% označava da je ćelija potpuno ispražnjena. Razlika napona između potpuno napunjene i ispražnjene ćelije može biti do 0,5 V. Definira se kao omjer trenutnog kapaciteta i nominalnog kapaciteta. Nominalni kapacitet definira proizvođač i predstavlja maksimalnu količinu naboja koji može biti uskladišten u bateriji [19]:

$$SoC = \frac{C_{bat}}{C_{max}};$$

SoC - stanje napunjenosti baterije;

C_{bat} - trenutni kapacitet baterije;

C_{max} - maksimalni kapacitet baterije.

Postoji mnogo metoda za određivanje SoC-a baterije, a većina ih se temelji na elektrokemijskim karakteristikama baterije i uvjetima opterećenja u stvarnom vremenu. Struja baterije, napon ćelije, i temperatura ćelije su ključni parametri za procjenu SoC-a baterije. Nema precizne metode kojom se može izračunati SoC, ali najčešće korištene su:

1.) Izravno mjerenje

- a) metoda napona otvorenog kruga
- b) metoda napona polova
- c) metoda impedancije
- d) metoda spektroskopijske impedancije

2.) Metoda bilježenja („*Book-Keeping method*“)

- a) metoda brojanja kulona
- b) modificirano brojanje kulona

3.) Prilagodljivi sustavi

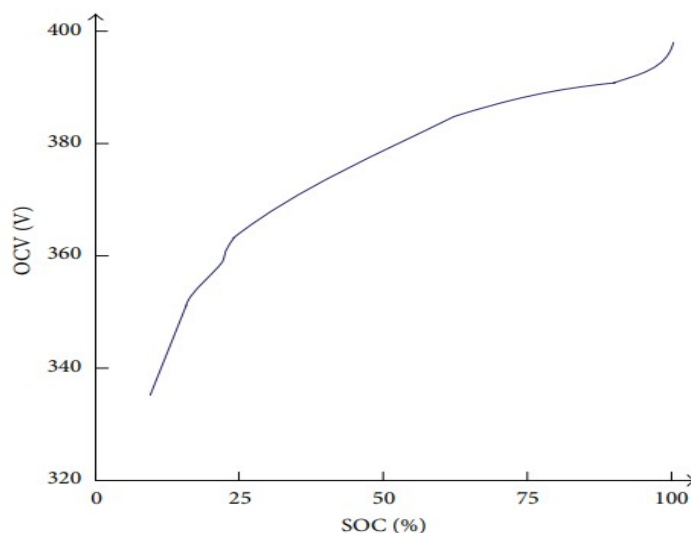
- a) BP neuronska mreža
- b) RBF neuronska mreža
- c) Stroj potpornih vektora
- d) Nejasna neuronska mreža
- e) Kalmanov filter

4.) Hibridne metode

- a) brojanje kulona i EMF kombinacija
- b) brojanje kulona i Kalmanov filtera kombinacija
- c) Sustav po jedinici i EKF kombinacija [4];[3]

Izravne metode određivanja stanja napunjenosti („*engl. State of Charge;SoC*“) su direktne metode mjerenja i koriste fizikalne karakteristike ćelije kao što su impedancija ili napon. Najčešće metode su metoda napona otvorenog kruga, metoda napona na polovima i metoda mjerenja impedancije.

Metoda napona otvorenog kruga (OCV): Li-ion baterija nema linearan odnos između napona otvorenog kruga i stanja napunjenosti (SoC-a). Tipičan odnos između SoC-a i OCV-a litij-ionske ćelije prikazan je na slici 18. Graf funkcije OCV-a i SoC-a nastao je primjenom impulsnog opterećenja na ćeliju, zatim ostaviti bateriju da se „smiri“. SoC i kapacitet litij-ionske baterije najčešće se procjenjuje pomoću dvostrukog proširenog Kalmanovog filtra u prilagodljivim sustavima za mjerenje SoC-a.[18]



Slika 17. Odnos napona otvorenog kruga (OCV) i stanja napunjenosti (SoC) litij – ion ćelije. Izvor [20].

Metoda bilježenja u realnom vremenu koristi podatke o pražnjenju baterije kao parametar za izračun stanja napunjenosti. Ova metoda omogućava nam mjerenja unutarnjih reakcija baterije kao što su samopražnjenje, gubitak kapaciteta i učinkovitost. Postoje dvije vrste metoda bilježenja: brojanju kulona i modificirano brojanje kulona. [2];[3]

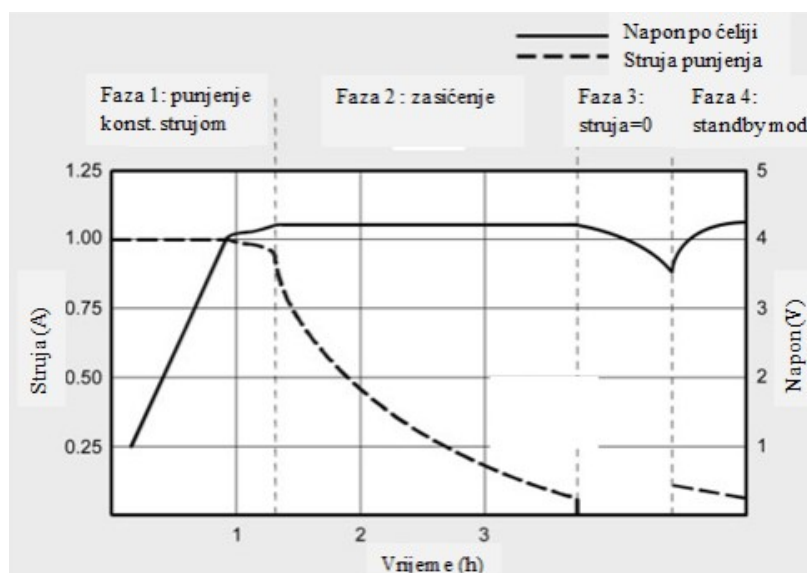
Prilagodljivi sustavi u razvoju s umjetnom inteligencijom novi su prilagodljivi sustavi za procjenu SoC-a. Nove razvijene metode uključuju neuronsku mrežu s povratnom propagacijom (BP), radijalne neuronske mreže (RBF), metode neizrazite logike, Kalmanov filtar i druge metode. Prilagodljivi sustavi su oni koji se mogu automatski prilagoditi promjenjivim uvjetima, kao što je ne linearni SoC litij-ion ćelije. [2];[3]

Hibridne metode. Cilj hibridnih modela je koristiti prednosti svake metode i dobiti optimalnu procjenu napunjenosti. Hibridne metode općenito daju dobre rezultate SoC-a u usporedbi s pojedinačnim metodama. Hibridne metode kombiniraju različite pristupe kao što su kombinacija metoda izravnog mjerenja napona i metoda bilježenja. [2];[3]

2.1 KARAKTERISTIKE PUNJENJA I PRAŽNJENJA LITIJ IONSKE ČELIJE

2.1.1 PUNJENJE

Litij-ionske ćelije sa klasičnim katodnim materijalima od kobalta, nikla, mangana i aluminija obično se pune do 4,20 V sa tolerancijom +/-50 mV. Punjenje iznad toga uzrokuje stres za ćeliju i rezultira oksidacijom koja smanjuje vijek trajanja i kapacitet. Također može uzrokovati sigurnosne probleme.



Slika 18. Faze punjenja litij-ion baterije. Izvor [19].

Punjenje litij-ionskih baterija može se podijeliti u dvije glavne faze:

Punjenje konstantnom strujom: u ovoj fazi ćelija se puni konstantnom strujom. Obično će to biti između 0,5 i 1,0 C. (za bateriju od 2Ah brzina punjenja je 2A za faktor od 1C). Za komercijalne ćelije preporuča se brzina punjenja od maksimalno 0,8C. [2];[3]

Faza konstantnog napona: U ovoj fazi nadopunjuje se baterija do 100% svog kapaciteta i obično je dugo traje. Nakon nekog vremena napon dostiže vrhunac na oko 4,2 volta. U tom trenutku ćelija ulazi u zasićenje odnosno fazu konstantnog napona. Održava se konstantan napon od 4,2 volta a struja eksponencijalno pada kroz vrijeme. [2];[3]

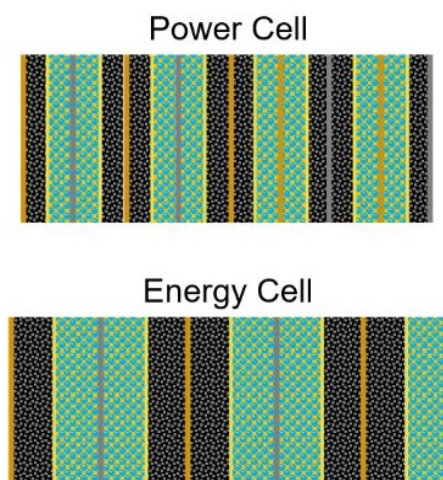
Kraj ciklusa punjenja se postiže kada struja padne na oko 10% nazivne struje. Vrijeme punjenja može biti oko dva sata za ovu fazu, ovisno o vrsti ćelije, proizvođaču itd. Za ovakav režim punjenja ćelija postoje posebno dizajnirani čipovi a jedan takav koristim u eksperimentalnom djelu rada i naziva se „TP4056“. Osim što koristi sve algoritme za takvu vrstu punjenja, takav čip je vrlo precizan na spomenute tolerancije od prepunjenja($\pm 50\text{mV}$) i struja.

2.1.2 KARAKTERISTIKE PRAŽNENJA

Ranija izvedba litij-ionske baterije bila je nestabilna za velika opterećenja stoga su se pojavile dvije osnovne vrste litij-ionskih ćelija: energetska (energetska) ćelija i ćelija visoke snage (PowerCell). Energetska ćelija imat će bolju volumetrijsku i gravimetrijsku gustoću energije nauštrb sposobnosti isporuke velike struje.

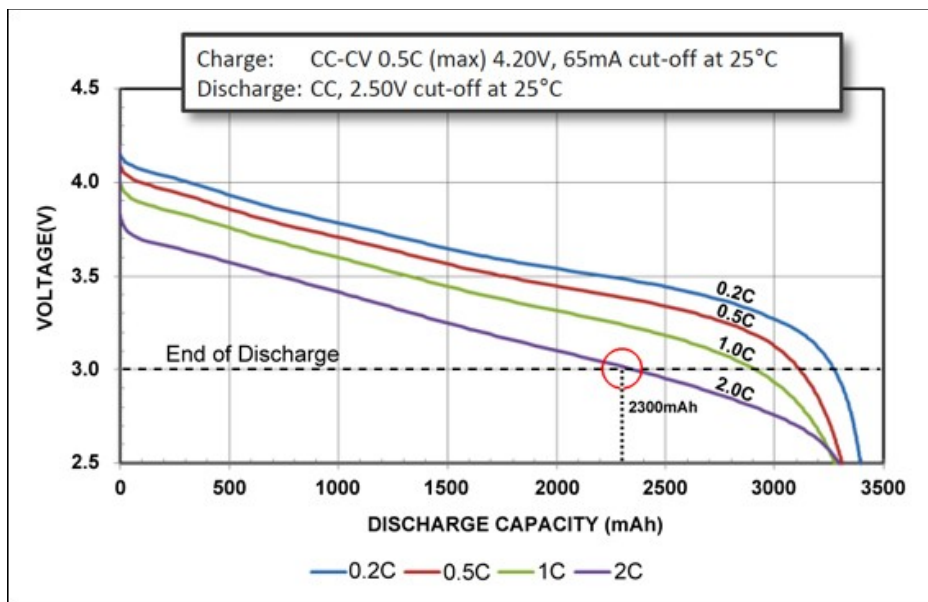
Ćelija visoke snage imat će nizak unutarnji otpor i bit će optimizirana za isporuku velike struje.

Ove dvije vrste baterija karakterizira skladištenje energije, također poznato kao kapacitet, i isporuka struje, također poznato kao opterećenje ili snaga. Karakteristike su definirane veličinom čestica na elektrodama. Veće čestice povećavaju površinu za maksimalni kapacitet, a fini materijal je smanjuje kako bi se postigla velika snaga.[26]



Slika 19. Dizajn aktivnih elemenata ćelije visoke snage i energetske ćelije. Izvor [26].

Litij-ionska energetska ćelija napravljena je za velik kapacitet kako bi osigurala dugo vrijeme rada. Energetska ćelija NCR18650B ima veliki kapacitet, ali je manje izdržljiva kada se prazni na 2C. Kada se prazni na 2C njen kapacitet je samo 2,3 Ah od deklariranih 3,2 Ah. Ova ćelija je idealna za prijenosno računalo i slične lagane zadatke. [27]

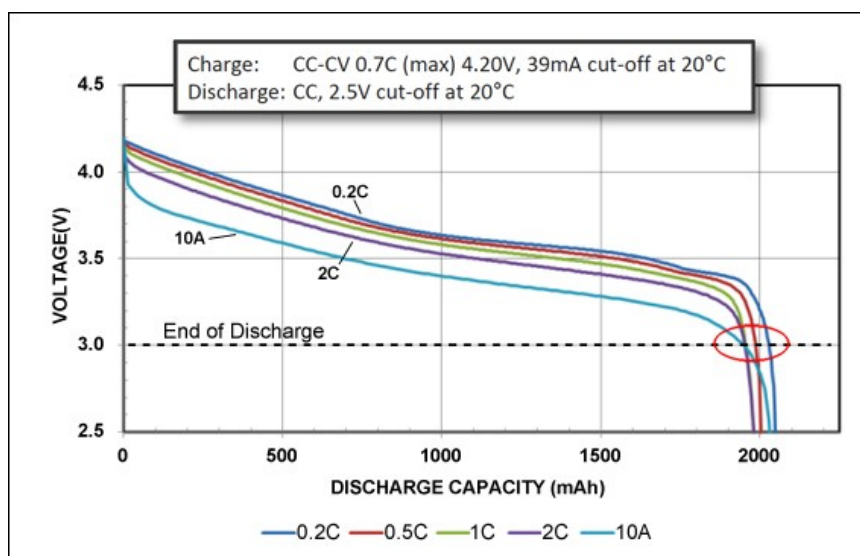


Slika 20. Karakteristike pražnjenja energetske ćelije NCR18650B tvrtke Panasonic. Izvor [27].

Energetska ćelija od 3200 mAh prazni se na 0,2C, 0,5C, 1C i 2C.

Panasonic UR18650RX ima manji kapacitet ali odlične karakteristike pri opterećenju.

Pražnjenje na 10A (5 C) ima minimalni gubitak kapaciteta na graničnom naponu od 3,0 V. Ova ćelija se koristi u sustavima koje zahtijevaju veliku struju opterećenja, kao što su električni alati.



Slika 21. Karakteristike pražnjenja UR18650RX Power Cell tvrtke Panasonic. Izvor [27].

Power Cell od 1950mAh prazni se na 0,2C, 0,5C, 1C i 2C i 10A. Sve ćelije su testirane do 3,0 V i kapacitet ne prelazi 2000 mAh.

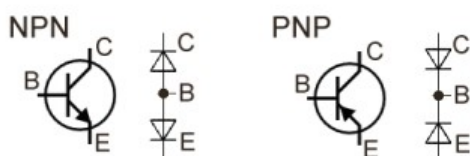
Power Cell dopušta kontinuirano pražnjenje od 10C. To znači da ćelija 18650 nazivne snage 2000 mAh može osigurati kontinuirano opterećenje od 20 A. Vrhunska izvedba djelomično se postiže smanjenjem unutarnjeg otpora i optimiziranjem površine aktivnih staničnih materijala. Mali otpor omogućuje veliki protok struje uz minimalni porast temperature. [27]

2.2. BIPOLARNI TRANZISTORI I OPERACIJSKA POJAČALA

2.2.1 BIPOLARNI TRANZISTORI

Spoj engleskih riječi transfer (prijelazni) i resistor (otpornik) tvori skupnu riječ tranzistor koja naznačuje aktivni elektronički uređaj u čvrstom stanju, a koji je upravljan strujnim tokom. Tranzistori se izrađuju od poluvodičkih materijala, kao što su silicij ili germanij, a sastoje se od tri poluvodička kristala, odnosno od tri elektrode s dva međusobna spoja.

Poluvodička područja su različito dopirana donorskim i akceptorskim primjesama tako da se jedno dopirano područje nalazi u sendviču između suprotno dopiranih područja. Jedna vanjska poluvodička elektroda služi kao kolektor (sakupljač naboja), unutarnji dio kao baza (upravljački ventil protoka), a druga vanjska poluvodička elektroda kao emiter (odašiljač naboja). Kolektorski krug prikuplja energiju iz vanjskog izvora napajanja, baza djeluje kao kontrolno-upravljačka elektroda, a odašiljač kao da emitira izlazni signal iz cijelog uređaja. Strujni signali malih amplituda i napona određenih frekvencija koji se dovode na bazu, upravljaju većim strujama i snagom na kolektoru tranzistora, uz malu promjenu signala dovedenog na bazu koja stvara veliku i brzu promjenu struje koja teče kroz cijeli uređaj. [1]



Slika 22. Simboli tranzistora i zamjenska shema pomoću dioda. Izvor [1].

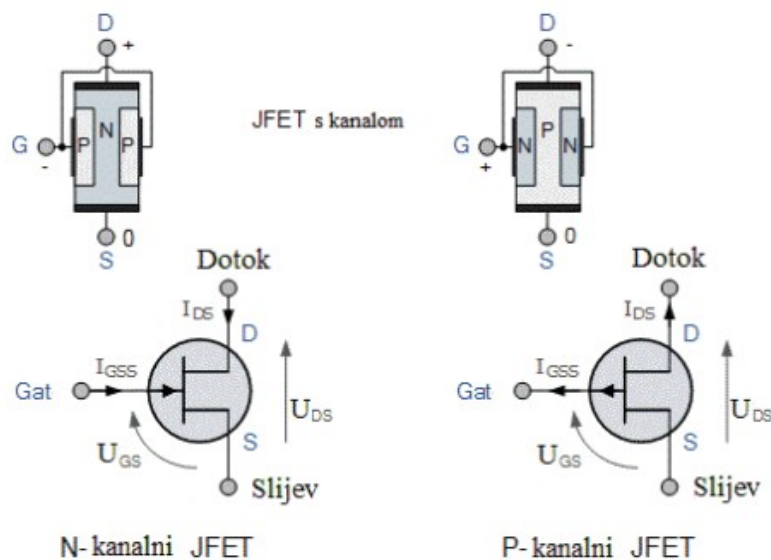
PNP tip tranzistorske konstrukcije dva PN spoja čine dvije PN diode koje su obrnuto postavljene i usmjerene prema središnjoj elektrodi, odnosno prema bazi oznake B. Podsjetimo se kako diode mogu biti polarizirane propusno i nepropusno. U pravilu, jedna dioda će u radu tranzistora biti propusno a druga nepropusno polarizirana. Smjer struje je uvijek određen strelicom tako da u PNP spoju struja izlazi iz p-tipa poluvodičkog kristala prema n-tipu jer je riječ o propusnoj polarizaciji dvaju poluvodičkih kristala.

Napon između baze i emitera (U_{BE}) je negativan na bazi i pozitivan kod emitera, jer za PNP tranzistor bazni spoj B je uvijek negativan u odnosu na emiter E (struja teče iz emitera). Također, napon napajanja emitera je pozitivniji (viši) u odnosu na kolektor (U_{CE}). Dakle, da bi PNP tranzistor vodio struju, emiter je uvijek na višem potencijalu u odnosu na bazu i kolektor, tako da je na najvišoj naponskoj (potencijalnoj) točki.[1]

Najčešće korištena tranzistorska konfiguracija je NPN tranzistor. Sastoji se od dva n-tipa poluvodičkih kristala postavljenih s vanjske strane te jedan p-tip poluvodičkog kristala u sredini. Mogu se koristiti na jedan od tri različita načina - u spoju zajedničke baze, u spoju zajedničkog emitera i u spoju zajedničkog kolektora.[1]

Tranzistor s efektom električnog polja (engl. Field Effect Transistor), koji je upravljani poljem ili jednostavnije rečeno FET, koristi napon koji se spaja na ulazni terminal nazvan Gat (engl. Gate) ili vrata za upravljanje strujom koja teče kroz tranzistor, rezultirajući proporcionalnost izlazne struje priključenom ulaznom naponu.

Uglavnom postoje dvije glavne vrste tranzistora upravljanih poljem i to su spojni FET ili JFET i FET s izoliranim gatom IGFET, koji je u žargonu poznatiji kao metal-oksidni poluvodički tranzistor (engl. Metal Oxide Semiconductor) s efektom polja ili kraće MOSFET.[1]



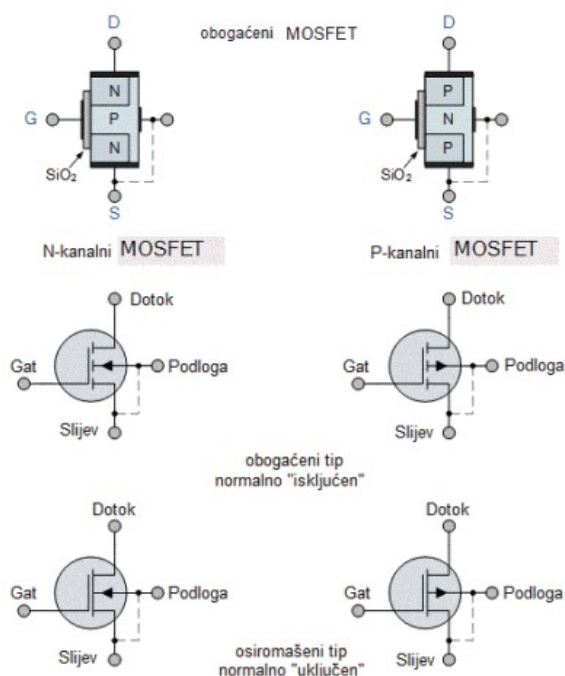
Slika 23. Struktura i simboli JFET tranzistora. Izvor [1].

Najčešći FET s izoliranim vratima koji se koristi u mnogim vrstama elektroničkih sklopova naziva se „metalom oksidirani” poluvodički tranzistor s efektom polja (engl. Metal Oxide Semiconductor) ili kraće MOSFET.

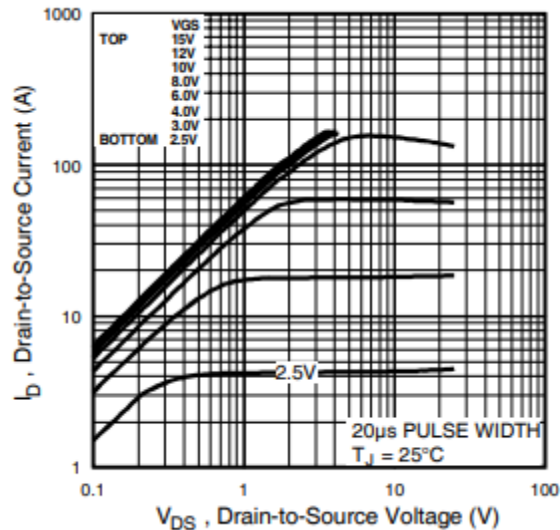
MOSFET tranzistori su naponski upravljani s efektom polja koji se razlikuju od JFETova po tome što imaju „metaloksid” elektrodu koja je električki izolirana iz glavnog poluvodičkog n-kanala ili p-kanala vrlo tankim slojem izolacijskog materijala, obično pomoću tankog sloja silicijevog dioksida ili materijala poznatijeg kao staklo. [1]

MOSFET-ovi uređaji s gatom, dovodom i slijevom, a dostupni su i p-kanalni (PMOS) i n-kanalni (NMOS) MOSFET-ovi. MOSFET-i su dostupni u dva osnovna oblika, tzv. :

- Osiromašeni tip - tranzistor treba vrijednost ulaznog napona (U_{GS}) za isključenje rada „OFF”. Osiromašeni tip MOSFET odgovara stanju sklopke „Normalno isključena”.
- Obogaćeni tip - tranzistor treba vrijednost ulaznog napona (U_{GS}) za uključivanje uređaja „ON”. Obogaćeni tip MOSFET odgovara stanju sklopke „Normalno uključena”. [1]



Slika 24. Struktura i simboli MOSFET tranzistora za obje izvedbe. Izvor [1].

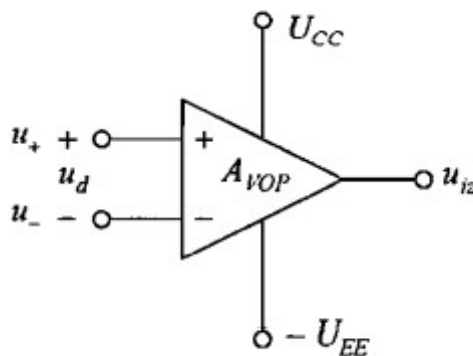


Slika 25. Tipična izlazna karakteristika IRLZ44N tranzistora. Izvor [28].

2.2.2 OPERACIJSKA POJAČALA

Operacijsko pojačalo ima dva ulaza i najčešće jedan izlaz. Odlikuje se vrlo velikim naponskim pojačanjem. Danas su integrirana operacijska pojačala najčešće korišteni analogni integrirani sklopovi.

Koriste se u velikom broju primjena kao što su realizacija raznih pojačala, aktivnih filtara, stabilizatora, komparatora, digitalno-analognih i analognog-digitalnih pretvornika, generatora signala i slično.

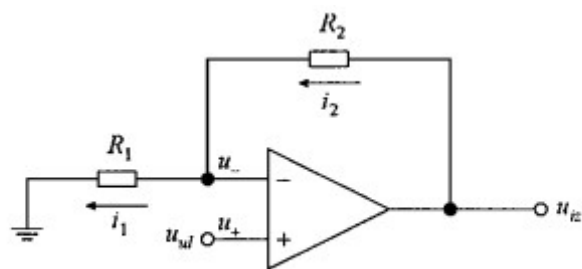


Slika 26. Električki simbol operacijskog pojačala. Izvor [29].

Izlazni napon u_{iz} u fazi je s naponom u_+ (+), a zakrenut u je u fazi za 180° u odnosu na napon u_- (-). Zbog toga se ulaz označen s „+“ naziva neinvertirajući ulaz, a ulaz s „-“ invertirajući ulaz.

U analizi sklopova s operacijskim pojačalima često se koriste svojstva idealnog operacijskog pojačala. Naponsko pojačanje vrlo je veliko i često se može smatrati beskonačnim. Ulazni otpori su vrlo veliki što znači da su struje koje teku u ulazne priključke zanemarivo male. Na izlazu se operacijsko pojačalo ponaša kao idealni naponski izvor sa zanemarivo malim unutarnjim otporom.

Integrirana operacijska pojačala imaju vrlo velika naponska pojačanja, ali im se pojačanja rasipaju te se zbog toga redovito koristi negativna povratna veza, primjenom koje pojačanja pojačala postaju manja, ali su znatno stabilnija. Za linearni rad izlazni napon operacijskog pojačala ne smije ući u zasićenje.



Slika 27. Neinvertirajuće pojačalo. Izvor [29].

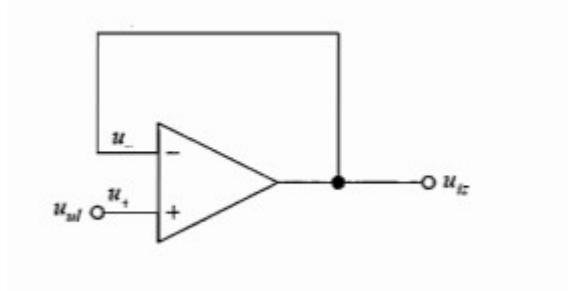
U spoju neinvertirajućeg pojačala, ulazni napon u_{ul} dovodi se izravno na neinvertirajući ulaz operacijskog pojačala, a otpornik R_1 spojen je između invertirajućeg ulaza i mase. Otpornik R_2 spojen između izlaza i invertirajućeg ulaza operacijskog pojačala, osigurava negativnu povratnu vezu.

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) * 1}{1 + \frac{1}{A_{VOP}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)};$$

Naponsko pojačanje neinvertirajućeg pojačala je pozitivno, što znači da su ulazni i izlazni napon u fazi. Naponsko pojačanje neinvertirajućeg pojačala ovisi o naponskom pojačanju operacijskog pojačala A_{VOP} . Pojačanje A_V ne ovisi o pojačanju A_{VOP} , ako je to pojačanje znatno veće od $1 + \frac{R_2}{R_1}$.

Specijalan slučaj neinvertirajućeg pojačala je naponsko sljedilo. U odnosu na neinvertirajuće pojačalo sa slike 27, u sljedilu su otpori $R_2 = 0$ i $R_1 = \infty$, te je naponsko pojačanje:

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = 1;$$



Slika 28. Naponsko sljedilo. Izvor [29].

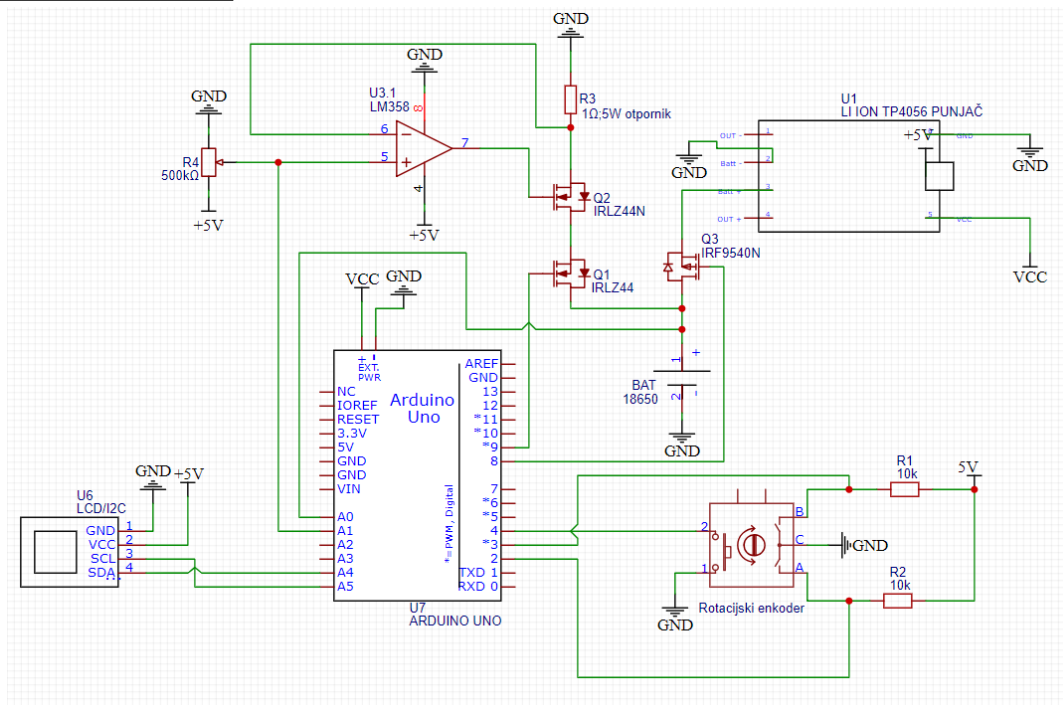
Naponsko sljedilo je operacijsko pojačalo s jediničnim pojačanjem odnosno operacijsko pojačalo čiji je izlazni napon jednak ulaznom naponu ("slijedi" ulazni napon). Operacijsko pojačalo kao naponsko sljedilo ne pojačava ulazni signal i pojačanje napona mu je 1.

Naponsko sljedilo ima vrlo visoku ulaznu impedanciju te ga ova karakteristika čini odličnim izborom u sklopovima koji zahtijevaju izolaciju između ulaznog i izlaznog signala.

Kada krug ima vrlo visoku ulaznu impedanciju odnosno što je veći otpor to je manja struja teče iz napajanja. [29]

3.EKSPERIMENTALNI DIO

3.1.SHEMA SKLOPA



Slika 29. Shema sklopa. Izvorno autor.

Cilj eksperimentalnog djela rada bio je osmisliti način za testiranje kapaciteta litij-ionske 18650 ćelije. Sustav se temelji na krugu opterećenja otpora od 1m kojim će se baterija prazniti konstantnom strujom od jedan amper. Istodobno mikrokontroler mjeri napon baterije i vrijeme sve do minimalnog napona pražnjenja („Cut-off voltage“) baterije. Jednostavnom formulom, može se dovoljno precizno izračunati kapacitet ćelije.

$$C (Ah) = I(A) * t(h)$$

Kapacitet baterije ($C (Ah)$) jednak je umnošku konstantne jačine struje kojom se baterija prazni i proteklog vremena pražnjenja izraženo u satima.

Za izračun konstantne struje pražnjenja koristi se Ohmov zakon za jačinu struje, koji glasi:

$$I_{bat}(A) = \frac{U_{bat}(V)}{R(\Omega)};$$

Ohmov zakon nam kaže kako će jačina struje pražnjenja biti određena omjerom napona baterije i veličini otpora. Da bi postigli konstantnu struju pražnjenja od 1A po formuli, otpor opterećenja mora biti 3.6Ω za nazivni napon litij-ionske baterije 3.6V.

$$I_{bat} (A) = \frac{3.6 V}{3.6 \Omega} = 1 A;$$

Baterija prilikom pražnjenja smanjuje svoj napon, a otpor opterećenja je konstantan. Rezultat toga je postupno smanjenje jačine struje pražnjenja.

Za konstantnu struju pražnjenja treba osigurati stalni pad napona na otporu opterećenja, neovisno o naponu baterije. To se postiže operacijskim pojačalom u ulozi naponskog slijedila i logičkim MOSFET, N-kanalnim tranzistorom.

Izlaznim naponom operacijskog pojačala kontrolira se propusnost tranzistora koji će omogućiti prolazak konstantne struje od baterije prema trošilu jačine koja se namjesti na potenciometru.

Arduino mikrokontroler očitava analogne vrijednosti napona baterije i napon na ulazu operacijskog pojačala te ih ispisuje na LCD ekran. Nakon što baterija postigne minimalni napon pražnjenja („Cut-off voltage”), kontroler prekida pražnjenje i ispisuje konačni kapacitet na LCD ekran.

Kako bi provjerio kapacitet deklariran od proizvođača, baterija mora biti potpuno napunjena, pa sam iz tog razloga dodao modul za punjenje ćelija (TP4056). Modul za punjenje TP4056 u sebi ima predefinirane parametre za punjenje baterija i upravlja se Arduino mikrokontrolerom na zahtjev korisnika.

Korisnik ovisno o želji odabire režim rada za ćeliju. Kroz ovaj sklop razvijena su 3 režima rada ćelije koji korisnik može odabrati:

- 1.) Testiranje kapaciteta
- 2.) Punjenje
- 3.) Skladištenje

U nastavku su pojašnjena sva tri načina rada kroz teoriju i praktičnu izvedbu.

Krug testera kapaciteta sastoji se od 3 dijela:

- Krug konstantne struje opterećenja
- Krug za punjenje pomoću TP4056 modula
- Krug korisničkog sučelja

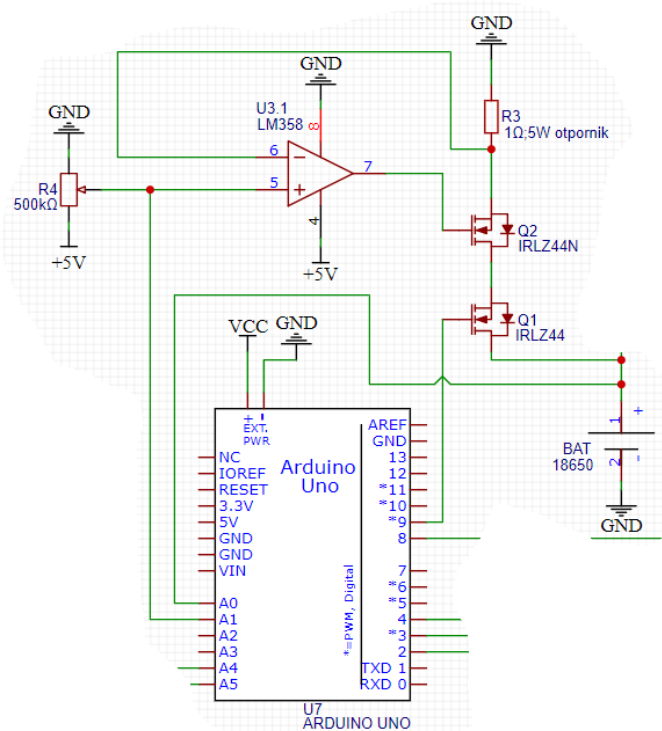


Slika 30. Prikaz korisničkog sučelja. Izvorno autor.

3.2. KRUG KONSTANTNE STRUJE OPTEREĆENJA

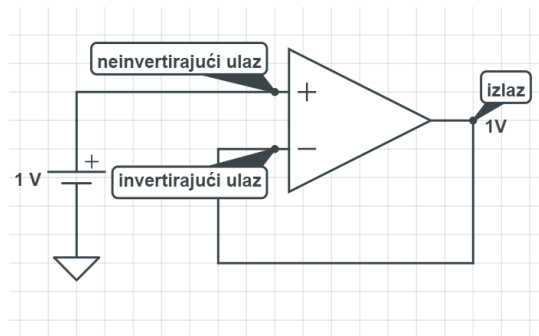
Krug opterećenja s konstantnom strujom izvedeno je pomoću operacijskog pojačala LM358 u ulozi naponskog slijedila, opterećenja otpora 1Ω (5W snage) i logičkog MOSFET, N-kanalnog tranzistora IRLZ44N.

Projektirani krug je strujni krug opterećenja konstantne struje, tako da struja pražnjenja ostaje konstantna tijekom cijelog razdoblja ispitivanja. Potenciometar otpora $500k\Omega$ spojen je na napajanje od 5V i služi za regulaciju napona od 0-5V na neinvertirajućem ulazu naponskog sljedila. Mjenjanjem otpora na potenciometru kontrolira se jačina struje pražnjenja baterije.



Slika 31. Krug konstantne struje opterećenja. Izvorno autor.

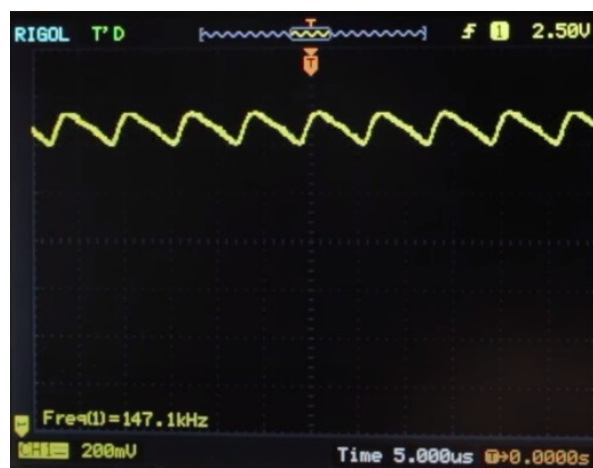
Pojačalo s negativnom povratnom vezom na invertirajućem djelu, izjednačava potencijal na svoja dva ulaza, invertirajući i neinvertirajući ulaz. U ovom slučaju potencijal na neinvertirajućijem ulazu je 1V. Pojačalo podešava svoj izlaz tako da invertirajući ulaz ima isti potencijal kao neinvertirajući ulaz. Ako je invertirajući napon prenizak pojačalo podiže napon na izlazu, a ako je previsok pojačalo ga smanjuje.



Slika 32. Naponsko sljedilo. Izvorno autor.

Kada korisnik pokrene način testiranja kapaciteta kontroler propusno polarizira tranzistor Q1 a neinvertirajuće pojačalo propusno polarizira tranzistor Q2 , te potiče struja od baterije prema trošilu R3. Pad napona na otporu nam predstavlja referentni napon u negativnoj povratnoj vezi pojačala.

Operacijsko pojačalo U3.1 (slika 24.) upravlja tranzistorom na način da naponi na invertirajućem i neinvertirajućem ulazu budu jednaki i to će postići uključivanjem ili isključivanjem tranzistora sve dok struja koja teče kroz otpornik ne bude proporcionalna naponu dovedenom na neinvertirajući dio pojačala.



Slika 33. Tranzistor se uključuje i isključuje frekvencijom od 150kHz. Izvorno autor.

Tranzistor Q_2 je kontroliran je naponom na gate-u. Tranzistor se nalazi u zatvorenome stanju i kroz njega ne teče struja sve dok napon između gate-a i source-a (V_{GS}) nije veći od vrijednosti praga okidanja („*threshold*“) V_{GSth} . Nakon što napon na gate-u postigne napon praga pokreće se strujni tok i jačina struje će biti veća kako V_{GS} raste, sve do napona zasićenja, gdje se smatra da je tranzistor potpuno propusan. Mijenjanjem napona na gate-u reguliram protok struje i na taj se način simulira vrijednost opterećenja. Budući da ne mogu znati koji napon postaviti na gate tranzistora, da bi se dobila konstantna struja koristi se operacijsko pojačalo koji će to učiniti automatski.

U ovom slučaju moram dobiti struju pražnjenja 1A, a to će se postići postavljanjem napona od 1V ulaz neinvertirajućeg ulaza komparatora. Ako se postavi 1V na neinvertirajući ulaz komparatora povećat će se napon na gate-u tranzistora Q_2 sve dok pad napona na otporniku R_3 ne bude 1V.

Prolazak struje kroz otpor R_3 stvara pad napona na otporniku i daje negativnu povratnu informaciju operacijskom pojačalu.

Proces mjerenja kapaciteta započinje na zahtjev korisnika odabirom opcije „Test kapaciteta“ u arduino korisničkom sučelju.

Mjerenje napona i struje:

Napon mjerimo izravno preko analognog ulaza A0 na Arduino kontroleru, koji očitava analognu vrijednost.

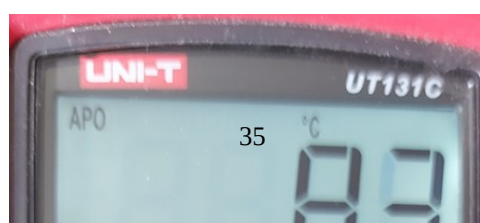
```
void loop() {  
int analog_baterije = analogRead(A0);           //očitavanje analogne vrijednosti na pinu A0  
int analog_ulaz_pojacala = analogRead(A1);      //očitavanje analogne vrijednosti na pinu A1  
float vrijednost_analog = analog_baterije * 5.0 / 1024.0; //pretvaranje analognog očitavanja A0 u linearnu funkciju od 1024 bitova
```

Napunjena Li-Ion ćelija ima napon od 4,1 V do 4,3 V, što je manje od granice napona od 5 V analognih ulaznih pinova na Arduino Uno kontroleru i tako ga možemo izravno spojiti na pozitivan pol baterije. U ovom projektu mjeri se napon ćelije kako bismo mogli odrediti je li ćelija ispravna ili je potpuno ispražnjena.

Za bolja očitavanja napona potrebno je ugraditi dva kondenzatora koji se koriste za filtriranje šumova koji dolaze iz strujnog kruga konstantne struje.

Također moramo izmjeriti struju koja teče kroz otpornik, a to se postiže izravnim očitavanjem napona na neinvertirajućem ulazu operacijskog pojačala.

Ohmovim zakonom dijelimo očitani napon na neinvertirajućem ulazu operacijskog pojačala U3.1 sa veličinom otpora R_3 . Izračunom dobivamo struju koja teče kroz otpornik, odnosno jačinu struje pražnjenja Li-ion ćelije.



Slika 34. Temperatura otpora opterećenja 10m/5W. Izvorno autor.

Teoretski maksimalna struja pražnjenja može biti 5A ali zbog postizanja visokih temperatura na otporu opterećenja, struja pražnjenja je programski ograničena na 1200mA i temperatura baterije u tim uvjetima ne prelazi 35 °C.

Arduino kod:

```
void setup() {
  lcd.begin();
  lcd.setCursor(0, 0);
  pinMode(praznjenje_mosfet, OUTPUT);           // definiranje digitalnog pina 9 kao output
  pinMode(punjenje_mosfet, OUTPUT);           // definiranje digitalnog pina 8 kao output
  digitalWrite(praznjenje_mosfet, LOW);       // postavljanje n-kanalnog mosfeta u zatvoreno stanje
  digitalWrite(punjenje_mosfet, HIGH);        // postavljanje p-kanalnog mosfeta u zatvoreno stanje
  pinMode(sw, INPUT_PULLUP);                  // postavljanje digitalnih pinova za enkoder
  pinMode(clk, INPUT);
  pinMode(dt, INPUT);
  PCICR |= 0b00000100;
  PCMSK2 |= 0b00010000;
  attachInterrupt(0, isr0, RISING);           //funkcija koja se koristi za očitavanje impulsa s enkodera
  lcd.createChar(0, customChar1);             //postavljanje pokazivača (strelice)
  lcd.createChar(1, OhmChar);
  lcd.clear();
  screen0();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.write((uint8_t)0);
}
void loop() {
  int analog_baterije = analogRead(A0);       //očitanje analogne vrijednosti na pinu A0
  int analog_ulaz_pojacala = analogRead(A1);  //očitanje analogne vrijednosti na pinu A1
  float vrijednost_analog = analog_baterije * 5.0 / 1024.0; //pretvaranje analognog očitavanja A0 u linearnu funkciju od 1024 bitova
  float napajanje = readVcc() / 1000.0;      // očitavanje referentnog napona napajanja
  struja_praznjenja = analog_ulaz_pojacala * (5.00 / 1024.00) / RES * 1000; // Računanje omjera za struju pražnjenja obzirom na
input potencijometra R4 u mA
  if (struja_praznjenja <= 1200){             //postavljanje struje pražnjenja
    struja_praznjenja = struja_praznjenja;
  }
  else{
    struja_praznjenja = 1200;                 //Struja praznjenja ograničena na 1200mA
  }
  Baterija_V = napajanje / 5 * vrijednost_analog;
  millisPassed = millis() - previousMillis;
  previousMillis = millis();

// TESTIRANJE KAPACITETA
if (screen == 1) {                            //odabir korisnika na sučelje 1 "Testiranje kapaciteta"
  if (Baterija_V <= 2.7){                     // ako je vrijednost očitavanja napona baterije manja od 2.3V, zatvori mosfet za praznjenje (Q2)
    Kapacitet = Kapacitet;                   // u ovom slučaju kapacitet se ne računa i jednak je nula
    Prisutnost_baterije = 0;                 // vrijednost koja nam je potrebna za provjeru uvjeta prisutnosti baterije
    digitalWrite(praznjenje_mosfet, LOW);    // zatvaranje mosfeta Q1 za mod pražnjenja, postavljanje na digitalni pin 0V
    lcd.setCursor(0,0);
  }
}
```



```

lcd.print("V:"); // ispis na LCD napon baterije
lcd.print(Baterija_V);
lcd.print("V ");
lcd.setCursor(8,0);
lcd.print("I:"); // ispis struje praznjenja koje korisnik postavlja na potencijometru u mA
lcd.print(struja_praznjenja,0);
lcd.print("mA ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("C:"); // ispis izracunatog kapaciteta u procesu praznjenja, mAh
lcd.print(Kapacitet,0);
lcd.print("mAh ");
lcd.print(char(1));
delay(1000);
}
if (Baterija_V > 2.7 && Prisutnost_baterije == 0) { //ako je napon baterije veci od 2.3V, a prisutnost baterije je postavljeno na 0
  Kapacitet = Kapacitet + (struja_praznjenja * (millisPassed / 3600000.0)); //izracun kapaciteta baterije u trenutnom vremenu na
  temelju postavljene struje praznjenja i proteklog vremena iskazana u mAh
  Napon_Bat_noload = Baterija_V;
  Prisutnost_baterije = 1; //vrijednost gdje postavljamo da je baterija prikljucena i moze poceti proces praznjenja
  digitalWrite(praznjenje_mosfet, HIGH); //postavljanje mosfeta Q1 u vodljivo stanje i pokretanje procesa praznjenja
  lcd.setCursor(0,0); // ispis na LCD napon baterije
  lcd.print("V:");
  lcd.print(Baterija_V);
  lcd.print("V ");
  lcd.setCursor(8,0);
  lcd.print("I:"); // ispis struje praznjenja koje korisnik postavlja na potencijometru u mA u realnom vremenu
  lcd.print(struja_praznjenja,0);
  lcd.print("mA ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("C:"); // ispis izracunatog kapaciteta u procesu praznjenja, mAh
  lcd.print(Kapacitet,0);
  lcd.print("mAh ");
  lcd.print(char(1));
  delay(1000);
}
else if (Baterija_V > 2.7 && Prisutnost_baterije == 1) {
  Kapacitet = Kapacitet + (struja_praznjenja * (millisPassed / 3600000.0));
  digitalWrite(praznjenje_mosfet, HIGH);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("V:");
  lcd.print(Baterija_V);
  lcd.print("V ");
  lcd.setCursor(8,0);
  lcd.print("I:");
  lcd.print(struja_praznjenja,0);
  lcd.print("mA ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("C:");
  lcd.print(Kapacitet,0);
  lcd.print("mAh ");
  lcd.setCursor(10,1);
  lcd.print("R:");
  lcd.print(Otpor_Bat,0);
  lcd.print("m");
  lcd.print(char(1));
  delay(1000);
}
}
}

```



Slika 35. Izgled ispisa vrijednosti napona baterije, struje pražnjenja, i izračunatog kapaciteta. Izvorno autor.

U ovom projektu koristio sam dvije baterije različitog proizvođača te sam usporedio njihove deklarirane specifikacije. Jedna je potpuno nova, a druga je recikirana baterija iz starog prijenosnog računala. Obje su prije testiranja kapaciteta u potpunosti napunjene na njihov maksimalni deklarirani napon od 4.2V.

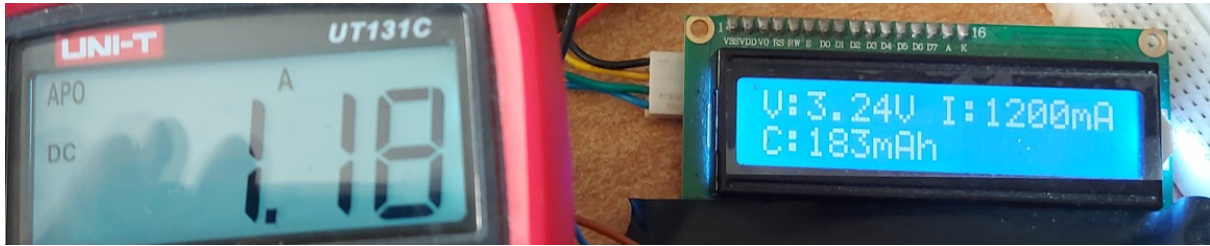


Slika 36. Testirane baterije. Izvorno autor.

Kod nove baterije (NCR18650A) dobiveni rezultati nisu se puno razlikovali od deklariranog, pogreška u mjerenju Arduino mikrokontrolerom bila je odprilike +/- 5%. Mjereni rezultati prikazani su u tablici i testirani su 3 puta od 4.2V do 2.7V.

Početni napon/Cut off napon	Struja pražnjenja	Izračunati kapacitet	Vrijeme mjerenja
4.25V/2.78V	1000mA	2850mAh	2h51min
4.22V/2.73V	1000mA	2838mAh	2h47min
4.23/2.77V	1000mA	2840mAh	2h49min

Tablica 2: Prikaz dobivenih rezultata u tri mjerenja kapaciteta s arduino mikrokontrolerom za Panasonic NCR18650A. Izvorno autor.



Slika 37. Prikaz izmjerene struje pražnjenja multimetrom u odnosu na prikazanu na LCD-u.
Izvorno autor.

Specifications

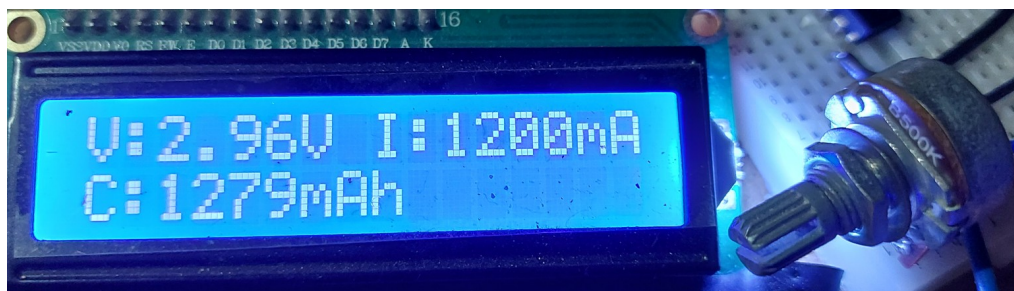
Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 2900mAh
Capacity ⁽²⁾	Min. 2950mAh Typ. 3070mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1475mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	47.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 620 Wh/l Gravimetric: 225 Wh/kg

Slika 38. Deklarirane specifikacije Panasonic NCR18650A ćelije. Izvor [24].

Rabljenoj ćeliji INR18650 proizvođača Samsung tijekom testiranja je izračunati kapacitet bio oko 15% manji od deklariranog. To proizlazi iz činjenice da je baterija već vremenski dotrajala, te je njena kemijska struktura degradirala što je rezultiralo manjim kapacitetom.

Početni napon/Cut off napon	Struja pražnjenja	Izračunati kapacitet	Vrijeme mjerenja
4.18V/2.75V	1000mA	1270mAh	1h15min
4.15V/2.71V	1000mA	1278mAh	1h17min
4.19/2.69V	1000mA	1275mAh	1h14min

Tablica 3: Prikaz dobivenih rezultata u tri mjerenja kapaciteta s arduino mikrokontrolerom za Samsung INR18650-15L. Izvorno autor



Slika 39. Prikaz pražnjenja Samsung INR18650-15L ćelije. Izvorno autor.

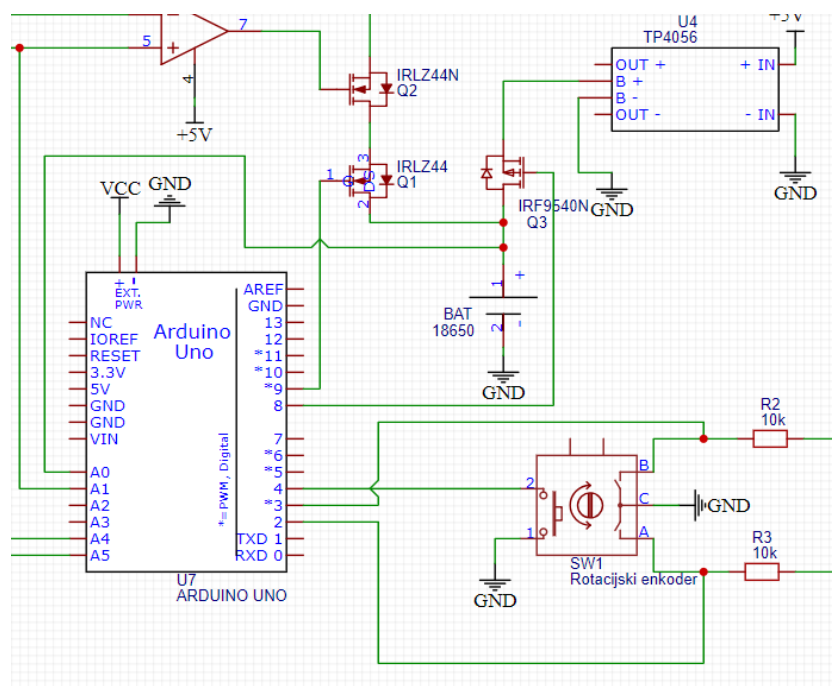
3. Nominal Specifications

Item	Specification
3.1 Nominal discharge capacity	1,500mAh (standard charge /0.2C discharge, 2.5V cut-off)
3.2 Minimum capacity	1,450mAh (1C disch., 2.5V discharge)
3.3 Charging voltage	4.2 ± 0.05 V
3.4 Nominal voltage	3.6V
3.5 Charging method	CC-CV (100mA cut-off)
3.6 Charging current	Standard charge: 0.5C Rapid charge: 4A
3.7 Charging time	Standard charge : 150min Rapid charge: 40min (at 25°C)
3.8 Max. discharge current (continuous)	18A (at 25°C), 60% at 250cycle
3.9 Discharge cut-off voltage	2.5V
3.10 Cell weight	43.0g max
3.11 Cell dimension	Height : 64.85 ± 0.15mm Diameter : 18.15 ± 0.10mm
3.12 Operating temperature (surface temperature)	Charge : 0 to 50°C (recommended recharge release < 45°C) Discharge: -20 to 75°C (recommended re-discharge release < 60°C)
3.13 Storage temperature	1 year: -20~25°C(1*) 3 months: -30~45°C(1*) 1 months: -30~60°C(1*)

Note (1): If the cell is kept as ex-factory status (50% of charge),
the capacity recovery rate is more than 90% of standard discharge capacity.

Slika 40. Deklarirane specifikacije Samsung INR18650-15L ćelije. Izvor [24].

3.3 KRUG ZA PUNJENJE POMOĆU TP4056 MODULA ZA PUNJENJE

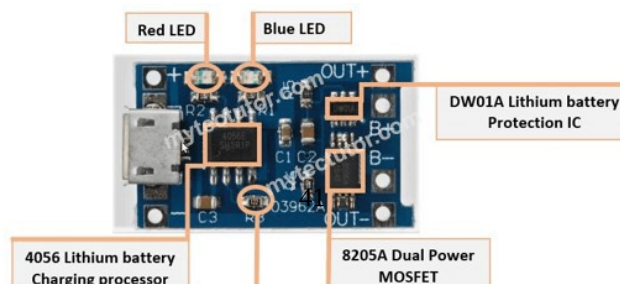


Slika 41. Krug za punjenje pomoću TP4056 modula. Izvorno autor.

Krug za punjenje izvedeno je P-kanalnim MOSFET-om IRF9540N i modulom za punjenje TP4056.

Krug punjenja započinje zahtjevom korisnika, a mikrokontroler propusno polarizira tranzistor Q3, čime se prema uspostavlja strujni krug od modula za punjenje prema bateriji.

Ovaj modul je napravljen za punjenje punjivih litij-ionskih baterija metodom konstantne struje/konstantni napon.



Slika 42. TP4056 modul za punjenje. Izvor [25].

Taj modul u sebi sadrži zaštitu od prekomjernog punjenja odnosno modul će sigurno napuniti ćeliju na 4,2V metodom konstantne struje/konstantnog napona.

Ako je napon priključene ćelije manja od 2,9 V, modul će koristiti struju punjenja od 130 mA sve dok napon baterije ne dosegne 2,9 V, pri čemu će se struja punjenja linearno povećati na konfiguriranu struju punjenja.

R_{prog} otpornik se koristi za očitavanje struje punjenja. Statusne LED diode – Crvena LED lampica označava da se baterija puni, a plava pokazuje da je baterija napunjena.

Ovaj modul za punjenje napaja se iz 5V,1A istosmjernog napona IN+ i IN-. [25]

U trenutku kada baterija dosegne 4.2V, arduino mikrokontroler zaustavlja proces punjenja postavljajući tranzistor Q3 u zatvoreno stanje, te se na ekranu ispisuje postotak napunjenosti baterije („State of Charge - SoC“).



Slika 43. Prikaz SoC-a, napona baterije i struje punjenja. Izvorno autor.



Slika 44. Modul za punjenje korišten u radu; TP4056. Izvorno autor.

Arduino kod:

```
//PUNJENJE
else if (screen == 2) { //kosrisnik odabire režim punjenja(screen 2)
  if (Baterija_V >= 4.15) { //uvjet ako je baterija više od 4.15V ispiši da je baterija puna
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Baterija puna");
    lcd.setCursor(12,0);
    lcd.print("100% ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("V:");
    lcd.print(Baterija_V); //ispis napona baterije u V
    lcd.print("V ");
    lcd.setCursor(8,1);
    lcd.print("I:");
    lcd.print(struja_punjenja,0); //ispis struje punjenja koja je 0 u ovom slučaju
    lcd.print("mA ");
    digitalWrite(punjenje_mosfet, HIGH); //ugasi mosfet, prekini krug punjnja od modula TP4056 do baterije
    delay(500);
    BatFull = BatFull + 1;
  }
  else if (Baterija_V == 0) { //slučaj ako baterija nije priključena ispiši da nema baterije
    BatFull = 0;
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Nema baterije"); //ispis da nema baterije
    lcd.setCursor(12,0);
    lcd.print(SoC,0); //ispis SoC, postotak napunjenosti
    lcd.print("% ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("V:"); //ispis napona baterije
    lcd.print(Baterija_V);
    lcd.print("V ");
    lcd.setCursor(9,1);
    lcd.print("I:"); //ispis trenutne struje punjenja
    lcd.print(struja_punjenja,0);
    lcd.print("mA ");
    digitalWrite(punjenje_mosfet, HIGH); //ugasi mosfet, prekini krug punjenja od modula TP4056 do baterije
    delay(500);
  }
}
else if (Baterija_V < 4.15 && BatFull < 10 && Baterija_V > 0) { //ako je baterija manja od 4.15V pokrenuti punjenje; varijabla batfull zaštita
od prekomjernog punjenj
lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Punjenje... ");
  lcd.setCursor(12,0);
  lcd.print(SoC,0);
  lcd.print("% "); //ispis SoC, postotak napunjenosti
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("V:");
  lcd.print(Baterija_V); //ispis napona baterije
```

```

lcd.print("V      ");
                                lcd.setCursor(8,1);
lcd.print(":");
lcd.print(struja_punjenja,0); //ispis trenutne struje punjenja
lcd.print("mA      ");
digitalWrite(punjenje_mosfet, LOW); //upali mosfet, prekini krug punjenja od modula TP4056 do baterije
delay(500);
}
else if (Baterija_V < 4.15 && BatFull >= 10) { //ako je napon baterije manji od 4.15 a varijabla batfull je izbrojala 10 ciklusa, prekini
punjenje
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Baterija puna"); //prekini punjenje i ispiši da je baterija puna
lcd.setCursor(12,0);
lcd.print("100% "); //ispis SoC, postotak napunjenosti
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("V:");
lcd.print(Baterija_V); //ispis napona baterije
lcd.print("V      ");
                                lcd.setCursor(8,1);
lcd.print(":"); lcd.print(struja_punjenja,0); //ispis trenutne struje punjenja
lcd.print("mA      ");
digitalWrite(punjenje_mosfet, HIGH); //ugasi mosfet, prekini krug punjenja od modula TP4056 do baterije
delay(500);
}

```

4.ZAKLJUČAK

Tehnologija litij-ionskih baterija je uvelike napredovala i općenito predstavljaju bitan izvor energije koje olakšavaju svakodnevni život čovjeku pri obavljanju raznih vrsta aktivnosti i poslova.

Kroz ovaj rad, uz pomoć i podršku mentora dr.sc. Vladimir Tudić te kroz stečena iskustva i znanja na stručnom studiju mehatronike u Karlovcu, razvijen je prototip sustava koji samostalno izračunava kapacitet i puni 18650 litij-ion ćelije.

U ovom Završnom radu prikazan je razvoj prototipa sustava koji uspješno testira kapacitet i performanse baterijskih ćelija. Ćelije je moguće testirati s različitim strujama pražnjenja i na ekranu pratiti parametre koji se testiraju. U isto vrijeme se mjeri napon ćelije te se ispisuje korisniku na razumljiv način.

Za taj sustav odabrane su komponente kao što su ArduinoUno mikrokontroler koji detektira napon ćelije dok korisnik odabire režim rada za ćeliju. U praktičnom djelu rada izvedena su tri režima tretiranja ćelije:

- 1) mjerenje kapaciteta;
- 2) punjenje;
- 3) skladištenje.

Nedostaci ovog sustava su ne precizna očitavanja napona na analognim ulazima Arduino mikrokontrolera. Iako sustav dovoljno precizno mjeri kapacitet, postoji mala odstupanja u očitavanju napona baterije. Nedostaju i neke funkcije sustava kao što je ispisivanje unutarnjeg otpora baterije koja se lako može integrirati u arduino kod. Uređaj je ograničen na testiranje baterijskih ćelija oznake 18650 zbog fizičkih ograničenja kućišta te su sve funkcije sustava projektirane na temelju njihovih

karakteristika. Rezultati mjerenja pokazuju ponašanje napona ćelije u vremenu tijekom konstantnoga opterećenja te na kraju mjerenja ispisuje njen kapacitet u mAh. Temelju izmjerenih podataka možemo odrediti za koju primjenu se ćelija može koristiti.

Izrada ovog rada mi je povećala znanje o baterijama te njenim primjenama te sam postao više svjestan o uređajima koje koristim, koliko energije troše te koliko su djelotvorni.

LITERATURA

- [1] Vladimir Tudić; *Elektronika 1; Nastavni materijal iz područja elektronike i elektroničkih elemenata*; https://www.vuka.hr/fileadmin/user_upload/knjiznica/on_line_izdanja/Vladimir_Tudic_Elektronika_1.pdf
- [2] T.B. Ready, *Linden's Handbook of Batteries*, McGraw Hill, 2010.
- [3] (*Handbook of batteries / David Linden, Thomas B. Reddy.—3d ed.*)
- [4] <https://www.upsbatterycenter.com/blog/history-batteries-timeline/>
- [5] <https://batteryuniversity.com/article/bu-002-introduction>
- [6] <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/voltaic-pile>
- [7] https://www.researchgate.net/figure/A-typical-lithium-ion-battery-utilizes-a-graphite-like-anode-and-an-intercalated-lithium_fig2_263733888
- [8] <https://www.displaydaily.com/paid-news/mdm/mdm-in-brief/mdm-supply-chain/samsung-looks-to-lg-chem-for-batteries>
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Lewis_Urry
- [10] <https://batteryuniversity.com/article/bu-704-how-to-transport-batteries>
- [11] <https://batteryuniversity.com/article/bu-802-what-causes-capacity-loss>
- [12] <https://batteryuniversity.com/article/bu-002-introduction>
- [13] <https://www.techsciresearch.com/blog/manufacturing-lithium-ion-batteries/29.html>
- [14] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829719308840>
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Cutoff_voltage
- [16] https://www.researchgate.net/figure/Internal-resistance-variation-for-different-discharge-currents-and-different-SOC-levels_fig5_276036436
- [17] <https://batteryuniversity.com/article/bu-105-battery-definitions-and-what-they-mean>
- [18] <https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate>
- [19] <https://downloads.hindawi.com/archive/2013/953792.pdf>
W.Y. Chang, "The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review"
- [20] <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>

- [21] <https://www.elecrow.com/elecrow-uno-r3-board-atmega328p-atmega16u2-with-usb-cable-for-arduino.html>
- [22] <https://batteryuniversity.com/article/bu-106-advantages-of-primary-batteries>
- [23] <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Voltage-follower>
- [24] https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ncr18650a&gclid=CjwKCAjw9suYBhBIEiwA7iMhNPJ4JnNFoVgapHXM4zZNCzbsIQkV9ZZCzKKWRwUTiackWsmDLK-JRoC8eMQAvD_BwE
- [25] <http://www.tp4056.com/d/tp4056.pdf>
- [26] <https://www.batterydesign.net/power-versus-energy-cells/>
- [27] <https://batteryuniversity.com/article/bu-501a-discharge-characteristics-of-li-ion>
- [28] <https://www.infineon.com/dgdl/irlz44nbpbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153567217c32725>
- [29] <https://www.scribd.com/document/40196791/Elektronika-1-Butkovic-Divkovic-Baric-Skripta-1-Ciklus>

POPIS SLIKA

Slika 1. Povijesna vremenska linija razvoja baterije. Izvor [11].....	2
Slika 2. Napredak baterija u odnosu na računalne tehnologije. Izvor [4].....	3
Slika 3. Voltin elektrostatički stup. Izvor [5].....	3
Slika 4. Tipična litij-ionska baterija koristi grafitnu anodu i litij kobalt.....	5
Slika 5. Primjeri primarnih baterija. Izvor [7].....	6
Slika 6. Starenje baterije. Izvor [8].....	8
Slika 7. Krivulja pražnjenja litij-iona s grafitnom anodom.....	10
Slika 8. Presjek cilindrične Litij-ion baterije. Izvor [12].....	11
Slika 9. Vrste separatora u litij-ionskoj bateriji Izvor [13].....	12
Slika 10. Električne i fizikalne karakteristike komercijalnih Litij-ion baterija. Izvor [4].....	13
Slika 11. Kapacitet i sposobnost pražnjenja 18650 ćelije.....	14
Slika 12. Pražnjenje konstantnom snagom 18650 ćelije. Izvor [2].....	15
Slika 13. Napon, stanje napunjenosti i struja punjenja.....	16
Slika 14. Varijacije unutarnjeg otpora za različite struje pražnjenja i stanje napunjenosti 18650 ćelije. Izvor [17].....	17
Slika 15. Prikaz odnosa specifične energije i specifične snage. Izvor [18].....	18
Slika 16. C-faktor i vrijeme punjenja i pražnjenja baterije od 1Ah(1000mAh). Izvor [19].....	19
Slika 17. Odnos napona otvorenog kruga (OCV) i.....	21
Slika 18. Faze punjenja litij-ion baterije. Izvor [19].....	22
Slika 19. Dizajn ćelije visoke snage i energetske ćelije. Izvor [26].....	23
Slika 20. Karakteristike pražnjenja energetske ćelije NCR18650B tvrtke Panasonic. Izvor [27].....	23
Slika 21. Karakteristike pražnjenja UR18650RX Power Cell tvrtke Panasonic. Izvor [27].....	24
Slika 22. Simboli tranzistora i zamjenska shema pomoću dioda. Izvor [1].....	25
Slika 23. Struktura i simboli JFET tranzistora. Izvor [1].....	26
Slika 24. Struktura i simboli MOSFET tranzistora za obje izvedbe. Izvor [1].....	27
Slika 25. Tipična izlazna karakteristika IRLZ44N tranzistora. Izvor [28].....	27
Slika 26. Električki simbol operacijskog pojačala. Izvor [29].....	28
Slika 27. Neinvertirajuće pojačalo. Izvor [29].....	28
Slika 28. Naponsko sljedilo. Izvor [29].....	29
Slika 29. Shema sklopa. Izvorno autor.....	30

Slika 30. Prikaz korisničkog sučelja. Izvorno autor.....	31
Slika 31. Krug konstantne struje opterećenja. Izvorno autor.....	32
Slika 32. Naponsko sljedilo. Izvorno autor.....	33
Slika 33. Tranzistor se uključuje i isključuje frekvencijom od 150kHz. Izvorno autor.....	33
Slika 34. Temperatura otpora opterećenja 10m/5W. Izvorno autor.....	34
Slika 35. Izgled ispisa vrijednosti napona baterije,.....	36
Slika 36. Testirane baterije. Izvorno autor.....	37
Slika 37. Prikaz izmjerene struje pražnjenja multimetrom u.....	37
Slika 38. Deklarirane specifikacije Panasonic NCR18650A ćelije. Izvor [24].....	38
Slika 39. Prikaz pražnjenja Samsung INR18650-15L ćelije. Izvorno autor.....	38
Slika 40. Deklarirane specifikacije Samsung INR18650-15L ćelije. Izvor [24].....	39
Slika 41. Krug za punjenje pomoću TP4056 modula. Izvorno autor.....	40
Slika 42. TP4056 modul za punjenje. Izvor [25].....	40
Slika 43. Prikaz SoC-a, napona baterije i struje punjenja. Izvorno autor.....	41
Slika 44. Modul za punjenje korišten u radu; TP4056. Izvorno autor.....	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Opće karakteristike Li-ion baterije. Izvor [14].....	13
Tablica 2: Prikaz dobivenih rezultata u tri mjerenja kapaciteta s arduino mikrokontrolerom za Panasonic NCR18650A. Izvorno autor.....	37
Tablica 3: Prikaz dobivenih rezultata u tri mjerenja kapaciteta s arduino mikrokontrolerom za Samsung INR18650-15L. Izvorno autor.....	38