

Usporedba performansi različitih tehnologija baterija za pohranu električne energije

Jurak, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:884849>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**USPOREDBA PERFORMANSI RAZLIČITIH
TEHNOLOGIJA BATERIJA ZA POHRANU
ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Diplomski rad

Dominik Jurak

Osijek, 2020.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	1
2. SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE	2
2.1. Mehanički sustavi	3
2.1.1. Crpno-akumulacijske HE	3
2.1.2. Komprimirani zrak.....	4
2.1.3. Zamašnjaci.....	4
2.2. Kemijski sustavi.....	5
2.2.1. Vodik	5
2.2.2. Sintetički prirodni plin	6
2.3. Električni sustavi	6
2.3.1. Supravodljivi magnetski svitak	6
2.3.2. Dvoslojni kondenzator (ultrakondenzator)	7
2.4. Toplinski sustavi	7
2.4.1. Toplinski spremnici	7
2.5. Elektrokemijski sustavi.....	7
2.5.1. Elektrokemijski sastav baterije	7
2.5.2. Električna shema baterije	14
2.5.3. Olovno-kiselinske baterije.....	16
2.5.4. Nikal-kadmij i nikal-metal hibrid baterije (NiCd, NiMH)	17
2.5.5. Litij-ionske baterije (Li-ion)	18
2.5.6. Natrij-sumpor i natrij nikal klorid baterije (NaS, NaNiCl).....	19
2.5.7. Protočne baterije (Flow).....	20
2.5.8. Usporedba elektrokemijskih sustava za pohranu energije	21
3. USPOREDBA PERFORMANSI RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA BATERIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	23
3.1. Punjač/pražnjač baterija iCharger 4010 Duo.....	23
3.2. Panasonic NCR18650B.....	26
3.2.1. Pražnjenje	28
3.2.2. Punjenje	30
3.2.3. Povratna učinkovitost	33
3.3. LG 18650HG2 baterija.....	34
3.3.1. Pražnjenje	35

3.3.2. Punjenje	38
3.3.3. Povratna učinkovitost	40
3.4. SONY US18650VTC5 baterija	41
3.4.1. Pražnjenje	43
3.4.2. Punjenje	45
3.4.3. Povratna učinkovitost	48
3.5. Panasonic eneloop pro BK-3HCDE NiMH baterija.....	49
3.5.1. Pražnjenje 0,1C faktorom pražnjenja	50
3.5.2. Punjenje 0,1C faktorom punjenja	52
3.6. Usporedba različitih tipova Li-ion baterija.....	55
3.6.1. Pražnjenje	55
3.6.2. Punjenje	61
3.6.3. Povratna učinkovitost	67
4. ZAKLJUČAK.....	69
LITERATURA	70
SAŽETAK.....	72
ABSTRACT	73
ŽIVOTOPIS.....	74

1. UVOD

U ovom radu opisati će se različiti sustavi za pohranu električne energije, njihov princip rada te neke glavne karakteristike svakog pojedinog sustava za pohranu energije. Posvetiti će se elektrokemijskim sustavima za pohranu električne energije, odnosno baterijama te će se detaljnije objasniti princip rada, neke bitne veličine i karakteristike te vrste baterija. Zatim slijedi opis uređaja korištenog prilikom praktičnog dijela rada u laboratoriju i metode punjenja/pražnjenja korištenih tehnologija baterija. U sklopu praktičnog dijela u Laboratoriju za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija provedena su mjerenja za tri vrste Li-ionskih baterija: Panasonic, LG te SONY i jednu vrstu NiMH baterija: Eneloop pro. Unutar te tri vrste Li-ionskih baterija proučavan je utjecaj različitih faktora C prilikom procesa punjenja/pražnjenja na napon, struju, snagu i energiju punjenja/pražnjenja te stanje energije baterije i povratnu učinkovitost baterija. Na temelju dobivenih podataka iz mjerenja u laboratoriju rađena je grafička analiza i proračun te je rađena usporedba performansi različitih tipova baterija.

1.1. Zadatak diplomskog rada

Opisati karakteristike različitih tehnologija za pohranu električne energije putem baterija, njihove prednosti i nedostatke. U praktičnom dijelu usporediti performanse baterija (baterijskih članaka) različitih tehnologija izrade pomoću uređaja Junsu iCharger 4010 Duo za punjenje/pražnjenje baterija.

2. SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Osnovna zakonitost funkcioniranja elektroenergetskog sustava jest da u svakom trenutku proizvodnja električne energije mora biti jednaka potrošnji električne energije uvećanoj za gubitke. Regulacija EES je složena jer je potražnja za električnom energijom u svakom trenutku drukčija. Iako je većinom predvidiva potražnja, ipak ovisi o potrebama potrošača kojih je mnogo. Dnevni dijagram opterećenja odnosno potražnje predstavlja osnovu za upoznavanje sa zahtjevima potrošača i polaznu točku za projektiranje, izgradnju i pogon elektrana. Dnevni dijagram opterećenja ima svoj karakterističan oblik u svakom EES, a ovisi o danima u tjednu, godišnjem dobu, vrsti potrošača, itd.

Mogućnost pohrane električne energije donosi mnogo prednosti u korištenju električne energije te ima znatnu ulogu u sustavima proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije koji nemaju konstantnu proizvodnju jer znatno ovise o vremenskim uvjetima i dostupnosti prirodnog toka energije. One proizvode električnu energiju onda kada im je primarna energija dostupna, a ne u vrijeme kada je ona potrebna u sustavu (kada ima vjetra, sunčevog zračenja, ili nekog drugog obnovljivog izvora energije). Sustavi za pohranu električne energije omogućuju bolju integraciju sustava za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije u EES, te smanjuju potrebu za rezervom u sustavu.

Razlikuju se sljedeći sustavi za pohranu električne energije prema obliku energije [1]:

- mehanički sustavi,
- elektrokemijski sustavi,
- kemijski sustavi,
- električni sustavi,
- toplinski sustavi.

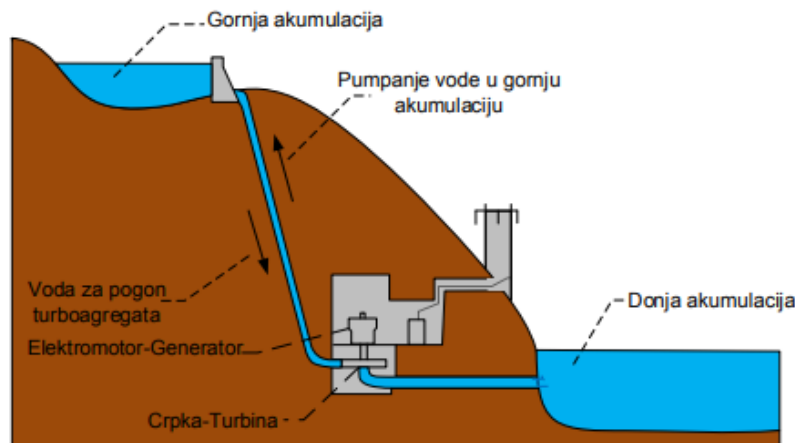


Slika 2.1. Sustavi pohrane električne energije [1]

2.1. Mehanički sustavi

2.1.1. Crpno-akumulacijske HE

Početakom 2019., instalirani kapacitet crpno-akumulacijskih HE kao sustava za pohranu energije dosegao je 183GW, što predstavlja otprilike 97% u svijetu instaliranih sustava za pohranu električne energije. [2] Konvencionalna crpno-akumulacijska hidroelektrana koristi dva spremnika za vodu na različitim visinama pa tako za vrijeme malih opterećenja crpi vodu iz donjeg u gornji spremnik (punjenje). Zatim, kada je potrebno, voda teče iz gornjeg u donji spremnik te tako pokreće turbinu sa generatorom za proizvodnju električne energije (pražnjenje). [1]



Slika 2.2. Crpno-akumulacijska HE

Učinkovitost crpno-akumulacijskih hidroelektrana je u rasponu od 70% do 85%. Prednosti crpno-akumulacijskih HE su relativno visoka učinkovitost i dug vijek trajanja (uobičajeno dulje od 40 godina), a glavni nedostatak je ovisnost o topografskim uvjetima (mali broj pogodnih lokacija za izgradnju, potrebne velike količine vode, značajan ekološki utjecaj). [1]

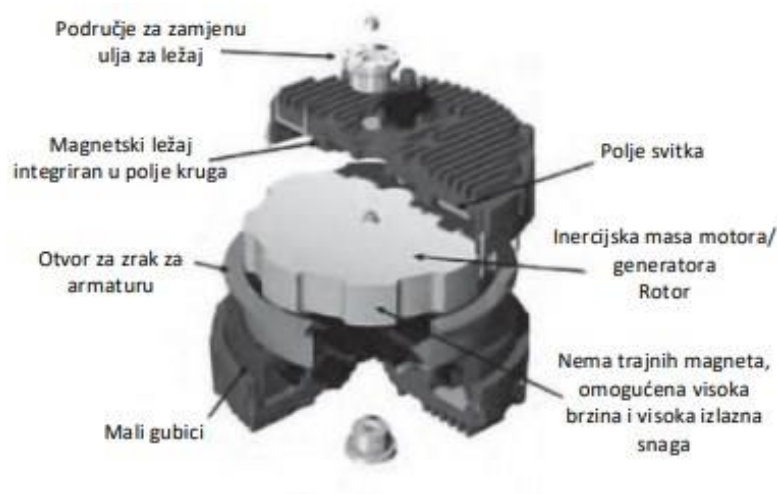
2.1.2. Komprimirani zrak

Postrojenja za skladištenje energije korištenjem komprimiranog zraka u velikoj su mjeri slični crpno-akumulacijskim HE s obzirom na njihovu primjenu i kapacitet skladištenja. Međutim, umjesto da se tijekom razdoblja skladištenja pumpa voda iz donjeg u gornji rezervoar, u postrojenju za skladištenje energije korištenjem komprimiranog zraka, vanjski se zrak komprimira i skladišti pod pritiskom bilo u podzemnoj strukturi ili nadzemnom sustavu spremnika ili cijevi. Kad je potrebna električna energija, zrak pod pritiskom se zagrijava i proširuje u plinskoj turbini koja pokreće generator za proizvodnju električne energije. [2] Ako se toplina oslobođena tijekom kompresije potroši na hlađenje, a ne na pohranu, zrak se mora dogrijati prije ekspanzije u turbini. Ovaj proces se naziva diabatska pohrana energije komprimiranim zrakom i rezultira slabom povratnom učinkovitosti koja je manja od 50%. Takve elektrane imaju visoku pouzdanost te su sposobne za pokretanje bez dodatne vanjske energije. Prednost pohrane energije komprimiranim zrakom je veliki kapacitet, a nedostaci su niska učinkovitost i geografska ograničenja lokacije. [1]

2.1.3. Zamašnjaci

Zamašnjaci su jednostavne mehaničke naprave koje električnu energiju pohranjuju u obliku kinetičke energije vrtnje. Zamašnjaci su se počeli prvi puta koristiti početkom 1970.-ih

godina. Imaju oblik diska i najčešće su izrađeni od čelika ili od željeza. Kinetička energija rotirajućeg tijela ovisi o momentu inercije i kvadratu kutne brzine. Budući da je zamašnjak (disk) konačnih dimenzija, pohranjena energija ovisi o kvadratu kutne brzine. Zbog velikih brzina rotacije zamašnjaci se moraju nalaziti u čvrstom metalnom kontejneru kako u slučaju kvara dijelovi koji su otpali ne bi bili opasni po okolinu, kako za ljude tako i za opremu. [1] Glavne prednosti zamašnjaka su visoka učinkovitost (90% pri nazivnoj snazi), niski troškovi održavanja, dug životni vijek (do 20 godina), brz odziv te mogućnost instaliranja bilo gdje, tj. nije potrebno traženje pogodne lokacije za izgradnju. Nedostatci su veliki investicijski troškovi, mali kapacitet pohrane energije te veliki gubitak energije tijekom vremena pohrane (samopražnjenje 3-20% po satu). [3]



Slika 2.3. Zamašnjak [1]

2.2. Kemijski sustavi

2.2.1. Vodik

Takav tipičan sustav za pohranu sastoji se od elektrolizera, spremnika vode i gorivih ćelija. Elektrolizer je elektrokemijski konverter koji uz pomoć električne energije razdvaja vodu na vodik i kisik. Vodik se pohranjuje u plinskim bocama ili spremnicima pod tlakom i tako se može čuvati praktički na neodređeno vrijeme. Za proizvodnju električne energije, vodik i kisik teku u gorivu ćeliju, gdje se odvija elektrokemijska reakcija koja je obrnuta od razdvajanja vode: vodik i kisik reagiraju i stvaraju vodu, oslobađa se toplina i generira struja. Iz ekonomskih i praktičnih razloga kisik nije pohranjen i ispušta se u atmosferu tijekom elektrolize, a za vrijeme proizvodnje električne energije uzima se iz zraka. Osim gorivih

ćelija, plinski motori, plinske turbine i kombinacija ciklusa plinske i parne turbine su mogućnosti za proizvodnju električne energije. Ukupna AC-AC učinkovitost je oko 40%. [1]

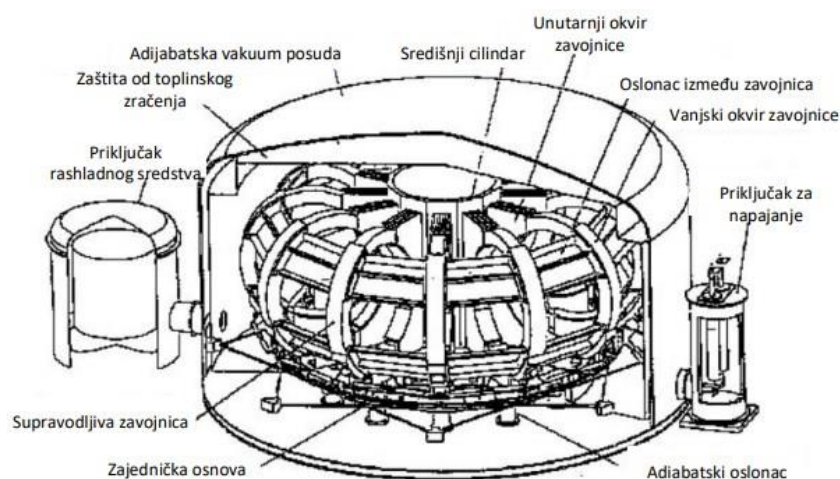
2.2.2. Sintetički prirodni plin

Sinteza metana (koji se naziva i sintetički plin) je druga opcija za pohranu električne energije kao kemijske energije. Ovdje je potreban još jedan korak nakon cijepanja vode u elektrolizeru, korak u kojem vodik i ugljični dioksid reagiraju u metan. Kao što je slučaj kod vodika, proizvedeni sintetički prirodni plin može se pohraniti u spremnicima pod tlakom, pod zemljom, ili se uvodi direktno u plinsku mrežu. Glavni nedostatak sintetičkog prirodnog plina je relativno niska učinkovitost zbog gubitaka u elektrolizi, procesu dobivanja metana, skladištenja, transporta i naknadne energije. Gubici energije pri procesu dobivanja metana u najvećoj mjeri su gubici u obliku topline. [1]

2.3. Električni sustavi

2.3.1. Supravodljivi magnetski svitak

U ovoj vrsti sustava energija se pohranjuje u magnetsko polje. Ovo magnetsko polje stvara istosmjerna struja koja teče kroz supravodljivu zavojnicu pri kriogenim temperaturama. Supravodljivi materijali pružaju gotovo zanemariv otpor dok su na kriogenim temperaturama, pa se magnetsko polje u zavojnici može stvoriti i održavati s vrlo malom količinom struje koja prolazi kroz nju, vrlo malo energije rasipa se omskim gubicima. [3]



Slika 2.4. Supravodljivi magnetski svitak [4]

Glavna prednost ove tehnologije pohrane je vrlo brzo vrijeme odziva te visoka ukupna povratna učinkovitost (85% - 90%) i vrlo visoka snaga koja može biti na raspolaganju u kratkom vremenskom razdoblju. [1]

2.3.2. Dvoslojni kondenzator (ultrakondenzator)

Dvoslojni kondenzatori se temelje na elektrokemijskim ćelijama koje sadrže dvije provodne elektrode, elektrolit i poroznu membranu koja omogućuje protok iona između dviju elektroda. Dakle, prikazani izgled sličan je elektrokemijskim ćelijama baterija. Glavna razlika između dvoslojnog kondenzatora (ili ultrakondenzatora, superkondenzatora, ovisno i literaturi) i baterija leži u činjenici da se u ćelijama ne događaju kemijske reakcije, već se energija elektrostatički pohranjuje u ćeliji. Prednosti su velika snaga, visoka povratna učinkovitost (do 80%), visoka pouzdanost te dug životni vijek. Glavni nedostatak je visoka stopa samopražnjenja (do 20% u 12 sati). [3]

2.4. Toplinski sustavi

2.4.1. Toplinski spremnici

Toplinski spremnici energije mogu pohraniti promjenu unutrašnje energije pojedinog materijala u obliku osjetne topline ili latentne topline. Kod pohrane osjetne topline, toplinska energija se pohranjuje povišavanjem temperature krute tvari ili tekućine. Latentna pohrana toplinske energije temelji se na apsorpciji ili otpuštanju topline kada skladišni materijal prolazi fazu promjene iz krutog stanja u tekuće ili iz tekućeg stanja u plinovito ili obrnuto. Sustav pohrane toplinske energije može pohraniti velike količine energije bez većih opasnosti, a dnevni gubitci zbog samopražnjenja su mali (0.05%-1%). Međutim, povratna učinkovitost sustava pohrane toplinske energije je obično niska (30%-60%). [2]

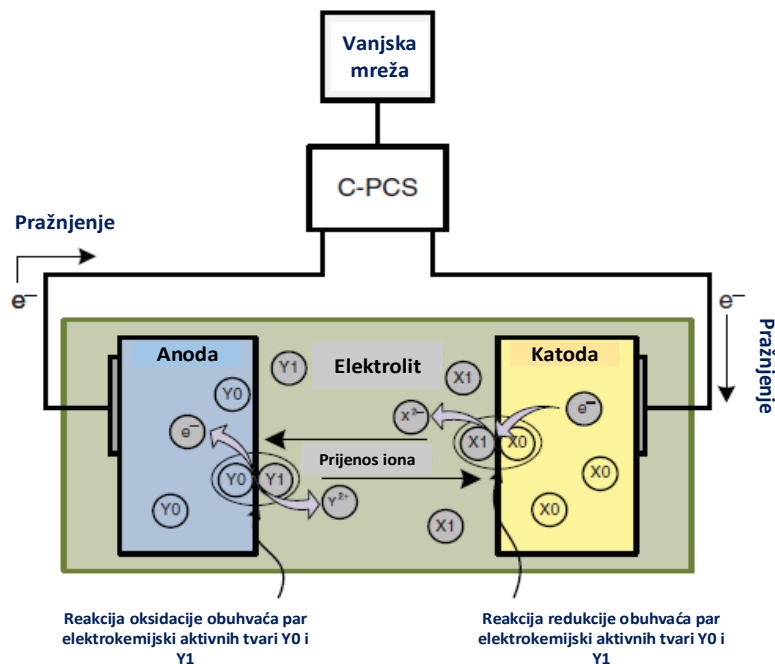
2.5. Elektrokemijski sustavi

2.5.1. Elektrokemijski sastav baterije

Baterijski sustav za pohranu energije pretvara električnu energiju u potencijalnu kemijsku energiju prilikom punjenja, a oslobađa električnu energiju pretvorenu iz kemijske energije svojih aktivnih materijala posredstvom elektrokemijskih reakcija prilikom pražnjenja. Zasnovan je na redukcijskim i oksidacijskim reakcijama (uobičajeno zvane redoks reakcije). Elektrokemijska redukcijska reakcija omogućuje komponenti uključenoj u proces da dobije elektrone, dok oksidacijska reakcija omogućuje gubitak elektrona. [3]

Baterijska ćelija osigurava uvjete da bi se ove elektrokemijske reakcije mogle dogoditi, stvarajući tako protok iona i elektrona između područja u kojima se one događaju. Da bi se omogućio ovaj protok iona i elektrona, baterijska ćelija ima dva kruga, jedan unutarnji i jedan vanjski. Unutarnji krug sastoji se od same baterijske ćelije koja osigurava put kojim prolaze rezultirajući ioni. Strujni krug se zatvara dodavanjem vanjskog kruga, osiguravajući na taj način put kojim prolaze elektroni nastali u redoks reakciji. Taj vanjski put osiguran je vanjskim sustavom (bilo opterećenje ili izvor energije) na koji je baterija spojena. [3]

Baterijska ćelija sastoji se od elektroda, elektrolita, separatora, oklopa i priključaka. Anoda, odnosno negativna elektroda, je elektroda koja daje elektrone vanjskom krugu te oksidira tijekom elektrokemijske reakcije. Katoda, odnosno pozitivna elektroda, je elektroda koja prima elektrone iz vanjskog kruga i reducira se tijekom elektrokemijske reakcije. Elektrolit, odnosno vodič iona, je medij kojim se prenosi naboj u vidu iona između anode i katode. Elektrolit je obično tekućina (voda ili neko drugo otapalo) koja sadrži otopljene soli, kiseline ili alkale za poboljšanje vodljivosti. Neke ćelije koriste krute elektrolite. [3]

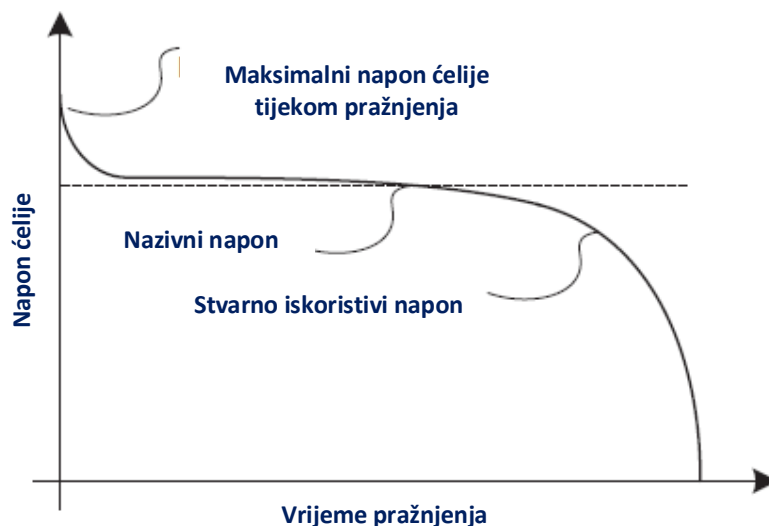


Slika 2.5. Princip rada baterije [3]

Predstavljajući glavne komponente baterijske ćelije, sada je puno lakše razumjeti princip rada, a to grafički potkrepljuje slika 2.5. Kao što se može napomenuti, ćelija baterije sastoji se od dvije elektrode, sastavljene od dva materijala nazvana Y0 (za anodu) i X0 (za katodu). Oboje su okruženi elektrolitom, Z. Također, anoda (negativna elektroda) je okružena supstancom ili

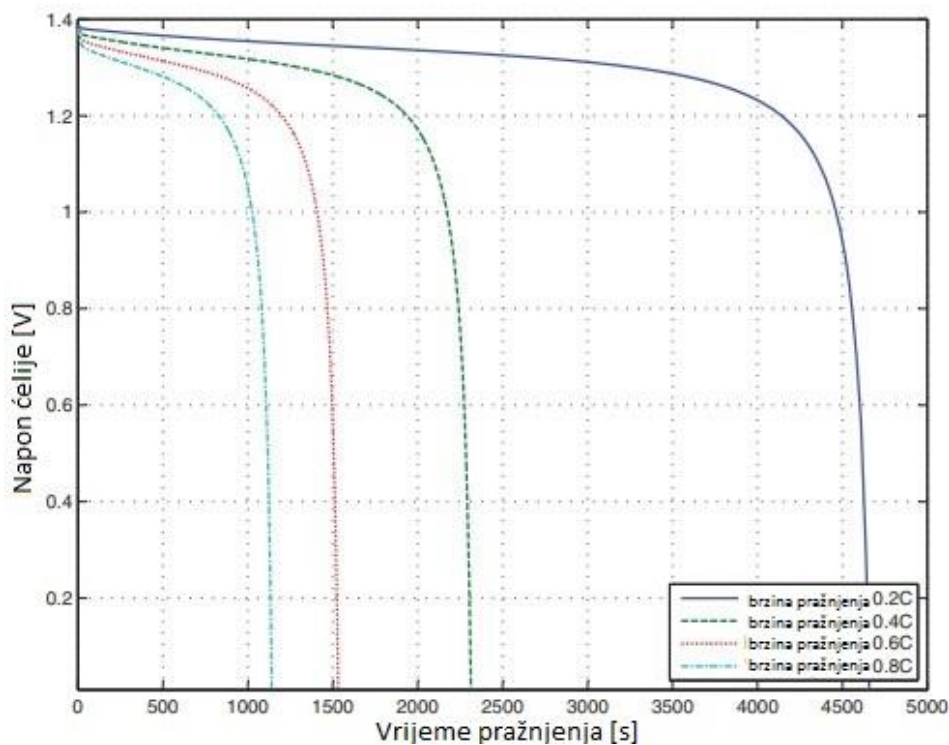
komponentom Y1. Slično tome, katoda je okružena komponentom X1. Materijali X0 – X1 i Y0 – Y1 definiraju dva para elektrokemijski aktivnih tvari. Razlika u energetske stanju dvaju para elektrokemijski aktivnih tvari prevodi se u razliku napona. Dodavanjem vanjskog opterećenja između elektroda, električni krug se zatvara. Zatim se baterija prazni, a to znači da se počinju događati redoks reakcije, puštajući električnu struju kroz opterećenje. Elektroni teku iz negativne elektrode (anoda, područje s maksimalnim energetske stanjem) u pozitivnu (katoda, područje s minimalnim energetske stanjem). Ti elektroni i pozitivni ioni Y²⁺, rezultat su reakcije oksidacije između tvari Y0 i Y1. Elektrone skuplja katodna elektroda stvarajući reakciju redukcije između tvari X0 i X1, što zauzvrat rezultira ionom X²⁻. Unutarnji krug omogućava ionsku razmjenu. Kao rezultat ovog procesa, svaki od parova elektrokemijski aktivnih tvari je oslabljen, pa se smanjuje električni potencijal između njih. Električni potencijal između dvije elektrode može se obnoviti obrnutim protokom električne struje, a samim tim i primjenom vanjskog izvora energije za punjenje baterije. [3]

Električni potencijal dobiven iz kemijskih reakcija dva para elektrokemijski aktivnih tvari, izmjeren u stanju potpuno napunjene ćelije kad nije povezana s vanjskim krugom, naziva se naponom otvorenog kruga. Taj napon određuje slobodnu energiju reakcije (Gibbsovu slobodnu energiju) elektrokemijskih reakcija u ćeliji baterije. Napon otvorenog kruga može se mjeriti voltmetrom, a odgovara ravnotežnim uvjetima. To znači da napon u otvorenom krugu nije moguće mjeriti odmah po dovršetku postupka punjenja, već samo nekoliko sati kasnije, čime se omogućuje bateriji da se nakon postupka "opusti" (ovo vrijeme ovisi o vrsti baterije i načinu punjenja). Druga metoda za procjenu napona u otvorenom krugu je statistička, koja se temelji na procjeni nekoliko krivulja napona tijekom procesa punjenja. Vrlo je važno razlikovati koncept napona otvorenog kruga od napona izmjerenog u ćeliji tijekom procesa pražnjenja, kako je to uobičajeno prikazano u podacima proizvođača. [3]



Slika 2.6. Karakteristika naponskog pražnjenja baterijske ćelije [3]

Zbog unutarnjeg otpora ćelije i električne struje koja prolazi kroz nju dolazi do pada napona u ćeliji, tako da ne treba uzeti u obzir da će napon ćelije izmjeren na početku procesa pražnjenja (i prema tome u uvjetima potpune napunjenosti) biti jednak naponu otvorenog kruga. Ispuštanjem ćelije napon opada od svoje maksimalne vrijednosti kada je u potpunosti nabijen na takozvani granični napon, koji definira raspon korisnog napona ćelije. Od ovog trenutka napon znatno opada, znatno ograničavajući upotrebljivost uređaja. Proizvođači obično navode "nazivni napon u ćeliji". Ovo je samo prosječna vrijednost između maksimalnog i graničnog napona. Ovaj prosječni napon ćelije, zajedno s brzinom pražnjenja, služi za proračun ekvivalentnog unutarnjeg otpora ćelije. Profil napona pražnjenja u ćeliji ovisi o mnogim čimbenicima, poput tlaka i temperature, jer utječu na provođenje kemijskih reakcija u ćeliji. Napon ćelije i brzina struje pražnjenja donekle su povezani, utječući na energetske kapacitet. Na slici 2.7. prikazani su tipični naponski trendovi baterijskih ćelija pri različitim brzinama pražnjenja. [3]



Slika 2.7. Tipične karakteristike napona za različite brzine (struje) pražnjenja [3]

Kao što se može napomenuti, što je veća struja pražnjenja, to su maksimalni napon i granični napon ćelije manji, čime se smanjuje kapacitet skladištenja energije. Energetski kapacitet baterija definiran je kao iskoristiva energija pri definiranoj brzini pražnjenja. Ovaj se izraz obično označava u amper-satima (Ah). U opisivanju baterija, struja pražnjenja često je izražena preko C faktora (engl. C-rate) s ciljem normaliziranja brzine pražnjenja neovisno o kapacitetu baterije. C faktor mjera je brzine pražnjenja baterije strujom I izraženom u amperima, od nominalne vrijednosti kapaciteta baterije do njene maksimalne ispražnjenosti (kapacitet baterije definiran je u Ah). Primjerice, 1C faktor označava da će struja pražnjenja isprazniti cijelu bateriju za jedan sat. Struja pražnjenja prema tome može biti izražena kao [3]:

$$I = C \cdot Cap [A] \quad (2-1)$$

gdje je: C – C-faktor punjenja/pražnjenja izražen u 1/h ; Cap – kapacitet baterije izražen u Ah. Omjer dostupnog naboja pohranjenog u bateriji u odnosu na naboj potpuno napunjene baterije određuje stanje napunjenosti baterije (engl. state of charge (SoC)), parametar bitan za optimalno upravljanje energijom kako bi se baterija zaštitila od dubokog pražnjenja ili prevelikog punjenja što smanjuje životni vijek baterije jer se postupno reducira dostupni kapacitet baterije. Što su dublji ciklusi pražnjenja, više kapaciteta se gubi. Stanje zdravlja

baterije (engl. state of health (SoH)) je pokazatelj baterijske funkcionalnosti koji predviđa broj koliko se puta baterija može isprazniti i napuniti prije nego postane neupotrebljiva. Definira se kao omjer maksimalnog kapaciteta potpuno napunjene stare baterije i maksimalnog kapaciteta potpuno napunjene nove baterije. Dubina pražnjenja baterije (engl. depth of discharge (DoD)) je postotak kapaciteta baterije koja je ispražnjena izražen kao postotak maksimalnog kapaciteta baterije. Unutarnji otpor baterije, u pravilu različit za punjenje i pražnjenje ovisi o stanju napunjenosti baterije. Kako unutarnji otpor raste, tako se učinkovitost baterije i toplinska stabilnost smanjuju jer se ujedno povećava i temperatura. Procesi punjenja i pražnjenja nisu idealni, ali uzimaju u obzir gubitke koji se prevode u padove napona i porast temperature. Dakle, energetska učinkovitost može se formulirati u smislu napona ćelije i teoretskog maksimalnog napona proizvedenog u kemijskoj reakciji u ćeliji, takozvani termodinamički napon. Tijekom punjenja, energetska učinkovitost u ćeliji definira se kao [3]:

$$\mu_c = V / V_{td} [\%] \quad (2-2)$$

a tijekom pražnjenja može se formulirati sa [3]:

$$\mu_d = V_{td} / V [\%] \quad (2-3)$$

gdje je V_{td} termodinamički napon, a V napon između stezaljki ćelije. Te su metrike drugačije formulirane, jer je napon u ćeliji veći od termodinamičkog u pražnjenju, a niži tijekom postupka punjenja. To je zbog učinka unutarnjeg otpora ćelije. [3]

Omjer uložene energije (u MWh) i energije dobivene nakon skladištenja (u MWh) je povratna učinkovitost (koja se naziva i AC / AC učinkovitost), izražena u postocima (%). Što je veća povratna učinkovitost, to manje energije gubimo zbog skladištenje te je sustav u cjelini učinkovitiji. Povratna učinkovitost se još može definirati kao:

$$\mu = E_{pr} / E_{pu} [\%] \quad (2-4)$$

gdje je E_{pr} ukupna energija utrošena tijekom procesa pražnjenja baterije, a E_{pu} ukupna energija utrošena tijekom procesa punjenja baterije.

S obzirom na definiciju energetske učinkovitosti i ovisnost napona ćelije o SoC (vidi sliku 2.6.), može se izvesti da se učinkovitost pražnjenja povećava sa SoC. Gledajući ovo obrnuto, učinkovitost punjenja opada sa SoC. Stoga, da bi se maksimizirala ukupna učinkovitost

tijekom pune petlje punjenja i pražnjenja, treba izračunati optimalni prosječni SoC. Ta se dužnost obično dodjeljuje sustavima za upravljanje baterijama. [3]

Daljnje glavne veličine za pohranu energije općenito, a posebno za baterije, su specifična energija i snaga. Te veličine povezuju kapacitet energije i snage s težinom baterije. U izračun ovih mjernih podataka uključeni su samo stanični reaktanti, čime se izostavljaju ostale strukturne komponente, separatori stanica i ožičenje, na primjer. Specifična energija može se izračunati na sljedeći način [3]:

$$E_{sp} = \frac{n \cdot F \cdot V_{td}}{3.6 \cdot \sum M_i} [Wh/kg] \quad (2-5)$$

gdje je n broj elektrona prenesenih u kemijskoj reakciji, F je Faradayeva konstanta u kulonima po molu, V_{td} je teoretski termodinamički napon ćelije, a $\sum M_i$ je zbroj molekulskih težina reaktanata stanice. Dakle, za optimizaciju specifične energije treba maksimizirati V_{td} i minimizirati $\sum M_i$. Potonje se postiže konfiguriranjem stanica na bazi reaktanata s malom atomskom težinom. Prvo se dobiva nakupljanjem dva para elektrokemijski aktivnih tvari s visoko elektropozitivnim i visoko elektronegativnim elementom. Kada se to učini, kemijske reakcije će dati visoki termodinamički napon V_{td} . [3]

Specifična energija može se definirati kao nominalna energija baterije po jedinici mase, koja se može nazvati i gravimetrijska gustoća energije. Gustoća energije može se definirati kao nominalna energija baterije po jedinici volumena, koja se može nazvati i volumetrijska gustoća energije (izražena u Wh/l). [8]

Gustoća snage može se definirati kao maksimalna dostupna snaga po jedinici volumena (izražena u W/l). Određuje veličinu baterije potrebnu za postizanje određenog cilja performansi. [8] Konačno, specifična snaga određuje maksimalnu snagu koju ćelija može isporučiti u odnosu na svoju težinu. Odrađuje težinu baterije potrebne za postizanje određenog cilja performansi. Ovisi o naponu otvorenog kruga ćelije V_0 , unutarnjem otporu R_u , te omskom otporu vodiča R_v . [3]

$$P_{sp} = \frac{V_0}{4(R_v + R_u)} [W/kg] \quad (2-6)$$

Ovaj promjenjivi unutarnji otpor, koji se obično naziva prekomjernim potencijalom, modelira pad napona u ćeliji i ovisi o količini povučene struje. Gledajući elektrokemiju i s ciljem maksimiziranja specifične energije, može se doći do nekoliko vrsta baterijskih ćelija. [3] Ove veličine mogu se opisati i povezati na primjeru boce i čepa. Boca ima veći kapacitet, ali

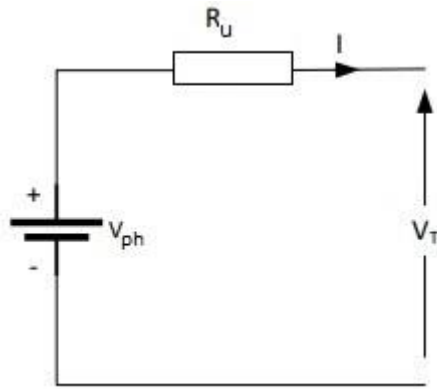
zahtijeva dulje vrijeme punjenja/praznjenja. Za razliku od boce, čep se može vrlo brzo napuniti i isprazniti. To znači da čep ima veću specifičnu snagu od boce, dok boca ima veću specifičnu energiju.

Kao što je prethodno napomenuto, elektrokemijski aktivne tvari koje se koriste za izgradnju baterijskih ćelija daju različite napone otvorenog kruga. Ostale karakteristike - poput, na primjer, cikličnosti, vremenskog odziva, raspona radnih temperatura i starenja - znatno se razlikuju ovisno o korištenoj tehnologiji. Zbog toga su istraživanja i razvoj tako intenzivni na ovom polju. Najstariji tip baterije je olovni, za koji se istraživačka djelatnost provodi više od 140 godina. No, postoji još nekoliko tehnologija koje dobivaju na važnosti u različitim stacionarnim i nestacionarnim područjima primjene. [3]

2.5.2. Električna shema baterije

Postoji nekoliko pristupa za modeliranje baterija. Među njima se u literaturi mogu naći elektrokemijski, analitički, stohastički i električni krugovi. Svaka vrsta predstavlja, u većoj ili manjoj mjeri, specifične pojave u ćeliji baterije, na primjer, stanje napunjenosti (SoC) i varijacije kapaciteta, ovisnost o temperaturi, učinci starenja itd. Međutim, niti jedan od ovih pristupa trenutno nije dovoljno točan da samostalno predstavlja sve čimbenike koji utječu na performanse baterije. Stoga bi modeliranje trebalo prilagoditi specifičnostima i razini detalja potrebnih za svaki pojedini slučaj. [3]

Modeli zasnovani na električnim krugovima omogućuju nam reprodukciju strujno naponskih karakteristika baterija, kao i njihove dinamičke reakcije. Da bi to učinili, ovi se modeli temelje na kontroliranim izvorima napona i struje, u kombinaciji s (obično) promjenjivim otporima i kondenzatorima. Ograničenje ovih modela je da ne mogu procijeniti SoC ćelija, pa se obično koriste zajedno s analitičkim modelima. Najjednostavniji pristup mogao bi biti modeliranje ćelija baterije kao idealnih izvora napona, čiji se naponi otvorenog kruga mogu dobiti terenskim ispitivanjima. Korak naprijed je uključivanje unutarnjeg otpora ćelije u ekvivalentni električni krug. [3]

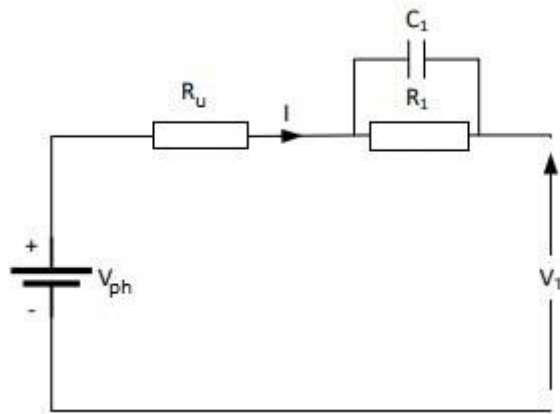


Slika 2.8. Linearni model baterije [5]

Otpor R_u predstavlja gubitke energije zbog kojih se baterije zagrijavaju. Napon stezaljki V_T poklapa se s naponom V_{ph} otvorenog kruga samo kada je u otvorenom krugu. Međutim, kada je priključeno opterećenje, taj napon se daje sa [5]:

$$V_T = V_{ph} - (R_u \cdot I) [V] \quad (2-6)$$

Stoga ovaj model može oponašati trenutni pad napona kada je krug dovršen, što je izravno proporcionalno cirkulirajućoj struji. Što je veći unutarnji otpor baterije, veći su gubici i manja dostupna maksimalna snaga. Glavni nedostatak ovog modela jest taj što se napon stezaljki V_T niti napon otvorenog kruga V_{ph} ne razlikuju ovisno o SoC. Otpor je također konstantan, neovisan o SoC ili temperaturi. U tom smislu treba napomenuti da je u stvarnoj bateriji otpor u velikoj mjeri ovisan o vrsti baterije, SoC i SoH stanju i temperaturi. Općenito, otpor se povećava kad se SoC smanji, SoH smanji (razgradnja se povećava) i temperatura smanji. U svakom slučaju, važno je napomenuti da ovaj model ne služi za predstavljanje prijelaznih stanja za sustav. Primjenjivost ovog modela ograničena je na studije u kojima baterija radi na srednjem opsegu SoC, gdje su unutarnji otpor i temperatura gotovo konstantni. Međutim, pri niskom SoC otpor previše varira. Dodajući daljnju složenost ekvivalentnom električnom krugu za baterijsku ćeliju, predstavljen je takozvani Thevenin model. [5]



Slika 2.9. *Theveninov model baterije [5]*

Ovaj model sastoji se od izvora napona u seriji s unutarnjim otporom ćelije, ali uključuje i treći element, sastavljen od paralelno spojenog kapaciteta s otporom. Ovaj element predstavlja ekvivalentni kapacitet koji pružaju paralelne ploče baterije, i odgovarajući otpor između elektrolita i gore spomenutih ploča. Svi se parametri koji karakteriziraju komponente ove sheme mogu ili ne moraju smatrati konstantnima. Usvajanjem različitih parametara (funkcija, na primjer, SoC), može se predstaviti nekoliko nelinearnosti koje se javljaju u ćeliji baterije. S ciljem poboljšanja točnosti modela, ekvivalentni krug Thevenin može se modificirati dodavanjem dodatnih zbijenih kapacitivno-otpornih elemenata. [3]

2.5.3. Olovno-kiselinske baterije

Olovno-kiselinske baterije najopsežnija su tehnologija punjivih baterija na svijetu. Imaju nenadmašan rekord u pouzdanosti i sigurnosti, što ih zajedno s dobro uspostavljenom svjetskom bazom dobavljača čini dominantnom baterijom u pogledu MWh proizvodnje. [6] Tipično se upotrebljavaju u sustavima za napajanje u nuždi, samostalnim sustavima sa fotonaponom, sustavima baterija za ublažavanje izlazne fluktuacije iz energije vjetra i kao akumulatori u vozilima. [1] Olovno-kiselinske baterije imaju dugu povijest uspješne upotrebe u skladištenju energije i njihove su mogućnosti i ograničenja pažljivo istraženi. Njihova pouzdanost je dobro utvrđena i mogu se prilagoditi širokom rasponu radnih ciklusa što će osigurati da daju dobro rješenje koje je konkurentno drugim pristupima. Uz to se olovno-kiselinske baterije široko recikliraju. Zahvaljujući već dugo uspostavljenoj shemi prikupljanja i recikliranja, olovno-kiselinske baterije predstavljaju temeljna načela ekološkog dizajna. Dizajnirane su za recikliranje na kraju njihovog vijeka upotrebe te se više od 90% njihovog materijala ponovno upotrebljava. Prosječna danas proizvedena olovno-kiselinska baterija sadrži više od 80% recikliranih materijala, a gotovo svo olovo koje se oporavi u procesu

recikliranja koristi se za izradu novih olovnih baterija. [6] Tipični vijek trajanja je od 6 do 15 godina sa životnim vijekom od 1500 ciklusa na 80% dubini pražnjenja te imaju povratnu učinkovitost oko 80% do 90%. [1] Olovno-kiselinske baterije za skladištenje energije izrađene su u više različitih vrsta. Mogu biti poplavljene, što znači da im povremeno trebaju dodaci vode za održavanje ili regulirane ventilima koji ne zahtijevaju rutinsko održavanje osim sigurnosnih pregleda. [6] Glavni nedostatak ovih baterija je znatno smanjenje iskoristivog kapaciteta nakon što se isprazni velika količina energija u kratkom vremenskom periodu. Npr. ako se u jednom satu baterija potpuno isprazni, samo oko 50% do 70% nazivnog kapaciteta ostaje dostupno. Ostali nedostaci su niža gustoća energije i upotreba olova. Prednosti su povoljan omjer cijena/performansi, lako recikliranje kao što je ranije navedeno i jednostavna tehnologija punjenja. [1]

2.5.4. Nikal-kadmij i nikal-metal hibrid baterije (NiCd, NiMH)

Prije komercijalnog uvođenja nikal-metal hibrid (NiMH) baterije oko 1995., nikal-kadmij (NiCd) baterije su bile u komercijalnoj upotrebi od oko 1915. U odnosu na olovne baterije, baterije na bazi nikla imaju nešto veću gustoću energije i veći broj ciklusa. Nedostaci NiCd baterija su [7]:

- kadmij je otrovni teški metal, što rezultira opasnostima za okoliš,
- baterija pati od memorijskog učinka - maksimalni kapacitet može se dramatično smanjiti ako se baterija više puta napuni nakon što se samo djelomično isprazni,
- visoka stopa samopražnjenja

Mnoge karakteristike NiCd baterije prenesene su u NiMH bateriju, koja je nastala kao zamjena za NiCd bateriju. Zbog propisa o zaštiti okoliša, NiCd je danas ograničen na posebne primjene. Prednosti NiMH baterija su [7]:

- 30% do 40% veći kapacitet od standardne NiCd baterije,
- manje sklone memorijskom učinku,
- jednostavno skladištenje i transport,
- ekološki prihvatljivo, sadrži samo blage toksine,
- sadržaj nikla čini recikliranje profitabilnim,
- širok raspon temperature.

NiMH baterija nije bez nedostataka. Baterija se nježnije i zahtjevnije puni od NiCd baterije. S 20 posto samopražnjenja u prva 24 sata nakon punjenja i 10 posto mjesečno nakon toga,

NiMH se svrstava među najviše u klasi. Modificiranje hidridnih materijala smanjuje samopražnjenje, ali to smanjuje specifičnu energiju. Ostali nedostaci su [7]:

- ograničeni vijek trajanja, duboko pražnjenje smanjuje vijek trajanja,
- osjetljiva na prekomjerno punjenje,
- stvara toplinu tijekom brzog punjenja i pražnjenja pod velikim opterećenjem.

2.5.5. Litij-ionske baterije (Li-ion)

Nakon što je 1970-ih kemičar Exxona Stanley Whittingham razvio koncept litij-ionskih baterija, Sony i Asahi Kasei stvorili su prvi komercijalni proizvod 1991. Litij-ionske baterije postale su najvažnija tehnologija za pohranu u području prijenosnih i mobilnih uređaja (npr. prijenosno računalo, mobilni telefon, električni bicikl, električni automobil) od oko 2000. godine. Visoki nazivni napon ćelije od 3,7 V znači da se broj ćelija u nizu s pripadajućim vezama i elektronikom može smanjiti kako bi se dobio ciljani napon. Na primjer, jedna Li-ion ćelija može zamijeniti tri NiCd ili NiMH ćelije koje imaju napon ćelije od samo 1,2 V. Još jedna prednost Li-ion baterija je njihova visoka gravimetrijska gustoća energije te mogućnost velikog smanjenja troškova zbog masovne proizvodnje. Iako Li-ion baterije imaju udio od preko 50% u malim i prijenosnim uređajima na tržištu, još uvijek postoje neki izazovi za razvoj Li-ion baterija većih razmjera. Glavna prepreka je visoka cijena zbog posebnog pakiranja i interne zaštite od preopterećenja. Li-ion baterije općenito imaju vrlo visoku učinkovitost, tipično u rasponu od 95% do 98%. Mogu ostvariti gotovo bilo kakvo vrijeme pražnjenja, od sekunde do tjedna, što ih čini vrlo fleksibilnom i univerzalnom tehnologijom za pohranu. Standardna ćelija ima 5000 punih ciklusa, ali moguće su i veće stope ciklusa, uglavnom ovisno o materijalu za elektrode. S obzirom da su Li-ion baterije još uvijek skupe, one se mogu natjecati sa olovno-kiselinskim baterijama za primjenu u sustavima koji zahtijevaju kratko vrijeme pražnjenja (npr. kao rezerva za primarnu regulaciju). Sigurnost je ozbiljan problem u tehnologiji Li-ion baterija. Većina metaloksidnih elektroda su toplinski nestabilne i mogu se razgraditi na povišenim temperaturama, oslobađajući kisik koji može dovesti do termičkog pobjega. Da bi se smanjio taj rizik, Li-ion baterije su opremljene jedinicom za praćenje kako bi se izbjeglo prekomjerno punjenje i pražnjenje. Obično je instaliran i ravnotežni naponski krug za nadzor naponske razine svake pojedine ćelije kako bi se spriječilo naponsko odstupanje među njima. Li-ion tehnologija i dalje se razvija, a postoji znatan potencijal za daljnji napredak. [1]

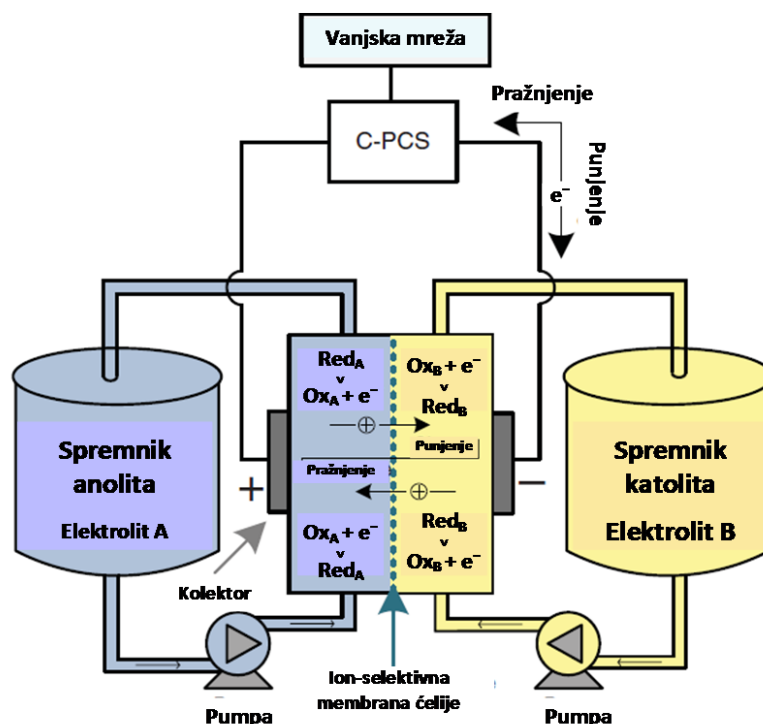
2.5.6. Natrij-sumpor i natrij nikal klorid baterije (NaS, NaNiCl)

Natrij-sumpor (NaS) baterije jedna su od najperspektivnijih tehnologija za stacionarne aplikacije velike snage. Niska atomska težina natrija i visoki termodinamički napon konfiguriraju ćelije baterija na bazi natrija s velikom specifičnom snagom. Konstrukcija ćelije prilično se razlikuje od dosad predstavljene. Elektrode NaS baterijskih ćelija su tekuće, dok je elektrolit, koji zauzvrat djeluje kao separator, čvrst. Da bi elektrode došle u tekuće stanje, moraju se otopiti, namećući radne temperature za NaS baterije od oko 300-400 °C. Pri ovoj temperaturi, keramički elektrolit dobar je vodič iona koji nastaju u kemijskim reakcijama unutar ćelije. [3] NaS baterije postižu tipični životni vijek od oko 4500 ciklusa i imaju vrijeme pražnjenja od 6,0 do 7,2 sata. Učinkovite su (povratna učinkovitost je oko 75%) i imaju brzu reakciju. NaS tehnologija baterija je predstavljena na 200 lokacija u Japanu, uglavnom za peglanje vrhova, a Njemačka, Francuska, SAD također imaju NaS baterije u pogonu. [1] NaS baterije su ekološki neškodljive, bez emisije tijekom rada i oko 99% ukupne težine materijala baterija može se reciklirati. Glavni je nedostatak potreban izvor topline koji koristi vlastitu pohranjenu energiju baterije, djelomično smanjujući performanse baterije, jer NaS baterija treba raditi na visokoj temperaturi. [2] Od ostalih nedostataka ove mlade tehnologije možemo istaknuti trajnu potrebu za intenzivnim istraživanjem i razvojem kako bismo prevladali, na primjer, probleme poput pucanja keramičke elektrolitske cijevi i korozije zbog sumpora, što oboje smanjuje vijek trajanja baterije. [3] Ove baterije su pogodne za aplikacije s dnevnim ciklusom. Kako je vrijeme odziva u rasponu od nekoliko milisekundi te NaS baterije ispunjavaju uvjete za stabilizaciju mreže, ova tehnologija je vrlo zanimljiva komunalnim uslugama i velikim potrošačima. [1]

Natrij nikal klorid (NaNiCl) baterija, poznatija kao ZEBRA (engl. Zero Emission Battery Research Activity), visokotemperaturna je baterija koja radi pri temperaturama oko 270°C te koristi nikal klorid umjesto sumpora za pozitivnu elektrodu. Može izdržati ograničenu prepunjenost i pražnjenje te ima potencijalno bolje sigurnosne značajke i veći napon ćelije u odnosu na NaS baterije. ZEBRA baterija može podnijeti najmanje 1000 ciklusa 100% punjenja/pražnjenja, uključujući bilo koju vrstu djelomičnog punjenja/pražnjenja. Ne zahtijeva održavanje, dugo traje i vrlo je pouzdana što ju čini posebno prikladnom za mobilne aplikacije (npr. električna vozila, hibridna vozila). Ne sadrži ekološki štetne materijale te se svi materijali mogu u potpunosti reciklirati. Istraživanje ove tehnologije usmjereno je na razvoj novije verzije baterije sa većom gustoćom snage. [1]

2.5.7. Protočne baterije (Flow)

Kao i u slučaju konvencionalnih baterija, princip rada protočnih baterija temelji se na elektrokemijskim reakcijama koje se javljaju u elektrokemijskim ćelijama. Međutim, protočne baterije razlikuju se od konvencionalnih po tome što se elektrolit ne čuva trajno u ćelijama, već se dvije vodene otopine elektrolita (A i B) nalaze u odvojenim spremnicima. Tijekom postupka punjenja te se vodene otopine pumpaju kroz elektrokemijske stanice, gdje se elektrokemijski aktivni materijal otopljen u elektrolitu A oksidira na anodi, a elektrokemijski aktivni materijal u elektrolitu B reducira na katodi. Ciklus pražnjenja obuhvaća obrnuti postupak. [3]



Slika 2.10. Princip rada protočnih baterija [3]

Tri glavne vrste protočnih baterija su vanadij redoks protočna baterija (engl. Vanadium Redox Flow Battery - VRFB), cink-brom protočna baterija (engl. Zinc-Bromine Flow Battery - ZBFB) te polisulfid-bromid protočna baterija (engl. Polysulfide-Bromide Flow Battery - PBFB). [3]

VRFB jedna je od najzrelijih protočnih baterija. VRFB imaju brze reakcije (brže od 0,001 sekunde) i mogu raditi 10 000–16 000+ ciklusa sa 100% dubinom pražnjenja. Njihova je učinkovitost relativno visoka, oko 60–80%. Glavna prednost VRFB-a je što može ponuditi gotovo neograničeni kapacitet jednostavnim korištenjem sve većih i većih spremnika.

Nedostatci VRFB su očigledni zbog niske specifične energije i gustoće energije. U današnje vrijeme VRFB se koriste za izravnavanje opterećenja, olakšavanje integracije obnovljivih izvora energije, kontrolu kvalitete energije, itd. [2]

ZBFB nudi jedan od najviših napona ćelije (oko 1.7V) i oslobađa dva elektrona po atomu cinka. Ovi se atributi kombiniraju i nude najveću gustoću energije među protočnim baterijama. Međutim, visoki napon ćelije i visoko oksidativni element, brom, zahtijevaju elektrode, membrane i komponente za rukovanje tekućinom koje mogu izdržati kemijske uvjete. Ovi su materijali skupi, a uz to brom je iznimno otrovan materijal. [6]

Napon ćelije PSFB može doseći 1.5V. Općenito govoreći, protočne baterije su lako prilagodljive, budući da volumen uskladištenog elektrolita određuje energetski kapacitet sustava. Također, prikladni su za dugotrajno skladištenje energije zbog vrlo niskog, pa čak i zanemarivog samopražnjenja. Protočne se baterije mogu u potpunosti isprazniti bez ikakvih oštećenja, a u pogledu cikličnosti imaju bolje karakteristike od konvencionalnih baterija. Zahtijevaju vrlo malo održavanje. Bez ikakve sumnje, glavno ograničenje tehnologije je relativno mala specifična energija, što ograničava njezinu upotrebu na stacionarne primjene. PSBF je najmanje razvijena tehnologija protočnih baterija. [6]

2.5.8. Usporedba elektrokemijskih sustava za pohranu energije

Na ovoj tablici može se vidjeti usporedba elektrokemijskih sustava za pohranu energija, odnosno različitih tipova tehnologija baterija. Iz ovih podataka možemo zaključiti da Li-ion baterija ima najbolje karakteristike u vidu specifične snage, specifične energije i učinkovitosti, no kao što je ranije navedeno ima svoje probleme u vidu cijene i sigurnosti. VRFB ima najbolji životni vijek te vrlo malu stopu samopražnjenja, no glavni problem je mala specifična energija. Olovno-kiselinske baterije su još uvijek najpouzdanije te su dominantne u vidu svjetske MWh proizvodnje zbog povoljnog omjera cijena/performansi, lakog recikliranja i jednostavne tehnologije punjenja.

Tablica 2.1. *Usporedba karakteristika različitih tipova elektrokemijskih sustava za pohranu energije (baterija) [9]*

Tip	Specifična energija [Wh/kg]	Učinkovitost [%]	Specifična snaga [W/kg]	Životni vijek (broj ciklusa)	Samopražnjenje mjesečno [%]
Olovno-kiselinska	30-40	70-90	180	200-2000	3-4
Ni-Cd	40-60	60-90	140-180	500-2000	10-15
NiMH	30-80	70	250-1000	500-1000	30
Li-ion	100-250	75-90	1800	500-2000	5-10
NaS	150	80-90	120-150	2500	-
VRFB	25-40	80	100-150	>16000	<1

3. USPOREDBA PERFORMANSI RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA BATERIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

U sklopu praktičnog dijela u Laboratoriju za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija provedena su mjerenja za tri vrste Li-ionskih baterija: Panasonic, LG te SONY i jednu vrstu NiMH baterija: Eneloop pro. Mjerenja su rađena za proces punjenja baterija i za proces pražnjenja baterija pri različitim faktorima C uređajem Junsu iCharger 4010 Duo za punjenje/pražnjenje baterija koji će se opisati u sljedećem poglavlju.

Prikazati će se grafička analiza mjernih rezultata te će se analizirati utjecaj različitih faktora C prilikom procesa punjenja/pražnjenja na napon, struju, snagu i energiju punjenja/pražnjenja te stanje energije i povratnu učinkovitost na svaku pojedinu Li-ionsku bateriju. Radi usporedivosti različitih tipova baterija različitih tehničkih karakteristika, grafička analiza mjernih podataka izražena je po zajedničkoj varijabli (stavljena na zajednički nazivnik), kapacitetu (x os).

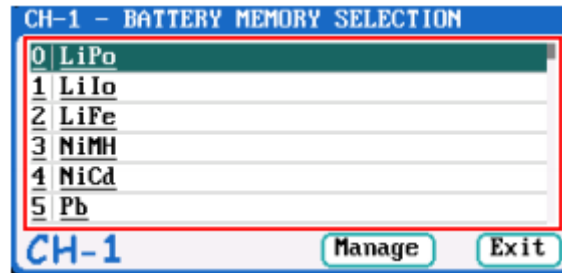
3.1. Punjač/pražnjač baterija iCharger 4010 Duo

Uređaj Junsu iCharger 4010 Duo za punjenje/pražnjenje baterija korišten u procesu punjenja/pražnjenja baterija prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Uređaj Junsu iCharger 4010 Duo za punjenje/pražnjenje baterija

Junsu iCharger 4010 Duo ima mogućnost punjenja/pražnjenja različitih tehnologija baterija: Li-ion (litij-ionske), Li-Po (litij-polimerne), Li-Fe (litij-željezo-fosfatne), NiMH (nikal-metal-hibridne), NiCd (nikal-kadmijeve) i Pb (olovne) što se vidi na slici 3.2. [10]

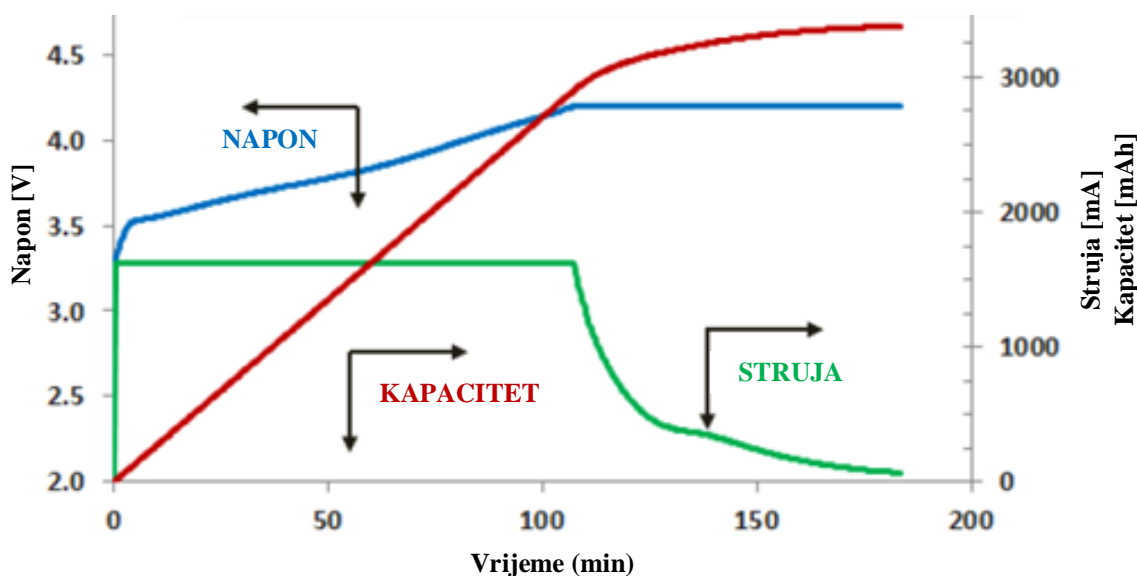


Slika 3.2. Izbornik za odabir tehnologije baterije [10]

Svaka vrsta tehnologije ima različit program punjenja/pražnjenja. Program litijskih baterija (Li-ion, Li-Po, Li-Fe) sadrži sljedeće načine rada: punjenje, način rada za pohranu, pražnjenje, ciklički način rada i način rada samo za balansiranje. [10]

Kod punjenja je moguće podesiti iznos struje punjenja, punjenje s balansiranjem ili bez njega (ako imamo više baterija spojenih u seriju gdje je potrebno nadzirati napon svake ćelije zasebno kako ne bi premašio preporučenu vrijednost), vršni napon punjenja te iznos struje pri kojoj se punjenje završava, a ona se definira u postotku podešene struje punjenja. [10]

Punjač prvo puni sa konstantnom strujom punjenja (CC – engl. constant current) koja se podesi u postavkama prije pokretanja procesa punjenja sve dok napon punjenja ne dosegne gornju graničnu vrijednost, tj. vršni napon punjenja koji tada postaje konstantan (CV – engl. constant voltage), nakon čega struja počne opadati te punjač prekida punjenje kada struja padne ispod određenog postotka podešene struje punjenja koji se postavi prije pokretanja procesa punjenja. Proces punjenja Li-ion baterije prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3. CC-CV karakteristika punjenja litij-ionske baterije [11]

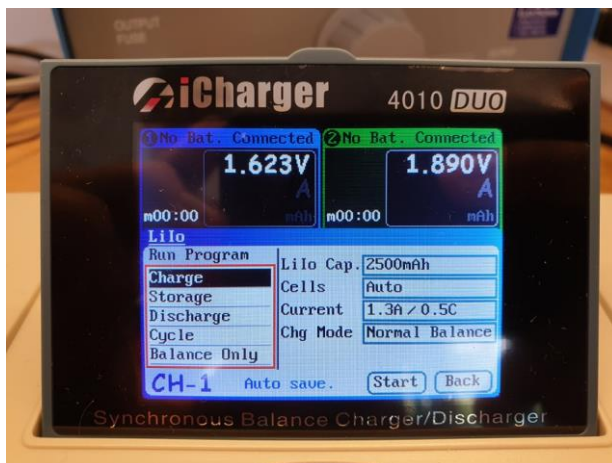
Kod pražnjenja moguće je podesiti iznos struje pražnjenje, donji napon pražnjenja i vrijednost struje pri kojoj se završava pražnjenje, a ona se definira u postotku struje pražnjenja. Slično kao i kod punjenja, baterija se prvo prazni konstantnom strujom, a napon opada do podešene vrijednosti donjeg napona pražnjenja, koji tada postaje konstantan, a struja pražnjenja počne opadati te pražnjač prekida pražnjenje kada struja padne ispod određenog postotka podešene struje pražnjenja koji se postavi prije pokretanja procesa pražnjenja. [10]

U slučaju da se baterija neće koristiti određeno vrijeme, postoji i način rada za pohranu baterije. Moguće je podesiti željeni napon ćelije koji se treba održati konstantnim, odnosno ako napon bude veći ili manji od te vrijednosti uređaj će prazniti odnosno puniti bateriju dok se ponovno ne dostigne željena vrijednost napona. [10]

Kod cikličkog načina rada može se odabrati način rada punjenje/pražnjenje ili pražnjenje/punjenje, broj ciklusa te vrijeme odmora između punjenja i pražnjenja. [10]

Za razliku od litijevih baterija, program olovnih i niklovnih baterija ima način rada punjenja, pražnjenja i cikličkog rada. Kod punjenja NiMH i NiCd baterija može se podesiti samo struja punjenja i dva načina rada (normalni i tzv. refleksni koji se koristi kada se želi smanjiti temperatura ćelije). Kod pražnjenja NiMh i NiCd baterija može se podesiti struja pražnjenja, donji napon pražnjenja te iznos struje pri kojemu se pražnjenje prekida izražen u postotku struje pražnjenja. [10]

Uređaj se spojnim vodičima spaja na istosmjerni izvor napajanja te sadrži dva kanala (CH-1 i CH-2) na koja je moguće spojnim vodičima priključiti držač za baterije. Potrebno je paziti na polaritet baterija jer će u suprotnom uređaj izbaciti grešku. Punjač se preko USB kabela spaja sa računalom gdje se preko softverskog programa uređaja Junsu iCharger 4010 Duo za punjenje/pražnjenje baterija vide dobiveni podatci punjenja/pražnjenja, odnosno napon, struja, kapacitet, temperatura, vrijeme itd. Nakon što se odabere željeni kanal i tip baterije (slika 3.2.), otvaraju se izbornici (slika 3.4.). U lijevom se odabire način rada (punjenje, pražnjenje, ciklički rad, pohrana, balansiranje), a u desnom se podešavaju parametri (struja punjenja/pražnjenja, donji napon pražnjenja, gornji napon punjenja, kapacitet baterije itd.). Kada se sve podesi, pokreće se proces punjenja/pražnjenja i snimaju rezultati (slika 3.5.). Osim što se rezultati prikazuju grafički u softverskom programu, također se izvoze u Excel formatu datoteke nakon čega je moguće vršiti obradu istih.



Slika 3.4. Prikaz izbornika za odabir načina rada i podešavanje parametara



Slika 3.5. Uređaj podešen za rad na dva kanala i snimanje parametara na računalu

Tablica 3.1. Tehničke karakteristike uređaja [10]

Ulazni napon	9,0 – 50,0V (DC)
Maksimalna ulazna struja	<65A
Maksimalna struja punjenja/pražnjenja	70A (sinkroni način) 40A (asinkroni način)
Maksimalna snaga punjenja	2000W (kanal 1400W pri naponu >23,5V)
Maksimalna snaga pražnjenja	200W (kanal 130W)
Maksimalna snaga regenerativnog pražnjenja	2000W (kanal 1400W)
Maksimalna snaga dodatnog pražnjenja	3200W (kanal 1600W pri 40V/40A)
Maksimalna struja pri balansiranju	2,4A (sinkroni način) 1,2A (asinkroni način)

Li-ion baterije nad kojima će se vršiti analiza su: Panasonic NCR18650B, LG 18650HG2 i SONY US18650VTC5. Svaki od tih tipova ima različite kapacitete i nazivne faktore punjenja/pražnjenja koji će biti tablično prikazani za svaki tip zasebno.

3.2. Panasonic NCR18650B

Na slici 3.6. prikazan je izgled Panasonic NCR1860B baterije. Tehničke karakteristike baterije prikazane su u tablici 3.2. Maksimalna struja punjenja od 1,625A odgovara 0,5C faktoru punjenja, a maksimalna struja pražnjenja od 6,5A odgovara 2C faktoru pražnjenja.



Slika 3.6. Panasonic NCR18650B baterija

Tablica 3.2. Tehničke karakteristike Panasonic NCR18650B baterije [11]

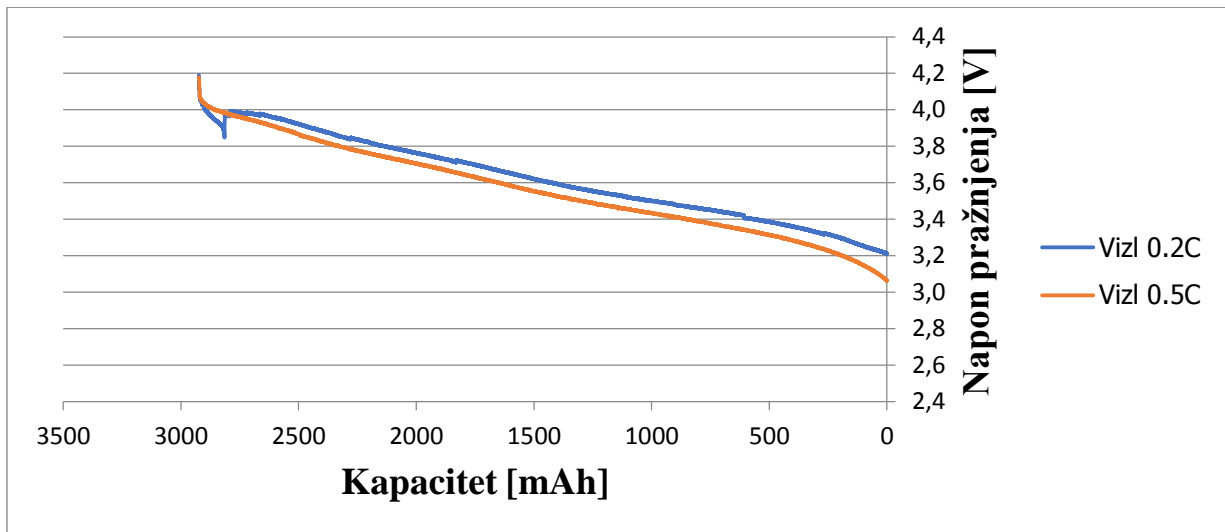
Nazivni kapacitet [mAh]	3250
Nazivni napon [V]	3,6
Vršni napon punjenja [V]	4,2
Maksimalna struja punjenja [A]	1,625
Nazivna struja punjenja [A]	1,625
Nazivna struja pražnjenja [A]	0,65
Donji napon pražnjenja [V]	2,5
Maksimalna struja pražnjenja [A]	6,5
Specifična energija [Wh/kg]	243
Gustoća energije [Wh/l]	676

Analizirati će se utjecaj različitih faktora C punjenja/pražnjenja na karakteristike (grafički):

- napon punjenja/pražnjenja,
- struju punjenja/pražnjenja,
- snagu punjenja/pražnjenja,
- energiju punjenja/pražnjenja,
- stanje energije.

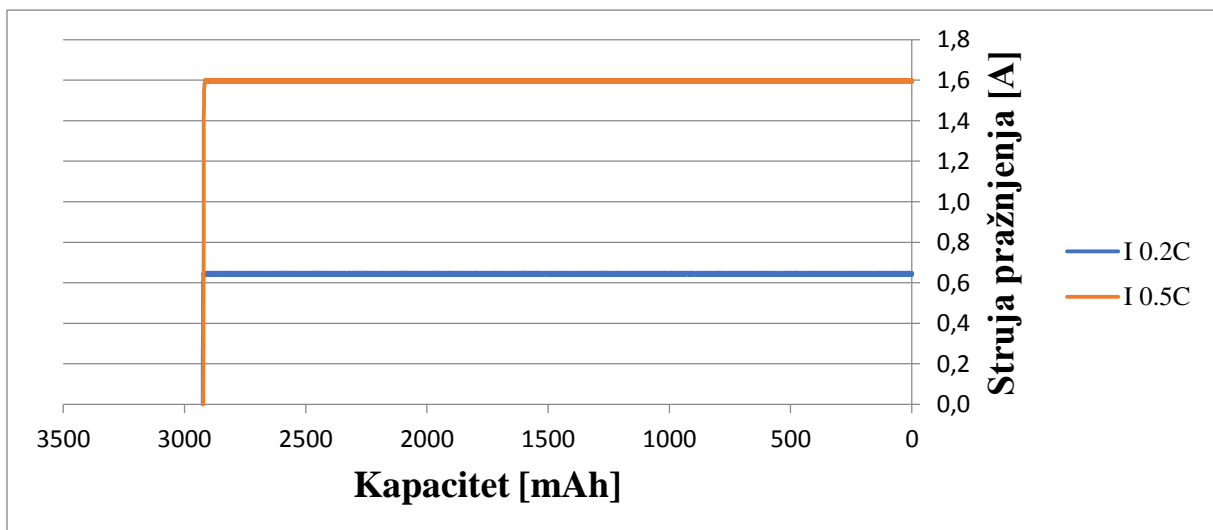
Generirati će se tablica sa povratnom učinkovitosti za pojedine faktore C punjenja/pražnjenja (0,2C i 0,5C) te će se grafički prikazati povratna učinkovitost u ovisnosti o faktorima C punjenja/pražnjenja (0,2C i 0,5C).

3.2.1. Pražnjenje



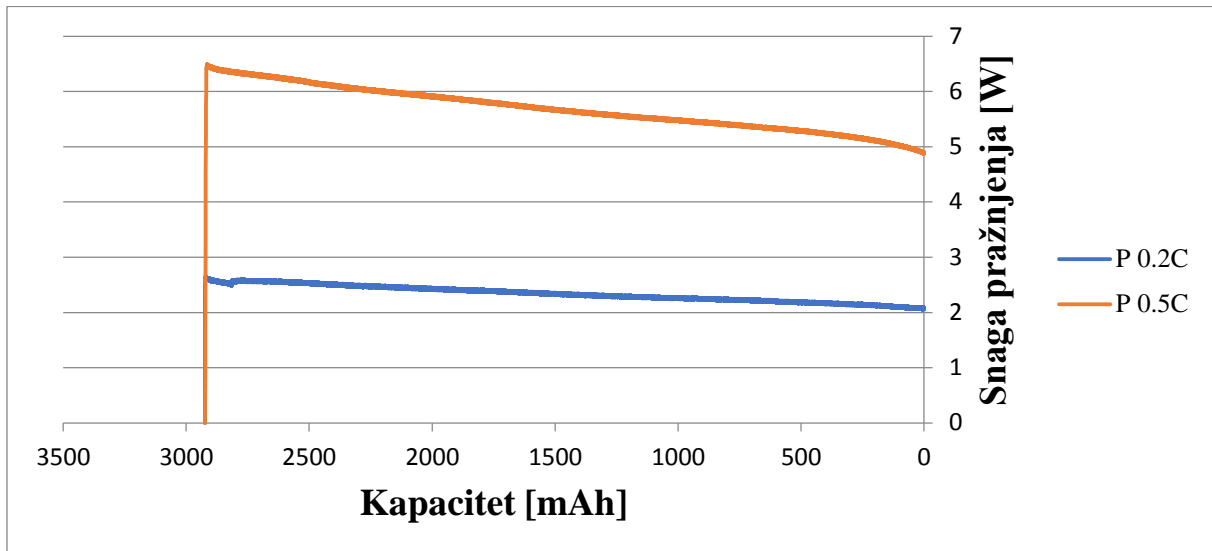
Slika 3.7. Utjecaj različitih faktora C na napon pražnjenja Panasonic Li-ion baterije

Napon pražnjenja za 0,2C i 0,5C linearno opada od početne vrijednosti 4,2V do vrijednosti napona oko 3V kada kapacitet baterije dosegne 0 mAh. Napon ne padne do donjeg napona pražnjenja od 2,5V jer se baterija ispraznila prije nego je napon dosegao tu vrijednost. Kako pražnjenje faktorom 0,2C traje znatno dulje od pražnjenja faktorom 0,5C, vidljivo je kako prilikom pražnjenja faktorom 0,5C napon brže pada tj. za iste vrijednosti kapaciteta baterije, napon pražnjenja faktora 0,5C je manji od napona pražnjenja faktora 0,2C.



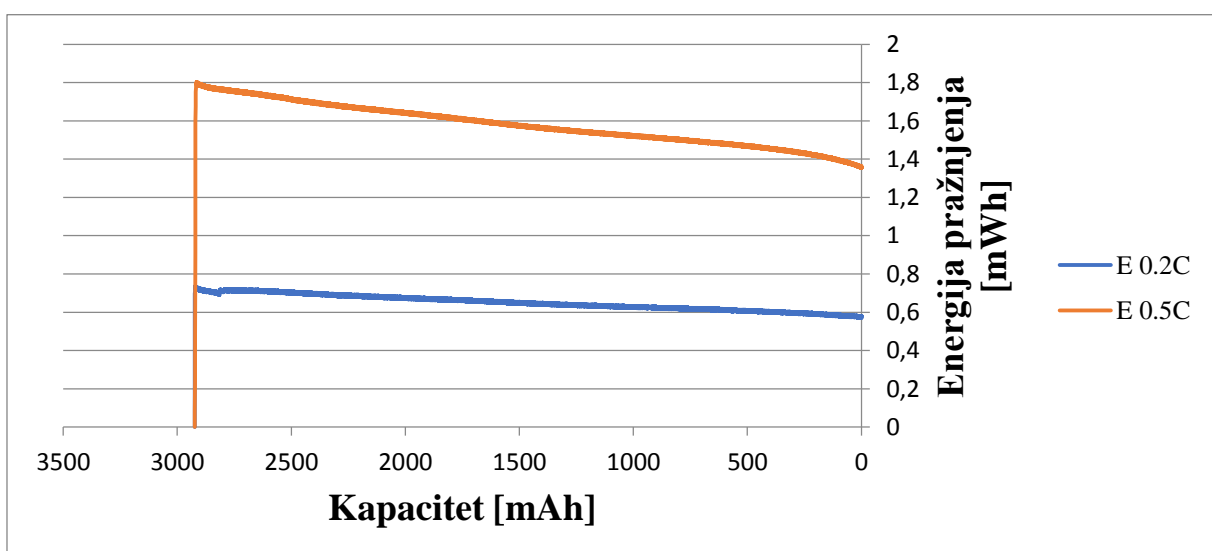
Slika 3.8. Utjecaj različitih faktora C na struju pražnjenja Panasonic Li-ion baterije

Struja pražnjenja kod 0,2C i 0,5C se ne mijenja te ostaje konstanta sve do 0 mAh jer napon nije pao do donjeg napona pražnjenja vrijednosti 2,5V jer se baterija ispraznila prije nego je do toga došlo. Vidljiva je razlika u struji pražnjenja za različite faktore C, što je veći faktor C, veća je struja pražnjenja. Tako je za 0,5C struja pražnjenja 1,6A, a za 0,2C struja pražnjenja 0,65A.



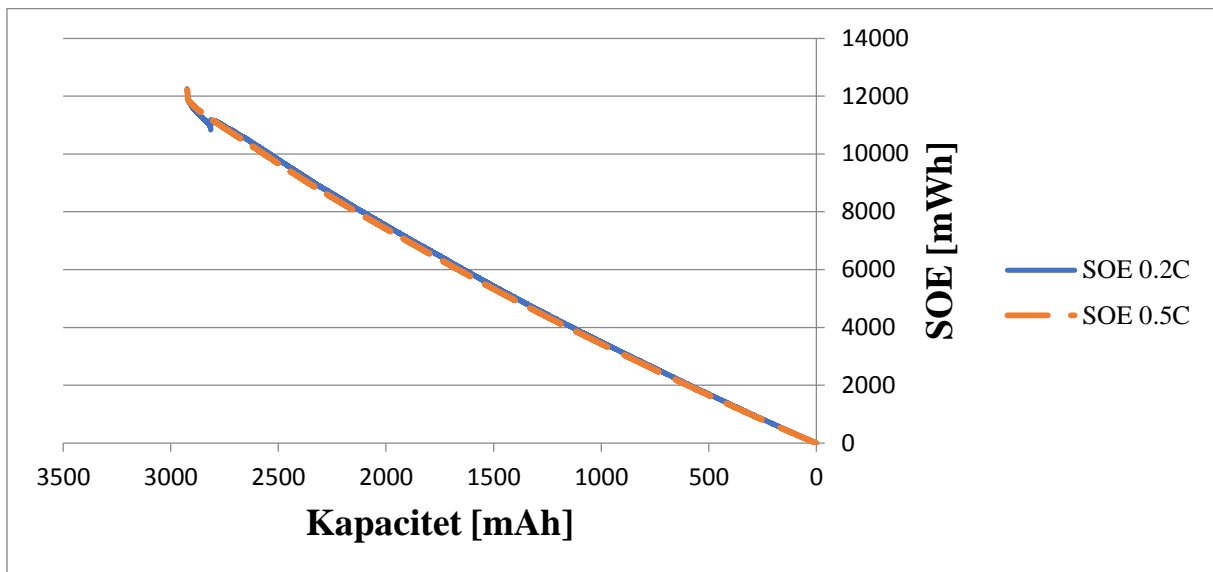
Slika 3.9. Utjecaj različitih faktora C na snagu pražnjenja Panasonic Li-ion baterije

Pošto je struja za faktore 0,2C i 0,5C konstanta te napon linearno opada, snaga prati trend umnoška napona i struje te linearno opada manjim intenzitetom od napona. Što je veći faktor C veća je i struja pražnjenja što znači da je i veća snaga pražnjenja što se u grafu i vidi.



Slika 3.10. Utjecaj različitih faktora C na energiju pražnjenja Panasonic Li-ion baterije

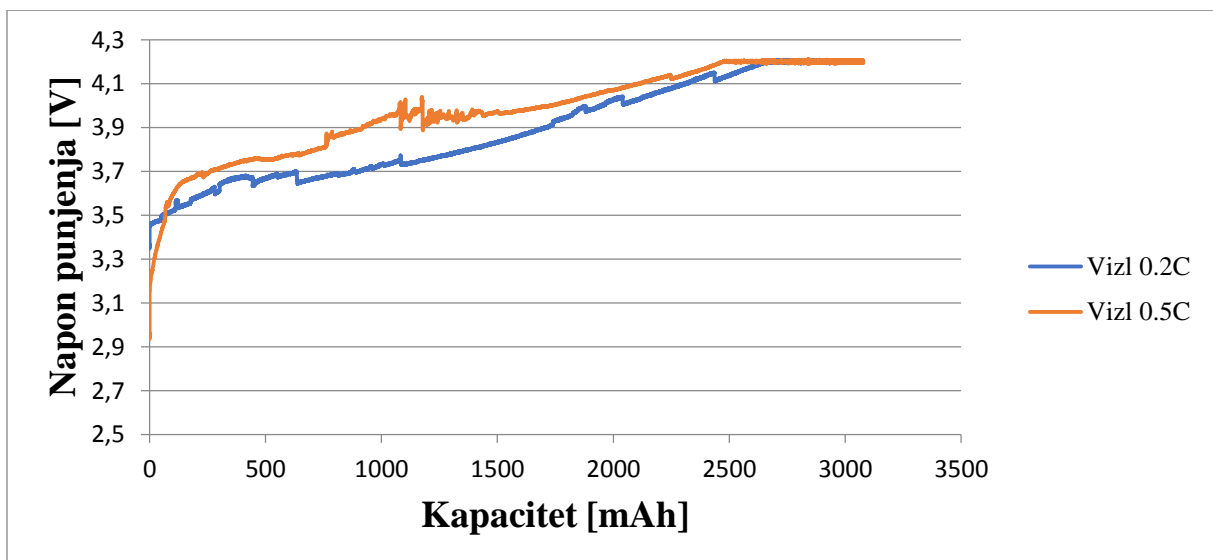
Energija pražnjenja prati trend snage pražnjenja.



Slika 3.11. Utjecaj različitih faktora C na SOE Panasonic Li-ion baterije

Vidljivo je da prilikom pražnjenja različitim faktorima C, stanje energije linearno opada te nema značajnog utjecaja na stanje energije baterije.

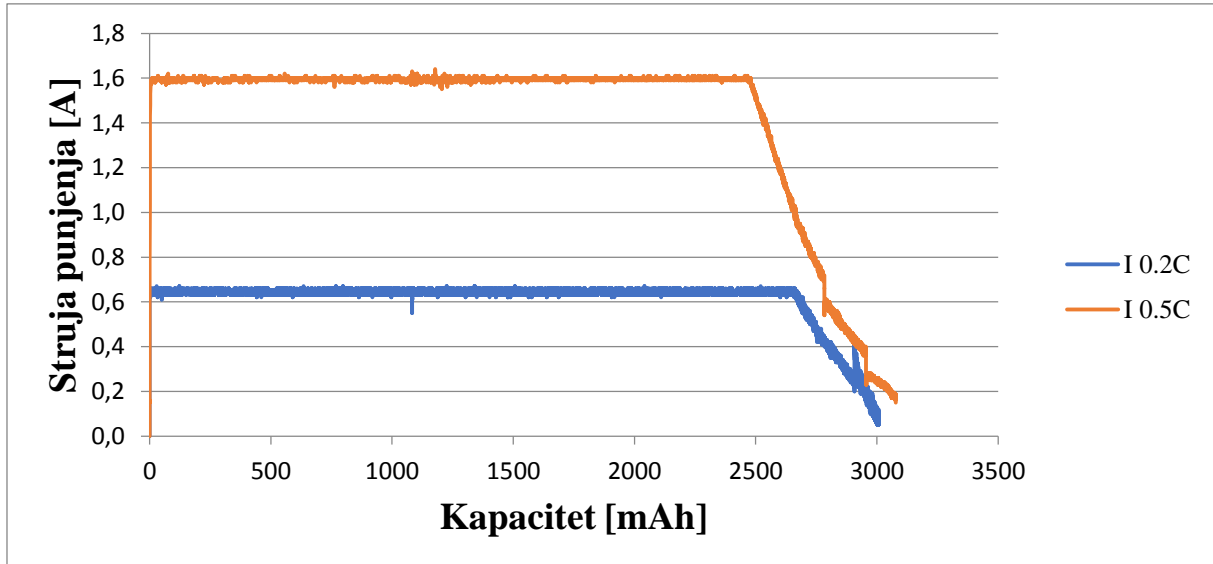
3.2.2. Punjenje



Slika 3.12. Utjecaj različitih faktora C na napon punjenja Panasonic Li-ion baterije

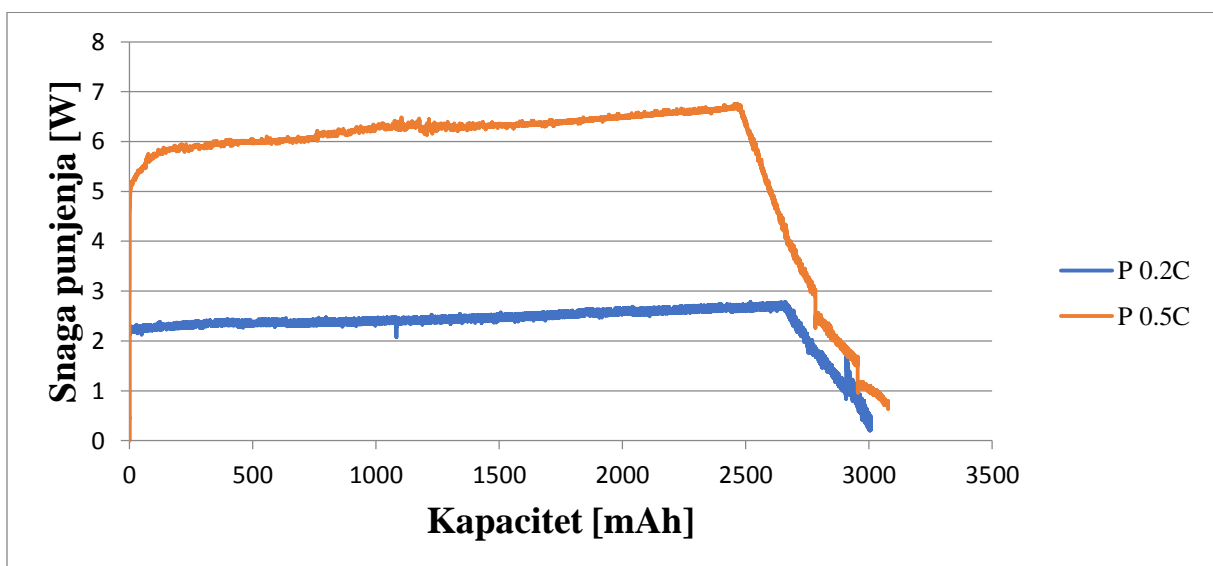
Napon punjenja linearno raste sve dok ne dosegne vrijednost vršnog napona punjenja 4,2V kada se ustali te je konstantan sve dok se baterija ne napuni. Kako punjenje faktorom 0,2C traje znatno dulje od punjenja faktorom 0,5C, vidljivo je kako prilikom punjenja faktorom

0,5C napon brže raste tj. za iste vrijednosti kapaciteta baterije, napon punjenja faktora 0,5C je veći od napona punjenja faktora 0,2C sve dok se napon ne ustali na vršnoj vrijednosti. Primjetno i da pri faktoru 0,5C CV način rada nastupi pri manjem kapacitetu nego pri faktoru 0,2C.



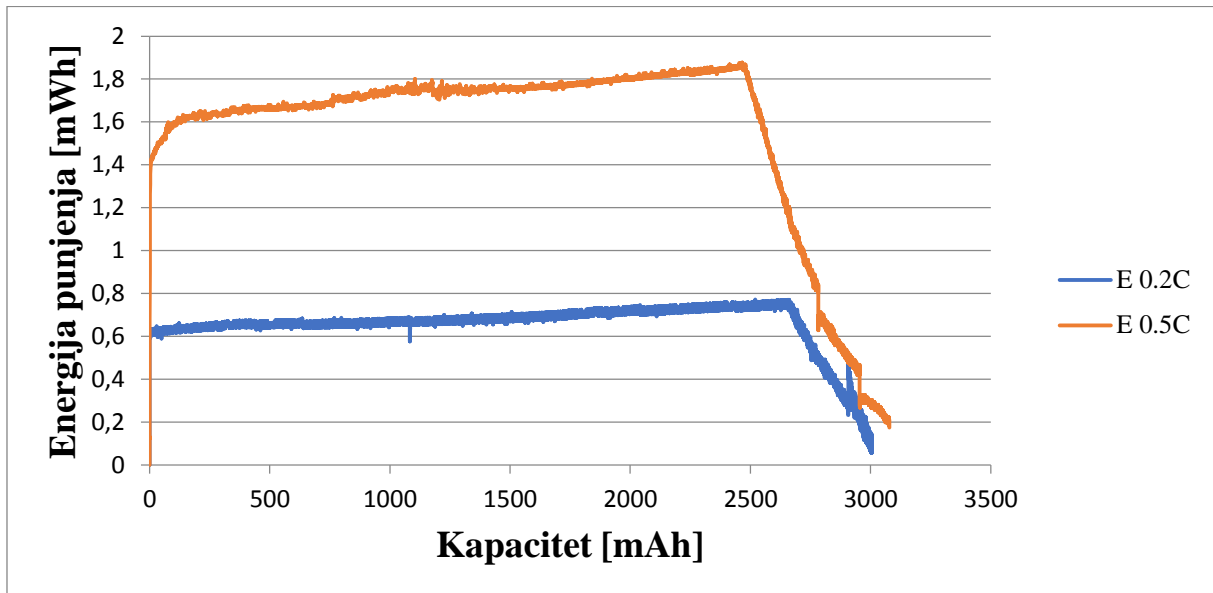
Slika 3.13. Utjecaj različitih faktora C na struju punjenja Panasonic Li-ion baterije

Struja punjenja je konstantna sve dok se napon ne ustali na vršnoj vrijednosti te struja krene naglo padati. Što je veći faktor C veća je i struja punjenja što je vidljivo u grafu. Struja punjenja za faktor 0,5C je znatno veća od struje punjenja za faktor 0,2C. Primjetno i da pri faktoru 0,5C CV način rada nastupi pri manjem kapacitetu nego pri faktoru 0,2 C.



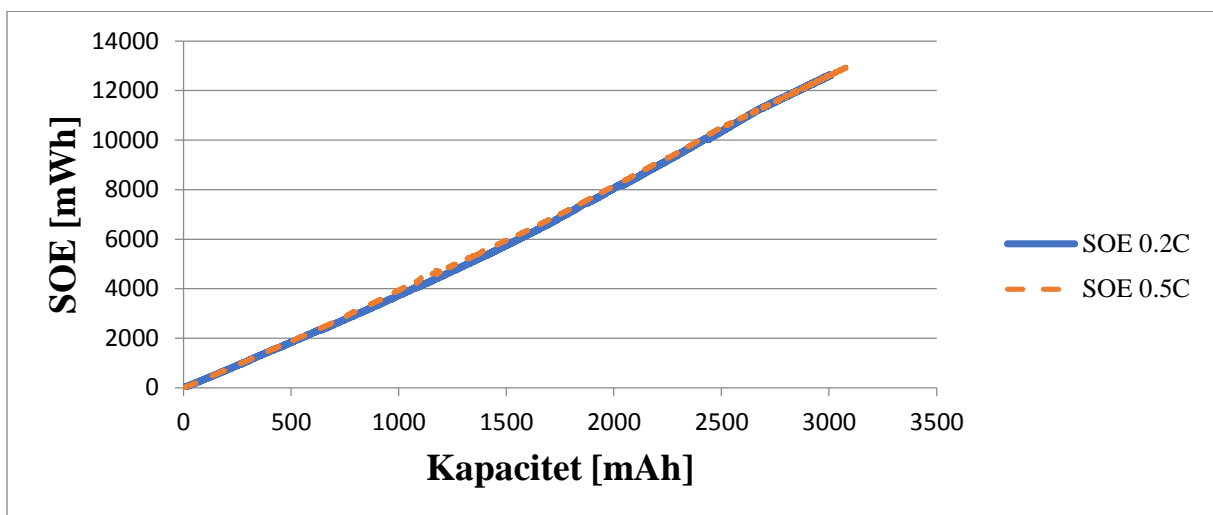
Slika 3.14. Utjecaj različitih faktora C na snagu punjenja Panasonic Li-ion baterije

Pošto je struja za faktore 0,2C i 0,5C konstanta te napon linearno raste, snaga prati trend umnoška napona i struje te linearno raste manjim intenzitetom od napona sve dok se napon ne ustali na vršnoj vrijednosti kada struja počne naglo opadati, što naravno utječe i na snagu koja proporcionalno prati pad struje. Što je veći faktor C veća je i struja punjenja što znači da je i veća snaga punjenja što se u grafu i vidi.



Slika 3.15. Utjecaj različitih faktora C na energiju punjenja Panasonic Li-ion baterije

Energija punjenja prati trend snage punjenja.



Slika 3.16. Utjecaj različitih faktora C na SOE Panasonic Li-ion baterije

Nema znatan utjecaj na stanje energije baterije.

3.2.3. Povratna učinkovitost

Povratna učinkovitost računa se prema izrazu (2-4):

$$\mu = \frac{E_{pr}}{E_{pu}} [\%] \quad (2-4)$$

gdje je E_{pr} ukupna energija utrošena tijekom procesa pražnjenja baterije, a E_{pu} ukupna energija utrošena tijekom procesa punjenja baterije.

Proračun za 0,2C faktor:

$$E_{pr} = 10547,25 \text{ mWh}$$

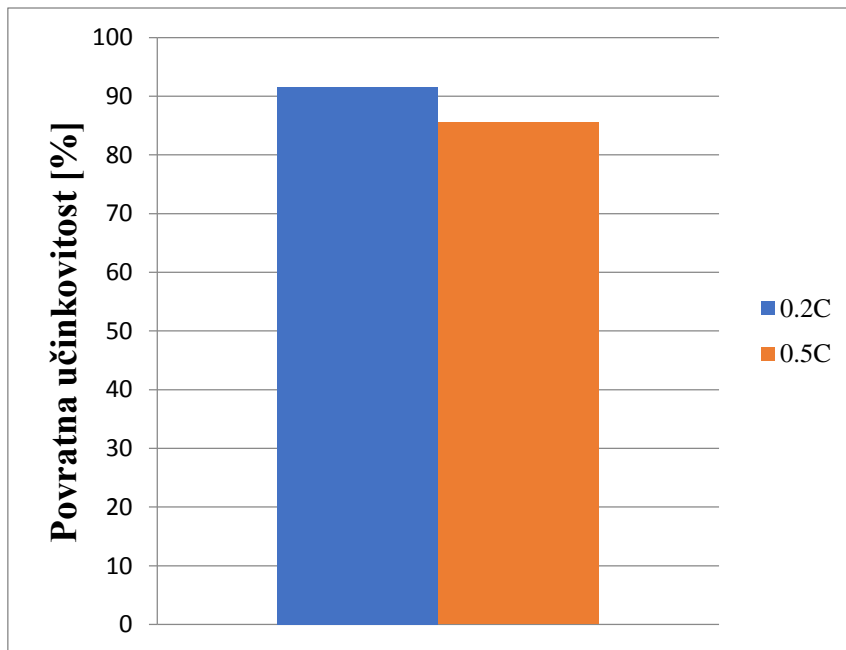
$$E_{pu} = 11515,49 \text{ mWh}$$

$$\mu = \frac{E_{pr}}{E_{pu}} \cdot 100\% = \frac{10547,25}{11515,49} \cdot 100\% = 91,59 \%$$

Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost Panasonic Li-ion baterije prikazan je tablično u tablici 3.3. i grafički na slici 3.17.

Tablica 3.3. Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost Panasonic Li-ion baterije

Faktor C	0,2C	0,5C
Ukupna energija utrošena tijekom pražnjenja [mWh]	10547,25	10363,25
Ukupna energija utrošena tijekom punjenja [mWh]	11515,49	12114,26
Povratna učinkovitost [%]	91,59	85,55



Slika 3.17. Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost Panasonic Li-ion baterije

Iz proračuna, tablice i grafa vidi se da je povratna učinkovitost baterije bolja kod faktora 0,2C nego kod faktora 0,5C. To se očekivalo jer je vremenski period punjenja/pražnjenja kod faktora 0,2C duži nego kod faktora 0,5C jer se radi sa manjim vrijednostima struje punjenja/pražnjenja.

3.3. LG 18650HG2 baterija

Na slici 3.18. prikazan je izgled ovog modela baterije. U tablici 3.4. prikazane su tehničke karakteristike proizvođača za bateriju. Maksimalna struja punjenja iznosi 4A što odgovara 1,33C faktoru punjenja, a maksimalna struja pražnjenja 20A što odgovara 6,67C faktoru pražnjenja.



Slika 3.18. Izgled LG 18650HG2 baterije

Tablica 3.4. Tehničke karakteristike LG 18650HG2 baterije [12]

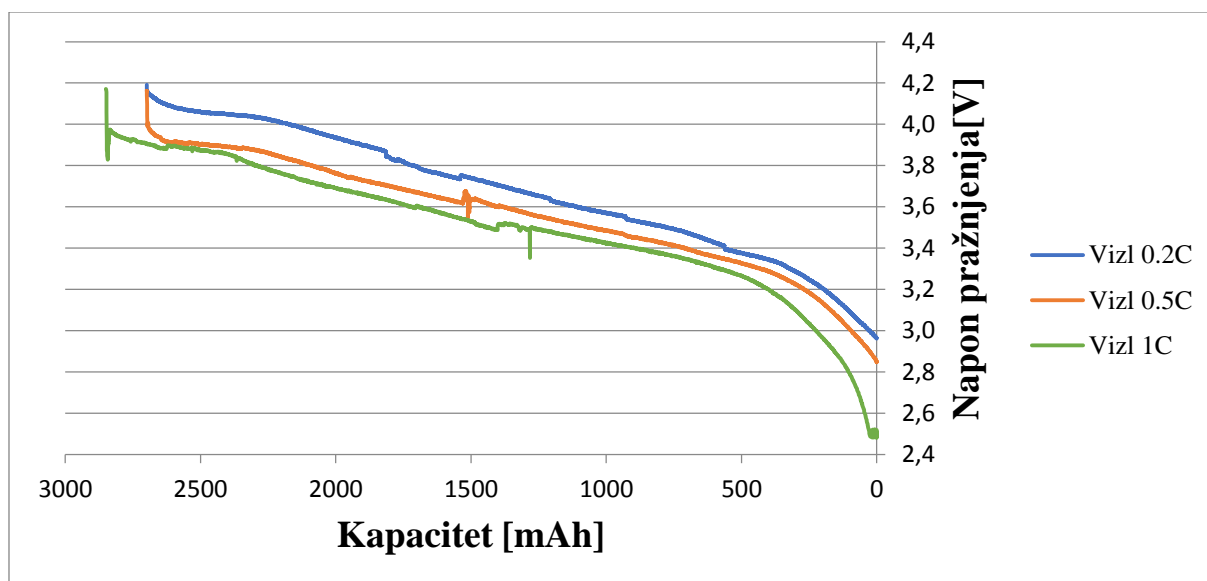
Nazivni kapacitet [mAh]	3000
Nazivni napon [V]	3,6
Vršni napon punjenja [V]	4,2
Maksimalna struja punjenja [A]	4
Nazivna struja punjenja [A]	1,5
Nazivna struja pražnjenja [A]	0,6
Donji napon pražnjenja [V]	2,5
Maksimalna struja pražnjenja [A]	20
Specifična energija [Wh/kg]	240

Analizirati će se utjecaj različitih faktora C punjenja/pražnjenja na karakteristike (grafički):

- napon punjenja/pražnjenja,
- struju punjenja/pražnjenja,
- snagu punjenja/pražnjenja,
- energiju punjenja/pražnjenja,
- stanje energije.

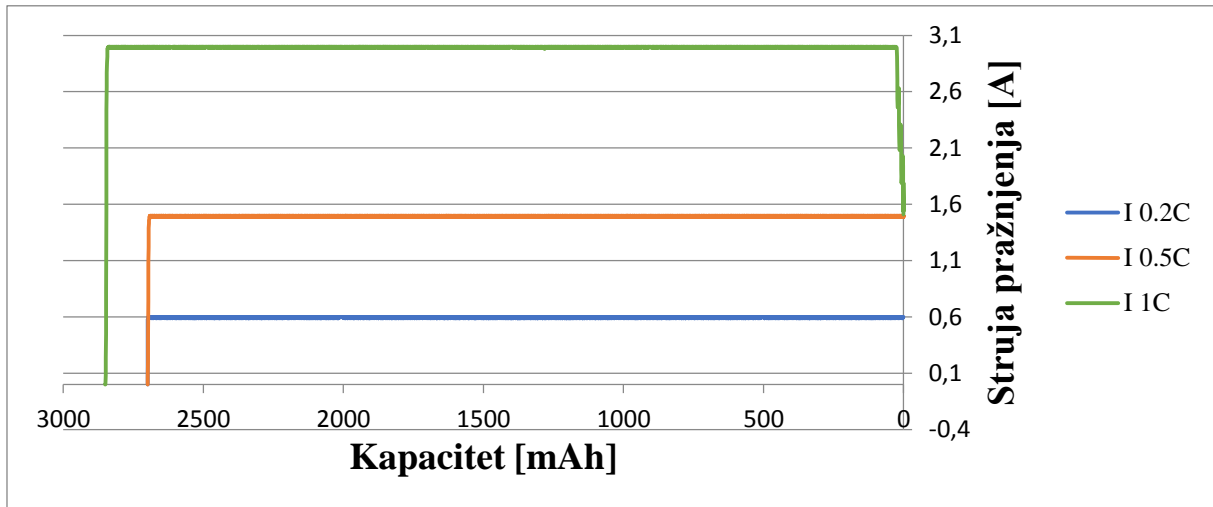
Generirati će se tablica sa povratnom učinkovitosti za pojedine faktore C punjenja/pražnjenja (0,2C, 0,5C i 1C) te će se grafički prikazati povratna učinkovitost u ovisnosti o faktorima C punjenja/pražnjenja (0,2C, 0,5C i 1C).

3.3.1. Pražnjenje



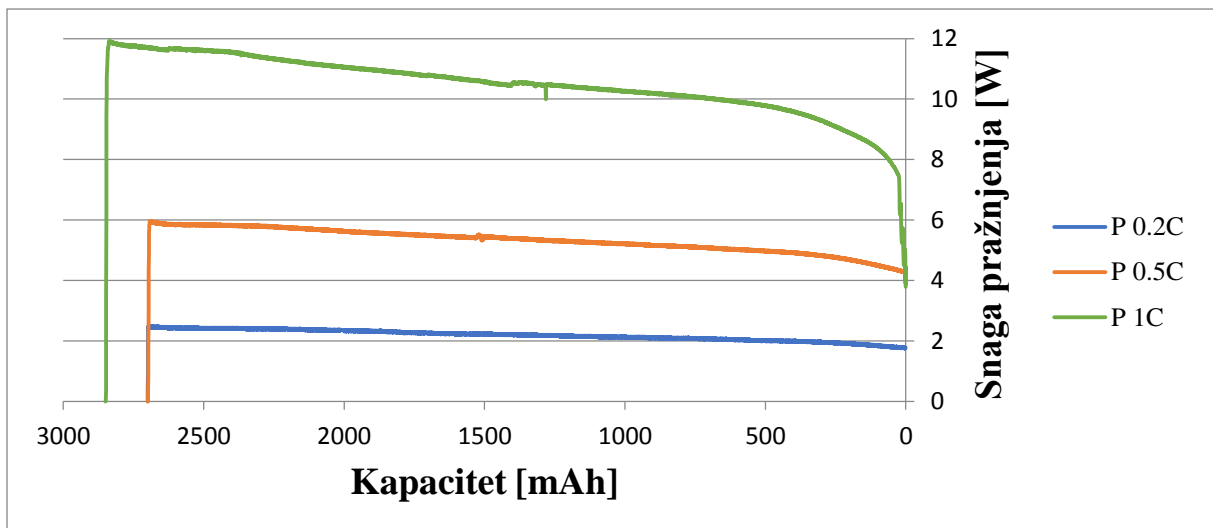
Slika 3.19. Utjecaj različitih faktora C na napon pražnjenja LG Li-ion baterije

Sličan trend kao kod Panasonic baterije. Jedina razlika je što kod faktora 1C napon pražnjenja padne do vrijednosti donjeg napona pražnjenja te se ustali na toj vrijednosti.



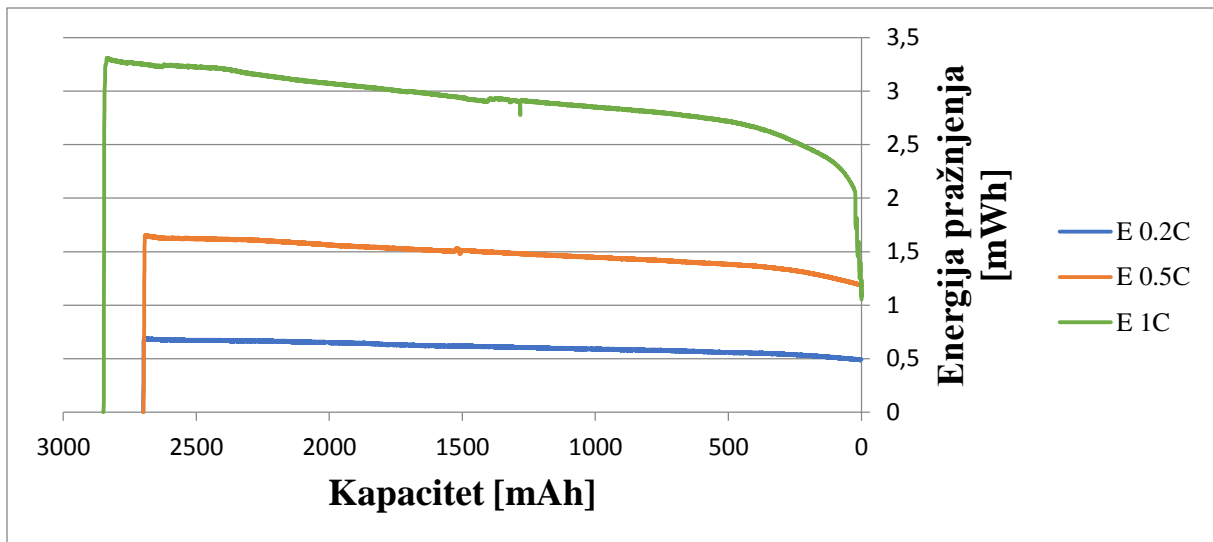
Slika 3.20. Utjecaj različitih faktora C na struju pražnjenja LG Li-ion baterije

Sličan trend kao kod Panasonic baterije. Jedina razlika je što kod faktora 1C struja pražnjenja počne padati nakon što napon pražnjenja padne do vrijednosti donjeg napona pražnjenja te se ustali na toj vrijednosti.



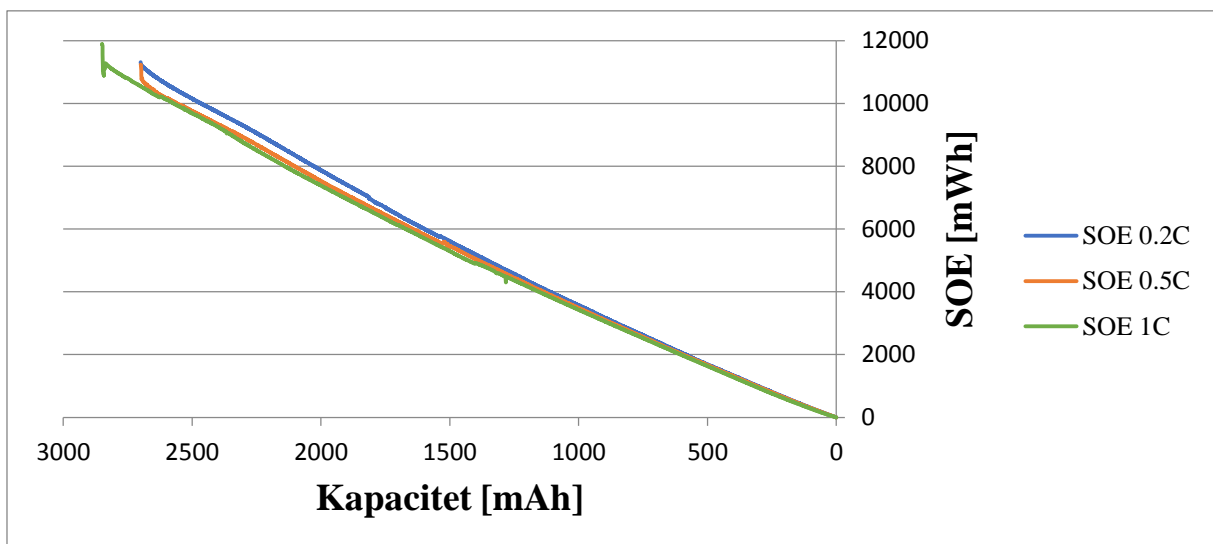
Slika 3.21. Utjecaj različitih faktora C na snagu pražnjenja LG Li-ion baterije

Sličan trend kao kod Panasonic baterije. Jedina razlika je što kod faktora 1C struja pražnjenja počne padati nakon što napon pražnjenja padne do vrijednosti donjeg napona pražnjenja te se ustali na toj vrijednosti, a samim time i snaga pražnjenja počne padati.



Slika 3.22. Utjecaj različitih faktora C na energiju pražnjenja LG Li-ion baterije

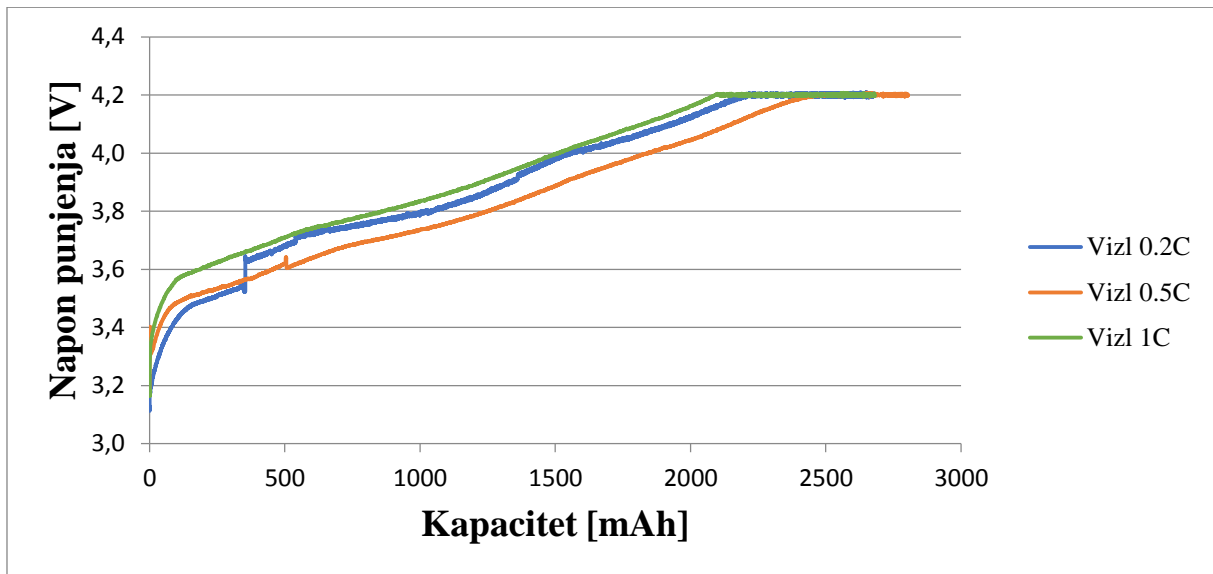
Energija pražnjenja prati trend snage pražnjenja.



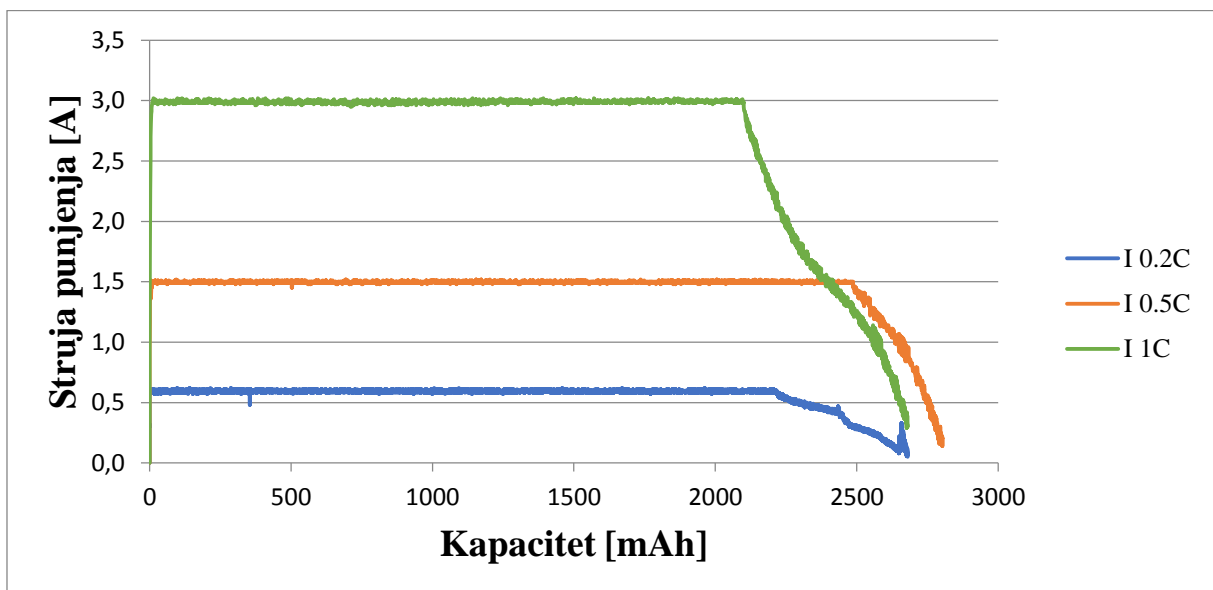
Slika 3.23. Utjecaj različitih faktora C na SOE LG Li-ion baterije

Sličan utjecaj kao kod Panasonic baterije.

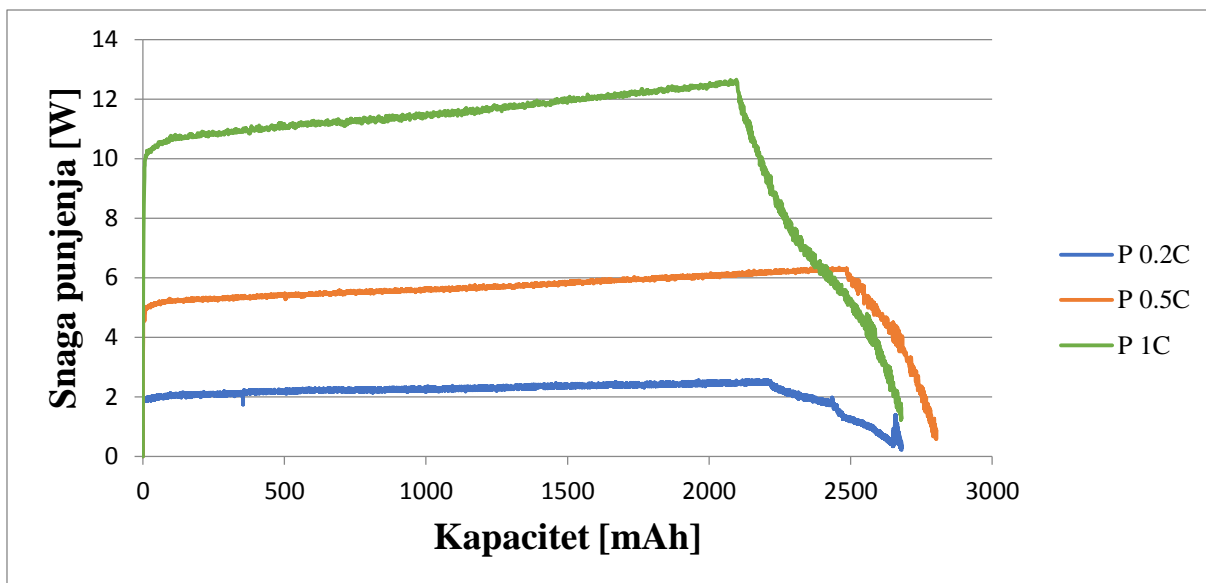
3.3.2. Punjenje



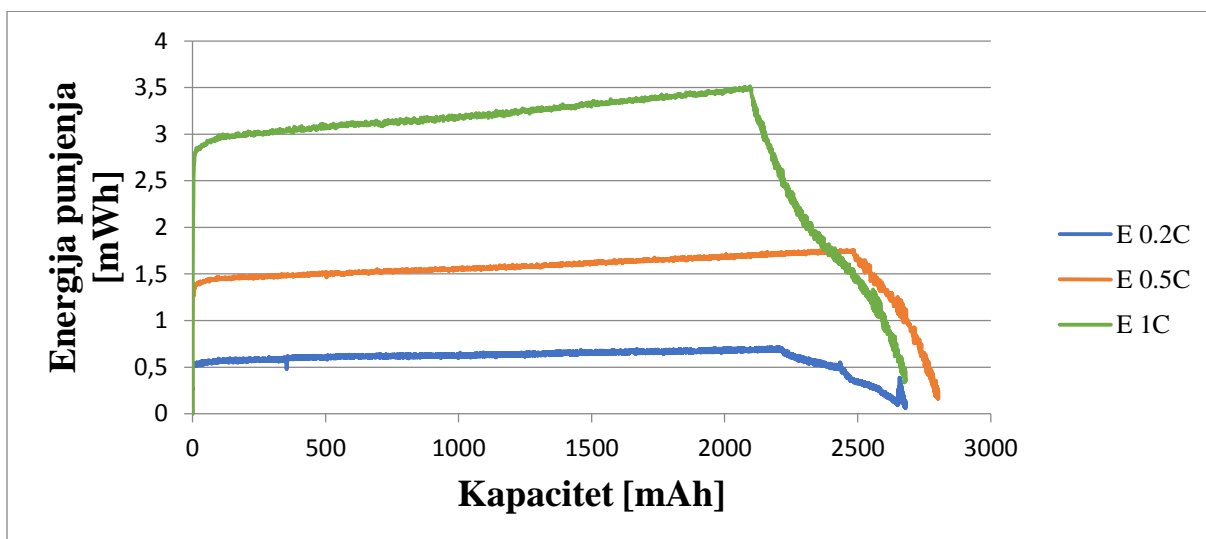
Slika 3.24. Utjecaj različitih faktora C na napon punjenja LG Li-ion baterije



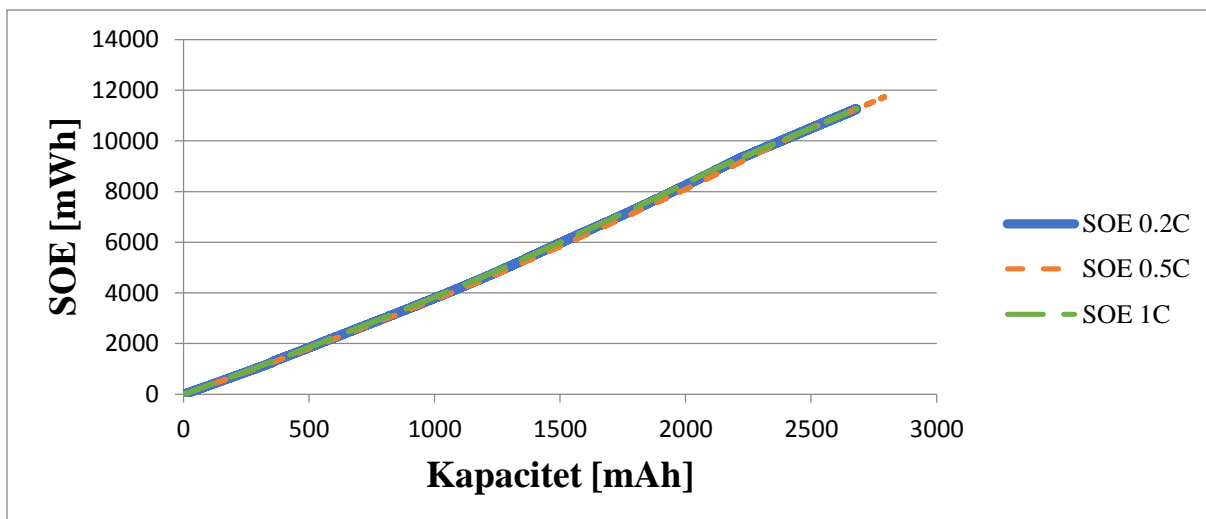
Slika 3.25. Utjecaj različitih faktora C na struju punjenja LG Li-ion baterije



Slika 3.26. Utjecaj različitih faktora C na snagu punjenja LG Li-ion baterije



Slika 3.27. Utjecaj različitih faktora C na energiju punjenja LG Li-ion baterije



Slika 3.28. Utjecaj različitih faktora C na SOE LG Li-ion baterije

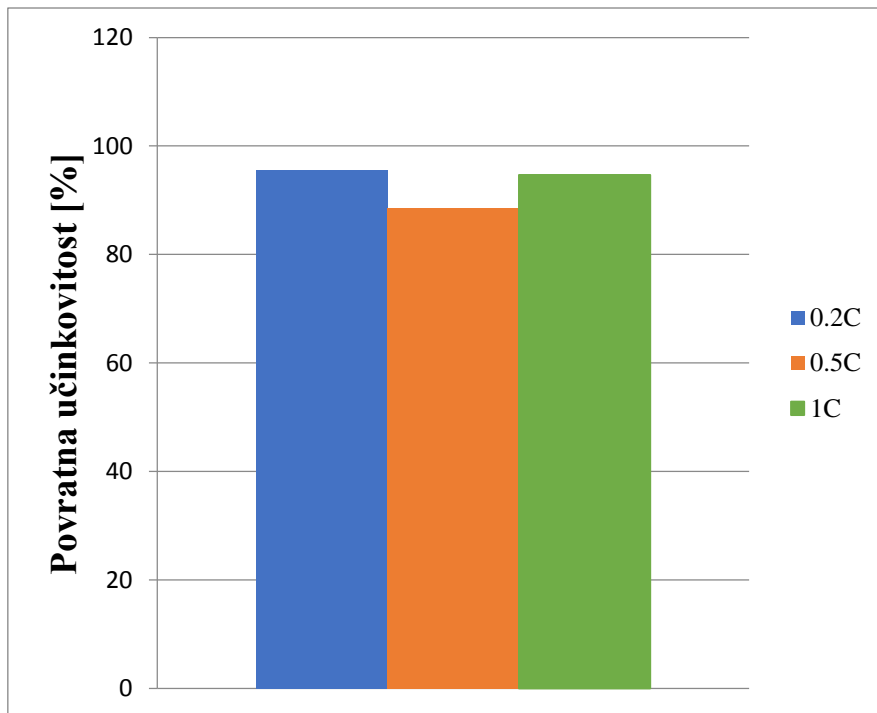
Utjecaj različitih faktora C punjenja na parametre LG Li-ion baterije sličan je utjecaju različitih faktora C punjenja na parametre Panasonic Li-ion baterije koji je ranije opisan.

3.3.3. Povratna učinkovitost

Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost LG Li-ion baterije prikazan je tablično u tablici 3.5. i grafički na slici 3.29.

Tablica 3.5. Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost LG Li-ion baterije

Faktor C	0,2C	0,5C	1C
Ispražnjenja energija [mWh]	9858,31	9543,14	9962,26
Uložena energija [mWh]	10318,07	10769,55	10522,46
Povratna učinkovitost [%]	95,54	88,61	94,68



Slika 3.29. Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost LG Li-ion baterije

Sličan trend kao kod Panasonic baterije. Razlika je kod 1C faktora. Povratna učinkovitost bi trebala opadati povećanjem faktora C, a u ovom slučaju faktor 1C ne prati taj trend. To se može pripisati grešci uređaja za punjenje/pražnjenje baterija. Iz grafova pražnjenja vidljivo je kako kod faktora 0,2C i 0,5C iznos ispražnjenog kapaciteta je isti, dok je kod faktora 1C veći. Razlog je što je kod faktora 0,2C i 0,5C uređaj za punjenje/pražnjenje baterija kod iznosa ispražnjenog kapaciteta od 2699 mAh ispisao grešku „exceed safe capacity limit“ što znači da je prekoračena donja granična vrijednost kapaciteta dok kod faktora 1C tu grešku nije ispisao te ispražnjeni kapacitet od 2850 mAh nagovještuje i veću ispražnjenu energiju baterije zbog čega je uvjetno i veća povratna učinkovitost.

3.4. SONY US18650VTC5 baterija

Na slici 3.30. prikazan je izgled ovog modela baterije. U tablici 3.6. prikazane su tehničke karakteristike proizvođača za ovu bateriju. Maksimalna struja punjenja iznosi 2,5A što odgovara 1C faktoru punjenja, a maksimalna struja pražnjenja iznosi 20A što odgovara 8C faktoru pražnjenja.



Slika 3.30. Izgled SONY US18650VTC5 baterije

Tablica 3.6. Tehničke karakteristike SONY US18650VTC5 baterije [13]

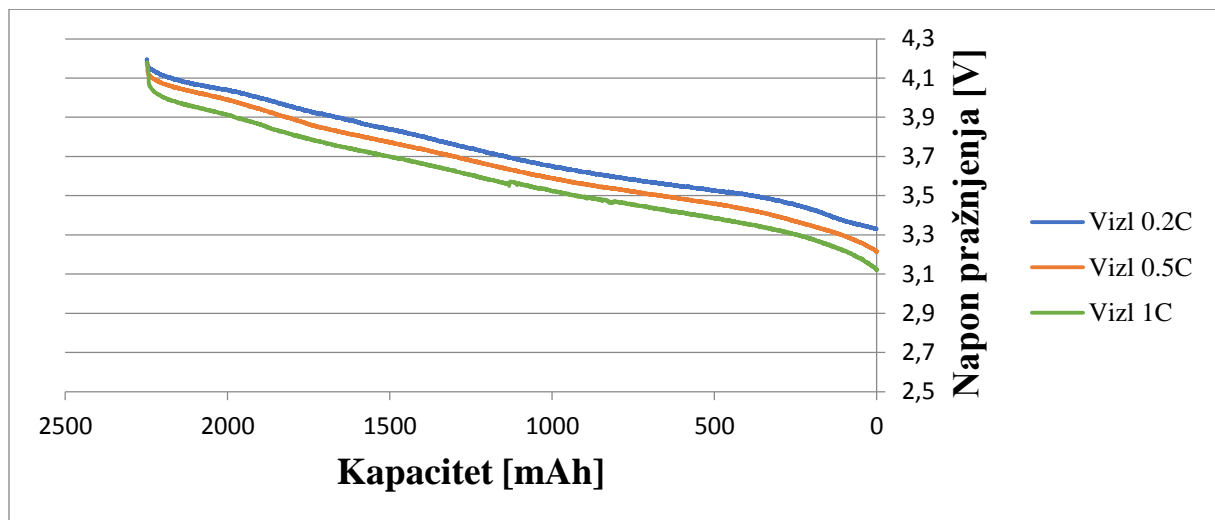
Nazivni kapacitet [mAh]	2500
Nazivni napon [V]	3,6
Vršni napon punjenja [V]	4,2
Maksimalna struja punjenja [A]	2,5
Nazivna struja punjenja [A]	2,5
Nazivna struja pražnjenja [A]	0,5
Donji napon pražnjenja [V]	2,5
Maksimalna struja pražnjenja [A]	20

Analizirati će se utjecaj različitih faktora C punjenja/pražnjenja na karakteristike (grafički):

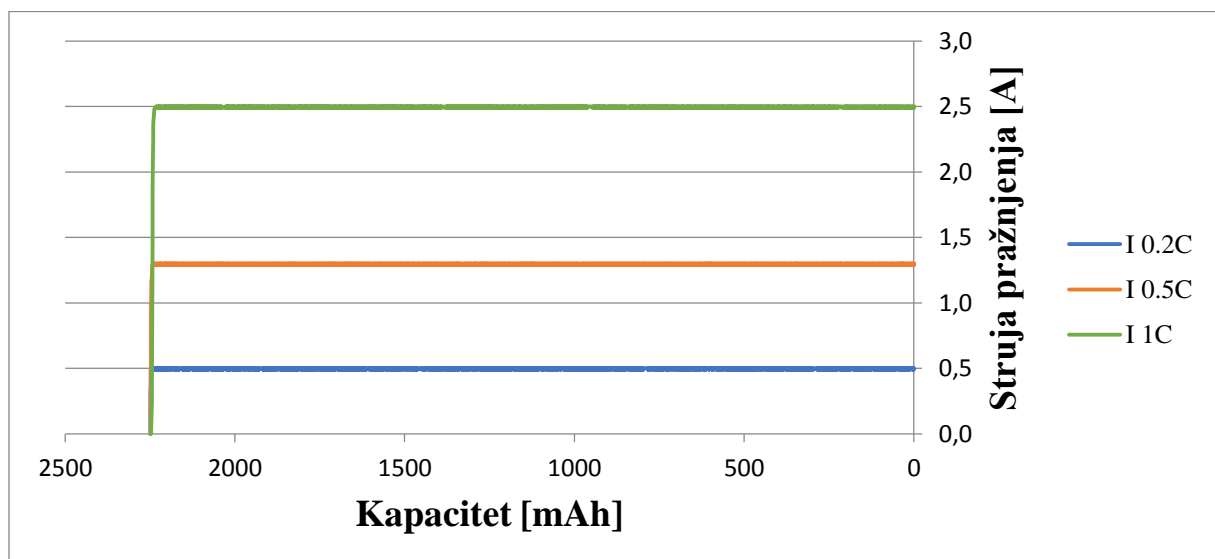
- napon punjenja/pražnjenja,
- struju punjenja/pražnjenja,
- snagu punjenja/pražnjenja,
- energiju punjenja/pražnjenja,
- stanje energije.

Generirati će se tablica sa povratnom učinkovitosti za pojedine faktore C punjenja/pražnjenja (0,2C, 0,5C i 1C) te će se grafički prikazati povratna učinkovitost u ovisnosti o faktorima C punjenja/pražnjenja (0,2C, 0,5C i 1C).

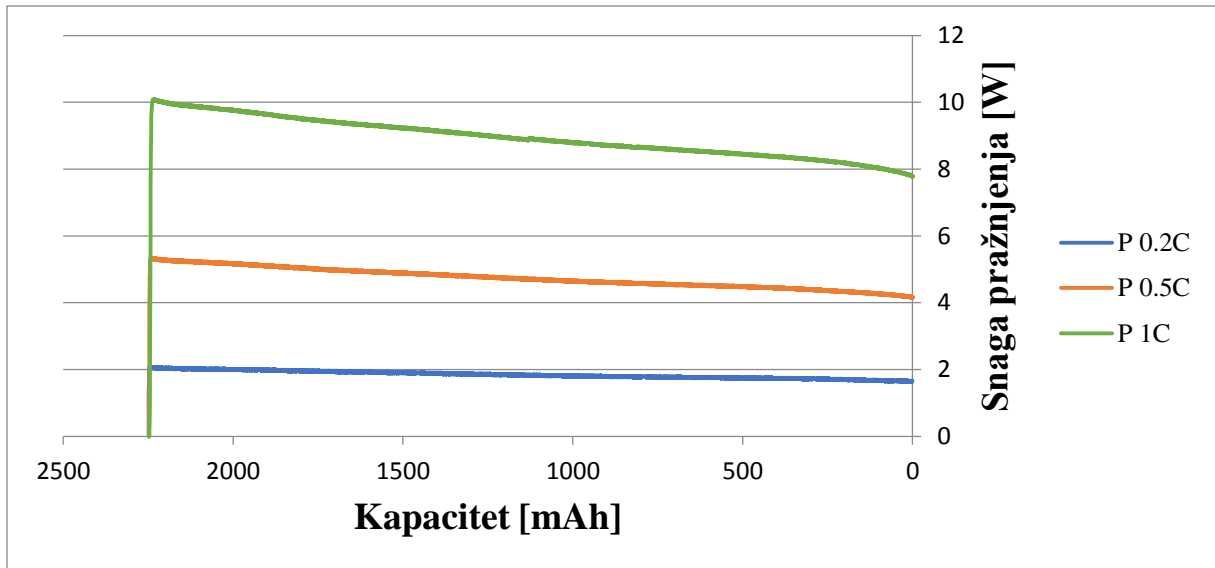
3.4.1. Pražnjenje



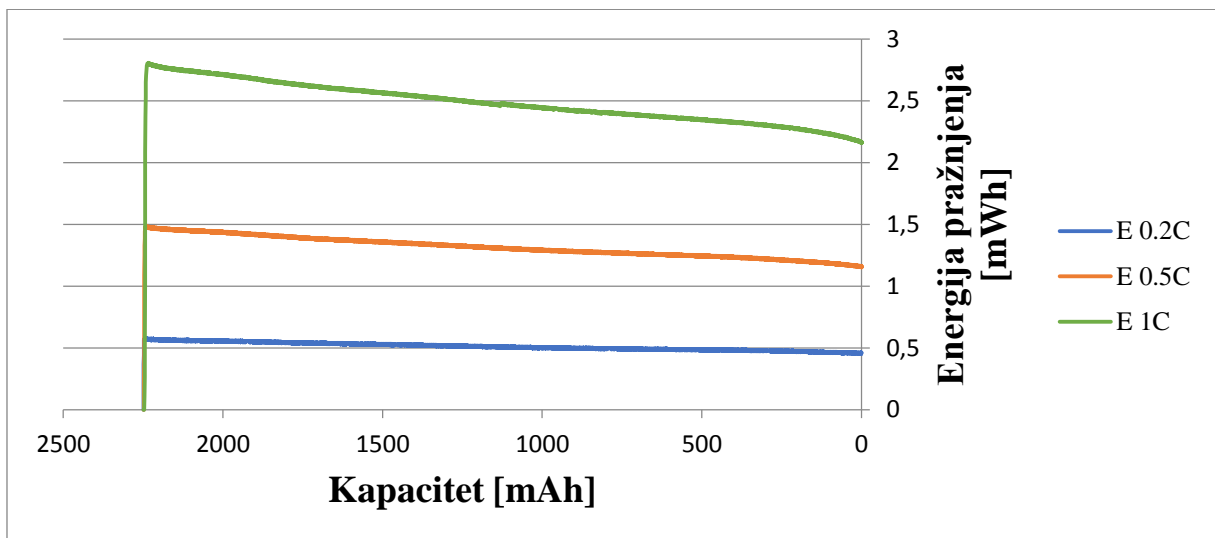
Slika 3.31. Utjecaj različitih faktora C na napon pražnjenja SONY Li-ion baterije



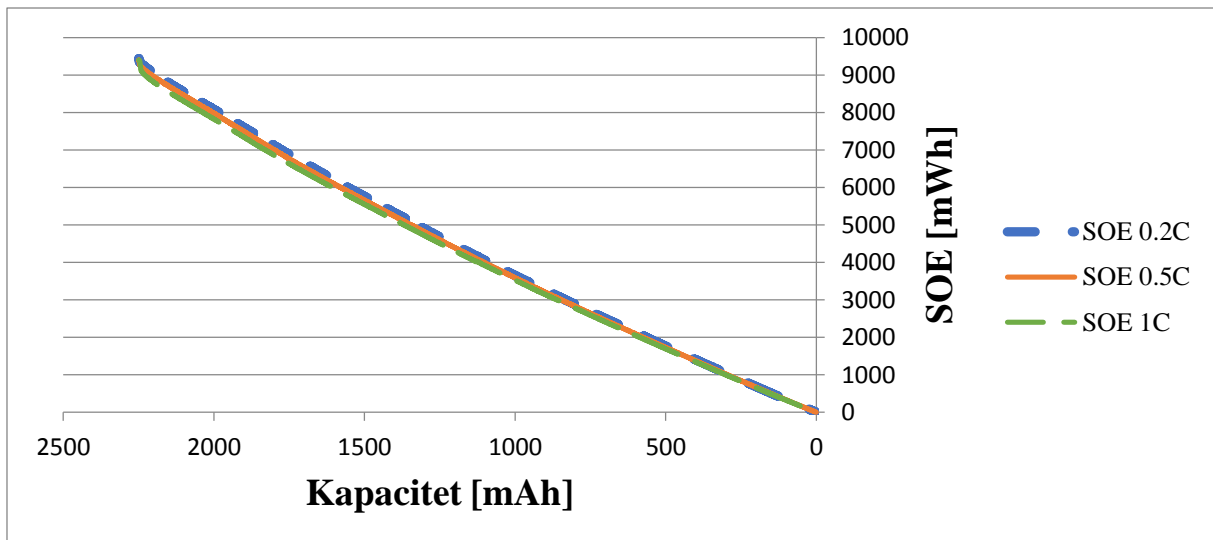
Slika 3.32. Utjecaj različitih faktora C na struju pražnjenja SONY Li-ion baterije



Slika 3.33. Utjecaj različitih faktora C na snagu pražnjenja SONY Li-ion baterije



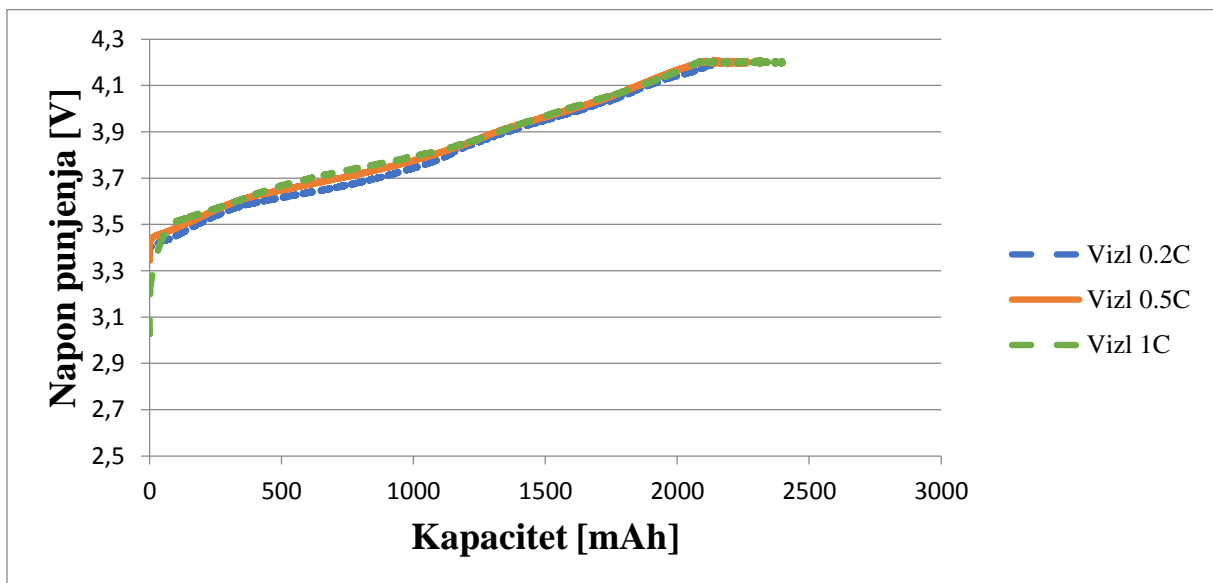
Slika 3.34. Utjecaj različitih faktora C na energiju pražnjenja SONY Li-ion baterije



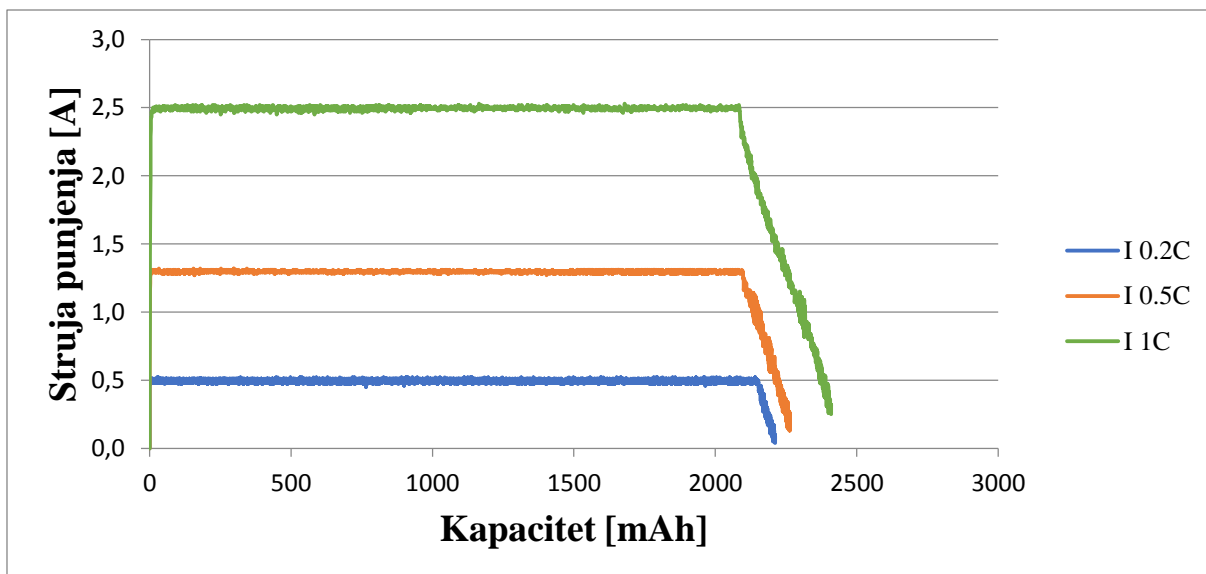
Slika 3.35. Utjecaj različitih faktora C na SOE SONY Li-ion baterije

Utjecaj različitih faktora C pražnjenja na parametre SONY Li-ion baterije sličan je utjecaju različitih faktora C pražnjenja na parametre Panasonic Li-ion baterije koji je ranije opisan.

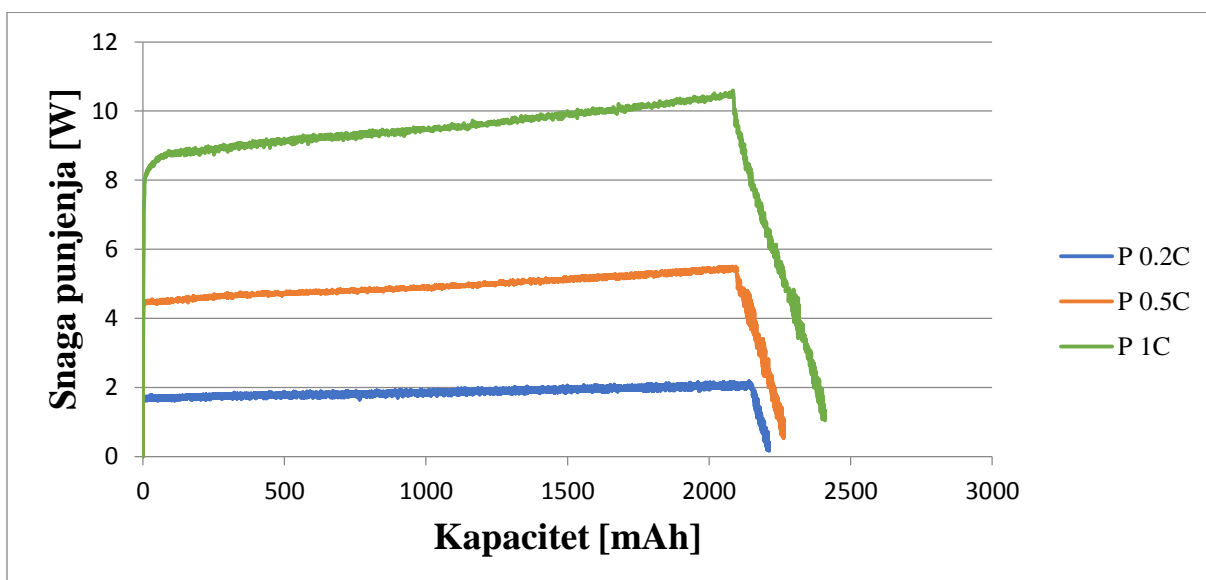
3.4.2. Punjenje



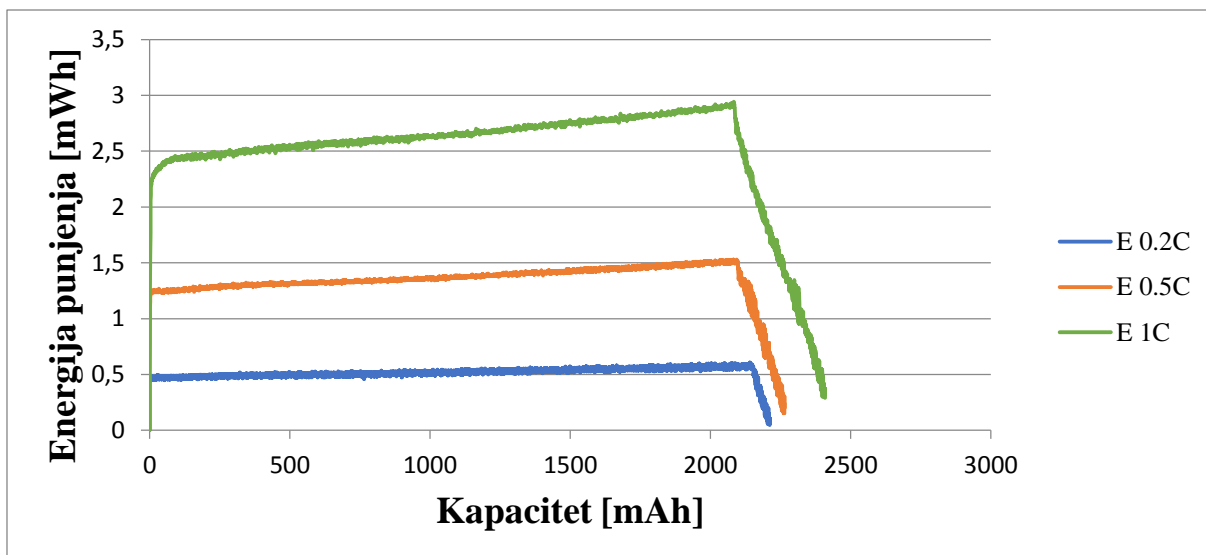
Slika 3.36. Utjecaj različitih faktora C na napon punjenja SONY Li-ion baterije



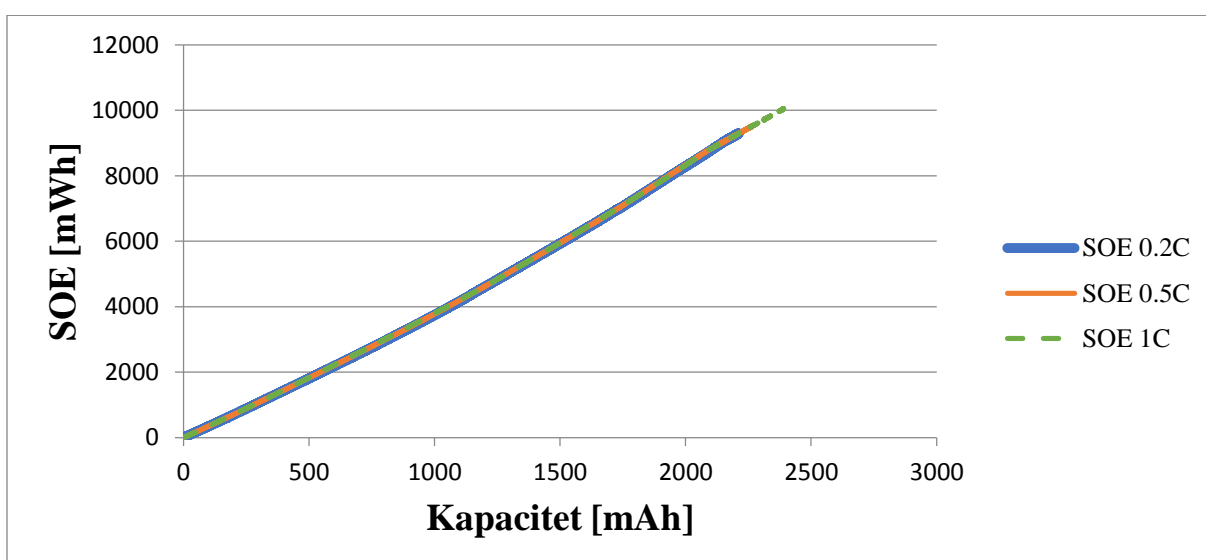
Slika 3.37. Utjecaj različitih faktora C na struju punjenja SONY Li-ion baterije



Slika 3.38. Utjecaj različitih faktora C na snagu punjenja SONY Li-ion baterije



Slika 3.39. Utjecaj različitih faktora C na energiju punjenja SONY Li-ion baterije



Slika 3.40. Utjecaj različitih faktora C na SOE SONY Li-ion baterije

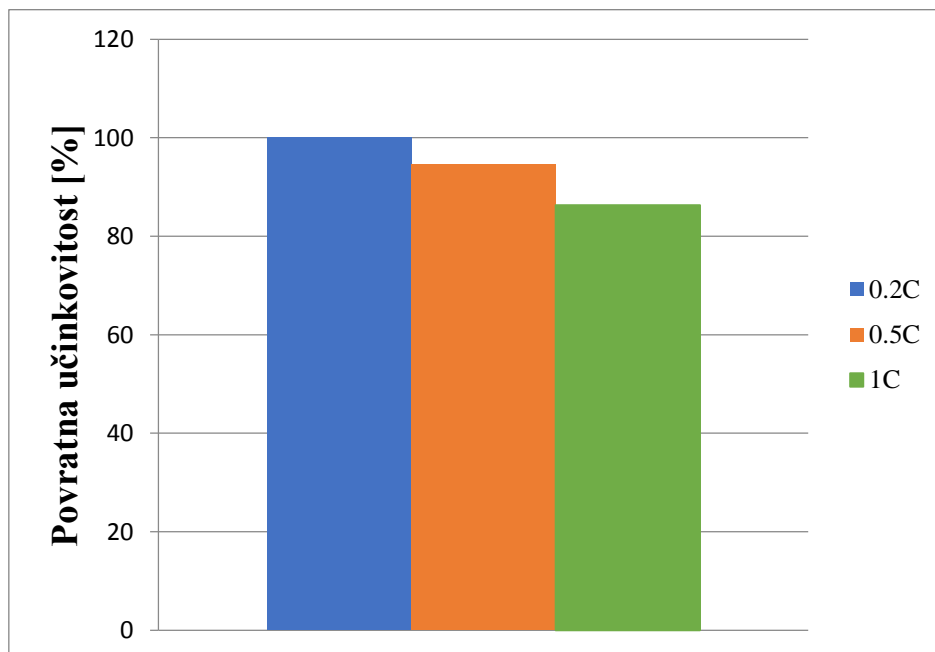
Utjecaj različitih faktora C punjenja na parametre SONY Li-ion baterije sličan je utjecaju različitih faktora C punjenja na parametre Panasonic Li-ion baterije koji je ranije opisan.

3.4.3. Povratna učinkovitost

Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost SONY Li-ion baterije prikazan je tablično u tablici 3.7. i grafički na slici 3.41.

Tablica 3.7. Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost SONY Li-ion baterije

Faktor C	0,2C	0,5C	1C
Ispražnjena energija [mWh]	8332,89	8198,12	8012,29
Uložena energija [mWh]	8329,34	8669,50	9280,82
Povratna učinkovitost [%]	100,04	94,56	86,33



Slika 3.41. Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost SONY Li-ion baterije

Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost SONY Li-ion baterije sličan je utjecaju različitih faktora C na povratnu učinkovitost Panasonic baterije. Povratna učinkovitost iznad 100% kod faktora 0,2C je nerealna te je greška nastala uslijed pogreške mjerenja i estimacije veličina mjernog uređaja.

3.5. Panasonic eneloop pro BK-3HCDE NiMH baterija

Na slici 3.42. prikazan je izgled ovog modela baterije. Tehničke karakteristike proizvođača za ovu bateriju razlikuju se od prethodne tehnologije jer nisu izravno definirane struje punjenja i pražnjenja, kao ni vrijednosti vršnog napona punjenja i donjeg napona pražnjenja. Nazivni kapacitet iznosi 2500mAh, a nazivni napon 1,2V. [14]

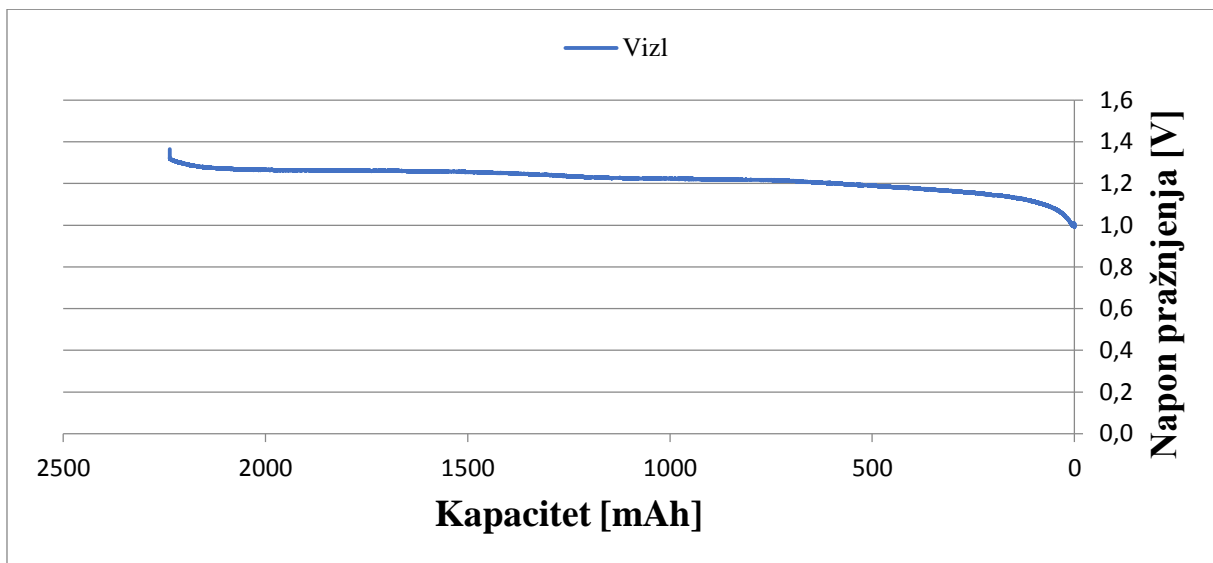


Slika 3.42. Izgled Panasonic eneloop pro BK-3HCDE baterije

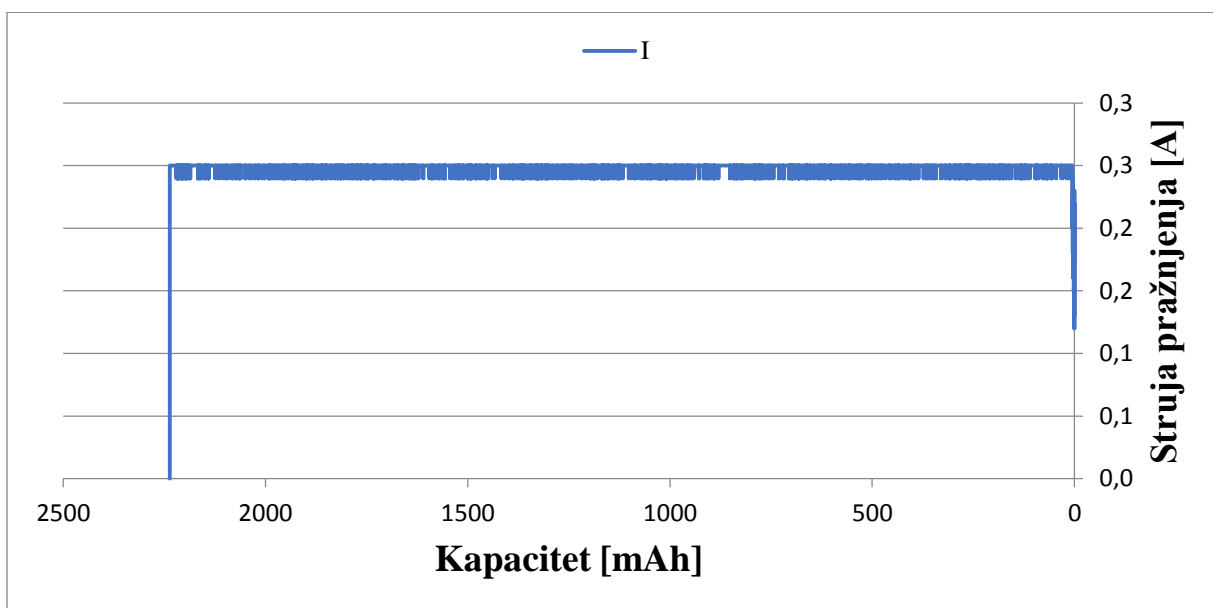
Analizirati će se utjecaj faktora 0.1C punjenja/pražnjenja na karakteristike (grafički):

- napon punjenja/pražnjenja,
- struju punjenja/pražnjenja,
- snagu punjenja/pražnjenja,
- energiju punjenja/pražnjenja,
- stanje energije.

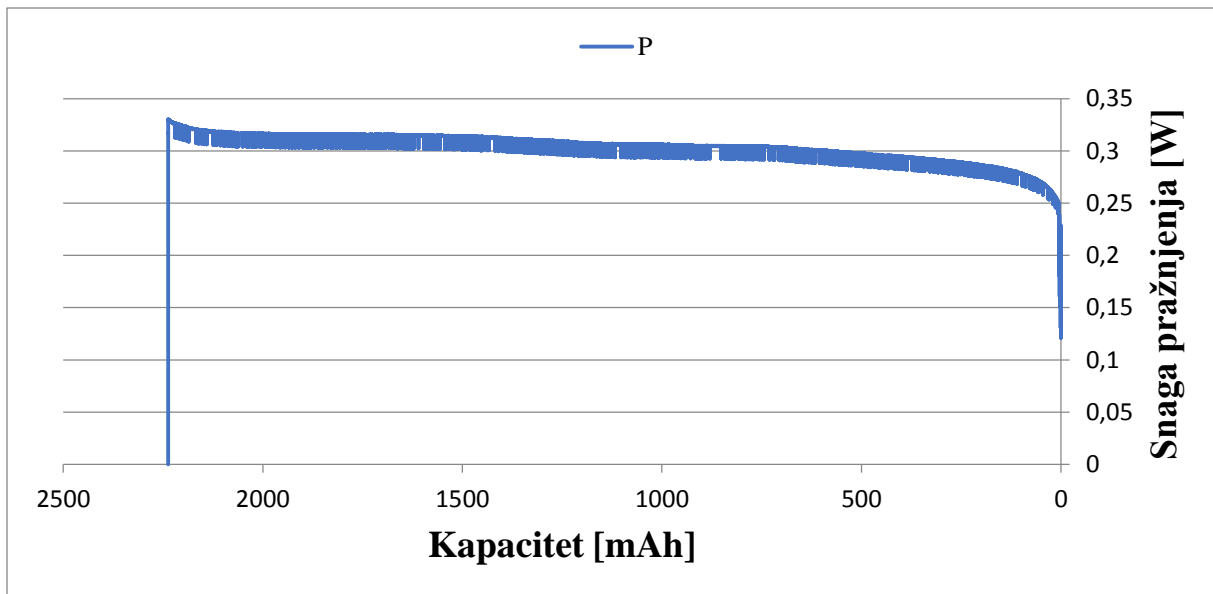
3.5.1. Pražnjenje 0,1C faktorom pražnjenja



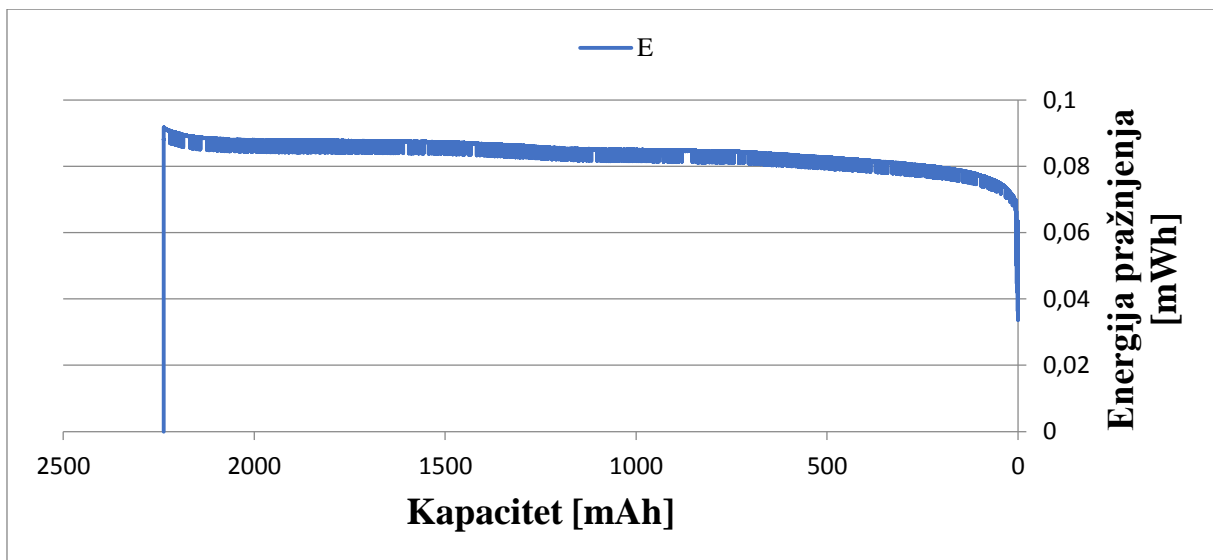
Slika 3.43. Napon pražnjenja u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije



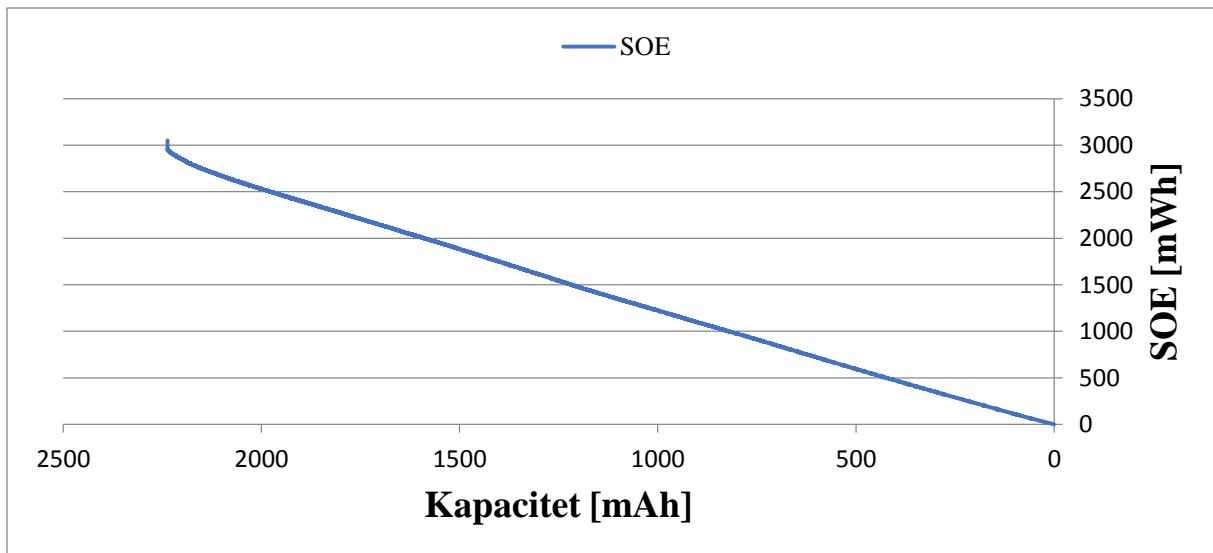
Slika 3.44. Struja pražnjenja u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije



Slika 3.45. Snaga pražnjenja u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije



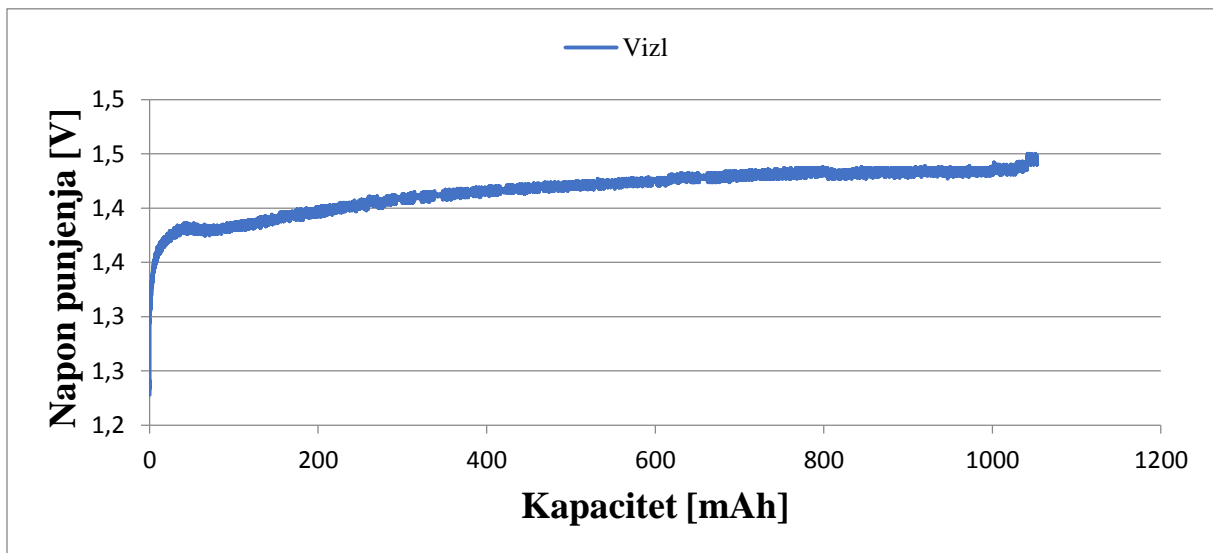
Slika 3.46. Energija pražnjenja u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije



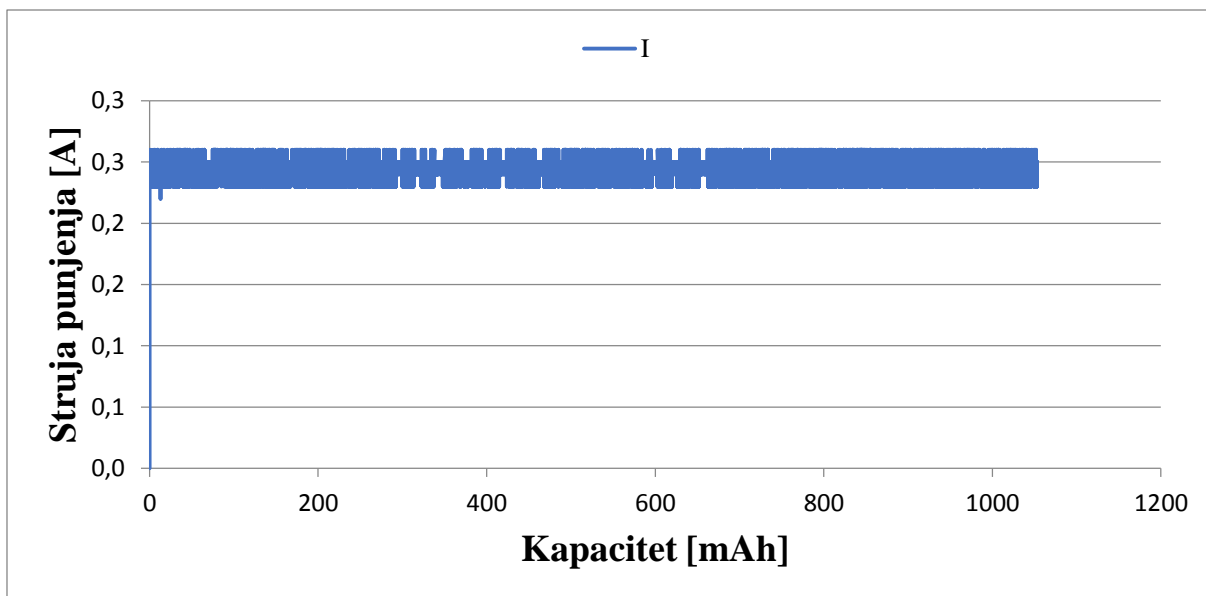
Slika 3.47. SOE u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije

Iz grafova se vidi da je struja pražnjenja konstantna dok napon pražnjenja lagano opada, a samim time snaga pražnjenja i energija pražnjenja prate trend napona i lagano opadaju dok se stanje energije baterije linearno smanjuje.

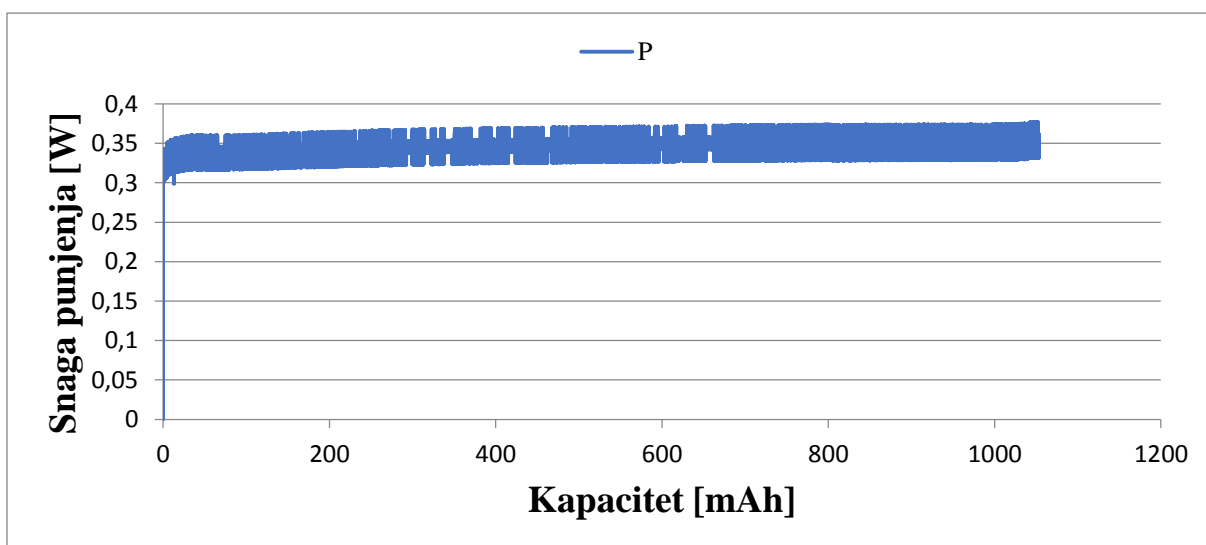
3.5.2. Punjenje 0,1C faktorom punjenja



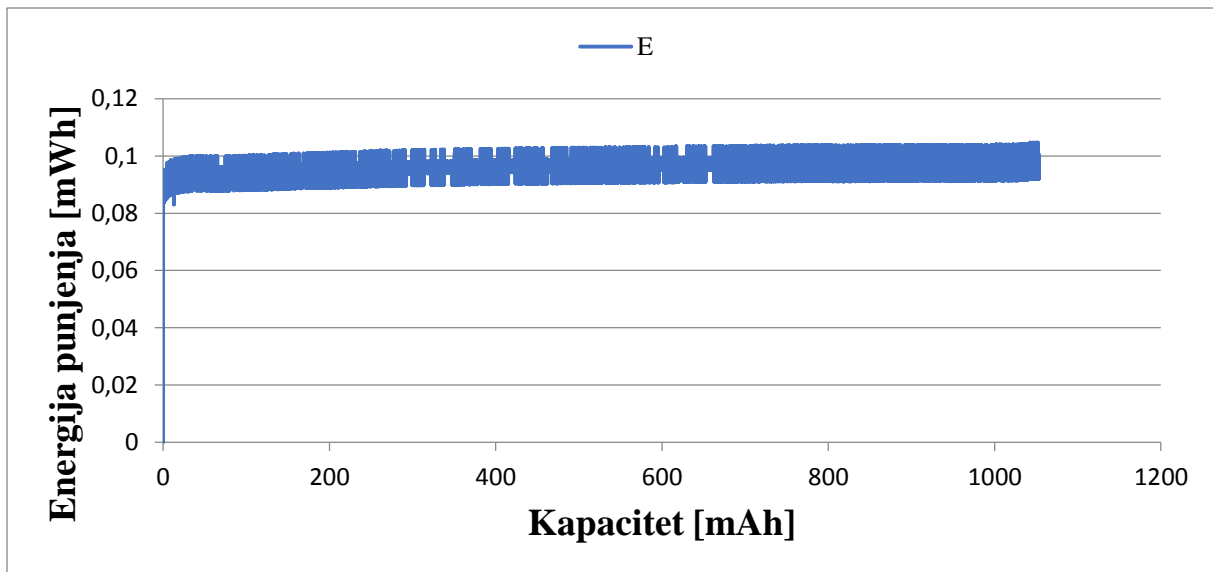
Slika 3.48. Napon punjenja u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije



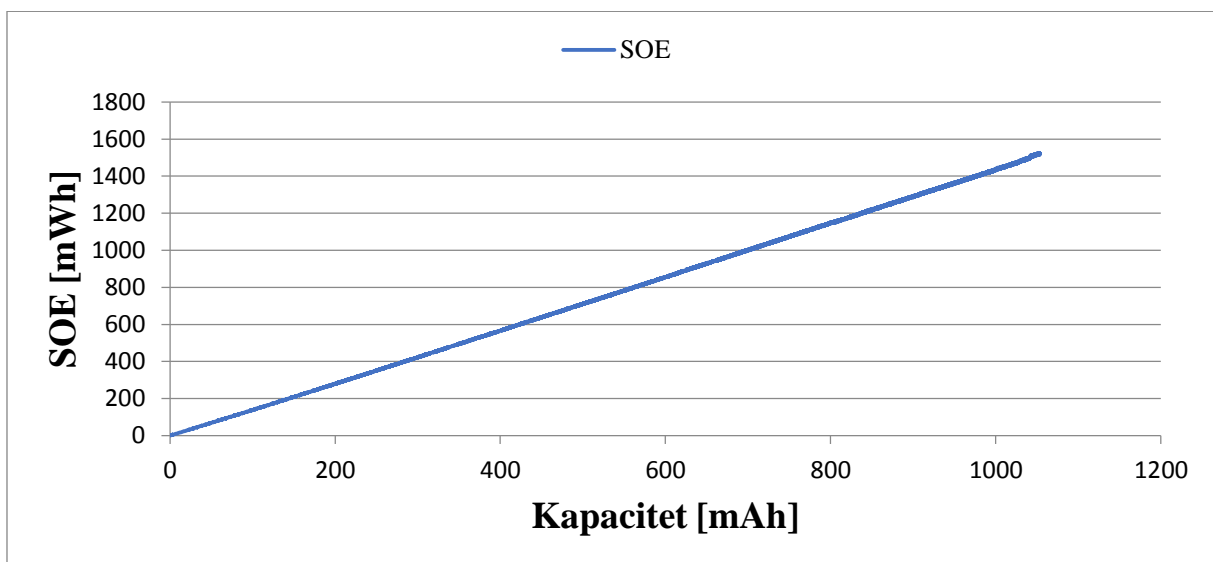
Slika 3.49. *Struja punjenja u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije*



Slika 3.50. *Snaga punjenja u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije*



Slika 3.51. Energija punjenja u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije



Slika 3.52. SOE u ovisnosti o kapacitetu NiMH baterije

Iz grafova se vidi da je struja punjenja konstantna dok napon punjenja lagano raste. Snaga punjenja i energija punjenja prate trend struje te su konstantne dok se stanje energije baterije linearno povećava. Punjenje ovakvih tehnologija baterija najviše je utjecano vremenom punjenja, dok je jedini faktor (parametar) koji utječe na prekid punjenja napon baterije. Zbog velike vremenske duljine procesa punjenja (16 sati pri faktoru 0,1C punjenja prema [14]) mjerenje je prekinuto nakon 4 sata i 14 minuta punjenja te se zbog toga ne može donijeti nikakav zaključak na temelju dobivenih rezultata osim toga da su iznosi napona, struje, snage i energije pražnjenja/punjenja znatno manji nego kod Li-ion tehnologije.

3.6. Usporedba različitih tipova Li-ion baterija

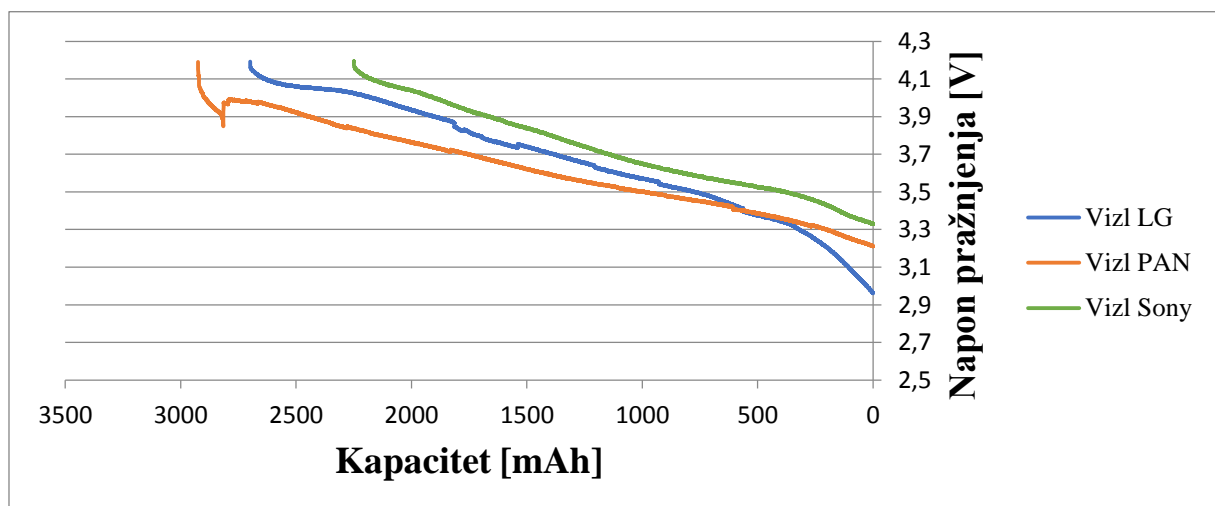
Analizirati će se utjecaj istih faktora C punjenja/pražnjenja (0,2C, 0,5C i 1C) na karakteristike (grafički) različitih Li-ion baterija:

- napon punjenja/pražnjenja,
- struju punjenja/pražnjenja,
- snagu punjenja/pražnjenja,
- energiju punjenja/pražnjenja.

Generirati će se tablica sa povratnom učinkovitosti za pojedine faktore C punjenja/pražnjenja (0,2C, 0,5C i 1C) te će se grafički prikazati povratna učinkovitost u ovisnosti o faktorima C punjenja/pražnjenja (0,2C, 0,5C i 1C) za različite tipove Li-ion baterija.

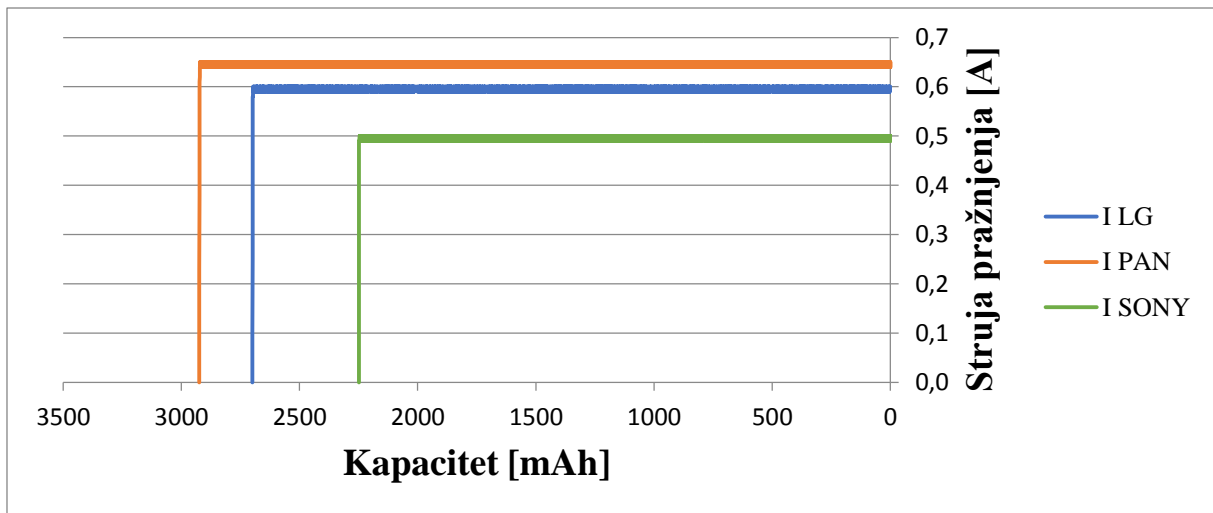
3.6.1. Pražnjenje

- 0,2C



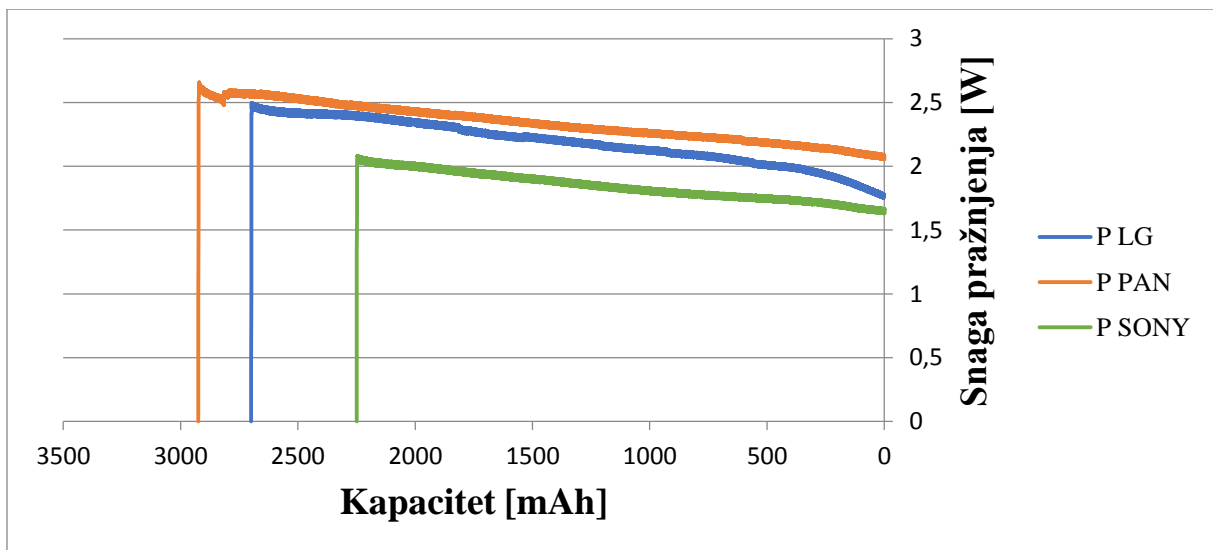
Slika 3.53. Utjecaj faktora 0,2C pražnjenja na napon pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija

Trend je isti kao u prijašnjim primjerima. Vidljiva razlika u kapacitetima baterija. Najveći kapacitet ima Panasonic baterija, a najmanji SONY baterija.



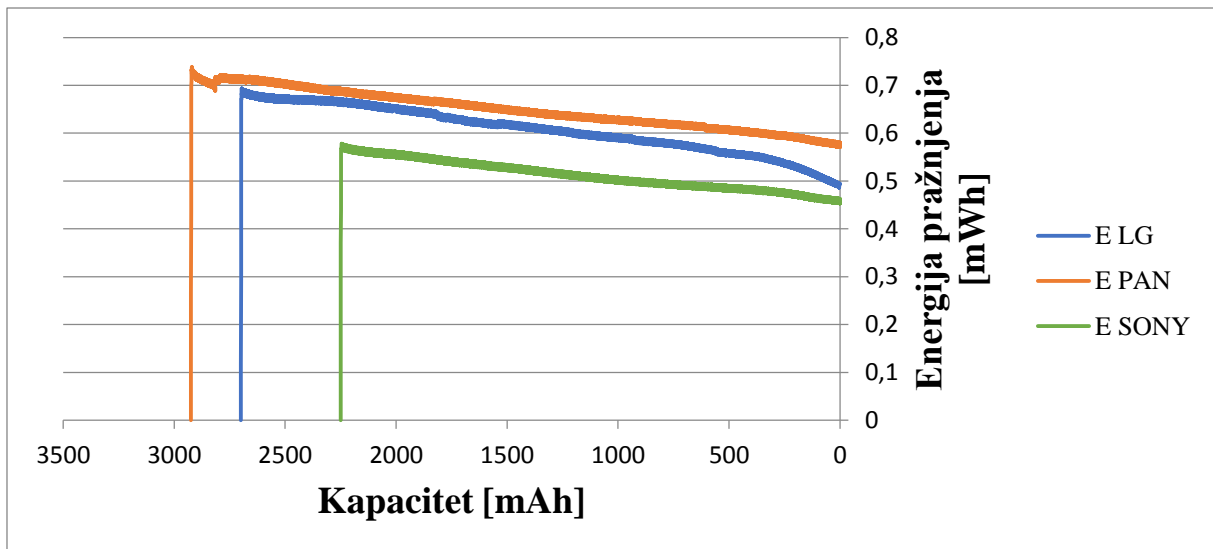
Slika 3.54. Utjecaj faktora 0,2C pražnjenja na struju pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija

Trend je isti kao u prijašnjim primjerima. Vidljiva razlika u kapacitetima baterija. Najveći kapacitet ima Panasonic baterija, a najmanji SONY baterija, pa je prema tome i veća struja pražnjenja za isti faktor C kod baterije sa većim kapacitetom.



Slika 3.55. Utjecaj faktora 0,2C pražnjenja na snagu pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija

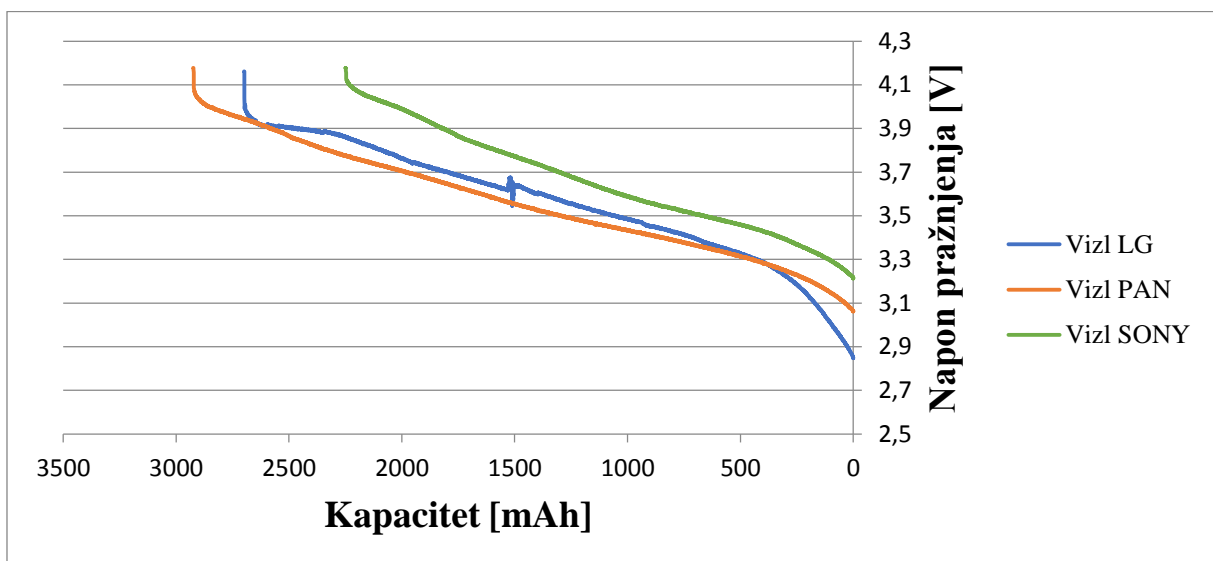
Trend je isti kao u prijašnjim primjerima. Vidljiva razlika u kapacitetima baterija. Najveći kapacitet ima Panasonic baterija, a najmanji SONY baterija, pa je prema tome i veća struja pražnjenja za isti faktor C kod baterije sa većim kapacitetom što znači da je i snaga pražnjenja veća.



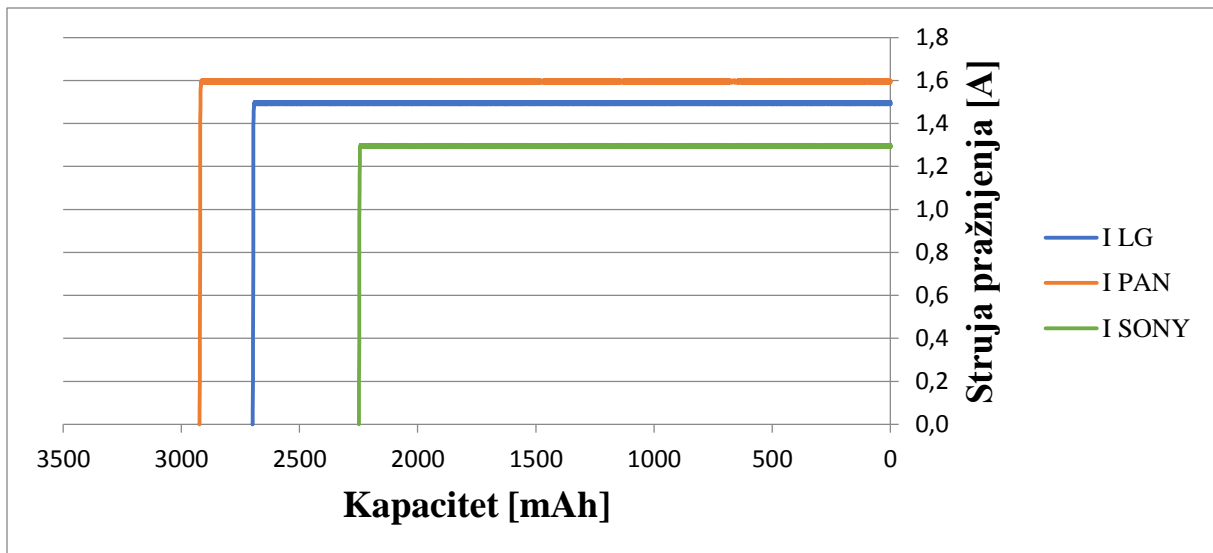
Slika 3.56. Utjecaj faktora 0,2C pražnjenja na energiju pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija

Energija prati trend snage.

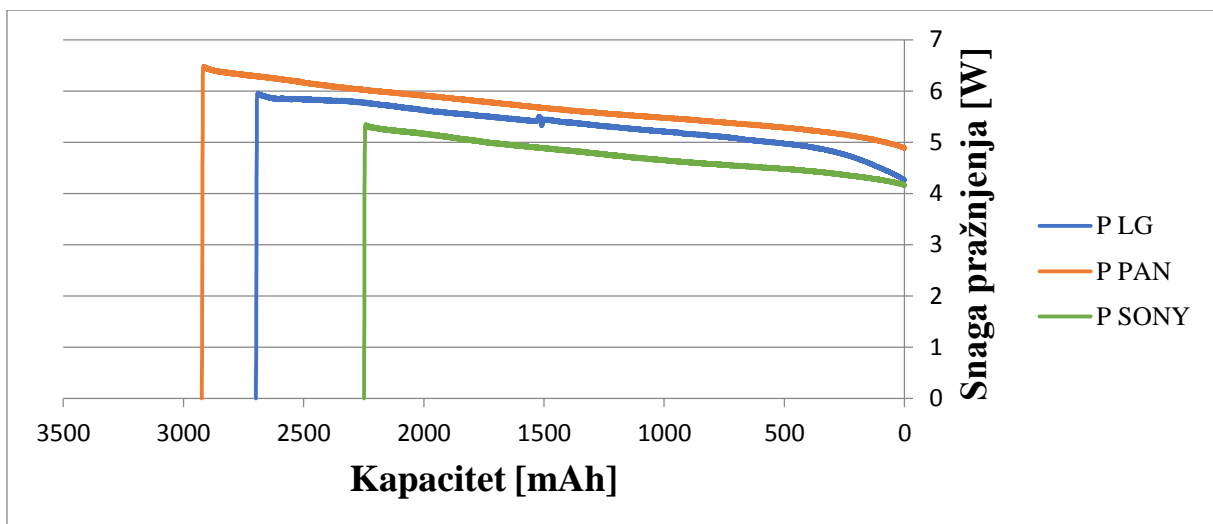
- 0,5C



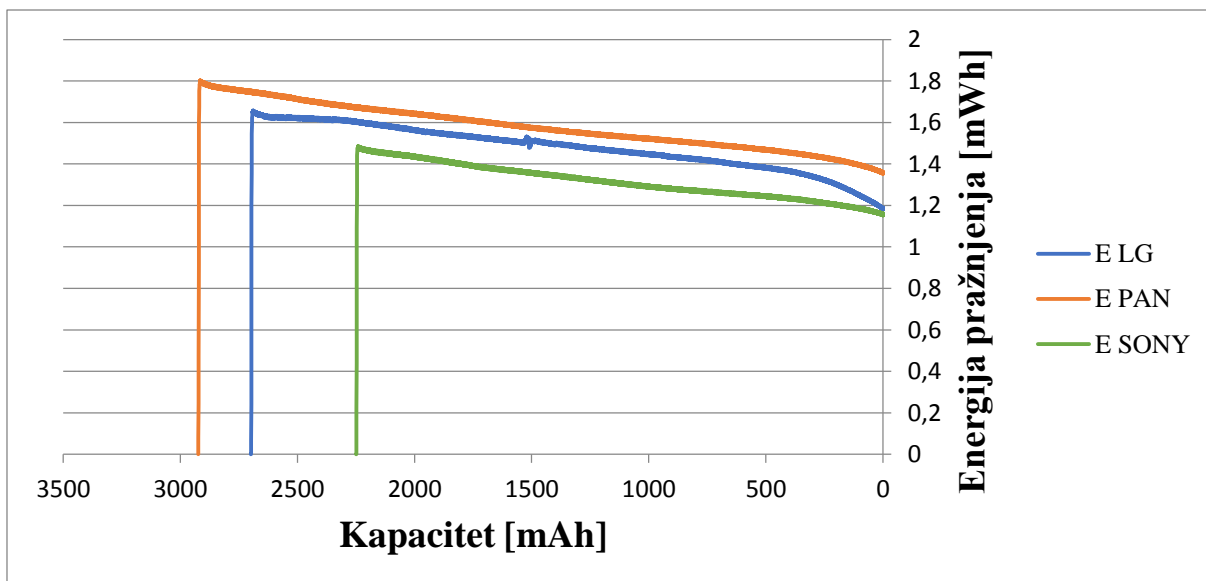
Slika 3.57. Utjecaj faktora 0,5C pražnjenja na napon pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija



Slika 3.58. Utjecaj faktora 0,5C pražnjenja na struju pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija



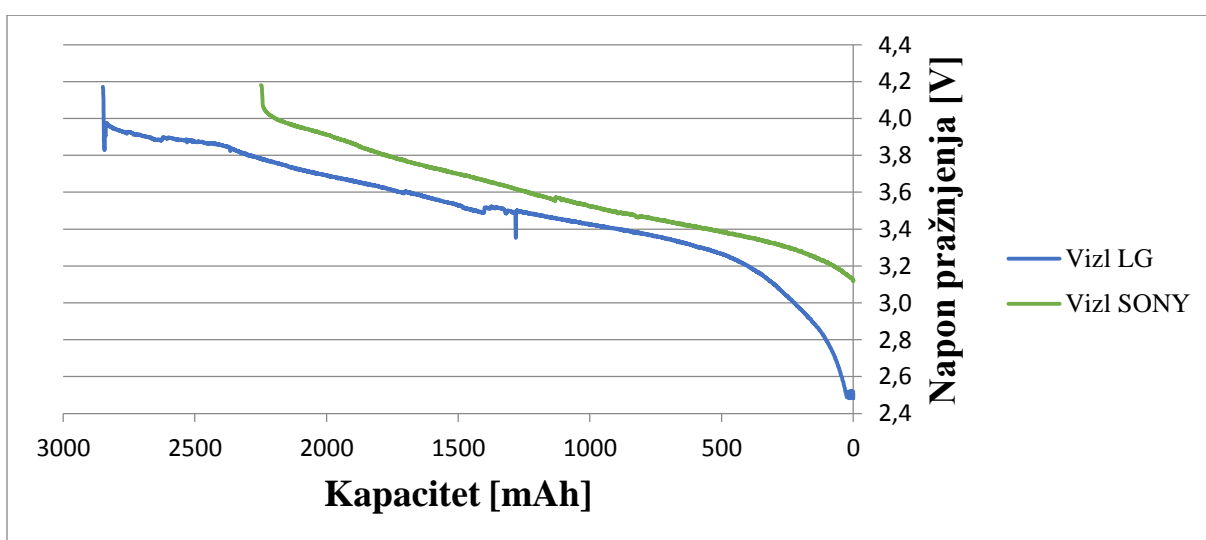
Slika 3.59. Utjecaj faktora 0,5C pražnjenja na snagu pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija



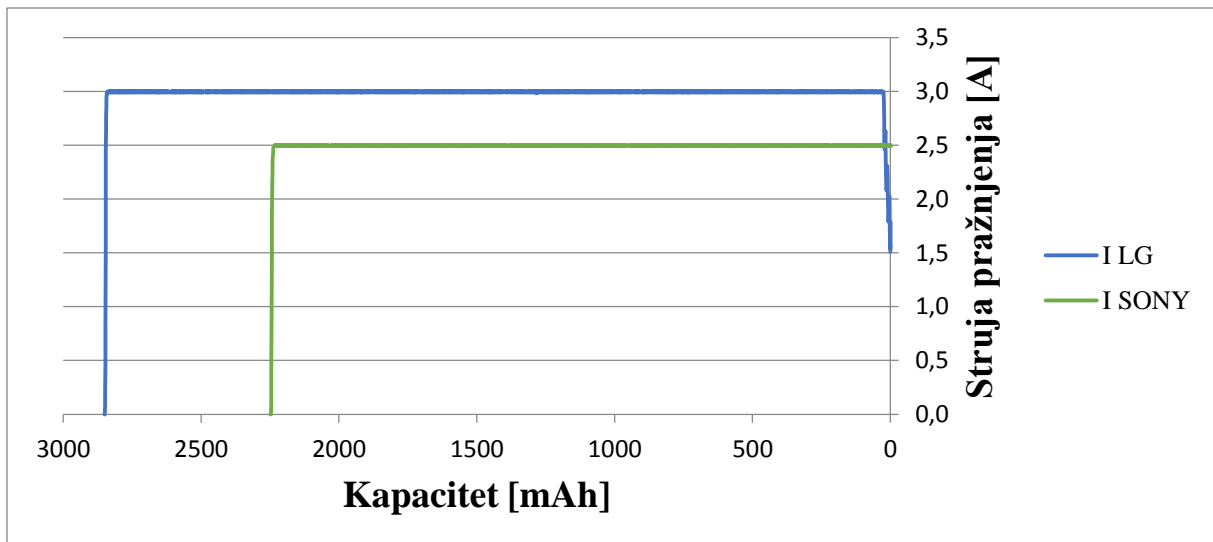
Slika 3.60. Utjecaj faktora 0,5C pražnjenja na energiju pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija

Utjecaj faktora 0,5C pražnjenja na parametre različitih tipova Li-ion baterija sličan utjecaju faktora 0,2C pražnjenja na parametre različitih tipova Li-ion baterija. Razlika vidljiva u povećanju struje pražnjenja, a samim time i povećanju snage pražnjenja. Energija pražnjenja prati trend snage pražnjenja.

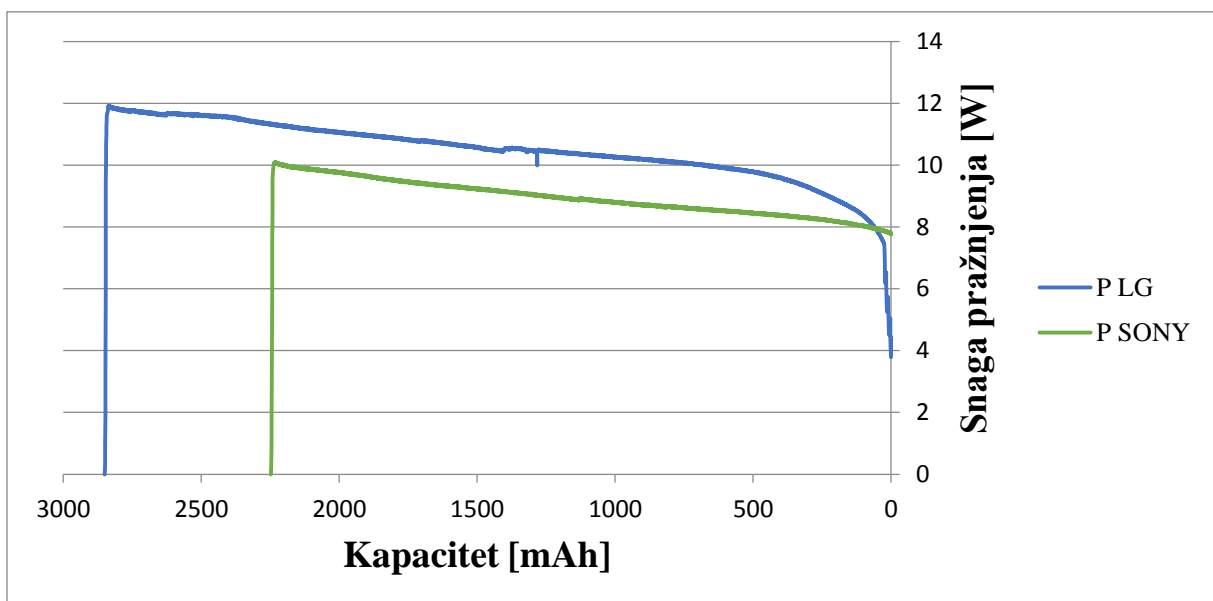
- 1C



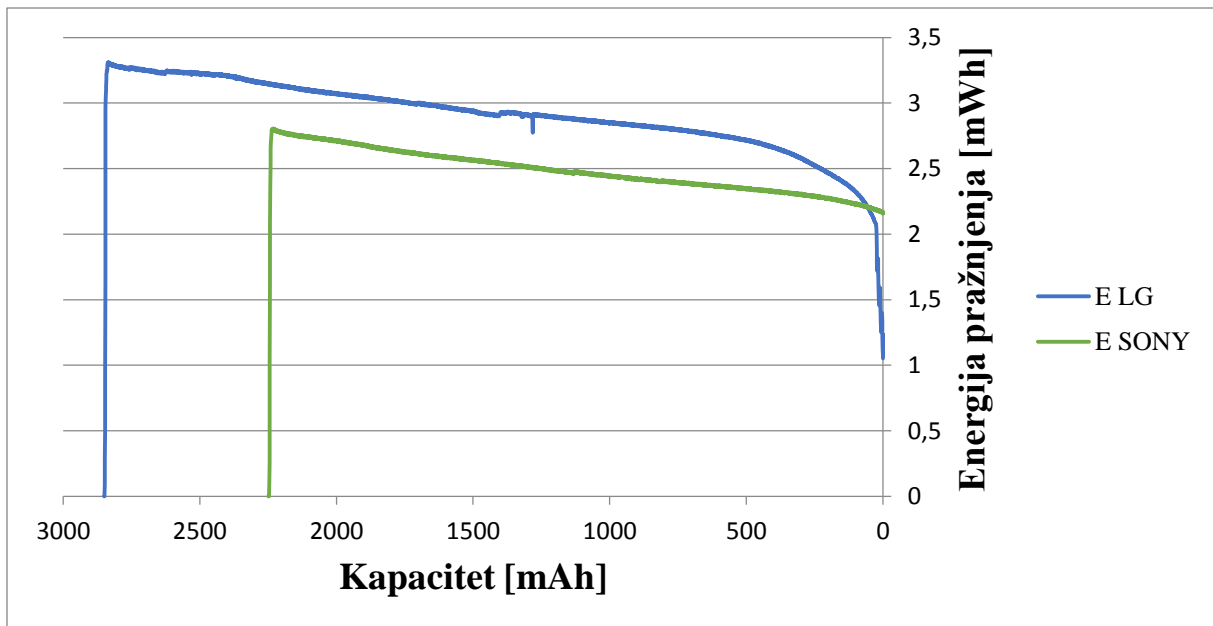
Slika 3.61. Utjecaj faktora 1C pražnjenja na napon pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija



Slika 3.62. Utjecaj faktora $1C$ pražnjenja na struju pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija



Slika 3.63. Utjecaj faktora $1C$ pražnjenja na snagu pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija

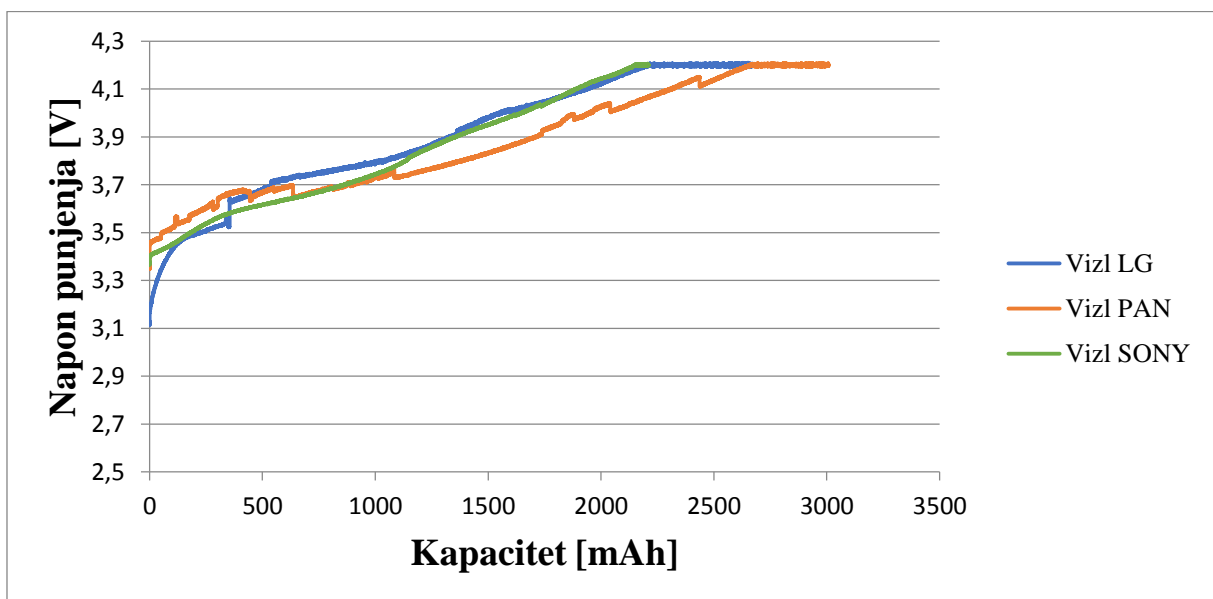


Slika 3.64. Utjecaj faktora 1C pražnjenja na energiju pražnjenja različitih tipova Li-ion baterija

Utjecaj faktora 1C pražnjenja na parametre različitih tipova Li-ion baterija sličan utjecaju faktora 0,2C i 0,5C pražnjenja na parametre različitih tipova Li-ion baterija. Razlika vidljiva u povećanju struje pražnjenja, a samim time i povećanju snage pražnjenja. Energija pražnjenja prati trend snage pražnjenja.

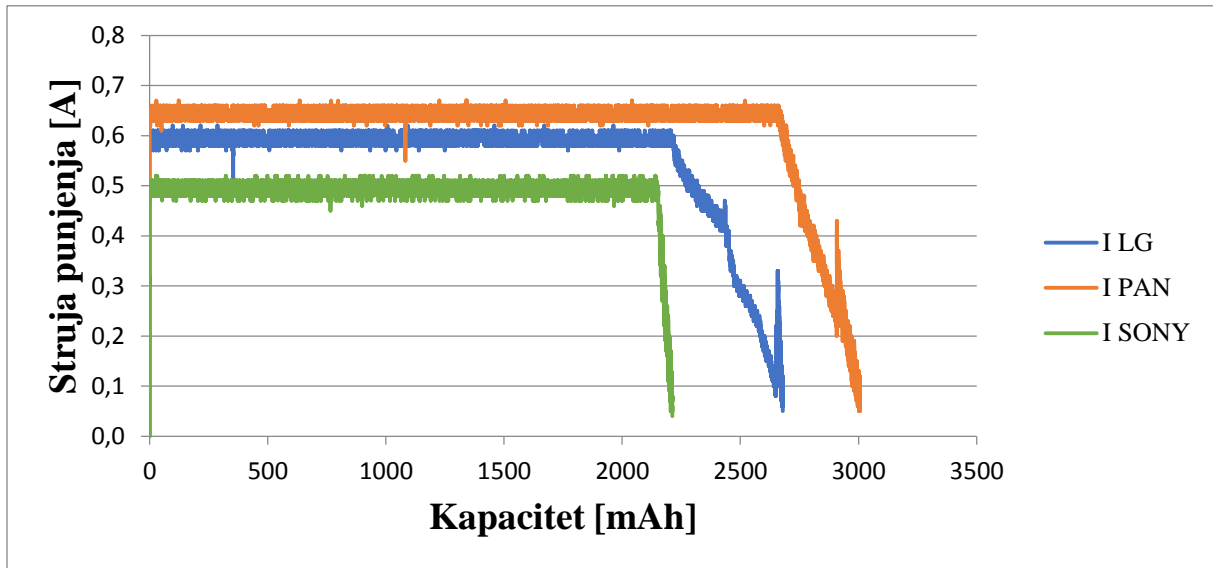
3.6.2. Punjenje

- 0,2C



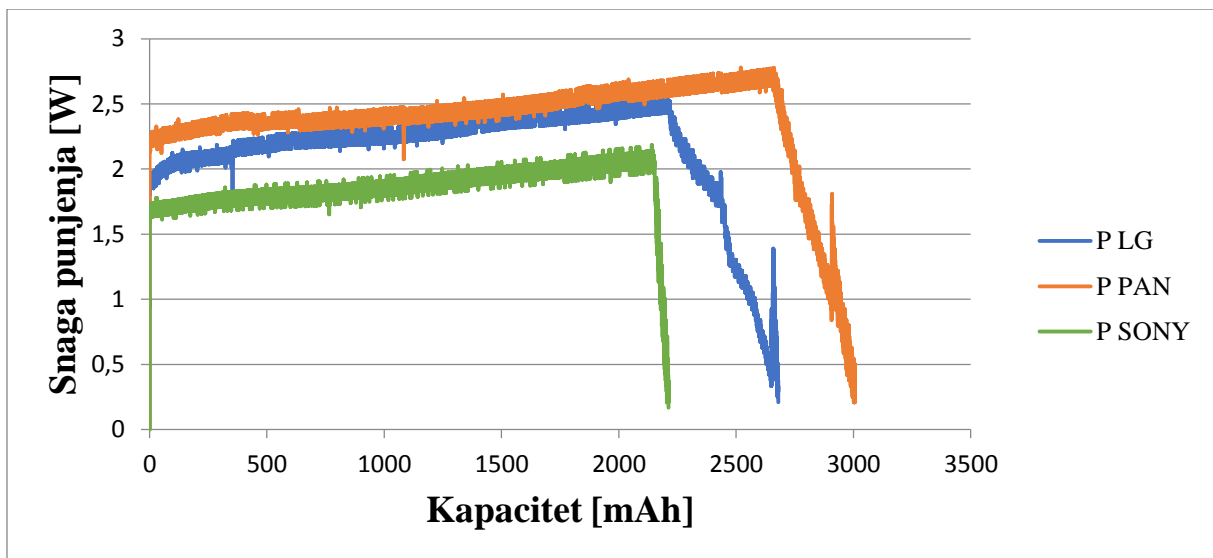
Slika 3.65. Utjecaj faktora 0,2C punjenja na napon punjenja različitih tipova Li-ion baterija

Trend je isti kao u prijašnjim primjerima. Vidljiva razlika u kapacitetima baterija. Najveći kapacitet ima Panasonic baterija, a najmanji SONY baterija.



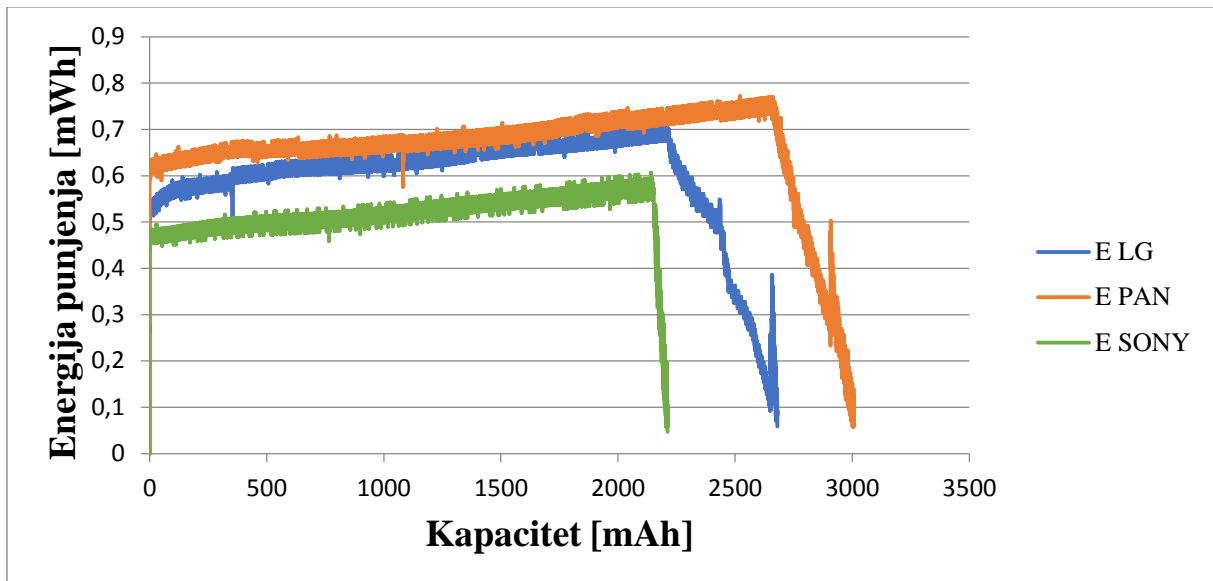
Slika 3.66. Utjecaj faktora 0,2C punjenja na struju punjenja različitih tipova Li-ion baterija

Trend je isti kao u prijašnjim primjerima. Vidljiva razlika u kapacitetima baterija. Najveći kapacitet ima Panasonic baterija, a najmanji SONY baterija, pa je prema tome i veća struja punjenja za isti faktor C kod baterije sa većim kapacitetom.



Slika 3.67. Utjecaj faktora 0,2C punjenja na snagu punjenja različitih tipova Li-ion baterija

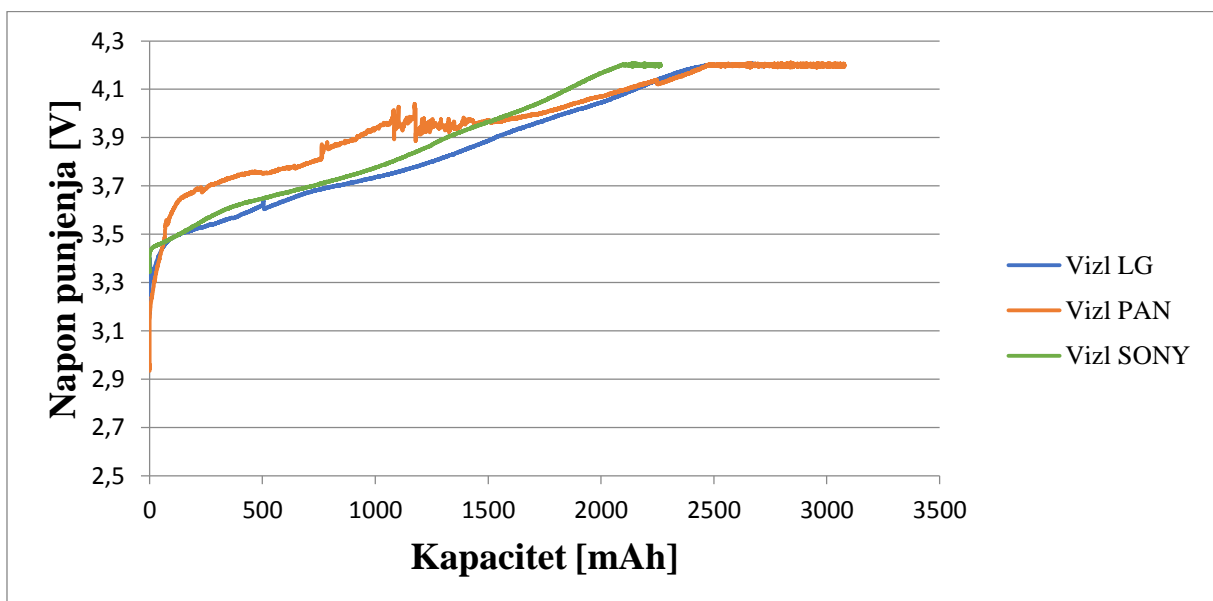
Trend je isti kao u prijašnjim primjerima. Vidljiva razlika u kapacitetima baterija. Najveći kapacitet ima Panasonic baterija, a najmanji SONY baterija, pa je prema tome i veća struja punjenja za isti faktor C kod baterije sa većim kapacitetom, a samim time i snaga punjenja.



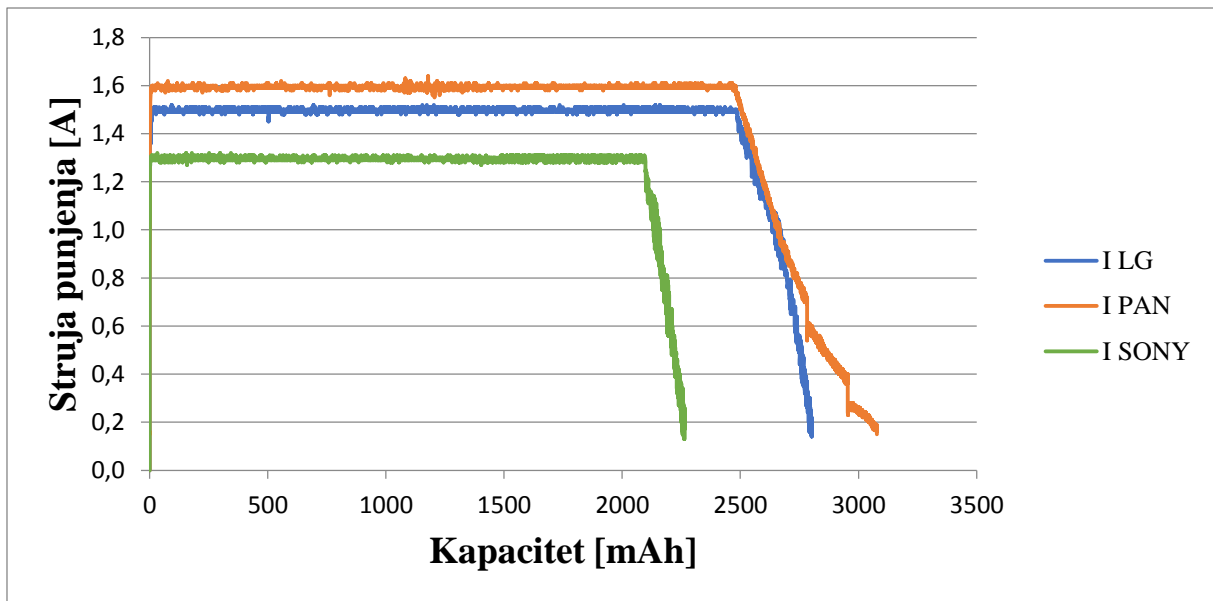
Slika 3.68. Utjecaj faktora 0,2C punjenja na energiju punjenja različitih tipova Li-ion baterija

Energija prati trend snage punjenja.

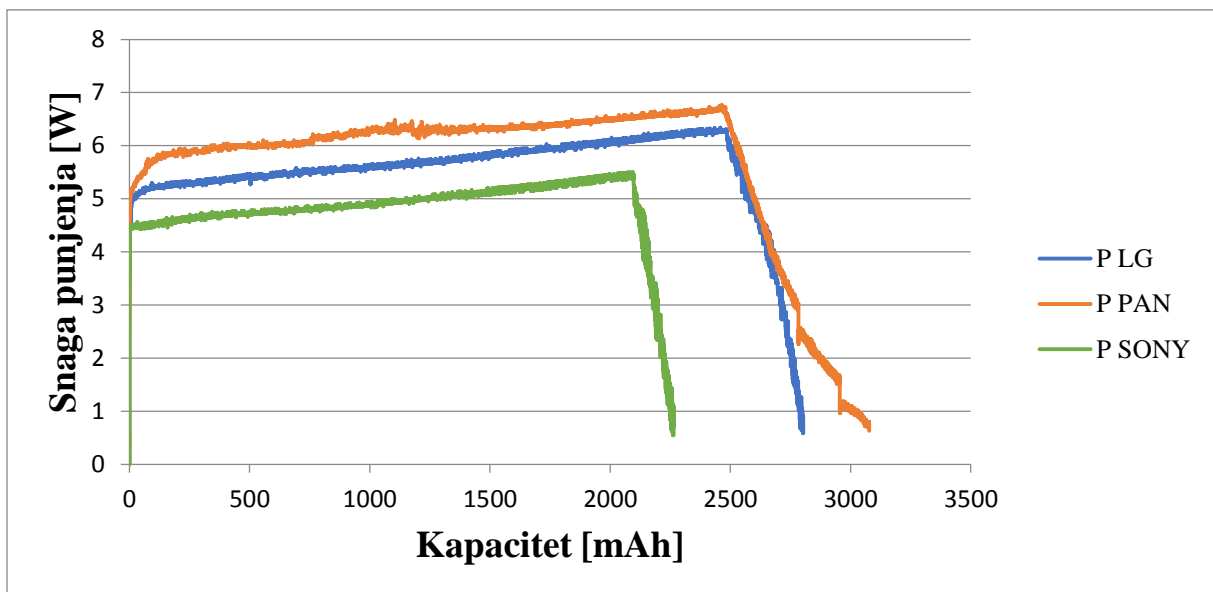
- 0,5C



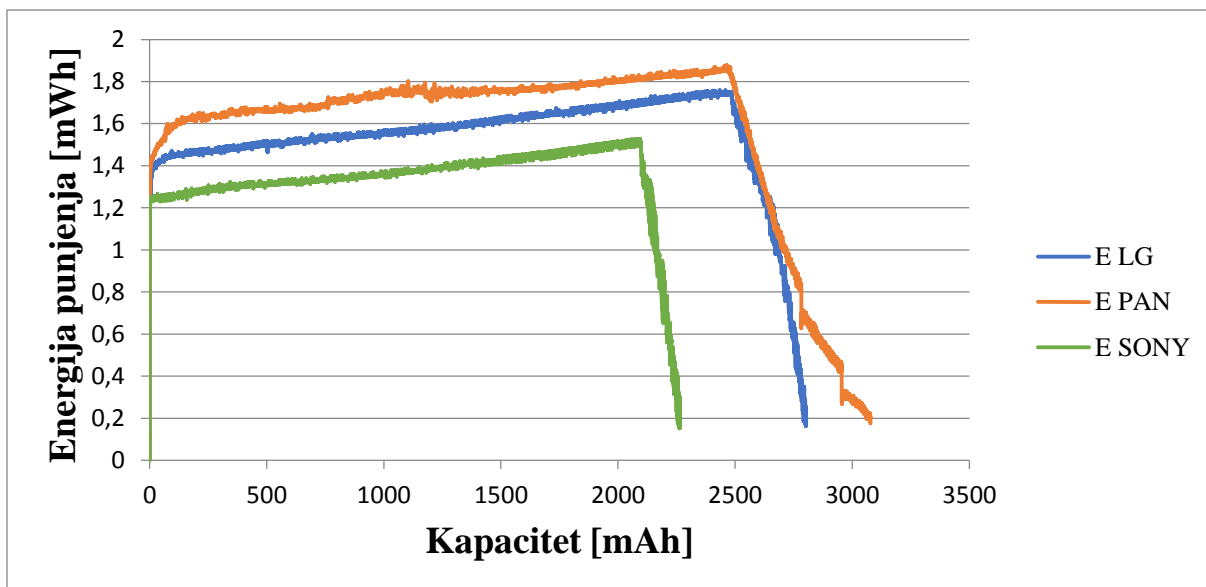
Slika 3.69. Utjecaj faktora 0,5C punjenja na napon punjenja različitih tipova Li-ion baterija



Slika 3.70. Utjecaj faktora 0,5C punjenja na struju punjenja različitih tipova Li-ion baterija



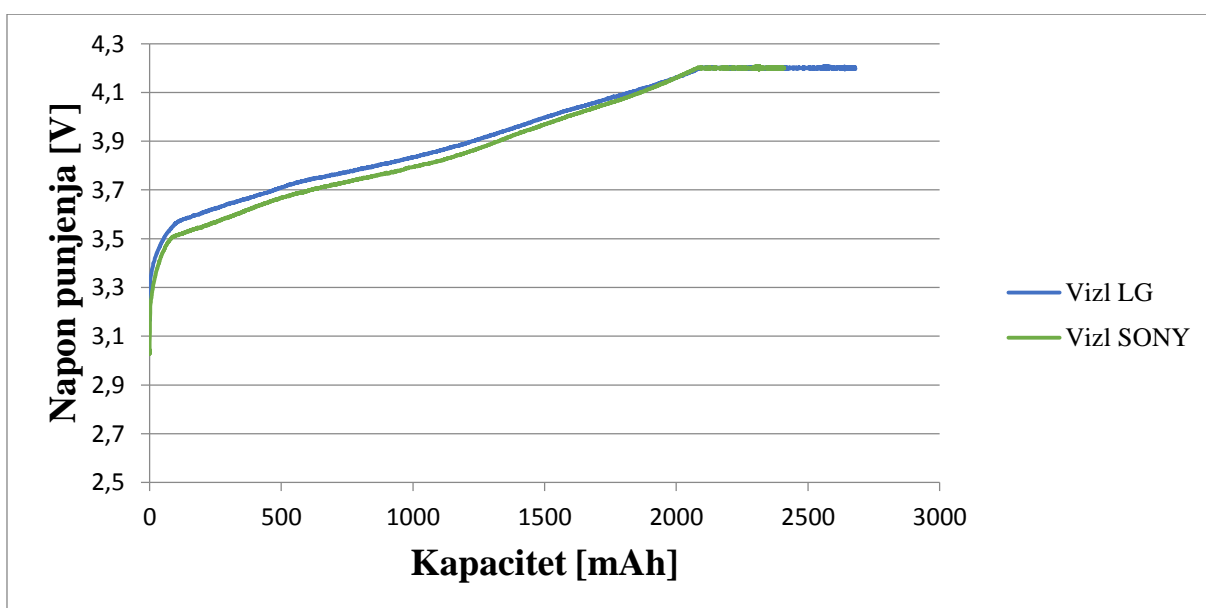
Slika 3.71. Utjecaj faktora 0,5C punjenja na snagu punjenja različitih tipova Li-ion baterija



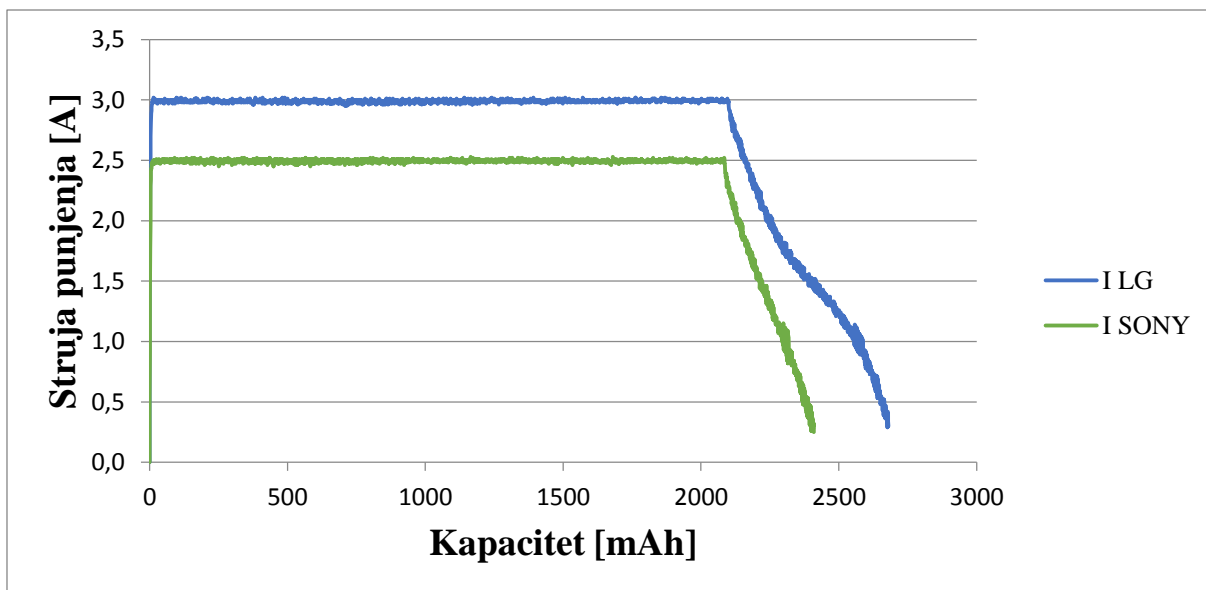
Slika 3.72. Utjecaj faktora 0,5C punjenja na energiju punjenja različitih tipova Li-ion baterija

Utjecaj faktora 0,5C punjenja na parametre različitih tipova Li-ion baterija sličan utjecaju faktora 0,2C punjenja na parametre različitih tipova Li-ion baterija. Razlika vidljiva u povećanju struje punjenja, a samim time i povećanju snage punjenja. Energija punjenja prati trend snage punjenja.

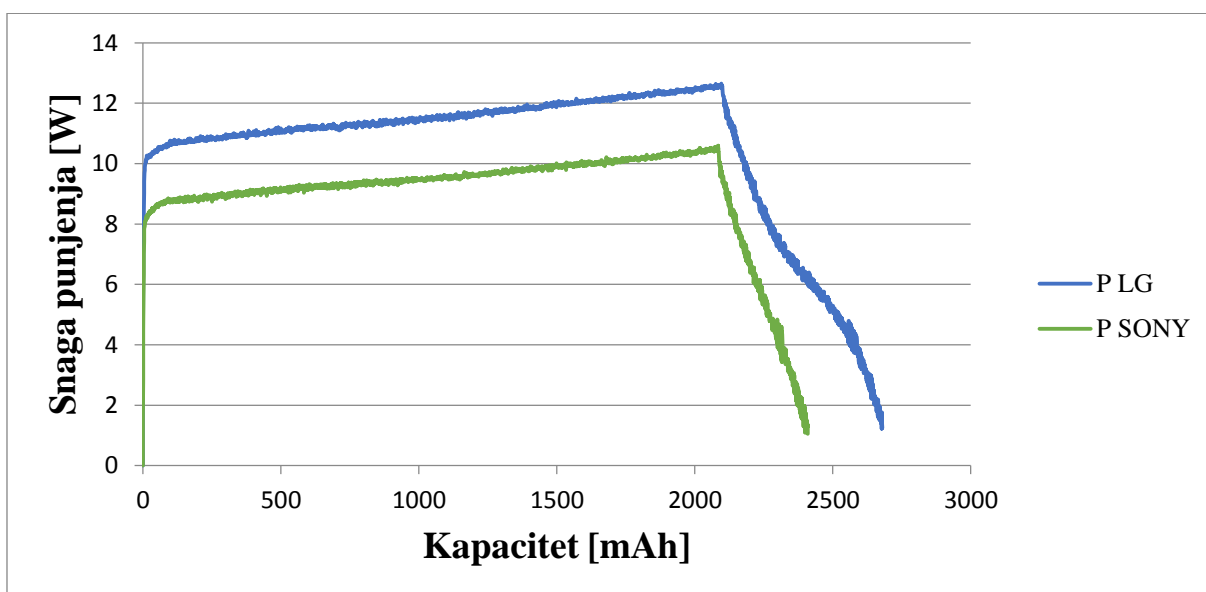
- 1C



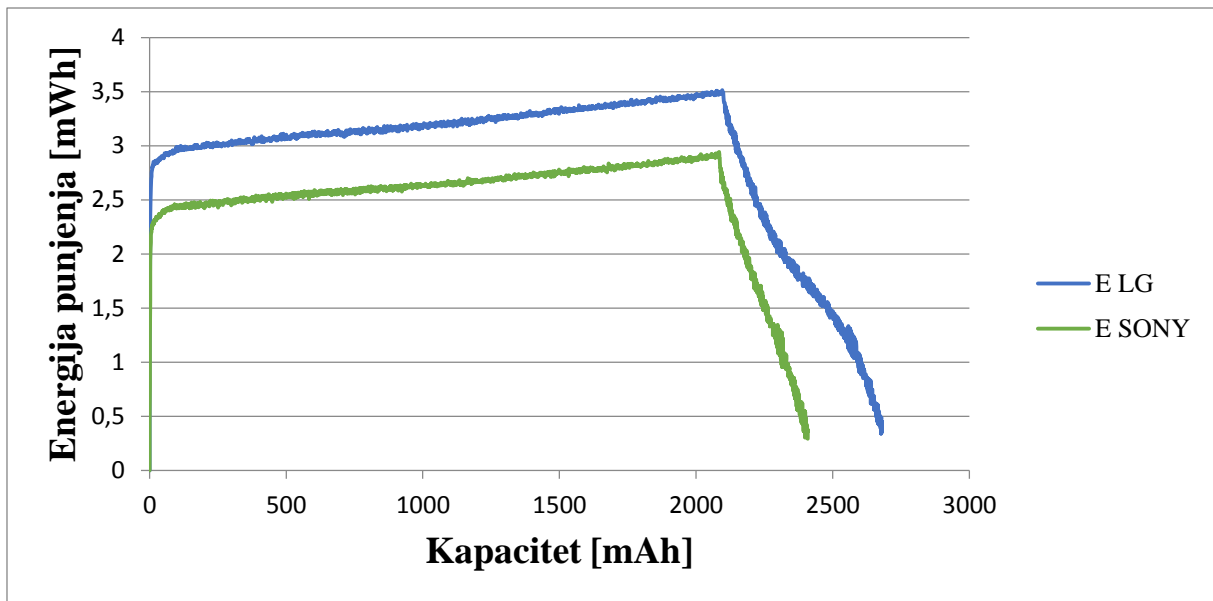
Slika 3.73. Utjecaj faktora 1C punjenja na napon punjenja različitih tipova Li-ion baterija



Slika 3.74. Utjecaj faktora IC punjenja na struju punjenja različitih tipova Li-ion baterija



Slika 3.75. Utjecaj faktora IC punjenja na snagu punjenja različitih tipova Li-ion baterija



Slika 3.76. Utjecaj faktora 1C punjenja na energiju punjenja različitih tipova Li-ion baterija

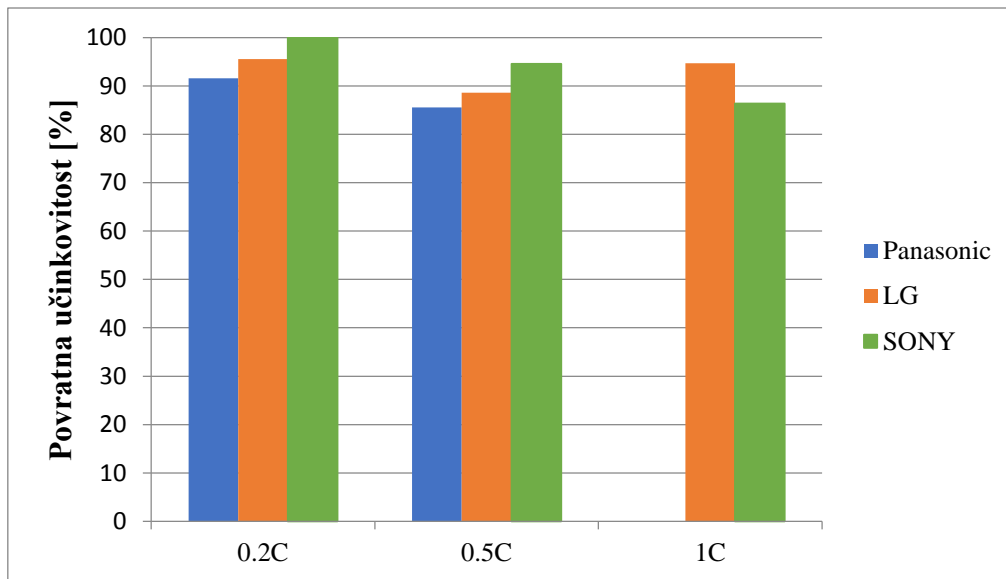
Utjecaj faktora 1C punjenja na parametre različitih tipova Li-ion baterija sličan utjecaju faktora 0,2C i 0,5C punjenja na parametre različitih tipova Li-ion baterija. Razlika vidljiva u povećanju struje punjenja, a samim time i povećanju snage punjenja. Energija punjenja prati trend snage punjenja.

3.6.3. Povratna učinkovitost

Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost različitih tipova Li-ion baterija prikazan je tablično u tablici 3.8. i grafički na slici 3.77.

Tablica 3.8. Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost različitih tipova Li-ion baterija

Tip baterije	Povratna učinkovitost pri faktoru 0,2C	Povratna učinkovitost pri faktoru 0,5C	Povratna učinkovitost pri faktoru 1C
LG	95,54	88,61	94,68
Panasonic	91,59	85,55	/
Sony	100,04	94,56	86,33



Slika 3.77. Utjecaj različitih faktora C na povratnu učinkovitost različitih tipova Li-ion baterija

Iz grafova vidljivo kako SONY baterija ima najbolju povratnu učinkovitost, a Panasonic baterija najgoru povratnu učinkovitost.

4. ZAKLJUČAK

Pri pražnjenju Li-ion baterija dolazi do linearnog smanjenja napona pražnjenja sve dok napon pražnjenja ne dođe do vrijednosti donjeg napona pražnjenja, nakon čega napon pražnjenja postaje konstantan. Napon pražnjenja brže pada pri većem faktoru C pražnjenja za isti tip baterije (isti kapacitet) jer manje traje sam proces pražnjenja baterije. Pri pražnjenju Li-ion baterije struja pražnjenja je konstantnog iznosa sve dok napon pražnjenja ne padne do vrijednosti donjeg napona pražnjenja te tada napon pražnjenja postaje konstantan, a struja pražnjenja krene naglo padati. Pri pražnjenju baterije SOC linearno opada što je i očekivano zbog toga što je SOC količina energije pohranjena u bateriji. Prilikom punjenja Li-ion baterije vidljivo je linearno povećanje napona punjenja sve dok ne dosegne vršnu vrijednost napona, te tada postaje konstantan. Napon punjenja brže raste pri većem faktoru C za isti tip baterije (isti kapacitet) jer manje traje sam proces punjenja baterije. Nadalje, struja punjenja je konstantnog iznosa sve dok napon punjenja ne dosegne vršnu vrijednost, te tada struja punjenja krene naglo padati. Iz grafičke analize mjerenja vidljivo je kako povratna učinkovitost Li-ion baterija opada povećanjem faktora C zbog većih vrijednosti struja punjenja/pražnjenja. Što je veća struja punjenja/pražnjenja, to su maksimalni napon i granični napon ćelije manji čime se smanjuje kapacitet skladištenja energije. Kako unutarnji otpor raste, tako se učinkovitost baterije i toplinska stabilnost smanjuju jer se ujedno povećava i temperatura. Najbolji rezultati povratne učinkovitosti dobiveni su kod mjerenja sa faktorom 0,2C punjenja/pražnjenja što se i očekivalo zbog najmanjih vrijednosti struja punjenja/pražnjenja. Usporedbom utjecaja različitih faktora C punjenja/pražnjenja na povratnu učinkovitost različitih tipova Li-ion baterija možemo zaključiti da SONY US18650VTC5 baterija ima najbolju povratnu učinkovitost u odnosu na Panasonic NCR18650B bateriju i LG 18650HG2 bateriju.

LITERATURA

- [1] Electrical Energy Storage project team: „Electrical Energy Storage“, International Electrotechnical Commission – IEC, Switzerland, 2011., link na opis različitih sustava za pohranu električne energije: <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>, [21.09.2020.]
- [2] Zechun Hu: „Energy Storage for Power System Planning and Operation“, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, China, 2020.
- [3] Francisco Díaz-González, Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt : „Energy Storage in Power Systems“ John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2016.
- [4] Andreas Oberhofer, Peter Meisen : „Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration“, Global Energy Network Institute (GENI), California, 2012.
- [5] Gaizka Saldaña, José Ignacio San Martín, Inmaculada Zamora, Francisco Javier Asensio, Oier Oñederra: „Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation“, *Energies*, No. 2750, Vol. 12, 2019.
- [6] Internetska stranica tvrtke Energy Storage Association, link na opis tehnologije baterija opisanih u teorijskom dijelu rada: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/solid-electrode-batteries/#>, [21.09.2020.]
- [7] Internetska stranica Battery University, link na opis tehnologije baterija opisanih u teorijskom dijelu rada: https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries, [21.09.2020.]
- [8] MIT Electric Vehicle Team: „A Guide to Understanding Battery Specifications“, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA, USA, 2008, link na opis specifikacija baterija: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf, [21.09.2020.]
- [9] Md Multan Biswas, Md Shafiul Azim, Tonmoy Kumar Saha, Umama Zobayer, Monalisa Chowdhury Urmi: „Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems“, *Smart Grid and Renewable Energy* Vol.4 No.1, 2013
- [10] Internetska stranica tvrtke iCharger NZ, link na priručnik uređaja Junsi iCharger 4010 Duo za punjenje/praznjenje baterija korišten u praktičnom dijelu rada: <https://www.icharger.co.nz/assets/brochures/4010DUO.pdf>, [21.09.2020.]

[11] Internetska stranica tvrtke AA Portable Power Corp., link na specifikacije Panasonic NCR18650B baterije korištene u praktičnom dijelu rada :

<https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf>, [21.09.2020.]

[12] Internetska stranica tvrtke NKON, link na specifikacije LG baterije korištene u praktičnom dijelu rada : <https://www.nkon.nl/sk/k/hg2.pdf>, [21.09.2020.]

[13] Internetska stranica tvrtke PowerStream, link na specifikacije SONY baterije korištene u praktičnom dijelu rada : <https://www.powerstream.com/p/us18650vtc5-vtc5.pdf>, [21.09.2020.]

[14] Internetska stranica tvrtke Panasonic, link na specifikacije Panasonic eneloop pro BK-3HCDE baterije korištene u praktičnom dijelu rada : https://www.panasonic-eneloop.eu/sites/default/files/Catalogue_eneloop_ENG_2017_DEF_LR.pdf, [21.09.2020.]

SAŽETAK

U ovome radu opisani su različiti sustavi za pohranu električne energije te su objašnjene glavne karakteristike svakog pojedinog sustava. Elektrokemijski sustavi za pohranu električne energije (baterije) detaljnije su opisani i uspoređeni s obzirom na glavne karakteristike svake pojedine tehnologije baterije. U sklopu praktičnog dijela u Laboratoriju za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija provedena su mjerenja za tri vrste Li-ion baterija: Panasonic NCR18650B, LG 18650HG2 te SONY US18650VTC5 i jednu vrstu NiMH baterija: Panasonic eneloop pro BK-3HCDE. Objasnjen je način punjenja/pražnjenja Li-ion baterija (CC-CV način punjenja/pražnjenja) te princip rada uređaja korištenog za provedbu mjerenja. Prikazana je grafička analiza mjernih rezultata te je analiziran utjecaj različitih faktora C prilikom procesa punjenja/pražnjenja na napon, struju, snagu i energiju punjenja/pražnjenja te stanje energije i povratnu učinkovitost na svaku pojedinu Li-ion bateriju. Na osnovu grafičke analize zaključeno je da su najbolji rezultati povratne učinkovitosti dobiveni kod mjerenja sa faktorom 0,2C punjenja/pražnjenja. Usporedbom utjecaja različitih faktora C punjenja/pražnjenja na povratnu učinkovitost različitih tipova Li-ion baterija zaključeno je da SONY US18650VTC5 baterija ima najbolju povratnu učinkovitost.

Ključne riječi: baterija, Li-ion, pohrana električne energije, faktor C, povratna učinkovitost

ABSTRACT

This thesis describes different electricity storage systems and explains the main characteristics of each system. Electrochemical systems for storing electricity (batteries) are described in more detail and compared with regard to the main characteristics of each individual battery technology. As part of the practical part in the Laboratory for Renewable Energy Sources at the Faculty of Electrical Engineering, Computing and Information Technology, measurements were performed for three types of Li-ion batteries: Panasonic NCR18650B, LG 18650HG2 and SONY US18650VTC5 and one type of NiMH batteries: Panasonic enloop pro BK-3HCDE. The method of charging/discharging Li-ion batteries (CC-CV mode of charging / discharging) and the principle of operation of the device used to perform the measurement are explained. A graphical analysis of the measurement results is presented and the influence of various C – rates during the charging/discharging process on the voltage, current, power and energy of the charging/discharging and the state of energy and round trip efficiency on each individual Li-ion battery is analyzed. Based on the graphical analysis, it was concluded that the best round trip efficiency results were obtained when measuring with a 0.2C charge/discharge rate. By comparing the influence of different charge/discharge C - rates on the round trip efficiency of different types of Li-ion batteries, it was concluded that the SONY US18650VTC5 battery has the best round trip efficiency.

Key words: battery, Li-ion, electrical energy storage, C – rate, round trip efficiency

ŽIVOTOPIS

Dominik Jurak

Vijenac Ivana Meštrovića 6, 31000 Osijek

Mob: 098/732-225

email: dominik.jurak1@gmail.com

Dominik Jurak rođen je 14.03.1996. u Osijeku. Završio je Osnovnu školu Vijenac u Osijeku. Zatim je upisao Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer elektrotehničar. Srednju školu završava 2014. godine sa odličnim uspjehom te iste godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Preddiplomski studij završava 2018. godine kada upisuje i diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, modul održiva energetika.