

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Jan Grgić

Lovro Lukač

**IZRADA I TESTIRANJE ELEKTRIČNOG
BICIKLA**

Zagreb, 2023.

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za napredne elektroenergetske sustave, u Zavodu za visoki napon i energetiku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Tomislava Capudera i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022./2023.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Izrada baterijskog paketa	2
2.1. Općenito o baterijama	2
2.2. Sustav upravljanja baterijom	5
2.3. Postupak izrade baterijskog paketa.....	8
3. Izrada električnog bicikla.....	12
3.1. Elektromotor	12
3.2. Kontroler.....	13
4. Laboratorijsko testiranje	16
4.1. Opis laboratorijske opreme	16
4.2. Testiranje ćelije.....	18
4.3. Testiranje paketa	23
5. Terensko testiranje.....	32
5.1. Cilj terenskog testiranja	32
5.2. Vizualizacija kretanja vozila.....	32
5.3. Proračun sila	36
5.4. Proračun snage i energije.....	39
6. Zaključak	44
Literatura.....	46
Sažetak.....	48
Summary.....	49

1. Uvod

Elektromobilnost u posljednje vrijeme postaje sve popularniji izbor za kretanje ljudi, posebice u gradovima. Električni bicikli i romobili nude niz prednosti uključujući smanjenu emisiju štetnih plinova, manju buku tijekom vožnje i smanjenje gužve u gradskom prometu te takvim karakteristikama predstavljaju ekološki prihvatljivu opciju. Iako su cijene električnih bicikla relativno visoke, u posljednje je vrijeme u trendu elektrifikacija voznih parkova raznih kompanija, a najuočljivija je u tvrtkama za dostavu hrane koje u velikoj mjeri koriste električne bicikle i mope. Također, razvojem tehnologije i padom cijena baterija električni bicikli postaju cjenovno sve pristupačniji, a postoje i poticajne mjere za kupnju električnih bicikla u cilju promoviranja održivog prijevoza. Zbog svega toga primjena električnih bicikla postaje sve šira, a sve su češći izbor i za turiste koji žele istražiti prirodne ljepote putujući na veće udaljenosti bez napora, posebno u brdovitim područjima, bez utjecaja na okoliš.

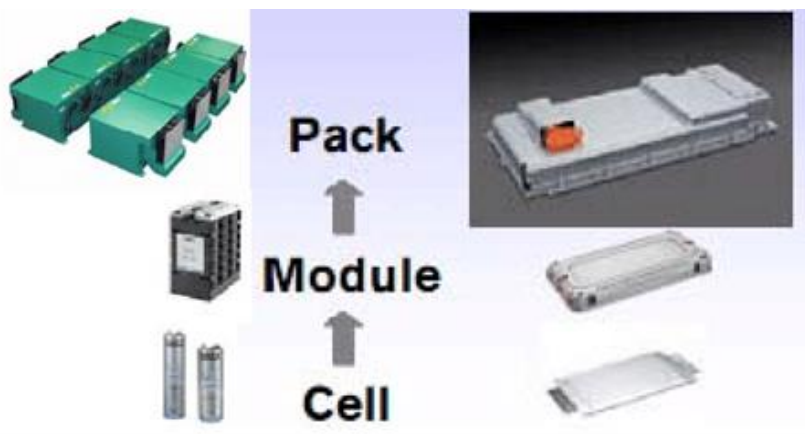
Razne primjene električnih bicikala zahtijevaju i različito dimenzionirane dijelove bicikla. Jedan je od glavnih dijelova baterijski paket koji mora biti sposoban pružiti traženu snagu kao i osigurati dovoljnu količinu spremljene energije kako bi se omogućio traženi domet. Uz to, baterijski paket mora biti ograničenih dimenzija kako bi se uklopio u okvir bicikla. Ispravno i optimalno dimenzioniranje baterijskog paketa osigurava se provođenjem određenih testiranja u laboratoriju i na terenu.

Cilj je ovog rada odabir komponenata, izrada prototipne baterije, sklapanje i testiranje električnog bicikla te projektiranje veće baterije prema zahtjevima dometa. Prototipna baterija testirat će se u laboratoriju pri različitim uvjetima, a cijeli bicikl testirat će se na specifičnoj ruti na temelju čega će biti moguće nadograditi karakteristike bicikla koje eventualno nisu zadovoljavajuće poput traženog momenta, snage, dometa i sl. Takva bi nadogradnja zahtijevala promjenu motora, kontrolera te projektiranje nove baterije. Također, analizirat će se i utjecaj naponskih ograničenja pražnjenja baterije što je bitno za ispravno podešavanje postavki sustava za upravljanje baterijom.

2. Izrada baterijskog paketa

2.1. Općenito o baterijama

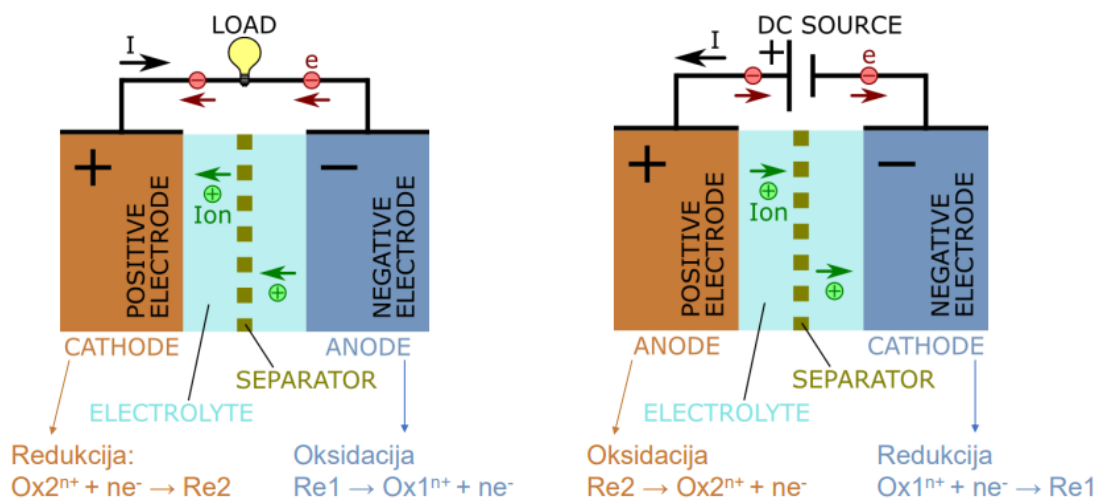
Baterije su elektrokemijski uređaji koji na temelju razlike potencijala između dva različita metala potopljenih u otopinu elektrolita mogu generirati električnu energiju. Baterije mogu biti primarne ili nepunjive, sekundarne ili punjive, rezervne i protočne. Primarne se baterije nakon prvog ciklusa pražnjenja više ne mogu napuniti (alkalne, LiFeS₂), dok sekundarne baterije mogu vršiti mnogostruke cikluse pražnjenja i punjenja (olovne, nikalne, litij-ionske, natrij-sumpor). Najmanji odvojni dio baterije koji se sastoji od aktivnih dijelova (elektrode, elektrolit sa separatorom), te se može puniti/prazniti naziva se ćelija. Napon ćelije određen je elektrokemijskim svojstvima materijala, dok je kapacitet određen veličinom ćelije (površina elektroda, količina elektrolita). Povezivanjem više ćelija serijskim ili paralelnim spojem dobiva se baterija s većim naponom (V), odnosno većim strujnim kapacitetom (Ah). Više električki povezanih ćelija zatvorenih u mehanički okvir naziva se baterijski modul. Mehanički okvir štiti modul od vanjskih udaraca, topline i vibracija. Više povezanih modula čini baterijski paket (Slika 2.1). Baterijski paket električki povezuje module te ih kroz sustav baterijskog upravljanja integrira u sustav koji koristi električnu energiju. Nadzor, upravljanje i zaštita izvršava se kroz sustav upravljanja baterijom (engl. Battery Management System, BMS).



Slika 2.1 Sastavljanje baterije

Osnovni su dijelovi baterijske ćelije pozitivna i negativna elektroda te elektrolit sa separatorom. Pozitivna elektroda ima veći standardni elektrodni potencijal te prilikom pražnjenja dolazi do redukcije, odnosno prihvata elektrona, dok prilikom punjenja dolazi do

oksidacije, odnosno otpuštanja elektrona. Na negativnoj elektrodi prilikom pražnjenja dolazi do oksidacije, a prilikom punjenja do redukcije (Slika 2.2). Elektrolit je sredstvo koje omogućuje tok iona između dvije elektrode, a u njega je uronjen separator koji odvaja elektrode. Separator propušta ione, a ne dopušta prolaz elektronima. Na taj je način omogućen rad baterije tako da elektroni vanjskim strujnim krugom putuju među elektrodama, dok ioni unutarnjim tokom putuju među elektrodama kroz elektrolit i separator. Potrebno je naglasiti da kod sekundarnih baterija izrazi pozitivna elektroda i katoda te negativna elektroda i anoda nisu istoznačnice pošto anoda predstavlja elektrodu na kojoj dolazi do oksidacije, dok je katoda elektroda na kojoj dolazi do redukcije. Za razliku od sekundarnih baterija, kod primarnih baterija koje nisu punjive (odnosno namijenjene su samo za pražnjenje) može se reći da je pozitivna elektroda katoda, a negativna elektroda je anoda.



Slika 2.2 Princip rada baterije

Glavne su karakteristike sekundarnih baterija napon i kapacitet. Kapacitet predstavlja količinu električnog naboja koja se može pohraniti u bateriji te se izražava u Amper-satima (Ah). Amper-sati predstavljaju struju koju baterija može isporučiti kroz vrijeme. Tako baterija nazivnog kapaciteta 20 Ah teoretski može isporučivati struju od 20 A tijekom jednog sata (1 C) ili 10 A tijekom dva sata (0.5 C). Brzina kojom se baterija puni ili prazni označava se C-razinom (engl. C-rate). U praksi, nazivni kapacitet može se ostvariti samo s niskim strujama pražnjenja. Kapacitet se smanjuje s vremenom (kalendarsko starenje) i korištenjem (cikličko starenje). Osim preko naboja, kapacitet je moguće definirati kao količinu električne energije pohranjene u bateriji, te se u tom slučaju izražava u Watt-satima (Wh). Još neke bitne karakteristike prilikom projektiranja baterija su specifična energija (kapacitet baterije po jedinici mase), specifična snaga (najveća dostupna snaga po jedinici mase), gustoća

energije (kapacitet baterije po jedinici volumena) i gustoća snage (najveća dostupna snaga po jedinici volumena) [1].

Postoje razne vrste baterija: olovne, natrij-sumporne, nikalne, litij-ionske. Olovne baterije prve su komercijalne sekundarne baterije. Zbog niže cijene u odnosu na moderne tehnologije imaju široku upotrebu. Najčešće se koriste u sustavima pomoćnog napajanja te kao pokretač motora u vozilima. Glavne karakteristike su im visoka specifična snaga, niska stopa samopražnjenja te visok specifični kapacitet [2]. Međutim zbog niske specifične energije, nemogućnosti brzog punjenja i dubokog pražnjenja nisu pronašle primjenu u pogonu električnih vozila. Natrij-sumporne baterije imaju veću specifičnu energiju od olovnih. Također, imaju i veliki životni vijek (oko 2500 ciklusa), međutim nedostatak je što je bateriju potrebno dovesti na 300-350 °C kako bi se reakcija mogla odvijati [3]. Zbog toga nisu upotrebljive u pogonima električnih vozila. Baterije na bazi nikla u početku su se izvodile u kombinaciji nikal-kadmij, ali zbog njihove toksičnosti zamijenjene su nikal-metal-hidridnom (NiMH) tehnologijom. Nikal-kadmij baterije imaju mnoge dobre karakteristike poput rada na velikom opterećenju, brzog punjenja i velikog broja ciklusa. Međutim zbog efekta pamćenja, visoke stope samopražnjenja i toksičnosti danas nisu u primjeni. NiMH baterije manje su sklone efektu pamćenja i nisu toksične, ali ih je potrebno održavati. Također, njihovo je punjenje kompleksno zbog osjetljivosti na prenapunjenost [4]. NiMH baterije korištene su u prvim komercijalnim hibridnim vozilima, Toyoti Prius i Hondi Insight [5]. U usporedbi s drugim vrstama baterija, litij-ionske baterije imaju veću gustoću energije (dvostruko veća od NiMH baterija) i snage, relativno dug životni vijek te visoki napon ćelije [6]. Također, velika je prednost litij-ionskih baterija što ih nije nužno održavati jer nisu podložne štetnim efektima poput efekta pamćenja ili kristalizacijskog efekta. Zbog toga nema potrebe za periodičnim pražnjenjem, a može ju se puniti u bilo kojem stupnju napunjenosti. Životni vijek litij-ionskih baterija je 500-1000 ciklusa što je također pogodna karakteristika za raznu primjenu, od mobilnih uređaja do električnih vozila. Glavna je prednost litij-ionskih baterija nad ostalima vezana za uporabu na električnim biciklima velika gustoća energije. Za bicikl je poprilično bitna što manja masa, a ovom se vrstom baterija mogu ostvariti odlične performanse uz relativno malu masu. Upravo će se iz tog razloga u projektu koristiti litij-ionske baterije.

Litij-ionske baterije vrlo su reaktivne i slabo podnose različita stanja za koja nisu namijenjene. Prilikom zapaljenja dolazi do lančane reakcije koju nije moguće zaustaviti, a s obzirom na veliku količinu energije koju pohranjuju, to može imati velike posljedice. Slabost

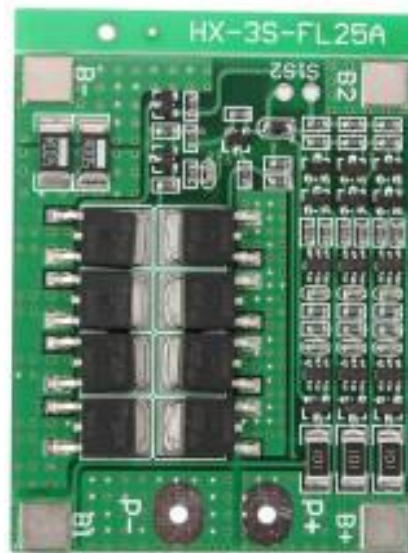
je ove vrste baterija osjetljivost na prenapunjenost kao i na pretjerano pražnjenje. Većina litij-ionskih baterija dolazi s upozorenjem da se ne smiju puniti na više od 4.2 V niti prazniti na manje od 2.5 V. Te su vrijednosti ekstremi te se taj interval može i smanjiti radi povećanja životnog vijeka baterije. Također, svaka litij-ionska baterija ima ograničenje na jačinu električne struje u kratkom intervalu (npr. na 10 sekundi, veća vrijednost struje) te konstantno (manja vrijednost struje koju baterija može podnijeti na dulje vrijeme). Ako se te vrijednosti prekorače, dolazi do zagrijavanja baterija koje se onda mogu zapaliti. Pretjerano se zagrijavanje može dogoditi i u nekim drugim situacijama (npr. visoka vanjska temperatura) pa i tada postoji opasnost od samozapaljenja bez obzira na poštivanje preporučenih vrijednosti [6]. Jedan od najvećih problema koji prati sve baterije, a ne samo litij-ionske je što ne postoje dvije ćelije identičnog kapaciteta i kulonske efikasnosti bez obzira što su napravljene u istoj tvornici isti dan. Iz tog se razloga neke ćelije u baterijskom paketu mogu napuniti brže, a neke sporije i ako se ne koristi sustav zaštite, može doći do prenapunjenosti nekih članaka u paketu. Isto se tako može dogoditi i prilikom pražnjenja ako se neki članci brže isprazne.

2.2. Sustav upravljanja baterijom

BMS (eng. Battery management system) je elektronički sustav koji upravlja radom baterije, a može upravljati jednom ćelijom ili baterijskim paketom. Njegov je zadatak zaštita, nadzor i regulacija punjenja i pražnjenja baterijskog paketa s ciljem produljenja životnog vijeka te efikasnog iskorištavanja dostupnog kapaciteta. Neke od najvažnijih funkcija BMS-a su zaštita baterije od rada izvan sigurnog radnog područja, praćenje stanja baterije, izračunavanje sekundarnih podataka, izvještavanje tih podataka, kontroliranje okoline i balansiranje [7]. BMS koji će se koristiti u ovome projektu morat će ispunjavati sljedeće zahtjeve:

- onemogućavanje rada baterije izvan sigurnog radnog područja
- mjerenje napona ćelije i paketa
- mjerenje temperature
- mjerenje struje
- balansiranje ćelija
- upravljanje punjenjem

- mjerenje kapaciteta baterije
- povezivanje na aplikaciju putem bluetooth modula
- ograničavanje maksimalne struje
- računanje stanja napunjenosti (eng. state of charge, SOC)



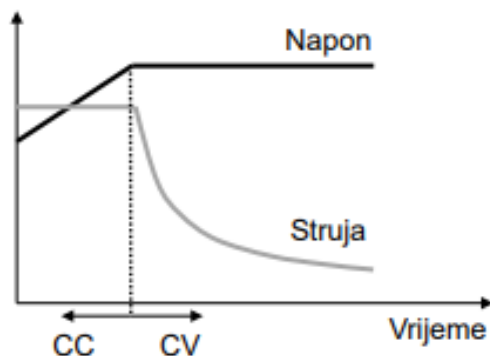
Slika 2.3 BMS

Pošto su litij-ionske baterije sigurne za rad u određenom naponskom intervalu (najčešće 2.5 V - 4.2 V), bitno je konstantno pratiti napon svake grupe u seriji. Preciznost u mjerenju napona treba biti 1 mV, dok će frekvencija mjerenja biti određena ograničenjima sklopa. Precizno mjerenje napona pomoći će i u procjeni stanja napunjenosti.

Mjerenje temperature izrazito je važna zadaća BMS-a. Osim odabira dobrih senzora za mjerenje temperature, bitno ih je i postaviti na prava mjesta u baterijskom paketu kako bi mjerenja imala smisla. BMS mora onemogućiti punjenje i pražnjenje kad je temperatura izvan sigurnog intervala. S obzirom na to da različiti proizvođači imaju različite operativne temperaturene intervale, BMS za ovaj projekt mora nuditi mogućnost postavljanja tih intervala u aplikaciji koja će se na BMS povezivati putem bežičnog protokola.

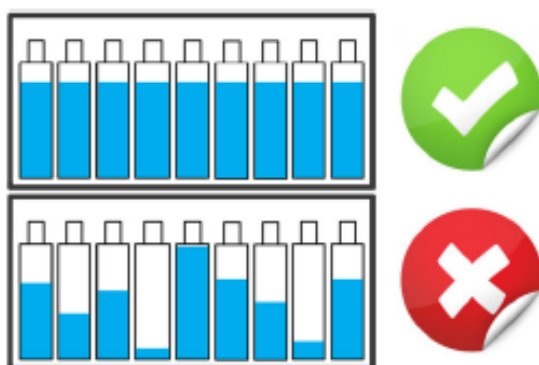
BMS ima i bitnu ulogu mjerenja struje pošto se u električne bicikle ne ugrađuju kontaktori pa je zadaća BMS-a prekidanje napajanja kad se prekorači maksimalna struja. Ovaj parametar također mora biti podesiv u aplikaciji. Druga je važna uloga mjerenja struje određivanje napunjenosti baterije. Mjerenjem struje na izlazu iz baterijskog paketa, može se ustanoviti koliko je električne energije potrošeno te približno odrediti stanje napunjenosti.

BMS upravlja punjačem na dva načina. Prvi način rada je uz konstantnu struju (engl. Constant current - CC). Na početku punjenja baterijski se paket puni konstantnom strujom, dopuštajući naponu da raste. Drugi je način rada uz konstantni napon (engl. Constant voltage - CV). Kad je paket skoro napunjen, i iznos njegovog napona postane konstantan, punjač održava konstantnu vrijednost napona dok struja opada što je paket više napunjen. Uz navedene načine rada postoji još rad uz konstantnu snagu.



Slika 2.4 CC i CV način punjenja

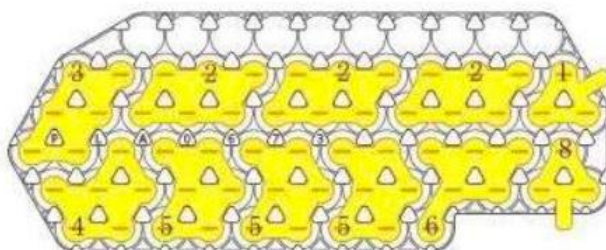
Balansiranje ćelija nužna je funkcija sustava za upravljanje baterijom električnog bicikla jer motori električnih bicikala najčešće rade na naponima od 24 V - 48 V te je u baterijskom paketu potrebno povezati nekoliko članaka u seriju. S obzirom na karakteristiku litij-ionskih baterija da svaka ima različiti kapacitet te kulonsku efikasnost, može se dogoditi da se neke ćelije napune prije te je zadaća BMS-a zaustaviti punjenje te ćelije dok se ostale još pune. Takav se način balansiranja zove pasivno balansiranje. Uz pasivno, postoji još i aktivno balansiranje. Prilikom aktivnog balansiranja, BMS premješta energiju iz grupa većeg napona u grupe manjeg napona koristeći kondenzatore ili zavojnice.



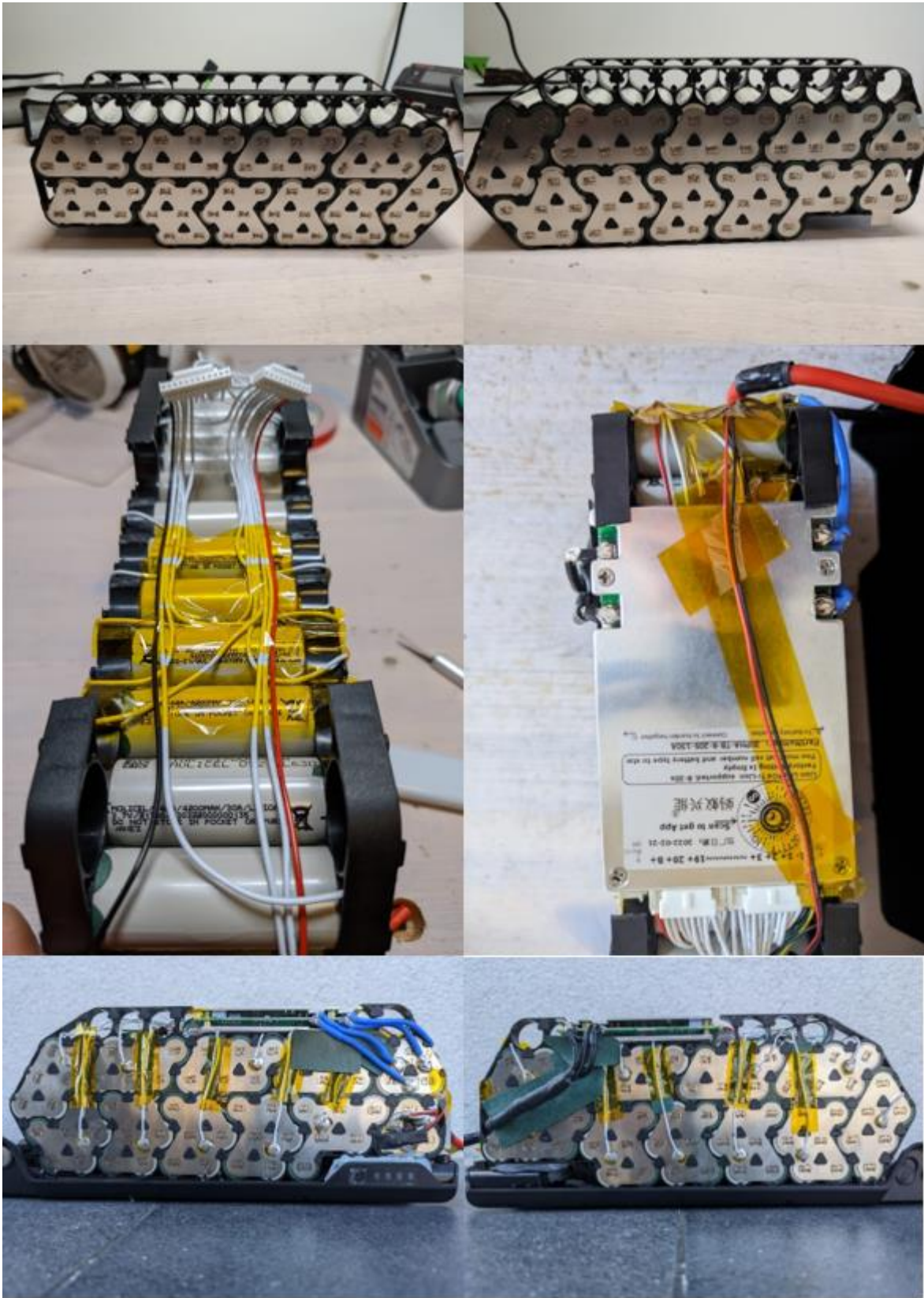
Slika 2.5 Balansiranje ćelija

2.3. Postupak izrade baterijskog paketa

Za izradu baterije odabrana je plastična kutija proizvođača „Reention“ jer je najveća kutija koja stane u ramu bicikla. Ta se kutija vrlo jednostavno skida s bicikla te stavlja na bicikl pa je pogodna za testiranje u laboratoriju. Također, kutija ima ključ pa je sigurna i od krađe. U kutiju stane maksimalno 91 komad 18650 ćelija, odnosno 70 komada 21700 ćelija. S obzirom na to da je odabran nazivni napon baterijskog paketa 72 V (odnosno 20 ćelija je spojeno u seriju), u kutiju je moguće staviti 80 komada 18650 ćelija, odnosno 60 komada 21700 ćelija. Ostatak prostora koristit će BMS. Istraživanjem dostupnih ćelija u Europi, zaključeno je da su ćelije Molicel P42A (formata 21700) najbolja opcija za ovaj projekt. Te su ćelije povoljne jer spadaju u kategoriju baterija snage, odnosno imaju nešto manji kapacitet, ali mogu davati veliku snagu. Kapacitet ćelije je 4.2 Ah te 15.5 Wh, a prema specifikaciji može isporučiti kontinuiranu struju od 45 A (uz konstantno mjerenje temperature svake ćelije). Gustoća energije ćelije iznosi 615 Wh/l, dok je specifična energija 230 Wh/kg. Odabirom P42A baterija slijedi da će paket biti sastavljen od 60 ćelija. 20 u seriju te 3 u paralelu. To odgovara odabiru kontrolera koji radi na nazivnom naponu od 72 V. Maksimalna struja ćelije u ovome će paketu biti 30 A jer je to struja koju proizvođač označava kao maksimalnu ukoliko se ne mjeri temperatura svake ćelije. To znači da je maksimalna struja paketa $3 \cdot 30 = 90$ A što također odgovara kontroleru kojemu je maksimalna struja 80 A. Nakon odabira ćelije i kutije, napravljena je shema spajanja ćelija u paket 20s3p. Model spojki napravljen je korištenjem programa “Fusion 360” te su spojke laserski rezane. S obzirom na velike struje, odlučeno je da će paket imati dva sloja spojki. Prvi se sloj sastoji od poniklanog bakra debljine 0.2 mm, dok se drugi sloj sastoji od čistog nikla debljine 0.15 mm. Ćelije su spajane točkastim zavarivanjem nakon čega je postavljen BMS



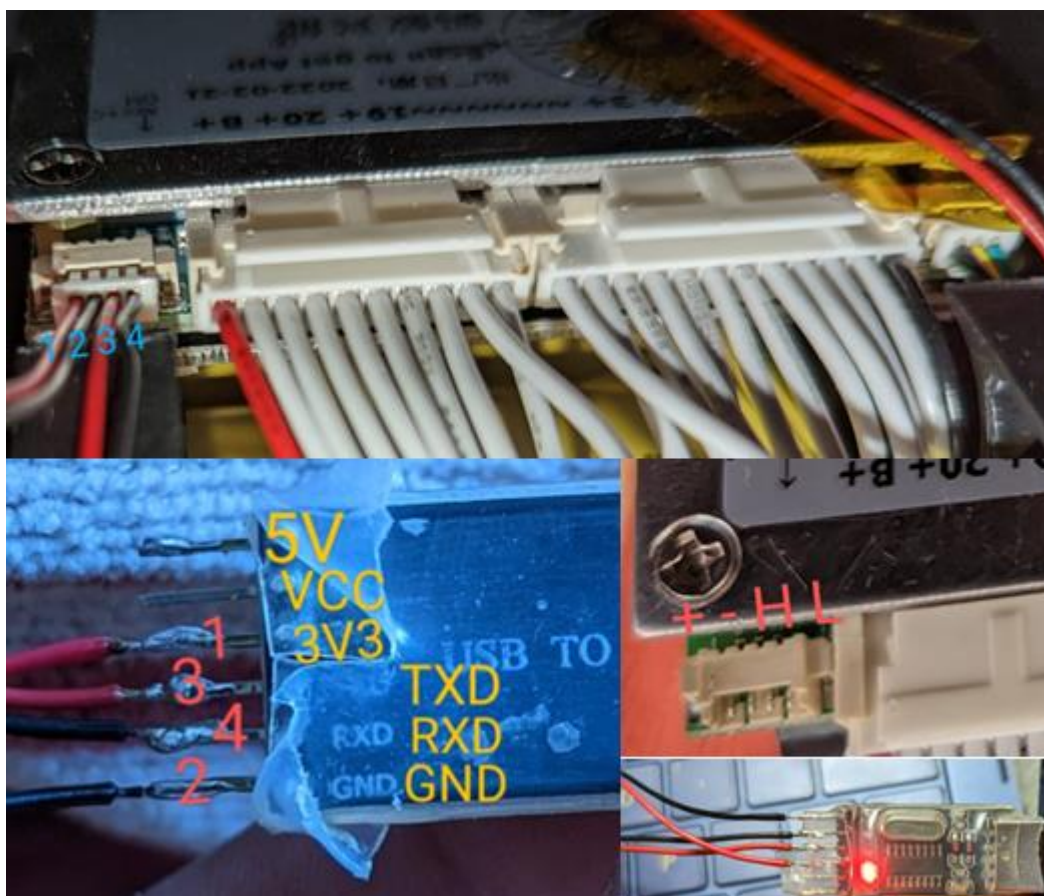
Slika 2.6 Shema spajanje ćelija



Slika 2.7 Sastavljanje baterije

BMS proizvođača „Ant“ odabran je zbog povezivosti putem bluetooth-a i TTL-a te mogućnosti mijenjanja raznih parametara. Za spajanje ovog BMS-a na računalo, napravljen je kabel koji omogućuje TTL komunikaciju putem USB konektora.

Na sljedećim je slikama prikazano lemljenje pločice. Također, pomoću te je pločice i ažuriran firmware BMS-a kako bi se mogli logirati podaci prilikom vožnje.



Slika 2.8 Lemljenje pločice i kabela za TTL

Radi prevelike struje za konektore u kutiji, kutija je na kraju probušena te su glavne žice izvedene kroz rupe. Na njih je postavljen XT-90 konektor. Za ovu je bateriju kupljen punjač 84 V, 5 A koji bateriju napuni za otprilike 2 sata i 30 minuta.



Slika 2.9 Baterija spojena na punjač

3. Izrada električnog bicikla

Prema [8] električni je bicikl vozilo koje ima najmanje dva kotača i koje se pokreće isključivo snagom vozača ili koje je opremljeno pedalama i pomoćnim električnim motorom čija najveća trajna snaga nije veća od 0.25 kW i koja se progresivno smanjuje do nule kad brzina dostigne 25 km/h, ili prije, ako vozač prestane pokretati pedale. Električni dio bicikla sastoji se od motora, kontrolera (invertera) te baterijskog paketa sa sustavom upravljanja (BMS). U prethodnom je poglavlju predstavljen baterijski paket, a u ovom poglavlju ostali dijelovi bicikla.

3.1. Elektromotor

Pogon električnog bicikla može biti ostvaren kao pomoć vozaču ili kao kompletan pogon. Prema smještaju motora na biciklu razlikuju se središnji motor, motor u prednjoj nabi i motor u stražnjoj nabi. Motori su uglavnom istosmjerni bez četkica (BLDC) pošto mogu pružiti veću snagu od istosmjernih motora sa četkicama [9]. Središnji motor može pružiti najviše momenta, međutim pošto je potreban prijenos do pogonskog kotača, lanac i lančanici se dodatno troše. S druge strane, motori smješteni u nabi imaju direktan prijenos na kotač što je pogodnije za veće brzine kretanja ili prijenos preko reduktora za manje brzine kretanja.

Za ovaj je projekt odabran najjači motor koji se može ugraditi na običan bicikl, Mxus 3k Turbo, a ugrađen je u stražnjoj nabi. Taj motor podnosi struju od 50 A bez većeg zagrijavanja, a na kraće vrijeme (do 30 sekundi) može podnijeti i 80 A, a spada u skupinu istosmjernih motora bez četkica. Odabrana je verzija s 3T (21x3) namotajima koja ima nešto veću krajnju brzinu te nešto manji moment od verzija 4T i 5T, a moment se prenosi bez reduktora. Ovaj je motor izrazito pogodan zbog 135mm osovine koja omogućava da ga se postavi na običan bicikl. Bitno je napomenuti da ovo vozilo sa motorom snage 3.6 kW prelazi kategoriju bicikla i spada u kategoriju električnog motocikla.

Tehničke karakteristike:

- 21x3 namotaja
- Moment 0.87 Nm/A
- Okretaji: 11 RPM/V
- Nominalna snaga: 3600 W pri 72 V

- Maksimalni napon: 120 V
- Kontinuirana struja: 50 A
- Maksimalna struja: 80 A
- 46 magneta (23 para)
- Širina osovine: 135 mm
- Masa: 9.4 kg



Slika 3.1 Mxus 3k Turbo motor

3.2. Kontroler

Kako bi se omogućilo upravljanje brzinom vrtnje motora potreban je kontroler. Kontroler preko senzora detektira položaj rotora motora na temelju čega upravlja puštanjem struja i magnetiziranjem zavojnica statora čime stvara okretno polje i uzrokuje vrtnju rotora.

Sabvoton SVMC72080 odabran je jer svojim karakteristikama savršeno odgovara odabranom motoru. Napravljen je za bateriju nominalnog napona 72 V, te mu je maksimalna struja 80 A. Kontroler proizvodi sinusne (a ne pravokutne) signale struje što omogućava tišu i energetski efikasniju vožnju te manje zagrijavanje motora.

Glavne karakteristike kontrolera:

- Nominalni napon: 72 V
- Maksimalna struja 80 A
- Ulaz za ekran s prikazom stanja baterije, brzine, puta i vremena vožnje

- Ulaz za ručicu za gas
- Sklopka za cestovni način rada (ograničenje na 25 km/h)
- Tempomat
- Regenerativno kočenje
- Alarm
- Mogućnost mijenjanja parametara putem bluetooth komunikacije



Slika 3.2 Sabvoton SVMC72080 kontroler



Slika 3.3 Električni bicikl

4. Laboratorijsko testiranje

4.1. Opis laboratorijske opreme

Laboratorijski dio testiranja proveden je u Laboratoriju za napredne elektroenergetske sustave Zavoda za visoki napon i energetiku. Testiranja su provedena za ćeliju kako bi se provjerile specifikacije proizvođača (slika 4.4) i odredila OCV (engl. *open circuit voltage*) krivulja te za cijeli paket kako bi se odredili potrebni podaci paketa. Ćelije su testirane na dvosmjernom AC/DC pretvaraču ITECH IT-M3622. Uređaj je prikazan na slici 4.1, a specifikacije u tablici 4.1. Za testiranje baterijskih modula i paketa u laboratoriju koristi se dvosmjerni AC/DC pretvarač ITECH IT6018C-800-75 koji omogućuje testiranje na većim strujama i naponu, odnosno snazi. Uređaj je prikazan na slici 4.2, a specifikacije u tablici 4.2. Upravljanje i komunikacija s pretvaračima ostvarena je preko SCADA sustava Cycle Killer razvijenog na Zavodu za visoki napon i energetiku. Testiranje je na ovaj način moguće provesti isključivo uz kontinuiranu struju, odnosno nije moguće simulirati stvarnu vožnju zadavanjem različitih struja u kratkim intervalima. Kako bi se postigla veća točnost mjerenja koriste se zasebne žice za mjerenje napona izravno na bateriji čime se izbjegava mjerenje pada napona na kablovima koji spajaju pretvarač i bateriju [10] (slika 4.3).



Slika 4.1 Pretvarač ITECH IT-M3622

Tablica 4.1 Specifikacije pretvarača ITECH IT-M3622

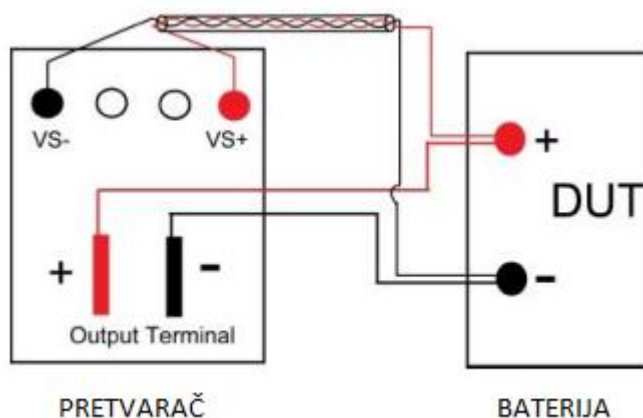
Nazivna izlazna snaga	400 W
Izlazni napon	0 – 60 VDC (rezolucija 1 mV)
Izlazna struja	-30 – 30 ADC (rezolucija 1 mA)
Ulaz	50 Hz, 230 V
Radni temperaturni raspon	0 – 40 °C



Slika 4.2 Pretvarač ITECH IT6018C-800-75

Tablica 4.2 Specifikacije pretvarača ITECH IT6018C-800-75

Nazivna izlazna snaga	18 kW
Izlazni napon	0 – 800 VDC (rezolucija 1 mV)
Izlazna struja	-75 – 75 ADC (rezolucija 1 mA)
Ulaz	50 Hz, 230 V
Radni temperaturni raspon	0 – 40 °C



Slika 4.3 Spoj baterije na pretvarač

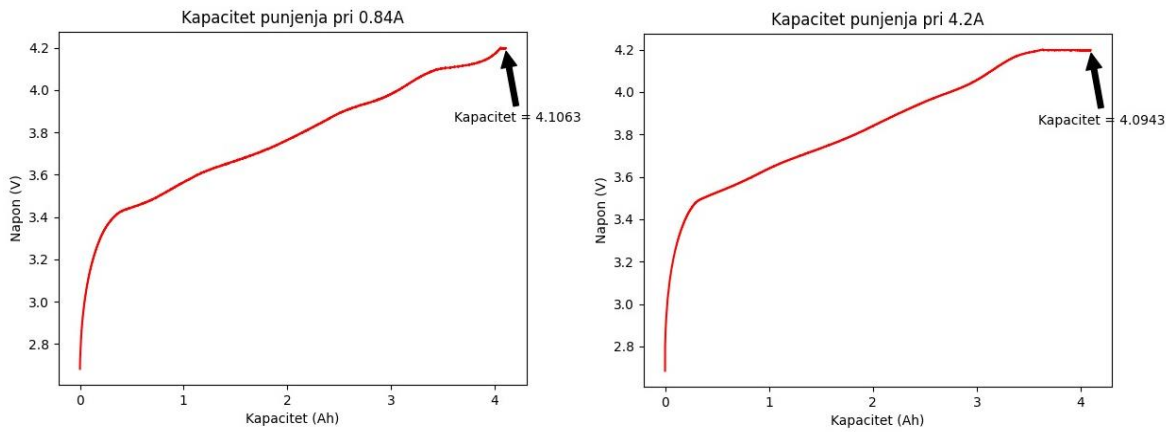
4.2. Testiranje ćelije

Testiranje je provedeno na ćeliji Molicel P42A čije su specifikacije prikazane na slici 4.4.

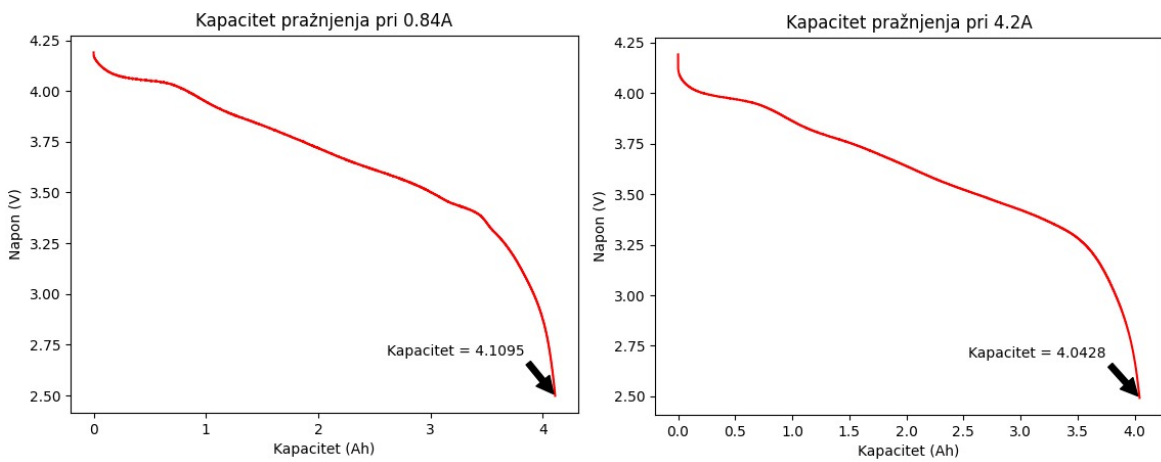
Capacity	Typical	4200 mAh 15.5 Wh
	Minimum	4000 mAh 14.7 Wh
Cell Voltage	Nominal	3.6 V
	Charge	4.2 V
	Discharge	2.5 V
Charge Current	Standard	4.2 A
Charge Time	Standard	1.5 hr
Discharge Current	Continuous	45 A
Typical Impedance	AC (1 KHz)	10 mΩ
	DC (10A/1s)	16 mΩ
Temperature	Charge	0°C to 45°C
	Discharge	-40°C to 60°C
Energy Density	Volumetric	615 Wh/l
	Gravimetric	230 Wh/kg

Slika 4.4 Specifikacije ćelije Molicel NR-21700-P42A

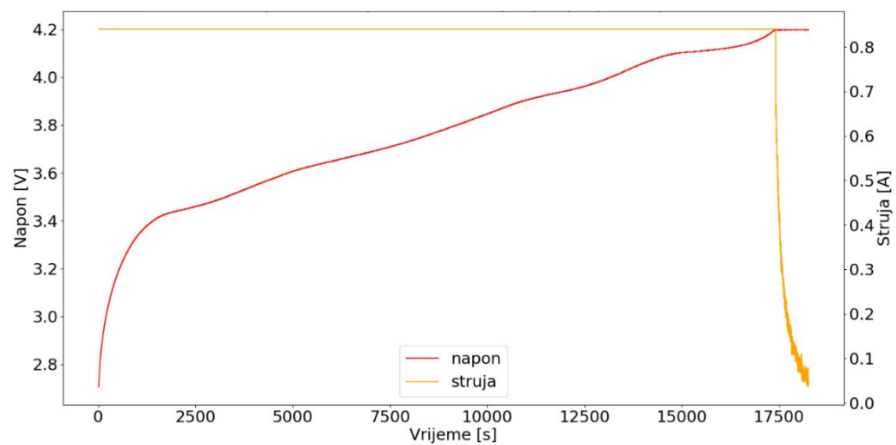
Na ćeliji su provedena testiranja punjenja i pražnjenja različitim strujama kako bi se odredio stvaran kapacitet i efikasnost te usporedili sa specifikacijama proizvođača. Na slici 4.5 prikazane su krivulje punjenja različitim strujama, 0.84 A (0.2 C) i 4.2 A (1 C). Moguće je uočiti da je punjenjem većom strujom ostvaren manji kapacitet, a nazivni kapacitet od 4.2 Ah nije dostignut niti punjenjem manjom strujom. Također, punjenje većom strujom uzrokuje raniji ulazak u CV fazu punjenja što je jasno vidljivo i na slikama 4.7 i 4.8. Kao i kod punjenja, pražnjenjem pri većim strujama ostvaruje se manji ispražnjeni kapacitet što je prikazano na slici 4.6.



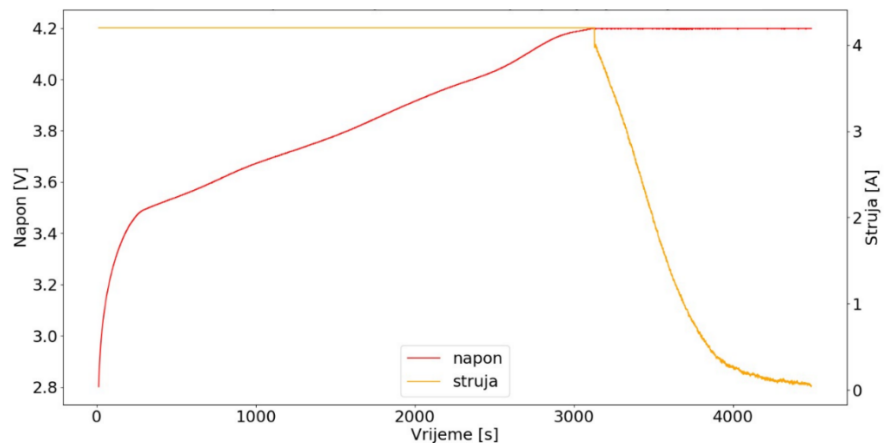
Slika 4.5 Punjenje ćelije različitim strujama



Slika 4.6 Pražnjenje ćelije različitim strujama

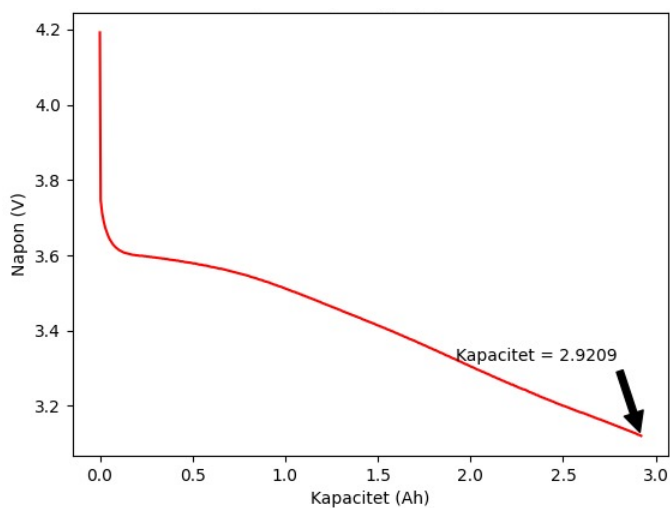


Slika 4.7 Ovisnost napona i struje o vremenu pri punjenju strujom 0.84 A

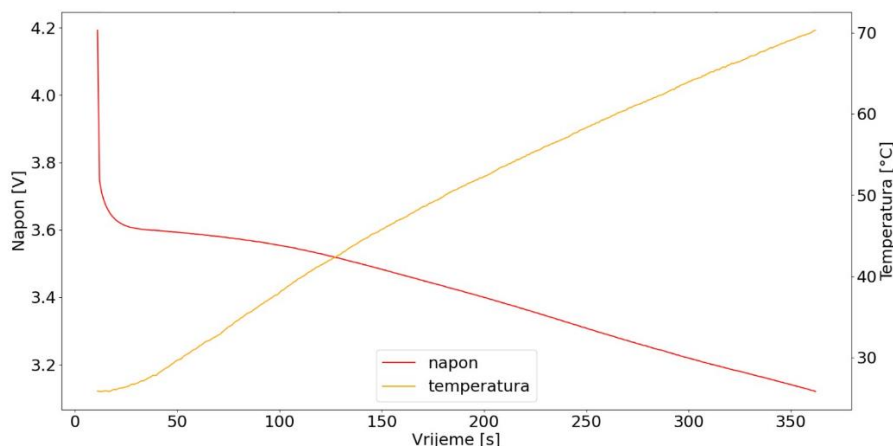


Slika 4.8 Ovisnost napona i struje o vremenu pri punjenju strujom 4.2 A

Ćelija je testirana i pri struji pražnjenja od 30 A. Prema specifikacijama proizvođača, ćelija bi trebala biti u mogućnosti prazniti se kontinuiranom strujom od 45 A. Međutim, pri testiranju na 30 A, dostignuta je temperatura od 70 °C nakon 6 minuta pražnjenja (slika 4.10), te je pražnjenje prekinuto nakon ispražnjenih 2.9209 Ah (slika 4.9).



Slika 4.9 Kapacitet pražnjenja ćelije pri 30 A



Slika 4.10 Ovisnost napona i temperature o vremenu pražnjenja pri 30 A

Uz poznate podatke o punjenju i pražnjenju ćelije pri strujama 0.2 C i 1 C moguće je odrediti efikasnosti ćelije. Efikasnost se prema mjerenim veličinama dijeli na kulonsku, naponsku i energetska. Kulonska je efikasnost omjer ispražnjenog i napunjenog kapaciteta, a kapacitet punjenja/pražnjenja moguće je odrediti integracijom struje punjenja/pražnjenja (1).

$$C = \int_0^T I(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$\eta^C = \frac{C^{dis}}{C^{ch}} \quad (2)$$

Litij-ionske baterije imaju vrlo visoku kružnu kulonsku efikasnost, uglavnom oko 99%, a manja je pri visokim strujama i temperaturama. Usporedbe radi, kružna kulonska efikasnost olovnih baterija iznosi oko 90%, dok se za nikalne baterije kreće u razmaku od 70 do 90%. Kod ciklusa pri 0.84 A, zbog mjerne pogreške, ispada da je kapacitet pražnjenja veći nego kod punjenja pa se kružna kulonska efikasnost može zaokružiti na 100%, dok pri većoj struji 4.2 A iznosi 98.74%. Za određivanje energetske efikasnosti ćelije potrebno je izračunati napunjenu i ispražnjenu energiju u ciklusu integriranjem snage punjenja i pražnjenja (3). Energetska efikasnost ciklusa pri 0.84 A iznosi 97.5%, dok pri većoj struji 4.2 A iznosi 92.61%

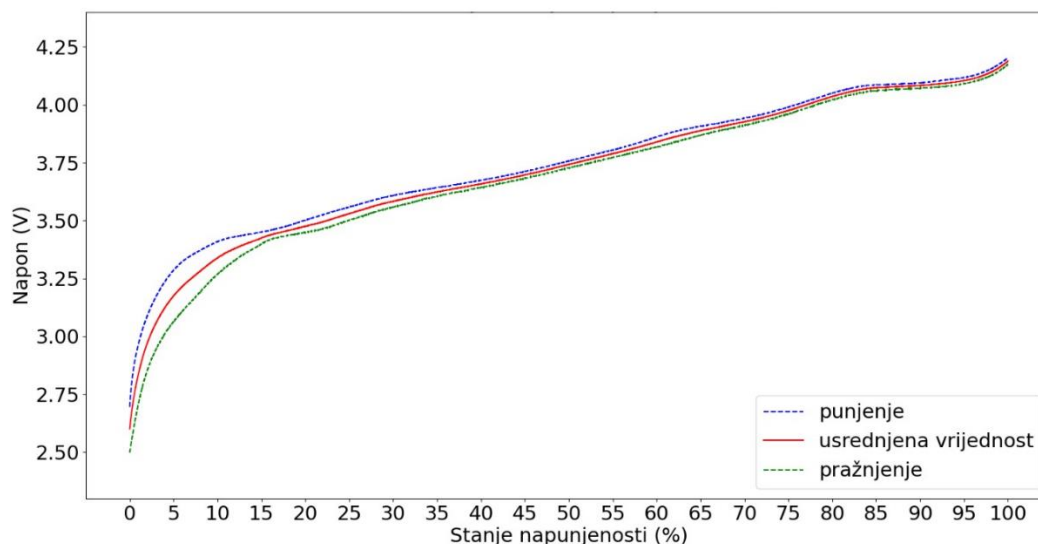
$$E = \int_0^T U(\tau) I(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$\eta^E = \frac{E^{dis}}{E^{ch}} \quad (4)$$

Mjerenjem struje i njenim integriranjem moguće je procijeniti stanje napunjenosti (engl. *state of charge*) baterije (5). Ta se metoda naziva brojanje kulona (engl. *coulomb counting*). Uz mjerenje struje punjenja/pražnjenja potrebno je znati točan kapacitet baterije te jednosmjerne kulonske efikasnosti koje nisu eksperimentalno određive, međutim mogu se zanemariti s obzirom na to da kružna kulonska efikasnost litij-ionskih baterija iznosi oko 99%.

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) + \eta^{ch,I} \cdot \frac{100}{c} \int_{t-1}^t I^{ch}(\tau) d\tau - \frac{1}{\eta^{dis,I}} \cdot \frac{100}{c} \int_{t-1}^t I^{dis}(\tau) d\tau \quad (5)$$

Osim brojanjem kulona, stanje napunjenosti moguće je procijeniti i pomoću OCV-SOC krivulje (engl. *open circuit voltage – state of charge curve*) koja povezuje napon otvorenog kruga i stanje napunjenosti baterije. Međutim ta je ovisnost nelinearna pa se procjena vrši pomoću “look-up” tablica ili polinomnom funkcijom [11]. Vrijednost napona u stabilnom stanju nakon punjenja ili pražnjenja predstavlja napon otvorenog kruga baterije na određenom stanju napunjenosti. Međutim, zbog različitih vremenskih skala unutarnjih kemijskih reakcija i procesa difuzije, potrebno je neko vrijeme da napon otvorenog kruga baterije dosegne stabilnu vrijednost [12]. Zbog toga je ova metoda neprikladna za primjenu u stvarnom vremenu. OCV-SOC krivulja određuje se eksperimentalno punjenjem i pražnjenjem baterije pri malim strujama. Na slici 4.11 prikazana je karakteristika za testiranu ćeliju pri strujama punjenja i pražnjenja 0.21 A. Moguće je uočiti da postoji raskorak između napona punjenja i pražnjenja. Stoga se napon otvorenog kruga određuje kao usrednjena vrijednost napona punjenja i pražnjenja pri određenom stanju napunjenosti [13].



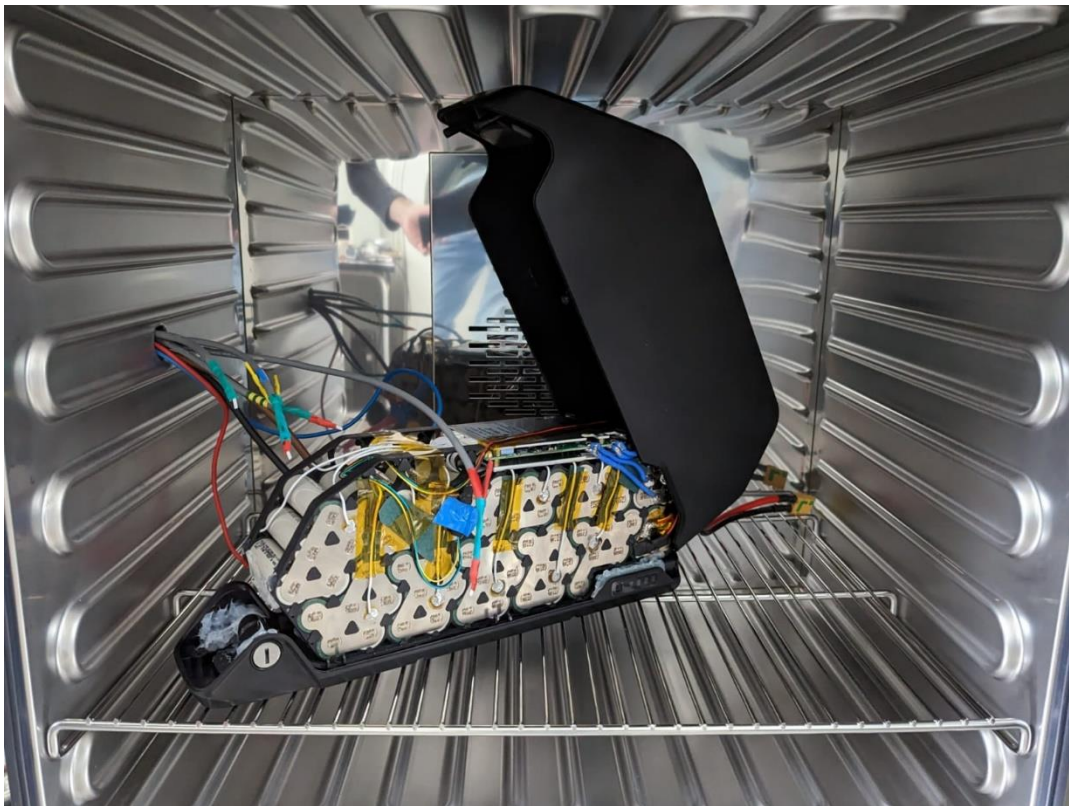
Slika 4.11 Određivanje OCV – SOC krivulje

4.3. Testiranje paketa

Testiranje je provedeno na prethodno opisanom paketu sastavljenom od Molicel P42A ćelija u konfiguraciji 20s3p. Paket je pražnjen pri različitim strujama i temperaturama te s različitim naponskim ograničenjima BMS-a. Cilj je testiranja odrediti kapacitet paketa u različitim uvjetima te koliko se kapaciteta može osloboditi pomicanjem naponskih ograničenja BMS-a. Također, potrebno je odrediti maksimalnu dopustivu struju bez pretjeranog zagrijavanja paketa (iznad 60 °C prema specifikaciji proizvođača). Za postizanje željenih temperatura prilikom testiranja paketa korištena je termalna komora Memmert u koju su provedene žice iz pretvarača ITECH IT6018C-800-75 te temperaturni senzori za praćenje temperature paketa.

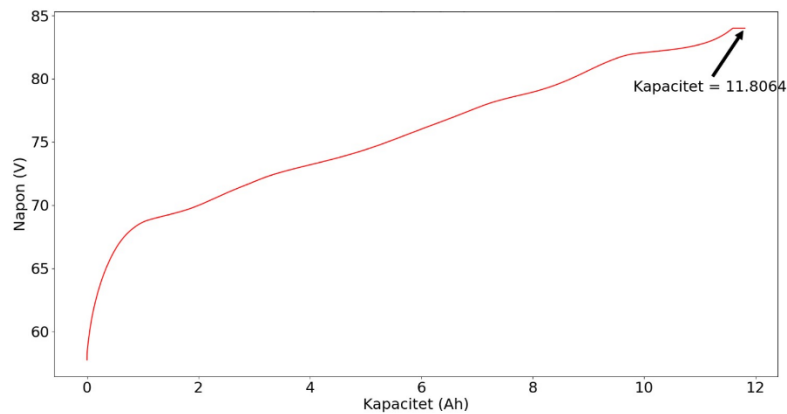


Slika 4.12 Pretvarač i termalna komora

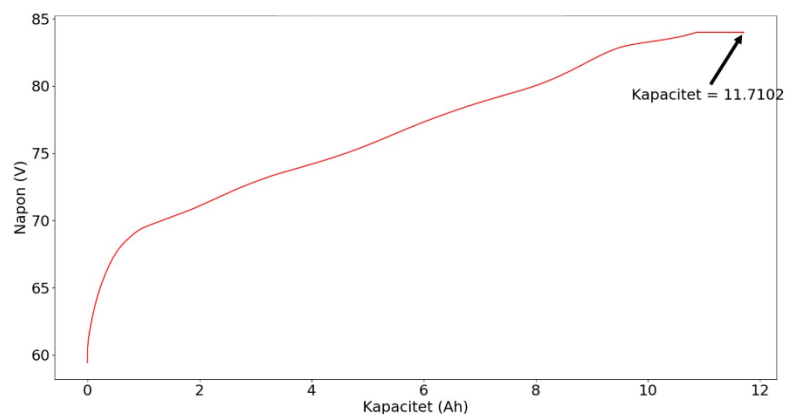


Slika 4.13 Paket u komori

Na slikama 4.14 i 4.15 prikazan je kapacitet punjenja paketa pri strujama 2.52 A (0.2 C) i 12.6 A (1 C). Nazivni kapacitet punog paketa (koji se sastoji od tri ćelije u paraleli) prema specifikacijama ćelije trebao bi iznositi 12.6 Ah te 1058.4 Wh. Međutim, zbog gubitaka na BMS-u te malih razlika u kapacitetu, unutarnjem otporu te kulonskim efikasnostima članaka spojenih u paketu, kapacitet je nešto manji.

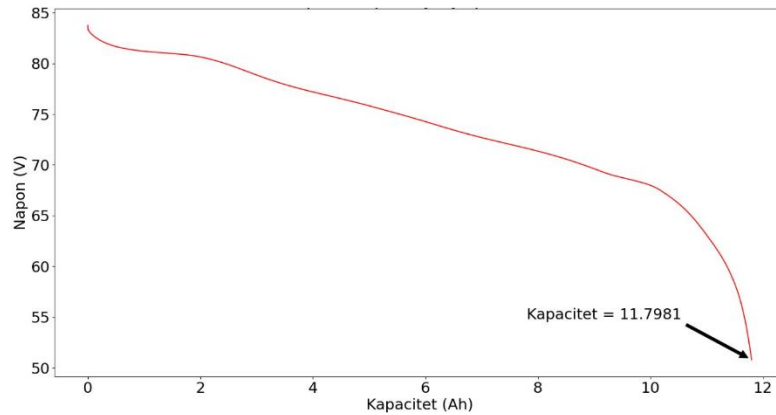


Slika 4.14 Kapacitet punjenja pri 2.52 A



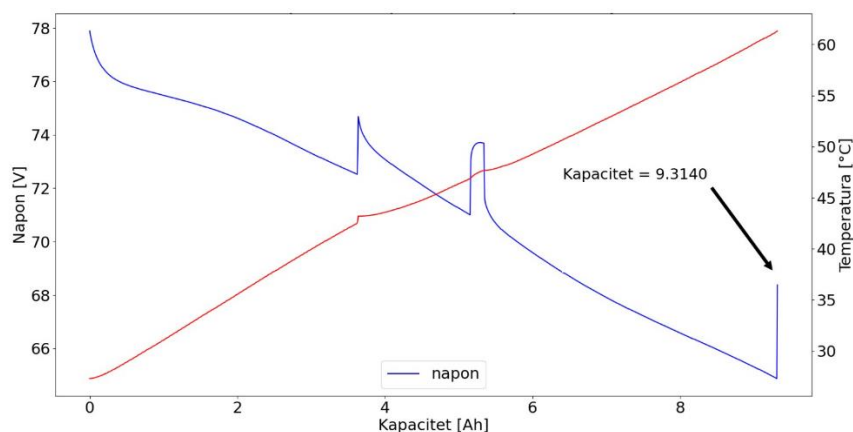
Slika 4.15 Kapacitet punjenja pri 12.6 A

Punjenjem paketa pri struji 2.52 A ostvaren je kapacitet iznosa 11.8064 Ah te 893.4836 Wh, dok je pražnjenjem pri istoj struji ispražnjen kapacitet iznosa 11.798 Ah te 869.852 Wh. Slijedi da energetska efikasnost pri ciklusu od 0.2 C iznosi 97.36%, dok kulonska efikasnost iznosi 99.85%.



Slika 4.16 Kapacitet pražnjenja pri 2.52 A

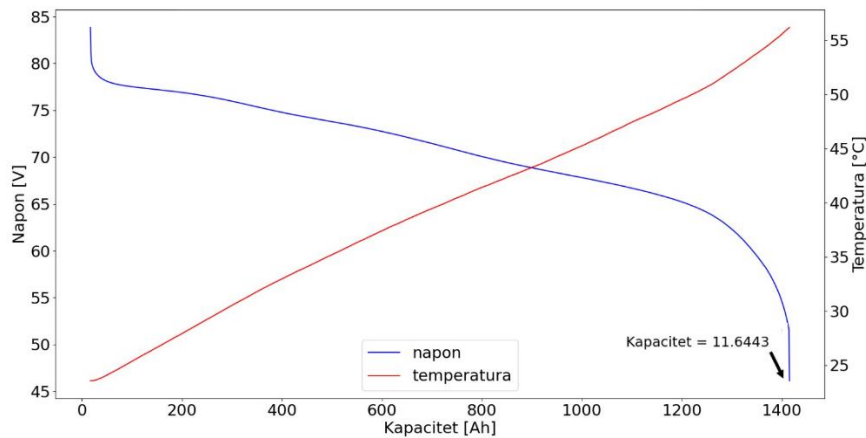
Kako bi se provjerilo ponašanje paketa pri ekstremnijim vožnjama, izvršen je niz testiranja pri strujama većeg iznosa. Na slici 4.17 prikazana je ovisnost napona i temperature o kapacitetu pri struji pražnjenja 50 A uz napomenu da mjerenja u prvih nekoliko sekundi nisu spremljena pa slika početnog, strmog pada napona nije potpuna. Također, u dva je trenutka BMS zbog pogreške prekinuo pražnjenje koje je brzo opet uspostavljeno. U tim je trenucima moguće uočiti i velik oporavak napona. Pražnjenje nije izvršeno do kraja s obzirom na to da je temperatura paketa dosegla vrijednost veću od dozvoljene granice od 60 °C te je BMS prekinuo pražnjenje uz ostvareni kapacitet od 9.3140 Ah.



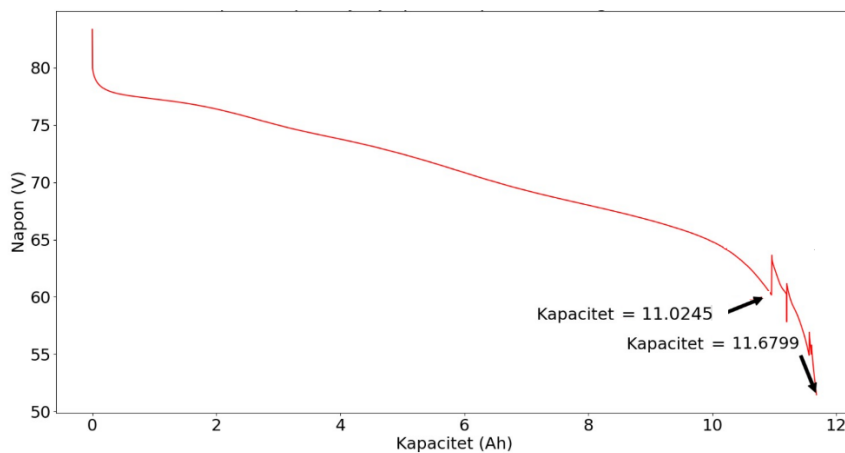
Slika 4.17 Pražnjenje pri 50 A

S obzirom na to da pražnjenje paketa pri 50 A nije provedeno do kraja, napravljeno je testiranje pri nešto manjoj struji iznosa 30 A te je temperatura paketa ostala unutar dozvoljene granice (slika 4.18). Prekid pražnjenja postavljen je kada napon neke grupe ćelija padne ispod 2.5 V. Pošto za ćelije nije dobro da dolaze na preniske iznose napona, u BMS-u je moguće postaviti ograničenje prekida napajanja kada se napon neke grupe spusti ispod 3 V te se tako produljuje životni vijek baterije. Takvo je pražnjenje strujom od 30 A

prikazano na slici 4.19. Kako bi se odredilo koliki kapacitet uz takvo ograničenje nije iskorišten, dodatno je izvršeno pražnjenje pri struji 12.6 A do 2.7 V te 2.5 V te je u tom intervalu ispražnjeno 0.656 Ah.

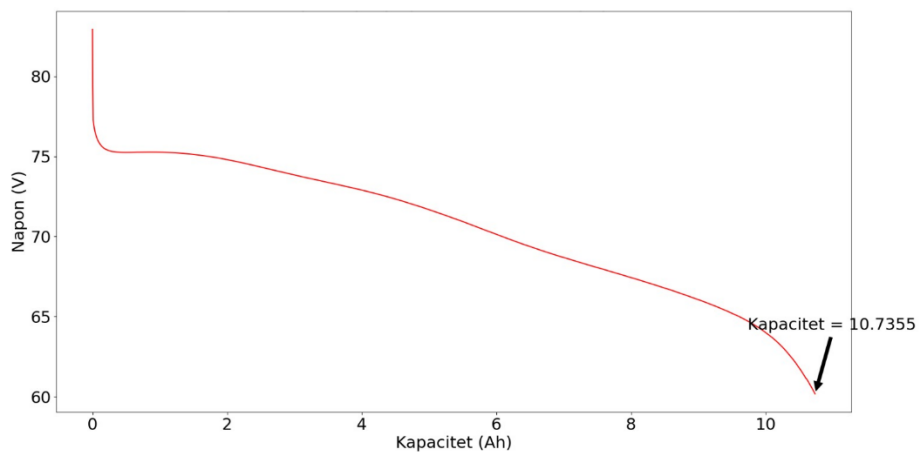


Slika 4.18 Pražnjenje pri 30 A

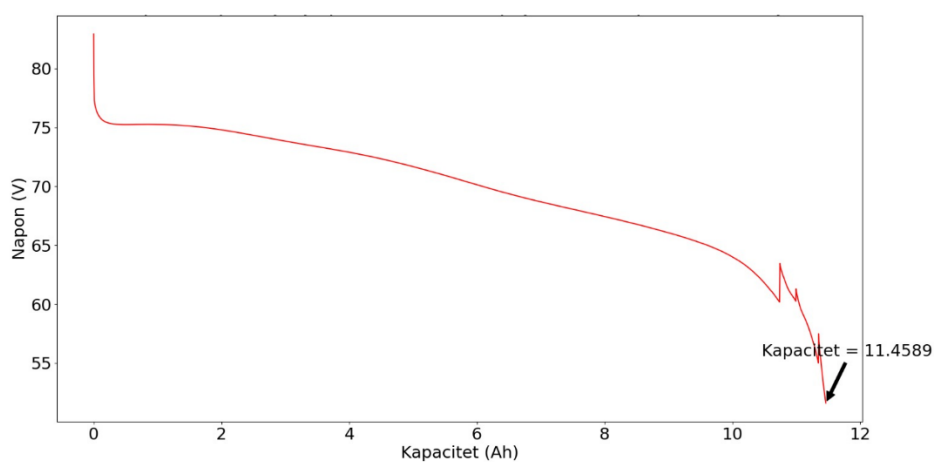


Slika 4.19 Pražnjenje pri 30 A do 3 V pa do 2.5 V

Baterija treba biti u mogućnosti isporučiti traženu snagu i kapacitet pri različitim uvjetima, stoga su testiranja provedena i na različitim temperaturama. Dosadašnja su mjerenja provedena na temperaturi 23 °C. Na slici 4.20 prikazano je pražnjenje pri temperaturi od 10 °C strujom 30A uz ograničenje najmanjeg dozvoljenog napona 3 V po grupi, a na slici 4.21 prikazan je i nastavak pražnjenja do 2.5 V po grupi pri 12.6 A. Moguće je uočiti da je dodatno oslobođeno još 0.7234 Ah kapaciteta.

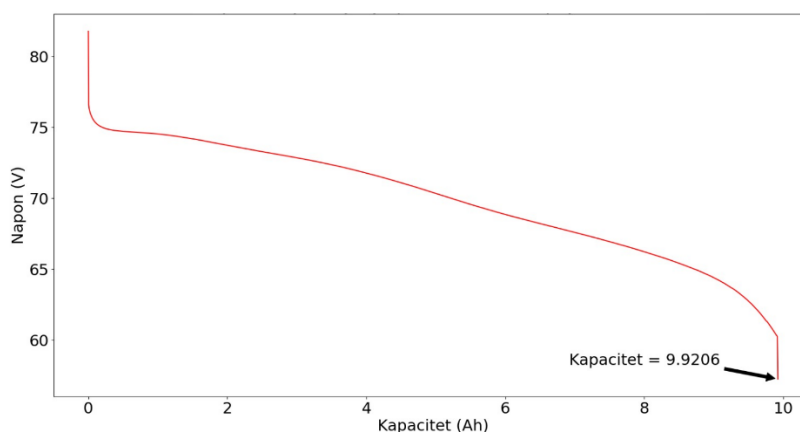


Slika 4.20 Pražnjenje pri 30 A do 3 V na 10 °C



Slika 4.21 Pražnjenje pri 30 A do 2.5 V na 10 °C

Za kraj je provedeno testiranje na 0°C uz ograničenje napona po grupi 3 V s obzirom na to da pražnjenje ispod te vrijednosti na niskoj temperaturi nije dobro za bateriju. Na slici 4.22 moguće je uočiti da ispražnjeni kapacitet iznosi 9.9206 Ah, odnosno 0.8149 Ah manje nego pri 10 °C te 1.1039 Ah manje nego pri 23 °C.



Slika 4.22 Pražnjenje pri 30 A do 3 V na 0 °C

Preglednosti radi, u nastavku su prikazane tablice koje prikazuju kulonske i energetske kapacitete pražnjenja paketa. U tablicama je prikazan utjecaj naponskih ograničenja BMS-a i temperature na iznos ispražnjenog kapaciteta. Tablice 4.5 i 4.6 prikazuju omjere kapaciteta pražnjenja do raznih naponskih razina u odnosu na kapacitet pražnjenja do 2.5 V. Tablice 4.7 i 4.8 prikazuju omjere kapaciteta pražnjenja pri različitim temperaturama u odnosu na kapacitet pražnjenja na 23 °C.

Tablica 4.3 Kulonski kapacitet pražnjenja u različitim uvjetima

Ah	23 °C	10 °C	0 °C
30 A do 3 V	10.9542	10.7355	9.9206
12.6 A do 3 V	11.1973	10.9899	
12.6 A do 2.7 V	11.5614	11.3434	
12.6 A do 2.5 V	11.6799	11.4589	

Tablica 4.4 Energetski kapacitet pražnjenja u različitim uvjetima

Wh	23 °C	10 °C	0 °C
30 A do 3 V	781.5737	756.735	693.533
12.6 A do 3 V	796.5123	772.3846	
12.6 A do 2.7 V	817.6829	792.963	
12.6 A do 2.5 V	824.1024	799.2272	

Tablica 4.5 Utjecaj naponskih ograničenja BMS-a na iznos ispražnjenog kulonskog kapaciteta

Ah	23 °C	10 °C
30 A do 3 V	93.79%	93.69%
12.6 A do 3 V	95.87%	95.91%
12.6 A do 2.7 V	98.99%	98.99%
12.6 A do 2.5 V	100.00%	100.00%

Tablica 4.6 Utjecaj naponskih ograničenja BMS-a na iznos ispražnjenog energetskeg kapaciteta

Wh	23 °C	10 °C
30 A do 3 V	94.84%	94.68%
12.6 A do 3 V	96.65%	96.64%
12.6 A do 2.7 V	99.22%	99.22%
12.6 A do 2.5 V	100.00%	100.00%

Tablice 4.5 i 4.6 prikazuju kapacitet baterijskog paketa koristeći uvjete prekida na 3 V, 2.7 V i 2.5 V po ćeliji. Iz prikazanog možemo uočiti da se pražnjenjem od 3 V do 2.5 V po ćeliji dobiva svega oko 6.26% kulonskog, odnosno 5.24% energetskeg kapaciteta. To bi značilo da ako je pretpostavljeni domet bicikla 40 km uz pražnjenje do 2.5 V po ćeliji, tada bi, uz ograničenje napona do 3 V po ćeliji, očekivani domet iznosio 37.9 km. Na taj bi se način neznatno smanjio domet, a znatno bi se povećao broj ciklusa odnosno životni vijek baterije.

Tablica 4.7 Utjecaj temperature na iznos ispražnjenog kulonskog kapaciteta

Ah	23 °C	10 °C	0 °C
30 A do 3 V	100.00%	98.00%	90.56%
12.6 A do 3 V	100.00%	98.15%	
12.6 A do 2.7 V	100.00%	98.11%	
12.6 A do 2.5 V	100.00%	98.11%	

Tablica 4.8 Utjecaj temperature na iznos ispražnjenog energetskog kapaciteta

Wh	23 °C	10 °C	0 °C
30 A do 3 V	100.00%	96.82%	88.74%
12.6 A do 3 V	100.00%	96.97%	
12.6 A do 2.7 V	100.00%	96.98%	
12.6 A do 2.5 V	100.00%	96.98%	

Iz tablica 4.7 i 4.8 jasno se vidi utjecaj temperature na baterijski paket. Dok pri temperaturi od 10 °C nema velike razlike u kapacitetu u odnosu na testiranje pri 23 °C, kapacitet pri temperaturi 0 °C značajno je manji. Kulonski je kapacitet pri 10 °C u prosjeku 1.91% manji, dok je pri 0 °C čak 9.44% manji u odnosu na kapacitet pri 23 °C. Energetski kapacitet prikazuje još veće razlike pri nižim temperaturama. Tako je on u prosjeku 3.06% manji pri 10 °C, dok je pri 0 °C 11.24% manji u odnosu na energetski kapacitet pri 23 °C. Dakle, pri temperaturama iznad 10 °C ne očekuju se velike oscilacije u dometu, dok se pri temperaturama bližim ništici očekuje značajniji pad dometa.

5. Terensko testiranje

5.1. Cilj terenskog testiranja

Nakon ispitivanja baterije u laboratoriju, potrebno je testirati prototipni bicikl na specifičnoj ruti kako bi se uočili nedostaci i ispravno dimenzionirali dijelovi krajnjeg proizvoda. Stoga je izvršena detaljna studija na ruti na kojoj se očekuje da bi bicikl prema svojim specifikacijama trebao biti primjenjiv. Ovakva se studija provodi na prototipnim električnim vozilima [14], [15], a važna je kako bi se provjerila sposobnost bicikla u kritičnim situacijama u kojima se od motora zahtijeva traženi moment i snaga, a od baterije kapacitet za željeni domet kao i isporučiva snaga motoru. Bicikl je testiran na ruti penjanja i spuštanja sa Sljemena prilikom čega je testirano i regenerativno kočenje. Cilj je testiranja na temelju izmjerenih podataka voznog ciklusa, topologije rute, profila vožnje i zadanih parametara vozila vizualizirati kretanju vozila, napraviti proračune momenta i svih sila koje na putu djeluju na vozilo te prikazati potrošnju energije potrebnu za kretanje vozila. Uvidom u dobivene rezultate bit će moguće nadograditi karakteristike bicikla koje eventualno nisu zadovoljavajuće poput traženog momenta, snage, dometa i sl. Za izvršavanje željenih proračuna prilikom voznog ciklusa potrebno je pratiti podatke poput GPS koordinata, brzine, struje i napona. Kako bi se omogućilo zapisivanje podataka voznog ciklusa odrađena su određena ažuriranja BMS-a što je spomenuto u poglavlju o izradi baterijskog paketa.

5.2. Vizualizacija kretanja vozila

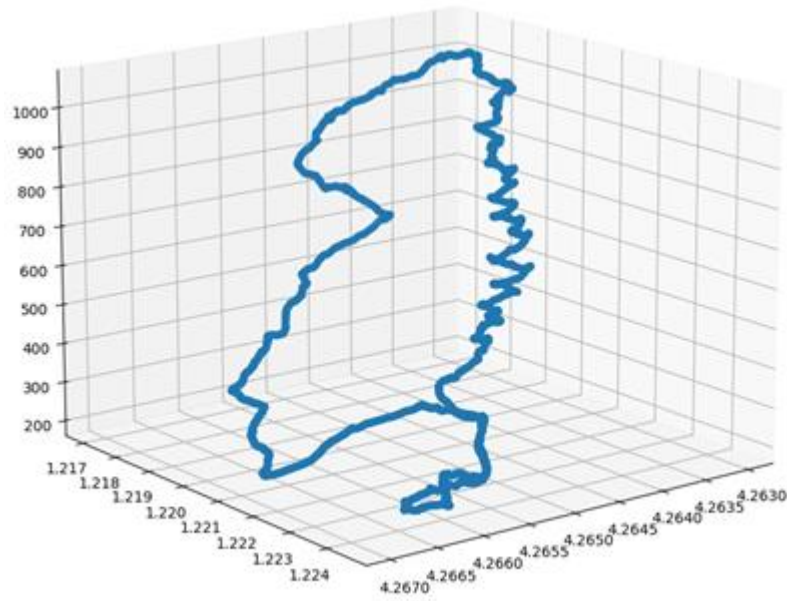
S obzirom na to da se prilikom mjerenja podataka voznog ciklusa očekuju određeni poremećaji i šumovi mjernih senzora, te je podatke potrebno filtrirati kako bi se izbjegli „šiljci“ prilikom prikazivanja podataka u grafovima.

Kako bi se putanja vozila prikazala u 3D obliku, potrebno je prvo napraviti prelazak iz polarnog u Kartezijev koordinatni sustav prema formulama (6) i (7).

$$x = \text{radijus Zemlje} * \sin(\text{sirina}) * \sin(\text{duljina}) \quad (6)$$

$$y = \text{radijus Zemlje} * \sin(\text{sirina}) * \cos(\text{duljina}). \quad (7)$$

Na slici 5.1 moguće je vidjeti prikaz putanje vozila u 3D obliku.



Slika 5.1 3D putanja vozila

Kako bi se odredio prijeđeni put vozila, potrebno je izračunati razlike prijeđenog puta iz mjerene zemljopisne dužine i širine pomoću Harvesinove formule (8).

$$ds = 2 \cdot r \cdot \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (8)$$

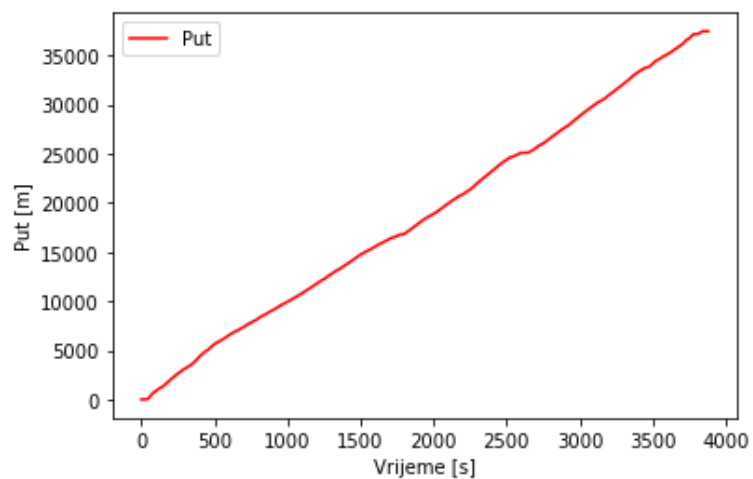
Prijeđeni put vozila računa se integracijom svih točaka razlike puta (9).

$$s = \int ds \cdot dt \quad (9)$$

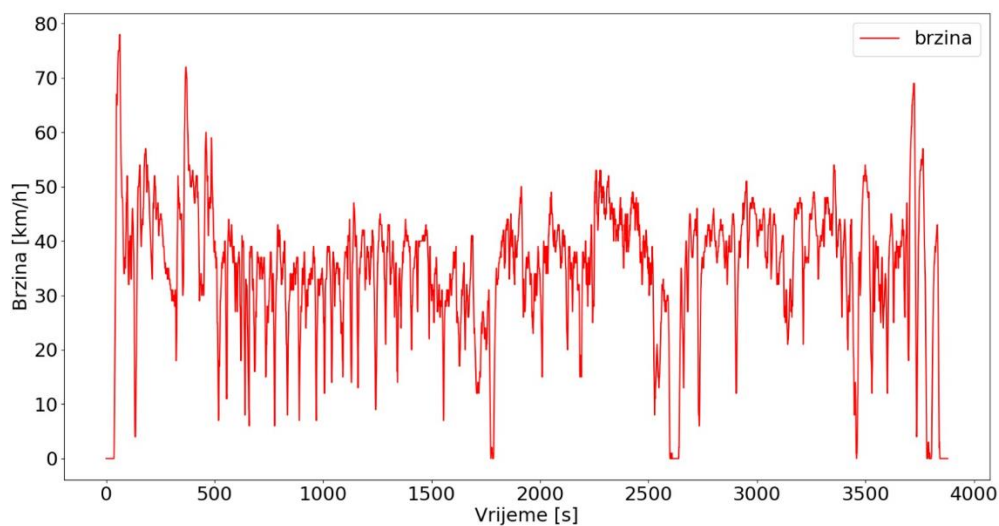
Vremenski intervali (dt) računaju se iz zadanih podataka vremena vožnje ($dt(i)=t(i+1)-t(i)$). Međutim, kako je vremenski interval logiranja konstantan te iznosi jednu sekundu nije ga potrebno računati, a pošto je brzina promjena puta u vremenu (10), točke razlike puta (ds) ujedno predstavljaju i brzinu.

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (10)$$

Na slici 5.2 prikazan je put vozila u ovisnosti o vremenu. Ostvareni domet do potpune ispražnjenosti baterije iznosi 37.5 km. S obzirom na to da GPS omogućuje direktno mjerenje brzine koristeći ugrađeni Kalmanov filtar, ta je brzina radi preciznosti odabrana za daljnje proračune, a prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.2 Put u ovisnosti o vremenu

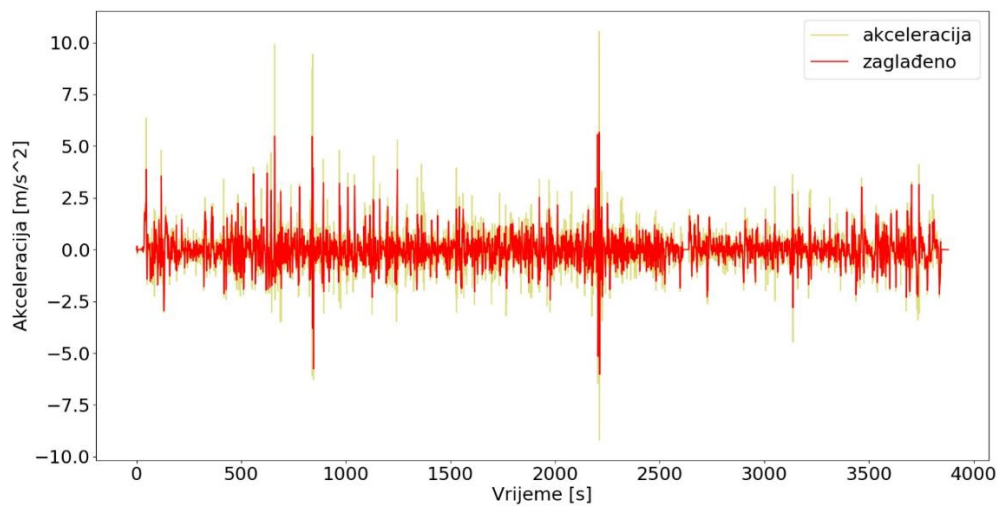


Slika 5.3 Brzina u ovisnosti o vremenu

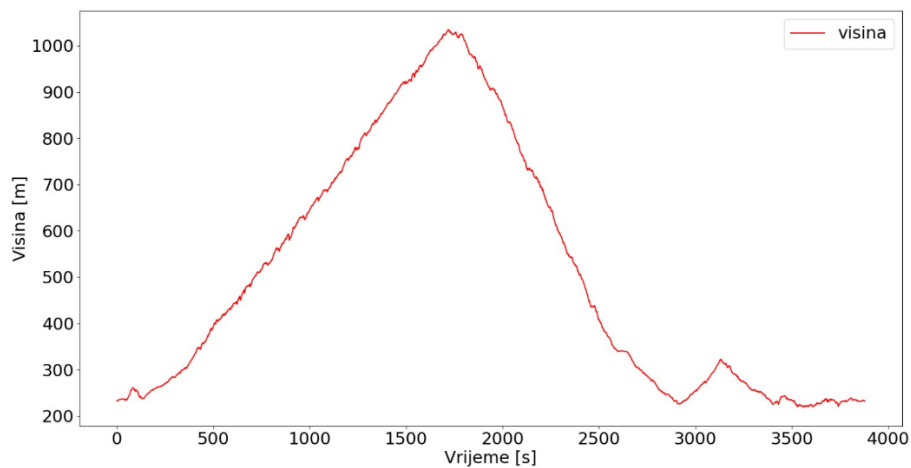
Sada je moguće izračunati i akceleraciju vozila na ruti prema (11), a prikazana je na slici 5.4.

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (11)$$

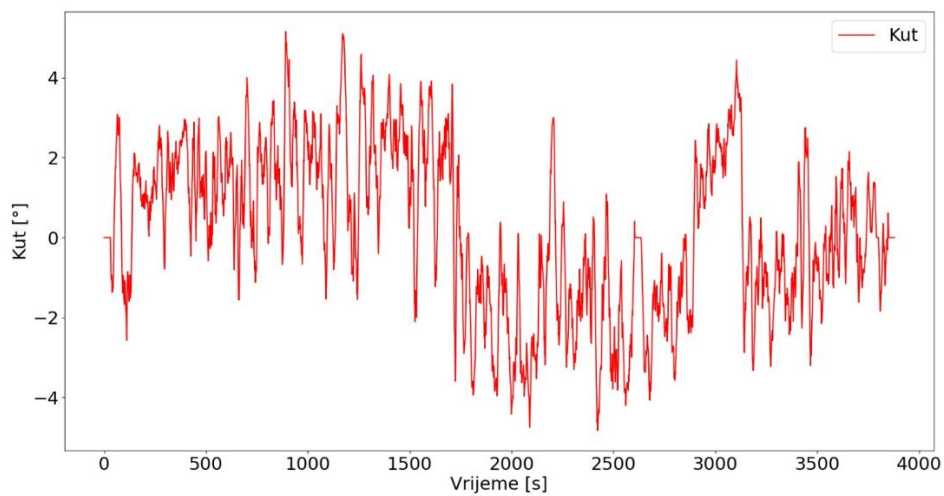
Nagib ceste računa se preko omjera promjene visine i promjene prijeđenog puta u nekom intervalu. Na slici 5.5 prikazan je uspon vozila, a na slici 5.6 nagib ceste.



Slika 5.4 Akceleracija u ovisnosti o vremenu



Slika 5.5 Uspon vozila



Slika 5.6 Kut nagiba u ovisnosti o vremenu

5.3. Proračun sila

Ukupna vučna sila suma je svih sila potrebnih za svladavanje otpora vožnje u svrhu ostvarenja gibanja. Vučna sila mora biti veća od sila otpora vožnje. Ukupna se sila sastoji od sile akceleracije (12), sile otpora zraka (13), sile otpora uspona (14) te sile otpora kotrljanja (15). Na slikama u nastavku prikazane su spomenute sile te ukupna sila kao njihova suma, a u tablici 5.1 prikazani su parametri potrebni za proračun.

$$F_a = m_v \cdot a_v \quad (12)$$

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_d \cdot A \cdot v_v^2. \quad (13)$$

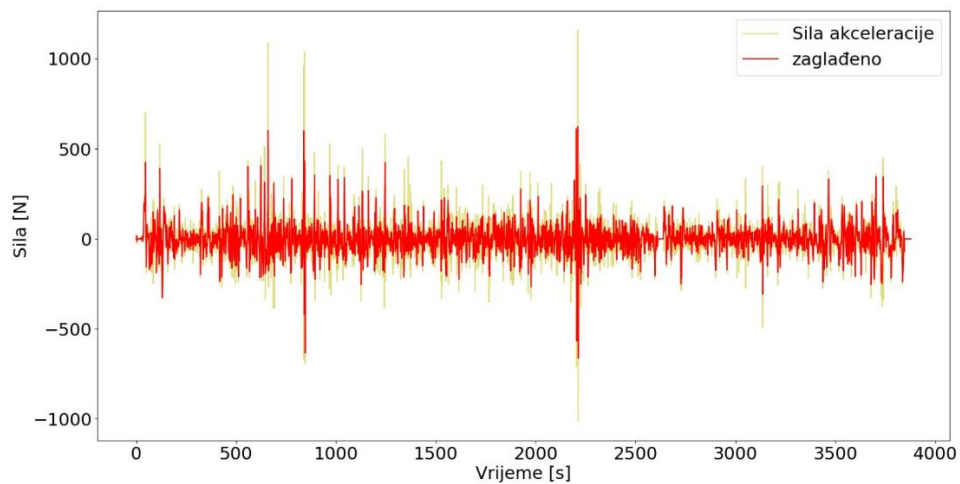
$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha_s) \quad (14)$$

$$F_k = m_v \cdot g \cdot c_{rr} \cdot \cos(\alpha_s) \quad (15)$$

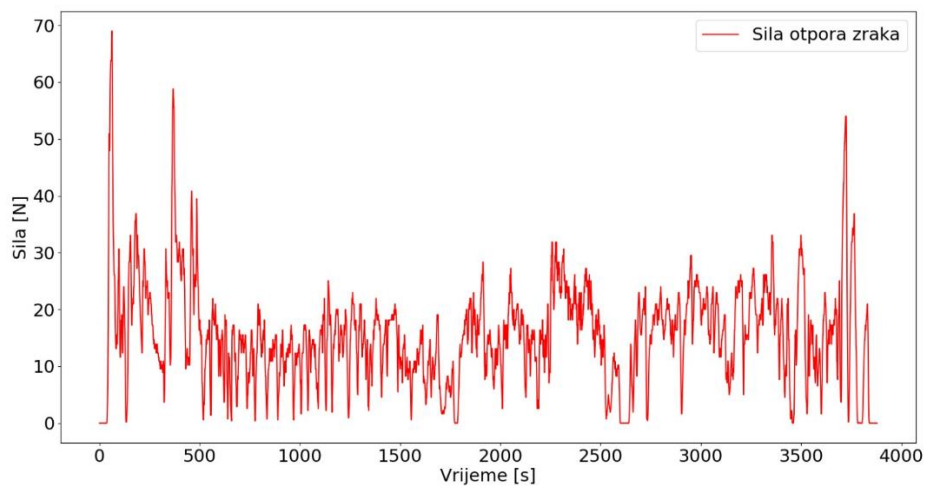
Sila ubrzanja prati graf akceleracije, a zbog toga što vožnja započinje i završava u mirovanju, srednja vrijednost sile iznosi 0. Na nekim je grafovima moguće uočiti da komponente sile (osim otpora zraka i kotrljanja) u određenim trenucima postaju negativne. Objašnjenje za to pojava je nizbrdice ili usporavanje vozila što ukazuje na mogućnost regeneracije te snage. S druge strane, u trenucima kada su sile pozitivne, potrebno je utrošiti mehaničku snagu za svladavanje otpora.

Tablica 5.1 Parametri vozila

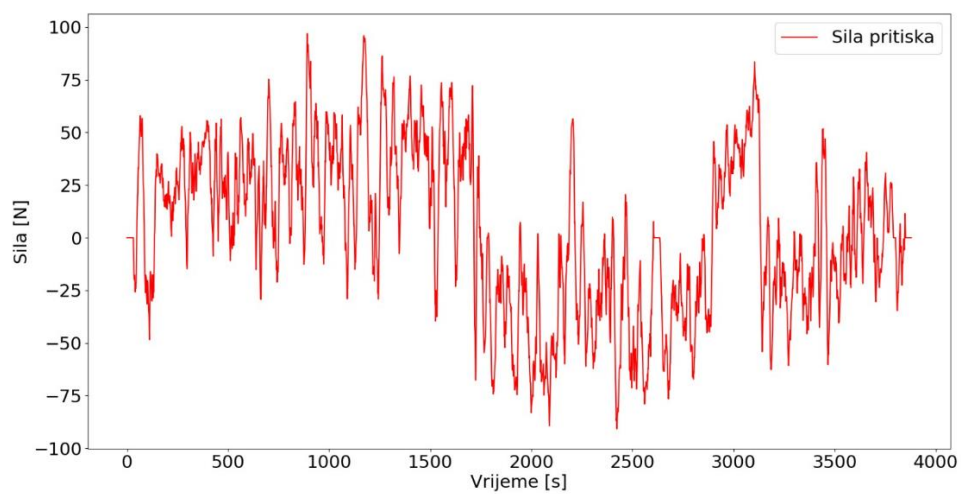
Masa	80 + 30 kg
Koeficijent otpora zraka (c_d)	0.7
Koeficijent otpora kotrljanja (c_{rr})	0.05
Čeona površina (A)	0.4 m ²
Polumjer kotača	0.33 m



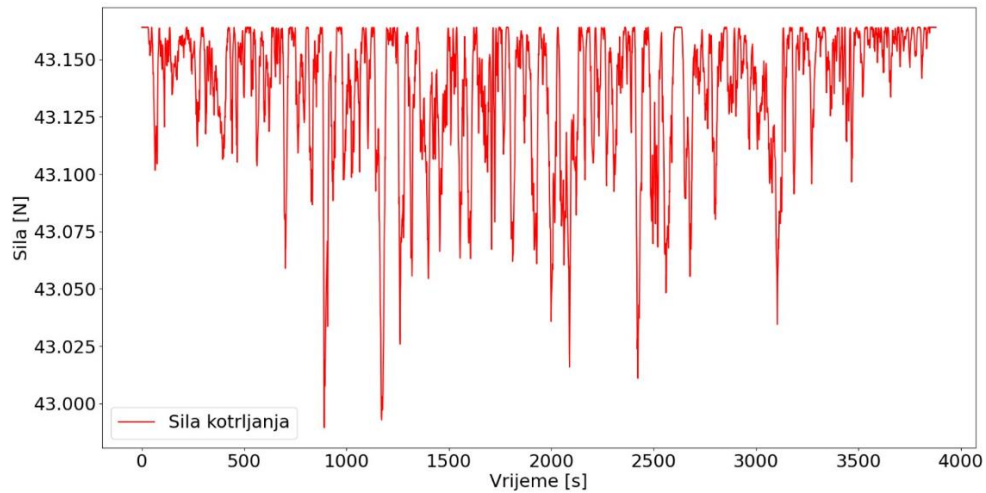
Slika 5.7 Sila akceleracije



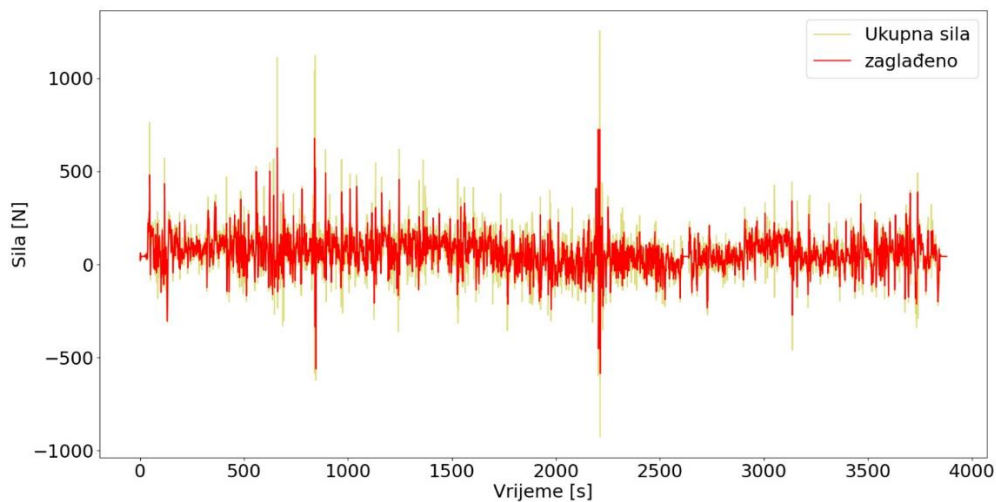
Slika 5.8 Sila otpora zraka



Slika 5.9 Sila uspona

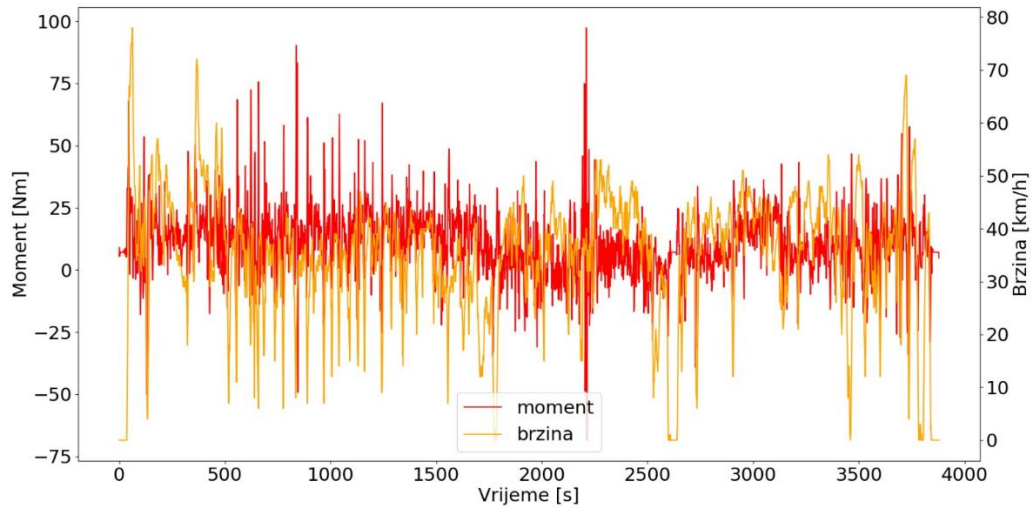


Slika 5.10 Sila kotrljanja



Slika 5.11 Ukupna sila

Umnožak sile i kraka na kojem sila djeluje (polumjer kotača) označava moment. Na slici 5.12 prikazan je moment koji djeluje na pogonskom kotaču. Maksimalan moment prema specifikacijama motora iznosi 70 Nm. Moguće je uočiti da je u ovoj vožnji bilo još prostora za iskorištavanje mogućnosti bicikla te da odgovara zahtjevima uspona na Sljeme. Također, bitno je napomenuti da na grafu postoje određeni šiljci kao posljedica pogreške mjerenja.

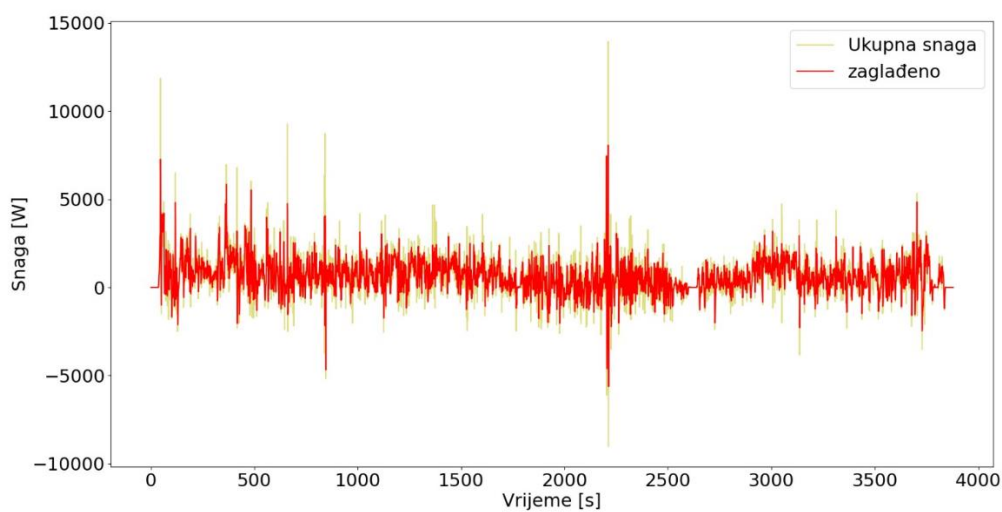


Slika 5.12 Moment na pogonskom kotaču

5.4. Proračun snage i energije

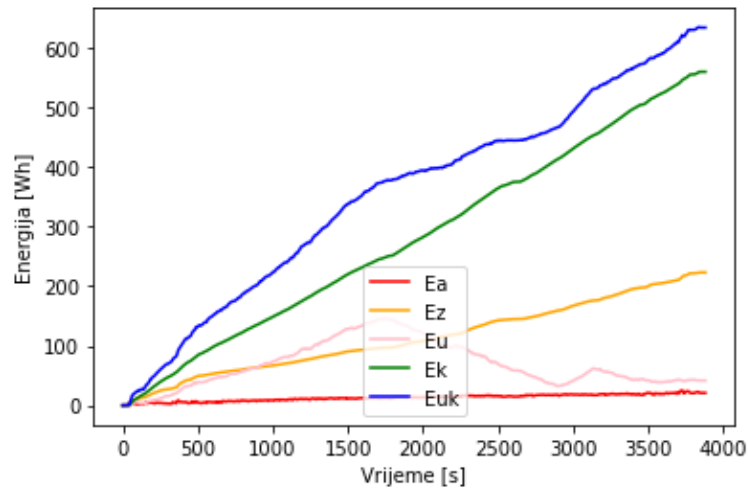
Ukupna pogonska snaga za savladavanje otpora dobiva se umnoškom sile i brzine u određenom trenutku (16). Na slici 5.13 u nastavku prikazana je ukupna potrebna snaga za savladavanje svih otpora. Moguće je uočiti da je iznos snaga uglavnom ispod nazivne snage od 3600 W, a u nekim trenucima dostiže vršnu snagu iznosa blizu 6000 W.

$$P_v = F_v \cdot v_v \quad (16)$$

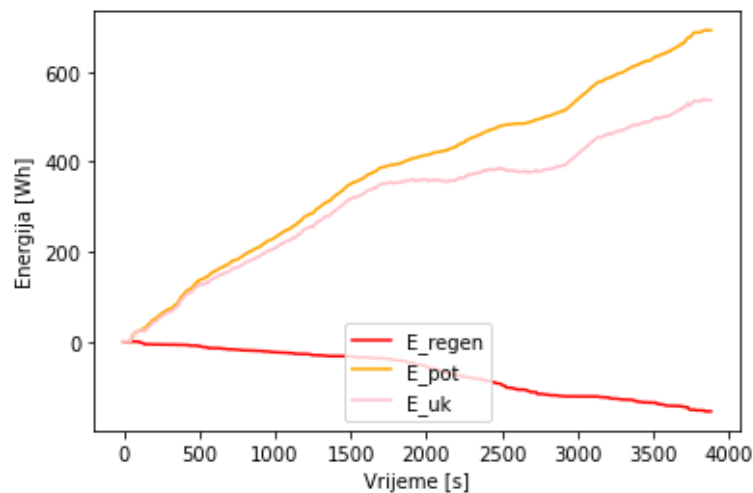


Slika 5.13 Ukupna snaga

Temeljem podataka snage moguće je odrediti i energiju potrebnu za savladavanje opora integrirajući snagu kroz vrijeme. Energija u krajnjem trenutku predstavlja ukupnu potrebnu energiju za savladavanje otpora puta. Na slici 5.14 prikazane su energije potrebne za savladavanje otpora. Moguće je uočiti da neki grafovi energije imaju poraste i padove. Porast energije predstavlja potrošnju, dok pad predstavlja regeneraciju. Također, potrebno je primijetiti da je energija za savladavanje otpora zraka i kotrljanja uvijek u porastu, odnosno nema regeneracije energije iz tih komponenti. Ukupna energija akceleracije iznosi nula s obzirom na to da su početna i konačna brzina na ruti jednake. Ukupna energija potrebna za uspon nije jednaka nuli jer se vozilo vraća u nešto višu točku od početne. Međutim, kako bi se negativne energije iskoristile potrebno ih je regenerirati. Na slici 5.15 prikazane su ukupna energija potrebna za savladavanje puta, moguća regenerirana energija te energija potrebna za put ukoliko je moguća potpuna regeneracija efikasnosti 100%.

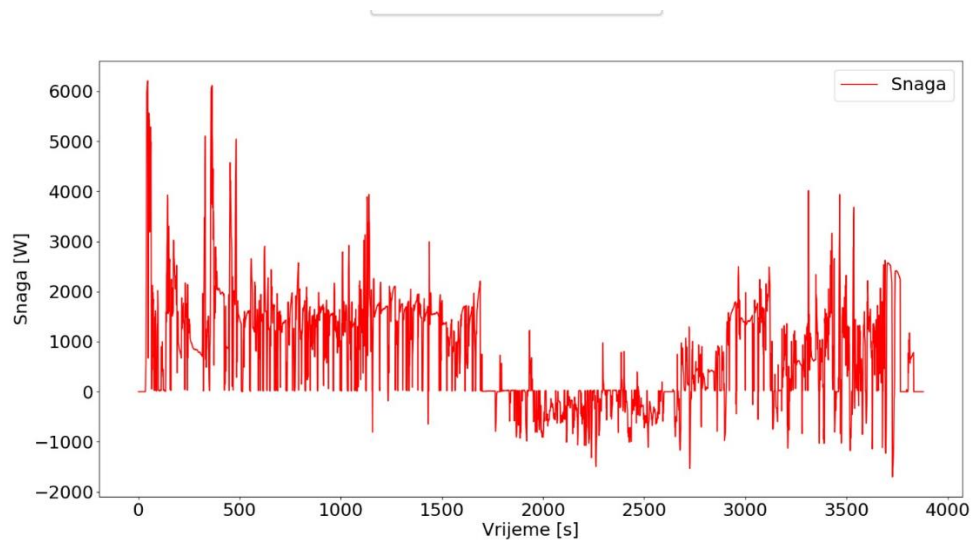


Slika 5.14 Sve energije

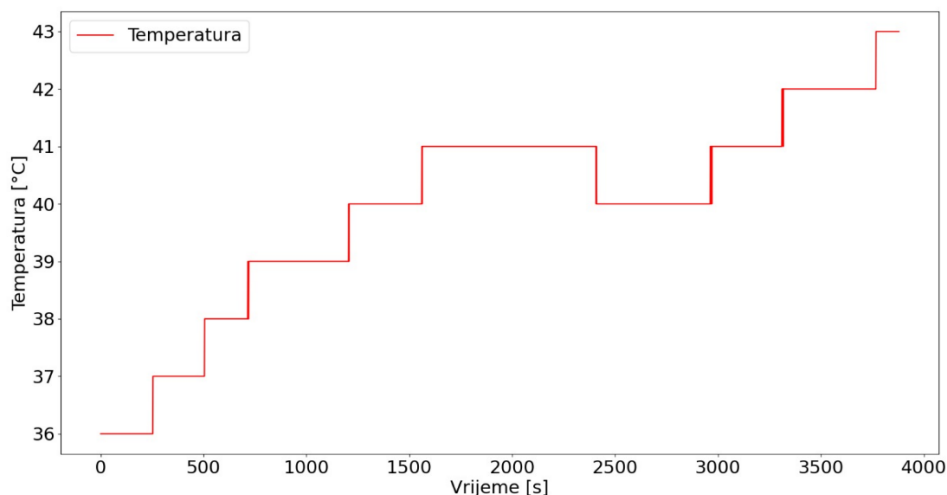


Slika 5.15 Energija potrebna za put i moguća regenerirana energija

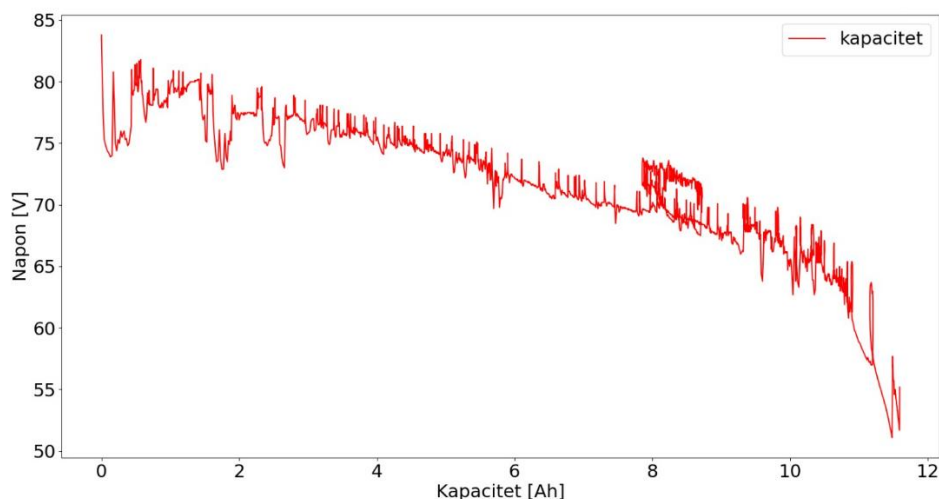
Potrebna energija za ostvarenje ovog puta iznosi 691.92 Wh, dok je regenerirati moguće 155.02 Wh. To znači da bi se ovaj put uz omogućenu potpunu regeneraciju efikasnosti 100% u teoriji mogao ostvariti uz potrošnju svega 536.9 Wh energije. Prethodno izračunate energije odnose se na energiju potrebnu za savladavanje otpora na kotačima. Međutim, ukupna je potrebna energija iz perspektive baterijskog paketa veća zbog gubitaka na komponentama od baterije do kotača. Isto vrijedi i za regeneriranu energiju, samo što je regenerirana energija u bateriju manja od iskoristive energije na kotačima. Prema tome, poznavanjem podataka korištene snage iz baterije moguće je odrediti efikasnosti pogona te regenerativnog kočenja. Na slici 5.16 prikazana je snaga koju daje baterijski paket. Ukupna energija potrošena iz baterije iznosi 826 Wh, dok je uspješno regenerirano 92.44 Wh. Sada je moguće odrediti efikasnost pogona koja iznosi 83.77 % te efikasnost regenerativnog kočenja koja iznosi 59.63 %.



Slika 5.16 Snaga baterijskog paketa



Slika 5.17 Temperatura baterijskog paketa



Slika 5.1818 Kapacitet baterijskog paketa

Ispražnjeni kapacitet baterijskog paketa iznosi 11.59 Ah. Baterija je ispunila očekivanja i omogućila prolazak željene rute relativno ekonomičnom vožnjom uz ostvareni domet 37.5 km do potpune ispražnjenosti bez većeg zagrijavanja (slika 5.17). Međutim, ukoliko bi vožnja bila sportskog karaktera, za koju prema korištenoj snazi itekako ima prostora, od baterije bi se zahtijevala veća snaga nego u ekonomičnom režimu te bi za isti domet bila potrebna veća energija i kapacitet. Tada bi u paket, uz isti napon, bilo potrebno dodati još paralelnih grupa ćelija. Ukoliko se napravi projekcija ekstremnije vožnje prilikom uspona tako da se sve brzine manje od 40 km/h skaliraju koeficijentom 1.3, potrebna energija za savladavanje puta iznosila bi 808.59 Wh. To znači da je uz izračunatu efikasnost pogona iz

baterijskog paketa potrebno 965.25 Wh. S obzirom na to da vožnja nizbrdo ostaje jednaka, može se pretpostaviti jednaki iznos energije iz regenerativnog kočenja kao i prije. Za takav profil vožnje potrebna je još jedna dodatna paralelna grupa ćelija čime se teoretski dobiva dodatnih 302 Wh energije u paketu.

6. Zaključak

U ovom su radu prikazani osnovni dijelovi električnog bicikla te njihovo spajanje u prototipni proizvod. Laboratorijskim i terenskim testiranjem prototipnog proizvoda zaključeno je da ispunjava tražene zahtjeve, odnosno motor i baterija su u mogućnosti pružiti dovoljnu snagu za uspon na Sljeme. Međutim, kako bi se u potpunosti iskoristile mogućnosti bicikla na toj ruti, odnosno ostvario prelazak iz ekonomičnog u sportski način vožnje, bilo bi potrebno povećati kapacitet baterije. Također, pri laboratorijskom testiranju paketa pražnjenjem strujom od 50 A na kojoj bi prema specifikacijama proizvođača ćelija bez problema trebala biti isporučena kontinuirana struja tog iznosa, zapaženo je prekomjerno zagrijavanje paketa. To zagrijavanje ukazuje na potrebu za traženjem rješenja za efikasnije odvođenje topline iz paketa.

Zahvala

Zahvaljujemo izv. prof. dr. sc. Tomislavu Capuderu i Hrvoju Bašiću, mag. ing. na savjetima, omogućenoj prilici i vremenu uloženom za rad u laboratoriju.

Literatura

- [1] V. Bobanac, H. Pandžić, I. Pavić, *Baterije*. Presentacija sa kolegija Osnove električnih i hibridnih vozila. Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2020.
- [2] M. Taguchi, T. Sasaki and H. Takahashi, *Discharge-Charge Property of Lead-Acid Battery Using Nano-Scale PbO₂ as Cathode Active Material*, *Materials Transactions*, vol. 55, no. 2, pp. 327-333. 2014.
- [3] H. Chen, Y. Xu, C. Liu, F. He, S. Hu, *Storing energy in China—an overview*, 2. Izdanje. 2022
- [4] *How to choose the right battery for your electric bike*. Poveznica: <https://epiccycles.ca/choose-right-battery-electric-bike/>; pristupljeno 3. travnja 2023.
- [5] E. Hansen, *Full system nickel-metal hydride battery packs for hybrid electric vehicle applications*, Seventeenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of Conference (Cat. No.02TH8576), Long Beach, CA, USA, 2002, pp. 253-260
- [6] M. Lelie, T. Braun, M Knips, H. Nordmann, F. Ringbeck, i H. Zappen. *Battery Management System Hardware Concepts: An Overview*. 2018
- [7] M. Lelie, T. Braun, M Knips, H. Nordmann, F. Ringbeck, i H. Zappen. *State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles*.
- [8] Narodne novine. *Zakon o sigurnosti prometa na cestama*. Članak 2. 2023.
- [9] P. Yedamale, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Microchip Technology Inc. 2003
- [10] *Bi-directional Programmable DC Power Supply, IT6000C Series User Manual*, (2019). Poveznica: <https://www.itechate.com/uploadfiles/2019/09/20190902105904594.pdf>; pristupljeno 6. travnja 2023.
- [11] H. Rahimidi-Eichi, F. Baronti, M. Chow. *Online Adaptive Parameter Identification and State-of-Charge Coestimation for Lithium-Polymer Battery Cells*. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014
- [12] H. Yongling, H. Rong, Z. Zhengjie, Y. Shichun, L. Xinhua, Z. Xichang, Y. Pan, Y. Xiaoyu, L. Shen. *Modeling of Dynamic Hysteresis Characters for the Lithium-Ion Battery*. *Journal of the Electrochemical Society*, 2020.
- [13] A. Stroe, J. Meng, D. Stroe, M. Świerczyński, R. Teodorescu, S. Kær. (2018). *Influence of Battery Parametric Uncertainties on the State-of-Charge Estimation of Lithium Titanate Oxide-Based Batteries*. *Energies*, 2018.
- [14] I. V. A. Veiga, R. Zymler, R. A. Shayani, D. M. Viana, and M. V.M. Orrico. *Sizing of motor and battery pack for an automotive electricvehicle given a specific route*. 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (TD-LA), 2012.
- [15] P. S. González-Rodríguez, P. I. Solares-Romero, L. C. Félix-Herrán, J. C. Tudón-Martinez and J. d. J. Lozoya-Santos. *A Methodology for the Sizing of a Battery Pack*

and Electric Motor: A Work-in-progress Result. 2022 International Symposium on Electromobility (ISEM), Puebla, Mexico, 2022

Sažetak

Naslov: Izrada i testiranje električnog bicikla

Autori: Jan Grgić, Lovro Lukač

U ovom su radu prikazani osnovni dijelovi električnog bicikla te njihovo spajanje u prototipni proizvod. Nakon odabira komponenti i izrade prototipnog baterijskog paketa provedena su karakteristična testiranja kako bi se utvrdila sposobnost vozila za ispunjavanje traženih zahtjeva. Baterijski paket testiran je u laboratoriju pri različitim uvjetima kao bi se odredile njegove točne specifikacije i ograničenja. Također, analiziran je i utjecaj naponskih ograničenja pražnjenja baterije što je bitno za ispravno podešavanje postavki sustava za upravljanje baterijom. Uz laboratorijsko testiranje paketa provedeno je i terensko testiranje bicikla na specifičnoj ruti te je prikazana detaljna studija ponašanja vozila prilikom vožnje na temelju čega su doneseni zaključci te je dan prijedlog za ispravno dimenzioniranje dijelova krajnjeg proizvoda.

Ključne riječi: baterije, električni bicikl, dimenzioniranje baterijskog paketa

Summary

Title: Building and testing an electric bicycle

Authors: Jan Grgić, Lovro Lukač

This paper presents the basic parts of an electric bicycle and their assembly into a prototype product. After the selection of components and the creation of a prototype battery pack, characteristic tests were carried out in order to determine the vehicle's ability to meet the desired requirements. The battery pack has been tested in a laboratory under various conditions to determine its exact specifications and limitations. Also, the influence of battery discharge voltage limits was analysed, which is essential for correct adjustment of battery management system settings. In addition to laboratory testing of the package, field testing of the bicycle on a specific route was also carried out, and a detailed study of the vehicle's behaviour during driving was presented. Based on the tests, conclusions were drawn and a proposal was made for the correct dimensioning of parts of the final product.

Keywords: batteries, electric bicycle, battery pack sizing