

Analiza USB standarda kao napajanja

Severović, Antun

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:200:628168>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-08**

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 diplomski studij elektroenergetike

ANALIZA USB STANDARDA KAO NAPAJANJA

Diplomski rad

Antun Severović

Osijek, 2023.

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
1.1.	Zadatak rada	1
1.2.	Pregled područja istraživanja	1
2.	PREGLED USB TEHNOLOGIJE SA NAGLASKOM NA NAPAJANJE.....	3
2.1.	Nazivne vrijednosti struje i napona karakteristične za prijenosne uređaje.....	4
2.2.	Razvoj USB standarda.....	4
2.2.1.	USB Type-C i USB PD	6
2.2.2.	USB PD zahtjevi za regulaciju napona	7
2.2.3.	Standardi učinkovitosti za vanjska napajanja.....	7
2.3.	Univerzalni USB punjač sa jednim i više priključaka.....	8
3.	ELEKTRIČNI ENERGETSKI PRETVARAČI.....	10
3.1.	Ispravljači	11
3.1.1.	Jednofazni poluvalni ispravljači	12
3.1.2.	Jednofazni punovalni ispravljači	13
3.1.3.	Jednofazni mosni ispravljači	14
3.1.4.	Trofazni punovalni ispravljači.....	15
3.1.5.	Trofazni mosni ispravljači.....	17
3.2.	Izmjenjivači (Inverteri).....	18
3.2.1.	Izmjenjivači izvora napona.....	19
3.2.2.	Izmjenjivači struje	20
3.3.	Izmjenični pretvarači	21
3.3.1.	Regulatori izmjeničnog napona	21
3.3.2.	Izravni pretvarači frekvencije.....	22
3.4.	Istosmjerni pretvarači	23
3.4.1.	Regulatori istosmjernog napona	23
3.4.2.	Silazni pretvarači	24
3.4.3.	Uzlazni pretvarači.....	26
4.	UREĐAJ ZA MJERENJE STRUJNO NAPONSKIH PRILIKA NA USB PORTU	28
4.1.	Primjena JT-UM25C u mjerenju strujno naponskih prilika na USB portu	30
4.1.1.	Nazivne specifikacije JT-UM25C	31
4.1.2.	Zaslona i korisničko sučelje	31
4.2.	Programska podrška za mjerni uređaj JT-UM25C.....	33
4.2.1.	Programska podrška za mobilni telefon	33
4.2.2.	Programska podrška za osobno računalo	34
5.	PROVEDBA MJERENJA MJERNIM UREĐAJEM JT-UM25C	35
5.1.	Uređaji na kojima su izvršena mjerenja	35
5.2.	Analiza rezultata mjerenja.....	36
5.2.1.	Bluetooth slušalica Jabra Talk 25.....	36

5.2.2.	Pametni telefon Samsung Galaxy S21	39
5.2.3.	Pametni telefon iPhone 5S.....	45
6.	ZAKLJUČAK	48
	LITERATURA.....	50
	SAŽETAK.....	52
	ABSTRACT	52
	ŽIVOTOPIS	52

1. UVOD

U današnjem digitalnom svijetu svakim danom sve je veći broj električnih uređajima kojima je potreban nekakav oblik napajanja. Porastom broja uređaja raste i potreba za različitim vrstama napajanja. Uređaji koje koristimo u svakodnevnom životu kao što su mobilni telefoni, pametni satovi, bežične slušalice, itd., napajaju svoje baterije preko USB kabela. Povećana potreba za korištenjem uređaja znači i veći troškovi, osim toga porast broj uređaja donosi i veću količinu neželjenog otpada. Jedan od načina smanjenja troškova i količine otpada u ovom slučaju je produljenje životnog vijeka uređaja. Najbolji način da se to postigne je osigurati kvalitetno napajanje koje znatno utječe na zdravlje baterija i njihovu dugotrajnost. U ovom diplomskom radu napisan je povijesni pregled razvoja USB tehnologije s osvrtom na napajanje. Također je napravljena podjela električnih energetske pretvarača bez kojih USB napajanje u svakodnevnom životu ne bi bilo moguće. U četvrtom poglavlju opisan je princip rada i karakteristike korištenog mjernog instrumenta. Mjerenja USB napajanja su izvršena na bluetooth slušalici i dva pametna telefona. U zadnjem poglavlju napravljena je analiza rezultata mjerenja.

1.1. Zadatak rada

Napraviti povijesni pregled razvoja USB standarda sa naglaskom na napajanje. Opisati USB protokole te njihovu sposobnost upravljanja snagom. Prikazati način mjerenja energetske potrošnje prilikom korištenja USB napajanja. Potrebno je napraviti pregled uređaja koji se koriste za mjerenje strujno naponskih prilika na USB portu. Opisati princip rada uređaja JT-UM25C, te pomoću istog provesti mjerenja na BT slušalici i pametnom telefonu. U zaključnom razmatranju potrebno je obrazložiti prednosti i nedostatke periodičnog mjerenja, odrediti kapacitet baterija uređaja na kojima je provedeno mjerenje te njihovo trenutno stanje.

1.2. Pregled područja istraživanja

U ovom radu proučavan je razvoj USB tehnologije sa aspekta napajanja, elektronički energetski pretvarači te uređaji za mjerenje strujno naponskih prilika na USB portu. U poglavlju pregleda USB tehnologije ukazuje se na utjecaj povećanja količine e-otpada na kvalitetu ljudskog života [1], te ulogu osobnih uređaja i njihovih adaptera u količini tog otpada [2]. Za napajanje pomoću USB kabela najčešće se koriste adapteri koji sadrže povratni pretvarač, literature [3] i [4] pružaju podatke o izvedbi takvih pretvarača te sadrže shematske prikaze istih. Kod pregleda USB tehnologije opisanu su USB priključci te navedene njihove izvedbe [5], također je napravljen

pregled sposobnosti upravljanja snagom USB standarda [6]. Standardi učinkovitosti za vanjska napajanja prikazani su tablicama koje su preuzete iz literature [7]. Kroz treće poglavlje opisani sklopovi energetske elektronike [8], te je napravljena podjela i opisan princip rada električnih energetskih pretvarača. Literature [9], [10] i [11] sličnog su sadržaja, bave se isključivo elektroničkim energetskim pretvaračima te pružaju potpuni pregled i uvid u sve izvedbe pretvarača. Kod istraživanja uređaja za mjerenje strujno naponskih prilika na USB portu opisan je jedan uređaj velike preciznosti mjerenja [12] te uređaj iz kategorije nižeg cjenovnog razreda [13]. Pružen je i detaljan opis i princip rada uređaja korištenog za izvršavanje mjerenja u ovom radu [14]. Za detaljnije podatke i specifikacije uređaja na kojima su izvršena mjerenja korištene su službene stranice proizvođača istih [15], [16] i [17].

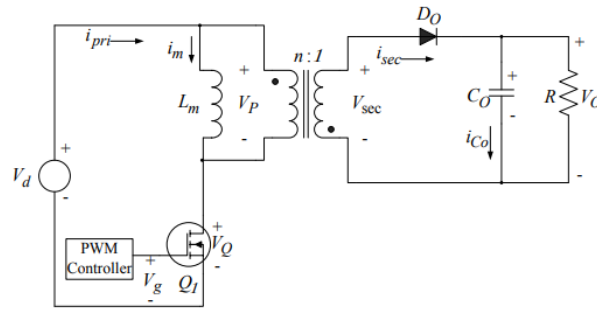
2. PREGLED USB TEHNOLOGIJE SA NAGLASKOM NA NAPAJANJE

U današnjem svijetu bogatom informacija, količina prijenosa istih svakim danom sve je veća. Uz veliku potražnju za isporukom globalnih informacija na pravovremen i učinkovit način, dijeljenje informacija zahtjeva prijenosnu platformu koja omogućuje prijenos u stvarnom vremenu. Prijenosni elektronički uređaji (PED), uključujući mobilne telefone, prijenosna računala, tablete te ostale nosive uređaje, najviše pridonose brzom rastu dijeljenja i obrade informacija.

Jedna od glavnih stavki PED-ova su njihovi punjači baterija, koji su najčešće ispravljači izmjenične u istosmjernu struju poznatiji kao adapteri. Budući da različiti PED-ovi zahtijevaju specifičan napon i razinu snage za punjenje svojih baterija, svakom PED-u potreban je odgovarajući punjač baterije. Također, drugi elektronički uređaji poput digitalnih kamera, zvučnika, monitora itd., trebaju namjenske adaptere izmjenične u istosmjernu struju koji mogu zadovoljiti njihove specifikacije napona i snage. U konačnici sve veći broj PED-ova i drugih elektroničkih uređaja rezultira proizvodnjom velikog broja adaptera, koji istekom svog radnog vijeka pridonose velikoj količini elektroničkog otpada (e-otpad).

E-otpad jedan je od najbrže rastućih tokova otpada, a njegov nagli porast donosi ozbiljne probleme onečišćenja ljudskog života. [1] Procjenjuje se da je 50 milijuna tona e-otpada stvoreno globalno u 2018. godini, a polovica toga je zbog osobnih uređaja kao što su računala, prijenosna računala, pametni telefoni, tableti i televizori [2]. Odbačeni adapteri ovih uređaja također značajno pridonose globalnom stvaranju e-otpada.

Jedna od jednostavnijih te najčešća izvedba napajanja koja se koristi za PED-ove su adapteri izmjenične u istosmjernu struju koji koriste povratni pretvarač (flyback converter). Povratni pretvarač omogućuje napajanje snage 100W sa najmanjim utroškom materijala. Također, uređaji u nastajanju poput MOSFET-a od silicij-karbida (SiC) i tranzistori visoke pokretljivosti elektrona (HEMT-a) od galij-nitrida (GaN), naširoko su korišteni za smanjenje veličine i povećanje učinkovitosti pretvarača energije radom na visokim frekvencijama. Aktivni flyback pretvarač sa stezaljkama temeljen na GaN-u nije istražen samo za primjenu kod adaptera izmjenične u istosmjernu struju koji radi na frekvenciji MHz [4, 5], već i za druge primjene poput satelita i zrakoplovstva. Aktivni flyback pretvarač sa sinkronim ispravljačem baziran na GaN-u smatra se atraktivnim rješenjem za realizaciju univerzalnog USB punjača[3].



Slika 2.1. Shematski prikaz povratnog (flyback) pretvarača [4]

2.1. Nazivne vrijednosti struje i napona karakteristične za prijenosne uređaje

PED-ovi i drugi elektronički uređaji razvijaju se nevjerojatnom brzinom sa novim i sofisticiranim funkcijama. Ove višenamjenske uređaje potrebno je puniti u redovitim intervalima na određenim razinama napona i snage. U tablici 2.1 navedene su nazivne vrijednosti napona i struje te snage adaptera koje koriste novi pametni telefoni trenutno najzastupljenijih proizvođača na tržištu.

Tablica 2.1. Nazivne vrijednosti adaptera pametnih telefona

Uređaj	Naponske razine (V)	Najveća struja (A)	Najveća snaga (W)
Samsung Galaxy S23+	9/15/20	3	60
Xiaomi Redmi Note 12 Pro	5/9/15/20	6	67
Xiaomi Poco F4 GT	5/9/11/20	6	120
iPhone 15 Pro	5/9/15/20	2,33	35

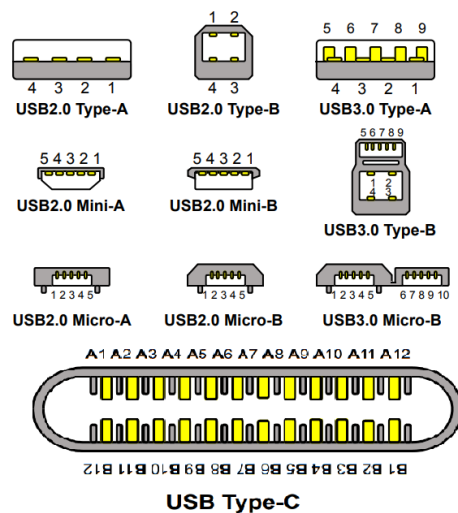
2.2. Razvoj USB standarda

USB (Universal serial bus) ili univerzalna serijska sabirnica, postala je sveprisutan protokol za konektore, od svog početka devedesetih godina omogućuje standardizirane veze između računala i njegovih perifernih uređaja kao što su miš, tipkovnica, vanjskih diskovi, pisari i slični uređaji.

USB standard je skup protokola koji definira brzinu prijenosa podataka i sposobnost prijenosa energije preko USB priključka. Tablica 2.2 ilustrira razvoj USB protokola u smislu njihove sposobnosti upravljanja snagom. Prva verzija USB standarda, nazvana USB 1.1, pojavila se 1990-ih. USB standard 1.1 imao je maksimalnu brzinu prijenosa od 12 megabita u sekundi (12 Mbps) ili 1,5 megabajta (MB) u sekundi i maksimalnu sposobnost prijenosa snage sabirnice od 2,5 W (5

V, 500 mA). Sljedeća revizija napravljena je 2000. godine uvođenjem USB standarda 2.0, s maksimalnom brzinom prijenosa od 480 Mbps ili 60 MB u sekundi. Daljnja revizija povećala je brzinu prijenosa podataka u većoj mjeri, 5,0 gigabita u sekundi (USB 3.1 Gen 1), 10,0 gigabita u sekundi (USB 3.1 Gen 2) i 20,0 gigabita u sekundi (USB 3.2). Osim većih brzina, ova je standard također povećao snagu sabirnice, nudeći 4,5 W, u usporedbi s 2,5 W koliko je bilo dostupno u USB 1.1 i USB 2.0.

USB BC 1.2 poseban je USB standard uveden za USB punjač, uređaj s posebnim priključkom za punjenje, poput zidnog adaptera ili adaptera za automobil, s maksimalnom napajanjem od 7,5 W. USB Type-C samo je revizija na fizičko USB sučelje (priključak), ali to je još uvijek USB 3.1 standard. Postoji razlika između USB standarda i USB konektora ili priključaka. USB standardi, kao što su USB 1.1, 2.0 i 3.1, skup su protokola koji određuju koliko učinkovito USB konektor (Tip-A, Tip-B i Tip-C) može rukovati podacima i napajanjem. Dakle, USB Type-C je jednostavno nova vrsta konektora za USB 3.1, koji može nositi maksimalnu struju od 3 A, stoga može isporučiti maksimalnu snagu do 15 W. Od evolucije prvog USB 1.1 do USB Type-C, nominalni napon od 5 V je zadržan a struja je povećana sa 500 mA na 3 A, pri čemu maksimalna snage raste na 15 W. Stoga je nedavno uveden novi USB standard pod nazivom USB PD (power delivery), koji doprinosi povećanju isporuke energije. Uz USB PD može se postići veliki skok u snazi do 100 W, jer se sada napon može povećati do razine od 20 V, a struja do 5 A.



Slika 2.2. Prikaz USB konektora sa označenim brojem pinova [5]

Sada s USB PD standardom, broj uređaja koje se mogu napajati pomoću USB kabela znatno je veći. Umjesto da budu ograničeni samo na pametne telefone, kamere i manje elektroničke uređaje, uvođenjem USB PD standarda uređaji koji troše veliku količinu energije poput monitora, tableta i

prijenosnih računala mogu se također napajati preko USB punjača. Stoga se dolaskom USB Type-C i PD standarda koncept univerzalnog USB punjača čini sve realnijom opcijom.

Tablica 2.2. Sposobnost upravljanja snagom USB standarda [6]

USB Standard	Napon (V)	Najveća struja
USB1.1	5	500 mA
USB 2.0	5	500 mA
USB 3.1	5	900 mA
USB BC 1.2	5	< 1,5 A
USB Type-C @ 1.5	5	1,5 A
USB Type-C @ 3A	5	3 A
USB PD	< 20	< 5 A

2.2.1. USB Type-C i USB PD

Godine 2014. predstavljen je USB Type-C, koji podržava prijenos podataka od 10 gigabita u sekundi (Gbps) te Display port od 8,1 Gbps. USB Type-C donio je puno više potencijala za budućnost USB-a. U 2017., USB 3.2x2 je objavljen za podršku dvostrukog podatkovnog prometa od 10 Gbps preko jednog Type-C sučelja, nudeći agregiranu propusnost od 20 gigabita, a 2019. je objavljen USB 4, koji nudi agregiranu propusnost od 40 gigabita preko jedne vrste C sučelje. USB Type-C je konektorsko sučelje koje je pružilo mnogo bolje korisničko iskustvo kombinirajući različite vrste USB konektora, kao i video i strujne konektore u jedan reverzibilni Type-C konektor zadržavajući sve funkcionalne prednosti USB-a.

U usporedbi s tradicionalnim Type-A i Type-B konektorima, Type-C konektor ima tri značajne prednosti. Može podržati protok podataka do 40 gigabita, dok Type-A ili Type-B podržavaju protok do 10 gigabita. Može podržati više protokola, kao što su DisplayPort, HDMI, Thunderbolt, itd. i posljednje, ali ne i najmanje važno, USB Type-C može dostići do 100 W snage, u usporedbi s uobičajenom snagom od 7,5 W u tradicionalnom USB konektoru.

Kao što je ranije spomenuto, Type-C konektor može podržati napajanje do 100 W, međutim, protokol USB Type-C podržava napajanje do 15 W (5 V, 3 A), što je dvostruko više od snage koju podržava tradicionalni USB priključci (7,5 W). Međutim, s USB PD standardom može se postići veliki skok u razini napajanja, sve do 100 W, jer omogućuje povećanje napona do 20 V i struje do 5A. Stoga se jedan USB može koristiti za napajanje niza različitih uređaja, s istim USB Type-C

PD punjačem.

Drugi važan koncept s obzirom na USB PD je pravilo monotonog povećanja snage. Ovo pravilo napajanja zahtijeva standard s četiri naponske razine, a to su 5 V, 9 V, 15 V i 20 V kao što je prikazano u tablici 2.3. Prema ovom pravilu, punjač od 15 W može podržavati samo napon od 5 V s 3 A na izlazu, punjač od 27 W može podržati napone od 5 i 9 V, s 3 A struje, punjač od 45 W može podržati napon od 5, 9 i 15 V, a punjač od 60 W može podržati sve gore navedene napone zajedno sa naponom od 20 V uz maksimalnu struju od 3A. Svi USB Type-C PD punjači moraju ispunjavati ove zahtjeve.

Tablica 2.3. Naponske razine i najveće struje USB PD punjača različitih snaga punjenja

Snaga punjača (W)	Naponske razine (V)	Najveća struja (A)
7,5	5	1,5
15	5	3
27	5/9	3
45	5/9/15	3
60	5/9/15/20	3

2.2.2. USB PD zahtjevi za regulaciju napona

Standardi regulacije napona za punjač od 5 V s jednim izlaznim naponom regulirani su USB 2.0 i 3.1 standardima, koji na izlazu proizvode napon od 4,75 do 5,5 V. Kako bi se povećala isporuka energije, USB PD standard podržava više izlaznih napona (5 V, 9 V, 15 V, 20 V) i nalažu održavanje raspona napona između +5% do -5%. USB PD također definira neke standarde koji se odnose na zahtjeve za prijelazom napona, tijekom stvarnog događaja prijelaza napona s jednog napona na drugi, dopušteno je prekoračenje napona od samo 5 mV za 275 ms nakon početka tranzicije. Također postoji ograničenje za brzinu promjene napona, tj. procijenjeno povećanje je ograničeno na 30 mV/us.

2.2.3. Standardi učinkovitosti za vanjska napajanja

Standardi i propisi za učinkovitost vanjskog napajanja i potrošnju struje bez opterećenja brzo su se razvili u proteklom desetljeću otkako je kalifornijska komisija za energiju (CEC) 2004. godine implementirala prvi obvezni standard. Nalaženje veće prosječne učinkovitosti vanjskih izvora napajanja ima značajan utjecaj na globalna potrošnja energije. Prosječna učinkovitost je aritmetička sredina aktivne učinkovitosti u sve 4 točke: 25%, 50%, 75% i 100% nazivne izlazne

snage. Tablice 2.4 i 2.5 ilustriraju standarde levela IV odijela za energiju (DoE) i EU kodeks ponašanja (CoC) Tire 2 standard koji se odnosi na učinkovitost vanjskog napajanja na potrošnju struje bez opterećenja. EU CoC Tier 2 također definira zahtjev za prosječnu učinkovitost od 10% opterećenja u aktivnom načinu rada.

Tablica 2.4. DoE level VI standard [7]

Izlazna snaga na natpisnoj pločici	Minimalna prosječna učinkovitost u aktivnom načinu rada	Maksimalna snaga u praznom hodu
$P_{out} \leq 1 \text{ W}$	$\geq 0,5 \times P_{out} + 0,16$	$\leq 0,100$
$1 \text{ W} < P_{out} \leq 49 \text{ W}$	$\geq 0,071 \times \ln(P_{out}) - 0,00014$ $\leq 0,100 \times P_{out} + 0,67$	$\leq 0,100$
$49 \text{ W} < P_{out} \leq 250 \text{ W}$	$\geq 0,880$	$\leq 0,210$
$P_{out} > 250$	$\geq 0,875$	$\leq 0,500$

Tablica 2.5. EU CoC Tier 2 standard [7]

Izlazna snaga na natpisnoj pločici (P_{out})	Minimalna prosječna učinkovitost u aktivnom načinu rada	10% prosječne učinkovitosti opterećenja u aktivnom načinu rada	Maksimalna snaga u praznom hodu
$0,3 \text{ W} \leq P_{out} \leq 1 \text{ W}$	$\geq 0,5 \times P_{out} + 0,169$	$\geq 0,5 \times P_{out} + 0,16$	$\leq 0,075$
$1 \text{ W} < P_{out} \leq 49 \text{ W}$	$\geq 0,071 \times \ln(P_{out}) - 0,00115 \times P_{out} + 0,67$	$\geq 0,071 \times \ln(P_{out}) - 0,00115 \times P_{out} + 0,67$	$\leq 0,075$
$49 \text{ W} < P_{out} \leq 250 \text{ W}$	$\geq 0,890$	$\leq 0,790$	$\geq 0,150$

2.3. Univerzalni USB punjač sa jednim i više priključaka

USB Type-C PD punjač (univerzalni punjač) može biti punjač s jednim ili više. Za punjač s jednim priključkom, jednostavna i jeftina flyback opcija mogla bi biti najbolji izbor, nudeći dobru učinkovitost i nisku potrošnju energije u stanju mirovanja. Punjač s više priključaka bit će teško dizajnirati jer svaki priključak mora podržavati više napona istovremeno.

Dvije vrste izvedbe više priključnih punjača:

- Prva moguća izvedba je generiranje svih mogućih razina napona cijelo vrijeme i zatim multipleksiranje napona. Ova vrsta sustava imat će vrlo dobru učinkovitost

jer se snaga obrađuje samo jednom na pretvaraču. Regulacija napona može biti loša kod povratnog pretvarača s više izlaza. Također, postojat će vrlo slaba iskorištenost kapaciteta pretvarača jer mora podržavati punu snagu na svakoj izlaznoj razini napona, a te razine nikada neće biti maksimalno opterećene istovremeno. Brzinu uspona je vrlo teško kontrolirati prilikom prebacivanja s jedne naponske razine na drugu pomoću multipleksera.

- Druga mogućnost je generiranje srednje istosmjerne sabirnice, zatim naknadna regulacija napona na svakom priključku. Ova izvedba može imati vrlo jednostavan i jeftin pretvarač jer mora podržavati samo jedan izlaz napon. Regulacija napona bit će vrlo dobra jer postoji zaseban pretvarač za svaki izlaz. Može doći do problema s učinkovitošću zbog višestrukih stupnjeva pretvorbe energije.

3. ELEKTRIČNI ENERGETSKI PRETVARAČI

Energetska elektronika je grana elektronike koja se bavi povezivanjem električnih sustava međusobno različitih karakteristika. Ovo se povezivanje ostvaruje s pomoću uređaja koji se nazivaju elektronički energetska pretvarači [8]. Različite vrste napajanja koriste se u svakodnevnim rutinama, kako kod kuće, tako i u industrijskom okruženju. Elektronički i električni uređaji su posvuda, a svima je potreban nekakav izvor električne energije za rad. Osnovni elementi opskrbe potrebnim napajanjem su sklopni poluvodički pretvarači zahvaljujući svojoj učinkovitosti, veličini, značajkama upravljanja te sposobnosti rada na različitim strujnim i naponskim razinama.

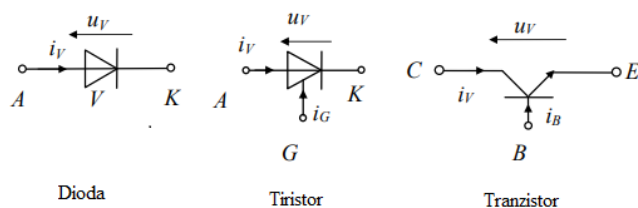
Svaki tehnički sustav je sklop međusobno povezanih komponenti koje transformiraju, prenose ili kontroliraju materijale, energiju i informacije s određenom svrhom. Osnovni blokovi električnog energetska sustava su:

- AC/DC ispravljači – ispravljaju izmjenične vrijednosti struje i napona u istosmjerne
- DC/AC pretvarači – pretvaraju istosmjerne vrijednosti struje i napona u izmjenične
- Istosmjerni pretvarači – mijenjaju vrijednosti istosmjernih veličina
- Izmjenični pretvarači- mijenjaju vrijednosti izmjeničnih veličina

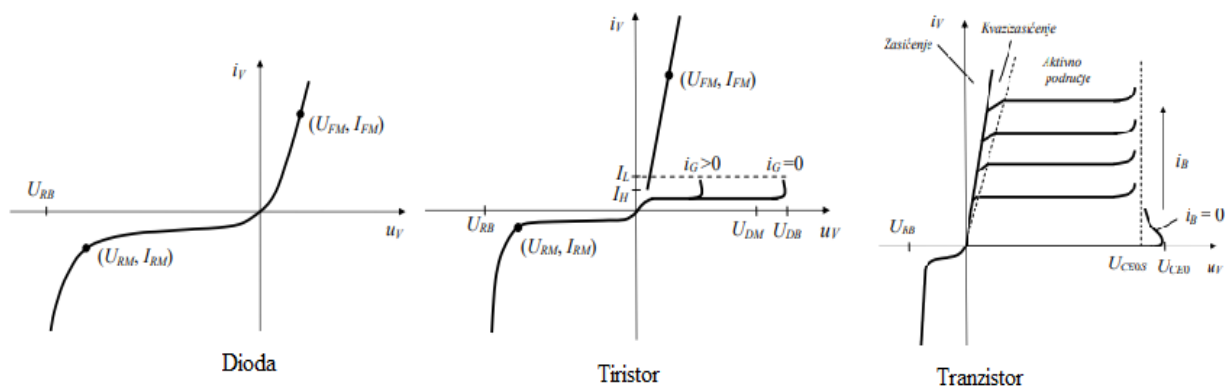
Iako su u ovom radu najviše koriste AC/DC ispravljači, napravljen je teorijski pregled za sve gore navedene blokove. Svi navedeni blokovi se sastoje od primarnih elektroničkih elemenata kao što su: otpornici, kondenzatori, transformatori, prigušnice, okviri, itd. te poluvodičkih komponenti kao što su:

- Diode, uključujući Zenerove, optoelektrične i Schottky diode, te DIAC (diode for alternating current)
- Tiristori, uključujući SCR (Silicon controlled rectifier), TRIAC (Triode for alternating current), MCT (MOS-controlled), GTO (Gate turn-off)
- Tranzistori, kao što su BJT (Bipolar junction transistor), FET (Field-effect transistor), IGBT (Insulated gate bipolar transistor)

Njihova uloga je kontrola rada opterećenja. Na slici 3.1. prikazani su simboli primarnih poluvodičkih komponenti. Slika 3.2. prikazuje tipične U-I karakteristike istih.



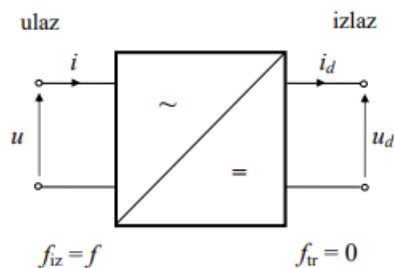
Slika 3.1. Simboli primarnih poluvodičkih komponenti



Slika 3.2. Tipične U-I karakteristike primarnih poluvodičkih komponenti

3.1. Ispravljači

Izmjenična struja je najobilniji izvor električne energije koja se isporučuje industrijskim i kućanskim objektima. Velika većina uređaja zahtjeva istosmjerni oblik struje kao izvor energije. Za proces prelaska izmjenične u istosmjernu struju potrebni su nam ispravljači koji koriste uređaje s asimetričnom vodljivošću kao što su poluvodičke diode i tiristori. Sustavi izgrađeni na diodama nisu upravljivi, dok sustavi izgrađeni na tiristorima imaju mogućnost kontrole na istosmjernom izlazu.



Slika 3.3. Simbol jednofaznog ispravljača i referentni smjerovi napona na priključcima.

[9]

Proces ispravljanja prilično je raznolik i može se koristiti za mnoge primjene ovisno o sustavu.

Ispravljački sklopovi dijele se na:

- Srednji (midpoint) (M) i mostni (B) ispravljači
- Jednofazni (M1, M2, B2) i trofazni (M3, B6) ispravljači
- Poluvalni (M1) i punovalni (M2, B2, M3, B6) ispravljači

Razlikuju se po obliku istosmjernog signala, učinkovitosti, prosječnoj i efektivnoj vrijednosti napona, struje i snage. Ispravljači se naširoko koriste u različitim vrstama pretvarača energije. Njihov raspon snage seže od milivata do megavata. Uređaji sa manjim rasponom snage najčešće se koriste kod jednofaznog izvora napajanja, dok se ispravljači velike snage uglavnom koriste u trofaznoj mreži. Napon napajanja je obično previsok za većinu uređaja koji se koriste u elektronici, iz tog razloga se transformatori koriste gotovo u svim ispravljačkim sklopovima. Kao što je prikazano na slici 3.2. transformator snižava efektivni napon (U_1) na niže razine (U_2) koje su prikladnije za korištenje.

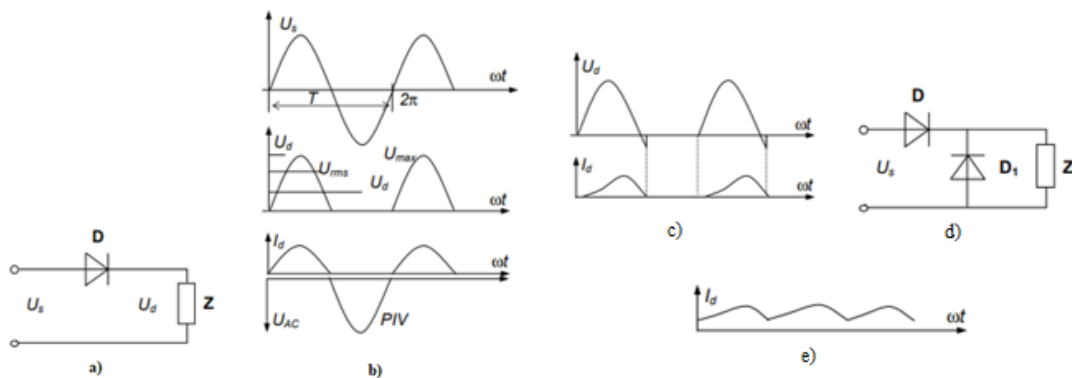
3.1.1. Jednofazni poluvalni ispravljači

Jednofazni poluvalni ispravljači su vrlo jednostavne izvedbe, ipak rijetko se koriste u praksi zbog svojih nedostataka. Neki od nedostataka su mala upotreba transformatora zbog lošeg oblika sekundarne struje, neprimjerena upotreba diode te loša kvaliteta ispravljenog napona. Osnovne izvedbe jednofaznih poluvalnih ispravljača su:

- Diodni ispravljač s aktivnim opterećenjem
- Diodni ispravljač s induktivnim opterećenjem
- Tiristorski ispravljač

Jednofazni poluvalni ispravljački krug (M1) prikazan je na slici 3.4. a). Valovi ulaznog i rezultirajućeg izlaznog napona poluvalnog ispravljača prikazani su na slici 3.4. b). Pretpostavimo li da je u pozitivnom dijelu krivulje AC sinusoidnog vala anoda diode D pozitivna, a katoda negativna, dioda će voditi. U tom slučaju na opterećenju Z pojavit će se struja. U negativnom dijelu krivulje anoda postaje negativna, a katoda pozitivna. Dioda je obrnuto polarizirana te kroz opterećenje neće teći značajna struja što znači da se na opterećenju neće pojaviti napon. U slučaju induktivnog opterećenja, U_d postaje negativan, a izmjenična mrežna struja (isto kao I_d) je izvan faze kao i napon (Slika 3.4. c)). Kada induktivnost teži beskonačnosti, valni oblik struje se iskrivljuje i postaje gotovo pravokutan. Dodatak diode slobodnog hoda D_1 (Slika 3.4. d)), dopušta da krivulja struje opterećenja bude kontinuirana i sprječava da U_d postane negativan (Slika 3.4.

e)). Kada je D isključen, D_1 dopušta strujni tok induktora opterećenja. Ako je induktivitet dovoljno velik, I_d nikada ne pada na nulu. Ovo radno stanje poznato je kao kontinuirano provođenje.



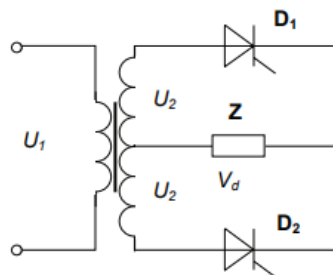
Slika 3.4. Diodni ispravljači sa aktivnim i induktivnim opterećenjem [10]

3.1.2. Jednofazni punovalni ispravljači

Glavne prednosti jednofaznog punovalnog ispravljača u odnosu na poluvalni su veća upotreba transformatora te učinkovitija upotreba dioda. Kvaliteta ispravljenog napona je niska zbog velikih amplituda i vrlo niskog faktora snage. Glavni nedostatak dvodiodnog punovalnog ispravljača je potreba za središnjim transformatorom. Komutacija poboljšava valni oblik struje u namotima transformatora i smanjuje potrebnu snagu transformatora te također poboljšava faktor snage.

Transformator sa središnjim odvodom je jedna od izvedbi jednofaznog punovalnog ispravljača. Dvodiodni jednofazni punovalni ispravljač (midpoint rectifier ili M2 rectifier) je paralelni spoj dvaju poluvalnih ispravljača. Ovaj sustav, prikazan na slici 3.5. proizvodi ispravljeni namreškani izlazni napon za svaku promjenu izmjeničnog ulaza. Izlaz ovog uređaja ima dvostruko veću vrijednost istosmjernog napona od poluvalnog ispravljača.

Ispravljač koristi transformator sa središnjim odvodom koji prenosi izmjenični napon izvora na diodni ispravljački krug. Anode svake diode D_1 i D_2 spojene su na suprotne krajeve sekundarnog namota transformatora. Diodne katode se zatim međusobno spajaju kako bi formirale zajednički pozitivni izlaz. Opterećenje napajanja mora se spojiti između zajedničke katodne točke i središnjeg priključka transformatora. Transformator, dvije diode i opterećenje čine potpuni put za struju.



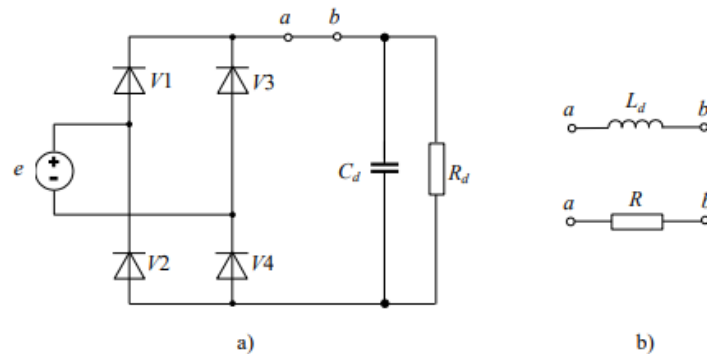
Slika 3.5. Transformator sa središnjim odvodom [10]

Kada se izmjenični napon primijeni na primarni namot transformatora, on smanjuje napon u sekundarnom namotu. Središnji odvojak služi kao električna neutralna točka ili središte sekundarnog namota. Polovica sekundarnog napona pojavit će se između središnjeg i gornjeg odvojka sekundarnog namota, a druga polovica između središnjeg i donjeg odvojka. Ove dvije vrijednosti napona su jednake i njihov iznos uvijek će biti π radijana (180 stupnjeva) izvan faze u odnosu na središnju točku. Svaka dioda mora imati PIV vrijednost dvostruko veću od vrijednosti vršnog napona razvijenog na izlazu, budući da je dvostruki vršni napon prisutan na diodi s obrnutim polaritetom.

3.1.3. Jednofazni mosni ispravljači

Izmjenične se pojne mreže ponašaju kao naponski izvori te u svijetu ispravljačkih sklopova dolazi do loše definiranih mreža u svakom slučaju kada se žele napajati istosmjerna kapacitivna trošila [9]. To je posebno važno u kontekstu napajanja široko korištenih elektroničkih uređaja koji zahtijevaju kontinuirani, obično glatki, izlazni istosmjerni napon. Ovi uređaji obično troše do nekoliko stotina vata (obično manje od 100W), a njihova proizvodnja je masovna i konstantno raste. Iz tehničkih i ekonomskih razloga, ključno je da se shema spajanja ispravljača za napajanje elektroničkih uređaja održava što jednostavnijom. S druge strane, struja iz mreže koja je uzrokovana radom ispravljača mora biti izmjenična. Kako dvofazni ispravljač zahtijeva ispravljački transformator, logično rješenje je koristiti jednofazni mosni spoj. Međutim, ovo stvara kapacitivnu petlju, što rezultira loše definiranom mrežom, kako se jasno vidi na dijagramu prikazanom na slici 3.6. a). Postoji nekoliko strategija za pretvaranje jednofaznog mosnog spoja s kapacitivnim opterećenjem u stabilnu i dobro definiranu mrežu. Najjednostavniji pristup je kada je potrebno očuvati električnu izolaciju između ispravljačkog sklopa i izmjenične mreže. U takvom slučaju, dovoljno je prilagoditi ispravljački transformator tako da ima veći gubitak, što je često slučaj kod punjača za male kapacitivne akumulatore.

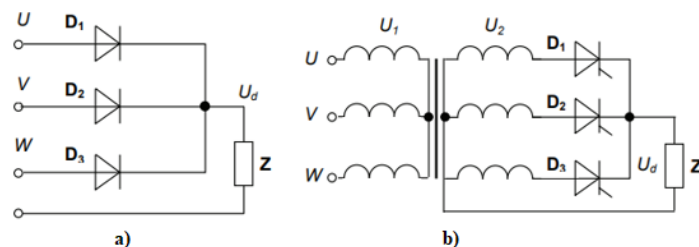
Međutim, u svim bitnijim primjenama, kao što je napajanje elektroničkih uređaja, električna izolacija se postiže korištenjem lančano spojenog istosmjernog pretvarača, dok je ispravljački sklop izravno povezan s izmjeničnom mrežom. Pretvaranje kapacitivno opterećenog jednofaznog mosnog spoja u dobro definiranu mrežu može se postići uvođenjem izmjenične prigušnice velike induktivnosti L u izmjenične dovode ispravljača. Sa druge strane, može se ugraditi istosmjerna prigušnica s induktivnošću L_d koja, zajedno s kondenzatorom kapacitivnosti C_d , formira niskopropusni filter, ili se može ugraditi otpornik R , kao što je prikazano na slici 3.6. b).



3.6. Loše definirana pretvaračka mreža koja spajanjem induktiviteta L_d ili otpora R postaje dobro definirana. [9]

3.1.4. Trofazni punovalni ispravljači

Trofazni trodiodni ispravljački krugovi (M3 ispravljači) proizvode čišći istosmjerni izlazni napon od jednofaznih ispravljačkih krugova, čime se troši manje energije. Na slici 3.7. faze trofaznog izvora U , V i W , spojene su na anode D_1 , D_2 i D_3 . Opterećenje je spojeno između katoda dioda i neutralnog izvora zvijezda spoja. Kada je faza U na svojoj vršnoj pozitivnoj vrijednosti, maksimalna vodljivost se javlja kroz diodu D_1 jer se nalazi u pozitivnoj poluperiodi. Tijekom negativne poluperiode faze U , D_1 ne provodi. Ostale diode rade na sličan način, provode tijekom pozitivnih poluperioda izmjeničnog ulaza, u suprotnom ne provode.



Slika 3.7. Trofazni punovalni ispravljači [10]

Ova vrsta ispravljača se može opisati kao kombinacija tri jednofazna poluvalna ispravljača za

proizvodnju poluvalnog istosmjernog izlaza. Faze trofaznog sustava pomaknute su jedna prema drugoj za $2\pi/3$ radijana (120 stupnjeva). Stoga je napon koji se pojavljuje na diodama izvan faze za 120 stupnjeva. Postoji vremenski period tijekom svakog izmjeničnog ciklusa kada se pozitivne izmjene međusobno preklapaju, kao što je prikazano na slici 3.8. a). Tijekom prvog perioda preklapanja, napon faze U je pozitivniji od napona faze W, dok je tijekom drugog intervala, faza W pozitivnija. Dioda D_1 će provoditi dok ne završi prvo vremensko razdoblje, zatim će D_2 provoditi počevši od kraja prvog perioda dok se ne dosegne sljedeće područje preklapanja. Za razliku od jednofaznog ispravljača, kut vodljivosti svake diode je $2\pi/3$ umjesto π , što znači da svaka dioda provodi od $\pi/6$ do $5\pi/6$.

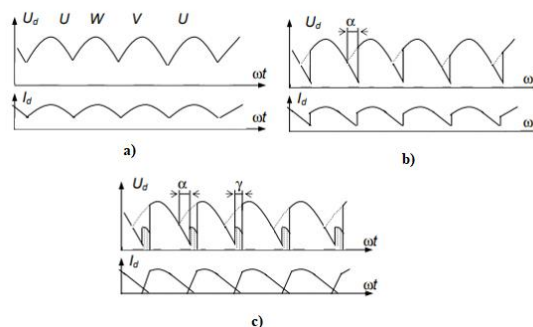
Dijagram ispravljanja tiristorskog trofaznog trodiodnog kruga s otpornim opterećenjem prikazan je na slici 3.8. b). Na otporno-induktivnom opterećenju struja se nastavlja kroz diodu ili tiristor nakon što napon promijeni predznak. Iz tog razloga, tiristor se ne zatvara u trenutku nultog napona, ali ostaje otvoren kao što je prikazano na slici 3.8. c).

Napon preko opterećenja raste do vršne vrijednosti tri puta tijekom svake izmjene faza ulaznog napona. Ovi su vrhovi međusobno udaljeni $2\pi/3$ radijana. Budući da izravni izlazni napon nikada ne pada na nulu, manja je valovitost izmjenične struje, što rezultira čistim oblikom istosmjerne struje od one koju proizvodi jednofazni ispravljač. Ispravljeni napon ovog kruga je:

$$U_d = \frac{3U_{\max}}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha \quad (3-1)$$

U ovom slučaju fazni napon s amplitudnom vrijednošću U_{\max} jednak je:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}U_s}{2\pi} = 1.17U_s \quad (3-2)$$

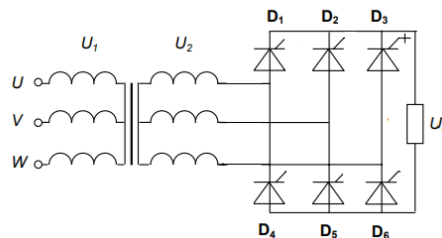


Slika 3.8. Strujne i naponske karakteristike trofaznog punovalnog ispravljača [10]

Nedostatak trofaznog trodiodnog ispravljača je što izmjenični vodovi nisu izolirani. Ovaj nedostatak izolacije, koji je izravna veza s izmjeničnim vodovima, predstavlja veliki problem u vidu sigurnosti. Da bi se otklonio ovaj nedostatak, može se koristiti transformator, kao što je prikazano na slici 3.7. b). Sekundarni napon se može povećati ili smanjiti pravilnim odabirom transformatora. Iznos sekundarnog napona napojnog transformator je $U_2 = U_s$. Kao i kod jednofaznog poluvalnog ispravljača, trofazni ispravljač sa srednjim odvojkom ima istosmjernu struju u sekundarnim namotima koje mogu uzrokovati probleme zasićenja jezgre transformatora. Struje u zbroju primarnih namotaja nisu jednake nuli, stoga je poželjno da primarni namoti nisu spojeni u zvijezdu.

3.1.5. Trofazni mosni ispravljači

SCR mosna izvedba trofaznog punovalnog ispravljača prikazana je na slici 3.9. Ovaj trofazni mosni ispravljač (B6) zahtjeva šest dioda za rad strujnog kruga. Ispravljač se može smatrati serijskim spojem dva M3 ispravljača, gdje su tri uređaja u spoju zajedničke katode, a tri u spoju zajedničke anode. Anode dioda D_4 , D_5 i D_6 spojene su zajedno u jednu točku, dok su katode dioda D_1 , D_2 i D_3 spojene zajedno u drugoj točki. Opterećenje se povezuje preko ovih točaka. Ovakva izvedba ne zahtjeva neutralni vod trofaznog izvora te se iz toga razloga mogu koristiti izvori spojeni u trokut ili zvijezda spojeve.



Slika 3.9. SCR mosna izvedba trofaznog punovalnog ispravljača [10]

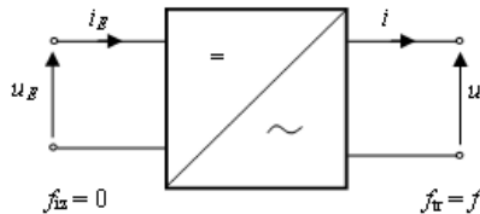
Princip rada sličan je radu jednofaznom mosnom ispravljaču u mnogim aspektima. Svaka dioda u ovom uređaju vodi tijekom jedne trećine ciklusa (120 stupnjeva). Vršni pozitivni istosmjerni izlazni napon javlja se tijekom svakih $\pi/60$ radijana trofaznog izmjeničnog ulaza. Izlazni napon se računa:

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}U_{\max}}{\pi} \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha \quad (3-3)$$

U ovom slučaju je $U_{d0} = 3\sqrt{3}\sqrt{2}U_s / \pi = 2,34U_s$ – fazni napon s vrijednošću amplitude U_{\max} . Kako α raste od 0 do π , izlazni napon varira od U_{d0} do $-U_{d0}$.

3.2. Izmjenjivači (Inverteri)

Proces pretvaranja istosmjerne u izmjeničnu struju naziva se inverzija. Osim električne struje, inverteri pretvaraju istosmjerni u izmjenični napon određene frekvencije.



3.10. Simbol jednofaznog izmjenjivača i referentni smjerovi napona na priključcima [9]

Inverteri koriste elektroničke elemente kao što su SCR, GTO tiristori i tranzistori. Ulazni istosmjerni napon može dolaziti iz ispravljenog izlaza izmjeničnog napajanja, takav slučaj naziva se inverzija istosmjernog međukruga. Ulazni istosmjerni napon može biti iz nezavisnog izvora, kao što je izvor istosmjernog napona ili baterije. Izlazna frekvencija invertera izmjenične struje može se precizno prilagoditi kontrolom frekvencije invertera. To se obično određuje frekvencijom kristalnog oscilatora koji se nalazi unutar sklopnog upravljačkog dijela izmjenjivača. Za kontrolu opterećenja pomoću izvora promjenjive frekvencije potrebno je da valni oblici korištenog napona ili struje imaju minimalna izobličenja. Najbolje rješenje su inverteri koji generiraju sinusne valne oblike koji su najpoželjniji za mnoge primjene. Nedostatak takvih uređaja su visoke cijene proizvodnje do kojih dolazi iz potrebe za velikim brojem sklopnih elemenata. Stoga će izmjenični izlaz praktičnih izmjenjivača u većini slučajeva imati određenu količinu harmonijskog sadržaja.

Postoje dva načina na koje se harmonijski sadržaj može svesti na nisku vrijednost ili barem unutar prihvatljivih granica:

- jedna metoda je korištenje filtarskog kruga na izlaznoj strani pretvarača; filter će morati podnijeti veliku izlaznu snagu iz pretvarača
- druga shema koristi strategiju modulacije koja će promijeniti sadržaj harmonika u izlaznom naponu tako da će potrebno filtriranje biti minimalno ili nula, ovisno o vrsti pojačanja.

Jednofazni i trofazni izmjenjivači dizajnirani su da daju jednofazni ili trofazni izlaz. Većina industrijske primjene zahtjeva trofazni izmjenični napon. Poluvalni izmjenjivači propuštaju električnu energiju tijekom jedne poluperiode te se koriste kada je snaga opterećenja od 100 do

200 W. Druga klasifikacija se odnosi na offline i online izmjenjivače. Kada je izmjenjivač jedini izvor izmjeničnog voda opterećenja, takav izmjenjivač se naziva izvanmrežni ili autonomni. Neki od popularnijih izvanmrežnih izmjenjivača imaju istu topologiju kao i kontrolirani ispravljači. U slučaju kada je izmjenjivač dio uobičajenog izvora napajanja naziva se mrežni ili izmjenjivač s mrežnim napajanjem.

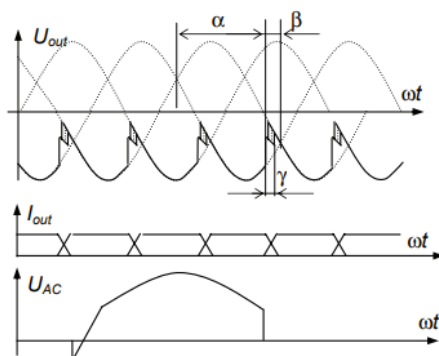
U skladu s elektromagnetskim procesima strujnog kruga razlikuju se izmjenjivači izvora napona i izvora struje. Izmjenjivač izvora napona (VSI, ili voltage stiff inverter) formira napon sa potrebnim svojstvima: veličine, frekvencije i faze. Ovo je najčešće korištena vrsta izmjenjivača. Signal koji daje na izlaznoj strani funkcionira kao izvor napona. Ovaj izmjenjivač ima nisku unutarnju impedanciju te najčešće ima kondenzator velikog kapaciteta spojen preko izvora napajanja koji održava napon konstantnim.

Jedna od značajki izmjenjivača izvora napona je i dvosmjerna ulazna struja VSI. Da bi se osigurala struja VSI, sklopke moraju biti konstruirane na potpuno upravljanim uređajima (tranzistori, GTO tiristori ili MCT) s diodama u praznom hodu. Izlazna struja VSI-a oblikovana je prema vrijednosti napona i otporu opterećenja. Izlazni napon izmjenjivača najčešće se podešava promjenom istosmjernog ulaznog napona koji isporučuje izmjenjivač. U ovom slučaju, podešavanje se odvija izvan izmjenjivača i neovisno je o radu izmjenjivača. Alternativni način podešavanja izmjeničnog napona je unutar izmjenjivača pomoću modulacije.

Izmjenjivač struje (CSI) je izvor struje sa potrebnim svojstvima: veličine, frekvencije i faze. Ulazni krug izmjenjivača izvora struje ima svojstva istosmjernog izvora struje. Prekidači izmjenjivača povremeno mijenjaju smjer izlazne struje. Opterećenje izmjenjivača ima svojstva izvora napona sa gotovo nulatom impedancijom. Iz toga razloga se izlazni napon CSI oblikuje prema padu napona na opterećenju koji je uzrokovan izlaznom strujom.

3.2.1. Izmjenjivači izvora napona

Punovalni kontrolirani ispravljači mogu raditi kao mrežni izmjenjivači kada je kut paljenja $\alpha > \pi/2$. Dijagrami napona i struje trofaznog pretvarača prikazani su na slici 3.12. U ovom slučaju je negativni izmjenični napon usmjeren suprotno od struje, stoga se negativna djelatna snaga premješta na opskrbni vod.



Slika 3.12. Dijagrami napona i struje trofaznog pretvarača [10]

U invertirajućem načinu rada prikladnije je kut paljenja izraziti kao “kut napredovanja“ od krajnje granice intervala dostupnog za uspješnu komutaciju nego kao kašnjenje α za početnim intervalom. Ovaj kut se najčešće označava kao β i njegove vrijednosti se izražavaju pomoću:

$$\alpha + \beta = \pi, \quad \cos \alpha = -\cos \beta \quad (3-4)$$

Da bi se komutacija dovršila prije dostupnog ograničenja u slučaju preklapanja, kut β mora biti veći od intervala komutacije γ . Interval komutacije je promjenjiv i ovisi o istosmjernoj struji opterećenja. Kao rješenje ovoga problema te problema vremena isključivanja tiristora, uobičajeno je osigurati minimalni sigurnosni kut koji se naziva kutom gašenja: $\beta - \gamma$. Za stabilan rad izmjenjivača kada postoji mogućnost kvara komutacije, poželjno je koristiti zatvorenu petlju sa gate kontrolom, koja će automatski podesiti siguran kut gašenja.

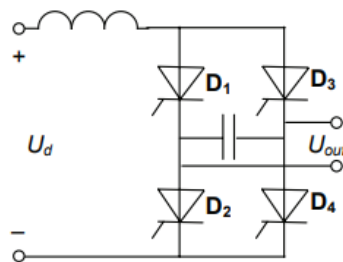
3.2.2. Izmjenjivači struje

Izmjenjivač struje CSI zahtijeva izvor istosmjerne struje na ulazu, za razliku od izvora istosmjernog napona potrebnog za VSI. Najčešće imaju veliki induktor spojen u seriju na izvor napajanja, koji održava struju konstantnom.

CSI se koristi za električnu opremu koja zahtijeva kontrolu vrijednosti struje, kao što su elektrolučne peći, indukcijsko grijanje, itd. Zbog potreba za otporno-kapacitivnim opterećenjem ne koriste se u toj mjeri kao VSI. CSI koristi napon u pretvaraču kao izvor struje sa odgovarajućom povratnom spregom. Kod uporabe tiristora, CSI ponekad imaju prednost u odnosu na VSI zbog jednostavnijih sklopnih krugova.

Prisilno komutirani CSI je najčešće korišteni sustav na razinama snage u rasponu od 50 do 3500 kW pri naponima do 700 V normalno. Razvijene su visokonaponske izvedbe 3,3/6,6 kV, ali se nisu pokazale ekonomski atraktivnima. Jednofazni CSI prikazan je na slici 3.13. Jednofazni most

ovdje igra ulogu komutatora. Za način strujnog izvora, induktor je uključen u ulazni krug pretvarača. Kondenzator se nalazi na izlazu kao energetski međuspremnik između pulsirajućeg izmjenjivač i opterećenje. Osim toga, kondenzator je instrument prisilne komutacije tiristora. Kada tiristori D_2 i D_3 provode struju, ulazni napon puni kondenzator. U trenutku uključivanja tiristora D_1 i D_4 , prethodni tiristori će dobiti reverzni napon napunjenog kondenzatora, što im pomaže da se odmah zatvore. Kondenzator počinje ponovno punjenje na drugi polaritet, dovršavajući ga prije sljedećeg uključivanja. Što je struja veća, kondenzator se brže puni i vrijeme prisilne komutacije je kraće.



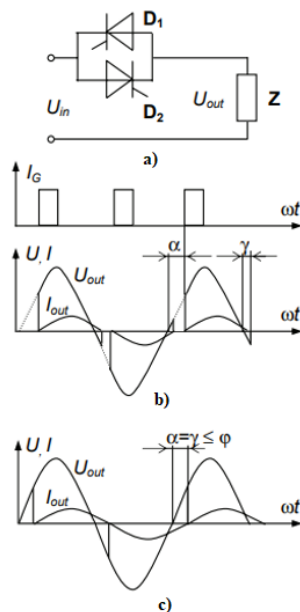
Slika 3.13. Jednofazni CSI [10]

3.3. Izmjenični pretvarači

Izmjenični pretvarači koriste se za pretvaranje izmjeničnih veličina jedne vrijednosti u izmjenične veličine drugih vrijednosti. Najjednostavnija izvedba izmjeničnog pretvarača je regulator izmjeničnog napona, koji mijenja napon bez promjene frekvencije. Ostale izvedbe su izravni pretvarač frekvencije koji mijenjaju oblik frekvencije i napona te pretvarač frekvencije istosmjernog kruga, koji se još naziva i DC link pretvarač.

3.3.1. Regulatori izmjeničnog napona

Kod monofaznih regulatora napona, izvor izmjenične struje omogućuje prirodnu komutaciju provodnih sklopki. Paralelno spojen par SCR sa obrnutim polaritetom ili TRIAC mogu obavljati funkciju elektroničke sklopke prikladne za korištenje s izmjeničnim napajanjem. Strujni krug jednofaznog regulatora izmjeničnog napona koji napaja otporničko-induktivno opterećenje prikazan je na slici 3.14. a). Ako su potrebni impulsi usmjeravanja I_g dovedeni na SCR dok su njegovi odgovarajući anodni naponi pozitivni, započinje provođenje struje.



Slika 3.14. Strujni krug i valni oblici struje i napona jednofaznog regulatora izmjeničnog napona [10]

Kut vodljivosti ovisi o kutu paljenja α , mjerenom od anodnog nultog napona, i o faznom kutu ϕ opterećenja za sinusoidno napajanje. Tiristor D_1 se pali na α , a tiristor D_2 se pali na $\pi + \alpha$. Kada se D_1 uključi na α , napon napajanja se primjenjuje na opterećenje. Struja opterećenja raste do α i opada do nule pod nekim kutom γ . Kada se D_2 uključi na $\pi + \alpha$, u opterećenju teče negativan strujni impuls. Valni oblici napona opterećenja U_{out} i struje opterećenja I_{out} prikazani su na slici 3.14. b) za $\alpha > \phi$. U ovom slučaju I_{out} je diskontinuiran. Slika 3.15. c) prikazuje valne oblike za situaciju kada je $\alpha \leq \phi$. U ovom slučaju I_{out} je kontinuiran i sinusoidan. Kada je $\alpha < \phi$, tiristor će se uključiti na $\omega t = \alpha$.

3.3.2. Izravni pretvarači frekvencije

Izravni pretvarači frekvencije dobivaju željeni oblik izlaznog napona i frekvencije izravno iz valnog oblika ulaznog izmjeničnog napona uklapanjem odnosno isklapanjem energetske poluvodičkih sklopki. Klasificiraju se kao izravni pretvarači frekvencije i pretvarači s međukrugom istosmjerne struje. Izravni pretvarači frekvencije ne sadrže pohranu energije u međukrugu. Njihova izmjenična ulazna frekvencija izravno se pretvara u izmjeničnu izlaznu frekvenciju. Najpopularniji tipovi izravnih pretvarača frekvencije su prirodno komutirani ciklopretvarači i matrični pretvarači frekvencije.

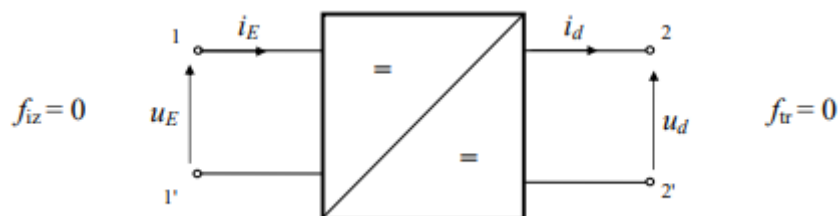
Ciklopretvarači su prirodno komutirani pretvarači frekvencije koji su sinkronizirani opskrbnim

vodom. Obično se koriste u sustavima velikih izlaznih snaga do desetak megavata za snižavanje frekvencije strojeva niske brzine. Tiristor koji se zatvara na prirodnim komutacijama, tj. isključuje se pri nultoj struji, gotovo je jedini uređaj koji može zadovoljiti napon prekidača i nazivnu struju potrebnu pri ovim razinama snage, najčešće se koriste 3-, 6-, 12-, i 24-pulsni ciklopretvarači.

Glavna značajka ovih sklopova je da su potrebni samo standardni linijski komutirani tiristori, koji su u uporabi dugi niz godina u sustavima najvećih nazivnih snaga. Također, cijena tiristora je razumna jer nisu potrebne posebne specifikacije u pogledu vremena isključivanja.

3.4. Istosmjerni pretvarači

Istosmjerni pretvarači koriste se za pretvaranje istosmjernih veličina jednih vrijednosti u istosmjernu veličinu drugih vrijednosti, a također mogu povezivati dva istosmjerna sustava. Načelo rada istosmjernih pretvarača zasniva se na brzom preklapanju energetskih sklopova koje velikom brzinom prekidaju istosmjerni ulazni izvor. Jedna od osnovnih značajki istosmjernih pretvarača je slobodan odabir radne frekvencije koja je ograničena gubitcima u aktivnim poluvodičkim elementima i reaktivnim komponentama. Klasificiraju se kao linearni i preklopni pretvarači. Temeljna razlika je u tome što linearni pretvarač regulira kontinuirani tok struje od ulaza do opterećenja kako bi se održao potrebnii napon opterećenja. Linearni pretvarači se koriste u sustavima malih snaga i u krugovima gdje je potrebno tiho napajanje, kao što su analogni, audio ili sklopovi sučelja. Preklopni pretvarač regulira isti protok struje smanjivanjem ulaznog napona i kontroliranjem prosječne struje pomoću postotka uključenosti (radni ciklus). Kada opterećenje zahtijeva veću struju, radni ciklus se povećava kako bi se struja prilagodila promjeni. DC/DC pretvarači izgrađeni na čoperima najpopularniji su pretvarači među modernim niskim i srednjim izvorima napajanja.



Slika 3.15. Simbol istosmjernog pretvarača i referentni smjerovi napona i struja na prilazima [9]

3.4.1. Regulatori istosmjernog napona

Kvaliteta napajanja ovisi o naponu opterećenja, struji opterećenja, regulaciji opterećenja i drugim čimbenicima. Regulacija opterećenja, skraćeno LR (također se naziva učinak opterećenja), je

promjena u reguliranom izlaznom naponu kada se struja opterećenja mijenja od minimalne do maksimalne:

$$LR = U_{NL} - U_{FL} \quad (3-5)$$

gdje je U_{NL} napon stezaljke bez opterećenja, a U_{FL} je nazivni napon stezaljke punog opterećenja.

Regulacija opterećenja često se izražava kao postotak dijeljenjem regulacije opterećenja s naponom punog opterećenja i množenjem rezultata sa 100% :

$$\%LR = \frac{U_{NL} - U_{FL}}{U_{FL} \cdot 100} \quad (3-6)$$

Sukladno tome, regulator napona je krug koji održava istosmjerni napon opterećenja konstantnim unatoč velikim promjenama u mrežnom naponu i otporu opterećenja. To je vrlo čvrst izvor istosmjernog napona. To znači da je izlazni otpor vrlo mali, gotovo jednak nuli. Regulator za regulaciju opterećenja može imati povratnu informaciju s izlaza ili povratnu vezu s ulaza pretvarača kako bi imao bolju regulaciju snage i otpornost na promjene opterećenja i linije. Glavna svrha ovog regulatora je održavati izlaz na nekoj željenoj razini postavljenoj referencom. Osnovni oblik sustava upravljanja zatvorenom petljom koristi izmjereni povratni signal i uspoređuje ga sa željenom referencom.

3.4.2. Silazni pretvarači

Preklopni istosmjerno napajanje znatno je prilagodljiviji izbor, sa širim rasponom primjena od linearnih regulatora. Glavne funkcije preklopnih istosmjernih pretvarača su:

- promjena razine napona
- osigurati galvansko odvajanje elektroničkih sklopova
- stabilizacija izlaznog napona

Preklopni pretvarači za razliku od linearnih regulatora:

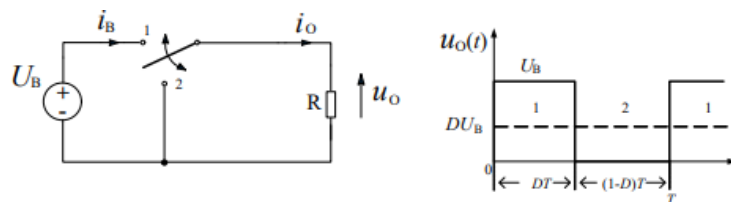
- pokazuju učinkovitost od 65 do 90% bez obzira na izlazni napon, čime se drastično smanjuju zahtjevi za veličinom hladnjaka
- zbog svoje visoke frekvencije rada, magnetski i kapacitivni elementi koji se koriste za pohranjivanje energije su mali, a trošak prekidačkog napajanja niži je nego kod linearnog regulatora
- izlazni napon može varirati iznad i/ili ispod razine ulaznog napona

- kada se ulazni napon isjecka u izmjenični valni oblik i postavi u magnetski element, mogu se dodati dodatni namoti kako bi se osiguralo više od jednog izlaznog napona.

Nedostaci sklopnih pretvarača su :

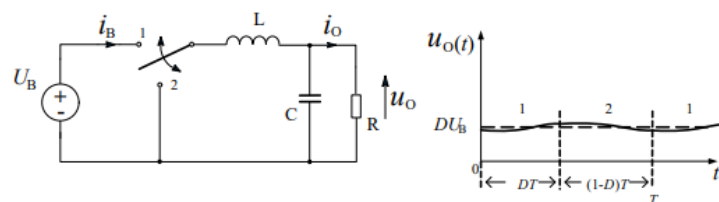
- više komplikacija u odnosu na linearne regulatore
- znatna buka na ulazu i izlazu
- znatno sporije prijelazno vrijeme odziva koje im je potrebno da odgovore na promjene u opterećenju zbog vremenski ograničenih impulsa energije.

Osnovna konfiguracija silaznog pretvarača prikazana je na slici 3.16. Sklopka se periodično otvara i zatvara s frekvencijom od $1/T$, pri čemu se omjer trajanja vođenja i ukupnog perioda naziva faktorom vođenja sklopke. Na izlazu, napon prema opterećenju R predstavlja intermitentni ulazni napon, što znači da je to niz impulsa s amplitudom U_B i srednjom vrijednošću $U_O = DU_B$. Ovaj napon prema opterećenju obično je valovit.



Slika 3.16. Strujni krug i naponske karakteristike silaznog pretvarača [11]

Međutim, istosmjerna komponenta napona koja prati ovakvo valovanje, u većini slučajeva, nije korisna za napajanje uređaja. U stvari, neki uređaji, kao što su integrirani digitalni sklopovi, ispravno rade samo kada su napajani iz istosmjernih izvora s malom valovitošću napona i struje. Istosmjerni pretvarači obično imaju izlazne napone koji se malo razlikuju od njihovih srednjih vrijednosti. Osnovnu konfiguraciju silaznog pretvarača (prikazanu na slici 3.16.) treba prilagoditi dodavanjem niskofrekventnog filtra između sklopke i opterećenja. Važno je napomenuti da, u ovoj analizi koja pretpostavlja idealne komponente, dodavanje filtra ne utječe na ukupne gubitke u sustavu. Gubitci na sklopki i filtru su zanemarivi, isto kao i na prigušnici i kondenzatoru.



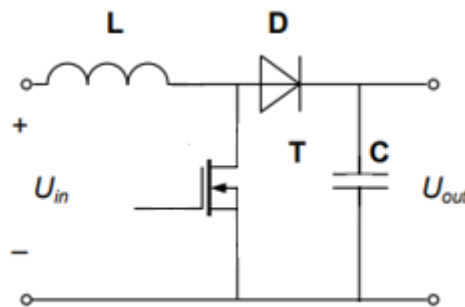
Slika 3.17. Strujni krug i naponske karakteristike pretvarača s niskonaponskim filtrom

[11]

Sklopka S ima dva potencijalna stanja ili pozicije, i ovisno o njoj trenutnoj poziciji, razlikuju se dva osnovna konfiguracijska stanja sklopa. Prvo stanje sklopa traje u vremenskom intervalu od $t = t_0 = 0$ do $t = DT$, gdje je T ukupno trajanje sklopnog ciklusa. Drugo stanje sklopa traje u vremenskom intervalu od $t = DT$ do

3.4.3. Uzlazni pretvarači

Silazni pretvarači proizvode izlazne napone niže od ulaznog napona. Međutim promjene u konfiguraciji čopera rezultiraju većim naponima opterećenja. Kod uzlaznog povratnog pretvarača (slika 3.18.), induktor L postavljen je izravno između ulaznog izvora U_{in} i sklopke T . Anodni vod ispravljača D postavljen je na čvor gdje su sklopka i induktor spojeni, a kondenzator C je postavljen između izlaza ispravljača i uzemljenja.



Slika 3.18. Uzlazni povratni pretvarač [10]

Povratni (flyback) proces može se podijeliti u dvije točke. Kada je prekidač napajanja uključen, struja se povlači kroz induktor, što uzrokuje pohranjivanje energije unutar zavojnice. Struja induktora raste gotovo linearno. Prekidač se tada isključuje. Budući da se struja kroz induktor ne može trenutno promijeniti i prisiljena je teći kroz diodu i opterećenje, napon induktora se preokreće (flies back). To uzrokuje uključivanje ispravljača, čime se energija induktora odbacuje u kondenzator. Struja induktora se smanjuje. Ovaj proces se odvija sve dok se energija induktora ne isprazni. Budući da napon induktora kasni za ulaznim, napon kondenzatora postaje viši od ulaznog napona. Kada napon kondenzatora dosegne željenu razinu, sklopka uključuje još jedan kondenzator. Kondenzator se ne može prazniti preko sklopke, jer je dioda obrnuto polarizirana. Na taj se način može dobiti stabilan napon koji je obično dvostruko veći od U_{in} ili više. Dok je

$$U_{out} = \frac{U_{in} \cdot (t_{on} + t_{off})}{t_{off}} = \frac{U_{in}}{1 - q}$$

(2-7)

za varijaciju q u rasponu $0 < q < 1$, izlazni napon će varirati u rasponu $U_{in} < U_{out} < \infty$. Ovaj sklop je posebno koristan kada radi na niskonaponskim izvorima i može dovesti do vrlo isplativih dizajna pretvarača.

4. UREĐAJ ZA MJERENJE STRUJNO NAPONSKIH PRILIKA NA USB PORTU

U današnjem svijetu bogatom informacija, količina prijenosa istih svakim danom sve je veća. Uz USB mjerač je uređaj koji se koristi za mjerenje i praćenje različitih električnih parametara USB uređaja i veza. Obično se koristi za procjenu performansi i karakteristika USB kabela, adaptera za napajanje te povezanog uređaja. USB mjerači daju podatke u stvarnom vremenu o naponu, struji i potrošnji energije.

Osnovne značajke USB mjerača su:

- Mjerenje napona: USB mjerači mjere napon koji daje USB izvor, kao što je punjač ili nekakva eksterna baterija. Ovo je važno kako bi se osiguralo da napon ostane unutar prihvatljivog raspona te se na taj način izbjegne oštećenje povezanog uređaja.
- Mjerenje struje: USB mjerači također mjere struju koja teče kroz USB vezu. Izmjereni parametri struje korisni su za procjenu mogućnosti napajanja punjača te određivanje stvarne struje koja se isporučuje povezanom uređaju.
- Mjerenje snage: Pomoću izmjerenih vrijednosti napona i struje, USB mjerači računaju snagu koja se isporučuje uređaju. Parametri snage pomažu u procjeni učinkovitosti punjenja i isporuke energije.
- Praćenje podataka: Neki USB mjerači također mogu prikazati brzine prijenosa podataka kada su uključene podatkovne veze. To može biti od pomoći u dijagnosticiranju problema s brzinama prijenosa podataka.
- Zaštita od prekomjerne struje i prenapona: Određeni USB mjerači imaju ugrađene zaštite za sprječavanje situacija prekomjerne struje ili prenapona koje bi potencijalno mogle oštetiti testirani uređaj.
- Praćenje temperature: Neki napredni USB mjerači mogu uključivati temperaturne senzore za praćenje temperature USB veze ili uređaja koji se puni. To može pomoći u prepoznavanju problema s pregrijavanjem.
- LCD zaslon ili digitalno očitavanje: USB testeri obično imaju zaslon, bilo da se radi o LCD zaslonu ili digitalnom očitavanju, na kojem se izmjereni parametri prikazuju u stvarnom vremenu.

Prilikom odabira USB mjerača potrebno je obratiti pozornost na njegove karakteristike. Poželjni su uređaji jednostavne izvedbe. Čest je slučaj da uređaji sa otmjenim operativnim sustavom i

izgledom imaju manju točnost dobivenih rezultat prilikom mjerenja. Također je poželjan jednostavan način rada, nema potrebe za postupkom odabira načina rada ili pritiskanjem bilo kakvih tipki kako bi se došlo do parametara. Prijateljsko korisničko sučelje jedna je od karakteristika koja doprinosi kvaliteti rada sa uređajem. Bitno je obratiti pozornost na brzinu osvježavanja zaslona, idealna brzina osvježavanja bi bila u mikrosekundama. Neki USB mjerači imaju zaštitu od prekomjernog napona i struje, čime štite sebe i uređaje na kojima se vrši mjerenje. Na tržištu se nalazi velik broj uređaja, postoje profesionalni uređaji sa visokom preciznošću mjerenja, isto tako velika je količina uređaja koji nisu pouzdani. Na slici 4.1. prikazan je Klein Tools ET920, uređaj jednostavne izvedbe i visoke preciznosti.



Slika 4.1. Klein Tools ET920 [12]

Klein Tools je popularni američki proizvođač mjernih instrumenata. Ovaj uređaj spada u kategoriju USB mjerača višeg cjenovnog razreda. Vrlo je jednostavan za rukovanje i nudi mogućnost mjerenja priključaka tipa USB A i C. Ima mogućnost pohranjivanja rezultata mjerenja te ne zahtjeva nikakav vanjski izvor energije za rad. Mjerni raspon napona je od 3 do 20 V, dok mjerni raspon struje ovisi o vrsti priključka korištenog prilikom mjerenja, za USB-A mjerni raspon je od 0,005 A do 5 A, za USB-C od 0,005 A do 5 A. Najbolji je za dugotrajni nadzor portova jer ima mogućnost mjerenja i do 1000 sati. Također ima zaštitu od prekomjernog napona i struje čim štiti spojne uređaje. Točnost ovog uređaja prilikom mjerenja je veća od 99%. Zbog svojih karakteristika Klein Tools ET920 jedan je od najboljih USB mjerača koji se nalaze na tržištu. Na slici 4.2. prikazan je AT35 USB 3.0, ovaj USB mjerač je nižeg cjenovnog razreda od Klein Tools ET920, osim toga ovaj uređaj zaostaje kvalitetom i preciznošću za prethodno opisanim uređaje.

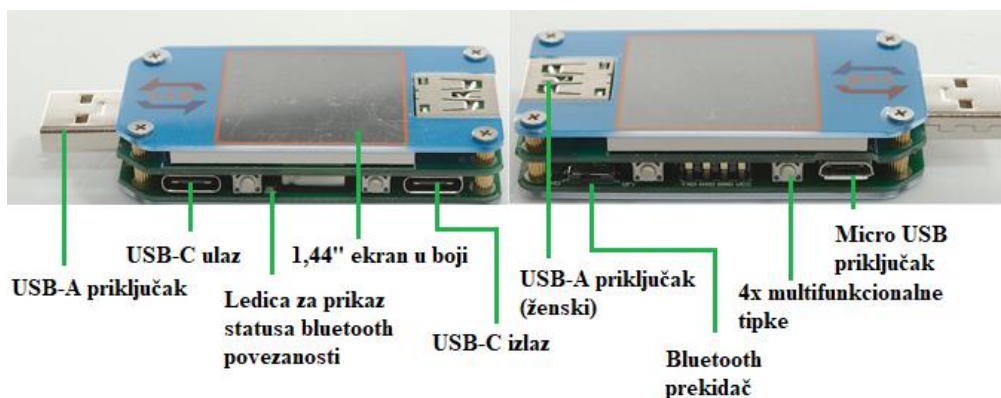


Slika 4.2. AT USB 3.0. [13]

AT USB 3.0 mjerač je uređaj koji se nalazi u kategoriji nižeg cjenovnog razreda te je vrlo jednostavan za korištenje. Nudi mogućnost mjerenja priključaka tipa USB A i C. Također ima opcije mjerenja kapaciteta baterije. Mjerni raspon napona je od 3,7 do 30 V, a mjerni raspon struje je od 0 do 4 A. Zbog svoje niske cijene i jednostavnog korištenja, AT USB 3.0. poželjan je za početnike dok kod profesionalnih mjerenja i mjerenja koja zahtijevaju visoku preciznost mjernog instrumenta ipak treba pristupiti sa kvalitetnijim instrumentom.

4.1. Primjena JT-UM25C u mjerenju strujno naponskih prilika na USB portu

USB mjerač JT-UM25C se koristi u ovom radu za mjerenje parametara tijekom punjenja pametnog telefona Samsung Galaxy s21 te bežičnih BT slušalica. Model "UM25C" jedna je od varijacija USB testera iz serije "UM" tvrtke RD Tech (poznate i kao Ruideng), tvrtke poznate po proizvodnji elektroničke opreme za testiranje i mjerenje. UM25C mjeri veličine napona i struje sa preciznošću od $\pm 0.5\%$ za napon i $\pm 1\%$ za struju. Osim toga prikazuje parametre temperature, akumulaciju kapaciteta i energije, impedanciju opterećenja te vrijeme mjerenja. UM25C ima zaslon u boji koji prikazuje mjerenja u stvarnom vremenu, što olakšava praćenje procesa punjenja ili napajanja. Neki modeli unutar UM serije, uključujući UM25C, imaju mogućnosti bilježenja podataka, čime omogućuju snimanje mjerenja tijekom vremena. To može biti korisno za praćenje potrošnje energije i fluktuacija. Još jedna od prednosti ovog mjerača je kompatibilnost sa USB Type-C konektorom. UM25C pomoću bluetootha se može povezati sa softverskom podrškom preko osobnog računala te android pametnog telefona. Softverska podrška pridonosi opsežnijoj analizi te lakšem bilježenju podataka.



Slika 4.3. USB mjerač, model JT-UM25C

4.1.1. Nazivne specifikacije JT-UM25C

Uređaj posjeduje 1,44 inčni LCD zaslon u boji pomoću kojeg prikazuje parametre tijekom mjerenja. LCD zaslon ima mogućnost postavljanja svjetline u pet razina, automatsko isključivanje zaslona se događa nakon 9 minuta pasivnog rada. Brzina osvježavanja zaslona je 2 Hz. Raspon mjerenja napona je od 0 do 24 V, sa rezolucijom mjerenja od 0,001 V. Raspon mjerenja struje je od 0 do 5 A, sa rezolucijom mjerenja od 0,0001 A. Greška uređaja prilikom mjerenja napona i struje iznosi $\pm 0,5\%$. Kod mjerenja akumulacije kapaciteta (mAh) i utrošene energije (mWh) rasponi su jednaki a njihov iznos je od 0 do 99999, dok kod mjerenja impedancije opterećenja raspon je od 0,8 do 9999,9 Ω . Mjerenje temperature moguće je u rasponu od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ uz pogrešku pri mjerenju do $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uređaj posjeduje način prepoznavanja brzog punjenja QC2.0 i QC3.0. Dimenzije uređaja su 71,2 mm x 30,5 mm x 12,4 mm uz težinu od 23,74 g.

4.1.2. Zaslon i korisničko sučelje

UM25C u postavkama ima više različitih mogućnosti prikazivanja rezultata mjerenja. Listanje zaslona kao i promjena postavki uređaja mogu se upravljati pomoću samog uređaja te pomoću softverske podrške preko pametnog telefona ili osobnog računala.



Slika 4.4. Prikaz trenutnih parametara pomoću zaslona UM25C [14]

Na početnoj stranici prikazane su trenutne vrijednosti napona i struje, količina energije predana uređaju, impedanciju i snagu opterećenja. Tu je i prikaz temperature koji pokazuje unutarnju temperaturu procesa. Za promjenu zaslona koriste se gumbi PREV ili NEXT.

Zaslon za prepoznavanje brzog punjenja prikazuje napon i struju, uz napon na podatkovnim linijama i način brzog punjenja (podatkovne linije se često koriste za odabir načina brzog punjenja). S QC punjačem na 12 V obje podatkovne linije bit će na oko 0,6 V.

Na zaslonu za snimanje procesa punjenja prikazani su kapacitet (mAh) i predana energija (mWh) te vrijeme punjenja. Prikazana je i vrijednost na kojoj počinje snimati, u ovom slučaju to je 0.1 A, ta vrijednost se može podešavati.

Zaslon pod nazivom "Impedancija kabela" služi za mjerenja otpora kabela i spojeva. Zahtjeva konstantno strujno opterećenje spojeno na izlaz, zatim snimanje napona i struje bez kabela, a potom sa kabelom. Pomoću ovih mjerenja izračunava se i prikazuje otpor. U slučaju da je ispitana struja previsoka, zaslon će se isključiti, što i nije najbolji način za prijavu pogreške.

Kod grafičkog prikaza mjerenja imamo prikaz vrijednosti napona i struja u stvarnom vremenu.

Zadnji zaslon služi za prikaz i podešavanje postavki uređaja.

4.2. Programska podrška za mjerni uređaj JT-UM25C

Od programske podrške UM25C posjeduje aplikacije za osobno računalo te android pametne telefone. Povezivanje aplikacija sa uređajem izvršava se pomoću bluetooth sučelja. Sučelje u osnovi pokazuje podatke sa svih zaslona uređaja (osim testa kabela) istovremeno.

4.2.1. Programska podrška za mobilni telefon

Pomoću mobilne aplikacije moguće je upravljati samim uređajem pomoću komandi koje su prikazane na slici 4.5. Grafički prikaz vrijednosti može se povećavati i smanjivati te pomicati u stranu, što znatno pridonosi boljem pregledu i uvidu u proces mjerenja.



Slika 4.5. Prikaz UM25C softvera za android pametne telefone

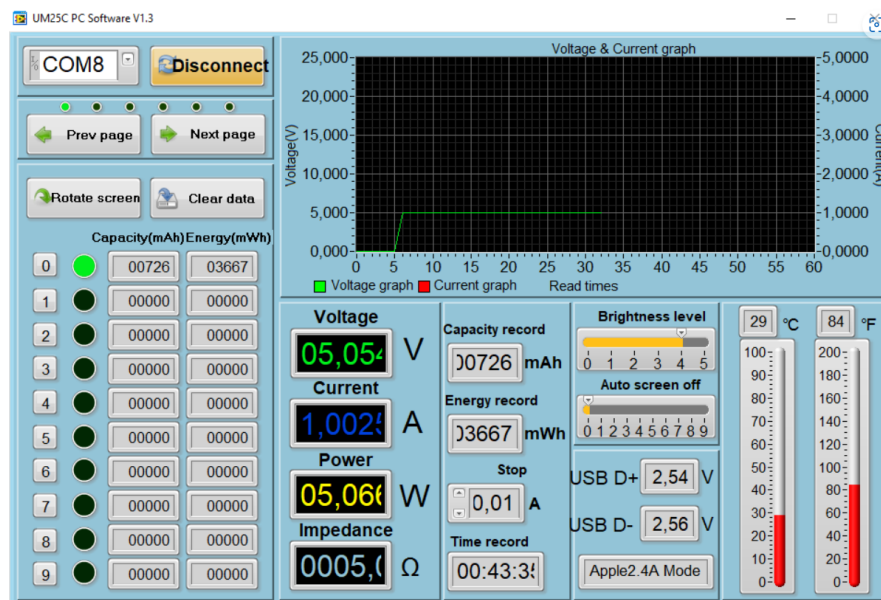
Sve podatke koji su zabilježeni tijekom mjerenja moguće je preko aplikacije spremiti u memoriju telefona. Podaci se spremaju u Excel formatu kao što je prikazano na slici 4.6.

	A	B	C	D	E	F
1	Voltage-Current					
2	Time	Voltage (V)	Current (A)	D+ (V)	D- (V)	Date
3	11:58:10	5,065	0	0,01	0	2023-07-06
4	11:58:11	5,064	0	0,01	0	2023-07-06
5	11:58:12	5,065	0	0,01	0	2023-07-06
6	11:58:13	5,064	0	0,01	0	2023-07-06
7	11:58:14	5,064	0	0,01	0	2023-07-06
8	11:58:15	5,064	0	0,01	0	2023-07-06
9	11:58:16	5,064	0	0	0	2023-07-06
10	11:58:17	5,064	0	0	0	2023-07-06
11	11:58:18	5,067	0	0	0	2023-07-06
12	11:58:19	5,065	0	0	0	2023-07-06
13	11:58:20	5,064	0	0	0	2023-07-06

Slika 4.6. Prikaz podataka mjerenja u Excel formatu

4.2.2. Programska podrška za osobno računalo

Softverska podrška za osobno računalo radi na istom principu povezivanja kao kod mobilne aplikacije. Na zaslonu su prikazana sve vrijednosti mjerenja istovremeno, uz nešto veći i pregledniji grafički prikaz vrijednosti. Pomoću ovog softvera također je moguće upravljati zaslonom samog uređaja te ispisivati vrijednosti mjerenja u Excel formatu.

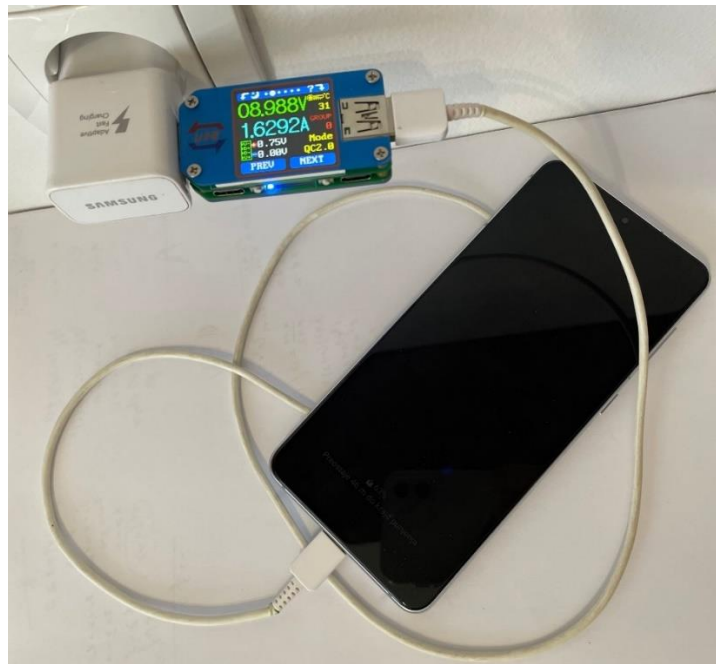


Slika 4.7. Prikaz UM25C softvera za osobno računalo

5. PROVEDBA MJERENJA MJERNIM UREĐAJEM JT-UM25C

U današnjem svijetu bogatom informacija, količina prijenosa istih svakim danom sve je veća. Uz Za mjerenje električnih parametara tijekom USB napajanja korišten je USB mjerač JT-UM25C čiji je način rada opisan u prethodnom poglavlju. Mjerenja su izvršena na tri različita uređaja, BT slušalici Jabra Talk 25, te pametnim telefonima Samsung Galaxy S21 i iPhone 5S.

Na slici 5.1. prikazan je mjerni uređaj koji je spojen na adapter (ispravljač) Samsung EP-TA200 te uređaj Samsung Galaxy S21.



Slika 5.1. Izvršavanje mjerenja na pametnom telefonu Samsung Galaxy S21

Prije početka mjerenja svakog uređaja, potrebno je isprazniti bateriju uređaja kako bi mjerenje bilo potpuno. Mjerenje se završava u trenutku kada je napunjenost baterije na maksimalnoj vrijednosti (100%). Ovakav način mjerenja korišten je radi određivanja trenutnog kapaciteta baterije uređaja (zdravlja baterije).

Uz pomoć aplikacije, instrument tijekom mjerenja svake sekunde logira podatke o vrijednostima napona i struje u Excel tablicu. Grafovi koji će biti korišteni u nastavku analize rezultata izrađeni su iz Excel tablica nastalih tijekom mjerenja.

5.1. Uređaji na kojima su izvršena mjerenja

Mjerenja su izvršena na tri različita uređaja, BT slušalici Jabra Talk 25, te pametnim telefonima

Samsung Galaxy S21 i iPhone 5S. Na slici 5.2. prikazani su svi uređaji na kojima su izvršena mjerenja.



Slika 5.2. Prikaz uređaja na kojima su izvršena mjerenja

Jabra Talk 25 je bluetooth slušalica sa litij-ionskom baterijom. Ovaj uređaj osim zvučnika posjeduje i mikrofoni koji je optimiziran za korištenje u mobilnim i drugim pozivima. Kapacitet baterije od 120 mAh daje mogućnost razgovora u trajanju od 8 sati sa jednim punjenjem. Sa značajkom Power Nap, Talk 25 produljuje trajanje baterije tako što se sama isključuje nakon jednog sata ne povezanosti sa drugim uređajem [15]. Ova značajka pridonosi očuvanju baterije uređaja.

Samsung Galaxy S21 je pametni telefon sa litij-ionskom baterijom kapaciteta 4000 mAh [16]. Galaxy S21 osim opcija brzog i super brzog punjenja, također ima mogućnost bežičnog punjenja. Kod super brzog punjenja uz napon od 9,3 V i struju 2,6 A postiže snagu do 25 W. Kod bežičnog punjenja maksimalna snaga napajanja iznosi 15 W.

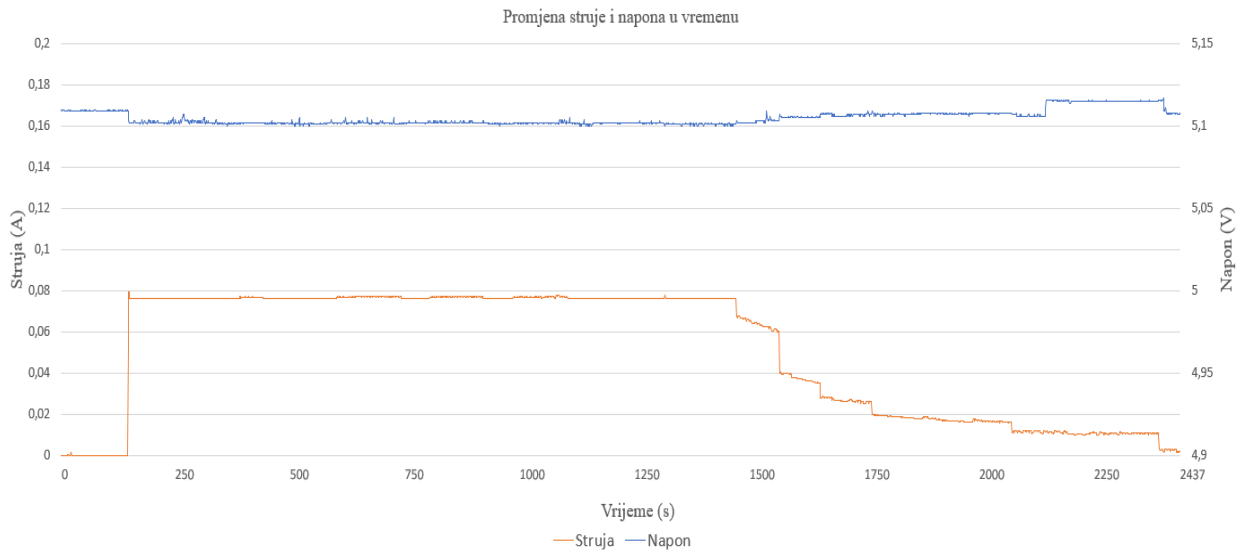
iPhone 5S je pametni telefon sa litij-polimerskom baterijom kapaciteta 1500 mAh [17]. Ovaj uređaj je pušten u prodaju 2013. godine te za razliku od novijih pametnih telefona nema opciju brzog punjenja. Punjenje se odvija na naponu od 5 V uz struju od 1 A, čime se postiže snaga napajanja od 5 W. Litij-polimerska baterija i način punjenja produljuju životni vijek ovog uređaja.

5.2. Analiza rezultata mjerenja

5.2.1. Bluetooth slušalica Jabra Talk 25

Za Jabra Talk 25 bluetooth slušalice izvedeno je mjerenje tijekom cjelokupnog punjenja. Jabra Talk 25 posjeduje litij-ionsku bateriju kapaciteta 120mAh. Na slici 5.3. se nalazi grafički prikaz

vrijednosti tijekom cjelokupnog punjenja slušalice.



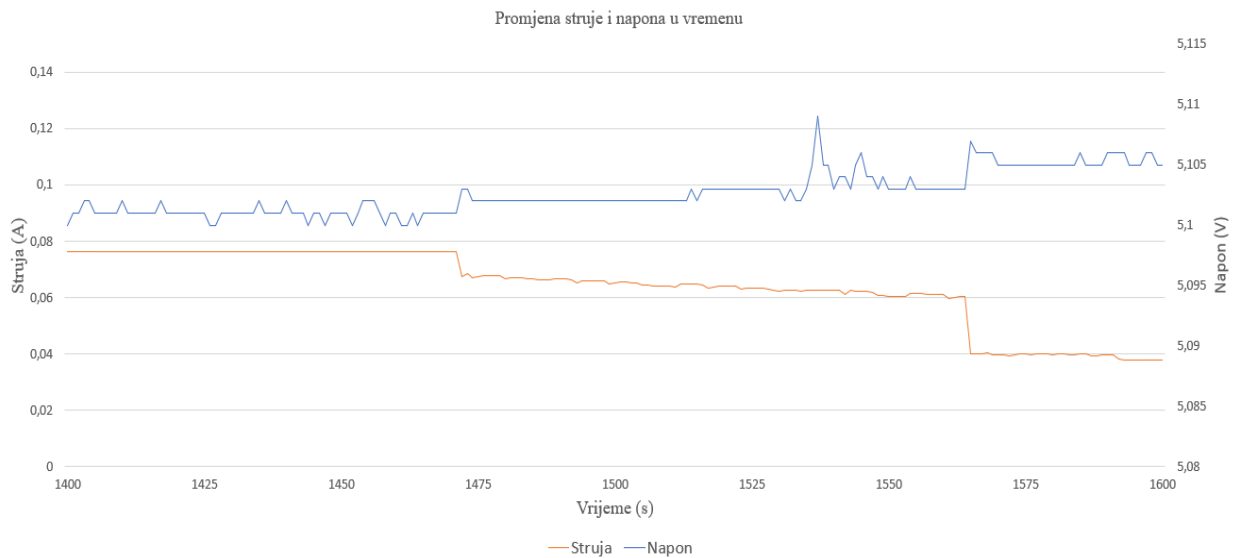
Slika 5.3. Grafički prikaz struje i napona cjelokupnog punjenja Jabra Talk 25

Iz slike 5.3. može se iščitati kako proces punjenja ovog uređaja ima dvije faze. U prvoj fazi punjenja imamo konstantnu vrijednost napona iznosa 5,1 V i struje iznosa 0,76 A. Prosječna snaga punjenja u prvoj fazi iznosi 3,8 W. Završetak prve faze punjenja kod litij-ionskih baterija nastupa kada stanje napunjenosti baterije dosegne razinu od 80%. Nakon toga slijedi druga faza punjenja gdje dolazi do konstantnog pada struje čime se smanjuje snaga punjenja. U ovom slučaju druga faza prema grafu počinje u 1472. sekundi. Na slici 5.4. nalazi se grafički prikaz vrijednosti tijekom početka punjenja.



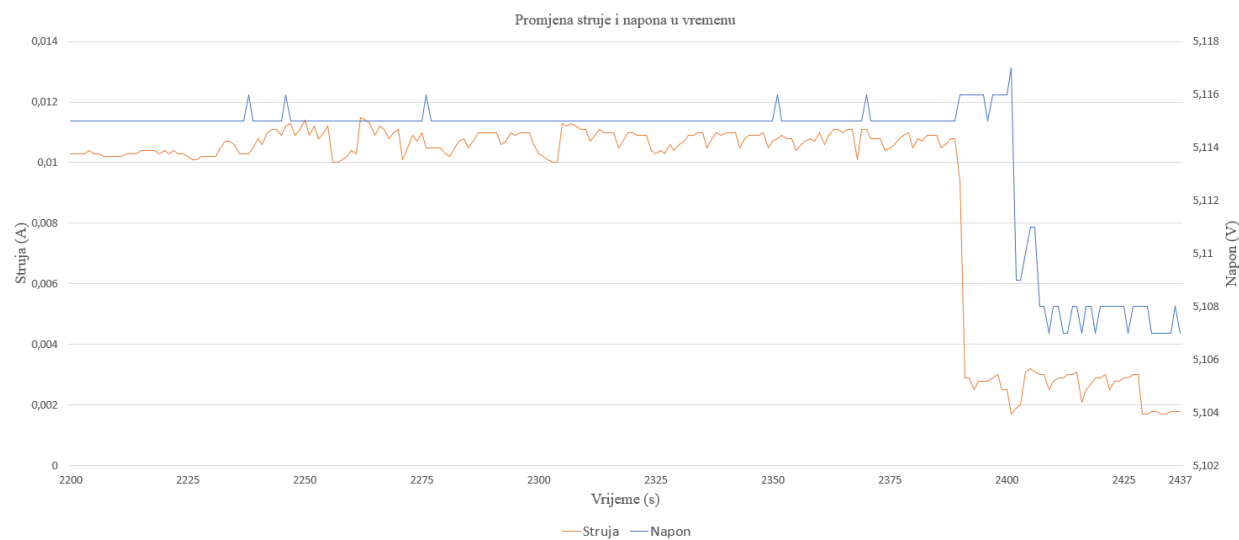
Slika 5.4. Grafički prikaz struje i napona tijekom početka punjenja Jabra Talk 25

Na slici 5.4. grafički je prikazan trenutak spajanja (148 s) uređaja na punjač. Struja postiže željenu vrijednost punjenja nakon 3 sekunde te zatim postaje konstantna, njezina vrijednost iznosi 0,76 A. Napon također drži konstantu vrijednost od 5,10 V, uz minimalne oscilacije koje su zanemarive. Na slici 5.5. nalazi se grafički prikaz vrijednosti na početku druge faze punjenja.



Slika 5.5. Grafički prikaz struje i napona početka druge faze punjenja Jabra Talk 25

Druga faza punjenja započinje u trenutku prvog značajnijeg pada vrijednosti struje. U ovom slučaju taj trenutak se događa u 1472. sekundi kao što je i vidljivo na grafu, vrijednost struje u kratkom roku se smanjuje sa 0,76 A na 0,66 A. U nastavku grafa je vidljivo da struja nastavlja gubiti vrijednost te će se takav trend nastaviti do završetka punjenja. Kod vrijednosti napona i dalje nisu vidljive nikakve značajne promjene. Na slici 5.6. nalazi se grafički prikaz vrijednosti tijekom završetka punjenja.



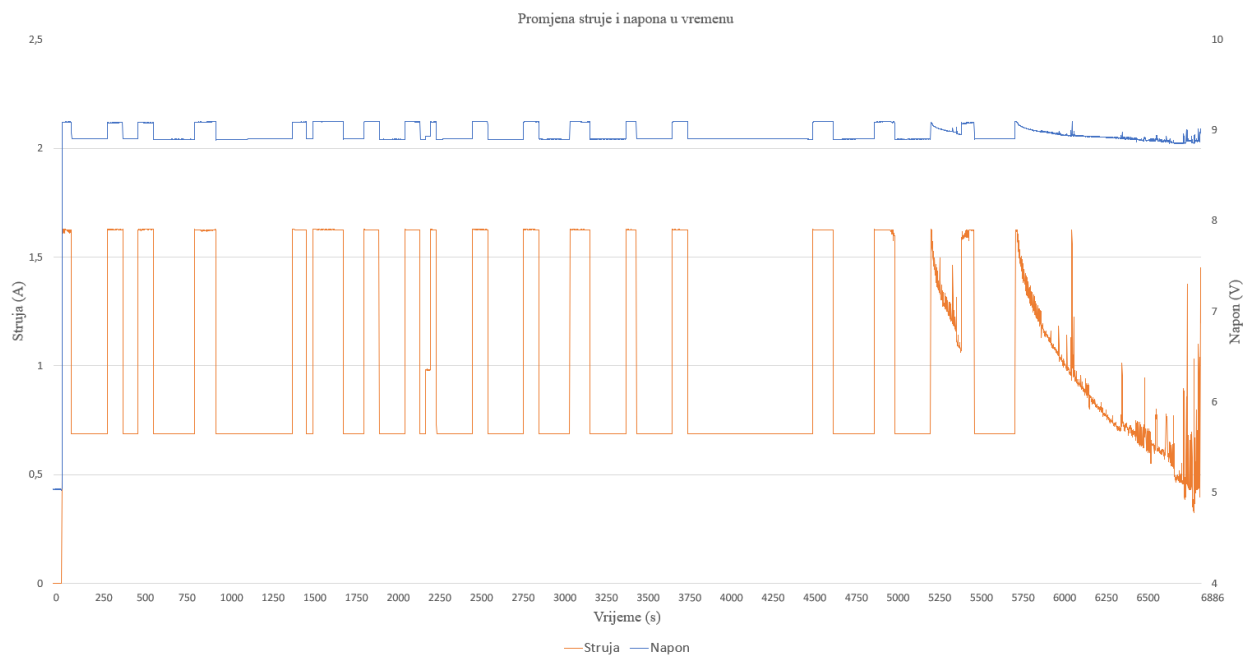
Slika 5.6. Grafički prikaz struje i napona tijekom završetka punjenja Jabra Talk 25

Iz slike iznad prepoznaje se nastavak trenda smanjenja vrijednosti struje punjenja. Vrijednost struje pri samom završetku punjenja iznosi 0,0018 A. Promjene u vrijednosti napona i dalje su minimalne i zanemarive.

Kod analize rezultata Jabra Tlak 25 proces punjenja može se podijeliti u dvije faze. U prvoj fazi punjenja vrijednosti struje i napona su statične, što znači da je snaga punjenja stalna a njen iznos je 3,8 W. U slučaju statičnog punjenja manjim snagama ne dolazi do zagrijavanja baterije kao u dinamičkom punjenju. Kod druge faze dolazi do konstantnog smanjenja snage punjenja što štiti bateriju od prenapunjenosti. Ovakav način punjenja u kojem ne dolazi do pretjeranog zagrijavanja baterije, te postoji zaštita od prenapunjenosti, pogodan je za zdravlje i dugovječnost baterije. Kapacitet baterije izmjeren tijekom punjenja iznosi 102 mAh. Prema izmjerenom kapacitetu, zdravlje baterije ovog uređaja je 85%.

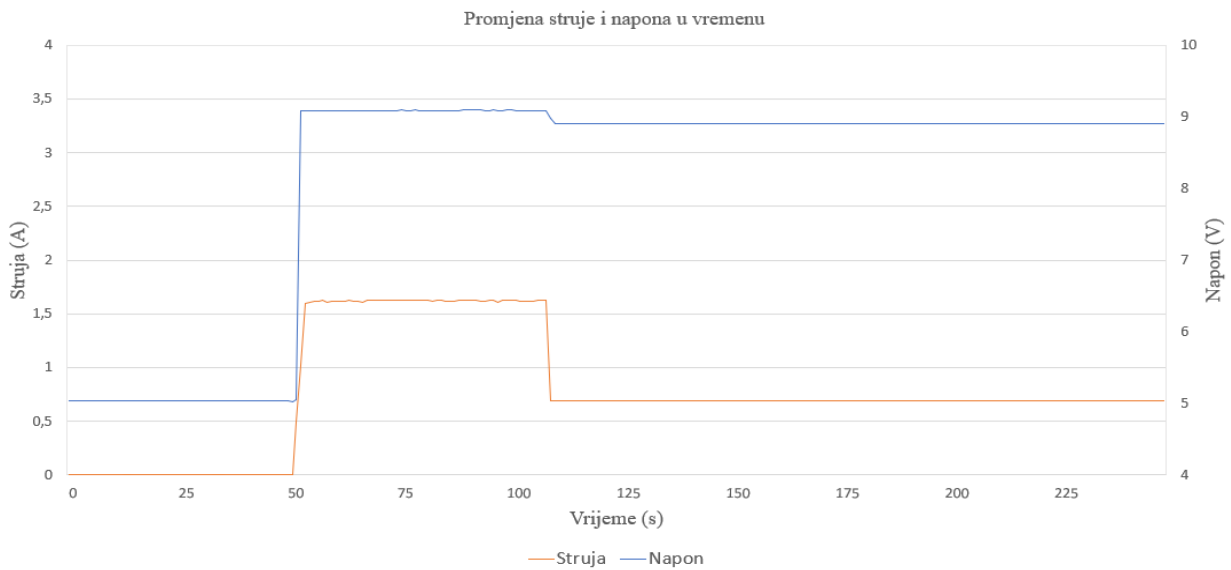
5.2.2. Pametni telefon Samsung Galaxy S21

Za uređaj Galaxy S21 izvedena su dva mjerenja. Prvo mjerenje je izvršeno tijekom procesa brzog punjenja uređaja, dok je za drugo mjerenje korištena manja snaga punjenja. Tijekom cijelog procesa brzog punjenja mjerni instrument i mobilna aplikacija su povezani i aktivni. Kod mjerenja punjenja manjom snagom, većim dijelom punjenja mobilna aplikacija nije aktivna. Uređaj posjeduje Litij-ionsku bateriju kapaciteta 4000 mAh. Na slici 5.7. nalazi se grafički prikaz promjene struje i napona tijekom cjelokupnog brzog punjenja uređaja.



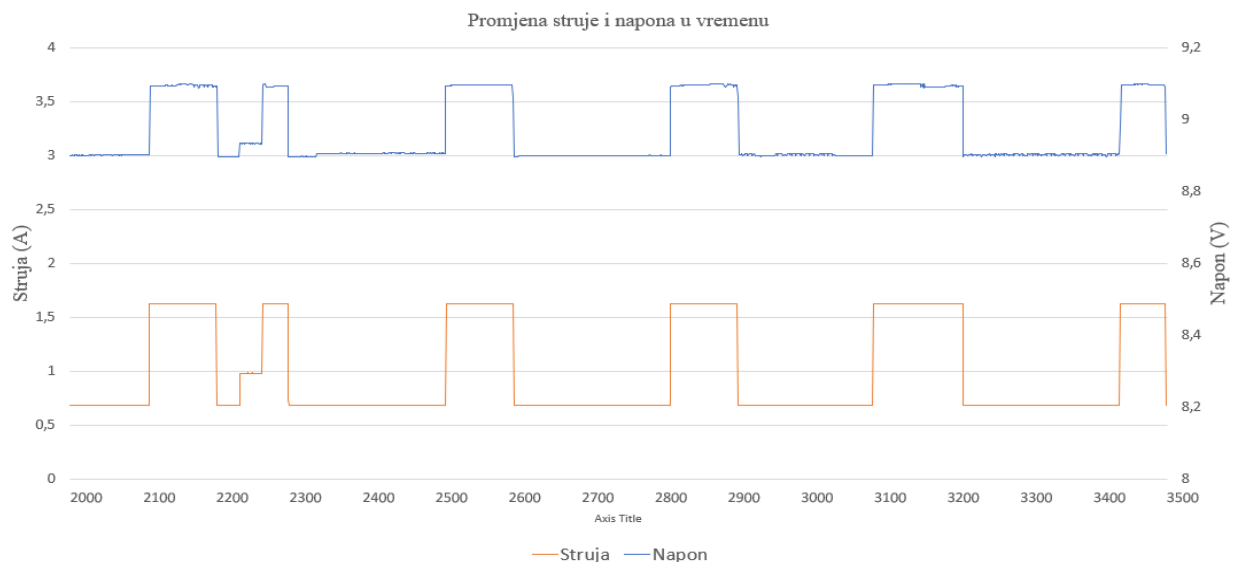
Slika 5.7. Grafički prikaz struje i napona cjelokupnog brzog punjenja Galaxy S21

Na slici 5.7. može se vidjeti kako tijekom brzog punjenja imamo dvije faze punjenja. Prva faza punjenja završava kada počinje konstantan pad vrijednosti struje (5269 s). U prvoj fazi punjenja oblici napona i struje su pravokutni sa različitim periodama. Minimalna vrijednost struje je 0,688 A, dok maksimalna iznosi 1,629 A. Kako se mijenja vrijednost struje, tako se mijenjaju i vrijednosti napona ali u znatno manjim razmjerima. Vrijednosti napona variraju između 8,89 V i 9,097 V. Kod druge faze punjenja vidimo konstantan pad vrijednosti struje i napona. Kod napona su promjene vrijednosti minimalne kao i u slučaju prve faze punjenja, dok kod struje imamo značajan pad vrijednosti do 0,32 A. Na slici 5.8. nalazi se grafički prikaz promjene struje i napona tijekom početka brzog punjenja.



Slika 5.8. Grafički prikaz struje i napona tijekom početka brzog punjenja Galaxy S21

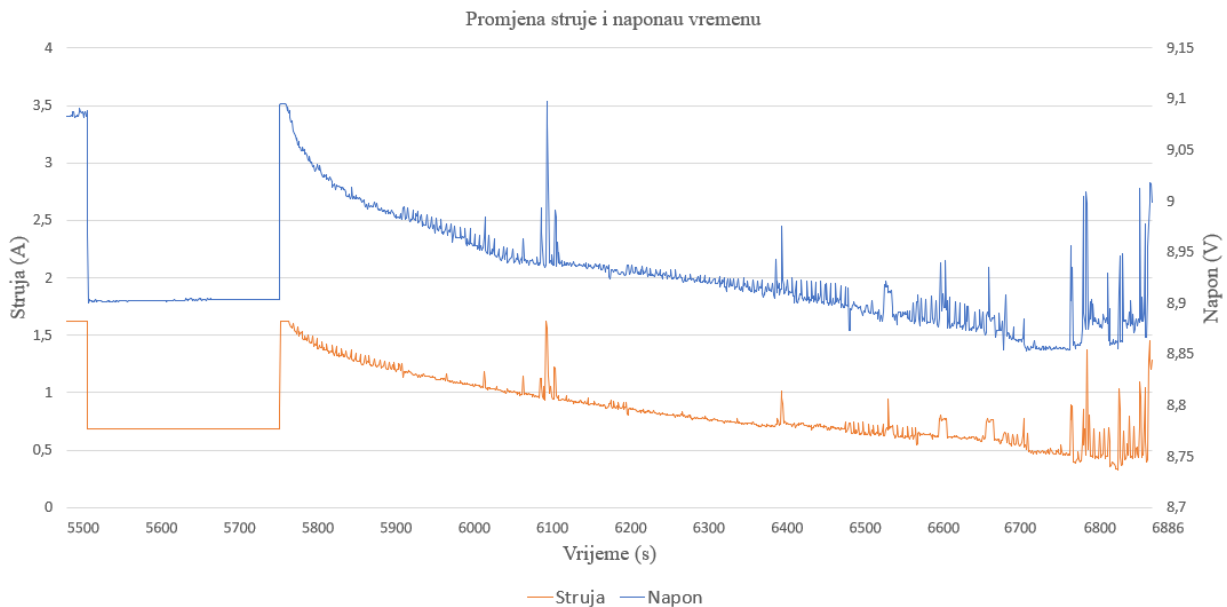
Na slici iznad prikazan je trenutak spajanja (51 s) uređaja na punjenja. U trenutku spajanja vrijednost napona skače na 9,08 V, dok struja postiže vrijednost od 1,62 A. Prva značajna promjena vrijednosti se događa nakon 58 sekundi punjenja, kada vrijednost struje pada na 0,68 A uz značajno manju promjenu vrijednosti napona. Na slici 5.9. nalazi se grafički prikaz struje i napona tijekom prve faze brzog punjenja.



Slika 5.9. Grafički prikaz struje i napona tijekom prve faze brzog punjenja Galaxy S21

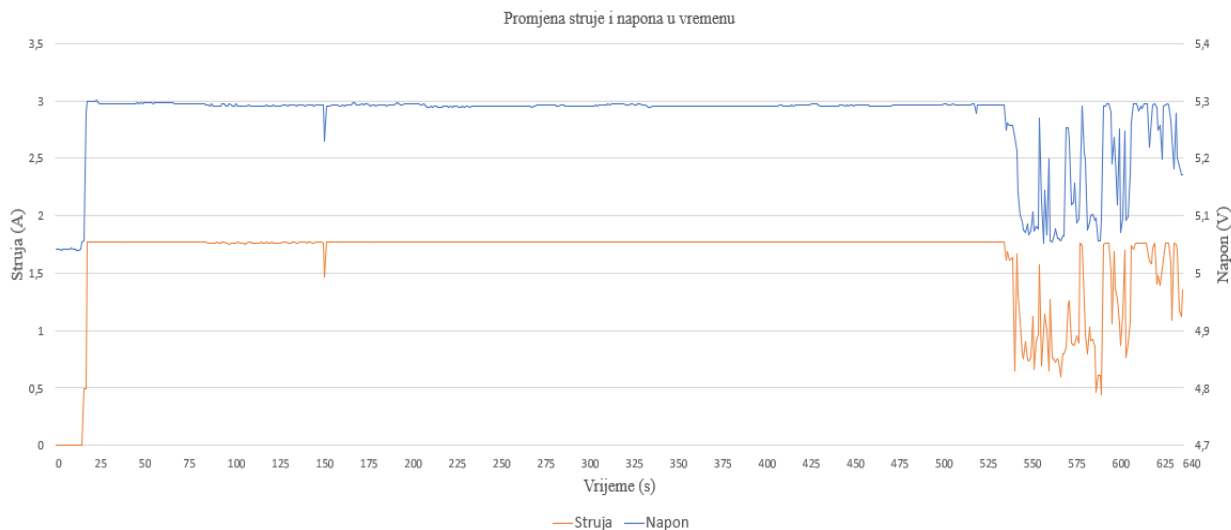
Na slici 5.9. prikazani su oblici napona i struje koje se pojavljuju tijekom cijele prve faze punjenja. U trenutcima kada je vrijednost struje približno 1,7 A, snaga punjenja je 15 W što znači da nastupa

brzo punjenje. Kod brzog punjenja zbog povećane snage punjenja baterija se počinje zagrijavati. Kada je temperatura baterije povišena, ispravljač smanjuje vrijednost struje te nastupa sporo punjenje (proces hlađenja baterije). Ovakav proces punjenja se odvija sve dok na nastupi druga faza. Na slici 5.10. nalazi se grafički prikaz struje i napona tijekom završetka brzog punjenja (druga faza).



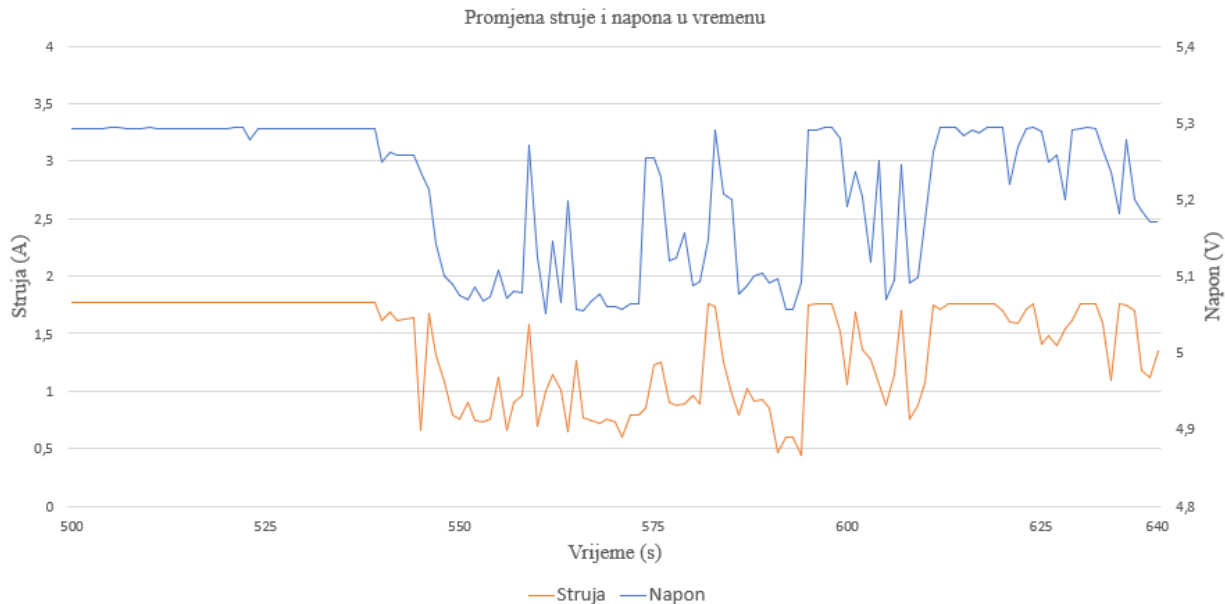
Slika 5.10. Grafički prikaz struje i napona tijekom završetka brzog punjenja Galaxy S21

Na slici 5.10. prikazane su promjene struje i napona tijekom druge (završne) faze brzog punjenja. Tijekom završne faze punjenja vrijednosti struje i napona su u konstantnom padu što znači da se smanjuje snaga punjenja. Minimalna izmjerena snaga tijekom završne faze punjenja iznosi 2.901 W. Ovakve promjene nastupaju kada je stanje napunjenosti baterije iznad 80%. Smanjivanje snage nastupa kako ne bi došlo do prekomjernog punjenja te nepotrebnog zagrijavanja koje negativno utječe na kapacitet baterije. Osim toga prekomjerno punjenje prouzrokuje nepotrebnu potrošnju električne energije. Na grafu su također vidljivi kratkotrajni skokovi struje i napona koji ne prelaze maksimalne vrijednosti izmjerene tijekom cjelokupnog punjenja. Na slici 5.11. prikazane su promjene struje i napona tijekom cjelokupnog punjenja manjom snagom.



Slika 5.11. Grafički prikaz struje i napona cjelokupnog punjenja Galaxy S21

Na slici 5.11. može se vidjeti kako tijekom sporog punjenja vrijednosti struje i napona su konstantne sve do završne faze punjenja. Tijekom prve faze punjenja vrijednost napona je 5,29 V dok vrijednost struje iznosi 1,76 A, snaga punjenja je 9,3 W. Na slici 5.12. prikazane su promjene vrijednosti struje i napona tijekom završne faze punjenja.



Slika 5.12. Grafički prikaz struje i napona tijekom završetka punjenja Galaxy S21

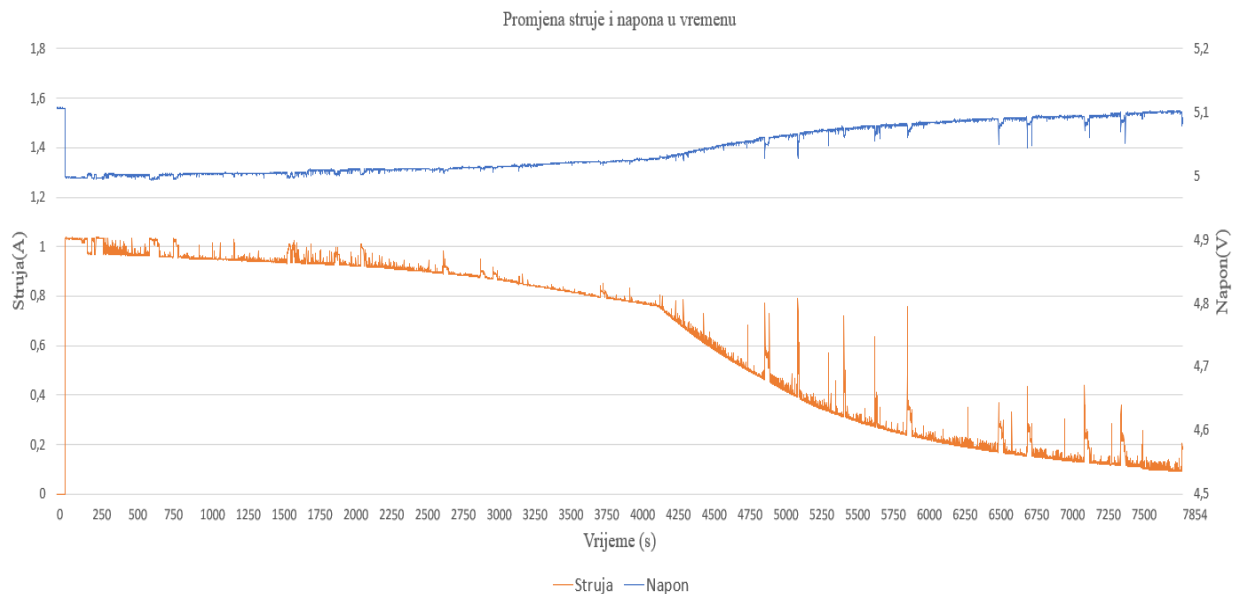
Na slici završne faze punjenja imamo značajne oscilacije vrijednosti parametara struje i napona. Za razliku od brzog punjenja, u ovom slučaju druga faza traje značajno manje uz puno veće oscilacije.

Iz analize rezultata Samsung Galaxy S21 se vidi kako je "spori" način punjenja pogodniji za dugovječnost baterije uređaja. Razlog tome je što brzi način punjenja koristi snagu veličine 15 W, te tako dolazi do zagrijavanja baterije koje nije pogodno za njezino zdravlje. Za sporo punjenje koristi se konstantna snaga veličine 9 W te nema dodatnog zagrijavanja kao u slučaju brzog punjenja. U oba slučaja punjenja primjećuje se kako baterija posjeduje termički prekidač koji ju štiti od prenapunjenosti, osim toga funkcija termičkog prekidača je također zaštita baterijskih ćelija od pregrijavanja. Kod sporog punjenja dobrim dijelom mobilna aplikacija nije bila aktivna (stand-by mode), čime je utvrđeno da mjerni instrument nema vlastitu memoriju te logira podatke uz pomoć aplikacija.

Izmjerena vrijednosti kapaciteta baterije kod sporog punjenja iznosi 3200 mAh, dok u slučaju brzog punjenja izmjereni kapacitet iznosi 2000 mAh. Kapacitet baterije novog uređaja je 4000 mAh, što pokazuje da uređaj u dinamičkom načinu rada (brzo punjenje) ima znatna odstupanja u mjerenju kapaciteta. Prema kapacitetu baterije izmjenenom tijekom sporog punjenja, trenutno zdravlje baterije ovog uređaja je 80%. Kod mjerenja utrošene energije za slučaj brzog punjenja izmjereno je 18355 mWh, dok u slučaju sporog punjenja taj iznos je 16837 mWh. Izmjereni podaci utrošene energije ukazuju na gubitke tijekom brzog punjenja uređaja.

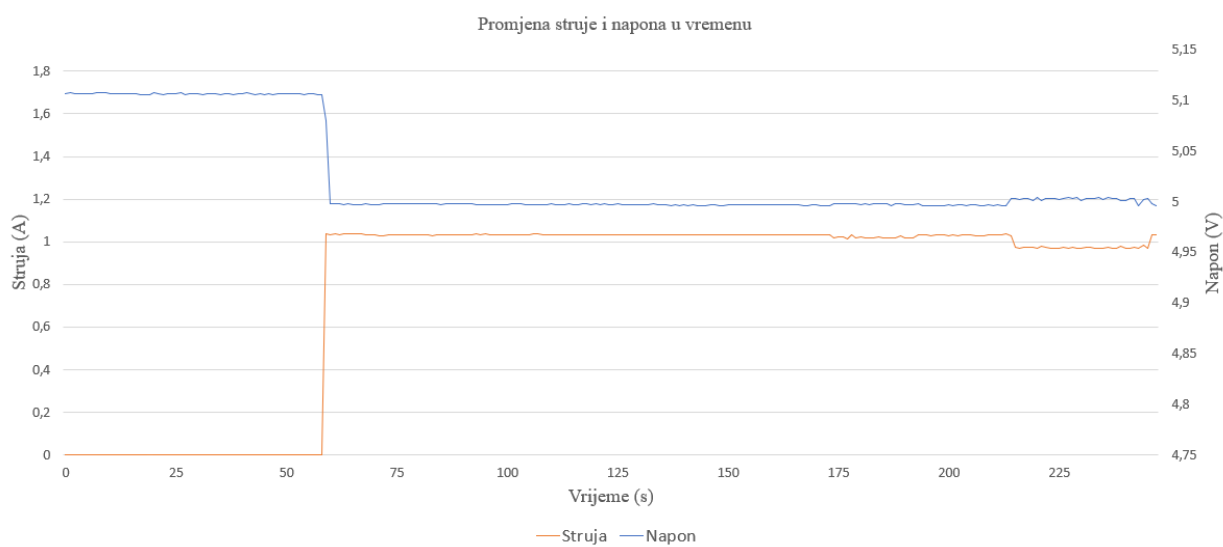
5.2.3. Pametni telefon iPhone 5S

Za iPhone 5S izvedeno je mjerenja parametara tijekom cjelokupnog punjenja uređaja. iPhone 5S je uređaj koji je 2013. godine pušten u prodaju, posjeduje litij-polimersku bateriju kapaciteta 1560 mAh, te nema mogućnost brzog punjenja. Prosječna snaga punjenja ovog uređaja iznosi 5 W. Na slici 5.13. nalazi se grafički prikaz struje i napona tijekom cjelokupnog punjenja uređaja.



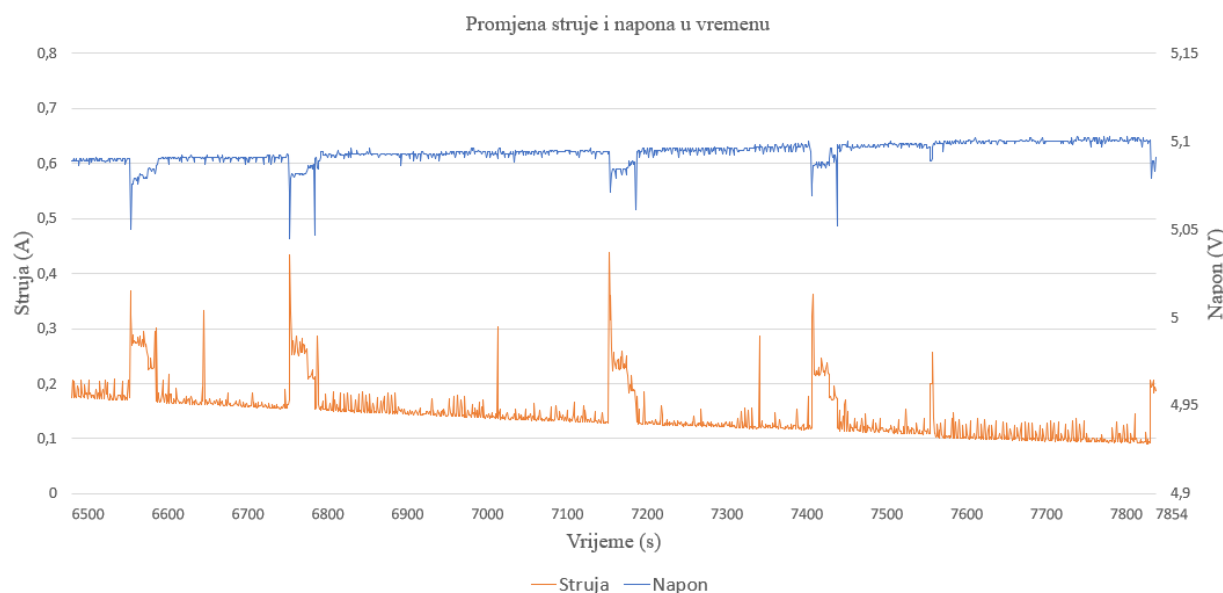
Slika 5.13. Grafički prikaz struje i napona cjelokupnog punjenja iPhone 5S

Na slici 5.13. može se vidjeti kako za razliku od punjenja litij-ionskih baterija, u ovom slučaju imamo konstantno smanjenje vrijednosti struje tijekom cijelog punjenja. Smanjivanjem vrijednosti struje, vrijednost napona raste ali u značajno manjem omjeru. Tijekom cijelog punjenja vidljiv je konstantan rast vrijednosti napona. Vrijednost napona tijekom cijelog punjenja je porasla samo za 2%, čime možemo reći da imamo konstantan napon tijekom punjenja. Na slici 5.14. prikazane su promjene vrijednosti struje i napona tijekom početka punjenja uređaja.



Slika 5.14. Grafički prikaz struje i napona tijekom početka punjenja iPhone 5S

Na slici iznad prikazan je trenutak spajanja (62 s) uređaja na napajanje. U trenutku spajanja vrijednost napona iznosi 4,98 V, dok je vrijednost struje 1,0352 A. Najveća snaga punjenja postignuta je u početnom dijelu punjenja a njen iznos je 5,18 W. Prva značajnija promjena događa se u 218. sekundi kada vrijednost struje pada na razinu 0,97 A. Na slici 5.15. prikazane su promjene vrijednosti struje i napona tijekom završnog dijela punjenja.



Slika 5.15. Grafički prikaz struje i napona tijekom završetka punjenja iPhone 5S

Tijekom završne faze punjenja vidljiv je nastavak trenda konstantnog smanjenja vrijednosti struje uz kratkotrajne skokove koje su najčešće prouzrokovani nedostacima ispravljača. U ovoj fazi

koriste se najmanje snage punjenja. U zadnjih nekoliko sekundi punjenja vrijednost snage opala je do 0,46 W.

Iz analize rezultata punjenja iPhone 5S može se vidjeti kako je maksimalna snaga punjenja veličine 5 W, što znači da baterija ovog uređaja nema mogućnost brzog punjenja. Za razliku od litij-ionskih baterija kojima konstantan pad snage punjenja započinje nakon 80% napunjenosti baterije, kod litij-polimernih baterija taj proces se odvija tijekom cijelog punjenja. S obzirom na konstantan pad snage punjenja, nameće se zaključak kako baterija ovog uređaja ima termički prekidač koji štiti bateriju od pregrijavanja i prenapunjenosti.

Izmjerena vrijednost kapaciteta baterije kod punjenja iznosi 1364 mAh, dok kapacitet baterije novog uređaja iznosi 1560 mAh. Prema izmjerenom kapacitetu baterije, trenutno zdravlje baterije ovog uređaja je 87%. Uzimajući u obzir starost samog uređaja, dolazi se do zaključka kako je litij-polimerna baterija imaju dugačak vijek trajanja. Utrošena energija izmjerena tijekom ovog punjenja je 6845 mWh.

6. ZAKLJUČAK

U današnjem svijetu bogatom informacija, količina prijenosa istih svakim danom sve je veća. Uz Zadatak rada je napraviti povijesni pregled razvoja USB standarda i protokola sa aspekta napajanja. Potrebno je proučiti uređaje koji se koriste za mjerenje strujno naponskih prilika na USB portu. Opisati princip rada mjernog uređaja JT-UM25C, te pomoću istog izvršiti mjerenja tijekom napajanja BT slušalice i pametnih telefona. Analizom dobivenih rezultat mjerenja utvrditi prednosti i nedostatke mjernog uređaja, odrediti kapacitet baterija uređaja na kojima je provedeno mjerenje te njihovo trenutno stanje.

U ovom radu dat je sveobuhvatan pregled USB standarda i specifikacija te se može utvrditi kako je trenutni razvoj usmjeren ka povećanju isporuke energije putem USB napajanja. Dolaskom USB PD standarda postignut je veliki skok u razini snage napajanja jer omogućuje rad na naponskoj razini od 20 V. Primjerice trenutno se na tržištu nalaze USB-Type C PD punjači za pametne telefone snage do 120 W. Veća snaga napajanja postiže se značajnim povećanjem razine napona, te u puno manjoj mjeri povećanjem struje. Do većih promjena struje napajanja ne dolazi zbog presjeka kabela koji se koristi prilikom USB napajanja. Veća struja zahtjeva kabel većeg presjeka što bi dovelo do povećanja troškova proizvodnje. USB Type-C PD trenutno je najzastupljeniji punjač te je broj njegovih korisnika u porastu, zahvaljujući činjenici da PD standard podržava više naponskih razina, USB Type-C PD na dobrom je putu da postane univerzalni punjač.

Po završetku teorijskog istraživanja provedena su mjerenja USB napajanja pomoću USB mjerača pod nazivom JT-UM25C. Kod mjerenja struje i napona pogreška uređaja je minimalna te ne odstupa od pogreške navedene u nazivnim specifikacijama uređaja. Prilikom mjerenja brzog napajanja Galaxy S21, u dinamičkom načinu rada zapažena su znatna odstupanja u mjerenju kapaciteta baterije. Za vrijeme mjerenja u trenucima kada uređaj nije bio povezan sa programskom podrškom, uređaj nije spremao podatke što znači da nema vlastitu memoriju.

Analiza rezultata mjerenja ukazuje na to da je u svim mjerenjima raspon napona održavan između +5% do -5% kako nalaže i USB PD standard. Najveće snage napajanja i promjene vrijednosti struje zabilježene su prilikom brzog punjenja Galaxy S21. Isto tako najmanji postotak zdravlja baterije ima uređaj koji koristi brzo napajanje što ukazuje na negativan utjecaj brzog napajanja na zdravlje baterije uređaja. Također iz rezultata trenutnih kapaciteta baterija može se zaključiti kako litij polimerske baterije imaju duži životni vijek od litij-ionskih baterija. Iako litij-ionske baterije gube kapacitet sa svakim dovršetkom ciklusa punjenja, trenutno su najzastupljenije u svim

elektroničkim uređajima.

LITERATURA

- [1] S. Kumar and S. Amit, Utilization of E-waste in Concrete and its Environmental Impact - A Review, Int. Conf. Smart City Emerg. Technol., pp. 14, 2018.
- [2] S. Needhidasan and S. G. Agarwal, Materials Today : Proceedings A review on properties evaluation of bituminous addition with E-waste plastic powder, Mater. Today Proc., vol. 22, pp. 12181222, 2020.
- [3] D. Gu, J. Xi and L. He, "A Digital PWM Controller of MHz Active Clamp Flyback with GaN Devices for AC-DC Adapter," IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 1496-1501.
- [4] Y.-J. Chen, M.-S. Chen, and J.-S. Lin, "Cultivating power converter talents on campus through the design methodology of flyback converter, 2012
- [5] Andrew Rogers, Introduction to USB Type-C, 2015. [Internet] Dostupno na: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00001953a.pdf> [Pokušaj pristupa 19.09.2023.]
- [6] Ishtiyaque Ahmad, B. G. Fernandes, Concept of Universal USB Charger, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Detroit, MI, USA, 2020
- [7] CUI Inc a bel group, Efficiency standards for external power supplies, 2023. [Internet]. Dostupno na: <https://www.cui.com/efficiency-standards> [Pokušaj pristupa 17.09.2023]
- [8] Ivan Flegar, Sklopovi energetske elektronike, Sveučilište Josip Juraj Strossmayer, Osijek, 1995
- [9] Ivan Flegar, Elektronički energetske pretvarači, Sveučilište Josip Juraj Strossmayer, Osijek, 2010
- [10] Valery Vodovozov, Raik Jansikene, Power Electronic Converters, Tallinn University of Technology Department of Electrical Drives and Power Electronics, 2006
- [11] Marko Vukšić, Elektronički pretvarači, Sveučilište u Splitu Sveučilišni odjel za stručne studije, 2019
- [12] Klein Tools Europe, Klein Tools USB Digital Meter, 2021. [Internet] Dostupno na: <https://>

www.yamanelectronics.com/best-usb-testers/https://www.kleintools.eu/catalog/usb-digital-meters/usb-digital-meter-usb-and-usb-c [Pokušaj pristupa 13.09.2023]

[13] Yaman Electronics, Tools and Learning, 2023, [Internet] Dostupno na:
<https://www.yamanelectronics.com/best-usb-testers/> [Pokušaj pristupa 16.09.2023.]

[14] Joy-it, JT-UM25 Manual, 2020 [Internet]. Dostupno na: [https:// joy-it.net/en/products/JT-UM25C](https://joy-it.net/en/products/JT-UM25C) [Pokušaj pristupa 08.09.2023]

[15] Jabra, Jabra Talk 25 Technical Specifications, 2018, [Internet] Dostupno na:
<https://www.emea.jabra.com/bluetooth-headsets/jabra-talk-25##100-92310900-60> [Pokušaj pristupa 12.09.2023]

[16] Samsung, Specification S21 5G, 2023, [Internet] Dostupno na:
https://www.samsung.com/africa_en/smartphones/galaxy-s21-5g/specs/ [Pokušaj pristupa 14.09.2023]

[17] Apple, iPhone 5s – Technical Specifications, 2023, [Internet] Dostupno na:
https://support.apple.com/kb/sp685?locale=en_GB [Pokušaj pristupa 14.09.2023]

SAŽETAK

Razvojem USB tehnologije povećava se i broj uređaja koji se napajaju pomoću USB kabela. Pregled USB tehnologije napravljen je kroz razvoj USB standarda i njihovih priključaka. Kod razvoja USB standarda stavljen je naglasak na njihovu sposobnost upravljanja snagom napajanja. Za potpuni proces punjenja, osim USB kabela potrebni su i električni energetske pretvarači. Iako se u praktičnom dijelu ovog rada najviše koriste AC/DC ispravljači, napravljen je teorijski pregled za sve vrste pretvarača. Praktični dio odrađen je kroz mjerenje strujno naponskih prilika na USB portu prilikom punjenja tri različita uređaja. Pružen je pregled uređaja koji se koriste prilikom ove vrste mjerenja, te je detaljno opisan princip rada i mogućnosti korištenog uređaja (JT-UM25C). Analizom podataka dobivenih iz provedenih mjerenja utvrđena su trenutna stanja baterija uređaja te njihov kapacitet. Obrazložene su prednosti i nedostaci periodičnog mjerenja.

ABSTRACT

The development of USB technology has led to an increase in the number of devices powered by USB cables. An overview of USB technology has been made through the development of USB standards and their connectors. When developing USB standards, emphasis was placed on their power management capability. For a complete charging process, in addition to the USB cable, electrical power converters are required. Although AC/DC adapters are most commonly used in the practical part of this work, a theoretical overview has been provided for all types of converters. The testing was conducted by measuring the current-voltage conditions at the USB port when charging three different devices. An overview of the devices used for this type of measurement is provided, and the operating principle and capabilities of the used device (JT-UM25C) are described in detail. The analysis of the data obtained from the measurements determined the current state of the device batteries and their capacity. The advantages and disadvantages of periodic measurements are explained.

ŽIVOTOPIS

Antun Severović rođen je 1996. godine u Novoj Gradiški. Osnovnu školu je pohađao u Novoj Gradiški. Godine 2015. završava srednju tehničku školu „Ruđer Bošković“ u Vinkovcima, smjer elektrotehničar. Po završetku srednje škole upisuje stručni studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer automatika. Preddiplomski stručni studij završava 2019. godine te upisuje diplomski studij elektroenergetike, smjer: elektroenergetski sustavi.

Potpis autora