

# Realizacija besprekidnog napajanja komandno-upravljačkog centra u sistemu OOiU

## The Realization of Uninterruptible Power Supply for Command-Control Centre of Emergency and Notification Warning System

Marko Tajdić\*, Željko V. Despotović\*\*, Jovan Kon\*\*

\*Elektrotehnički Fakultet, Univerzitet u Beogradu, Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu, Srbija

\*\*Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu, Srbija

**Rezime** - Sistem za osmatranje, obaveštavanje i uzbunjivanje (OOiU), ima za zadatak da u skladu sa zakonskim propisima, pravilnicima i uredbama izvrši sve potrebne mere u cilju osmatranja, obaveštavanja, a po potrebi, delimičnog ili opšteg javnog uzbunjivanja stanovništva na ugroženom području. Sistemom OOiU, koji je između ostalog od veoma bitnog značaja za Sektor za vanredne situacije Republike Srbije, se upravlja iz komandnog upravljačkog centra (KUC). O samoj važnosti ovog OOiU sistema govori i to što on poseduje prenos podataka po dva prenosna puta (WiFi i UHF). Na osnovu prethodno rečenog sledi da je veoma bitno obezbediti robustan, pouzdan i neprekidan rad KUC-a, a samim tim i nesmetani rad sistema za OOiU. Značajnu ulogu u obezbeđivanju pouzdanog, neprekidnog i autonomnog rada celokupnog sistema ima besprekidno napajanje (BPN). Uloga BPN je veoma bitna, jer u slučaju nestanka mrežnog napajanja 230 V, 50 Hz, ono treba da preuzme napajanje sistema. Upravljački sistem treba da obezbedi veoma brzo prebacivanje (vreme prebacivanja  $\leq 10$  ms) na rezervni izvor napajanja bez prestanka rada i naponskog propada celokupnog sistema OOiU. Autonomija projektovanog sistema u odsustvu mrežnog napajanja i pri radu na baterijskoj banci je 24 časa. U radu će biti prikazana praktična realizacija jednog ovakvog sistema, kao i eksperimentalni rezultati dobijeni tokom eksploatacionog puštanja sistema BPN u rad. Rešenje je u upotrebi u KUC-Valjevo sistema OOiU Sektora za vanredne situacije Republike Srbije, počev od 30. juna 2020.

**Ključne reči** - OOiU, besprekidno napajanje, autonomija, energetska pretvarači, baterijska banka, statički prekidač

**Abstract** - The emergency and notification warning system has the task to, in accordance with legal regulations, rules and observances, perform all necessary measures in order to monitoring, inform, and if necessary, partial or general public alerting of the population in the endangered area. The emergency and notification warning system, which is, among other things, very important for the Emergency management sector of the Republic Serbia, is managed from the command-control center. The importance of this system is evidenced by the fact that it has data transmission on two transmission paths (WiFi and UHF).

Based on the above, it follows that it is very important to ensure robust, reliable and uninterrupted operation of the CCC and thus the smooth operation of the emergency and notification warning system. Uninterruptible power supply (UPS) plays a significant role in ensuring reliable, uninterrupted and autonomous operation of the entire system. The role of BPN is very important, because in case of loss of mains power 230 V, 50 Hz, it should take over the power supply of the system. The control system should provide a very fast switching (switching time  $\leq 10$  ms) to the backup power supply without interruption and voltage failure of the entire system. When working on a battery bank, the autonomy of the designed system in the absence of mains power is 48 hours. The paper will present the practical implementation of such a system, as well as the experimental results obtained during the operational commissioning of the UPS system. The solution is in use in the CCC-Valjevo of the emergency and notification warning system, starting from June 30, 2020.

**Index terms** - Emergency and notification warning system, UPS, power converter, battery bank, static switch

### I UVOD

Besprekidna napajanja (BPN) inače popularno nazvana UPS napajanja („*Uninterruptible Power Supply*“) se koriste za trajnu i stabilnu isporuku električne energije u slučaju kvara na distributivnoj mreži ili čak kao samostalni izvori napajanja. Izobličenja napajanja kao što su prekidi napajanja, propadi napona, naponski pikovi i naponski harmonici mogu da izazovu ozbiljne uticaje na osetljiva opterećenja u električnim sistemima. Sistemi BPN su posebno potrebni na mestima gde postoji učestalo prekidanje dovodnog napajanja i/ili u slučaju čestog dešavanja fluktuacija napona. U situacijama kada se javljaju kratkotrajna kolebanja snage ili naponski poremećaji, sistem BPN obezbeđuje konstantnu snagu za pouzdan i trajan rad važnih potrošača. Tokom produženog trajanja prekida napajanja, BPN obezbeđuje rezervno napajanje kako bi sistem mogao da radi dovoljno dugo, a takođe da bi se na jednostavan način i bez poremećaja mogao isključiti sa napajanja [1-4].

BPN nalaze veoma veliku primenu u napajanju medicinske

opreme, telekomunikacione opreme, ali u najvećem broju slučajeva, u sistemima računarskih napajanja. Osetljivi potrošači se najčešće dovode u vezu sa problemima kvaliteta napajanja električnom energijom [1-2], [5-6]. Oni ne tolerišu dugotrajno vreme bez napajanja. Čak i kratkotrajni ispad od 50-100 ms može dovesti do katastrofalnih posledica (ispad operacionog bloka u bolnicama, gubitak podataka u računarskim centrima, bankama, ispad upravljačkog sistema na elektranama i sl.).

Osnovnu konfiguraciju BPN čine ispravljač, rezervni izvor energije (baterija), statički prekidač i DC/AC pretvarač-invertor. Zbog harmonijskih izobličenja koje u napojnoj mreži prouzrokuje ispravljač, nove topologije ispravljača sadrže kola za korekciju faktora snage i eliminisanje uticaja viših harmonika.

Osnovni princip rada BPN je da se rezervni izvor energije (baterija) preko mrežnog ispravljača puni kontrolisanom jednosmernom strujom. Baterija potom napaja invertor koji pretvara njenu jednosmernu energiju (DC) u naizmeničnu energiju (AC) i kao takvu je dostavlja potrošačima. Ovakav sistem je najčešće predviđen za rad od nekih desetak minuta, ali da bi se minimizirala veličina baterije, neki sistemi za snabdevanje računarskih sistema rade tačno onoliko vremena koliko je potrebno da bi se hardver ručno ili automatski isključio i da bi se sačuvali bitni podaci [7].

Statički prekidač je takođe veoma bitna komponenta za što kvalitetnije funkcionisanje. On može biti izveden kao elektromehanički ili kao poluprovodnički (antiparalelna veza tiristora). U oba slučaja upravljačko kolo mora da aktivira prekidač kada izlazni napon padne ispod neke određene vrednosti od svoje nominalne. Vreme komutacije elektro-mehaničkih prekidača iznosi 50-100 ms. Ovo vreme kašnjenja može da dovede do isključenja potrošača ili čak do kvara na njima. Upotrebom tiristorских statičkih prekidača može da se postigne vreme komutacije u trajanju od oko 5ms, što je sasvim dovoljno za većinu potrošača da nastave da funkcionišu normalno [8-12].

U ovom radu akcenat je dat na rešavanje problema napajanja računarskog i telekomunikacionog dela sistema za osmatranje, obaveštavanje i uzbunjivanje (OOiU), koji ima za cilj da izvrši sve potrebne mere u cilju osmatranja, obaveštavanja, a po potrebi, delimičnog ili opšteg javnog uzbunjivanja stanovništva na ugroženom području (elementarne nepogode, ratne situacije i sl.). Sistemom OOiU, koji je između ostalog od veoma bitnog značaja za Sektor za vanredne situacije Republike Srbije, se upravlja iz komandnog upravljačkog centra (KUC). O samoj važnosti ovog OOiU sistema govori i to što on poseduje prenos podataka po dva prenosna puta (WiFi i UHF) i odgovarajuću računarsku opremu koja je osetljiva na poremećaje mrežnog napajanja različitog porekla. Na osnovu prethodno rečenog sledi da je veoma bitno obezbediti robusan, pouzdan i neprekidan rad KUC-a, a samim tim i nesmetani rad sistema za OOiU.

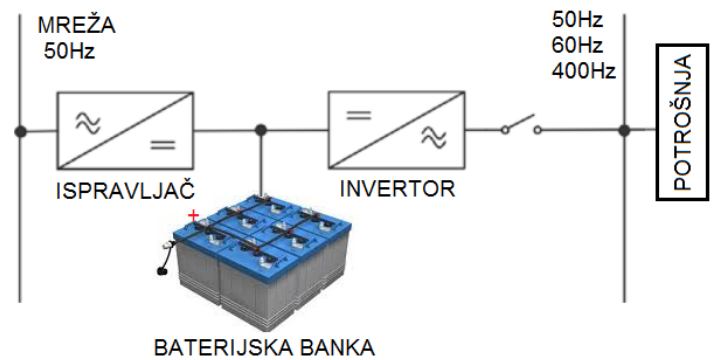
Značajnu ulogu u obezbeđivanju pouzdanog, neprekidnog i autonomnog rada celokupnog sistema ima BPN. U ovom konkretnom slučaju, uloga BPN je veoma bitna, jer u slučaju nestanka mrežnog napajanja 230 V, 50 Hz, ono treba da preuzme napajanje sistema. U sistemu je posebna pažnja bila posvećena izboru elektronskog statičkog prekidača, koji treba da obezbedi veoma brzo prebacivanje (vreme prebacivanja  $\leq 10\text{ms}$ ) na rezervni izvor napajanja bez prestanka rada sistema OOiU.

Realizovani sistem je projektovan za autonomiju rada od 15h, u odsustvu mrežnog napajanja (rad na baterijskoj banci) i pri maksimalnoj jednovremenoj snazi potrošnje. U radu će biti prikazana praktična realizacija jednog ovakvog sistema, kao i eksperimentalni rezultati dobijeni tokom eksploatacionog puštanja sistema BPN u rad.

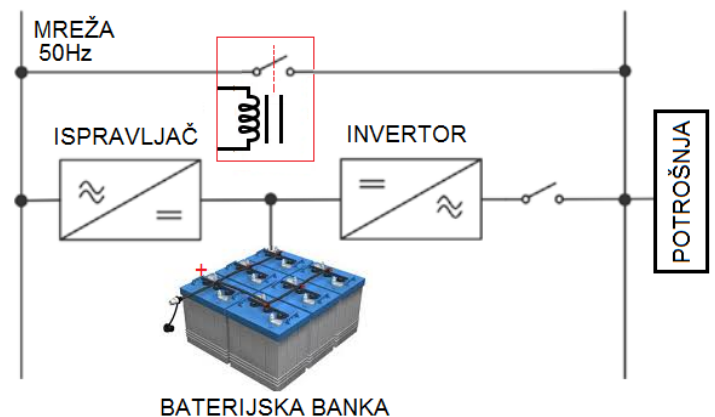
## II OSNOVNE TOPOLOGIJE SISTEMA BEPREKIDNOG NAPAJANJA (SBN)

Najjednostavnija topologija jednostrukog sistema besprekidnog napajanja (SBN) je prikazan na Slici 1. Na distributivnu mrežu je priključen monofazni ili trofazni AC/DC pretvarač (ispravljač) čija je uloga punjenje baterijske banke (akumulatorske baterije) i napajanje DC ulaza monofaznog ili trofaznog DC/AC pretvarača (invertora). Dobra strana ovog napajanja je što invertor obezbeđuje stabilan napon napajanja potrošača pri čemu učestanost napona na potrošačima (50Hz, 60Hz, 400Hz i sl.), ne mora biti jednaka učestanosti napona u električnoj mreži.

U slučaju nestanka mrežnog napona, jednosmerno međukolo invertora se napaja iz akumulatorske baterije. Kapacitet akumulatorske baterije se projektuje tako da omogući rad potrošača do startovanja nekog rezervnog izvora napajanja (najčešće je to dizel ili benzinski električni agregat) ili, u slučaju njegovog neuspešnog starta, do bezbednog isključenja potrošača sa napajanja.



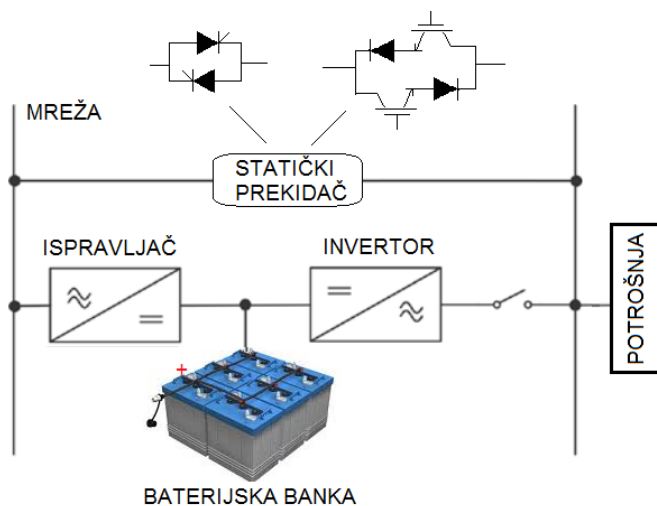
Slika 1. Blok šema osnovne konfiguracije jednostrukog SBN



Slika 2. Blok šema osnovne konfiguracije jednostrukog SBN sa mogućnošću prebacivanja na distributivnu mrežu

U slučaju kada se zahteva da je učestanost napona na potrošačima jednaka učestanosti napona distributivne mreže, primenjuje se konfiguracija jednostrukog sistema sa mogućnošću prebacivanja na distributivnu mrežu. Osnovna blok šema ove topologije je prikazana na Slici 2.

Kao i kod prethodne topologije, potrošnja se napaja iz invertora, ali se u slučaju preopterećenja na njegovom izlazu, eventualnog njegovog kvara ili redovnog održavanja, potrošnja elektromehaničkim preklopnikom (kontaktorom) prebacuje na napajanje iz električne mreže. Bez naponska pauza kod prebacivanja potrošnje sa jednog napajanja na drugo iznosi 100-200 ms, obzirom da je vreme reagovanja elektro-mehaničkih sklopki tog reda veličine.



**Slika 3.** Blok šema osnovne konfiguracije jednostrukog SBN sa elektronskim statičkim prekidačem (tiristorskim ili tranzistorskim)

U cilju otklanjanja bez naponske pauze za uključenje potrošača na mrežu, može se koristiti statički elektronski prekidač realizovan u tiristorskoj ili tranzistorskoj tehnologiji kao što je prikazano na Slici 3. Uslov za ispravan rad ovog SBN jeste da je izlazni napon invertora frekventno i PLL sinhronizovan sa mrežnim naponom. Potrošnja se napaja iz invertora, a u slučaju preopterećenja, kvara ili redovnog održavanja invertora, potrošač se prebacuje na napajanje sa električne mreže. Na red sa invertorom zadržan je elektromehanički prekidač. Pri ovome mogu nastupiti sledeće situacije:

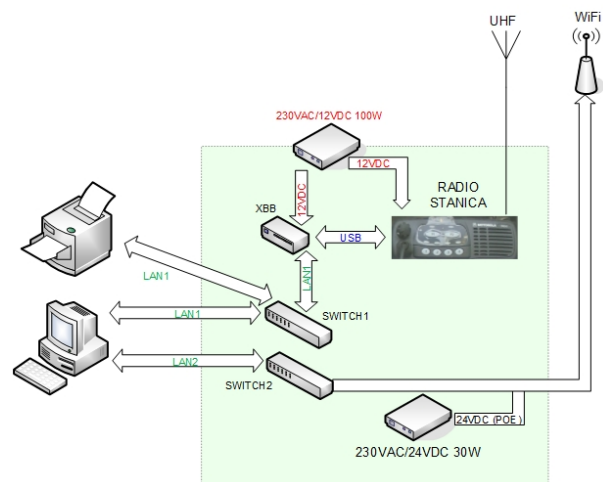
- (1) U slučaju preopterećenja, dolazi do aktiviranja preostrojne zaštite, koja isključuje sve tranzistore u invertoru, tako da se može uključiti statički prekidač ka mreži.
- (2) U slučaju isključenja invertora zbog održavanja, upravljačkom kolu se daje komanda za isključenje svih tranzistora tako da se takođe može uključiti statički prekidač ka mreži.
- (3) U slučaju kvara invertora upravljačko kolo detektuje kvar, signalizira grešku i ukida upravljačke impulse za interne tranzistore, a kod oštećenih tranzistora pregorevaju osigurači vezani na red sa njima, tako da se i u ovom slučaju može uključiti statički prekidač ka mreži.

### III ZAHTEVI ZA POTROŠNJOM U SISTEMU BPN KOMANDNO UPRAVLJAČKOG CENTRA (KUC) OOiU SISTEMA

Na Slici 4 je data blok šema potrošača KUC-a Valjevo, u sistemu OOiU. Kao što se sa ove blok šeme vidi sistem BPN za potrošače ima: PC računar sa monitorom i štampačem i dodatni razvodni orman (označen uokvirenom površinom na Slici 4.) sa svom potrebnom telekomunikacionom opremom neophodnom za funkcionisanje OOiU sistema.

U ormanu telekomunikacione opreme se nalaze dva izvora napajanja, dva komutaciona modula tzv. „switch-a“ (SWITCH1 i SWITCH2 na blok šemi na Slici 4), jedan XBB modul koji služi za konverziju protokola, WiFi oprema i radio stanica.

Prvi izvor napajanja je AC/DC pretvarač ulaznog naizmeničnog napona 230V, 50 Hz u izlazni jednosmerni napon +24V, čija izlazna snaga iznosi 30W. Ovaj izvor služi za napajanje WiFi opreme (PoE – Power over Ethernet).



**Slika 4.** Blok šema osnovne konfiguracije potrošača KUC-a Valjevo u sistemu OOiU

Drugi izvor napajanja je AC/DC pretvarač ulaznog naizmeničnog napona 230 V, 50 Hz u izlazni jednosmerni napon +12 V, čija izlazna snaga iznosi oko 100 W. Ovaj izvor služi za napajanje XBB modula i radio stanice (MOTOTRBO DM4400, proizvodnje MOTOROLA).

Pomoću modula SWITCH1 vrši se međusobno povezivanje PC računara KUC-a sa štampačem i XBB modulom (konvertor protokola). XBB je kao što je već rečeno uređaj koji služi za konverziju protokola. Konkretno, XBB omogućava razmenu podataka između PC računara KUC-a i radio stanice. Podaci sa PC računara KUC-a, preko modula SWITCH1 stižu do XBB (LAN, Ethernet protokol), a XBB ih potom prosleđuje preko USB protokola do radio stanice. Ovaj deo telekomunikacione opreme i sistema predstavlja UHF prenosni put.

Pomoću modula SWITCH2 se vrši međusobno povezivanje WiFi opreme sa PC računara KUC-a. Ovaj deo opreme: PC računar KUC-a, WiFi oprema, modul SWITCH2 i napajanje čine jedan deo sistema i predstavljaju WiFi prenosni put.

U Tabeli 1. je dat pregled potrošnje snage iz 230V, 50Hz po

pojedinih potrošačima i prenosnim putevima.

**Tabela 1.** Pregled potrošača KUC-a

Potrošač	Snaga (W)
UHF prenosni put	100W
WiFi prenosni put	30W
PC računar	150W
PC monitor	50W
Štampač	50W
<b>UKUPNO:</b>	<b>380W (400W*)</b>

\*maksimalna izlazna snaga (nikada ne rade oba prenosna puta sa punom snagom i istovremeno)

#### IV TEHNIČKI OPIS SISTEMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA

Blok šema implementiranog sistema BPN potrošača KUC-a Valjevo u sistemi OOiU je data na Slici 5. U ovom sistemu se uočava nekoliko ključnih funkcionalnih blokova: (1) mrežni punjač, (2) jednosmerno međukolo 24Vdc, (3) baterijska banka 24Vdc/200Ah, (3) inverter, (4) elektronski statički prekidač.

#### Mrežni punjač

U sistemu BPN se koristi mrežni punjač baterijske banke 24V/200 Ah, izlazne snage 1000 W. Mrežni punjač je sa galvanskom izolacijom između mrežnog ulaza 230 V, 50 Hz i izlaznog jednosmernog napona 26 V...28.8 V, koji se koristi za punjenje baterijske banke. Izlazna struja punjača je 35 A. U sklopu mrežnog punjača se nalazi mrežni ispravljač sa naponskim podizačem, odnosno korektorom faktora snage ("power factor correction" - PFC), tako da se ceo punjački sklop ponaša prema mreži kao aktivno opterećenje, odnosno njegov faktor snage je blizak 1 (u konkretnom slučaju  $\cos\phi > 0.95$ ).

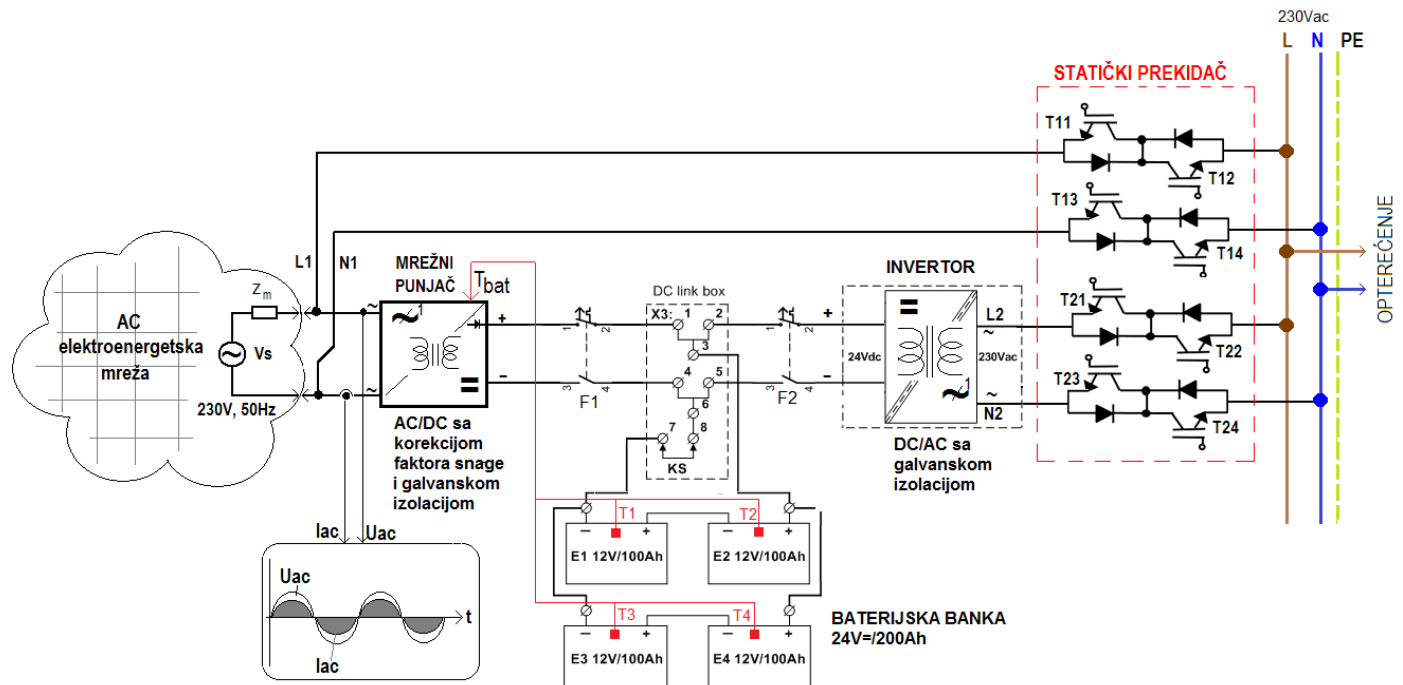
Takođe, na ovaj način je nivo harmonijskih izobličenja ulazne struje punjača (koja se injektira u AC mrežu 230V, 50Hz) sveden na minimum.

Blok šema mrežnog punjača je data na Slici 6. [13]. Mikroprocesorska upravljačka jedinica (CPU) ostvaruje nadzor i kontrolu nad punjačem. Ostvarene su analogne povratne sprege po struji punjenja baterija (blok za „detekciju struje baterije“) i po naponu baterije. Kao digitalni ulazi u CPU se koriste: optički izolovan signal daljinske kontrole (tzv. „remote-control“-RC), izbor režima rada punjača (2-stepeni i 3-stepeni profil punjenja), detekcija pogrešnog povezivanja krajeva baterije (+BAT) i (-BAT) i termička zaštita (nad temperaturna zaštita) ukoliko dođe do pregrevanja modula ulaznog PFC ispravljača.

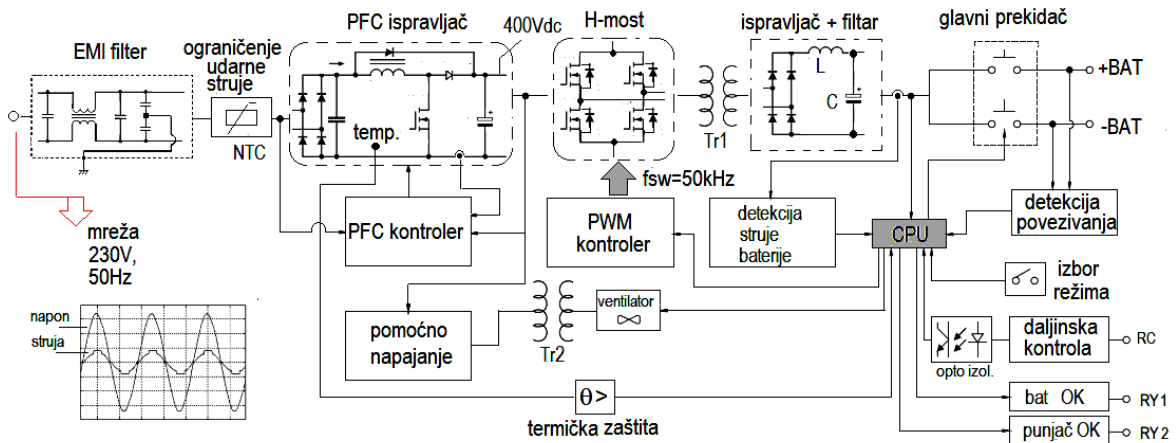
Kao digitalni izlazi iz CPU su izvedeni statusi: priključena baterija („bat OK“) i ispravan režim punjenja („punjač OK“). Ostali digitalni izlazi koji se koriste su: kontrola rada glavnog prekidača koji dovodi baterijsku banku na napon (priklučci +BAT, -BAT) i uključenje ventilatora za hlađenje ukoliko temperatura u unutrašnjosti punjača pređe unapred zadatu vrednost praga nad temperaturne zaštite.

Pretvarački deo punjača se sastoji od (1) ulaznog mrežnog PFC ispravljača (AC/DC) koji u sebi ima implementiran algoritam korekcije ulaznog faktora snage, (2) MOSFET tranzistorskog „H-mosta“ sa kojim je kaskadno vezan izlazni ispravljač sa „LC“-filtrom“ sa koga se napaja baterija.

Napajanje „H-mosta“ je 400 Vdc i ovo napajanje je galvanski odvojeno od izlaznog ispravljača i „LC“ - filtra“, posredstvom visokofrekventnog feritnog transformatora Tr1, koji je predviđen za prekidačku učestanost 50 kHz. Iz napajanja 400 Vdc se dobija pomoćno napajanje (DC/AC) koje se koristi za napajanje ventilatora kojim je obezbeđeno hlađenje sistema.



**Slika 5.** Principialna električna blok-šema povezivanja elektroenergetske opreme unutar sistema BPN KUC-a

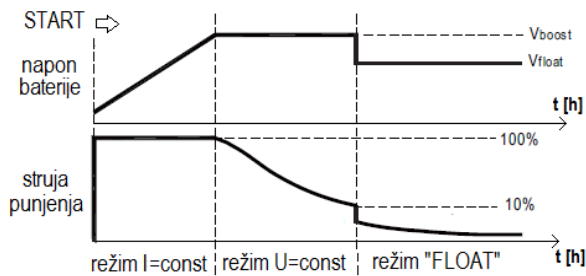


Slika 6. Blok šema mrežnog punjača sa galvanskom izolacijom i korektorom faktora snage (PFC) [13]

PWM kontroler kojim se postiže kontrola struje punjenja i napona baterije je pod direktnim nadzorom CPU, pri čemu CPU zadaje referentnu vrednost, odnosno vremenski profil struje punjenja (koji je principski prikazan na Slici 7.). Radna učestanost pretvaračkog „H-mosta“ je  $f_{sw}=50\text{kHz}$ .

Za ograničenje startne ulazne struje PFC ispravljača se koristi pasivno kolo bazirano na NTC otpornosti. Ulazni EMI filter obezbeđuje potiskivanje visokofrekventne komponente 100 kHz iz spektra ulazne struje, tako da na ulazu AC mrežnog punjača postaje dominantna 50 Hz-na komponenta ulazne struje, odnosno ulazni napon i ulazna struja su praktično u fazi, kao što je prikazano na Slici 6.

Na Slici 7. je dat profil punjenja baterije iz mrežnog punjača, odnosno prikaz karakterističnih veličina koje se odnose na bateriju (napon i struja punjenja baterije).



Slika 7. Profili napona i struje punjenja baterijske banke [13]

U režimu-I, obezbeđena je konstantna 10h struja punjenja približne vrednosti od 20A, koja brojno iznosi oko 10% od kapaciteta baterijske banke (odnosno  $I_{10h}[A] \approx 0.1 \cdot C[Ah]$ ). U ovom režimu se ima približno linearni porast napona baterije do vrednosti  $V_{boost}$ . Po dostizanju ovog naponskog praga u režimu-U je obezbeđena naponska regulacija, odnosno održavanje napona baterije na vrednosti  $V_{boost}$ . U ovom režimu struja baterije pada do vrednosti 10% od početne struje punjenja  $I_{10h}[A]$ .

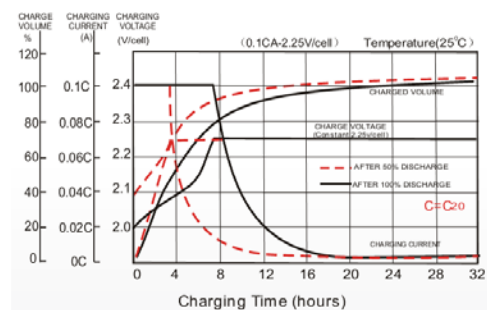
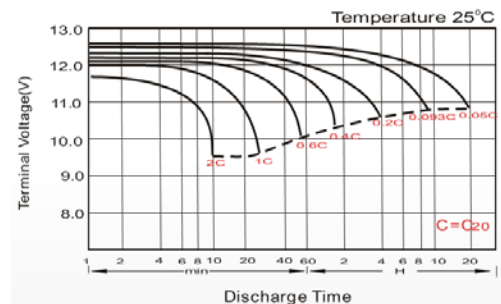
Nakon dostizanja ovog praga I10%, punjač prelazi u režim „FLOAT“ i tada je struja baterije  $< 0.1 \cdot I_{10h}[A]$  (u ovom režimu se ima struja održavanja tzv. „trickle-charge current“). Napon

baterije  $V_{float}$  u ovom režimu je manji od maksimalne vrednosti  $V_{boost}$ .

Punjač ima opciju temperaturne kompenzacije punjenja i, na bazi izmerenih temperatura T1-T4 u kućistima baterija (ulaz  $T_{bat}$  prikazan na Slici 5.). Takođe na osnovu ovih merenja, u slučaju prevelikog porasta temperature elektrolita baterije, dolazi do bezuslovnog blokiranja izlaza punjača.

#### DC link i baterijska banka

U sistemu je izveden DC link razvod (sprega modula punjač-baterija-invertor) na koji je povezana baterijska banka 24Vdc, kapaciteta 200Ah. Ugrađene su četiri olovne-gel hermetički zatvorene baterije 12V/100Ah, UCG100-12, proizvodnje Ultracell, koje su predviđene za režime dubokog pražnjenja (standardno za dubine pražnjenja od 80%). Karakteristike pražnjenja i punjenja odabranih baterija su date na dijagramima na Slici 8. [14].

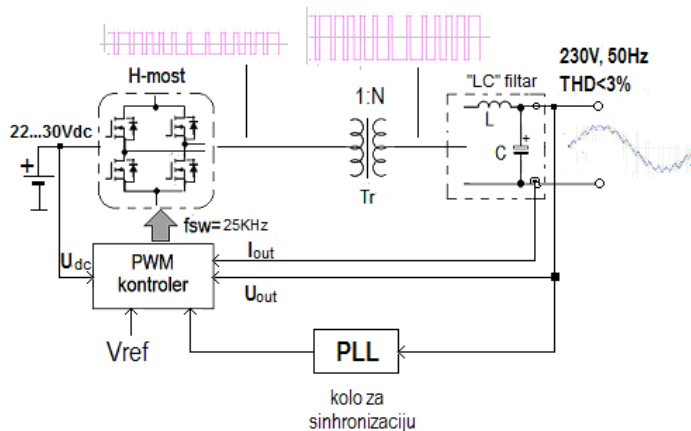


Slika 8. Karakteristike pražnjenja i punjenja baterija UCG100-12 [14]

Projektovana autonomija baterije pri maksimalnoj izlaznoj snazi od 380 W i pri dubini pražnjenja od 50% je oko 6 h. Ovo je pesimistička vrednost obzirom da svi potrošači nisu aktivni u istom trenutku, a neki se veoma retko koriste (kao na primer štampač). Takođe nikada oba prenosna puta (UHF i WiFi) ne rade istovremeno, niti sa maksimalnom snagom, tako da se može računati sa faktorom jednovremenosti potrošnje od  $K_j = 0.4$ . U tom slučaju je jednovremena snaga oko 160 W. Pri ovim uslovima i pri dubini pražnjenja od 50%, autonomija rada sistema na baterijskom napajanju je oko 15 h. Ukoliko se ide na veće dubine pražnjenja od 80%, vreme autonomije se može povećati na 24 h. Treba napomenuti da se u slučaju većih dubina pražnjenja ograničava broj radnih ciklusa baterije (jedan radni ciklus je *punjenje-pražnjenje*), odnosno vek trajanja baterije. U konkretnom slučaju za dati tip baterija, broj radnih ciklusa za dubinu pražnjenja od 50% je 1200, dok je za dubinu pražnjenja od 80%, taj broj jednak 600 (ovi podaci su preuzeti iz kataloga proizvođača). U svakom slučaju treba naći kompromisno rešenje. U ovom konkretnom slučaju je usvojeno da je prihvatljiva dubina pražnjenja baterijske banke 50%, pri kojoj je vreme autonomije sistema oko 15 h.

### Invertor

Principijska blok šema invertorskog DC/AC pretvarača je data na Slici 9. Invertor je baziran na topologiji „puni-most“ ili „H-most“ koji se napaja iz jednosmernog DC linka, čiji se napon menja u opsegu 22÷30Vdc. Izlazno kolo 230 V, 50 Hz, uključujući i izlazni „LC“ filter su galvaniski izolovani od DC ulaza preko transformatora  $Tr$ , koji je koncipiran kao podizač napona („step-up“) i koji obezbeđuje podizanje primarnog napona u odnosu 1:N (u ovom slučaju 1:10).



Slika 9. Blok šema invertorskog modula

Na sekundaru transformator se nalazi nisko-propusni „LC“ filter koji obezbeđuje filtraciju napona sekundara, koji je dobijen primenom PWM algoritma u upravljačkom kolu invertora.

U bloku PWM kontrolera je integrisana upravljačka elektronika invertora i drajveri za pobudu MOSFET tranzistora u „H-mostu“. Ulazni merni signali su: napon DC međukola  $U_{dc}$ , izlazna struja  $I_{out}$  i izlazni napon  $U_{out}$ . Kolo sa fazno-spregnutom petljom (tzv. „phase locked loop“-PLL) služi za sinhronizaciju izlaznog napona invertora sa mrežnim naponom u trenutku prebacivanja napajanja sa mreže na invertor ili obrnuto. U principu invertor je

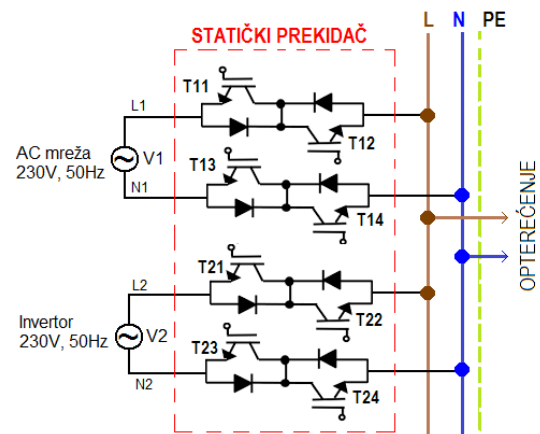
koncipiran da može da radi u paraleli sa mrežom, tako da u ovom slučaju PLL kolo dobija takođe na značaju.

Izlazni napon invertora je sinusni sa stepenom izobličenja  $THD \leq 3\%$ , efektivne vrednosti 230V i učestanosti 50Hz  $\pm 0.1\text{Hz}$ , sa naponskom regulacijom  $\pm 3\%$  sa promenom opterećenja (tzv. „transient load regulation“). Izlazna snaga invertora u trajnom režimu je 400W, dok invertor može dati snagu od 460W u intervalu od 180s (režim kratkotrajnog preopterećenja) i maksimalnu vršnu snagu („surge power“) od 600W u intervalu od 10s, odnosno 800W u toku 30 perioda (600ms)[15].

### Statički prekidač

Elektronski statički prekidač je baziran na brzim bipolarnim poluprovodničkim sklopkama, koje su sastavljene od dva IGBT tranzistora u anti-paraleli i dve pripadajuće diode vezane na red sa njima [12], kao što je prikazano na Slici 5.

Detaljniji prikaz poluprovodničkog statičkog prekidača koji obezbeđuje brzo prebacivanje napajanja sa jednog na drugi izvor je dat na Slici 10.



Slika 10. Blok šema poluprovodničkog IGBT statičkog prekidača

Statički prekidač obezbeđuje dovođenje napona iz izvora V1 (AC mreža) ili iz izvora V2 (invertor) na opterećenje, zavisno od toga koji od ovih energetskih ulaza je podešen kao primarni, a koji kao sekundarni (pomoćni) izvor napajanja.

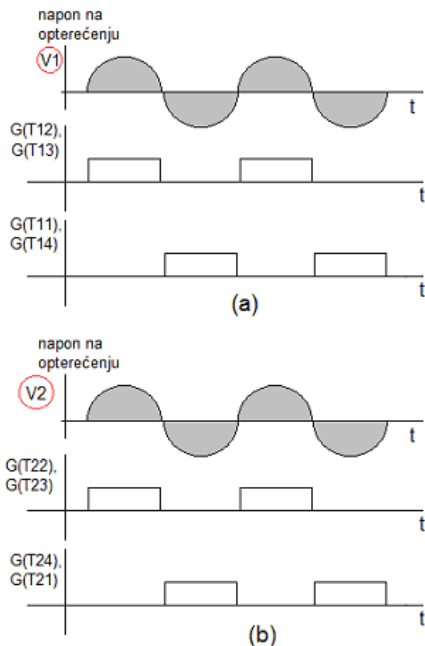
Pored pomenute funkcije statički prekidač ima ulogu da ostvari napajanje potrošača bez prekida u trenutku prebacivanja napajanja sa jednog na drugi naponski izvor (sa V1 na V2 i obrnuto sa V2 na V1).

Na Slici 11. prikazani su upravljački signali na gejtovima IGBT prekidača, koji su sinhronizovani sa polu-periodama napona koji se dovodi na opterećenje.

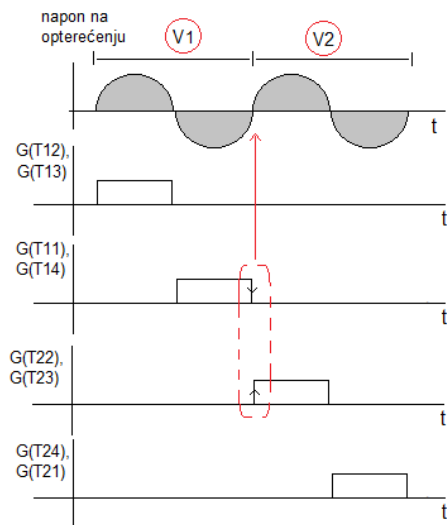
Na Slici 11.(a) je prikazan slučaj kada je primarni izvor napajanja mreža (napon V1), dok je na Slici 11.(b) prikazan slučaj kada je primarni izvor napajanja invertor.

Na Slici 12. je su prikazani karakteristični talasni oblici na gejtovima IGBT prekidača u slučaju prebacivanja napajanja sa izvora V1 na izvor V2.

U trenutku prebacivanja se vrši komutacija sa prekidača T11 i T14, na prekidače T22 i T23. Slični zaključci bi se mogli izvesti u slučaju prebacivanja napajanja sa izvora V2 na izvor V1.



**Slika 11.** Karakteristični talasni oblici na gejtovima IGBT tranzistora statičkog prekidača u ustaljenom stanju; (a) kada je primarni izvor napajanja V1, (b) kada je primarni izvor napajanja V2



**Slika 12.** Karakteristični talasni oblici na gejtovima IGBT tranzistora statičkog prekidača prilikom prebacivanja napajanja sa izvora V1 na izvor V2

Na osnovu prikazanih teoretskih talasnih oblika na Slikama 11. i 12., je jasno da je pouzdano prebacivanje sa jednog na drugi izvor, moguće samo u slučaju korektno sinhronizacije, kada je moguće ostvariti brzu komutaciju.

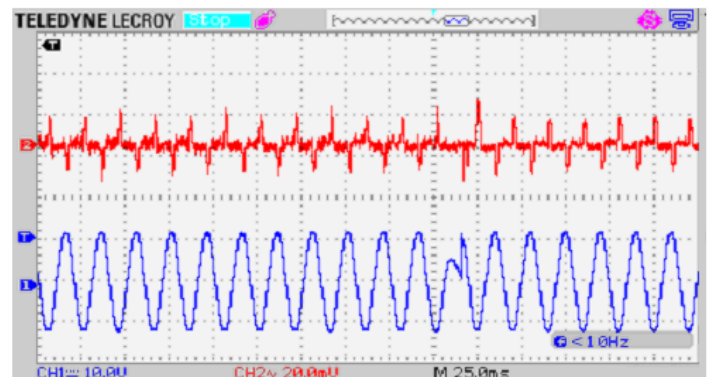
## V EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U nastavku rada će biti dati ključni rezultati realizacije sistema BPN, kao i neki ključni eksperimentalni rezultati dobijeni tokom eksploatacionih testiranja i puštanja u rad sistema.

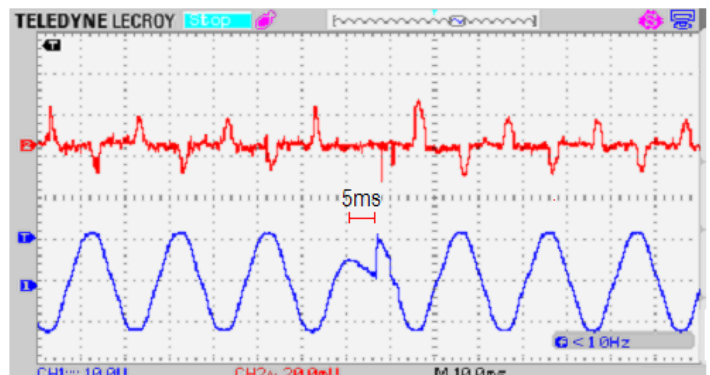
Pri eksperimentalnoj verifikaciji parametara sistema BPN je korišćena sledeća merna oprema:

- Osciloskop: WAVEACE 1002, 60 MHz, 1 Gs/s, TELEDYNE LeCroy
- Strujna klešta za osciloskop: HANTEK CC650, opsega 0...±650 A DC ili AC (prenosni odnos sonde 1 mV/100 mA)
- Digitalna strujna klešta (ručna): AC, DC: UNI T- UT210E

Na Slici 13. su prikazani talasni oblici napona i struje na opterećenju, prilikom prebacivanja napajanja sa invertora na mrežno napajanje 230V, 50Hz. Simuliran je ispad invertora usled prekida u dovodnom DC napajanju i snimljeni su odzivi struje i napona opterećenja. Snaga opterećenja u ovom eksperimentu je iznosila 350 W.



**Slika 13.** Talasni oblici napona na sabirnicama opterećenja i struje opterećenja prilikom prebacivanja napajanja sa invertora na distributivnu mrežu; CH1-napon (250 V/div), CH2-struja opterećenja (10 A/div)

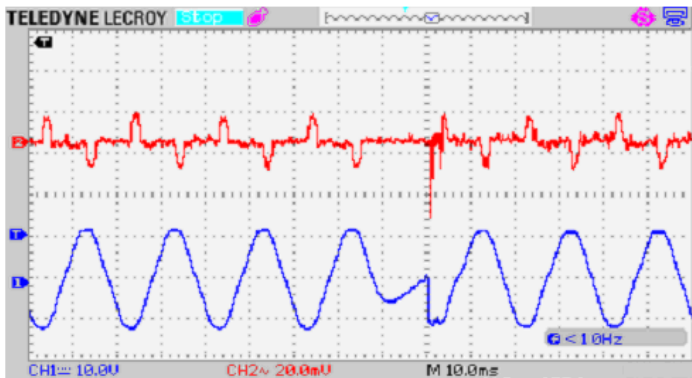


**Slika 14.** Talasni oblici napona na sabirnicama opterećenja i struje opterećenja (detaljni prikaz intervala prebacivanja sa snimka na Slici 13); CH1-napon (250 V/div), CH2-struja opterećenja (10 A/div)

Detaljniji prikaz napona i struje opterećenja u intervalu neposredno pre i nakon prebacivanja napajanja (usled dejstva

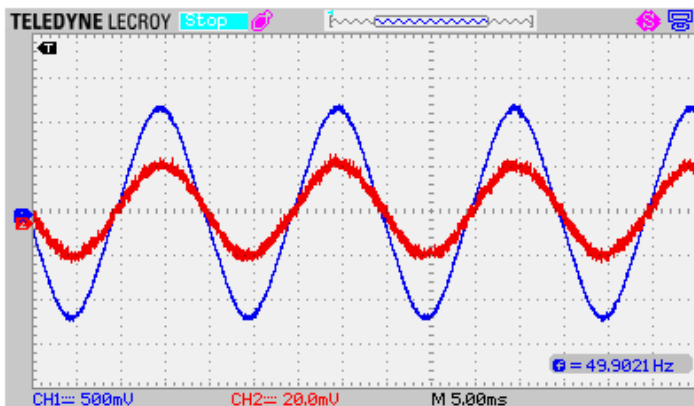
elektronskog prekidača) je dat na Slici 14. Sa ovih snimaka se vidi da se prebacivanje sa invertorskog na mrežno napajanje ostvaruje u intervalu 5 ms. U ovom intervalu mrežni napon je na niskoj vrednosti od oko 50 V, i ovo prouzrokuje određenu pauzu u napajanju opterećenja, koja ne utiče na njegov stabilni rad, obzirom da su opterećenja AC/DC ispravljači koji napajaju potrošače KUC-a.

Na Slici 15. je dat snimak karakterističnih veličina (napona i struje opterećenja) prilikom prebacivanja napajanja potrošača KUC-a, sa mrežnog na invertorsko napajanje. Opterećenje je, kao i u prethodnom slučaju iznosilo oko 350 W.



**Slika 15.** Talasni oblici napona na sabirnicama opterećenja i struje opterećenja prilikom prebacivanja napajanja sa mrežnog na invertorsko napajanje; CH1-napon (250V/div), CH2-struja opterećenja (10A/div)

Sa ovih snimaka se vidi da se prebacivanje napajanja sa mreže na inverter ostvaruje u intervalu od oko 8ms. U ovom intervalu mrežni napon je na negativnoj i relativno niskoj vrednosti od oko -50V, i ovo prouzrokuje određenu pauzu u napajanju potrošača, koja ne utiče na njegov stabilni rad, obzirom da je opterećenje ustvari skup AC/DC ispravljača koji napajaju potrošače KUC-a.



**Slika 16.** Talasni oblici mrežnog napona i ulazne struje PFC ispravljača (punjača baterijske banke); CH1-napon (150V/div), CH2-struja opterećenja (7A/div)

Na Slici 16. je dat snimak talasnih oblika ulaznog napona i struje mrežnog punjača (kontrolisanog PFC ispravljača), koji se koristi za punjenje baterijske banke 24 Vdc/200 Ah. Prikazani snimak se odnosi na slučaj kada se vrši punjenje baterije i napajanje

invertora sa DC ulaza. U ovom slučaju je ostvarena mrežna struja efektivne vrednosti 5A pri naponu 230V, 50Hz., odnosno ostvarena je nominalna izlazna snaga punjača od 1000W. Pri ovim uslovima njegova ulazna snaga od 1100W (obzirom da je stepen iskorišćenja pri nominalnoj snazi iznosio oko 88%).

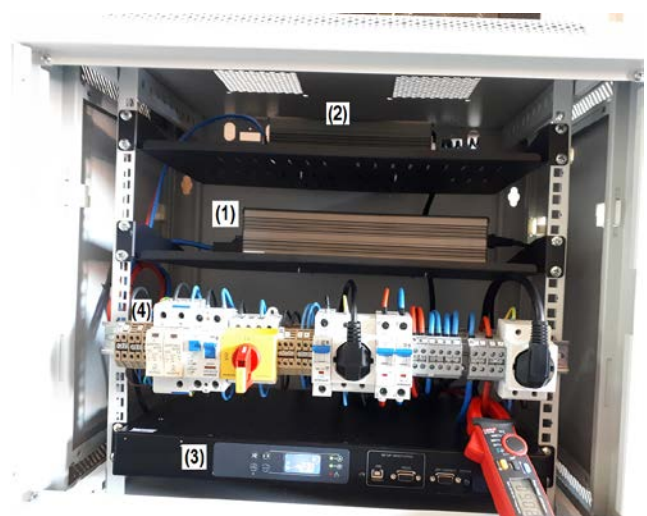
Na Slici 17. je prikazan izgled realizovanog energetskog ormana besprekidnog napajanja u KUC Valjevo.



**Slika 17.** Izgled realizovanog energetskog ormana BPN u KUC Valjevo

U okviru ovog ormana se nalaze dva najbitnija pod-razvoda (pod-sklopa): (1) deo sa modulima energetske elektronike, (2) deo za smeštaj baterijske banke 24Vdc/200 Ah. Na Slici 17. su takođe prikazani i neki potrošači u si stemu BPN: (3) ormarić telekomunikacione opreme, PC računar (4) i štampač (5).

Na Slici 18. je detaljnije prikazan podsistem (razvodni orman) koji sadrži module energetske elektronike (punjač, inverter, statički prekidač i svu ostalu sklopnu, zaštitnu i spojnu opremu).



**Slika 18.** Izgled podsistema uređaja energetske elektronike, sa sklopnom i zaštitnom opremom



U okviru ovog podsistema se nalaze sledeći moduli: (1) mrežni PFC ispravljač, (2) DC/AC pretvarač-invertor, (3) elektronski statički prekidač, (4) prenaponske zaštite i zaštitni uređaj diferencijalne struje (ZUDS) u dovodu distributivnog (mrežnog) napajanja 230 V, 50 Hz. Takođe, u ovom delu se nalazi i ostala sklopna, zaštitna i spojna oprema (grebenasti prekidač, zaštitni prekidači, redne stezaljke, "šuko" utičnice i sl.)

#### VI ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazana jedna moguća realizacija sistema BPN koje se koristi za napajanje potrošača KUC Valjevo u sistemu OOiU. Realizovano BPN obezbeđuje autonomiju od 15 h pri snazi od 160 W (maksimalna jednovremena snaga potrošnje) i pri dubini pražnjenja baterija od 50%. Napajanje takođe obezbeđuje jednu veoma bitnu funkciju-*neprekidnost napajanja* i pouzdan rad potrošača u intervalu prebacivanja napajanja sa invertora na mrežu i obrnuto, sa mreže na invertor, čije je trajanje max 10 ms (tipično 5 ms). U toku eksploatacionih ispitivanja i testiranja su snimljeni eksperimentalni rezultati, u okviru kojih je potvrđena realizacija tehničkih zahteva za BPN, odnosno zahtevana autonomija od minimalno 12 h pri maksimalno jednovremenoj snazi i vreme bez naponske pauze ( $\leq 10$  ms). Napajanje je realizovano početkom 2020., a pušteno u rad krajem juna 2020., od kada se nalazi u eksploatacionoj upotrebi. Prikazana realizacija BPN, predstavlja deo master rada (prijavljenog na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu), autora-master kandidata Marka Tajdića.

#### ZAHVALNICA

Istraživanje i tehnička realizacija opisanog sistema u ovom radu su finansijski podržana od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (period 2020.-2021.)

#### LITERATURA

- [1] King, A., Knight, W. *Uninterruptible Power Supplies and Standby Power Systems*, McGraw-Hill 2003.

- [2] Kaight, W., King, A. *Uninterruptible Power Supplies*, McGraw-Hill, 2004
- [3] Radaković, Z., Jovanović, M. *Specijalne električne instalacije niskog napona*, Akademska misao, Beograd, 2008.
- [4] Rajković, D., Janda, Ž. *Sistemi za besprekidno napajanje električnom energijom*, Agencija Spridonović, Beograd, 1999.
- [5] Kusko, A. *Emergency/standby power systems*, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [6] UPS theory, in: *A.B.C. Training Manual*, Issue 1, 2002.
- [7] Pandžić, N. *Novi pristupi projektovanju sistema za besprekidno napajanje*, in Proc. INFOTEH- Jahorina, Vol 8, Ref. F-15, pp. 894-898, 2009.
- [8] Ransom, D.L. Choosing the correct transfer switch, *IEEE Transaction Industry Application*, Vol. 49, Issue 6, pp. 2820-2824, 2013. <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2265376>
- [9] Tian, B., Mao, C., Lu, J., Wang, D., He, Y., Duan, Y., Qiu, J. 400 V/1000 kVA hybrid automatic transfer switch, *IEEE Transaction Industry. Electronics*, Vol. 60, Issue 12, pp. 5422-5435, 2013. <https://doi.org/10.1109/tie.2013.2238872>
- [10] Janda, Ž., Ninković, P., Đorđević, R. Mikroprocesorski vođena statička preklapka, in Proc. 26. *Savetovanje JUKO CIGRE*, rad R14-04, Banja Vrućica, 25-30. maj 2003.
- [11] Janda, Ž., Ninković, P., Prole, R. Mikroprocesorski vođena statička preklapka sa paralelnim radom invertora, in Proc. *X Simpozijum Energetska Elektronika*, pp. 25-30, Novi Sad 1999.
- [12] Aguinaga, J. *Study of Static Transfer Switches*, MSc thesis, University of Technology, Faculty of electronics, communication and Automation, Helsinki, 2008. <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/1087>
- [13] Despotović, Ž., Tajdić, M., Kon, J. Hibridno napajanje telekomunikacione opreme daljinskih mernih stanica u sistemima zaštite od poplava, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. XXII, No. 1-2, pp. 102-112, 2020.
- [14] Mobasolar, capital energie, <https://www.mobasolar.com/wp-content/uploads/2018/04/Battery-UCG100-12-min.pdf>
- [15] Mean Well, <https://www.meanwell.com/productPdf.aspx?i=40>

#### AUTORI

**Marko Tajdić**, dipl. el. inž, Elektrotehnički Fakultet, Univerzitet u Beogradu, Institut „M.Pupin“, Univerzitet u Beogradu, marko.tajdic@pupin.rs

**Dr Željko V. Despotović**, dipl. el. inž, Institut „M.Pupin“, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs

**Jovan Kon**, dipl. el. inž., Institut „M.Pupin“, Univerzitet u Beogradu, jovan.kon@pupin.rs