

# Analiza karakteristika semi-bridgeless PFC ispravljača sa izlaznom snagom preko 4 kW

Saša Vučićević, Nijaz Hadžimejlić, Pero Čeklić

Odjeljenje za razvoj  
KV Team d.o.o, Sarajevo  
Bosna i Hercegovina

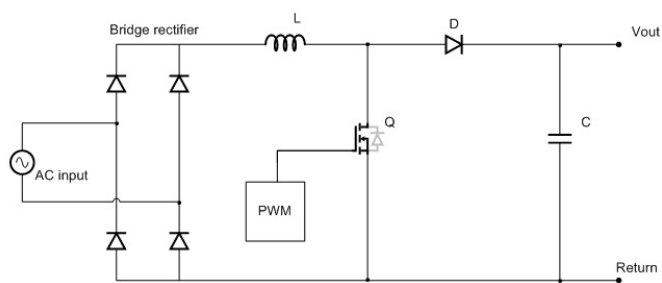
[sasa.v@kvteam.com](mailto:sasa.v@kvteam.com), [nijaz.h@kvteam.com](mailto:nijaz.h@kvteam.com), [pero.c@kvteam.com](mailto:pero.c@kvteam.com)

**Sadržaj**—U radu je opisan ispravljač sa popravkom faktora snage (Power factor correction - PFC) sa dva podizača (DC/DC pretvarača), takozvani interleaved ispravljač, i to njegova bridgeless konfiguracija, gdje se koriste samo dvije diode mosnog ispravljača, radi smanjenja gubitaka. Konstruisan je PFC velike izlazne snage (preko 4 kW), sa dobrom efikasnošću (i do 97%) i dobrim faktorom snage (preko 0,9). Koristilo se upravljačko kolo UCC28070, kao i modul tranzistor-dioda APT50N60JCCU2. Testiranja su rađena na standardnim mrežnim naponima od 230 Vac i 115 Vac. U radu su prikazani rezultati testiranja ovakvog ispravljača: efikasnost, faktor snage, sadržaj viših harmonika, kao i rezultati testiranja na elektromagnetne smetnje.

**Ključne riječi**- popravka faktora snage; PFC; Interleaved PFC; Bridgeless PFC; Semi-Bridgeless PFC; upravljačko kolo UCC28070; modul tranzistor-dioda; efikasnost kola za popravku faktora snage; elektromagnetne smetnje.

## I. UVOD

Ispravljački sklop za popravku faktora snage (PFC) se, u većini slučajeva, sastoji od podizača (*boost converter*), kao i od mosnog ispravljača, koji se postavlja na ulaz u cilju ispravljanja naizmjeničnog mrežnog napona [1][2]. Osnovno kolo je prikazano na Sl. 1. Ova topologija je dobra za niske i srednje nivoe snage (do 1 kW) [2].



Slika 1. Pojednostavljena šema PFC-a [3]

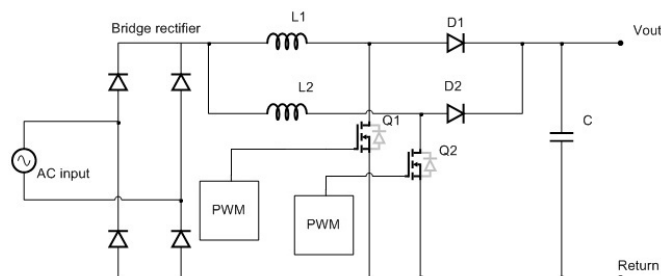
Glavni zadatak PFC-a je da uobličava ulaznu struju, sa ciljem povećanja aktivne snage koja se dobija iz mreže i smanjenja viših harmonika struje koji se emituju nazad u mrežu. Faktor snage ( $PF$ ) se definiše kao odnos aktivne snage ( $P$ ) i prividne snage ( $S$ ) i može imati vrijednost između nula i jedan. Cilj je da  $PF$  teži 1 [3][4].

$$PF = \frac{P[W]}{S[VA]} \quad (1)$$

U radu je opisan ispravljač za popravku faktora snage sa izlaznom snagom preko 4 kW. Za razliku od osnovnog ispravljača prikazanog na Sl. 1, korišćena su dva podizača (*interleaved PFC*). Pošto je jedan od glavnih ciljeva što veća efikasnost ispravljača, korišćena je *bridgeless* konfiguracija, gdje se ne koristi mosni ispravljač na ulazu. Na taj način se povećava efikasnost smanjenjem broja prekidačkih elemenata [2][3][4]. Korišćeno je upravljačko kolo UCC28070 *Texas Instruments*. Zbog jednostavnije konstrukcije i karakteristika komponenti, umjesto odvojenih tranzistora i dioda, korišten je modul tranzistor-dioda APT50N60JCCU2. Ovakav PFC je testiran i na 230 Vac i na 115 Vac ulaznom naponu, pri čemu su provjeravani efikasnost, faktor snage i elektromagnetne smetnje. Rezultati testiranja su dati u radu.

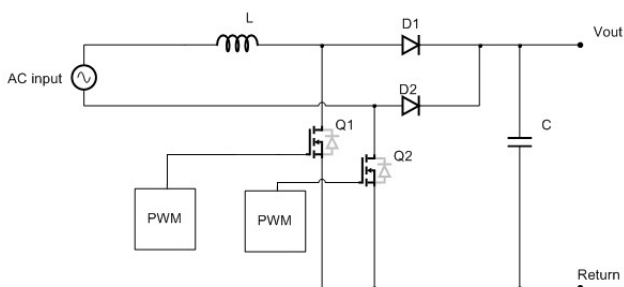
## II. INTERLEAVED I BRIDGELESS PFC

Na Sl. 2 je prikazana pojednostavljena šema *interleaved* ispravljača za popravku faktora snage. Ovakav PFC se sastoji od dva paralelna podizača koji rade fazno pomjereni za  $180^\circ$ . Na taj način se dobija manja talasnost ulazne struje, koja se dobija kao zbir struja zavojnica  $L_1$  i  $L_2$ . Talasnost ulazne struje će se u potpunosti eliminisati pri faktoru ispunje od 50%. Struja izlaznog kondenzatora predstavlja zbir struja dioda *interleaved PFC*-a umanjena za vrijednost jednosmjerne izlazne struje iz kola. [2][3][5].



Slika 2. Interleaved PFC [3]

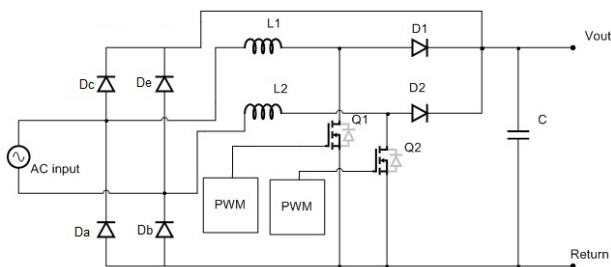
Na Sl. 3 je prikazana pojednostavljena šema *bridgeless PFC*-a. Cilj je povećanje efikasnosti ispravljača smanjenjem broja poluprovodničkih komponenti. U ovoj konfiguraciji, to je učinjeno eliminisanjem mosnog ispravljača [2][3]. Ulazna struja prolazi kroz onu granu koja je aktivna za polovinu talasa. Ipak, tranzistor neaktivne grane ima svoju ulogu, jer njegova povratna dioda služi da se zatvori strujni krug. Ovakva struktura eliminiše pad napona jedne diode, čime se povećava efikasnost [6].



Slika 3. Bridgeless PFC [3]

Ipak, ova struktura ima određene nedostatke, što je rezultat činjenice da je faza plivajuća u odnosu na masu *PFC*-a. Određeni broj *PFC* kontrolera treba da mjeri ulazni napon i struju zavojnice. Ove zahtjeve je teško ostvariti za *bridgeless* konfiguraciju. Pored ovih nedostataka, glavni problem predstavlja *EMI* filtriranje. Masa izlaznog napona je uvijek plivajuća u odnosu na odgovarajući AC ulaz. To dovodi do velikog šuma koji je teško filtrirati [6].

Da bi se prevazišli nedostaci *bridgeless PFC*-a, predložen je *semi-bridgeless* ispravljač (Sl. 4). Kod ove konfiguracije *PFC* zavojnica je podijeljena na dvije manje zavojnice i direktno spojena na AC ulaze. Takođe, dvije diode ( $D_a$  i  $D_b$ ) su spojene na masu izlaza *PFC*-a, čime ulazni napon više nije plivajući u odnosu na masu. Na ovaj način je ulazni napon *PFC*-a ispravljen sinusoida u odnosu na masu, čime se uklanja problem mjerenja napona. Takođe, postavljanjem diode se smanjuje šum, što olakšava *EMI* filtriranje [6].

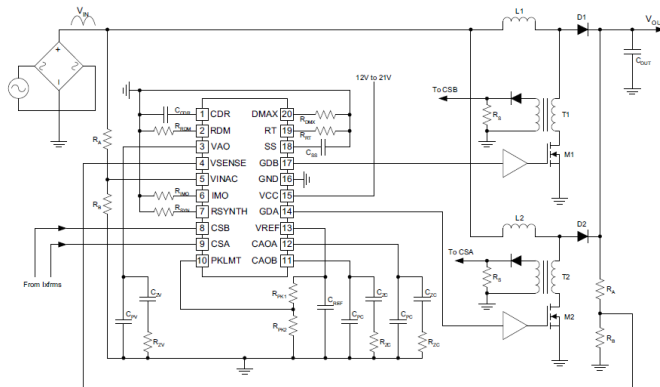


Slika 4. Semi-Bridgeless PFC [3]

Ovakav ispravljač, takođe, zahtijeva i dvije diode za prvo punjenje *PFC* kondenzatora ( $D_c$  i  $D_e$ ). Nakon punjenja kondenzatora i početka rada pretvarača ove dvije diode nemaju više nikakvu ulogu u radu *PFC*-a. U tome se razlikuju od standardnog *interleaved PFC*-a, jer je aktivna samo jedna dioda mosnog ispravljača [6]. Upravo je ovakav *Semi-Bridgeless PFC* ispravljač upotrijebljen i za njega su dati rezultati testiranja.

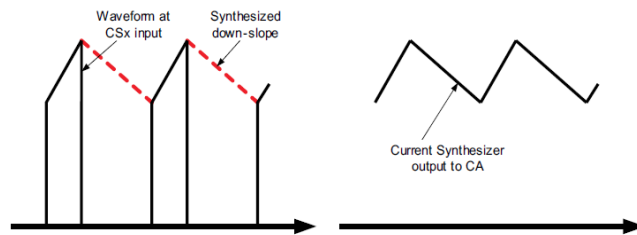
### III. UPRAVLJAČKO KOLO UCC28070

Da bi se zadržala jednostavnost ispravljača za popravku faktora snage, upotrijebljeno je upravljačko kolo UCC28070 *Texas Instrument*. Ovo kolo daje dva upravljačka signala (*PWM*) fazno pomjerena za  $180^\circ$ , što mu omogućava upravljanje *interleaved PFC*-om. Na Sl. 5 je prikazana pojednostavljena šema *interleaved PFC*-a sa upravljačkim kolom UCC28070 [7].



Slika 5. Pojednostavljena šema *interleaved PFC*-a sa upravljačkim kolom UCC28070 [7]

Važno je napomenuti da se ovo kolo može iskoristiti i za *semi-bridgeless* strukturu *PFC*-a, iz razloga što se za ovu strukturu koriste i mosni ispravljač i podizač, s tim da se zavojnice podizača povezuju direktno na naizmjenični ulazni napon, a ne na izlaz mosnog ispravljača. Na ovaj način se eliminišu dvije diode mosnog ispravljača i povećava se efikasnost *PFC*-a. Ovo je veoma bitno, jer upravljačko kolo UCC28070 rješava problem mjerenja struje zavojnice (Sl. 6). Za vrijeme vođenja glavnog prekidača, struje zavojnica se mjere na *CSA* i *CSB* pinovima upravljačkog kola preko strujnih transformatora. Istovremeno se odvija kontinualno mjerenje ulaznog i izlaznog napona preko *VINAC* i *VSENSE* pinova, što dozvoljava upravljačkom kolu da estimira struju zavojnice za vrijeme vođenja diode [7].

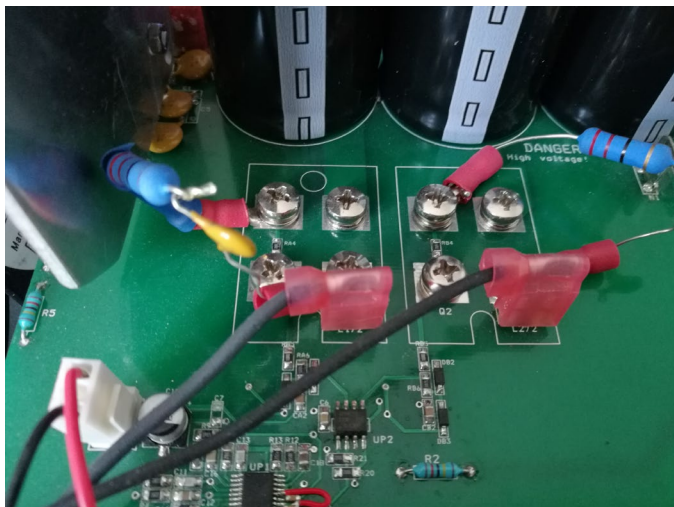


Slika 6. Izmjerena/estimirana struja zavojnice [7]

Još jedna od prednosti korišćenja upravljačkog kola UCC28070 je što *Texas Instruments* daje alat za proračun svih komponenti koje se koriste uz postavljene početne uslove: minimalni i maksimalni ulazni napon, minimalna i maksimalna ulazna frekvencija, maksimalna izlazna snaga, prekidačka frekvencija, izlazni napon itd. Detaljan proračun komponenti nije opisan u ovom radu.

#### IV. APT50N60JCCU2 MODUL TRANZISTOR-DIODA

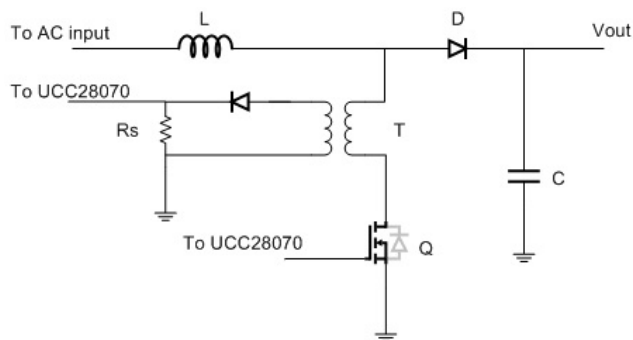
Radi pojednostavljenja šeme, smanjenja gubitaka i smanjenja elektromagnetnih smetnji, umjesto odvojenih tranzistora i dioda, iskorištena su dva modula tranzistor-dioda APT50N60JCCU2, sa sljedećim karakteristikama:  $V_{DSS} = 600$  V,  $I_D = 50$  A. Ovi moduli se koriste za kontrolu AC i DC motora, kod prekidačkih napojnih jedinica i ispravljača za popravku faktora snage. Na Sl. 7 je prikazan PFC ispravljač sa dva modula tranzistor-dioda.



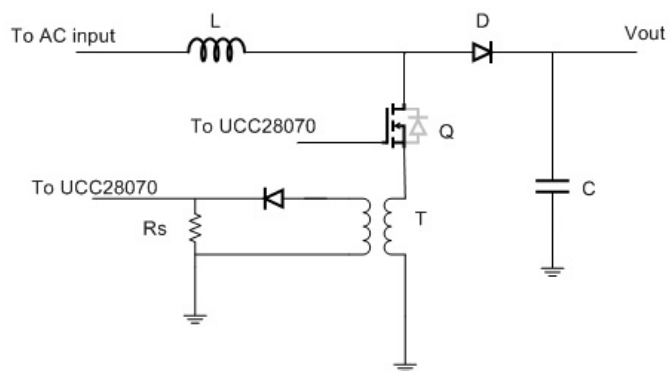
Slika 7. PFC ispravljač sa dva modula tranzistor-dioda

Tranzistor koji se koristi u modulu je *MOSFET CoolMos* sa izuzetno niskim  $R_{DSon} = 45$  m $\Omega$ . Dioda je SiC Šotkijeva dioda. Pakovanje je SOT-227. Prednosti ovog modula su izuzetne karakteristike pri radu na visokim frekvencijama, stabilno ponašanje pri različitim temperaturama, mogućnost direktnog montiranja na hladnjak itd. Detaljnije karakteristike modula su date u [8].

Kod upravljačkog kola UCC28070 se između drejna tranzistora i anode diode koristi strujni trafo. Primjenom ovog modula, to nije moguće, jer su drejn tranzistora i anoda diode u istoj tački. Zbog toga je strujni trafo postavljen između sorsa tranzistora i mase. Način postavljanja strujnog trafoa u slučaju odvojenih tranzistora i diode je dat na Sl. 8, dok je postavljanje strujnog trafoa u slučaju korišćenja modula prikazano na Sl. 9.



Slika 8. Postavljanje strujnog trafoa u slučaju korišćenja odvojenih tranzistora i diode



Slika 9. Postavljanje strujnog trafoa u slučaju korišćenja modula tranzistor-dioda

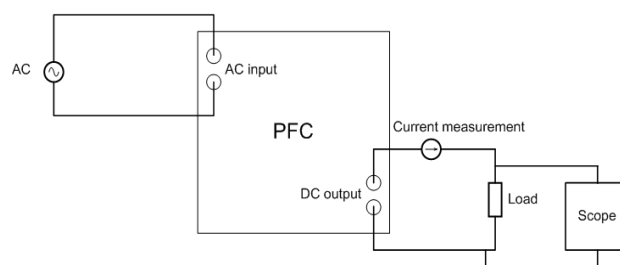
#### V. TESTIRANJE PFC-A

Testiran je *bridgeless PFC* sa upravljačkim kolom UCC28070 i sa modulima tranzistor-dioda APT50N60JCCU2. Prilikom testiranja su provjeravani faktor snage (*PF*), efikasnost ( $P_{out}/P_{in}$ ), kao i elektromagnetne smetnje koje emituje PFC (kondukcione i radijacione). Testiranja su rađena u sljedećim uslovima:

- Ulazni napon: 230 Vac i 115 Vac;
- Napon na izlazu PFC-a: 330 Vdc;
- Frekvencija rada PFC-a po jednom modulu: 147 kHz;
- Maksimalna snaga: 4150 W pri ulaznom naponu 230 Vac i 2200 W pri ulaznom naponu 115 Vac.

Maksimalna snaga na izlazu iz PFC-a zavisi od pojačanja u povratnoj sprezi po struji. U konkretnom slučaju, kod testiranog PFC-a se podešava odabirom  $R_s$  otpornika upravljačkog kola PFC-a (za manju vrijednost otpornika se dobija veća snaga). Ovaj otpornik se postavlja u paralelu sa strujnim trafoom svake grane PFC-a, kao što se može vidjeti na Sl. 5. Vrijednost  $R_s$  otpornika se određuje na osnovu odabranog strujnog trafoa. Za maksimalnu izlaznu snagu od 4150 W, vrijednost  $R_s$  otpornika treba da bude 5  $\Omega$ . Za ovu vrijednost otpornika, testiranja su rađena samo pri ulaznom naponu 230 Vac. Pri ulaznom naponu 115 Vac, PFC ne radi kako treba pri izlaznim snagama većim od 2500 W (nedostatak resursa), zbog čega se za ovu mrežu koristio 10  $\Omega$   $R_s$  otpornik, sa kojim je izlazna snaga ograničena na 2200 W.

Šema spajanja PFC kola na ulazni napon i opterećenje je data na Sl. 10.

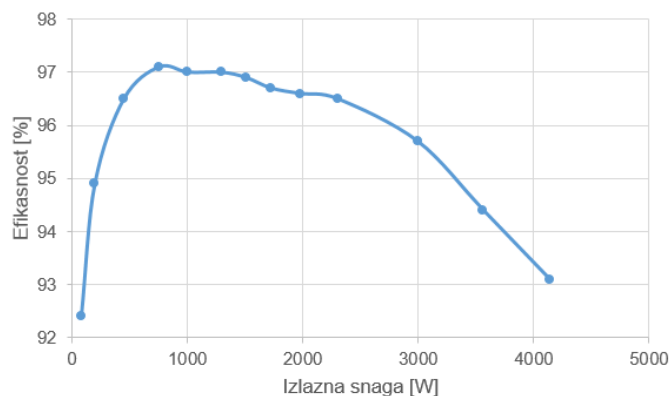


Slika 10. Šema spajanja PFC-a na ulazni napon i opterećenje [3]

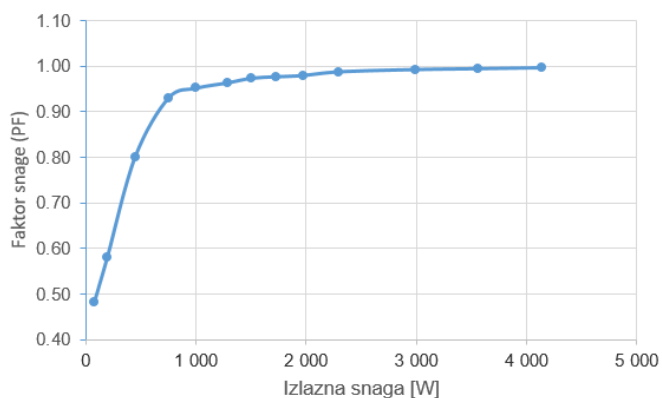
U Tabeli I. su dati faktor snage i efikasnost *PFC*-a za  $R_s$  5  $\Omega$ , pri različitim snagama, a na slikama 11 i 12 su dati grafik efikasnosti i grafik faktora snage u tom slučaju, respektivno.

TABELA I. FAKTOR SNAGE I EFIKASNOST *PFC*-A, ULAZNI NAPON 230 VAC,  $R_s$  5  $\Omega$

Ulazna snaga [W]	Izlazna snaga [W]	Faktor snage PF	Efikasnost $P_{out}/P_{in}$ [%]
87	80	0,482	92,4
207	197	0,58	94,9
465	449	0,8	96,5
777	754	0,93	97,1
1033	1002	0,951	97
1332	1293	0,963	97
1555	1506	0,973	96,9
1783	1724	0,976	96,7
2043	1974	0,979	96,6
2385	2300	0,987	96,5
3129	2993	0,992	95,7
3772	3562	0,994	94,4
4444	4137	0,996	93,1



Slika 11. Grafik efikasnosti, ulazni napon 230 Vac,  $R_s$  5  $\Omega$

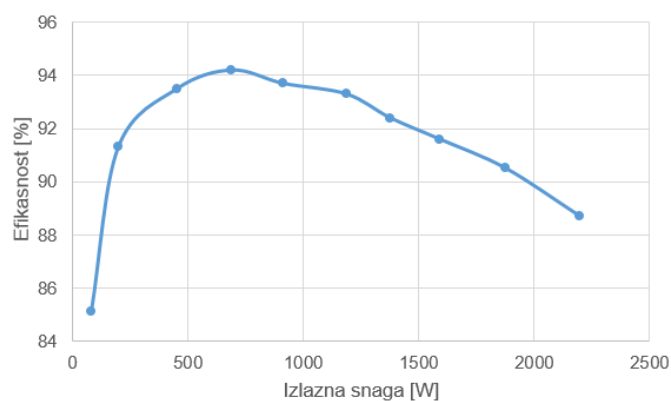


Slika 12. Grafik faktora snage, ulazni napon 230 Vac,  $R_s$  5  $\Omega$

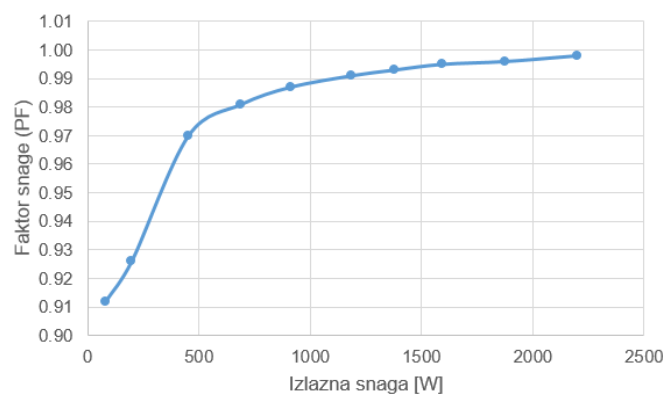
U Tabeli II. su dati faktor snage i efikasnost *PFC*-a za  $R_s$  10  $\Omega$ , ulazni napon 115 Vac, pri različitim snagama, a na slikama 13 i 14 su dati grafik efikasnosti i grafik faktora snage u tom slučaju, respektivno.

TABELA II. FAKTOR SNAGE I EFIKASNOST *PFC*-A, ULAZNI NAPON 115 VAC,  $R_s$  10  $\Omega$

Ulazna snaga [W]	Izlazna snaga [W]	Faktor snage PF	Efikasnost $P_{out}/P_{in}$ [%]
95	81	0,912	85,1
217	198	0,926	91,3
484	453	0,97	93,5
732	690	0,981	94,2
973	911	0,987	93,7
1271	1186	0,991	93,3
1490	1376	0,993	92,4
1737	1590	0,995	91,6
2074	1877	0,996	90,5
2476	2197	0,998	88,7



Slika 13. Grafik efikasnosti, ulazni napon 115 Vac,  $R_s$  10  $\Omega$

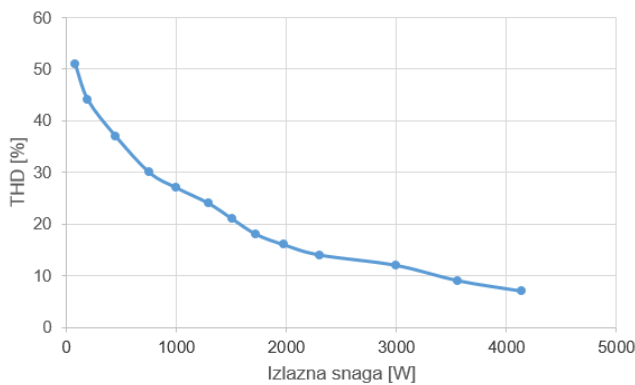


Slika 14. Grafik faktora snage, ulazni napon 115 Vac,  $R_s$  10  $\Omega$

Sljedeći parametar koji se provjeravao je sadržaj viših harmonika struje (*THD*). Rezultati su dati u Tabeli III i na Sl. 15 za ulazni napon 230 Vac, a za ulazni napon 115 Vac u Tabeli IV i na Sl. 16.

TABELA III. THD STRUJE, ULAZNI NAPON 230 VAC, RS 5 Ω

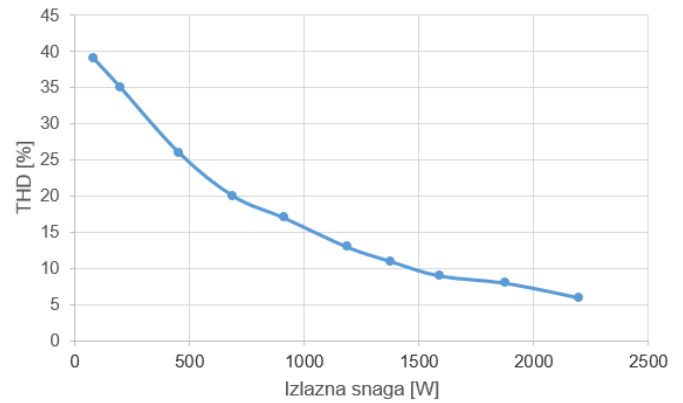
Ulazna snaga [W]	Izlazna snaga [W]	THD struje [%]
87	80	51
207	197	44
465	449	37
777	754	30
1033	1002	27
1332	1293	24
1555	1506	21
1783	1724	18
2043	1974	16
2385	2300	14
3129	2993	12
3772	3562	9
4444	4137	7



Slika 15. THD struje, ulazni napon 230 Vac, Rs 5 Ω

TABELA IV. THD STRUJE, ULAZNI NAPON 230 VAC, RS 5 Ω

Ulazna snaga [W]	Izlazna snaga [W]	THD struje [%]
95	81	39
217	198	35
484	453	26
732	690	20
973	911	17
1271	1186	13
1490	1376	11
1737	1590	9
2074	1877	8
2476	2197	6



Slika 16. THD struje, ulazni napon 230 Vac, Rs 5 Ω

Jedan od kriterijuma prilikom pravljenja PFC-a je bio i da se zadovolje granice elektromagnetnih smetnji definisane standardom CISPR11 (dio standarda EN\_61326-1). Ispod su navedene ove granice za industrijske uređaje u koje bi se ugrađivao testirani PFC. Testiranja su rađena na kondukcione i radijacione smetnje. Opseg frekvencija u kojima se testiraju kondukcione smetnje je od 0,15 MHz do 30 MHz. Standard definiše granice za *average* i *quasi-peak* mjerenja za kondukcione smetnje. Za *average* mjerenja, granica je 66 dB za frekvencije do 0,5 MHz i 60 dB za frekvencije iznad 0,5 MHz. Za *quasi-peak* mjerenja, granica je 79 dB za frekvencije do 0,5 MHz i 73 dB za frekvencije iznad 0,5 MHz [9].

Što se tiče radijacionih smetnji, opseg frekvencija u kojima se rade testiranja je od 30 MHz do 1 GHz. Standard definiše granice za *quasi-peak* mjerenja. Granice su 40 dB za frekvencije do 230 MHz i 47 dB za frekvencije iznad 230 MHz [9].

Testiranja, i za kondukcione i za radijacione smetnje, su rađena u sljedećim uslovima:

- Ulazni napon: 230 Vac;
- Izlazni napon: 330,7 Vdc;
- Izlazna struja: 3,58 A;
- Izlazna snaga: 1184 W.

Rezultati testiranja za kondukcione smetnje su dati u Tabeli V, dok su rezultati testiranja za radijacione smetnje dati u Tabeli VI.

TABELA V. TESTIRANJE PFC-A NA KONDUKCIONE SMETNJE

Frekvencija [MHz]	Quasi-peak [dB]	Average [dB]
4,502	43,1	32,0
15,443	41,8	34,7
8,560	40,2	32,7
0,274	67,8	50,0
14,018	39,0	32,0

Kao što se može vidjeti iz tabele, nijedna tačka ne izlazi iz granica definisanih standardom za kondukcione smetnje. Tačka koja je najbliža granici je na frekvenciji 274 kHz, gdje je *quasi-peak* 67,8 dB (11,2 dB ispod granice), a *average* 50,0 dB (16 dB ispod granice). Sve ostale tačke su 25 dB ili više ispod granice definisane standardom.

TABELA VI. TESTIRANJE PFC-A NA RADIJACIONE SMETNJE

Frekvencija [MHz]	Quasi-peak [dB]
31,438	31,2
49,670	26,1
71,212	27,2

Slično kao i za kondukcione smetnje, i za radijacione smetnje, nijedna tačka ne izlazi iz granica definisanih standardom. Tačka koja je najbliža granici je na frekvenciji 31,438 MHz, gdje je *quasi-peak* 31,2 dB (8,8 dB ispod granice).

Važno je napomenuti i to da su testiranja rađena bez ulaznog filtera. Uzimajući to u obzir, rezultati testiranja na elektromagnetne smetnje će biti još bolji kada se ispred PFC-a dodaju filteri za ulazni napon.

Kao što se može vidjeti u Tabeli I. faktor snage pri malim naponima je dosta mali. Razlog je niska ulazna struja, kao i prenosni odnos trafoa koji se koristio u kolu (prenosni odnos 200). Samim tim, struja kroz  $R_s$  otpornik je dosta niska (reda par mA) i utiče na faktor snage.

## VI. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen ispravljač za popravku faktora snage sa izlaznom snagom većom od 4 kW. Opisane su različite strukture *PFC* ispravljača, od kojih je za realizaciju ovog projekta iskorištena *semi-bridgeless* struktura, koja sadrži mosni ispravljač, ali koristi samo dvije diode ovog ispravljača. Testirani su: efikasnost ispravljača, faktor snage, *THD*, kao i uticaj na elektromagnetne smetnje. Ova struktura je iskorištena kako bi se postigla što veća efikasnost i faktor snage. U rezultatima se može vidjeti da je za 4 kW *PFC*, efikasnost veća od 92% na svim snagama, dok je najveća efikasnost od 97% na snagama od 1 kW do 2 kW. Iznad 2 kW efikasnost počinje da se smanjuje. Razlog je veća izlazna struja (s kvadratom struje se povećavaju gubici na komponentama). Do 3,5 kW efikasnost je iznad 95%. Faktor snage je na svim snagama većim od 700 W iznad 0,9. To su vrijednosti dobijene pri ulaznom naponu od 230 Vac. Pri ulaznom naponu od 115 Vac,

se smanjuje efikasnost, ali se povećava faktor snage, što se može vidjeti iz rezultata prikazanih za maksimalnu izlaznu snagu od 2200 W. Pored ovih testova, rađena su testiranja *PFC*-a i na elektromagnetne smetnje, gdje je utvrđeno da ispravljač za popravku faktora snage zadovoljava granice definisane standardom CISPR11.

## LITERATURA

- [1] Fairchild Semiconductor, [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com), "Power Factor Correction (PFC) Basics," Avgust 2004.
- [2] Fariborz Musavi, Wilson Eberle, William G. Dunford, "A High-Performance Single-Phase Bridgeless Interleaved PFC Converter for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Battery Chargers," IEEE Transactions on Industry Applications, Jul/Avgust 2011.
- [3] Saša Vučićević, Nijaz Hadžimejlić, Pero Čeklić, "Testiranje i upoređivanje iterleaving i bridgeless kola za popravku faktora snage (PFC)," Infoteh-Jahorina, Mart 2015.
- [4] ON Semiconductor, [www.onsemi.com](http://www.onsemi.com), "Power Factor Correction (PFC) Handbook, Choosing The Right Power Factor Controller Solution," April 2014.
- [5] Michael O'Loughlin, "An Interleaving PFC Pre-Regulator For High-Power Converters," Texas Instruments, 2006.
- [6] Liu ChueChao, Wang ZhiHao, "UCC28070 Implement Bridgeless Power Factor Correction (PFC) Pre-Regulator Design," Texas Instruments, Juli 2009.
- [7] Texas Instruments, "UCC28070 Interleaving Continuous Conduction Mode PFC Controller," Novembar 2007.
- [8] MicroSemi, "APT50N60JCCU2 – Rev 3," Oktobar 2012.
- [9] International Standard IEC "CISPR11 - Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement," Maj 2009.

## ABSTRACT

This paper explains power factor correction circuit with two boost converters in the bridgeless configuration. PFC is designed with high power output (over 4 kW). This type of PFC is controlled with the TI controller UCC28070. Transistor-diode modules APT50N60JCCU2 were used to satisfy the circuit's characteristics. Testing has been performed on 230 Vac and 115 Vac input voltages. Following characteristics were tested and analyzed: efficiency, power factor, THD and EMI. Main goal was to achieve good efficiency and power factor and these results are given in the paper. Additionally, EMI was tested in order to approve that this circuit works according to the defined standard.

## SEMI-BRIDGELESS PFC CHARACTERISTICS ANALYSIS WITH OUTPUT POWER HIGHER THAN 4 KW

Saša Vučićević, Nijaz Hadžimejlić, Pero Čeklić