

## Tiristorski ispravljači sa digitalnim regulatorima zasnovanim na mikrokontroleru 80C196 za sisteme besprekidnog napajanja

Vladimir Vukić

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd

[vladimir.vukic@ieent.org](mailto:vladimir.vukic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu su predstavljeni tiristorski ispravljači sa digitalnim regulatorima razvijenim u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”. Digitalni regulatori ispravljača tipa „DRI 05” i „DRI 07” zasnovani su na mikrokontroleru „Intel” 80C196KB16. Detaljno su opisana primenjena tehnička rešenja i iskustva stečena u industrijskoj eksploataciji tiristorskih ispravljača. Nova rešenja primenjena na digitalnim regulatorima Instituta su funkcije automatskog trostrukog restarta, detekcije nesimetrije tiristorskog mosta i visokog bruma ispravljača, kao i programskog histerezisa za smenjivanje regulatora napona i struje. Detaljno su analizirani odzivi primenjenih PI regulatora laboratorijskog tiristorskog ispravljača na izlaznom RLC kolu. Predstavljeni su i snimci talasnih oblika napona i struja ispravljača dobijeni u realnim pogonskim uslovima.

**Ključne reči:** tiristorski ispravljač, mikrokontroler 80C196, PI regulator, sistem drugog reda, srednje vreme između otkaza

### 1. Uvod

Krajem 20. veka i tokom prve decenije 21. veka u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” proizveden je veliki broj uređaja energetske elektronike i merne tehnike zasnovan na „Intel”-ovim mikrokontrolerima familije 80C196KB/KC. Najveći broj uređaja za čije upravljanje su korišćeni pomenuti mikrokontroleri su tiristorski ispravljači za punjenje baterija u razvodima jednosmerne struje i napajanje plazmatronskih elektroda. Najveći značaj mikrokontrolerski tiristorski ispravljači Instituta „Nikola Tesla” imaju u elektranama Elektroprivrede Srbije, gde služe kao izvori jednosmerne struje i punjači baterija u sistemima besprekidnog i sigurnosnog napajanja. Ispravljači sa digitalnim regulatorima zasnovanim na mikrokontroleru „Intel”

80C196KB16 podržavaju pet blokova termoelektrana i četiri agregata hidroelektrana čija je ukupna instalisana snaga 2280 MVA, što predstavlja oko 32% instalisane snage elektrana Elektroprivrede Srbije u Centralnoj Srbiji i Vojvodini. Nakon višegodišnje eksploatacije ispravljača i praćenja njihovog rada u industrijskim postrojenjima moguće je predstavljanje rezultata o pouzdanosti i radnim karakteristikama tiristorskih ispravljača upravljanijih mikrokontrolerima 80C196KB16.

U radu je dat pregled razvoja elektronskih uređaja zasnovanih na mikrokontrolerima "Intel" 80C196 u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”, sa posebnim osvrtom na razvoj regulisanih tiristorskih ispravljača serije DRI. Dat je i kratak opis ovih uređaja, a potom su predstavljeni rezultati ispitivanja odziva regulatora i talasnih oblika napona i struje ispravljača.

## **2. Razvoj elektronskih uređaja zasnovanih na mikrokontroleru 80C196 u Institutu „Nikola Tesla”**

Rad na mikroprocesorskoj kartici zasnovanoj na mikrokontroleru "Intel" 80C196KB u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” počeo je 1994. godine u Centru za automatiku i regulaciju, u okviru rada na projektu Ministarstva za nauku i tehnologiju Srbije „Razvoj porodice digitalnih regulatora brzine asinhronih motora” [1].

Mikrokontroler 80C196KB je kompanija "Intel" predstavila novembra 1990. godine [2], kao dalji razvoj procesora 8096BH iz familije MCS-96 [2]. Mikrokontroler 80C196KB je 16-bitni "fixed-point" procesor zasnovan na CHMOS tehnološkom procesu, sa radnom frekvencijom 12 MHz, maksimalne brzine rada 1,5 MIPS (miliona osnovnih instrukcija u sekundi). Raspolaže sa osam 10-bitnih A/D konvertora, dva 16-bitna tajmera, 232 bajta registarskog RAM-a na samom čipu, 16 adresnih linija za povezivanje periferija, 64 kB adresnog prostora, 16 bidirekcionih ulaza (među njima se nalaze i serijski port i jedan PWM izlaz), četiri „brza” ulaza (HSI, eng. "High speed input") i četiri „brza” izlaza (HSO, eng. "High speed output") [2]. Radni napon kola je +5V DC. Naknadno je kompanija "Intel" tržištu ponudila unapređenu verziju ovog mikrokontrolera pod oznakom 80C196KB16, koja je i korišćena za upravljanje tiristorskim ispravljačima Instituta.

U Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” napravljena je serija mikroprocesorskih kartica („MK”, „uP”, „LAR196”, „uP2” i „uP3”) na kojima se, pored mikrokontrolera "Intel" 80C196KB/KC, nalazi i EPROM od 32 kB, eksterni RAM od 2 kB, eksterni EEPROM od 8 kB, kao i paralelni interfejs (PIA) tipa 82C55, uz ostala prateća logička, drajverska i komunikaciona integrisana kola [3],[4]. Eksperimentisano je i sa drugačijim konfiguracijama, ali je ova koncepcija prevladala na gotovo svim ugrađenim uređajima.

Prvi uređaji Centra za automatiku i regulaciju zasnovani na ovom "Intel"-ovom mikroprocesoru isporučeni elektranama Elektroprivrede Srbije bili su

tiristorski sistemi pobude za sinhronu generatore A i B snage 54 MVA u hidroelektrani „Bistrica”, koji su pušteni u rad 2000. godine [3]. Kasnije su usledili monofazni tranzistorski invertori i statičke preklopke [5]. U Centru za električna merenja Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla” su pravljene brojni digitalni merni uređaji zasnovani na mikrokontroleru „Intel” 80C196 [6].

Novembra 2003. godine počeo je razvoj mikroprocesorskih regulatora plazmatronskih ispravljača „MRP 196” zasnovanih na 16-bitnom mikrokontroleru „Intel” 80C196KB16 [4],[7], a laboratorijski eksperimenti i ispitivanja na postrojenju sastavljenom od 16 ispravljača MARIP 350-300 sa rednim tiristorskim mostovima, proizvedenih u preduzeću „Minel-Automatika” sa digitalnim regulatorima Instituta, trajali su od jula 2004. godine. Marta 2006. godine je uspešno pušteno u rad svih 16 ispravljača sa pratećim plazmatronskim elektrodama u pilot – postrojenju termoelektrane „Nikola Tesla A”. Do decembra 2006. godine je za Institut za nuklearne nauke „Vinča” razvijena i modifikacija digitalnog regulatora MRP-196RP za rekonstrukciju plazmatronskog ispravljača sa paralelnim tiristorskim mostovima MARIP 500-300. Ukupna snaga pomenutih 17 plazmatronskih ispravljača je 2800 kVA.

U martu 2005. počeo je rad na digitalnom regulatoru ispravljača „DRI 05”, a novembra iste godine je izvršena rekonstrukcija i puštanje u rad prvog tiristorskog ispravljača sa starom analognom elektronikom umesto koje je ugrađen novi digitalni regulator [8]. Februara 2006. godine je pušten u rad i prvi tiristorski ispravljač (DRI 220-63), koji je u potpunosti napravljen u Institutu sa novim regulatorom tipa „DRI 05”, zasnovanom na mikrokontroleru „Intel” 80C196KB16 [9]. U januaru 2007. godine proizveden je i pušten u rad i drugi tiristorski ispravljač DRI 220-63 (220V, 63A) za Beočinsku fabriku cementa „Lafarge”) sa regulatorom tipa „DRI 05”. Uređaji DRI 220-63 predstavljaju prve samostalne tiristorske ispravljače sa digitalnim regulatorima za sisteme besprekidnog napajanja jednosmernom strujom proizvedene u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla”. Ukupna snaga dva pomenuta ispravljača je 40 kVA, a u periodu novembar 2005. – oktobar 2009. godine rekonstruisano je još 14 starih poluupravljivih tiristorskih ispravljača „Energoninvest” TPA u termoelektrani „Nikola Tesla B”, ukupne snage 700 kVA. U ispravljače tipa TPA su ugrađeni digitalni regulatori tipa „DRI 05” umesto starih analognih upravljačkih elektronika, uz zamenu svih pratećih prekidača, releja, sijalica i provodnika upravljačkog kola.

Septembra 2007. godine su pušteni u rad i prvi ispravljači sa digitalnim regulatorima tipa „DRI 07”, unapređenim varijantama regulatora „DRI 05” takođe zasnovanim na procesorima 80C196KB16 [10]. U periodu od septembra 2007. do novembra 2010. godine ugrađeno je i pušteno u rad 11 novih punoupravljivih tiristorskih ispravljača proizvedenih u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” sa regulatorima tipa „DRI 07”, ukupne snage 850 kVA (pet ispravljača DRI 220-250 i četiri DRI 110-500 u termoelektrani „Nikola Tesla A” [10], kao i po jedan DRI 110-100 u hidroelektranama „Ovčar Banja” i „Međuvršje” [11]).

Dvadeset sedam tiristorskih ispravljača u sistemima besprekidnog

napajanja sa digitalnim regulatorima tipa „DRI 05” i „DRI 07” su od 23. 11. 2005. do 31.12.2010. godine proveli u radu ukupno oko 627000 časova (ispravljači rade cele godine gotovo bez pauze – obično se isključuju samo jednom godišnje oko 10 časova, za vreme periodičnog pražnjenja baterije). U tom periodu je, uključujući i havarijske situacije u pogonu, evidentirano pet otkaza komponenti na upravljačkim elektronikama koji su izazvali ispade ispravljača iz pogona (u svim slučajevima su baterije nastavile da napajaju potrošače i nije došlo do ispada postrojenja zbog nestanka jednosmernog napona). Na komponentama energetskog kola ispravljača serije DRI proizvedenih u Institutu „Nikola Tesla” nije bilo otkaza. Na osnovu navedenih podataka može se izvesti zaključak da je empirijska vrednost faktora MTBF (srednje vreme između kvarova, *eng. “Mean time between failures”*) tiristorskih ispravljača serije DRI oko 125400 časova.

Ukupno je proizvedeno i rekonstruisano 44 tiristorskih ispravljača, kod kojih je upravljanje ostvareno pomoću mikrokontrolera “Intel” 80C196KB16, ukupne snage 3,86 MVA. Uz ove ispravljače je isporučeno i sedam kompleta rezervnih kartica upravljačke elektronike.

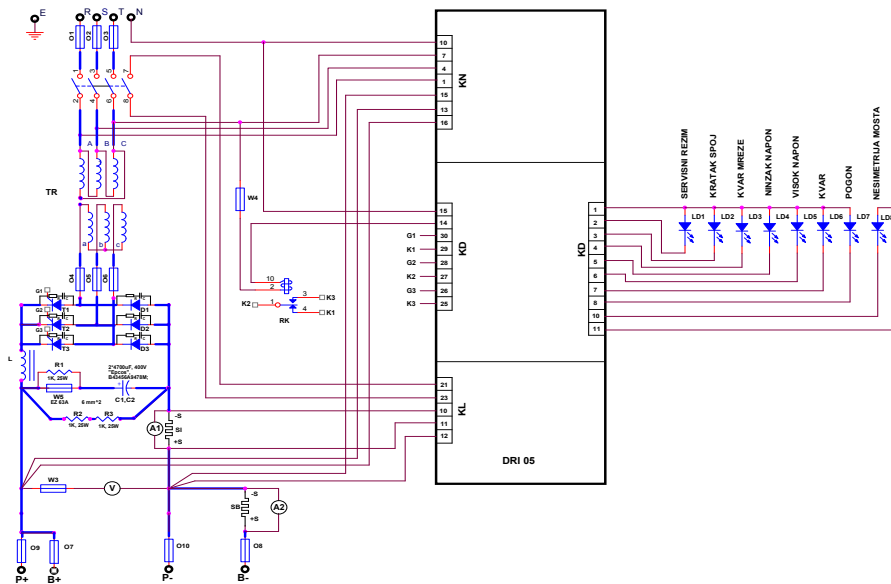
### **3. Karakteristike tiristorskih ispravljača sa digitalnim regulatorima tipa „DRI 05” i „DRI 07”**

Prvi tiristorski ispravljač sa digitalnim regulatorom je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” napravljen i pušten u rad maja 1992. godine, kao deo integrisanog monofaznog sistema besprekidnog napajanja (SBN) snage 10 kVA u fabrici za preradu vode „Rzav” u Arilju [12]. Upravljačka elektronika ispravljača je, isto kao i u slučaju invertora i statičke preklopke ovog SBN-a, bila zasnovana na 8-bitnom mikrokontroleru 80535 [13]. Uređaj je radio do 1994. godine, kada je došlo do udara groma u blizini postrojenja. Korisnici su procenili da je popravka SBN-a nerentabilna, a dalji rad na ovim uređajima u Institutu je obustavljen nakon odlaska rukovodioca projekta u inostranstvo.

Od 1968. godine pa sve do maja 2004. godine Institut je kupcima u elektroprivredi i industriji isporučivao automatske regulisane tiristorske ispravljače serije ARI, sa nekoliko varijanti upravljačke analogne elektronike.

Ugradnjom mikroprocesorske upravljačke elektronike tipa „DRI 05” u tiristorski ispravljač namenjen za punjenje baterije ostvarena je mogućnost projektovanja različitih regulatora napona i struje, kao i lak uticaj na parametre regulatora. Pored uvođenja prednosti koje pružaju digitalni regulatori, omogućeno je i formiranje složenih radnih sekvenci, kao i komunikacija uređaja sa nadređenim računarnom preko serijske veze standarda RS 485. Automatski trostruki restart u periodu od 90 sekundi nakon pojave kvara predstavlja rešenje koje ranije nije bilo primenjivano na tiristorskim ispravljačima. Detekcija nesimetrije mosta, odnosno otkaza tiristora ili ultrabrzog osigurača ispravljačkog mosta predstavlja još jednu specifičnost

digitalnog regulatora „DRI 05”.



Slika 1. Šema električnih veza ispravljača DRI 220-63

Pomoću mikroprocesorske kartice „uP3” je programski realizovan veliki broj funkcija. Ispravljači sa digitalnim regulatorom tipa „DRI 05” imaju funkcije automatskog trostrukog uključanja u slučaju trajnog kvara, „mekog” starta, kontrole prisustva mrežnog napona, detekcije visokog i niskog napona baterije, kratkog spoja, nesimetrije napona tiristorskog mosta izazvane otkazom tiristora, kao i signalizacije kvara i ispada uređaja beznaponskim kontaktima i svetlosnom signalizacijom. Programski su realizovane regulacione petlje po naponu i struji ispravljača. Režim punjenja baterije (dopunjavanje, punjenje, forsirano punjenje) može da se podesi ručno, a moguće je i zadavanje automatskog režima punjenja baterije prema IUU karakteristici. Napajanje regulatora „DRI 05” izvedeno je preko DC/DC pretvarača napajanog dvostrano, mrežnim naponom 220V, 50 Hz i naponom baterije.

Ispravljač održava konstantan napon na akumulatorskoj bateriji u slučaju da su svi mereni parametri u dozvoljenim granicama. U slučaju da dođe do reagovanja prenaponske ili kratkospojne zaštite, dolazi do isključivanja ispravljača. Nakon 30 sekundi od delovanja zaštite ispravljač se automatski uključuje i ukoliko nije prisutan uzrok delovanja zaštite, nakon prolaska kroz režim mekog starta ispravljač ulazi u stacionarno stanje. Ukoliko zaštite i dalje reaguju, ispravljač se ponovo isključuje. Ako je i posle tri automatska uključanja, između kojih protekne 30 sekundi, prisutan uzrok delovanja zaštite, upravljačka elektronika ispravljača prekida sekvence automatskog uključivanja ispravljača i neophodan je ručni reset ispravljača.

U slučajevima rada ispravljača sa nalivenim olovnim baterijama, preko četvoropoložajnog prekidača režima punjenja baterije (dopunjavanje, punjenje, forsirano punjenje i automatski rad) može da se zada ručni ili automatski režim punjenja baterije prema IUU karakteristikama. U slučaju rada sa hermetizovanim olovnim baterijama nema potrebe za ugradnjom prekidača režima rada, već prilikom uključivanja ispravljač automatski prelazi na referentne vrednosti tipične za režim dopunjavanja.

Prilikom popravke ili ispitivanja ispravljača moguće je njegovo prebacivanje u servisni režim rada. Ispravljač u servisni režim rada može da se prebaci zadavanjem komande sa računara, preko galvanski izolovane "half - duplex" serijske veze standarda RS 485 (korišćeno je kolo MAX 1480A). Pomoću serijske veze više mikroprocesorskih regulatora može da komunicira sa nadređenim računarom (dobijaju potrebne parametre, prosleđuju merene veličine, kao i parametre režima rada i delovanja zaštita), bez rizika od otkaza komunikacione opreme zbog različitih potencijala baterija. U servisnom režimu se vrši deaktiviranje svih programskih zaštita, a vrednost ugla paljenja tiristora, odnosno izlaznog napona se zadaje neposredno, bez mogućnosti regulacije. Na ovaj način je moguće ispitati ispravljač u celom opsegu radnih vrednosti struja i napona.



*Slika 2. Digitalni regulator ispravljača „DRI 07” u laboratoriji*

Digitalni regulator ispravljača „DRI 05” se nalazi u zatvorenoj aluminijumskoj kutiji sa priključnim klemama sa bočne leve i desne strane. Na prednjoj strani kutije su montirani osigurači u kolima naizmenične i jednosmerne struje, potencijometar za podešavanje napona ispravljača i priključni konektor kabla za komunikaciju. Kutija regulatora sadrži dve ploče

upravljačke elektronike, montirane na dva nivoa. Kartica napajanja i DC/DC pretvarač (opsega ulaznih jednosmernih napona 120 - 300 V) montirani su na dnu kutije, a na višem nivou je montirana osnovna štampana kartica analogne upravljačke elektronike „DIGISP 05”.

Ukoliko postoje odstupanja od referentnog napona ispravljača, pomoću potenciometra na kutiji elektronike može se podesiti vrednost izlaznog napona u opsegu  $\pm 10\%$  od nominalne vrednosti.

Napajanje se obezbeđuje sa primarne strane ispravljačkog transformatora. Napon sa osnovnog pretvarača se transformiše na četiri naponska nivoa preko DC/DC pretvarača „Traco Power” serija TEN4 i TEN8: +5V, za napajanje mikrokontrolera,  $\pm 12V$ , za napajanje analogne elektronike i upaljača, kao i +12 V, za napajanje galvanski izolovanih ulaznih optokaplerskih kanala.

Sinhronizacioni impulsi se dobijaju od sinusoida mrežnog napona, uz vršenje neophodnih prilagođenja za rad procesora. U okviru upaljačkog sklopa realizovano je šest galvanski izolovanih izlaza za paljenje tiristora. Signal se do gejta tiristora prenosi preko impulsnog transformatora.

Merena vrednost izlaznog napona ispravljača se dovodi u regulator „DRI 05” sa pozitivnog pola baterije, a potom se vrši prilagođavanje naponskog nivoa preko naponskog razdelnika i filterskog stepena. Izlazni napon ispravljača se preko razdelnika napona dovodi na razdvojni stepen, gde se prilagođava i šalje u kontroler kao regulacioni signal. Za potrebe zaštite i merenja na A/D konvertor mikrokontrolera se šalje i filtrirani signal napona. U istom sklopu nalazi se i kolo za detekciju ispada baterije. Pojava visokog bruma ispravljača, odnosno velike naizmenične komponente izlaznog jednosmernog napona predstavljaju indikaciju ispada baterije, odnosno kvara elektrolitskih kondenzatora (ukoliko su montirani na izlazu uređaja) prilikom rada ispravljača bez baterije. Signal sa šanta ispravljača se dovodi na diferencijalni pojačavač, gde se vrši filtriranje i pojačavanje signala do nivoa 0 - 5 V. Prilagođena vrednost, kao i filtrirani signal, dovode se na A/D konvertor mikrokontrolera za potrebe regulacije i zaštite. Pored obrade u mikroprocesoru, signal struje se dovodi i na aktivni filter frekvencije 100 Hz, koji u slučaju pregorevanja jednog osigurača u tiristorskom mostu ili prestanka rada jednog tiristora detektuje nesimetriju tiristorskog mosta.

Prekostrujna zaštita je realizovana i kao nezavisni analogni sklop. Delovanje prekostrujne zaštite dovodi do blokade prolaska impulsa ka gejtovima tiristora.

Mikroprocesorska kartica „uP3” je zasnovana na mikrokontroleru "Intel" 80C196KB16. Upravljačke funkcije mikroprocesorske kartice „uP3” su realizovane programski, a osnovna namena je generisanje upaljačkih impulsa za tiristore i realizacija regulatora. Kompletan softver je napisan u programskom jeziku „C”. Prilikom detekcije prisustva ulaznog naizmeničnog napona, mikrokontroler u prvom prolazu određuje fazni redosled napona. Takođe, vrši se detekcija prisustva faza trofaznog naizmeničnog napona i

provera zaštitnih funkcija.

Osnova programskog faznog pomerača je preuzeta sa završne varijante digitalnog regulatora plazmatronskog ispravljača [4],[7]. Upravljačke funkcije su na programskom nivou realizovane u okviru dve prekidne funkcije. Sinhronizaciona prekidna funkcija radi na 20 ms, odnosno definisana je trajanjem jedne periode mrežnog napona. Regulaciona prekidna funkcija se izvršava svakih 1,66 ms. Tokom sinhronizacione prekidne funkcije se vrši merenje potrebnih vremenskih intervala i praćenje prisustva faze. Za vreme trajanja regulacione prekidne funkcije vrši se proračun izlaza regulatora, A/D konverzija merenih signala i određuje se ugao paljenja tiristora. Provera stanje zaštitnih funkcija (visok i nizak napon, nesimetrija mosta, ispad baterije, kratak spoj, kvar mrežnog napajanja) i režima rada (režim punjenja baterije, servisni režim, položaj glavnog prekidača) vrši se u beskonačnoj petlji u osnovnom delu programa.

Unapređenje digitalnih regulatora tiristorskih ispravljača tipa „DRI 07” ogleda se u uvođenju detekcije pojave zemljospoja na izlaznim kontaktima ispravljača, unapređenju upravljačkog programa, uvođenju zaštitnih funkcija detekcije pregrevanja hladnjaka i pregorevanja osigurača tiristorskog mosta, dojavi merenih veličina signalom 4-20 mA, povećanju broja izlaznih logičkih signala sa 10 na 15, uvođenju kanala za merenje struje baterije, dodavanju tastera za resetovanje mikrokontrolera u slučaju kvara, kao i u povećanju opsega ulaznog jednosmernog napona napajanja DC/DC pretvarača na 85 V – 375 V.

U digitalnom regulatoru tipa „DRI 07” izvršeno je uvođenje većeg broja analognih (struja ispravljača, napon ispravljača) i relejnih izlaznih signala (nizak napon baterije, visok napon, kratak spoj, kvar) pomoću kojih je omogućeno efikasno praćenje rada svih ispravljača u postrojenju od strane nadređenog „SCADA” računarskog sistema. Integrisanje zemljospojnog relea na kartici analogne elektronike „DIGISP 07” dovelo je do povećanja broja funkcija ispravljača vezanih za nadzor baterije i potrošača jednosmerne struje, uz mogućnost evidentiranja spojeva pozitivnog i negativnog pola baterije sa sistemom uzemljenja i prosleđivanja informacije centralnom računaru. Prag reagovanja zemljospojnog relea je podesiv u opsegu 10 k $\Omega$  - 1 M $\Omega$ . Uvođenjem kanala za merenje struje sa šanta baterije, uz postojeći signal ukupne struje ispravljača, dobija se mogućnost ograničavanja struje baterije i u režimu dopunjavanja, kada je neophodno da se obezbedi nominalna struja ispravljača koju dele potrošači i baterija. Postojanje tastera za reset mikrokontrolera daje korisniku mogućnost za jednostavno otklanjanje problema u funkcionisanju upravljačke elektronike u slučaju poremećaja u izvršavanju instrukcija procesora. Povećanje opsega ulaznog napona na DC/DC pretvaraču namenjenom za napajanje upravljačke elektronike daje mogućnost ispravnog rada ispravljača i u slučajevima pojave većih prenapona u razvodu jednosmerne struje, kao i rad sklopova za nadzor stanja baterije i serijske veze sa nadređenim računarom i u slučaju kvara mrežnog napajanja i dubokog pražnjenja baterije. Uvođenjem dva režima rada LED dioda, u kojima signalne diode stalno sijaju ili se naizmenično pale i gase, uz postojanje



dvostrukih tumačenja signala na natpisnim pločama, obezbeđen je prikaz većeg broja signala režima rada i zaštitnih funkcija od raspoloživog broja signalnih kanala.

Pored 13 proizvedenih i 14 rekonstruisanih tiristorskih ispravljača za sisteme besprekidnog napajanja jednosmernom strujom serije DRI, Institut je u od marta 2007. do jula 2010. godine proizveo i u hidroelektranama EPS-a pustio u rad još sedam tiristorskih ispravljača serije DRI-PT, zasnovanih na programabilnom logičkom kontroleru "Omron" CJ1G i operatorskom panelu osetljivom na dodir "Omron" NS5, ukupne snage 210 kVA [14]-[16]. Razvoj ispravljača serija DRI i DRI-PT je tekao paralelno, pa su pojedina tehnička i programska rešenja razvijena za jedan projekat uključivana i na drugi (npr. tehničko rešenje zemljospojnog relea za karticu „DIGISP 06” (ispravljač DRI 220-70PT) je, sa manjim modifikacijama, iskorišćeno i na kartici analogne elektronike „DIGISP 07” digitalnog regulatora tipa „DRI 07”). Zbog toga nije moguće potpuno razdvajanje projekata tiristorskih ispravljača sa digitalnim regulatorom serija DRI i DRI-PT. Ispravljači serije DRI-PT podržavaju deset agregata hidroelektrana (hidroelektrana „Đerdap 1”, reverzibilna hidroelektrana „Bajina Bašta”, dodatna elektrana hidroelektrane „Đerdap 2”) čija je ukupna instalisana snaga 1910 MVA, što predstavlja oko 26% instalisane snage elektrana Elektroprivrede Srbije u Centralnoj Srbiji i Vojvodini.

Od avgusta 2008. godine se u Institutu „Nikola Tesla” proizvodi još jedna serija tiristorskih ispravljača sa digitalnim regulatorima zasnovanim na mikrokontrolerima kompanije „Microchip” [17].

#### **4. Rezultati ispitivanja i diskusija**

Prilikom ispitivanja u laboratoriji, kao i prilikom puštanja u rad ispravljača DRI 220-250 (nominalni napon dopunjavanja 245,3 V, nominalna struja 250 A) i DRI 24-600 (nominalni napon dopunjavanja 29 V, nominalna struja 600 A) izvršeno je snimanje odziva regulatora napona i struje. Snimanje talasnih oblika struje i napona vršeno je pomoću 100 MHz digitalnog osciloskopa "Fluke" 196C. Signal struje je dobijen pomoću strujnih klešta "Chauvin Arnoux" PAC22 (1400 A, 0-10 kHz), dok je za merenje signala napona korišćena sonda "Metrix" HX0005 (450 MHz, 10:1, 14 pF).

Na Slikama 3 i 4 su prikazani talasni oblici napona i struje laboratorijskog ispravljača DRI 220-10 (nominalni parametri 220 V, 10 A). Ispravljač je radio sa memorijom ispravljača DRI 220-250, a ovakvo ispitivanje je moglo da se izvrši jer na merni kanal struje dolazi signal sa šanta opsega 0 – 60 mV, pa na rad mikroprocesora nema uticaja da li je šant za 10 A ili 250 A. Ispitivanje je vršeno na paralelnom rezistivno – kapacitivnom opterećenju, sastavljenom od potrošača otpornosti 200  $\Omega$  i elektrolitskih kondenzatora kapacitivnosti 9400  $\mu$ F. Induktivnost redne prigušnice laboratorijskog ispravljača je 40 mH.

Ispitivani su odzivi različitih PI regulatora napona na step – poremećaj, izazvan promenom režima rada ispravljača, odnosno prebacivanjem prekidača režima rada iz položaja dopunjavanja (referentni napon 245,3 V) u položaj punjenja (referentni napon 266,2 V). Na ovaj način je dobijena trenutna promena reference od 8,5% početne nominalne vrednosti. Struja rezistivnog potrošača je bila relativno mala (oko 1,2 A), zbog čega i prilikom naglog rasta struje elektrolitskih kondenzatora ispravljač nije ulazio u režim regulacije struje, pa je na kompletnu prelaznu pojavu uticao samo PI regulator napona. Tačan trenutak promene reference napona je mogao da bude ustanovljen zahvaljujući postojanju izlaznog logičkog signala za aktiviranje svetlosne signalizacije režima punjenja. Nalog za aktiviranje pomenute LED diode zadaje mikrokontroler u istom trenutku kada zadaje i promenu referentne vrednosti napona. Na ovaj način je omogućeno praćenje odziva regulatora napona, kao i precizno određivanje parametara regulatora iz talasnog oblika napona.

Radi lakše analize prelazne pojave, pored kompletnog talasnog oblika jednosmernog napona na izlazu ispravljača, snimljena je i naizmenična komponenta izlaznog napona, koja odgovara prelaznom procesu sa reference napona dopunjavanja na napon punjenja. Oba talasna oblika napona su zajedno predstavljena na jednoj slici.

Prikazana su dva slučaja odziva PI regulatora napona na step – poremećaj: u prvom slučaju parametri regulatora su bili  $K_{p1} = 0,5$ ,  $T_{i1} = 13,33$  ms, dok je u drugom slučaju koeficijent proporcionalnog pojačanja bio  $K_{p2} = 0,375$ , a vremenska konstanta integralnog dejstva  $T_{i2} = 17,78$  ms. Ovi parametri su bliski vrednostima sa kojima rade ispravljači DRI 220-250 u termoelektrani „Nikola Tesla A”. Ipak, postoji značajna razlika između ispravljača DRI 220-250 u elektrani i laboratorijskog ispravljača DRI 220-10, prvenstveno zbog toga što uređaji u elektrani nisu bili predviđeni za rad bez baterije, pa su napravljeni bez filterskih kondenzatora, dok laboratorijski ispravljač nema svoju bateriju nominalnog napona 220 V, već radi sa elektrolitskim kondenzatorima.

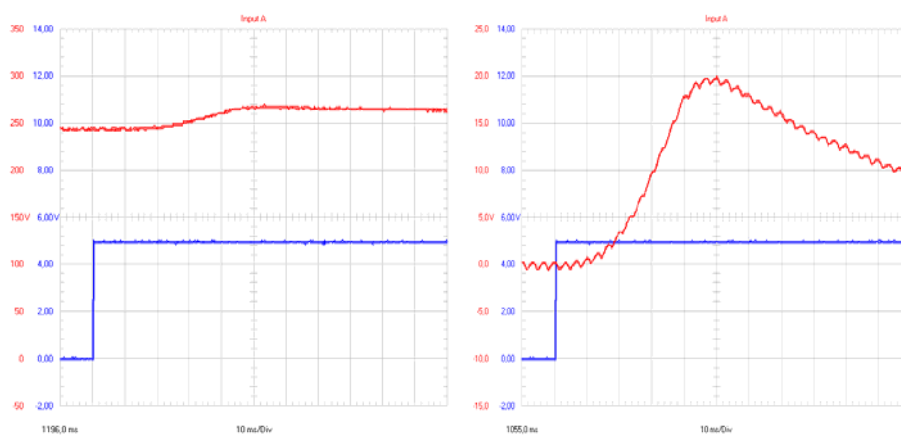
Takođe, razlika postoji i u vrednostima karakterističnih parametara sistema drugog reda. Odzivi regulatora napona ispravljača DRI 220-10 prikazani na slikama 3 i 4 snimljeni su sa strujom rezistivnog potrošača od oko 1,2 A, odnosno 12% nominalne struje. U ovoj radnoj tački, uz navedene vrednosti induktivnosti i kapacitivnosti filterskih elemenata, iz diferencijalne jednačine za RLC kolo sa rednom prigušnicom i paralelnim kondenzatorom i otpornikom [18],[19]:

$$\frac{d^2v_c}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{LC} = \frac{V_d}{LC} \quad (1)$$

kao i iz opšteg oblika prenosne funkcije sistema drugog reda [20]:

$$KG(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

dobija se vrednost faktora prigušenja izlaznog filtera ispravljača DRI 220-10 jednaka 0,0052. Sa druge strane, na ispravljaču DRI 220-250 koji radi sa ekvivalentnim opterećenjem od 12%  $I_{nom}$ , odnosno oko 30 A (uz induktivnost prigušnice od 0,7 mH), faktor prigušenja  $\xi = 0,0052$  bi postojao ako bi se nalivena olovna baterija modelovala kapacitivnošću od oko 97200  $\mu$ F. Parametri baterije imaju velike varijacije sa temperaturom, starošću, gustom elekrolita i izrazito su nelinearni, ali ovakva procena može da se smatra opravdanom za preliminarna podešavanja regulatora ispravljača u laboratoriji, nakon kojih moraju da uslede ispitivanja i podešavanja na terenu, prilikom puštanja uređaja u rad.



Slika 3. Talasni oblici napona ispravljača (gore, crveno) i napona signalizacije režima punjenja (dole, plavo) uređaja DRI 220-10 prilikom promene režima rada: a) kompletan talasni oblik napona ispravljača; b) naizmenična komponenta napona ispravljača.  $K_{p1} = 0,5$ ,  $T_{i1} = 13,33$  ms

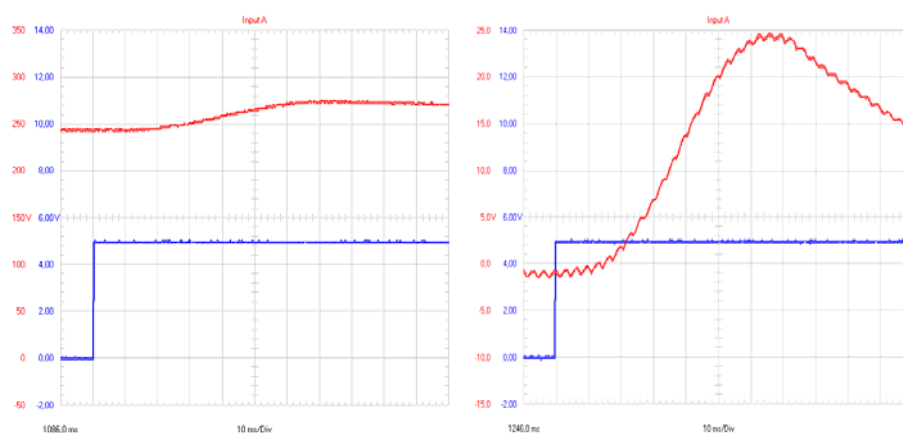
Iz navedenih podataka se uočava da RLC kolo na izlazu ispravljača DRI 220-10 ima veoma malo prigušenje. Na osnovu empirijskih relacija za vreme uspona (rast od 10% do 90% krajnje vrednosti porasta napona) i vreme kašnjenja (rast od 0% do 50% krajnje vrednosti) [21]:

$$T_u = \frac{1 + 1,13\xi + 1,4\xi^2}{\omega_n}, \quad 0 < \xi < 1 \quad (3)$$

$$T_k = \frac{1 + 0,6\xi + 0,15\xi^2}{\omega_n}, \quad 0 < \xi < 1 \quad (4)$$

dobijaju se vremena uspona  $T_u = 19,5$  ms i vreme kašnjenja  $T_k = 19,45$  sistema drugog reda, odnosno ispravljača DRI 220-10.

Sa Slike 3 se očitavaju vrednosti za ispravljač sa PI regulatorom čiji su parametri  $K_{p1} = 0,5$ ,  $T_{i1} = 13,33$  ms:  $T_u = 23,6$  ms,  $T_k = 30,4$  ms,  $V_{max} = 265,1$  V,  $\Delta V = 19,8$  V,  $L = 16,66$  ms, gde su  $V_{max}$  - maksimalna izmerena vrednost napona tokom prelaznog procesa,  $\Delta V$  – porast napona u prelaznom procesu (najveća zabeležena vrednost naizmenične komponente napona),  $L$  – kašnjenja odziva (vrednost između 0% i 10% porasta napona [22]). Sa Slike 4 se očitavaju parametri prelaznog procesa ispravljača sa PI regulatorom napona sa parametrima  $K_{p2} = 0,375$ ,  $T_{i2} = 17,78$  ms:  $T_u = 35,6$  ms,  $T_k = 38$  ms,  $V_{max} = 274$  V,  $\Delta V = 25,4$  V,  $L = 20$  ms.

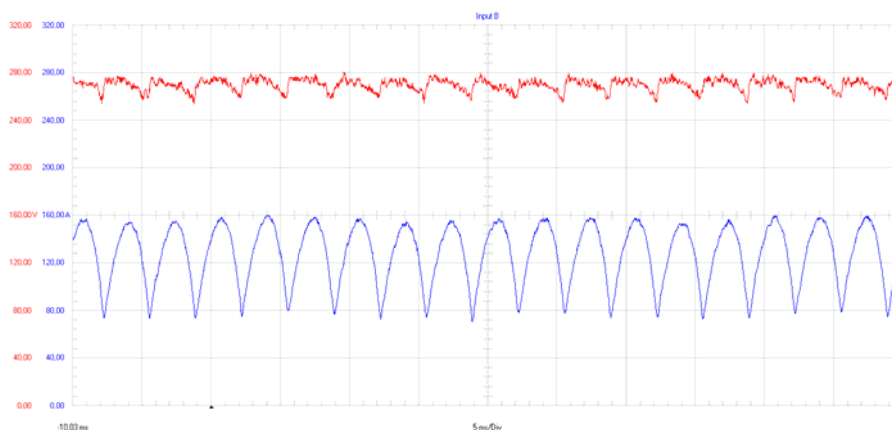


Slika 4. Talasni oblici napona ispravljača (gore, crveno) i napona signalizacije režima punjenja (dole, plavo) uređaja DRI 220-10 prilikom promene režima rada: a) kompletan talasni oblik napona ispravljača; b) naizmenična komponenta napona ispravljača.  $K_{p2} = 0,375$ ,  $T_{i2} = 17,78$  ms

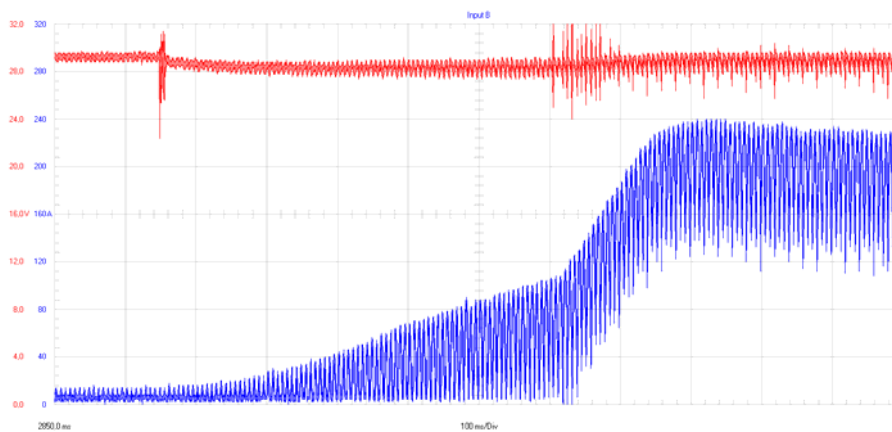
Uočava se da PI regulator napona čiji su odzivi prikazani na slici 3 ima znatno bolje karakteristike u odnosu na drugi ispitivani regulator. Regulator sa parametrima  $K_{p1} = 0,5$ ,  $T_{i1} = 13,33$  ms na laboratorijskom modelu gotovo da nije imao preskok (izmereno je maksimalno 265 V, a referenca je bila 266,2 V, ali sa tačnošću regulacije  $\pm 1\%$ ). U slučaju PI regulatora sa parametrima  $K_{p2} = 0,375$ ,  $T_{i2} = 17,78$  ms, iako preskok nije bio veliki, ipak je u odnosu na prethodni slučaj uočljiv (274 V; oko 3% iznad referentne vrednosti 266,2 V, a oko 28% iznad maksimalno zabeležene vrednosti skoka napona u prvom slučaju). U drugom slučaju je vreme uspona veće za 50%. Razlika u vremenima kašnjenja i kašnjenju odziva je manja – zabeleženo je od 20% do 25% veće kašnjenje u drugom slučaju. Razumljivo je i zbog čega su izmerena veća vremena kašnjenja i uspona,  $T_k$  i  $T_u$ , u odnosu na prirodan odziv kola drugog reda: PI regulator je uticao na prelaznu pojavu prvenstveno smanjivanjem preskoka, odnosno efektivnim povećanjem relativnog prigušenja procesa, što je uticalo i na povećanje vremena uspona i kašnjenja [21].

Prikazani talasni oblici napona i izložena analiza prelaznih procesa

navode na zaključak da su parametri PI regulatora  $K_{p1} = 0,5$ ,  $T_{i1} = 13,33$  ms dali optimalne odzive punoupravljivog tiristorskog ispravljača na laboratorijskom modelu i da predstavljaju dobru osnovu za određivanje parametara regulatora na realnom objektu upravljanja.



Slika 5. Talasni oblici napona (gore, crveno) i struje (dole, plavo) ispravljača DRI 220-250 u režimu punjenja



Slika 6. Talasni oblici napona (gore, crveno) i struje (dole, plavo) ispravljača DRI 24-600 u režimu dopunjavanja prilikom priključivanja potrošača u paralelnom radu

Na Slici 5 su prikazani talasni oblici napona i struje ispravljača DRI 220-250 u termoelektrani „Nikola Tesla A”. Snimak je napravljen u automatskom režimu rada, prilikom regulacije struje ispravljača u režimu punjenja duboko ispržnjene baterije. Kao što se uočava sa Slike 5, ispravljač radi u režimu neprekidne struje.

Na Slici 6 je prikazana prelazna pojava snimljena tokom rada ispravljača

DRI 24-600 prilikom paralelisanja sa drugim ispravljačem istih nominalnih parametara u termoelektrani „Nikola Tesla B”. Na snimku se uočava prelazna pojava nastala prilikom preuzimanja dela struje potrošača prilikom paralelisanja dva ispravljača DRI 24-600. Uočava se šum na signalu napona, nastao kao posledica smetnje koja je nastala prilikom uključivanja prekidača za paralelisanje sabirnica potrošača. Prelazna pojava je bila spora, gotovo bez prebačaja i uz malu varijaciju napona na potrošačima. Ukupna struja potrošača od oko 360 A je podeljena približno jednako između dva paralelisana ispravljača u pogonu. Integralna konstanta PI regulatora napona je na ispravljaču DRI 24-600 imala vrednost  $T_i = 20$  ms.

## 5. Zaključak

Tiristorski ispravljači serije DRI sa digitalnim regulatorima tipa „DRI 05” i „DRI 07” zasnovani na „Intel”-ovim mikrokontrolerima 80C196KB16 predstavljaju tehnička rešenja proverena u višegodišnjoj eksploataciji, tokom koje su demonstrirali robusnost i visoku pouzdanost, uz jednostavno rukovanje i održavanje. Praćenjem rada uređaja u industrijskim postrojenjima empirijski je određeno srednje vreme između otkaza od 125400 časova.

Ispravljači serije DRI su bili prvi namenski projektovani nezavisni tiristorski ispravljači proizvedeni u Institutu sa digitalnim regulatorima za sisteme besprekidnog napajanja koji su isporučeni korisnicima u industriji i elektroprivredi. Uređaji sa digitalnim regulatorima tipa „DRI 05” su prvi ispravljači Instituta na kojima su uvedene funkcije automatskog trostrukog restarta, detekcije nesimetrije tiristorskog mosta i visokog bruma baterije, kao i programskog histerezisa za smenjivanje regulatora napona i struje.

Primenjeni digitalni PI regulatori napona i struje su se pokazali kao optimalno rešenje u poluupravljivim i punoupravljivim tiristorskim ispravljačima, bez potrebe za uvođenjem adaptivnog dejstva u slučajevima kada ispravljači serije DRI uvek rade sa baterijama. Demonstriran je uspešan rad PI regulatora sa relativno velikom periodom odabiranja u regulaciji sistema drugog reda sa veoma malim prigušenjem. Uz određivanje optimalnih parametara regulatora napona postignuti su odzivi na step-poremećaj od 8,5% sa zanemarljivim preskokom, uz povećanje vremena uspona za 20% i vremena kašnjenja za oko 55% u odnosu na prirodni odziv ispitivanog sistema drugog reda.

## Zahvalnica

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije u okviru projekta TR33020, „Povećanje energetske efikasnosti hidroelektrana i termoelektrana Elektroprivrede Srbije razvojem tehnologije i uređaja

energetske elektronike za regulaciju i automatizaciju”.

## Literatura

- [1] V. Vučković, Ž. Janda, J. Bebić, M. Janković, S. Vukosavić, „Razvoj porodice digitalnih regulatora brzine asinhronih motora”, *Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Godišnji izveštaj za 1993. i 1994. godinu*, str. 40-41, 1995.
- [2] "80C196KB User's Guide", *Intel Corporation*, November 1990.
- [3] I. Stevanović, Đ. Stojić, Z. Ćirić, „Tiristorski sistem pobude sa električnim kočenjem i digitalnim automatskim regulatorom pobude u 'HE Bistrica'”, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Knjiga 16*, str. 47-60, 2004.
- [4] M. Janković, V. Vukić, S. Dobričić, R. Prole, „Mikroprocesorsko upravljanje tiristorskim ispravljačem za napajanje plazmatrona”, *Elektroprivreda, br. 3*, str. 45 - 52, 2005.
- [5] Ž. Janda, R. Đorđević, B. Jovanović, V. Šinik, „Enhanced sliding-mode control of the single phase voltage source inverter”, *13th International Symposium on Power Electronics – Ee 2005*, paper T4-3.3, pp. 1-4, Novi Sad, November 2nd – 4th 2005.
- [6] S. Milosavljević, R. Milosavljević, „Uređaj za sekundarno ispitivanje relejnih zaštita – SIR 3”, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Knjiga 14*, str. 117-122, 1999.
- [7] V. Vukić, M. Janković, R. Prole, „Mikroprocesorsko upravljanje dvanaestopulsnim rednim tiristorskim mostom”, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Knjiga 16*, str. 61-67, 2004.
- [8] R. Prole, V. Vukić, M. Janković, „Tehnički opis mikroprocesorskog regulatora tiristorskog ispravljača 'DRI 05'”, *Elaborat br. 205027, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, decembar 2005*.
- [9] V. Vukić, D. Jevtić, R. Prole, „Tehnički opis sa uputstvom za rukovanje i održavanje ispravljača 'DRI 220-63'”, *Elaborat br. 206003, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, januar 2006*.
- [10] V. Vukić, D. Džepčeski, „Tehnički opis sa uputstvom za rukovanje i održavanje ispravljača 'DRI 220-250'”, *Elaborat br. 207014, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, avgust 2007*.
- [11] D. Džepčeski, V. Vukić, „Tehnički opis sa uputstvom za rukovanje i održavanje ispravljača 'DRI 110-100' i razvoda za napajanje jednosmernom strujom 'RJS 110'”, *Elaborat br. 208015, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, maj 2008*.

- [12] J. Bebić, „Jedan novi pristup konstrukciji monofaznih sistema za besprekдно napajanje”, magistarski rad, *Elektrotehnički fakultet*, Beograd, 1994.
- [13] M. Janković, Đ. Stojić, J. Bebić, „Prikaz realizacije modularnog ispravljačkog stepena SBN-a na bazi mikrokontrolera 80535”, *VIII simpozijum „Energetska elektronika”*, str. 599 - 606, Novi Sad, 27. – 29. septembar 1995.
- [14] V. Vukić, R. Prole, D. Džepčeski, „Digitalni regulisani tiristorski ispravljač zasnovan na programabilnom logičkom kontroleru sa opcijom automatskog preuzimanja opterećenja”, *28. savetovanje JUKO CIGRE*, knjiga II, str. 205-212, Vrnjačka Banja, 30. septembar - 5. oktobar 2007.
- [15] V. Vukić, „Tiristorski ispravljač upravlján programabilnim logičkim kontrolerom sa modularnim čoperskim izlaznim stepenom”, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”*, Knjiga 19, str. 85-92, 2008.-2009.
- [16] V. Vukić, R. Prole, D. Jevtić, „Novo postrojenje sa tiristorskim ispravljačima i razvodom jednosmerne struje za napajanje hidroelektrane”, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”*, Knjiga 20, str. 143-156, 2010.
- [17] S. Dobričić, R. Prole, D. Jevtić, „Rekonstrukcija ispravljača 220V i 24V na Bloku 1 i Opštoj grupi u TE ‘Kostolac B’”, *Godišnji izveštaj za 2008. i 2009. godinu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”*, str. 115-116, 2010.
- [18] M. Nahvi, J.A. Edminster, “Theory and problems of electric circuits”, *McGraw-Hill*, New York, 2003.
- [19] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, “Power Electronics”, *John Wiley & Sons, Inc*, New York, 1995.
- [20] C.L. Philips, R.D. Harbor, “Feedback Control Systems”, *Prentice Hall International, Inc*, New Jersey, 1996.
- [21] M. Mataušek, „Regulacija” (predavanja), *Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu*, Beograd, 1997.
- [22] G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeni, “Feedback control of dynamic systems”, *Addison-Wesley Publishing Company*, 1986.

**Abstract:** In this paper the thyristor rectifiers with digital control units developed in Institute “Nikola Tesla” are presented. Digital control units of the types “DRI 05” and “DRI 07” are based on microcontroller „Intel” 80C196KB16. Implemented technical solutions are described in detail, also as the experience derived from industrial exploitation of thyristor rectifiers. The new features implemented on the Institute’s digital control units were triple automatic restart, detection of asymmetry of thyristor bridge and output voltage ripple, also as program hysteresis for alternation of voltage and current regulators. Responses of the



implemented PI regulators of laboratory thyristor rectifier connected to RLC circuit are studied in detail. Results of examinations of rectifier's output current and voltage waveforms in industrial facilities are also presented.

**Key words:** thyristor rectifier, microcontroller 80C196, PI regulator, second-order system, MTBF

## **Thyristor Rectifiers With Digital Control Units Based on Microcontroller 80C196 for Uninterruptible Power Supply Systems**

Rad primljen u uredništvo 30.9.2011. godine  
Rad prihvaćen 17.10.2011. godine