

UDK: 621.314.63

Оригинални научни рад  
Original scientific paper

## ЕНЕРГЕТСКА ЕФИКАСНОСТ И ДИГИТАЛНА КОМУНИКАЦИЈА ФАЗНО РЕГУЛИСАНИХ ИСПРАВЉАЧА ЗА ИНДУСТРИЈСКЕ СИСТЕМЕ БЕСПРЕКИДНОГ НАПАЈАЊА

Владимир Вукић\*

*Електротехнички институт „Никола Тесла”, Београд*

**Сажетак:** У раду су представљени мрежом комутовани фазно регулисани исправљачи са дигиталним регулаторима развијеним у Електротехничком институту „Никола Тесла”. Дигитални регулатори исправљача типа „ДРИ 07” засновани су на микроконтролеру „Intel” 80С196КВ16. Описана су техничка решења примењена на исправљачима серије ДРИ, са посебним освртом на могућности успостављања дигиталне комуникације са управљачким рачунарским системима коришћењем стандардних индустријских протокола комуникације. Галвански одвојена „half-duplex” серијска веза стандарда RS-485 даје могућност лаког повезивања великог броја међусобно удаљених исправљача са једним програмабилним логичким контролером подешеним за вршење конверзије протокола комуникације, као и даље прослеђивање података централном рачунару о стању свих исправљача у погону. Приказани су резултати испитивања фактора снаге, укупног хармонијског изобличења струје и степена корисног дејства исправљача. Извршено је упоређивање добијених резултата са одговарајућим подацима о исправљачима водећих западноевропских произвођача. На фазно регулисаном исправљачу снаге 90 kVA, оптерећеном са 50% номиналне струје, измерене су вредности степена корисног дејства од најмање 96,6%.

**Кључне речи:** *фазно регулисани исправљач, микроконтролер 80С196, степен корисног дејства, фактор снаге, укупно хармонијско изобличење струје, систем беспрекидног напајања, индустријски протокол комуникације*

---

\* Контакт аутор: Владимир Вукић, Косте Главинића 8А, 11000 Београд.  
е-mail: vladimir.vukic@ieent.org

Рад је настао у оквиру пројекта ТР 33020, „Повећање енергетске ефикасности хидроелектрана и термоелектрана Електропривреде Србије развојем технологије и уређаја енергетске електронике за регулацију и аутоматизацију”, који је финансирало Министарство просвете и науке Републике Србије

## УВОД

Све већа аутоматизација производње и увођење управљачких рачунарских система довели су до подизања захтева везаних за напајање индустријских потрошача електричном енергијом високог квалитета. Због осетљивих процеса производње, од електропривреде, преко хемијске до прехранбене индустрије, не само да трајни прекиди напајања електричном струјом могу да доведу до великих застоја и губитака у производњи, већ и краткотрајни нестанак или пад напона може да изазове испад критичних потрошача.

Трендови дигитализације производне опреме и њеног повезивања од централног управљачког рачунара па до појединачних сензора посебно су изражени у прехранбеној индустрији [1]. Основни примењени систем повећања ефикасности постројења се састојао у аутоматизацији процеса и повезивања што већег броја машина и сензора (и преко 700 [1]) у јединствени систем са напредним индустријским протоколом комуникације. Овако бројна и често просторно веома удаљена дигитална електронска опрема захтева веома стабилно и квалитетно напајање, уз примарни значај поузданог напајања електричном енергијом централног управљачког рачунарског система. Не треба занемарити ни чињеницу да чак и краткотрајни испади или нетачна показивања електронских мерних претварача, попут детектора рН вредности, притиска, протока, температуре, садржаја воде или концентрације конзерванса могу да доведу до погоршања карактеристика, па и кварења читавих серија прехранбених производа [2].

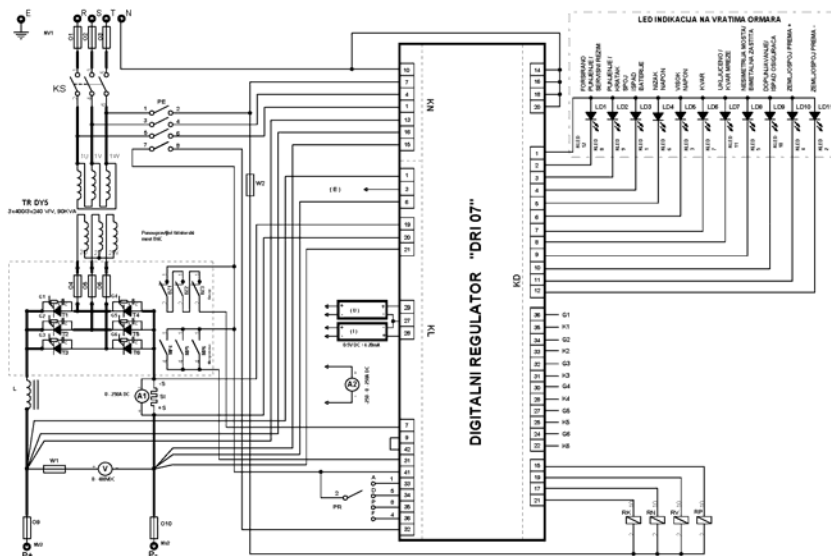
Због наведених разлога, односно потребе за формирањем технолошки напредног погона прехранбене индустрије, неопходно је подизање поузданости рада и енергетске ефикасности постројења. Због тога је приликом разматрања ефикасности индустријског процеса неопходна и анализа ефеката примене система беспрекидног напајања. Ипак, уређаји беспрекидног напајања и сами представљају потрошаче електричне енергије, па је и у овом случају важан избор поузданих и енергетски ефикасних уређаја, као и паралелна анализа њихове набавне цене, трошкова одржавања и потрошње електричне енергије.

У овом раду су описани мрежом комутовани фазно регулисани тиристорски исправљачи серије ДРИ који представљају део индустријског система беспрекидног напајања једносмерном струјом. Анализирана је њихова енергетска ефикасност и квалитет електричне енергије, као и техничке могућности прикључивања исправљача на индустријску телекомуникациону мрежу.

## ОПИС ФАЗНО РЕГУЛИСАНОГ ИСПРАВЉАЧА ДРИ 220-250

Дигитални регулисани исправљач ДРИ 220-250 је један од тиристорских исправљача серије ДРИ, развијених и произведених у Електротехничком институту „Никола Тесла”. Управљање уређајем врши дигитални регулатор исправљача типа „ДРИ 07”, заснован на микроконтролеру “Intel” 80C196KB16. Управљачке функције микропроцесорске картице „uP3” су реализоване програмски, а основна намена је генерисање упаљачких импулса за тиристоре и реализација регулатора [3]. Исправљачи серије ДРИ имају функције аутоматског

троструког укључења у случају трајног квара, „меког” старта, контроле присуства и фазног редоследа мрежног напона, детекције високог и ниског напона батерије, кратког споја, несиметрије напона тиристорског моста изазване отказом тиристора, као и сигнализације квара безнапонским контактима и светлосном сигнализацијом. Програмски су реализоване регулационе петље по напону и струји исправљача.



Слика 1. Шема електричних веза исправљача ДРИ 220-250  
Figure 1. Circuit diagram of the rectifier DRI 220-250

Дигитални регулатор исправљача „ДРИ 07” налази се у затвореној алуминијумској кутији са прикључним клеммама са бочне леве и десне стране. На предњој страни кутије су монтирани осигурачи за кола наизменичне и једносмерне струје, потенциометар за подешавање напона, прикључни конектор кабла за комуникацију и тастер за ресет процесора. Напајање регулатора „ДРИ 07” изведено је преко DC/DC претварача (опсега улазних једносмерних напона 85 - 375 V) напајаног двострано, мрежним напонем 220 V, 50 Hz и напонем батерије.

У случајевима рада исправљача са наливеним оловним батеријама, преко четвороположајног гребенастог прекидача режим пуњења батерије (допуњавање, пуњење, форсирано пуњење) може да се подеси ручно, а могуће је и задавање аутоматског режима пуњења батерије према IUU карактеристици [4].

У оквиру упалачког склопа реализовано је шест галвански изолованих излаза за паљење тиристора. Мерена вредност излазног напона исправљача се преко напонског разделника и филтерског степена доводи на A/D конвертор микроконтролера. У истом склопу налази се и коло за детекцију испада батерије. Појава високог брума исправљача, односно велике наизменичне компоненте

излазног једносмерног напона, представља индикацију испада батерије. Сигнали са шантова исправљача и батерије се доводе на диференцијалне појачаваче, одакле се прилагођене и филтриране вредности шаљу у микроконтролер за потребе регулације и заштите. Такође, сигнали напона и струје исправљача се прослеђују на мерне претвараче струје опсега 4 - 20 mA. Поред обраде у микропроцесору, сигнал струје се доводи и на активни филтер, који у случају прегоривања једног осигурача у тиристорском мосту или престанка рада једног тиристора детектује несиметрију моста. Прекострујна заштита је реализована као независни аналогни склоп који приликом реаговања блокира пролазак импулса ка гејтовима тиристора.



Слика 2. Фазно регулисани исправљачи ДРИ 220-250 и ДРИ 110-500 у индустријском разводу једносмерне струје  
*Figure 2. Phase-controlled rectifiers DRI 220-250 and DRI 110-500 in industrial direct current distribution system*

Посебну целина на плочи аналогне електронике представља земљоспојно реле, које детектује успостављање електричне везе између позитивног или негативног пола прикључене батерије и система уземљења. Праг реаговања земљоспојног релеа је подесив у опсегу 10 k $\Omega$  - 1 M $\Omega$ .

Галванској изолацији је приликом развоја дигиталног регулатора типа „ДРИ 07” посвећена велика пажња, будући да су фазно регулисани исправљачи у системима непрекидног напајања обично предвиђени за напајање потрошача једносмерне струје који нису повезани са системом уземљења. Будући да се на дигитални регулатор исправљача типа „ДРИ 07” доводи улазни наизменични напон 3·380 V, 50 Hz, али и једносмерни напон батерије, веома је важно да не дође до повезивања различитих потенцијала који би утицали на исправност мерно-регулационе или комуникационе електронике, а нарочито на безбедност руковаоца. Због тога су сви наизменични напони галвански одвојени посредством мерних трансформатора, гејтови тиристора преко импулсних трансформатора, а сви логички улази управљачке електронике (стања прекидача,

ультрабрзих осигурача, биметала, земљоспојног релеа...) изоловани су помоћу оптокаплера, типичних мерних уређаја са оптичким паровима [5]. Коришћени су оптокаплери типа 4N27, пробојног напона до 5300 V. Канал серијске комуникације стандарда RS-485 је такође оптички изолован помоћу интегрисаног кола MAX 1480A, максималног битског протока 2,5 Mb/s и максималног пробојног напона до 2000 V [6].

### Дигитална серијска комуникација

Приликом поправке или испитивања исправљача могуће је његово пребацивање у сервисни режим рада. У сервисном режиму се врши деактивирање свих програмских заштита, а вредност угла паљења тиристора се задаје непосредно, без могућности регулације. Исправљач у сервисни режим рада може да се пребаци задавањем команде са рачунара, преко галвански изоловане "half - duplex" серијске везе стандарда RS-485. Помоћу серијске везе више дигиталних регулатора исправљача типа „ДРИ 07” може да комуницира са надређеним рачунаром (добива потребне параметре, прослеђује мерене величине, као и параметре режима рада и деловања заштита), без ризика од отказа комуникационе опреме због различитих потенцијала батерија.

Паралелним повезивањем више исправљача серијском везом стандарда RS-485 могуће је прослеђивање информација (на растојању до 1200 m) са великог броја исправљача на један индустријски програмабилни логички контролер (ПЛЦ). Једноставним додавањем одговарајућих комуникационих модула, уз мање интервенције на управљачком програму ПЛЦ-а, корисник може да повеже све дигиталне регулаторе исправљача са управљачким рачунарским системом постројења преко неког индустријског протокола комуникације. Фазно регулисани исправљачи серије ДРИ су до сада прикључивани на централни рачунар преко протокола "PROFIBUS DP" (посредством "Omron"-ових ПЛЦ контролера серије CJ1 [7]), али је могућа примена и других стандардних индустријских протокола комуникације, попут "Modbus", "DeviceNet", "CompoNet", "CompoBus/S", "PROFINET-IO", "Ethernet" или "EtherNet/IP" [7]. Ипак, могућа је остваривање комуникације са исправљачима серије ДРИ и преко хијерархијски нижих протокола, попут "Controller-Area Network" или серијске везе стандарда RS-232 [7]. Иако је "CAN-bus" протокол првенствено намењен за основну комуникацију у компактним вишепроцесорским системима, попут савремених аутомобила, грађевинских или пољопривредних машина, код исправљача серије ДРИ је, посредством ПЛЦ-а "Omron" серије CJ1, могућа његова примена за повезивање са другим дигиталним уређајима. Иако произвођачи процесних рачунарских система обично захтевају комуникацију према вишим хијерархијским протоколима, могућност прикључивања исправљача серије ДРИ на "CAN-bus" комуникациону мрежу може да буде веома значајна у прехранбеној индустрији, будући да се комуникација са великим бројем процесних и пољопривредних машина обавља управо према "Controller-Area Network" протоколу [8].

## РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА И ДИСКУСИЈА

Приликом пуштања у рад исправљача ДРИ 220-250 (номинални напон допуњавања 245,3 V, номинална струја 250 A) извршено је снимање карактеристика уређаја. Снимање активних снага, несинусоидалног фактора снаге и укупног хармонијског изобличења струје вршено је анализатором снаге "Chauvin Arnoux" СА 8334В (пропусни опсег 10 - 70 Hz, мерење напона до 600 V и струја до 3000 A; мерна несигурност за снаге, напоне и струје је 0,5%). Степен корисног дејства је накнадно одређиван као количник активне снаге на излазу исправљача и активне снаге измерене на улазним контактима исправљача. Наизменична струја је мерена струјним клештима "Chauvin Arnoux", опсега 0-100 A, а једносмерна струја је мерена на шанту исправљача (250 A, 60 mV) помоћу напонског мерног канала осцилоскопа "Fluke" 196С. Једносмерни излазни напон је мерен универзалним инструментом "RishMulti 18S", мерне несигурности 0,03%.

Приликом испитивања пуноуправљивог тиристорског исправљача ДРИ 220-250 током рада према IUU карактеристици, након дубоког пражњења наливене оловне батерије, мерене су вредности хармонијског изобличења струје (THDI), несинусоидалног фактора снаге и степена корисног дејства. Мерења су вршена у аутоматском раду, у режиму пуњења батерије и при активној регулације струје (I део IUU карактеристике, референтна вредност 125 A). Да би се избегле грешке настале због немогућности истовременог читавања података са свих инструмената, показивања два волтметра и анализатора снаге су фотографисана, а подаци о измереним напонима и снагама су накнадно читавани са фотографија.

Измерене вредности фактора снаге имају вредности које одговарају номинално оптерећеним пуноуправљивим тиристорским исправљачима. Ипак, за струју исправљача од око 51% номиналне вредности, мерене вредности су нешто боље од очекиваних. Приликом претходних испитивања исправљача ДРИ 220-160ПТД приликом испитивања у режиму пуњења са око 63% номиналног оптерећења измерене су вредности фактора снаге несинусоидалне струје  $\lambda = 0,665$  и укупног хармонијског изобличења струје  $THDI = 0,36$  [9]. На добијене вредности фактора снаге и хармонијског изобличења првенствено утичу разлике у привидној снази и преносном односу енергетских трансформатора исправљача ДРИ 220-250 и ДРИ 220-160ПТД. Треба приметити да је већ при оптерећењу од око половине номиналне струје (додуше, у режиму пуњења, а не допуњавања) исправљач ДРИ 220-250 достигао вредност фактора снаге од 0,78 коју један од произвођача тиристорских исправљача [10] наводи као стандардну вредност за номинално оптерећене уређаје, као и да је током рада исправљача у режиму пуњења вредност THDI стално имала вредности уобичајене за рад 220 V исправљача са номиналном струјом [9].

У Табели 1 су приказане и измерене вредности улазних и излазних активних снага исправљача. Из података о активним снагама израчунати су и подаци о степену корисног дејства и укупним губицима у уређају. Израчунате су вредности степена корисног дејства у опсегу 97,3% – 98,2%, а укупни израчунати губици у исправљачу крећу се у опсегу од 598 W до 877 W. Ипак, због блиских вредности улазних снага (измерене помоћу анализатора снаге "Chauvin Arnoux" СА 8334В) и излазних снага (производ излазног једносмерног напона и излазне струје мерене на

шанту исправљача), израчунате вредности фактора снаге и степена корисног дејства не могу бити прихваћене као тачне. Мерна несигурност анализатора снаге је око 0,5%, а треба још додати и мерне несигурности волтметара, тако да, за наведене податке, може да се процени укупна мерна несигурност одређивања снаге на око 300 W. То је, за израчунате вредности губитака, изузетно велика вредност. Због тога је потребно извршити процену губитака у исправљачу који би се упоредили са добијеним вредностима.

Табела 1. Измерене вредности активних снага ( $P_{AC}$ ,  $P_{DC}$ ), несинусоидалног фактора снаге ( $\lambda$ ), укупног степена хармонијског изобличења струје (THDI), струје ( $I_{isp}$ ), напона ( $U_{DC}$ ,  $U_{AC}$ ) и степена корисног дејства ( $\eta$ ) исправљача ДРИ 220-250

Table 1. Measured values of active powers ( $P_{AC}$ ,  $P_{DC}$ ), power factor ( $\lambda$ ), total harmonic distortion in current (THDI), current ( $I_{isp}$ ), voltage ( $U_{DC}$ ,  $U_{AC}$ ) and overall efficiency ( $\eta$ ) of rectifier DRI 220-250

$P_{AC}$ [kW]	$\lambda$	THDI [%]	$I_{isp}$ [% $I_{nom}$ ]	$I_{isp}$ [A]	$U_{DC}$ [V]	$U_{AC}$ [V]	$P_{DC}$ [kW]
32,26	0,722	33,7	51,17	127,9	245,4	3,9	31,386
32,13	0,723	33,7	51,17	127,9	245,5	3,8	31,404
32,14	0,723	33,6	51,17	127,9	245,9	3,8	31,452
33,29	0,745	33,2	51,33	128,3	254,1	3,4	32,609
33,49	0,767	32,5	50,5	126,3	260,5	3,2	32,892
34,18	0,768	32,5	51	127,5	261,2	3,2	33,303
34,30	0,785	32,1	50,5	126,3	265,6	3,1	33,533

На основу података о испитивању трансформатора (преносни однос 400/240 V/V, секундарна струја 216,5 А, губици празног хода  $P_0 = 514$  W ( $I_0 = 3,4\%$ ), губици кратког споја  $P_{Cu} = 1403$  W ( $u_{ks} = 2,8\%$ )), уз прорачунату секундарну струју трансформатора од 104,4 А (48,2% номиналне секундарне струје трансформатора од 216,5 А; једносмерна струја исправљача 127,9 А), добија се вредност губитака у трансформатору од 840 W [11]. Губици снаге у 250 А пригушници оптерећеној са око 50% номиналне струје су процењени на око 20 W. Из каталога компаније "Semikron" се одређује да су губици у тиристорском мосту са шест тиристора SKT 250 око 280 W, за струју од око 130 А [12]. Губици управљачке и мерне електронике могу да се процене на око 15 W, док остали губици у бакарним кабловима, прекидачима, релејима, инструментима и високоучинским осигурачима не би требало да премаше 15 W при раду са половином номиналне струје. На крају може да се изврши процена губитака у исправљачу ДРИ 220-250, при раду са струјом од око 127 А, на највише 1170 W, чиме би вредност степена корисног дејства исправљача била најмање 96,6%.

Ако усвојимо процењену вредност степена корисног дејства, уочава се да је код исправљача ДРИ 220-250 постигнута још већа енергетска ефикасност у односу на ионако добар степен корисног дејства од 96%, забележен код исправљача ДРИ 220-160ПТД при струји потрошача од око 40% номиналне вредности. Основни разлози измерених већих вредности степена корисног дејства су већа номинална

снага трансформатора исправљача ДРИ 220-250 (око 50%), али и много једноставнија конструкција, без двоструког LC филтера, са веома малим бројем потрошача и компактном управљачком електроником. Подизањем степена корисног дејства са 96% на бар 96,6% при раду са 51% номиналне струје остварује се смањивање губитака у исправљачу ДРИ 220-250 за око 215 W. Међутим, ако се изврши упоређивање добијених података са подацима других произвођача објављеним у литератури [9],[10],[13],[14], усвајајући вредност степена корисног дејства стандардних тиристорских исправљача на тржишту од око 94% при раду са половином номиналне струје, добија се разлика у губицима од око 2,6%, што представља уштеду снаге у режиму допуњавања (референтни напон 245,3 V) од најмање 840 W. При просечној цени kWh електричне енергије од 0,05 €, уз дневне уштеде енергије од 17 kWh, при трајном раду са 50% номиналног оптерећења у режиму допуњавања, постигла би се уштеда од најмање 6200 € током процењене двадесетогодишње експлоатације једног исправљача ДРИ 220-250 у односу на коришћење стандардних западноевропских уређаја.

Повећање енергетске ефикасности фазно регулисаних исправљача ДРИ 220-250 је постигнуто првенствено једноставном и робусном конструкцијом енергетског кола. Пројектовање трансформатора за широк опсег радних напона, уз остављање резерве снаге при номиналном оптерећењу од око 10%, имали су велики утицај на смањивање укупних губитака. Резерва снаге је била још већа у случају тиристорског моста. Једноставна топологија енергетског кола, уз коришћење релативно кратких каблова великог пресека, такође је имала утицаја на мале губитке снаге исправљача ДРИ 220-250. Одсуство филтерских кондензатора, блидер-отпорника за пражњење кондензатора и пратеће електричне опреме довело је до елиминисања потенцијалних губитака у излазним капацитивностима и отпорностима. Једноставна управљачка електроника, без дисплеја и пратећих активних сензора, додатно је допринела повећању енергетске ефикасности.

На крају, треба навести и да је једноставан уређај, са веома малим бројем елемената, робуснији и поузданији од веома сложених уређаја енергетске електронике. Коришћење тиристорског моста са дискретним елементима и природним хлађењем представља још један начин да се подигне поузданост. Употребом форсирано хлађеног тиристорског моста са тиристорским модулима за мању струју смањила би се цена исправљача, али би се повећали губици снаге, уз смањивање поузданост уређаја.

У случају исправљача ДРИ 220-250 се јасно види да недостатак локалне телекомуникационе електронике не мора да буде хендикеп уколико група уређаја, помоћу серијске везе стандарда RS-485 и једног ПЛЦ-а, може да се повеже са управљачким рачунарским системом и да сваки појединачни уређај достави податке о свом режиму рада и мереним величинама.

## ЗАКЉУЧАК

Мрежом комутовани исправљачи са дигиталним регулаторима типа „ДРИ 07” засновани на “Intel”-овим микроконтролерима 80С196КВ16 представљају уређаје проверене у вишегодишњој експлоатацији, у којој су демонстрирали високу поузданост, уз једноставно руковање и одржавање.



Постојање галвански одвојене „half-duplex” серијске везе стандарда RS-485 даје могућност лаког повезивања великог броја међусобно удаљених исправљача и прослеђивање њихових података ка централном рачунару, без ризика од отказа комуникационе опреме због различитих потенцијала прикључених батерија. У досадашњој експлоатацији су фазно регулисани исправљачи серије ДРИ били повезивани у дигиталне комуникационе мреже преко програмабилних логичких контролера “Omron” серије CJ1 посредством индустријског протокола комуникације “PROFIBUS DP”, а на исти начин могу да се прикључе и на комуникационе мреже које раде са протоколима “Modbus”, “DeviceNet”, “CompoNet”, “CompoBus/S”, “PROFINET-IO”, “Ethernet”, “EtherNet/IP” и “Controller-Area Network”.

Једноставном и робусном конструкцијом енергетског кола исправљача, као и употребом штедљиве управљачке електронике, уз постојање резерве снаге критичних елемената енергетског кола, постигнут је степен корисног дејства исправљача ДРИ 220-250 оптерећеног са 50% номиналне струје од најмање 96,6%.

Наведени резултати препоручују исправљаче серије ДРИ као оптимално решење за индустријска постројења у којима су услови експлоатације тешки (екстремне температуре, прашина, хемијски агресивна средина...), тражени трошкови експлоатације ниски, а захтевана поузданост уређаја висока, уз поседовање основних телекомуникационих могућности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Benson, I.B., Millard, J.W.F., 2001. *Food compositional analysis using near infra-red absorption technology*. Објављено у *Instrumentation and sensors for the food industry*, Kress-Rogers, E., Brimelow, C.J.B. (eds.), pp. 137-186, Cambridge, England: CRC Press, Woodhead Publishing Limited.
- [2] Kress-Rogers, E., 2001. *Instrumentation for food quality assurance*. Објављено у *Instrumentation and sensors for the food industry*, Kress-Rogers, E., Brimelow, C.J.B. (eds.), pp. 1-30, Cambridge, England: CRC Press, Woodhead Publishing Limited.
- [3] Јанковић, М., Вукић, В., Добричић, С., Проле, Р., 2005. *Микропроцесорско управљање тиристорским исправљачем за напајање плазматрона*. Електропривреда. 58 (3): 45-52.
- [4] Вукић, В., 2008.-2009. *Тиристорски исправљач управљан програмабилним логичким контролером са модуларним чоперским излазним степеном*. Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”. 19: 85-92.
- [5] Радичевић, Б., Вукић, Ђ., Ерцеговић, Ђ., Ољача, М., 2009. *Оптички сензори и њихова примена на пољопривредним машинама*. Пољопривредна техника. 34 (1): 123-136.
- [6] 2005. *Complete, isolated RS-485/RS-422 Data Interface*. Maxim Integrated Products.
- [7] 2009. *Industrial Automation Guide 2009/2010*. Omron Corporation.
- [8] Глигоријевић, К., Ољача, М., Вукић, Ђ., Златановић, И., Радичевић, Б., Пајић, М., Радојевић, Р., Ољача, В., Димитровски, З., 2009. *Примена CAN Bus мрежа на тракторима и радним машинама*. Пољопривредна техника. 34 (1): 115-122.
- [9] Вукић, В., Проле, Р., Јевтић, Д., 2010. *Ново постројење са тиристорским исправљачима и разводом једносмерне струје за напајање хидроелектране*. Зборник радова, Електротехнички институт „Никола Тесла”. 20: 143-156.
- [10] 2002. *Profitec S: Battery-Charging Rectifier*. AEG Power Supply Systems, 2002.

- [11] Сушић, С., 2010. *Испитни лист трансформатора ТМТ 90-400.240 бр. 10272*. Стемп.
- [12] 2005. *Power Electronics – Discrete Diode / Thyristor Chips*. Semikron International GmbH.
- [13] 2003. *Technical Data Sheet: SDC Rectifier: Battery Charger 24-220 V/25-1200 A*. Gutor Electronic LTD, 2003.
- [14] 2006. *Rectifiers for stationary battery systems - Standard thyristor-controlled rectifiers THYROTRONIC Line*. Benning Power Electronics LTD.

## POWER EFFICIENCY AND DIGITAL COMMUNICATION OF PHASE-CONTROLLED RECTIFIERS FOR INDUSTRIAL UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY SYSTEMS

Vladimir Vukić

*Electrical Engineering Institute “Nikola Tesla”, Belgrade*

**Abstract:** In this paper are presented line-frequency phase-controlled rectifiers with digital control units developed in Institute “Nikola Tesla”. Digital control units of the type “DRI 07” are based on microcontroller „Intel” 80C196KB16. Implemented technical solutions are described, with emphasis on capabilities to establish digital communication with a central process computer implementing standard industrial communication protocols. Electrically isolated „half-duplex” serial communication of RS-485 standard enables easy connection of numerous, mutually remote rectifiers with one programmable logic controller adjusted for the conversion of communication protocols, also as further proceeding of data on the state of all rectifiers in a facility to the process control system. Results of the examinations of power factor, total current harmonic distortion and overall efficiency are presented. Comparison of procured results with corresponding data related to the rectifiers made by the leading west-european manufacturers. On phase-controlled rectifier rated for 90 kVA, loaded with 50% of its nominal current, overall efficiency of at least 96.6% was measured.

**Key words:** *phase-controlled rectifier, microcontroller 80C196, overall efficiency, power factor, THDI, uninterruptible power supply system, industrial communication protocol*

Датум пријема рукописа: 26. 10. 2011.  
Датум пријема рукописа са исправкама:  
Датум прихватања рада: 04. 11. 2011.