

ПРИЈАВА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

- 1. Аутор:** др Владимир Ђ. Вукић, дипл. инж. ел.
- 2. Назив техничког решења:** Тиристорски исправљач ДРИ 110-1000 са изузетно ниском таласношћу усмерене излазне струје
- 3. Кључне речи:** AC/DC претварач, пуњач батерије, дигитални регулатор, таласност усмерене струје, таласност напона, дигитална комуникација
- 4. Урађено за:** Електротехнички институт „Никола Тесла” а.д. (произвођач уређаја). Наручилац: „Електромонтажа” Краљево. Носилац уговора: “Mitsubishi Hitachi Power Systems Ltd.” (MHPS).
- 5. Датум комплетирања техничког решења:** 10.8.2021. године.
- 6. Датум почетка примене техничког решења и име корисника:** 10.8.2021. године; Електропривреда Србије, Термоелектрана „Никола Тесла А” (према уговору бр. 12.01.12625/52-17, понуди бр. 02/1438 (од 26.6.2020. године) и наруџбеници Р20 П-10 (од 20.11.2020. године)).
- 7. Област на коју се техничко решење односи:** индустријски енергетски претварачи велике снаге.
- 8. Проблем који се техничким решењем решава**

Посматрано међу уређајима са дигиталним регулаторима, исправљач ДРИ 110-1000 представља пуњач батерија највеће снаге и излазне струје произведен у Електротехничком институту „Никола Тесла”. Намењен је за пуњење наливених оловних акумулаторских батерија називног капацитета 6000 Ah. Пре примене овог техничког решења, номинална излазна струја исправљача серије ДРИ није била већа од 600 А, што је давало могућност повезивања елемената енергетског кола кабловским везама уместо шинских.

Један од основних техничких захтева за пројектовање уређаја ДРИ 110-1000 био је везан за постизање изузетно ниске таласности напона на излазу исправљача, фактора таласности мањег од пола процента номиналног излазног напона ($\beta_V \leq \pm 0,5 \% U_{\text{nom}}$), без прикључене акумулаторске батерије. Узимајући у обзир изузетно велику капацитивност филтерског кондензатора, као и постојања могућности истовременог рада исправљача са две акумулаторске батерије (укупног капацитета 12000 Ah), јасно је да се ради о систему аутоматског управљања који ради на самој граници стабилности, са изузетно ниским вредностима коефицијента релативног пригушења. Због тога је и пројектовање стабилних регулатора излазног напона, односно струје, било веома захтевно. Ради постизања овако ниске таласности напона, на излазу исправљача је уграђен двоструки LC филтер, чиме су остварене захтеване радне карактеристике.

Следећа унапређења у односу на претходна техничка решења огледају се у уградњи универзалног мерног инструмента и струјних трансформатора за мерење улазних наизменичних електричних величина, као и за анализу квалитета електричне енергије. Подигнут је степен заштите од продора страних предмета на IP41 (са IP10 или IP21 на претходним исправљачима серије ДРИ), па је, узимајући у обзир велику дисипацију снаге на елементима енергетског кола, примењена нова концепција хлађења ормара исправљача, са комбинованим природним и форсираним ваздушних хлађењем.

На исправљачима серије ДРИ, са управљачком електронском јединицом заснованом на 16-битном микроконтролеру “Intel” 80C196KB16, по први пут је извршена интеграција операторског панела осетљивог на додир. Због ограничења примењене микропроцесорске картице типа “uP3”, која располаже само са једним портom за серијску комуникацију, развијен је нови софтвер, који подржава паралелну комуникацију у складу са два различита протокола: ModBus ASCII и INT-CPD-05 (наменски протокол, развијен пре двадесетак година у Електротехничком институту “Никола Тесла” за комуникацију са регулаторима енергетских претварача Института). Усавршени су алгоритми хистерезиса регулатора струје исправљача и биметалне заштите.

9. Стање решености проблема у свету

Већина светских произвођача тиристорских исправљача производи уређаје који, без прикључене акумулаторске батерије, могу да обезбеде ефективну вредност таласности излазног напона од око 5 % номиналног излазног једносмерног напона. Неки западноевропски произвођачи дају могућност да се, на основу додатног техничког захтева, омогући рад исправљача, без прикључене батерије, са таласношћу напона од 1 % U_{nom} .

Поједини модели тиристорских исправљача светских произвођача имају могућност мерења улазних наизменичних напона и струја, али немају могућност анализе параметара квалитета електричне енергије, какве пружају преносни анализатори снаге.

У каталозима светских произвођача обично се наводи степен заштите ормара IP20.

Један немачки произвођач прави тиристорске исправљаче за излазне струје до 400 А. Већина других произвођача прави пуњаче батерија за максималне излазне струје од 1000 А или 1200 А.

10. Опис техничког решења са карактеристикама

Постројење за одсумпоравање димних гасова у термоелектрани „Никола Тесла А” изграђено је на основу међународног споразума Владе Републике Србије и Владе Империје Јапан, везаног за изградњу нових еколошких постројења у Србији. Носилац уговора, као и техничког решења и технологије постројења за одсумпоравање димних гасова, била је јапанска компанија “Mitsubishi Hitachi Power Systems Ltd.” (MHPSP). Аутор тендерске документације и технички консултант на пројекту била је компанија “Tokyo Electric Power Services Co. Ltd.” (TEPSCO). На основу наруџбине предузећа “Електромонтажа” из Краљева, члана националног конзорцијума “Јединство”, у Електротехничком институту „Никола Тесла” су пројектована и произведена два исправљача ДРИ 110-1000. Уређаји са технолошким ознакама Т.36ЕF3 и Т.36ЕF4, испоручени су ради уградње у објекту “С5” новог постројења за одсумпоравање димних гасова. Веома велика излазна струја исправљача условљена је природом технолошког процеса одсумпоравања, првенствено везаном за производњу великих количина гипса као нуспродукта примењене технологије. Ради спречавања стврдњавања гипса у случају губитка напајања критичне опреме технолошког процеса, неопходна је веома велика аутономија акумулаторских батерија, што неминовно води до увећања њиховог капацитета, па, самим тим, и потребе за изузетно великом струјом одговарајућег исправљача – пуњача батерије.

На слици 1 је приказан изглед два исправљача ДРИ 110-1000 (ознаке Т.36ЕF3 и Т.36ЕF4), уграђених у објекту “С5” термоелектране “Никола Тесла А”. У тексту који следи биће укратко описане иновације које су први пут примењене на исправљачима серије ДРИ.

10.1. Нископропусни LCLC филтер

Ради смањивања таласности излазног напона и струје, са шинама тиристорског моста је повезан нископропусни LCLC филтер. Таласност напона се првенствено смањује електролитским кондензаторима, док се на таласност струје утиче пригушницама на гвозденом језгру. Формирањем двоструког LC филтера, постигнута је тражена таласност излазног напона, чија ефективна вредност није већа од 0,5 % U_{nom} . Да би се спречило засићење гвозденог језгра, обе пригушнице су, по струји, предимензионисане за по 5 %.



Слика 1. Два исправљача ДРИ 110-1000 (технолошке ознаке: T.36EF3 (слева) и T.36EF4 (здесна)) у објекту "С5" постројења за одсумпоравање димних гасова термоелектране "Никола Тесла А"

Смањивање таласности усмерене струје је остварено применом веома великих капацитивности и индуктивности, будући да рад са готово идеалном једносмерном струјом треба да се оствари и у случају да на излаз исправљача није прикључена акумулаторска батерија. Фактор таласности (рипла) напона (β_V) може да се израчуна из следеће једначине:

$$\beta_V = \frac{U_{rip} \sqrt{2}}{U_{DC}} \quad (1)$$

где је: $\sqrt{2} U_{rip}$ – амплитуда наизменичне компоненте напона (таласност напона), U_{DC} – излазни једносмерни напон.

На сличан начин, фактор таласности струје (β_I) може да се дефинише релацијом:

$$\beta_I = \frac{I_{rip} \sqrt{2}}{I_{DC}} \quad (2)$$

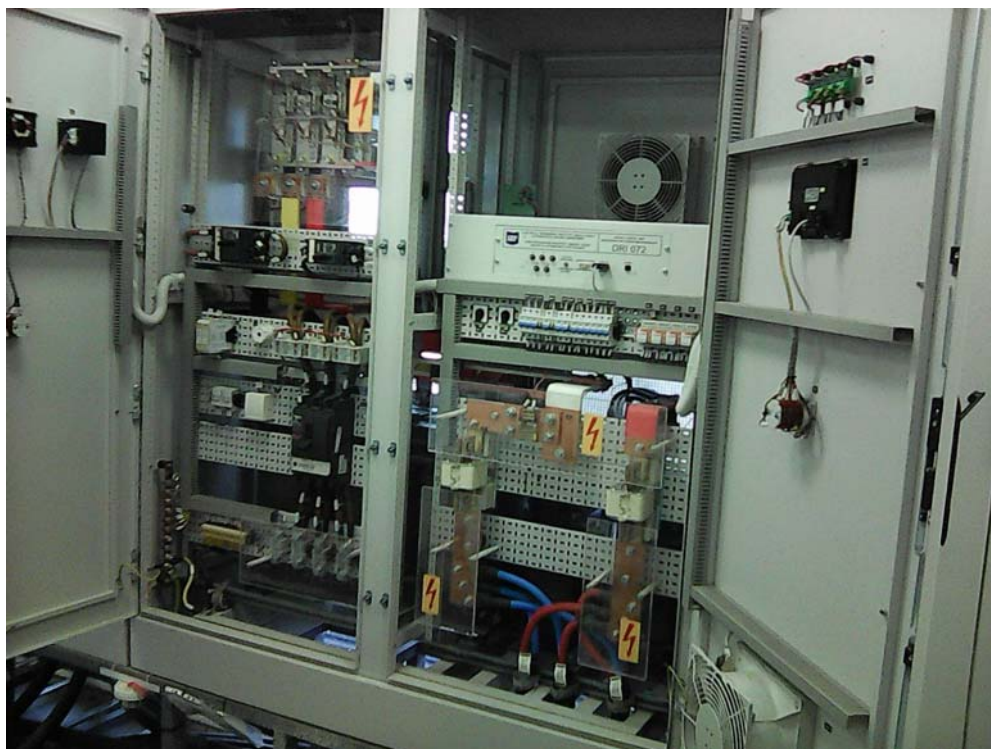
где је: $\sqrt{2} I_{rip}$ – амплитуда наизменичне компоненте струје (таласност струје), I_{DC} – излазна једносмерна струја исправљача.

Коришћењем детаљног рачунарског симулационог модела, пројектован је оптимални излазни филтер за потискивање таласности усмерене струје. Примењена је конфигурација LCLC нископропусног филтера на излазу исправљача. Избором одговарајућих параметара, описани филтер треба да ограничи фактор таласности напона излазне струје на највише $\pm 0,5\%$ (одговара релативној вредности наизменичне компоненте излазног напона од око $0,35\%$).

Средње (AV), ефективне (RMS) и вршне (PE) вредности струје кондензатора и пригушница добијене су симулацијом у најтежим условима рада – без прикључене батерије и са струјом потрошача једнаком $105\% I_{nom}$. За другу пригушницу (L_2), најтежи режим рада је када исправљач ради без филтерског кондензатора C_1 , али са максималном излазном струјом од 1050 А.

Са становишта таласности излазне струје, најтежи је случај рада исправљача само са батеријом и занемарљивом струјом потрошача (реда 0.1 А). У овом случају, резултат рачунарске симулације указује да ће фактор таласности струје бити, према релацији (2), једнак $\beta_I = 1.55\%$.

У складу са наведеним захтевима, као и резултатима рачунарске симулације, изабрани су следећи параметри излазног филтера: $L_1 = 80\ \mu\text{H}$, $I_{L1(AV)} = 1050\ \text{A}$, $I_{L1(PE)} = 1260\ \text{A}$, $C_1 = 108000\ \mu\text{F}$, $I_{C1(RMS)max} \geq 225\ \text{A}$, $L_2 = 24\ \mu\text{H}$, $I_{L2(AV)} = 1050\ \text{A}$, $I_{L2(PE)} = 1215\ \text{A}$, $C_2 = 36000\ \mu\text{F}$, $I_{C2(RMS)max} \geq 63\ \text{A}$. Као основни капацитивни елемент за употребу у излазном филтерском колу исправљача искоришћен је следећи кондензатор: “Ерсос” В43456А4189М000 ($C = 18000\ \mu\text{F}$, $I_{max}(100\ \text{Hz}, 85^\circ\text{C}) = 38\ \text{A}$). Прва група електролитских кондензатора (СЕ1-СЕ6) је заштићена прекидачем за номиналну струју од 250 А, али са прагом реаговања подешеним на 225 А. Друга група електролитских кондензатора (СЕ7-СЕ8) је заштићена прекидачем за номиналну струју од 63 А. Коришћењем наведеног филтера, постигнут је фактор таласности напона $\beta_V < 0,5\%$. Приликом фабричког техничког пријема, са чисто резистивним оптерећењем, у режиму допуњавања ($U_{nom} = 122,7\ \text{V}$), за струју потрошача од 92,9 А, у најгорем случају је измерена наизменична компонента излазног напона од 0,202 V (фактор таласности напона: $\beta_V = 0,23\%$).



Слика 2. Унутрашњост исправљача ДРИ 110-1000, са дигиталним регулатором типа “ДРИ 072” монтираним на врху предњег десног поља ормара

На слици 2 је приказан изглед унутрашњости ормара исправљача ДРИ 110-1000. Заштитни прекидачи две групе филтерских кондензатора се налазе на перфорираној плочи монтираној на врху предњег левог поља исправљача. Пригушнице излазног филтера се налазе иза перфорираних плоча предњег десног поља, док се филтерски кондензатори налазе на врху задњих поља ормара исправљача.

10.2. Мерни инструменти и сензори

Уградњом мерних инструмената и сензора струје високе класе тачности, на исправљачима серије ДРИ су добијене нове техничке могућности. Ради мерења усмерене излазне струје исправљача, уграђен је бакарни шант за 1500 А/60 mV, класе тачности 0,2 %. По први пут је на исправљачима серије ДРИ изведено мерење улазних наизменичних електричних величина. Ради мерења улазних фазних наизменичних струја, пре примара сувог трофазног енергетског трансформатора постављена су три струјна трансформатора (тип STN 88/60) номиналних параметара 400/5 А/А, привидне снаге 10 VA, класе тачности 0,5 %. Помоћу вишенаменског мерног инструмента „Iskra” МС 740 врши се мерење свих улазних параметара исправљача: наизменичних напона и струја, фактора снаге, потом привидне, активне и реактивне снаге, затим фактора хармонијског изобличења струје и напона, крест-фактора, итд. Класа тачности инструмента „Iskra” МС 740 се креће у опсегу од 0,2 % (напон, струја) до 1 % (реактивна енергија). Тип примењене мерне спреге је, према ознакама произвођача инструмента, 4u (3W4): трофазни систем са четворожичном везом и несиметричним оптерећењем.

10.3. Дигитални регулатор исправљача типа „ДРИ 072” са операторским панелом типа INT-NB5

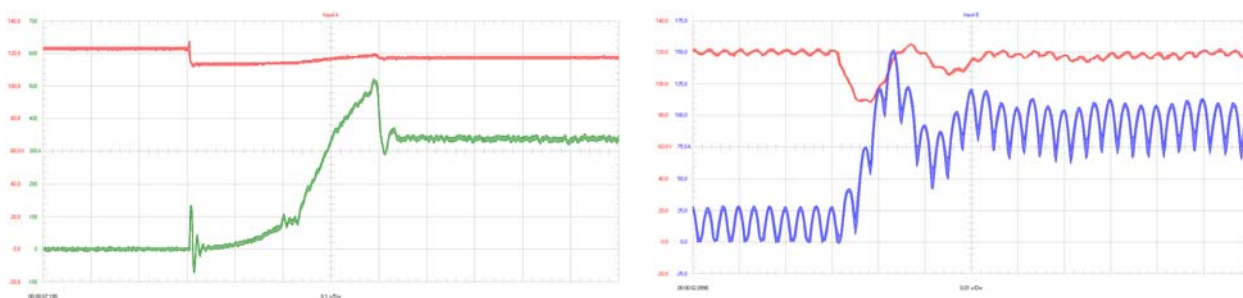
Исправљачи ДРИ 110-1000 представљају даље унапређење тиристорских исправљача серије ДРИ, заснованих на дигиталним регулаторима исправљача „ДРИ 07” и „ДРИ 07Б”. Управљање исправљачем ДРИ 110-1000 врши дигитални регулатор исправљача типа „ДРИ 072”, заснован на 16-битном микроконтролеру “Intel” 80C196KB16. Везу са надређеним рачунаром регулатор типа „ДРИ 072” успоставља посредством протокола серијске комуникације INT-CPD-05 (стандарда RS-485), док везу са операторским панелом осетљивим на додир INT-NB5 (преко другог конектора DB-9, али истог порта на микропроцесорској картици) успоставља посредством протокола ModBus ASCII.

Операторски панел INT-NB5, заснован на екрану осетљивом на додир “Omron” NB5Q-TW01B, првенствено служи за задавање података (микропроцесорској картици регулатора „ДРИ 072”) о временском ограничењу рада у режиму форсираног пуњења батерије. Корисник може да зада време рада у опсегу од 0 минута до 72 часа и 59 минута. Кориснички софтвер операторског панела је универзалан, па постоје различита виртуелна поља за задавање времена рада регулаторима исправљача Т.36ЕФ3 и Т.36ЕФ4. Поред поља за задавање времена рад у форсираном пуњењу, корисник панела може да приступи и часовнику стварног времена, као и основним подацима о исправљачу ДРИ 110-1000 и произвођачу уређаја.

У односу на претходне управљачке јединице серије ДРИ, дигитални регулатор исправљача „ДРИ 072” има промењено напајање. Уместо оригиналне картице “DP TENT В” искоришћена је модификована штампана картица “DP DJ”, пројектована за већу излазну струју, са додатним локалним филтерским кондензаторима и допунским конекторима према осигурачима и торусном трансформатору кола за напајање управљачке електронике. Због интеграције операторског панела INT-NB5, знатно је повећана снага локалног DC/DC претварача номиналног напона 24 V: са 24 W на 60 W.

У односу на претходне пројекте исправљача серије ДРИ, управљачки софтвер је додатно побољшан. Усавршени су упити софтверског хистерезиса регулатора излазне струје исправљача: примењено решење је посебно значајно у случајевима мерења усмерене излазне струје и напона изузетно ниске таласности. Промењен је алгоритам рада биметалне заштите исправљача: управљачка електроника искључује исправљач све док је раздвојен безнапонски контакт биметала хладњака тиристорског моста. Чим се безнапонски контакт биметала врати у нормално стање, исправљач аутоматски покреће поступак препокретања, без обзира на претходно трајање испида исправљача.

Специфичност представљеног техничког решења се огледа у примени новог комуникационог софтвера, који подржава паралелну комуникацију у складу са два различита протокола: ModBus ASCII и INT-CPD-05. Будући да се комуникација према протоколу INT-CPD-05 обавља само приликом сервисне интервенције произвођача, виши приоритет има комуникација према стандарду ModBus ASCII. Комуникација се активира одговарајућим софтверским прекидом. Након идентификације почетног бајта примљене поруке, микропроцесор дефинише да ли се врши читавање ModBus ASCII или INT-CPD-05 поруке. Улазне поруке се разврставају у посебне низове, који се попуњавају све до пријема завршних бајтова. Очитавање поруке по протоколу INT-CPD-05 се своди на читавање низа са хексадецималним вредностима. Очитавање поруке према протоколу ModBus ASCII је сложеније, и захтева да се прво изврши конверзија ASCII карактера у хексадецималне бројеве. Пре пријема завршних бајтова врши се прелиминарни прорачун параметра LRC (Longitudinal Redundancy Check). Када се, са по два завршна бајта, заврши пријем ModBus или CPD-05 поруке, завршава се и читавање примљене поруке. Тада се спроводи завршни прорачун контролних параметара (Checksum и LRC). Уколико израчунате и примљене вредности ових параметара нису једнаке, пријављује се грешка у пријему поруке, а индекси бројача и вредности контролних параметара се иницијализују. Уколико се примљене и прорачунате вредности контролних параметара поклапају, прослеђује се информација о приспећу нове поруке, уз вршење иницијализације контролних речи. На крају описаног процеса се мења статус регистра за контролу серијског порта, чиме се омогућава пријем нове поруке.



Слика 3. Таласни облици напона (горе, црвено) и струје (доле, плаво или зелено) исправљача. Лево: нови исправљач ДРИ 110-1000 (са регулатором типа „ДРИ 072”), са излазним LCLC филтером, приликом прикључивања испразњене акумулаторске батерије на исправљач и потоњег активирања регулатора струје ($100\% I_{ном}$); на графику је, зеленом бојом, приказана измерена вредност једне трећине укупне излазне струје. Десно: стари исправљач ДРИ 110-100 (са регулатором типа „ДРИ 07Б”) - рад без батерије, са излазним LC филтером, приликом промене резистивног оптерећења са $15\% I_{ном}$ на $96\% I_{ном}$.

На слици 3 је дат упоредни приказ таласних облика новог исправљача ДРИ 110-1000, са двоструким LC филтером, и старог исправљача ДРИ 110-100, са излазним LC филтером. Приказани таласни облици су добијени у различитим условима рада исправљача (нови исправљач је испитан приликом прикључивања испразњене

акумулаторске батерије у постројењу, са занемарљивим резистивним оптерећењем; стари исправљач: приликом рада без батерије, са променом резистивног оптерећења од 15 % до 96 % номиналне излазне струје). Ипак, јасно се уочава разлика у таласности напона и струје, чије су вредности далеко мање код новог исправљача са LCLC филтером.

10.4. Остале иновације

На исправљачима серији ДРИ је, по први пут, примењено још неколико мањих иновација. Уграђен је склоп за испитивање исправности земљоспојног релеа: руковалац може, преко уграђених отпорника, помоћу гребенастог прекидача да изазове појаву земљоспоја према позитивној или негативној излазној шини исправљача. Другим гребенастим прекидачем је омогућено оспособљавање или онеспособљавање сирене за звучну сигнализацију квара исправљача. У десном пољу исправљача уграђена су два вентилатора за форсирано хлађење ормара исправљача, који се, преко термостата, активирају када температура амбијента прекорачи задату вредност. Вентилатори су спрегнути са главним прекидачем исправљача, тако да се, при високим температурама амбијента, форсирано хлађење активира истовремено са укључивањем исправљача. Узимајући у обзир веома велике струје у енергетском колу исправљача, посебно са стране секундарна енергетског трофазног трансформатора, уместо кабловских веза свуда су примењене бакарне шинске везе. Ради избегавања преношења механичких осцилација са постоља са трансформатором и пригушницама на слободностојећи ормар, све везе индуктивних елемената са сабирницама у ормару изведене су помоћу флексибилних ламинарних бакарних шина. Подигнут је ниво механичке заштите руковаоца од електричног удара: преграде од метала и плексигласа обезбеђују интерно раздвајање плоча са монтираном нисконапонском опремом према степену заштите "Form 2b".

10.5. Техничке карактеристике исправљача ДРИ 110-1000:

Номинални напон исправљача:	110 V
Номинална струја исправљача:	1000 A
Број хелија батерије:	55
Капацитет батерије:	6000 Ah
Напон напајања:	3 x 400/230 V +10%/-15%, f = 50 Hz ± 5%
Снага напајања:	222 kVA
Струја напајања:	321 A
Преносни однос струјних мерних трансформатора:	400/5 A/A
Напон допуњавања:	122,7 V
Напон пуњења:	133,1 V
Напон дубоког пуњења:	143 V
Минимални дозвољени напон батерије:	100,6 V
Максимална струја пуњења:	600 A
Максимална струја форсираног пуњења:	100 A
Прелаз са пуњења на допуњавање (аутоматски рад):	100 A
Напон на потрошачима: у нормалном раду (допуњавање):	122,7 V
приликом пражњења:	110 V ± 10%
Заштите: пренапонска, поднапонска, заштита од преоптерећења, испад фазе мрежног напајања исправљача, испад батерије, заштита од несиметричног рада тиристорског моста	
ЛЕД сигнализација:	

висок напон, низак напон, кратак спој, испад фазе мрежног напајања, испад батерије, несиметрија моста, укључено, квар, земљоспој према +, земљоспој према -

Даљинска сигнализација безнапонским контактима:	
квар, висок напон батерије, низак напон батерије, преоптерећење, испад прекидача прве групе филтерских кондензатора (CE1-CE6), испад прекидача друге групе филтерских кондензатора (CE7-CE8), испад главног улазног прекидача, испад прекидача вентилатора 1, испад прекидача вентилатора 2, испад прекидача вентилатора тиристорског моста	
Даљинска дојава сигналом 4-20 mA:	струја исправљача, напон исправљача
Број аутоматских поновних укључења исправљача након реаговања појединих заштита:	3
Време између аутоматских поновних укључења исправљача:	30 секунди
Стандард дигиталне комуникације:	RS-485
Протокол дигиталне комуникације са надређеним рачунаром:	INT-CPD-05
Протокол дигиталне комуникације са оперативним панелом:	ModBus ASCII
Битски проток дигиталне комуникације:	4800 b/s
Формат поруке дигиталне комуникације (број битова податка; парност; стоп-бит):	8N1
Шум (бука):	< 85 dB
Радна температура:	0 – 40°C
Гранична температура за укључивање форсираног ваздушног хлађења ормара:	35°C
Праг реаговања биметалне заштите тиристорског моста:	95°C
Релативна влажност ваздуха:	до 90%, без кондензације
Надморска висина:	до 1000 m
Боја:	RAL7035
Степен заштите од продора страних тела и воде:	IP41
Степен механичке заштите од електричног удара:	Form 2b
Димензије:	
ширина:	1800 mm
дубина:	815 mm
висина:	2260 mm
маса:	1600 kg

11. Могућности примене техничког решења

Тиристорски исправљач ДРИ 110-1000 са дигиталним регулатором типа „ДРИ 072” погодан је за уградњу у електропривредним и индустријским системима непрекидног напајања код којих је примарни захтев везан за напајање потрошача велике снаге усмерном струјом изузетно ниске таласности, попут електромагнета.

Будући да располаже вишенаменским инструментом за мерење улазних наизменичних напона и струја, исправљач ДРИ 110-1000 има могућност аутономне анализе квалитета електричне енергије у напојној трофазној електричној мрежи, без потребе за коришћењем преносних анализатора снаге.

12. Техничка документација

У прилогу пријаве техничког решења налази се део главног пројекта исправљача (елаборат Електротехничког института “Никола Тесла” бр. 222049), под називом: **“Battery charger DRI 110-1000 – Main design for flue gas desulphurization construction project for thermal power plant Nikola Tesla – The first revision”**. Приложен је и део елабората бр. 222048, **“Технички опис исправљача ДРИ 110-1000 са упутством за руковање и одржавање”**. Оба документа су предата наручиоцу и инвеститорима дана 20.9.2022. године. Из наведених докумената, приложених у документацији овог техничког решења, искључени су делови који садрже поверљиве податке Института.

Напомена:

1. Ово техничко решење је настало у оквиру активности предвиђених уговорима о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО у 2020, 2021 и 2022. години, које су закључили Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије и Електротехнички институт “Никола Тесла” а.д, Универзитет у Београду.