

# **ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА**

## **Систем за мерење потрошње и квалитета напајања електричном енергијом**

### **Аутори техничког решења**

- Проф. др Борислав Јефтенић, дипл. инж. електротехнике
- Доц. др Милан Бебић, дипл. инж. електротехнике
- Доц. др Лепосава Ристић, дипл. инж. електротехнике
- др Александар Николић, дипл. инж. електротехнике
- Илија Михаиловић, дипл. инж. електротехнике
- Драган Јевтић, дипл. инж. електротехнике
- Неша Рашић, дипл. инж. електротехнике
- Никола Илић, мастер инж. електротехнике и рачунарства
- Никола Георгијевић, мастер инж. електротехнике и рачунарства

### **Наручилац техничког решења**

Техничко решење је урађено у оквиру пројекта Технолошког Развоја под насловом „Повећање енергетске ефикасности у одабраном индустријском сектору кроз имплементацију система енергетског менаџмента у малим и средњим предузећима“, евиденциони број пројекта ТР 33017.

### **Корисник техничког решења**

- Лабораторија за електромоторне погоне Електротехничког факултета Универзитета у Београду
- Електротехнички Институт Никола Тесла

### **Година када је техничко решење урађено**

2013.

### **Област технике на коју се техничко решење односи:**

Енергетика, енергетска ефикасност,  
ужа област:

Електротехника, електромоторни погони

### **Категорија техничког решења: Лабораторијски прототип - M85**

Научно веће Електротехничког Института "Никола Тесла", на седници одржаној 11.02.2014. године, донело је следећу

### ОДЛУКУ

Усвајају се извештаји о извршеним рецензијама техничког решења:

**„Систем за мерење потрошње и квалитета напајања електричном енергијом“**

пријављеног у трећој години истраживања на пројекту бр. TR33017, а које је доступно у електронској форми на адреси:


[http://www.pogoni.etf.rs/TR33017/teh\\_res\\_3-17-1.pdf](http://www.pogoni.etf.rs/TR33017/teh_res_3-17-1.pdf)

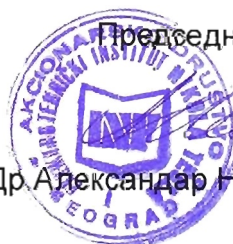
Извештаје су поднели проф. др Дарко Марчетић, ванр.проф. Факултета техничких наука Универзитета у Новом Саду и др Милутин Петронијевић, доцент Електронског факултета Универзитета у Нишу.

Ова одлука ступа на снагу даном доношења.

12.02.2014. године

Председник Научног већа

  
Др Александар Николић, научни сарадник



Odlukom Naučnog veća Elektrotehničkog Instituta Nikola Tesla iz Beograda, br. 33 od 13.1.2014. imenovan sam za recenzenta tehničkog rešenja „Sistem za merenje potrošnje i kvaliteta napajanja električnom energijom“, čiji su autori: prof. dr Borislav Jeftenić, dr Milan Bebić, dr Leposava Ristić, dr Aleksandar Nikolić, Ilija Mihailović, Dragan Jevtić, Neša Rašić, Nikola Ilić i Nikola Georgijević. Na osnovu pregleda dokumentacije tehničkog rešenja, podnosim sledeći

## IZVEŠTAJ

Tehničko rešenje „Sistem za merenje potrošnje i kvaliteta napajanja električnom energijom“ realizovano je 2013. godine. Dokumentacija tehničkog rešenja ima 13 strana i sadrži sledeća poglavlja:

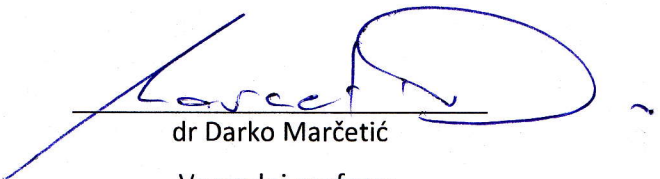
1. Opis problema koji se rešava tehničkom rešenjem
2. Stanje rešenosti problema u svetu
3. Suština tehničkog rešenja
4. Detaljan opis tehničkog rešenja
5. Literaturu

Tehničko rešenje pripada oblasti Energetike, Energetske efikasnosti, uža oblast Elektrotehnika, Elektromotorni pogoni, predložena kategorija tehničkog rešenja je M85 – Laboratorijski prototip.

Predloženi laboratorijski prototip uređaja za merenje napona i struja sastoji od razvijene ploče sa senzorima za napon i struju na bazi Hall-ovog efekta, standardnog digitalnog 4-kanalnog osciloskopa i skupa programa za izračunavanje snage u mestu priključenja i drugih veličina od interesa za procenu kvaliteta napajanja električnom energijom i uticaja potrošača na napojnu mrežu. Sensori napona i struje su standardne komponente, lako dostupne na tržištu, što povećava mernu nesigurnost dobijenih rezultata.

Prednost korišćenja ovakvog sistema u odnosu na komercijalno raspoložive uređaje pod zajedničkim nazivom „mrežni analizatori“ ili „analizatori snage“ (engl. power analyzers) je u mogućnostima za sprovođenje različitih proračuna, uključujući i proračune po teorijama koje nisu standardizovane, kao što je teorija o trenutnim vrednostima aktivne i reaktivne snage (engl. Instantaneous Active and Reactive Power Theory). Korišćeni osciloskop ima sinhrono odabiranje u sva četiri kanala, što je prednost u odnosu na standardne akvizicione sisteme, kod kojih su više analognih kanala multipleksirani na jedan A/D konvertor. Glavni nedostatak prikazanog prototipa je u donekle nekomfornom načinu priključenja merne aparature na sistem na kojem se vrši merenje.

Tehničko rešenje „Sistem za merenje potrošnje i kvaliteta napajanja električnom energijom“ ispunjava uslove propisane *Pravilnikom o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata*, kategorija „prototip, nove metode, softver, instrument, nove genske probe, mikroorganizmi i sl.“. Predlažem da se predloženo tehničko rešenje prihvati kao M85 – Laboratorijski prototip.

  
dr Darko Marčetić

Vanredni profesor  
Katedra za energetska elektroniku i pretvarače,  
Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije  
Fakultet tehničkih nauka  
Univerzitetu Novom Sadu

Odlukom Naučnog veća Elektrotehničkog Instituta Nikola Tesla iz Beograda, br. 33 od 13.1.2014. imenovan sam za recenzenta tehničkog rešenja „Sistem za merenje potrošnje i kvaliteta napajanja električnom energijom“, čiji su autori: prof. dr Borislav Jeftenić, dr Milan Bebić, dr Leposava Ristić, dr Aleksandar Nikolić, Ilija Mihailović, Dragan Jevtić, Neša Rašić, Nikola Ilić i Nikola Georgijević. Na osnovu pregleda dokumentacije tehničkog rešenja, podnosim sledeći

## IZVEŠTAJ

Tehničko rešenje „Sistem za merenje potrošnje i kvaliteta napajanja električnom energijom“ realizovano je 2013. godine. Dokumentacija tehničkog rešenja je na 13 strana formata A4 i sadrži sledeća poglavlja:

1. Opis problema koji se rešava tehničkom rešenjem
2. Stanje rešenosti problema u svetu - prikaz i analiza postojećih rešenja
3. Objašnjenje suštine tehničkog rešenja
4. Detaljan opis tehničkog rešenja (uključujući i prateće ilustracije i tehničke crteže)
5. Literaturu

Tehničko rešenje pripada oblasti Energetike, Energetske efikasnosti, uža oblast Elektrotehnika, Elektromotorni pogoni, predložena kategorija tehničkog rešenja je M85 – Laboratorijski prototip.

Predloženo tehničko rešenje bazirano je na korišćenju osciloskopa za snimanje vremenskih oblika napona i struja, i numeričkoj obradi podataka pomoću koje se dobijaju relevantni podaci o snazi i u interakciji potrošača (u ovom slučaju elektromotornog pogona) sa sistemom napajanja električnom energijom. Prednost korišćenja ovakvog načina analize je u mogućnosti primene modernih teorija o trenutnoj vrednosti aktivne i reaktivne snage i u mogućnosti sprovođenja harmonijske analize koja obuhvata harmonike veoma visokog reda.

Nedostatak prikazanog laboratorijskog prototipa u odnosu na komercijalno raspoložive uređaje za analizu kvaliteta napajanja električnom energijom je u sertifikatima o tačnosti rezultata koje renomirani proizvođači isporučuju uz uređaje.

Tehničko rešenje „Sistem za merenje potrošnje i kvaliteta napajanja električnom energijom“ ispunjava uslove propisane *Pravilnikom o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata*, kategorija „prototip, nove metode, softver, instrument, nove genske probe, mikroorganizmi i sl.“. Predlažem da se predloženo tehničko rešenje prihvati kao M85 – Laboratorijski prototip.



dr Milutin Petronijević

Docent

Katedra za Energetiku  
Univerzitet u Nišu Elektronski fakultet

## **1. Опис проблема који се решава техничким решењем.**

У индустријским постројењима примењује се све већи број нелинеарних потрошача као што су регулисани електромоторни погони са асинхроним моторима, напајани из фреквентних претварача. Предности примене таквих регулисаних погона су добро познате. Са друге стране, регулисани погони са фреквентним претварачима имају нерегулисани диодни трофазни исправљач према мрежи, што доприноси хармонијском изобличењу струје коју ти потрошачи узимају из мреже. У последње време се у литератури често среће термин „квалитет електричне енергије“ који описује утицај нелинеарних потрошача на напојну мрежу.

На тржишту постоји велики број комерцијалних уређаја за анализу квалитета напајања електричном енергијом, који се разликују по квалитету израде, могућностима анализе прилика у електричној мрежи, и наравно по цени. Заједничка карактеристика свих комерцијално расположивих уређаја је да имају затворен софтвер, тј. могу да изврше само оне анализе које је произвођач уређаја предвидео и програмирао, што ограничава опсег њихове употребе у научним истраживањима. Могућности анализа које неки уређај нуди су директно сразмерне његовој цени, тако да се са основном конфигурацијом уређаја, односно основним испорученим софтвером неке анализе не могу ни спровести. Додавање могућности инсталацијом софтверских модула могуће је само уколико је то произвођач предвидео, и резервисано је за мрежне анализаторе више класе, и наравно са већом ценом.

## **2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења**

Произвођачи мрежних анализатора су груписали своје производе у две ценовне групе. Уређаји који припадају нижој категорији мере струју и напон једнофазно уз претпоставку о симетричности оптерећења. Мрежни анализатори у горњој групи постоје са варијабилним бројем канала од једног до четири (за мерење четворожилних случајева напајања). Уређаји су тако дизајнирани да кориснику омогућавају лако повезивање и мерење без неопходних дубинских знања из области квалитета напајања електричном енергијом, алгоритама за обраду сигнала и начина израчунавања величина од интереса. Преглед мрежних анализатора реномираних произвођача је дат у [1-3]. На слици 1 је дата фотографија задње стране мрежног анализатора са најбољим перформансама фирме „Tektronix“, водећег светског произвођача мерне опреме. Тип анализатора је РА4000 са четири канала, који вишеструко надмашује по цени овде описани мерни уређај.



Сл. 1. Приказ конектора за прикључење (са задње стране) на мрежном анализатору PA4000 са четири канала фирме Tektronix

### 3. Суштина техничког решења

Мерни уређај за мерење потрошње и квалитета напајања електричном енергијом који је развијен у оквиру програмске активности предвиђене фазом 3 пројекта „Повећање енергетске ефикасности у одабраном индустријском сектору кроз имплементацију система енергетског менаџмента у малим и средњим предузећима“ представља алтернативно решење комерцијално расположивим мрежним анализаторима. Развијени уређај је заснован на примени стандардних сензора за напон струју на бази Hall-овог ефекта [4], и стандардног четворо-каналног дигиталног осцилоскопа. Целокупна обрада сигнала се врши на стандардном персоналном рачунару коришћењем програмског пакета Matlab. Исте алгоритме обраде сигнала и израчунавања могуће је применити и у програмског коду добијеном компајлирањем неког од стандардних програмских језика, чиме се може избећи употреба софтверског пакета Matlab, за који је потребна лиценца.

Предности примене развијеног уређаја за мерење у односу на комерцијално расположиве мрежне анализаторе су:

- Примена познатих алгоритама обраде сигнала и израчунавања.
- Могућност промене сензора струје и напона, тако да се могу прилагодити потрошачу, или групи потрошача.
- Примена сензора који детектују произвољне таласне облике напона и струје, укључујући и једносмерне компоненте.
- Упознавање и обука корисника уређаја за мерење са алгоритмима обраде сигнала и израчунавања величина релевантних за потрошњу електричне енергије и квалитета напајања електричном енергијом.
- Уређај користи четворо-канални дигитални осцилоскоп за аквизицију таласних облика одабраних напона и струја, што пружа флексибилност у раду са уређајем при мерењу различитих врста оптерећења. У случају мерења симетричног оптерећења врши се аквизиција фазних напона и струја једне фазе, док се у случају мерења несиметричног оптерећења врши аквизиција два међуфазна напона и две фазне струје.

Могућности савремених осцилоскопа превазилазе могућности мрежних анализатора у сличној ценовној категорији.

- Трошкови за опрему су мањи од цене мрежног анализатора.

Са друге стране, развој сопственог уређаја за мерење има и мане:

- Мерни уређај са четворо-каналним осцилоскопом може да израчунава потпун скуп величина релевантних за квалитет напајања електричном само за симетричне трофазне и монофазне напојне мреже (односно оптерећења). Такође употреба је ограничена на случајеве напајања трожилним напојним водом (без нултог вода). Мрежни анализатори су опремљени осмо-каналним (три фазна напона и напон нултог проводника, три фазне струје и струја нултог проводника) аквизиционим системом, тако да се могу примењивати и у случају несиметричних потрошача, и несиметричних напојних мрежа
- Употреба комерцијално расположивог мрежног анализатора је једноставнија и прилагођена је мање стручном особљу.
- Прикључивање сензора за мерење напона и струја у комерцијалним мрежним анализаторима је једноставније него у случају развијеног мерног уређаја.

Обрада сигнала помоћу програмског пакета Matlab подразумева елиминацију могућих офсета (присуство једносмерних компоненти) у сигналу које уносе мерни конвертори. То се постиже одузимањем средње вредности свих одбирака датог снимка од вредности сваког одбирка. Затим се врши скалирање сигнала, узимајући у обзир преносне односе мерних конвертора и омске вредности коришћених шантова ( $R_I$  и  $R_U$  на слици 2). Скалирање се врши у циљу добијања бројних вредности које одговарају физичким јединицама, односно које одговарају вредностима напона и струја у фазама погона. Следећи корак је израчунавање вредности напона и струја које нису мерени. У случају несиметричног оптерећења мере се међуфазни напони  $u_{ab}$  (напон између фаза „a“ и „b“) и  $u_{bc}$  као и струје у фазама „a“ и „b“. Преостали напон  $u_{ca}$  односно струју у преосталој фази (фаза „c“) добијамо коришћењем једначина (1) и (2).

$$u_{ab}(t) + u_{bc}(t) + u_{ca}(t) = 0 \quad (1)$$

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \quad (2)$$

У случају симетричног оптерећења мере се фазни напони и струје једне фазе а напоне и струје фаза за које мерења нису вршена се израчунавају користећи изразе (3) и (4).

$$u_a(t) = u_b(t - \frac{2T}{3}) = u_c(t + \frac{2T}{3}) \quad (3)$$

$$i_a(t) = i_b(t + \frac{2T}{3}) = i_c(t - \frac{2T}{3}) = 0 \quad (4)$$

По одређивању сва три напона и све три струје приступа се анализи у фреквентном домену применом дискретне Фуријеове трансформације помоћу матлаб функције засноване на FFT алгоритму (Fast Fourier Transform). Ова анализа омогућава рачунање величина од интереса при несинусоидалним напонима и струјама. Као резултат анализе у фреквентном

домену имају се фазни ставови и амплитуде свих хармоника почевши од првог (компонента на основној учестаности од 50Hz) до хармоника чија учестаност одговара половини учестаности одабирања сигнала (која је обрнуто сразмерна времену одабирања). Субхармоници и интерхармоници нису обухваћени анализом.

Затим се приступа извршавању дела програмског кода којим се израчунавају различите величине које су од интереса приликом проучавања погона са аспекта енергетске ефикасности и квалитета напајања електричном енергијом [5-7]. Једначине су груписане у две групе. У првој групи су једначине за прорачун величина које је могуће добити мерењем напона и струје једне фазе и дате су изразима почевши од (5) до (32). Индекси  $a$  у једначинама означавају да је у питању фазна величина (конкретно фаза „a“). Индекс  $A$  означава да је у питању величина добијена аритметичким збиром трофазних величина. Индекс  $h$  означава вредност која се односи на одговарајући ( $h$  – ти) хармоник. Број 1 у индексу означава величину која се односи на први хармоник (фундаментал), број 2 други хармоник, број 3 трећи итд.

У једначинама (5) до (13) су прорачунати ефективна вредност напона  $U_a$  [V] и струје  $I_a$  [A], трофазна активна снага  $P$  [kW], реактивна снага  $Q$  [kvar], привидна снага  $S$  [kVA] и фактор снаге  $TPF$ . Једначине (14) до (20) као резултат дају фазне величине као што су снага дисторзије  $D$  [var], ефективне вредности првих хармоника напона  $U_1$  [V] и струја  $I_1$  [A], активне  $P_1$  [W], реактивне  $Q_1$  [var] и привидне снаге  $S_1$  [VA] првог хармоника, као и тотално хармонијско изобличење струје  $THD_I$  и напона  $THD_U$  као и фактор снаге  $TPF$  и фактор помераја  $DPF$ . Једначине (21) до (25) се односе на трофазне величине и то привидна снага рачуната као векторски збир фазних привидних снага  $S_V$  [VA], привидна снага  $S_A$  [VA], снага дисторзије  $D_A$  [var] и реактивна снага  $Q_A$  [var] рачунате као алгебарски збир одговарајућих фазних снага као и фактор снаге дат у односу на алгебарску  $TPF_A$  и векторску привидну снагу  $TPF_V$ . Поред њих дефинисани су и трофазни еквиваленти напона  $U_e$  [V], струја  $I_e$  [A] и привидне снаге  $S_e$  [VA]. Једначине (26) до (32) су дефинисане на основу препорука IEEE (Std 1459-2010) [8] и представљају растављање мерене вредности сигнала на две компоненте. На компоненту сигнала која представља њен први хармоник и компоненту сигнала која у себи садржи све остале хармонике, за напоне  $U_H$  [V], струје  $I_H$  [A] и за снаге, активну  $P_H$  [W] и реактивну  $Q_H$  [var]. Као резултат тих једначина добијају се и величине као што су неактивна снага  $N$  [var], привидна неактивна снага  $S_N$  [VA], привидна хармонијска снага  $S_H$  [VA], снага дисторзије услед изобличења напона  $D_U$  [var] и снага дисторзије услед изобличења струја  $D_I$  [var]

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{a2}^2 + I_{a3}^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} \quad (5)$$

$$U_a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{U_{a1}^2 + U_{a2}^2 + U_{a3}^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} U_h^2} \quad (6)$$

$$P = P_a + P_b + P_c = \frac{1}{T} \int_0^T (u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t)) dt \quad (7)$$

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T u_a(t)i_a(t) dt = \sum_{h=0}^{\infty} U_{ah} I_{ah} \cos(\theta_{ah} - \delta_{ah}) = \sum_{h=0}^{\infty} U_{ah} I_{ah} \cos \phi_{ah} \quad (8)$$

$$Q_a = \sum_{h=0}^{\infty} U_{ah} I_{ah} \sin \phi_{ah} = \sum_{h=0}^{\infty} U_{ah} I_{ah} \sin(\theta_{ah} - \delta_{ah}) \quad (9)$$

$$Q_A = Q_a + Q_b + Q_c \quad (10)$$

$$S_A = U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c \quad (11)$$

$$S_A = S_a + S_b + S_c \quad (12)$$

$$TPF_A = \frac{P}{S_A} \quad (13)$$

$$D_a = \sqrt{S_a^2 - P_a^2 - Q_a^2} \quad (14)$$

$$P_{a1} = U_{a1} I_{a1} \cos(\theta_{a1} - \delta_{a1}) \quad (15)$$

$$Q_{a1} = U_{a1} I_{a1} \sin(\theta_{a1} - \delta_{a1}) \quad (16)$$

$$THD_{I_a} = \frac{\sqrt{I_a^2 - I_{a1}^2}}{I_{a1}} \quad (17)$$

$$THD_{U_a} = \frac{\sqrt{U_a^2 - U_{a1}^2}}{U_{a1}} \quad (18)$$

$$TPF_a = \frac{P_a}{S_a} \quad (19)$$

$$DPF_a = \cos(\theta_{a1} - \delta_{a1}) = \cos(\phi_{a1}) \quad (20)$$

$$S_V = \sqrt{\left(\sum_{k=a}^c P_k\right)^2 + \left(\sum_{k=a}^c Q_k\right)^2 + \left(\sum_{k=a}^c D_k\right)^2} \quad (21)$$

$$TPF_V = \frac{P}{S_V} \quad (22)$$

$$I_e = \frac{\sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}}{3} \quad (23)$$

$$U_e = \frac{\sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2}}{3} \quad (24)$$

$$S_e = 3U_e I_e \quad (25)$$

$$I_{aH} = \sqrt{I_a^2 - I_{a1}^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (26)$$

$$U_{aH} = \sqrt{U_a^2 - U_{a1}^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2} \quad (27)$$

$$P_{aH} = P_a - P_{a1} = P_a - U_{a1} I_{a1} \cos \phi_{a1} = \sum_{h=2}^{\infty} U_{ah} I_{ah} \cos \phi_{ah} \quad (28)$$

$$Q_{aH} = Q_a - Q_{a1} = Q_a - U_{a1} I_{a1} \sin \phi_{a1} = \sum_{h=2}^{\infty} U_{ah} I_{ah} \sin \phi_{ah} \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
S_a^2 &= (U_a I_a)^2 = (I_{a1}^2 + I_{aH}^2)(U_{a1}^2 + U_{aH}^2) = \\
&= I_{a1}^2 U_{a1}^2 + I_{a1}^2 U_{aH}^2 + I_{aH}^2 U_{a1}^2 + I_{aH}^2 U_{aH}^2 = \\
&= S_{a1}^2 + D_{aU}^2 + D_{aI}^2 + S_{aH}^2 \\
&= S_{a1}^2 + S_{aN}^2
\end{aligned} \tag{30}$$

$$S_{aH}^2 = P_{aH}^2 + N_{aH}^2 \tag{31}$$

$$S_a^2 = P_{a1}^2 + Q_{a1}^2 + D_{aU}^2 + D_{aI}^2 + P_{aH}^2 + N_{aH}^2 = P_a^2 + N_a^2 \tag{32}$$

У другој групи су једначине за прорачун величина које се добијају мерењем два међуфазна напона и две фазне струје и дате су изразима почевши од једначине (33) до (37). У њима  $p(t)$  [W] и  $q(t)$  [имагинарно VA] представљају тренутну активну и тренутну реактивну снагу док  $s(t)$  [VA] представља комплексну тренутну привидну снагу [9]. Поред тих величина могуће је израчунати и све величине које се добијају мерењем фазних струја и њиховом анализом у фреквентном домену, као што су  $I_a$  [A],  $I_1$  [A],  $THD_I$ ,  $I_e$  [A], и  $I_H$  [A]. У двофазном начину повезивања (два међуфазна напона и две фазне струје) уређаја за мерење омогућено је мерење снаге, и спектрална анализа струја (које су увек критичније са хармонијског аспекта). Велика предност једначина (33) до (37) је што важе и у стационарним и у транзијентним режимима, што значи да су погодни за употребу приликом мерења у случају покретања или заустављања погона.

$$p(t) = u_{ac}(t)i_a(t) + u_{bc}(t)i_b(t) \tag{33}$$

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_{ab}(t)i_c(t) + u_{bc}(t)i_a(t) + u_{ca}(t)i_b(t)) \tag{34}$$

$$\underline{s}(t) = p(t) + jq(t) \tag{35}$$

$$s(t) = \sqrt{p^2(t) + q^2(t)} \tag{36}$$

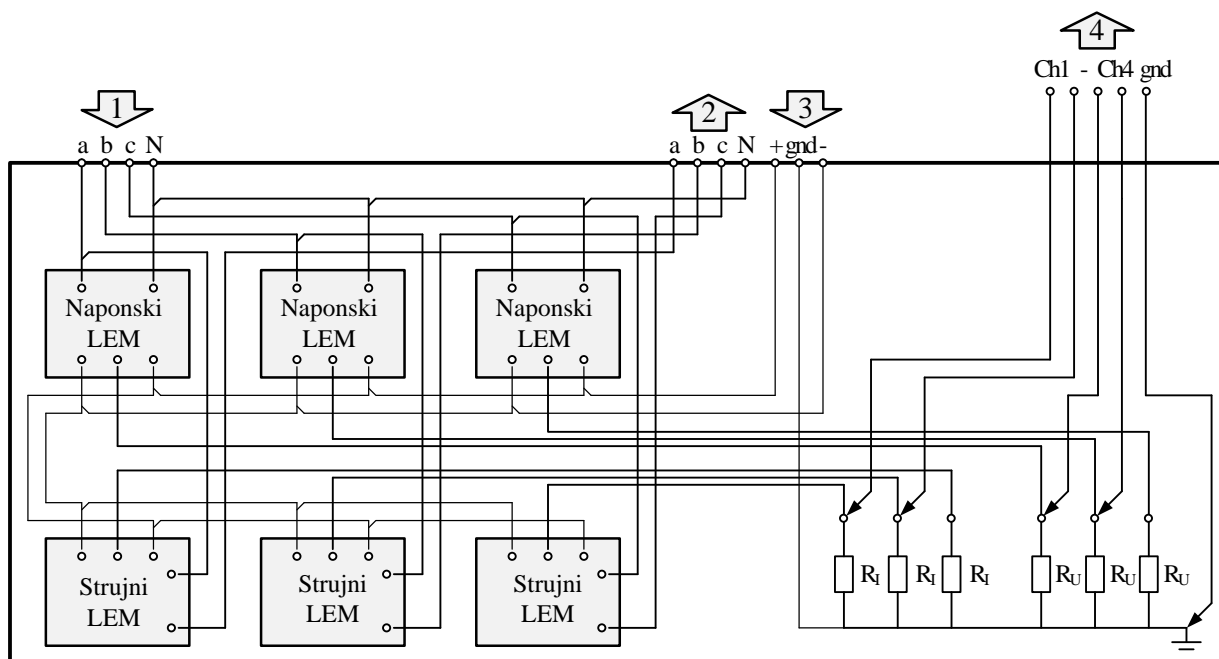
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \tag{37}$$

Из великог броја дефиниционих образаца који су овде приказани и који се у софтверу израчунавају произилази још једна могућност мерног уређаја. Могуће је одређивање одступања резултата приликом примене различитих метода израчунавања величина од интереса у конкретним ситуацијама као и осмишљавање нових образаца односно алгоритама и њихово упоређење са стандардним.

#### 4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације и техничке цртеже)

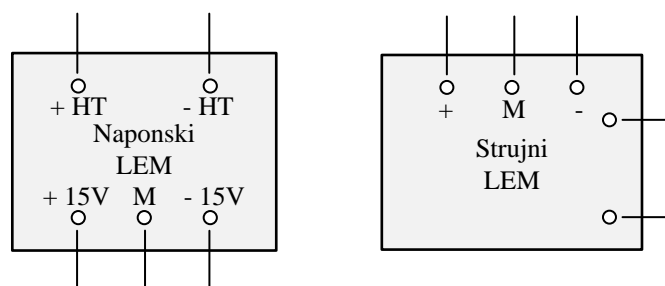
Мерни уређај се састоји од рачунара, осцилоскопа и струјних односно напонских конвертора (LEM модула). Три напонска и три струјна мерна конвертора су комплетно ожичена и постављена на плочу заједно са одговарајућим бројем редних стезалки. Редне стезалке служе за повезивање проводника између мерних конвертора са једне стране и одговарајућих места у погону где се жели мерити напон односно струја са друге стране. LEM модули су напојени са  $\pm 15V$  из помоћног напајања. На плочи постоје отпорници који су предвиђени за повезивање осцилоскопа помоћу напонских сонди. Осцилоскоп је повезан са

рачунаром коме се прослеђују бројне вредности мерених величина путем USB 2.0 везе. На слици 2. су симболички приказани мерни конвертори и начин њиховог ожичења за случај када су на плочу доведени фазни напони и струје.



Сл. 2. Део развијеног уређаја, плоча са напонским и струјним модулима (мерним конверторима)

Редне стезаљке испод стрелица са ознаком „1“ и „2“ служе за повезивање каблова ка одговарајућим тачкама у погону где се мерења врше. Редне стезаљке испод стрелице са ознаком „3“ служе за повезивање помоћног извора напајања потребног за рад мерних конвертора. Испод стрелице са ознаком 4 су приказани крајеви четири напонске сонде осцилоскопа које се повезују на отпорнике (шантове) на слици означене са  $R_I$  и  $R_U$ . На левој страни слике 2 дат је поједностављен приказ прикључака коришћеног напонског мерног конвертора.



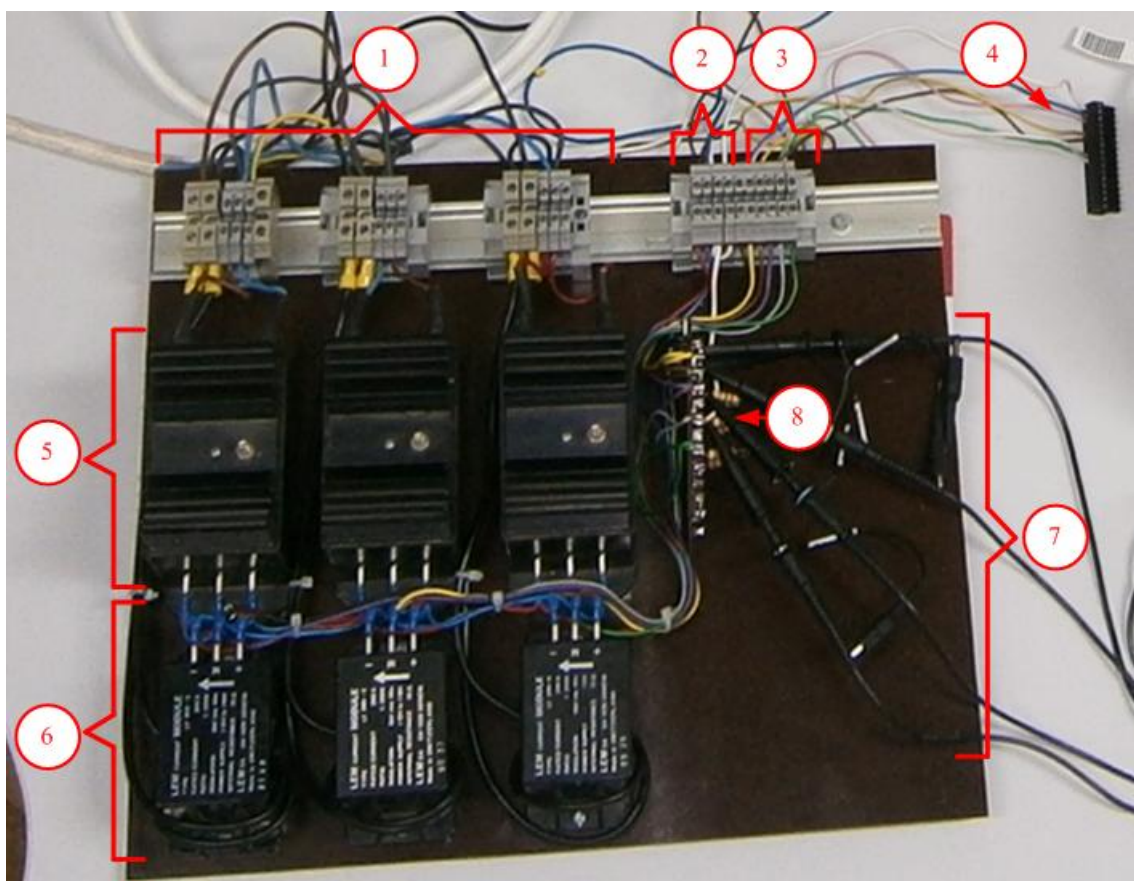
Сл. 3. Детаљ са слике 2, распоред и ознаке прикључака LEM модула (мерних конвертора)

На прикључке +HT и –HT се доводи мерени напон (до 400V) и који се конвертован у струјни сигнал прослеђује на прикључку M. Прикључци +15V и –15V служе за повезивање помоћног напајања. На десној страни слике 2 је дат поједностављен приказ прикључака коришћеног струјног модула. На прикључке (отвор кроз који се провуче жица) са његове десне стране се доводи струја (до 200A) која се конвертује у струјни сигнал и прослеђује на прикључак M. Прикључци са ознакама + и – служе за повезивање помоћног напајања потребног за рад модула. Карактеристике мерних конвертора су дате у Табели 1.

Табела 1. Електричне карактеристике коришћених струјних и напонских мерних конвертора

Тип модула	Струјни ЛЕМ модул (струјни конвертор)		Напонски ЛЕМ модул (напонски конвертор)
Назив модула	LT 200-S	Назив модула	LV 100 – 400
Називна струја	200 А	Називна струја примарног намотаја	25 mA
Преносни однос	1:2000	Преносни однос	400 V/ 50 mA
Изолационе особине	6 kV ефективно, 60 sec	Изолационе особине	6 kV ефективно, 60 sec
Напајање	$\pm 12\text{ V do } \pm 18\text{ V}$	Напајање	$\pm 12\text{ V do } \pm 18\text{ V}$
Унутрашња отпорност	35 $\Omega$	Унутрашња отпорност секундарног намотаја	60 $\Omega$

На слици 4 је дата фотографија плоче са струјним и напонским мерним конверторима са нумерички означеним компонентама од којих се састоји.



Сл. 4. Компоненте плоче са струјним и напонским мерним конверторима

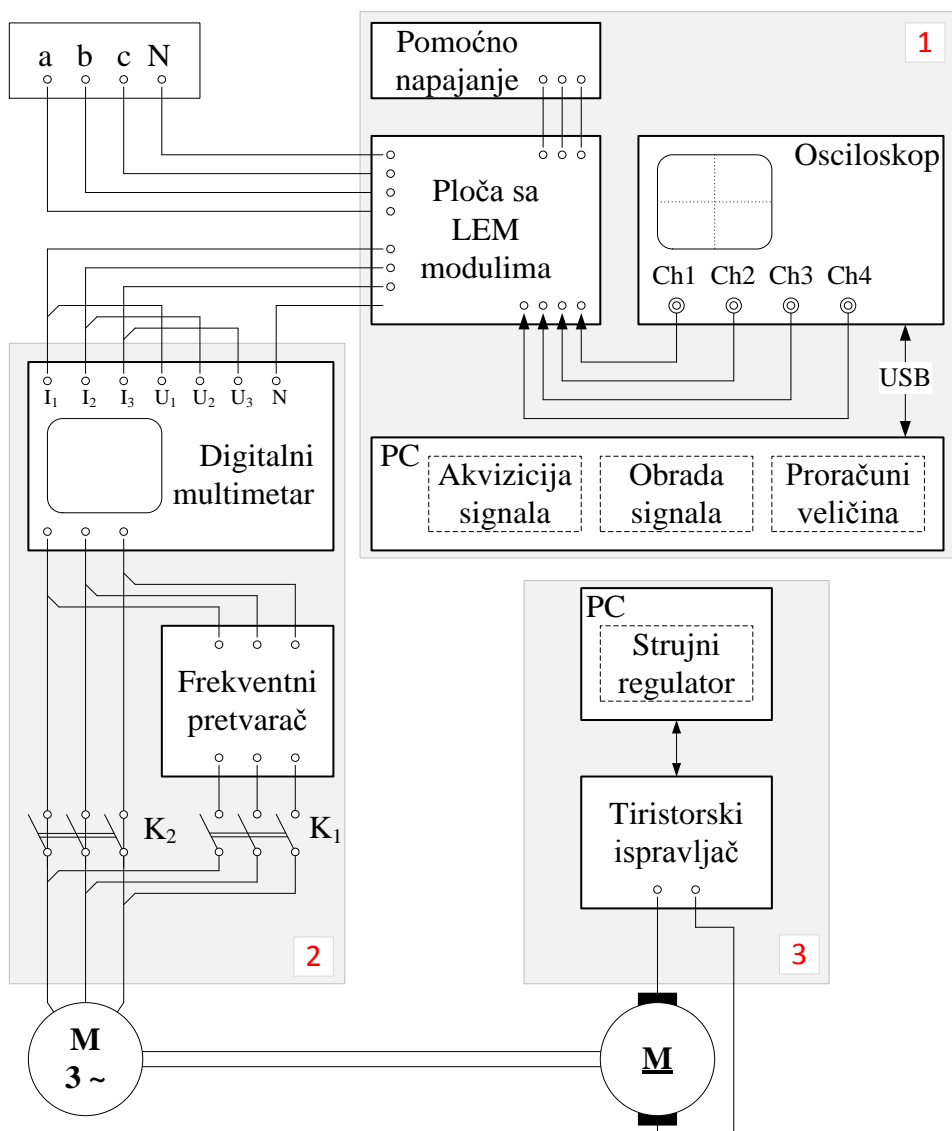
(1 – Редне стезаљке за повезивање одабраних фаза на мерни уређај, 2 – Редне стезаљке за повезивање помоћног напајања, 3 – Редне стезаљке за прикључење аквизационе картице, 4 – Конектор аквизационе картице, 5 – Три напонска мерна конвертора, 6 – Три струјна мерна конвертора, 7 – Напонске сонде осцилоскопа, 8 – Струјни и напонски шантови)

Употребљени осцилоскоп има четири аналогна канала стога је могуће мерити максимално четири величине и његове техничке карактеристике су дате у Табели 2.

Табела 2. Техничке карактеристике осцилоскопа

Назив осцилоскопа	Tektronix MSO 2014B Mixed Signal Oscilloscope 16 CH MSO 100MHz 1 GS/s
Максимални пропусни опсег	200MHz
Максимална брзина одабирања	1GS/s
Број канала	4 аналогна / 15 дигиталних
Дужина снимања	10 <sup>6</sup> одбирака (по сваком каналу)
Повезивање USB 2.0	Предњи порт за складиштење снимака на флеш меморији Задњи порт за повезивање са рачунаром

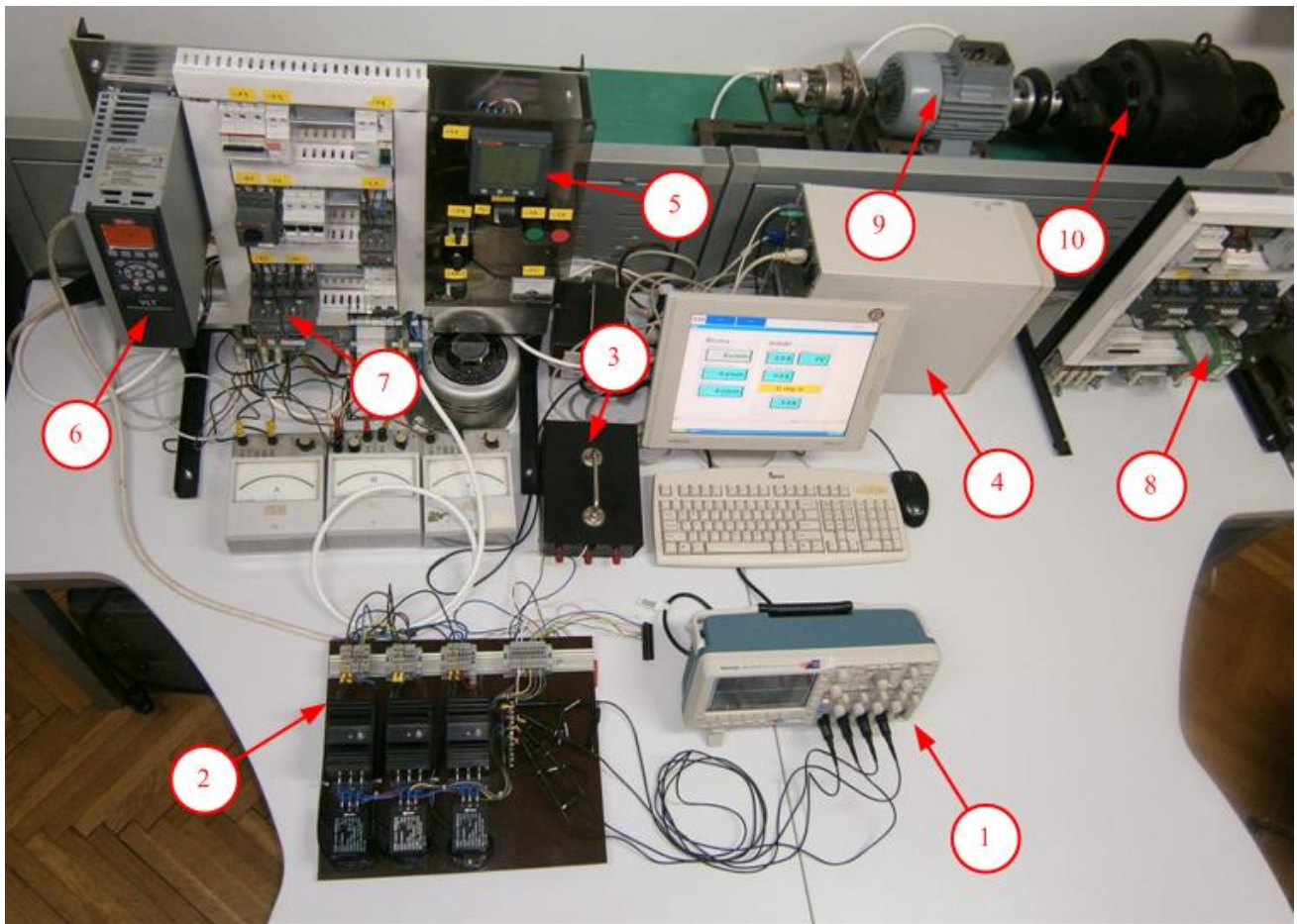
На слици 5 дата је блок шема мерног уређаја и погона [6, 8] на коме је вршена верификација резултата. Изабран је асинхрони погон као најчешће примењивани погон у индустрији и то за случај регулисаног (напајаног из фреквентног претварача) и нерегулисаног погона (напајаног из мреже). Елементи у уоквиреном пољу означеном са 1 чине мерни уређај представљен овим техничким решењем. Уоквирено поље означено са 2 представља лабораторијску плочу (панел) са које се напаја асинхрони мотор. На плочи су повезани дигитални мултиметар, фреквентни претварач и два контактора који омогућавају да се мотор напаја из мреже или из фреквентног претварача. Мерни уређај се везује редно између мрежних прикључака (означених са а, b, c и N) и плоче за напајање асинхроног мотора.



Сл. 5. Блок шема коришћене опреме за верификацију резултата  
(1 – Мерни уређај, 2 – Пloча са опремом за напајање асинхроног мотора,  
3 – Пloча са опремом за напајање једносмерног мотора)

Вратило асинхроног мотора је круто повезана са вратилом једносмерног мотора који се напаја из тиристорског исправљача који је струјно регулисан (уоквирено поље са ознаком 3 на слици 5) и који служи као оптерећење. На тај начин је омогућено адекватно оптерећење асинхроног мотора током верификације резултата и мерења напона и струја за више различитих оптерећења погона.

На слици 6 је дата фотографија коришћене опреме. Опрема коришћена за верификацију резултата се користи за извођење лабораторијских вежби из предмета Електромоторни погони у оквиру основних академских студија на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.



Сл. 6. Компоненте мерног уређаја и опреме коришћене за верификацију резултата мерења (1- Осцилоскоп, 2- Плоча са LEM модулима (струјним и напонским мерним конверторима), 3- Помоћно напајање, 4- Рачунар за аквизицију и обраду података са осцилоскопа и вршење прорачуна над њима, 5- Дигитални мултиметар, 6- Фреквентни претварач, 7- Контактори K1 и K2 на плочи за напајање асинхроног мотора, 8- Плоча за напајање једносмерног мотора, 9- Асинхрони мотор, 10- Једносмерни мотор)

Сигнали са напонских сонди се доводе на аналогне канале осцилоскопа по следећем распореду:

- За случај несиметричног оптерећења канал 1 је међуфазни напон  $U_{ab}$ , канал 2 је међуфазни напон  $U_{bc}$ , канал 3 је фазна струја  $I_a$  и канал 4 је фазна струја  $I_b$  (напони и струје који нису мерени се рачунају коришћењем једначина (1-2)).
- За случај симетричног оптерећења канал 1 је фазни напон  $U_a$  канал 2 је фазна струја  $I_a$  (напони и струје који нису мерени се сматрају идентичним са оним у фази „a“ али фазно помереним за одговарајуће углове).

Путем USB везе са рачунаром и коришћењем програма фирме Tektronix „OpenChoice Desktop“ се врши аквизиција података односно бројне вредности које одговарају доведеним сигнаlima на аналогним каналима се прослеђују рачунару у CSV формату (Comma separated values). На рачунару се помоћу програмског кода написаног у Matlab-у (производ фирме MathWorks) приступа CSV фајловима и врши се обрада сигнала да би се добиле величине од интереса. На плочи са мерним струјним и напонским конверторима је предвиђена и опција

(конектор) за прикључење РС аквизиционе картице. У том случају треба узети у обзир да аквизиционе картице најчешће немају синхроно одабирање на својим аналогним каналима, и да ће то захтевати имплементацију алгоритама за смањење грешке у тако добијеним резултатима мерења.

## Литература

- [1] F. Corporation. (2012, Fluke 434-II/435-II/437-II Three Phase Energy and Power Quality Analyzer. *Users Manual (rev.1 06/12)*.
- [2] C. S.A. Supply Network Analyzer AR5 and AR5-L. *Instruction Manual M98151101-03-10B*.
- [3] Tektronix. PA4000 Power Analyzer. *User Manual (077-0815-00)*.
- [4] LEM. (2008, Current and Voltage Transducers for Industry applications. *Industry Catalogue*.
- [5] M. Fernando, *et al.*, "Power Quality Measurement Under Non-Sinusoidal Condition," in *Power Quality Monitoring, Analysis and Enhancement*, A. Zobaa, *et al.*, Eds., ed: InTech, 2011.
- [6] F. C. D. L. Rosa, *Harmonics and Power Systems*: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [7] S. Svensson, "Power Measurement Techniques for Non-Sinusoidal Conditions," Doctor of Philosophy, Department of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden, 1999.
- [8] IEEE, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," ed, 2010.
- [9] A. H., *et al.*, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.