

# ***PREIZKUŠANJE USTREZNOSTI DELOVANJA PMU NAPRAV Z RTDS SIMULATORJEM***

Denis Sodin<sup>1,2</sup>, Marko Mihelin<sup>1,2</sup>, Miha Smolnikar<sup>1,2</sup>, Urban Rudež<sup>3</sup>

<sup>1</sup> – ComSensus d.o.o., Brezje pri Dobu 8a, 1233 Dob  
[denis.sodin@comsensus.eu](mailto:denis.sodin@comsensus.eu) [marko.mihelin@comsensus.eu](mailto:marko.mihelin@comsensus.eu) [miha.smolnikar@comsensus.eu](mailto:miha.smolnikar@comsensus.eu)

<sup>2</sup> – Institut Jožef Stefan, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana  
[denis.sodin@ijs.si](mailto:denis.sodin@ijs.si) [marko.mihelin@ijs.si](mailto:marko.mihelin@ijs.si) [miha.smolnikar@ijs.si](mailto:miha.smolnikar@ijs.si)

<sup>3</sup> – Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana  
[urban.rudez@fe.uni-lj.si](mailto:urban.rudez@fe.uni-lj.si)

**Povzetek:** S porastom uporabe PMU tehnologije med operaterji sistema se je na tržišču začelo pojavljati vse več proizvajalcev PMU-jev, ki pa v splošnem uporabljajo različne pristope za izračun kazalcev. Z namenom zagotoviti, da bodo meritve PMU naprav različnih proizvajalcev med sabo konsistentne (predvsem pa dovolj natančne) sta bila uvedena standarda IEEE C37.118 in IEEE TSS. Standarda določata smernice in testne postopke s katerimi se celovito oceni delovanje posamezne PMU naprave v različnih obratovalnih scenarijih, ki zajemajo tako stacionarno stanje kot tudi nekatere dinamične pojave. Kljub temu pa je dejanski postopek preverjanja skladnosti PMU naprave z omenjenima standardoma precejšen izziv že zaradi številčnosti zahtevanih testov. Konvencionalno preizkušanje PMU naprav predvideva priključitev naprave na opremo, ki rekonstruira vnaprej znane poteke napetosti in tokov za vsak posamezni scenarij (»playback« oprema), nakar je izvedena primerjava izvornih in izračunanih veličin. Takšen postopek zahteva veliko truda in predvsem vložnega uporabnikovega časa zaradi pomanjkanja avtomatizacije. Izboljšavo ponuja simulator dinamičnih pojavov v elektroenergetskem omrežju, ki izvaja izračune v realnem času (RTDS).

**Ključne besede:** PMU, RTDS, HIL, IEEE C37.118, IEEE TSS.

## ***IEEE STANDARDS COMPLIANCE TESTING OF PMU WITH RTDS***

**Abstract:** With increasing use of PMU technology amongst network operators, more and more manufacturers of PMUs started to emerge, who in principle, use different algorithms for calculation of phasors. In order to ensure interoperability of different PMUs (and adequate performance of individual PMU), standards IEEE C37.118 and IEEE TSS were introduced. Standards define guidelines and testing procedures that thoroughly evaluate performance of PMU in steady state as well as performance during dynamic events. Nevertheless the sheer number of tests required to evaluate compliance with both standards still poses a challenge. Most common approach for testing of PMU devices is to play known waveforms of voltage and current to PMU, using a playback equipment and then make a comparison of input and calculated values. This approach requires much of user's effort and time due to lack of automation. One of possible solutions comes with use of real-time digital simulator of dynamic events in power network (RTDS).

**Keywords:** PMU, RTDS, HIL, IEEE C37.118, IEEE TSS.

## 1 UVOD

Dandanes je v elektroenergetiki veliko aktivnosti povezanih z nadgradnjo obstoječega električnega omrežja v smislu izkoriščanja razvoja v komunikacijski tehnologiji (pametna omrežja). Za ta prehod je potrebnih kar nekaj izboljšav v trenutni infrastrukturi. Pri tem veliko vlogo igra vključitev pametnih elektronskih naprav (IED). Ena izmed njih je gotovo tudi naprava za merjenje kazalcev električnih veličin (PMU). Uporaba le-te pripomore k spoznavnosti omrežja v realnem času s časovno resolucijo vse do 200/s, in sicer z meritvami frekvence, njenega prvega časovnega odvoda (RoCoF), napetostnih in tokovnih kazalcev. Časovne značke meritev, zajetih na različnih geografskih lokacij, omogočajo, da so vse meritve časovno poravnane oz. sinhronizirane, kar omogoča na pregleden način predstaviti natančno in celovito sliko stanja omrežja (vključno z zajemom nekaterih dinamičnih pojavov).

Preden se posamezen PMU lahko priključi v omrežje pa je potrebno preveriti sledeče:

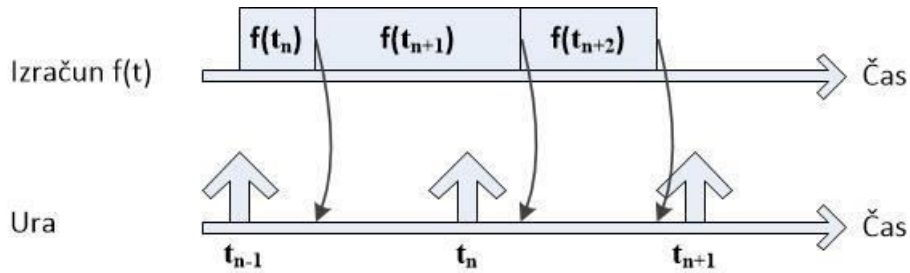
- da je naprava dovolj natančna ter s tem ustrezno odraža razmere v omrežju,
- da je naprava združljiva z ostalimi, že obstoječimi napravami (proizvajalci PMU-jev za izračun fazorjev uporabljajo različne pristope, meritve pa morajo biti kljub temu med sabo konsistentne).

Glavno pomoč pri zagotavljanju teh pogojev preizkuševalcu ponujata IEEE standard C37.118.1-2011 [1] skupaj z razširitvijo C37.118.1a-2014 [2] in IEEE standard TSS (test suite specification) [3]. Prvi določa, katere teste mora PMU prestati in znotraj kakšnih mej morajo biti izračunane veličine za posamezen test, da se PMU še smatra kot sprejemljiv. Prav tako pa ta standard definira dva možna razreda delovanja PMU-jev (M-razred in Prazred). Za aplikacije, ki zahtevajo veliko natančnost meritev se uporablja M-razred, med tem, ko se P-razred uporablja predvsem v aplikacijah, ki zahtevajo hiter odziv. Meje posameznih testov so za različna razreda različne, se pa v obeh primerih testira tako delovanje v stacionarnem stanju, kot tudi v dinamičnih razmerah. Vseeno pa ta standard specifično ne določa niti podrobnosti testnega postopka, niti postopka izračunov, kar lahko povzroči različne rezultate za isti PMU. To je bil razlog za nastanek standarda TSS, ki je dvoumnosti glede samega testiranja odpravil, je pa s sabo prinesel novo težavo. Standard namreč predvideva, da se ustreznost delovanja PMU-ja preizkusi s stotinami meritev, kar lahko od preizkuševalca zahteva ogromno truda, predvsem pa vloženege časa. Korak k avtomatizaciji postopka testiranja ponuja RTDS [4], ki je posebej za namen preizkušanja skladnosti PMU-jev s prej omenjenima standardoma razvil programski paket PMU Utility. Preostanek članka bo namenjen predstavitvi testnega okolja in rezultatov testiranja konkretne PMU naprave.

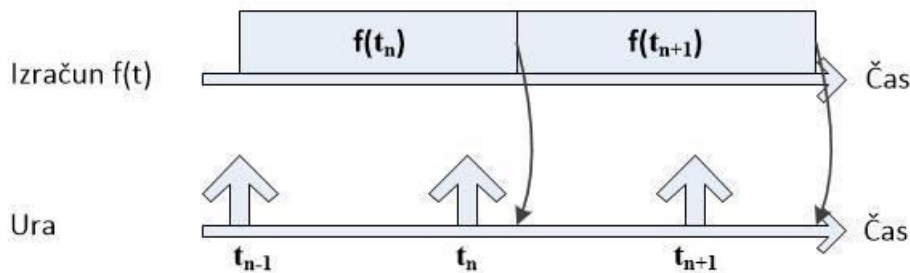
## 2 PREDSTAVITEV TESTNEGA OKOLJA

### 2.1 RTDS

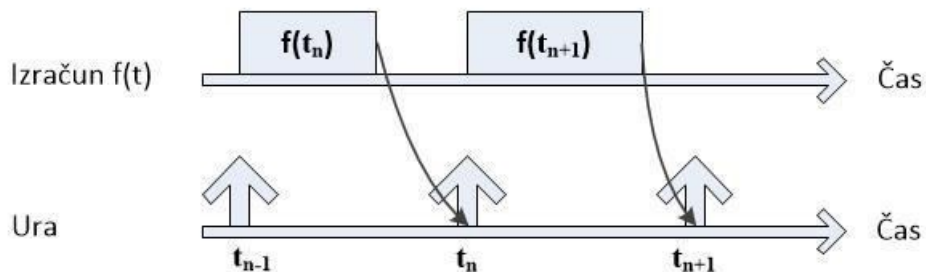
Digitalni simulator v realnem času (real-time digital simulator – RTDS) je simulator energetskega omrežja, ki je zmožen reševati simulacije elektromagnetnih tranzientnih pojavov v realnem času. Gre torej za zmogljiv računalnik, katerega strojna oprema temelji na večjem številu procesorskih kartic, hiter izračun pa omogoča delitev celotne simulacije na več manjših delov. Vsakega izmed teh prevzame ena izmed paralelno vezanih kartic, ki svoje izračune opravljajo istočasno, delne rešitve pa se potem združijo v celostno rešitev simulacije. Programsko okolje za upravljanje z RTDS-om se imenuje RSCAD in vsebuje več modulov (Draft, Runtime, CBuilder,...), ki bodo podrobneje opisani v sledečih podpoglavjih. Moduli uporabniku omogočajo pripravo, zagon in analizo simulacij, prav tako pa predstavljajo povezavo med uporabnikom in RTDS-om. RSCAD že vsebuje knjižnice s pogosto uporabljenimi elementi v omrežju, kar uporabniku omogoča enostavno ustvarjanje testnega modela po meri. Ko je model dokončan, se prevede v sistem matričnih enačb, ki se z RSCAD-a pošljejo na RTDS, kjer se neprekinjeno računajo, prej omenjen način paralelnega delovanja kartic pa omogoča, da se izračuni vedno zaključijo znotraj časovnega intervala 50 $\mu$ s (časovni korak). Vrednosti opazovanih veličin pri simulacijah v realnem času se vedno osvežijo točno po izteku časovnega koraka, kar je drugače od tako imenovanih »offline« simulacij, kjer se vrednosti osvežijo takoj, ko se izračuni končajo. V primeru simulacij v realnem času, osvežitev izračuna simulacije torej sovпада s časom simulacije, med tem, ko se lahko pri offline simulacijah zgodi, da kalkulacija in osvežitev bodisi prehitvata, bodisi zaostajata za simuliranim časom, kot je prikazano na spodnji sliki.



(a) Offline simulacija: izračun se zaključi pred iztekom simuliranega časa



(b) Offline simulacija: izračun se zaključi po izteku simuliranega časa



(c) Simulacija v realnem času: izračun se vedno zaključi znotraj časovnega koraka, osvežitev vrednosti pa je sinhronizirana s simulacijskim časom

Slika 1: Prikaz izračuna pri offline simulaciji in simulaciji v realnem času

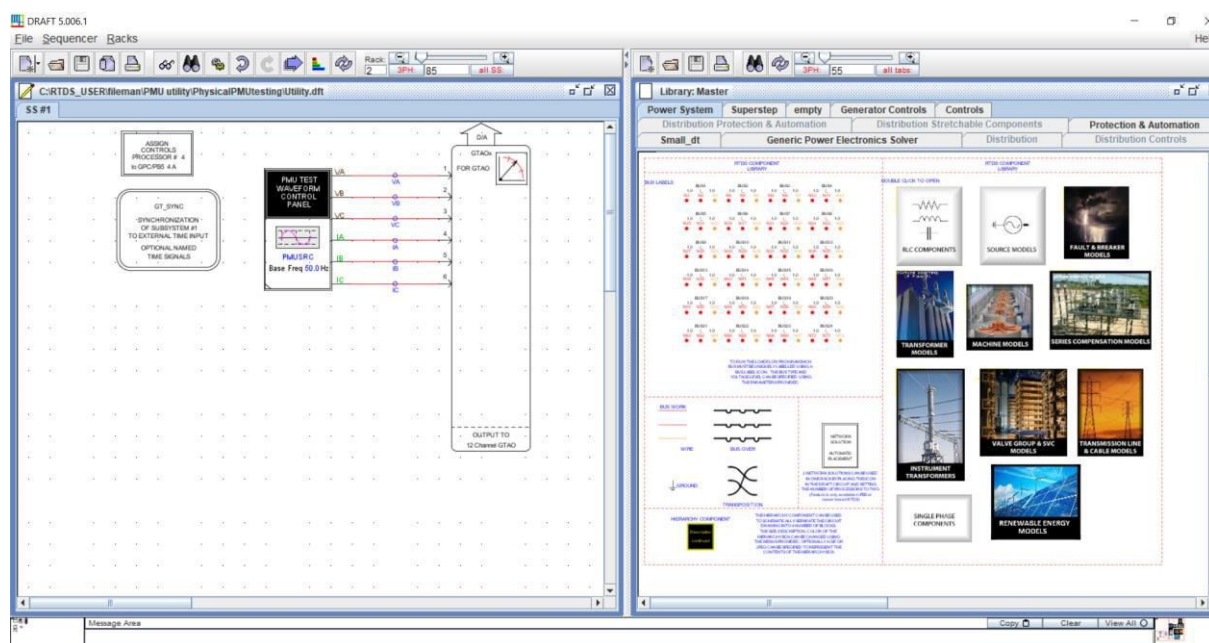
Izračunane vrednosti tokov, napetosti, frekvence, itd... iz RTDS simulacije, lahko uporabnik spremlja v že prej omenjenem modulu Runtime, ali pa te signale iz RTDS-a, preko digitalno / analogne kartice (GTAO – giga transceiver analog output), izvozi na zunanje naprave (recimo PMU). Razen GTAO kartice je RTDS, ki je bil uporabljen za preizkušanje, opremljen s sledečo strojno opremo:

- GPC (giga processor card) in PB5 kartici: omogočata izračunavanje simulacij v realnem času.
- GTWIF (giga transceiver workstation interface) kartica: namenjena povezavi RSCAD-a z GPC karticami preko ethernet povezave.
- GTDI (giga transceiver digital input) kartica: namenjena uvozu digitalnih signalov z zunanjih naprav.
- GTAI (giga transceiver analog input) kartica: namenjena uvozu analognih signalov z zunanjih naprav.

- GTFPI (giga transceiver front panel interface) kartica: namenjena povezavi med GPC karticami in GTDI, GTAO, GTAI karticami.
- GTNET (giga transceiver network interface) kartica: namenjena povezovanju RTDS-a in zunanjih naprav z različnimi komunikacijskimi protokoli.
- GTSYNC (giga transceiver synchronization) kartica: namenjena sinhronizaciji simulacijskega časovnega koraka z zunanjo časovno referenco (npr. GPS uro).

### 2.1.1 RSCAD Draft

Modul RSCAD Draft je namenjen izgradnji omrežja, ki ga želimo simulirati. Iz spodnje slike je razvidno, da ima uporabnik v desnem oknu orodja na razpolago knjižnice pogosto uporabljenih elementov omrežja, ki jih lahko preprosto prekopira v levo okno, ki je namenjeno izgradnji omrežja. S spreminjanjem parametrov posameznega elementa lahko nato omrežje prilagodi tako, da pravilno odraža realno stanje sistema.



Slika 2: RSCAD Draft okolje

Izgradnja testnega okolja za testiranje PMU-jev je preprosta, saj so zanj potrebne zgolj tri komponente: PMU test waveform control panel, GT\_Sync in GTAO output (glej levo okno gornje slike).

PMU test waveform control panel komponenta je namenjena ustvarjanju napetostnih in tokovnih razmer, kot so definirane v [1], [2], [3].

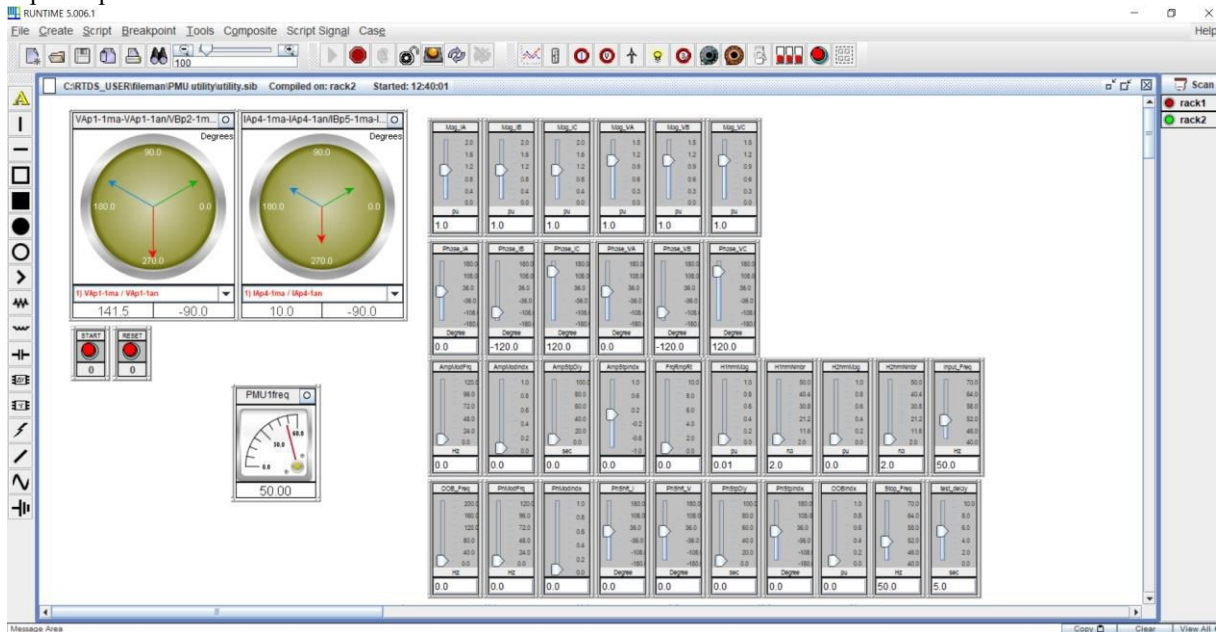
GT\_Sync komponenta je namenjena časovni sinhronizaciji med fizičnim PMU-jem, ki ga želimo testirati in RTDS-om.

GTAO output komponenta služi pretvorbi digitalnega signala (iz PMU test waveform control panel komponente) v analogno obliko in poskrbi, da se ta signal pojavi na izhodnih sponkah GTAO kartice.

### 2.1.2 RSCAD Runtime

Modul RSCAD Runtime skrbi, da lahko simulacijo naložimo, kontroliramo in poženemo z osebnega računalnika. Programska oprema Runtime-a komunicira z GTWIF kartico RTDS-a in z njo izmenjuje tako podatke o osveževanju grafov, kot tudi podatke o vseh spremembah, ki jih uporabnik naredi med samo simulacijo (spremeni frekvenco, fazni kot, magnitudo, itd...). Runtime torej služi kot uporabniška konzola s katero lahko uporabnik s simulacijo interagira v realnem času s pomočjo gumbov, drsnikov, stikal, itd... (glej Slika 3.) Za testiranje PMU-jev je pomembna predvsem funkcija »automated batch mode« [4]. Ta uporabniku omogoča, da spiše skripto, ki služi zagonu/ustavitvi posameznega simulacijskega scenarija, zagonu različnih dogodkov, spreminjanju vrednosti spremenljivk, shranjevanju rezultatov, itd... Na ta način je mogoče uporabiti skripto, ki samodejno opravi vse, v

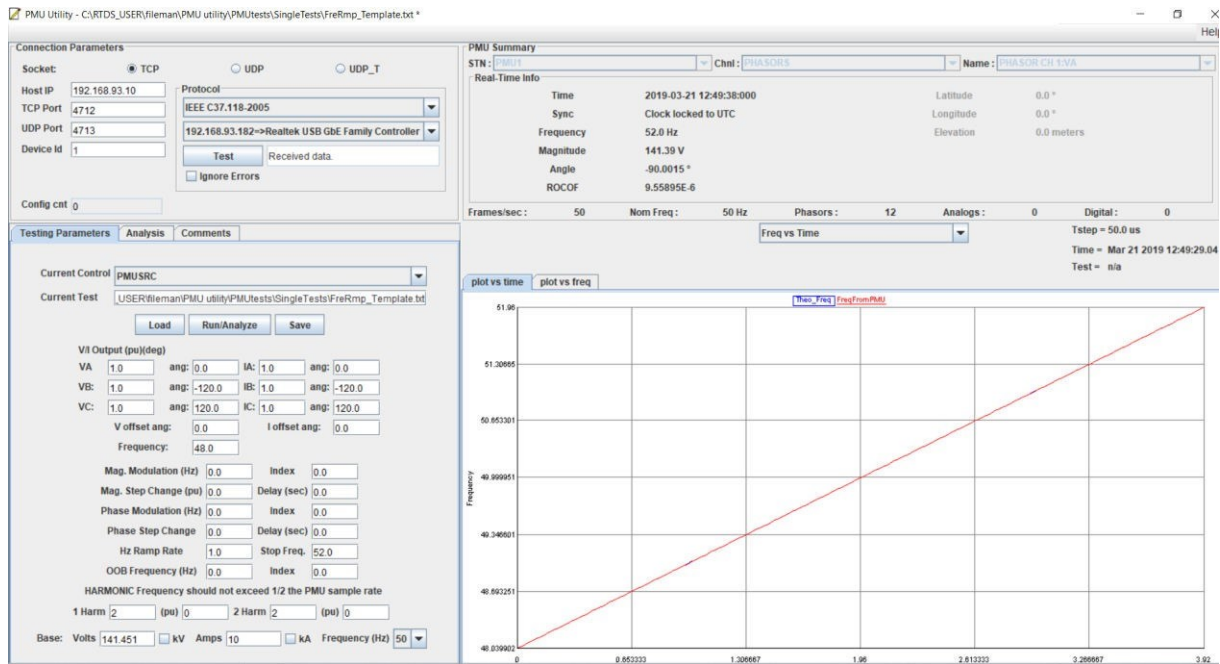
standardu predvidene, teste za PMU, rezultate pa shrani v datoteko iz katere je razvidno katere teste je PMU uspešno preстал in katerih ne.



Slika 3: RSCAD Runtime

### 2.1.3 PMU Utility

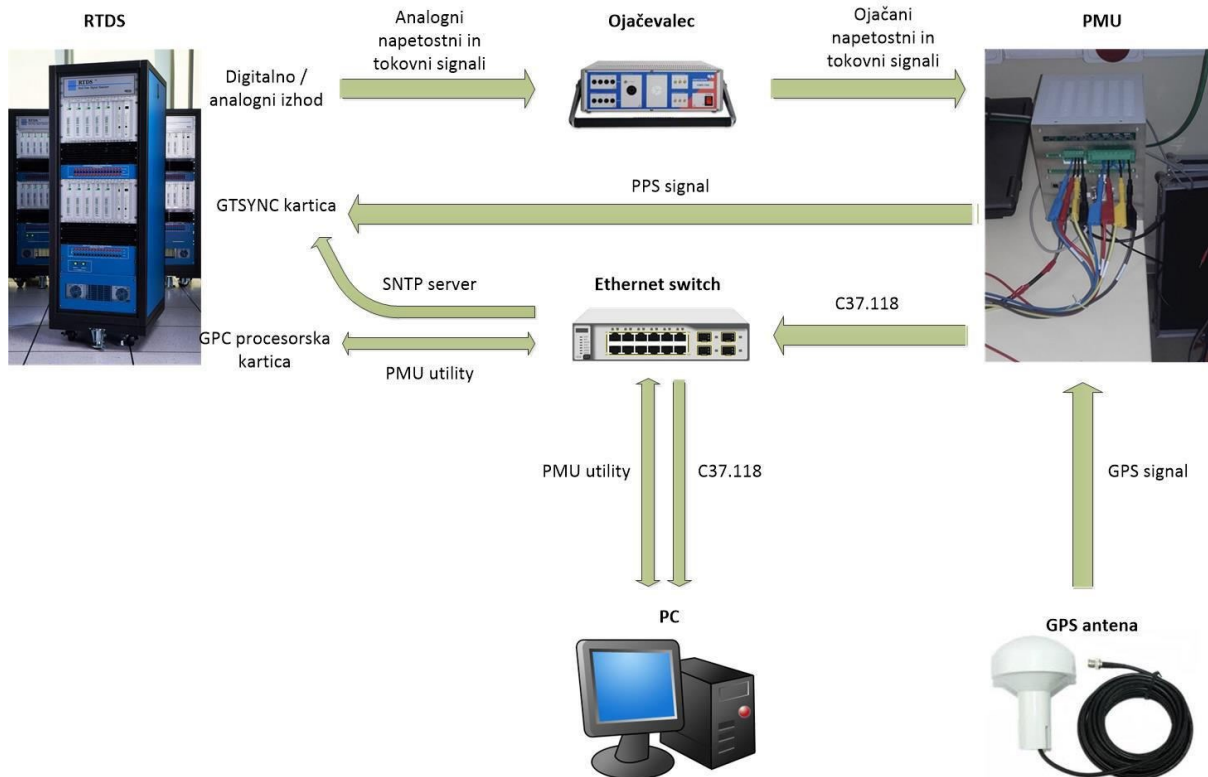
Orodje PMU Utility je del modula RSCAD Runtime, ki je namenjeno preizkušanju ustreznosti delovanja PMU naprav. Slika 4 prikazuje delovno okolje tega orodja, ki se lahko razdeli na 4 dele. Levo zgoraj je okno s parametri povezave, kjer uporabnik določi IP naslov PMU-ja, tip komunikacije s PMU-jem (TCP, UDP ali TCP&UDP), TCP in UDP vhod, številko naprave in standard po katerem PMU Utility komunicira s PMU-jem (IEEE C37.118-2005 ali IEEE C37.118.2-2011). Desno zgoraj so podatki, ki jih PMU Utility prejema s PMU-ja. V tem delu lahko uporabnik opazuje vse fazorje, pa tudi digitalne signale, ki jih PMU pošilja. Levo spodaj se nahajajo testni parametri, ki bodo med testiranjem krmilili drsnike Runtima. Uporabnik lahko tukaj nastavi tip testa, čas trajanja testa, katere napake PMU-ja želi ocenjevati, grafe, ki jih želi prikazati, itd..., prav tako pa lahko določi vrednosti mej, ki jih bo PMU Utility še smatral za dovoljene (tu lahko uporabi tako meje določene v standardu, ali pa izbere svoje vrednosti). Desno spodaj se nahaja okno z rezultati, kjer so grafično prikazani vsi predhodno določeni rezultati, ki se lahko izvozijo bodisi v CSV, bodisi v HTML obliki.



Slika 4: PMU Utility

## 2.2 Strojna oprema v zanki

Testiranje PMU-ja z RTDS-om poteka po principu strojne opreme v zanki (angl. Hardware in the Loop – HIL testing). Povezave med posameznimi napravami so prikazane na spodnji sliki.



Slika 5: Testno okolje za testiranje PMU-ja z RTDS-om

Programska oprema RSCAD, ki teče na osebnem računalniku, komunicira z RTDS-om preko ethernet povezave. Na RTDS-u se simulacija izvaja v realnem času, simulirane veličine pa se iz digitalne oblike pretvorijo v analogne in pripeljejo na izhode GTA0 kartice. Maksimalna vrednost signalov doseže  $\pm 10V$ , kar je manj od nazivne napetosti večine PMU-jev, zato je potrebno signale pred priključitvijo na PMU najprej ojačati. PMU izračunane vrednosti pošilja, po standardu IEEE C37.118-2005, preko ethernet povezave nazaj v osebni računalnik, kjer se opravi primerjava s teoretičnimi vrednostmi fazorjev, izračunanih na podlagi položaja drsnikov RSCAD-a. Za sinhronizacijo PMU-ja in RTDS-a je uporabljen PPS (pulse per second) signal, ki ga PMU pridobi preko GPS antene in potem pošlje še GTSYNC kartici RTDS-a.

### 3 TESTIRANJE SKLADNOSTI

#### 3.1 Testi predpisani v standardu

V uvodu je že bilo zapisano, da se za ugotavljanje kakovosti delovanja PMU-jev uporabljajo standardi [1], [2], [3]. V njih so določeni testi in analizirane veličine ter dovoljene meje napak za posamezni test, ki so še sprejemljive, da PMU uspešno prestopi testiranje. V članku bo narejen kratek opis posameznih analiziranih veličin, ki se uporabljajo za določitev skladnosti in predstavitev obeh glavnih skupin testov (stacionarni testi, dinamični testi). Tukaj dodajmo še, da se vsak izmed testov ne opravi zgolj enkrat, ampak za celoten interval vrednosti, ki so določene v standardu. Npr. pri testu frekvenčnega območja za P-razred PMU-ja in nazivno frekvenco 50 Hz, se test izvede za vse frekvence od 48Hz do 52 Hz, s korakom 0.1 Hz.

##### 3.1.1 Analizirane veličine

- Skupna vektorska napaka (ang. total vector error - TVE)  
Odstopanje izmerjenega fazorja od teoretične vrednosti fazorja. (Fazor je določen z amplitudo in faznim kotom, kar pomeni, da je skupna vektorska napaka odvisna od obeh veličin.)
- Napaka frekvence (ang. frequency error - FE)  
Odstopanje izmerjene frekvence od teoretične vrednosti frekvence.
- Napaka prvega odvoda frekvence (ang. rate of change of frequency – RoCoF error)  
Odstopanje izmerjenega prvega odvoda frekvence od teoretične vrednosti prvega odvoda frekvence.
- Odzivni čas (ang. response time)  
Čas med meritvama, ki sta v stacionarnem stanju, pred in po uvedbi skočne spremembe. Določen kot razlika med časom, ko meritev prvič zapusti predpisano mejo natančnosti (zaradi uvedbe skočne spremembe) in časom, ko se meritve vrnejo v to mejo in znotraj nje ostanejo.
- Čas zakasnitve (ang. delay time)  
Časovni interval med trenutkom, ko je skočna sprememba dodana vhodnemu signalu PMU-ja in časom meritve, ko spremenjeni signal doseže srednjo vrednost med začetnim in končnim stacionarnim stanjem.
- Prekoračitev končne vrednosti (ang. over/under-shoot)  
Največje odstopanje merjene veličine (zaradi uvedbe skočne spremembe) od vrednosti, ki jo ta veličina doseže v končnem stacionarnem stanju.

##### 3.1.2 Stacionarni testi

Med stacionarnimi testi se skladnost PMU-ja s standardom določa s primerjavo izračunanih vrednosti fazorjev, frekvence in RoCoF-a s teoretičnimi vrednostmi. O stacionarnih testih govorimo kadar so amplituda, fazni kot in frekvenca signalov ves čas merjenja konstantni. Stacionarni testi so sledeči:

- Frekvenčno območje signala (ang. frequency range)
- Amplitudno območje signala (ang. magnitude range)
- Test faznega kota (ang. phase angle test)
- Popačenje zaradi harmonskih komponent (ang. harmonic distortion)
- Izvenpasovna frekvenčna motnja (ang. out of band interference) – se izvaja samo za M-razred PMU-jev

### 3.1.3 Dinamični testi

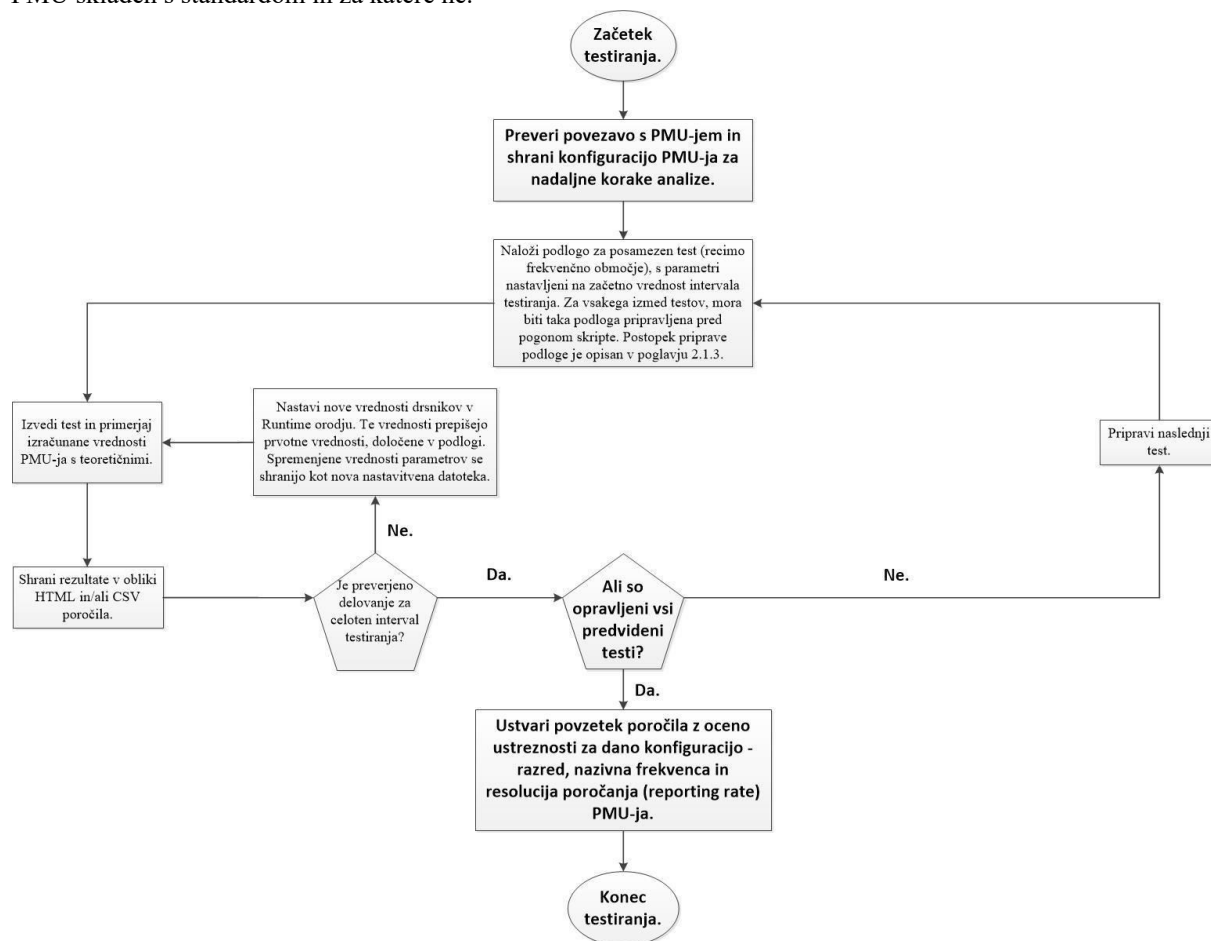
Pri dinamičnih testih se amplituda, fazni kot in frekvenca signalov med merjenjem bodisi ves čas zvezno spreminjajo, bodisi je signalu v nekem trenutku dodana skočna vrednost. Pomembno pa je, da se pri vsakem testu preverja odvisnost delovanja PMU-ja s spreminjanjem zgolj ene izmed teh količin. Dinamični testi so sledeči:

- Modulacija amplitude (ang. amplitude modulation)
- Modulacija faznega kota (ang. phase angle modulation)
- Linearna frekvenčna rampa (ang. linear frequency ramp)
- Skočna sprememba (ang. step change)

### 3.2 Avtomatizacija postopka testiranja

V poglavju 2.1.2 je že bilo nakazano, da je mogoče postopek testiranja PMU-ja, z RTDS-om, avtomatizirati s pomočjo skripte. Pregled celotnega postopka, ki je definiran v skripti, je podan v obliki diagrama poteka, prikazanim na Slika 6. Zunanja (večja) zanka skrbi, da se izvedejo vsi testi predstavljeni v 3.1.2 in 3.1.3., notranja (manjša) zanka pa, da je za posamezen test preverjen celoten interval vrednosti, ki je za ta test predpisan v standardu.

Testiranje vseh, v standardih predpisanih testov, se za uporabnika torej poenostavi zgolj na zagon skripte. Ta testiranje opravi popolnoma avtomatizirano in kot rezultat vrne poročilo iz katerega je razvidno, za katere teste je PMU skladen s standardom in za katere ne.



Slika 6: Diagram poteka delovanja skripte



### 3.3 Preizkus PMU prototipa

Do sedaj je bilo orodje PMU Utility predstavljeno zgolj kot orodje za preverjanje skladnosti za že razvite PMU naprave s standardi. Treba pa se je zavedati, da se lahko PMU Utility uporabi tudi kot pomoč proizvajalcem PMU-jev med samo razvojno fazo. Poleg povzetka poročila (kjer je zapisano zgolj katere teste je PMU uspešno opravil in katerih ne) je namreč možno za vsak test ločeno preveriti tudi CSV poročilo (kjer so podane vse izračunane in teoretične vrednosti). V tem primeru PMU Utility služi kot pomočnik za odkrivanje testnih scenarijev, kjer delovanje algoritma za izračun fazorjev ni pravilno oziroma dovolj natančno, s čimer se proizvajalcu poenostavi odkrivanje napak in pomanjkljivosti v algoritmu, kot tudi nudi možnost izboljšanja delovanja, s finim nastavljanjem parametrov PMU-ja.

Takšen test je bil izveden za prototip PMU, ki se razvija v okviru projekta H2020 RESOLVD, rezultati in ugotovitve pa podani razvijalcem.

3.3.1 Rezultati preizkusa S testiranjem so bile ugotovljene naslednje

nepravilnosti v delovanju prototipa:

- Netočne vrednosti izračunanih amplitud napetosti
- Časovni zamik med vhodnim signalom in izračunano vrednostjo
- Odvisnost izračunanega RoCoF-a od resolucije poročanja
- Odvisnost izračunanega faznega kota tako od resolucije poročanja, kot tudi od frekvence vhodnega signala

V nadaljevanju so predstavljene tabele, s pomočjo katerih se je odkrilo posamezne napake v delovanju PMU-ja, pa tudi, s strani razvijalcev, ugotovljeni razlogi zanje.

Teoretične amplitude napetosti		Napačno izračunane amplitude napetosti		Napaka v amplitudi	
Theoretical		Actual		Theoretical	
MAG_VA		Va		Va Error	
Time (seconds)	Magnitude (V)	Magnitude (V)		Time (seconds)	Magnitude Error (V)
0	230.94	235.2694092		0	-4.32940918
0.02	230.94	235.2682953		0.02	-4.328295288
0.04	230.94	235.2675171		0.04	-4.32751709
0.06	230.94	235.2669525		0.06	-4.326952515
0.08	230.94	235.2666626		0.08	-4.326662598
0.1	230.94	235.2671356		0.1	-4.32713562
0.12	230.94	235.2675018		0.12	-4.327501831
0.14	230.94	235.2677307		0.14	-4.327730713
0.16	230.94	235.2672882		0.16	-4.327288208
0.18	230.94	235.2671509		0.18	-4.327150879
0.2	230.94	235.2679901		0.2	-4.327990112
0.22	230.94	235.2678833		0.22	-4.327883301
0.24	230.94	235.2672729		0.24	-4.327272949
0.26	230.94	235.2679138		0.26	-4.327913818
0.28	230.94	235.2685089		0.28	-4.328508911
0.3	230.94	235.26828		0.3	-4.328280029
0.32	230.94	235.2684326		0.32	-4.328432617
0.34	230.94	235.2679901		0.34	-4.327990112
0.36	230.94	235.2678528		0.36	-4.327852783
0.38	230.94	235.2686157		0.38	-4.328615723
0.4	230.94	235.2680359		0.4	-4.328035889
0.42	230.94	235.2675171		0.42	-4.32751709
0.44	230.94	235.2683868		0.44	-4.328386841
0.46	230.94	235.2686768		0.46	-4.328676758
0.48	230.94	235.268219		0.48	-4.328218994

Slika 7: Primerjava izračunanih in teoretičnih vrednosti amplitude napetosti

Napaka v izračunanih vrednostih amplitude se je pojavila pri vseh testih, v poročilu pa jo je mogoče opaziti, kot je prikazano na Slika 7. Iz dejstva, da je bila napaka konstantna in enaka za vse teste je možno sklepati, da je vzrok zanjo nepravilno kalibriran PMU.

Časovni zamik med teoretičnimi in izračunanimi vrednostmi je najlepše viden na primeru skočne spremembe amplitude. Na Slika 8 se tako vidi, kako izračunana vrednost amplitude toka doživi skočno spremembo pred teoretično. Do te napake je prišlo zaradi neupoštevanja vseh zakasnitev v verigi digitalnega procesiranja.

	Theoretical	Actual
	MAG_IA	IL1
Time (seconds)	Magnitude (amps)	Magnitude (amps)
-0.12	18.44	18.42494202
-0.115	18.44	18.42760086
-0.11	18.44	18.42564964
-0.105	18.44	18.41758728
-0.1	18.44	18.41049385
-0.095	18.44	18.41673088
-0.09	18.44	18.43500137
-0.085	18.44	18.44055939
-0.08	18.44	18.41030502
-0.075	18.44	18.37087822
-0.07	18.44	18.41507721
-0.065	18.44	18.64539337
-0.06	18.44	19.07800293
-0.055	18.44	19.5999279
-0.05	18.44	20.03573799
-0.045	18.44	20.27070618
-0.04	18.44	20.31832123
-0.035	18.44	20.27989006
-0.03	18.44	20.2492466
-0.025	18.44	20.25442696
-0.02	18.44	20.27276611
-0.015	18.44	20.27921486
-0.01	18.44	20.27218819
-0.005	18.44	20.26403427
0	18.44	20.26191521
0.005	20.284	20.26426125
0.01	20.284	20.26631165
0.015	20.284	20.26625443

Časovni znački teoretične in izračunane skočne spremembe se ne ujemata

Skok v amplitudi (izračunan)

Skok v amplitudi (teoretičen)

Slika 8: Primerjava izračunanih in teoretičnih vrednosti amplitude toka

Rezultati pri resoluciji poročanja 50/s

Rezultati pri resoluciji poročanja 200/s

Theoretical					Actual				
Theoretical		Actual			Theoretical		Actual		
Time (seconds)	ROCOF	ROCOF	ROCOF	ROCOF Error vs Time	Time (seconds)	ROCOF	ROCOF	ROCOF	ROCOF Error vs Time
0	1	1.023292542		-0.023292542	0	1	0.232505798		0.767494202
0.02	1	0.999259949		7.40E-04	0.005	1	0.30040741		0.69959259
0.04	1	0.971412659		0.028587341	0.01	1	0.317573547		0.682426453
0.06	1	1.003265381		-0.003265381	0.015	1	0.296974182		0.703025818
0.08	1	1.005744934		-0.005744934	0.02	1	0.267982483		0.732017517
0.1	1	0.989151001		0.010848999	0.025	1	0.250434875		0.749565125
0.12	1	1.008605957		-0.008605957	0.03	1	0.247764587		0.752235413
0.14	1	1.001930237		-0.001930237	0.035	1	0.252342224		0.747657776
0.16	1	0.991249084		0.008750916	0.04	1	0.255203247		0.744796753
0.18	1	1.015663147		-0.015663147	0.045	1	0.253295898		0.746704102
0.2	1	1.026725769		-0.026725769	0.05	1	0.248908997		0.751091003
0.22	1	0.992774963		0.007225037	0.055	1	0.245094299		0.754905701
0.24	1	0.965118408		0.034881592	0.06	1	0.24356842		0.75643158
0.26	1	1.035499573		-0.035499573	0.065	1	0.245285034		0.754714966
0.28	1	0.994300842		0.005699158	0.07	1	0.249671936		0.750328064
0.3	1	0.989532471		0.010467529	0.075	1	0.253295898		0.746704102
0.32	1	0.988769531		0.011230469	0.08	1	0.253105164		0.746894836
0.34	1	0.993728638		0.006271362	0.085	1	0.250434875		0.749565125
0.36	1	1.009941101		-0.009941101	0.09	1	0.246810913		0.753189087
0.38	1	0.989341736		0.010658264	0.095	1	0.245475769		0.754524231
0.4	1	0.998687744		0.001312256	0.1	1	0.248527527		0.751472473
0.42	1	1.005172729		-0.005172729	0.105	1	0.253486633		0.746513367
0.44	1	1.002883911		-0.002883911	0.11	1	0.25806427		0.74193573
0.46	1	1.009368896		-0.009368896	0.115	1	0.256729126		0.743270874
0.48	1	1.001930237		-0.001930237	0.12	1	0.250816345		0.749183655
0.5	1	1.002311707		-0.002311707	0.125	1	0.244903564		0.755096436
0.52	1	1.007461548		-0.007461548	0.13	1	0.243377686		0.756622314

Pravilno izračunane vrednosti RoCoF-a pri 50/s

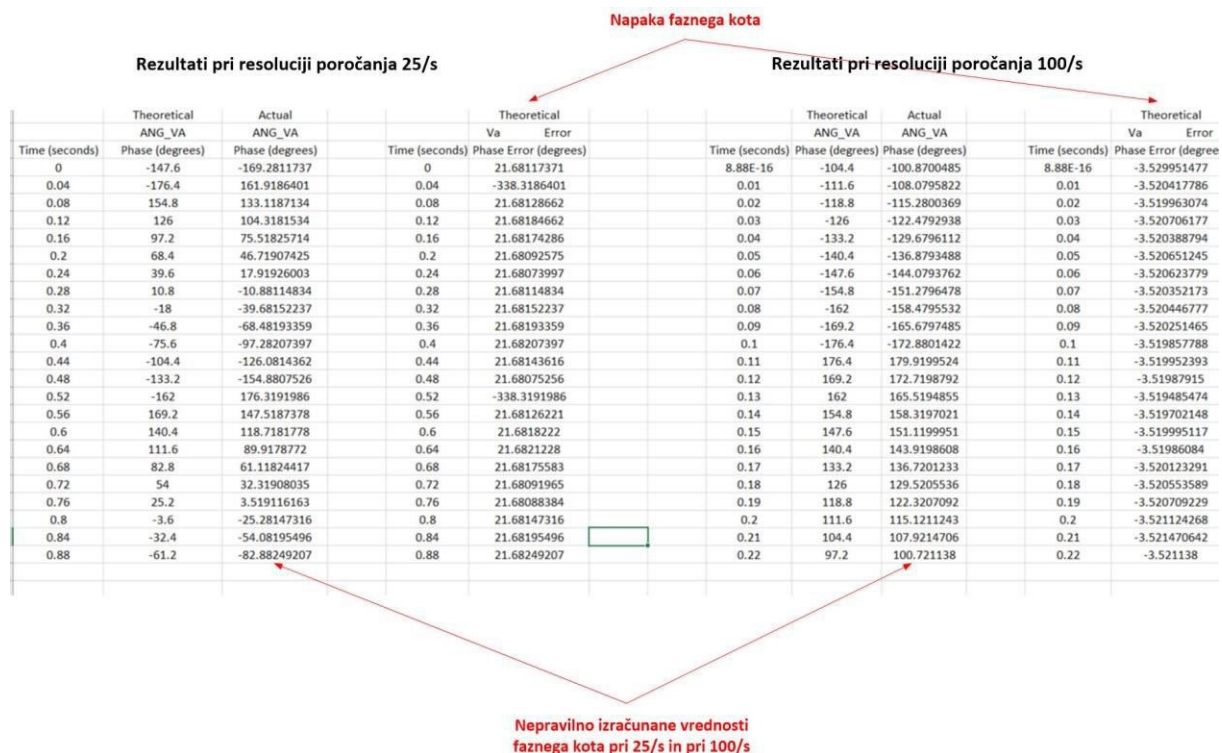
Nepravilno izračunane vrednosti RoCoF-a pri 200/s

Slika 9: Primerjava izračunanih in teoretičnih vrednosti RoCoF-a

Med testom frekvenčne rampe se je ugotovilo, da PMU pri različnih resolucijah poročanja vrača različne vrednosti za RoCoF. Za teoretično vrednost RoCoF-a 1 Hz/s, je PMU za resolucije poročanja 50 /s, 100 /s in 200 /s vrnil vrednosti: 1 Hz/s, 0.5 Hz/s in 0.25 Hz/s. Na Slika 9 so prikazani rezultati za resolucijo poročanja 50 /s in 200 /s. Iz dejstva, da se je RoCoF nižal proporcionalno z višanjem resolucije poročanja je bilo ugotovljeno, da je vzrok napake neupoštevanje časa med izhodnimi vzorci pri izračunu odvoda frekvence.

Zadnja napaka, nepravilno računanje faznega kota, je bila, podobno kot prva, opažena pri vseh testih (primer na Slika 10). Za razliko od prve, pa je ta napaka zavzemala različne vrednosti tako med posameznimi testi, kot tudi pri različnih resolucijah poročanja. Na koncu se je ugotovilo, da je razlog zanjo neupoštevanje dejanske frekvence signala pri rotaciji faznega kota, iz začetka opazovanega okna na sredino, kjer se nahaja časovna značka.

Zadnje tri nepravilnosti je razvijalcem PMU-ja že uspelo odpraviti, odpravljanje prve pa je še v teku. Po odpravi se bo celoten test ponovil in če bodo vsi testi uspešno opravljeni, se bo posvetilo še fini kalibraciji naprave.



Slika 10: Primerjava izračunanih in teoretičnih vrednosti faznega kota napetosti

#### 4 ZAKLJUČKI

V članku je predstavljena vzpostavitev avtomatiziranega testnega okolja za preverjanja skladnosti PMU naprav z veljavnimi standardi, s pomočjo simulatorja RTDS. Preverjanje poteka po principu HIL testiranja, v katerega so vključeni: testirani PMU, RTDS, osebni računalnik, tokovno / napetostni ojačevalac in ethernet stikalo. Zaradi številčnosti testov, ki so v standardu zahtevani, je celoten postopek testiranja avtomatiziran, s pomočjo skripte v orodju RSCAD Runtime, tako, da zahteva minimalno uporabnikovo interakcijo. Postopek preizkusa je bil izveden na realnem PMU prototipu, s čimer se je potrdila uporabnost orodja PMU-Utility tudi za razvijalce PMU naprav.

#### ZAHVALA

V prispevku predstavljeno raziskovalno delo sta delno sofinancirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru temeljnega projekta »Upravljanje z viri za zanesljive komunikacije z nizkimi zakasnitvami v pametnih omrežjih – LoLaG« (J2-9232) in Evropska skupnost v okviru projektov Obzorja 2020 DEFENDER (pog. št. 740898) in RESOLVD (pog. št. 773715).

#### REFERENCE

IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE Std. C37.118.1-2011, 2011.

- [1] IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems (Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements), IEEE Std. C37.118.1a-2014, 2014.
- [2] IEEE Synchrophasor Measurement Test Suite Specification, IEEE Std. Association, 2014.
- [3] GURUSINGHE D. R., OUELLETTE D., KUFFEL R.: An automated test setup for performance evaluation of a phasor measurement unit, Proc. of Protection, Automation & Control World Conference (PAC World 2016), 2016.
- [4] KONSTANTINOS D., WU Q., NIELSEN A. H.: Phasor measurement unit and phasor data concentrator test with real time digital simulator, IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014.