



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Dragana Naumović Vuković

PRILOG SAVREMENOM ETALONIRANJU STRUJNIH MERNIH TRANSFORMATORA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2018.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:			
Идентификациони број, ИБР:			
Тип документације, ТД:		Монографска документација	
Тип записа, ТЗ:		Текстуални штампани материјал	
Врста рада, ВР:		Докторска дисертација	
Аутор, АУ:		Драгана Наумовић Вуковић	
Ментор, МН:		Др Зоран Митровић, редовни професор	
Наслов рада, НР:		Прилог савременом еталонирању струјних мерних трансформатора	
Језик публикације, ЈП:		Српски	
Језик извода, ЈИ:		Српски	
Земља публикавања, ЗП:		Србија	
Уже географско подручје, УГП:		Војводина	
Година, ГО:		2018.	
Издавач, ИЗ:		Факултет техничких наука	
Место и адреса, МА:		Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6	
Физички опис рада, ФО:		3 поглавља/132 стране/124 цитата/55 табела/75 слика/ - /2 прилога	
Научна област, НО:		Електротехничко и рачунарско инжењерство	
Научна дисциплина, НД:		Електрична мерења, метрологија и биомедицина	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:		Струјни мерни трансформатор, еталон трансформатор, струјни компаратор, двостепени струјни трансформатор, еталонирање, мерна апаратура, мерни систем, једновремена упоредна метода еталонирања, мерна несигурност, интеркомпарација, међулабораторијско поређење	
УДК			
Чува се, ЧУ:		Библиотека Факултета техничких наука у Новим Саду	
Важна напомена, ВН:			
Извод, ИЗ:		У овој докторској дисертацији приказана је концепција, реализација и потврда нове методе једновременог еталонирања струјних мерних трансформатора са две различите мерне апаратуре. Прегледом стручне литературе не постоји податак да је ова метода раније примењивана. У дисертацији су приказане различите мерне методе за испитивање и еталонирање мерних трансформатора које имају примену у савременој пракси и које подразумевају и различите мерне могућности. Такође је и експериментално потврђено једновременно испитивање и еталонирање струјних мерних трансформатора са неколико мерних апаратура које су засноване на различитим методама. Спроведна истраживања и експериментални резултати показују и потврђују низ предности оваквог начина еталонирања. Детаљна анализа компоненти мерне несигурности показала је да се применом ове методе постиже побољшање мерне несигурност еталонирања за скоро ред величине у односу на класично појединачно еталонирање са две различите мерне апаратуре. Анализа утицајних величина на мерну несигурност показује да се по овој новој методи еталонирања елиминише низ компоненти од којих су најзначајније: утицај неједнакости референтних струја и испитног оптерећења. Истраживања су такође показала да једновремена метода осим што доприноси подизању тачности еталонирања струјних трансформатора, има примену и у еталонирању мерних апаратура за испитивање тачности мерних трансформатора и интеркомпарацији струјних еталон трансформатора. Кроз конкретне примере реализоване у пракси, размотрени су и приказани начини еталонирања мерних апаратура за испитивање тачности овом новом методом. Интеркомпарацијом два мерна система високе класе тачности Националног меролошког института Канаде (National Research Council Canada), од којих је једна развијена у Електротехничком Институту "Никола Тесла", показана је и предност примене једновремене методе у области примарне метрологије струјних мерних трансформатора.	
Датум прихватања теме, ДП:			
Датум одбране, ДО:			
Чланови комисије, КО:	Председник:	Др Платон Савиљ, ванредни професор	Потпис ментора
	Члан:	Др Драган Ковачевић, научни саветник	
	Члан:	Др Драган Пејић, доцент	
	Члан:	Др Борис Антић, доцент	
	Члан, ментор:	др Зоран Митровић, редовни професор	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :												
Identification number, INO :												
Document type, DT :	Monographic publication											
Type of record, TR :	Printed textual material											
Contents code, CC :	Ph. D. thesis											
Author, AU :	Dragana Naumović Vuković											
Mentor, MN :	Ph.D. Zoran Mitrović, Full Professor											
Title, TI :	The Recent Contribution to Calibration of Current Transformers											
Language of text, LT :	Serbian											
Language of abstract, LA :	English											
Country of publication, CP :	Republic of Serbia											
Locality of publication, LP :	Vojvodina											
Publication year, PY :	2018.											
Publisher, PB :	Faculty of Technical Sciences											
Publication place, PP :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6											
Physical description, PD :	3 chapters/132 pages/124 ref./55 tables/75 pictures/ - /2appendixes											
Scientific field, SF :	Electrical and computer engineering											
Scientific discipline, SD :	Electrical measurement, metrology and biomedicine											
Subject/Key words, S/KW :	Current transformer, standard current transformer, current comparator, two stage current transformer, measuring system, calibration, uncertainty of measurement, simultaneous method, intercomparison											
UC												
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad											
Note, N :												
Abstract, AB :	The dissertation presents the concept, its realisation and verification of the new method of simultaneous comparison of the current transformers by two different measuring apparatus. It is shown by searching the literature, that this method has not been used before. In this dissertation different measuring methods for testing and calibration of current transformers, with their different measuring capabilities are presented. Most of them have been used in recent practice. Furthermore, the experimental verification of new simultaneous calibration method is presented. For this reason some measuring apparatus based on different measuring methods were used. Conducted research and experimental results confirmed a number of advantages of this calibration method. Detailed analysis of the components of the uncertainty of measurements shown that using simultaneous method uncertainty of measurements have been improved comparing to method with two individual calibration by different apparatus. In that case some of the measuring uncertainty components can be neglected. The most significant is component caused by variation of referent current and component caused by variation of burden. The research has also showed that simultaneous method can be used for calibration of measuring apparatus for current transformer accuracy testing and their inter-comparisons. The ways of calibration of apparatus for current transformer accuracy testing are considered and presented, through concrete examples realized in practice. A high-accuracy comparison of two NRC (National Research Council Canada) calibration systems were carried out by new simultaneous method. One measuring system is developed at Electrical Engineering institute Nikola Tesla, Belgrade. Accordingly the advantage of simultaneous method applied at the primary metrology of current transformer is verified.											
Accepted by the Scientific Board on, ASB :												
Defended on, DE :												
Defended Board, DB :	<table><tr><td>President:</td><td>PhD Platon Sovilj, associate professor</td><td rowspan="5">Mentor's sign</td></tr><tr><td>Member:</td><td>PhD Dragan Kovačević, full professor</td></tr><tr><td>Member:</td><td>PhD Dragan Pejić, assistant professor</td></tr><tr><td>Member:</td><td>PhD Boris Antić, assistant professor</td></tr><tr><td>Member, Mentor:</td><td>PhD Zoran Mitrović, full professor</td></tr></table>	President:	PhD Platon Sovilj, associate professor	Mentor's sign	Member:	PhD Dragan Kovačević, full professor	Member:	PhD Dragan Pejić, assistant professor	Member:	PhD Boris Antić, assistant professor	Member, Mentor:	PhD Zoran Mitrović, full professor
President:	PhD Platon Sovilj, associate professor	Mentor's sign										
Member:	PhD Dragan Kovačević, full professor											
Member:	PhD Dragan Pejić, assistant professor											
Member:	PhD Boris Antić, assistant professor											
Member, Mentor:	PhD Zoran Mitrović, full professor											

Baveći se merenjima električnih veličina već više od dve decenije, imala sam zadovoljstvo i privilegiju da se upoznam i da radim sa mnogim zanimljivim i za metrologiju značajnim ljudima. Mnogi od njih su, neki posredno, a neki i direktno, uticali na moje stručno sazrevanje u ovoj oblasti.

Želela bih da istaknem saradnju sa kolegama iz Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla", zahvaljujući kojoj sam i ja postala član tima koji se problematikom mernih transformatora uspešno bavi već više od 60 godina. Posebno se zahvaljujem kolegi dr Slobodanu Škundriću koji mi je svojim bogatim znanjem i umećem iskreno i nesebično pomogao da otkrijem ovu inspirativnu oblast metrologije.

Profesorima Ivanu Župunskom i Vladimiru Vujičiću sa Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu zahvaljujem na velikoj podršci i podsticanju da napišem ovaj rad.

Posebno zahvaljujem svom mentoru profesoru Zoranu Mitroviću, takođe sa Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, koji je svojom posvećenošću, stručnim i prijateljskim podsticajima doprineo realizaciji ovoga rada.

Naravno, bez velike podrške moje porodice, mame, supruga i mojih dragih dečaka, sigurna sam da bi realizacija ovoga rada bila mnogo, mnogo teža.

Nadam se, da sam ovim radom ispunila, barem delimično, moto "biti koristan", akademika profesora Petra Miljanića, sa kojim sam imala veliku čast da razgovaram, diskutujem i sarađujem.

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
1.1	Greške strujnog mernog transformatora.....	3
1.2	Pregled mernih metoda za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora.....	6
1.2.1	Klasične metode i uređaji za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora.	7
1.2.1.1	Šering - Albertijeva metoda	8
1.2.1.2	Holeova metoda	12
1.2.1.3	Metoda strujnog komparatora	14
1.2.2	Pregled savremenih mernih metoda i uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora	22
1.2.2.1	Metoda izdvajanja ortogonalnih komponenti napona	22
1.2.2.2	Metoda diskretne Furijeove transformacije	26
1.2.2.3	Virtuelni merni uređaji	30
2.	JEDNOVREMENA UPOREDNA METODA ETALONIRANJA STRUJNIH MERNIH TRANSFORMATORA	37
2.1	Etaloniranje strujnih mernih transformatora jednovremenom uporednom metodom.....	39
2.1.1	Etaloniranje strujnih mernih transformatora jednovremenom uporednom metodom - eksperimentalna provera	40
2.2	Etaloniranje etalon strujnih transformatora jednovremenom uporednom metodom.....	46
2.2.1	Etaloniranje etalon strujnih transformatora jednovremenom uporednom metodom - eksperimentalna provera	48
2.3	Etaloniranje aparatura za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora jednovremenom uporednom metodom.....	58

2.3.1	Komparativno etaloniranje	58
2.3.2	Generisanje kompleksne greške	59
2.4	Primena jednovremene uporedne metode etaloniranja kod interkomparacija i međulaboratorijskih poređenja	61
2.5	Interkomparacija tri merna sistema jednovremenom uporednom metodom etaloniranja	70
2.5.1	Interkomparacija tri merna sistema jednovremenom uporednom metodom etaloniranja - eksperimentalna provera	72
3.	ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI	80
3.1	Uticajne veličine na grešku merenja	80
3.1.1	Uticaj greške primenjene merne aparature	81
3.1.2	Uticaj mrežnog napajanja	81
3.1.3	Uticaj temperature	82
3.1.4	Uticaj elektromagnetnog polja	82
3.1.5	Uticaj induktivnih sprega	82
3.1.6	Uticaj uzemljenja	83
3.1.7	Uticaj sekundarnog opterećenja	83
3.1.8	Uticaj referentne struje	85
3.2	Uticajne veličine i procena merne nesigurnosti	88
3.3	Matematički model grešaka merenja	90
3.3.1	Komponente merne nesigurnosti kod merenja amplitudne greške	91
3.3.2	Komponente merne nesigurnosti kod merenja fazne greške	93
3.3.3	Kombinovana merna nesigurnost	94
3.3.4	Proširena merna nesigurnost	97
3.4	Merna nesigurnost metode jednovremenog uporednog etaloniranja strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A.....	98
3.5	Merna nesigurnost metode jednovremenog uporednog etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A.....	109
3.6	Merna nesigurnost metode jednovremenog uporednog etaloniranja kod interkomparacija mernih aparatura	121
	ZAKLJUČAK.....	123
	LITERATURA.....	125
	PRILOG 1: SPISAK SLIKA PO REDOSLEDU POJAVLJIVANJA	132
	PRILOG 2: SPISAK TABELA PO REDOSLEDU POJAVLJIVANJA	136

1. UVOD

Merenja kao potreba i ljudska aktivnost postoje koliko i civilizacija. Jedinstvom mera, iskazanim Metarskom konvencijom još davne 1875. godine, utrt je put industrijskoj kooperaciji, svetskoj trgovini i razmeni, a takođe i najširoj naučno-tehničkoj saradnji, posebno napretku metrologije kao nauke [1, 2]. Zahvaljujući tehničkom i tehnološkom razvoju, novim materijalima, elektronici i računarskoj tehnici, tačnost merenja je za poslednjih vek i po značajno povećana, a u nekim oblastima i za nekoliko redova veličine [3].

Ova disertacija je rezultat višegodišnjeg rada u jednoj specifičnoj, ali i značajnoj metrološkoj oblasti. Reč je o strujnim mernim transformatorima i ispitivanju njihove tačnosti, odnosno o merenju greške transformacije primarne struje iskazane kroz merenje strujne (amplitudne) i ugaone (fazne) greške.

U sistemima za merenje napona, struje, snage i energije u električnim kolima naizmeničnog napona i struje merni transformatori su nezaobilazni elementi. Njihova uloga je prilagođenje (transformacija) realnih vrednosti napona i struje (napona reda nekoliko stotina i hiljada volti i struja nekoliko stotina do hiljada ampera) na odgovarajuće optimalne nivoe mernih i regulacionih sistema kao i sistema zaštite [4]. Takođe, njima se postiže i galvansko odvajanje radnog, energetskog sistema, od sistema za merenje i zaštitu.

Merenje električnog napona, struje, snage i energije, regulacija i zaštita elektroenergetskih postrojenja ne mogu se zamisliti bez primene mernih transformatora. Posebno je značajna njihova uloga u obračunskom merenju električne energije, gde od tačnosti mernih transformatora direktno zavisi i ukupna tačnost merenja energije [5]. U lancu proizvodnja - prenos - distribucija, električna energija se meri najmanje tri puta. Zbog toga je ekonomski interes, naročito u uslovima deregulisanog tržišta, da se merenje energije ostvaruje sa što manjom greškom. Zbog toga, merni transformatori kao i brojila električne energije pripadaju oblasti zakonske metrologije [6, 7]. Metrološkim propisima i standardima precizno su definisani uslovi primene, ispitivanje, etaloniranje, kao i rokovi periodičnog pregleda ovih vrsta merila [8, 9, 10, 11, 12].

Osnovni pravac razvoja mernih transformatora, pored unapređenja njihove pouzdanosti, je u smanjenju greške transformacije primarnih veličina na sekundarne. Kako su električni napon i struja vektorske veličine, i greška transformacije definiše sa amplitudnom (strujnom i naponskom) greškom i faznom (ugaonom) greškom. Poboljšanje i podizanje tačnosti mernih transformatora uslovljeno je razvojem mernih metoda i uređaja za merenje i određivanje grešaka transformacije. Istorijski posmatrano, problematika mernih transformatora datira još od početka dvadesetog veka [13, 14], tako da je i razvoj mernih metoda i uređaja za merenje grešaka mernih transformatora zavisio pre svega od tehničkih i tehnoloških mogućnosti vremena u kome se odvijao. Tako su se prve metode i uređaji zasnivali na kvadratnom elektrometru [15, 16]. Savremeni uređaji razvijeni su na najsavremenijim mikroprocesorskim tehnologijama i virtuelnoj instrumentaciji [17, 18, 19, 20, 21].

Savremena metrologija podrazumeva korišćenje novih tehničkih i tehnoloških dostignuća radi povećanja tačnosti, pouzdanosti i efikasnosti merenja. Jedno od takvih dostignuća je i strujni komparator, koji je prvo našao primenu u poređenju naizmeničnih struja, a kasnije i za tačno merenje jednosmerne struje, otpornosti, kapacitivnosti i dr. [22, 23]. Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" (u daljem tekstu Institut) zahvaljujući najviše profesoru Petru Miljaniću, je jedan od pionira u ovoj oblasti. I sam naziv "strujni komparator", danas međunarodno prihvaćen stručni izraz, pojavio se prvo u radovima stručnjaka Elektrotehničkog

instituta "Nikola Tesla" [24, 25]. U razvoju i primeni strujnih komparatora Institut uživa ugled svetski priznate institucije već više od pola veka. Uređaji za ispitivanje strujnih transformatora na bazi strujnog komparatora, razvijeni u Institutu, našli su primenu u svim fabrikama mernih transformatora bivše Jugoslavije, kao i u mnogim drugim laboratorijama za ispitivanje mernih transformatora u okviru distributivnih preduzeća i prenosne mreže. Ovi uređaji pokazali su niz metroloških prednosti u odnosu na druga rešenja, posebno kod ispitivanja mernih transformatora na terenu, na mestu ugradnje, zatim u njihovoj serijskoj i fabričkoj kontroli kvaliteta, kao i kod najpreciznijih merenja, [26, 27]. Nove generacije uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora razvijene u Institutu u poslednjih desetak godina našle su primenu u savremenoj proizvodnji mernih transformatora, kako u domaćim fabrikama (MINEL -FEPO Zrenjanin, FMT - Fabrika mernih transformatora, Zaječar), tako i u fabrikama iz okruženja ("Energoinvest", Srpsko Srajevo, "Končar - Mjerni transformatori" Zagreb) i Evropske unije (MBS, Nemačka).

Poseban razvoj u Institutu posvećen je razvoju mernih aparatura za primenu u najtačnijim merenjima iz ove oblasti. Takvi merni sistemi razvijeni su za potrebe primarne metrologije transformacije naizmeničnih struja, Direkcije za mere i dragocene metale, 1995. godine, kao i Nacionalnog metrološkog instituta Kanade (National Research Council Canada, NRC), 2014. godine i Laboratorije za visokonaponska ispitivanja opreme, Hydro Quebec Research Institute (IREQ), 2016. godine, takođe u Kanadi.

Ispitivanje tačnosti i etaloniranje mernih transformatora u Institutu može se obaviti na više načina, primenom različitih mernih metoda i mernih uređaja [28, 29]. Nezavisno od primenjene merne metode i uređaja, etaloniranje i ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora sprovodi se saglasno nacionalnim i međunarodnim standardima za merne transformatore pri određenim vrednostima struje i opterećenja [7, 9].

Ocena kvaliteta realizovanih merenja sagledava se kroz iskazanu mernu nesigurnost rezultata merenja [30]. Metrologija, kao globalna nauka u najširem smislu, imala je i ima određenih problema u naučnoj komunikaciji kada je reč o jedinstvenom prikazu i pristupu analizi rezultata merenja. Međunarodni standard „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, 1993. [30], otvorio je široko polje za teorijska istraživanja i praktičnu primenu u metrologiji [31, 32, 33, 34], konkretno i u oblasti mernih transformatora. Merna nesigurnost je jedna od najaktuelnijih tema savremene metrologije, kako sa teorijskog, tako i sa aspekta praktične primene. Skoro da nema naučnog skupa koji se bavi problematikom merenja a da ova tema nije značajno zastupljena bilo kroz pojedinačne radove ili kroz organizovane posebne sekcije posvećene proračunu merne nesigurnosti. Najbolji primer rečenog su poslednji Svetski kongres metrologa IMEKO 2015 [35] i Konferencija o preciznim merenjima u elektrotehnici CPEM 2016 [36].

Metrološki je preporučljivo da merna nesigurnost kod ispitivanja tačnosti mernih transformatora bude najmanje tri do pet puta bolja od grešaka ispitivanog strujnog transformatora. Kod ispitivanja tačnosti transformatora standardne klase tačnosti 0.1, 0.2 i 0.5, to se može obezbediti bez većih problema. Međutim, kod etaloniranja etalon transformatora, odnosno njihove interkomparacije, metrološki zadatak se usložnjava [37, 38, 39]. Zahtevi za mernu nesigurnost amplitudne i fazne greške reda ppm (engl. *parts per million*) ($\mu A/A$, odnosno μrad) zahtevaju složenije analize i istraživanja uticajnih veličina višeg reda, kao i primenu novih mernih metoda i postupaka u otklanjanju, slabljenju i kompenzaciji grešaka merenja [40, 41].

Autor je imala sreću da radi kako na ispitivanju strujnih transformatora standardnih klasa tačnosti (od 0.2 do 3), tako i na ispitivanju etalon strujnih transformatora deklariranih grešaka reda ppm ($\mu A/A$, odnosno μrad). Značajna iskustva stečena su tokom etaloniranja različitih sistema za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Činjenica da se u Institutu već više od šezdest godina razvija i proizvodi merna oprema za ispitivanje tačnosti mernih

transformatora pružala je dobru osnovu za razvoj, usavršavanje i primenu novh mernih metoda u ovoj oblasti.

U ovoj doktorskoj disertaciji prikazana je koncepcija, realizacija i potvrda nove metode jednovremenog uporednog etaloniranja strujnih mernih transformatora sa dve različite merne aparature. Autor je, kroz pregled stručne literature, utvrdila da ne postoji podatak da je ova metoda ranije primenjivana.

Disertaciju čine tri osnovne celine, poglavlja.

U prvom poglavlju disertacije prikazane su različite merne metode za ispitivanje i etaloniranje mernih transformatora koje imaju primenu u savremenoj praksi i koje podrazumevaju i različite merne mogućnosti.

U drugom poglavlju prikazana je koncepcija i realizacija metode jednovremenog uporednog etaloniranja strujnih mernih transformatora sa dve različite merne aparature. Takođe, eksperimentalno je potvrđeno jednovremeno uporedno etaloniranje strujnih mernih transformatora sa nekoliko mernih aparatura koje su zasnovane na različitim metodama. Sprovedena istraživanja i eksperimentalni rezultati pokazuju i potvrđuju niz prednosti ovakvog načina etaloniranja. Jednovremena uporedna metoda etaloniranja, osim što doprinosi povećanju tačnosti etaloniranja strujnih mernih transformatora, ima primenu i u etaloniranju mernih aparatura za ispitivanje tačnosti mernih transformatora i interkomparaciji strujnih etalon transformatora. Kroz konkretne primere, realizovane u praksi, razmotreni su i prikazani načini etaloniranja mernih aparatura za ispitivanje tačnosti ovom novom metodom. Interkomparacijom dva merna sistema visoke klase tačnosti Nacionalnog metrološkog instituta Kanade (NRC), od kojih je jedna razvijena u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla", pokazana je i prednost primene jednovremene metode u oblasti primarne metrologije strujnih mernih transformatora [41].

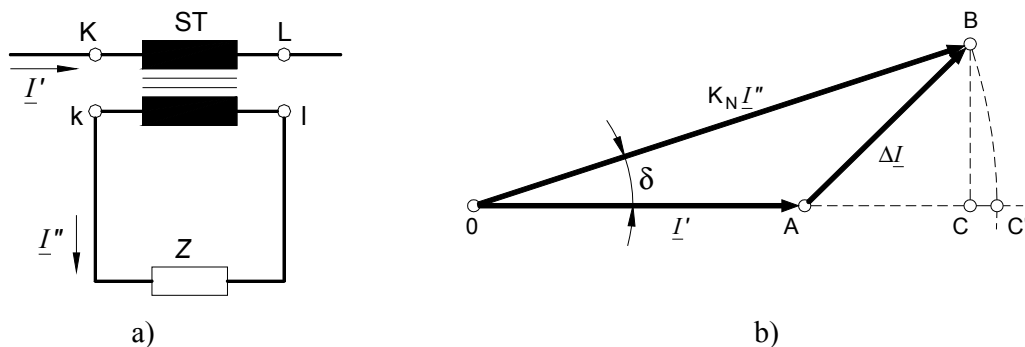
Detaljna analiza komponenata merne nesigurnosti data je u trećem poglavlju. Ova analiza je pokazala da se primenom nove jednovremene uporedne metode postiže poboljšanje merne nesigurnosti etaloniranja za skoro red veličine u odnosu na klasično, pojedinačno etaloniranje sa dve različite merne aparature. Analiza uticajnih veličina na mernu nesigurnost pokazuje da se po novoj metodi etaloniranja eliminiše niz komponenti, od kojih su najznačajnije uticaj nejednakosti referentnih struja i ispitnog opterećenja. Ovakav pristup proračunu merne nesigurnosti značajno doprinosi etaloniranju strujnih mernih transformatora visokih klasa tačnosti, što je od posebne važnosti u primarnoj metrologiji transformacije naizmeničnih struja.

1.1 Greške strujnog mernog transformatora

Osnovna funkcija strujnih mernih transformatora je da u energetske kolima struje reda stotina i hiljada ampera svedu na optimalne nivoe pogodne za rad mernih kola, odnosno mernih instrumenata. Kao i svako merenje, i merna transformacija struja nije idealna i praćena je određenim greškama. Kako je struja vektorska veličina, to se odstupanje od idealne transformacije karakteriše kompleksnom greškom $\underline{G}$ [9, 42]. Kompleksna greška obuhvata amplitudnu g i faznu grešku δ , odnosno u matematičkoj formi:

$$\underline{G} = g + j\delta \quad (1.1.1)$$

Za strujni merni transformator, šematski prikazan na slici 1.1.1a, geometrijska interpretacija njegove amplitudne i fazne greške prikazana je vektorskim dijagramom na slici 1.1.1b.



Slika 1.1.1 Strujni merni transformator: a) Električna šema strujnog mernog transformatora, b) Vektorski dijagram struja strujnog mernog transformatora

Amplitudna (strujna) greška g strujnog transformatora izražava se u procentima i definisana je odnosom primarne I' i sekundarne struje I'' prema izrazu:

$$g = \frac{k_{ns} \cdot I'' - I'}{I'} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.1.2)$$

gde je k_{ns} naznačeni odnos transformacije.

Fazna (ugaona) greška δ strujnog transformatora izražava se najčešće u minutima (min) i definisana je kao fazni pomeraj sekundarne struje I'' u odnosu na primarnu struju I' :

$$\delta = \angle \left(\vec{I}', \vec{I}'' \right) \text{ [min]} \quad (1.1.3)$$

Amplitudna i fazna greška strujnog mernog transformatora definisane su njegovim:

- konstruktivnim i tehnološkim parametrima: materijalom, oblikom i dimenzijama magnetnog kola, brojem amper-zavoja, dužinom i presekom žice, geometrijom primarnog i sekundarnog namotaja;
- eksploatacionim parametrima: sekundarnim opterećenjem, odnosom merene struje prema nazivnoj, učestanošću, izobličenjem i oblikom merene primarne struje;
- ambijentalnim uslovima: temperaturom i pritiskom.

Kvalitativno, navedene greške mogu se izraziti kao funkcija nabrojanih parametara:

$$g = f(\mu, \nu_{Fe}, l_{Fe}, S_{Fe}, M, l_{Cu}', S_{Cu}', l_{Cu}'', S_{Cu}'', \rho_{Cu}, S, \cos\beta, f_n, \sin p, \theta, h) \quad (1.1.4)$$

$$\delta = f(\mu, \nu_{Fe}, l_{Fe}, S_{Fe}, M, l_{Cu}', S_{Cu}', l_{Cu}'', S_{Cu}'', \rho_{Cu}, S, \cos\beta, f_n, \sin p, \theta, h) \quad (1.1.5)$$

gde su:

μ_r - relativna permeabilnost magnetnog kola, koju daje proizvođač za konkretan materijal u formi dijagrama u funkciji jačine magnetnog polja ili kao $B-H$ dijagram,

ν_{Fe} - gubici u magnetnom kolu dati kao W/kg ili kao karakteristika u funkciji indukcije i učestanosti,

l_{Fe} - dužina magnetnog kola,

S_{Fe} - presek magnetnog kola,

M_n - nazivna magnetnopobudna sila, odnosno proizvod primarne nazivne struje i broja primarnih navojaka,

l_{Cu}' - dužina žice primarnog namotaja,

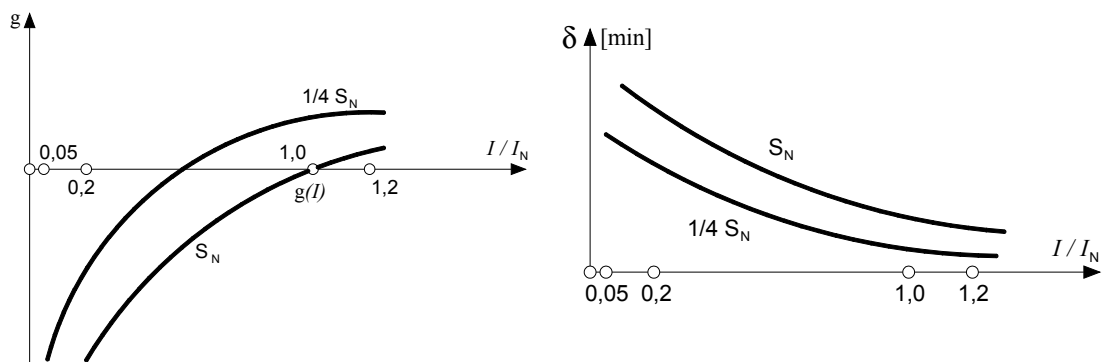
S_{Cu}' - presek žice primarnog namotaja,
 l_{Cu}'' - dužina žice sekundarnog namotaja,
 S_{Cu}'' - presek žice sekundarnog namotaja,
 S - sekundarno opterećenje,
 $\cos\beta$ - kosinus ugla sekundarnog opterećenja,
 f_n - nazivna učestanost
 s - odnos primarne struje prema nazivnoj
 p - atmosferski pritisak,
 θ - temperatura ambijenta,
 h - vlažnost vazduha.

Funkcionalne veze ovih parametara sa amplitudnom i faznom greškom su poznate, tako da je moguće za dati strujni transformator analitički doći do njihovih vrednosti, što se i inače radi kod projektovanja [42]. Međutim, prave (tačnije) vrednosti grešaka dobijaju se tek merenjem, odnosno ispitivanjem tačnosti mernog transformatora.

Uticaj uslova ambijenta na greške strujnog mernog transformatora je praktično zanemarljiv. Strujni merni transformatori su i projektovani za rad u prilično širokom opsegu temperatura ambijenta i vlažnosti vazduha, a specijalne konstrukcije prilagođene su i za ekstremne uslove rada [8]. Zbog toga je temperatura uticajna veličina drugog reda, a vlažnost vazduha i pritisak imaju zanemarljiv uticaj višeg reda.

Sekundarno opterećenje i odnos referentne struje prema naznačenoj imaju direktan uticaj na grešku strujnog mernog transformatora. I kod projektovanja strujnih transformatora i deklarisanja njihovih metroloških karakteristika sekundarno opterećenje i opseg referentne struje su veoma značajni parametri.

Propisi koji se odnose na strujne merne transformatore i na ispitivanje njihove tačnosti uvažavaju prirodnu karakteristiku ovih grešaka [9]. Propisane granice grešaka za pojedine klase tačnosti definisane su u odnosu na procenat naznačene struje I_n i za opseg naznačenog opterećenja od 1/4 do pune vrednosti, i odgovaraju nelinearnom karakteru grešaka. Tako su propisane granice grešaka za datu klasu tačnosti veće za male naznačene struje, 1% I_n , 5% I_n i 20% I_n , dok vrednosti propisane greške za 100% I_n i 120% I_n , praktično definišu klasu tačnosti [9].



Slika 1.1.2 a) Zavisnost amplitudne greške od struje i opterećenja,
 b) zavisnost fazne greške od struje i opterećenja [43]

Strujni transformatori se inače ispituju u označenim tačkama (1%, 5 %, 20 %, 100% i 120%) naznačene primarne struje i pri naznačenom i 1/4 naznačenog sekundarnog opterećenja.

Na slici 1.1.2 prikazana je zavisnost amplitudne i fazne greške strujnog transformatora od primarne struje i opterećenja. Zavisnost amplitudne greške od odnosa ispitne struje I i

naznačene struje I_n , za opterećenja S_n i $1/4 S_n$, prikazana je na slici 1.1.2a, a na slici 1.1.2b data je zavisnost fazne greške strujnog transformatora od odnosa I / I_N za ista opterećenja [43].

1.2 Pregled mernih metoda za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora

Od početka primene strujnih mernih transformatora, još davne 1892. godine [44] pojavila se i potreba za ispitivanjem njihove tačnosti. Greške tih prvih mernih transformatora bile su reda oko 3% (amplitudna) i približno 200 minuta (fazna) [13]. Ove greške su tada utvrđivane direktnim merenjem primarnih i sekundarnih struja i faznog pomeraja. Pored same greške merne metode, ograničenja su se pojavila i u primeni analognih mernih instrumenata [45]. Primera radi, u to vreme granice merenja struja analognim mernim instrumentima bile su 200 A. Za struje veće od ove vrednosti primenjivani su odgovarajući šantovi i predotpori.

Sa ubrzanim tehnološkim razvojem počinje i primena preciznih etalon mernih transformatora [46]. Napretkom u izradi i primeni novih magnetnih materijala greške mernih transformatora smanjuju se već tridesetih godina prošlog veka na 0.1% i 5 min [47].

Prve metode za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora pojavljuju se početkom prošlog veka [15, 48, 49]. Oko 1930. godine pojavljuju se merni uređaji zasnovani na kompenzacionoj metodi i kompleksnom kompenzatoru [50, 51]. Postoje mnoga rešenja kompleksnih kompenzatora, ali, sa stanovišta ispitivanja tačnosti mernih transformatora, najznačajniji je, svakako, rad naučnika Šeringa i Albertija [48]. Tehnološka poboljšanja i modifikacije ovog kompenzatora učinjenje tridesetih godina prošlog veka [16], a naročito ona kasnija oko šezdesetih godina prošlog veka, učinila su da su ovi instrumenti dugo bili nezaobilazni u mernim aparaturama laboratorija za ispitivanje mernih transformatora tokom dvadesetog veka.

Diferencijalna metoda pripisuje se Silsbiju (F. B. Silsbee) i vezuje se za 1917. godinu [15]. Ovu metodu usavršio je Hole (W. Hohle) 1934. godine [52]. Suština ove metode je merenje razlika dveju veličina. U slučaju strujnih mernih transformatora, porede se sekundarni naponi (ili struje) ispitivanog i etalon transformatora približno jednakih odnosa transformacije. Da bi ovo poređenje bilo što tačnije, etalon strujni transformator treba da ima zanemarljivo malu grešku. Merni uređaj, tzv. Holeov kompenzator, napravljen po ovoj metodi, našao je široku praktičnu primenu [53].

Treća, takođe veoma značajna merna metoda koja se zadržala do danas zasniva se na primeni strujnog komparatora. Ideju strujnog komparatora prvi je, daleke 1917. godine, izložio američki fizičar Bejker (Baker) [49]. On je predložio da se razlika dveju struja meri pomoću namotaja na magnetnom jezgru. Strujni komparator sa kompenzacionim namotajem prvi je upotrebio 1930. godine engleski naučnik Brađis (Bruges) [54], a nemački fizičar Rajhe (Reihe) primenjuje ga za proveru uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora [55]. Ova, dakle, davno poznata, ali tada tehnički i tehnološki nesavršena metoda, doživljava pedesetih godina prošlog veka svoju reafirmaciju u nekoliko metroloških laboratorija. Tih godina započinje rad na ovoj problematici i u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla" u Beogradu. Realizuje se prvi uređaj za merenje tačnosti strujnih mernih transformatora. Ovaj rad, koji u kontinuitetu traje i danas, obeležen je nizom uspešnih rezultata i radova. Tako se u radovima saradnika prvi put pojavljuje termin "strujni komparator" koji je i svetski prihvaćen [24]. Poseban napredak u konstrukciji i izradi strujnih komparatora ostvaren je zajedničkim radom

saradnika kanadskog NRC (National Research Council) i Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla" [25].

Poslednjih godina 20. veka, primenom savremenih elektronskih rešenja i mikroračunarske tehnike, značajno su unapređene merne metode i uređaji za ispitivanje tačnosti mernih transformatora [18]. Mogućnosti i prednosti hardverske i softverske podrške PC nisu samo u domenu povećanja efikasnosti ili pouzdanosti rada, već i u povećanju tačnosti merenja. Savremeni uređaji zasnovani su na o opštoj tendenciji u elektronici da se obrada mernog signala realizuje u digitalnom obliku. Razlike između pojedinih rešenja ovih uređaja su najčešće u načinu dalje elektronske obrade mernih signala [17, 19].

U narednim poglavljima biće detaljnije prikazane kako klasična kompenzaciona, diferencijalna i metoda strujnog komparatora, tako i savremene merne metode zasnovane na metodi izdvajanja ortogonalnih komponenti napona, Furijeovoj transformaciji i virtuelnim mernim instrumentima.

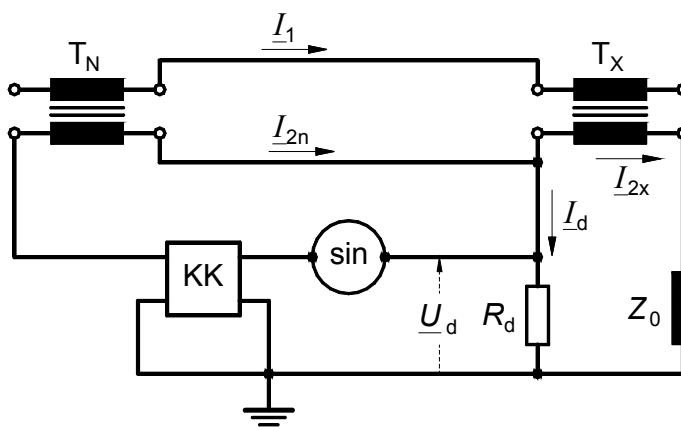
1.2.1 Klasične metode i uređaji za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora

Klasični merni uređaji za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora zasnivaju se na tri klasične merne metode: kompenzacionoj, diferencijalnoj i metodi strujnog komparatora.

Dve bazične metode za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, razvijene početkom i u prvoj polovini prošlog veka, na kojima su zasnovani mnogi uređaji za ispitivanje mernih transformatora, su diferencijalna i kompenzaciona metoda.

Diferencijalna metoda podrazumeva upoređivanje sekundarnih struja ispitivanog transformatora sa etalon transformatorom istog ili približno istog odnosa transformacije, odnosno merenje razlika njihovih struja. Na slici 1.2.1 je prikazana struktura diferencijalne metode za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora [56].

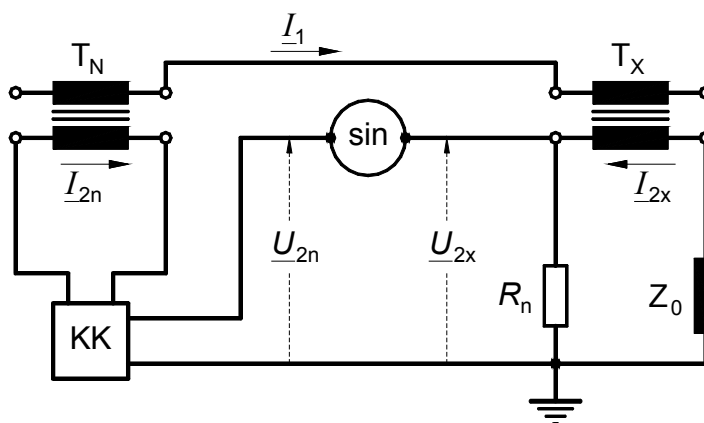
Kompenzaciona metoda je u osnovi direktno poređenje dva naizmenična napona generisana na preciznim etalonskim šantovima, jedan od strane primarne struje, a drugi od strane sekundarne struje ispitivanog transformatora. Modifikovana kompenzaciona metoda prikazana na slici 1.2.2 uključuje etalon transformator za transformaciju primarne struje na odgovarajuću vrednost sekundarne struje [56].



Slika 1.2.1 Diferencijalna metoda za ispitivanje strujnih mernih transformatora [56]

Osnovni element mernih aparatura zasnovanih na obe metode je kompleksni kompenzator KK. Osim njega, merne aparature čine i selektivni indikator nule SIN, referentno opterećenje Z_0 , i precizni otpornici R_n ili R_d . Bez obzira na to što su elementi mernih aparatura skoro identični, razlika među ovim metodama je vrlo značajna. Po diferencijalnoj metodi kompleksnim kompenzatorom meri se napon U_d koji je mera razlike sekundarnih struja etalona i ispitivanog transformatora. Dakle, meri se napon koji je već mera greške ispitivanog transformatora. Po kompenzacionoj metodi kompleksnim kompenzatorom mere se naponi U_{2x} i U_{2n} koji odgovaraju ukupnoj sekundarnoj struji ispitivanog transformatora I_{2x} i struji etalon transformatora I_{2n} . Razlika ovih merenih napona je mera greške ispitivanog strujnog transformatora. Zato, kod određivanja greške ispitivanog strujnog transformatora, merenje naizmeničnog (kompleksnog) napona po kompenzacionoj metodi mora biti znatno tačnije (bar za dva reda veličine), kako bi se dobila ista tačnost određivanja greške ispitivanog strujnog transformatora kao kod diferencijalne metode.

Osim ove dve metode za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora koristi se i metoda strujnog komparatora koja se svodi na poređenje struja preko magnetopobudnih sila, odnosno magnetnih flukseva koje te struje generišu u magnetnom kolu strujnog komparatora.



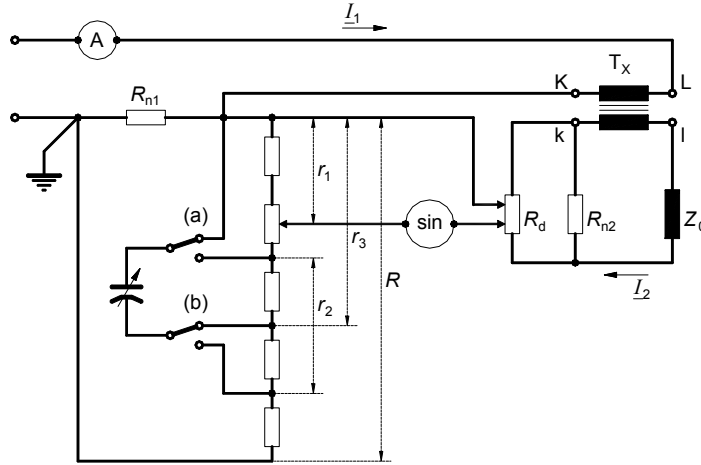
Slika 1.2.2 Kompenzaciona metoda za ispitivanje strujnih mernih transformatora [56]

Princip klasične kompenzacione metode biće objašnjen na primeru unapređenog Šering - Albertijevog kompenzatora [16], a diferencijalna na primeru Holeovog kompenzatora [53].

1.2.1.1 Šering – Albertijeva metoda

U mernoj aparaturi sa Šering - Albertijevim kompleksnim kompenzatorom, osim etalon transformatora primenjeni su precizni šantovi i otpornički delitelji napona. Šematski prikaz merenja greške strujnog mernog transformatora po kompenzacionoj metodi Šering-Alberti, gde se umesto etalon strujnog transformatora koriste precizni šant i otpornički delitelj prikazan je na slici 1.2.3 [56].

Po ovoj metodi porede se padovi napona u primarnom i sekundarnom kolu ispitivanog transformatora. Uravnotežavanje kompenzatora je nezavisno po amplitudi i fazi. Konstruktivno to je rešeno tako što se grubo podešavanje ostvaruje pomoću otporničkog delitelja r_d / R_d a fino pomoću potenciometara od otporne žice r za strujnu, tj. amplitudnu grešku, i pomoću kondenzatora C za faznu, tj. ugaonu grešku [56].



Slika 1.2.3 Šering-Albertijeva metoda za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora [56]

Za preklopnik u položaju (a) na slici 1.2.3, jednačina ravnoteže glasi:

$$\underline{I}_2 \cdot \frac{r_d}{R_d} \cdot \frac{R_{N2} R_d}{R_d + R_{N2}} (1 + j \operatorname{tg} \delta_a) = \underline{I}_1 \frac{r}{R} \left[(R_{N1} + R) + j \omega r^2 C \frac{R_{N1} R}{(R_{N1} + R)^2} \right] \quad (1.2.1)$$

odnosno za preklopnik u položaju (b):

$$\underline{I}_2 \cdot \frac{r_d}{R_d} \cdot \frac{R_{N2} R_d}{R_d + R_{N2}} (1 + j \operatorname{tg} \delta_b) = \underline{I}_1 \frac{r}{R} \left[(R_N + R) + j \omega r^3 C \frac{R_{N1} + R + r_3}{(R_{N1} + R)^2} \right] \quad (1.2.2)$$

Izjednačavanjem realnih članova u jednačini (1.2.1) ili (1.2.2) i pojednostavljenjem jednačina uvođenjem izraza:

$$R'_{N1} = \frac{R_{N1} R}{R_{N1} + R} \quad (1.2.3)$$

i

$$R'_{N2} = \frac{R_{N2} R_d}{R_{N2} + R_d} \quad (1.2.4)$$

dobija se:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_d}{r_d} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{R'_{N1}}{R'_{N2}} \quad (1.2.5)$$

Na osnovu definicije amplitudne greške, jednačina (1.1.3) i (1.2.5), sledi:

$$g_i = \left(K_n \frac{R_d}{r_d} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{R'_{N1}}{R'_{N2}} \right) - 1 \quad (1.2.6)$$

Na osnovu izraza (1.2.6) moguće je dimenzionisati elemente kompenzatora tako da se ostvari direktno očitavanje amplitudne greške na skali žičanog potencijometra r . Izjednačavanjem imaginarnih članova u jednačini (1.2.1) i korišćenjem izraza (1.2.5) dobija se:

$$\operatorname{tg} \delta_a = \frac{r_2^2 \omega}{R_{N1} + R} \cdot C \quad (1.2.7)$$

Kako je δ_a relativno mala veličina (za strujne merne transformatore čija je fazna greška ispod 100 min) to se može uzeti da je $\operatorname{tg} \delta_a \approx \delta_a$ pa je tada fazna greška:

$$\delta_a = \frac{r_2^2 \omega}{R_{N1} + R} \cdot C \quad (1.2.8)$$

Vidi se da se i fzna greška, pogodnim izborom konstruktivnih parametara r_2 , R_{N1} , R i C , za datu učestanost $\omega = 2\pi f$, može direktno prikazati u ugaonim minutima ili centiradijanima.

U slučaju negativne fazne greške, preklopnik u položaju (b), dobija se:

$$\delta_b = -\frac{R_{N1} + R - r_3}{R_{N1} + R} r_3 \omega C \quad (1.2.9)$$

Izjednačavanjem izraza (1.2.8) i (1.2.9):

$$\frac{r_2^2}{R_{N1} + R} = -\frac{R_{N1} + R - r_3}{R_{N1} + R} \cdot r_3 \quad (1.2.10)$$

dobija se uslov jednakosti za konstantu skale za pozitivnu i negativnu faznu grešku:

$$r_2^2 = (R_{N1} + R - r_3) \cdot r_3 \quad (1.2.11)$$

I pored toga što izvedena razmatranja potvrđuju jednoznačnost i korektnost izložene metode, teškoće u njenoj primeni ipak postoje. Tako je potrebno za svaki ispitivani transformator obezbediti takve etalon otpornike R_{N1} i R_{N2} da je njihov odnos jednak odnosu transformacije K_n :

$$K_n = \frac{R'_{N1}}{R'_{N2}} \quad (1.2.12)$$

Ako se ovome doda da i otpori R i R_d utiču na odnos R'_{N2}/R'_{N1} , onda je i njihova vrednost najčešće nestandardna. Osim toga ovi otpornici, kao i ostali otpornici u šemi treba da budu precizni, temperaturno stabilni i sa malom vremenskom konstantom. Posebne teškoće javljaju se kod izrade otpornika R_{N1} za velike primarne struje i vezane su za njihovu disipaciju i umeravanje. Zato je kod većih primarnih struja (preko 20 A) pogodnija primena strujnog etalon transformatora umesto otporničkog delitelja.

Modifikovana šema Šering – Albertijevog kompenzatora za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora sa etalon strujnim transformatorom data je na slici 1.2.4 [56].

Izrazi za amplitudnu i faznu grešku kod ovakve šeme se neznatno razlikuju od izraza (1.2.6), (1.2.7) i (1.2.9) i glase za slučaj pozitivne ugaone greške, preklopnik u položaju (a):

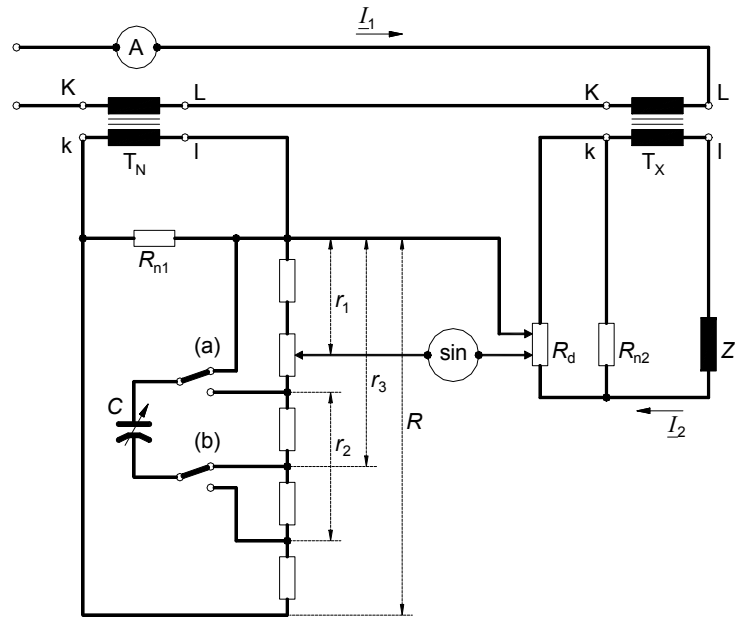
$$g_i = \left(\frac{R_d}{r_d} \cdot \frac{R_{N1}}{R_{N2}} \cdot \frac{K_{nX}}{K_{nN}} \cdot \frac{r}{R} \right) + g_e - 1 \quad (1.2.13)$$

$$\delta_a = \frac{r_2^2 \omega}{R_{N1} R} + \delta_N \quad (1.2.14)$$

odnosno, za slučaj negativne ugaone greške, preklopnik u položaju (b):

$$\delta_b = -\frac{R_{N1} + R - r_3}{R_{N1} + R} \cdot r_3 \omega C + \delta_N \quad (1.2.15)$$

Ako su greške etalon transformatora dovoljno male, mogu se zanemariti u izrazima (1.2.13) i (1.2.14), odnosno (1.2.15).



Slika 1.2.4. Šering – Albertijeva metoda za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora pomoću etalon transformatora [56]

Kompenzatori po Šering – Albertiju izrađuju se uglavnom za laboratorijske potrebe. Ovo je posledica zahteva da ugrađeni elementi budu što tačniji, temperaturno i vremenski nepromenljivi. Jasno je da to zavisi i od uslova eksploatacije, a laboratorija pruža neuporedivo bolje uslove od pogona ili terena.

Pored navedenih nedostataka, javlja se i problem dodatnog opterećenja ispitivanog strujnog transformatora otporom R_{N2} , što nije zanemarljivo, naročito kod ispitivanja strujnih mernih transformatora malih tereta.

Komercijalni uređaji izrađeni po ovoj metodi omogućavaju merenje greške mernih transformatora, pri čemu greška samog kompenzatora ostaje u granicama $\pm 0,02\%$ i $\pm 2'$.

Glavno preimućstvo ove metode je u mogućnosti merenja greške mernih transformatora nestandardnog odnosa transformacije.

1.2.1.2 Holeova metoda

Diferencijalna metoda, kao što je već rečeno, zasniva se na poređenju sekundarne veličine ispitivanog transformatora sa sekundarnom veličinom etalon transformatora jednakog ili približno jednakog odnosa transformacije. Dobijena razlika napona meri se kompleksnim kompenzatorom, čime se jednoznačno utvrđuju vrednosti amplitudne i fazne greške. Na slici 1.2.5 prikazana je šema Holeove metode ispitivanja tačnosti strujnih mernih transformatora [56].

Kao što se sa slike vidi, ispitivani i strujni etalon transformator vezani su na red i u kolu primara i u kolu sekundara. Ukoliko su sekundarne struje jednake, kroz diferencijalnu granu neće teći struja. U suprotnom, kada ove struje nisu jednake, prema Kirhofovom zakonu, kroz granu KM teći će struja:

$$\underline{I}_d = \underline{I}_{2N} - \underline{I}_{2x} \quad (1.2.16)$$

Na otporniku R_d ova diferencijalna struja stvara pad napona:

$$\underline{U}_d = \underline{R}_d \underline{I}_d \quad (1.2.17)$$

Napon U_d , koji je mera kompleksne greške ispitivanog transformatora, uravnotežava se pomoću kompleksnog napona U_g . Kako oba napona zavise od sekundarne struje I_2 , greška mernog transformatora T_x se može iskazati vrednošću otpornosti potencijometara r_g i r_δ , odnosno položajem klizača ovih potencijometara.

Napon na sekundarnim krajevima međuinuktiviteta M srazmeran je:

$$\underline{U}_M = j\omega M \underline{I}_{2N} \quad (1.2.18)$$

Napon na sekundarnim krajevima strujnog transformatora ST jednak je:

$$\underline{U}_S = \frac{R_g}{K_{ST}} \underline{I}_{2N} \quad (1.2.19)$$

Napon U_G rezultat je zbira napona na oba potencijometra:

$$\underline{U}_G = \frac{r_g}{K_{ST}} \underline{I}_{2N} + j\omega M \frac{r_\delta}{R_\delta} \underline{I}_{2N} \quad (1.2.20)$$

Ako se struje I_{2N} i I_{2x} izraze kao:

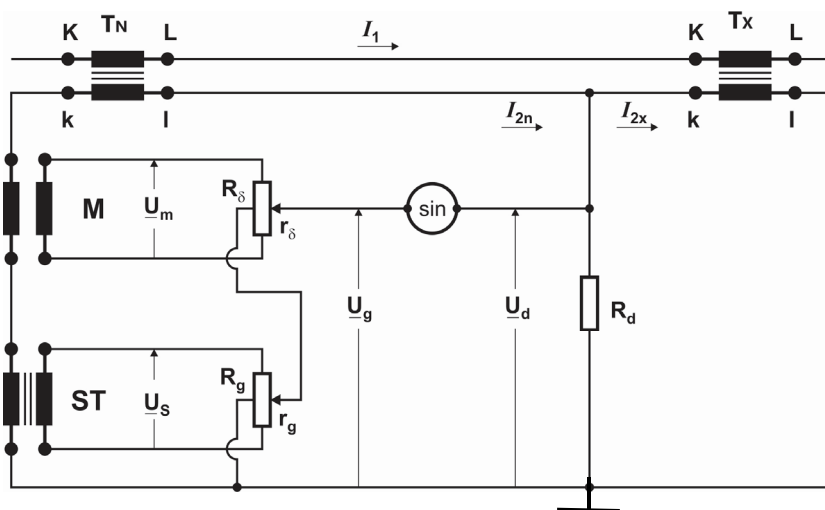
$$\underline{I}_{2x} = \frac{\underline{I}_1}{K_{nX}} (1 + g_i)(1 + j \operatorname{tg} \delta) \quad (1.2.21)$$

$$\underline{I}_{2N} = \frac{\underline{I}_1}{K_{pN}} (1 + g_e)(1 + j \operatorname{tg} \delta_e) \quad (1.2.22)$$

i uz uslov $K_{nX} = K_{nN}$, a na osnovu definicije strujne i ugaone greške i jednačina ravnoteže, dobija se:

$$g_i = \frac{r_g}{R_g K_{ST}} + g_e \quad (1.2.23)$$

$$\delta = \frac{\omega}{R_d} \cdot \frac{M}{R_s} \cdot r_\delta + \delta_e \quad (1.2.24)$$



Slika 1.2.5 Ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora po Holeovoj diferencijalnoj metodi [56]

Iz gornjih jednačina se vidi da je strujna greška srazmerna otpornosti r_g , a ugaona otpornosti r_δ . Konstruktivno je to izvedeno tako što su skale kliznih, kružnih potencijometara, r_g i r_δ graduísane u procentima, odnosno ugaonim minutima. U praksi se promenom otpornosti R_d može menjati opseg merenja greške. Kao i kod Šering – Albertijeve metode, i u ovoj metodi izraz za ugaonu grešku zavisi od učestanosti. Uostalom, u šemi se ravnoteža kompenzatora postiže samo za osnovni harmonik napona, a detekcija ravnoteže postiže se preko selektivnog indikatora nule, odnosno nultog signala, u šemi označenog sa SIN.

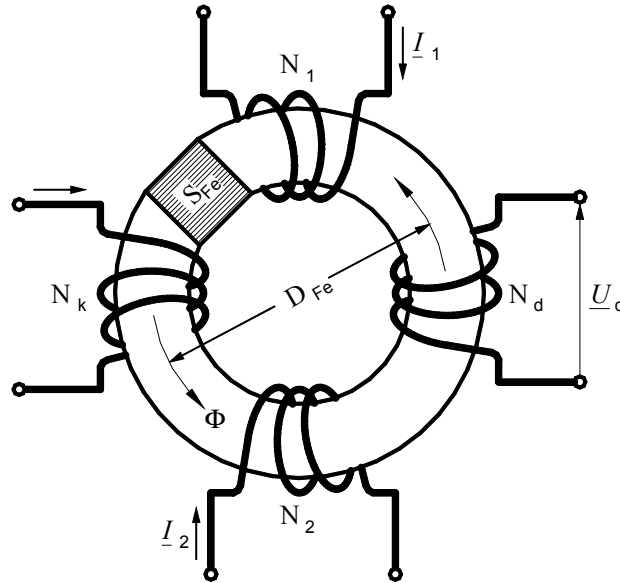
Zahtevi u pogledu tačnosti samih elemenata šeme, s obzirom na to da se pomoću njih u slučaju Holeove metode meri diferencijalna struja I_d , odnosno struja kompleksne greške, a ne ukupan sekundarni napon ili struja, su znatno blaži nego kod Šering – Albertijeve metode. U ovom slučaju zahtevi su na nivou relativne greške koja je mera greške ispitivanog transformatora. Kod Šering – Albertijeve metode ovi zahtevi su se odnosili na nivo apsolutne greške u određivanju greške ispitivanog transformatora.

Ograničenje Holeove metode je obavezujuća primena etalon transformatora koji mora imati isti odnos transformacije kao i ispitivani transformator. Problem merenja nestandardnih odnosa transformacije, dakle ispitivanje tačnosti mernih transformatora za koje ne postoji etalon transformator odgovarajućeg odnosa transformacije, rešava se kod strujnih mernih transformatora upotrebom etalon strujnog međutransformatora.

Deklarisane greške Holeovog kompenzatora u savremenijim komercijalnim izvedbama iznosile su 0.005% za merenje amplitudne greške i 0.3 min za merenje fazne greške. Komercijalni merni uređaj bio je izrađivan u obliku mernog kofera, pogodnog za rad i u laboratoriji i na terenu.

1.2.1.3 Metoda strujnog komparatora

Idealan transformator je transformator za koji važi jednakost magnetopobudnih sila [57]. Realno, jedan deo primarne magnetopobudne sile se troši na magnećenje jezgra i gubitke u njemu, što je i osnovni uzrok greške strujnog mernog transformatora. Ako se magnetni fluks u jezgri veštački svede na nulu, tada strujni transformator postaje idealan. Tako se dobija mogućnost vrlo tačnog poređenja dveju naizmeničnih struja, što je i osnovna ideja strujnog komparatora [57]. Na slici 1.2.6 je šematski prikazan strujni komparator. Za merenje magnetnog fluksa u jezgri strujnog komparatora služi detekcioni namotaj N_d , a za dovođenje magnetnog fluksa na nulu služi kompenzacioni namotaj, na slici 1.2.6 označen kao N_k [58].



Slika 1.2.6. Strujni komparator [58]

Detekcioni namotaj izrađen je od tanke bakarne žice, ravnomerno namotane uz samo torusno jezgro komparatora. Namotaj treba da ima što veći broj navojaka, a magnetno jezgro treba da bude od materijala koji ima veliki početni magnetni permeabilitet.

Napon na krajevima detekcionog namotaja je:

$$\underline{U_d} = 2\pi f \mu_0 \mu_r N_d \frac{S_{Fe}}{D_{Fe}} \sum I \quad (1.2.25)$$

Odnos $\underline{U_d} / \sum I$ naziva se osetljivošću komparatora. U praksi osetljivost komparatora se kreće od 1 V/A do 4 V/A.

Ilustracije radi, pri osetljivosti komparatora od 3 V/A, sa sekundarnim namotajem od $N = 100$ navojaka i sekundarnom strujom $I_2 = 5$ A, kod greške od 1×10^{-6} javiće se, kao njena posledica, detekcioni napon $\underline{U_d} = 1,5$ mV. Poređenja radi, kod klasične kompenzacione metode (npr. Šering – Albertijeve) sa šantom $R_{N1} = 0,4 \Omega$, za utvrđivanje greške od 1×10^{-6} bio bi

potreban selektivni indikator nule osetljivosti 2 $\mu\text{V}/\text{pod}$. Odnos je skoro hiljadu puta u korist strujnog komparatora. To je jedna od najvažnijih osobina i prednosti nad klasičnim postupcima. Druga, isto tako važna činjenica je, da se poređenje struja svodi na odnos broja navojaka (N_1 / N_2). Ovaj odnos je, za razliku od odnosa otpora, vremenski i temperaturno nepromenljiv.

Strujni komparator ipak nije idealan merni sistem. Greške koje se javljaju kod strujnog komparatora mogu biti spoljne ili unutrašnje, a po prirodi magnetne ili kapacitivne.

Kompleksna greška strujnog komparatora definiše se kao i kod strujnog transformatora:

$$\underline{G} = \frac{N_2 \underline{I}_2}{N_1 \underline{I}_1} - 1 \quad (1.2.26)$$

U praksi se više operiše sa amplitudnom (strujnom) g_i i faznom (ugaonom) δ greškom.

Ukupna kompleksna greška strujnog komparatora sastoji se od greške magnetne prirode G_m i greške kapacitivne prirode G_C :

$$\underline{G} = \underline{G}_m + \underline{G}_C \quad (1.2.27)$$

Magnetna komponenta greške nastaje usled nesavršenosti magnetnog kola (jezgra) i namotaja, kao posledica stranih magnetnih polja.

U izvođenju jednačine (1.2.25) pretpostavlja se idealna simetrija namotaja i struktura strujnog komparatora. Korektno izvođenje polazi od jednačine:

$$du = \frac{d\phi}{dt} \quad (1.2.28)$$

Za elementarni deo detekcionog namotaja predstavljenog na slici 1.2.7 indukovani napon je:

$$du = Nd_l \frac{d\phi}{dt} = nd_l \frac{d}{dt} (BS_{Fe} \cos \alpha) \quad (1.2.29)$$

Ukupan detekcioni napon je tada:

$$U_d = \oint_l du = \oint_l nS_{Fe} \mu_0 \mu_r \frac{d}{dt} (Hdl \cos \alpha) \quad (1.2.30)$$

Kada bi veličine n , S_{Fe} i μ_r bile nepromenljive duž obima torusnog jezgra l , tada bi se korišćenjem Amperovog zakona koji u integralnom obliku glasi:

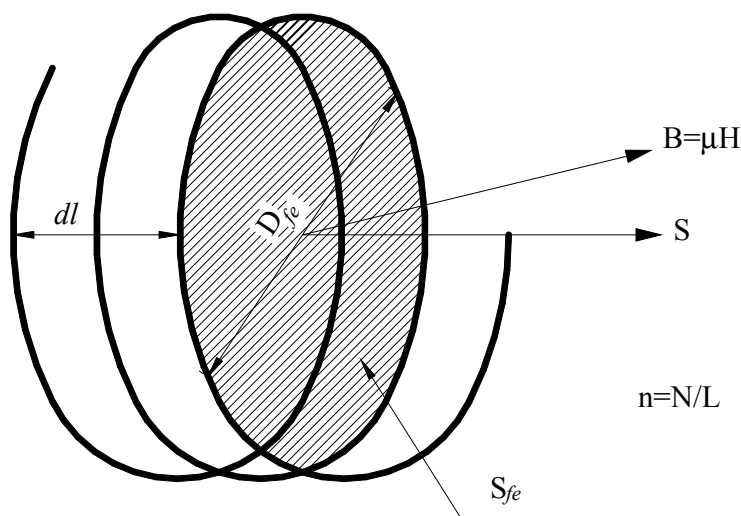
$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum_s \vec{I} \quad (1.2.31)$$

dobio izraz:

$$U_d = nS_{Fe} \mu_0 \mu_r \frac{d}{dt} \oint_l \vec{H} d\vec{l} = nS_{Fe} \mu_0 \mu_r \frac{d}{dt} \sum_s \vec{I} \quad (1.2.32)$$

Ovaj izraz definiše vrednost efektivnog napona na krajevima detekcionog namotaja, jednačina (1.2.25). Kako su veličine n , S_{Fe} i μ_r promenljive duž obima torusnog jezgra l , to znači da se

integral dat jednačinom (1.2.30) ne može jednoznačno rešiti. Drugim rečima, to znači da usled ove nesimetrije komparacija magnetopobudnih sila ΣI neće biti apsolutno tačna.



Slika 1.2.7 Elementarni deo detekcionog namotaja strujnog komparatora [58]

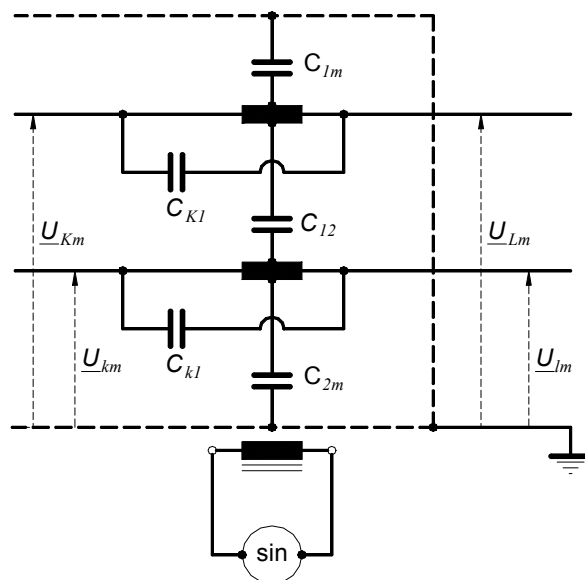
Navedena činjenica se eksperimentalno može proveriti tako što se kroz torusno jezgro provuče strujna kontura koju sačinjavaju dva dugačka paralelna provodnika [57]. Ako su struje u tim provodnicima iste a suprotnog znaka, tada bi u slučaju idealnog komparatora detekcioni napon bio nula. U suprotnom, javiće se određeni napon kao mera unutrašnje nesimetrije. Kako se na magnetno kolo praktično ne može uticati, to se korekcija ili kompenzacija ove nesimetrije izvodi preko korekcije broja navojaka duž obima jezgra. Opisani eksperiment, uz snimanje promene napona u funkciji ugla zakretanja strujne konture, omogućava određivanje mesta na kome treba povećati gustinu detekcionog namotaja. U praksi se to izvodi tako što se preko već namotanog detekcionog namotaja na određenim mestima dodaju korekcionni namotaji. Svi oni se, zajedno sa detekcionim namotajem, povežu na red. Na ovaj način može se magnetna greška usled nehomogenosti smanjiti za ceo red veličine.

Rasuta magnetna polja primarnog i sekundarnog namotaja, kao i strana magnetna polja koja bi se zatvarala kroz jezgro komparatora, mogu se oslabiti pomoću magnetnog štita, o čemu će biti reči kasnije.

Pored magnetne greške na tačnost komparatora utiču i greške kapacitivne prirode. Kako su namotaji strujnog komparatora prilično simetrično raspoređeni oko torusnog jezgra, može se pretpostaviti da su i međunavojne kapacitivnosti i kapacitivnost prema oklopu ravnomerno raspoređeni, tako da se oni mogu predstaviti na način dat šemom na slici 1.2.8.

Mere koje svakako treba preduzeti da bi se smanjila kapacitivna greška su:

- potpuno elektrostatičko oklapanje detekcionog namotaja,
- potpuno elektrostatičko oklapanje kompenzacionog namotaja,
- smanjenje međunamotajne kapacitivnosti,
- smanjenje potencijalnih razlika među namotajima njihovim uzemljavanjem ili veštačkim dovođenjem na isti potencijal (npr. pomoću tzv. Vagnerove grane).



Slika 1.2.8. Ekvivalentne kapacitivnosti kod strujnog komparatora [58]

Ukupna greška strujnog komparatora rezultat je nesavršenosti samog komparatora (limitirana osetljivost, određena nesimetrija, međunavojna i međunamotajna kapacitivnost, itd.) ali i spoljnih uticaja. Pod spoljnim uticajima podrazumevaju se uticaji same merne metode, ali i neželjeni strani uticaji (električni, magnetni i dr.). Zbog toga se u određivanju tačnosti strujnih komparatora može ići na procenu maksimalnih grešaka, na osnovu izmerenih parametara strujnog komparatora i analiziranih uticaja. Pokazuje se da se magnetne greške mogu konstruktivno svesti na red veličine 10^{-7} , a kapacitivne do 10^{-6} . Greška usled neosetljivosti strujnog komparatora zavisi od merne metode u kojoj je primenjen strujni komparator i vrste selektivnog indikatora nule, o čemu će biti više reči u poglavlju o primeni strujnog komparatora.

Drugi način utvrđivanja greške strujnog komparatora je eksperimentalni; to može biti poređenje ispitivanog strujnog komparatora sa tačnijim (etalon) strujnim komparatorom. Međutim, u ovom postupku se javlja niz problema od kojih je jedan i sama greška primenjenog etalona.

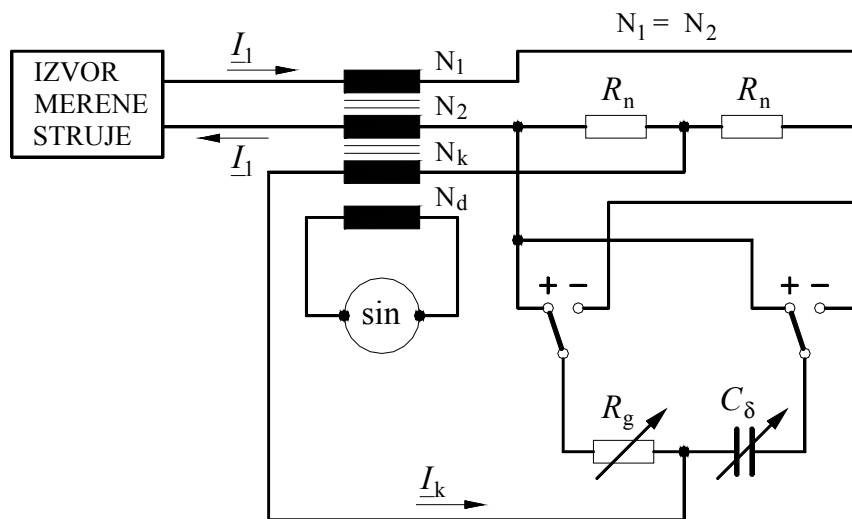
Za odnos struja 1:1 moguće je primeniti metod samokalibracije strujnog komparatora, što je prikazano električnom šemom na slici 1.2.9.

Kroz primarni i sekundarni namotaj strujnog komparatora prolazi ista struja. U slučaju idealnog strujnog komparatora, selektivni indikator nule SIN ne bi merio nikakav napon greške. U praksi detekcioni napon postoji, a pomoću potencijometra R_g i promenljivog kondenzatora C_δ podešava se kompenzaciona struja I_k kroz kompenzacioni namotaj, čime se detekcioni napon dovodi na nulu. Ovi parametri, zajedno sa šantom R_n , određuju grešku ispitivanog strujnog komparatora.

Ako se zanemari impedansa kompenzacionog namotaja $Z_k \approx 0$ u odnosu na R_g , tada su izrazi za grešku strujnog komparatora:

$$g_i = \frac{N_k R_n}{N_2 R_g} \quad (1.2.33)$$

$$\delta = \frac{N_k}{N_2} \omega C_\delta \quad (1.2.34)$$



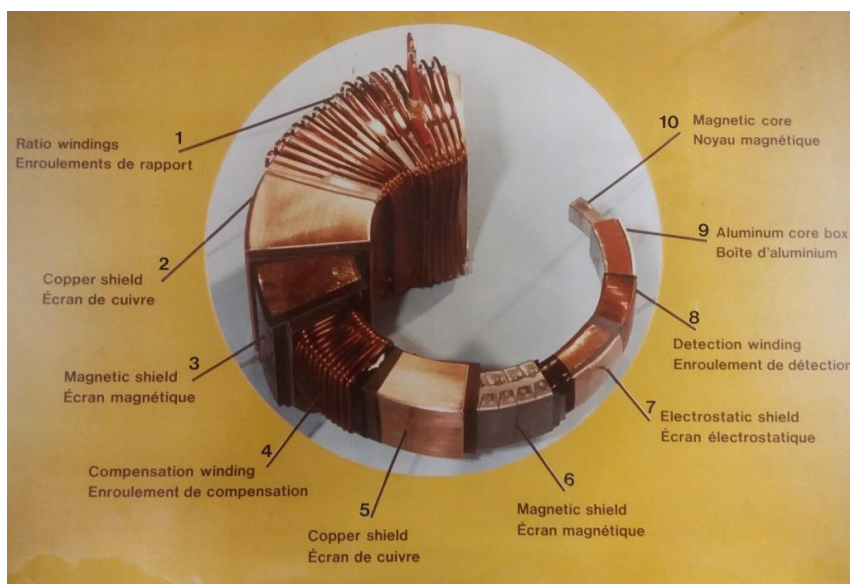
Slika 1.2.9. Električna šema samokalibracije strujnog komparatora [58]

Pomoću opisane metode mogu se eksperimentalno utvrđivati uticaji: napona napajanja, stranih polja, efekta uzemljivanja i oklapanja itd., na grešku merenja strujnog komparatora. Eksperimentalni rezultati potvrđuju da se amplitudna greška brižljivo realizovanih strujnih komparatora kreće u granicama od 10^{-6} do 10^{-7} , a fazna je reda $0,01'$.

Konstruktivno, strujni komparator čine magnetno jezgro i namotaji, pa je sličan strujnom mernom transformatoru. Međutim, sistem elektrostatičkog i magnetnog oklapanja čini strujni komparator znatno složenijim [57]. Na slici 1.2.10 prikazana je struktura strujnog komparatora.

Magnetno kolo strujnog komparatora je torusnog oblika, od mekog magnetnog materijala velike početne magnetne permeabilnosti. Ove osobine imaju ferolegure na bazi nikla, poznate pod komercijalnim nazivima: permaloj, mumetal, permenom 10, vacoperm 100, M1040 i dr. Savremena nanotehnologija nudi i u ovoj oblasti nove magnetne materijale nanokristalne strukture. Proizvođači magnetnog materijala isporučuju gotova torusna jezgra željenih dimenzija od traženog magnetnog materijala u zaštitnom prstenu od aluminijuma ili pertinaksa. Oklop magnetnog jezgra štiti magnetno kolo od mehaničkih naprezanja i deformacija. Poznato je da meki magnetni materijali značajno menjaju svoje magnetne karakteristike pod uticajem mehaničkih naprezanja i deformacija. Preko ovog oklopa postavlja se detekcioni namotaj [58]. To je najčešće dvoslojni namotaj od izolovane bakarne žice prečnika od 0,025 mm do 0,1 mm [57]. Prvi je puni sloj ravnomerno namotanih navojaka, a drugi je u vidu korekcionne sekcije za simetriranje detekcionog namotaja. Broj navojaka zavisi od dimenzije jezgra i debljine žice. Namotaj ima obično od 1000 do 5000 navojaka. Preko detekcionog namotaja, koji je prethodno ispitan i simetrian, postavlja se izolacija, a potom i elektrostatički oklop. Konstruktivno, elektrostatički oklop se ostvaruje preko specijalnih provodnih traka koje se motaju oko jezgra ili pomoću odgovarajućih oklopa (košuljice) od bakarnog lima (folije). Zatim dolazi magnetni štit od mekog magnetnog materijala (mumetala). Ovo inače čini i drugi stepen u sistemu magnetnog oklapanja kod strujnog komparatora. Tu su već strana magnetna polja oslabljena, pa ne postoji opasnost od magnetnog zasićenja ovog oklopa. Konstruktivno se izvodi pomoću traka od lima koje formiraju oklop. Sledi još jedan elektrostatički štit, zatim izolacija, pa kompenzacioni namotaj. Za kompenzacioni namotaj se koristi izolovana bakarna žica što je moguće većeg preseka. Ovaj zahtev proizilazi iz težnje da

impedansa ovog namotaja bude što je moguće manja, odnosno da se struja kroz ovaj namotaj ostvaruje pri što nižem naponu. Broj navojaka kompenzacionog namotaja odgovara broju sekundarnih navojaka, tj. ako postoji više sekcija sekundarnog namotaja, onda se i kompenzacioni namotaj izvodi na isti način. Konstruktivno, kompenzacioni namotaj se simetrično raspoređuje duž obima torusa. Preko kompenzacionog namotaja postavlja se izolacija, pa zatim magnetni štit. Ovaj magnetni štit izrađuje se od magnetnih limova za energetske transformatore (npr. hipersil). Njega čini sistem paketa limova poredanih tako da obrazuju magnetni oklop. Paketi limova su namotani u vidu torusa odgovarajućih dimenzija tako da se njihovim slaganjem dobija potpun magnetni oklop oko kompenzacionog namotaja. Limovi se posle motanja termički tretiraju radi poboljšanja magnetnih karakteristika, narušenih usled mehaničke obrade.



Slika 1.2.10. Struktura strujnog komparatora [57]

Dimenzije paketa limova određuju se proračunom magnetnog štita ili proračunom magnetnog jezgra, ako se preko njega prenosi određena električna energija, što je slučaj kod upotrebe strujnog komparatora i kao izvora primarnih struja.

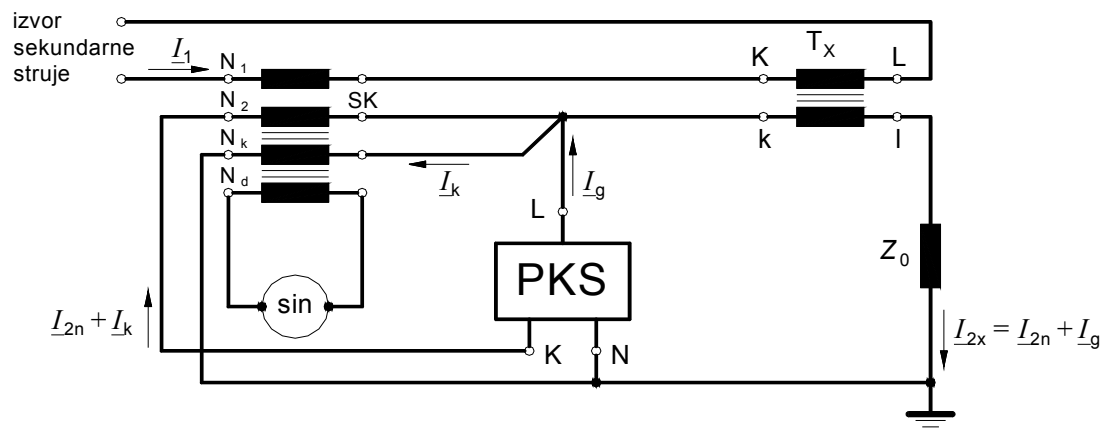
Na kraju se motaju sekundarni i primarni namotaji. Oba su izrađena od izolovanih bakarnih provodnika, pravilno raspoređenih duž obima torusa. Dimenzionisanje provodnika vezano je za dozvoljenu gustinu struje. Broj navojaka se bira prema naznačenoj primarnoj i sekundarnoj struji. Optimalna magnetopobudna sila je između 500 i 3000 ampernavojaka. Najčešće se primarni namotaji za primarne struje veće od 500 A i ne izvode. Oni se u ovom slučaju formiraju provlačenjem jednog ili više navojaka odgovarajućeg preseka kroz otvor torusnog tela komparatora, odnosno kućišta, prilikom povezivanja merne šeme. Od konstruktivnih delova komparatora treba spomenuti i priključne stezaljke (klemme) za izvode primarnog, sekundarnog, kompenzacionog i detekcionog namotaja koji su montirani na kućištu. Strujni komparatori predviđeni za merenje na terenu imaju konstrukciju i kućište prilagođene ovom zahtevu.

Dimenzije i masa strujnog komparatora u direktnoj su vezi sa opsegom naznačenih primarnih struja.

Zbog svojih izvanrednih metroloških karakteristika strujni komparator je našao vrlo široku primenu, posebno u električnim merenjima gde se zahteva visoka tačnost [58].

Sama ideja strujnog komparatora inspirativno je delovala i na merenja u električnim kolima jednosmerne struje. Pokazalo se da je princip primenljiv, uz određene modifikacije u detekcionom sistemu, i za komparaciju jednosmernih struja [22]. Dalji razvoj strujnih komparatora za jednosmernu struju pokazao je njihove nesumnjive prednosti nad klasičnim mernim rešenjima. Mostovi za merenje otpornosti [23, 61], kompenzatori jednosmerne struje [60] i analogni konvertori visoke rezolucije [62] samo su ilustracija iskazane tvrdnje.

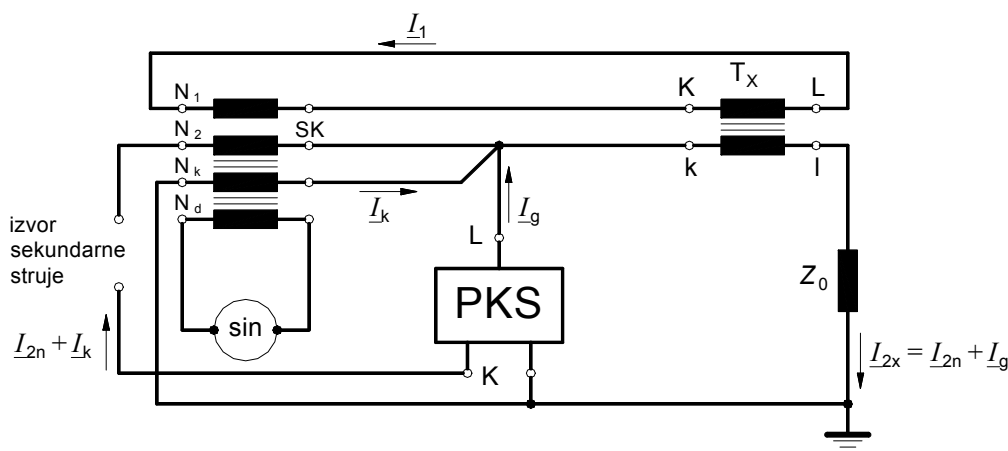
Na slici 1.2.11. data je osnovna šema za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora pomoću strujnog komparatora [58].



Kroz primarni namotaj strujnog komparatora i strujnog mernog transformatora teče primarna struja I_1 . Kroz sekundarni namotaj komparatora teče struja $I_{2N} - I_{2k}$. Struja I_{2N} odgovara idealnoj sekundarnoj struji za naznačeni odnos transformacije k_n strujnog komparatora. Struja I_k je posledica struje magnećenja oklopa strujnog komparatora i kao takva teći će i kroz kompenzacioni namotaj komparatora, kompenzujući grešku nastalu usled struje I_k u sekundarnom namotaju. Tako će napon na krajevima detekcionog namotaja biti nula. To važi samo pod uslovom da je ispitivani transformator idealan, tj. da mu je kompleksna greška $\underline{G} = 0$. Na ovoj ideji zasniva se i princip rada kompenzovanog strujnog komparatora. Drugim rečima, komparator kompenzuje sopstvenu grešku nastalu kao posledica magnećenja magnetnog oklopa. Uz uslov da impedansa kompenzacionog namotaja bude vrlo mala, $Z_k \approx 0$, dobija se potpuna kompenzacija greške strujnog komparatora. Ova činjenica omogućila je korišćenje kompenzovanog strujnog komparatora kao izvora primarne struje kod ispitivanja tačnosti strujnih mernih transformatora. Potrebna električna energija za napajanje ispitivanog transformatora prenosi se preko magnetnog štita, koji preuzima ulogu energetskog transformatora. U tom smislu, kada se komparator projektuje, ovo magnetno kolo treba tako i dimenzionisati. Kompenzovani strujni komparator predstavlja značajanu uštedu u opremi, naročito kad je reč o ispitivanju na terenu, jer se izbegava upotreba strujnog izvora kao neizostavnog elementa ispitnog mernog kola.

U obe šeme na slikama 1.2.11 i 1.2.12 merenje greške svodi se na podešavanje kompleksne struje I_G sve dok se detekcioni napon ne dovede na nulu [58]. Ova struja predstavlja struju greške ispitivanog transformatora. Samo podešavanje ove struje vrši se blokom za podešavanje kompleksne struje, u šemi označenim sa PKS. Problem se svodi na nezavisno podešavanje dve ortogonalne komponente struje. Ova struja je istovremeno direktno proporcionalna sekundarnoj struji I_{2N} . Izraženo matematički:

U tom slučaju g_a i δ predstavljaju parametre šeme koji odgovaraju amplitudnoj, odnosno faznoj greški ispitivanog transformatora.



Slika 1.2.12. Električna šema ispitivanja tačnosti strujnog mernog transformatora pomoću kompenzovanog strujnog komparatora [58]

Kao što je već rečeno, metoda strujnog komparatora ima niz prednosti, već i samim tim što se zasniva na poređenju magnetopobudnih sila. Pri ravnoteži magnetopobudnih sila detekcioni napon strujnog komparatora je jednak nuli, pa se odnos merenih struja svodi na odnos broja navojaka. Ovaj odnos je, za razliku od odnosa otpora, vremenski nepromenljiv i temperaturno neosetljiv.

Kod brižljivo realizovanih strujnih komparatora moguće je ostvariti da amplitudna greška bude u granicama od 10^{-6} do 10^{-7} , a fazna reda 0,01'.

1.2.2 Pregled savremenih mernih metoda i uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora

Primenom savremenih elektronskih rešenja i mikroračunarske tehnike, poslednjih godina značajno su unapređene merne metode i uređaji za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Mogućnosti hardverske i softverske podrške PC nije samo u domenu povećanja efikasnosti ili pouzdanosti rada, već i u povećanju tačnosti merenja. Trend koji je počeo sa primenom mikroprocesora u mernoj instrumentaciji nastavljen je i proširen primenom PC i pojavom "virtuelnih instrumenata". Postoji više definicija ovog termina [63], ali je nesporno da ovaj koncept obezbeđuje viši nivo obrade (procesiranja) mernog signala. Istina, ovde se najviše radi o obradi mernog signala u digitalnom obliku. Prethodno, u samom merilu, mernim spregama i pretvaračima moguća je i obrada mernog signala u analognoj formi. U uređajima za ispitivanje tačnosti mernih transformatora je upravo to slučaj. Diferencijalna ili kompenzaciona merna metoda predstavljaju taj prvi nivo analogne obrade mernih napona ili struja. Razlike između pojedinih rešenja su upravo u načinu dalje elektronske obrade mernih signala.

Opšta je tendencija u elektronici da se obrada mernih signala realizuje u digitalnom obliku. To važi i za uređaje za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, što se moglo videti i iz dosadašnjeg izlaganja. U uređajima za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, razvijenim u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla", kao što su ASK-1 i INST-1 [64, 65], deljenje napona ostvarivano je pomoću analognih delitelja. Već kod uređaja INST-2 [66], deljenje napona je u digitalnom obliku i realizovano je pomoću mikroprocesora. Rad uređaja ASK-2 [67] i INST-2A [68], INST-2C [69], IST-4 [41], podržan je od strane PC, pa je i obrada mernih signala bila saglasna toj činjenici.

Sa PC kao standardnim, pouzdanim, ali i relativno jeftinim hardverom i dodatnim komercijalno raspoloživim elektronskim karticama za analogno i digitalno procesiranje mernih signala, moguće je realizovati po konceptu virtuelnog instrumenta vrlo kompleksne merne uređaje, različite namene i oblasti primene [41]. Svaki od takvih uređaja zahteva odgovarajući, specifičan softver. Time se težina realizacije mernih instrumenata pomerila na stranu izrade softvera [70].

1.2.2.1 Metoda izdvajanja ortogonalnih komponenti napona

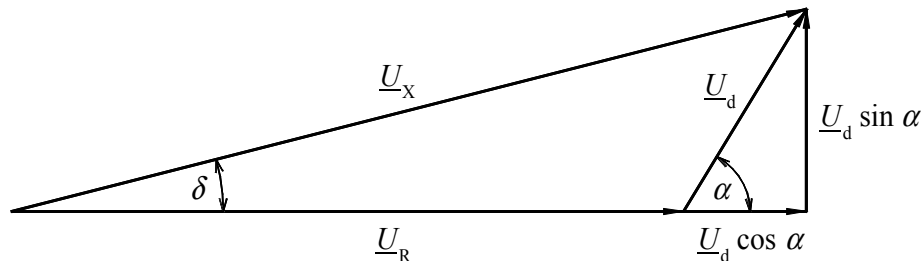
Savremene merne metode i uređaji za ispitivanje tačnosti mernih transformatora uglavnom se zasnivaju na diferencijalnoj metodi i metodi strujnog komparatora. Kod prve, kao početni rezultat dobijaju se dva napona: diferencijalni i referentni, a kod druge, detekcioni i referentni napon. Diferencijalni ili detekcioni napon $\underline{U}_d$ saglasni su sa kompleksnom greškom ispitivanog mernog transformatora. Referentni napon $\underline{U}_R$, kako i sam naziv kaže, odgovara sekundarnom naponu (ili struji) etalon transformatora, odnosno strujnog komparatora. Vektorski dijagram ovih napona prikazan je na slici 1.2.13. Dijagram na slici 1.2.13 je namerno karikiran [58], jer bi se u realnom obliku vektori napona $\underline{U}_R$ i $\underline{U}_x$ praktično poklopili. Jednačine koje opisuju odnose ovih napona i njihovu vezu sa greškama mernog transformatora su:

$$\underline{G} = g + j\delta \quad (1.2.36)$$

$$\underline{G} = \frac{\underline{U}_M - \underline{U}_{ref}}{\underline{U}_{ref}} = \frac{\underline{U}_g}{\underline{U}_{ref}} \quad (1.2.37)$$

$$g_a = \frac{U_g}{U_{ref}} \cos \alpha \quad (1.2.38)$$

$$\delta \cong \operatorname{tg} \delta = \frac{U_g \sin \alpha}{U_{ref} + U_g \cos \alpha} \cong \frac{U_g}{U_{ref}} \sin \alpha \quad (1.2.39)$$



Slika 1.2.13 Vektorski dijagram napona [58]

Jednačine (1.2.38) i (1.2.39) opisuju matematički model metode ortogonalnih komponenti napona u X-Y-Z koordinatnom sistemu, opšte prihvaćenom u shvatanju fizičkog prostora i pojava. To je i u tehničkom smislu najprihvatljiviji izbor, jer postoje razrađene metode i postupci faznog pomeranja napona ili struje za fazni ugao od $\pi/2$ [71, 72].

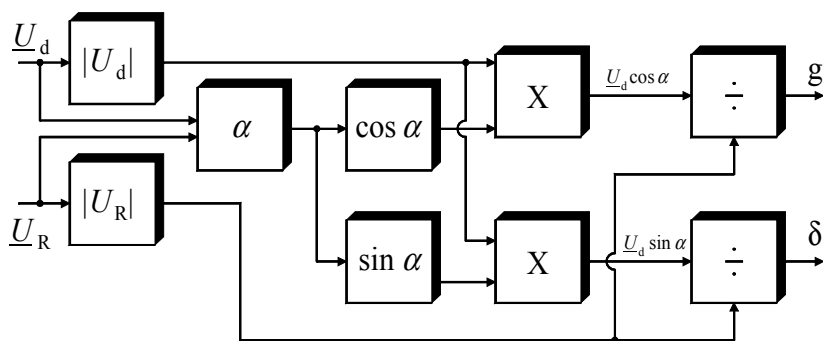
U jednačini (1.2.39) učinjene su dve aproksimacije. Prvo, ugao je zamenjen tangensom tog ugla, i drugo, u zbiru napona ($U_R + U_d \cos \alpha$), zanemarena je komponenta $U_d \cos \alpha$. Maksimalna greška prve aproksimacije je samo $\pm 0,05 \text{ min}$ u opsegu merene fazne greške do $\pm 120 \text{ min}$. Relativna greška usled druge aproksimacije je:

$$g = \frac{\Delta \delta}{\delta} \quad (1.2.40)$$

To znači da je relativna greška u merenju fazne greške, usled navedenog zanemarivanja, na nivou merene amplitudne greške. Kako su kod mernih transformatora amplitudna i fazna greška povezane i definisane za svaku konkretnu klasu tačnosti, to je i ovo zanemarivanje bez praktičnih posledica. U principu, mernim transformatorima koji imaju amplitudne greške reda 2 %, odgovaraju fazne greške reda 100 min, pa su i greške usled navedene aproksimacije na nivou 2 min, što za takve merne transformatore nije od značaja. Kod mernih transformatora više klase tačnosti, na primer klase 0.1, ova greška aproksimacije je na nivou 0,005 min, što je znatno manje od ukupne greške merne metode ili uređaja za ispitivanje tačnosti, tako da ova aproksimacija ne predstavlja problem ni kod najpreciznijih merenja.

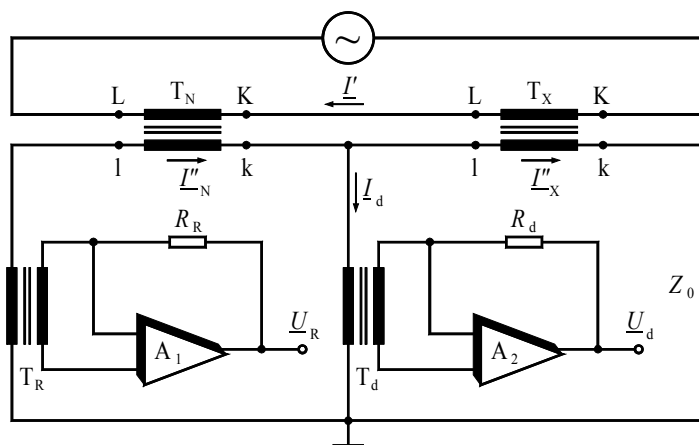
Analiza grešaka merenja ove, ali i svake druge merne metode treba da se sprovede za konkretan strukturni model. Ako bi se matematički model ove merne metode direktno realizovao, dobila bi se struktura prikazana na slici 1.2.14 [58].

Ovaj model tehnički i tehnološki može da se realizuje, ali to sigurno ne bi bilo i optimalno rešenje. U ovoj strukturi nedostaju i neki elementi. Greške mernih transformatora definisane su za osnovni harmonik, što prikazanu strukturu usložnjava za bar još dva filtra propusnika opsega niskih učestanosti. Činjenica da se navedeni naponi mere u vrlo širokom opsegu, posebno diferencijalni napon, podrazumeva promenu pojačanja, odnosno primenu više mernih opsega. Način obrade mernih signala, množenje i deljenje napona, unosi, takođe, značajne greške u merenje, pa je od značaja kako se to u praksi realizuje.



Slika 1.2.14 Strukturni model merne metode ortogonalnih komponenti napona [58]

U praksi postoji više različitih realizacija ove merne metode, koje se razlikuju kako u samoj strukturi, tako i u detaljima i rešenjima pojedinih elektronskih sklopova. Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" razvio je nekoliko tipova mernih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora kao što su: KSK-7 [73], ASK-1[67], INST-1[65], IST-2[74] i INST-2A[68 42], zasnovanih na ovoj mernoj metodi. To je rezultat realnih tehnoloških promena, ali i određenih specifičnih zahteva primene. U početku, šezdesetih godina prošlog veka, preovladavala su rešenja na bazi pasivnih RLC elemenata: rezonantnih RLC filtera, RC mostova za fazno okretanje napona, diodnih faznih ispravljača i sl. [75]. Sedamdesetih godina prošlog veka preovlađuju elektronska rešenja sa integrisanim kolima: aktivni filtri, elektronski pomerači faze, elektronski fazni ispravljači, množači i delitelji [76].



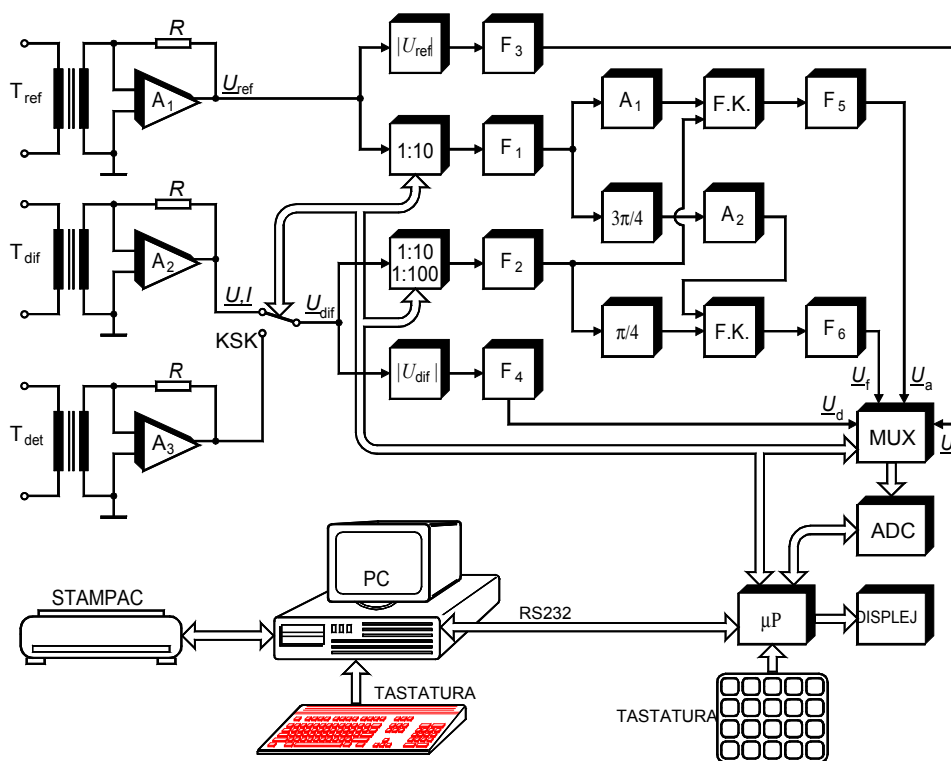
Slika 1.2.15 Električna šema diferencijalne metode za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora [58]

Osamdesetih godina dvadesetog veka napredak se ostvaruje u pravcu digitalnih rešenja obrade mernog signala: A/D konvertori, deljenje u računskom obliku i dr. [77]. Devedesetih godina prošlog veka ova rešenja karakteriše primena mikrop procesora i mikroracunara, odnosno softverskih rešenja za otklanjanje i smanjenje grešaka merenja kao posledice nesavršenosti primenjenog hardvera [78]. Ovde nije samo reč o tehnološkim poboljšanjima, već su značajno unapređene i teorijske osnove na kojima su ta rešenja zasnovana. Analiza, odnosno procena grešaka merenja, sprovodi se za svako konkretno tehničko rešenje. U ovom radu, kao ilustracija metode ortogonalnih komponenta napona, prikazaće se uređaj INST-2A, razvijen u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla" za potrebe laboratorijskog ispitivanja tačnosti

mernih transformatora u Saveznom zavodu za mere i dragocene metale (sada Direkciji za mere i dragocene metale) [68]. I kod ovog uređaja polazi se od diferencijalne metode, kako je to prikazano na slici 1.2.15.

Blok-šema uređaja INST-2A prikazana je na slici 1.2.16. Struktura ovog mernog uređaja sastoji se od: ulaznog prilagodnog dela (strujno-naponskih mernih transformatora), analognog elektronskog dela, digitalnog dela, mikroprocesorskog dela i PC sa standardnim okruženjem. Rad ovog uređaja podržan je personalnim računarom i za ovu svrhu namenski razvijenim softverom. Analogna obrada merenih napona $\underline{U}_{dif}$ i $\underline{U}_{ref}$ obuhvata: automatsko podešavanje pojačanja u dekadnim stupnjevima (1:10 i 1:100), dobijanje apsolutne vrednosti napona ($|\underline{U}_{dif}|$, $|\underline{U}_{ref}|$), filtre propusnike opsega niskih učestanosti (F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , F_5 , F_6), obrtače faze ($\pi/4$, $3\pi/4$), generisanje odgovarajućih četvrtki napona (A_1 , A_2) i fazno regulisano ispravljanje napona (FK) [68].

Kao što se iz ovog kratkog pregleda vidi, značajna obrada mernih signala obavlja se u analognom obliku. Tačnost merenja ovim uređajem u velikoj meri zavisi od primenjenih rešenja pojedinih elektronskih sklopova. Zato će pojedini sklopovi biti detaljnije razmatrani.



Slika 1.2.16 Strukturni model merne metode ortogonalnih komponenti napona [58]

Filtri F_1 i F_2 , koji služe za izdvajanje osnovnih harmonika napona $\underline{U}_{dif}$ i $\underline{U}_{ref}$, realizovani su kao šestopolni niskopropusni filtri tipa *Butterworth*, granične učestanosti 70 Hz. Pored značajnog slabljenja viših harmonika, što je vrlo važno za diferencijalni napon kod ispitivanja strujnih transformatora, gde izobličenja diferencijalnog napona idu i do 20 %, potrebna je identičnost frekvencijskih karakteristika ova dva filtra, posebno u pogledu faznog pomeraja osnovnog harmonika. Ostali filtri realizovani su kao dvopolni filtri propusnici opsega niskih učestanosti granične učestanosti oko 5 Hz.

Za fazno izdvajanje komponenti napona, $U_a = U_{\text{dif}} \cos \alpha$ i $U_f = U_{\text{dif}} \sin \alpha$, primenjeno je jedno originalno rešenje u kome se neophodni fazni pomak od $\pi/2$ između upravljačkih napona fazno regulisanih ispravljača ostvaruje kao razlika faznog pomaka referentnog napona $\underline{U}_{\text{ref}}$ za $3\pi/4$ i diferencijalnog $\underline{U}_{\text{dif}}$ za $\pi/4$ [68].

Dalja obrada mernih signala obavlja se u digitalnom obliku. Prethodno se izvrši konverzija analognih napona U_a , U_f , U_d , U_R u odgovarajuće digitalne (brojčane) vrednosti. To se postiže pomoću jednog analognog multipleksera (MUX) i jednog 12-bitnog analogno-digitalnog konvertora (ADC). Mikroprocesor (μP) kontroliše i upravlja celokupnim procesom merenja: ostvaruje automatsku promenu opsega merenja i pojačanja, izvršava aritmetičko-logičke operacije i u prikladnom obliku na odgovarajućem displeju prikazuje rezultate merenja.

Merni uređaj povezan je preko serijskog interfejsa RS232 sa personalnim računarom (PC), a namenski razvijeni softver obezbeđuje jedan viši nivo obrade rezultata merenja, akvizicije, arhiviranja i štampanja ispitnog lista.

Zahvaljujući primenjenim hardverskim i softverskim rešenjima, realizovani uređaj ima sledeće merno-tehničke karakteristike [68]:

- omogućava ispitivanje tačnosti strujnih i naponskih mernih transformatora,
- omogućava merenje strujnih i naponskih opterećenja,
- naznačeni naponi su: $100/\sqrt{3}$ V, $110/\sqrt{3}$ V, $120/\sqrt{3}$ V, $200/\sqrt{3}$ V, 100 V, 110 V, 120 V,
- naznačene struje su: 1 A i 5 A,
- naznačena učestanost je 50 Hz,
- opsezi merenja amplitudne greške su: $\pm 0,2 \%$ i $\pm 2 \%$,
- opsezi merenja fazne greške su: $\pm 10'$ i $\pm 100'$,
- rezolucija merenja amplitudne greške je 0,0001 %,
- rezolucija merenja fazne greške je $0,001'$
- greška merenja amplitudne greške je: $\pm 0,1 \%$ od merene vrednosti i $\pm 0,002 \%$
- greška merenja fazne greške je: $\pm 0,1 \%$ od merene vrednosti i $\pm 0,01'$,
- greška u merenju opterećenja je: $\pm 0,5 \%$ od merene vrednosti i ± 5 digita,
- napajanje je mrežnim naponom 220 V $\pm 10 \%$, 50 Hz,
- temperaturni opseg primene je od 18 °C do 28 °C.

Realizovani uređaj INST-2A spada u savremene merne uređaje za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Ovakva ocena data je kako zbog visokih metroloških karakteristika, tako i zbog primenjenih tehničkih i tehnoloških rešenja. Uređaj je korišćen u realizaciji i eksperimentalnoj verifikaciji jednovremene uporedne metode etaloniranja.

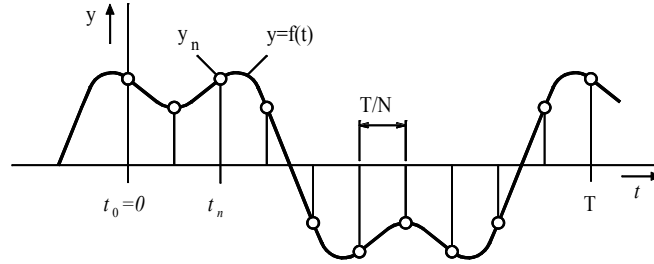
1.2.2.2 Metoda diskretne Furijeove transformacije

Primena merne metode diskretne Furijeove transformacije za ispitivanje tačnosti mernih transformatora potiče iz laboratorije za merne transformatore Nacionalnog metrološkog instituta Nemačke, PTB, koji u oblasti metrologije ima tradiciju još iz daleke 1877 godine [79]. Istorijski gledano, u ovoj laboratoriji razvijeno je nekoliko značajnih mernih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, poznatih kao: Šering-Albertijev [48], Holeov [53] i Kelerov kompenzator [80]. Stručnjaci PTB značajno su doprineli razvoju mernih metoda i merne tehnike u oblasti mernih transformatora. Kao rezultat novijih istraživanja u PTB je i metoda diskretne Furijeove transformacije, primenjena prvo za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora [81], a kasnije i za ispitivanje naponskih mernih transformatora [82].

Metoda diskretne Furijeove transformacije za ispitivanje tačnosti mernih transformatora u osnovi je takođe diferencijalna. Polazni parametri za ovu mernu metodu su

diferencijalni napon $\underline{U}_d$ i referentni napon $\underline{U}_R$. Novina koju daje ova metoda je u načinu obrade ovih mernih napona.

Metoda Furijeove transformacije je od ranije poznata metoda digitalnog procesiranja signala, koja je tek primenom mikroračunara doživele punu afirmaciju. Osnovne teorijske postavke Furijeove transformacije date su u odnosu na periodičan signal $y(t)$, diskretizovan u N tačaka, sa korakom diskretizacije T/N , kao što je to prikazano na slici 1.2.17 [83].



Slika 1.2.17 Diskretizacija periodičnog signala $y(t)$ [83]

Funkcija $y(t)$ aproksimirana Furijeovim redom je:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^k a_k \cos(k\omega_0 t) + \sum_1^k b_k \sin(k\omega_0 t) \quad (1.2.41)$$

Matematički gledano, razvijanje neke funkcije u red je određivanje koeficijenata toga reda (a_0 , a_k , b_k). Za razvijanje neke funkcije u red do k -tog harmonika potrebno je $(k+1)$ nezavisnih jednačina. Za periodični signal $y_n(t_n)$ diskretizovan u N segmenata u okviru periode T, vrednosti koeficijenata Furijeovog reda izračunavaju se prema jednačinama:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_n(t_n) \cos(k\omega_0 t_n) \quad \text{za } k = 0, 1, \dots, K \quad (1.2.42)$$

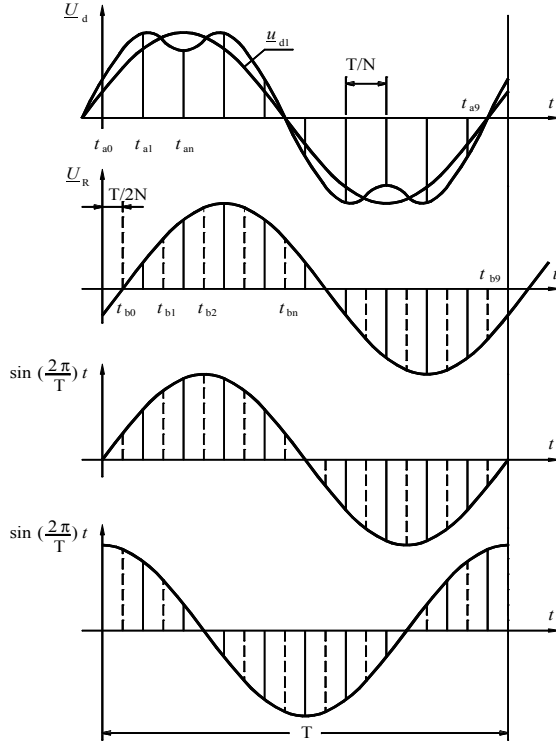
$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_n(t_n) \sin(k\omega_0 t_n) \quad \text{za } k = 0, 1, \dots, K \quad (1.2.43)$$

Za ispitivanje tačnosti mernih transformatora od interesa je samo osnovni harmonik tj.

$$y_1 = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) = C_1 \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.2.44)$$

gde su: $C_1 = \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)}$, a ugao $\varphi = \arctg(b_1 / a_1)$

Na isti način u Furijeov red mogu se razložiti i merni naponi $\underline{U}_d$ i $\underline{U}_R$. Diskretizacija ovih napona prikazana je grafički na slici 1.2.18.



Slika 1.2.18 Diskretizacija merenih napona $\underline{U}_d$ i $\underline{U}_R$ [83]

Koeficijenti za osnovni harmonik diferencijalnog napona U_{d1} prema jednačinama (1.2.42) i (1.2.43) su:

$$a_{d1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_d(t_{an}) \cos(2\pi\omega_0 t_{an} / T) \quad (1.2.45)$$

$$b_{d1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_d(t_{an}) \sin(2\pi\omega_0 t_{an} / T) \quad (1.2.46)$$

odnosno za osnovni harmonik referentnog napona U_{R1} :

$$a_{R1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_R(t_{bn}) \cos(2\pi\omega_0 t_{bn} / T) \quad (1.2.47)$$

$$b_{R1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_R(t_{bn}) \sin(2\pi\omega_0 t_{bn} / T) \quad (1.2.48)$$

Pomoću ovih koeficijenata mogu se izraziti osnovni harmonici merenih napona kao kompleksne veličine:

$$U_{d1} = b_{d1} + ja_{d1} \quad (1.2.49)$$

$$U_{R1} = b_{R1} + ja_{R1} \quad (1.2.50)$$

Na osnovu gornjih jednačina kao i poznatih izraza za amplitudnu i faznu grešku kod diferencijalne metode, moguće je odrediti amplitudnu i faznu grešku ispitivanog transformatora:

$$g = \operatorname{Re}\left[\frac{U_{d1}}{U_{R1}}\right] + g_N = \frac{b_{d1}b_{R1} + a_{d1}a_{R1}}{b_{d1}^2 + a_{d1}^2} + g_N \quad (1.2.51)$$

$$\delta = \operatorname{Im}\left[\frac{U_{d1}}{U_{R1}}\right] + \delta_N = \frac{a_{d1}b_{R1} - b_{d1}a_{R1}}{b_{d1}^2 + a_{d1}^2} + \delta_N \quad (1.2.52)$$

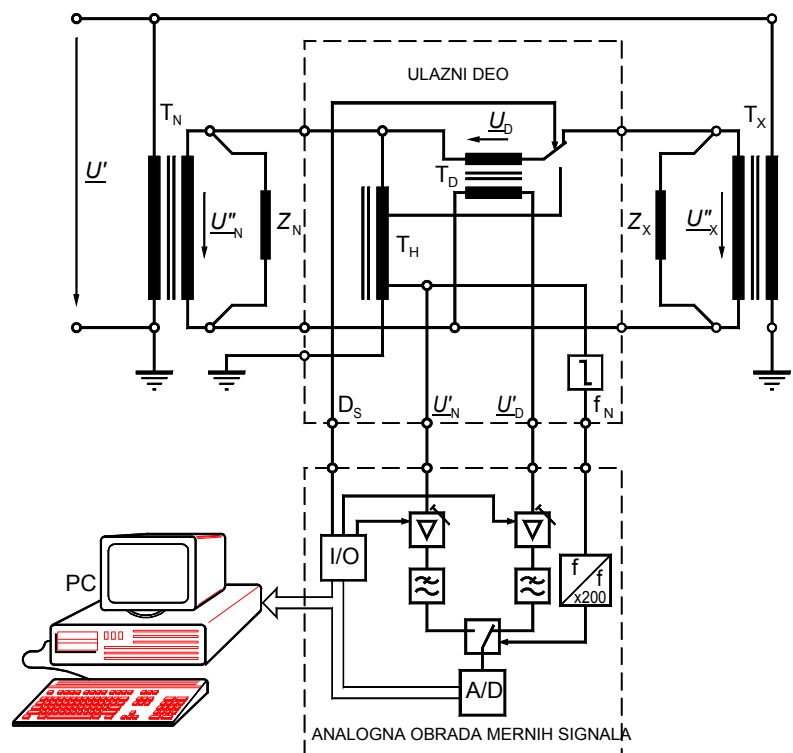
Prema jednačinama (1.2.51) i (1.2.52) za izračunavanje greške ispitivanog transformatora i jednačina (1.2.45), (1.2.46), (1.2.47) i (1.2.48), na osnovu kojih se računaju koeficijenti diskretne Furijeove transformacije napona $\underline{U}_d$ i $\underline{U}_R$, može se steći utisak o složenosti matematičkog modela ove merne metode. Međutim, ako se pogleda hardverska struktura uređaja za ispitivanje tačnosti naponskih mernih transformatora zasnovanog na ovoj mernoj metodi, a koja je prikazana na slici 1.2.19, vidi se da je ona znatno jednostavnija od strukture uređaja INST-2A datog na slici 1.2.16.

Matematička obrada mernih signala kod ove metode jeste složenija, ali se realizuje u digitalnom obliku i podržana je od strane PC. Analogna obrada mernih signala je samo na nivou mernih transformatora T_d , T_R , ulaznih pojačavača i filtera. Mereni naponi $\underline{U}_d$ i $\underline{U}_R$ se galvanski izoluju od napajanja, pojačavaju i filtriraju, pre nego što se pomoću multipleksera (MUX) dovedu na A/D konvertor. Sa A/D konvertora ovi, sada digitalni signali, se dalje obrađuju u PC. Očigledno je da je kod ove metode težište na softverskim rešenjima, što je i generalni trend savremene merne instrumentacije.

Na osnovu merne metode diskretne Furijeove transformacije, primenjenog hardvera i razvijenog softvera, stručnjaci PTB realizovali su merni uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora visokih metroloških karakteristika, čija je šema prikazana na slici [83]:

- opsezi merenja amplitudne greške su $\pm 0,2 \%$ i $\pm 2 \%$,
- opsezi merenja fazne greške su $\pm 0,2 \text{ crad}$ i $\pm 2 \text{ crad}$,
- maksimalna rezolucija merenja greške je 0,000001 %.

Greška merenja amplitudne i fazne greške uređaja je $\pm 0,5 \%$ od merne vrednosti greške i $\pm 0,05 \%$ od mernog opsega, bez greške etalon transformatora. Uređaj omogućava merenje amplitudne i fazne greške u celom opsegu referentnog napona ili struje, od 1% do 200%.



Slika 1.2.19 Struktura PTB uređaja za ispitivanje tačnosti naponskih transformatora [83]

1.2.2.3 Virtualni merni uređaji

Razvoj mernih metoda i uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, istorijski gledano, u metrološkom smislu pratio je kako sam razvoj tehnologije izrade mernih transformatora, tako i stanje tehnike i tehnologije u svetu. U proteklih sto godina tačnost merenja greške mernih transformatora poboljšana više od sto puta [84], što se slaže i sa napretkom koji je ostvaren u tačnosti mernih transformatora. U tehničkom smislu to je put od kompleksnih kompenzatora sa vibracionim galvanometrom i ručnim uravnotežavanjem do savremenih elektronskih uređaja sa automatskim merenjem i samokalibracijom, tehnološki zasnovanim na mikroelektronici [85]. Uređaji za ispitivanje tačnosti mernih transformatora uglavnom su sledili aktuelne trendove u razvoju merne instrumentacije, koja je prolazila kroz različite faze, poznate kao: analogni, digitalni, mikroprocesorski i inteligentni instrumenti. Sadašnja faza označava se kao virtuelni instrumenti.

U Elektrotehničkom institutu “Nikola Tesla” (u daljem tekstu Institut) razvijeno je nekoliko virtuelnih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, koji se zasnivaju na PC i određenim specifičnim mernim instrumentima.

Jedan od ovakvih uređaja razvijen je u Institutu pre svega za potrebe ispitivanja tačnosti mernih transformatora nestandardnog odnosa transformacije. Ispitivanje tačnosti ovih transformatora predstavlja problem iz najmanje dva razloga: problem odgovarajućih etalon transformatora i problem jednog univerzalnog kompleksnog kompenzatora. U Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla" navedeni problemi rešavani su odvojeno. Zahvaljujući iskustvu stečenom u izradi strujnog komparatora, kao i primeni elektronske kompenzacije greške [73], realizovan je specifičan strujni etalon transformator za primarne struje do 3000 A [86], visokih metroloških karakteristika:

- opseg primarnih struja je od 1 A do 3000 A,
- opseg sekundarnih struja je od 0,1 A do 5 A,
- naznačeno opterećenje je 5 VA,
- strujna greška je manja od $\pm 0,005 \%$ i fazna greška je manja od $\pm 0,2$ min u opsegu struja od 1 % do 200 % naznačene struje.

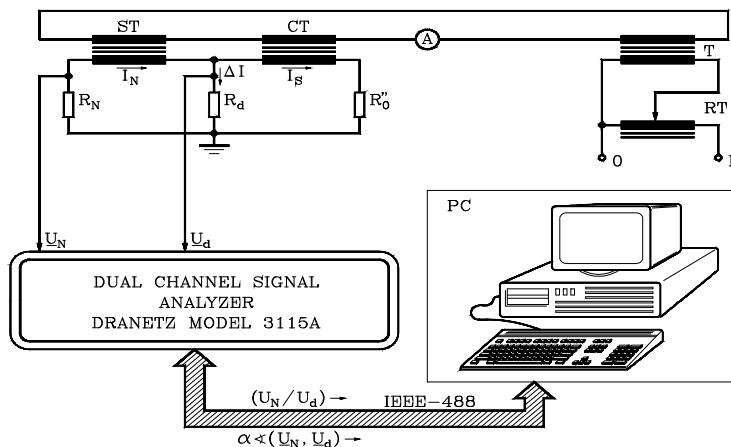
Specifičnost ovog rešenja je u činjenici da se sekundarni broj navojaka može birati u opsegu do 3000 navojaka sa rezolucijom od jednog navojka. To omogućava primenu ovog etalona ne samo za standardni niz primarnih i sekundarnih struja, već i za sasvim nestandardne odnose transformacije.

Na ovaj način rešen je problem strujnog etalon transformatora kod ispitivanja po diferencijalnoj metodi. Problem odgovarajućeg mernog uređaja koji bi mogao da meri strujnu i faznu grešku u širokom opsegu primarnih i sekundarnih struja rešavan je po konceptu virtuelne instrumentacije.

U konkretnom primeru ispitivanja tačnosti strujnih transformatora nestandardnog odnosa transformacije primenjena je realativno jednostavna hardveska struktura, prikazana na slici 1.2.20.

I u ovom slučaju radi se o diferencijalnoj mernoj metodi, sa etalon strujnim transformatorom sa elektronskom kompenzacijom greške. Novina je u načinu obrade relevantnih merenih napona $\underline{U}_N$ i $\underline{U}_d$. Ovi naponi se mere pomoću dvokanalnog mrežnog analizatora, proizvodnje "Dranetz", tip 3115A. Tačnije rečeno, meri se odnos osnovnih harmonika ova dva napona i njihov fazni stav. Na bazi ovih podataka, prema odgovarajućem algoritmu, PC izračunava strujnu i faznu grešku i prikazuje ih na ekranu u okviru grafički programirane maske. Analiza grešaka, kao i eksperimentalna provera, pokazale su da se na ovaj način može ispitivati tačnost mernih transformatora nestandardnog odnosa transformacije sa greškom koja nije veća od greške standardnih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora [86].

Iskustvo stečeno u razvoju ovog virtuelnog instrumenta, a pre svega mogućnost primene složenijih nelinearnih matematičkih modela, doveli su do razvoja jednog originalnog rešenja merenja greške mernih transformatora metodom dvofazne konverzije [87]. I ova merna metoda, kao osnovni kvalitet, ima mogućnost ispitivanja tačnosti mernih transformatora nestandardnog odnosa transformacije. Isticanje ovog problema (nestandardni odnos transformacije) je u skladu sa narastajućim potrebama i promenama koje se dešavaju u oblasti mernih transformatora [86].



Slika 1.2.20 Blok šema hardvera za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora [87]

Drugi virtuelni merni instrument razvijen u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla" zasniiva se na metodi dvofazne konverzije. Metoda dvofazne konverzije zasniiva se na diferencijalnoj metodi za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, kao i merenju dva fazna ugla između tri relevantna merena napona [87].

Kod metode dvofazne konverzije diferencijalna šema za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora pretrpela je neznatne izmene, koje se ogledaju u dodavanju još jednog šanta u sekundarnom kolu etalon transformatora, kako je to prikazano na slici 1.2.21 [83].

Kod diferencijalne metode sekundarna struja (ili napon) ispitivanog T_X i etalon transformatora T_N su približno iste vrednosti, a njihov međufazni ugao δ je reda jednog stepena. Na vektorskom dijagramu napona i struja datom na slici 1.2.22, svesno je ovaj ugao karikiran, jer bi u suprotnom dijagram bio nerazumljiv. Naponi U_R i U_d , na otporima R_N i R_d , dovedeni su na približno isti nivo amplituda, zahvaljući izabranom odnosu otpornosti ($r = R_d / R_N$), koji je realno oko 100, za amplitudnu grešku reda 1 %.

Prema vektorskom dijagramu na slici 1.2.22, mogu se postaviti sledeće matematičke relacije [83]:

$$\Delta BCD \Rightarrow \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_d \sin \alpha}{U_d \cos \alpha} = \frac{\frac{\Delta I}{I_R} \sin \alpha}{\frac{\Delta I}{I_R} \cos \alpha} = \frac{g_f}{g_a} \quad (1.2.53)$$

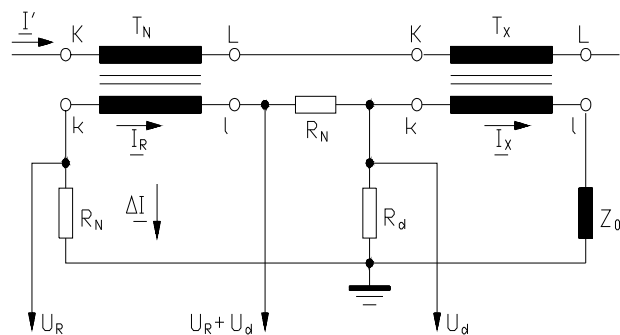
$$\Delta ACD \Rightarrow \operatorname{tg} \beta = \frac{U_d \sin \alpha}{U_R + U_d \cos \alpha} = \frac{\frac{\Delta I}{I_R} \sin \alpha}{\frac{R_N}{R_d} + \frac{\Delta I}{I_R} \cos \alpha} = \frac{g_f}{\frac{1}{r} + g_a} \quad (1.2.54)$$

$$g_a = \frac{\operatorname{tg} \beta}{r(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)} \quad (1.2.55)$$

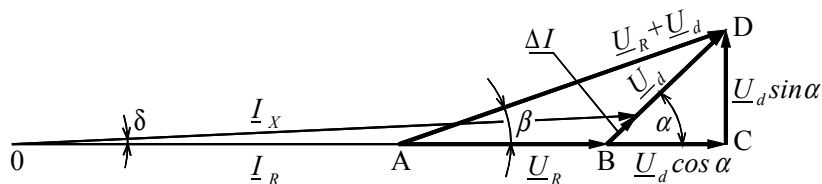
$$g_f = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}{r(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)} \quad (1.2.56)$$

Analiza jednačina (1.2.55) i (1.2.56) pokazuje da su:

- amplitudna i fazna greška izražene kao funkcija dva merena ugla α i β i izabranog parametra šeme r ;
- merni ugao može imati sve vrednosti u intervalu od 0 do 2π , dok ugao β zavisi od odnosa otpora r i može se ograničiti samo na segment $[\pi/2, -\pi/2]$;
- trigonometrijske funkcije (1.2.55) i (1.2.56) su neprekidne osim u slučaju kada su α i β jednaki 0 ili π , a tada je fazna greška ispitivanog transformatora jednaka nuli; u slučaju kada je $\alpha = \pi/2$ ili $\alpha = 3\pi/2$, greške su $g_a = 0$ i $g_f = \pm \operatorname{tg} \beta / r$.

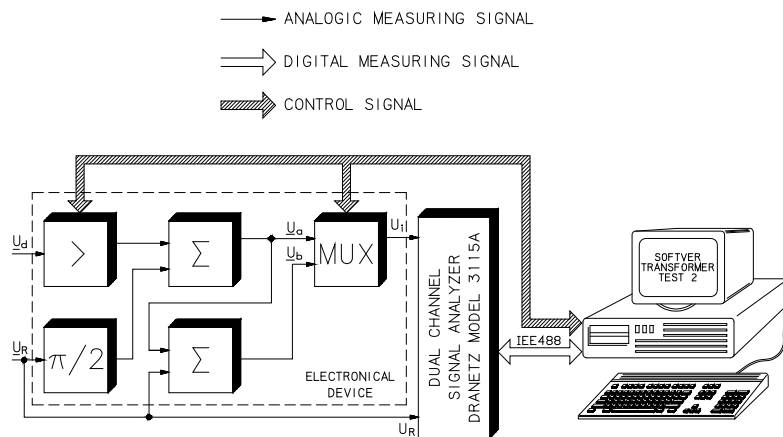


Slika 1.2.21 Električna šema modifikovane diferencijalne metode [83]



Slika 1.2.22 Vektorski dijagram struja i napona kod metode dvofazne konverzije [83]

Eksperimentalna provera izloženog matematičkog modela ostvarena je ispitivanjem jednog strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 200 A / 5 A, pomoću virtuelnog instrumenta prikazanog na slici 1.2.23 [83].



Slika 1.2.23 Strukturna šema instrumenta za ispitivanje tačnosti mernih transformatora po metodi dvofazne konverzije [83]

Strukturu ovog instrumenta čine postojeći dvokanalni mrežni analizator koji služi za merenje faznih uglova, PC i elektronski deo koji sadrži sledeće elektronske sklopove: pojačavač, dva sabirača, kolo za okretanje faze za $\pi/2$ i multiplekser [83]. Ulazni naponi $\underline{U}_R$ i $\underline{U}_d$ su u elektronskom delu podvrgnuti relativno jednostavnoj analognoj obradi i kao takvi dovode se

preko multipleksa na dvokanalni mrežni analizator. PC upravlja radom elektronskog dela i mrežnog analizatora po datom programu, razvijenom pomoću softverskog paketa "LabVIEW". Namenski razvijeni softver omogućava simulacije u punom opsegu ulaznih veličina, ima mogućnost analize grešaka merenja, omogućava kalibraciju instrumenta i korekciju rezultata merenja, vrši obradu rezultata merenja po zadatom matematičkom modelu i vizuelnu prezentaciju rezultata merenja, arhiviranje i štampanje ispitnog protokola.

Merenje faznih uglova $\alpha = \angle(\underline{U}_d, \underline{U}_R)$ i $\beta = \angle(\underline{U}_R + \underline{U}_d)$ realizovano je pomoću mrežnog analizatora proizvođača "Dranetz", tip 3150. Ovaj instrument omogućava merenje ugla u širokom opsegu napona od 1 mV do 300 V, sa greškom manjom od $0,03^\circ$. Greška u merenju ugla, kako sprovedene analize pokazuju, preslikava se na merenje grešaka ispitivanog transformatora i umanjena je za najmanje dva reda veličine, tj. za vrednost odnosa r . To praktično znači da je merna nesigurnost metode manja od 10^{-5} za amplitudnu grešku, odnosno $10 \mu\text{rad}$ za faznu grešku. Tako se pokazuje da prednost diferencijalne metode, koja važi za merenje malih razlika modula merenih napona, važi i za merenje malih faznih uglova. Analiza grešaka pokazuje da ova metoda obezbeđuje visoku tačnost merenja, koja je zasnovana na diferencijalnoj metodi i tačnom merenju ugla. Činjenica da se mere fazni uglovi u širokom opsegu ulaznih napona ukazuje da je metoda posebno pogodna za ispitivanje tačnosti mernih transformatora nestandardnog odnosa transformacije.

Treći virtuelni uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora razvijen u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla" zasnovan je na diskretnoj Furijeovoj transformaciji (DFT) [88, 89]. Uređaj je realizovan sa standardnim hardverom (digitalnim osciloskopom i PC) i namenski razvijenim softverom. Pokazalo se da je metoda DFT pogodna za primenu kod virtuelnih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Umesto namenskog hardvera za akviziciju mernih signala moguće je primeniti i dvokanalni digitalni osciloskop sa serijskim interfejsom RS-232, koji omogućava povezivanje osciloskopa sa PC. Jednostavna realizacija diferencijalne metode sa etalon transformatorom i dva strujna šanta omogućava da se referentna i diferencijalna struja konvertuju u dva odgovarajuća naponska signala pogodna za snimanje pomoću digitalnog osciloskopa [83].

Strukturni model takvog virtuelnog uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora na bazi metode DFT prikazan je na slici 1.2.24. Primenjena diferencijalna merna metoda podrazumeva da su etalon transformator T_N i ispitivani strujni transformator T_X istog odnosa transformacije n_N . Referentni napon u_N je u saglasnosti sa sekundarnom strujom etalon transformatora i''_N . Diferencijalni napon u_d je u saglasnosti sa diferencijalnom strujom i_d , odnosno sa kompleksnom greškom ispitivanog transformatora T_X . Jednačine koje opisuju zavisnost amplitudne greške g i fazne greške δ ispitivanog strujnog transformatora T_X su:

$$g \equiv \frac{I_{d1}}{I_{N1}} \cdot \cos \varphi \cdot 100 = \frac{U_{d1}}{U_{N1}} \cdot \frac{R_N}{R_d} \cdot \cos \varphi \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.2.57)$$

$$\delta \equiv \frac{I_{d1}}{I_{N1}} \cdot \sin \varphi \cdot 100 = \frac{U_{d1}}{U_{N1}} \cdot \frac{R_N}{R_d} \cdot \sin \varphi \cdot 3440 \quad [^\circ] \quad (1.2.58)$$

Svaka neprekidna periodična funkcija $f(t)$ može se transformisati u tzv. Furijeov red, dat izrazom:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^k a_k \cos(k\omega_1 t) + \sum_1^k b_k \sin(k\omega_1 t) \quad (1.2.59)$$

gde su: a_k i b_k odgovarajući koeficijenti Furijeovog reda.

Kao što je moguće harmonijsku funkciju predstaviti Furijeovim redom, moguće je izračunati i koeficijente Furijeovog reda za diskretizovanu periodičnu funkciju. U principu, svi digitalni osciloskopi diskretizuju merne signale koje zatim memorišu u digitalnoj formi. Kvalitet, odnosno tačnost zapisa mernog signala, zavisi od stepena diskretizacije, tj od broja odbiraka N u toku jedne periode. U konkretnom slučaju primenjenog osciloskopa "Fluke", tip 97, broj odbiraka je bio 512.

Na osnovu diskretizovanih vrednosti oba signala izračunavaju se vrednosti koeficijenata Furijeovog reda. Takav postupak označava diskretnu Furijeovu transformaciju periodičnog signala. Po definiciji, amplitudna i fazna greška ispitivanog transformatora definisane su samo za osnovni harmonik napona, pa su tako od značaja upravo samo koeficijenti za prvi harmonik napona.

Naponi u_{d1} i u_{r1} definisani su preko odgovarajućih koeficijenata dobijenih na bazi DFT, a prema jednačinama (1.2.49) i (1.2.50). Na osnovu ovih napona može se izraziti amplitudna g_x i fazna greška δ_x ispitivanog transformatora T_x :

$$g_x = \frac{b_{d1}b_{N1} + a_{d1}a_{N1}}{a_{N1}^2 + b_{N1}^2} \cdot \frac{R_N}{R_d} \cdot 100 + g_N \quad (1.2.60)$$

$$\delta_x = \frac{a_{d1}b_{N1} - b_{d1}a_{N1}}{a_{N1}^2 + b_{N1}^2} \cdot \frac{R_N}{R_d} \cdot 3440 + \delta_N \quad (1.2.61)$$

Jednačine (1.2.60) i (1.2.61), za amplitudnu g_x i faznu grešku δ_x , na osnovu koeficijenata dobijenih pomoću DFT i parametara diferencijalne metode (R_N , R_d , g_N i δ) predstavljaju matematički model, koji se softverski implementira u PC.

Koncept virtuelnog instrumenta podrazumeva standardni hardver i namenski razvijeni softver. U strukturi ovog virtuelnog uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora sadržani su upravo takvi elementi: etalon transformator, strujni šantovi, dvokanalni digitalni osciloskop i PC, koje praktično poseduje svaka laboratorija koja se bavi ovakvim ili sličnim merenjima. Ovo su ujedno i prednosti, jer nije neophodno posedovati namenski razvijeni merni instrument za ispitivanje tačnosti mernih transformatora.

Namenski softver za virtuelne instrumente zasniva se najčešće na objektnom programiranju.

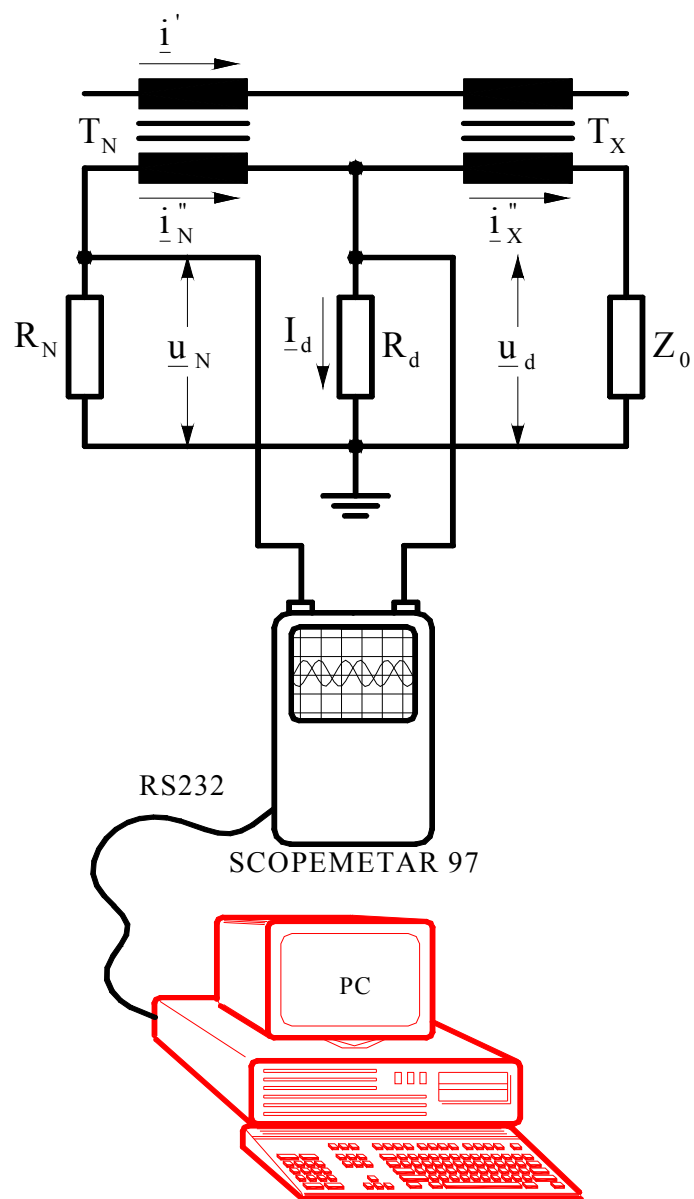
U konkretnom slučaju naponi u_N i u_d snimaju se pomoću dvokanalnog digitalnog osciloskopa, a preko serijskog interfejsa RS-232 dostavljaju se PC za dalju digitalnu obradu. Metodom DFT određuju se osnovni harmonici napona U_{In} i U_{Id} kao i njihov fazni stav. Na osnovu ovih podataka, a prema razvijenom softveru, izračunavaju se amplitudna i fazna greška ispitivanog transformatora.

Realizovani virtuelni uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora ima sledeće metrološke karakteristike:

- greška merenja amplitudne greške manja je od $\pm 1 \%$ od merene vrednosti greške i $\pm 0,02 \%$.
- greška merenja fazne greške manja je od $\pm 1 \%$ od merene vrednosti greške i $\pm 2'$.

Realizovani virtuelni uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora zasnovan na DFT, standardnom hardveru i namenski razvijenom softveru ima određene prednosti u odnosu na slične klasične uređaje za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Ove prednosti se pre svega ogledaju u ceni, ali i u vremenu potrebnom za realizaciju ovakvog uređaja.

Rezultati eksperimentalne provere, kao i sprovedena analiza grešaka, potvrdili su dobre metrološke karakteristike virtuelnog uređaja, koje ne zaostaju za karakteristikama klasičnih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora.



Slika 1.2.24 Strukturni model virtuelnog uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora [83]

2. JEDNOVREMENA UPOREDNA METODA ETALONIRANJA STRUJNIH MERNIH TRANSFORMATORA

U prethodnim poglavljima opisane su metode za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora. Većina prethodno prikazanih metoda koristi se i za ispitivanje i etaloniranje strujnih mernih transformatora i za etaloniranje etalon strujnih transformatora.

Prema definiciji, etaloniranje je skup postupaka kojima se, u određenim uslovima, uspostavlja odnos između vrednosti veličina koje pokazuje merilo, ili merni sistem, ili vrednosti koje predstavlja materijalizovana mera ili referentni materijal, i odgovarajućih vrednosti ostvarenih etalonima [90].

Treba naglasiti da i ispitivanje tačnosti i etaloniranje podrazumevaju identičan postupak merenja amplitudne i fazne greške strujnog mernog transformatora, jer se u oba postupka ispitivani transformator upoređuje sa referentnim etalom.

Terminološki, ispitivanje tačnosti vezuje se za sam proizvodni proces strujnih mernih transformatora i postupak koji se sprovodi u laboratorijama za kontrolu kvaliteta kod proizvođača. U njima se u cilju postizanja odgovarajuće klase tačnosti amplitudna i fazna greška u toku proizvodnje kontrolišu merenjem, nekoliko puta. Najznačajnija kontrola je tzv. finalna kontrola u okviru komadnog ispitivanja svakog transformatora pojedinačno. Ovim merenjem utvrđuju se amplitudna i fazna greška proizvedenog transformatora i definitivno deklariraju njegova klasa tačnosti. Od posebnog je značaja ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora koji su u pogonu u funkciji obračunskog merenja električne energije. Zakonska metrologija tretira ovu funkciju mernih transformatora kroz obavezni prvi pregled, pre njihovog stavljanja u upotrebu u okviru obračunskih mernih grupa [91, 92]. Ispitivanje tačnosti vrši se i povremeno kod transformatora u pogonu, a posebno kada se sumnja u njihov ispravan rad [93, 94, 95]. I pri prvom pregledu, i pri povremenoj planskoj i neplanskoj kontroli, ispitivanjem tačnosti proverava se, ustvari, usaglašenost sa deklarisanom klasom tačnosti [7, 9].

Postupak etaloniranja vezuje se za nacionalne i akreditovane laboratorije koje su u hijerarhijskom poretku nacionalne i zakonske metrologije iznad laboratorija proizvođača. Njihov prevashodni zadatak je etaloniranje radnih i referentnih etalon strujnih transformatora [96, 97].

Etaloniranje merne opreme za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora zavisi kako od merne metode na čijem principu ti merni uređaji rade, tako i od tehničke i tehnološke realizacije mernih uređaja.

Dve metode, koje su u savremenim laboratorijama i mernim sistemima za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora najzastupljenije, su diferencijalna metoda i metoda strujnog komparatora.

Svaka od mernih metoda za određivanje grešaka strujnih mernih transformatora podrazumeva postojanje mernog sistema koga čini grupa mernih instrumenata i uređaja. U opštem smislu ovaj merni sistem obuhvata: etalon strujni transformator, merni uređaj za određivanje grešaka, referentno opterećenje i strujni izvor. U slučaju diferencijalne merne metode merni sistem čine: strujni etalon transformator, uređaj za merenje amplitudne (strujne) i fazne (ugaone) greške, etalonsko opterećenje i regulisani izvor primarnih struja. Kod metode kompenzovanog strujnog komparatora strukturu mernog sistema čine: kompenzovani strujni komparator, uređaj za merenje amplitudne (strujne) i fazne (ugaone) greške i etalonsko opterećenje. Specifičnost kompenzovanog strujnog komparatora je u tome što on istovremeno ima ulogu etalon transformatora i izvora primarnih struja.

Da bi merni sistem mogao da se upotrebi u svrhu etaloniranja strujnih transformatora, neophodno je poznavati tačne metrološke karakteristike, odnosno greške, kako mernog uređaja

za merenje grešaka strujnih transformatora, tako i primenjenih etalon transformatora i etalonskog opterećenja. Drugim rečima, etaloniranje spomenutih mernih sistema podrazumeva etaloniranje svakog pojedinačnog elementa sistema u cilju određivanja njegovih stvarnih grešaka. Etaloniranje etalon transformatora se zasniva na njegovom poređenju sa etalon transformatorom boljih metroloških karakteristika. Za svrhu etaloniranja etalonskih strujnih opterećenja postoje specijalni merni instrumenti koji direktno mere aktivnu i reaktivnu snagu, odnosno impedansu i faktor snage, preko kojih se računa greška ovakvih uređaja [98, 99].

Poseban metrološki problem predstavlja etaloniranje uređaja za određivanje tj. merenje amplitudne i fazne greške strujnih mernih transformatora. U principu, etaloniranje ovakvih uređaja je moguće ostvariti direktnom ili indirektnom metodom poređenja. Direktna metoda podrazumeva generisanje poznate vrednosti merene veličine i njeno merenje pomoću uređaja koji je predmet etaloniranja. Indirektna uporedna metoda takođe podrazumeva generisanje poznate vrednosti merene veličine koja se meri kako od strane uređaja (instrumenta) koji je predmet etaloniranja, tako i referentnim uređajem (instrumentom). Rezultati ovih merenja se zatim međusobno porede. Ovakav način poređenja zahteva i podrazumeva postojanost i nepromenljivost merene veličine za vreme merenja. Pri tome se za referentni uređaj bira onaj instrument koji ima poznatu, najmanje tri do pet puta manju, vremenski stabilnu grešku merenja određenu i potvrđenu nizom etaloniranja.

U oba slučaja, i direktnom i indirektnom postupku etaloniranja uređaja za merenje grešaka strujnih transformatora, javljaju se kompleksni i višeslojni (mnogostruki) problemi. Direktna metoda podrazumeva generisanje tačne vrednosti amplitudne i fazne greške. Generisanje i promenu vrednosti amplitudne greške strujnog transformatora moguće je postići relativno lako i veoma tačno promenom broja primarnih ili sekundarnih navojaka. Međutim, generisanje i promena vrednosti fazne greške je daleko složenija.

Postoje namenski razvijeni uređaji za generisanje fazne i amplitudne greške, tzv. kalibratori kompleksne greške, ali su oni obično razvijeni samo za specifična rešenja mernih sistema i uređaja koje poseduju najčešće vodeće metrološke laboratorije u oblasti mernih transformatora, kao što su PTB, METAS, NIST, NPL i dr. [19, 21]

Primena indirektne uporedne metode povezana je sa obezbeđenjem dva zahteva: generisanje amplitudne i fazne greške ispitivanog transformatora i nepromenljivost tih grešaka u toku etaloniranja. Generisanje amplitudne i fazne greške ispitivanog transformatora moguće je ostvariti šentiranjem (povezivanjem u sekundarno kolo odgovarajuće promenljive impedanse) sekundarnog kola ispitivanog transformatora odgovarajućom promenljivom impedansom. Obezbeđenje nepromenljivosti generisanih grešaka u intervalu etaloniranja je poseban problem iz sledećih razloga: Vremenski interval etaloniranja je relativno veliki, od desetak minuta do nekoliko sati. U tom intervalu sasvim su moguća određena odstupanja u eksploatacionim parametrima ispitivanog transformatora, kako u pogledu ispitnog opterećenja, tako i u pogledu ispitne struje, mrežne učestanosti i jednakosti uslova ambijenta. U takvim okolnostima moguća je određena varijacija generisanih grešaka. Uticaj varijacije temperature, ma koliko da je mali, unosi određenu komponentu merne nesigurnosti. Takođe, teško je obezbediti potpuno iste uslove ispitivanja u smislu uticaja stranih elektromagnetnih polja.

Rešenje navedenih problema bilo bi u jednovremenom merenju amplitudne i fazne greške ispitivanog transformatora ispitivanom i referentnom mernom aparaturom, ili ispitivanim i referentnim uređajem, pod uslovom da je to moguće ostvariti, s obzirom da postoji više različitih mernih metoda i još više različitih rešenja mernih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora.

Problemi sa obezbeđenjem jednakih uslova ispitivanja, odnosno etaloniranja, javljaju se i prilikom sprovođenja međulaboratorijskih poređenja iz oblasti ispitivanja, odnosno etaloniranja strujnih mernih transformatora, u svrhu potvrđivanja kompetentnosti laboratorija. U praksi međulaboratorijsko poređenje podrazumeva etaloniranje odabranog artefakta od strane

različitih laboratorija učesnica u poređenju. Odabrani artefakt u slučaju međulaboratorijskog poređenja iz oblasti ispitivanja/etaloniranja strujnih mernih transformatora u smislu određivanja amplitudne i fazne greške može biti kako strujni transformator standardne klase tačnosti [9], tako i etalon transformator, tzv. putujući ili transfer etalon [100]. Odabir artefakta zavisi od metroloških mogućnosti laboratorija učesnica, odnosno njihove pozicije u metrološkoj hijerarhiji. Odabrani artefakt mora da ima vremenski postojeće greške koje su proverene nizom ponovljenih etaloniranja. Svaka laboratorija učesnica etalonira/ispituje izabrani artefakt svojom ispitnom opremom i odgovarajućom metodom, pri određenim laboratorijskim uslovima. Bez obzira koliko propisani ili dogovoreni protokoli međulaboratorijskog poređenja brižljivo vode računa, takoreći insistiraju na identičnim ili što je moguće bližim uslovima ispitivanja, ipak dolazi do odstupanja u eksploatacionim parametrima ispitivanog transformatora, kako u pogledu ispitnog opterećenja, tako i u pogledu ispitne struje, mrežne učestanosti, uticaja stranih elektromagnetnih polja i jednakosti uslova ambijenta [101, 102]. U takvim okolnostima moguća je određena varijacija generisanih grešaka. Pomenute uticaje laboratorije najčešće tretiraju kroz procenju mernu nesigurnost.

Kod tzv. ključnih poređenja, u kojima se međusobno porede laboratorije učesnice iz samog vrha metrološke hijerarhije, kao što su nacionalne laboratorije, uslovi i postupci poređenja su još strožiji. I u slučaju međulaboratorijskih poređenja u kojima se porede u smislu tačnosti vrhunske opreme laboratorija za ispitivanje strujnih mernih transformatora čije su greške reda nekoliko ppm ($\mu\text{A/A}$, odnosno μrad) ili delova ppm ($\mu\text{A/A}$, odnosno μrad), jednovremena metoda pokazuje prednost u prevazilaženju problema uticaja pojedinih parametara.

Sprovedena istraživanja u laboratoriji Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ pokazala su da je primena jednovremene uporedne metode merenja amplitudne i fazne greške moguća kako pri etaloniranju strujnih mernih transformatora i uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, tako i u interkomparaciji etalon strujnih transformatora [103, 41].

2.1 Etaloniranje strujnih mernih transformatora jednovremenom uporednom metodom

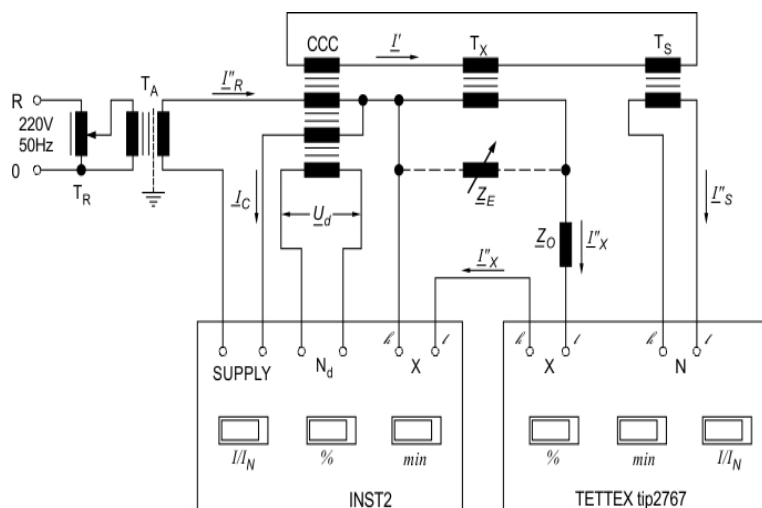
Jednovremena uporedna metoda etaloniranja predstavlja jednovremeno ispitivanje ili etaloniranje strujnih mernih ili etalon strujnih transformatora primenom dva različita merna sistema za ispitivanje tačnosti zasnovana na istim ili različitim metodama pod istim uslovima.

Jednovremena uporedna metoda biće objašnjena na primeru etaloniranja klasičnog induktivnog strujnog transformatora. Na slici 2.1.1 prikazana je električna šema jednovremenog ispitivanja tačnosti strujnog transformatora pomoću dve različite merne aparature koje se zasnivaju na dve različite merne metode. Rad prve merne aparature se zasniva na metodi kompenzovanog strujnog komparatora, a drugi na diferencijalnoj mernoj metodi.

Uslov jednovremenog merenja oba merna sistema obezbeđen je tako što jedan sistem sekundarnu struju I_x'' ispitivanog transformatora T_x upoređuje sa referentnom sekundarnom strujom I_R'' kompenzovanog strujnog komparatora KSK, a drugi sa sekundarnom strujom I_S'' etalon transformatora T_s . Navedene struje transformišu se prvo u odgovarajuće napone U_R , U_g , U_s i U_d pa se njihovom daljom obradom u analognoj i digitalnoj formi dobijaju rezultati za amplitudnu i faznu grešku etaloniranog transformatora.

Podešavanje vrednosti ispitne struje I_R'' realizuje se u sekundarnom kolu komparatora pomoću regulacionog transformatora T_R i izolacionog transformatora T_A . Regulacioni transformator je priključen na izvor napajanja. Sekundarna struja I_R'' se pomoću magnetnog

kola i primarnog namotaja komparatora transformiše u primarnu struju I' koja se zatvara preko primarnih namotaja etalon strujnog transformatora T_S i ispitivanog strujnog transformatora T_X . U ovim strujnim transformatorima primarna struja se transformiše u odgovarajuće navedene sekundarne struje I_X'' and I_S'' , koje se porede. Ispitivani strujni transformator T_X treba da ima isti prenosni odnos kao etalon transformator i kompenzovani strujni komparator. Tačnost ovog transformatora za razmatranu metodu nije od značaja, ali je poželjno da je njegovo naznačeno sekundarno opterećenje bar 2 VA, što je više nego što obe merne aparature opterećuju ispitivani strujni transformator. Ovo su ujedno i dovoljni uslovi da obe merne aparature simultano mere amplitudnu i faznu grešku ispitivanog transformatora.



Slika 2.1.1 Električna šema jednovremene uporedne metode etaloniranja strujnog transformatora primenom metode kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalne metode

2.1.1 Etaloniranje strujnih mernih transformatora jednovremenom uporednom metodom - eksperimentalna provera

Eksperimentalna provera izložene merne metode jednovremenog merenja grešaka transformacije ispitivanog strujnog transformatora sa dve merne aparature realizovana je u Laboratoriji za ispitivanje i etaloniranje Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ (u daljem tekstu Laboratorija Instituta). Tokom ovih merenja u laboratoriji su bili obezbeđeni sledeći uslovi ispitivanja: temperatura ambijenta od 19 °C do 22 °C; učestanost mrežnog napona 50 Hz $\pm$ 1 Hz; distorzija mrežnog napona manja od 5%. Etaloniran je strujni transformator standardne klase tačnosti 0.5, naznačenog prenosnog odnosa 25 A/5 A i naznačenog opterećenja 10 VA. Etalon se u Laboratoriji instituta koristi kao radni etalon, jer ima veoma stabilne greške ustanovljene dugogodišnjim ponovljenim merenjima. Etaloniranje je izvršeno u standardom propisanim mernim tačkama 5%, 20%, 100% i 120% naznačene struje i pri četvrtini i naznačenom opterećenju [9], odnosno pri vrednostima opterećenja 2,5 VA, $\cos\varphi = 1$ i pri 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$. Strujni transformator T_X etaloniran je prvo svakom metodom pojedinačno, a zatim jednovremenom uporednom metodom. Dobijeni rezultati dati su u tabelama 2.1 i 2.2.

Tabela 2.1 Rezultati zasebnog pojedinačnog ispitivanja tačnosti strujnog transformatora T_x metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom [117]

25 A/5 A		Metoda				Razlika met.	
S_n	I/I_n (%)	KSK		DIF		KSK-DIF	
		g (%)	δ (min)	g (%)	δ (min)	g (%)	δ (min)
2.5 VA $\cos\varphi = 1$	5	0.2959	19.2	0.23	24.6	0.066	-5.40
	20	0.3886	11.15	0.294	15.01	0.095	-3.86
	100	0.3815	4.36	0.344	6.76	0.038	-2.40
	120	0.3569	5.20	0.313	7.39	0.044	-2.19
10 VA $\cos\varphi = 1$	5	-0.5730	27.44	-0.612	32.6	0.039	-5.16
	20	-0.2181	12.97	-0.259	16.9	0.041	-3.93
	100	-0.0143	5.66	-0.0595	7.56	0.045	-1.90
	120	-0.0548	6.55	-0.1108	8.78	0.056	-2.23

U tabeli 2.1. prikazani su rezultati merenja kada je transformator T_x posebno ispitivan po metodi kompenzovanog strujnog komparatora (u tabeli označeno sa KSK) i posebno po diferencijalnoj metodi (u tabeli označeno sa DIF). Rezultati jednovremenog ispitivanja transformatora T_x po metodi kompenzovanog strujnog komparatora (KSK) i po diferencijalnoj metodi (DIF) prikazani su u tabeli 2.2. Rezultati su takođe prikazani i grafički na slikama 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4 i 2.1.5.

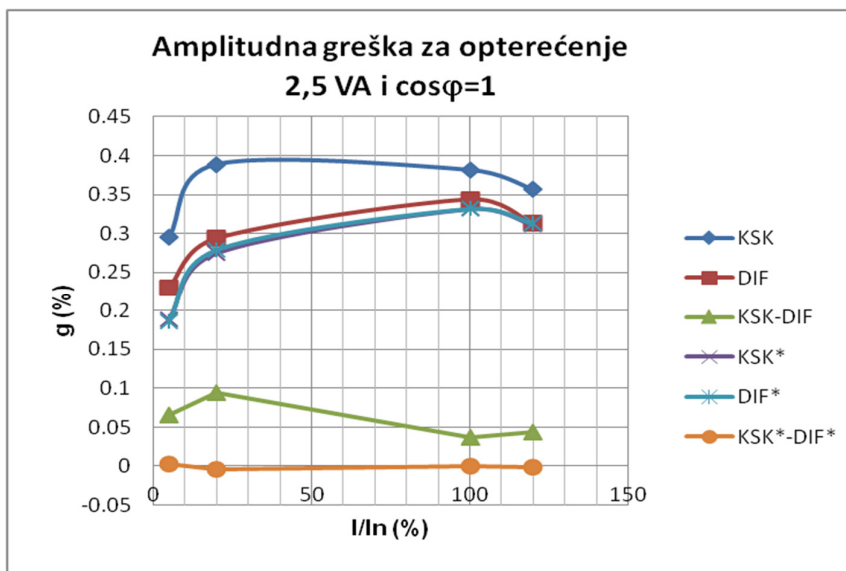
Tabela 2.2 Greške merenja kada se strujni transformator T_x ispituje jednovremeno metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom [117]

25 A/5 A		Metoda				Razlika met.	
S_n	I/I_n (%)	KSK*		DIF*		KSK*-DIF*	
		g (%)	δ (min)	g (%)	δ (min)	g (%)	δ (min)
2.5 VA $\cos\varphi = 1$	5	0.1885	28.20	0.186	27.8	0.003	0.40
	20	0.2747	15.05	0.279	15.9	-0.004	-0.85
	100	0.3318	6.35	0.332	6.7	0.000	-0.31
	120	0.3114	7.13	0.313	7.5	-0.002	-0.37
10 VA $\cos\varphi = 1$	5	-0.5038	27.40	-0.481	28.0	-0.023	-0.60
	20	-0.2599	15.95	-0.248	16.9	-0.012	-0.95
	100	-0.0789	7.35	-0.0807	7.8	0.002	-0.47
	120	-0.1159	7.99	-0.1228	8.7	0.007	-0.71

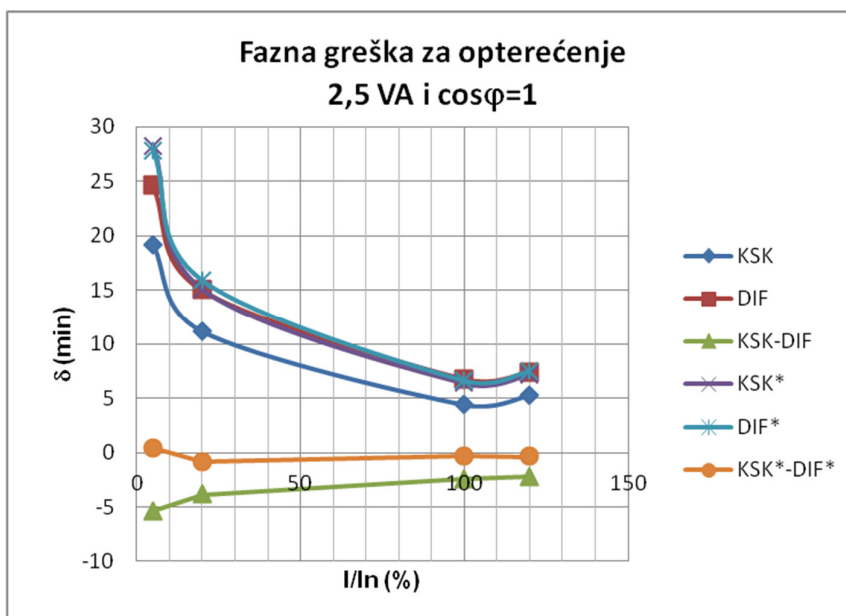
Napomena: * označava jednovremeno merenje korišćenjem dve različite metode

Razlika rezultata merenja grešaka (KSK-DIF) kod pojedinačnog, zasebnog, etaloniranja metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom za amplitudnu grešku je u rasponu od 0.038 % do 0.095 %, a za faznu grešku od 1.9 min do 5.40 min. U ovom slučaju razlike amplitudne greške su u proseku 0.053 %, odnosno za faznu grešku 2.70 min. Razlika rezultata merenja grešaka (KSK*-DIF*), kada se etaloniranje vrši jednovremeno metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom za amplitudnu

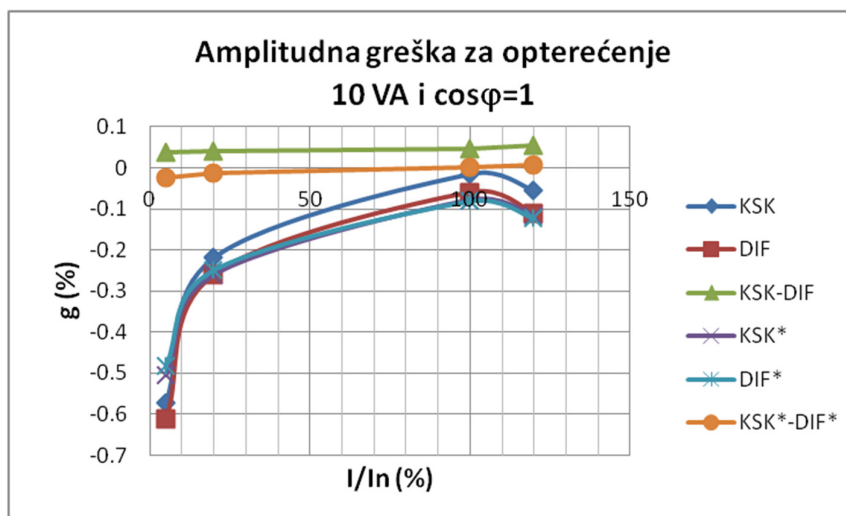
grešku je u rasponu od 0.001 % do 0.02 %, a za faznu grešku od 0.31 min do 0.95 min. Dakle, kod jednovremenog ispitivanja razlike amplitudne greške su u proseku 0.00067 %, odnosno za faznu grešku 0.58 min. Analizom dobijenih rezultata vidi se da je razlika izmerenih vrednosti za amplitudnu i faznu grešku kod jednovremenog uporednog etaloniranja skoro za red veličine manja u odnosu na razlike grešaka izmerenih pojedinačnim etaloniranjima po obe metode.



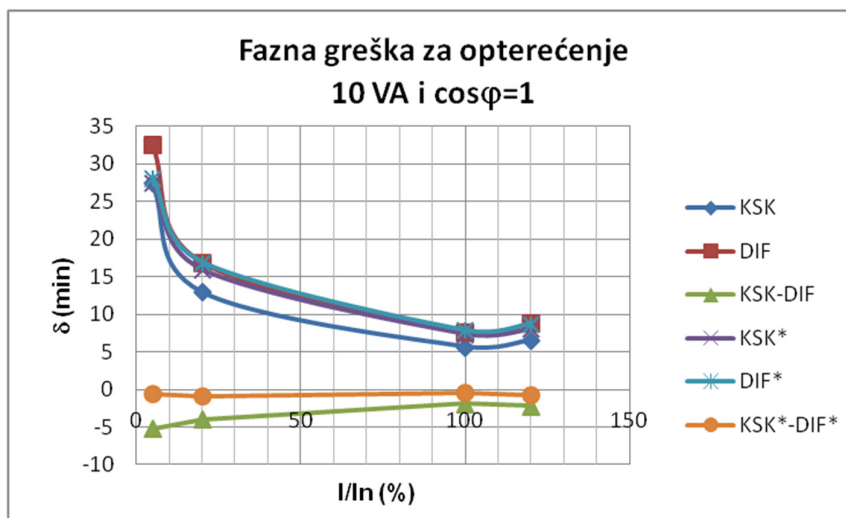
Slika 2.1.2 Rezultati merenja amplitudne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 2.5 VA i $\cos\varphi = 1$, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, pojedinačno i jednovremeno



Slika 2.1.3 Rezultati merenja fazne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 2.5 VA i $\cos\varphi = 1$, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, pojedinačno i jednovremeno

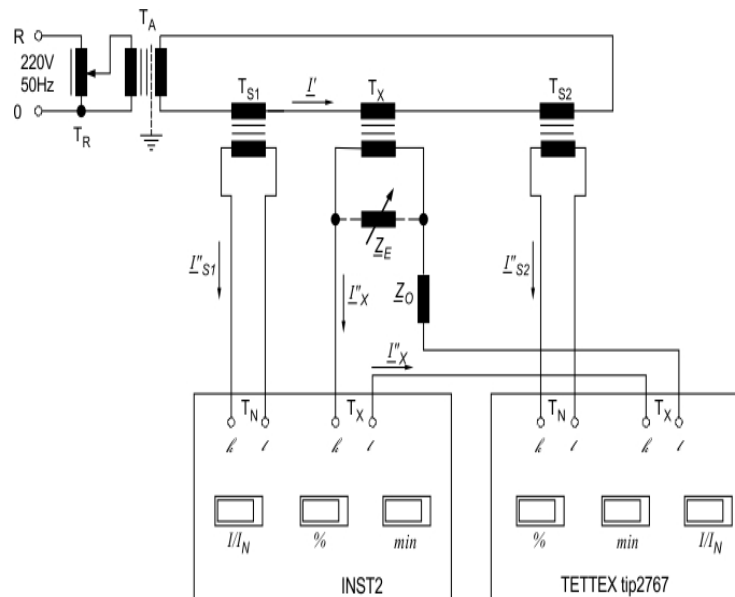


Slika 2.1.4 Rezultati merenja amplitudne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, pojedinačno i jednovremeno



Slika 2.1.5 Rezultati merenja fazne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, pojedinačno i jednovremeno

Realizacija jednovremene uporedne metode moguća je i sa kombinacijom mernih uređaja koji rade na istom principu. Na slici 2.1.6 prikazana je električna šema jednovremenog ispitivanja tačnosti strujnog transformatora sa dve merne aparature, odnosno dva merna uređaja koji rade na principu diferencijalne metode. Kao etalon transformatore T_{S1} i T_{S2} oba sistema koriste etalon strujne transformatore sa elektronskom kompenzacijom greške. Prvi merni sistem razvijen je Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla", a drugi je komercijalni merni sistem proizvođača "Tettex Instruments".



Slika 2.1.6 Električna šema jednovremene uporedne metode etaloniranja strujnog transformatora primenom dve aparature zasnovane na diferencijalnoj metodi

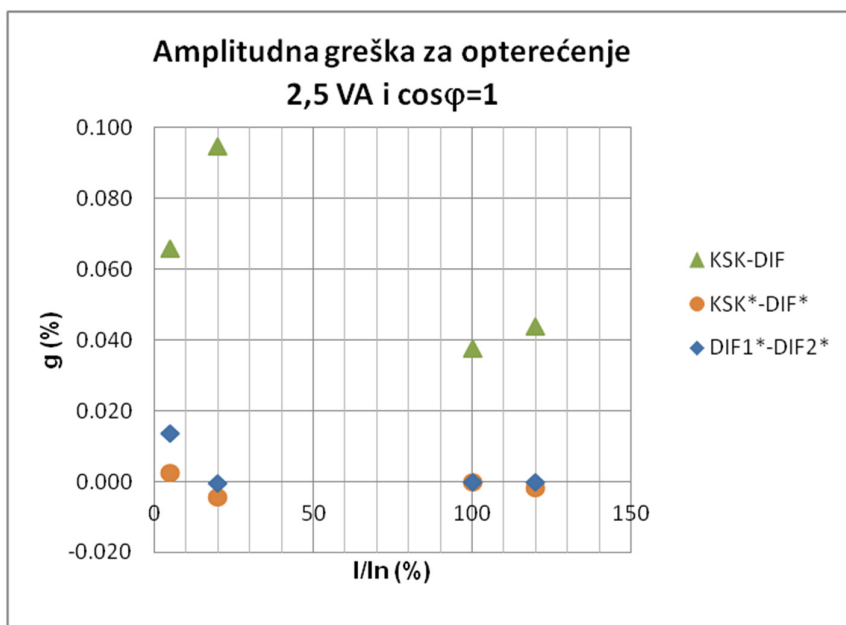
Ispitivan je, takođe, strujni merni transformator iz prethodnog primera prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase tačnosti 0.5, naznačene snage 10 VA.

U Tabeli 2.1.3 prikazane su uporedno razlike u merenju amplitudne i fazne greške kada se ispitivani transformator etalonira zasebno metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom (KSK-DIF), kao i razlike kada se taj transformator etalonira jednovremeno metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom (KSK*-DIF*) i jednovremeno dvema diferencijalnim metodama (DIF1*-DIF2*).

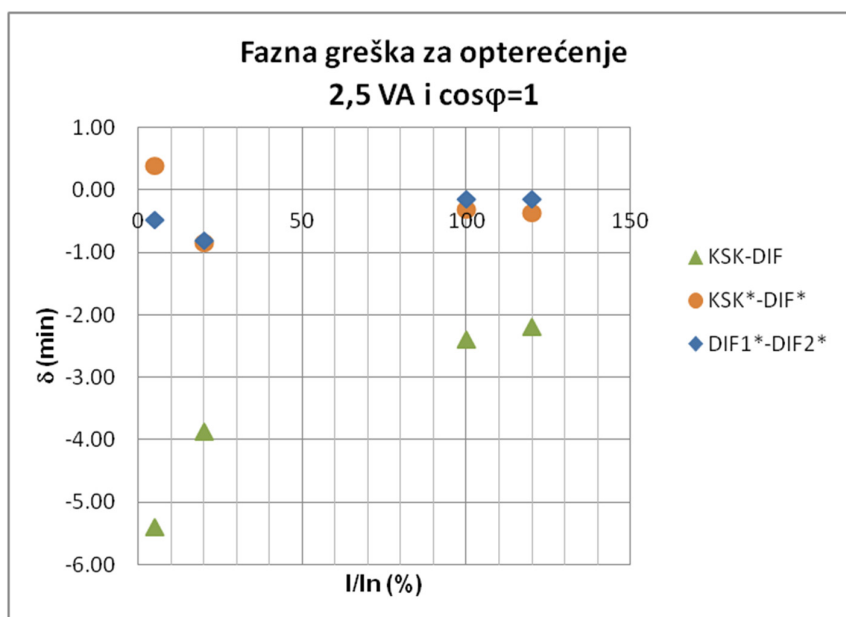
Tabela 2.3 Razlike u greškama merenja kada se strujni transformator T_x ispituje različitim mernim metodama na tri različita načina: zasebno diferencijalnom metodom i metodom kompenzovanog strujnog komparatora (KSK-DIF), jednovremeno metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom (KSK*-DIF*) i jednovremeno dvema diferencijalnim metodama (DIF1*-DIF2*)

25 A/5 A		Razlika metoda					
S_n	I/I_n (%)	KSK-DIF		KSK*-DIF*		DIF1*-DIF2*	
		g (%)	δ (min)	g (%)	δ (min)	g (%)	δ (min)
2.5 VA $\cos\varphi = 1$	5	0.066	-5.40	0.003	0.40	0.014	-0.47
	20	0.095	-3.86	-0.004	-0.85	0.000	-0.81
	100	0.038	-2.40	0.000	-0.31	0.000	-0.14
	120	0.044	-2.19	-0.002	-0.37	0.000	-0.14
10 VA $\cos\varphi = 1$	5	0.039	-5.16	-0.023	-0.60	-0.025	-0.85
	20	0.041	-3.93	-0.012	-0.95	-0.005	-0.82
	100	0.045	-1.90	0.002	-0.47	0.000	-0.22
	120	0.056	-2.23	0.007	-0.71	0.000	-0.07

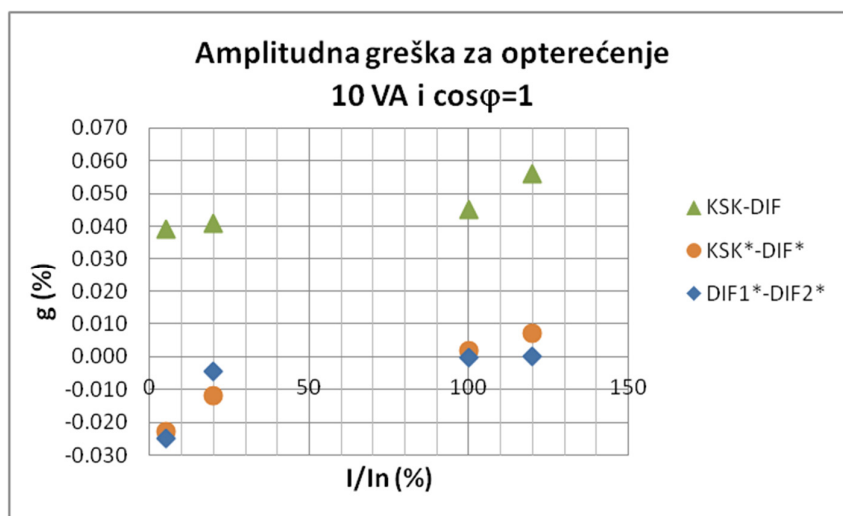
Razlike u merenjima grešaka takođe su prikazane i grafički na slikama 2.1.7, 2.1.8, 2.1.9 i 2.1.10.



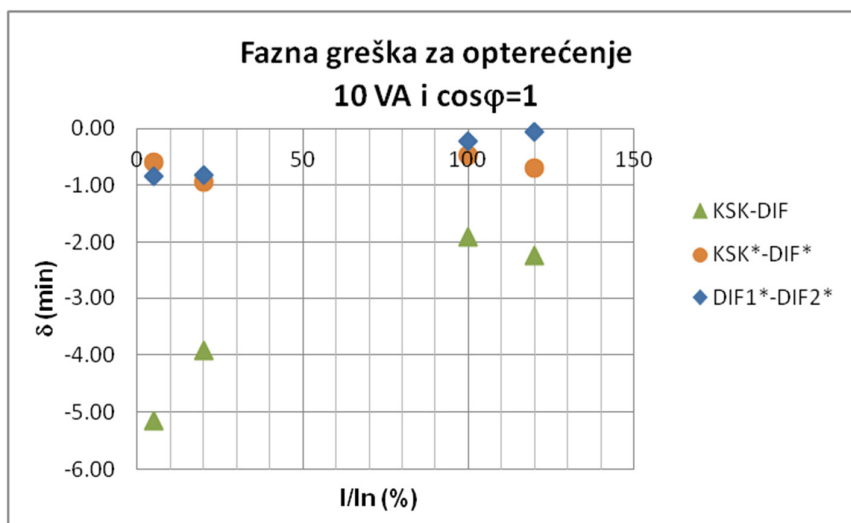
Slika 2.1.7 Razlike u merenju amplitudne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 2,5 VA i $\cos\varphi = 1$, pojedinačno i jednovremeno različitim metodama



Slika 2.1.8 Razlike u merenju fazne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 2.5 VA i $\cos\varphi = 1$, pojedinačno i jednovremeno različitim metodama



Slika 2.1.9 Razlike u merenju amplitudne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$, pojedinačno i jednovremeno različitim metodama



Slika 2.1.10 Razlike u merenju fazne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$, pojedinačno i jednovremeno različitim metodama

2.2 Etaloniranje etalon strujnih transformatora jednovremenom uporednom metodom

Etaloniranje strujnog transformatora, kao što je napred rečeno, može se ostvariti primenom različitih metoda etaloniranja. Mnoge laboratorije su u mogućnosti, zahvaljujući

opremi kojom raspoložu, da etaloniranje sprovedu primenom različitih metoda. Jedan od načina da laboratorija proveri verodostojnost rezultata etaloniranja i svoju kompetentnost u sprovođenju metoda etaloniranja je i ponavljanje etaloniranja istog transformatora primenom iste ili različitih metoda. Čak i primenom iste metode ne može se ostvariti idealna ponovljivost rezultata etaloniranja. Ovo je posledica različitih uticajnih parametara u različitim vremenskim intervalima u kojima se etaloniranje sprovodi [103, 104]. Zapravo, praktično je nemoguće, bez obzira na nastojanja, obezbediti potpuno iste uslove ispitivanja u smislu spoljašnjih uticaja. Dodeljivanjem procenjene merne nesigurnosti svakom pojedinačnom merenju, odnosno dobijenim pojedinačnim rezultatima merenja, uvažava se specifičnost pojedinih metoda i svih spoljašnjih uticajnih parametara.

Bez obzira na primenjenu metodu etaloniranja, oprema koja se koristi za etaloniranje strujnih transformatora uvek čini jedan merni sistem. Ovaj merni sistem sastoji se od: etalon transformatora, uređaja za merenje grešaka, etalonskog opterećenja, strujnog izvora sa mogućnošću regulacije i strujnih i naponskih veza. Svaki od navedenih delova mernog sistema utiče i pojedinačno na samo merenje u većoj ili manjoj meri. Ovi uticaji su u krajnji rezultat merenja najčešće uračunati kroz procenjenu mernu nesigurnost, o čemu će detaljno biti reči u narednom poglavlju.

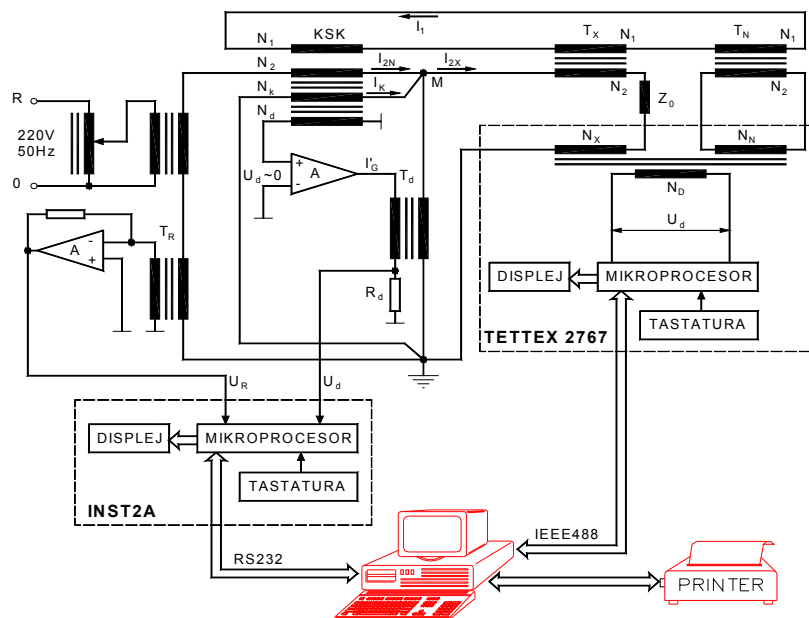
Pokazalo se da se objedinjavanjem dva merna sistema radi jednovremenog etaloniranja jednog strujnog transformatora mnogi parametri, čiji su uticaji izraženi prilikom etaloniranja transformatora pojedinačnim mernim sistemima, praktično zanemaruju. Ovo je naročito značajno prilikom etaloniranja etalon strujnih transformatora visokih klasa tačnosti. Deklarisane greške ovakvih etalona su reda veličine nekoliko ppm ($\mu\text{A/A}$, μrad) ili čak ispod 1 ppm ($\mu\text{A/A}$, μrad). Sa druge strane, pojedini, gore spomenuti uticaji mogu biti i nekoliko puta veći od samih grešaka etalona. U ovakvim slučajevima stvarna greška etalona praktično je pokrivena, maskirana, pojedinim komponentama ukupne greške koji potiču od spoljašnjih parametara, Poglavlje 3.

Jednovremeno uporedno etaloniranje strujnog mernog transformatora dvema različitim metodama sprovedeno je u Laboratoriji Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, po šemi na slici 2.2.1. Električna šema sa slike 2.2.1 prikazuje međusobno povezane dve merne aparature (dva merna sistema) za ispitivanje tačnosti strujnog transformatora T_x . Prva merna aparatura, zasnovana na metodi kompenzovanog strujnog komparatora, razvijena je i napravljena u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla“. Nju čine kompenzovani strujni komparator tip KSK-1000 i uređaj za merenje amplitudne i fazne greške tip INST-2A [66]. Za kompenzovani strujni komparator tip KSK-1000 procenjena amplitudna greška je manja od $\pm 0.001 \%$ ($10 \mu\text{A/A}$), a fazna greška je manja od $\pm 0.05 \text{ min}$ ($14.5 \mu\text{rad}$). Deklarisana greška uređaja za merenje amplitudne i fazne greške tip INST-2A manja je od $\pm 0.2 \%$ od vrednosti merene amplitudne greške i $\pm 0.002 \%$, odnosno $\pm 0.2 \%$ od vrednosti merene fazne greške i $\pm 0.034 \text{ min}$.

Druga merna aparatura zasnovana je na jednoj vrsti diferencijalne merne metode razvijene i realizovane od strane proizvođača „Tettex Instruments“, a čine je etalon transformator sa elektronskom kompenzacijom greške, tip 4764, i uređaj za merenje amplitudne i fazne greške, tip 2767. Etalon transformator tip 4764 ima deklarisanu amplitudnu grešku $\pm 10 \mu\text{A/A}$ i faznu grešku $\pm 0.05 \text{ min}$ (14.5 ppm). Mikroprocesorski uređaj tip 2767 meri amplitudnu grešku bolje od $\pm 0.5 \%$ od očitane vrednosti i $\pm 10 \mu\text{A/A}$ i $\pm 1 \text{ digit}$, odnosno faznu grešku bolje od $\pm 0.5 \%$ od očitane vrednosti i $\pm 0.034 \text{ min}$ ($10 \mu\text{rad}$) i $\pm 1 \text{ digit}$.

Kao strujni izvor za napajanje elemenata šeme i po diferencijalnoj i po metodi strujnog komparatora služi kompenzovani strujni komparator (KSK 1000). Zajednički element obe metode je ispitivani etalon transformator T_x , čije je sekundarno kolo redno povezano i sa uređajem za ispitivanje mernih transformatora po diferencijalnoj metodi (Tettex - 2767) i sa uređajem za ispitivanje transformatora po metodi kompenzovanog strujnog komparatora

(INST-2A). Kako su oba uređaja koncipirana na bazi mikroprocesora, obrada merenih signala dobijenih različitim metodama vrši se u samim uređajima. Uređaj tip INST-2A je povezan serijskom vezom RS-232, a uređaj tip 2767 paralelnom vezom IEEE488 na PC. Vođenje samog procesa merenja, prikaz rezultata merenja i njihova finalna obrada vrši se odgovarajućim softverom prilagođenim za ovu specifičnu jednovremenu metodu.



Slika 2.2.1 Praktična realizacija jednovremene uporedne metode u Laboratoriji za ispitivanje i etaloniranje Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ [104]

2.2.1 Etaloniranje etalon strujnih transformatora jednovremenom uporednom metodom - eksperimentalna provera

Ekperimentalna provera primene jednovremene metode u svrhu etaloniranja etalon transformatora proverena je na primeru etaloniranja etalon transformatora proizvođača Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", tip EST5000, koji ima deklarisanu amplitudnu grešku bolju od 0.005% i faznu grešku bolju od 0.1 min. Etaloniranje je urađeno za prenosni odnos 100 A/5 A i sekundarno opterećenje približno 2 VA, koje je posledica priključnih veza i opterećenja mernog uređaja (merne aparature). U tabeli 2.4 prikazane su osnovne metrološke karakteristike referentnih strujnih etalon transformatora i ispitivanog etalona. Uočava se da su sva tri navedena etalona u pogledu amplitudne i fazne greške istog reda veličine. Kod ovakvih merenja uticajni parametri su veoma izraženi, tako da je potrebno primeniti sve potrebne mere radi njihove eliminacije, kako je opisano u poglavlju 3. Takođe, i prilikom procene merne nesigurnosti, uticajne veličine koje se prilikom ispitivanja klasičnih mernih transformatora i etalona nižih klasa mogu zanemariti, a reda su ppm (10^{-6}), u ovom slučaju se moraju uzeti u obzir.

Prvo je izvršeno etaloniranje pojedinačnim mernim sistemima, po diferencijalnoj i metodi strujnog komparatora. Zatim je urađeno jednovremeno uporedno etaloniranje strujnog etalon transformatora tip EST5000 primenom diferencijalne metode i metode strujnog komparatora. Dobijeni rezultati su prikazani u tabelama 2.5 i 2.6 i na slikama 2.2.2 do 2.2.5.

Tabela 2.4 Metrološke karakteristike referentnih strujnih etalona i ispitivanog etalon strujnog transformatora

	Tip etalon transformatora		
Metrološke karakteristike	KSK-1000 (etalon u metodi kompenzovanog strujnog komparatora)	4764 (etalon u diferencijalnoj metodi)	EST 5000 (ispitivani etalon transformator)
Opseg primarnih struja	Od 5 A do 1000 A	Od 1 A do 5000 A	Od 1 A do 5000 A
Sekundarne struje	5 A	1 A i 5 A	1 A i 5 A
Naznačena vrednost amplitudne greške	$\pm 0,001\%$ (10 $\mu\text{A/A}$)	$\pm 0,001\%$ (10 $\mu\text{A/A}$)	$\pm 0,005\%$ (50 $\mu\text{A/A}$)
Naznačena vrednost fazne greške	$\pm 0,05$ min (15 μrad)	$\pm 0,05$ min (15 μrad)	$\pm 0,1$ min (30 μrad)
Merni opseg	Od 5% I_n do 120% I_n	Od 1% I_n do 200% I_n	Od 5% I_n do 200% I_n

Tabela 2.5 Rezultati etaloniranja ispitivanog etalon transformatora tip EST5000 pojedinačno diferencijalnom metodom (DIF) i metodom kompenzovanog strujnog komparatora (KSK)

100 A/5 A							
S_n	I/I_n (%)	KSK		DIF		KSK-DIF	
		g ($\mu\text{A/A}$)	δ (μrad)	g ($\mu\text{A/A}$)	δ (μrad)	g ($\mu\text{A/A}$)	δ (μrad)
2 VA $\cos\varphi = 1$	1	-202	-17	32	-73	-234	56
	5	5	4	5	2	0	2
	20	2	1	3	8	-1	-8
	50	1	0	2	15	-1	-15
	100	0	0	1	17	-1	-17
	120	0	-1	1	17	-1	-19

Iz prikazanih rezultata se vidi da se pojedinačnim etaloniranjem i jednovremenim etaloniranjem dobijaju veoma bliske vrednosti za amplitudnu i faznu grešku, naročito za deo mernog opsega od 20% do 120% naznačene struje. Međutim, za merne tačke 1% i 5% razlike nisu zanemarljive. U prvom delu opsega ispitnih struja (1% I_n i 5% I_n), uticaj ofseta elektronike, stranih elektromagnetskih polja, kapacitivnih struja između namotaja i načina

uzemljavanja dolaze do izražaja. Zbog toga su i izmerene vrednosti grešaka veće, skoro za red veličine. Treba napomenuti da je merna tačka 1% I_n uvrštena u merenja bez obzira što etaloni KSK1000 i EST5000 nisu deklarirani za ovu tačku mernog opsega. To je verovatno i razlog većih vrednosti amplitudne i fazne greške ispitivanog transformatora u ovoj mernoj tački.

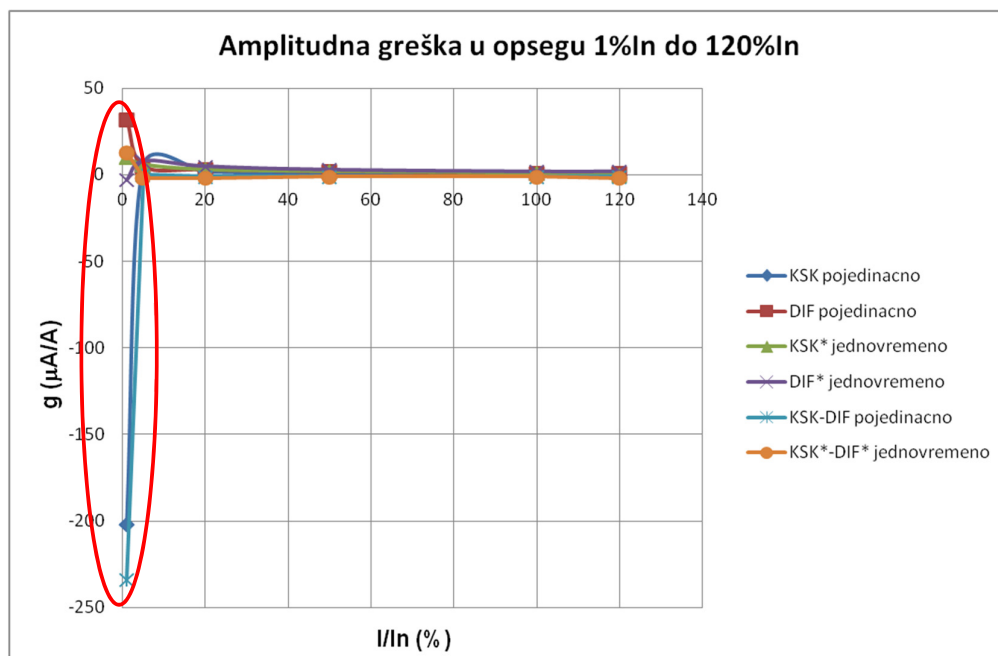
Tabela 2.6 Rezultati etaloniranja ispitivanog etalon transformatora tip EST5000 jednovremeno diferencijalnom metodom (DIF*) i metodom kompenzovanog strujnog komparatora (KSK*)

100 A/5 A							
S_n	I/I_n (%)	KSK*		DIF*		KSK*-DIF*	
		g ($\mu A/A$)	δ (μrad)	g ($\mu A/A$)	δ (μrad)	g ($\mu A/A$)	δ (μrad)
2 VA $\cos\varphi = 1$	1	10	17	-3	0	13	17
	5	6	2	8	8	-2	-6
	20	3	-2	5	-1	-2	-1
	50	2	-3	3	-2	-1	-1
	100	1	-5	2	-5	-1	0
	120	0	-6	2	-6	-2	0

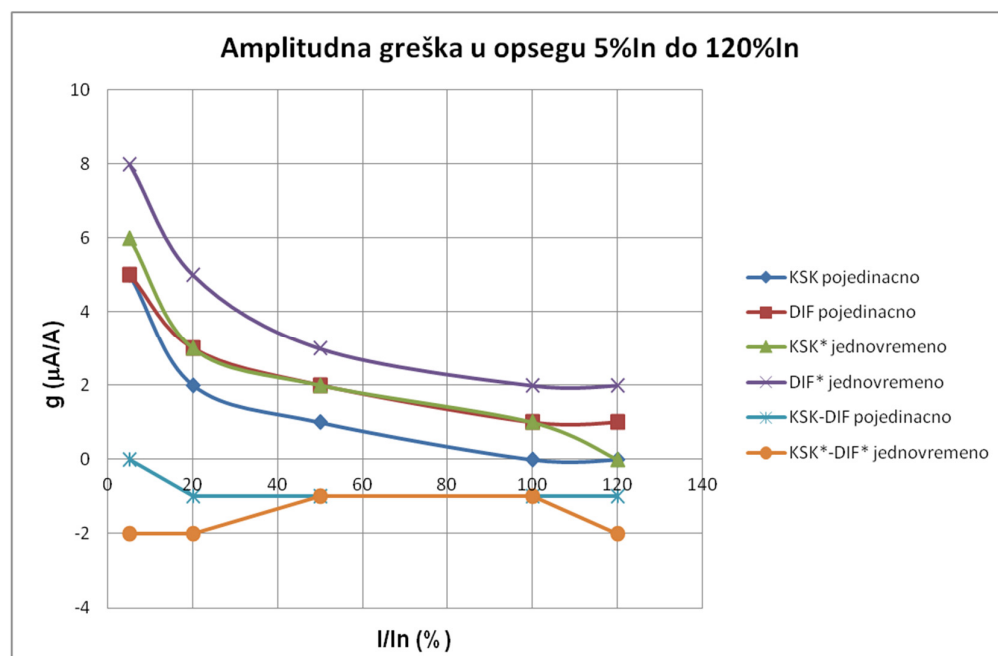
Primenom jednovremenog ispitivanja vrednosti amplitudne i fazne greške ispitivanog etalona pri mernim tačkama 1% I_n i 5% I_n se značajno smanjuju, videti slike 2.2.2 i 2.2.3. Jasno se vidi da su razlike u izmerenim vrednostima grešaka za opseg ispitne struje od 5% I_n do 120% I_n i za pojedinačno i za jednovremeno ispitivanje unutar granica od 2 $\mu A/A$, za amplitudnu gešku.

Slično je i sa izmerenim vrednostima fazne greške. Pojedinačnim merenjima diferencijalnom i metodom kompenzovanog strujnog komparatora dobijaju se veće razlike u izmerenim faznim greškama nego primenom jednovremenog ispitivanja, slike 2.2.4 i 2.2.5. Kod pojedinačnih etaloniranja razlika u dobijenim rezultatima kreće se u tački 1% I_n , unutar 80 μrad , a u opsegu od 5% I_n do 120% I_n unutar 30 μrad . Primenom jednovremene metode merenja ove razlike se smanjuju, pa tako za mernu tačku 1% I_n ona iznosi oko 20 μrad , a za opseg od 5% I_n do 120% I_n je unutar 7 μrad .

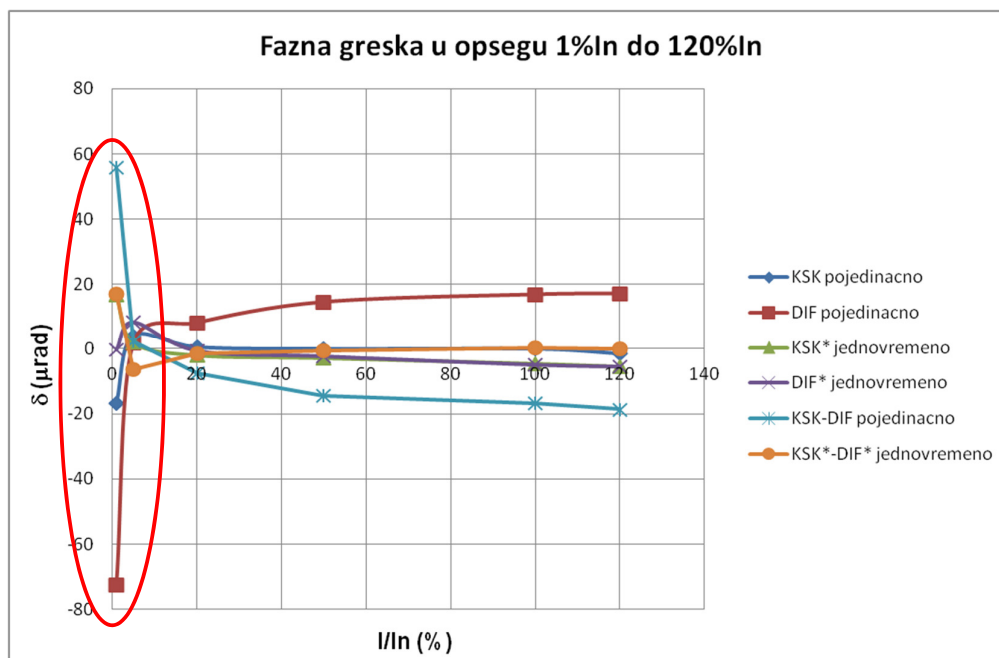
Razlog za dobijena manja odstupanja u izmerenim vrednostima amplitudne i fazne greške je mnogostruk. Uslovi ispitivanja, kada se merenje vrši pojedinačnim ispitivanjima, nikada nisu u potpunosti isti, čak i uz brižljivo vođenje računa kako o konfiguraciji merne šeme, tako i o uticajima. Primenom jednovremene uporedne metode ispitivanja, merni sistemi se dovode u podjednake uslove rada, pa su tako i uticajni parametri jednaki i istovremeno utiču na obe merne aparature. To dalje znači i da se udeo pojedinih uticajnih parametara u proračunu merne nesigurnosti kod jednovremenog ispitivanja/etaloniranja, za razliku od uticaja tih uticajnih parametara u slučaju pojedinačnog ispitivanja/etaloniranja, može zanemariti. O ovome će detaljnije biti reči u narednom poglavlju 3.1.



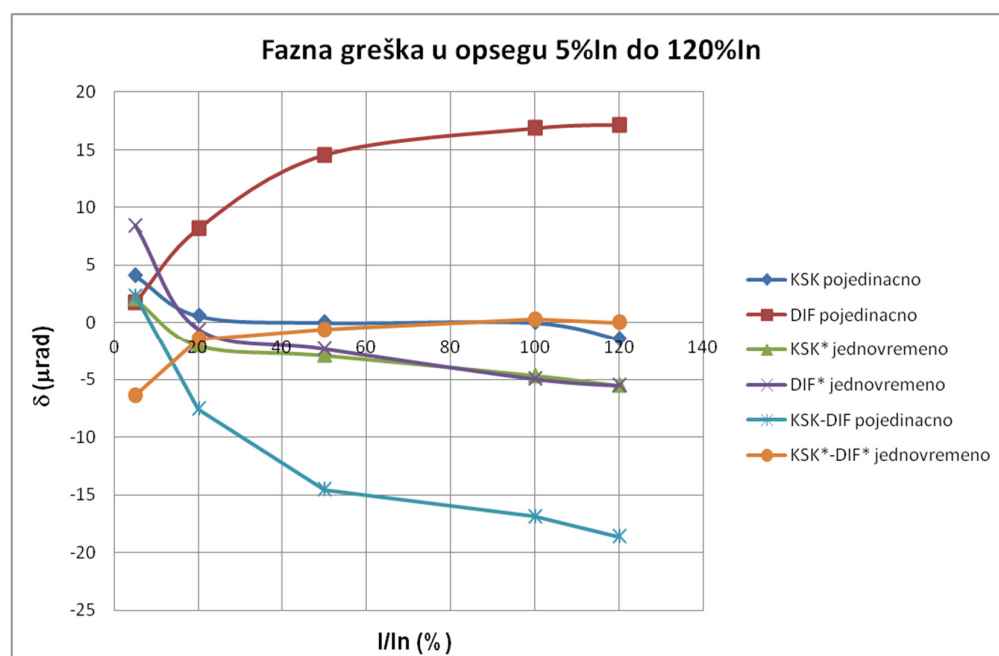
Slika 2.2.2 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora EST5000 za prenosni odnos 100 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje



Slika 2.2.3 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora EST5000 za prenosni odnos 100 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje



Slika 2.2.4 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora EST5000 za prenosni odnos 100 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje



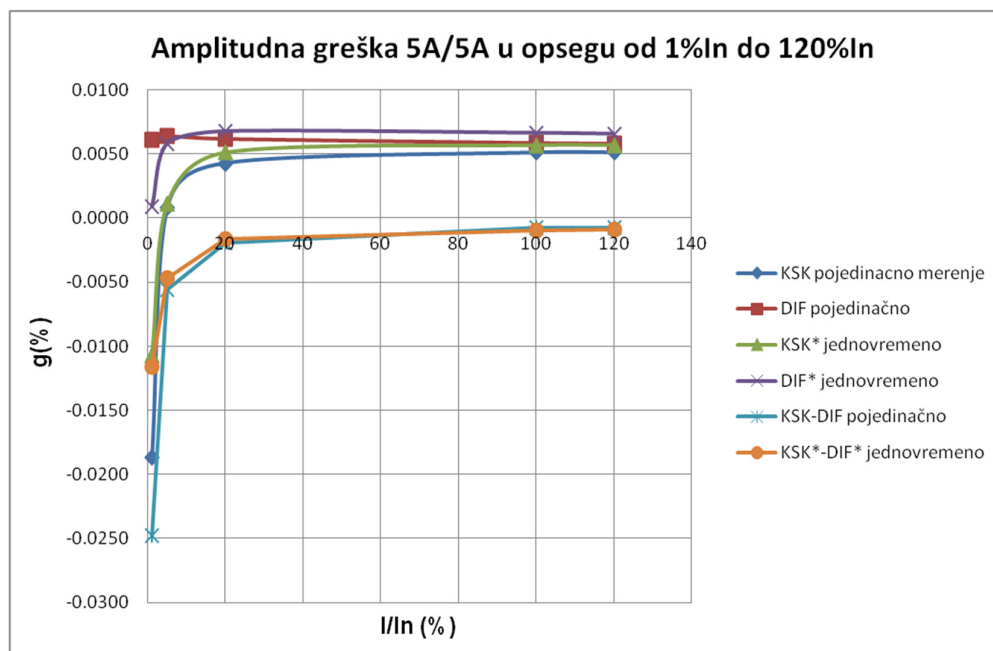
Slika 2.2.5 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora EST5000 za prenosni odnos 100 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje

Osim za prenosni odnos 100 A/5 A, eksperimentalna provera jednovremenog uporednog etaloniranja etalon strujnog transformatora obavljena je i za primarnu struju 5 A i 1000 A. Ispitivani strujni etalon transformator u ovom slučaju bio je transformator proizvođača Hartmann&Braun (H&B) koji ima ulogu radnog etalona u Laboratoriji za ispitivanje i etaloniranje i veoma stabilne greške proverene nizom etaloniranja u dugogodišnjem vremenskom periodu. Ovaj etalon transformator ima za red veličine lošiju grešku od etalona EST5000. Njegova amplitudana greška iznosi $\pm 0,02\%$, a fazna 2min.

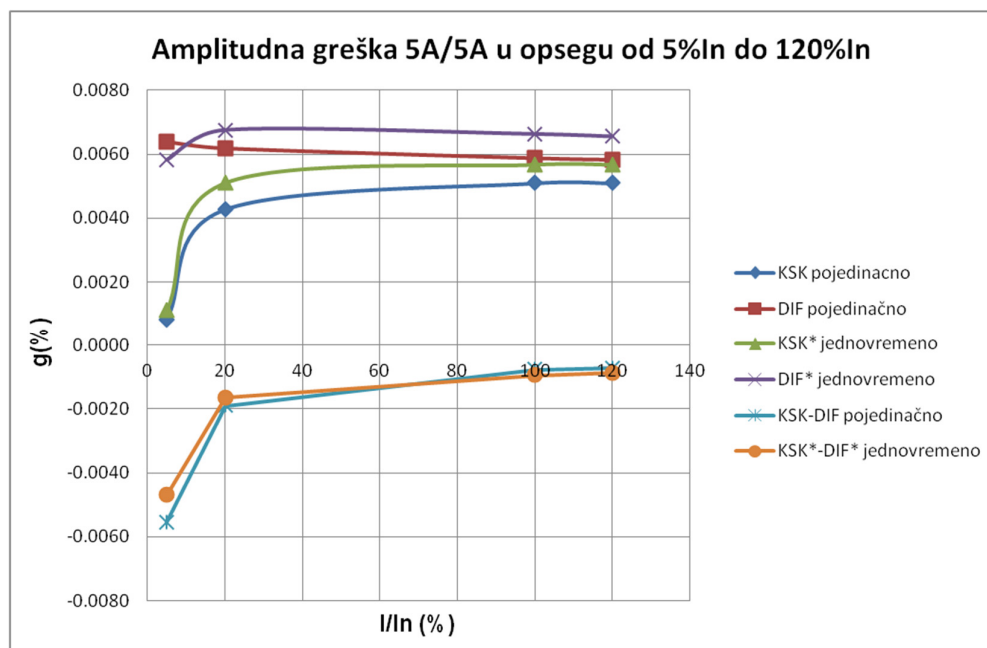
Rezultati etaloniranja pojedinačnim mernim metodama i jednovremeno, za prenosni odnos 5 A/5 A, prikazani su na slikama 2.2.6, 2.2.7, 2.2.8 i 2.2.9, a za prenosni odnos 1000 A/5 A na slikama 2.2.10, 2.2.11, 2.2.12 i 2.2.13. Etalon transformator H&B za prenosni odnos 5 A/5 A etaloniran je pojedinačno i jednovremeno metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, prema šemi na slici 2.2.1. Za prenosni odnos 1000 A/5 A etaloniranje je obavljeno pojedinačno i jednovremeno dvema diferencijalnim metodama, slika 2.1.6.

Za prenosni odnos 5 A/5 A razlike u pojedinačnim izmerenim vrednostima amplitudne greške pri 1% I_n i 5% I_n su značajnije i manje su kada se primeni jednovremena merna metoda. Međutim, za merne tačke u opsegu 20% I_n do 120% I_n razlike pojedinačnih izmerenih vrednosti grešaka i po KSK i po DIF metodi, bilo za pojedinačno merenje, bilo za jednovremeno merenje, su $\pm 10 \mu\text{A/A}$. Za ovaj opseg grešaka, razlike između merenja primenom pojedinačnih metoda i jednovremeno skoro da nema, slika 2.2.6 i 2.2.7. Međutim, pojedinačne izmerene vrednosti fazne greške kreću se u dijapazonu $\pm 100 \mu\text{rad}$, pa je u ovom slučaju primena jednovremenog etaloniranja sa KSK i DIF metodom pogodnija za ceo opseg referentne struje, slike 2.2.8 i 2.2.9.

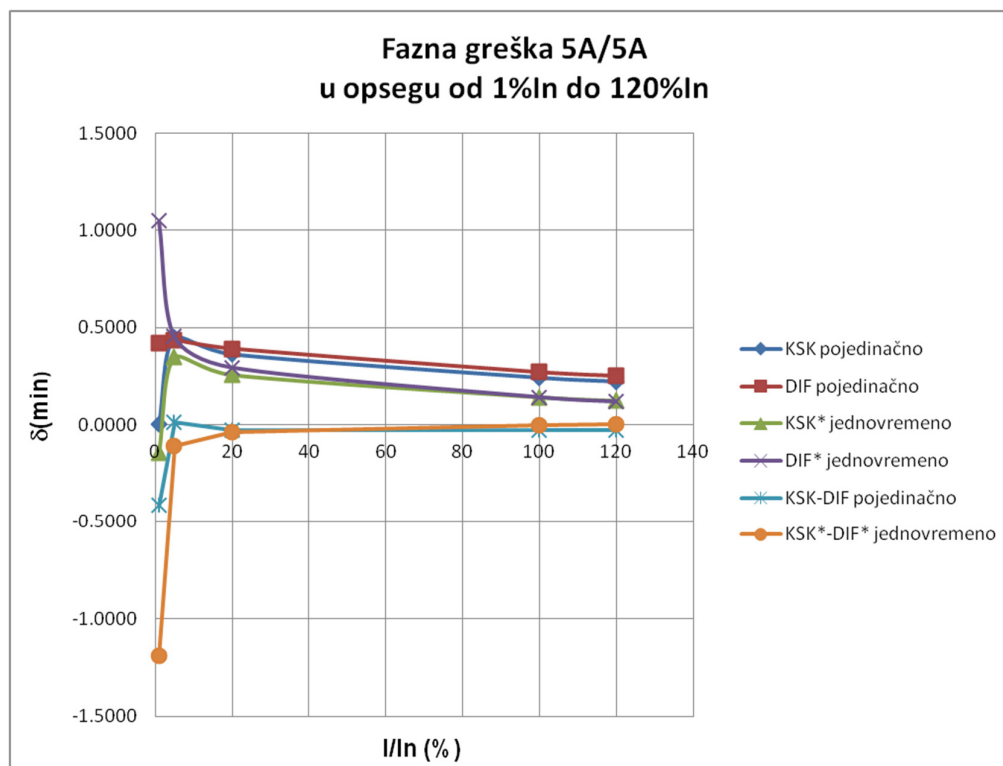
Etaloniranje etalon strujnog transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A izvršeno je u mernim tačkama 1%, 5%, 20% i 50% naznačene struje, jer u trenutku kada je sproveden eksperiment nije bio na raspolaganju adekvatan strujni izvor koji bi obezbedio primarne struje veće od 500 A. Prema slikama 2.2.10 i 2.2.11 vidi se da su razlike između izmerenih amplitudnih grešaka primenom jednovremenog merenja sa dve diferencijalne metode manje nego one dobijene pojedinačnim merenjima. Isto važi i za faznu grešku, slike 2.2.12 i 2.2.13. Sa slike 2.2.11 vidi se da je razlika u rezultatima za amplitudnu grešku, primenom jednovremenog merenja $50 \mu\text{A/A}$ za 1% I_n i da se smanjuje na vrednost ispod $10 \mu\text{A/A}$ za merne tačke 5%, 20% i 50%. I za faznu grešku, slika 2.2.13, primenom jednovremenog merenja razlika se sa $50 \mu\text{rad}$ za 1% I_n smanjuje na vrednost ispod $10 \mu\text{rad}$ za merne tačke 5%, 20% i 50%.



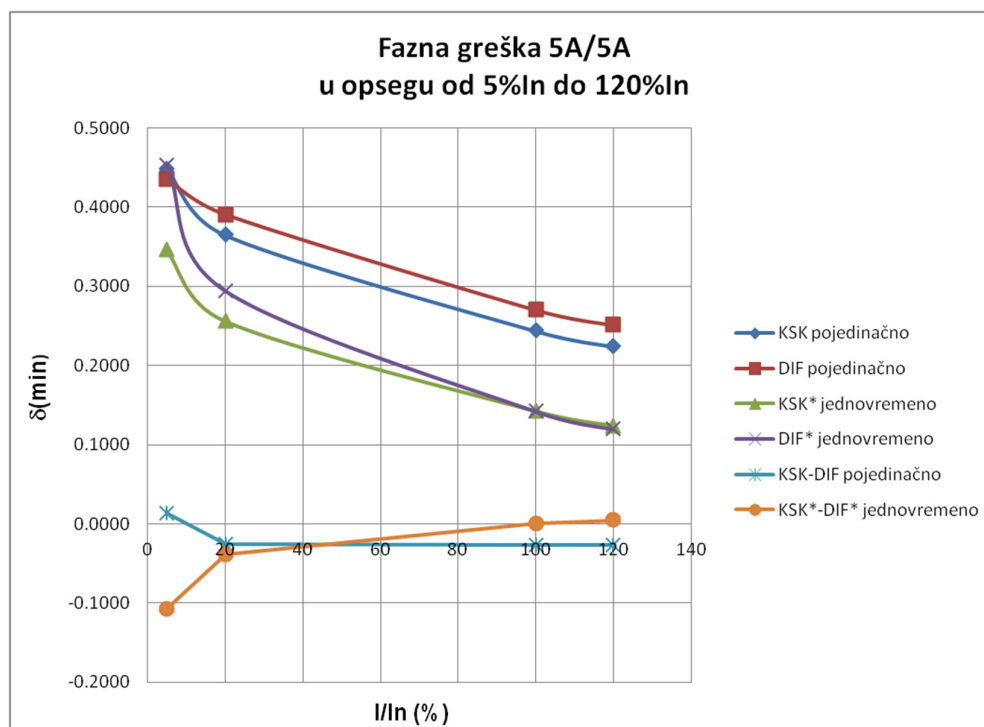
Slika 2.2.6 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje



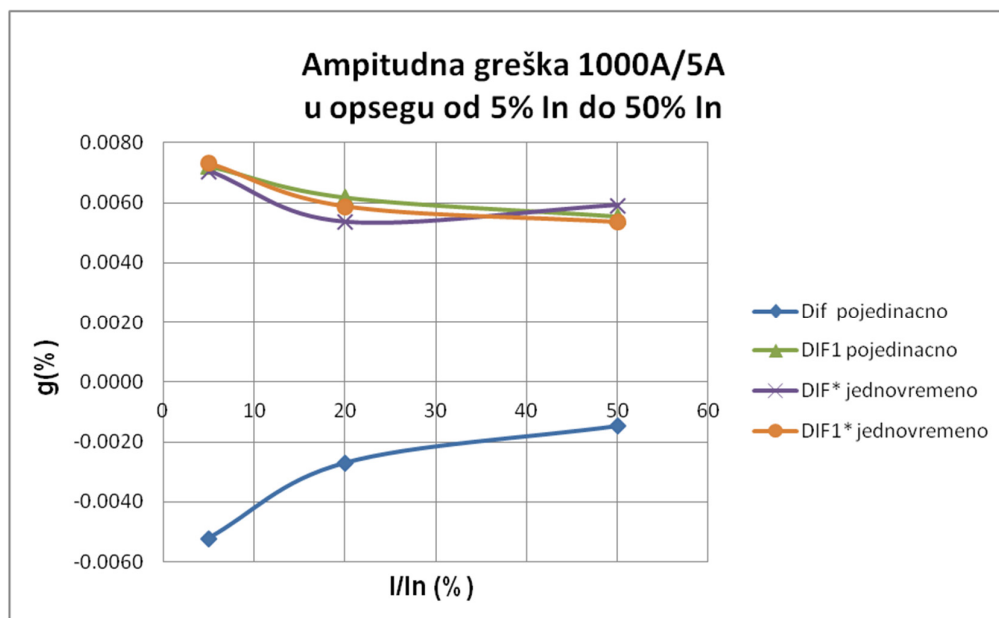
Slika 2.2.7 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje



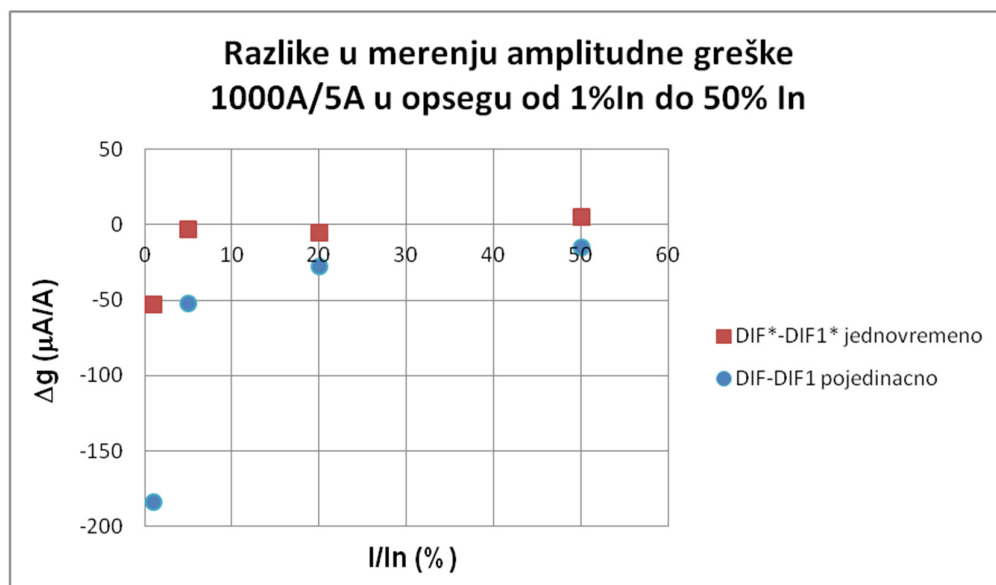
Slika 2.2.8 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje



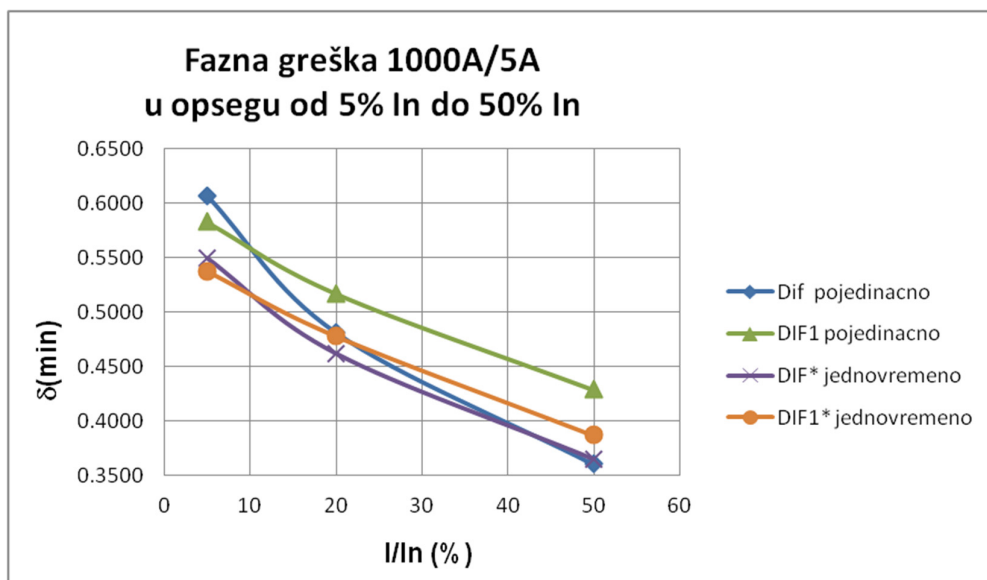
Slika 2.2.9 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje



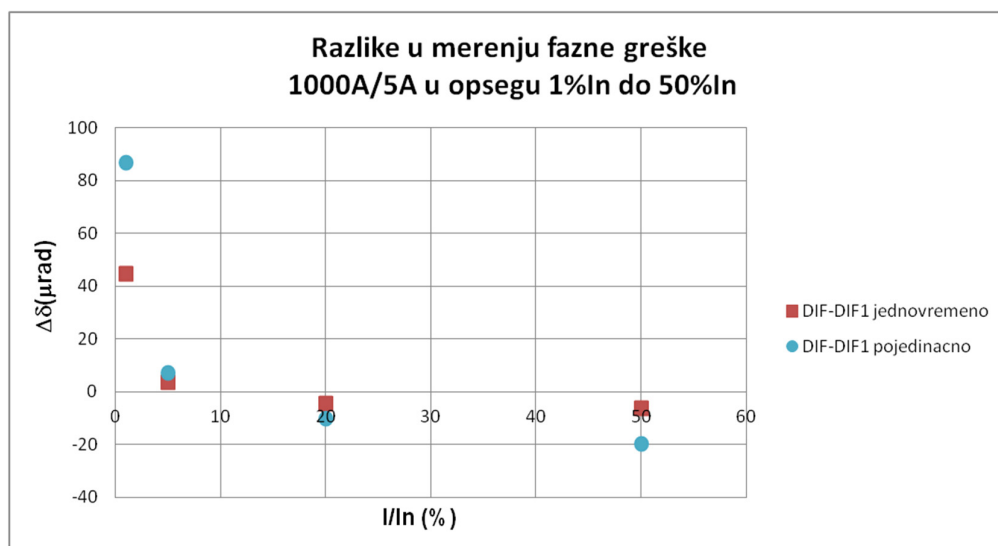
Slika 2.2.10 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 5% do 50% naznačene struje



Slika 2.2.11 Razlike u izmerenim vrednostima amplitudne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 1% do 50% naznačene struje



Slika 2.2.12 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 5% do 50% naznačene struje



Slika 2.2.13 Razlike u izmerenim vrednostima fazne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 1% do 50% naznačene struje

2.3 Etaloniranje aparatura za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora jednovremenom uporednom metodom

U ovom poglavlju biće razmotrena dva načina etaloniranja aparature za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora zasnovana na jednovremenoj metodi. Prvi način podrazumeva etaloniranje transformatora T_x poznatih karakteristika sa obe aparature, referentnom i ispitivanom. Drugi način podrazumeva jednovremeno podešavanje kompleksne greške referentne i ispitivane aparature.

Praktična realizacija jednovremene metode u Laboratoriji za ispitivanje i etaloniranje Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ prikazana na slici 2.2.1 iskorišćena je i za etaloniranje jedne od aparatura za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora iz prikazane šeme.

Merne aparature su proizvedene od strane različitih proizvođača i zasnovane su na različitim mernim metodama.

Prva merna aparatura zasnovana na metodi kompenzovanog strujnog komparatora (merni uređaj tip INST-2A) usvojena je za referentnu. Druga aparatura koja se etalonira (merni uređaj tip 2767) je zasnovana na diferencijalnoj metodi. Opis obe merne aparature dat je u prethodnom poglavlju.

Obe merne aparature napajaju se iz istog strujnog izvora. Strujni transformator T_x je opterećen konstantnim internim opterećenjem koje potiče od spojnih veza i mernih elemenata obe aparature, i eksternim referentnim opterećenjem Z_o . Opterećenje Z_o je promenljivo i ima određen uticaj na greške ispitivanog strujnog transformatora koje se mere jednovremeno obema mernim aparaturama.

Ispitivani transformator, T_x , je etalon transformator sa elektronskom kompenzacijom greške tip EST5000, prenosnog odnosa 100 A/5 A, deklarisanе amplitudne greške 0.005% i fazne greške 0.1 min.

2.3.1 Komparativno etaloniranje

Ceo postupak etaloniranja ispitivane merne aparature se sastoji u tome što se mere amplitudna i fazna greška strujnog transformatora T_x i ispitivanom i referentnom mernom aparaturom jednovremeno. Na taj način obezbeđuju se isti uslovi ispitivanja za obe aparature. Dobijeni rezultati se zatim međusobno porede.

Ispitivanje je obavljeno u opsegu naznačene struje od 5% do 120%. Merenjem je proveravana nula oba merna sistema u funkciji od referentne struje. Rezultati su prikazani u tabeli 2.3.1.

Rezultati iz tabele 2.3.1 pokazuju da su razlike u merenjima amplitudne greške ovim dvema aparaturama manje od $\pm 5 \mu A/A$ za opseg referentne struje od 20% do 120%. Takođe, u ovom opsegu razlike u merenju fazne greške su manje od $\pm 47 \mu rad$. Za referentnu struju 5% I_n razlike u izmerenim vrednostima amplitudne i fazne greške su 4 puta veće. Ovo je verovatno posledica ofseta oba merna uređaja.

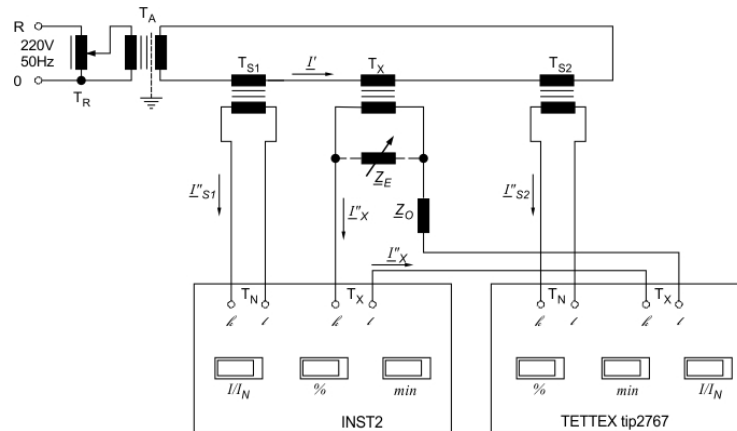
Razlike u rezultatima merenja treba da su u granicama zbira deklarisanih (procenjenih) grešaka obe merne aparature.

Tabela 2.3.1. Rezultati provere nule dve merne aparature primenom jednovremene metode etaloniranja

I/I_N (%)	KSK metoda		DIF metoda		Razlika KSK-DIF	
	g_I (%)	δ_I (min)	g_{II} (%)	δ_{II} (min)	Δg_{I-II} (%)	$\Delta \delta_{I-II}$ (min)
5	0.0083	2.1778	0.0064	1.637	0.0019	0.5408
20	0.0042	0.9629	0.0047	0.804	-0.0005	0.1589
50	0.0040	0.7508	0.0043	0.607	-0.0003	0.1438
100	0.0037	0.3975	0.0035	0.385	0.0002	0.0125
120	0.0028	0.2449	0.0029	0.248	-0.0001	-0.0031

2.3.2 Generisanje kompleksne greške

Varijaciju merene kompleksne greške moguće je ostvariti promenom sekundarne struje I_X'' ispitivanog transformatora T_X ili sekundarne struje I_S'' etalon transformatora T_S . To se može ostvariti tako što se paralelno sekundarnom kolu ispitivanog ili etalon transformatora priključi promenljiva impedansa Z_E kao što je naznačeno isprekidanom linijom na slici 2.3.2. Varijacija grešaka ispitivanog strujnog transformatora pomoću promenljive impedanse je bitan element predložene metode jednovremenog etaloniranja.



Slika 2.3.2 Električna šema jednovremenog podešavanja kompleksne greške referentne i ispitivane aparature

Kompleksna greška $\underline{G}$, koju čine amplitudna g i fazna greška δ strujnog transformatora, merena primenom diferencijalne metode merenja predstavlja relativnu vektorsku razliku osnovnog harmonika sekundarnih struja ispitivanog I_{IX}'' i etalon strujnog transformatora I_{IS}'' :

$$\underline{G} = g + j\delta = \frac{I_{IS}'' - I_{IX}''}{I_{IS}''} \cdot 100 \quad (2.3.1)$$

Najjednostavniji način kojim se omogućava varijacija struje u nekom električnom kolu postiže se paralelnom vezom tog električnog kola i promenljive impedanse $\underline{Z}_E$. U konkretnom slučaju prikazanom na slici 2.3.2, paralelno sa impedansom opterećenja $\underline{Z}_0$ ispitivanog transformatora T_X povezana je promenljiva impedansa $\underline{Z}_E$. Lako se pokazuje da kompleksna greška ispitivanog transformatora direktno zavisi od odnosa impedansi $\underline{Z}_0 / \underline{Z}_E$:

$$\underline{G} = -\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_E + \underline{Z}_0} \cdot 100 \quad (2.3.2)$$

Kako je $G \ll 100 \%$, to je i $\underline{Z}_0 \ll \underline{Z}_E$, pa se jednačina (2.3.2) može pojednostaviti:

$$\underline{G} \cong -\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_E} \cdot 100 \quad (2.3.3)$$

Odnosno, amplitudna u (%) i fazna greška u minutima:

$$g = 100 \cdot \operatorname{Re} \left(-\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_E} \right) \quad (2.3.4)$$

$$\delta = 3442 \cdot \operatorname{Re} \left(-\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_E} \right) \quad (2.3.5)$$

Praktična realizacija izloženog koncepta generisanja amplitudne i fazne greške oslanja se na primenu promenljive omske otpornosti R_E (dekadna kutija otpornosti) za generisanje amplitudne greške, odnosno promenljive kapacitivnosti C_E (dekadna kutija kapacitivnosti) za generisanje fazne greške. Na ovaj način omogućeno je relativno nezavisno zadavanje amplitudne i fazne greške.

Za konkretan primer, za impedansu opterećenja Z_0 uzet je etalon otpornik, otpornosti $R_0 = 0,4008 \Omega$. Tada izrazi za amplitudnu i faznu grešku postaju:

$$g = -100 \cdot \frac{R_0}{R_E} = -40,08 \cdot \frac{1}{R_E} \quad (2.3.6)$$

$$\delta = -3442 \cdot R_0 \cdot \omega \cdot C_E = -433,4 \cdot 10^3 \cdot C_E \quad (2.3.7)$$

Za generisanje amplitudne greške u opsegu etaloniranja od $\pm 2 \%$ nema tehničkih problema. Za zadavanje faznih grešaka do ± 10 minuta potreban je kondenzator kapacitivnosti $23 \mu F$. Za veće fazne greške potrebne su i veće vrednosti kapacitivnosti. Primenom naponskog transformatora odgovarajućeg prenosnog odnosa ostvaruje se transformacija impedanse, te je moguće sa dekadnom kutijom kapacitivnosti do $1 \mu F$ generisati i fazne greške veće od 100 minuta.

Za potrebe ovog eksperimenta, pomoću promenljive impedanse $\underline{Z}_E$ amplitudna greška je generisana u opsegu od -2% do $+1.67\%$, a fazna greška u opsegu od -126 min do $+90$ min pri referentnoj struji jednakoj 50% naznačene struje. Izmereni rezultati prikazani su u tabeli 2.3.2.

Prema rezultatima jednovremenog merenja zadatih grešaka sa dve aparature (tabela 2.3.2) vidi se da su razlike u izmerenim vrednostima amplitudne greške u opsegu od $\pm 2 \mu A/A$ za

zadatu grešku oko nule do $\pm 90 \mu\text{A/A}$ za zadate greške jednake i veće od 1%. Razlike u merenju fazne greške kreću se u opsegu od $\pm 0.06 \text{ min}$ ($\pm 16 \mu\text{rad}$) do $\pm 0.73 \text{ min}$ ($\pm 200 \mu\text{rad}$). Vrednosti amplitudne i fazne greške prikazane u tabelama 2.3.1 i 2.3.2 pokazuju dobro slaganje rezultata dobijenih primenom jednovremene metode etaloniranja, što predstavlja i eksperimentalnu verifikaciju prikazanog koncepta. Razlike u izmerenim vrednostima amplitudne i fazne greške u svim mernim tačkama su manje od algebarskog zbira deklarisanе greške aparature koja je etalonirana.

Tabela 2.3.2. Rezultati jednovremenog merenja amplitudne i fazne greške strujnog transformatora koje su generisane promenljivom impedansom $\underline{Z}_E$ pomoću dve merne aparature

I/I_N (%)	KSK metoda		DIF metoda		Razlika KSK-DIF	
	g_I (%)	δ_I (min)	g_{II} (%)	δ_{II} (min)	Δg_{I-II} (%)	$\Delta \delta_{I-II}$ (min)
50	-2.026	-125.60	-2.020	-125.67	0.006	0.070
	-1.507	-104.30	-1.500	-103.97	0.007	-0.330
	-1.107	-50.50	-1.098	-49.77	0.009	-0.726
	-0.498	-17.40	-0.500	-17.86	-0.002	0.463
	-0.356	-8.97	-0.357	-9.27	-0.001	0.297
	-0.2104	-4.74	-0.211	-4.95	-0.0006	0.210
	-0.1338	-0.51	-0.133	-0.64	0.0008	0.133
	0.0040	0.61	0.0043	0.75	0.0003	-0.144
	0.1101	4.03	0.1106	4.19	0.0005	-0.160
	0.2372	7.76	0.237	7.84	-0.0002	-0.080
	0.3457	12.41	0.346	12.36	0.0003	0.055
	0.5421	26.00	0.541	25.55	-0.0011	0.451
	0.8343	72.30	0.829	72.90	-0.0053	-0.603
	1.6773	89.60	1.674	90.08	-0.0033	-0.480

2.4 Primena jednovremene uporedne metode etaloniranja kod interkomparacija i međulaboratorijskih poređenja

Etaloniranje strujnih mernih transformatora u različitim laboratorijama često podrazumeva ne samo primenu različitih metoda etaloniranja, već i sprovođenje etaloniranja u različitim uslovima, svojstvenim pojedinačnim laboratorijama. Zbog toga svaka laboratorija kroz iskazivanje svojih najboljih mogućnosti merenja (CMC) i dodeljivanjem merne nesigurnosti dobijenim rezultatima merenja, upravo opisuje svoju specifičnost [31, 32]. Koliko se laboratorije međusobno razlikuju i koliko njihove različitosti utiču na sam postupak etaloniranja, utvrđuje se međulaboratorijskim poređenjima i učešćima u PT šemama (potvrđivanju kompetentnosti kroz međulaboratorijska poređenja) [105, 106].

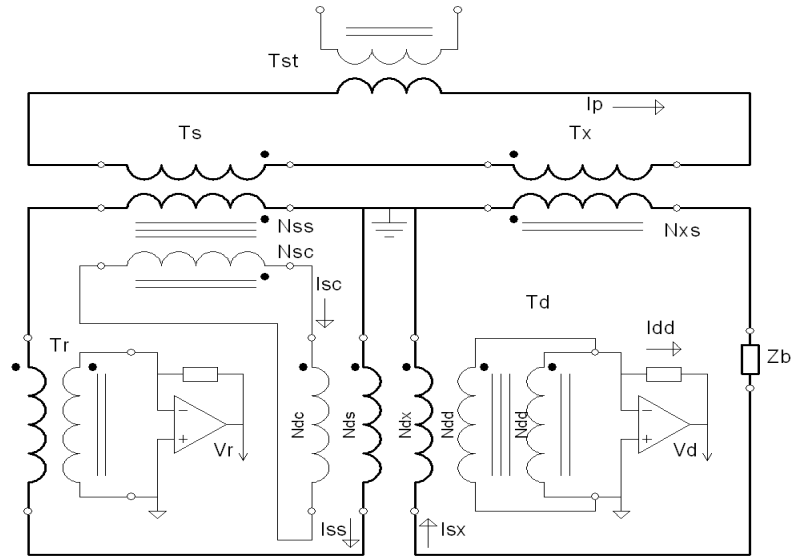
Međulaboratorijska poređenja kao i interkomparacije mernih aparatura za etaloniranje strujnih etalon transformatora visokih klasa tačnosti su zahtevni postupci. Da bi se pokazalo dobro slaganje ovakvih mernih sistema, potrebno je veoma brižljivo sprovesti merenja uz

posebno pažljivo analiziranje mogućih uticajnih veličina, poglavlje 3. I u ovakvim slučajevima jednovremena uporedna metoda etaloniranja ima niz prednosti.

Kao primer za napred rečeno, biće opisano poređenje dve merne aparature visoke tačnosti za etaloniranje strujnih mernih transformatora Nacionalnog metrološkog instituta Kanade (National Research Council of Canada, u daljem tekstu NRC). Poređenje je sprovedeno za nekoliko različitih odnosa transformacije, nekoliko različitih vrednosti sekundarnih opterećenja i referentnih vrednosti struje i pri frekvencijama 50 Hz i 60 Hz [41]. Prva merna aparatura zasnovana je na jednoj verziji diferencijalne metode sa dvostepenim etalon strujnim transformatorom, razvijena je u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla" (u daljem tekstu INT). Druga aparatura je zasnovana na metodi strujnog komparatora i razvijena je u NRC-u [107, 108]. U ovom poređenju druga, NRC aparatura, je imala ulogu referentne aparature. Poređenje je sprovedeno u svrhu potvrde, validacije, INT merne aparature kao podobne za primenu kod etaloniranja etalon strujnih transformatora visoke tačnosti.

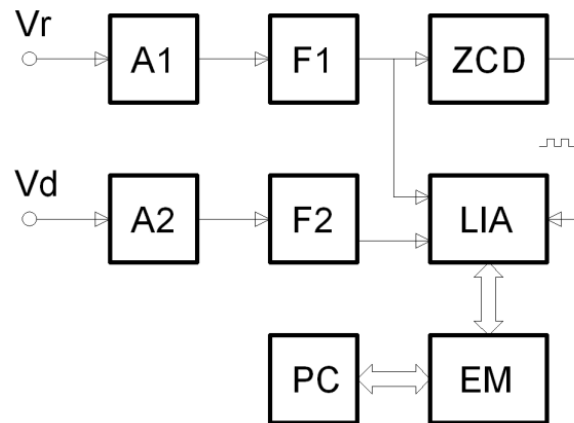
Kako NRC i INT merne aparature nisu detaljnije objašnjene u poglavlju 1 koje se bavi mernim metodama i uređajima, to će radi boljeg razumevanja izvršene interkomparacije biti učinjeno u tekstu koji sledi.

Merni sistem INT ima niz prednosti u poređenju sa mernom opremom i metodama opisanim u [108, 109]. Kada se jednom izabere prenosni odnos strujnog transformatora koji se etalonira i on se poveže u merno kolo, nije potrebno dodatno uravnotežavanje mernog sistema. Takođe, ispitivani strujni transformator i etalon transformator ne moraju da imaju isti nominalni prenosni odnos, što je prednost u poređenju sa metodama opisanim u [87, 103], a sprovedenim u [110]. Ovo je postignuto korišćenjem diferencijalnog transformatora sa više namotaja i više različitih prenosnih odnosa. Na taj način omogućava se etaloniranje u širokom opsegu prenosnih odnosa. Dodatno, visoka tačnost etalon strujnog transformatora postiže se ne samo dobrim odabirom visoko permeabilnih magnetnih jezgara (kao što je visoko permeabilni supermalloy) i dizajnom dvostepenog transformatora, već takođe i povezivanjem njegovog kompenzacionog namotaja sa posebnim namotajem diferencijalnog transformatora, čime se povećavaju efekti kompenzacije. Još jedna od prednosti opisane merne aparature INT zasnovane na diferencijalnoj metodi u odnosu na pristup opisan u [103] je u konverziji strujne greške u napon u elektronskom modulu, a tek nakon što se uobliči, determiniše, u diferencijalnom transformatoru visoke tačnosti. Osim visoke tačnosti, prednost ovog sistema u odnosu na sistem prikazan u [107] je u manje zahtevnom dizajnu sa kojim se postiže visoka tačnost. Merni sistem INT omogućava brz rad, zapisivanje izmerenih rezultata u fajl i autokalibraciju mernog uređaja pri malim vrednostima struja, čime se eliminišu uticaji ofseta i šuma koji potiču od elektronskih kola, kao i funkciju zaštite od neželjenog isključenja napajanja.



Slika 2.4.1 Električna šema INT aparature za određivanje grešaka strujnih mernih transformatora zasnovana na novoj diferencijalnoj metodi [41]

Na slici 2.4.1 prikazana je električna šema INT aparature za određivanje grešaka strujnih mernih transformatora zasnovana na novoj diferencijalnoj metodi. Na slici je strujni izvor označen sa T_{st} , etalon strujni transformator sa T_s , diferencijalni transformator sa T_d , referentni transformator sa T_r , ispitivani transformator sa T_x , strujno opterećenje sa Z_b i dva strujno-naponska konvertora sa I/V. Primarna struja označena je sa I_p , I_{ss} i I_{xs} su sekundarne struje etalon transformatora T_s i ispitivanog transformatora T_x , I_{sc} i I_{dd} su struja kompenzacije etalon transformatora T_s i ukupna sekundarna struja diferencijalnog transformatora T_d .



Slika 2.4.2 Blok dijagram obrade signala INT merne aparature [41]

Dva strujno-naponska pretvarača obezbeđuju referentni V_r i diferencijalni V_d napon koji se dalje obrađuju kao što je prikazano na pojednostavljenom blok dijagramu na slici 2.4.2. Na slici 2.4.2, A1 i A2 su pojačavači, a F1 i F2 su low-pass filteri (filteri propusnici niskih učestanosti). Zero krosing detektor, ZCD, generiše digitalni oblik signala na osnovu pojačanog i filtriranog referentnog napona V_r . Ovaj napon se koristi kao referentni signal za lock-in amplifier (LIA) koji kao svoje ulazne signale koristi pripremljene, kondicionirane signale napona V_r i V_d . LIA razlaže napon V_d na dve ortogonalne komponente uzimajući u obzir napon

V_T kao referencu. Na ovaj način omogućava se redukcija šuma i elektromagnetskih smetnji [111]. LIA komunicira sa elektronskim modulom (EM). U elektronskom modulu EM vrši se dalja obrada signala. Elektronski modul je namenski pravljen kao deo elektronskog mernog uređaja razvijenog u INT. Elektronski modul čine releji sa niskom otpornošću kontakata, čiji je zadatak da selektuju odgovarajući namotaj diferencijalnog transformatora T_d , zatim kontrolna relejna kola, kola za zaštitu od slučajnih prekomernih struja, kao i komunikacioni interfejs. Preko ovog interfejsa komunicira se sa LIA i industrijskim PC. Namenski razvijen softver za PC omogućava kontrolu procesa etaloniranja za svaki odabrani prenosni odnos tako što se selektuje odgovarajući diferencijalni namotaj i povezuje sa adekvatnim sekundarnim namotajima etalon transformatora T_s i ispitivanog transformatora T_x . Primenjeni sistem elektrostatičkog i magnetskog oklapanja smanjuje elektrostatičke i elektromagnetne smetnje iz mernog okruženja. Dalja redukcija šuma postiže se upotrebom lock-in amplifier-a na nivou sistema, pretpojačavačima za nizak nivo šuma (low-noise preamplifiers), kao i filterima na nivou komponenti i digitalnim filtriranjem odbiraka signala i usrednjavanjem mernih rezultata na softverskom nivou.

Diferencijalni transformator poredi sekundarnu struju I_{ss} i struju kompenzacije (korekcije) I_{sc} etalon transformatora T_s sa sekundarnom strujom I_{xs} ispitivanog transformatora T_x prema izrazu:

$$N_{ds} \cdot I_{ss} + N_{dc} \cdot I_{sc} - N_{dx} \cdot I_{xc} = N_{dd} \cdot I_{dd} \quad (2.4.1)$$

Namotaji N_{dd} i N_{da} diferencijalnog transformatora T_d imaju isti broj navojaka, i na slici su označeni sa N_{dd} . Struja I_{dd} podeljena strujom I_{ss} je mera kompleksne greške ispitivanog transformatora, pri čemu je usvojeno da se greške etalon transformatora T_s i diferencijalnog transformatora T_d , mogu zanemariti.

Etalon strujni transformator T_s dizajniran je tako da ima promenljivi broj primarnih navojaka i fiksni broj navojaka sekundarnog i kompenzacionog namotaja. Na ovaj način zadovoljen je zahtev za širokim opsegom primarnih struja, kao i dosta niskim vrednostima sekundarnih struja sa jedne strane, i visokom tačnošću sa druge strane. Širok dijapazon primarnih struja postiže se kombinacijama od 1, 2, 3, 4, 5 6 i 10 primarnih navojaka sa navojcima diferencijalnog transformatora za više odnosa transformacije. Cela merna aparatura (T_s i merni uređaj) omogućava etaloniranje za naznačene sekundarne struje od 5 A, 2.5 A, 1 A, 0.1 A i 0.08 A. Zahtev za nestandardnim malim sekundarnim strujama ispod 1 A postignut je zahvaljujući primeni diferencijalnog transformatora za više prenosnih odnosa koji ima namotaje sa relativno malim brojem navojaka. Male naznačene sekundarne struje od 100 mA i 80 mA zahtevale bi sekundarni namotaj konvencionalnog diferencijalnog transformatora sa velikim brojem navojaka reda 10000. Međutim, strujni etalon transformator T_s je napravljen tako da ima dva sekundarna namotaja od po 400 navojaka. Diferencijalni transformator je dizajniran tako da njegov sekundarni namotaj N_{ds} za sekundarnu struju T_s od 80 mA ima samo 750 navojaka. Na ovaj način omogućena je izrada etalon transformatora visoke tačnosti sa relativno jednostavnom strukturom njegovih namotaja, čime se postiže bolje simetriranje namotaja i njihovo bolje elektrostatičko i magnetno oklapanje. Primarni i sekundarni namotaji su namotani oko jezgra i magnetno i elektrostatički oklopljeni.

Tačnost strujnog etalon transformatora postignuta je nekonvencionalnim dvostepenim dizajnom. Detekciono jezgro je napravljeno od visokopermeabilnog magnetskog materijala, dok je radno merno jezgro napravljeno od standardnog magnetskog materijala koji se koristi kod izrade klasičnih strujnih transformatora. Kompenzacioni namotaj nije povezan sa sekundarnim namotajem direktno, već preko zasebnog diferencijalnog namotaja. Na taj način namotaj N_{sc} etalon transformatora T_s nije opterećen naponom koji je posledica celokupne sekundarne struje I_{ss} i impedansom namotaja N_{ds} , već značajno manjim naponom koji potiče

od kompenzacije struje I_{sc} male vrednosti i impedanse namotaja N_{dc} . Ovo čini da impedansa koju „vidi“ namotaj N_{sc} bude veoma mala, čime je kompenzacija efikasnija. U praksi ovo poboljšanje se manifestuje kroz dva do tri puta niže greške merenja.

Diferencijalni transformator T_d je takođe izrađen kao dvostepeni strujni transformator koji ima tri primarna namotaja. Izbor broja navojaka namotaja T_d je takav da je odnos N_{dx}/N_{ds} jednak proizvodu odnosa transformacije etalon transformatora i ispitivanog transformatora i $N_{de} = N_{ds}$. Namotaji N_{dc} i N_{ds} imaju sekcije za naznačene struje 3,75 A, 5 A i 6 A. namotaj N_{dx} ima sekcije za naznačene struje 5 A, 2.5 A, 1 A, 0.1 A i 0.08 A.

Diferencijalni transformator sa pomenutim namotajima i njihovim sekcijama i etalon transformator sa spoljnim primarnim namotajem i namotanim delom primarnog namotaja podeljenim na 5 sekcija, kao i dva sekundarna namotaja od po 400 zavojaka, omogućavaju 55 različitih prenosnih odnosa pri kojima je moguće etalonirati odgovarajuće ispitivane strujne transformatore. Ostalih 5 prenosnih odnosa za primarne struje iznad 3000 A dobija se korišćenjem oba sekundarna namotaja etalon transformatora T_s .

Namotaj N_{dx} diferencijalnog transformatora ima impedansu koja je pretežno otpornog karaktera, s obzirom na činjenicu da ovaj transformator radi u režimu nultog fluksa. Ova impedansa zavisi od odabranog broja navojaka namotaja N_{dx} i deo je ukupne impedanse opterećenja. Kao takva, mora se uračunati u postavljenu vrednost Z_b . Ako je neophodno, ukupna impedansa se može dovesti na 0Ω pomoću aktivnog elektronskog opterećenja.

Uz pomenutu mernu aparaturu razvijen je i namenski softver, koji je takođe bitan za postizanje visoke tačnosti merenja. Softver je pisan u programima MATLAB i C#. MATLAB omogućava snažnu platformu za razvoj mernog algoritma koji se zasniva na digitalnoj obradi signala referentnog napona V_r i diferencijalnog napona V_d . Na ovaj način obuhvaćeno je digitalno filtriranje, usrednjavanje mernih rezultata, samokalibracija sa potiskivanjem i smanjivanjem šuma i korekcijom ofseta koji potiče od elektronike (elektronskih sklopova, kola), što je naročito od značaja pri malim vrednostima ispitne struje. Grafički korisnički interfejs razvijen je na platformi C#. On omogućava odabir parametara kalibracije kao što su primarne i sekundarne struje strujnog transformatora, opterećenje, radna frekvencija, radni režim, merni opseg i jedinice u kojima se izražava izmerena vrednost grešaka. Komunikacioni interfejs je takođe izrađen u platformi C# i omogućava prikupljanje i arhiviranje rezultata merenja.

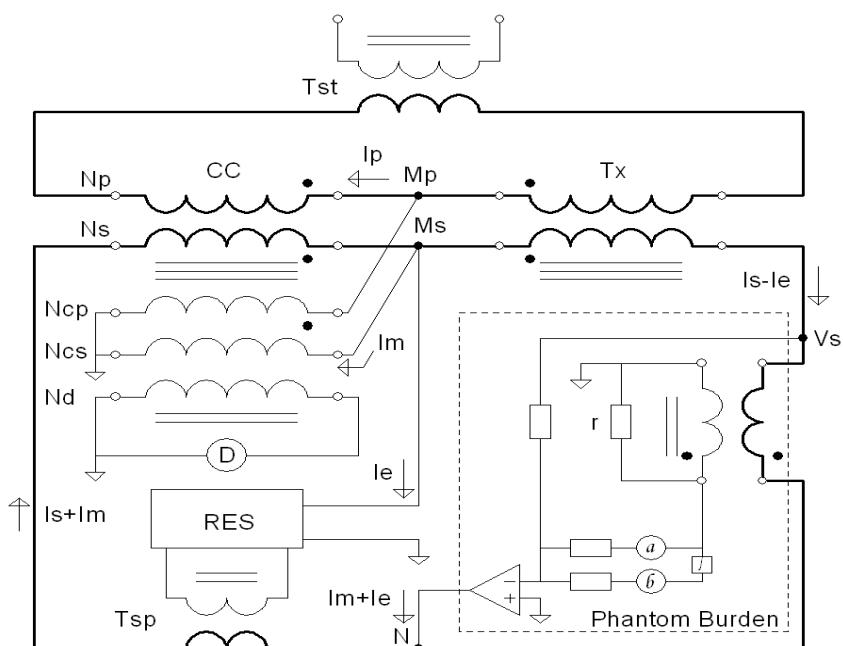
Druga merna aparatura (u daljem tekstu označena kao NRC merna aparatura) prikazana je na slici 2.4.3. Zasnovana je na metodi kompenzovanog strujnog komparatora. Sastoji se od kompenzovanog strujnog komparatora - uređaja visoke tačnosti [107, 108], mernog uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora [112] i fantomskog opterećenja [113].

Izvor primarnog napona na slici 2.4.3 označen je sa T_{st} , strujni komparator sa CC, detektor sa D, uređaj za merenje grešaka RES, a transformator koji napaja RES sa T_{sp} , a sa T_x ispitivani strujni transformator. Sa M_p i M_s označene su tačke u primarnom i sekundarnom kolu koje su dovedene na nulti potencijal preko primarnog namotaja CC, N_{cp} i njegovog sekundarnog kompenzacionog namotaja. N_{cs} . Sa I_p , I_s i I_e označene su primarna, sekundarna i struja greške. I_m je struja magnećenja šupljeg magnetskog jezgra CC. Fantomsko opterećenje sa svojim podešavanjem po amplitudi i fazi, na slici obeleženo sa a i b, omogućava podešavanje kompleksne impedanse opterećenja ispitivanog transformatora T_x . Ono takođe kompenzuje impedansu kablova i na taj način stvara uslove ispitivanja T_x pri nultom opterećenju. Strujni komparator sa više prenosnih odnosa omogućava da se izabere prenosni odnos jednak prenosnom odnosu ispitivanog transformatora T_x . Kada se CC uz pomoć mernog uređaja RES dovede u ravnotežu, struja I_e predstavlja grešku ispitivanog transformatora T_x pri određenoj ispitnoj struji, frekvenciji i opterećenju.

U ovom konkretnom slučaju strujni etalon T_x je poslužio kao prenosni artefakt, transfer etalon za INT i NRC merne sisteme.

Za prikazanu interkomparaciju korišćena su dva strujna komparatora, jedan do 2000 A [25] i drugi do 60000 A [107] u zavisnosti od korišćenih odnosa transformacije i primarnih struja. Za veće prenosne odnose dva strujna komparatora vezivana su u kaskadu. Vezivanjem u kaskadu nije došlo do značajnije redukcije njihove tačnosti [108, 57]. Etaloniranje strujnog komparatora od 60000 A izvršeno je uz pomoć drugog NRC strujnog komparatora od 1200 A pri prenosnim odnosima koje on omogućava. Ostali prenosni odnosi dobijeni su kaskadnim vezivanjem strujnih komparatora od 2000 A i 1200 A [108]. Njihovim etaloniranjem su potvrđene greške reda $1 \mu\text{A/A}$ odnosno $1 \mu\text{rad}$.

Kao transfer standardi u ovom poređenju korišćena su dva torusna dvostepena strujna transformatora visoke tačnosti i slične konstrukcije. Prvi transformator ima prenosni odnos 1000:1 za jedan eksterni primarni namotaj i naznačenu primarnu struju od 1000 A. Detalji njegove konstrukcije dati su u [114]. Ovaj transformator ima bogat dosije etaloniranja pri različitim uslovima ispitivanja i ima amplitudnu grešku $0 \mu\text{A/A}$ i faznu grešku manju od $2 \mu\text{rad}$ pri opterećenju od $0,1 \Omega$ i pri frekvenciji mreže od 60 Hz i 50 Hz. Iz višegodišnjih rezultata njegovog etaloniranja pokazuje se da ima dobru vremensku stabilnost unutar $1 \mu\text{A/A}$, odnosno $1 \mu\text{rad}$.



Slika 2.4.3 NRC merna aparatura zasnovana na metodi strujnog komparatora [41]

Drugi strujni transformator ima nekoliko sekundarnih namotaja za prenosni odnos 2000:1 za jedan primarni navojak i naznačenu primarnu struju od 2000 A. Etaloniran je više puta u NRC i ima stabilne amplitudnu i faznu grešku, obe manje od $1 \mu\text{A/A}$, odnosno μrad za opterećenje ne veće od 1Ω i za frekvencije mreže od 60 Hz i 50 Hz.

Drugi prenosni odnosi oba strujna transformatora postizani su uz pomoć eksternih primarnih namotaja sa različitim brojem navojaka. Maksimalni broj navojaka u tako formiranom eksternom primarnom namotaju bio je 25. Za ovako formirane prenosne odnose oba transformatora su etalonirana opremom NRC-a zasnovanoj na kompenzovanom strujnom komparatoru pojedinačno. Varijacije njihovih grešaka pri pomenutim konfiguracijama bile su unutar $2 \mu\text{A/A}$, odnosno μrad .

Za ovo poređenje strujni izvor napajan je preko pojačavača snage pri stabilnoj sinhronizovanoj mrežnoj frekvenciji od 60 Hz i 50 Hz. Napon napajanja merne opreme bio je 120 V pri frekvenciji 65 Hz i 55 Hz.

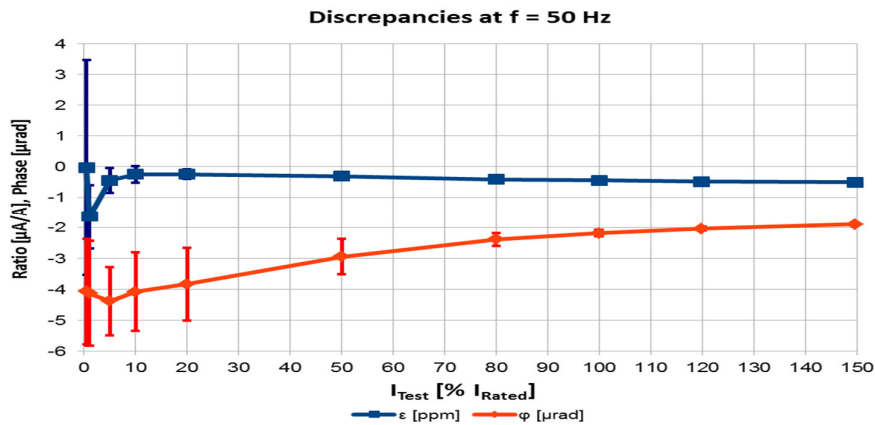
Greška ε_x ispitivanog strujnog transformatora T_x kada se etalonira bilo opremom INT, bilo opremom NRC, data je izrazom:

$$\varepsilon_x = \alpha + j\beta = (\underline{I}_s - \underline{I}_p / n) / (\underline{I}_p / n) \quad (2.4.2)$$

gde su α i β amplitudna i fazna greška, $\underline{I}_p$ i $\underline{I}_s$ primarna i sekundarna struja, a n nominalni odnos transformacije.

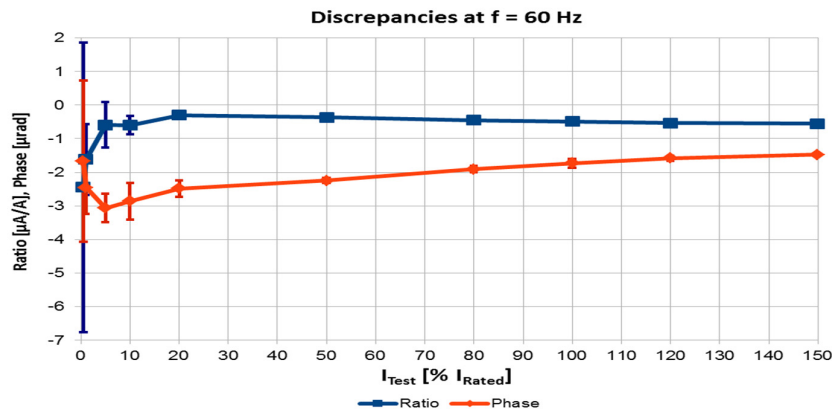
Interkomparacija dve opisane aparature urađena je na dva načina: pojedinačno klasičnim poređenjem etaloniranja transfer etalona i primenom jednovremene uporedne metode etaloniranja.

Strujni transformator prenosnog odnosa 1000:1, kao transfer standard, etaloniran je prvo INT mernom aparaturom zasnovanom na diferencijalnoj mernoj metodi, a zatim pomoću NRC merne aparature. Merenje je ponovljeno u nekoliko uzastopnih dana 5 puta, pri opterećenju od 0,03 Ω i pri ispitnoj struji od 0,5% do 150% naznačene struje ispitivanog transformatora od 1000 A. Merenja su ponavljana pri istim mernim tačkama i na 50 Hz i na 60 Hz. Odstupanja u izmerenim amplitudnim i faznim greškama dobijena merenjem korišćenjem dva nezavisna sistema prikazana su na slici 2.4.4.



Slika 2.4.4 Odstupanja u merenju amplitudne (plava linija) i fazne (crvena linija) greške transfer etalona prenosnog odnosa 1000:1 pojedinačno pomoću dve merne aparature, NRC i INT pri frekvenciji 50 Hz i opterećenju 0,03 Ω [41]

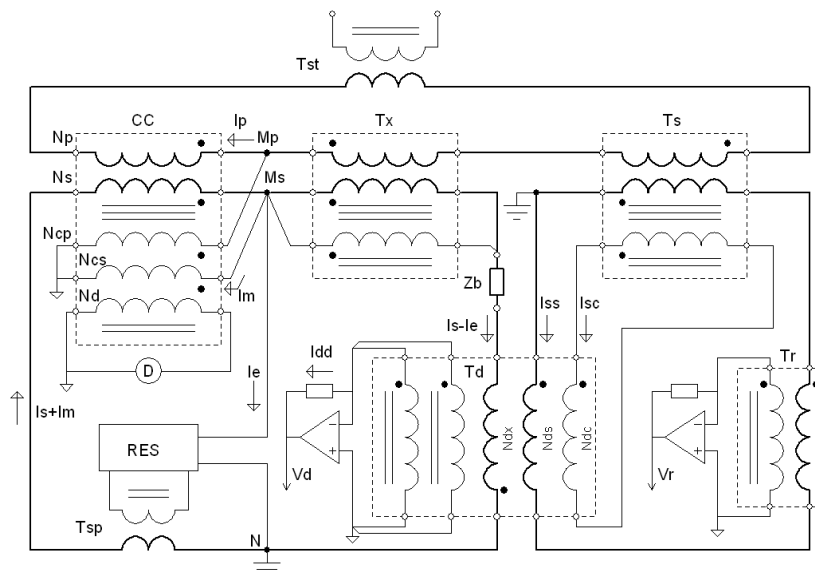
Jednovremeno uporedno etaloniranje ispitivanog transformatora T_x INT i NRC mernim sistemima prikazano je na slici 2.4.6. Fotografija merne konfiguracije prikazana je na slici 2.4.7 a i b. Transfer standard je bio podešen na prenosni odnos 2000:1. NRC merna aparatura bila je povezana slično kao na slici 2.4.3. Umesto fantom opterećenja u ovom slučaju korišćeno je pasivno opterećenje Z_b . Ukupno sekundarno opterećenje ispitivanog transformatora T_x je u ovom slučaju zbir Z_b i impedanse namotaja N_{dx} diferencijalnog transformatora T_d . Pošto druga impedansa varira sa brojem navojaka N_{dx} i zavisi od izabranog prenosnog odnosa ispitivanog transformatora T_x , ukupno opterećenje sekundarnog kola T_x je određeno dodatnim merenjem napona i struje na sekundarnim izvodima T_x .



Slika 2.4.5 Odstupanja u merenju amplitudne (plava linija) i fazne (crvena linija) greške transfer etalona prenosnog odnosa 1000:1 pojedinačno korišćenjem dve merne aparature, NRC i INT pri frekvenciji 60 Hz i opterećenju 0,03 Ω [41]

U slučaju drugog ispitivanog strujnog transformatora - transfer standarda, dva NRC strujna komparatora povezana su u kaskadu kako bi se ostvario prenosni odnos 2000:1. Ovo je bilo uslovljeno naznačenim prenosnim odnosom drugog transfer standarda.

INT merna aparatura povezana je slično kao na slici 2.4.1. Sekundarne veze su ostale iste, dok su sa primarne strane izvodi označeni sa T_x i T_s udaljeni jedan od drugog. Pošto je tačka Mp ostala uzemljena na NRC aparaturi i pošto primarni namotaji T_x i T_s imaju mali broj navojaka u primarnom namotaju, odnosno 1 navojak u slučaju transfer etalona prenosnog odnosa 2000:1, razlika u pozicijama primarnih priključaka nije bila od značaja.



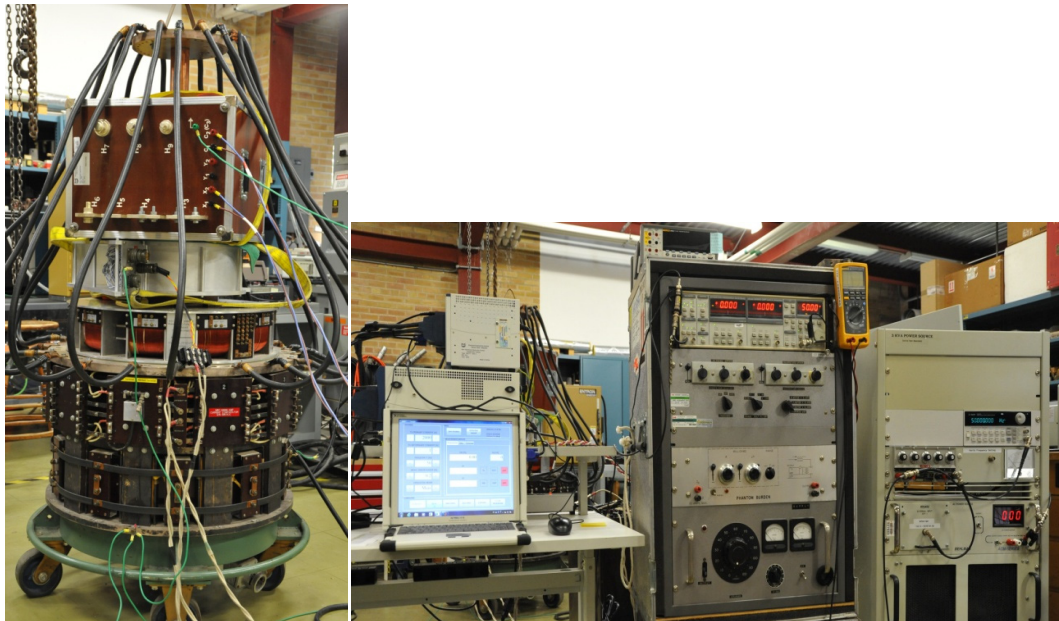
Slika 2.4.6 Električne šema jednovremene metode etaloniranja ispitivanog transformatora Tx korišćenjem dva merna sistema INT i NRC [41]

Za etaloniranje transfer etalona prenosnog odnosa 2000:1 jednovremeno pomoću obe merne aparature urađen je set od 10 ponovljenih merenja u različitim vremenskim intervalima, pri opterećenju od $0,17 \Omega$ i pri ispitnim strujama od 0.5% do 120% naznačene struje i za frekvencije 50 Hz i 60 Hz. Pojedinačni rezultati merenja oba sistema, kao i razlike između njih, prikazani su u tabeli 2.4.1. Kao što se iz tabele može videti, apsolutne vrednosti greške

ispitivanog transformatora, transfer standarda, dobijene merenjem NRC mernom aparaturom su neznatno niže nego greške izmerene INT mernom aparaturom. Najveća odstupanja u merenju ovim sistemima iznose za amplitudnu grešku $1.6 \mu\text{A/A}$, a za faznu grešku $1.5 \mu\text{rad}$.

Rezultati proračuna merne nesigurnosti dati su poglavlju 3.1.5.

Na osnovu dobijenih rezultata merenja i proračunatih mernih nesigurnosti iz poglavlja 3.1.5, ekvivalentnost merenja dva navedena merna sistema potvrđena je izračunavanjem En broja [100] En broj je izračunat i za amplitudnu i za faznu grešku. Kao referentna vrednost greške uzeta je vrednost izmerena NRC mernim sistemom. Kako En broj ne prevazilazi vrednost od 0,4 za sve merne tačke, ovim poređenjem pokazano je dobro slaganje prezentovanih mernih aparatura.



Slika 2.4.7 Fotografija postavke jednovremenog poređenja između NRC i INT merne aparature u laboratoriji NRC, Kanada: a) INT etalon strujni transformator na vrhu, ispod njega je transfer standard Tx prenosnog odnosa 2000:1, a ispod je NRC strujni komparator 60 kA i strujni izvor; b) NRC i INT merni uređaji [41]

Tabela 2.4.1 Rezultati jednovremenog poređenja mernih aparatura INT i NRC [41]

f (Hz)	I/I_N	NRC merna aparatura		INT merna aparatura		Razlika INT-NRC	
	(%)	g ($\mu\text{A/A}$)	δ (μrad)	g ($\mu\text{A/A}$)	δ (μrad)	Δg ($\mu\text{A/A}$)	$\Delta \delta$ (μrad)
60	0,5	0,5	-1,5	0,0	0,0	-0,5	1,5
	1	0,5	-1,5	1,7	0,0	-0,5	1,5
	5	0,5	-1,7	1,4	-2,1	1,6	-0,5
	10	0,5	-1,6	1,0	-2,0	1,5	-0,4
	20	0,5	-1,6	1,0	-2,0	1,5	-0,4
	50	0,5	-1,6	1,0	-2,0	1,5	-0,4
	80	0,5	-1,5	1,0	-2,0	1,5	-0,5
	100	0,5	-1,5	0,0	-2,0	1,5	-0,5
	120	0,5	-1,5	0,0	-2,0	1,5	-0,5
50	0,5	0,3	-1,1	0,0	0,0	-0,3	1,1
	1	0,3	-1,2	0,0	0,0	-0,3	1,2
	5	0,3	-1,2	1,8	-1,5	1,5	-0,3
	10	0,3	-1,2	1,7	-1,9	1,4	-0,8
	20	0,3	-1,1	1,4	-1,9	1,1	-0,8
	50	0,3	-1,0	1,0	-2,0	0,7	-1,0
	80	0,3	-1,0	1,0	-2,0	0,7	-1,0
	100	0,3	-1,0	1,0	-2,0	0,7	-1,0
	120	0,3	-1,0	1,0	-2,0	0,7	-1,0

2.5 Interkomparacija tri merna sistema jednovremenom uporednom metodom etaloniranja

Sistemi za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora uglavnom koriste diferencijalnu mernu metodu u koju se može takođe svrstati i metoda strujnog komparatora. Sistemi za ispitivanje tačnosti sastoje se od nekoliko mernih uređaja od čije tačnosti u većoj ili manjoj meri zavisi ukupna tačnost merenja amplitudne i fazne greške ispitivanih strujnih transformatora. To su, već spomenuti, etalon transformator (ili strujni komparator) čija se greška direktno u apsolutnom iznosu uključuje u rezultate merenja, merni uređaj čija se greška merenja definiše dvema komponentama, greška nule kao apsolutna greška i relativna greška merenja amplitudne i fazne greške. Pored navedenih grešaka, u ukupnoj grešci merenja sistema participiraju i greške u merenju ispitne struje i greške referentnog opterećenja, a udeo ovih grešaka zavisi i od ispitivanog strujnog transformatora. Kod ispitivanja tačnosti etalon strujnih transformatora evidentno postoji i uticaj mrežnog napajanja, uzemljenja, elektromagnetskih smetnji, u određenoj meri konfiguracije ispitne šeme i uticaj ambijenta, pre svega temperature i vlažnosti. Zato je određivanje merne nesigurnosti kod ispitivanja tačnosti strujnih transformatora složen zadatak, posebno kada je reč o ispitivanju etalon transformatora ili interkomparaciji mernih sistema.

Metoda jednovremenog uporednog etaloniranja primenjena na interkomparaciju dva ili više mernih sistema u osnovi ima prednost jer se određene greške mogu isključiti kao izvor razlika rezultata merenja između pojedinih sistema. To se, pre svih, odnosi na greške usled

merjenja ispitne struje i referentnog opterećenja. Jednovenost merjenja u značajnoj meri izjednačava greške kao posledice mrežnog napajanja, uzemljenja, elektromagnetskih smetnji, konfiguracije šeme i ambijenta, pa se i njihov uticaj u razlici grešaka evidentno smanjuje. Ovo je eksperimentalno potvrđeno u više sprovedenih komparacija dva merna sistema [103, 38].

U savremenim mernim uređajima za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora koji su bazirani na diferencijalnoj mernoj metodi, za utvrđivanje diferencijalne struje, odnosno vektorske razlike sekundarnih struja ispitivanog strujnog transformatora i etalon strujnog transformatora najčešće se primenjuju diferencijalni transformatori. Kod ovakvih mernih uređaja nema galvanske veze između sekundarnih kola ispitivanog strujnog transformatora i etalon strujnog transformatora. To otvara mogućnost da se sekundarna struja ispitivanog strujnog transformatora istovremeno dovede do nekoliko ispitnih uređaja. To je osnovna postavka i preduslov za jednovremenu komparaciju više mernih sistema. Ova metoda dopušta da se u interkomparaciju uključi i jedan sistem sa mernim uređajem koji ima klasičnu diferencijalnu strujnu granu ili jedan merni sistem sa strujnim komparatorom. Broj sistema u interkomparaciji nije neograničen, između ostalog i zbog činjenice da svaki sistem unosi određeno opterećenje u sekundarno kolo ispitivanog strujnog transformatora.

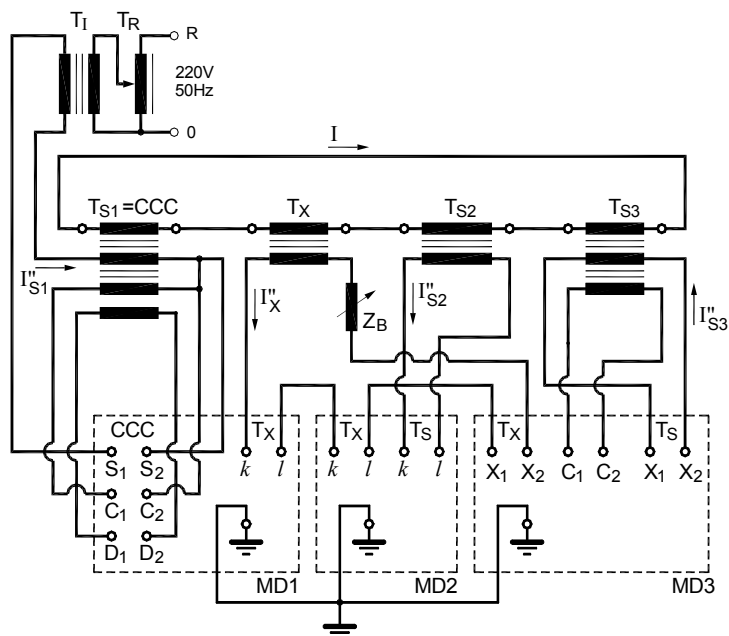
Na slici 2.5.1, prikazana je električna šema jednovremenog poređenja tri različita sistema za ispitivanje tačnosti strujnog mernog transformatora.

U navedeno poređenje bila su uključena tri različita merna sistema, kako po principu rada, porecku proizvođača, godini proizvodnje, tako i po nameni korišćenja u odgovarajućoj laboratoriji. Između ovih mernih sistema postoji takođe i razlika u procenjenoj mernoj nesigurnosti, koja je obuhvatila samo komponente tipa B na osnovu deklariranih karakteristika datih od strane proizvođača, bez komponenti koje se odnose na ispitivani merni transformator [8].

Prvi merni sistem razvijen od strane Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla" 1995. godine, sastoji se od kompenzovanog strujnog komparatora, tip KSK 1000 (na slici 2.5.1 označen kao $T_{S1} = CCC$) i mernog uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, tip INST-2A (na slici 2.5.1 označen kao MD1). Procenjena merna nesigurnost ovog sistema je bolja od $40 \mu A/A$ (μrad) za opseg referentne struje od 5% do 120% naznačene struje.

Drugi sistem proizvođača "Tettex Instruments" proizveden je 2000. godine. Čine ga etalon transformator, tip 4764 (na slici 2.5.1 označen kao T_{S2}) i merni uređaj tip 2767 (na slici 2.5.1 označen kao MD2). Procenjena merna nesigurnost ovog sistema je bolja od $20 \mu A/A$ za amplitudnu grešku i bolja od $20 \mu rad$ za faznu grešku u opsegu referentne struje od 5% do 200% naznačene struje.

Treći sistem je takođe razvijen od strane Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla" 2015. godine. Sastoji se od dvostepenog etalon transformatora, tip DSST3000 (na slici 2.5.1 označen kao T_{S3}) i uređaja za određivanje tačnosti strujnih transformatora tip IST4 (na slici 2.5.1 označen kao MD3). U slučaju ovog mernog sistema procenjena merna nesigurnost je bolja od $30 \mu A/A$ (μrad) kako za amplitudnu, tako i za faznu grešku za merni opseg od 1% do 200% naznačene struje.



Slika 2.5.1 Jednovremeno poređenje tri merne aparature zasnovane na različitim mernim metodama

Kao ispitni strujni transformator korišćen je etalon transformator prenosnog odnosa 100 A/5 A proizvođača Hartmann&Braun, deklarisanе amplitudne greške manje od $\pm 0.02\%$ i fazne greške manje od ± 2 min za naznačeno sekundarno opterećenje od 0.04 Ω (1 VA).

2.5.1 Interkomparacija tri merna sistema jednovremenom uporednom metodom etaloniranja - eksperimentalna provera

Interkomparacija sistema obavljena je u laboratoriji Elektrotehničkog instituta “Nikola Tesla”. Napajanje ispitnog kola bilo je iz mreže napona 220 V, 50 Hz, pomoću regulacionog transformatora T_R i izolacionog prilagodnog transformatora T_I . Primarna ispitna struja I ostvaruje se pomoću kompenzovanog strujnog komparatora CCC koji je istovremeno i etalon i prilagodni strujni transformator [9]. Merenje amplitudne i fazne greške ispitivanog strujnog etalon transformatora obavljeno je u mernim tačkama 5% I_n , 20% I_n , 100% I_n , i 120% I_n i pri sekundarnom opterećenju od 2.5 VA. Temperatura ambijenta iznosila je $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fototografija realizacije jednovremene metode poređenja tri merna sistema u Laboratoriji Instituta, data je na slici 2.5.2.

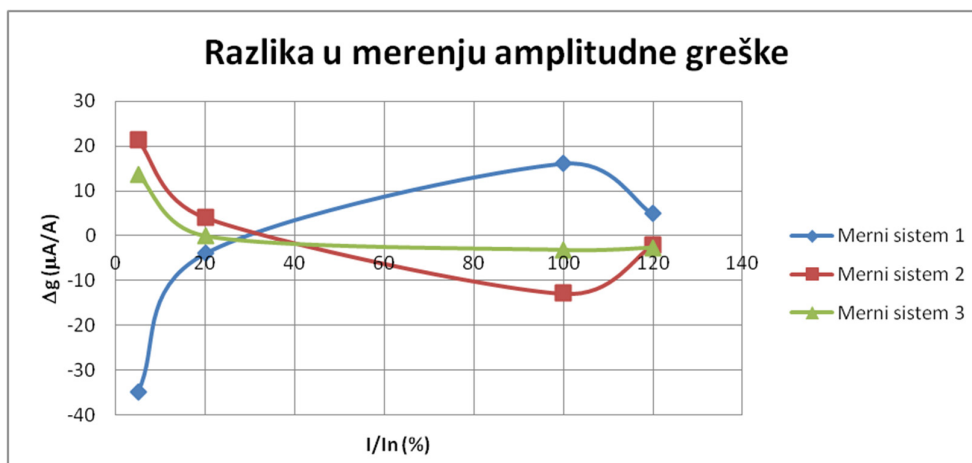
Na osnovu izmerenih rezultata iz tabele 2.5.1, na slikama 2.5.3 i 2.5.4 prikazana su odstupanja amplitudne i fazne greške u odnosu na srednju vrednosti sva tri sistema. Takođe, na osnovu izmerenih rezultata izračunata je standardna devijacija kao tip A merne nesigurnosti za 2σ za svaki sistem pojedinačno. Prema očekivanjima, najveća merna nesigurnost bila je pri mernoj tački 5% naznačene struje, za sva tri merna sistema, i za amplitudnu i za faznu grešku bila je manja od 3 $\mu\text{A/A}$.



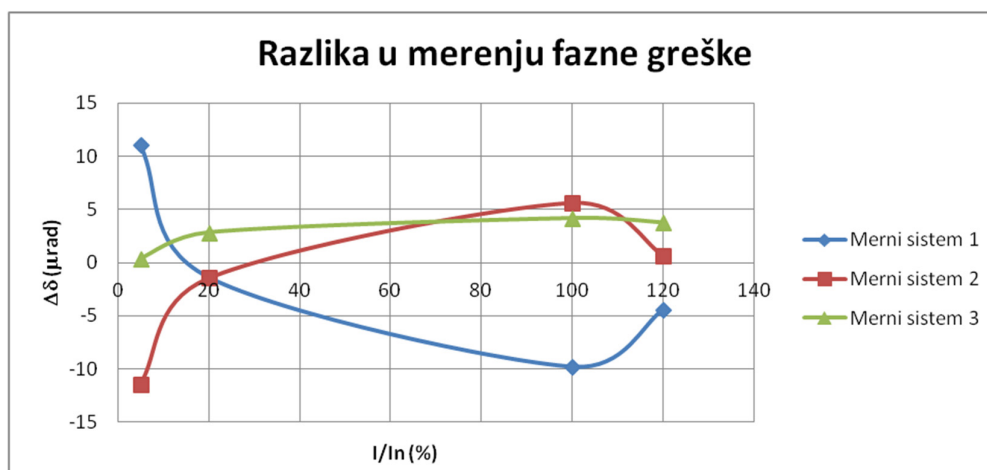
Slika 2.5.2 Realizacija jednovremene uporedne metode etaloniranja kod poređenja tri merna sistema u Laboratoriji Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“

Tabela 2.5.1 Rezultati jednovremene uporedne metode etaloniranja ispitivanog transformatora Tx korišćenjem tri merna sistema

I/I_N	Merni sistem 1		Merni sistem 2		Merni sistem 3	
(%)	g (%)	δ (min)	g (%)	δ (min)	Δg (%)	$\Delta \delta$ (min)
5	-0.0150	0.3542	-0.0094	0.277	-0.01016	0.3175
20	-0.0074	0.1042	-0.0066	0.104	-0.00702	0.1187
100	-0.0037	0.0108	-0.0066	0.064	-0.00564	0.0589
120	-0.0075	0.0725	-0.0082	0.090	-0.00826	0.1006



Slika 2.5.3 Razlike u merenju amplitudne greške ispitivanog strujnog transformatora jednovremenom uporednom metodom etaloniranja, u odnosu na srednju vrednost za sva tri merna sistema za prenosni odnos 100 A/5 A jednovremeno sa tri merna sistema



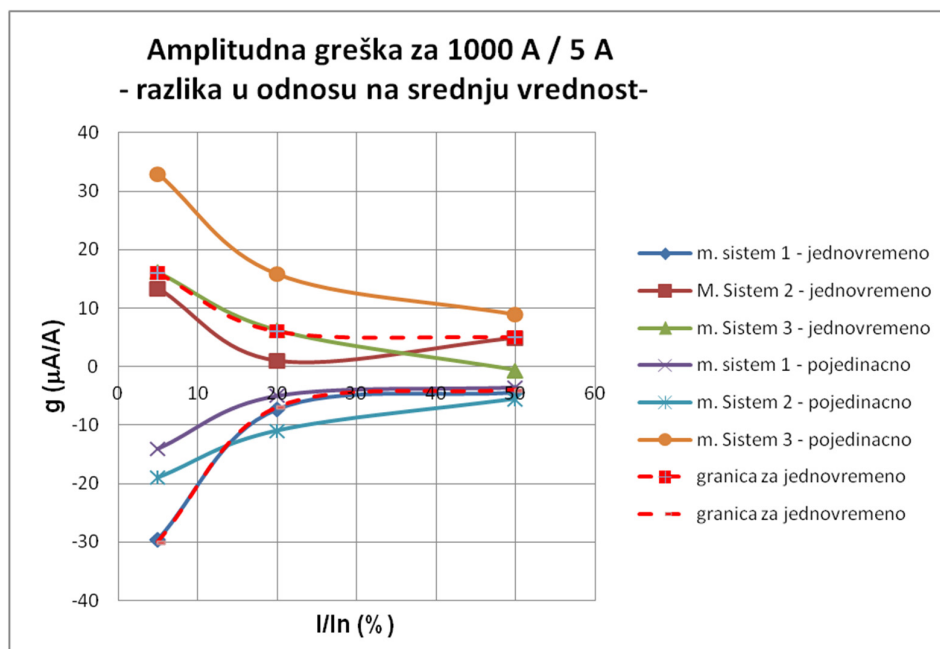
Slika 2.5.4 Razlike u merenju fazne greške ispitivanog strujnog transformatora jednovremenom uporednom metodom etaloniranja, u odnosu na srednju vrednost za sva tri merna sistema za prenosni odnos 100 A/5 A jednovremeno sa tri merna sistema

Na slikama 2.5.3 i 2.5.4 prikazane su razlike u merenju amplitudne i fazne greške u odnosu na srednju vrednost sva tri sistema. Izmerene vrednosti pokazuju da su odstupanja izmerene amplitudne greške pri jednovremenom merenju unutar granica od $\pm 30 \mu\text{A/A}$ za mernu tačku 1% I_n , odnosno manji od $\pm 15 \mu\text{A/A}$ za opseg od 5% I_n do 120% I_n . U slučaju merenja fazne greške, odstupanja su unutar granica od $\pm 12 \mu\text{rad}$ za mernu tačku 1% I_n , odnosno manji od $\pm 10 \mu\text{rad}$ za opseg od 5% I_n do 120% I_n . Dobijene vrednosti su unutar granica proširene merne nesigurnosti za amplitudnu i faznu grešku, kao što će biti pokazano u 3.5.

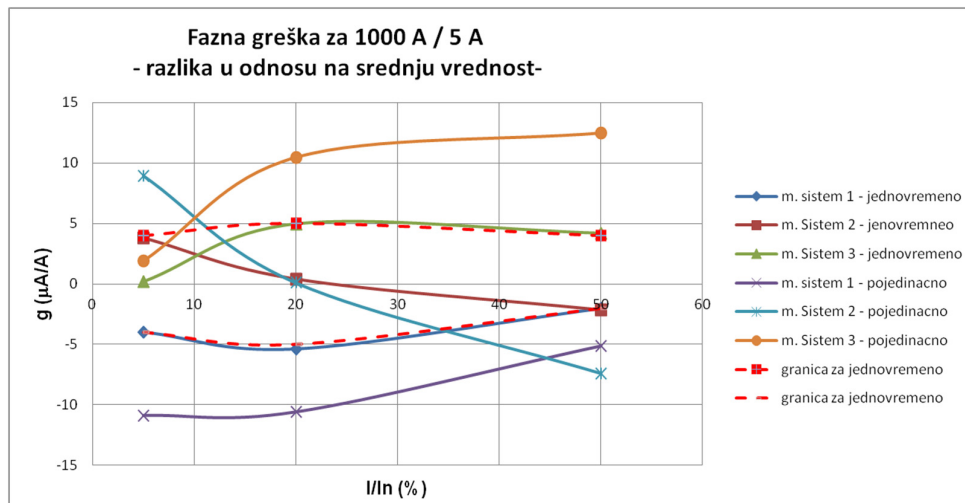
Osim za prenosni odnos 100 A/5 A, ispitivani strujni etalon etaloniran je jednovremenom uporednom metodom i za prenosne odnose 1000 A/5 A i 5 A/5 A, kako pojedinačno sa tri različite merne metode, tako i jednovremeno. Dobijeni rezultati prikazani su grafički na slikama 2.5.5 i 2.5.6 za prenosni odnos 1000 A/5 A, a na slikama 2.5.7, 2.5.8, 2.5.9, 2.5.10, 2.5.11 i 2.5.12 za prenosni odnos 5 A/5 A.

Analizom razlika pojedinačnih amplitudnih greška u odnosu na srednju vrednost primećuje se njihovo bolje slaganje kod jednovremenog uporednog etaloniranja korišćenjem tri različite metode, slika 2.5.5. Slično je i u pogledu razlika pojedinačnih faznih grešaka u odnosu na srednju vrednost, slika 2.5.6, gde su bolja slaganja takođe kod primene jednovremene uporedne metode. Na slikama 2.5.5 do 2.5.12 isprekidanom crvenom linijom nacrtane su granice odstupanja kod jednovremenog uporednog etaloniranja.

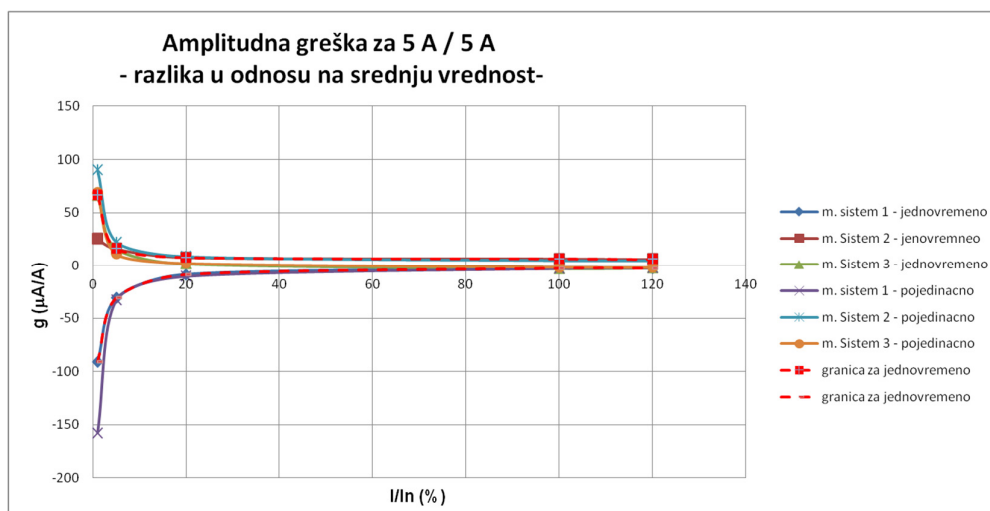
Pozitivan efekat primene metode jednovremenog uporednog etaloniranja za prenosni odnos 5 A/5 A, korišćenjem tri različite metode, uočljiv je za merne tačke 1% I_n i 5% I_n , slika 2.5.8, kod merenja amplitudne greške, iz istih razloga o kojima je bilo reči u poglavlju 2.2. Za merne tačke 20% I_n , 100% I_n i 120% I_n , slika 2.5.9, ovaj efekat se gubi, tj. skoro da nema razlike u rezultatima pojedinačnih i jednovremenih merenja. Kod merenja fазne greške na osnovu analize razlika u odnosu na srednju vrednost, prednost jednovremenog uporednog etaloniranja u poređenju sa pojedinačnim merenjima nije toliko izražena. Međutim, ne treba zaboraviti da, kada se dobijenim rezultatima pridoda i proračunata merna nesigurnost, jednovremena metoda svakako dobija prednost, poglavlje 3.



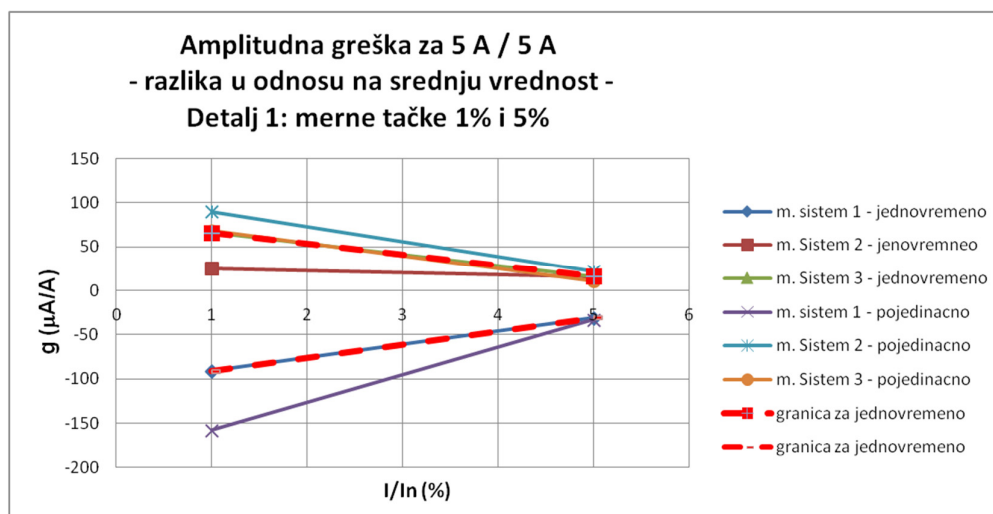
Slika 2.5.5 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 5% do 50% naznačene struje



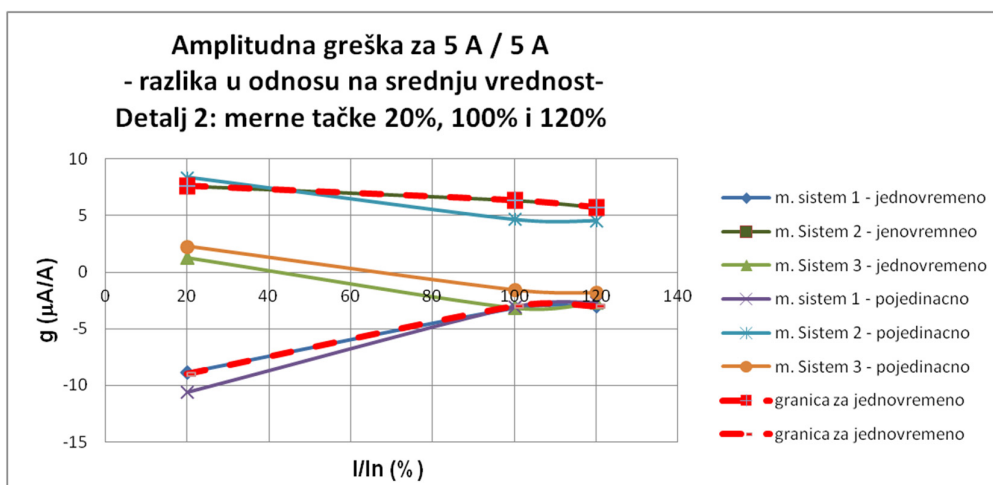
Slika 2.5.6 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 5% do 50% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem



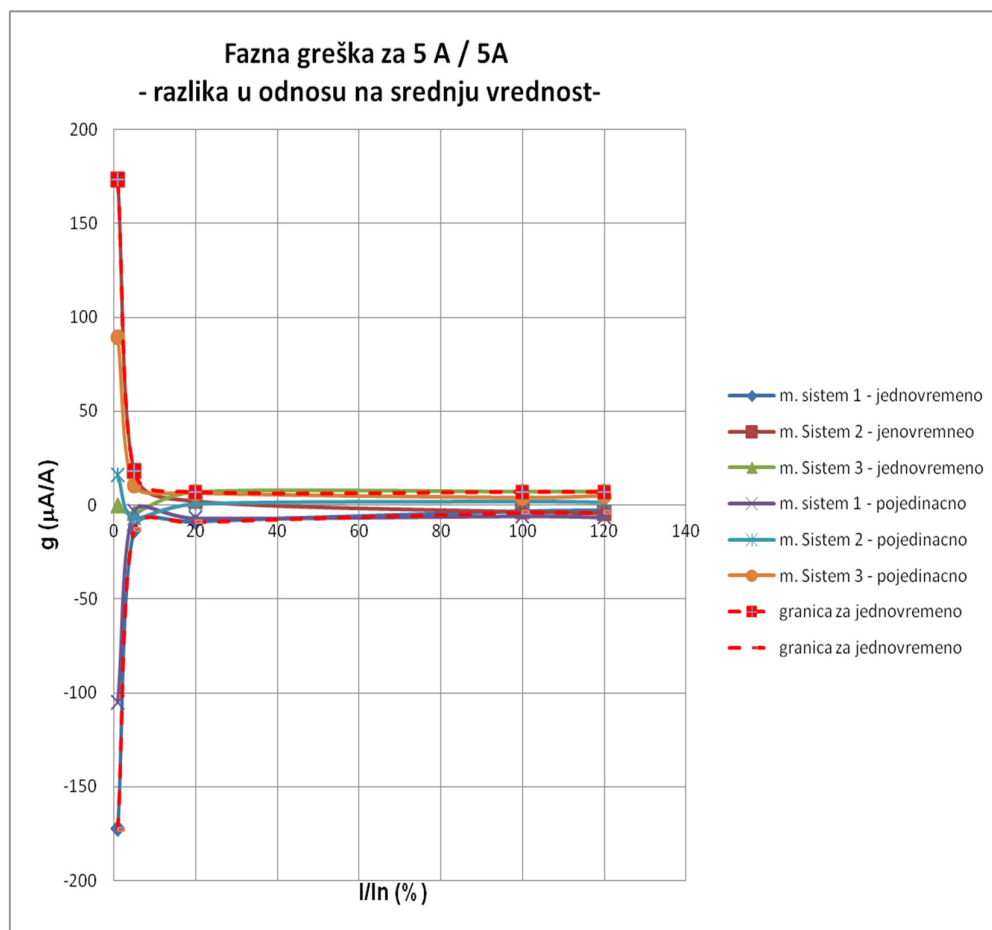
Slika 2.5.7 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem



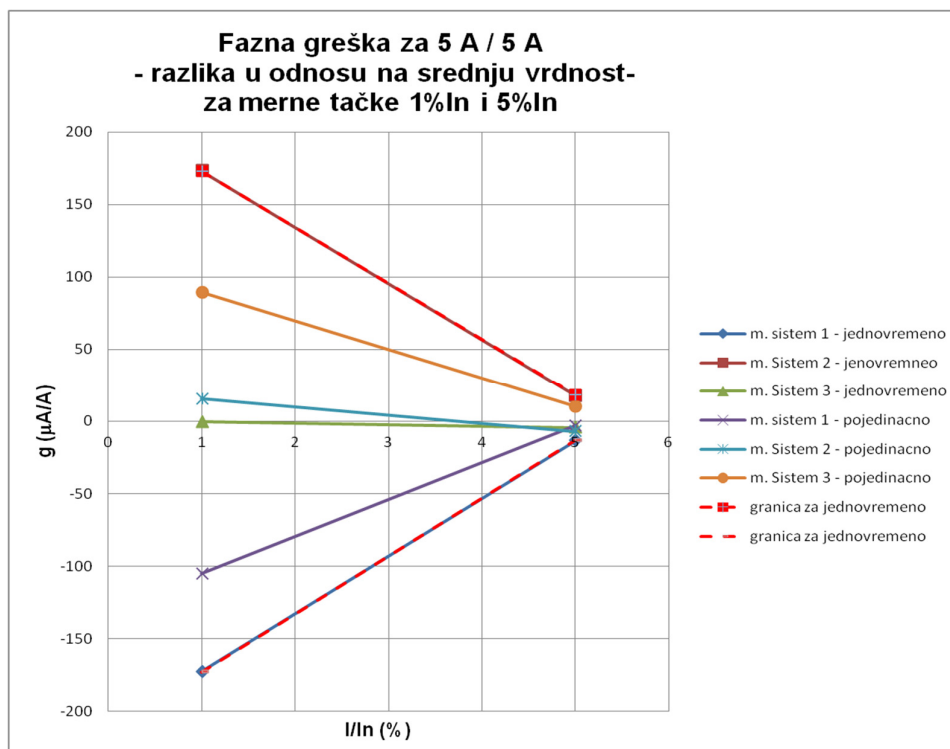
Slika 2.5.8 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 5% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem



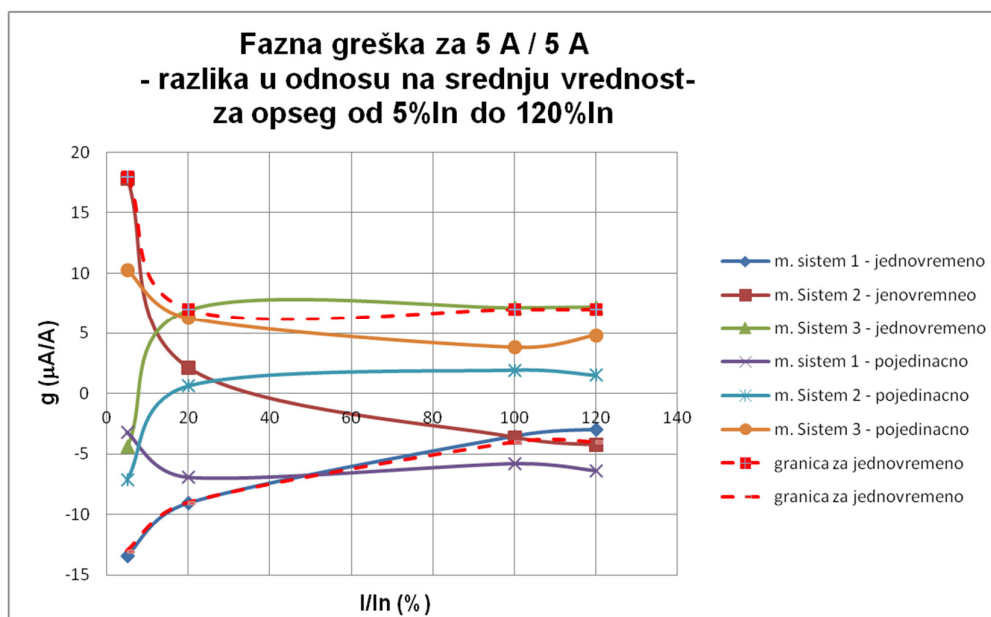
Slika 2.5.9 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 20% do 120% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem



Slika 2.5.10 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem



Slika 2.5.11 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 5% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem



Slika 2.5.12 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem

3. ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI

Ispitivanje tačnosti i etaloniranje strujnih mernih transformatora, kao što je prikazano u poglavlju 2, može se obaviti na više načina, primenom različitih mernih metoda i mernih uređaja [4, 26]. U poglavlju 2. je objašnjeno da i ispitivanje tačnosti i etaloniranje podrazumevaju identičan postupak merenja amplitudne i fazne greške strujnog mernog transformatora.

Ispitivanje tačnosti u laboratorijama proizvođača prilikom prvog pregleda i komadnih ispitivanja i pri planskoj i neplanskoj kontroli mernih transformatora u pogonu ima za cilj proveru usaglašenosti izmerenih grešaka sa deklarisanom klasom tačnosti. Radi pravilne i tačne ocene usaglašenosti strujnih mernih transformatora sa zahtevima standarda i propisa [9, 10], neophodno je izmerenim vrednostima grešaka pridodati proračunatu mernu nesigurnost [115, 116].

Procena merne nesigurnosti kod etaloniranja radnih i referentnih etalon strujnih transformatora ima za cilj što bolje određivanje njihovih amplitudnih i faznih grešaka, čime se jasnije definiše i njihova dalja primena.

Nezavisno od primenjene merne metode i uređaja, ispitivanje tačnosti i etaloniranje strujnih mernih transformatora sprovodi se saglasno međunarodnim i nacionalnim standardima iz oblasti mernih transformatora pri određenim vrednostima ispitne struje i opterećenja [9, 10]. Obrada rezultata merenja obuhvata i procenu merne nesigurnosti prema matematičkom modelu za konkretnu mernu metodu i primenjene merne uređaje. Metrološki je preporučljivo da merna nesigurnost bude najmanje tri do pet puta bolja od grešaka ispitivanog mernog transformatora. Kod ispitivanja tačnosti strujnih mernih transformatora standardnih klasa tačnosti (0.1, 0.2 i 0.5) to se može obezbediti bez većih problema [9]. Međutim, kod etaloniranja etalon transformatora, odnosno njihove interkomparacije, procena merne nesigurnosti postaje metrološki složenija [103]. Zahtevi za mernu nesigurnost amplitudne i fazne greške reda $\mu\text{A/A}$ (μrad), odnosno ppm, zahtevaju složenije analize i istraživanja uticaja veličina višeg reda, kao i primenu novih mernih metoda i postupaka u otklanjanju, smanjenju ili kompenzaciji greške merenja [37]. Dosadašnje iskustvo u etaloniranju i komparaciji etalon strujnih transformatora pokazuje da su izvori merne nesigurnosti i u primenljivosti referentnih uslova ispitivanja [27, 96].

3.1 Uticajne veličine na grešku merenja

U poglavlju 1.1 opisani su konstruktivni, tehnološki i eksploatacioni parametri koji definišu grešku merenja strujnih mernih transformatora. Međutim, tek merenjem, odnosno ispitivanjem tačnosti strujnog mernog transformatora, moguće je odrediti prave (tačnije) vrednosti grešaka.

U prethodnim poglavljima prikazane su različite metode i postupci za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Pokazano je, takođe, da bez obzira na mernu metodu ispitivanje tačnosti podrazumeva sistem mernih uređaja: etalon strujni transformator (strujni komparator), uređaj za merenje amplitudne i fazne greške, strujno opterećenje i izvor primarnih struja. U zavisnosti od samog ispitivanog transformatora, njegove klase tačnosti, ispitni merni sistemi imaju bolje ili lošije metrološke karakteristike. Čak i u slučaju ispitivanja tačnosti, odnosno etaloniranja etalon strujnih transformatora visokih klasa tačnosti, kada se postupak merenja

obavlja mernim sistemima izuzetno dobrih metroloških karakteristika, nemoguće je postići idealne uslove ispitivanja.

U najširem smislu, izmerena vrednost grešaka (amplitudne i fazne) strujnih mernih transformatora zavisi, u većoj ili manjoj meri, od:

- greške primenjenog etalon strujnog transformatora,
- greške mernog uređaja i njegove rezolucije
- kapacitivnih struja između namotaja
- mrežnog napajanja,
- vrednosti referentnog opterećenja,
- promene referentne struje,
- promene temperature ambijenta,
- konfiguracije primarnih veza,
- stranih elektromagnetnih polja i
- remanentne indukcije u magnetnom kolu ispitivanog i etalon transformatora.

3.1.1 Uticaj greške primenjene merne aparature

Uticaj greške primenjene merne aparature, odnosno njenih komponenata, posebno etalon strujnog transformatora i mernog instrumenta za određivanje tačnosti, može se značajno smanjiti, u nekim slučajevima i zanemariti ako se vodi računa da sopstvene greške ovih komponenti mernog sistema budu najmanje tri do pet puta manje od grešaka ispitivanog mernog transformatora. U slučaju ispitivanja tačnosti klasičnih mernih transformatora i etalon strujnih transformatora nižih klasa tačnosti ovaj uslov je relativno lako ostvariti. Tada greške etalon transformatora i mernog uređaja u konačnom rezultatu merenja učestvuju kao komponente procenjene merne nesigurnosti.

U slučaju etaloniranja etalon strujnih transformatora visokih klasa tačnosti čije se sopstvene greške približavaju greškama primenjenog etalon transformatora, ili su čak istog reda veličine, greške referentnog etalona direktno utiču na grešku merenja. U takvim situacijama greška referentnog etalona često se uzima kao korekcija greške ispitivanog etalona.

Merni uređaj kojim se mere amplitudna i fazna greška utiče kako sopstvenom greškom merenja, tako i rezolucijom očitavanja izmerene vrednosti grešaka. Navedeni uticaji mernog uređaja iskazuju se kroz mernu nesigurnost rezultata merenja.

3.1.2 Uticaj mrežnog napajanja

Uticaj mrežnog napajanja prisutan je posebno pri merenju malih vrednosti naznačenih struja, naročito pri mernim tačkama 1% I_n i 5% I_n . Nastaje kao posledica izobličenosti napona, međunamotajne kapacitivnosti, neadekvatnog uzemljenja i prisustva jednosmerne komponente struje kod elektronskih regulisanih izvora napajanja. Uticaj mrežnog napajanja dolazi do izražaja najviše kod etaloniranja strujnih etalon transformatora viših i visokih klasa tačnosti čije su greške reda nekoliko desetina ili samo nekoliko ppm ($\mu A/A$, odnosno μrad). Da bi se u toku merenja ostvario zadovoljavajući odnos merni signal – šum, merenja se često izvode pri frekvencijama različitim od mrežne. Tako se za frekvenciju mreže 50 Hz, merenja sprovedu na frekvencijama 53 Hz, 55 Hz i više.

3.1.3 Uticaj temperature

O uticaju temperature ambijenta nešto je već rečeno u okviru razmatranja mernih metoda. Tako uticaj temperature kod klasične diferencijalne metode [53, 78] ima karakter greške drugog reda, za razliku od klasične kompenzacione metode gde je ta greška prvog reda [48]. Kod savremenih mernih uređaja temperatura najviše utiče na elektronske komponente elektronskih sklopova i ovaj uticaj obuhvaćen je ofsetom ili driftom pojedinih elektronskih komponentata kao što su: operacioni pojačavači i pasivni elektronski elementi otpornici i kondenzatori. Adekvatnim izborom elemenata i primenom kompenzacije i kalibracionog postupka prilikom postupka ispitivanja tačnosti strujnih transformatora, može se postići da ovaj uticaj bude manji od 0,05% u celom opsegu radnih temperatura.

Temperatura posredno utiče na ispitivanje tačnosti (greške višeg reda) preko promene referentnog opterećenja, kao i preko promene unutrašnjeg otpora strujnog etalon transformatora i ispitivanog transformatora. O promeni referentnog opterećenja sa temperaturom može se vrlo precizno govoriti, ali o uticaju ove promene na grešku ispitivanog transformatora mnogo teže, jer ona zavisi od konstruktivnih karakteristika konkretnog ispitivanog mernog transformatora. Prema dosadašnjem iskustvu u ovoj oblasti, procenjuje se da ovaj uticaj nije veći od 0,0005%/°C, odnosno 0,001 min/°C. Slično važi i za uticaj temperature na promenu unutrašnje impedanse ispitivanog i etalon transformatora [83]. U kontrolisanim laboratorijskim uslovima ambijenta, u kojima se sprovode etaloniranje, ovaj uticaj se može zanemariti.

3.1.4 Uticaj elektromagnetnog polja

Izvori elektromagnetnog polja mogu biti unutrašnji i spoljašnji. Da bi se sagledao uticaj elektromagnetnog polja treba razmotriti izvore, interakcijske veze i mehanizme uticaja.

Unutrašnji izvori elektromagnetskog polja su izvori za napajanje kola potrebnim visokim naponom ili velikim primarnim strujama, etalon transformatori, mrežni transformatori, induktiviteti kod opterećenja, razne sklopke i prekidači, pa i sami uređaji za merenje grešaka strujnog transformatora.

Spoljni izvori elektromagnetnih polja mogu biti vrlo različiti, kako po prirodi nastanka, tako i po karakteristikama. Vodovi visokog napona i velikih struja, atmosferska pražnjenja, razni telekomunikacioni sistemi i dr. ubrajaju se u spoljne izvore elektromagnetnog polja [83]. Putevi delovanja elektromagnetnih polja na merni sistem su: galvanske (otporne) sprege, kapacitivne i induktivne sprege, talasna modulacija i zračenje. U slučaju razmatranih uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora od interesa su svi navedeni putevi.

Mnoge od ovih uticaja moguće je izbeći ili svesti na minimum pravilnom konfiguracijom merne šeme i uzemljavanjem. Kod preciznih merenja amplitudne i fazne greške strujnih mernih transformatora reda ppm ($\mu\text{A}/\text{A}$, odnosno μrad), kakva se sprovode prilikom međunarodnih interkomparacija etalon strujnih transformatora, naročito prilikom poređenja primarnih struja većih od 1000 A, dimenzije primarnog kola i dispozicija elemenata merne šeme se zbog toga unapred definišu [101, 102, 110].

3.1.5 Uticaj induktivnih sprega

Smanjenje induktivnih sprega postiže se izbegavanjem većih strujnih petlji i dislokacijom merne opreme od izvora elektromagnetskih smetnji. U tom smislu primenjuje se upređanje veza radi smanjenja induktivnosti. I kapacitivne i induktivne sprege smanjuju se sa

rastojanjem. Zbog toga se elektronski merni uređaji obavezno udaljavaju od jakih izvora električnog i magnetnog polja. Prilikom ispitivanja/etaloniranja strujnih mernih transformatora primarnih struja većih od 1000 A na ovaj efekat posebno treba obratiti pažnju.

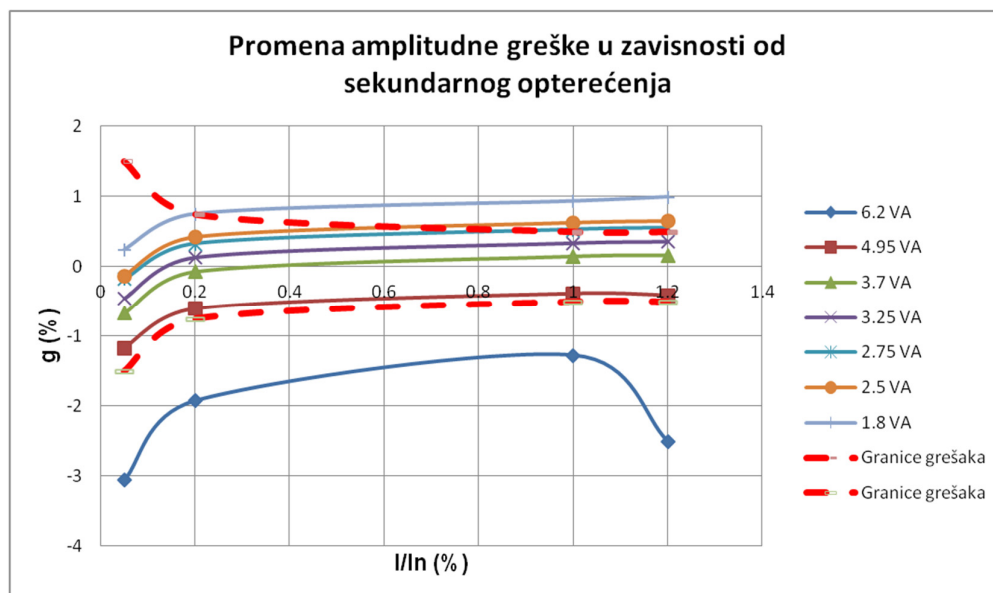
3.1.6 Uticaj uzemljenja

Uzemljenje je jedna od mera koja se obavezno primenjuje pri ispitivanju tačnosti strujnih mernih transformatora, kako zbog sigurnosti rada, tako i zbog smanjenja greške merenja. Samo uzemljenje treba da bude izvedeno po odgovarajućim standardima [83]. Uzemljuju se skoro svi elementi merne šeme: merni uređaj, etalon transformator, ispitivani transformator, napojni i regulacioni transformator, opterećenje. Svi nabrojani elementi merne šeme imaju na sebi izvedena priključna mesta za uzemljenje. Ono o čemu treba voditi računa je da se sva uzemljenja priključuju zvezdasto, tj. iz jedne tačke, i da se to ostvaruje provodnicima preseka od najmanje 2,5 mm². Osim nabrojanih elemenata merne šeme, kod kojih se uzemljuju njihovi metalni delovi, magnetna jezgra i kućišta, uzemljuju se i određene tačke u primarnom i sekundarnom mernom kolu. U sekundarnom kolu to je već konstruktivno izvedeno na samom mernom uređaju. U primarnom kolu, koje se posebno uzemljuje, tačka uzemljenja se usaglašava sa uzemljenjem u sekundarnom kolu. Uzemljavanjem primarnih kola eliminiše se uticaj kapacitivnih struja između namotaja transformatora. Pravilo je da tačka uzemljenja ne treba da bude na vezi koja spaja etalon i ispitivani transformator. U suprotnom, stvorili bi se uslovi za eventualnu nejednakost primarnih struja kroz ispitivani i etalon transformator, a kao posledica kapacitivnih struja koje se zatvaraju preko ovog uzemljenja.

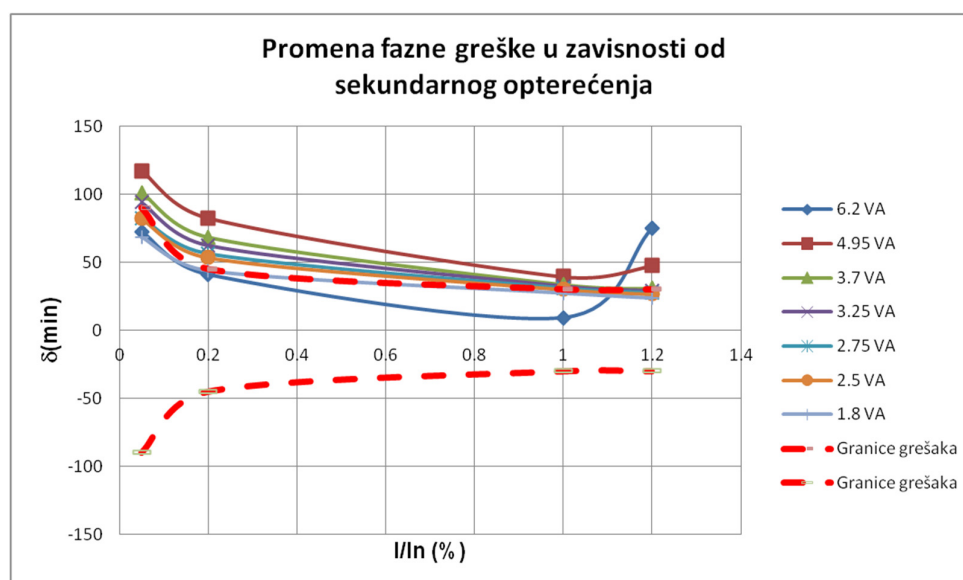
3.1.7 Uticaj sekundarnog opterećenja

Na sekundarno opterećenje ispitivanog mernog transformatora treba obratiti posebnu pažnju. Pored referentnog opterećenja, uvek treba ispitati koliko ispitivani transformator još dodatno opterećuju merni uređaj, a naročito priključne veze i kontakti [43]. Uticaj sekundarnog opterećenja veoma je značajan kod strujnih mernih transformatora naznačenih snaga $\leq 5\text{ VA}$ [118].

U cilju procene uticaja sekundarnog opterećenja na grešku strujnog mernog transformatora u Laboratoriji za ispitivanje i etaloniranje Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla" sproveden je niz eksperimenata [43, 118]. Na primeru jednog klasičnog strujnog transformatora klase 0.5, prenosnog odnosa 100 A/5 A i male naznačene snage od svega 3 VA prikazan je uticaj promene sekundarnog opterećenja na njegovu amplitudnu i faznu grešku, slika 3.1.1 i 3.1.2. Vidi se da samo promena od 1 VA, koliko najčešće u ukupnom sekundarnom opterećenju doprinosi merni uređaj ili neadekvatan presek i dužina sekundarnih veza, može da, u pogledu grešaka, transformator izvede iz klase tačnosti [43]. Zbog toga je preporučljivo uvek proveriti napon na sekundarnim priključcima ispitivanog transformatora pri 100% naznačene struje. Navedeni efekti su izraženiji kod strujnih mernih transformatora naznačene sekundarne struje od 5 A.



Slika 3.1.1 Promena amplitudne greške u zavisnosti od vrednosti sekundarnog opterećenja za strujni transformator klase 0.5, prenosnog odnosa 100 A/5 A i naznačene snage 3 VA [43]



Slika 3.1.2 Promena fazne greške u zavisnosti od vrednosti sekundarnog opterećenja za strujni transformator klase 0.5, prenosnog odnosa 100 A/5 A i naznačene snage 3 VA [43]

Osim rezultata prikazanih na slikama 3.1.1 i 3.1.2, ponašanje amplitudne i fazne greške u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara prikazano je i na slikama 3.1.3 i 3.1.4. Eksperimentalna istraživanja obavljena su i na strujnim mernim transformatorima klase tačnosti 0.5 i prenosnog odnosa 200 A/5 A ali različitih naznačenih snaga: 3 VA, 15 VA i 45 VA [43]. I u ovom slučaju analiziran je uticaj pretpostavljenog dodatnog sekundarnog opterećenja od 1 VA na vrednost amplitudne i fazne greške ispitivanih transformatora. Strujne

i fazne greške ispitivanih transformatora merene su pri 5%, 20%, 100% i 120% naznačene struje. Strujni merni transformatori naznačenih snaga 15 VA i 45 VA ispitivani su pri punom i 1/4 naznačenog opterećenja, dok je strujni merni transformator naznačene snage 3 VA ispitivan detaljnije za opterećenja u opsegu od 1 VA do 4 VA.

Analizom rezultata merenja i prikazanih grafika može se zaključiti da je funkcionalana veza amplitudne i fazne greške i ispitnog opterećenja praktično linearna, što je u saglasnosti sa jednačinom (1.1.2). Gradijenti promene amplitudne i fazne greške najveći su za najmanje vrednosti ispitne struje, slike 3.1.3 i 3.1.4. Gradijent promene amplitudne greške sa opterećenjem za 5% naznačene struje iznosi oko 0,3%/VA, a za vrednost naznačene struje 100%, približno 0,2%/VA. Gradijent promene fazne greške sa opterećenjem pri 5% naznačene struje iznosi približno 13min/VA, a za naznačenu struju (100%) približno 4min/VA. Kod strujnih transformatora većih naznačenih snaga, gradijenti promene amplitudne i fazne greške sa opterećenjem su srazmerno manji. Na slikama 3.1.5 i 3.1.6 prikazane su promene amplitudne i fazne greške sa opterećenjem, pri 5% naznačene struje i za strujne transformatore različitih naznačenih snaga.

I u slučaju sekundarnog opterećenja, etaloniranju etalon transformatora visokih klasa tačnosti treba pristupiti sa posebnom pažnjom, jer su ovakvi etaloni najčešće projektovani za sekundarna opterećenja od samo nekoliko VA. Zbog toga u mernim šemama za njihovo etaloniranje često nije ni uključeno referentno strujno opterećenje, jer su veze i merni uređaj dovoljno opterećenje njihovih sekundarnih kola.

3.1.8 Uticaj referentne struje

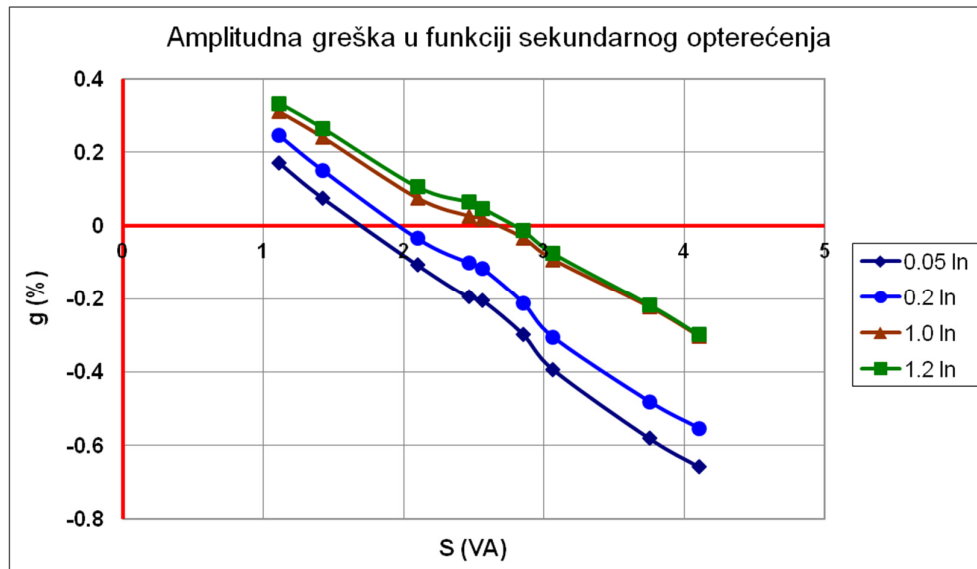
Standardima i propisima definisane su ispitne merne tačke i za amplitudnu i za faznu grešku u odnosu na naznačenu struju. Istorijski gledano, kod prvih standardizovanih ispitivanja tačnosti strujnih transformatora, a u skladu s tada zastupljenim metodama ispitivanja tačnosti [48, 53], najmanja ispitna merna tačka bila je pri 10% naznačene struje. Savremena merna oprema, zasnovana na savremenim metodama ispitivanja, omogućila je da važeći standardi osim mernih tačaka 5 %, 20 %, 100% i 120 % naznačene struje obuhvate, kao obaveznu, i tačku 1% I_n kod transformatora sa proširenim osegom za klase 0.2S i 0.5S koji su sve više u primeni u obračunskim merenjima električne energije u prenosnoj i distributivnoj mreži [119]. U interkomparacijama mernih oprema za etaloniranje strujnih mernih transformatora visokih klasa tačnosti ide se još dalje, pa se tako merenja obavljaju i za mernu tačku 0.5% naznačene struje [41].

Podešavanje referentne struje koja se izražava kao procenat naznačene struje, I/I_n , takođe dolazi do izražaja kod ispitivanja strujnih transformatora pri malim vrednostima te struje. U slučaju poređenja rezultata etaloniranja strujnih etalon transformatora opšti problem uporednih mernih metoda je jednovremeno očitavanje rezultata sa dva merna uređaja u uslovima varijacije vrednosti merene veličine. U konkretnom slučaju, uređaji za ispitivanje tačnosti mernih transformatora mere u osnovi odnos sekundarnih struja ispitivanog i etalon transformatora, odnosno relativne veličine - amplitudnu i faznu grešku. Uticaj nestabilnosti mrežnog napona, odnosno ispitne struje, manifestuje se kao varijacija rezultata merenja koji su uslovljeni karakteristikama amplitudne i fazne greške etalona i ispitivanog transformatora. Ovo je direktno vezano za nelinearnu prirodu grešaka strujnog transformatora, koja se ogleda u velikom gradijentu grešaka, i amplitudne i fazne, u opsegu od 1% do 5% naznačene struje koji je i nekoliko puta veći nego pri ispitnim strujama od 20 % I_n , 100 % I_n i 120 % I_n .

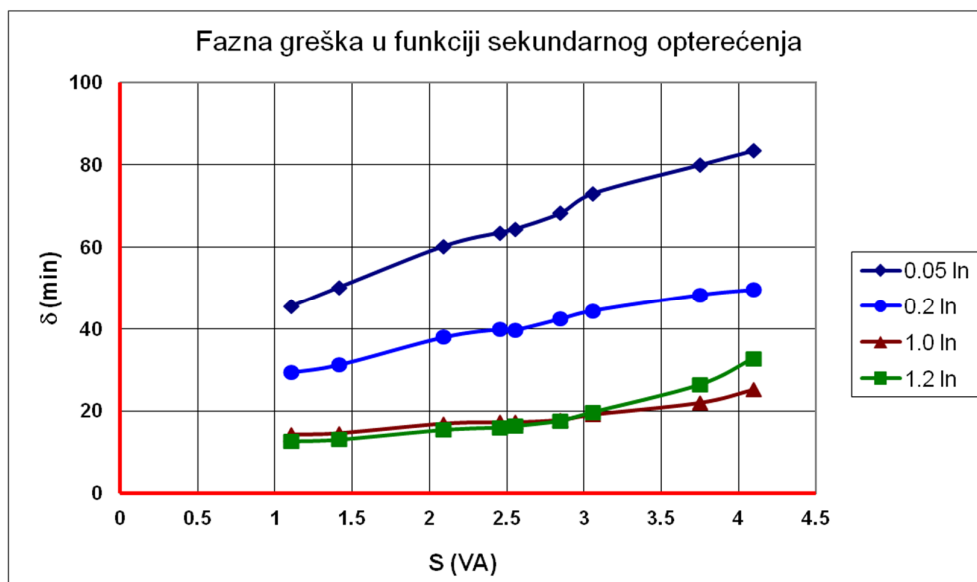
Uticaj sekundarnog opterećenja i referentne struje na kompleksnu grešku strujnog mernog transformatora uzima se u obzir kroz proračun merne nesigurnosti.

O još jednom efektu se mora voditi računa prilikom ispitivanja tačnosti strujnih mernih transformatora. U pitanju je efekat namagnećenosti jezgra, odnosno remanentne, zaostale,

magnetske indukcije. Ovaj efekat je posledica ili struje kvara, njene jednosmerne komponente (kratak spoj, zemljospoj i dr.), ili je posledica grešaka pri samom ispitivanju mernog transformatora (otvoren sekundar, preopterećenje i dr.). Usled zaostale magnetne indukcije u jezgru dolazi do povećane greške mernog transformatora. Takav transformator treba razmagnetisati. Postupak se sastoji u postepenom podizanju sekundarne struje do 120% naznačene vrednosti i potom njenim smanjivanjem do nule [7].



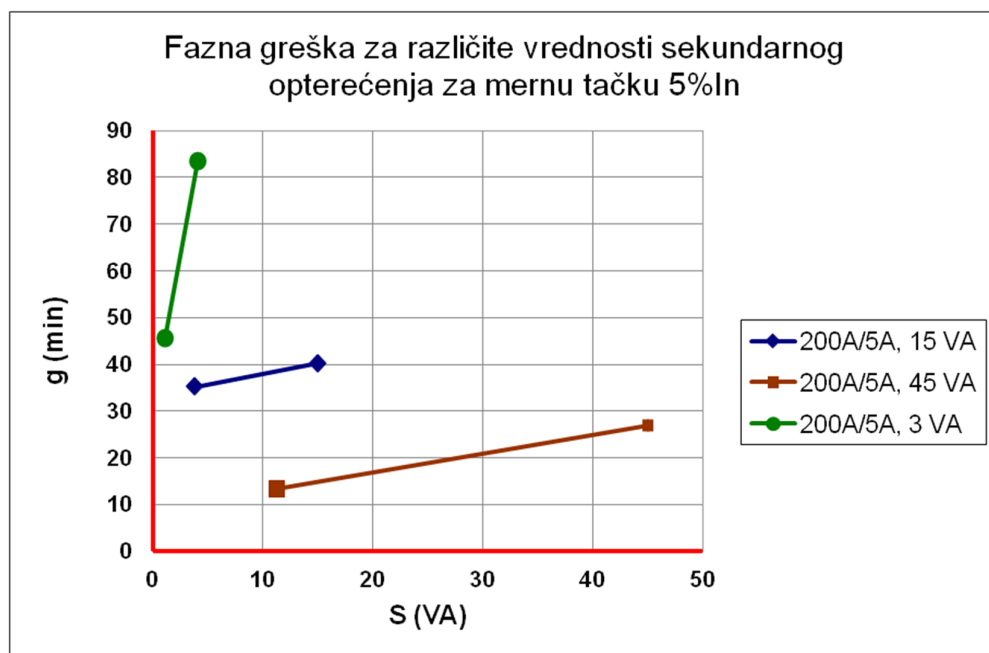
Slika 3.1.3 Amplitudna greška u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara, za merni transformator klase tačnosti 0.5, prenosnog odnosa 200 A/5 A i naznačene snage 3 VA [118]



Slika 3.1.4 Fazna greška u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara, za merni transformator klase tačnosti 0.5, prenosnog odnosa 200 A/5 A i naznačene snage 3 VA [118]



Slika 3.1.5 Amplitudna greška u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara (za mernu tačku 5% I_n), za merne transformatore klase tačnosti 0.5, prenosnog odnosa 200 A/5 A i različitih naznačenih snaga: 3 VA, 15 VA i 45 VA [118]



Slika 3.1.6 Fazna greška u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara (za mernu tačku 5% I_n), za merne transformatore klase tačnosti 0.5, prenosnog odnosa 200 A/5 A i različitih naznačenih snaga: 3 VA, 15 VA i 45 VA [118]

3.2 Uticajne veličine i procena merne nesigurnosti

Etaloniranje mernih instrumenata i uređaja koje je u skladu sa međunarodnim standardima [31, 120] zahteva određivanje merne nesigurnosti za svaki iskazani rezultat merenja. To podrazumeva detaljnu metrološku analizu uticajnih veličina na grešku merenja, a samim tim i na procenu merne nesigurnosti za svaku primenjenu mernu metodu i korišćene merne uređaje.

U skladu sa uticajima na grešku merenja strujnih transformatora navedenim u prethodnom poglavlju, kod standardnih mernih metoda za ispitivanje tačnosti (diferencijalne i metode strujnog komparatora), mogu se definisati sledeće komponente merne nesigurnosti:

1. komponenta merne nesigurnosti usled ponovljivosti rezultata merenja, odnosno standardna devijacija rezultata merenja, tip A merne nesigurnosti [32, 33, 120],
2. komponenta merne nesigurnosti usled greške etalon transformatora, odnosno merna nesigurnost sa kojom je ta komponenta merne nesigurnosti određena, tip B merne nesigurnosti [32, 33, 120],
3. komponenta merne nesigurnosti usled greške mernog uređaja, odnosno merna nesigurnost sa kojom je ta komponenta merne nesigurnosti određena, tip B merne nesigurnosti,
4. komponenta merne nesigurnosti usled rezolucije očitavanja amplitudne i fazne greške, tip B merne nesigurnosti,
5. komponenta merne nesigurnosti usled uticaja kapacitivnih struja između namotaja, tip B merne nesigurnosti,
6. komponenta merne nesigurnosti usled varijacija učestanosti mrežnog napajanja, tip B merne nesigurnosti,
7. komponenta merne nesigurnosti usled varijacija vrednosti referentnog strujnog opterećenja, tip B merne nesigurnosti,
8. komponenta merne nesigurnosti usled varijacija vrednosti referentnih struja, tip B merne nesigurnosti,
9. komponenta merne nesigurnosti usled varijacija temperature ambijenta, tip B merne nesigurnosti,
10. komponenta merne nesigurnosti usled uticaja konfiguracije primarnih veza, tip B merne nesigurnosti,
11. komponenta merne nesigurnosti usled uticaja stranih elektromagnetnih polja, tip B merne nesigurnosti,
12. komponenta merne nesigurnosti usled uticaja remanentne indukcije u magnetnom kolu ispitivanog i etalon transformatora, tip B merne nesigurnosti.

Uticaji koji se uzimaju u obzir u proračunu merne nesigurnosti prilikom etaloniranja/ispitivanja mernih transformatora različito su zastupljeni u različitim laboratorijama. Ovo zavisi ne samo od merne opreme pojedinačne laboratorije, metoda koje se koriste, već i od laboratorijskih uslova. Tako, na primer, Laboratorija za ispitivanje mernih transformatora američkog Nacionalnog metrološkog instituta - NIST, daje procenu vrednosti komponenata merne nesigurnosti kod ispitivanja tačnosti strujnih transformatora, klasa tačnosti 0.5, 0.2 i 0.1, kao što je prikazano u Tabeli 3.1 [121].

Prema podacima iz tabele 3.1, udeo navedenih komponenata (2, 3, 4, 5, 6) je vrlo značajan i prelazi 80% ukupne kombinovane merne nesigurnosti. Samo eliminacijom ovih komponenti merna nesigurnost se poboljšava za više od dva puta.

Kod etaloniranja strujnih etalon transformatora visokih klasa tačnosti, navedene komponente merne nesigurnosti su izvesno manje, ali su u relativnom smislu i dalje značajne.

Tako se u prikazu jednog međulaboratorijskog poređenja (interkomparacije) mernih sistema za ispitivanje tačnosti strujnih etalon transformatora daje procena komponenti merne nesigurnosti kao što je dato u Tabeli 3.2 [102].

Tabela 3.1: Komponente merne nesigurnosti kod ispitivanja/ etaloniranja strujnih mernih transformatora u NIST-u [121]

Redni br.	Izvor merne nesigurnosti	Za amplitudnu grešku ($\mu\text{A/A}$)	Za faznu grešku (μrad)
1.	Magnetizacija jezgra	Od 5 do 15	Od 16 do 48
2.	Strujno opterećenje	6	19
3.	Promena temperature ispitivanog strujnog transformatora	6	19
4.	Referentna struja	3	9
5.	Uticaj položaja primarnog provodnika	20	6
6.	Uticaj elektromagnetnih polja	10	10
	Kombinovana merna nesigurnost	Od 25 do 28	Od 35 do 57

Navedene komponente merne nesigurnosti pod brojevima 4, 6, 7, 8, 9 date u tabeli 3.2 znatno su manje u odnosu na vrednosti komponenti merne nesigurnosti iz tabele 3.1, što je razumljivo, jer je u pitanju međulaboratorijsko poređenje etalon transformatora visokih klasa tačnosti. Udeo ovih komponenti u ukupnoj mernoj nesigurnosti u ovom slučaju je relativno manji. Međutim, efekti relativnog poboljšanja merne nesigurnosti nisu zanemarljivi.

Tabela 3.2: Komponente merne nesigurnosti procenjene za interkomparaciju nacionalnih metroloških instituta Kanade (NRC) i Južne Koreje (KRIS) [102]

Redni br.	Izvor merne nesigurnosti	Za amplitudnu grešku ($\mu\text{A/A}$)	Za faznu grešku (μrad)
1.	Ponovljivost merenja	1.7	2.9
2.	Uticaj etalon strujnog transformatora	7.0	7.0
3.	Linearnost strujnog komparatora	5.8	5.8
4.	Strujno opterećenje	1.0	1.0
5.	Rezolucija strujnog komparatora	0.3	0.1
6.	Uticaj referentne struje na ispitivani etalon transformator	zanemarljiva	0.2
7.	Uticaj frekvencije na ispitivani etalon transformator	zanemarljiva	0.1
8.	Promena temperature ispitivanog etalon transformatora	zanemarljiva	0.1
9.	Konfiguracija primarnih veza	3.0	2.9
	Kombinovana merna nesigurnost	10	10

Uticaj kapacitivnih struja između namotaja ispitivanog i etalon transformatora na rezultate merenja amplitudne i fazne greške nije specificiran ni u tabeli 3.1, ni u tabeli 3.2. Realno, on je prisutan i značajniji je za manje vrednosti naznačenih primarnih struja ($<10\text{ A}$). Uticaj

kapacitivnih struja zavisi od niza faktora: sistema napajanja, uzemljenja primarnog i sekundarnog kola, ispitnog opterećenja, a pre svega od međunavojne kapacitivnosti, odnosno kapacitivnosti namotaja prema masi etalona i ispitivanog strujnog transformatora. Brižljivim uzemljavanjem pojedinih tačaka merne šeme ovaj uticaj se može zanemariti, što je u prikazanim primerima očigledno sprovedeno.

Upoređivanjem tabela 3.1 i 3.2, primećuje se da su u slučaju interkomparacije neki izvori merne nesigurnosti značajno smanjeni, a da se uticaji referentnog etalon transformatora i mernog uređaja ne mogu zanemariti. U slučaju interkomparacije KRIS-NRC, tabela 3.2, kombinovana merna nesigurnost je svedena na manje od polovine merne nesigurnosti koju daje NIST za ispitivanje klasičnih strujnih mernih transformatora, tabela 3.1.

Gore spomenuti uticaji i njima odgovarajuće komponente merne nesigurnosti, u najširem smislu reči, odnose se kako na ispitivanja tačnosti pojedinačnim mernim metodama, tako i na primenu jednovremenog ispitivanja korišćenjem dve ili više različitih mernih metoda, odnosno mernih sistema.

3.3 Matematički model grešaka merenja

Metrološka analiza polazi od matematičkog modela greške primenjene merne metode i uređaja, kao i uticajnih veličina, na sam proces merenja.

Ispitivanje klase tačnosti strujnih mernih transformatora i njihovo etaloniranje u Laboratoriji Instituta obavlja se mernom opremom koja se zasniva na diferencijalnoj metodi i na metodi kompenzovanog strujnog komparatora [68, 58].

Merenje amplitudne greške strujnih transformatora po diferencijalnoj mernoj metodi ili metodi kompenzovanog strujnog komparatora, kada se svaka od metoda sprovodi zasebno, može se opisati sledećim matematičkim izrazom [122]:

$$g_M = g_T + g_{RE} + \Delta g_U + \Delta g_{U-rez} + \Delta g_{Opt} + \Delta g_{Iref} \quad (3.1)$$

gde su:

g_M - merena vrednost amplitudne greške ispitivanog strujnog transformatora

g_T - amplitudna greška ispitivanog etalon transformatora, (srednja vrednost $N \geq 10$ očitavanja) izmerena na mernom uređaju za ispitivanje tačnosti mernih transformatora,

g_{RE} - amplitudna greška referentnog strujnog etalon transformatora,

Δg_U - greška merenja amplitudne greške uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora,

Δg_{U-rez} - greška usled rezolucije uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora,

Δg_{Opt} - greška usled uticaja strujnog opterećenja i

Δg_{Iref} - greška usled merenja referentne struje.

Slično kao u slučaju amplitudne greške, merenje fazne greške strujnih transformatora opisano je sledećim izrazom:

$$\delta_M = \delta_T + \delta_{RE} + \Delta \delta_U + \Delta \delta_{(U-rez)} + \Delta \delta_{Opt} + \Delta \delta_{Iref} \quad (3.2)$$

gde su:

δ_M - merena vrednost fazne greške ispitivanog strujnog transformatora,

δ_T - fazna greška ispitivanog strujnog etalon transformatora (srednja vrednost $N \geq 10$ očitavanja), izmerena na mernom uređaju za ispitivanje tačnosti mernih transformatora,

δ_{RE} - fazna greška referentnog etalon transformatora,

$\Delta \delta_U$ - greška merenja fazne greške uređajem za ispitivanje tačnosti mernih transformatora,

$\Delta\delta_{U\text{-rez}}$ - greška usled rezolucije primenjenog uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora,

$\Delta\delta_{\text{Opt}}$ - greška usled uticaja strujnog opterećenja i

$\Delta\delta_{\text{lref}}$ - greška usled merenja referentne struje.

Kao što se iz jednačina (3.1) i (3.2) vidi, izvori merne nesigurnosti su različiti i višestruki.

3.3.1 Komponente merne nesigurnosti kod merenja amplitudne greške

Komponente merne nesigurnosti kod merenja amplitudne greške za metode merenja, uređaje i uslove ispitivanja u Laboratoriji Instituta su sledeće [122].

1) Merna nesigurnost usled ponovljenih merenja $u_1 = u(g_M)$ – merna nesigurnost tip A, Gausove (normalne) raspodele, sa $n-1$ stepeni slobode, gde je $n \geq 10$. Izražava se kao standardna, odnosno eksperimentalna standardna devijacija amplitudne greške. Određuje se na sledeći način:

- Merenje se ponavlja n (najmanje 10) puta u svakoj mernoj tački.
- Na osnovu najmanje n merenja izračunava se srednja vrednost amplitudne greške ispitivanog transformatora prema formuli:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (3.3)$$

- Zatim se izračunava standardna devijacija uzorka, σ , prema formuli:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (3.4)$$

gde su:

n – broj ponovljenih merenja (najmanje 10 merenja),

x_i – izmerena vrednost i -tog merenja, i

μ – srednja vrednost n merenja (najmanje 10 merenja)

- Eksperimentalna standardna devijacija uzorka je pozitivna vrednost kvadratnog korena iz jednačine (3.4), odnosno pozitivna vrednost standardne devijacije koja se računa prema jednačini (3.4).

2) Merna nesigurnost usled amplitudne greške referentnog etalona $u_2 = u(g_{RE})$ - merna nesigurnost tip B, pravougaone raspodele, sa stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Uzima se vrednost greške deklarisanе od strane proizvođača.
- Ova vrednost se deli sa $\sqrt{3}$ i predstavlja mernu nesigurnost usled greške referentnog etalona.
- U slučaju kada su u izveštaju o etaloniranju referentnog etalona obuhvaćene i ispitne tačke koje su od interesa za ispitivani instrument, može se uzeti vrednost proširene merne nesigurnosti iz poslednjeg sertifikata, odnosno izveštaja o

etaloniranju navedenog referentnog etalon transformatora, podeljene koeficijentom proširenja koji je dat u istom izveštaju.

3) Merna nesigurnost usled greške merenja amplitudne greške uređajem za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, $u_3 = u(\Delta g_U)$ - merna nesigurnost tip B, pravougaone raspodele sa stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Uzima se vrednost greške merenja amplitudne greške, koja je deklarirana od strane proizvođača.
- Ova vrednost se deli sa $\sqrt{3}$ i predstavlja mernu nesigurnost usled greške merenja amplitudne greške uređajem za ispitivanje tačnosti mernih transformatora.
- U slučaju kada su u izveštaju o etaloniranju referentnog mernog uređaja obuhvaćene i ispitne tačke koje su od interesa za ispitivani strujni transformator, može se uzeti i vrednost proširene merne nesigurnosti iz poslednjeg sertifikata, odnosno izveštaja o etaloniranju navedenog referentnog uređaja, podeljene koeficijentom proširenja koji je dat u istom izveštaju.

4) Merna nesigurnost usled rezolucije uređaja ispitivanje tačnosti mernih transformatora pri merenju amplitudne greške, $u_4 = u(\Delta g_{U-rez})$ - merna nesigurnost tip B, pravougaone raspodele sa stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Ako je a_1 rezolucija pri merenju amplitudne greške mernog uređaja, tada je odgovarajuća komponenta merne nesigurnosti data izrazom:
$$u(\delta g_{U-rez}) = a_1 / 2\sqrt{3}$$

5) Merna nesigurnost usled uticaja priključenog strujnog opterećenja (tereta) u sekundarnom kolu $u_5 = u(\Delta g_{Opt})$ - merna nesigurnost tip B pravougaone raspodele, sa stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Najčešće se uzima vrednost greške deklarirane od strane proizvođača. Za strujno opterećenje ova greška najčešće iznosi $\pm 3\%$. Za male vrednosti strujnog opterećenja od 1 VA do 3 VA, u zavisnosti od toga koliko sekundarno kolo ispitivanog strujnog transformatora i priključne veze i spojevi opterećuju sam uređaj za ispitivanje tačnosti, često nije neophodno u sekundarno kolo priključivati referentno strujno opterećenje (teret). Iskustveno je potvrđeno da se i u ovom slučaju može računati sa greškom od približno 3% koja potiče od priključenog opterećenja.
- Ova vrednost se deli sa $\sqrt{3}$ i predstavlja komponentu merne nesigurnosti usled greške opterećenja i iznosi $u_5 = u(\delta g_{a Opt})$
- U slučaju kada su u izveštaju o etaloniranju referentnog opterećenja obuhvaćene i ispitne tačke koje su od interesa za ispitivani strujni transformator, može se uzeti vrednost proširene merne nesigurnosti iz poslednjeg sertifikata, odnosno izveštaja o etaloniranju navedenog referentnog opterećenja (tereta), podeljene koeficijentom proširenja koji je dat u istom izveštaju.

6) Merna nesigurnost usled greške merenja referentne struje $u_6 = u(\Delta g_{Iref})$ - merna nesigurnost tip B pravougaone raspodele, sa stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Uzima se vrednost greške merenja referentne struje koja je deklarirana od strane proizvođača.
- Ova vrednost se deli sa $\sqrt{3}$ i predstavlja mernu nesigurnost usled greške merenja referentne struje.

3.3.2 Komponente merne nesigurnosti kod merenja fazne greške

Komponente merne nesigurnosti kod merenja fazne greške za metode merenja, uređaje i uslove ispitivanja u Laboratoriji Instituta su sledeće [122].

1) Merna nesigurnost usled ponovljenih merenja $u_7 = u(\delta_M)$ – merna nesigurnost tip A, Gausove (normalne) raspodele, sa $n-1$ stepeni slobode, gde je $n \geq 10$. Može se izraziti ili kao standardna devijacija izmerenih vrednosti, ili kao eksperimentalna standardna devijacija amplitudne greške. Određuje se na sledeći način:

- Merenje se ponavlja n (najmanje 10) puta u svakoj mernoj tački.
- Na osnovu n merenja izračunava se srednja vrednost fazne greške ispitivanog transformatora prema formuli datoj jednačinom (3.3).
- Zatim se izračunava eksperimentalna standardna devijacija uzorka, prema formuli datoj jednačinom (3.4), kao pozitivna vrednost kvadratnog korena, odnosno pozitivna vrednost standardne devijacije σ koja se računa prema jednačini (3.4).

2) Merna nesigurnost usled fazne greške etalon transformatora $u_8 = u(\delta_{RE})$ - merna nesigurnost tip B pravougaona (ravnomerna) raspodela, sa stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Uzima se vrednost greške etalon strujnog transformatora deklarisan od strane proizvođača.
- Ova vrednost se deli sa $\sqrt{3}$ i predstavlja mernu nesigurnost usled greške referentnog etalona.
- U slučaju kada su u izveštaju o etaloniranju referentnog etalona obuhvaćene i ispitne tačke koje su od interesa za ispitivani strujni transformator, može se uzeti vrednost proširene merne nesigurnosti iz poslednjeg sertifikata, odnosno izveštaja o etaloniranju navedenog referentnog etalon transformatora, podeljene koeficijentom proširenja koji je dat u istom izveštaju.

3) Merna nesigurnost usled greške merenja fazne greške mernog uređaja za određivanje tačnosti mernih transformatora, $u_9 = u(\Delta\delta_U)$ - merna nesigurnost tip B, pravougaona (ravnomerna) raspodela, sa stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Uzima se vrednost greške merenja fazne greške deklarisan od strane proizvođača.
- Ova vrednost se deli sa $\sqrt{3}$ i predstavlja mernu nesigurnost usled greške merenja fazne greške mernim uređajem.
- U slučaju kada su u izveštaju o etaloniranju referentnog mernog uređaja obuhvaćene i ispitne tačke koje su od interesa za ispitivani strujni merni transformator, može se uzeti i vrednost proširene merne nesigurnosti iz poslednjeg sertifikata, odnosno izveštaja o etaloniranju navedenog referentnog uređaja, podeljene koeficijentom proširenja koji je dat u istom izveštaju.

4) Merna nesigurnost usled rezolucije uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora pri merenju fazne greške, $u_{10} = u(\Delta\delta_{U-rez})$ - merna nesigurnost tip B, pravougaona (ravnomerna) raspodela, sa stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Ako je a_1 rezolucija merenja fazne greške mernog uređaja, tada je odgovarajuća komponenta merne nesigurnosti data izrazom:

$$u_4 = u(\Delta\delta_{U\text{-rez}}) = a_1 / 2\sqrt{3}$$

5) Merna nesigurnost usled uticaja priključenog strujnog opterećenja (tereta) u sekundarnom kolu $u_{11} = u(\Delta\delta_{\text{Opt}})$ - merna nesigurnost tip B sa pravougaonom (ravnomernom) raspodelom i stepenom slobode ∞ . Određuje se na sledeći način:

- Najčešće se uzima vrednost greške deklarisanе od strane proizvođača. Za strujno opterećenje ova greška najčešće iznosi $\pm 3\%$. Za male vrednosti strujnog opterećenja od 1 VA do 3 VA, u zavisnosti od toga koliko sekundarno kolo ispitivanog strujnog transformatora i priključne veze i spojevi opterećuju sam uređaj za ispitivanje tačnosti, često nije neophodno u sekundarno kolo priključivati referentno strujno opterećenje (teret). Iskustveno je potvrđeno da se i u ovom slučaju može računati sa greškom od približno 3% koja potiče od priključenog opterećenja.
- Ova vrednost se deli sa $\sqrt{3}$ i predstavlja mernu nesigurnost usled greške opterećenja i iznosi $u_5 = u(\Delta\delta_{\text{Opt}})$
- U slučaju kada su u izveštaju o etaloniranju referentnog opterećenja obuhvaćene i ispitne tačke koje su od interesa za ispitivani strujni merni transformator, može se uzeti i vrednost proširene merne nesigurnosti iz poslednjeg sertifikata, odnosno izveštaja o etaloniranju navedenog referentnog opterećenja (tereta), podeljene koeficijentom proširenja koji je dat u istom izveštaju.

6) Merna nesigurnost usled greške merenja referentne struje $u_{12} = u(\Delta\delta_{\text{Iref}})$ - merna nesigurnost tip B sa pravougaonom (ravnomernom) raspodelom i sa stepenom slobode ∞ . Računa se na sledeći način:

- Uzima se vrednost greške merenja referentne struje koja je deklarisanа od strane proizvođača.
- Ova vrednost se deli sa $\sqrt{3}$ i predstavlja mernu nesigurnost usled greške merenja referentne struje.

3.3.3 Kombinovana merna nesigurnost

Kao što se iz navedenog može videti, kod merenja fazne greške izvori merne nesigurnosti su isti kao i kod merenja amplitudne greške. U proračunu merne nesigurnosti, komponente merne nesigurnosti za amplitudnu grešku označene su od u_1 do u_6 , a komponente merne nesigurnosti za faznu grešku od u_7 do u_{12} .

Kombinovana merna nesigurnost merenja amplitudne greške koja obuhvata sve komponente merne nesigurnosti izračunava se prema izrazu [32, 120]:

$$u_c(g_T) = \left[\sum_{i=1}^6 (c_i^2 \cdot u_i^2(g_i)) \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

Kombinovana merna nesigurnost merenja fazne greške izračunava se prema izrazu [32, 120]:

$$u_c(\delta_T) = \left[\sum_{i=7}^{12} (c_i^2 \cdot u_i^2(\delta_i)) \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Faktori osetljivosti c_1, c_2, c_3 i c_4 u jednačini (3.5) i faktori c_7, c_8, c_9 i c_{10} u jednačini (3.6) su jednaki jedinici i dati su izrazima koji slede.

Tako su faktori osetljivosti za amplitudnu grešku:

$$c_1 = \frac{\partial u_c(g_T)}{\partial(g_T)} = 1 \quad (3.7)$$

$$c_2 = \frac{\partial u_c(g_T)}{\partial(g_{RE})} = 1 \quad (3.8)$$

$$c_3 = \frac{\partial u_c(g_T)}{\partial(\Delta g_U)} = 1 \quad (3.9)$$

$$c_4 = \frac{\partial u_c(g_T)}{\partial(\Delta g_{U-rez})} = 1 \quad (3.10)$$

Faktori osetljivosti za faznu grešku su:

$$c_7 = \frac{\partial u_c(\delta_T)}{\partial(\delta_T)} = 1 \quad (3.11)$$

$$c_8 = \frac{\partial u_c(\delta_T)}{\partial(\delta_{RE})} = 1 \quad (3.12)$$

$$c_9 = \frac{\partial u_c(\delta_T)}{\partial(\Delta \delta_U)} = 1 \quad (3.13)$$

$$c_4 = \frac{\partial u_c(\delta_T)}{\partial(\Delta \delta_{U-rez})} = 1 \quad (3.14)$$

Faktori c_5, c_6, c_{11} i c_{12} nisu jednaki jedinici i određuju se prema jednačinama koje slede.

Koeficijent c_5 , određuje se prema sledećem izrazu:

$$\begin{aligned} c_5 &= \frac{\partial u_c(g_T)}{\partial(\Delta g_{opt})} \approx \frac{\Delta g_T(I_{ref}, S_i)}{\Delta S_i} \\ &= \frac{(g_T(I_{ref}, S_1) - g_T(I_{ref}, S_2))}{(S_1 - S_2)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

gde je:

- $\Delta g_T(I_{ref}, S_i)$ razlika vrednosti amplitudne greške za različite vrednosti opterećenja S_i u dve susedne merne tačke,
- S_1 opterećenje u jednoj mernoj tački, a S_2 opterećenje u susednoj mernoj tački ispitivanog transformatora,
- $g_T(I_{ref}, S_1)$ amplitudna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref} za opterećenje S_1 ,
- $g_T(I_{ref}, S_2)$ amplitudna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref} za referentno opterećenje S_2 .

Koeficijent c_6 određuje se prema sledećem izrazu:

$$c_6 = \frac{\partial u_c(g_T)}{\partial (\Delta g_{I_{ref}})} \approx \frac{\Delta g_T(I_{ref}, S_i)}{\Delta I_{ref}} = \frac{(g_T(I_{ref-1}, S_i) - g_T(I_{ref-2}, S_i))}{(I_{ref-1} - I_{ref-2})} \quad (3.16)$$

gde je:

- $\Delta g_T(I_{ref}, S_i)$ razlika vrednosti amplitudne greške u dve susedne merne tačke,
- S_i opterećenje ispitivanog transformatora,
- $g_T(I_{ref-1}, S_i)$ amplitudna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref-1} za opterećenje S_i ,
- $g_T(I_{ref-2}, S_i)$ amplitudna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref-2} za opterećenje S_i ,
- ΔI_{ref} razlika referentnih struja u dve susedne merne tačke I_{ref-1} i I_{ref-2} .

Koeficijent c_{11} određuje se prema sledećem izrazu:

$$c_{11} = \frac{\partial u_c(\delta_T)}{\partial (\Delta \delta_{opt})} \approx \frac{\Delta \delta_T(I_{ref}, S_i)}{\Delta S_i} = \frac{(\delta_T(I_{ref}, S_1) - \delta_T(I_{ref}, S_2))}{(S_1 - S_2)} \quad (3.17)$$

gde je:

- $\Delta \delta_T(I_{ref}, S_i)$ razlika vrednosti fazne greške za različite vrednosti opterećenja S_i u dve susedne merne tačke,
- S_1 opterećenje u jednoj mernoj tački, a S_2 opterećenje u susednoj mernoj tački ispitivanog transformatora,
- $\delta_T(I_{ref}, S_1)$ fazna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref} za opterećenje S_1 ,
- $g_T(I_{ref}, S_2)$ fazna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref} za referentno opterećenje S_2 .

Koeficijent c_{12} određuje se prema sledećem izrazu:

$$\begin{aligned}
c_{12} &= \frac{\partial u_c(\delta_T)}{\partial(\Delta\delta_{I_{ref}})} \approx \frac{\Delta\delta_T(I_{ref}, S_i)}{\Delta I_{ref}} \\
&= \frac{(\delta_T(I_{ref-1}, S_i) - \delta_T(I_{ref-2}, S_i))}{(I_{ref-1} - I_{ref-2})}
\end{aligned} \tag{3.18}$$

gde je:

- $\Delta\delta_T(I_{ref}, S_i)$ razlika vrednosti fazne greške u dve susedne merne tačke,
- S_i opterećenje ispitivanog transformatora,
- $\delta_T(I_{ref-1}, S_i)$ fazna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref-1} za opterećenje S_i ,
- $\delta_T(I_{ref-2}, S_i)$ fazna greška ispitivanog transformatora u mernoj tački I_{ref-2} za opterećenje S_i ,
- ΔI_{ref} razlika referentnih struja u dve susedne merne tačke I_{ref-1} i I_{ref-2} .

Koeficijente c_5 , c_6 , c_{11} i c_{12} treba odrediti za svaku mernu tačku prema standardu [9] tj. za vrednosti referentne struje: 0,05 I_n , 0,2 I_n , 1,0 I_n , 1,2 I_n i pri istom opterećenju S_i .

3.3.4 Proširena merna nesigurnost

Prema izračunatoj kombinovanoj mernoj nesigurnosti, prema formuli (3.5) i (3.6), računa se proširena merna nesigurnost. Proširena merna nesigurnost izražava se kao kombinovana standardna merna nesigurnost uvećana za unapred određen faktor pokrivanja za nivo poverenja približno 95% [115].

$$U = k \cdot u_c \tag{3.19}$$

U zavisnosti od dominantne komponente merne nesigurnosti i njoj odgovarajuće raspodele zavisice i vrednost koeficijenta pokrivanja k [115]. U slučajevima normalne Gausove raspodele koeficijent pokrivanja $k = 2$. Međutim, u većini slučajeva iz prakse normalnu Gausovu raspodelu je teško i eksperimentalno dokazati, naročito u slučaju manjeg broja merenja, $n \leq 40$ i kada su komponente merne nesigurnosti tipa B sa pridruženim drugim raspodelama dominantne, ili po svom uticaju ekvivalentne mernoj nesigurnosti tipa A. Tada se primenjuju alati kao što je Centralna granična teorema [115] ili "Monte Karlo" metoda [123].

U slučaju ispitivanja i etaloniranja strujnih mernih transformatora standardnih klasa tačnosti, kao i u slučaju etaloniranja strujnih etalon transformatora nižih klasa tačnosti, dominantne su komponente merne nesigurnosti tipa B sa pripadajućom pravougaonom raspodelom. Dominantna komponenta merne nesigurnosti najčešće potiče od greške mernog instrumenta za ispitivanje tačnosti transformatora, pa je tako u tom slučaju dominantna pravougaona raspodela [124].

Kod etaloniranja strujnih etalon transformatora, naročito onih visoke tačnosti, komponente merne nesigurnosti se usložnjavaju. Osim uticaja referentnog etalon transformatora i mernog instrumenta koji se uzimaju u proceni tipa B merne nesigurnosti, u ovom slučaju tip A merne nesigurnosti postaje takođe značajan. Pri malim vrednostima ispitnih struja tip A merne nesigurnosti može postati i dominantan. Ovo je zbog toga što kod etalon transformatora visokih klasa tačnosti, pri malim ispitnim strujama, uticaji kapacitivnih struja, načina uzemljavanja i konfiguracije primarnih i sekundarnih provodnika mogu imati značajan uticaj. Posebna pažnja posvećuje se uticajima i uticajnim veličinama na sam proces

etaloniranja strujnih transformatora i proračunu merne nesigurnosti kod međulaboratorijskih poređenja, o čemu je već ranije diskutovano.

3.4 Merna nesigurnost metode jednovremenog uporednog etaloniranja strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A

Prema rezultatima etaloniranja strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase tačnosti 0.5, iz tabela 2.1 i 2.2 poglavlje 2.1, koje se odnose na pojedinačno, odnosno jednovremeno merenje amplitudne i fazne greške diferencijalnom i metodom strujnog komparatora, u tabelama 3.3, 3.4, 3.5 i 3.6 dat je uporedni pregled amplitudnih i faznih grešaka i njima odgovarajućih proračunatih kombinovanih i proširenih mernih nesigurnosti.

Tabela 3.3 Uporedni pregled amplitudnih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja strujnog mernog transformatora metodom strujnog komparatora pojedinačno (KSK) i jednovremeno (KSK*)

25 A/5 A		KSK pojedinačno			KSK* jednovremeno		
S_n	I/I_n (%)	g (%)	u_c ($\mu A/A$)	U ($\mu A/A$)	g (%)	u_c ($\mu A/A$)	U ($\mu A/A$)
2,5 VA cosϕ = 1	5	0.2959	120	241	0.1885	15	30
	20	0.3886	26	51	0.2747	16	32
	100	0.3815	19	39	0.3318	16	33
	120	0.3569	20	40	0.3114	16	33
10 VA cosϕ = 1	5	-0.5730	291	583	-0.5038	18	37
	20	-0.2181	112	225	-0.2599	16	31
	100	-0.0143	69	138	-0.0789	14	27
	120	-0.0548	65	129	-0.1159	15	30

Tabela 3.4 Uporedni pregled faznih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja strujnog mernog transformatora metodom strujnog komparatora pojedinačno (KSK) i jednovremeno (KSK*)

25 A/5 A		KSK pojedinačno			KSK* jednovremeno		
S_n	I/I_n (%)	δ (min)	u_c (μrad)	U (μrad)	δ (min)	u_c (μrad)	U (μrad)
2,5 VA cosϕ = 1	5	19.20	125	250	28.20	23	46
	20	11.15	43	86	15.05	19	37
	100	4.36	20	41	6.35	16	32
	120	5.20	17	34	7.13	16	33
10 VA cosϕ = 1	5	27.44	220	439	27.40	22	45
	20	12.97	34	67	15.95	19	38
	100	5.66	19	38	7.35	16	33
	120	6.55	21	42	7.99	17	33

Kada se prema tabelama 3.3 do 3.6 analiziraju kombinovana i proširena merna nesigurnost pojedinačnih merenja primenom posebno metode strujnog komparatora i posebno diferencijalne merne metode, primećuje se da je ona najizraženija za mernu tačku 5% I_n . Zatim se za mernu tačku 20% I_n smanjuje približno četiri puta, da bi pri mernim tačkama 100% I_n i 120% I_n bila za više od reda veličine manja u odnosu na mernu tačku 5% I_n . Razlog tome je što su mnogi uticaji na grešku merenja najizraženiji upravo u tački 5% I_n . U slučaju ovoga merenja komponenta A merne nesigurnosti kretala se od 1 do 10 ppm ($\mu A/A$, odnosno μrad), što je zanemarljivo u poređenju sa komponentom B merne nesigurnosti koja je dostizala vrednost i do 300 ppm ($\mu A/A$, odnosno μrad). U tabelama 3.3 do 3.6 primećuje se da se u slučaju jednovremenog etaloniranja primenom diferencijalne i metode kompenzovanog strujnog komparatora merna nesigurnost poboljšava za svaku primenjenu metodu i to posebno za merne tačke 5% i 20% naznačene struje i u proseku je manja i više od deset puta. Razlog tome je što su u navedenim mernim tačkama uticaji referentne struje i opterećenja najizraženiji, tabele 3.7 do 3.22. Zbog jednakosti uslova ispitivanja ovi uticaji su kod jednovremenog merenja isti za obe merne aparature i mogu se zanemariti. Primećuje se da je u slučaju jednovremenog etaloniranja merna nesigurnost ujednačena u celom opsegu ispitnih struja. Razlog tome je što su kod jednovremenog etaloniranja dominantne komponente merne nesigurnosti usled grešaka referentnog etalon transformatora i mernog uređaja.

Tabela 3.5 Uporedni pregled amplitudnih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja strujnog mernog transformatora diferencijalnom metodom pojedinačno (DIF) i jednovremeno (DIF*)

25 A/5 A		DIF pojedinačno			DIF* jednovremeno		
S_n	I/I_n (%)	g (%)	u_c ($\mu A/A$)	U ($\mu A/A$)	g (%)	u_c ($\mu A/A$)	U ($\mu A/A$)
2,5 VA $\cos\varphi = 1$	5	0.2300	120	240	0.1860	13	26
	20	0.2940	25	50	0.2790	16	31
	100	0.3440	20	39	0.3320	17	34
	120	0.3130	20	39	0.3130	16	33
10 VA $\cos\varphi = 1$	5	-0.6120	292	584	-0.4810	21	42
	20	-0.2590	112	224	-0.2480	15	29
	100	-0.0595	69	137	-0.0807	10	21
	120	-0.1108	64	129	-0.1228	12	25

Tabela 3.6 Usporedni pregled faznih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja strujnog mernog transformatora diferencijalnom metodom pojedinačno (DIF) i jednovremeno (DIF*)

25 A/5 A		DIF pojedinačno			DIF* jednovremeno		
S_n	I/I_n (%)	δ (min)	u_c (μ rad)	U (μ rad)	δ (min)	u_c (μ rad)	U (μ rad)
2,5 VA cosϕ = 1	5	24.60	165	329	27.80	11	21
	20	15.01	44	88	15.90	10	21
	100	6.76	19	39	6.66	10	21
	120	7.39	16	33	7.50	10	21
10 VA cosϕ = 1	5	32.60	221	442	28.00	11	21
	20	16.90	36	71	16.90	10	21
	100	7.56	18	36	7.82	10	21
	120	8.78	21	41	8.70	10	21

U tabelama 3.3, 3.4, 3.5 i 3.6 korišćene su sledeće skraćenice i oznake:

- S_n - vrednost naznačenog sekundarnog strujnog opterećenja
- I/I_n - vrednost referentne struje koja se izražava kao ispitna struja I u odnosu na naznačenu I_n
- g - amplitudna greška
- δ - fazna greška
- u_c - kombinovana merna nesigurnost
- U - proširena merna nesigurnost za koeficijent proširenja $k = 2$

Na osnovu matematičkog modela iz poglavlja 3.3 i rezultata za amplitudnu i faznu grešku koji su izmereni primenom metode kompenzovanog strujnog komparatora pojedinačno, a zatim jednovremeno, u tabelama 3.7 do 3.22 prikazan je budžet merne nesigurnosti za merne tačke 5% I_n i 100% I_n za ispitivani merni transformator prenosnog odnosa 100 A/5 A, naznačene snage 10 VA i klase tačnosti 0.5.

Tabela 3.7 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2.5 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (%)	$u(x_i)$ (%)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (%)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	0.2959	0.0001 %	9	$c_1 = 1$	0.0001	0.01
∂g_{RE}		0.0006 %	∞	$c_1 = 1$	0.0006	0.23
∂g_U		0.0015 %	∞	$c_1 = 1$	0.0015	1.55
∂g_{U-rez}		0.00003 %	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.00
∂g_{Opt}		0.0433 VA	∞	$c_5=0.1709$ %/VA	0.0074	37.82
∂g_{Iref}		0.0289 A	∞	$c_6=0.3240$ %/A	0.0094	60.40
g	0.2959	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.012$ %	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			$U = 0.024$ %	

Tabela 3.8 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2.5 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (%)	$u(x_i)$ (%)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (%)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	0.1885	0.0001 %	9	$c_1 = 1$	0.0001	0.86
∂g_{RE}		0.0006 %	∞	$c_1 = 1$	0.0006	14.89
∂g_U		0.0014%	∞	$c_1 = 1$	0.0014	84.21
∂g_{U-rez}		0.00003 %	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.04
g	0.1885	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.002$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			$U = 0.004$	

Tabela 3.9 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2.5 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (min)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (min)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	19.20	0.0093 min	9	$c_1 = 1$	0.0093	0.05
$\partial\delta_{RE}$		0.0288 min	∞	$c_1 = 1$	0.0288	0.45
$\partial\delta_U$		0.0619 min	∞	$c_1 = 1$	0.0619	2.07
$\partial\delta_{U-rez}$		0.00003 min	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.00
$\partial\delta_{Opt}$		0.0433 VA	∞	$c_5 = 5.44$ min/VA	0.2353	29.93
$\partial\delta_{Iref}$		0.0289 A	∞	$c_6 = 12.24$ min/A	0.3533 %	67.49
δ	19.20	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.43$ min	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			U = 0.86 min	

Tabela 3.10 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2.5 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (min)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (min)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	28.2	0.0093 min	9	$c_1 = 1$	0.0093	1.42
$\partial\delta_{RE}$		0.0288 min	∞	$c_1 = 1$	0.0288	13.56
$\partial\delta_U$		0.0723 min	∞	$c_1 = 1$	0.0723	85.02
$\partial\delta_{U-rez}$		0.00003 min	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.0
δ	28.2	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.078$ min	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			U = 0.157 min	

Tabela 3.11 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2.5 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (%)	$u(x_i)$ (%)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (%)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	0.3815	0.0001 %	9	$c_1 = 1$	0.0001	0.27
∂g_{RE}		0.0006 %	∞	$c_1 = 1$	0.0006	8.96
∂g_U		0.0016 %	∞	$c_1 = 1$	0.0016	68.46
∂g_{U-rez}		0.00003 %	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.04
∂g_{Opt}		0.0433 VA	∞	$c_5=0.0205$ %/VA	0.0009	21.12
∂g_{Iref}		0.0289 A	∞	$c_6=0.0072$ %/A	0.0002	1.15
g	0.3815	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.002$ %	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 0.004$ %	

Tabela 3.12 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2.5 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (%)	$u(x_i)$ (%)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (%)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	0.3318	0.0001 %	9	$c_1 = 1$	0.0001	0.37
∂g_{RE}		0.0006 %	∞	$c_1 = 1$	0.0006	12.29
∂g_U		0.0015 %	∞	$c_1 = 1$	0.0015	87.32
∂g_{U-rez}		0.00003 %	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.02
g	0.3318	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.002\%$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 0.004$ %	

Tabela 3.13 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2.5 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (min)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (min)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	4.36	0.0003 min	9	$c_1 = 1$	0.0003	0.02
$\partial\delta_{RE}$		0.0288 min	∞	$c_1 = 1$	0.0288	17.12
$\partial\delta_U$		0.0448 min	∞	$c_1 = 1$	0.0448	41.19
$\partial\delta_{U-rez}$		0.00003 min	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.00
$\partial\delta_{Opt}$		0.0433 VA	∞	$c_5 = 1.03$ min/VA	0.0445	40.80
$\partial\delta_{Iref}$		0.0289 A	∞	$c_6 = 0.226$ min/A	0.0065	0.87
δ	4.36	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.07$ min	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			$U = 0.14$ min	

Tabela 3.14 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2.5 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (min)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (min)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	6.35	0.0003 min	9	$c_1 = 1$	0.0003	0.0
$\partial\delta_{RE}$		0.0288 min	∞	$c_1 = 1$	0.0288	27.35
$\partial\delta_U$		0.0471 min	∞	$c_1 = 1$	0.0471	72.65
$\partial\delta_{U-rez}$		0.00003 min	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.0
δ	6.35	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.055$ min	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			$U = 0.110$ min	

Tabela 3.15 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 10 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (%)	$u(x_i)$ (%)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (%)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	0.5730	0.0003 %	9	$c_1 = 1$	0.0003	0.00
∂g_{RE}		0.0006 %	∞	$c_1 = 1$	0.0006	0.04
∂g_U		0.0018%	∞	$c_1 = 1$	0.0018	0.39
∂g_{U-rez}		0.00003 %	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.00
∂g_{Opt}		0.1732 VA	∞	$c_5=0.0809$ %/VA	0.0140	23.10
∂g_{Iref}		0.0289 A	∞	$c_6=0.8829$ %/A	0.0255	76.47
g	0.5730	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.029$ %	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 0.058$ %	

Tabela 3.16 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 10 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (%)	$u(x_i)$ (%)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (%)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	-0,5038	0.00003 %	9	$c_1 = 1$	0.00003	0.05
∂g_{RE}		0.0006 %	∞	$c_1 = 1$	0.0006	9.95
∂g_U		0.0017 %	∞	$c_1 = 1$	0.0017	89.95
∂g_{U-rez}		0.00003 %	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.05
g	-0.5038	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.002\%$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 0.004\%$	

Tabela 3.17 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 10 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (min)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (min)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	27.44	0.0036 min	9	$c_1 = 1$	0.0036	0.00
$\partial\delta_{RE}$		0.0288 min	∞	$c_1 = 1$	0.0288	0.15
$\partial\delta_U$		0.0714 min	∞	$c_1 = 1$	0.0714	0.89
$\partial\delta_{U-rez}$		0.00003 min	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.00
$\partial\delta_{Opt}$		0.0433 VA	∞	$c_5 = 0.081 \text{ min/VA}$	0.1399	3.44
$\partial\delta_{Iref}$		0.0289 A	∞	$c_6 = 25.57 \text{ min/A}$	0.7382	95.52
δ	27.44	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.76 \text{ min}$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			$U = 1.52 \text{ min}$	

Tabela 3.18 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 10 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (min)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (min)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	27,40	0.0036 min	9	$c_1 = 1$	0.0036	0.22
$\partial\delta_{RE}$		0.0288 min	∞	$c_1 = 1$	0.0288	14.03
$\partial\delta_U$		0.0714 min	∞	$c_1 = 1$	0.0714	85.75
$\partial\delta_{U-rez}$		0.00003 min	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.0
δ	27.40	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.047 \text{ min}$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			$U = 0.154 \text{ min}$	

Tabela 3.19 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 10 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (%)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (%)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	-0.0143	0.00006 %	9	$c_1 = 1$	0.00006	0.0
∂g_{RE}		0.0006 %	∞	$c_1 = 1$	0.0006	0.7
∂g_U		0.0012 %	∞	$c_1 = 1$	0.0012	2.6
∂g_{U-rez}		0.00003 %	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.0
∂g_{Opt}		0.1732 VA	∞	$c_5=0.0392$ %/VA	0.0068	96.7
∂g_{Iref}		0.0289 A	∞	$c_6=0.0005$ %/A	0.00001	0.0
g	-0.0143	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.007$ %	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 0.014$ %	

Tabela 3.20 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 10 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (%)	$u(x_i)$ (%)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (%)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	-0.789	0.00006	9	$c_1 = 1$	0.00006	0.19
∂g_{RE}		0.0006	∞	$c_1 = 1$	0.0006	17.60
∂g_U		0.0013	∞	$c_1 = 1$	0.0013	82.16
∂g_{U-rez}		0.00003	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.05
g	-0.789	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.0014\%$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 0.0028\%$	

Tabela 3.21 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 10 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (min)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (min)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	5.66	0.0031%	9	$c_1 = 1$	0.0031	0.20
$\partial\delta_{RE}$		0.0288%	∞	$c_1 = 1$	0.0288	19.00
$\partial\delta_U$		0.0463%	∞	$c_1 = 1$	0.0463	49.90
$\partial\delta_{U-rez}$		0.00003%	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.0
$\partial\delta_{Opt}$		0.1732 VA	∞	$c_5 = 0.02055 \text{ min/VA}$	0.0359	30.00
$\partial\delta_{Iref}$		0.0288 VA	∞	$c_6 = 0.02154 \text{ min/VA}$	0.0062	0.90
δ	5.66	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.065 \text{ min}$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 0.131 \text{ min}$	

Tabela 3.22 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 10 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (min)	$u(x_i)$ (min)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (min)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	7.35	0.0031	9	$c_1 = 1$	0.0031	0.3
$\partial\delta_{RE}$		0.0288	∞	$c_1 = 1$	0.0288	26.32
$\partial\delta_U$		0.0482	∞	$c_1 = 1$	0.0482	73.38
$\partial\delta_{U-rez}$		0.00003	∞	$c_1 = 1$	0.00003	0.00
δ	7.35	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 0.056$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 0.113$	

U tabelama 3.7 - 3.22 korišćene su sledeće skraćenice i oznake:

Δg_T - izmerena vrednost amplitudne greške strujnog mernog transformatora

∂g_{RE} - amplitudna greška referentnog strujnog transformatora

∂g_U - greška merenja amplitudne greške uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora

∂g_{U-rez} - rezolucija uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora kod merenja amplitudne greške

∂g_{Opt} - uticaj sekundarnog strujnog opterećenja

∂g_{Iref} - uticaj merenja referentne struje

g - izmerena vrednost amplitudne greške

$\Delta \delta_T$ - izmerena vrednost fazne greške strujnog mernog transformatora

$\partial \delta_{RE}$ - fazna greška referentnog strujnog transformatora

$\partial \delta_U$ - greška merenja fazne greške uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora

$\partial \delta_{U-rez}$ - rezolucija uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora kod merenja fazne greške

$\partial \delta_{Opt}$ - uticaj merenja referentne struje

$\partial \delta_{Iref}$ - uticaj merenja referentne struje

δ - izmerena vrednost fazne greške

k - koeficijent proširenja

u_c - kombinovana merna nesigurnost

U - proširena merna nesigurnost

$[c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2] \cdot 100$ - formula za izračunavanje indeksa koji pokazuje udeo pojedinih komponenta merne nesigurnosti u ukupnoj kombinovanoj mernoj nesigurnosti.

Analizom merne nesigurnosti i prethodno prikazanih eksperimentalnih rezultata pokazuje se da kod jednovremenog ispitivanja pojedini uticaji postaju zanemarljivi, pa se i njima odgovarajuće komponente merne nesigurnosti mogu zanemariti. Kod metode jednovremenog merenja amplitudne i fazne greške klasičnog strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, korišćenjem dve različite merne aparature, poslednjih osam nabrojanih komponenti merne nesigurnosti, tabela 3.2, ne učestvuju u određivanju kombinovane i proširene merne nesigurnosti. Nema varijacije grešaka merenja usled: učestanosti, opterećenja, struje, temperature, konfiguracije veza, stranih elektromagnetnih polja, kapacitivnih struja i zaostale indukcije, jer se merenja sa obe merne aparature obavljaju jednovremeno i u istim uslovima. Nije teško, niti netačno dati kvalitativnu ocenu, da se eliminacijom nabrojanih komponenti merne nesigurnosti značajno poboljšava kombinovana merna nesigurnost.

3.5 Merna nesigurnost metode jednovremenog uporednog etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A

Prema rezultatima etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A iz tabela 2.5 i 2.6, poglavlje 2.2, koji se odnose na pojedinačno, odnosno jednovremeno merenje amplitudne i fazne greške diferencijalnom i metodom strujnog komparatora, u tabelama 3.23, 3.24, 3.25 i 3.26 dat je uporedni pregled amplitudnih i faznih grešaka i njima odgovarajućih proračunatih kombinovanih i proširenih mernih nesigurnosti.

Prilikom analize dobijenih rezultata treba, naravno, imati u vidu da i ispitivani etalon transformator (EST 3000) i referentni etalon transformator (KSK1000) imaju grešku definisanu za opseg naznačenih struja od 5% do 120%, za razliku od etalon transformatora (4767) koji je

korišćen u DIF metodi, tabela 2.4, čija je greška definisana i za 1% naznačene struje. Usled toga je i velika razlika u izmerenoj vrednosti amplitudne greške pri 1% I_n , KSK metodom (-202 $\mu A/A$) i diferencijalnom metodom (32 $\mu A/A$), kada se ona meri svakom metodom pojedinačno. Slično je i za faznu grešku u ovoj mernoj tački za pojedinačno merenje (-17 μrad za KSK metodu i -73 μrad za DIF metodu). U opsegu referentne struje od 5% I_n do 120% I_n vrednosti i amplitudne i fazne greške ne prelaze 20 $\mu A/A$, odnosno μrad .

Kod jednovremenog merenja diferencijalnom metodom i metodom strujnog komparatora u mernoj tački 1% I_n i amplitudna i fazna greška manje su od 20 $\mu A/A$ (μrad), a u opsegu referentne struje od 5% I_n do 120% I_n njihove vrednosti ne prelaze 10 $\mu A/A$, odnosno μrad .

Primećuje se da su kombinovana merna nesigurnost i njoj odgovarajuća proširena merna nesigurnost najveće za male vrednosti ispitnih struja, tj. u mernim tačkama 1% I_n i 5% I_n i za pojedinačno i za jednovremeno merenje dvema metodama, o čemu je bilo reči u poglavlju 3.2.

U tabelama 3.27 do 3.38 dati su budžeti merne nesigurnosti za amplitudnu i faznu grešku merene metodom strujnog komparatora (KSK) za 1% I_n , 5% I_n i 100% I_n , a u tabelama 3.39 do 3.44 prikazan je udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za amplitudnu grešku za merne tačke 1% I_n i 100% I_n .

Iz budžeta merne nesigurnosti za amplitudnu grešku za 1% I_n kod pojedinačnog merenja KSK metodom merne nesigurnosti tip A i tip B su podjednako zastupljene, dok je kod jednovremenog merenja tip A dominantan. U poglavlju 3.2 je već rečeno da su u ovim mernim tačkama uticaji kapacitivnih struja, uzemljavanja pojedinih tačaka merne šeme, induktivnih sprega i elektromagnetskog polja najizraženiji. Navedeni uticaji su čisto stohastičke prirode i merljivi su kroz standardnu devijaciju rezultata merenja, koja predstavlja i tip A merne nesigurnosti. Međutim, osim ovih uticaja, ni uticaji strujnog opterećenja (koga u ovom slučaju čine sekundarne veze i priključci kao i opterećenje samog mernog uređaja) i varijacije referentne struje nisu zanemarljivi, što se vidi kroz komponente merne nesigurnosti koje čine mernu nesigurnost tipa B. Kod jednovremenog merenja uticaji opterećenja i referentne struje zbog identičnih uslova merenja za oba merna sistema, a samim tim i njihovog jednovremenog delovanja na obe merne aparature, se mogu zanemariti, pa tada u tipu B merne nesigurnosti preovlađuju komponente merne nesigurnosti usled greške referentnog etalon transformatora i mernog uređaja, tabele 3.39 do 3.44.

U mernoj tački 1% I_n , tip A merne nesigurnosti nije toliko značajno izražen kod pojedinačnog merenja fazne greške, kao što je to slučaj kod merenja amplitudne greške. Preovlađuje tip B merne nesigurnosti i sa njim povezani uticaji varijacije referentnog opterećenja i referentne struje. Kod jednovremenog merenja fazne greške, tip A i tip B merne nesigurnosti su podjednako zastupljeni.

Za mernu tačku 5% I_n , tip A merne nesigurnosti se znatno smanjuje i za pojedinačno i za jednovremeno merenje, a tip B preovlađuje.

U mernoj tački 100% I_n , tip A merne nesigurnosti i pri merenju amplitudne greške, i pri merenju fazne greške je manji od 10% u odnosu na kombinovanu mernu nesigurnost i za pojedinačno i za jednovremeno merenje. Tip B merne nesigurnosti je očigledno dominantan i iznosi preko 90% kombinovane merne nesigurnosti, tabele 3.43 i 3.44. Kod pojedinačnog merenja dominantne su komponente merne nesigurnosti usled varijacije opterećenja i varijacije referentne struje, a kod jednovremenog merenja usled grešaka referentnog opterećenja i mernog uređaja, tabele 3.39 do 3.44.

Tabela 3.23 Uporedni pregled amplitudnih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A metodom strujnog komparatora pojedinačno (KSK) i jednovremeno (KSK*)

100 A/5 A		KSK pojedinačno			KSK* jednovremeno		
S_n	I/I_n (%)	g ($\mu A/A$)	u_c ($\mu A/A$)	U ($\mu A/A$)	g ($\mu A/A$)	u_c ($\mu A/A$)	U ($\mu A/A$)
2 VA $\cos\varphi = 1$	1	-202	95	189	10	40	80
	5	5	41	82	6	8	17
	20	2	19	37	3	8	16
	50	1	11	21	2	8	16
	100	0	11	22	1	8	16
	120	0	12	24	0	8	16

Tabela 3.24 Uporedni pregled faznih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A metodom strujnog komparatora pojedinačno (KSK) i jednovremeno (KSK*)

100 A/5 A		KSK pojedinačno			KSK* jednovremeno		
S_n	I/I_n (%)	δ (μrad)	u_c (μrad)	U (μrad)	δ (μrad)	u_c (μrad)	U (μrad)
2 VA $\cos\varphi = 1$	1	-17	110	219	17	12	24
	5	4	77	154	2	10	21
	20	1	39	78	-2	9	17
	50	0	25	49	-3	9	18
	100	0	23	46	-5	9	18
	120	-1	22	43	-6	9	18

Tabela 3.25 Uporedni pregled amplitudnih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A diferencijalnom metodom pojedinačno (DIF) i jednovremeno (DIF*)

100 A/5 A		DIF pojedinačno			DIF* jednovremeno		
S_n	I/I_n (%)	g ($\mu A/A$)	u_c ($\mu A/A$)	U ($\mu A/A$)	g ($\mu A/A$)	u_c ($\mu A/A$)	U ($\mu A/A$)
2 VA $\cos\varphi = 1$	1	32	66	131	-3	9	17
	5	5	41	83	8	9	17
	20	3	19	38	5	9	17
	50	2	15	30	3	9	17
	100	1	11	23	2	9	17
	120	1	12	25	2	9	17

Tabela 3.26 Uporedni pregled faznih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A diferencijalnom metodom pojedinačno (DIF) i jednovremeno (DIF*)

100 A/5 A		DIF pojedinačno			DIF* jednovremeno		
S_n	I/I_n (%)	δ (μrad)	u_c (μrad)	U (μrad)	δ (μrad)	u_c (μrad)	U (μrad)
2 VA $\cos\varphi = 1$	1	-73	109	218	0	11	21
	5	2	77	155	8	10	21
	20	8	40	79	-1	10	20
	50	15	25	50	-2	10	21
	100	17	24	47	-5	10	21
	120	17	23	45	-6	10	21

Tabela 3.27 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 1% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (μA/A)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (μA/A)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	-202	68 μA/A	9	$c_1 = 1$	68	51.6
∂g_{RE}		6 μA/A	∞	$c_1 = 1$	6	0.4
∂g_U		6 μA/A	∞	$c_1 = 1$	6	0.4
∂g_{U-rez}		0 μA/A	∞	$c_1 = 1$	0	0.0
∂g_{Opt}		0.0346 VA	∞	$c_5=0.0800$ %/VA	28	8.8
∂g_{Iref}		0.0289 A	∞	$c_6=0.2040$ %/A	59	38.8
g	-20.2	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 95$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 190$	

Tabela 3.28 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 1% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (μA/A)	$u(x_i)$ (μA/A)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (μA/A)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	10	39	9	$c_1 = 1$	39	95.86
∂g_{RE}		6	∞	$c_1 = 1$	6	2.06
∂g_U		6	∞	$c_1 = 1$	6	2.07
∂g_{U-rez}		0	∞	$c_1 = 1$	0	0.01
g	10	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 40$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 80$	

Tabela 3.29 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 1% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (μrad)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (μrad)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	-17	14 μrad	9	$c_1 = 1$	14	1.68
$\partial\delta_{RE}$		8 μrad	∞	$c_1 = 1$	8	0.59
$\partial\delta_U$		2 μrad	∞	$c_1 = 1$	2	0.02
$\partial\delta_{U-rez}$		0 μrad	∞	$c_1 = 1$	0	0.00
$\partial\delta_{Opt}$		0.0346 VA	∞	$c_5 = 3.446$ min/VA	35	10.01
$\partial\delta_{Iref}$		0.0288 VA	∞	$c_6 = 12.24$ min/VA	103	87.70
δ	-17	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 110$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			U = 219	

Tabela 3.30 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 1% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (μrad)	$u(x_i)$ (μrad)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (μrad)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	17	8	9	$c_1 = 1$	8	47.9
$\partial\delta_{RE}$		8	∞	$c_1 = 1$	8	50.1
$\partial\delta_U$		2	∞	$c_1 = 1$	2	2.0
$\partial\delta_{U-rez}$		0	∞	$c_1 = 1$	0	0.0
δ	17	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 12$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			U = 24	

Tabela 3.31 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost ($\mu\text{A/A}$)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ ($\mu\text{A/A}$)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	5	3 $\mu\text{A/A}$	9	$c_1 = 1$	3	0.3
∂g_{RE}		6 $\mu\text{A/A}$	∞	$c_1 = 1$	6	2.0
∂g_U		6 $\mu\text{A/A}$	∞	$c_1 = 1$	6	2.0
$\partial g_{U\text{-rez}}$		0 $\mu\text{A/A}$	∞	$c_1 = 1$	0	0.0
∂g_{Opt}		0.0346 VA	∞	$c_5=0.0572$ %/VA	20	23.6
$\partial g_{I_{\text{ref}}}$		0.0289 A	∞	$c_6=0.1200$ %/A	35	72.1
g	5	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 41$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 82$	

Tabela 3.32 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost ($\mu\text{A/A}$)	$u(x_i)$ ($\mu\text{A/A}$)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ ($\mu\text{A/A}$)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
Δg_T	6	1	9	$c_1 = 1$	1	2.1
∂g_{RE}		6	∞	$c_1 = 1$	6	48.8
∂g_U		6	∞	$c_1 = 1$	6	49.1
$\partial g_{U\text{-rez}}$		0	∞	$c_1 = 1$	0	0.0
g	6	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 8$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 17$	

Tabela 3.33 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (μrad)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (μrad)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	4	10 μrad	9	$c_1 = 1$	10	1.77
$\partial\delta_{RE}$		8 μrad	∞	$c_1 = 1$	8	1.18
$\partial\delta_U$		2 μrad	∞	$c_1 = 1$	2	0.05
$\partial\delta_{U-rez}$		0 μrad	∞	$c_1 = 1$	0	0.00
$\partial\delta_{Opt}$		0.0346 VA	∞	$c_5 = 2.754$ min/VA	28	12.89
$\partial\delta_{Iref}$		0.0288 VA	∞	$c_6 = 8.440$ min/VA	71	84.11
δ	4	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 77$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			$U = 154$	

Tabela 3.34 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (μrad)	$u(x_i)$ (μrad)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (μrad)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	2	6	9	$c_1 = 1$	6	32.5
$\partial\delta_{RE}$		8	∞	$c_1 = 1$	8	64.9
$\partial\delta_U$		2	∞	$c_1 = 1$	2	2.6
$\partial\delta_{U-rez}$		0	∞	$c_1 = 1$	0	0.0
δ	2	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 10$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			$U = 21$	

Tabela 3.35 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost ($\mu\text{A/A}$)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ ($\mu\text{A/A}$)	Indeks (%) $[c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2] \cdot 100$
Δg_T	0.0	2 $\mu\text{A/A}$	9	$c_1 = 1$	2	1.8
∂g_{RE}		6 $\mu\text{A/A}$	∞	$c_1 = 1$	6	27.0
∂g_U		6 $\mu\text{A/A}$	∞	$c_1 = 1$	6	27.0
$\partial g_{U\text{-rez}}$		0 $\mu\text{A/A}$	∞	$c_1 = 1$	0	0.2
∂g_{Opt}		0.0346 VA	∞	$c_5=0.0205$ %/VA	7	40.8
∂g_{Iref}		0.0289 A	∞	$c_6=0.0068$ %/A	2	3.2
g	0.0	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 11$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 22$	

Tabela 3.36 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost ($\mu\text{A/A}$)	$u(x_i)$ ($\mu\text{A/A}$)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ ($\mu\text{A/A}$)	Indeks (%) $[c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2] \cdot 100$
Δg_T	1	1	9	$c_1 = 1$	1	1.3
∂g_{RE}		6	∞	$c_1 = 1$	6	49.3
∂g_U		6	∞	$c_1 = 1$	6	49.3
$\partial g_{U\text{-rez}}$		0	∞	$c_1 = 1$	0	0.1
g	1	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 8$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za $p = 95\%$			$U = 16$	

Tabela 3.37 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (μrad)	$u(x_i)$	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (μrad)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	0.0	5 μrad	9	$c_1 = 1$	5	4.1
$\partial\delta_{RE}$		8 μrad	∞	$c_1 = 1$	8	13.4
$\partial\delta_U$		2 μrad	∞	$c_1 = 1$	2	0.5
$\partial\delta_{U-rez}$		0 μrad	∞	$c_1 = 1$	0	0.0
$\partial\delta_{Opt}$		0.0346 VA	∞	$c_5 = 1.029 \text{ min/VA}$	10	20.4
$\partial\delta_{Iref}$		0.0288 VA	∞	$c_6 = 2.146 \text{ min/VA}$	18	61.6
δ	0.0	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 23$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			U = 46	

Tabela 3.38 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Veličina	Vrednost (μrad)	$u(x_i)$ (μrad)	Broj stepeni slobode	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$ (μrad)	Indeks (%) [$c_i^2 \cdot u^2(x_i)/u_c^2$] · 100
$\Delta\delta_T$	-5	3	9	$c_1 = 1$	3	9.0
$\partial\delta_{RE}$		8	∞	$c_1 = 1$	8	87.5
$\partial\delta_U$		2	∞	$c_1 = 1$	2	3.5
$\partial\delta_{U-rez}$		0	∞	$c_1 = 1$	0	0.0
δ	-5	Kombinovana merna nesigurnost			$u_c = 9$	$\Sigma = 100\%$
k	2	Proširena merna nesigurnost za p = 95%			U = 18	

Tabela 3.39 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za amplitudnu grešku za mernu tačku 1% I_n

Amplitudna greška pri 1% I_n				
	pojedinačno		jednovremeno	
	$g = -202 \mu A/A$		$g = 10 \mu A/A$	
	Vrednost	Komponenta m.n.	Vrednost	Komponenta m.n.
Tip A	51 %	$u(g_T) = \sigma = 51\%$	95.86 %	$u(g_T) = \sigma = 95.9\%$
Tip B	49 %	$u(g_{Iref}) = 38.8\%$ $u(g_{Opt}) = 8.8\%$	4,1 %	$u(g_U) = 4.1\%$
u_c	95 $\mu A/A$		40 $\mu A/A$	
U	189 $\mu A/A$		80 $\mu A/A$	

Tabela 3.40 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za faznu grešku za mernu tačku 1% I_n

Fazna greška pri 1% I_n				
	pojedinačno		jednovremeno	
	$\delta = -17 \mu rad$		$\delta = 17 \mu rad$	
	Vrednost	Komponenta m.n.	Vrednost	Komponenta m.n.
Tip A	1.7 %	$u(\delta_T) = \sigma = 1.68\%$	47.9 %	$u(\delta_T) = \sigma = 47.9\%$
Tip B	99.3%	$u(\delta_{Opt}) = 10\%$ $u(\delta_{Iref}) = 87.7\%$	52.1 %	$u(\delta_{RE}) = 50.1\%$ $u(\delta_U) = 2.0\%$
u_c	110 μrad		12 μrad	
U	219 μrad		24 μrad	

Tabela 3.41 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za amplitudnu grešku za mernu tačku 1% I_n

Amplitudna greška pri 1% I_n				
	pojedinačno		jednovremeno	
	$g = 5 \mu A/A$		$g = 6 \mu A/A$	
	Vrednost	Komponenta m.n.	Vrednost	Komponenta m.n.
Tip A	0.4 %	$u(g_T) = \sigma = 0.4\%$	2.1 %	$u(g_T) = \sigma = 2.1\%$
Tip B	99.6 %	$u(g_{Iref}) = 72.1\%$ $u(g_{Opt}) = 23.6\%$	97.9 %	$u(\delta_{RE}) = 48.8\%$ $u(g_U) = 49.0\%$
u_c	41 $\mu A/A$		8 $\mu A/A$	
U	82 $\mu A/A$		17 $\mu A/A$	

Tabela 3.42 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za faznu grešku za mernu tačku 1% I_n

Fazna greška pri 1% I_n				
	pojedinačno		jednovremeno	
	$\delta = -17 \mu rad$		$\delta = 4 \mu rad$	
	Vrednost	Komponenta m.n.	Vrednost	Komponenta m.n.
Tip A	1.8 %	$u(\delta_T) = \sigma = 1.77\%$	32.5 %	$u(\delta_T) = \sigma = 32.5\%$
Tip B	98.2%	$u(g_{RE}) = 1.2\%$ $u(\delta_{Opt}) = 12.9\%$ $u(\delta_{Iref}) = 84.1\%$	67.5 %	$u(\delta_{RE}) = 64.9\%$ $u(\delta_U) = 2.6\%$
u_c	77 μrad		10 μrad	
U	154 μrad		21 μrad	

Tabela 3.43 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za amplitudnu grešku za mernu tačku 100% I_n

Amplitudna greška pri 100% I_n				
	pojedinačno		jednovremeno	
	$g = 0 \mu A/A$		$g = 1 \mu A/A$	
	Vrednost	Komponenta m.n.	Vrednost	Komponenta m.n.
Tip A	1.8 %	$u(g_T) = \sigma = 1.8\%$	1.3 %	$u(g_T) = \sigma = 1.3\%$
Tip B	98.2%	$u(g_{RE}) = 27\%$ $u(g_U) = 27\%$ $u(g_{Opt}) = 40.8\%$	98.7 %	$u(g_{RE}) = 49.3\%$ $u(g_U) = 49.3\%$
u_c	11 $\mu A/A$		8 $\mu A/A$	
U	22 $\mu A/A$		16 $\mu A/A$	

Tabela 3.44 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za faznu grešku za mernu tačku 100% I_n

Fazna greška pri 100% I_n				
	pojedinačno		jednovremeno	
	$\delta = 0 \mu rad$		$\delta = -5 \mu rad$	
	Vrednost	Komponenta m.n.	Vrednost	Komponenta m.n.
Tip A	4.1 %	$u(\delta_T) = \sigma = 4.1\%$	9 %	$u(\delta_T) = \sigma = 9\%$
Tip B	95.9%	$u(\delta_{RE}) = 13.4\%$ $u(\delta_{Opt}) = 20.4\%$ $u(\delta_{ref}) = 61.6\%$	91.0 %	$u(\delta_{RE}) = 87\%$ $u(\delta_j) = 3.5\%$
u_c	23 μrad		9 μrad	
U	46 μrad		18 μrad	

3.6 Merna nesigurnost metode jednovremenog uporednog etaloniranja kod interkomparacija mernih aparatura

U ovom poglavlju data je ukratko procena merne nesigurnosti kod interkomparacije dve merne aparature zasnovane na metodi strujnog komparatora (NRC) i modifikovanoj diferencijalnoj metodi (INT) koja je realizovana u laboratoriji NRC u Kanadi.

Kao što je u poglavlju 2.4 rečeno, interkomparacija je obavljena na dva načina. Prvo je poređenje dveju mernih aparatura urađeno na klasičan način, etaloniranjem transfer etalona, etalon strujnog transformatora. Zatim je interkomparacija urađena primenom jednovremene uporedne metode etaloniranja.

Budžet merne nesigurnosti INT merne aparature za klasično poređenje putem transfer etalona dat je u tabeli 3.45 za ispitne struje u opsegu od 0,5% do 5% i od 10% do 150% naznačene struje I_n . Sa U je označena proširena merna nesigurnost sa faktorom obuhvata $k = 2$.

Izvori merne nesigurnosti tipa A su ponovljivost za $N = 10$ merenja, a za tip B: uticaj mernog kola mernog uređaja, uticaj etalon strujnog transformatora, kao i uticaji referentne struje, opterećenja i frekvencije.

Za mernu aparaturu NRC zasnovanu na strujnom komparatoru, za klasično poređenje putem transfer etalona, komponente merne nesigurnosti obuhvataju: uticaj strujnog komparatora, mernog uređaja i strujnog opterećenja. Kombinovana proširena merna nesigurnost sa faktorom obuhvata $k = 2$, za NRC mernu aparaturu na bazi strujnog komparatora procenjena je na manje od $2 \mu\text{A/A}$ odnosno μrad za strujne transformatore čija je greška manja od $100 \mu\text{A/A}$ odnosno μrad , a za strujne transformatore čije su greške ispod $3000 \mu\text{A/A}$, odnosno μrad , procenjena je na $6 \mu\text{A/A}$, odnosno μrad .

Kod klasičnog poređenja putem transfer standarda, merna nesigurnost tipa A, označena na slici 2.4.4, je ispod $1 \mu\text{A/A}$ i μrad pri ispitnim strujama iznad 10% nominalne struje i ispod $5 \mu\text{A/A}$ i μrad pri ispitnim strujama manjim od 0,5% nominalne struje. Vidi se da preovlađuje tip A merne nesigurnosti INT merne aparature. Odstupanja grešaka između dva merna sistema za 50 Hz su slična, kao što se vidi na slici 2.4.5.

Kod etaloniranja jednovremenom uporednom metodom, tip A merne nesigurnosti ($k = 2$) za NRC mernu aparaturu je unutar $0.1 \mu\text{A/A}$ za amplitudnu grešku i $0.2 \mu\text{rad}$ za faznu grešku za ispitne struje iznad 1% naznačene struje. Za ispitne struje u opsegu 0.5% do 1% nominalne vrednosti struje, tip A merne nesigurnosti je unutar $0.5 \mu\text{A/A}$, odnosno μrad i za amplitudnu i za faznu grešku.

Za INT mernu aparaturu, tip A merne nesigurnosti je unutar $1 \mu\text{A/A}$, odnosno μrad i za amplitudnu i za faznu grešku za ispitne struje veće ili jednake 10% nominalne struje. Ove merne nesigurnosti su za ispitne tačke 5%, 1% i 0.5% naznačene struje, manje od 2, 5 i $10 \mu\text{A/A}$ odnosno μrad .

Tabela 3.45 Budžet merne nesigurnosti za INT mernu aparaturu kod klasične interkomparacije etaloniranja transfer etalona [41]

Izvori merne nesigurnosti	Referentna struja u opsegu od 0,5% do 5% I_n		Referentna struja u opsegu od 10% do 150% I_n	
	Za amplitudnu grešku g ($\mu\text{A/A}$)	Za faznu grešku δ (μrad)	Za amplitudnu grešku g ($\mu\text{A/A}$)	Za faznu grešku δ (μrad)
σ ($N=10$)	5	5	0,5	0,5
Merni uređaj	1,7	2,9	1,2	2
Etalon transformator	2,9	4	1,7	2,5
Referentna struja	1,4	1,4	1,2	1,2
Referentno opterećenje	1	1	1	1
Frekvencija	0,6	1,2	0,6	0,6
U ($k = 2$)	12,6	14,7	5,4	7,3

ZAKLJUČAK

Jednovremena uporedna metoda etaloniranja strujnih mernih transformatora sa dve različite merne aparature, prikazana u ovoj doktorskoj disertaciji, predstavlja novi pristup etaloniranju strujnih mernih transformatora koji otvara nove metrološke mogućnosti i prednosti. Ovom metodom moguće je jednovremeno etaloniranje nekog strujnog mernog transformatora sa dva (tri, a možda i više) različita merna sistema. U radu je metoda „Jednovremenog uporednog etaloniranja“ detaljno teorijski obrađena i još detaljnije eksperimentalno proveravana u dužem vremenskom periodu sa više različitih mernih sistema.

U disertaciji, u prvom poglavlju, obrađene su različite merne metode za ispitivanje i etaloniranje mernih transformatora koje imaju primenu u savremenoj praksi, i koje podrazumevaju i različite merne mogućnosti. Prikazane su njihove prednosti i mane, kao i načini njihove realizacije.

Koncepcija i realizacija jednovremene uporedne metode etaloniranja strujnih mernih transformatora sa dve različite merne metode prikazana je u drugom poglavlju. Metoda je eksperimentalno potvrđena jednovremenim ispitivanjem i etaloniranjem strujnih mernih transformatora sa nekoliko mernih aparatura koje su zasnovane na različitim mernim metodama. U radu su prikazani rezultati pojedinačnog i jednovremenog ispitivanja tačnosti korišćenjem dve metode od kojih je jedna zasnovana na diferencijalnoj mernoj metodi, a druga na metodi kompenzovanog strujnog komparatora. Takođe je eksperimentalno potvrđeno i jednovremeno i pojedinačno ispitivanje tačnosti pomoću dve različite aparature bazirane na diferencijalnoj mernoj metodi. Pokazana je primena jednovremene metode kod etaloniranja strujnih etalon transformatora i kod etaloniranja aparatura za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Na primerima interkomparacije dve i tri različite merne aparature za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora pokazana je mogućnost njene primene i u ovoj oblasti.

Sprovedena istraživanja i eksperimentalni rezultati pokazuju i potvrđuju niz prednosti i doprinosa ovakvog načina etaloniranja. Jednovremena metoda doprinosi povećanju tačnosti etaloniranja strujnih mernih transformatora, što omogućava bolje i jasnije definisanje njihovih najznačajnijih karakteristika, amplitudne i fazne greške i u skladu s tim njihovu praktičnu primenu.

Etaloniranje mernih aparatura za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora u praksi nije lako realizovati. Jednovremenom uporednom metodom relativno jednostavno se prevazilazi problem potrebe za skupim, i često samo vrhunskim laboratorijama dostupnim mernim uređajima za etaloniranje aparatura za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora, što je još jedan doprinos ove disertacije. Interkomparacijom dva merna sistema visoke klase tačnosti Nacionalnog metrološkog instituta Kanade (NRC), od kojih je jedan razvijen u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla", pokazana je i prednost i doprinos primene jednovremene metode u oblasti primarne metrologije transformacije naizmeničnih struja.

Detaljno razmatranje uticaja na merenje amplitudne i fazne greške strujnih mernih transformatora dato je u trećem poglavlju. Pokazano je kako se pojedini uticaji transponuju u komponente ukupne merne nesigurnosti kod ispitivanja i etaloniranja kako standardnih strujnih mernih transformatora, tako i etalon strujnih transformatora. Prema prikazanom matematičkom modelu za amplitudnu i faznu grešku, a na osnovu konkretnih rezultata merenja, dati su proračuni budžeta merne nesigurnosti za nekoliko ključnih primera pojedinačnog i

jednovremenog ispitivanja strujnih mernih transformatora i etaloniranja strujnih etalon transformatora. Sprovedena analiza je pokazala da se primenom nove jednovremene uporedne metode postiže značajno poboljšanje merne nesigurnosti etaloniranja, za skoro red veličine u odnosu na klasično, pojedinačno etaloniranje sa dve različite merne aparature. Analiza uticajnih veličina na mernu nesigurnost pokazuje da se po novoj metodi etaloniranja eliminiše niz komponenti od kojih su najznačajnije uticaj nejednakosti referentnih struja i ispitnog opterećenja. Smanjenje merne nesigurnosti kod etaloniranja strujnih mernih transformatora višestruko je značajno. Ovakav pristup proračunu merne nesigurnosti značajno doprinosi etaloniranju strujnih mernih transformatora, posebno onih visokih klasa tačnosti, što je od posebne važnosti u primarnoj metrologiji transformacije naizmeničnih struja. U lancu metrološke sledivosti na svakom nivou metrološke hijerarhije smanjenje merne nesigurnosti ima ne samo tehničko već i ekonomsko opravdanje.

Na kraju ovog rada želim da izrazim posebno zadovoljstvo što sam imala prilike i mogućnosti da se bavim ovom oblašću metrologije i budem deo tima koji radi kako na ispitivanju strujnih mernih transformatora standardnih klasa tačnosti u laboratoriji i na terenu, tako i na veoma delikatnim ispitivanjima etalon strujnih transformatora i aparatura za njihovo etaloniranje, čije su deklarirane greške reda ppm ($\mu A/A$, odnosno μrad). U Elektrotehničkom Institutu "Nikola Tesla" se već više od šezdeset godina razvija i proizvodi merna oprema za ispitivanje tačnosti mernih transformatora koja ima široku praktičnu primenu u zemlji i inostranstvu. Ova činjenica pružala je dobru osnovu za razvoj, usavršavanje i primenu novih mernih metoda u ovoj oblasti. Nadam se da će i ovaj rad doprineti nastavku ove značajne dugogodišnje tradicije.

LITERATURA

- [1] *The International System of Units (SI)*, 8th Edition, Bureau international des poids et mesures, 2006.
- [2] *The International System of Units - Supplement 2014: Updates to the 8th edition (2006) of the SI Brochure*, Bureau international des poids et mesures, 2014.
- [3] F. Piquemal, B. Jackelmann, L. Callegaro, J. Hallstrom, J.B.M. Janssen, J. Melcher, G. Rietveld, U. Siegner, P. Wright and M. Zeler, "Metrology in electricity and magnetism: EURAMET activities today and tomorrow", *Metrologia*, No. 54, R1, doi.org/10.1088/1681-7575/aa7case, 2017.
- [4] S.Škundrić, D.Naumović-Vuković, D.Kovačević, "Uloga i važnost mernih transformatora u merenju električnih veličina", Međunarodno regionalno savetovanje o distributivnim mrežama, Herceg Novi, 2004
- [5] S. Škundrić, D. Naumović-Vuković, A. Nikolić, D. Kovačević, *Metrological supervision of electricity meters in substations up to 35 kV*, 9th International Conference – Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, October 2007.
- [6] *Metrologija - ukratko*, 3. izdanje, DMDM, 2008,
- [7] Pravilnik o mernim transformatorima koji se koriste za obračun električne energije, "Službeni glasnik RS", broj 66/15
- [8] SRPS EN 61869-1: 2010 Merni transformatori - Deo 1: Opšti zahtevi
- [9] SRPS EN 61869-2: 2014 Merni transformatori - Deo 2: Dodatni zahtevi za strujne transformatore
- [10] SRPS EN 61869-3: 2012 Merni transformatori - Deo 3: Dodatni zahtevi za induktivne naponske transformatore
- [11] SRPS EN 61869-4: 2012 Merni transformatori - Deo 4: Dodatni zahtevi za kombinovane transformatore
- [12] SRPS EN 61869-3: 2012 Merni transformatori - Deo 5: Dodatni zahtevi za kapacitivnenaponske transformatore
- [13] P. G .Agnew and T.T.Fitch, "The detrmiation of the constants of instrument transformers", *Bull. Buerau Standards*, vol.6, pp.281-299, April 1909.
- [14] H. B. Brooks and F.C. Holtz, "The two-stage current transformer", *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, Vol. XLI, pp. 382-393, Jun, 1922.
- [15] F. B .Silsbee, "A method for testing current transformers", *Bull. Buerau Standards*, vol.14, pp.317-329, July 1917.
- [16] A. H. M. Arnold, "Current transformer testing", *J.Inst.Elect. Eng.*, vol. 74, No. 449, pp. 424-437, May 1934.

- [17] G.Rietveld, L. Jol, H. E. van den Brom and E. So, "High-current CT calibration using a sampling current ratio bridge", *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 62, No. 6, pp. 1693-1698, Jun. 2013.
- [18] E. Mohns, J. Meisner, G. Roeissle and M. Seckelmann, "A wideband current transformer bridge", *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 63, No. 10, pp. 2322-2329, Jun. 2013.
- [19] E. Mohns, G. Roeissle, S. Fricke, F. Pauling, "An AC Current Transformer Standard Measuring System for Power Frequencies", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 66, Issue 6, pp. 1433-1440, 2017
- [20] E. Mohns, S Fricke, F. Pauling, "An AC power amplifier for testing instrument transformer test equipment", *Conference on Precision Electromagnetic measurements*, CPEM2016, 2016
- [21] S. Siegenthaler, C. Mester, "A Computer - Controlled Callibrator for Instrument transformer Test Sets", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 66, Issue 6, pp. 1184-1190, 2017.
- [22] P.N.Miljanić, N.L.Kusters, W.J.M.Moore, "A current comparator for precision measurement of direct current rations", *Electrical Engineering*, Vol. 82, Issue 3, pp. 204-210, 1963.
- [23] M.P. Mac Martin and N.L. Kusters, "A direct current comparator ratio bridge for four terminal resistance measurement", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, IM-15 (4), pp. 212-220, December 1966
- [24] I. Obradovic, P. Miljanic, S. Spiridonovic, "Prufung von Stromwandler mittls eines Stromkomparators und eines elektrischen Hilfssystems", *ETZ-A*, H.19, pp.699-701., 1957
- [25] P. N. Miljanic, N. L. Kusters and W. J. Moore, "The development of the current comparator, a high-accuracy A-C ratio measuring device", *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng. I, Commun. Electron.*, vol 81, no.5, pp.359-368, Nov. 1962.
- [26] S.Škundrić, D. Kovačević, D. Naumović-Vuković, S. Milosavljević, „Primena strujnog komparatora za ispitivanje tačnosti etalona i transformatora u mernim grupama“, „Elektroenergetski sistemi: eksploatacija, upravljanje, ispitivanje, merenje“, Monografija, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“,Elektroenergetski sistemi COBISS.SR-ID 136938252,(ISBN 86-83349-06-3, ISBN 978-86-83349-06-07 a), Beograd, 2006.
- [27] S. Škundrić, R. Dereta, D. Naumović-Vuković, "Interkomparacija strujnih etalon transformatora", "Elektroprivreda", br. 3., str. 25-31, Beograd, 2005. (ISSN 0013-5755= Elektroprivreda COBISS.SR-ID 32023)
- [28] S. Škundrić, D. Kovačević, D. Naumović-Vuković, „The role and Importance of Software Application in Instrument Transformers Accuracy Testing“, *IMEKO XVIII World Congress*, Rio de Janeiro, Brazil, September, 2006.
- [29] D.Naumović-Vuković, S. Škundrić, D. Kovačević, S. Milosavljević, "On Site Accuracy Testing of Instrument Transformers", *The Third International Symposium on High Voltage and High Power Tests, Measurements and Certification of Electrical Power Equipment*, Baile Olanesti, Romania, November, 2007.
- [30] ISO, *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, Int. Org. for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993.
- [31] SRPS ISO/IEC 17025:2017 Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje

- [32] ILAC G17:2002 Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of Standard ISO/IEC 17025
- [33] ILAC P14:12/2010 - ILAC Policy for Uncertainty in Calibration
- [34] L.R. Pendrill "Using measurement uncertainty in decision making and conformity assessment", *Metrologia*, No. 51, pp. 206-218, doi:10.1088/0026-1394/51/4/S206, 2014.
- [35] www.imeko.org
- [36] www.cpem2016.com
- [37] S.Škundrić, D.Kovačević, D.Naumović-Vuković, S.Milosavljević, "Ispitivanje tačnosti etalon strujnih transformatora", *Info-Teh*, D10, pp. 262-264, Jahorina, 2006
- [38] B. Djokić, H. Parks, N. Wise, D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, A. Žigić and V. Polužanski, "A Comparison of Two Current Transformer Calibration Systems at NRC Canada," *CPEM 2016 Conf. Digest*, July 2016.
- [39] S. Harmon, L. Henderson, NPL REPORT TQE4, EUROMET Projects 473 and 612: Comparison of the measurement of current transformers, EURAMET. EM-S11 Final Report, March 2009
- [40] J.D. Ramboz, O. Petersons, *A Calibration Service for current Transformers*, NIST Special publication 250-36, Gaithersburg, 1991
- [41] B. Djokić, H. Parks, N. Wise, D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, A. Žigić and V. Polužanski, "A Comparison of Two Current Transformer Calibration Systems at NRC Canada," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 66, Issue 6, pp. 1628-1635, 2017.
- [42] V. Bego, *Mjerni transformatori*, Školska knjiga, Zagreb, 1977.
- [43] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, S. Milosavljević, "Uticaj sekundarnog opterećenja na tačnost strujnih mernih transformatora", *Zbornik radova sa VI Simpozijuma o elektrodistributivnim mrežama Srbije i Crne Gore sa regionalnim učešćem*, R.1.2. str. 1-6, ISBN 978-86-83171-14-9, Oktobar, 2008.
- [44] S. Spiridonović, S. Škundrić, "Strujni merni transformatori", *Zbornik radova - Savetovanje o transformatorima u energetici*, 1996.
- [45] G. Keinath, "Fehlergroben des Stromwandlers", *ATM*, (Z224-1), 1932.
- [46] G. Keinath, "Stromwandler mit Hochter Genauigkeit", *ATM*, (Z20-4), 1932
- [47] G. Keinath, "Hochmagnetische Legirungen", *ATM*, (Z913-3), 1932
- [48] H. Schering, E. Alberti, Eine einfache Methode zur Prufung von Stromvandlern, *Arch. Elektrotechn*, Bd. 2, pp. 236-237, 1914.
- [49] H.S. Baker, "Current Transformer Ratio and Phase Error by Test Ring Method", *AIEE Proc.*, Vol. XXXVI, pp.1173, 1917
- [50] W. Geyger, "Wechselstrom - Kompensatoren", *ATM*, (J94-1), 1932.
- [51] W. Geyger, "Wechselstrom - Kompensatoren", *ATM*, (J94-9), 1937.
- [52] W. Hohle, "Messwandler - Pruefeinrichtungen", *Arch. Elektrotechn.*, Bd27, pp849, 1933.
- [53] W. Hohle, Neure Stromwandler - Pruefeinrichtungen, *ATM*, (Z224-4), 1934
- [54] W.E. Bruges, "Method of Testing Current Transformers", *Jurnal IEVE*, Vol. 68, pp.305, 1930.

- [55] W. Reiche, "Stromwoundler Hochster Genauikeit", VDE Fachberichte, 1935.
- [56] S.Škundrić, F. Smak, S. Spiridonović, N. Pandurović, D. Kovačević, "Savremene metode i uređaji za ispitivanje mernih transformatora" Studija uređena za Združenu elektroprivredu Srbije, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd, 1990.
- [57] W.J.M. Moore and P.N. Miljanic, *The Current Comparator*, Peter Peregrinus Ltd., ISBN 0 86341 112 6, 1988.
- [58] S.Škundrić, D. Kovačević, D. Naumović-Vuković, S. Milosavljević, „Primena strujnog komparatora za ispitivanje tačnosti etalona i transformatora u mernim grupama“, „Elektroenergetski sistemi: eksploatacija, upravljanje, ispitivanje, merenje“, Monografija, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, 2006. (ISBN 86-83349-06-3, ISBN 978-86-83349-06-07 a) Elektroenergetski sistemi COBISS.SR-ID 136938252
- [59] W.J.M. Moore, "A Technique for calibrating power frequency wattmeters at low power factors", IEEE Trans. Instrumentation and Measurements, IM-23 (4), pp.318-322, December 1974
- [60] N.L.Kusters, W.J.M. Moore and P.N. Miljanic, "A current comparator for precision measurement of DC ratios", IEEE Transactions on Communications and Electronics, Vol. 83, Issue 70, pp.22-27, January 1964
- [61] M.P. Mac Martin and N.L. Kusters, "The Application of the Direct Current Comparator to a Seven Decade Potentiometer", IEEE IM-17, pp. 263-268, 1968.
- [62] E. So, "A Current Comparator Based 20-bit Digital to Analog Converter", IEEE IM-34 Issue 2, pp. 278-282, 1985.
- [63] W. Winiecki, "Virtual instruments - what does it really mean?", IMEKO World Congress, Tampere, 1997.
- [64] Pandurović, S.Škundrić, D.Miličević, "Prikaz sistema za automatsko ispitivanje tačnosti strujnih transformatora - ASK", Zbornik radova VII JUKEM, Ohrid, 1976.
- [65] S.Škundrić, F.Smak, S.Vukovojac, D.Kovačević, Mikroprocesorski uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Zbornik radova instituta "Nikola Tesla", vol.8, Beograd, 1990.
- [66] F.Smak, S.Škundrić, S.Vukovojac, D.Kovačević, M.Korolija, "Savremeni uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, tip INST-2A", Svetovanje "Transformatori u elektroenergetici", Beograd, 1996
- [67] S.Škundrić, D.Kovačević, F.Smak, S.Vukovojac, M.Korolija, "A coputer aided system for automatic testing of instrument current transformer accuracy", XXIII IMEKO World Congress, Torino, 1994
- [68] F.Smak, S.Škundrić, S.Vukovojac, D.Kovačević, M.Korolija, Savremeni uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, tip INST-2A. Svetovanje "Transformatori u elektroenergetici", Beograd, 1996
- [69] D. Naumovic Vukovic, S. Skundric, A. Zigic "Three channels device for current transformer accuracy testing", Proc. 2017 International Symposium on Power Electronic, pp. 1-4, 2017.
- [70] G.Barney, *Intelligent instrumentation-microprocessor aplications in instruments*, Prantice and Hall, London, 1988
- [71] K.Clarke, "Phase measurement, traceability and verification theory and practice",. IEEE Trans. Instrument&Measurement, No 1, 1990, s 51-56.

- [72] Applications handbook of precision phase measurement. Dranetz Engineering Laboratories, 1995.
- [73] N. Pandurović, S. Škundrić, F. Smak, "Jedna modifikacija uređaja KSK-6", VI JUKEM, Jajce, 1974.
- [74] Pandurović N., Miljanić P., DEVICE FOR TESTING THE ACCURACY OF INSTRUMENT CURRENT TRANSFORMERS ON SITE, VI IMECO Congress London 1976
- [75] W. Brendler, "Eine neue tragbare wandler-messeinrichtung mit direkter fehleranzeige nach dem Differenzverfahren", Elektrotechnik, H.7, pp. 333-335, 1957.
- [76] E.Zinn, "An electronic-self-balancing instrument transformer testing device", IEEE Trans. Instrument&Measurement, Vol. IM-20, pp. 291-296, 1971.
- [77] W.Bruckel, Eine neue digital einstellbare Messwandler-Prüfeinrichtung mit Fehlerkompensation. ATM, H.1, pp. 17-20, 1974.
- [78] G.Ramm, H.Moser, Eine neuartige, rechnergesteuerte und selbstkalibrierende Stromwandler-Messeinrichtung. PTB-Mitteilungen Bd.105, H4, s.263-271, 1995
- [79] www.ptb.de
- [80] A. Keller, "Neuzeitliche Messwandler - Prüfeinrichtungen nach dem Differentialverfahren, ETZ-a, pp. 105-108, 1953
- [81] A. Braun, "Elektronischer Vektormesser für die Komplexe Wechselstrommesstechnik", TM50, H.10, pp. 372-377, 1985.
- [82] A. Braun, H. Moser, "Rechnergesteuerter Massplatz zur Kalibrierung von Normalspannungswandlern" PTB Mitteilungen, pp. 298-302, 1989.
- [83] S. Škundrić, Ispitivanje tačnosti mernih transformatora metodom dvofazne konverzije, Doktorska disertacija, Elektronski fakultet u Nišu, 2000.
- [84] O. Ivanusiw, "Microprocessor Based Automatic Instrument Transformer Comparator ", IEEE IM 32, pp. 165-169, 1983.
- [85] M. Lobijinski, *Messtechnik mit Mikrocomputern*, Munchen 1984
- [86] S.Škundrić, V.Radenković, D.Kovačević, F.Smak, S.Mikičić, Testing of instrument transformers with the non-standard ratios. XXIV IMEKO World Congress, Tampere, 1997
- [87] S.Škundrić, V.Radenković, "Instrument transformer accuracy testing by the two-phase conversion method", Electrical Engineering, H 4, pp.326-328, 1998.
- [88] D. Kovačević, S.Škundrić, S.Mikičić, Virtual instrument in nonsinusoidal conditions, XI Conference TC-4, IMEKO, Lisbon, 2001.
- [89] S.Škundrić, D. Kovačević S.Mikičić, Instrument transformers accuracy testing by DFT method. XVII World Congress IMEKO, Cavtat, 2003.
- [90] CGM 200:2012 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)
- [91] Pravilnik o vrstama merila koja podležu zakonskoj kontroli, Službeni glasnik RS, br. 13/2018.
- [92] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, Lj. Nikolić, I. Krstić, D. Belonić, P. Nikolić, "Ispitivanje tačnosti generatorskih strujnih mernih transformatora nazivne primarne struje 8000A", Zbornik radova XXXI Savetovanje CIGRE SRBIJA, RA302, str. 1-8, 2013.

- [93] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, S. Milosavljević, "Mogućnosti metrološkog nadzora obračunskih mernih mesta u elektrodistributivnim mrežama", VII CIRED, Vrnjačka Banja, 26.09.2010.-01.11.2010., R-5.17
- [94] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, A. Nikolić, *Ispitivanje tačnosti mernih grupa u elektroenergetskim postrojenjima*, 28. Savetovanje JUKO CIGRE, Vrnjačka Banja, oktobar 2007.
- [95] S. Škundrić, D. Naumović-Vuković, A. Nikolić, D. Kovačević, *Metrological supervision of electricity meters in substations up to 35 kV*, 9th International Conference – Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, October 2007.
- [96] S. Škundrić, D. Naumović-Vuković, R. Dereta, A. Popović, "Merna nesigurnost etalona odnosa naizmeničnih struja Zavoda za mere i dragocene metale", Zbornik radova, Šesti kongres metrologa Srbije i Crne Gore, str. 139-145., Beograd, maj 2005. (ISBN 86-7518-050-0 (GF))
- [97] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, R. Dereta, Merna nesigurnost etaloniranja strujnih mernih transformatora u Laboratoriji Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, Kongres Metrologa, septembar 2007.
- [98] H. Cayci, "A sample method for the measurement of instrument current transformer burdens", Proceedings of the XXIX CPEM2014, pp. 634-635, 2014.
- [99] K. Draxler, R. Styblikova, M. Ulvr, "Advanced procedures for calibration of instrument transformer burdens", Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 983-988, 2011.
- [100] SRPS ISO/IEC 17043:2011 Ocenjivanje usaglašenosti - Opšti zahtevi za ispitivanje osposobljenosti
- [101] K. Draxler, R. Stzblikova, G. Rietveld, H. van den Brom, M. Schnaitt, W. Waldmann, E. Dimitrov, T. Cincar-Vujovic, B. Paczek, G. Sadkowski, G. Crotti, R. Martin, F. Garnacho, I. Blanc, R. Kampfer, C. Mester, A. Wheaton, E. Mohns, E. Bergman, M. Hammarquist, H. Cayci, J. Hallstrom, E. P. Soumalainen, "International Comparison of Current Calibration Systems up to 10kA at 50Hz frequency", Proc. of Conference CPEM 2016, pp.1-2, 2016.
- [102] J.K. Jung, E. So, J.T. Park, M. Kim, "KRISS-NRC Intercomparisons of Calibration Systems for Instruments Transformers with Many Different Ratios at Power Frequency", IEEE Trans. I.&M., Vol.58, Issue 4, pp. 1023-1028, 2009.
- [103] D. Naumovic-Vukovic, S. Skundric, D. Kovacevic and S. Milosavljevic, "Calibration of High Accuracy Class Standard Current Transformers," Proc. XIX IMEKO World Congress, pp. 621-625, Sep. 2009.
- [104] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, D. Kovačević: „Etaloniranje strujnog transformatora sa elektronskom kompenzacijom greške“, Međunarodni simpozijum INFO-TEH, Jahorina, 2007.
- [105] EA-4/18 INF:2010 Guidance on the level and frequency of proficiency testing participation
- [106] ISO/IEC 17043:2010 Conformity assessment - General requirements for proficiency testing
- [107] N. L. Kusters, and W. J. M. Moore, "The Compensated Current Comparator; A New Reference Standard for Current-Transformer Calibrations in Industry," *IEEE Instr. Meas.*, vol. 13, no. 2-3, pp. 107 - 114, Jun.-Sep. 1964.

- [108] P. N. Miljanic, N. L. Kusters, and W. J. M. Moore, "The Application of Current Comparators to the Calibration of Current Transformers at Ratios up to 36000/5 Amperes," *IEEE Instr. Meas.*, vol. 17, no. 3, pp. 196 - 203, Sep. 1968.
- [109] K. Forger and H. Schlinke, "Investigation of AC Differential Current Transformers Using a Current Step-Up Circuit for 1-10 kHz," *ISA Trans.*, vol. 9, no. 3, pp. 176 - 188, 1970.
- [110] E. Mohs, J. Meisner, G. Roeissle and M. Seckelmann, "PTB-UNIM bilateral Comparison on Current Transformer Measurement Systems at currents up to 60000A", in Proc. CPEM, pp. 18-19, Jul. 2012.
- [111] R. Vogelgesnag, *Lock In Amplifier Theory*, Stuttgart, 2004
- [112] W. J. M. Moore and N. L. Kusters, "Direct Reading Ratio-Error Sets for the Calibration of Current Transformers," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 19, no. 3, pp. 161–166, Aug. 1970.
- [113] N. L. Kusters and W. J. M. Moore, "A Phantom Burden for Current Transformer Calibration," *IEEE Trans. Pow. App. Syst.*, vol. 93, no. 1, pp. 240 – 243, 1974.
- [114] W. J. M. Moore, G. Love and F. A. Raftis, "Measurement of Short Circuit Load Losses in Large Three Phase Power Transformers Using an Alternating Current Comparator Bridge," *IEEE Trans. Pow. App. Syst.*, vol. 94, no. 6, pp. 2074 – 2076, 1975.
- [115] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, *Guide to the Expression of Uncertainty in measurement*, International Organization for Standardization, Geneva, 1995
- [116] D. Naumović-Vuković, I. Krstić, A. Žigić, S. Škundrić, "Uticaj merne nesigurnosti pri oceni usaglašenosti strujnih mernih transformatora sa zahtevima standarda", Zbornik radova XXXI Savetovanje CIGRE SRBIJA, RA306, str. 1-8, 2015.
- [117] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić "Etaloniranje merne aparature za ispitivanje tačnosti mernih transformatora", Zbornik radova Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Knjiga 18, str. 195-204, Beograd, 2007. (UDK 621.314.224.8:53 088.3)
- [118] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, S. Milosavljević, „Problemi u primeni strujnih transformatora malih naznačenih snaga“, *Elektroprivreda*, br. 2, str. 162-167, Beograd, 2010., UDK 621.314.224, ISSN 0013-5755
- [119] IS-EMS 411-2015 Merni transformatori, 2015.
- [120] JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data – Guide to expression of uncertainty in measurement (ISO Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, 1995 with minor corrections)
- [121] J.D. Ramboz, O. Petersons, *A Calibration Service for current Transformers*, NIST Special publication 250-36, Gaithersburg, 1991.
- [122] D. Naumović-Vuković, S. Škundrić, R. Dereta, Merna nesigurnost etaloniranja strujnih mernih transformatora u Laboratoriji Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, Kongres Metrologa, septembar 2007.
- [123] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the *Guide to the Expression of Uncertainty in measurement, Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, Joint Committee for Guides in Metrology, Geneva, 2007.
- [124] M3003:EDITION 3 2012 - The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, United Kingdom Accreditation Service

PRILOG 1: SPISAK SLIKA PO REDOSLEDU POJAVLJIVANJA

Slika 1.1.1 Strujni merni transformator: a) Električna šema strujnog mernog transformatora, b) Vektorski dijagram struja strujnog mernog transformatora

Slika 1.1.2 a) Zavisnost amplitudne greške od struje i opterećenja, b) zavisnost fazne greške od struje i opterećenja

Slika 1.2.1 Diferencijalna metoda za ispitivanje strujnih mernih transformatora

Slika 1.2.2 Kompenzaciona metoda za ispitivanje strujnih mernih transformatora

Slika 1.2.3 Šering-Albertijeva metoda za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora

Slika 1.2.4. Šering – Albertijeva metoda za ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora pomoću etalon transformatora

Slika 1.2.5 Ispitivanje tačnosti strujnih mernih transformatora po Holeovoj diferencijalnoj metodi

Slika 1.2.6. Strujni komparator

Slika 1.2.7 Elementarni deo detekcionog namotaja strujnog komparatora

Slika 1.2.8. Ekvivalentne kapacitivnosti kod strujnog komparatora

Slika 1.2.9. Električna šema samokalibracije strujnog komparatora

Slika 1.2.10. Struktura strujnog komparatora

Slika 1.2.11 Električna šema ispitivanja tačnosti strujnog mernog transformatora pomoću strujnog komparatora napajanog sa strane primara

Slika 1.2.12. Električna šema ispitivanja tačnosti strujnog mernog transformatora pomoću kompenzovanog strujnog komparatora

Slika 1.2.13 Vektorski dijagram napona

Slika 1.2.14 Strukturni model merne metode ortogonalnih komponenti napona

Slika 1.2.15 Električna šema diferencijalne metode za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora

Slika 1.2.16 Strukturni model merne metode ortogonalnih komponenti napona

Slika 1.2.17 Diskretizacija periodičnog signala $y(t)$

Slika 1.2.18 Diskretizacija merenih napona $\underline{U}_d$ i $\underline{U}_R$

Slika 1.2.19 Struktura PTB uređaja za ispitivanje tačnosti naponskih transformatora

Slika 1.2.20 Blok šema hardvera za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora

Slika 1.2.21 Električna šema modifikovane diferencijalne metode

Slika 1.2.22 Vektorski dijagram struja i napona kod metode dvofazne konverzije

Slika 1.2.23 Strukturna šema instrumenta za ispitivanje tačnosti mernih transformatora po metodi dvofazne konverzije

Slika 1.2.24 Strukturni model virtuelnog uređaja za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora

Slika 2.1.1 Električna šema jednovremene metode etaloniranja strujnog transformatora primenom metode kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalne metode

Slika 2.1.2 Rezultati merenja amplitudne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 2.5 VA i $\cos\varphi = 1$, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, pojedinačno i jednovremeno

Slika 2.1.3 Rezultati merenja fazne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 2.5 VA i $\cos\varphi = 1$, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, pojedinačno i jednovremeno

Slika 2.1.4 Rezultati merenja amplitudne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, pojedinačno i jednovremeno

Slika 2.1.5 Rezultati merenja fazne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$, metodom kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom, pojedinačno i jednovremeno

Slika 2.1.6 Električna šema jednovremene uporedne metode etaloniranja strujnog transformatora primenom dve aparature zasnovane na diferencijalnoj metodi

Slika 2.1.7 Razlike u merenju amplitudne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 2.5 VA i $\cos\varphi = 1$, pojedinačno i jednovremeno različitim metodama

Slika 2.1.8 Razlike u merenju fazne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 2.5 VA i $\cos\varphi = 1$, pojedinačno i jednovremeno različitim metodama

Slika 2.1.9 Razlike u merenju amplitudne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$, pojedinačno i jednovremeno različitim metodama

Slika 2.1.10 Razlike u merenju fazne greške mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A, klase 0.5, za naznačenu snagu 10 VA i $\cos\varphi = 0.8$, pojedinačno i jednovremeno različitim metodama

Slika 2.2.1 Praktična realizacija jednovremene uporedne metode u Laboratoriji za ispitivanje i etaloniranje Elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ [66]

Slika 2.2.2 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora EST5000 za prenosni odnos 100 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje

Slika 2.2.3 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora EST5000 za prenosni odnos 100 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje

Slika 2.2.4 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora EST5000 za prenosni odnos 100 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje

Slika 2.2.5 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora EST5000 za prenosni odnos 100 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje

Slika 2.2.6 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje

Slika 2.2.7 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 5 A/ 5A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje

Slika 2.2.8 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje

Slika 2.2.9 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje

Slika 2.2.10 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 5% do 50% naznačene struje

Slika 2.2.11 Razlike u izmerenim vrednostima amplitudne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 1% do 50% naznačene struje

Slika 2.2.12 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 5% do 50% naznačene struje

Slika 2.2.13 Razlike u izmerenim vrednostima fazne greške etalon transformatora H&B za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 1% do 50% naznačene struje

Slika 2.3.2 Električna šema jednovremenog podešavanja kompleksne greške referentne i ispitivane aparature.

Slika 2.4.1 Električna šema INT aparature za određivanje grešaka strujnih mernih transformatora zasnovana na novoj diferencijalnoj metodi

Slika 2.4.2 Blok dijagram obrade signala INT merne aparature

Slika 2.4.3 NRC merna aparatura zasnovana na metodi strujnog komparatora

Slika 2.4.4 Odstupanja u merenju amplitudne (plava linija) i fazne (crvena linija) greške transfer etalona prenosnog odnosa 1000:1 pojedinačno sa dve merne aparature, NRC i INT pri frekvenciji 50 Hz i opterećenju 0,03 Ω

Slika 2.4.5 Odstupanja u merenju amplitudne (plava linija) i fazne (crvena linija) greške transfer etalona prenosnog odnosa 1000:1 pojedinačno sa dve merne aparature, NRC i INT pri frekvenciji 60 Hz i opterećenju 0,03 Ω

Slika 2.4.6 Električne šema jednovremene metode etaloniranja ispitivanog transformatora Tx sa dva merna sistema INT i NRC

Slika 2.4.7 Fotografija postavke jednovremenog poređenja između NRC i INT merne aparature u laboratoriji NRC, Kanada: a) INT etalon strujni transformator na vrhu, ispod njega je transfer standard Tx prenosnog odnosa 2000:1, a ispod je NRC strujni komparator 60 kA i strujni izvor; b) NRC i INT merni uređaji

Slika 2.5.1 Jednovremeno poređenje tri mere aparature zasnovane na različitim mernim metodama

Slika 2.5.2 Realizacija jednovremene uporedne metode etaloniranja kod poređenja tri merna sistema u Laboratoriji Instituta

Slika 2.5.3 Razlike u merenju amplitudne greške ispitivanog strujnog transformatora jednovremenom uporednom metodom etaloniranja, u odnosu na srednju vrednost iste za sva tri merna sistema za prenosni odnos 100 A/5 A jednovremeno sa tri merna

Slika 2.5.4 Razlike u merenju fazne greške ispitivanog strujnog transformatora jednovremenom uporednom metodom etaloniranja, u odnosu na srednju vrednost iste za sva tri merna sistema za prenosni odnos 100 A/5 A jednovremeno sa tri merna

Slika 2.5.5 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 5% do 50% naznačene struje

Slika 2.5.6 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 1000 A/5 A u opsegu od 5% do 50% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem

Slika 2.5.7 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem

Slika 2.5.8 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 5% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem

Slika 2.5.9 Izmerene vrednosti amplitudne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 20% do 120% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem

Slika 2.5.10 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 120% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem

Slika 2.5.11 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 1% do 5% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem

Slika 2.5.12 Izmerene vrednosti fazne greške etalon transformatora H&B sa tri merna sistema za prenosni odnos 5 A/5 A u opsegu od 5% do 120% naznačene struje, pojedinačnim i jednovremenim uporednim etaloniranjem

Slika 3.1.1 Promena amplitudne greške u zavisnosti od vrednosti sekundarnog opterećenja za strujni transformator klase 0.5, prenosnog odnosa 100 A/5 A i naznačene snage 3 VA

Slika 3.1.2 Promena fazne greške u zavisnosti od vrednosti sekundarnog opterećenja za strujni transformator klase 0.5, prenosnog odnosa 100 A/5 A i naznačene snage 3 VA

Slika 3.1.3 Amplitudna greška u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara, za merni transformator klase tačnosti 0.5, prenosnog odnosa 200 A/5 A i naznačene snage 3 VA

Slika 3.1.4 Fazna greška u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara, za merni transformator klase tačnosti 0.5, prenosnog odnosa 200 A/5 A i naznačene snage 3 VA

Slika 3.1.5 Amplitudna greška u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara (za mernu tačku 5% I_n), za merne transformatore klase tačnosti 0.5, prenosnog odnosa 200 A/5 A i različitih naznačenih snaga: 3 VA, 15 VA i 45 VA

Slika 3.1.6 Fazna greška u funkciji sekundarnog opterećenja i ispitne struje kao parametara (za mernu tačku 5% I_n), za merne transformatore klase tačnosti 0.5, prenosnog odnosa 200 A/5 A i različitih naznačenih snaga: 3 VA, 15 VA i 45 VA

PRILOG 2: SPISAK TABELA PO REDOSLEDU POJAVLJIVANJA

Tabela 2.1 Rezultati zasebnog pojedinačnog ispitivanja tačnosti strujnog transformatora T_x metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom

Tabela 2.2 Greške merenja kada se strujni transformator T_x ispituje jednovremeno metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom

Tabela 2.3 Razlike u greškama merenja kada se strujni transformator T_x ispituje različitim mernim metodama na tri različita načina: zasebno diferencijalnom metodom i metodom kompenzovanog strujnog komparatora (KSK-DIF), jednovremeno metodama kompenzovanog strujnog komparatora i diferencijalnom metodom (KSK*-DIF*) i jednovremeno dvema diferencijalnim metodama (DIF1*-DIF2*)

Tabela 2.4 Metrološke karakteristike referentnih strujnih etalona i ispitivanog etalon strujnog transformatora

Tabela 2.5 Rezultati etaloniranja ispitivanog etalon transformatora tip EST5000 pojedinačno diferencijalnom metodom (DIF) i metodom kompenzovanog strujnog komparatora (KSK)

Tabela 2.6 Rezultati etaloniranja ispitivanog etalon transformatora tip EST5000 jednovremeno diferencijalnom metodom (DIF*) i metodom kompenzovanog strujnog komparatora (KSK*)

Tabela 2.3.1. Rezultati provere nule dve merne aparature primenom jednovremene metode etaloniranja

Tabela 2.3.2. Rezultati jednovremenog merenja amplitudne i fazne greške strujnog transformatora koje su generisane promenljivom impedansom $\underline{Z}_E$ pomoću dve merne aparature

Tabela 2.4.1 Rezultati jednovremenog poređenja mernih aparatura INT i NRC

Tabela 2.5.1 Rezultati jednovremene uporedne metode etaloniranja ispitivanog transformatora T_x sa tri merna sistema

Tabela 3.1 Komponente merne nesigurnosti kod ispitivanja / etaloniranja strujnih mernih transformatora u NIST-u

Tabela 3.2 Komponente merne nesigurnosti procenjene za interkomparaciju nacionalnih metroloških instituta Kanade (NRC) i Južne Koreje (KRIS)

Tabela 3.3 Uporedni pregled amplitudnih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja strujnog mernog transformatora metodom strujnog komparatora pojedinačno (KSK) i jednovremeno (KSK*)

Tabela 3.4 Uporedni pregled faznih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja strujnog mernog transformatora metodom strujnog komparatora pojedinačno (KSK) i jednovremeno (KSK*)

Tabela 3.5 Uporedni pregled amplitudnih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja strujnog mernog transformatora diferencijalnom metodom pojedinačno (DIF) i jednovremeno (DIF*)

Tabela 3.6 Uporedni pregled faznih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja strujnog mernog transformatora diferencijalnom metodom pojedinačno (DIF) i jednovremeno (DIF*)

Tabela 3.7 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2.5 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.8 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2.5 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.9 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2.5 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.10 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2.5 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.11 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2.5 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.12 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2.5 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.13 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2.5 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.14 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2.5 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.15 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 10 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.16 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 10 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.17 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 10 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.18 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 10 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.19 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 10 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.20 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 10 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.21 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 10 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.22 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 25 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 10 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.23 Uporedni pregled amplitudnih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A metodom strujnog komparatora pojedinačno (KSK) i jednovremeno (KSK*)

Tabela 3.24 Uporedni pregled faznih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A metodom strujnog komparatora pojedinačno (KSK) i jednovremeno (KSK*)

Tabela 3.25 Uporedni pregled amplitudnih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A diferencijalnom metodom pojedinačno (DIF) i jednovremeno (DIF*)

Tabela 3.26 Uporedni pregled faznih grešaka i proračunatih kombinovane u_c i proširene U (za $k = 2$) merne nesigurnosti, kod etaloniranja etalon strujnog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A diferencijalnom metodom pojedinačno (DIF) i jednovremeno (DIF*)

Tabela 3.27 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 1% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.28 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 1% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.29 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 1% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.30 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 1% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.31 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.32 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.33 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.34 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 5% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.35 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.36 Budžet merne nesigurnosti za amplitudnu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.37 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2 VA za pojedinačno merenje KSK metodom

Tabela 3.38 Budžet merne nesigurnosti za faznu grešku strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 100 A/5 A u mernoj tački 100% I_n pri 2 VA za jednovremeno merenje KSK metodom

Tabela 3.39 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za amplitudnu grešku za mernu tačku 1% I_n

Tabela 3.40 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za faznu grešku za mernu tačku 1% I_n

Tabela 3.41 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za amplitudnu grešku za mernu tačku 1% I_n

Tabela 3.42 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za faznu grešku za mernu tačku 1% I_n

Tabela 3.43 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za amplitudnu grešku za mernu tačku 100% I_n

Tabela 3.44 Udeo merne nesigurnosti tip A i tip B u ukupnoj mernoj nesigurnosti za faznu grešku za mernu tačku 100% I_n

Tabela 3.45 Budžet merne nesigurnosti za INT mernu aparaturu kod klasične interkomparacije etaloniranja transfer etalona