

## RAZVOJ METROLOGIJE U ELEKTROTEHNIČKOM INSTITUTU "NIKOLA TESLA" U BEOGRADU

Dr Slobodan Škundrić, dipl.ing

Metrologija kao nauka i merenja kao njena praktična implementacija imali su i imaju vrlo značajnu ulogu u razvoju Instituta, što je normalno i razumljivo. Ako po Mendeljejevu; "nauka počinje tamo gde počinju merenja", onda se eksperimentalna istraživanja kojima se Institut pretežno bavi ne mogu ni zamisliti bez značajne podrške metrologije. Toga su izgleda bili svesni i prvi istraživači u Institutu. Posle drugog svetskog rata metrološka infrastruktura u zemlji, a takođe i u Institutu bila je zaista na vrlo niskom nivou. Sa tehnički i tehnološki skromnom instrumentacijom i mernim uređajima, ali sa puno volje i poleta, rešavani su tada različiti metrološki zadaci i problemi. Jasno je da su aktivnosti i efekti takvog rada bili dosta ograničeni i pored znanja i upornosti istraživača. Invencija i znanje najčešće su se trošili na to, da se sa raspoloživim mernim i tehničkim sredstvima reše neki konkretni problemi i zadaci. To nisu bila uvek prava i optimalna rešenja, ali su se i na takvim poslovima sticala nova znanja i iskustva. Nabavka odgovarajuće merne opreme i instrumenata bila je imperativ daljeg napretka metrologije u Institutu.

Zahvaljujući aktivnoj međunarodnoj tehničkoj saradnji Instituta sa tada (sredinom prošlog veka) vodećim evropskim firmama iz oblasti merne tehnike kao što su: "Siemens" i "Hartmann & Braun", Institut je uspeo da se opremi sa u to vreme vrlo kvalitetnim i preciznim mernim uređajima i instrumentima kao što su: kompenzator za precizno merenje jednosmerne struje i napona, Šering-Albertijev kompenzator za ispitivanje tačnosti strujnih i naponskih mernih transformatora, visokonaponski Šeringov most za merenje kapaciteta i ugla gubitaka, Vitstonov i Tomsonov most za merenje otpornosti, garnitura analognih instrumenata klase tačnosti 0,2 za merenje jednosmernog i naizmeničnog napona, struje i snage, kao i garnitura odgovarajućih šentova i predotpora. Znajući da metrološku osnovu svakog tačnog merenja čine pre svega etaloni, Institut nabavlja setove radnih etalona; otpornosti, induktivnosti, kapacitivnosti. Od vodećeg evropskog metrološkog instituta PTB-a (Physikalisches Technische Bundesanstalt) Institut nabavlja grupu od deset Vestonovih ćelija, tada važećeg grupnog etalona volta. Nabavkom etalon strujnog transformatora primarne struje do 3000 A, etalon naponskog transformatora primarnog napona do 110 kV i otporničkog delitelja napona do 35 kV Institut kompletira i mernu opremu za ispitivanje tačnosti mernih transformatora. Sa već tada afirmisanim metrološkim stručnjacima (Petar Miljanić, Vladeta Knežević, Srđan Spiridonović), i sa navedenom mernom opremom Institut postaje vodeća metrološka laboratorija u zemlji. O tome svedoče mnoga tada pionirska merenja i ispitivanja koja su započeta upravo u Institutu. Prva redovna ispitivanja mernih instrumenata i mernih transformatora u tadašnjoj Jugoslaviji obavljana su u laboratorijama Instituta. Od kolikog je to bilo značaja sredinom prošlog veka u doba intenzivne elektrifikacije i dinamičkog razvoja elektroindustrije može se suditi po ugledu koji je Institut uživao kod svojih najznačajnijih poslovnih partnera (Elektrosrbija, Energoinvest, Rade Končar, EPS i dr.).

Posebno mesto u razvoju metrologije u Institutu imao je razvoj etalona električnih veličina. Bilo je jasno, da sama nabavka određenih etalona nije dovoljna. Trebalo je

rešiti probleme čuvanja i primene etalona kao i transfera mere na hijerarhijski niža merila. Zato je trebalo razviti i osvojiti odgovarajuće merne metode, obezbediti stabilne izvore jednosmernih i naizmeničnih struja i napona. U Institutu je 1965.godine razvijen visokostabilni izvor naizmeničnog napona sa invertorom na tiratronskej tehnološkoj osnovi. Za prelazak sa etalona jednosmernog napona na naizmenični napon Vladeta Knežević je razvio jedno originalno rešenje transfer instrumenta u vidu četvorokvadrantnog elektrostatičkog instrumenta [1]. Ovaj instrument omogućavao je komparaciju ne samo jednosmernog i naizmeničnog napona već takođe i jednosmerne i naizmenične snage unutar greške od samo stotinak ppm (part per million) [2]. U to vreme to je bio zaista značajan metrološki rezultat, a samo rešenje bilo je inspirativno i za druge metrologe u zemlji. Nažalost, bolest i smrt ovog vrsnog metrologa 1971. godine prekinula su ova istraživanja u Institutu. Desetak godina kasnije profesor Vojislav Bego sa Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu sa elektrostatičkim instrumentom kao naponskom vagom postigao vrlo zapažene rezultate u svetskim razmerama [3].



*Vladeta Knežević (1928-1971)*



*Srđan Spiridonović (1928-2006)*

U Institutu je uvek negovana privrženost struci i istraživačkom radu, a u metrološkim poslovima posebno se insistiralo na pedantnosti i čestitosti u svim fazama merenja. Još jedna značajna karakteristika rada u Institutu je otvorenost i spremnost na saradnju sa stručnjacima iz drugih Instituta, fakulteta i srodnih organizacija kako u zemlji tako i inostranstvu. U metrologiji to se i podrazumeva, jer i sam metarski sistem počiva na ideji: "za sve narode i za sva vremena". Obezbeđenje jedinstva mera obuhvata pored čuvanja i primene etalona i redovne komparacije istih. Institut je bio inicijator, organizator i učesnik prvih interkomparacija etalona oma i volta u ondašnjoj Jugoslaviji [4]. Posle stečenog pozitivnog iskustva na dve jugoslovenske komparacije etalona volta, organizovano je po prvi put u nas, 1976. godine merenje transfer etalona volta i oma u BIPM-u (Bureau International des Poids et Mesures) 1976. godine [5]. Rezultat svih tih metroloških aktivnosti bilo je poznavanje oma i volta u zemlji sa mernom nesigurnošću od samo nekoliko ppm, što je sedamdesetih godina prošlog veka bio zavidan metrološki rezultat.

Pored merenja električnih veličina u Institutu se ozbiljno istraživalo i radilo na merenju neelektričnih veličina električnim putem. Značajni rezultati ostvareni su u oblastima merenja: mehaničkih veličina (mase, sile, momenta, pritiska, vibracija), fotometrijskih veličina (fluksa i osvetljaja), magnetnih veličina (jačine magnetnog polja, fluksa, gubitaka u gvožđu, kompleksnog permeabiliteta), fizičkih i hemijskih karakteristika izolacionih sistema, posebno tečnih dielektrika.

Sa širenjem delatnosti na različite oblasti merenja kao i strukture poslova fizički se povećavao i broj istraživača koji se u Institutu bavio metrologijom. Od organizacione grupe u okviru Odeljenja za merenje i regulaciju već 1966. godine to postaje najveće odeljenje u Institutu, a i danas je to najveći centar Instituta. Od studentskih istraživanja i pružanja usluga oko ispitivanja i overe mernih instrumenata, prešlo se na razvoj novih metoda i mernih uređaja kao i na izradu merne opreme i uređaja sa posebne namene. Kao ilustracija rečenog najbolje može da posluži primer razvoja merne opreme za ispitivanje tačnosti mernih transformatora.

Merni transformatori su vrlo značajni merni elementi, posebno u oblasti elektroenergetskih postrojenja, jer se bez njih jednostavno ne može ni zamisliti merenje električnih veličina, kao ni upravljanje i zaštita elektroenergetskih postrojenja. Ispitivanje tačnosti, kao jedne od osnovnih karakteristika mernih transformatora ima u tome posebnu ulogu, kako u razvoju i izradi, tako i u primeni mernih transformatora. Istovremeno to je naučna oblast u kojoj Institut "Nikola Tesla" ima tradiciju dugu više od pedeset godina, mnogobrojne i značajne rezultate. Malo je stručnih oblasti u kojima su naši Instituti držali korak sa svetom u tako za tehniku dugom vremenskom periodu, kao što je to slučaj sa ovom oblašću istraživanja. Skladan spoj teorijskih istraživanja sa eksperimentalnim i njihova uspešna primena u praksi, doprineli su da se ostvare zapaženi rezultati. Iza svega i ispred svega toga stoji nezamenljivi ljudski faktor, entuzijazam, ljubav prema struci, želja da se uradi bolje i više, da se sve to eksperimentalno proveriti i usavrši, a stečeno iskustvo razmeni sa stručnjacima iz ove oblasti kako u zemlji tako i svetu. Naravno, kao i u svakom drugom poslu i određene povoljne okolnosti ili srećan slučaj imaju svoje mesto.

Slika 1.  
Strujni komparator



Za Institut početkom šezdesetih godina povoljne okolnosti su bile: mladi, talentovani istraživači okupljeni oko jednog realnog i tada gorućeg problema, ispitivanja tačnosti mernih transformatora. Jedan od tih mladih istraživača, danas jedan od najuglednijih svetskih stručnjaka iz ove oblasti akademik Petar Miljanić u saradnji sa Srđanom Spiridonovićem† i akademikom Ilijom Obradovićem postavili su temelje ove delatnosti u Institutu. Primena strujnog komparatora za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora koju su ovi autori prikazali u tada vodećem nemačkom časopisu "ETZ", inicirala je razvoj ove ideje i u drugim svetskim laboratorijama [6]. Sam naziv »strujni komparator« prihvaćen je u svetskim okvirima, u engleskom jeziku kao »Current Comparator« a u nemačkom kao "Stromkomparator". Osim ovog trajnog priznanja autorima, dugogodišnja saradnja koja je usledila sa kanadskim NRC (National Research Council) u ovoj oblasti bila je još jedna potvrda ovog izuzetnog rezultata.

Osnovna ideja strujnog komparatora, da se merenje odnosa struja svodi na broj navojaka koji su za razliku od preciznih otpornika vremenski i temperaturno nepromenljivi, našla je širu primenu u metrologiji, posebno u izradi mernih uređaja za najpreciznija merenja, kao na primer: za merenje otpora, kapaciteta i snage. Veliki doprinos razvoju mernih metoda, kao i metoda za otklanjanje i smanjenje sistematskih grešaka koje je se javljaju kao rezultat tehnoloških i tehničkih ograničenja u konstrukciji i izradi strujnog komparatora, dala su upravo istraživanja u Institutu "Nikola Tesla".

Najznačajniji rezultati ovih početnih istraživanja, poređani hronološki su:

- 1954. godina, originalno rešenje uređaja za ispitivanje tačnosti mernih transformatora [7],
- 1957. godina, prvi komercijalni uređaj za ispitivanje tačnosti strujni transformatora na bazi strujnog komparatora [8],
- 1962. godine, razvoj strujnog komparatora visoke klase tačnosti [9],
- 1964. godine, metode za otklanjanje i smanjenje kapacitivnih grešaka kod strujnog komparatora [10],
- 1965. godine, metoda za podešavanje kompleksnog odnosa transformacije [11],
- 1965. godine, razvoj i primena merne metode kompenzovanog strujnog komparatora [12].

Već 1965.godine dolazi do komercijalne primene ovih istraživanja. Za potrebe fabrike mernih transformatora u Zaječaru razvijen je uređaj za ispitivanje tačnosti strujnih transformatora u laboratoriji, baziran na kompenzovanom strujnom komparatoru, označen kao KSK-5. Istovremeno radi se na razvoju jednog takvog uređaja namenjenog ispitivanju tačnosti mernih transformatora na terenu. Uređaj Instituta "Nikola Tesla" označen kao KSK-6, u dužem periodu bio je jedan od najkvalitetnijih uređaja, i to u konkurenciji sa sličnim mernim uređajima tada poznatih evropskih proizvođača kao što su: "Hartmann&Braun", "Siemens", "Tettex". Podatak da su sve fabrike mernih transformatora i većina elektroprenosnih i distributivnih preduzeća prethodne Jugoslavije, bile opremljene ovim uređajima najbolja je potvrda takve ocene.

Značajan rezultat ostvaren je 1971. godine u rešavanju problema međufazne kontrole u fabrici mernih transformatora "Energoinvest" iz Sarajeva. Razvijen je jedan specifičan uređaj za serijsku kontrolu tačnosti strujnih transformatora nazvan "Pristroj" [13]. Efikasnost merenja, kao osnovni zahtev, ostvarena je kod ovog uređaja direktnim očitavanjem amplitudne i fazne greške na odgovarajućim analognim instrumentima. Razvojem elektronike i njene primene u tehnici merenja otvorene su nove mogućnosti i u ovoj oblasti. Već 1975. godine u Institutu je razvijen prvi uređaj za automatsko ispitivanje tačnosti mernih transformatora, ASK-1 [14]. Ovaj uređaj omogućavao je da se kompletno ispitivanje tačnosti jednog strujnog transformatora obavi za manje od jednog minuta, ili oko trideset puta brže nego manuelnim uravnotežavanje kao kod klasičnih mernih uređaja. Te zaista dobre metrološke karakteristike ovog uređaja potvrđene su u i praksi u fabrikama mernih transformatora: "Energoinvest", "FMT", "EMO". I ovaj uređaj baziran je na kompenzovanom strujnom komparatoru, ali u režimu nultog fluksa, ostvarenog automatski pomoću odgovarajuće negativne povratne sprege [15]. Direktno očitavanje amplitudne i fazne greške ispitivanog transformatora na digitalnim panelmetrima i štampanja rezultata merenja na numeričkom štampaču, bilo je u to vreme zaista jedno savremeno tehničko rešenje. Na istoj tehnološkoj osnovi razvijen je nešto kasnije i prenosni uređaj, INST-1, namenjen prevashodno ispitivanju tačnosti mernih transformatora u elektroenergetskim postrojenjima. Rezultati višegodišnjih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja vezanih za strujni komparator i njegovu primenu u najpreciznijim merenjima sabrana su u knjizi "Current Comparator", dvojice najeminentnijih stručnjaka iz ove oblasti, W.J.M.Moore i P.N. Miljanića [16].

Slika 2.  
Uređaj za automatsko  
ispitivanje  
tačnosti strujnih  
transformatora ASK-1  
(1975.godina)



Razvoj tehnologije, posebno mikroračunarske tehnike dao je novi podsticaj razvoju mernih uređaja, pa i onih namenjenih ispitivanju tačnosti mernih transformatora, kako u podizanju tačnosti merenja, tako i u pouzdanosti, efikasnosti i komfornosti rada. Razvijen je mikroprocesorski uređaj za ispitivanje tačnosti mernih strujnih i naponskih transformatora, INST-2 [17], namenjen prevashodno merenjima na terenu. Prednosti koje je doneo mikroprocesorski koncept mernih instrumenata bile su: u softverskom popravljaju nesavršenosti hardvera, podizanju tačnosti i efikasnosti merenja, boljoj akviziciji i prezentaciji rezultata.

Na takvoj tehnološkoj osnovi razvijen je i novi uređaj za automatsko ispitivanje tačnosti strujnih transformatora, ASK-2 [18]. Celokupan rad ovog uređaja vođen je i podržavan pomoću PC. To je rezultiralo značajnim povećanjem tačnosti ali i efikasnosti merenja. Kompletno ispitivanje tačnosti strujnog transformatora sa ovim uređajem traje samo petnaestak sekundi, što je oko pet puta kraće od uređaja prethodne generacije tip ASK-1. Kao i uređaj ASK-1 i uređaj ASK-2 nije imao pravu konkurenciju u svetu. Istraživanja koja su prethodila razvoju ovog uređaja ukazivali su da se na konceptu strujnog komparatora mogu realizovati i uređaji za ispitivanje mernih transformatora najviše klase tačnosti. Takav jedan uređaj, tip INST-2A razvijen je u Institutu za potrebe Saveznog zavoda za mere i dragocene metale [19].



Slika 3.  
Uređaj za automatsko ispitivanje tačnosti strujnih transformatora ASK-2 (1988.godina)

Primena PC u realizaciji različitih mernih uređaja pokazala se kao dobar koncept, koji se je otvarao ceo niz novih mogućnosti i rešenja. Ovaj koncept razvijao se u smeru od inteligentnih do virtuelnih instrumenata. U oblasti ispitivanja tačnosti mernih transformatora primena PC olakšavala je rešavanje problema automatizacije ispitivanja, akvizicije i prezentacije rezultata merenja. U metrološkom smislu PC omogućavaju podizanje tačnosti merenja primenom odgovarajućih softverskih metoda za otklanjanje ili smanjenje sistematskih i slučajnih grešaka. U principu PC omogućavaju i primenu nelinearnih mernih metoda i vrlo složenih matematičkih modela. Ove teorijske mogućnosti našle su praktičnu primenu u rešavanju problema ispitivanja tačnosti mernih transformatora nestandardnog odnosa transformacije [20]. Razvijena je nova merna metoda za ispitivanje tačnosti mernih transformatora metodom dvofazne konverzije [21], a u okviru koncepta virtuelnih instrumenata istražuju se mogućnosti softverske korekcije greške mernih transformatora [22]. Na problematici ispitivanja tačnosti mernih transformatora tokom pedesetogodišnjih istraživanja odbranjene su: dve doktorske teze [23], [24] i urađen je jedan magistarski rad [25].

Uređaji za ispitivanje tačnosti mernih transformatora razvijeni u Institutu pokazali su u praksi niz metroloških prednosti u odnosu na druga rešenja, posebno kod ispitivanja mernih transformatora na mestu ugradnje, kao i u primeni kod serijske fabričke kontrole mernih transformatora. Indirektna potvrda kvaliteta ovih uređaja data je takođe od strane BIPM-a, koji je uvrstio Institut «Nikola Tesla» u spisak preporučenih svetskih proizvođača ove merne opreme [24]. Direktna i najbolja potvrda rečenog ipak leži u višegodišnjoj uspešnoj saradnji sa fabrikama mernih transformatora: «Energoinvest»-Sarajevo, «Končar»-Zagreb, «EMO»-Ohrid, «FMT»-Zaječar, «Minel Fepo»-Zrenjanin, a koja traje i posle raspada zemlje. Nove generacije ovih naših mernih uređaja razvijene su upravo za navedene firme. Razvoj nekonvencionalnih mernih transformatora postaviće sigurno nove zahteve u vezi ispitivanja tačnosti, pa se slobodno može reći da istraživanja u ovoj oblasti imaju i dalje dobru perspektivu.

Slika  
4. mikroprocesorski  
uređaj za ispitivanje  
tačnosti mernih  
transformatora INST-  
2 (2002.godina)



Još nekoliko oblasti metrologije imaju u Institutu takođe tradiciju dužu od trideset godina, to su pre svih: izrada mernih uređaja različite namene po specijalnim zahtevima korisnika, merenja zemljinog magnetnih polja, merenja elektrohemijskih karakteristika izolacionih sistema posebno ispitivanja transformatorskih ulja, merenja sile i mase električnim putem,

Institut je od vankada bio sigurna kuća u koju su dolazili mnogi poslovni ljudi sa vrlo različitim zahtevima, problemima i pitanjima vezanim najčešće za elektrotehniku i elektronenergetiku, a odlazili uglavnom zadovoljni sa ponuđenim rešenjem, odrađenom uslugom, dobrim stručnim savetom, studijom ili realizovanim uređajem. Posebno mesto u tome ima saradnja sa Elektroprivredom Srbije, kao najznačajnijim poslovnim partnerom, za koga su urađeni mnogi značajni poslovi: razne studije, uređaji, ispitivanja i merenja. I neke na oko sitne usluge mogu biti i te kako značajne za korisnika. Jedna anegdota to dobro ilustruje. Kod gradnje reverzibilne hidroelektrane „Bajina Bašta“, javio se ozbiljan problem u varenju sastava čeličnih ploča za glavni cevovod elektrane. Stručnjaci Instituta su na osnovu obavljenih merenjem ustanovili da su problemi u vezi varenja posledica namagnećenosti čeličnih ploča. Razmagnetisanje je obavljeno vrlo efikasno, na samom gradilištu. na opšte zadovoljstvo. Tadašnji direktor HE Bajina Bašta Radenko Nikolić (kasnije i generalni direktor EPS-a), sećao se toga posla, kao velike stručne pomoći Instituta. Stručnjaci Instituta su zaista vrlo efikasno rešili nastali problem, koji na prvi pogled i nije izgledao mnogo težak. Međutim, razmagnetisanje velikih magnetnih masa kao što su čelične ploče dimenzija: 10 m x 2 m x 30 mm, nije ni malo lak ni jednostavan stručni zadatak. Kako je sličan problem (razmagnetisanje vazduhoplova) već ranije bio detaljno (teorijski i praktično) istražen u Institutu to se i ovaj zadatak mogao rešiti bez mnogo lutanja.

Ako se pregledaju godišnji izveštaji o radu Instituta, koje Institut redovno izdaje od 1961.godine, može se videti da se u odeljenju za merenja, kasnije OOUR „Elektromerenja“,

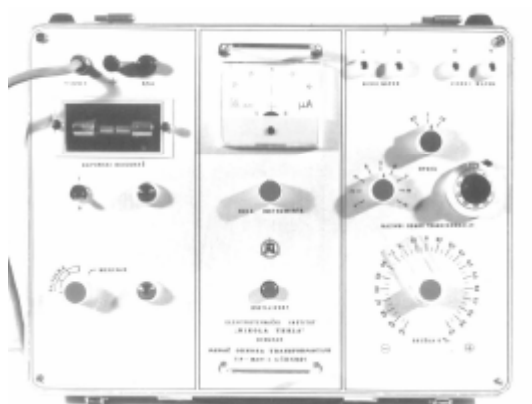


a danas u „Centru za Elektromerenja“ svake godine razvije i realizuje bar jedan novi merni uređaj najčešće po posebnom zahtevu korisnika. Spisak takvih uređaja bio bi zaista dugačak, a prostor i vreme ne dozvoljavaju da sve navede, već samo neki:

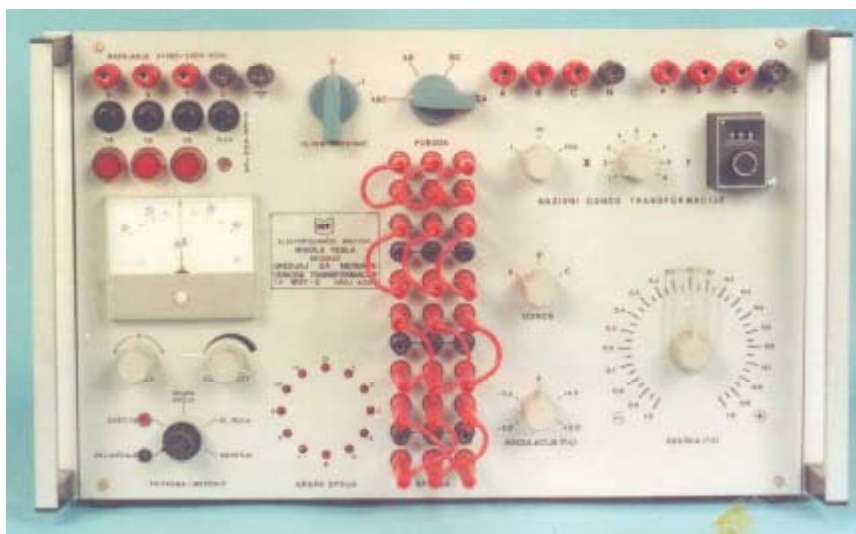
- Uređaj za merenje gubitaka transformatorskih limova (1961.god.).
- Uređaj za ispitivanje kondenzatorskog papira (1962.god.)
- Uređaj za ispitivanje akumulatora (1963.god.).
- Uređaj za merenje malih jednosmernih polja (1964.g).
- Uređaj za ispitivanje startne sposobnosti olovnih akumulatora (1965).
- Uređaj za ispitivanje i podešavanje prigušnica (1966.g)
- Prenosni magnetometar za merenje zemljinog polja (1967.g).
- Visokonaponski most za merenje kapaciteta i gubitaka (1968.g).
- Uređaj za daljinsko merenje vodostaja (1968.g).
- Uređaj za ispitivanje monofaznih asinhronih motora (1969.g).
- Uređaj za sekundarno ispitivanje releja (1970.g).
- Elektrodinamometar za merenje sile mišića (1970.g).
- Uređaj za automatsku kompenzaciju zemljinog magnetnog polja (1971.g).
- Uređaj za primarno ispitivanje releja (1972.g).
- Uređaj za merenje dielektrične konstante i gubitaka (1973.g).
- Uređaj za merenje odnosa transformacije (1974.g).
- Uređaj za ispitivanje dinamičke oštine vida (1974.g).
- Uređaj za automatsko merenje napona članaka akumulatorske baterije (1975.g).
- Automatski komutator impulsa (1976.g).
- Uređaj za trofazno napajanje i merenje (1978.g).
- Uređaj za merenje opterećenja mernih transformatora (1980.g.)
- Uređaj za ispitivanje distantne zaštite (1982.g).
- Aparati za kontrolu izolovanosti trolejbusa (1983.g).
- Uređaj merenje složene greške strujnih transformatora za zaštitu (1984.g).
- Elektronski vektometar za merenje električnih napona i struja (1985.g).
- Računarski sistem za merenje i regulaciju napona i struja u elektrolizi aluminijuma (1986.g).
- Merno-zaštitni uređaj za 10 kHz generator (1987.g)
- Ispitna stanica za energetske transformatore (1988.g).
- Uređaj za automatsko ispitivanje tačnosti mernih transformatora (1990.g).
- Elektronska vaga za merenje osovinskog opterećenja vagona (1992.g)
- Uređaj za automatsku kontrolu broskog magnetizma (1994.g).
- Kamionska elektronska vaga (1996.g).
- Računarski sistem za akviziciju podataka na merno-kontrolnoj magnetnoj stanici (1996.g).
- Elektronska vaga na transportnoj traci (1997.g)
- Uređaj za simulaciju elektrostatičkog pražnjenja (1998.g).
- Prenosni uređaj za pražnjenje Aku-baterija (2000.g)

Sve ove uređaje i još veći broj ne navedenih realizovali su stručnjaci Instituta, zahvaljujući znanju, iskustvu ali i tehničkoj podršci saradnika pre svih elektromašinske radionice, koja je od 1980. godine u sastavu Centra za elektromerenja. Ti vrsni majstori uspevali su da materijalizuju i vrlo složene zamisli inženjera konstruktora. Većina njih je u penziji, neki nisu viši ni živi, ali njihove sposobnosti i umeće utkane su u mnoge uređaje realizovane u Institutu. Radi nas, njih i onih koji nisu imali prilike da lično sarađuju sa ovim ljudima, spomenimo zaista vrsne limare: Radomira Jovanovića i Stevu Šagija, mašinskih bravara Mihajila Čevrljakovića, Žive Tucakova i Aleš Alojza, preciznog mehaničara Savu Stevančevića i mašinskog strugara Živorada Gajića. Tu su i električari: Predrag Mitić, Žarko Đorđević, Branko Stoilković, Borivoje Stokić. Zasluge svakako pripadaju i marljivom i ozbiljnom šefu radionice Franji Cimermanu. Najveće pohvale zaslužuju pre svih konstruktori uređaja: inženjeri i tehničari Instituta kao neposredni realizatori ovih poslova. Njihova imena i ostvarenja upisana su u godišnje izveštaje o radu Instituta, a najveću ličnu satisfakciju imali su i imaju u zadovoljstvu kreativnog stvaranja i mogućnosti da znanje i ideje pretoče u značajne i korisne merne uređaje namenjene elektroprivredi i elektroindustriji, a često i mnogo širem krugu korisnika.

Slika 5.  
Merač odnosa transformacije MOT-1



Slika 6.  
Trofazni  
merač odnosa transformacije MOT-3



U oblast magnetnih merenja Institut je ušao sledeći zahteve i potrebe korisnika, pružajući usluge ispitivanja magnetnih karakteristika transformatorskog lima, na primer: merenje gubitaka, kompleksnog permeabiliteta i dr. Međutim, najznačajniji rezultati postignuti su u merenju malih jednosmernih polja (zemljino magnetno polje). Usavršena je Fersterova metoda merenja slabih magnetnih polja na bazi merenja drugog harmonika napona. Na ovom principu razvijeno je u Institutu nekoliko generacija magnetomata, koji su bili na zavidnom tehničkom i metrološkom nivou. Poslovi na razvoju i izradi magnetometara u dužem vremenskom razdoblju (preko trideset godina) bili su oslonac stabilnog rada i razvoja Centara za elektromerenja. Nažalost, burne društvene promene u zemlji krajem prošlog veka imale su velikog odraza i na dalji razvoj ove oblasti metrologije u Institutu. Odlazak vrsnih stručnjaka Ljubomira Zivlakovića i Slobodana Jovanovića u penziju dodatno je doveo u pitanje dalji razvoj ove oblasti u Institutu. Nešto slično dogodilo se sa oblašću fotometrijskih merenja i razvoja svetlosnih izvora.

Počelo se sa razvojem mernih metoda merenja jačine svetlosti i osvetljaja i ispitivanjem i merenjem svetlosnih izvora. U dužem periodu Institut je bio vodeća laboratorija u ovoj oblasti. Uspešna saradnja sa fabrikom sijalica „Nikola Tesla“ u Pančevu rezultirala je razvojem halogenih svetlosnih izvora osvajanjem i transferom znanja i tehnologije. Malo je poznato, da su tokom izgradnja HE Đerdap gradilište brane i mašinska hala hidroelektrane bile osvetljene reflektorima sa jodnim sijalicama razvijenim i izrađenim u Institutu. Nažalost, i ovde je došlo do gašenja delatnosti, reklo bi se zbog ne kontinuiteta u kadrovskom razvoju. Odlaskom Dobrivoja Joksimovića, a kasnije i Jovana Milivojevića u penziju, delatnost u oblasti fotometrije i svetlosnih izvora potpuno zamire u Institutu, što je zaista šteta, jer je generalno ova oblast u Srbiji nedovoljno stručno pokrivena.

Jedna od oblasti koja u Institutu ima dugu i uspešnu tradiciju (preko trideset godina) je i merenje i ispitivanje: električnih, fizičkih i hemijskih karakteristika elektroizolacionih sistema, posebno transformatorskog ulja. Sistematski rad u ovoj oblasti započet je još daleke 1969. godine studijom „Starenje električne izolacije sinhronih mašina i transformatora“, kao i standardnim ispitivanjima izolacionih transformatorskih ulja, a uspešno se razvija i napreduje svih ovih godina. Institut nije bio samo pionir u ovim istraživanjima, već je i vodeća laboratorija u zemlji u ovoj oblasti. Po karakteru i sadržaju rada, reč je o multidisciplinarnim istraživanjima koja okupljaju stručnjake iz različitih oblasti tehnike: elektroinženjere, fizičare, hemičare, tehnologe. Kombinujući merenja i ispitivanja u laboratoriji na uzorcima ulja i materijala ugrađenih u izolacione sisteme, sa rezultatima merenja i ispitivanja na aparaturama i električnim mašinama u elektroenergetskim postrojenjima, sticala su se dragocena iskustva o prirodi i načinu starenja izolacionih sistema, mogućnosti dijagnostike uzroka i kvarova, ali i mogućnosti prognostike i preventivnog održavanja. Vrlo brzo pokazalo se da takav kompleksni i sistematski pristup problemima izolacionih sistema donosi niz prednosti, podiže pre svega pouzdanost i efikasnost elektroenergetskih pogona, predupređujući neželjene i neočekivane kvarove i havarije na skupim mašinama i aparatima. Kako je napredovala u svetu dijagnostika stanja izolacionih sistema u električnim mašinama, tako se i u Institutu proširivao obim i kvalitet ispitivanja i merenja. Usavršavane su postojeće merne metode, osvajane su nove, nabavljana je savremena merna oprema i instrumentacija, proširivana su znanja iz ove oblasti i sticana nova iskustva u vezi dijagnostike stanja.

Slika 7.  
Uređaj za gasnu  
hromatografiju ulja



Kontinuitet u radu i istraživanju u ovoj oblasti, prirodan razvojni put mladih stručnjaka, timski rad, uspešna saradnja sa kolegama u elektroprivredi, otvorenost prema novom, međulaboratorijska i međunarodna saradnja, a pre svega radni entuzijizam pouzdan su recept za uspeh svakog pa i ovog posla. Iza ovih dobrih stručnih i ekonomskih rezultata stoji cela plejada stručnjaka. Dobar deo njih već je u penziji. Spomenimo zato te pionire ovog posla u Institutu ali i u tadašnjoj Jugoslaviji. To su: profesor Predrag Duduković, hemičarke: Melinda Radovanović i Velinka Pejović, elektroinženjeri: Srboljub Vukovojac, Radosav Brkić, Aleksandar Bojković, Miodrag Korolija, fizičar Jovan Milivojević. Značajan doprinos dali su takođe i tehničari i laboranti: Đurđevka Milosavljević, Snežana Kovačević, Bogdan Brojčin† i Dragan Jovanović. Rezultati istraživanja iz ove oblasti izloženi su u više studija, stotine stručnih referata objavljenih u stručnim časopisima ili prezentiranih na stručnim skupovima u zemlji i inostranstvu. Institut je 2005. godine izdao monografiju: Hemija u Elektroenergetici - transformatorska ulja“, autora Velinke Pejović u kojoj su sumirani rezultati i iskustva vezana za ispitivanje transformatorskih ulja. Iz ove oblasti urađena su u Institutu dva magistarska rada [26], [27].

Sila kao fizička veličina predstavlja jednu od najznačajnijih manifestacija prirode. Njena spoznaja i praktično korišćenje u velikoj meri je određivalo tokove razvoja civilizacije. Merenje sile imalo je u tome važnu ulogu, danas pogotovo. Razvojem nauke i tehnologije prošireni su i pooštreni zahtevi u pogledu mernog opsega i tačnosti merenja sile. Skoro da nema oblasti ljudske delatnosti, od nauke, privrede, sporta i medicine gde nije zastupljeno merenje sile. Usko sa ovim povezano je i merenje mase.

Vaganje i vagarstvo je važna i kompleksna oblast metrologije. Danas se pod vaganjem podrazumeva merenje mase. U vrlo dugom periodu, vagao se teret, odnosno merila težina. Izrazi “masa i težina“, kao i niz drugih metroloških pitanja vezanih za vage i vaganje, koji zaslužuju detaljnija razjašnjenja obrađeni su u knjizi: Elektromehaničke vage- merenje sile i mase pomoću tenzometarskih pretvarača sile [28]. Najbolje što tehnika i tehnologija mogu da ponude iz oblasti konstrukcije i materijala, nalazi primenu u merenju i vagarstvu.

Vage i vaganje su vrlo rano prerasle osnovni tehnički značaj i postale civilizacijska tekovina i interes najšireg sloja ljudi. Sa vagama se susrećemo neposredno po rođenju, a lično i profesionalno tokom celog života. Kupuje se i prodaje, proizvodi i istražuje, analizira i zaključuje prema pokazivanju vaga. Vage i vaganje staro je koliko i civilizacija, što znači oko deset hiljada godina. Sve do sredine prošlog veka bile su to uglavnom mehaničke vage. Princip rada mehaničkih vaga je u osnovi vrlo jednostavan i očigledan, ali su vage i vaganje oduvek predstavljali nešto posebno.

Značajne rezultate Institut je ostvario baš u merenju sile i mase električnim putem, preciznije merenjem pomoću tzv. tenzometarskih traka (strain gage). Sve je počelo daleke 1967. godine sa razvojem prvih analognih elektrodinamometara za potrebe sportista i stomatologa, a stiglo se do multifunkcionalnih virtuelnih vaga i elektrodinamometara. Greške merenja tih prvih elektrodinamometara bile su reda procenata, a danas se merenje sile i mase sa tenzometarskim mernim pretvaračima sile može realizovati u vrlo širokom mernom opsegu (od 1N do 1MN i od 100 g do 100 t) sa greškom manjom od 0,05%. Kada je reč o merenju mase istraživanja i razvoj u Institutu obuhvatala su merila mase koja nalaze uglavnom primenu u industriji tzv. tehnološke vage (klasa tačnosti IIII) i u trgovini tzv. obračunske vage (klasa III). Neupućene u ovu problematiku oznaka klase tačnosti mogla bi da navede na pomisao da se tu radi o vagama sa dozvoljenim greškama merenja od 3 % i 4%, što je potpuno pogrešno, jer vage klase III imaju prema metrološkim propisima dozvoljene greške merenja manje od 0,1 %.

Pojava elektromehaničkih (mehanotronskih) vaga podstaknuta je pre svega razvojem informatičke tehnologije. U razmaku od samo desetak godina ove vage su skoro u potpunosti istisnule mehaničke vage. Princip rada ovih vaga bazira se na merenju sile električnim putem. To podrazumeva primenu mernih pretvarača sile (MPS), koji mehaničku silu transformišu u korespondentnu električnu veličinu (napon, struju, učestanost). Postoje zaista mnogo različitih vrsta MPS. Zbog dobrih mernotehničkih karakteristika, ali i povoljnog odnosa karakteristika i cene, MPS na bazi elektrootpornih tenzometarskih traka (strain gage) postali su dominantan koncept merenja sile i mase električnim putem.

Institut se zahvaljujući dotadašnjim istraživanjima i razvoju u oblasti merenja sile relativno lako uključio i u razvoj elektromehaničkih vaga. To je praktično počelo 1978. godine prvo razvojem mernog pretvarača sile platformskog tipa za potrebe prve domaće elektromehaničke vage "Optima 2000", firme Digitron iz Buja, a nastavljeno je razvojem prve domaće elektromehaničke poštanske vage za pisma "Tenzopost" 1984. godine. Već na ovoj prvoj namenski razvijenoj vagi primenjeno je nekoliko novih originalnih tehničkih rešenja [29], a sama konstrukcija mernog pretvarača sile, koja je zaista bila revolucionarna i prava jeres u odnosu na tada važeće tehničke kanone je i patentirana [30]. Ono što je mnogo važnije primenjeno rešenje pokazalo se u praksi ne samo kao originalno, već i kao izuzetno dobro. Napravljeno je preko hiljadu takvih mernih pretvarača sile, sa škartom u proizvodnji manjim od 0,5 %. Više stotina poštanskih vaga sa ovim pretvaračima je i danas posle dvadeset godina eksploatacije još u primeni.

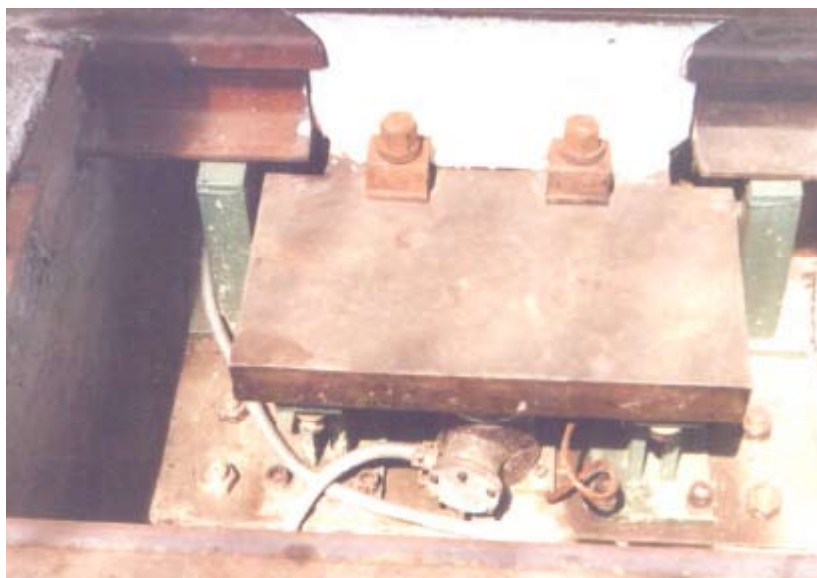
Slika 8.  
Elektronska  
poštanska vaga



Spremnost da se krene ka novim i drugačijim tehničkim rešenjima došla je posebno do izražaja kod razvoja univerzalne poštanske vage (za pisma i pakete) [31]. Konstrukcija vage sa dva merna pretvarača sile različitih opsega merenja (2kg i 20 kg) bila je a i danas je, jedinstveno rešenje vage sa više opsega merenja. Na takvom konceptu razvijena je kasnije i trgovačka vaga sa više opsega merenja. Tehničko rešenje vage sa više opsega merenja potvrđeno je u praksi u radu nekoliko hiljada vage, od kojih su neke u upotrebi već više od dvadeset godina. Program poštanskih i trgovačkih vage je tokom godina stalno tehnološki usavršavan, pa su posle vage "Tenzopost", sledili noviji tipovi vage: "Tenzohit", "Tenzostar", "Tenzolux".

Tehnologiju proizvodnje elektromehaničkih vage Institut je preneo fabrici "FMT" iz Zaječara. Pored poštanskih i trgovačkih vage u Institutu su razvijane i vage vrlo različitih i specifičnih namena: kolske, železničke, vage na traci, kranske vage, bunker vage, vage za liftove, vage za osobno merenje, magacinske vage, dozirne vage, vage za merenje podvesnog tereta, vage za merenje osovinskog opterećenja, vage na rezervoarima i dr. Osnovne odlike svih ovih vage su dobre metrološke karakteristike, pouzdanost i funkcionalnost u merenju mase.

Slika 9.  
Merna platforma  
vage za merenje  
osovinskog  
opterećenja



U oblasti merenja sile, u Institutu su ostvareni su takođe vrlo zapaženi rezultati. Razvijeno je desetak različitih tipova elektrodinamometara specifičnih namena i tehničkih zahteva. Kako se kod merenja sile električnim putem polazi od mernog pretvarača sile (load cell), to je i težište razvoja i izrade elektrodinamometra na konstrukciji mernih pretvarača sile. Baš u tom segmentu ove problematike Institut je ostvario i najznačajnije rezultate. Razvijani su merni pretvarači koji mogu da mere sile reda njutna, ali i pretvarači koji mere sile i preko desetmeganjutna. Razvijani su takođe višekomponentni merni pretvarači sile koji omogućavaju merenje intenziteta, pravca i smera vektora mehaničke sile. Na bazi takvih posebnih konstrukcija mernih pretvarača sile mogli su se rešavati vrlo specifični metrološki zahtevi bazirani na merenju sile. Tako su razvijeni uređaji: za merenje koeficijenta trenja metlica brisača vetrobranskog stakla [32], uređaj za merenje intenziteta pravca i smera brzine vetra [33], automatsko vitlo za bezbedno kotvljenje brodova i dr.



Slika 10.

Elektrodinamometar sa mernim pretvaračem sile na bazi tenzometarskih traka



Osnovna obeležja razvoja metrologije mase i sile u Institutu je stalno proširivanje opsega merenja, povećanja tačnosti, pouzdanosti i efikasnosti merenja. To je ostvarivano oslanjanjem na naučni, tehnički i tehnološki progres u ovoj oblasti, ali i na sopstveno znanje, stečeno iskustvo i spremnost da se ide u novo i istraživačkim stazama kojima se ređe ide. Rezultat takvog pristupa i rada u Institutu su: urađen jedan magistarski rad [34] i odbranjena jedna doktorska teza [35] iz oblasti merenja sile i mase pomoću tenzometarskih traka.

Priča o razvoju metrologije u elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla" ne bi bila kompletna, ako se ne spomenu i različita specifična ispitivanja i merenja koje je Institut ostvarivao u laboratorijama i na terenu, a u skladu sa zahtevima korisnika ili metroloških standarda. Takvih merenja i ispitivanja je bilo zaista mnogo. Trebalo bi mnogo truda i vremena da se samo evidentiraju. Jedno od takvih specifičnih ispitivanja i merenja bilo je i ispitivanje elastičnosti podova za sportske hale, u svrhu traženja optimalne konstrukcije podova sa stanovišta pogodnosti za bavljenje sportskim aktivnostima u zatvorenom prostoru. Na uzorcima podova različite konstrukcije mereni su parametri mehaničke elastičnosti podova: koeficijenti prigušenja i prostiranja mehaničkih talasa, rezonantne učestanosti konstrukcije, i dr. Tako je za projekat: Akcelerator "Nikola Tesla" u Vinči, merena mehanička sila pritezanja delova magnetnog kola. Merenje je realizovano na zavrtnjima M50 dužine 3 m, pomoću nalepljenih tenzometarskih traka. Sva ova ispitivanja, a takođe i mnoga druga potvrđuju koliko su merenja prisutna i važna, u životu i radu.

Slika 11.  
Merenje sile  
pritezanja jarma  
akceleratora "Tesla"





Danas, kao sa početka priče o razvoju metrologije u Institutu, ispitivanja i merenja imaju vrlo značajnu ulogu, gledano po stručnim i finansijskim efektima. Institut se akreditovao za mnoga ispitivanja svoje oblasti delatnosti, a u domenu metrologije za etaloniranje mernih instrumenata za merenje električnih veličina u skladu sa standardom ISO17025. Ostvaren je i održan kontinuitet u oblasti ispitivanja mernih instrumenata i mernih transformatora, ali su se delatnost centara za merenja proširila na različite segmente metrologije, što je razumljivo i normalno s obzirom na ulogu i civilizacijski značaj koji imaju merenja.

I zaista nema ljudske aktivnosti, od privrede do sporta, od medicine do umetnosti, gde na neki način i u nekoj meri nije uključeno i merenje neke fizičke veličine. Zato se slobodno može reći da ova delatnost ima dobru i sigurnu perspektivu u Institutu. Put razvoja i napretka metrologije u Institutu je dobro trasiran, mnoge oblasti metrologije imaju dugogodišnju tradiciju i kontinuitet u razvoju, a dolaskom novih i mladih stručnjaka u Institutu istraživačka i stvaralačka energija se sigurno uvećava i podiže.

#### REFERENCE:

- [1.] V.Knežević, *Upoređivanje snage naizmenične struje sa jednosmernim naponom pomoću kvadratnog elektrometra*, IV simpozijum JUKEM-a, Beograd, 1969.
- [2.] V.Knežević, *Konverzija snage u efektivnu vrednost napona sa gledišta potrebe za tačnim merenjem energije*. Elektrotehnika, br. 9, Beograd, 1972.
- [3.] V.Bego, J.Butorac, G.Gašljević, K.Poljanec, *Volt Balance Realisation of the Volt at ETF in Zagreb*, IEEE Tr. IM36, Nr.2, pp.185-190, 1987.
- [4.] D.Vujević, S.Škundrić, *Usporedba Vestonovih etalona napona u Jugoslaviji*, V simposijum JUKEM-a, Zagreb, 1971.
- [5.] S. Škundrić, *Merenje jugoslovenskih etalona volta u BIPM-u*, Zbornik radova JUKEM-a, 1978, Maribor.
- [6.] I.Obradović, P.Miljanić, S.Spiridonović, *Stromwandlern mittels eines Stromkomparators und eines elektrischen Hilfsystems*, ETZ-A, Bd 78, H19, 1957, s.359-368,
- [7.] P. Miljanić, S.Spiridonović, I.Obradović, *Uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora*, Pat.pr. P.304/1954.
- [8.] N.Pandurović, S.Škundrić, F.Smak, *Jedna modifikacija uređaja KSK-6*, VI simposijum JUKEM-a, Jajce, 1974.
- [9.] P.Miljanić, N.L.Kasters, W.J.Moore. *The development of the current a high-accuracy A\_C ratio measuring device*, AIEE Tr. Communication and Electronic, 81, 1962, p.359-368.
- [10.] P.Miljanić, *Capacitive error in current comparators*, IEEE Tr. Inst. & Meas., 1964, p.210-216.

- [1.] P.Miljanić, *Adjustable complex-ratio transformer*, IEEE Tr. Inst. & Meas., 1965, p.135-141.
- [2.] P.Miljanić, N.L.Kasters, W.J.Moore, *A current comparator for precision measurement of direct current rations*, Electrical Engineering, 1963.
- [3.] N.Pandurović, *Uređaj za serijsku kontrolu tačnosti strujnih transformatora*. V simpozijum JUKEM-a, Zagreb, 1971.
- [4.] N.Pandurović, S.Škundrić, D.Miličević, *Prikaz sistema za automatsko ispitivanje tačnosti mernih strujnih transformatora*, VII JUKEM, Ohrid, 1976.
- [5.] N.Pandurović, S.Škundrić, D.Miličević, *The compensated current comparator with automatically zeroing flux*, VIII IMECO World Congress, Moskva, 1979.
- [6.] W.J.M. Moore, P.N.Miljanic, *The Current Comparator*, Peter Peregrinus Ltd. London, 1988.
- [7.] S.Škundrić, F.Smak, S.Vukovojac, D.Kovačević, *Mikroprocesorski uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora*, XIV JUKEM, Sarajevo 1990.
- [8.] S.Škundrić, D.Kovačević, F.Smak, S.Vukovojac, M.Korolija, *A Computer aided system for automatic testing of instrument current transformer accuracy*. IMEKO World Con., Torino, 1994.
- [9.] F.Smak, S.Škundrić, S.Vukovojac, D.Kovačević, M.Korolija, *Savremeni uređaj za ispitivanje tačnosti mernih transformatora, tip INST-2A*, Savetovanje o transfor. u elektroenergetici, Beograd, 1996
- [10.] S. Škundrić, V.Radenković, D.Kovačević, F. Smak, S. Mikičić, *Testing of the Instrument Transformers with the Non-standard Rations*, Proc. of 14th IMEKO World Congress, p.353- 357, Tampere, 1997.
- [11.] S. Škundrić, V. Radenković, *Instrument transformer accuracy testing by the two-phase conversation method*, Electrical Engeenering, Vol. 85 H4, p.432-438, 1998.
- [12.] S.Škundrić, D. Kovačević, V.Radenković, *Instrument Transformers in Virtual Instruments*, Proceedings of 16th IMEKO World Congress, Beč, 2000.
- [13.] P.Miljanić, *Servo sistemi u električnim merenjima*, Doktorska disertacija, ETF, Beograd, 1957.
- [14.] S. Škundrić, D., *Ispitivanje tačnosti mernih transformatora metodom dvofazne konverzije*, Doktorska disertacija, Elektronski fakultet u Nišu, 2000.
- [15.] S. Škundrić, D., *Savremene metode i uređaji za ispitivanje tačnosti mernih transformatora*, Magistarski rad, Elektronski fakultet u Nišu, 1995.

- [16.] J. Lukić, *Rerafinacija koriscenih mineralnih izolacionih ulja ekstrakcijom sa n-metil pirolidenom*, Magistarski rad na Tehnološko metalurskom fakultetu u Beogradu, 2004.
- [17.] V. Rajaković, *Prečišćavanje zauljenih voda – destabilizacijom emulzija zamrzavanjem i mikrotalasnim zagrevanjem*, Magistarski rad na Tehnološkom fakultetu u Beogradu, 2002.
- [18.] S.Škundrić, D.Kovačević, *Elektromehaničke vage - merenje sile i mase pomoću tenzometarskih traka*. SMEITS, Beograd, 1995.
- [19.] S.Škundrić, *Elektromehaničke vage, inteligentno merenje mase*, XV.međunarodni seminar ISEMEK-a, Ljubljana, 1989.
- [20.] S.Škundrić, *Rastavljivi merni pretvarač sile*, patent broj 872/92 od 1992 godine
- [21.] S.Škundrić, *Elektromehanička vaga sa više opsega merenja*, Zbornik radova Instituta "NikolaTesla" Vol.9, Beograd, 1992.
- [22.] D.Kovačević, S. Škundric, S.Vukovojac, B.Dimitrijević, *Computer-controlled system for measuring windshield wiper friction*. Conference IMEKO TC-3, Madrid, 1996 .
- [23.] S.Škundrić, S.Vukovojac, N.Miladinović, S.Milosavljević, *Merač brzine vetra*, Zbornik radova Instiruta Nikola Tesla, knj. 17, Beograd, 2005, str. 9-17.
- [24.] D.Kovačević, *Analiza i razvoj mernih pretvarača sile visoke klase tačnosti*, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 1988.
- [25.] D. Kovačević, *Inteligentni merni pretvarači sile na bazi tenzometarskih traka*, Doktorska disertacija, Elektronski fakultet u Nišu, 1999.