

Laboratorij za određivanja svojstava kompleksnih materijala akustičkim metodama - LOSKSAM

Antonio Petošić¹, Petar Franček¹ i Siniša Fajt²

¹ Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, antonio.petic@fer.hr

¹ Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, petar.francek@fer.hr

² redoviti član Akademije, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, sinisa.fajt@fer.hr

Sažetak: U radu će se opisati rad Istraživačkog laboratorija za određivanja svojstava kompleksnih materijala akustičkim metodama-LOSKSAM osnovanog u sklopu Zavoda za elektroakustiku, Fakulteta elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu. U LOSKSAM-u se provodi karakterizacija elektroakustičkih i ultrazvučnih pretvarača i, kao i pripadajućih elektroničkih i akustičkih komponenata. Razvijaju se sonde za bio-medicinsko djelovanje (terapija, kirurgija) kao i za nedestruktivno ispitivanje materijala. Obavljaju se mjerenja isijane ultrazvučne snage u realnom okruženju, detekcija pojave kavitacije kod ultrazvučnih mjerenja, njeno korištenje u kirurške svrhe te kalibracija svih vrsta elektroakustičkih pretvarača i mjerenja na akustičkim elementima i sustavima.

Gljučne riječi: akustičke metode, svojstva materijala i akustičkih elemenata, medicinski i industrijski ultrazvuk, elektroakustički pretvarači.

1. Uvod

Osnovno područje rada Laboratorija za određivanje svojstava kompleksnih materijala akustičkim metodama(LOSKSAM-a) usmjereno je na: određivanje svojstava parametara različitih aktivnih i pasivnih materijala u biomedicini, prehrambenoj industriji, procesnoj industriji i proizvodnji akustičkih uređaja. Istraživački laboratorij LOSKSAM je osnovan 2015. godine i voditelj mu je prof. dr. sc. Antonio Petošić. Članovi laboratorija su: dr. sc. Petar Franček, dr. sc. Mia Suhanek, dr. sc. Sanja Grubeša, prof. dr. sc. Ivan Đurek, prof. dr. sc. Kristian Jambrošić

Stvaranje novih materijala s poboljšanim svojstvima u akustičkim primjenama (smanjene brzine širenja vala, povećano gušenje u čujnom frekvencijskom području, smanjenje koeficijenta refleksije u svrhu akustičke nevidljivosti, predstavlja nove izazove u svjetskoj znanosti. Osnovna svrha istraživačkog laboratorija LOSKSAM [1] je konstrukcija novih materijala s akustičkim svojstvima koja ih čine prikladnim za uporabu u spomenute svrhe i mjerenje osnovnih fizikalnih svojstava tih materijala te njihova puna karakterizacija.

Također važan dio djelatnosti laboratorija je razvoj novih mjernih sustava i procedura ključan za precizno određivanje svojstava kompleksnih aktivnih i pasivnih materijala koji se pojavljuju u elektroakustičkim sustavima i pretvaračima.

Akustički pretvarači i sustavi karakterizirani u Laboratoriju uvelike se koriste u različitim područjima kao što su: terapijske, kirurške i dijagnostičke primjene u medicini, nedestruktivno testiranje (NDT) materijala, ultrazvučno čišćenje u industriji i tretiranje različitih tvari u kemijskim procesima.

U čujnom i ultrazvučnom frekvencijskom području izazovi s kojima se laboratorij susreće predstavljaju novi materijali čija je debljina puno manja od valne duljine upadnog zvučnog vala. Kada se ultrazvučni val širi kroz takve materijale, postiže se veliko gušenje, a time i bolja izolacijska i apsorpcijska svojstva takvog materijala.

U ultrazvučnom frekvencijskom području izazov predstavljaju novi piezoelektrični materijali izrađeni u nanotehnologiji koji omogućuju izradu manjih nizova pretvarača za primjene u terapiji, dijagnostici i kirurgiji s povećanim koeficijentom elektroakustičkog iskorištenja.

Određivanje svojstava kompleksnih materijala i sustava za primjene u akustici jedna je od mnogobrojnih aktivnosti Laboratorija koja zauzima sve istaknutije mjesto u ukupnom znanstvenom i stručnom djelovanju Laboratorija. S tehničke strane, kvalitativni pomak ostvaren je zahvaljujući novim mjernim sustavima koji omogućavaju obradu i prikaz rezultata mjerenja u realnom vremenu. Uspješnom prijavom na uspostavni istraživački projekt Hrvatske zaklade za znanost 2014. i Projekte MZOŠ-a 2007. godine, ostvareni su preduvjeti za proširenje stečenih znanja otvaranjem prema komplementarnim istraživačkim grupama u Europi i svijetu. Ovo povezivanje ubrzo je rezultiralo uključivanjem u međunarodne znanstvene projekte te nešto kasnije razmjenom znanstvenih boravaka istraživača i doktoranada.

Uspostavljene veze sa znanstvenicima iz Europe i ostatka svijeta (prof. dr. sc. Dragan Damjanović iz Ceramics Lab-a EPFL-Švicarska, prof. dr. sc. Nazanin Bassiri Gharb iz School of Mechanical Engineering, Georgia Tech-Sjedinjene Američke Države, dr. sc. Stefan Radel iz Vienna Institute of Technology - Austrija, prof. dr. sc.

Joshua Reiss iz Queen Mary University London-Ujedinjeno Kraljevstvo) potvrda su aktualnosti istraživanja i razine dosega koje je ostvario Laboratorij. Laboratorij sudjeluje u istraživačkim aktivnostima i prijavama u stručnim projektima s hrvatskim institucijama (INETEC d.o.o., PROKLIMA d.o.o., KLIMAOPREMA d.o.o.) te vanjskim institucijama ALNOR Ltd. Poljska.

U kontekstu dosadašnjih ostvarenja i sadašnjih istraživanja Laboratorij za određivanje svojstava kompleksnih struktura akustičkim metodama pridonosi suradnji unutar institucije Sveučilišta u Zagrebu i predstavlja pozitivan pomak prema podizanju prepoznatljivosti u međunarodnim znanstvenim krugovima u ovom području istraživanja.

2. Područje djelovanja LOSKSAM-a

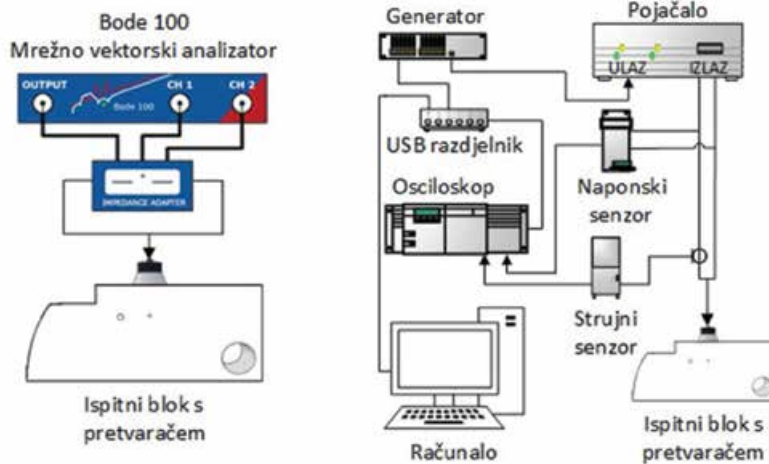
Područja djelovanja LOSKSAM-a se može pojednostavljeno prikazati kao istraživačka, nastavna i stručna.

2.1. Istraživačka djelatnost

Istraživačka djelatnost LOSKSAM-a obuhvaća sljedeće aktivnosti: znanstveno-istraživački rad na području akustičke karakterizacije materijala te karakterizacije elektroakustičkih pretvarača u različitim uvjetima pobude. Primijećeno je da ponašanje materijala (perforirani elementi u prostorijama, aktivni i pasivni slojevi materijala u ultrazvučnim pretvaračima) jako ovisi o razini i vrsti pobude (impulsna i kontinuirana). Uređaji i sustavi projektiraju se na osnovi mjerenja u laboratorijskim uvjetima pri malim razinama pobudnih signala zanemarujući nelinearnosti, dok se u stvarnosti ponašanje pretvarača mijenja ovisno o vrsti akustičkog polja kojima se materijali i uzorci tretiraju.

2.1.1. Optimizacija pobude piezokeramičkih ultrazvučnih pretvarača

U okviru ovog istraživanja izrađen je doktorski rad dr. sc. Petra Frančeka pod nazivom: "Optimizacija pobude piezokeramičkih ultrazvučnih pretvarača u promijenjivim nelinearnim i termodinamičkim uvjetima rada" [2]. U dodatku dokorskog istraživanja je objavljen rad u časopisu u kojemu se pronalazi optimalno rješenje za oblik i trajanja pobudnog impulsa za detekciju objekata kod nedestruktivnog testiranja materijala [2, 3]. Mjerni sustav realiziran u okviru ovog područja istraživačkog laboratorija je prikazan na slici 1.

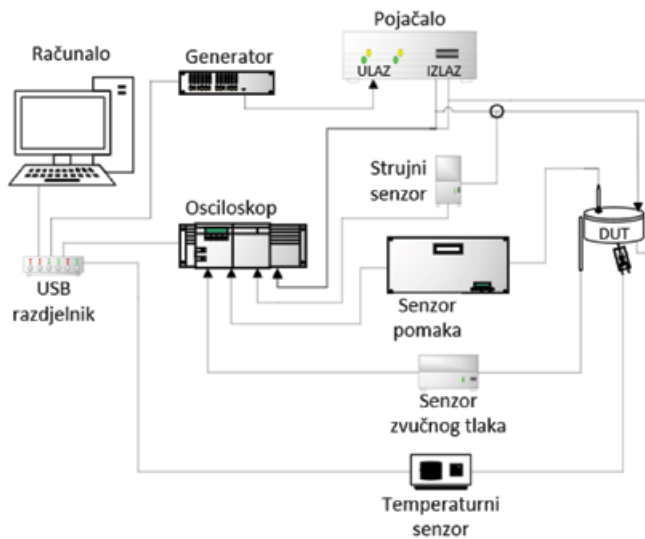


Slika 1: Prikaz mjernog sustava za optimizaciju pobude pretvarača za nedestruktivno testiranje materijala [1]

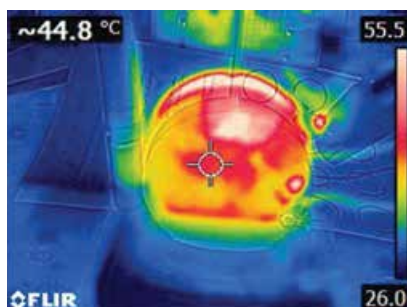
Na slici 1. lijevo je prikazan mjerni sustav koji impedancijskom spektroskopijom određuje ulaznu električnu impedanciju pretvarača s opterećenim medijem kojim se precizno određuje frekvencija serijske i paralelne električne rezonancije mjernog sustava. Na slici 1. desno je prikazan sustav koji optimizira duljinu i oblik pobudnog impulsa za detektiranje pukotina u testnom uzorku materijala.

Pravilno određivanje svojstava kompleksnih materijala pri akustičkim primjenama ključno je za konstrukciju novih materijala (nanomaterijali, zrnate strukture s proizvoljno generiranom rešetkom sastavnih elemenata) sa željenim svojstvima vezanim uz propagaciju infrazvučnih, zvučnih i ultrazvučnih valova.

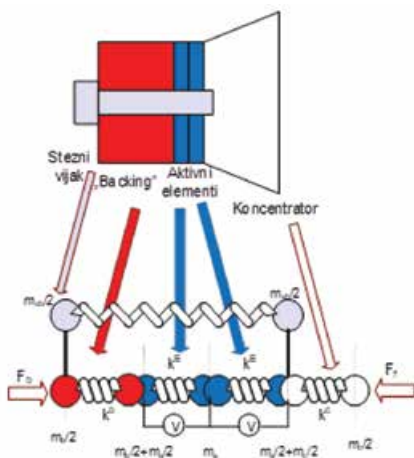
Cilj istraživačkog laboratorija je bolje definirati svojstva materijala kojima se može manipulirati u svrhu postizanja poboljšane propagacije zvuka i ultrazvuka kroz same materijale, te na temelju tih saznanja dati temelj za proizvodnju novih materijala koji će se primjenjivati u čujnom i ultrazvučnom frekvencijskom području. Osobita pažnja se posvećuje tretiranju uzoraka piezokeramičkih materijala s različitim vrstama signala s obzirom na akustičku snagu i frekvencijsko područje. Prikaz mjernog sustava za karakterizaciju piezokeramičkih uzoraka koji se upotrebljavaju u različitim vrstama ultrazvučnih pretvarača je prikazan na slici 2. Slika 2. prikazuje mjernu opremu laboratorija koja se koristi u elektromehaničkoj karakterizaciji piezokeramičkih elemenata. Slika 3. prikazuje mjerni hidrofonski, senzor pomaka i senzor temperature u okolini piezokeramičkog elementa kao i temperaturnu raspodjelu na površini piezokeramičkog uzorka tijekom provođenja eksperimenta. Slika 4. prikazuje nadomjesni model ultrazvučnog pretvarača s titrajućim masama.



Slika 2: Mjerni sustav za elektromehanički i akustičku karakterizaciju piezokeramičkog elementa



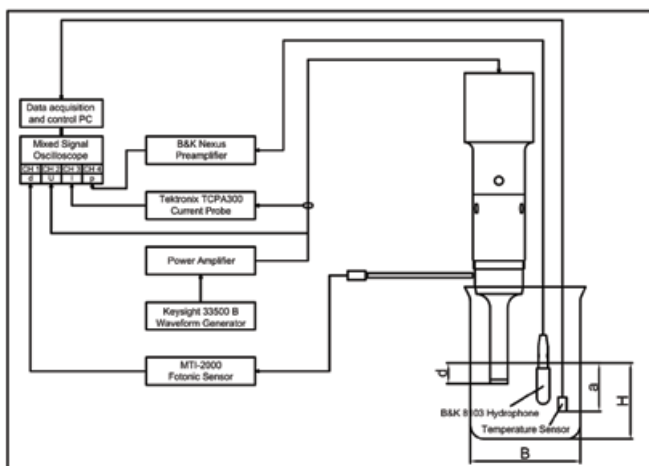
Slika 3: Prikaz elektromehaničke i temperaturne karakterizacije piezokeramičkog elementa



Slika 4: Prikaz nadomjesnog modela ultrazvučnog pretvarača pomoću titrajućih masa

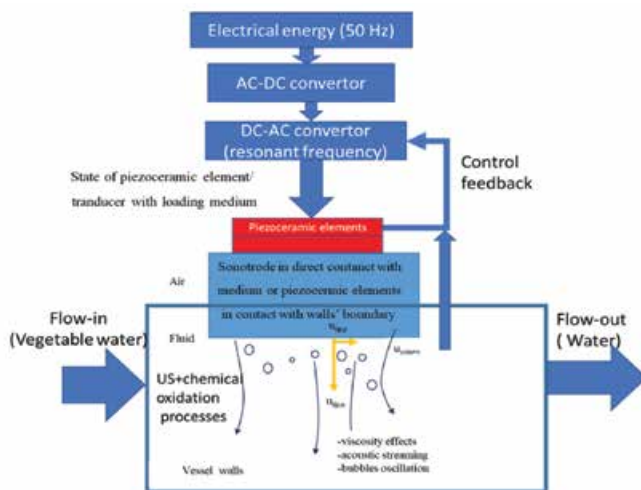
2.1.2 Projekt tretiranja namirnica visokointenzivnim ultrazvukom

Tijekom rada ultrazvučnog laboratorija napravljena je detaljna analiza utjecaja visokointenzivnog ultrazvučnog polja na namirnice (voda, mlijeko, sok) te je objavljen rad u časopisu *Ultrasonics Sonochemistry* [5]. Napravljena je analiza utjecaja amplitude zvučnog tlaka na tretiranje prehrambenih namirnica u suradnji s Prehrambeno-biotehničkim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu prema mjernom sustavu na slici 5. Slika 5. prikazuje mjerne uređaje potrebne za tretiranje različitih prehrambenih materijala u sonorektoru.



Slika 5: Prikaz mjernog sustava za tretiranje namirnica u malom sonorektoru

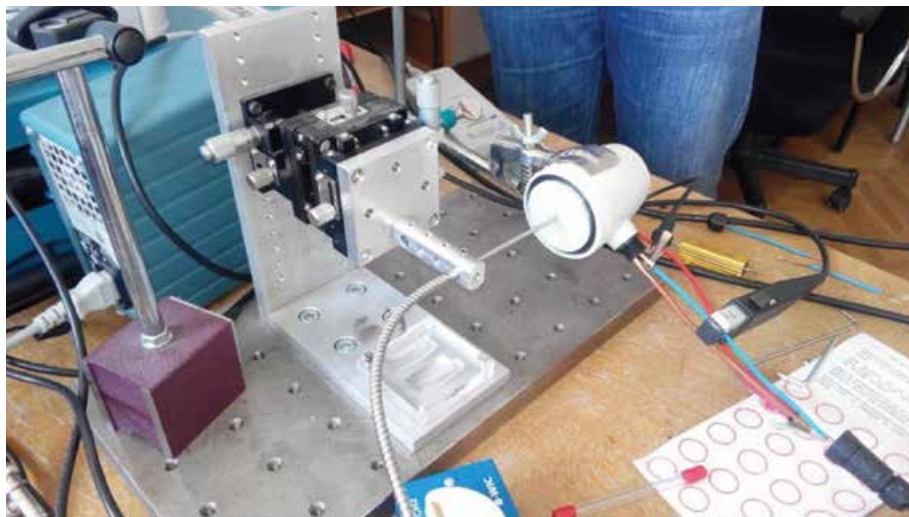
U svrhu poboljšanja kemijskih procesa u proizvodnji maslina i tretiranju otpadnih voda prema slici 6. obavljena je električna, mehanička i akustička karakterizacija komercijalnih i vlastito razvijenih uređaja s različitim prehrambenim uzorcima.



Slika 6: Prijedlog optimizacije kemijskih procesa primjenom ultrazvuka optimirane frekvencije i snage pobude s obzirom na karakteristike opterećenog medija

2.1.3 Projekt optimizacije pobude za tretiranje algi na brodovima

U sklopu projekta i suradnje s gospodarstvom napravljena je optimizacija pobudne frekvencije i snage za tretiranje algi na brodovima u Jadranskom moru prema slici 7 i 8. Na slici 7. prikazano je mjerenje pomaka vrha komercijalnog pretvarača koji se koristi za tretiranje algi na brodovima a slika 8. prikazuje signale napona, struje i pomaka dobivenih optimizacijom.



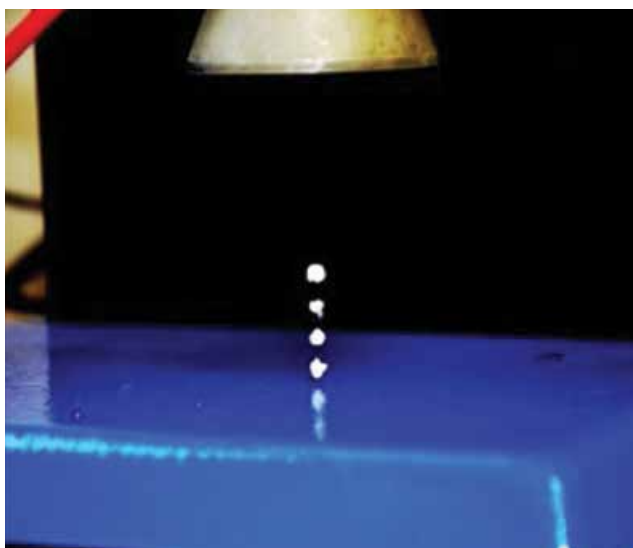
Slika 7: Mjerenje pomaka vrha pretvarača koji se koristi u tretiranju algi na brodovima



Slika 8: Optimizirani signali napona, struje i pomaka na vrhu pretvarača u svrhu tretiranja algi

2.2. Nastavna djelatnost

Obrazovna djelatnost laboratorija uključuje rad na studentskim projektima na preddiplomskoj i diplomskoj razini kroz teme koje pokrivaju nastavnici i članovi laboratorija te predmete u okviru kojih se predaju teme povezane s djelatnostima laboratorija (Elektroakustika1, Prijenos zvuka, Analiza i sinteza audiosignala, Ultrazvuk u medicini i industriji, Biomedicinska elektroakustika, Modeliranje u akustici). Naglasak je stavljen na izradi završnih, diplomskih i specijalističkih radova, pri čemu se posebna važnost pridaje tome da teme radova budu povezane s istraživanjima Laboratorija. Do sada su potencijali predloženog laboratorija iskorišteni prilikom izrade 10 završnih i 5 diplomskih radova pod vodstvom voditelja laboratorija. Oprema nabavljena za potrebe istraživanja i saznanja prikupljena u istraživačkom procesu u okviru laboratorija se koristi u pokaznim i redovitim laboratorijskim vježbama iz predmeta na preddiplomskoj i diplomskoj razini studija, konkretno Elektroakustika1, Prijenos zvuka, Ultrazvuk u medicini i tehnici te Ultrazvučni sustavi. Prikaz pojave akustičke levitacije koji se prikazuje u sklopu vježba iz predmeta Elektroakustika1 i na danima otvorenih vrata je prikazan na slici



Slika 9: Prikaz mjernog postava za demonstraciju akustičke levitacije

2.3 Stručna djelatnost

Stručna djelatnost odvija se kroz suradnju s gospodarstvom (INETEC d.o.o., PROKLIMA d.o.o., Brodarski Institut d.o.o., ALNOR Ltd.- Poland) na području istraživačke djelatnosti, kao i kroz izradu akustičkih projekata različitih razina složenosti.

Trajna suradnja u području istraživanja ostvarena je kroz razvoj metoda za karakterizaciju elektroakustičkih pretvarača za upotrebu u nedestruktivnom testiranju materijala, razvoju ultrazvučnih pretvarača s većim koeficijentima iskorištenja te izradi akustičkih elemenata za zaštitu od buke u sustavima klimatizacije i ventilacije.

S partnerima iz gospodarstva članovi laboratorija sudjelovali su u razvoju mjernih metoda za određivanje svojstava piezokeramičkih elemenata u pretvaračima za primjene u industrijskoj dijagnostici te medicinskih ultrazvučnih pretvarača. Razvijene su mjerne metode za električnu, mehaničku i akustičku karakterizaciju pretvarača te za karakterizaciju akustičkih materijala u različitim uvjetima pobude (Kundtova cijev, difuzno polje). U suradnji s PROKLIMA d.o.o. su razvijene mjerne metode za određivanje akustičkih parametara kućišta, velikih klima komora i akustičkih parametara prigušivača klima komora. U predloženim rješenjima su se koristili klasični materijali i materijali s modificiranom strukturom koji su pokazali bolja izolacijska i zvukopojna svojstva. Slika 10. prikazuje mjerni sustav za određivanje unesenog i prenesenog prigušenja kulisnih prigušivača.



Slika 10: Mjerni sustav za određivanje unesenog i prenesenog prigušenja kulisnih prigušivača

3. Zaključak

U ovome radu su prikazane osnovne aktivnosti laboratorija LOSKSAM-a. Iz priloženog je jasno da osnivanje ovoga laboratorija ne bi bilo moguće bez financiranja Hrvatske zaklade za znanost HRZZ - Uspostavni istraživački projekt vezan za naziv laboratorija [7]. Uspostava LOSKSAM-a dosada je omogućila u suradnji s gospodarstvom osim teoretsko znanstvenih rješenja realizaciju niz praktičnih i stručnih projekata. Početno financiranje HRZZ omogućilo je nabavku nužne mjerno ispitne opreme, dok daljnji znanstveno istraživački rad i suradnja s gospodarstvom te novi domaći i međunarodni znanstveno istraživački projekti morat će omogućiti nabavku novije i modernije mjerne opreme čiji se razvoj odvija velikom brzinom. Osim toga Sveučilište u Zagrebu, a posebno njezina domicilna sastavnica LOSKSAM-a Fakultet elektrotehnike i računarstva morat će omogućiti nove posebne laboratorijske prostore nužne za daljnja znanstvena istraživanja koja će služiti za povećanje međunarodne prepoznatljivosti, te edukaciju na preddiplomskoj, diplomskoj i postdiplomskoj razini.

Literatura

- [1] https://ultrason.fer.hr/ultrason/research_lab
- [2] Petar Franček: Optimizacija pobude piezokeramičkih ultrazvučnih pretvarača u promijenjivim nelinearnim i termodinamičkim uvjetima rada, doktorski rad 2021.
- [3] Franček, Petar; Petošić, Antonio; Budimir, Marko; Hrabar, Ivan: Electrical resonance/antiresonance characterization of NDT transducer and possible optimization of impulse excitation signals width and their types // NDT & E international, 106 (2019), 23-41 doi:10.1016/j.ndteint.2019.05.005
- [4] Petošić, Antonio; Franček, Petar; Mamić, Ana; Vejić, Petar; Volarić, Davor; Budimir, Marko
- [5] Electromechanical and acoustical characterization of piezoceramic elements and NDT ultrasound transducers by using different types of excitation signals // NDT in Progress 2017 / Diederichs, Rolf ; Ginzl, Edward (ur.). Prag, Češka Republika: NDT.net - The Web's Largest Portal of Nondestructive Testing (NDT), 2018. str. 1-10
- [6] Petošić, Antonio; Horvat, Marko; Režek Jambrak, Anet: Electromechanical, acoustical and thermodynamical characterization of a low-frequency sonotrode-type transducer in a small sonoreactor at different excitation levels and loading conditions // Ultrasonics sonochemistry, 39 (2017), 219-232 doi:10.1016/j.ultsonch.2017.04.026
- [7] Ultrazvučni sustav za određivanje kompleksnih materijala u nelinearnim uvjetima pobude (HRZZ 4996)

Laboratorij za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Mladen Zrinjski¹, Đuro Barković², Sergej Baričević³

¹ član suradnik HATZ-a, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet,
mladen.zrinjski@geof.unizg.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, djuro.barkovic@geof.unizg.hr

³ Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, sergej.baricevic@geof.unizg.hr

***Sažetak:** : Laboratorij za mjerenja i mjernu tehniku jedna je od ustrojbenih jedinica Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. U Laboratoriju se razvijaju nove mjerne metode i uređaji za ispitivanje i umjeravanje geodetskih instrumenata i pribora u skladu s međunarodnim i nacionalnim normama. U Laboratoriju se obavlja nastavna, znanstveno-istraživačka i stručna djelatnost. U radu su opisane dvije doktorske disertacije i dva diplomatska rada koji su izrađeni u Laboratoriju, a koji pobliže ističu izazove znanstveno-istraživačkog rada. Opisan je jedan doktorski rad koji je u završnoj fazi izrade, kako bi se prikazao razvoj Laboratorija u predstojećem razdoblju.*

***Ključne riječi:** Laboratorij za mjerenja i mjernu tehniku, kalibracijska baza, komparator, precizni elektrooptički daljinomjer, GPS.*

1. Uvod

Razvoj Laboratorija za mjerenja i mjernu tehniku, kao zasebne ustrojbene jedinice Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, započeo je 1964. godine na prijedlog profesora Dušana Benčića. Daljnji veliki doprinos razvoju Laboratorija dao je profesor Nikola Solarić.

2. Komparacija nivelmanskih letava pomoću inkrementalne mjerne letve

U okviru znanstvenog istraživanja u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Đuro Barković izradio je doktorsku disertaciju *Komparacija nivelmanskih letava pomoću inkrementalne mjerne letve*, koju je obranio 2002. godine.

U doktorskoj disertaciji dan je prikaz umjeravanja pomoću vlastito izrađenog komparatora u koji je ugrađena inkrementalna mjerna letva kao normalna mjera ili etalon. Umjeravanjem se utvrđuju odstupanja pojedinih vrijednosti mjernog uređaja od stvarnih ili nominalnih vrijednosti. Pomoću tih odstupanja moguće je popraviti mjerenu vrijednost i time povećati točnost mjerenja.

U uvodu disertacije istaknuta je važnost usporedbenih mjerenja, tj. ispitivanja i kontrole mjernih uređaja, osobito kada se njima koristimo u visoko točnim mjernim procesima. U geodeziji, geometrijski nivelman visoke točnosti je najtočnija metoda mjerenja visinskih razlika. Osnovni pribor koji se upotrebljava pri mjerenju tom metodom je: nivelir sa stativom i nivelmanske letve. Dakle, umjeravanjem se uspoređuju linearne vrijednosti pojedinih crtica invarne nivelmanske letve s inkrementalnom mjernom letvom kao etalomom.

U drugom poglavlju dane su definicije umjeravanja, komparatora i etalona s naglaskom na potrebu periodičnog ispitivanja i umjeravanja mjernih uređaja. U ovom slučaju to se odnosi na instrumente i pribor potreban za geometrijski nivelman visoke točnosti, a prije svega na nivelir i invarne nivelmanske letve.

Upravo je u trećem poglavlju opisana svrha i značaj geometrijskog nivelmana u globalnom i geodetskom smislu. Dan je pregled osnovnih tipova nivelira i detaljniji pregled nivelmanskih letava, s naglaskom na invarne nivelmanske letve. U posebnom potpoglavlju prikazane su pogreške koje nastaju pri niveliranju s posebnim osvrtom na pogrešku zbog neravnomjerno nanese podjele i pogrešku promjene u duljini invarne trake nivelmanske letve, kao i uslijed utjecaja razlike temperatura pri mjerenju i umjeravanju. Tu je dan matematički izraz po kojem se računaju popravke za izmjerene vrijednosti. Popravke se računaju pomoću faktora mjerila m_0 , određenoga umjeravanjem, i pomoću razlike u temperaturi pri mjerenju (na terenu) i temperature pri umjeravanju (u laboratoriju). Danim primjerom pokazano je da te popravke nisu zanemarivih vrijednosti. Na kraju ovog poglavlja dana je preporuka da se umjeravanje invarnih nivelmanskih letava provodi periodično (jednom godišnje) i prije svakoga većeg posla, posebno u radovima u kojima se zahtijeva visoka točnost mjerenja.

Povijesni pregled komparatora i metoda umjeravanja prikazan je u četvrtom poglavlju i to od najjednostavnijih i najstarijih komparatora poput invarnih šipki duljine 1 m

do najsuvremenijih komparatora na osnovi laserskih interferometara i inkrementalnih mjernih sustava. Detaljno je prikazana osnova rada induktivnog mjerača pomaka i laserskog Dopplerova interferometra.

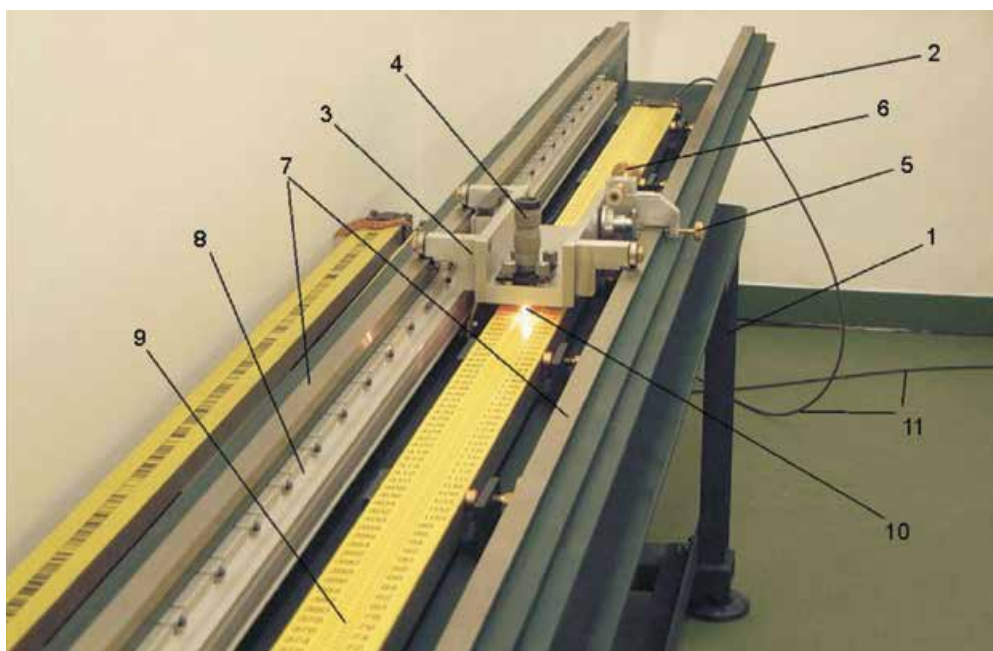
Peto poglavlje obrađuje inkrementalni mjerni sustav jer je na toj osnovi izrađena inkrementalna mjerna letva koja je ugrađena kao etalon u novi komparator Geodetskog fakulteta. Iz opsežnog i detaljnog opisa te s mnoštvom grafičkih prikaza inkrementalnog mjernog sustava, vidi se da je ovaj mjerni sustav vrlo pouzdan, precizan i vrlo visoke točnosti, što pokazuje da je inkrementalna mjerna letva njemačke tvrtke Heidenhain, upotrijebljena kao etalon novog komparatora Geodetskog fakulteta, vrlo dobar izbor.

Opis razvoja i izrade novog komparatora Geodetskog fakulteta detaljno je prikazan u šestom poglavlju. Najprije se opisuje povijesni pregled razvoja i izrade novog komparatora, zatim slijedi prikaz izrade konstrukcije komparatora u nekoliko faza do konačnog prikaza gotovog komparatora s popisom glavnih dijelova (slika 1). U tom je poglavlju detaljno opisan svaki dio komparatora, a posebno oni dijelovi koji se neposredno upotrebljavaju u mjernom procesu, tj. pri umjeravanju. Na osnovi detaljnog opisa može se vidjeti da je izradi komparatora posvećena velika pozornost i stručnost tako da se novi komparator Geodetskog fakulteta odlikuje kvalitetom izabranih materijala, preciznom izradom i obradom pojedinih dijelova i cjelokupnom stabilnošću, što su osnovni preduvjeti za točnost umjeravanja.

U sedmom poglavlju dana je matematička osnova za obradu i izjednačenje izmjerenih vrijednosti. U tom su poglavlju prikazane osnovne formule za ocjenu preciznosti i točnosti izmjerenih podataka, a posebno je potpoglavlje posvećeno izvodu parametara za prikaz pravca prilagođenog skupu točaka ravnine te izvodu formula za ocjenu točnosti tih parametara.

Osmo poglavlje opisuje razvoj računalne podrške pri umjeravanju i obradi izmjerenih vrijednosti. Ta se podrška sastoji od vlastito razvijenog programa "KOMPA" pod okriljem Windows operativnog sustava, a pomoću objektno-orijentiranog programskog jezika Visual Basic 5.0 Professional. U tom se poglavlju detaljno prikazuju opis i osnove rada s programom "KOMPA", a slike sa zaslona monitora zorno i sustavno vode korisnika i na jednostavan način mu otkrivaju njegove mogućnosti. U procesu umjeravanja opažač svu svoju koncentraciju usmjerava na viziranje, pomoću mikroskopa, na pojedine crtice podjele na invarnoj nivelmanskoj letvi, dok program "KOMPA", nakon aktiviranja i unosa osnovnih podataka vezanih za letvu i temperaturu u prostoriji, vodi komparator i kontrolira cijeli mjerni postupak. Na kraju mjernog postupka programom "KOMPA" obrađuju se izmjerene vrijednosti i prikazuju na zaslonu monitora ili na papiru ispisom u obliku IZVJEŠĆA O KOMPARACIJI prema međunarodnoj normi ISO 12858-1 za invarne nivelmanske letve.

U devetom poglavlju, izvedena je obrada izmjerenih vrijednosti s primjenom statističkih testova. Na osnovi velikog broja mjerenja provedena je procjena standardnog odstupanja viziranja na pojedini rub crtice invarne nivelmanske letve za dva opažača, zatim su ta mjerenja podvrgnuta Pearsonovu testu χ^2 radi utvrđivanja normalnosti razdiobe. Osim toga, pomoću standardnih odstupanja i χ^2 testa testirana je jednakost tih mjerenja pomoću Fisherova F -testa. Statistički su obrađena mjerenja dobivena umjeravanjem jedne invarne nivelmanske letve. Iz deset kompariranih neovisnih podjela invarnih nivelmanskih letava, izračunato je srednje standardno odstupanje viziranja. U posebnom potpoglavlju dan je tablični prikaz rezultata umjeravanja sedam invarnih nivelmanskih letava dobivenih umjeravanjem u Zagrebu i Münchenu. Iz tih razlika izračunata je standardna mjerna nesigurnost mjerila m_0 podjele invarnih nivelmanskih letava, $u_{\Delta m_0} = 0,39 \mu\text{m/m}$. Uzimajući u obzir mjernu nesigurnost etalona prema certifikatu $u_{(\text{cert})} = 0,5 \mu\text{m/m}$, prvotna procjena standardne mjerne nesigurnosti određivanja mjerila letve m_0 pomoću inkrementalne mjerne letve iznosi $u_{m_0} = 0,63 \mu\text{m/m}$ [1].



- | | |
|----------------------------|---|
| 1 - postolje komparatora | 7 - vodilice |
| 2 - tijelo komparatora | 8 - inkrementalna mjerna letva (etalon) |
| 3 - pomična kolica | 9 - invarna nivelmanska mjerna letva |
| 4 - mikroskop za viziranje | 10 - osvjetljenje |
| 5 - vijak kočnice | 11 - priključni kabeli |
| 6 - vijak za fini pomak | |

Slika 1: Komparator Geodetskog fakulteta izrađen 2002. godine s popisom glavnih dijelova [1]

3. Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a

Na kalibracijskoj bazi i u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Mladen Zrinjski proveo je znanstveno istraživanje koje je rezultiralo izradom doktorske disertacije *Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a*, koju je obranio 2010. godine.

U disertaciji je dan pregled dosadašnjih radova i iskustava u Republici Hrvatskoj te u svijetu. Detaljno je opisana kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (slika 2) na kojoj su obavljena mjerenja. Naveden je popis najpoznatijih kalibracijskih baza sa stupovima u svijetu te je dana njihova duljina. U disertaciji su detaljno objašnjene pogreške daljinomjera koje utječu na precizno mjerenje duljina. Dan je prikaz korekcija i redukcija koje je potrebno uzeti u račun prilikom mjerenja duljina elektrooptičkim daljinomjerom na kalibracijskoj bazi. Objašnjen je utjecaj multipath efekta na GPS-mjerenja te su dani matematički izrazi za računanje $MP1$ i $MP2$. U disertaciji je dan teorijski prikaz ekscentriciteta faznog središta antene i njegove varijacije. Kako su sva GPS-mjerenja obavljena GPS-antenama Zephyr Geodetic, detaljno su objašnjena fizikalna svojstva i karakteristike te antene.

U drugom dijelu disertacije opisan je praktični dio rada. Za umjeravanje kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primijenjen je precizni elektrooptički daljinomjer Leica TCA2003 (slika 3). Duljine su mjerene u svim kombinacijama, sa stupova 0, 1, 2, 3, 5, 7 i 10 (3. kolovoza 2009.). Obavljena su i mjerenja duljina s pomoću posebno izrađenog nosača, kako bi se odredio utjecaj periodijske pogreške na svaku mjerenu duljinu. Atmosferski parametri mjereni su s pomoću dva senzora Vaisala WXT510, pri čemu je Vaisala 1 bio postavljen uz stup 0, a Vaisala 2 uz stup 10. Za automatizirano prikupljanje, pohranjivanje i obradu atmosferskih parametara, mjenjenih senzora Vaisala WXT510, razvijen je softver WeatherTransmitter. Izrađen je isključivo za potrebe ove disertacije i buduća umjeravanja na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta. Automatizirano mjerenje atmosferskih parametara i njihova obrada prilikom preciznog mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi prvi je put primijenjeno u ovoj disertaciji.

Kao neovisna kontrola za umjeravanje kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primijenjena je relativna statička GPS-metoda (slika 4a). GPS-mjerenja obavljena su u 8 sesija po 24 sata, od 25. srpnja do 2. kolovoza 2009. Korištena su 4 prijamnika Trimble 5700 i 3 prijamnika Trimble R7 te 7 antena Zephyr Geodetic. U mjerenje je uključena i trigonometrijska točka I. reda Brusnik (slika 4b), kako bi se povećala duljina za ispitivanje GNSS-instrumenata. GPS-mjerenja na Brusniku su obavljena u prve dvije sesije, prijamnikom Trimble 5700 i antenom Zephyr Geodetic. U diserta-

ciji su dana dva izvješća o seizmičkim aktivnostima na području Republike Hrvatske, a koje su se dogodile za vrijeme GPS-mjerenja.

Za sve duljine izmjerene s pomoću TCA2003 izračunate su potrebne korekcije i redukcije. Za svaku mjerenu duljinu izračunata je periodijska pogreška te je uzeta u obzir prilikom izjednačenja. Izjednačenje duljina provedeno je s težinama mjerenja jednakima 1. Izjednačenjem je dobivena i vrijednost adicijske korekcije za sustav TCA2003+reflektor. U Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta provedeno je automatizirano umjeravanje frekvencmetra s pomoću GPS-signala i mjerenje frekvencije u elektrooptičkom daljinomjeru TCA2003. Za daljinomjer TCA2003 određena je multiplikacijska konstanta i s njome su pomnožene izračunate duljine raspona između stupova kalibracijske baze.

Ispitivanja utjecaja multipath efekta *MP1* i *MP2* na GPS-mjerenja provedena su za sve točke (7 točaka kalibracijske baze, Brusnik i 4 CROPOS referentne stanice), u svim sesijama mjerenja, primjenom softvera TEQC. Najmanji utjecaj multipath efekta dobiven je za točke baze, što upućuje da se kalibracijska baza Geodetskog fakulteta nalazi na terenu i lokaciji pogodnima za GNSS-mjerenja. Za sve točke na kojima su obavljena mjerenja (i za sve sesije mjerenja), softverom TEQC provedeno je ispitivanje broja registriranih opažanja od ukupnog broja mogućih opažanja sa svih GPS-satelita. Obrada GPS-vektora provedena je softverom Trimble Total Control (TTC), v. 2.73. Pritom su upotrijebljene precizne efemeride, datoteke ionosfere i datoteke modela antena Zephyr Geodetic i Zephyr Geodetic 2 za CROPOS referentne stanice. Srednje vrijednosti duljina izračunate su iz 8 sesija po 24 sata. Koordinate stupova kalibracijske baze i Brusnika određene su primjenom CROPOS-a i njegova servisa GPPS. Za izjednačenje koordinata korištene su 4 referentne stanice CROPOS-a: Zabok, Bjelovar, Sisak i Karlovac. Izjednačenje je provedeno softverom Trimble Total Control, v. 2.73. Kao konačan rezultat dobivene su koordinate stupova kalibracijske baze i Brusnika u ETRS89, $e=1989.0$, službenom položajnom datumu Republike Hrvatske. U ovoj disertaciji prvi su put određene koordinate stupova kalibracijske baze Geodetskog fakulteta u službenome nacionalnom datumu, primjenom CROPOS-a.

Dana je usporedba konačnih duljina između stupova kalibracijske baze, dobivenih elektrooptičkim daljinomjerom TCA2003 i GPS-om. Za sve duljine dobivene razlike manje su od 1 mm. Statističko testiranje srednjih vrijednosti duljina dvaju nizova mjerenja (GPS i TCA2003) provedeno je primjenom *t*-testa. Taj je test pokazao da oba niza mjerenja imaju iste srednje vrijednosti. U disertaciji je dana analiza poma-ka stupova kalibracijske baze za razdoblje od 1996. do 2009. godine. Prikazana je procjena standardne mjerne nesigurnosti A i B vrste mjerenja duljine od 1000 m na kalibracijskoj bazi s pomoću TCA2003. Dan je pregled poželjnih daljnjih istraživanja na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta.

Poseban je doprinos ove disertacije u tome što je u njoj detaljno istraženo i potvrđeno da se za umjeravanje kalibracijske baze mogu primijeniti dvije potpuno neovisne metode: precizni elektrooptički daljinomjer i GPS (GNSS). To omogućuje da se u budućim umjeravanjima baze neće morati izvoditi često vrlo skupe međunarodne usporedbe između kalibracijskih baza. Tako umjerena kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu služi kao osnova za umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera i GNSS-instrumenata (ali i drugih mjernih instrumenata i uređaja), što je i obveza prema zakonskim i podzakonskim propisima [2].



Slika 2: Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu [2]



Slika 3: Mjerenje duljina preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Leica TCA2003 na kalibracijskoj bazi [2]



a)



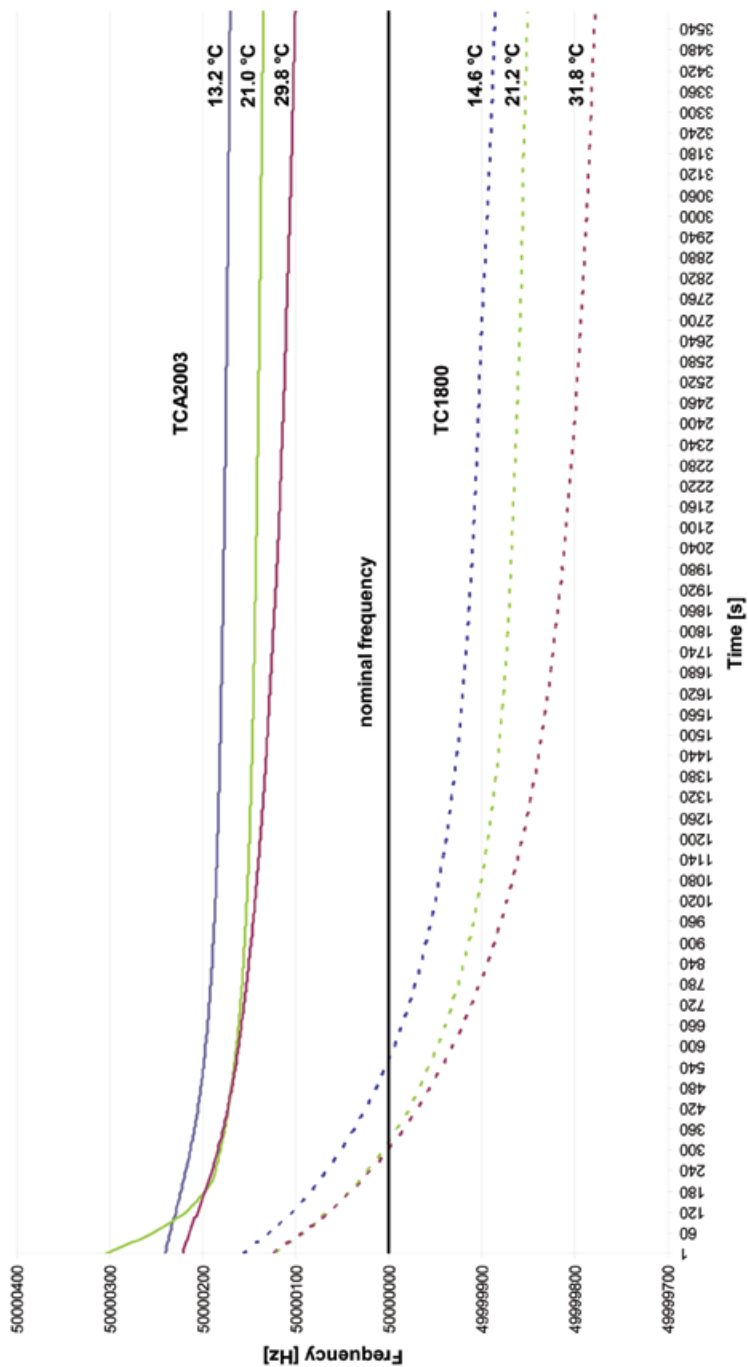
b)

Slika 4: a) GPS mjerenja na kalibracijskoj bazi, b) GPS mjerenja na točki Brusnik [2]

4. Ispitivanje mjerne frekvencije elektrooptičkih daljinomjera

U Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta provedeno je znanstveno istraživanje u okviru kojega je studentica Martina Peša izradila diplomski rad *Ispitivanje mjerne frekvencije elektrooptičkih daljinomjera*, koji je obranila 2011. godine. Mentori diplomskog rada bili su Đuro Barković i Mladen Zrinjski.

U diplomskom radu detaljno je opisan razvoj i princip rada elektrooptičkih daljinomjera, pogreške koje nastaju pri elektrooptičkom mjerenju duljina te ukupna točnost elektrooptičkih daljinomjera. Kako bi se povećala preciznost mjerenja duljina, potrebno je redovito ispitati mjernu frekvenciju elektrooptičkog daljinomjera. Prikazan je postupak izmjere frekvencije elektrooptičkih faznih daljinomjera Leica TC1800 i Leica TCA2003 te pritom primijenjenog sustava uređaja.



Slika 5: Promjene mjernih frekvencija daljinomjera Leica TC1800 i Leica TCA2003 u ovisnosti o vremenu i temperaturi zraka [3]

Mjerenje frekvencije obavljeno je na sljedećim temperaturama zraka:

- Leica TC1800: 14,6 °C, 21,2 °C i 31,8 °C
- Leica TCA2003: 13,2 °C, 21,0 °C i 29,8 °C

Mjerenje frekvencije obavljeno je pomoću sustava uređaja i softvera: fotodiode koja infra-zračenje pretvara u električni impuls, PLL sklopa koji omogućuje da se s njega kontinuirano dobivaju signali za mjerenje frekvencije, osciloskopa na kojem je potrebno dobiti sinusni oblik signala, frekvencimetra koji mjeri frekvenciju daljinomjera te softvera Agilent IntuiLink Counter koji obavlja registraciju mjerenih podataka u računalo.

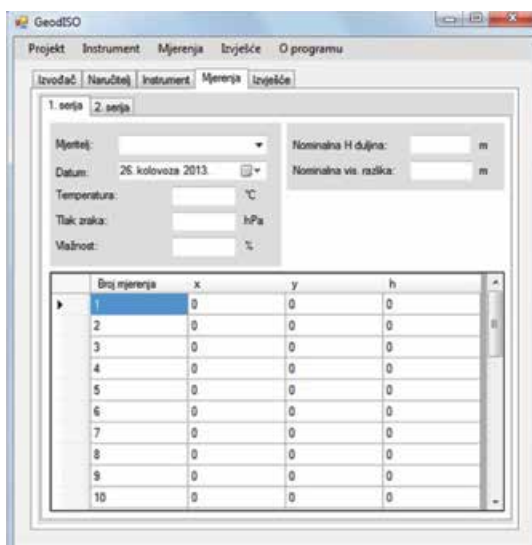
Svakom daljinomjeru je nakon uključivanja potrebno određeno vrijeme za stabilizaciju frekvencije. Vrijeme stabilizacije frekvencije važno je za precizna mjerenja milimetarske točnosti te je potrebno pričekati da to vrijeme nakon uključivanja instrumenta prođe prije startanja mjerenja. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da to vrijeme stabilizacije za daljinomjer Leica TC1800 iznosi približno 15 minuta, a za Leicu TCA2003 približno 5 minuta (slika 5). Možemo uočiti da su raspon i standardno odstupanje mjerne frekvencije više nego dvostruko manji za daljinomjer Leica TCA2003 u odnosu na Leicu TC1800, što ukazuje na veću stabilnost frekvencije daljinomjera Leica TCA2003. Vidljiv je i utjecaj temperature na način da je frekvencija pri niskoj temperaturi najveća, dok se povećanjem temperature ona smanjuje te se najteže stabilizira pri najvišoj temperaturi. Uspoređujući temperaturu i standardno odstupanje, možemo primijetiti da s porastom temperature raste i vrijednost standardnog odstupanja mjerne frekvencije [3].

5. Softverska podrška pri ispitivanju i umjeravanju geodetskih instrumenata prema nacionalnim normama

U Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta provedeno je znanstveno istraživanje u okviru kojega je student Dino Udovičić izradio diplomski rad *Softverska podrška pri ispitivanju i umjeravanju geodetskih instrumenata prema nacionalnim normama*, koji je obranio 2013. godine. Mentori diplomskog rada bili su Đuro Barković i Mladen Zrinjski.

Nacionalnim normama za ispitivanje i umjeravanje geodetskih instrumenata propisuju se postupci ispitivanja, umjeravanja te iskazivanja rezultata mjerenja s procjenom mjerne nesigurnosti. Ispitivanje preciznosti nivelira provodi se prema normi HRN ISO 17123-2, teodolita prema normi HRN ISO 17123-3, a GNSS RTK mjernog sustava prema HRN ISO 17123-8. Kao softverska podrška ispitivanju i umjeravanju

geodetskih instrumenata prema navedenim normama izrađen je računalni program GeodISO (slika 6) korištenjem modernoga programskog jezika C#. U ovoj softverskoj aplikaciji mogu se obraditi mjerenja, provesti statistički testovi i dobiti izvješće u formi, koja je u skladu s normama osnovne oznake HRN ISO 17123 [4].



Slika 6: Računalni program GeodISO [4]

6. Razvoj metode umjeravanja geodetskih linearnih mjerila

U Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta asistent Sergej Baričević, mag. ing. geod. et geoinf., provodi znanstveno istraživanje u okviru prijavljene teme doktorskog rada *Razvoj metode umjeravanja geodetskih linearnih mjerila*. Mentor teme doktorskog rada je prof. dr. sc. Đuro Barković.

U okviru ovoga doktorskog rada automatizirat će se postupak umjeravanja, kojim će se u cijelosti eliminirati utjecaj osobnih pogrešaka opažača jer će se očitavanje pojedinih crtica podjele na geodetskom linearnom mjerilu izvoditi pomoću CCD kamere koja će se također pomicati automatski pomoću servomotora. Takav potpuno novi sustav umjeravanja, kojim će se zamijeniti analogni način očitavanja pojedinačnih crtica podjele s CCD kamerom na motoriziranim kolicima i u kojem će se postupak mjerenja, obrade i analize podataka mjerenja te prikaza konačnih rezultata u potpunosti automatizirati, zahtijeva samostalnu izradu sveobuhvatnoga računalnog programa. Nakon izrade automatiziranog sustava umjeravanja, provest će se istraživanje može li takav automatizirani komparator (slika 7) dati točnije rezultate mjerenja uz manju mjernu nesigurnost od dosadašnje metode umjeravanja. Važno je naglasiti da za izra-

du tog sustava neće biti korištena gotova komercijalna rješenja, već će se pojedine komponente ugrađivati u sustav, a samostalno kreiran računalni program bit će otvorenog koda. Navedeno istraživanje je u završnoj fazi izrade, koje bi trebalo rezultirati obranom doktorskog rada Sergeja Baričevića tijekom 2022. godine.



Slika 7: Komparator Geodetskog fakulteta s izmijenjenim dijelovima
(1 – kolica sa servomotorom, 2 – kamera s CCD senzorom, 3 – telecentrični objektiv,
4 – upravljačko računalo, 5 – serversko računalo) [5]

7. Zaključak

Razvoj Laboratorija za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu traje u kontinuitetu gotovo punih šezdeset godina. U Laboratoriju se obavlja nastavna, znanstveno-istraživačka i stručna djelatnost. U Laboratorija za mjerenja i mjernu tehniku razvijaju se nove mjerne metode i uređaji za ispitivanje i umjeravanje geodetskih instrumenata i drugih mjernih senzora u skladu s međunarodnim i nacionalnim normama. Znanstveno-istraživački rad, koji se odvija u okviru Laboratorija, pridonosi stalnom razvoju i unapređenju nastavne i stručne djelatnosti.

Literatura

- [1] Barković, Đ.: *Komparacija nivelmanskih letava pomoću inkrementalne mjerne letve, doktorska disertacija*, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, (2002).

- [2] Zrinjski, M.: *Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a, doktorska disertacija*, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, (2010).
- [3] Peša, M.: *Ispitivanje mjerne frekvencije elektrooptičkih daljinomjera*, diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, (2011).
- [4] Udovičić, D.: *Softverska podrška pri ispitivanju i umjeravanju geodetskih instrumenata prema nacionalnim normama*, diplomski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, (2013).
- [5] Baričević, S.; Barković, Đ.; Zrinjski, M.: *Umjeravanje preciznih nivelmanskih letvi*, Geodetski list, 75 (2021) 2, 169-188.