

UDK 528.517.085.39:681.783.2:621.3.082.73:621.397.331.265
Pregledni znanstveni članak

Nova tehnološka dostignuća u konstrukcijama integriranih mjernih stanica

Nikola SOLARIĆ, Miljenko SOLARIĆ, Đuro BARKOVIĆ, Mladen ZRINJSKI – Zagreb¹

SAŽETAK. U radu su opisana nova tehnološka dostignuća i rješenja u konstrukcijama integriranih mjernih stanica tvrtke Leica, koje su razvijene u posljednjih desetak godina. Nove konstrukcije u integriranim mjernim stanicama znatno su unaprijedile rad motora za pokretanje alhidade oko vertikalne osi i durbina oko horizontalne osi. Osim toga, omogućile su i znatno povećanje preciznosti i točnosti viziranja, mjerenja kutova te mjerenja duljina. Iznad linearnog CCD-senzora i izvora svjetlosti umjesto ravnih zrcala postavljena su parabolična zrcala. To omogućava da kroz limb s kodiranom podjelom prolazi koncentrirana količina svjetlosti koja dolazi na linearni CCD-senzor, što omogućava očitavanje limba i do 5000 puta u sekundi. U novim automatiziranim mjernim stanicama za motorizaciju je primijenjen direktni pogon koji je baziran na obrnutom piezoelektričnom efektu. Za elektrooptičko mjerenje duljina razvijen je PinPoint EDM-system. Za mjerenje velikih duljina (do 1000 m) bez prizama ili refleksnih folija razvijena je tehnologija System Analyzer. Primjena "anamorphic" sustava prizmi za bolje formiranje signala laserskog snopa omogućuje točnije mjerenje duljina.

Ključne riječi: integrirana mjerna stanica, motori za pokretanje alhidade i durbina, obrnuti piezoelektrični efekt, direktni pogon, PinPoint EDM-system.

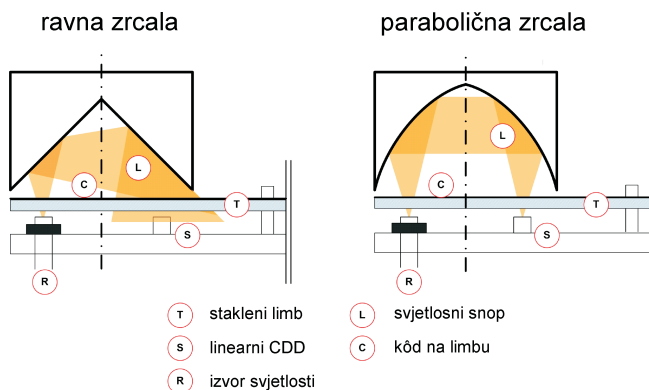
¹ Prof. emeritus dr. sc. Nikola Solarić, član emeritus Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: nikola.solaric@geof.hr,
prof. dr. sc. Miljenko Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: miljenko.solaric@geof.hr,
prof. dr. sc. Đuro Barković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: djuro.barkovic@geof.hr,
dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: mladen.zrinjski@geof.hr.

1. Uvod

U posljednjih dvadesetak godina došlo je do naglog razvoja mjernih stanica (totalne stanice, elektronički tahimetri) (Kahmen 1997, Deumlich i Staiger 2002, Solarić i dr. 2007). Posebno značajan razvoj postignut je u posljednjih nekoliko godina u tvrtki Leica, razvojem motora koji brže i preciznije pokreću alhidadu oko vertikalne osi i durbin oko horizontalne osi. Prijašnji sustav pokretanja alhidade u automatiziranim mjernim stanicama pomoću step-motora imao je nedostatak tzv. minimalnoga koraka koji je na većim udaljenostima nosio veću pogrešku viziranja, a time i pogrešku mjerenja kuta. Također, postignuto je povećanje preciznosti i točnosti viziranja, mjerenja kutova (Solarić i dr. 2007) i mjerenja duljina.

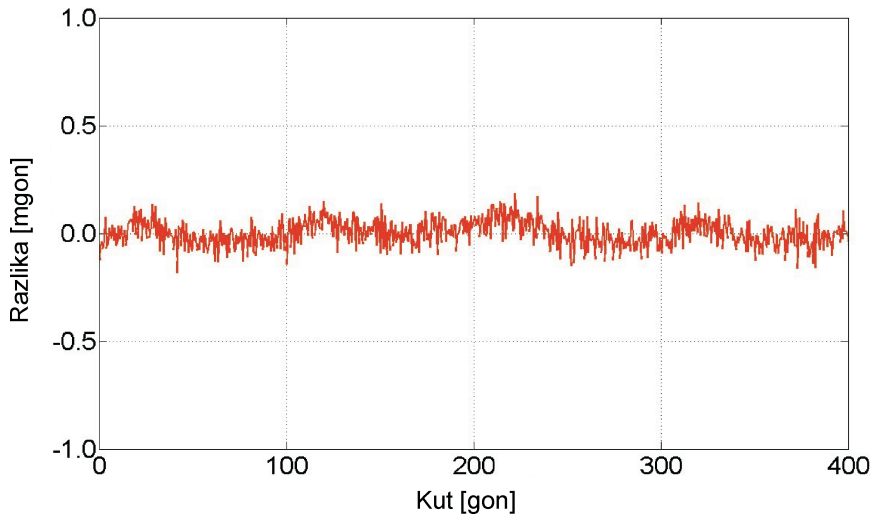
2. Mjerenje kutova

O novostima u mjerenju kutova te građi kompenzatora koji se nalazi u novim instrumentima tvrtke Leica prethodno je pisano u Solarić i dr. (2007), Benčić i Solarić (2008). Ovdje će se dati prikaz samo najnovijih tehnoloških dostignuća, koja su u međuvremenu razvijena. Iznad linearnog CCD-senzora (Charge-coupled device) i izvora svjetlosti umjesto ravnih zrcala postavljena su parabolična zrcala (slika 1). To omogućava da kroz limb s kodiranom podjelom prolazi koncentrirana količina svjetlosti koja dolazi na linearni CCD, što omogućava očitavanje limba i do 5000 puta u sekundi. To ima veliku prednost i primjenu pri automatskom praćenju brzog cilja. Osim toga, omogućena je i direktna kontrola motora pri navođenju durbina na neki određeni cilj.



Slika 1. Ravna i parabolična zrcala iznad linearnog CCD-senzora i izvora svjetlosti.

Umjesto očitavanja samo na dva mjesta kodiranog limba postavljena su očitavanja limba na 4 mjesta, što omogućava veću preciznost i točnost mjerenja kutova. Na slici 2 prikazana je razlika kutova izmjerenih pomoću automatizirane mjerne stanice Leica i test stroja TPM-2 (Lippuner i Scherrer 2005). Ta razlika pokazuje da se kut očitani na 4 mjesta limba izmjeri sa standardnim odstupanjem $\sigma = 0,203''$ (0,063 mgon).

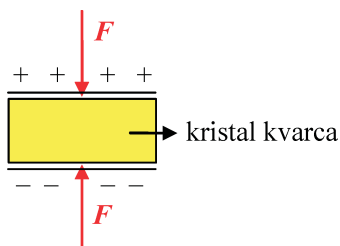


Slika 2. Razlika kutova izmjerenih pomoću automatizirane mjerne stanice Leica i test stroja TPM-2.

3. Motorizacija

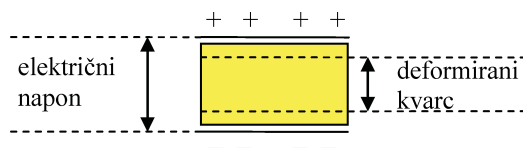
Posljednjih godina, umjesto običnih step-motora, u mjerne stanice ugrađeni su motori za pokretanje alhidade oko vertikalne osi i durbina oko horizontalne osi, koji rade na principu obrnutog (inverznog) piezoelektričnog efekta i direktno pretvaraju električni napon u mehanički pokret (Physik Instrumente 2009). Bitna je karakteristika tog motora velika brzina i ubrzanje te gotovo beskonačno mali korak motora. To omogućava da pri pokretima u horizontalnom i vertikalnom smjeru motor radi gotovo bez trzaja, te omogućava vrlo precizno postavljanje niti nitnoga križa u odgovarajući položaj. Piezoelektrični efekt bio je poznat već u 18. stoljeću, a eksperimentalno ga je pobliže proučavao 1880-ih godina Pierre Curie.

Kada je kristal kvarca podvrgnut pritisku, djelovanjem neke vanjske sile F , dolazi do deformacije kristalne rešetke i nejednake raspodjele molekula u kristalnoj rešetci te razdvajanja pozitivnog i negativnog naboja na plohama kristala (slika 3). To je direktni piezoelektrični efekt. Kristali i keramike na kojima dolazi do takve pojave nazivaju se piezoelektrični materijali.



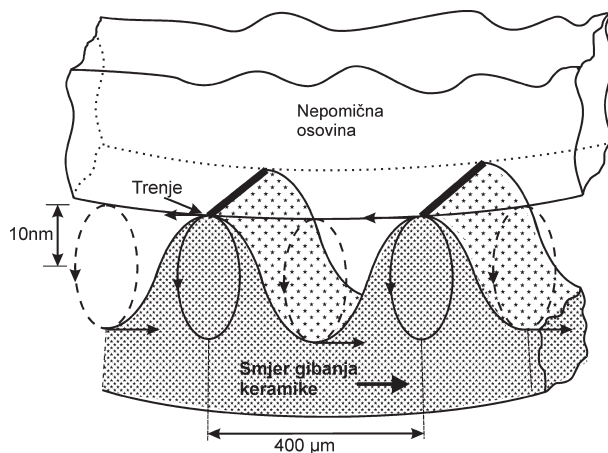
Slika 3. Direktni piezoelektrični efekt.

Događa se i obrnuti (inverzni) piezoelektrični efekt. Ako se između krajeva kristala kvarca dovede napon, dolazi do deformacije kristala kvarca (slika 4), tj. dolazi do stiskanja ili širenja kristala ovisno o polaritetu napona (polaritetu električnog polja) i njegove veličine. Izmjenično električno polje izaziva periodične promjene dimenzija kristala, njegovo stezanje ili rastezanje. Te promjene mogu biti primijenjene za mehanički pokret (pogon). Na primjeni tog efekta radilo se u IBM-u (Barth 1973), a prvi prijavljeni patent iz toga područja bio je 1979. godine (Vasiliev i dr. 1979). Veličina i smjer deformacije kristala ovisi o smjeru osi kristalizacije kvarca i jačine električnog polja. Izmjenično električno polje dovodi do periodičnih promjena dimenzija minerala. Te promjene mogu biti primijenjene za pogon motora. Umjesto kristala minerala danas se mogu primijeniti i umjetno proizvedene keramike kao piezoelektrični materijal. To omogućava da se piezoeffekt može danas primijeniti u različite svrhe (Uchino i Giniewicz 2003, Jin i dr. 2005, Jin i dr. 2006).



Slika 4. Obrnuti piezoelektrični efekt.

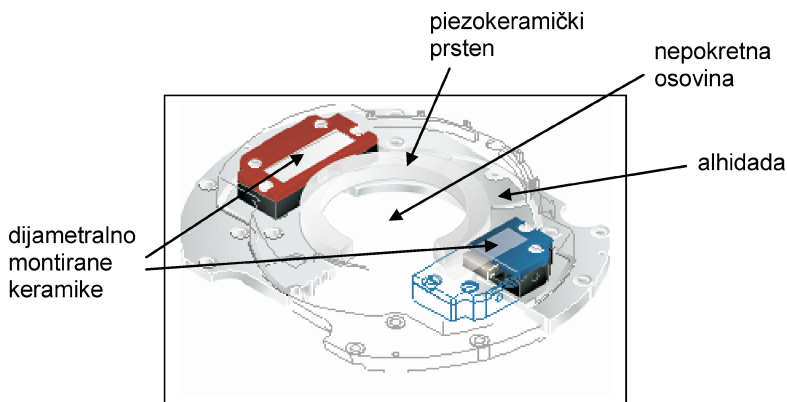
Da bi se postiglo okretanje alhidade automatizirane mjerne stanice oko nepokretne vertikalne osovine izaziva se eliptičko titranje u piezoelektričnoj keramici (slika 5). Eliptički titraji piezoelektrične keramike odupiru se trenjem o nepokretnu čvrstu osovinu i izazivaju okretanje alhidade oko nepokretne čvrste vertikalne osi (odnosno durbina oko horizontalne osovine).



Slika 5. Princip rada direktnog pogona² u automatiziranim mjernim stanicama tvrtke Leica baziran na obrnutom piezoelektričnom efektu.

² Taj pogon dobio je naziv direktni pogon jer direktno pretvara električnu energiju u pokret, bez prijenosa zupčanika, četkica i sličnog.

U novijim automatiziranim mjernim stanicama tvrtke Leica primijenjene su dvije dijametralno postavljene piezoelektrične keramike za ubrzanje i precizno vođenje keramičkoga valjkastog prstena (slika 6). Keramički prsten nalazi se u alhidadi automatizirane mjerne stanice i okreće se zajedno s cijelom alhidadom oko vertikalne osovine, odnosno durbin oko horizontalne osovine. Tijekom okretanja keramičkog prstena oko nepomične osovine okreće se i cijela alhidada oko vertikalne osovine, odnosno durbin oko horizontalne osovine.



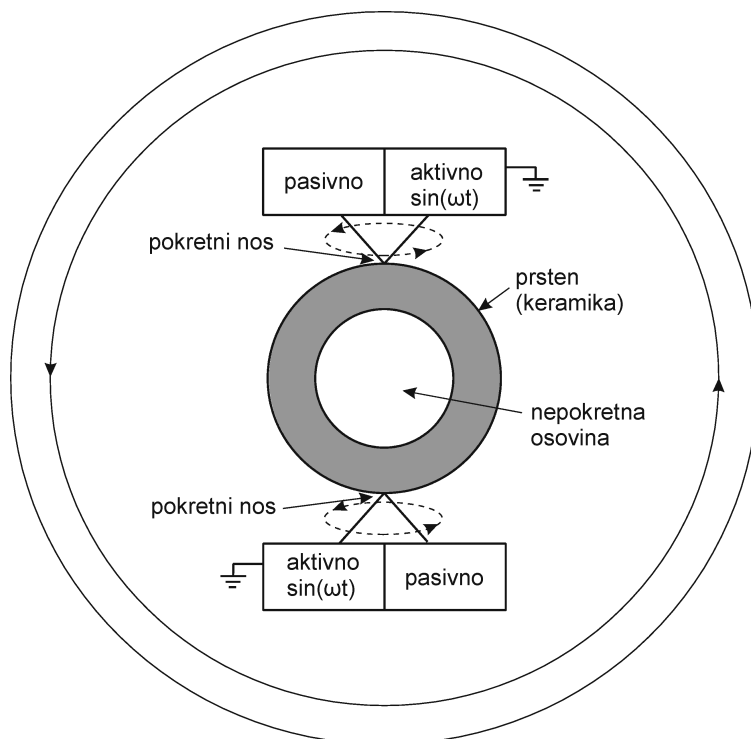
Slika 6. Direktni pogon u automatiziranoj mjernoj stanici Leica (Nindl i dr. 2009).

Keramika se nalazi između dvije elektrode (aktivne i pasivne) (slika 7). Ako je na aktivnu elektrodu priključen sinusni napon dolazi do eliptičkih titraja u piezoelektričnoj keramici i pokretnom nosu, a to titranje prenosi se na piezokeramički prsten i na okretanje alhidade oko nepokretne vertikalne osovine automatizirane mjerne stanice.

Smjer i brzina eliptičkih pokreta određeni su pomoću aktivnih isječaka (segmenata) montirane keramike i jakosti struje. Smjer gibanja može se promijeniti jednostavno promjenom stanja elektroda aktivno i pasivno. Uz keramike i između obje elektrode nalazi se “nos”, koji prenosi pokrete čvrsto montirane keramike na keramički valjkasti prsten. Montirane keramike, pokretni nosovi i keramički valjkasti prsten izvode eliptičke titraje (slike 6 i 7), ako je priključena sinusoidalna izmjenična struja. Zbog eliptičkih pokreta u montiranoj keramici, nosovima i keramičkom valjkastom prstenu, pomiče se alhidada oko vertikalne osi, odnosno durbin oko horizontalne osi (slika 7).

Primjena piezotehnologije omogućava motorizaciju velikih brzina i ubrzanja okretanja, a također i male korake u nanometarskom području alhidade odnosno durbina. To omogućava velike brzine i ravnomjerno okretanje instrumenta, bez trzaja.

Postignuta je dugovječnost instrumenta i dugi su intervali vremena između servisa direktnog pogona, jer nema pokretnih dijelova (četkica) i prijenosnih zupčanika. Direktni pogon u automatiziranoj mjernoj stanici Leica ne proizvodi magnetsko polje, a ujedno mu ne smetaju ni strana magnetska polja. Zato je njime



Slika 7. Princip rada direktnog pogona u automatiziranoj mjernoj stanici Leica baziran na obrnutom piezoeffektu.

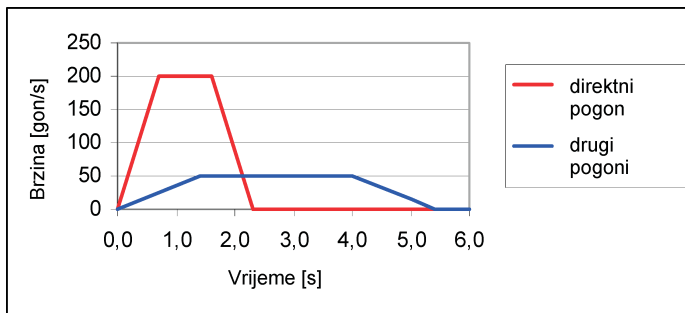
moгуće mjeriti i u blizini magnetskih polja, kao na primjer u blizini električnih centrala.

U usporedbi s dosadašnjim pogonima, direktni pogon u automatiziranim mjernim stanicama Leica ima sljedeće prednosti:

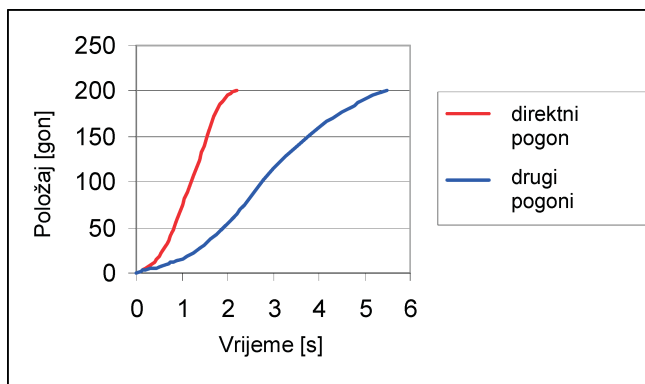
- veliku brzinu (do 200 gon/s)
- veliko ubrzanje (do 400 gon/s²)
- dugi vijek trajanja i robusnost
- ne stvara šumove (buku)
- konstrukcija je čvrsta
- ne troši struju za vrijeme mirovanja.

Direktni pogon automatiziranih mjernih stanica Leica, zahvaljujući velikoj brzini i ubrzanju, znatno skraćuje vrijeme postavljanja alhidade i durbina u neki određeni položaj. Na slici 8a prikazana je usporedba trenutačne brzine direktnog pogona pomoću obrnutog piezoeffekta i uobičajenoga konvencionalnog pogona pri promjeni položaja durbina za 200 gona. Na slici 8b prikazana je usporedba kuta zakreta alhidade ovisno o vremenu kod direktnog i drugih pogona (Nindl i dr. 2009, Zogg i dr. 2009).

Maksimalna brzina direktnog pogona u automatiziranim mjernim stanicama Leica najmanje je četiri puta veća od dosadašnjih uobičajenih pogona. Vrijeme postavljanja durbina u odgovarajući položaj u tim je sustavima upola kraće.



a)



b)

Slika 8. a) usporedba trenutačne brzine direktnog pogona pomoću obrnutog piezoeffekta i uobičajenoga konvencionalnog pogona pri promjeni položaja durbina za 200 gona; b) usporedba kuta zakreta alhidade ovisno o vremenu pri direktnom i drugim pogonima (Nindl i dr. 2009).

Potrošnja struje motorizirane stanice vrlo je važan faktor pri izboru instrumenta s pogonom na baterije. Mala potrošnja struje, osobito u položaju mirovanja instrumenta, znatno produžuje vrijeme pogona mjerne stanice. Direktni pogon automatizirane mjerne stanice Leica troši struju samo za pokretanja, a u položaju mirovanja ne troši struju. Direktni pogon može zadržati horizontalni i vertikalni položaj alhidade i durbina bez potrošnje struje u istom položaju. To štedi električnu energiju, ne razvija toplinu te omogućava dulje vrijeme mjerenja u usporedbi s drugim instrumentima. S druge strane, mala količina razvijene topline u unutrašnjosti instrumenta vrlo je važna da bi se postigla visoka točnost mjerenja. Obično veće količine topline negativno djeluju na točnost mjerenja. To omogućava

vrlo stabilan položaj durbina za vrijeme viziranja i početka mjerenja, bez dodatnih kolebanja.

Za direktni pogon koji primjenjuje piezotehnologiju značajno je da ima duži vijek trajanja u usporedbi s uobičajenim pogonima. To je zato jer se direktni pogoni ne koriste zupčanicima i gotovo nemaju habanja, a to produžava vijek trajanja i intervale vremena između servisa.

4. Elektrooptičko mjerenje duljina (EDM)

Za elektrooptičko mjerenje duljina pomoću prizme, refleksne folije ili prirodne površine, u tvrtki Leica Geosystems razvijen je PinPoint EDM³-system. U tom sustavu odašilje se vidljivi laserski snop koaksijalno s optičkom osi durbina. Svjetlost reflektirana od cilja detektira se osjetljivim svjetlosnim prijamnikom i pretvara u električni signal. Digitaliziranjem toga signala, sakupljanjem i analizom tih podataka određuje se duljina do ciljne točke. Vrlo visoka modulacijska frekvencija od 100 MHz u daljinomjeru omogućava visokoprecizno i točno mjerenje duljina. Iako nije primijenjena neka nova revolucionarna metoda mjerenja duljina, dobivaju se preciznija mjerenja zahvaljujući novoj minijaturnoj elektronici koja reflektirani signal analizira složenim (sophisticiranim) postupcima.

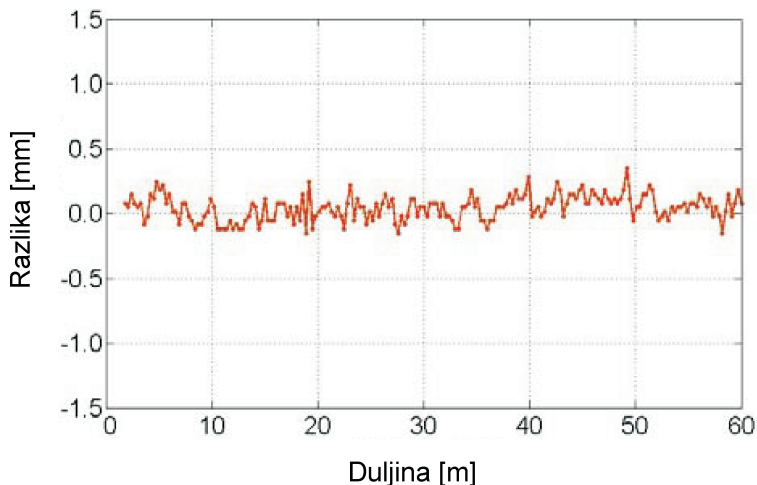
Leica Geosystems bez reflektora (PinPoint R1000 EDM) mjeri duljine do prirodnih površina, čak do 1000 m. Da bi se mogle mjeriti tako velike duljine bez prizama ili refleksnih folija, u Leica Geosystems razvijena je tehnologija nazvana System Analyzer. Ta tehnologija omogućava ispitivanje signalnih informacija za određivanje duljina te kombinira prednosti faznog načina mjerenja duljina i impulsnog načina mjerenja duljina iz vremena gibanja svjetlosti (Bayoud 2006). Za svakog mjerenja duljine trenutačno se određuje kvaliteta laserskog snopa i kvaliteta cilja pomoću System Analyzera. Na kraju, pomoću suvremenih načina obrade signala računa se duljina s vrlo velikom preciznošću.

Da bi se postigla što veća točnost, u integriranoj mjernoj stanici Leica poboljšani su Leica PinPoint EDM-system. Mjerna nesigurnost mjerenja duljina na okruglu prizmu je (0,6 mm + 1 ppm), ispitana prema ISO (2001). Daljinomjerni sustav odabire mjernu frekvenciju ovisno o uvjetima okoline. Poboljšani daljinomjer primjenjuje dodatno različite frekvencije i smanjuje loši utjecaj višestruke refleksije između instrumenta i cilja. Nadalje, mjerni proces uzima u obzir više mjerenja, koja povećavaju pouzdanost i točnost mjerenih duljina.

PinPoint EDM-system ima više prednosti pri mjerenju duljina. Osim vrlo visoke pouzdanosti i točnosti mjerenja, moguća su mjerenja i po lošim vremenskim uvjetima kao što su prašina, dim, magla, kiša ili snijeg.

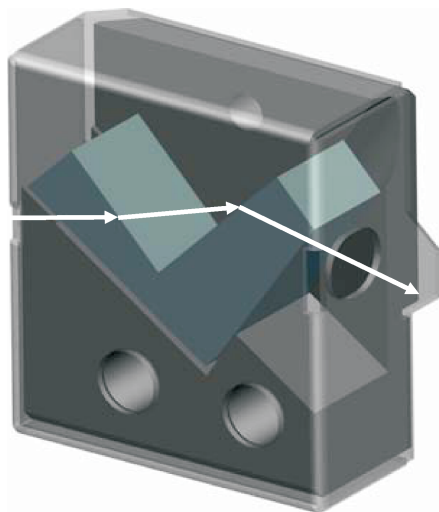
Navedenu točnost mjerenja duljina integriranom mjernom stanicom Leica potvrdili su akreditirani mjerni laboratoriji. Pritom su izmjerene duljine uspoređene s duljinama izmjenjenima preciznim interferometrom (slika 9).

³ EDM – Electro-optical distance meter.



Slika 9. Razlike duljina izmjerenih preciznim interferometrom i integriranom mjernom stanicom Leica (Nindl i dr. 2009).

Osim poboljšanja u elektronici i analizi signala, sustav mjerenja duljina još je poboljšán i optimiran pomoću boljeg oblika profila signala laserskog snopa. Nehomogeno svjetlo okoline odrezano je da svjetlost na periferiji (obodu) vidnog polja, zbog višestruke refleksije, ne bi utjecala na mjerenje duljine. Dodatno je formiran laserski snop pomoću “anamorphic” sustava prizmi (slika 10). To omogućava točnije mjerenje duljina, osobito pomoću prizme.



Slika 10. “Anamorphic” sustav prizmi za bolje formiranje oblika profila signala laserskog snopa sa shematskim prikazom hoda laserskog snopa (Nindl i dr. 2009).

5. Zaključak

Nova integrirana mjerna stanica Leica odlikuje se visokom preciznošću, točnošću i učinkovitošću. Prednosti integrirane mjerne stanice Leica vrlo su značajne jer je u nju ugrađena najnovija tehnologija koja prilikom mjerenja duljina, pomoću prizme ili na prirodne površine, daje najvišu točnost rezultata mjerenja te povećava mjernu učinkovitost.

Osobito čvrsta mehanička konstrukcija i brzi sustav za mjerenje kutova omogućavaju mjerenje s nesigurnošću od 0,5" (Nindl i dr. 2009). Visoka točnost mjerenja kutova i duljina te najbolja učinkovitost zahtijevaju posebnu mehaničku konstrukciju kako bi se smanjio utjecaj okoline za vrijeme mjerenja, a to je u ovoj integriranoj mjernoj stanici postignuto. Dodatni fini pogon omogućava mjerenja samo jednom rukom, a tipka "Smart-Taste", koju definira korisnik, omogućava mjerenja bez tangencijalnog pritiska na alhidadu.

Preciznost, točnost i ekonomičnost najvažnije su u svim geodetskim mjerenjima, a osobito za potrebe izrade inženjerskih projekata. Integrirana mjerna stanica Leica ispunjava ta svojstva. Kvaliteta rezultata i mjerna učinkovitost zadovoljeni su u ovoj integriranoj mjernoj stanici primjenom optimalne kombinacije različitih senzora. Brzo i precizno mjerenje kuta, PinPoint EDM-system i motorizacija u automatiziranoj mjernoj stanici Leica, pomoću direktnog pogona zasnovanog na piezoeffektu omogućavaju određivanje položaja s vrlo visokom točnošću u najkraćem vremenu. O visokoj pouzdanosti integrirane mjerne stanice Leica govori i dugi vijek trajanja i dugi intervali vremena između servisa za održavanje.

U integriranu mjernu stanicu Leica u cijelosti su ugrađene sve funkcije prethodno razvijenog sustava "X-Function" tvrtke Leica Geosystems. Integrirana mjerna stanica Leica kompatibilna je također s hardverom GNSS uređaja i svim komponentama poznate serije Leica System 1200.

Literatura

- Barth, H. V. (1973): Ultrasonic Driven Motor, IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 16, No. 7, 2263–2271.
- Bayoud, F. A. (2006): Leica's PinPoint EDM Technology with Modified Signal Processing and Novel Optomechanical Features, Proceedings of the XXIII International FIG Congress, October 8–13, Munich, 1–16.
- Benčić, D., Solarić, N. (2008): Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici, Školska knjiga, Zagreb.
- Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 9. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- ISO (2001): ISO 17123-4:2001 – Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments).
- Jin, L., Yao, X., Wei, X., Xi, Z. (2005): Observation of Piezoelectric Resonance in Time Domain Transient Current of Ferroelectric Ceramics and Crystals, Applied Physics Letters, Vol. 87, No. 7, 3 pages.

- Jin, L., Yao, X., Wei, X. (2006): Piezoelectric Resonance of Lead Zirconate Titanate Ceramics Excited by a Stepwise Electric Field, *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, No. 1, 6 pages.
- Kahmen, H. (1997): *Vermessungskunde*, 19. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin-New York.
- Lippuner, H., Scherrer, R. (2005): Die neue Theodolit-Prüfmaschine TPM-2 von Leica Geosystems, *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, Vol. 112, No. 5, 170–176.
- Nindl, D., Lienhart, W., Zogg, H. M. (2009): Neueste Entwicklungen und Technologien für modernste Totalstationen mit höchster Messgenauigkeit, *Geomatik Schweiz*, No. 8, 411–415.
- Physik Instrumente (2009): Technical Progress with Ultrasonic Piezomotors, *Moving the NanoWorld*, Issue 40, 1–8.
- Solarić, N., Benčić, D., Barković, Đ., Zrinjski, M. (2007): Očitavanje i registracija prava-elektroničkim teodolitima i elektroničkim tahimetrima Leica, *Kartografija i Geoinformacije*, Vol. 6, No. izvanredni broj, 246–253.
- Uchino, K., Giniewicz, J. R. (2003): *Micromechatronics*, Marcel Dekker Inc., New York.
- Vasiliev, P. E. i dr. (1979): UK Patent Application GB 2020857 A.
- Zogg, H. M., Lienhart, W., Nindl, D. (2009): *Leica TS30 White Paper*, Leica Geosystems AG, Heerbrugg.

New Technological Achievement in the Construction of Integrated Measuring Stations

ABSTRACT. The paper describes new technological achievement and solutions in the construction of integrated measuring stations manufactured by the company Leica that have been developed in the last ten years. New constructions in the integrated measuring stations have significantly enhanced the operation of the engine to run the alidade around the vertical axis and the telescope around the horizontal axis. They have also provided significantly higher precision and accuracy of sighting, angle and distance measurement. Above the linear CCD sensor, there are parabolic mirrors installed instead of flat mirrors. It allows the concentrated amount of light reaching the linear CCD sensor to pass through the circle with the coded distribution, which makes it possible to read the circle scale even 5000 times in a second. In the new automated measuring stations, a direct drive based on the reverse piezoelectric effect. For the purpose of electro-optical distance measurement, the PinPoint EDM-system has been developed. There has been also the technology of System Analyzer developed to measure large distances (up to 1000 m) without a prism or reflex foils. The application of "anamorphic" prism system for better formation of laser beam signal provides more accurate distance measurement.

Keywords: integrated measuring station, engines to run alidade and telescope, reverse piezoelectric effect, direct drive, PinPoint EDM-system.

Primljeno: 2011-01-21

Prihvaćeno: 2011-11-10