

UDK 528.5:528.4

Pregledni znanstveni članak / Review

Mjerni sustavi i metode umjeravanja vertikalnog kruga geodetskih instrumenata

Luka DRUŽEIĆ, Đuro BARKOVIĆ, Mladen ZRINJSKI,
Sergej BARIČEVIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. Umjeravanje vertikalnog kruga geodetskih instrumenata ključno je za osiguranje točnosti mjerenja vertikalnih kutova u različitim geodetskim zadacima. U radu je prikazan pregled razvijenih mjernih sustava, metoda te konstrukcija komparatora, uz detaljan opis građe komparatora, procesa umjeravanja i glavnih izvora nesigurnosti koji utječu na točnost umjeravanja. Provedena je analiza i usporedba ključnih parametara komparatora, uključujući ukupne standardne nesigurnosti umjeravanja, područje umjeravanja te primijenjene metode umjeravanja.

Ključne riječi: vertikalni krug, geodetska mjerna stanica, umjeravanje, kutni enkoder, autokolimator.

1. Uvod

Temeljna zadaća svih geodetskih poslova je postići i osigurati traženu točnost mjerenja u skladu sa zahtjevima propisanim pojedinim projektom ili pravnom regulativom. Kako bi se ispunili zadani kriteriji, geodetske instrumente potrebno je redovito ispitivati i umjeravati. S vremenom i uporabom geodetskih instrumenata točnost mjerenja opada, što utječe na pouzdanost prikupljenih podataka. Umjeravanjem se osigurava rad instrumenata s točnošću koju određuje proizvođač uz otkrivanje i smanjivanje sustavnih utjecaja, čime se poboljšava

¹ Luka Družević, univ. mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: luka.druzeic@geof.unizg.hr
prof. dr. sc. Đuro Barković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: djuro.barkovic@geof.unizg.hr
prof. dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mladen.zrinjski@geof.unizg.hr
doc. dr. sc. Sergej Baričević, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: sergej.baricevic@geof.unizg.hr

ukupna točnost mjerenja. Važno je napomenuti da se umjeravanjem ne smanjuje utjecaj slučajnih pogrešaka niti uključuje mehaničke rektifikacije instrumenata (Savvaidis i dr. 2004). Mjerenje vertikalnih kutova s velikom točnošću ključno je pri preciznim geodetskim mjerenjima i poslovima državne izmjere. Vertikalni kutovi na teodolitima i geodetskim mjernim stanicama određuju se očitavanjem vertikalnog kruga. Vertikalni krug je definiran kao kružna ploča s podjelom u stupnjevima ili gonima, a okomito je postavljen u odnosu na horizontalnu os instrumenta (Frančula i Lapaine 2008).

Ispitivanje preciznosti mjerenja vertikalnih kutova teodolitom provodi se u skladu s normom HRN ISO 17123-3:2004, koja propisuje terenski postupak mjerenja te dva postupka ispitivanja preciznosti: jednostavni test i potpuni test. Osim toga, navedena norma preporučuje primjenu tri statistička ispitivanja za vertikalne kutove u sklopu potpunog testa (HRN ISO 2004, Zrinjski i dr. 2011). Za razliku od umjeravanja, koje je namijenjeno pronalaženju i korekciji sustavnih utjecaja, ispitivanje preciznosti fokusira se na provjeru ispunjava li geodetski instrument unaprijed definirane kriterije preciznosti potrebne za određene geodetske zadatke. Cilj ispitivanja nije analiza utjecaja sustavnih pogrešaka na kvalitetu mjerenja, već potvrda da instrument zadovoljava zahtjeve točnosti propisane od proizvođača za predviđene primjene.

U ovom radu dan je pregled javno dostupnih postojećih mjernih sustava za umjeravanje vertikalnog kruga u svijetu. Detaljno su opisane građe uređaja, postupci umjeravanja te su tablično prikazani izvori nesigurnosti s pripadajućim standardnim nesigurnostima. Za komparator razvijen u tvrtki Leica Geosystems, prema dostupnoj literaturi, izvori nesigurnosti nisu javno dostupni te su u okviru ovog rada izostavljeni, ali je dana ukupna standardna nesigurnost cjelokupnog mjernog sustava koja iznosi 0,182". Naposljetku je provedena analiza mjernih sustava i metoda umjeravanja usporedbom ključnih parametara relevantnih za umjeravanje vertikalnog kruga.

2. Umjeravanje vertikalnog kruga

Umjeravanje je proces kojim se uspoređuje očitana vrijednost mjernog instrumenta s poznatom referentnom vrijednošću, obično etalonom (Frančula i Lapaine 2008). Umjeravanjem se definira odnos, odnosno određuju se parametri odnosa mjerila ili mjernog sustava sa stvarnom veličinom ili veličinom koja je barem jedan red veličine točnosti viša od mjerila ili mjernog sustava koji se umjerava (Baričević i dr. 2021). Uređaj razvijen u svrhu umjeravanja naziva se komparator. Točnost umjeravanja komparatora definirana je sukladno Uputama za iskazivanje mjerne nesigurnosti (engl. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – GUM*) (Državni zavod za mjeriteljstvo 2008). Prema GUM-u, ukupna standardna nesigurnost umjeravanja mjerene veličine y računa se prema izrazu:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2, \quad (1)$$

gdje su:

u_c – ukupna standardna nesigurnost,

u_i – standardna nesigurnost pojedinog izvora,

N – ukupni broj izvora nesigurnosti.

Umjeravanje vertikalnog kruga može se ostvariti primjenom dviju temeljnih metoda. Prva metoda bazira se na izravnoj usporedbi kutnih vrijednosti geodetske mjerne stanice i vrijednosti izmjerenih s uređajima veće točnosti uzetim kao etaloni. Prema dostupnoj literaturi, instrumenti koji se prilikom umjeravanja upotrebljavaju kao etalon su:

- kutni enkoderi,
- autokolimatori,
- Mooreov stol za indeksiranje.

Kutni enkoder (engl. *angle encoder*) je elektromehanički uređaj za precizno mjerenje kutnog pomaka osovine i pretvorbom istog u digitalni ili analogni signal. Glavni dio kutnog enkodera je krug, odnosno kružna skala s rešetkastim uzorkom različitih visina montirana na osovini uređaja, podijeljena na segmente kojima se očitavaju kutovi s točnošću do desetinke sekunde. Kutni enkoderi dijele se na apsolutne i relativne (Šiaudinytė 2014).

Autokolimator (engl. *autocollimator*) je optički sustav zasnovan na načelu autokolimacije, odnosno preslikavanja gdje slika predmeta nastane u njezinoj ravnini. Primjenjuje se za precizna mjerenja malih kutnih promjena. Autokolimatori mogu biti optički i elektronički (Benčić i Solarić 2008).

Mooreov stol za indeksiranje (engl. *Moore's Precision Index*) je visokoprecizni uređaj za mjerenje i umjeravanje razvijen u američkoj tvrtki Moore. Sastoji se od dvije spojene nazubljene ploče, pri čemu se gornja ploča može podići i zarotirati do željenog kuta. Precizni zubi osiguravaju točno poravnanje u svakom položaju. Najzastupljeniji je Mooreov 1440 stol za indeksiranje, koji sadrži 1440 podjela, omogućujući očitavanje kutova s razmakom 15' (Bručas 2008).

Druga, trigonometrijska metoda temelji se na mjerenju duljina te računanju referentnog vertikalnog kuta posredno, primjenom trigonometrijskih funkcija. Duljine se mjere laserskim interferometrom ili kombinacijom elektrooptičkog daljinomjera i mjerne letve.

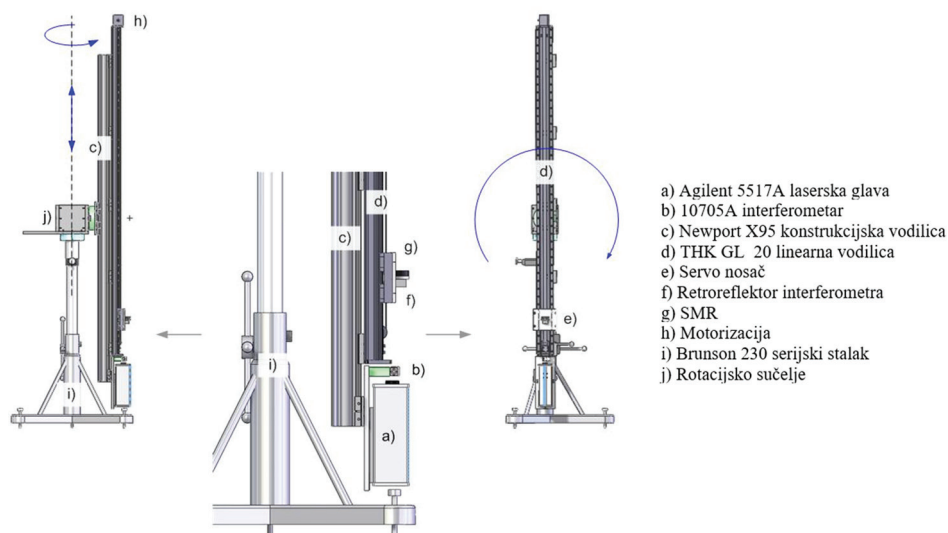
3. Europski centar za sinkrotronsko zračenje, Francuska

Europski centar za sinkrotronsko zračenje (engl. *European Synchrotron Radiation Facility* – ESRF) smješten je u gradu Grenobleu u Francuskoj. ESRF upravlja najmoćnijim izvorom sinkrotronskog zračenja u Europi. Skupina za poravnanje i geodetska mjerenja (engl. *Alignment and Geodesy* – ALGE) unutar ESRF-a odgovorna je za postavljanje, nadzor i povremeno poravnanje

akceleratora. Upotrebljavaju se visokoprecizni geodetski instrumenti poput robotiziranih geodetskih mjernih stanica i laserskih skenera za mjerenja. U svrhu poboljšanja točnosti očitavanja vertikalnih kutova, razvijen je komparator za umjeravanje vertikalnog kruga (engl. *Vertical Circle Comparator – VCC*) u robotiziranim geodetskim mjernim stanicama i laserskim skenerima (Martin i Chetwynd 2009).

3.1. Građa VCC-a

Prema Martin (2010) VCC se sastoji od motorizirane vertikalne vodilice linearnoga gibanja duljine 2,5 m s nosačem pričvršćenim na aluminijsku tračnicu duljine 3 m i interferometra. Interferometar je smješten na jednom kraju vodilice, dok su motori koji pokreću nosač na suprotnom kraju. Retroreflektor (engl. *Spherically Mounted Retroreflector – SMR*) nalazi se na nosaču. Cijeli sustav postavljen je na čvrsto postolje s podesivom visinom (slika 1). VCC je postavljen u vertikalni položaj i pričvršćen je na postolje sa sustavom koji omogućuje rotaciju u proizvoljnom smjeru.

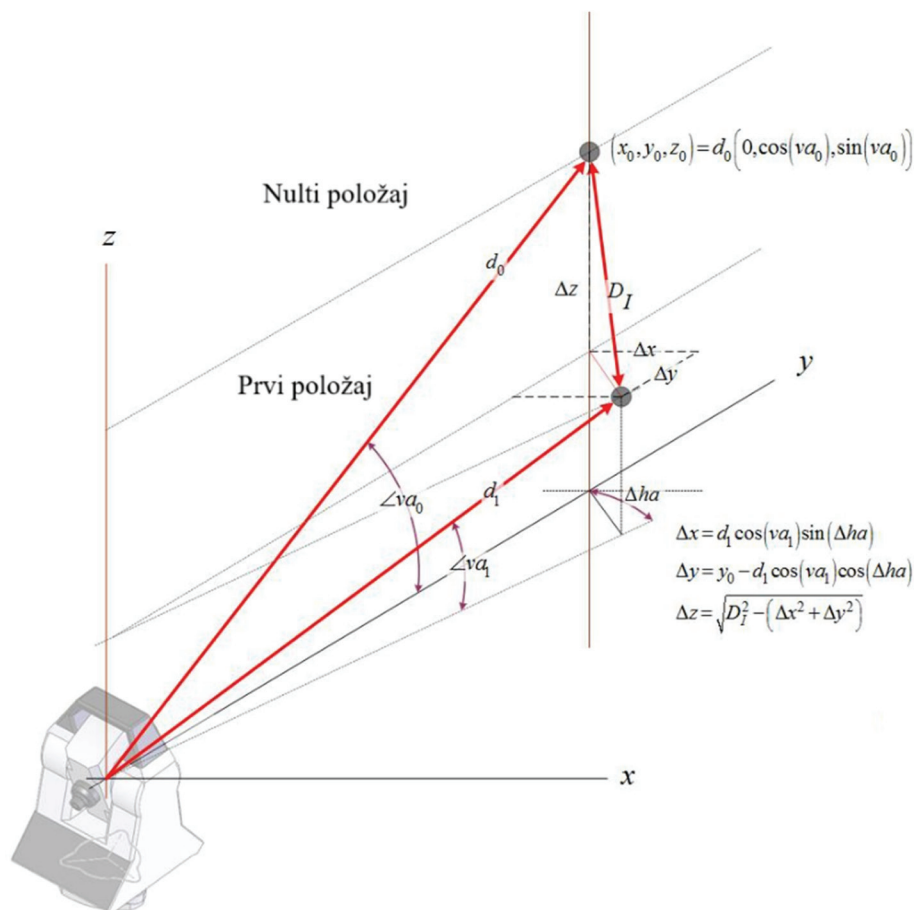


Slika 1. Shematski prikaz VCC-a (prema Martin 2010).

3.2. Postupak umjeravanja

Postupak umjeravanja temelji se na usporedbi očitavanja vertikalnih kutova umjeravanoga geodetskog instrumenta s precizno izmjerenim vertikalnim pomaci-ma retroreflektora koji se nalazi na uređaju (slika 2). Vertikalni pomaci retroreflektora se precizno mjere s interferometrijskim sustavom integriranim u VCC. Udaljenost između geodetskog instrumenta i VCC-a određuje se elektrooptičkim

daljinomjerom geodetskog instrumenta, prethodno umjerenim na stolu za umjeravanje daljinomjera (engl. *Distance Meter Calibration Bench – DCB*).



Slika 2. Prikaz postupka umjeravanja geodetske mjerne stanice na VCC-u (prema Martin 2009, Martin i Chetwynd 2009).

Referentni vertikalni kutovi računaju se prema izrazu (Martin i Chetwynd 2009, Martin 2010):

$$v_a = \arcsin\left(\frac{z_0 - \Delta z}{d_i}\right), \quad (2)$$

gdje su:

v_a – referentni vertikalni kut,

z_0 – visina prizme u početnoj poziciji,

Δz – vertikalni pomak prizme,

d_i – kosa duljina.

U svom radu Martin (2009) ističe dva nedostatka VCC-a. Prvi je ograničeno područje umjeravanja zbog horizontalne udaljenosti između geodetskog instrumenta i VCC-a. Primjerice, pri umjeravanju robotizirane geodetske mjerne stanice Leica TDA5005 na minimalnoj preporučenoj horizontalnoj udaljenosti 6 m, operativno područje mjerenja vertikalnih kutova iznosi $90^\circ \pm 10,4^\circ$ i $270^\circ \pm 10,4^\circ$. U praksi se horizontalna udaljenost može smanjiti na približno 2,5 m prije nego što sustav za automatsko viziranje (engl. *Automatic Target Recognition* – ATR) prestane funkcionirati. Na toj udaljenosti operativno područje mjerenja vertikalnih kutova iznosi $90^\circ \pm 23,75^\circ$ i $270^\circ \pm 23,75^\circ$. Drugi nedostatak je povećanje mjerne nesigurnosti pri kraćim horizontalnim udaljenostima. Iako smanjenje horizontalne udaljenosti omogućuje šire područje umjeravanja vertikalnih kutova, istovremeno dolazi do povećanja nesigurnosti u određivanju horizontalne duljine između instrumenta i prizme, što može negativno utjecati na ukupnu točnost umjeravanja.

3.3. Izvori nesigurnosti

U tablici 1 navedeni su izvori nesigurnosti komparatora za umjeravanje vertikalnog kruga.

Tablica 1. *Izvori nesigurnosti VCC-a (prema Martin 2009, prema Martin i Chetwynd 2009).*

Sastavnica standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Izvor nesigurnosti	Vrijednost standardne nesigurnosti ($k=1$) $u(x_i)$
$u(D_i)$	Nesigurnost interferometrijskog mjerenja udaljenosti do retroreflektora	10 μm
$u(d_1)$ i $u(d_2)$	Nesigurnost udaljenosti izmjerenih elektrooptičkim daljinomjerom	86 μm
$u(\Delta h_a)$	Nesigurnost horizontalnih kutova	0,7"
$u(\Delta v_a)$	Nesigurnost umjeravanja vertikalnih kutova	2"

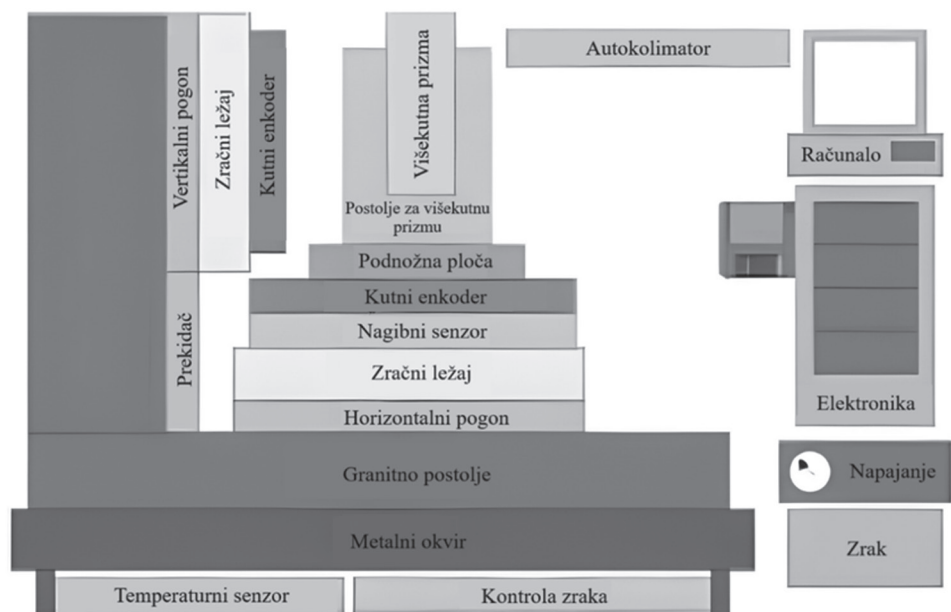
Nesigurnost interferometrijskog mjerenja udaljenosti do retroreflektora prvenstveno je rezultat temperaturnih utjecaja. Tijekom dugotrajnog umjeravanja dolazi do dilatacije tračnica i okvira VCC-a zbog temperaturnih promjena. Najutjecajniji čimbenik nesigurnosti udaljenosti izmjerene geodetskom mjernom stanicom je nesigurnost elektrooptičkog daljinomjera koji je prethodno umjeren na DCB-u. Za geodetsku mjernu stanicu Leica TDA5005, nominalna nesigurnost elektrooptičkog daljinomjera dobivena je temeljem potvrde o umjeravanju DCB-a te iznosi 86 μm . Postupak umjeravanja uključuje istovremeno mjerenje horizontalnih i vertikalnih kutova. Nesigurnost umjeravanja vertikalnih kutova temelji se na deklariranoj točnosti kuta koju propisuje proizvođač instrumenta. Točnost VCC-a pri umjeravanju geodetske mjerne stanice Leica TDA5005 s proširenom nesigurnošću ($k=2$) iznosi 1,6" (Martin 2009).

4. Tvrtka Leica Geosystems, Švicarska

Tvrtka Leica Geosystems iz Švicarske razvila je uređaj za umjeravanje horizontalnog i vertikalnog kruga kod teodolita i geodetskih mjernih stanica. Prva realizacija nastala je 1988. godine pod nazivom uređaj za umjeravanje teodolita (njem. *Theodolit-Prüfmaschine* – TPM). Razvojem novih tehnologija, 2004. godine predstavljena je nova inačica pod nazivom TPM-2 koja je i danas u upotrebi. TPM-2 se primjenjuje i za umjeravanje visokopreciznih uređaja za mjerenje kutova, poput višekutnih prizmi i kutnih enkodera (Lippuner i Scherrer 2005).

4.1. Građa uređaja za umjeravanje teodolita

U svom radu Lippuner i Scherrer (2005) opisuju uređaj za umjeravanje teodolita kao mjerni sustav koji se sastoji od dva precizna rotacijska stola smještenim na granitnom postolju oblika L. Postolje je postavljeno na metalnom okviru s podesivim nogama. Na horizontalnom rotacijskom stolu postavljena je podnožna ploča. Vertikalni rotacijski stol, montiran na bočnoj strani granitnog postolja, ima pričvršćenu rotacijsku ruku na kojoj se nalazi autokolimator. Kretanje rotacijske ruke je ograničeno mehaničkim preprekama. Osovinski sustavi oba rotacijska stola imaju zračne ležajeve. Kutovi se mjere kutnim enkoderima proizvođača Heidenhain. Horizontalni rotacijski stol pokreću četiri električna motora, dok vertikalni rotacijski stol upotrebljava osam motora zbog povećanog opterećenja rotacijske ruke i autokolimatora. Na slici 3 shematski je prikazan TPM-2. Za ispravan rad mora biti zadovoljen uvjet da se vertikalna os, horizontalna os i kolimacijska os mjernog sustava sijeku u jednoj točki. Paralelnost vertikalnih osi TPM-2 i geodetskog instrumenta provjerava se pomoću nagibnog senzora koji je integriran u vertikalnu os mjernog sustava.



Slika 3. Shematski prikaz uređaja za umjeravanje teodolita (prema Lippuner i Scherrer 2005).

Signali kutnih enkodera obrađuju se putem kartica povezanih s računalom. Nadalje, putem 8-kanalne RS232 kartice, sustav povezuje nagibni senzor, autokolimator, kontroler kretanja, temperaturne senzore, geodetski instrument i napajanje sustava. Sustav upotrebljava kontroler kretanja, kutne enkodere i motore za precizno praćenje i određivanje položaja osi u stvarnom vremenu (Lippuner i Scherrer 2005).

4.2. Postupak umjeravanja

Prije početka umjeravanja poravnavaju se osi mjernog uređaja i TPM-2. Umjeravani geodetski instrument postavlja se na podnožnu ploču. Na objektiv durбина postavlja se zrcalo autokolimatora, a na okular se postavlja protuteg kako bi se uravnotežio durbin (Lippuner i Scherrer 2005). Durbin se pričvršćuje za rotacijsku ruku pomoću nosača, koji ga vodi tijekom vertikalnog pomaka rotacijske ruke (slika 4). Autokolimator i zrcalo na objektivu instrumenta moraju biti u ravnini. Na početku umjeravanja odredi se početni zenitni kut te se očitavaju referentne vrijednosti kutnog enkodera i autokolimatora. Zatim se rotacijska ruka pomiče vertikalno za unaprijed određeni korak. Na svakom položaju očitavaju se vrijednosti kutnog enkodera i autokolimatora te se pohranjuju na računalu. Proces se ponavlja na nekoliko pozicija uzduž vertikalne osi kako bi se pokrilo cijelo područje mjerenja (Lippuner 2008). Zbog mehaničkih prepreka, vertikalne kutove nije moguće mjeriti u području

126° – 243° (140 gon – 270 gon), a osim toga područje oko zenita $\pm 9^\circ$ (± 10 gon) je isključeno iz mjerenja. Cijeli postupak je automatiziran. Točnost TPM-2 uređaja za umjeravanje vertikalnih kutova ($k=2$) iznosi 0,182", odnosno 0,056 mgon (Lippuner i Scherrer 2005).



Slika 4. Prikaz uređaja TPM-2 (Lippuner i Scherrer 2005).

5. Zavod za geodeziju Tehničkog sveučilišta Vilnius Gediminas, Litva

Zavod za geodeziju Tehničkog sveučilišta Vilnius Gediminas (engl. *Institute of Geodesy of Vilnius Gediminas Technical University*) u Litvi više od desetljeća istražuje i razvija metode za umjeravanje horizontalnog i vertikalnog kruga kod geodetskih instrumenata. U ovom poglavlju su objašnjene dvije razvijene metode za umjeravanje vertikalnog kruga. Prva je trigonometrijska metoda temeljena na primjeni pomične i stacionarne mjerne letve. Drugom metodom umjeravanje se provodi primjenom posebno izrađenog uređaja koji omogućuje horizontalno pozicioniranje vertikalnog kruga instrumenta s upotrebom elektroničkog autokolimatora i stola za indeksiranje.

5.1. Trigonometrijska metoda umjeravanja primjenom pomične mjerne letve

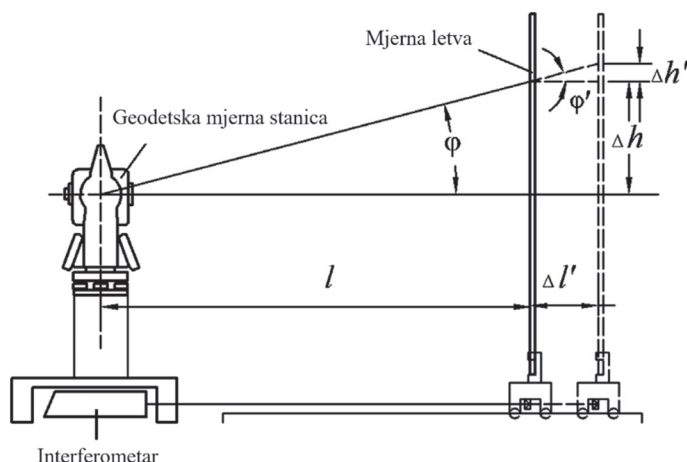
Ova metoda primjenjuje pomičnu mjernu letvu i laserski interferometar za precizno određivanje referentnih vertikalnih kutova primjenom trigonometrijskih funkcija.

5.1.1. Građa uređaja s pomičnom mjernom letvom

Uređaj se sastoji od invarne mjerne letve Gaertner Scientific 244, duljine 1 m s milimetarskom podjelom. Letva je postavljena vertikalno i pričvršćena je na nosač opremljen ručkom, što omogućuje horizontalno pomicanje duž vodilica. Geodetska mjerna stanica se postavlja na podesivo postolje na betonskom stupu, na visini koja osigurava da je durbin usmjeren na središnju liniju mjerne letve. Vizurna os mjerne stanice i vertikalna os letve moraju biti međusobno okomite. Ispod postolja je postavljen laserski interferometar Hewlett Packard Laser System 5519A, usmjeren prema prizmi pričvršćenoj na nosaču letve. Pomična mjerna letva i geodetska mjerna stanica se precizno poravnavaju s laserskim nivelirom PLS80 i vijcima za fino podešavanje na nosaču (Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016).

5.1.2. Postupak umjeravanja

Kad se durbin geodetske mjerne stanice usmjeri na središnju liniju mjerne letve, očitavanje zenitnog kuta treba biti 90° ili 270° , ovisno o položaju instrumenta. Zatim se vizira proizvoljna podjela na mjernoj letvi te se durbin zakoči. Iznos zenitnog kuta očitava se s geodetske mjerne stanice, a udaljenost do mjerne letve mjeri se laserskim interferometrom. Nakon toga se mjerna letva horizontalno pomiče dok se horizontalna nit nitnog križa durбина ne poklopi sa sljedećom podjelom na letvi. Ponovno se izmjeri horizontalna udaljenost s laserskim interferometrom. Vertikalna udaljenost je razlika između početne vizirane podjele na mjernoj letvi i podjele nakon pomaka. Mjerenja se ponavljaju 12 puta u dva položaja instrumenta. Područje mjerenja vertikalnih kutova je ograničeno na $90^\circ \pm 17^\circ$ i $270^\circ \pm 17^\circ$, ovisno o horizontalnoj udaljenosti (Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016). Na slici 5 prikazan je postupak umjeravanja.



Slika 5. Postupak umjeravanja primjenom pomične mjerne letve (prema Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016).

Referentni vertikalni kut računa se prema izrazu (Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016):

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\Delta h'}{\Delta l'}\right), \quad (3)$$

gdje su:

φ' – referentni vertikalni kut,

$\Delta h'$ – vertikalna udaljenost između dvije podjele na mjernoj letvi,

$\Delta l'$ – horizontalna udaljenost između dva položaja mjerne letve.

5.1.3. Izvori nesigurnosti

U tablici 2 prikazani su izvori nesigurnosti trigonometrijske metode umjeravanja primjenom pomične mjerne letve.

Tablica 2. *Izvori nesigurnosti trigonometrijske metode umjeravanja primjenom pomične mjerne letve (prema Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016).*

Sastavnica standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Izvor nesigurnosti	Vrijednost standardne nesigurnosti ($k=1$) $u(x_i)$
$u(\Delta l')$	Nesigurnost horizontalne udaljenosti	$1,102 \cdot 10^{-4}$ m
$u(\Delta h')$	Nesigurnost vertikalne udaljenosti	$4,398 \cdot 10^{-4}$ m
$u(\theta_{GMS})$	Nesigurnost umjeravanja vertikalnih kutova	0,294 "

Nesigurnost horizontalne udaljenosti odnosi se na nesigurnosti vezane uz laserski interferometar te njegovu ograničenu rezoluciju. Nesigurnost vertikalne udaljenosti je rezultat čimbenika poput dilatacije i nevertikalnosti letve. Na nesigurnost umjeravanja vertikalnih kutova utječu čimbenici poput ograničene rezolucije geodetske mjerne stanice te varijacijama u rezultatima prilikom ponovljenih mjerenja. Točnost ove metode umjeravanja s proširenom nesigurnošću ($k=2$) iznosi 0,59" (Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016).

5.2. Trigonometrijska metoda umjeravanja primjenom stacionarne mjerne letve

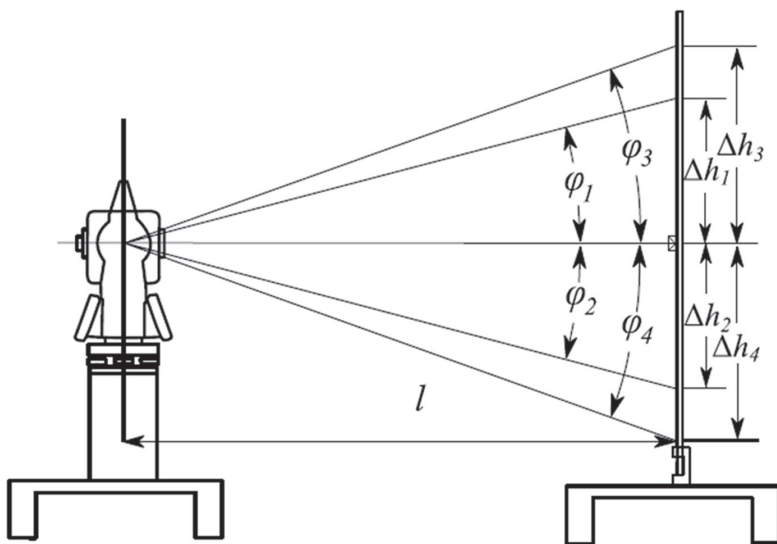
Umjeravanje se provodi usporedbom očitavanja geodetske mjerne stanice i referentnih vertikalnih kutova određenih s pomoću nepomične mjerne letve i poznate horizontalne udaljenosti.

5.2.1. Građa uređaja sa stacionarnom mjernom letvom

Druga predložena trigonometrijska metoda temelji se na nepomičnoj mjernoj letvi. Geodetska mjerna stanica postavlja se na podesivo postolje na betonskom stupu. Mjerna letva je postavljena vertikalno. Horizontalna udaljenost mjeri se elektrooptičkim daljinomjerom, a prizma se postavlja izravno na središnju liniju mjerne letve.

5.2.2. Postupak umjeravanja

Geodetska mjerna stanica postavlja se na proizvoljnu udaljenost od mjerne letve. Durbin se usmjeri na središnju liniju mjerne letve te očitavanje zenitnog kuta treba biti 90° ili 270° , ovisno o položaju instrumenta. Očita se horizontalna udaljenost. Zatim se vizira podjela na letvi pod proizvoljnim zenitnim kutom. Očita se vertikalna udaljenost od središnje linije do vizirane podjele na mjernoj letvi. Područje mjerenja vertikalnih kutova iznosi $90^\circ \pm 17^\circ$ i $270^\circ \pm 17^\circ$ (Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016). Na slici 6 prikazan je postupak umjeravanja.



Slika 6. Postupak umjeravanja primjenom stacionarne mjerne letve (Šiaudinytė 2014).

Referentni vertikalni kut se računa prema izrazu (Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016):

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{\Delta h_i}{l}\right), \quad (4)$$

gdje su:

φ_i – referentni vertikalni kut,

Δh_i – vertikalna udaljenost između središnje i proizvoljne podjele na mjernoj letvi,

l – horizontalna udaljenost od geodetske mjerne stanice do mjerne letve.

5.2.3. Izvori nesigurnosti

U tablici 3 prikazani su izvori nesigurnosti trigonometrijske metode umjeravanja primjenom stacionarne mjerne letve.

Tablica 3. *Izvori nesigurnosti trigonometrijske metode umjeravanja primjenom stacionarne mjerne letve (prema Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016).*

Sastavnica standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Izvor nesigurnosti	Vrijednost standardne nesigurnosti ($k=1$) $u(x_i)$
$u(\Delta h)$	Nesigurnost vertikalne udaljenosti	$4,398 \cdot 10^{-4}$ m
$u(\Delta l)$	Nesigurnost horizontalne udaljenosti	$6,738 \cdot 10^{-5}$ m
$u(\theta_{GMS})$	Nesigurnost umjeravanja vertikalnih kutova	0,099 "

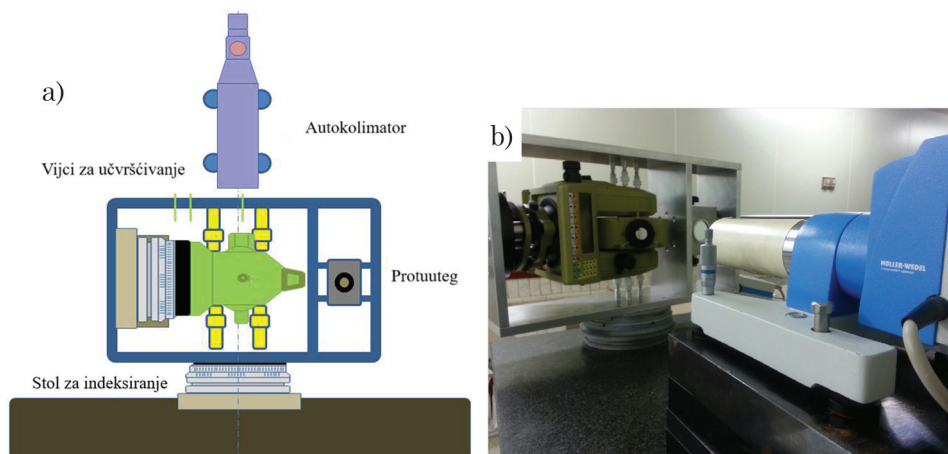
Nesigurnost horizontalne udaljenosti rezultat je mjerenja do prizme, konstante prizme, debljine mjerne letve i točnosti elektrooptičkog daljinomjera. Standardna nesigurnost umjeravanja vertikalnih kutova je manja u odnosu na metodu pomične mjerne letve zbog manje varijacije u rezultatima prilikom ponavljanja mjerenja, prvenstveno zbog statičnosti mjerne letve. Točnost ove metode umjeravanja s proširenom nesigurnošću ($k=2,447$) iznosi 0,24" (Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Grattan 2016).

5.3. Metoda umjeravanja horizontalnim pozicioniranjem vertikalnog kruga

Ova metoda temelji se na postavljanju geodetske mjerne stanice u horizontalni položaj i usporedbi očitavanja vertikalnih kutova s referentnim vrijednostima Mooreova 1440 stola za indeksiranje i autokolimatora.

5.3.1. Građa uređaja za horizontalno pozicioniranje vertikalnog kruga

Prema Šiaudinytė (2014), Suh i Šiaudinytė (2014) te Šiaudinytė i Suh (2015) drugi predloženi mjerni sustav za umjeravanje vertikalnog kruga temelji se na usporedbi očitavanja vertikalnih kutova geodetske mjerne stanice s referentnim kutovima. Glavna komponenta mjernog sustava je posebno izrađen okvir za horizontalno postavljanje geodetske mjerne stanice (slika 7a). Okvir je opremljen sa šest vijaka za podešavanje, po tri na svakoj strani, koji pružaju stabilnu potporu geodetskoj mornoj stanici. Nadalje, na jednoj strani okvira je podnožna ploča, dok je nasuprot postavljen protuuteg za poboljšanu stabilnost. Okvir je precizno horizontiran i postavljen na Mooreov 1440 stol za indeksiranje. Cjelokupni mjerni sustav položen je na granitnu ploču ispunjenu pijeskom radi poboljšane stabilizacije i smanjenja vibracija tijekom umjeravanja. Promjene kutnih pozicija durbina očitavaju se pomoću elektroničkog autokolimatora Möller-Wedel.



Slika 7. a) Shematski prikaz uređaja, b) prikaz postupka umjeravanja geodetske mjerne stanice Leica TC2003 (prema Suh i Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Suh 2015).

5.3.2. Postupak umjeravanja

Geodetska mjerna stanica postavlja se na podnožnu ploču te se cjelokupni uređaj horizontalno montira na stol za indeksiranje. Zrcalo autokolimatora pričvršćuje se za objektiv durбина. Zatim se durbinu autokolimatora i geodetske mjerne stanice poravnavaju i koaksijalno usmjeravaju jedan prema drugome te se postave u početni položaj (slika 7b). Nakon poravnanja, stol za indeksiranje se rotira za željeni kut, dok se durbin geodetske mjerne stanice zakreće unatrag za isti taj kut. Minimalni pomak stola za indeksiranje iznosi 15'. Očitavanja kutova Mooreova 1440 stola za indeksiranje se uzimaju kao referentna i uspoređuju se s očitanjima kutova geodetske mjerne stanice. Promjena položaja zrcala na

durbinu u odnosu na početni položaj se očitava s autokolimatorom. Postupak se ponavlja 12 puta, šest puta u smjeru kretanja kazaljke na satu i šest puta u suprotnom smjeru. Područje mjerenja vertikalnih kutova iznosi $90^\circ \pm 50^\circ$ i $270^\circ \pm 50^\circ$ (Šiaudinytė 2014, Suh i Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Suh 2015).

5.3.3. Izvori nesigurnosti

Izvori nesigurnosti uređaja za horizontalno pozicioniranja vertikalnog kruga prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. *Izvori nesigurnosti uređaja za horizontalno pozicioniranja vertikalnog kruga (prema Šiaudinytė 2014, Suh i Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Suh 2015).*

Sastavnica standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Izvor nesigurnosti	Vrijednost standardne nesigurnosti ($k=1$) $u(x_i)$
$u(\theta_{I.C.})$	Nesigurnost stola za indeksiranje	0,05 "
$u(\theta_{GMSrez})$	Rezolucija geodetske mjerne stanice	0,029 "
$u(\theta_{AK})$	Nesigurnost autokolimatora	0,25 "
$u(\theta_{AKpon})$	Ponovljivost autokolimatora	0,049 "
$u(\theta_{AKrez})$	Rezolucija autokolimatora	0,014 "

Nesigurnost ponovljivosti autokolimatora procjenjuje se kao omjer standardne nesigurnosti uzorka i kvadratnog korijena broja mjerenja. Nesigurnosti stola za indeksiranje i autokolimatora preuzete su iz potvrde o umjeravanju uređaja. Nesigurnosti zbog rezolucije geodetske mjerne stanice i autokolimatora proizlaze iz zaokruživanja rezultata prema minimalnoj jedinici prikaza uređaja. Rezolucija autokolimatora iznosi 0,05", dok rezolucija geodetske mjerne stanice Leica TC2003 iznosi 0,1". Nesigurnosti rezolucija imaju pravokutnu razdiobu. Procjenjuju se prema izrazu (Šiaudinytė 2014, Suh i Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Suh 2015):

$$u(\theta_{rez}) = \frac{R}{2\sqrt{3}}, \quad (5)$$

gdje je:

R – rezolucija uređaja.

Pravokutna razdioba primjenjuje se za procjenu standardne nesigurnosti kada su sve vrijednosti unutar intervala jednako vjerojatne (Benčić i Solarić 2008).

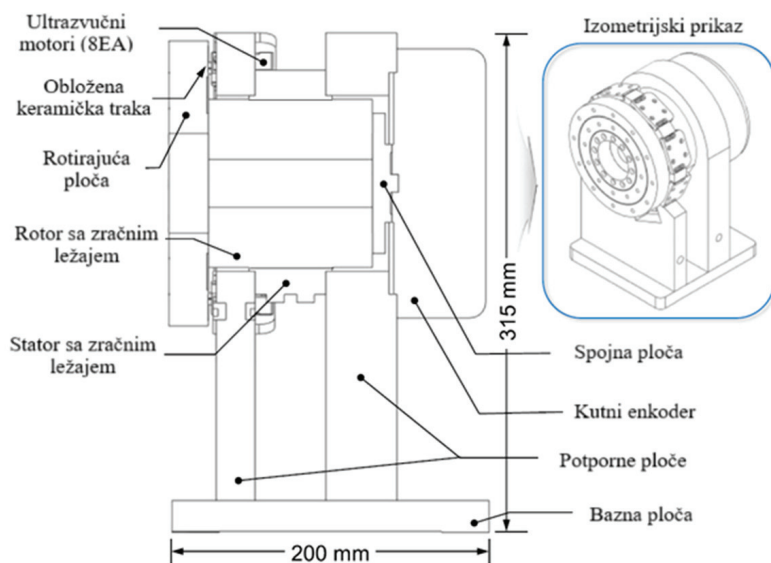
Točnost navedene metode umjeravanja s proširenom nesigurnošću ($k=2$) iznosi 0,52" (Šiaudinytė 2014, Suh i Šiaudinytė 2014, Šiaudinytė i Suh 2015).

6. Korejski istraživački institut za etalone i znanost, Južna Koreja

U Korejskom istraživačkom institutu za etalone i znanost (engl. *Korea Research Institute of Standards and Science* – KRISS) razvijen je sustav za umjeravanje vertikalnih kutova (engl. *Vertical Angle Measurement System* – VAMS). Sustav pruža usluge umjeravanja senzora za očitavanje vertikalnih kutova i vertikalnog kruga u geodetskim instrumentima.

6.1. Građa sustava za umjeravanje vertikalnih kutova

U radu Kim i dr. (2024) navodi se da je sustav za umjeravanje vertikalnih kutova precizna rotacijska platforma koja uključuje zračni cilindrični ležaj, osam ultrazvučnih motora i kutni enkoder Heidenhain RON 905. Zračni ležaj i kutni enkoder su koaksijalno postavljeni te su poduprti dvjema potpornim pločama, smještenim na baznoj ploči. Zračni ležaj vodi jednoosno rotacijsko gibanje s odklonom 25 nm i nagibnom pogreškom 0,1 μ rad. Heidenhain RON 905 kutni enkoder ima kružnu podjelu s 36 000 linija, pružajući rezoluciju očitavanja do 0,009". Ultrazvučni motori omogućuju rotaciju stola, pričvršćeni na suprotnu stranu od zračnog ležaja, upotrebom sile trenja između motora i keramički obložene površine rotacijskog stola. Shematski prikaz VAMS-a dan je na slici 8. Upotrebom izmjeničnog i istosmjernog strujnog načina rada, motorima je omogućena kontinuirana rotacija u istosmjernom strujnom načinu rada te precizno rotacijsko gibanje ograničenog raspona u izmjeničnom strujnom načinu rada. Upotrebom očitavanja kutnog enkodera kao povratne informacije i algoritma za prebacivanje načina rada, VAMS može generirati bilo koju vertikalnu poziciju s minimalnim pomakom manjim od 0,01". Sustav za umjeravanje vertikalnih kutova ima dva načina rada. Prvi način rada primjenjuje se u svrhu umjeravanja senzora za očitavanje vertikalnog kuta, a drugi način rada u svrhu umjeravanja vertikalnog kruga u geodetskim instrumentima. Na rotacijski stol se postavlja rotacijska ruka te je potreban autokolimator i zrcalo kako bi se očitala odstupanja između vertikalnih kutova mjernog sustava i umjeravanoga geodetskog instrumenta. Postavljen je uteg na suprotnu stranu rotirajuće ruke kako bi se uravnotežio autokolimator. Područje umjeravanja vertikalnih kutova kod geodetskih instrumenata zbog mehaničkih prepreka je ograničen na $\pm 120^\circ$. Razvijen je minijturni autokolimator (engl. *miniature autocollimator*) kako bi se zadovoljila tražena rezolucija i točnost, a istovremeno se održao lagan i kompaktni dizajn u svrhu reduciranja učinka opterećenja na sustav za umjeravanje vertikalnih kutova. Minijturnim autokolimatorom mjere se kutne pozicije zrcala (Θ_x i Θ_y).



Slika 8. Shematski prikaz VAMS-a (prema Kim i dr. 2024).



Slika 9. Prikaz postupka umjeravanja geodetske mjerne stanice Leica TC2003 (prema Kim i dr. 2024).

Signal kutnog enkodera povezan je s računalom putem kartice Heidenhain IK220. Proporcionalno-integralno derivacijski (engl. *Proportional-integral derivative* – PID) kontrolni signal primjenjuje se na upravljač motora Nanomotion AB2 preko programabilne kartice. Slika dobivena s minijaturnog autokolimatora prenosi se na računalo te se obrađuje kako bi se dobilo dvodimenzionalno očitavanje kutne pozicije. Tijekom umjeravanja, očitavanja instrumenta unose se u program za umjeravanje ručno ili automatski, ovisno o tome ima li umjeravani geodetski instrument serijsko ili USB sučelje (Kim i dr. 2024).

6.2. Postupak umjeravanja

Postupak umjeravanja je proveden na geodetskoj mornoj stanici Leica TC2003 (slika 9). Zrcalo autokolimatora postavljeno je na objektiv durbina. Nagibni kutovi zrcala, autokolimatora i geodetske mjerne stanice poravnati su kako bi rotacijske osi VAMS-a i instrumenta bile paralelne, a optička os autokolimatora okomita u odnosu na obje rotacijske osi i zrcalo. Umjeravanje je izvedeno dva puta u tri serije mjerenja. Nakon prvog umjeravanja, geodetska mjerna stanica je uklonjena i ponovno postavljena. Mjerenja su provedena u intervalima 10° . Vertikalni kut geodetske mjerne stanice je ručno namješten tijekom umjeravanja (Kim i dr. 2024).

6.3. Izvori nesigurnosti

Glavni izvori nesigurnosti sustava za umjeravanje vertikalnih kutova prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. *Izvori nesigurnosti VAMS-a (prema Kim i dr. 2024).*

Sastavnica standardne nesigurnosti $u(x_i)$	Izvor nesigurnosti	Vrijednost standardne nesigurnosti ($k=1$) $u(x_i)$
$u(\theta_{ENK})$	Očitavanja kutnog enkodera	0,084"
$u(\theta_{AK})$	Očitavanja autokolimatora	0,13"
$u(\alpha_L)$	Kompenzacijska vrijednost za učinke opterećenja	0,18"

Primarni izvori nesigurnosti koji utječu na očitavanja kutnog enkodera su pogreška nelinearnosti i pogreška poravnanja rotacijske osi kutnog enkodera i horizontalne osi geodetske mjerne stanice. Nesigurnost autokolimatora proizlazi iz čimbenika poput pogreške nelinearnosti i faktora skaliranja. Kompenzacijska vrijednost za učinke opterećenja odnosi se na moguća savijanja kom-

ponenti VAMS-a, koja nastaju zbog težine i vertikalnosti sustava. Prvenstveno se to odnosi na opterećenje uzrokovano minijaturnim autokolimatorom. Iako je ovaj učinak djelomično kompenziran postavljanjem utega na suprotnu stranu rotirajuće ruke, do savijanja može doći i uslijed promjene kutnih pozicija rotirajuće ruke. Točnost VAMS-a s proširenom nesigurnošću ($k=2$) iznosi $0,51''$ (Kim i dr. 2024).

7. Usporedba metoda umjeravanja vertikalnog kruga

U tablici 6 prikazana je usporedba metoda umjeravanja vertikalnog kruga kod geodetskih mjernih stanica prema dostupnoj literaturi, uključujući godine izrade, primijenjene metode umjeravanja, područje umjeravanja vertikalnih kutova te točnosti komparatora s pripadnom standardnom nesigurnošću.

Tablica 6. *Usporedba metoda umjeravanja vertikalnog kruga prema ključnim parametrima.*

Institucija Država	Godina razvitka	Metode umjeravanja	Područje umjeravanja	Standardna nesigurnost ($k=2$)
ESRF Francuska	2009.	Trigonometrijska metoda	$90^\circ \pm 23,75^\circ$	$1,6''$
Leica Geosystems Švicarska	2004.	Kutni enkoder + autokolimator	$9^\circ - 126^\circ$ $243^\circ - 351^\circ$	$0,182''$
Tehničko sveučilište Vilnius Gediminas Litva	2014.	Trigonometrijska metoda primjenom pomične mjerne letve	$90^\circ \pm 17^\circ$	$0,59''$
		Trigonometrijska metoda primjenom stacionarne mjerne letve	$90^\circ \pm 17^\circ$	$0,20''$
		Stol za indeksiranje + autokolimator	$90^\circ \pm 50^\circ$	$0,52''$
KRISS Južna Koreja	2024.	Kutni enkoder + autokolimator	$0^\circ \pm 120^\circ$	$0,51''$

Iz provedene analize, vidljivo je da komparatori temeljeni na trigonometrijskoj metodi imaju manje područje umjeravanja vertikalnih kutova u odnosu na komparatore koji upotrebljavaju metodu izravne usporedbe kutnih vrijednosti s uređajima poput kutnog enkodera i stola za indeksiranje. Razlog tomu je horizontalna udaljenost između mjerne letve i geodetske mjerne stanice, koja ovisi o minimalno dopuštenoj udaljenosti izoštravanja slike. Povećanjem horizontalne udaljenosti smanjuje se područje umjeravanja vertikalnih kutova, dok se smanjenjem udaljenosti gubi mogućnost pravilnog izoštravanja slike, što negativno utječe na točnost umjeravanja.

8. Zaključak

Redovito umjeravanje geodetskih instrumenata neophodno je za osiguranje točnosti mjerenja. Umjeravanjem vertikalnog kruga kod teodolita i geodetskih mjernih stanica smanjuje se utjecaj sustavnih pogrešaka pri mjerenju vertikalnih kutova. U cilju povećanja točnosti mjerenja i efikasnosti umjeravanja, brojni instituti diljem svijeta razvili su vlastite komparatore za umjeravanje vertikalnog kruga. Točnost svakog komparatora izražava se kroz ukupnu standardnu nesigurnost svih izvora nesigurnosti u procesu umjeravanja.

Umjeravanje vertikalnog kruga provodi se dvjema metodama, izravnom usporedbom mjerenih kutnih vrijednosti s referentnim vrijednostima dobivenim uređajima veće točnosti i posrednim određivanjem referentnih kutnih vrijednosti primjenom trigonometrijskih funkcija. Analiza ovih metoda pokazala je da komparatori koji upotrebljavaju uređaje poput kutnog enkodera, autokolimatora i stola za indeksiranje omogućuju šire područje umjeravanja vertikalnih kutova u odnosu na one temeljene na trigonometrijskim metodama.

Komparator za umjeravanje vertikalnog kruga razvijen na Europskom centru za sinkrotronsko zračenje u Francuskoj ima najveću standardnu nesigurnost te iznosi $1,6''$ ($k=2$). Potrebno je napomenuti da navedena standardna nesigurnost uvelike ovisi o točnosti elektrooptičkog daljinomjera instrumenta koji se umjerava. Uređaj za umjeravanje teodolita, razvijen u tvrtki Leica Geosystems u Švicarskoj, ima najmanju standardnu nesigurnost koja iznosi $0,182''$ ($k=2$) te je jedini komparator, u sklopu istraživanja, gdje je postupak umjeravanja u potpunosti automatiziran. Najnoviji komparator razvijen je u Korejskom istraživačkom institutu za etalone i znanost u Južnoj Koreji te je ujedno i komparator s najvećim područjem umjeravanja vertikalnih kutova.

Odabir odgovarajuće metode umjeravanja vertikalnog kruga ovisi o specifičnim zahtjevima kao što su tražena točnost i područje umjeravanja, dostupnost tehničke opreme i financijskih sredstava. Stoga je izbor metode umjeravanja potrebno prilagoditi postojećim uvjetima i specifičnim potrebama mjerenja.

Literatura

- Baričević, S., Barković, Đ., Zrinjski, M. (2021): Umjeravanje preciznih nivelmanskih letvi, *Geodetski list*, 75 (98), 2, 169–188.
- Benčić, D., Solarić, N. (2008): *Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici*, Školska knjiga, Zagreb.
- Bručas, D. (2008): Development and research of the test bench for the angle calibration of geodetic instruments, doktorska disertacija, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius.
- Državni zavod za mjeriteljstvo (2008): *Vrednovanje mjernih podataka – Upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti*, Zagreb.
- Frančula, N., Lapaine, M. (2008): *Geodetsko-geoinformatički rječnik*, Državna geodetska uprava, Zagreb.
- HRN ISO (2004): *HRN ISO 17123-3:2004 – Optika i optički instrumenti – Te-*

- renski postupci za ispitivanje geodetskih instrumenata i instrumenata izmjere – 3. dio: Teodoliti (ISO 17123-3:2001).
- Kim, J. A., Lee, J. Y., Kang, C. S., Woo, J. H. (2024): High precision vertical angle measurement system for calibration of various angle sensors and instruments, *Measurement Science and Technology*, 35(7), 075011.
- Lippuner, H. (2008): Device for checking or calibrating the angle-dependent alignment of a high-precision test piece, US Patent No. US7359047 B2.
- Lippuner, H., Scherrer, R. (2005): Die neue Theodolit-Prüfmaschine TPM-2 von Leica Geosystems, *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, 112(5), 170–176.
- Martin, D. (2009): High precision angle calibration for spherical measurement systems, doktorska disertacija, University of Warwick, Warwick.
- Martin, D. (2010): Instrument calibration at the ESRF, In XXIV FIG International Congress.
- Martin, D., Chetwynd, D. G. (2009): Angle calibration of robotic total stations and laser trackers, In XIX IMEKO World Congress, Fundamental and Applied Metrology.
- Savvaïdis, P., Ifadis, I. M., Doukas, I., Lakakis, K., Petridou-Chrysohoidou, N. (2004): Calibrating geodetic instruments, *Int. J. Geoinf.*, 5, 18–21.
- Suh, H. S., Šiaudinytė, L. (2014): New setup for calibration of vertical angle measuring systems, IMEKO.
- Šiaudinytė, L. (2014): Research and development of methods and instrumentation for the calibration of vertical angle measuring systems of geodetic instruments, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius.
- Šiaudinytė, L., Grattan, K. T. V. (2016): Uncertainty evaluation of trigonometric method for vertical angle calibration of the total station instrument, *Measurement*, 86, 276–282.
- Šiaudinytė, L., Suh, H. S. (2015): Uncertainty evaluation of proposed setup for the calibration of vertical angle measuring systems by using means for the flat angle calibration, *Measurement*, 67, 177–182.
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Tir, M. (2011): Automatizacija ispitivanja preciznosti teodolita prema normi HRN ISO 17123-3:2004, *Geodetski list*, 65 (88), 2, 123–144.

Measurement Systems and Vertical Circle Calibration Methods for Geodetic Instruments

ABSTRACT. Vertical circle calibration for geodetic instruments is essential for ensuring the accuracy of vertical angle measurements in various geodetic applications. This paper presents an overview of the developed measurement systems, methods and comparator constructions, the calibration processes and the main sources of uncertainty affecting calibration accuracy. An analysis and comparison of key comparator parameters were conducted, including expanded uncertainties, calibration ranges and the applied calibration methods.

Keywords: vertical circle, total station, calibration, angle encoder, autocollimator.

Primljeno / Received: 2025-02-25

Prihvaćeno / Accepted: 2025-03-20