

PET GENERACIJ INTEGRIRANIH ELEKTRONSKIH TAHIMETROV

FIVE GENERATIONS OF INTEGRATED ELECTRONIC TACHYMETERS

Nedim Tuno, Admir Mulahusić, Simona Savšek, Dušan Kogoj

UDK: 528.53

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.02

Prispelo: 17. 1. 2019

Sprejeto: 12. 2. 2019

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2019.01.41-56

REVIEW ARTICLE

Received: 17. 1. 2019

Accepted: 12. 2. 2019

IZVLEČEK

Mineva petdeset let od pojava prvega integriranega elektronskega tahimetra. V polstoletnem razvoju elektronskih tahimetrov so se pojavile številne konstrukcijske izboljšave in inovativne tehnološke rešitve. Od zgodnjih modelov, ki so omogočali »le« elektronsko merjenje in shranjevanje merskih vrednosti, so tahimetri z uporabo internih mikroprocesorjev, možnostjo merjenja dolžin brez reflektorjev, robotizacijo, slikovno podporo idr. postali kompleksni multisenzorski sistemi. Sodobni tahimeter je univerzalna merska platforma, ki s svojo široko prilagodljivostjo omogoča izvedbo najrazličnejših nalog terestrične geodezije. Za boljše razumevanje posebnosti in zmogljivosti tahimetrov jih je treba sistematično razvrstiti v razvojne generacije. Avtorji članka so prepoznali pet generacij tahimetrov, na podlagi katerih so želeli opredeliti glavne tehnološke dosežke v zgodovinskem razvoju teh instrumentov.

ABSTRACT

Five decades have passed since the introduction of the first integrated electronic tachymeter. Many innovative technologies in the construction of them have appeared since then. Compared to the early models, which only measured and stored direct measurements, tachymeters have become more sophisticated by means of incorporating internal microprocessor and software packages, reflector-less distance-measuring capabilities, robotic functions, image assistance, and other features, and have become multi-sensor systems. The modern tachymeter is a universal measuring platform that adapts, with its great flexibility, to the application in various terrestrial surveying tasks. To better understand tachymeters and their specific characteristics, capabilities, and development, it is necessary to group them by generations. The authors of this paper have recognized five tachymeter generations with the purpose of marking the main technological advances in the historical development of these instruments.

KLJUČNE BESEDE

elektronski tahimeter, razvoj, generacije, tehnološki napredek

KEY WORDS

electronic tachymeter, development, generations, technological progress

1 UVOD

Z revolucionarnimi spremembami v zgradbi tahimetrov, pri čemer se je vse bolj uveljavljala elektronika, so se mersko-tehnične operacije na terenu skrčile na viziranje, celotni tok elektronsko izmerjenih vrednosti od instrumenta do računalnika pa je bil avtomatiziran. Prvi instrument, pri katerem so uspešno uresničili takšno rešitev, se je pojavil leta 1968. Koncept, opredeljen s prvim instrumentom, bo v nadaljnjem burnem razvoju, z vzporednim razvojem računalniške tehnike in programske podpore, bistveno preobrazil in razširil funkcionalnost tahimetra. Vgradnja mikroročunalnika z mikroprocesorjem je povzročila silovit razvoj elektronskih tahimetrov, ki traja vse do danes in mu ni videti konca. Moderni elektronski tahimetri so s svojimi vsestranskimi zmožnostmi pravzaprav multisenzorski sistemi za merjenje nepremičnih in gibljivih ciljev. So univerzalni geodetski instrumenti s širokim spektrom uporabe, zato jih upravičeno imenujemo 'popolne postaje' (angl. *total station*). Danes trg ponuja veliko najrazličnejših modelov elektronskih tahimetrov, ki jih izdelujejo v obratih desetih proizvajalcev geodetske opreme po svetu.

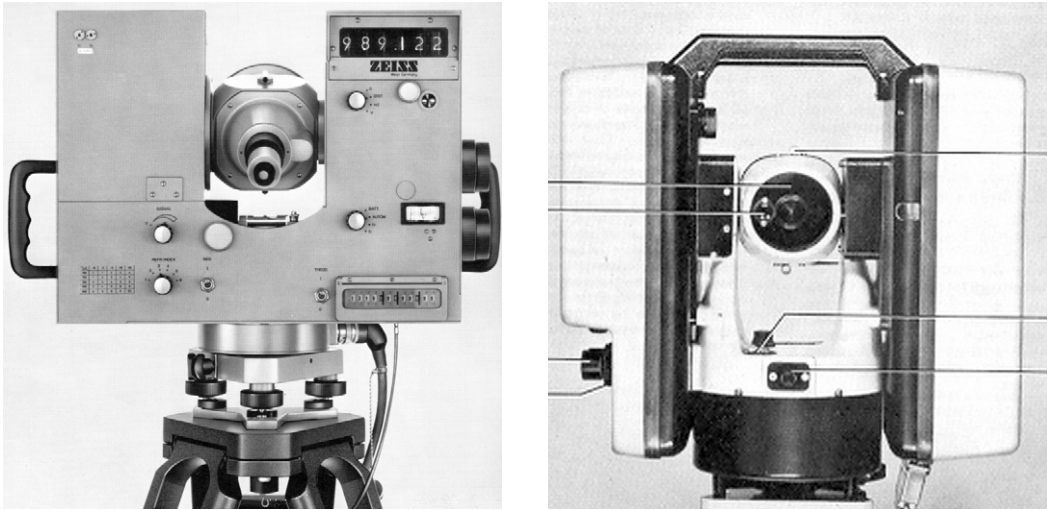
O elektronskih tahimetrih je bilo v znanstveni in strokovni literaturi veliko napisanega. Pregled dostopnih literarnih virov kaže na veliko število opisov posameznih modelov instrumentov, napisanih kmalu po tem, ko so se pojavili na trgu. Takšne prikaze so prispevali na primer Leitz (1970), Rawlinson (1976), Gort (1980), Hollwey (1983), Lachat, Landes in Grussenmeyer (2017), Schrock (2017) itd. Drugi članki se osredotočajo na posamezne optične, mehanske in elektronske rešitve v tahimetrih, tako Brooke (1988) in Solarić et al. (2007) pišejo o sistemih določanja kotnih vrednosti, Scherer in Lerma (2009), Ehrhart in Lienhart (2016) in Wagner et al. (2016) obdelujejo slikovno podporo in podobno. Najti je mogoče dela, ki se ukvarjajo z možnostmi in aktualnimi konstrukcijskimi dosežki instrumentov posameznih proizvajalcev (Valh et al., 2008; Kogoj, Bilban in Bogatin, 2004; Stempfhuber in Wunderlich, 2004; Lemmon in Jung, 2005; Lemmon in Wetherbee, 2005; Solarić et al., 2011 itd.). Dela, ki obravnavajo problematiko razvoja instrumentov in okoliščine, ki so ga narekovala, so maloštevilna in nepopolna. Pomembni so prikazi tehnološkega razvoja tahimetrov posameznih proizvajalcev, na primer Spectra Precision (Cheves, 1999), Leica Geosystems (Tuno et al., 2010) in Zeiss (Tuno, Mulahusić in Kogoj, 2012). Razvoj tahimetrov je obdelan tudi v delih, ki na splošno obravnavajo vse geodetske instrumente (Rüeger, 2006) ali vse instrumente posameznih proizvajalcev (Smith, 1999). Grobe opise razvoja tahimetrov brez podrobnosti so predstavili Ferreira, Capnor in Ferbrita (2011) in Lemmens (2016), veliko popolnejši pregled je napisal Courbon (2007).

Glede na to, da do sedaj objavljena dela niso popolna, želimo v tem prispevku podati vseobsežen pregled razvoja elektronskih tahimetrov v zadnjih petdesetih letih. S pregledom in analizo osnovnih značilnosti instrumentov, ki so se pojavili v posameznem obdobju, bomo poskušali prvič tahimetre sistematično razvrstiti v ustrezne časovne generacije. Tako bomo najboljše orisali uporabo posameznih podsistemov tahimetra z vidika prispevka tehnološkega razvoja, pojava in razvoja novih tehnologij ter ustvarjanja novih možnosti. Pri tem ne smemo zamenjati razvojnih generacij tahimetrov s tipi tahimetrov in njihovim razvrščanjem glede na natančnost, namen idr.

2 ELEKTRONSKI TAHIMETRI PRVE GENERACIJE (1968–1977)

Obiskovalci nemškega Geodetskega dneva (srečanja nemških geodetov), ki je bil organiziran leta 1968 v Stuttgartu, so lahko prvič videli prototip neobičajnega tahimetra, ki ga je razstavila nemška tovarna Zeiss Oberkochen (danes Trimble). Večina ni niti slutila, da se prav v tem instrumentu skrivajo rešitve, ki bodo v naslednjih letih in desetletjih korenito spremenile geodetsko mersko tehniko. Serijska proizvodnja

takšnih tahimetrov se je začela dve leti kasneje pod oznako Reg Elta 14 (nem. *Registriern des Elektrisches tachymeter* – registrirni električni tahimeter) (Tuno, Mulahusić in Kogoj, 2012). Leta 1975 je bila cena tega instrumenta 69.000 DEM, kar bi danes znašalo kar 131.172 USD (URL 1). Leta 1971 je švedski proizvajalec AGA (danes Trimble) pričel proizvodnjo elektronskega tahimetra Geodimeter 700, izboljšani model Geodimeter 710 pa se je pojavil leta 1974 (Cheves, 1999; Smith, 1999).



Slika 1: Elektronski tahimetri prve generacije: Zeiss Reg Elta 14 (Zeiss, 1975) in AGA Geodimeter 710 (objavljeno z dovoljenjem Georga Palmgrenna).

Prvi integrirani elektronski tahimetri so bili videti kot veliki teodoliti, pri katerih je bila celotna elektronska oprema za merjenje dolžin in kotov nameščena na bočnih straneh instrumenta v masivnih nosilcih daljnogleda (slika 1). Vgrajene so imeli elektrooptične fazne razdaljemere, za izvor svetlobe pa so uporabili Ga-As luminiscenčno diodo (Zeiss), oziroma He-Ne laser (AGA) (Deumlich, 1982). Za merjenje kotov je Zeissov instrument uporabljal absolutni postopek s kodirano razdelbo na limbih in avtomatsko koincidenčno diametralnih delov kroga, čitanje pa se je izvedlo s fotoelektronskim mikrometrom (Leitz, 1970). Tahimetri Geodimeter so kotne vrednosti določali z relativnim postopkom. Na krogih je bila nanešena inkrementalna razdelba 10.000 intervalov, ki jo je instrument čital tudi na fotoelektrični način (Rawlinson, 1976). V instrument so vgradili kompenzator vertikalnega kroga. Instrument je imel koksialno optiko – kolimacijska os in os razdaljemera sta sovpadali, kar pomeni, da so se vse tri merjene količine – dolžina, horizontalna smer in zenitna razdalja – nanašale na isto ciljno točko, navizirano z nitnim križem daljnogleda. Doseg obeh instrumentov pri merjenju dolžin je bil nekaj kilometrov, standardni odklon pa v intervalu od 5 mm do 10 mm, medtem ko je natančnost merjenja kotov znašala od 2" do 3" (Deumlich, 1982). Tahimetri so izmerjene vrednosti prikazali digitalno z namenom hitrega pregleda in grobe kontrole. To je bila vzporedna možnost, samodejno shranjevanje meritev v notranji spomin instrumenta je bilo veliko bolj smotno. Na instrument je bilo namreč mogoče priključiti modul za registracijo, ki je omogočal shranjevanje merskih vrednosti in predhodno vnesenih kod na perforirani papirni trak. S tem je bil prvič realiziran neprekinjen tok podatkov od snemanja na terenu do izdelave načrta, saj so se posneti podatki s traku lahko neposredno prenesli na računalnik (Benčić in Solarić, 2008).

Tahimetre je bilo mogoče povezati z zunanjim računalnikom za obdelavo merskih vrednosti neposredno na terenu za potrebe dodatne izmere ali zakoličbe (Tuno, Mulahusić in Kogoj, 2012).

Prvi elektronski tahimetri so imeli številne pomanjkljivosti, saj so bili začetki razvoja povezani s številnimi nerešenimi vprašanji. Kontrola merskih vrednosti tako rekoč ni bila mogoča, napake pri prenosu in obdelavi podatkov so bile neobvladljive. Največja pomanjkljivost teh instrumentov je bila njihova visoka cena in dejstvo, da je bila v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja informatizacija v večini geodetskih podjetij šele v povojih. Zato veliko zainteresiranih kupcev ni bilo. Zeiss Oberkochen je v prvih treh letih izdelal vsega dvesto tahimetrov Reg Elta 14 (Courbon, 2007).

3 ELEKTRONSKI TAHIMETRI DRUGE GENERACIJE (1977–1990)

Naslednji korak v razvoju tahimetrov je bila uporaba mikroročunalnikov z vgrajenim mikroprocesorjem v instrument. To je bila podlaga za nadaljnjo avtomatizacijo obdelave merskih vrednosti: samodejno upoštevanje instrumentalnih pogreškov, sistematičnih vplivov na meritve in preračun meritev iz merskega v koordinatni prostor.

Tahimetra Wild (danes Leica Geosystems) Tachymat TC1 in Hewlett-Packard (HP) Total Station 3820A (slika 2) sta prva instrumenta, ki ju uvrščamo v drugo generacijo integriranih elektronskih tahimetrov. Na trg sta prišla leta 1977. Naslednje leto je Zeiss Oberkochen pričel proizvodnjo tahimetra Elta 2 (Courbon, 2007). Poleg vgradnje mikroprocesorja in mikroročunalnika je napredek viden predvsem v bistveno manjših dimenzijah in masi tahimetrov ter v veliko boljšem sistemu avtomatske registracije (Rüeger, 2006). Podatki se niso več shranjevali na papirne trakove, uporabljeni so bili mediji za digitalno shranjevanje – kasete z magnetnim trakom, prenosna spominska enota in zunanji elektronski registrator (Benčić in Solarić, 2008). Že takrat se je v konstrukciji pojavil elektronski dvoosni kompenzator za merjenje nagiba stojiščne osi instrumenta (HP 3820A), ki je omogočil samodejni izračun in upoštevanje popravka meritev zaradi nevertikalnosti stojiščne osi in posledično nehorizontalnosti vrtilne osi daljnogleda (Gort, 1980). Nov in pomemben koncept v razvoju je bil opredeljen s tahimetrom Zeiss Elta 2, pri katerem so teodolit, razdaljemer, registrator, računalnik, modul s programi in izvor napajanja v istem ohišju. S tem se je precej povečala priročnost instrumenta na terenu glede na tahimetre, ki so imeli zunanje napajanje in ločen registrator (Tuno, Mulahusić in Kogoj, 2012).



Slika 2: Elektronski tahimetri druge generacije: HP 3820A (objavljeno z dovoljenjem Kennetha Kuhna, HP Memory Project), Wild Tachymat TC1 (Tuno et al., 2010), Geodimeter System 400 (Geotronics, 1991).

Ob koncu sedemdesetih let je bila cena elektronskih tahimetrov še vedno nepredstavljivo višja od cene optičnih instrumentov. Razlog so bili visoki stroški razvoja, tako je na primer HP 3820A takrat stal 34.000 USD (Gort, 1980), kar bi danes pomenilo več kot 100.000 USD. Prehod s klasičnega na avtomatiziran način obdelave meritev je zahteval dodatna visoka finančna sredstva. To sta bila glavna razloga, da ti instrumenti niso dosegli večjega komercialnega uspeha. Tako je na primer Wild izdelal le 650 tahimetrov TC1 in ustavil proizvodnjo že leta 1979 (Tuno et al., 2010). HP 3820A je bil izdelan v tisoč primerkih, leta 1983 je tovarna dokončno ustavila proizvodno linijo za izdelavo geodetskih instrumentov. Glede na to, da sta bila HP 3820A in nekoliko starejši optično elektronski tahimeter HP 3810A prva elektronska tahimetra, ki sta se množično uporabljala v praksi, je njuna oznaka *Total Station* (popolna postaja) prešla v širšo rabo. To je hitro postal splošni izraz za vse elektronske tahimetre (Lemmens, 2016), kar se v angleškem poimenovanju teh instrumentov ni spremenilo do danes.

Komercialni neuspeh tahimetrov TC1 in Elta 2 ni prestrašil Wildovih in Zeissovih konstruktorjev, da ne bi še naprej razvijali zmogljivejših instrumentov. Takrat so tudi drugi proizvajalci iskali lastne rešitve. Tako so imeli vsi glavni proizvajalci geodetske opreme – Wild, Zeiss Oberkochen, Zeiss Jena, Geotronics, Topcon, Sokkisha in Nikon – do leta 1985 v ponudbi integrirane elektronske tahimetre. Že leta 1983 je bilo na trgu dostopnih enajst različnih modelov takšnih instrumentov (Rüeger, 2006). Instrumenti so bili še vedno dragi (preračunano na današnje vrednosti je bila leta 1985 cena povprečnega elektronskega tahimetra od 30.000 do 40.000 EUR), opazen pa je bil trend padanja cen (Courbon, 2007). V osemdesetih letih so proizvajalci namesto jekla za ohišje in sestavne dele vse bolj uporabljali aluminij in kompozitne materiale, kar je pomenilo precejšnje zmanjšanje mase instrumentov. Takrat se je povečala zmogljivost mikroprocesorjev, ki so zato ponujali veliko večje možnosti, na primer za kompleksno obdelavo merskih podatkov že na terenu. Instrumenti so bili opremljeni s programi in funkcijami »on board«, imeli so možnost shranjevanja instrumentalnih pogreškov in podobno. Na vrhuncu razvoja tahimetrov druge generacije so se pojavili prvi instrumenti, ki jih je bilo mogoče samostojno programirati (Smith, 1999). Vse več pozornosti so proizvajalci posvečali tudi obliki instrumenta, instrumenti so dobili modernejše oblike ob upoštevanju primerne ergonomije.

V osemdesetih letih so proizvajalci dajali prednost zunanjim spominskim enotam, ki so omogočale elektronsko zapisovanje (Pavia, 2006). Poleg shranjevanja velike količine podatkov so omogočale njihovo delno obdelavo (npr. Sokkisha SDR2, AGA Geodat, Nikon DR1 in podobni). Malo kasneje so se začele uporabljati posebne pomične spominske enote, kot so Zeiss Mem E in Wild REC-modul (Tuno et al., 2010; Tuno, Mulahusić in Kogoj, 2012). Takrat so se pojavili tudi prvi instrumenti z vgrajeno notranjo spominsko enoto (trdi diski) (Smith, 1999). Zmogljivost spominske enote je omogočala shranjevanje tudi nekaj tisoč zapisov.

Leta 1983 je tovarna Wild predstavila dinamični način čitanja kotnih vrednosti na limbih, ki omogoča visoko natančnost merjenja kotov (Wild TC2000, kasneje TC2002: $\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}} = 0,5''$). Postopek je zasnovan na uporabi inkrementalne razdelbe, pri čemer sistem določi absolutno vrednost smeri (Tuno et al., 2010). Sistem meri čas zasuka vrtečega steklenega kroga za vrednost merjenega kota. Princip je enako digitalnemu načinu določitve fazne razlike pri faznih razdaljemernih. Takrat je le še tovarna Zeiss Oberkochen izdelovala tahimetre, ki so zagotavljali natančnost merjenja smeri, boljšo od 1" (Zeiss Elta 2, Rec Elta 2: $\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}} = 0,6''$), uporabljali pa so relativni postopek čitanja kotnih vrednosti

(Tuno, Mulahusić in Kogoj, 2012). Relativni postopek (inkrementalna razdelba) čitanja kotnih vrednosti na limbih je bil uporabljen pri večini tahimetrov druge generacije (Brooke, 1988), pri čemer so bile vrednosti standardnih odklonov merjenja kotov v intervalu od 2" do 20". Od sredine osemdesetih let je tovarna Wild proizvajala tahimetre z absolutnim statičnim sistemom za čitanje razdelbe na krogih (kodirani način), ki je bil veliko hitrejši in cenejši od dinamičnega načina (Solarić et al., 2007). Tahimetri druge generacije so opremljeni s faznimi razdaljemerji. Njihov doseg ob uporabi reflektorja je bil do 3300 m (Smith, 1999), standardni odklon merjenja $\sigma_{[mm];[ppm]}$ pa od 5 mm; 5 ppm do 2 mm; 2 ppm. Ob nadaljnjem razvoju elektrooptike je ob vse večji vlogi procesorja pri merjenju z inteligentno analizo procesa dosežena optimizacija merjenja in večja natančnost. Povečanje natančnosti je temeljilo na postopku TOP (angl. *time-optimized precision*), kar pomeni časovno optimirano natančnost na podlagi analize z merskim programom procesorja (Benčić in Solarić, 2008). Prvi instrument s takšnim razdaljemerom je bil Wild TC2002 iz leta 1990, dosega pa natančnost $\sigma_{[mm];[ppm]}$ 1 mm; 1 ppm (Tuno et al., 2010).

V osemdesetih so bile razvite številne inovativne rešitve, ki so bile uspešno uporabljene v elektronskih tahimetrih. Večina se jih je prvič pojavila v konstrukcijah različnih modelov tahimetrov Geodimeter (na primer prenos zvoka z infrardečo svetlobo, optična usmerjevalna luč, stopenjski motorji za vrtenje okrog osi Y in Z, senzor za sledenje gibajočega reflektorja in podobno). Instrumenti serije Geodimeter System 400 (slika 2) iz leta 1986 so merjene vrednosti prikazovali na velikem LCD-zaslonu, v primerjavi s tedanjimi tahimetri, ki so imeli enega ali več LCD-zaslonov za prikaz samo ene izmerjene ali izračunane vrednosti. Na teh tahimetrih je bil prvič uporabljen alfanumerični uporabniški vmesnik na podlagi tehnike menijev. Instrument je imel vgrajen elektronski kompenzator, nagib vertikalne osi tahimetra se je prikazal na zaslonu grafično v obliki dveh cevni libel in odmika mehurčka od marke libele. V okviru te serije tahimetrov je obstajalo nekaj modelov z različnimi spominskimi enotami, programskimi paketi, tipkovnicami in podobno. Uporabnik je lahko sam izbral konfiguracijo, ki je najbolj ustrezala njegovim potrebam (Smith, 1999).

4 ELEKTRONSKI TAHIMETRI TRETJE GENERACIJE (1990–2005)

Pri razdelitvi tahimetrov tretje generacije se je, v primerjavi z razdelitvami v preteklosti, poleg natančnosti prvič upoštevala tudi splošna učinkovitost oziroma funkcionalnost instrumentov. V tem smislu so se tahimetri razdelili v štiri osnovne skupine: enostavne, standardne, univerzalne in precizne. Proizvajalci so izdelovali tahimetre v serijah enake funkcionalnosti in različne natančnosti. Obenem so v okviru ene proizvodne linije izdelovali instrumente različne funkcionalnosti glede na potrebe kupca. Novost iz tega obdobja je koncept standardizacije formata zapisa podatkov, uvedba enakih uporabniških vmesnikov in sistemov za shranjevanje podatkov za vse instrumente ter programsko opremo enega proizvajalca.

Tretja generacija elektronskih tahimetrov je prinesla številne novosti, od katerih je najznačilnejša popolnoma nova tehnika merjenja, pri kateri se je mesto operaterja prestavilo s tahimetra na položaj reflektorja (tarče) na ciljni točki. Operater je upravljal tahimeter na daljavo, avtomatizacijo merjenja pa sta omogočali funkciji samodejnega viziranja in sledenja tarče. Obdobje univerzalnih motoriziranih tahimetrov z možnostjo samodejnega sledenja in viziranja tarče se je začelo leta 1990 s serijsko proizvodnjo instrumenta Geodimeter System 4000 tovarne Geotronics (slika 3). Geodetski strokovnjak prevzame vlogo operaterja, figuranta in vodje izmere. Izbira mesto merske točke, na katero postavi reflektor na togem grezilu, prek

kontrolerja in radijske zveze pošilja ukaze instrumentu, ki na njihovi podlagi izvaja merske operacije. Samodejno viziranje je bilo sestavljeno iz grobega iskanja ciljne točke v okolici trenutnega položaja vizurne osi in iz finega viziranja. Opisani sistem je omogočal tudi sledenje premične točke (Cheves, 1999; Smith, 1999; Benčić in Solarić, 2008). Tudi drugi proizvajalci so hitro razvili lastne rešitve tako imenovanih robotiziranih tahimetrov, na primer Topcon leta 1991, Leica Geosystems leta 1995, Zeiss leta 1996, Sokkia leta 2000 itd. Naslednja faza v razvoju robotiziranih tahimetrov je bila vgradnja sistema za hitro iskanje ciljne točke – tarče. V primerjavi z dotedanjimi sistemi, pri katerih je moral operater pred samodejnim postopkom grobega viziranja ročno, z daljinskim upravljalnikom, vizuro približno usmeriti proti tarči, imajo novi sistemi (dostopni od leta 1997) popolnoma avtomatiziran sistem iskanja tarče (Rüeger, 2006).

Leta 1993 je bil predstavljen instrument Zeiss Rec Elta RL, prvi integrirani elektronski tahimeter z možnostjo merjenja dolžin brez uporabe reflektorja na ciljni točki. Instrument je imel vgrajen impulzni razdaljemer z lasersko diodo kot izvorom svetlobe. Doseg merjenja dolžin brez reflektorja je bil 200 m, z reflektorjem pa kar 8000 m (Tuno, Mulahusić in Kogoj, 2012). Z impulznimi razdaljemerji z možnostjo merjenja brez reflektorja so bili nekaj let kasneje opremljeni tudi tahimetri proizvajalcev Topcon, Trimble in Nikon (Rüeger, 2006). Ti razdaljemerji so hitro napredovali na področju dosega, tako so se na primer s tahimetrom Topcon GPT 1002 iz leta 1998 merile dolžine brez reflektorja do 100 m, Topcon GPT 3000W iz leta 2004 je imel doseg 250 m, Topcon GPT-3000LW iz leta 2005 pa kar 1200 m (Topcon, 2018c). Leica Geosystems je začela leta 1998 v instrumente vgrajevati fazne razdaljemere z lasersko diodo kot svetilom, ki omogoča merjenje dolžin brez uporabe reflektorjev z dosegom 80 m. Kasneje so se pojavili razdaljemerji istega proizvajalca z oznako XR, katerih doseg brez uporabe reflektorja je bil 170 m, z reflektorjem pa kar 12.000 m.

Običajni standardni odklon merjenih dolžin tahimetrov tretje generacije z uporabo reflektorjev je bil 2 mm; 2 ppm ($\sigma_{\text{ISO-EDM}}$), le precizni tahimetri so bili natančnejši, standardni odklon je bil 1 mm; 1 ppm ($\sigma_{\text{ISO-EDM}}$). Posebnost so bili tahimetri za industrijska merjenja, kot je Leica Geosystems TPS5000, ki je omogočal merjenje dolžin do 120 m z natančnostjo 0,2 mm. Pri večini tahimetrov tretje generacije se je uporabljal fazni način elektrooptičnega merjenja dolžin. Tahimetri Leica Geosystems serij TPS5000 in TPS2000 so imeli edini boljše natančnost merjenja smeri od 1", standardni odklon smeri po ISO je bil 0,5" ($\sigma_{\text{ISO-THEO Hz,V}}$). Tako visoko natančnost so dosegli z absolutnim statičnim načinom čitanja na štirih mestih kodiranega kroga (Tuno et al., 2010). Pri večini tahimetrov iz tega obdobja je bil uporabljen absolutni postopek čitanja razdelbe na krogih, natančnost kotnih meritev pa je glede na predhodno generacijo tahimetrov ostala nespremenjena (POB, 2000). Univerzalne robotizirane tahimetre odlikuje bistveno krajši čas čitanja kotnih vrednosti in veliko večja hitrost merjenja dolžin. Hitrosti so že omogočale enostavne kinematične izmere. Tahimetri, ki so se pojavili ob koncu devetdesetih, so imeli možnost natančnega določanja položaja gibljive merjene točke s frekvenco od 7 Hz do 10 Hz (Stempfhuber in Wunderlich, 2004).

Samodejno usmerjanje kolimacijske osi na podlagi vnaprej določenega kotnega koraka in merjenje dolžin brez uporabe reflektorja so prvič uspešno vgradili v tahimetre Leica Geosystems TPS1100 leta 1999. S takšnimi instrumenti je bilo mogoče izbrana območja izmere, na primer fasade, digitalizirati v obliki rastra, v katerem so koordinate točk določene po popolnoma avtomatiziranem postopku brez dotika merjenega objekta (Ferreira, Capnor in Ferbritadr, 2011).

Zadnje desetletje 20. stoletja je zaznamoval hiter razvoj spominskih medijev, zato so se njihove cene občutno znižale. Takratni tahimetri so imeli vgrajene interne spominske enote z zmogljivostjo od nekaj sto KB do 1 MB, omogočali pa so priključitev zunanjih spominskih enot (elektronski zapisnik) (Pavia, 2006). Naprednejši modeli so od sredine devetdesetih podpirali tudi kartice PCMCIA SRAM za registracijo podatkov (zmogljivost spomina je v začetku znašala 512 KB), ob koncu devetdesetih pa so se pojavili instrumenti, v katere je bilo mogoče vstaviti spominske kartice PCMCIA ATA Flash z zmogljivostjo do 16 MB (Tuno et al., 2010).

Za uporabnike tahimetrov je bil izdelan uporabniški vmesnik po vzoru PC s sistemom MS-DOS, kjer je operater zelene aktivnosti instrumenta izbral iz menija ali neposredno s funkcijskimi tipkami. Struktura menija je bila razdeljena na več celot. Vse večji enobarvni LCD-zasloni so še poenostavili delo tudi z možnostjo prikaza enostavne grafike. Ob koncu devetdesetih so se začeli uporabljati zasloni boljše ločljivosti (npr. 256 x 64 pikselov), ki so omogočali prikaz bolj zapletene grafike. Že takrat so se pojavili instrumenti z zasloni na dotik in operacijskim sistemom (Spectra Precision, 1999). Nekateri instrumenti so dobili popolno tipkovnico QWERTY.



Slika 3: Avtomatizirani univerzalni tahimeter Geodimeter System 4000 s kontrolno enoto RPU 4000 za daljinsko upravljanje (objavljeno z dovoljenjem Shelly Cox, xyHt Magazine) in uporaba kontrolne enote Spectra Precision Geodat Win za terestrična in satelitska merjenja (Spectra Precision, 1999).

Prvi koraki na poti integracije tehnologij terestrične izmere in satelitskega pozicioniranja so bili narejeni leta 1995. Takrat so se pojavili tahimetri in sprejemniki GPS proizvajalca Geotronics, ki so uporabljali enake spominske kartice PCMCIA. S tem je bil omogočen prenos podatkov, pridobljenih s satelitsko izmero, iz sprejemnika GPS na tahimeter in nasprotno. Leta 1998 je isti proizvajalec (takrat pod imenom Spectra Precision) uvedel poseben registrator Geodat Win s tipkovnico in zaslonom, ki se je vgrajeval na tahimetre in sprejemnike GPS RTK (slika 3) in je bil obenem kontrolna enota (Lemmon in Wetherbee, 2005; Pavia, 2006). Meritve obeh instrumentov so se shranjevale v isto datoteko. Leica Geosystems je leta 2004 predstavila elektronske tahimetre TPS1200 in sprejemnike GNSS GPS1200, ki so uporabljali isti uporabniški vmesnik, isti format baze podatkov, iste baterije in polnilce ter enotno programsko opremo za združitev in obdelavo podatkov obeh merskih tehnologij (Stempfhuber in Wunderlich, 2004).

Ob napredku tehnologije za proizvodnjo elektronskih instrumentov, stalnih inovacijah, razvoju globalnega trga in še drugih dejavnikih je v devetdesetih letih občutno padla cena elektronskih teodolitov in

tahimetrov. Končno so lahko tudi majhna geodetska podjetja ekonomsko upravičila nakup elektronskih tahimetrov in pripadajoče opreme. Takšni pogoji so ugodno vplivali na razvoj integriranih elektronskih tahimetrov, ki je postajal vse hitrejši. Tako je bilo leta 1994 na mednarodnem trgu mogoče najti 68 različnih modelov teh instrumentov (Rüeger, 2006), leta 2000 pa se je število povečalo na 116. Na začetku tega tisočletja je bilo treba za enostavni tahimeter odšteti 7000 USD, kar danes znaša 9000 EUR. S povečanjem natančnosti, kompleksnosti in funkcionalnosti je zrasla tudi cena tahimetrov. Univerzalne robotizirane tahimetre je bilo mogoče kupiti za 40.000 USD (današnja vrednost okrog 53.000 EUR) (POB, 2000). Potem ko so se leta 2002 evropskim in japonskim proizvajalcem priključili še Kitajci (South, 2018), je postala ponudba še bogatejša, cene pa še nižje.

5 ELEKTRONSKI TAHIMETRI ČETRTE GENERACIJE (2005–DANES)

Sredi prvega desetletja novega tisočletja so se na trgu pojavili elektronski tahimetri z vgrajenimi dodatnimi merskimi senzorji, ki precej povečajo njihove merske sposobnosti in funkcionalnost. Razvoj gre v smeri najširše mogoče uporabe teh instrumentov.



Slika 4: Tahimetri četrte generacije: Leica Geosystems SmartStation (Tuno et al., 2010), Topcon IS (objavljeno z dovoljenjem GeoWild d.o.o. Sarajevo), Trimble S8 DR HP (objavljeno z dovoljenjem © Trimble Geospatial Inc).

Leica Geosystems je leta 2005 pričela proizvodnjo instrumentov SmartStation, merskega sistema, pri katerem sta prvič v eno celoto združena tahimeter in sprejemnik GNSS (slika 4). Bazna komponenta SmartStationa (‘pametne postaje’) je elektronski tahimeter serije TPS1200. Neposredno na tahimeter se postavlja ustrezen geodetski dvofrekvenčni sprejemnik GNSS. Tako je omogočena določitev koordinat stojišča tahimetra na podlagi satelitskih meritev. Tradicionalna metoda določanja koordinat geodetskih točk na območju izmere (delovišču) tako teoretično ni več potrebna (Tuno et al., 2010). Trimble je leta 2005 ponudil podobno rešitev, poimenovano IS (angl. *Integrated Surveying*) Rover, ki združuje univerzalni tahimeter Trimble S6 in sprejemnik GNSS Trimble R8 (Lemmon in Wetherbee, 2005). Pri tem sistemu se uporablja togo grezilo, na katerem sta na isti vertikali pritrjena antena sprejemnika GNSS in reflektor. Kontrolna enota je ob tem grezilu in služi za vodenje tako terestrične kot tudi satelitske

izmere. V primerjavi s sistemom SmartStation, kjer merski postopek upravljamo s tahimetra, omogoča IS Rover daljinsko upravljanje tahimetra s ciljne točke. Pri tem s tahimetrom izvedemo merjenje smeri in dolžin na ciljno točko ali/in s sprejemnikom GNSS RTK merjenja na isti ciljni točki. Zelo podoben sistem pod imenom SmartPole je začela Leica Geosystems izdelovati ob koncu leta 2006.

S pojavom instrumenta Topcon GPT-7000i leta 2005 se je začelo obdobje elektronskih tahimetrov z integriranimi slikovnimi senzorji, tahimetrov s slikovno podporo – IATS (angl. *image assisted total station*) (Scherer in Lerma, 2009). Ta standardni tahimeter brez pogonov ima vgrajeni dve videokameri s senzorji CMOS ločljivosti 0,3 Mp. Širokokotna kamera opazuje okolico z zornim poljem $28^\circ \times 22^\circ$. Postavljena je ob daljnogledu in služi za pregledovanje delovišča kot celote. Koaksialna kamera spremenljive goriščne razdalje pa omogoča prikaz slike, ki jo vidimo skozi daljnogled. Kamera je neposredno povezana z optičnim sistemom daljnogleda, zorni kot je le približno 1° , zato pa je slika občutno podrobnejša (Wagner, 2017). Za vsako izmerjeno detajlno točko se v spomin samodejno shranita dve fotografiji, sliko koaksialne kamere pa je mogoče neposredno opazovati na zaslonu tahimetra. Teoretično ciljne točke ni več treba opazovati skozi daljnogled instrumenta. Na sliki, ki jo ustvari video podpora, je mogoče vizualizirati položaje vseh izmerjenih točk, zakoličenih točk idr. To je zelo koristno, saj pri terenskem delu v vsakem trenutku lahko enostavno kontroliramo potek izmere. Naslednji Topconov tahimeter s slikovno podporo je bil model GPT-9000Ai (v proizvodnji od leta 2007), ki pa je v primerjavi s prvim modelom popolnoma robotiziran z dodatno vgrajeno možnostjo laserskega skeniranja – IASTS (angl. *image assisted scanning total station*). Enostavna funkcija skeniranja je omogočala hitrost do 20 točk na sekundo. Tudi ta model je bil opremljen s pregledno in koaksialno kamero s samodejno izostritvijo slike, pri obeh je bila ločljivost 1,3 Mp. Slika videokamere se v živo prenese na zaslon tahimetra ali na enoto za daljinsko upravljanje. Sistem omogoča nov način viziranja, tako da na zaslonu tahimetra označimo ciljno točko z dotikom, kolimacijska os (nitni križ) se nato samodejno postavi na izbrano točko. Možnost upravljanja instrumenta preko kontrolne enote na daljavo z dvostransko komunikacijo tudi video funkcije omogoča, da lahko uporabnik izvaja izmero po načinu 'one man station'. Radijska zveza omogoča povezavo na oddaljenosti do nekaj sto metrov. Slikovna podpora omogoča izbiro območja skeniranja kar na video prikazu na zaslonu. Posnete fotografije lahko uporabimo kot podlago oblakom točk za ustvarjanje foto realističnih tridimenzionalnih modelov skeniranih objektov. Tahimeter GPT-9000A1 se od leta 2008 proizvaja pod oznako IS (angl. *Imaging Station*) (slika 4) (Topcon, 2018b; Topcon 2018c). Tahimetre IATS in IASTS so razvili tudi Trimble, Leica Geosystems in Pentax (Wagner et al., 2016). Kakovost vgrajenih kamer je hitro napredovala, tako so se že leta 2010 pojavili instrumenti Leica Geosystems VIVA s kamero ločljivosti 5 Mp. Leica Geosystems NOVA MS50 iz leta 2013 ima poleg širokokotne kamere tudi koaksialno kamero spremenljive goriščne razdalje do 30-kratne povečave. Ta tahimeter ima bistveno izboljšano funkcijo skeniranja, katere hitrost znaša tudi do 1000 točk na sekundo (Grimm in Zogg, 2013).

Razvoj razdaljemerov v tahimetrih je v 21. stoletju prinesel predvsem povečanje merskega dosega brez uporabe reflektorjev, povečanje natančnosti in hitrosti meritev. Tako je Topcon v instrumente GPT-9000A vgradil impulzni razdaljemer, katerega doseg pri merjenju brez reflektorja je kar 2000 m (Topcon, 2018c). Leica Geosystems je v modele tahimetrov serije TPS1200+ (leto 2007) vgradila razdaljemere z enim izvorom svetlobe, lasersko diodo, ki služi za merjenje dolžin z reflektorjem in brez njega. Pri tem uporabljajo tehnologijo *System Analyzer*, ki kombinira prednosti faznega in impulznega načina merjenja dolžin, doseg pri merjenju do naravnih površin pa je 1000 m. Ta razdaljemer je bil kasneje izpopolnjen

glede natančnosti ($\sigma_{\text{ISO-EDM}}$: 0,6 mm; 1 ppm) in leta 2009 vgrajen v tahimeter TS30 (Tuno et al., 2010; Solarić et al., 2011). Še natančnejši razdaljemer so vgradili v industrijske tahimetre serije TDRA6000, pri katerih je natančnost okoli 0,25 mm za dolžine do 120 m (Leica Geosystems, 2018). Precizne razdaljeme podmilimeterske natančnosti in dosega 200 m je razvilo tudi podjetje Sokkia za svoje instrumente NET 05 (leto 2008). Enakovredne instrumente od leta 2010 pod oznako MS05A proizvaja tudi Topcon (Topcon, 2018a; Topcon, 2018b).

Tahimetri s funkcijo skeniranja zahtevajo za učinkovito uporabo bistveno večjo hitrost merjenja. Pri prvotnih rešitvah je izmera ene same dolžine zahtevala tudi nekaj sekund. Prvi tahimetri s funkcijo skeniranja so se pojavili leta 2007 (Trimble VX in Topcon GPT-9000Ai). Hitrost skeniranja je bila največ od 15 do 20 meritev na sekundo (Lachat, Landes, in Grussenmeyer, 2017). Takrat so bili skonstruirani robotizirani univerzalni tahimetri z možnostjo določanja položaja gibljivega reflektorja (sistem AST – avtomatsko sledenje tarče) s frekvenco tudi do 20 Hz (Stempfhuber, 2009). Naslednji korak v razvoju je bil razdaljemer, vgrajen v instrument Leica Geosystems NOVA MS50. Razdaljemer ima lasersko diodo kot svetilo, pri merjenju pa uporablja novo Leicino tehnologijo WFD (angl. *Wave Form Digitizer*). WFD je posebna vrsta impulzno-faznega načina določitve dolžine, pri kateri se fazna razlika določa v okviru svetlobnega impulza. Z akumulacijo več impulzov je določitev fazne razlike veliko natančnejša, osnovni impulzni način pa poveča hitrost meritev. Tako je največja hitrost tudi do 1000 meritev na sekundo. Isti razdaljemer se uporablja za merjenje dolžin z reflektorjem in brez njega. Doseg pri merjenju z reflektorjem je do 10000 m, pri standardnem merjenju brez reflektorja pa 2000 m. Omogočena je optimizacija skeniranja v štirih hitrostih (1000 Hz, 250 Hz, 62 Hz in 1 Hz) glede na različne oddaljenosti od objekta skeniranja (Grimm in Zogg, 2013).

Motorizirani tahimetri nove generacije potrebujejo za čitanje limbov le 0,5 do 0,05 s, posamezni modeli pa le nekaj milisekund. V tahimetrih Leica Geosystems sistem za čitanje razdelbe na krogih namesto ravnih uporablja parabolična zrcala. Skozi limb s kodirano razdelbo tako prehaja koncentrirana količina svetlobe, ki pada na linearni CCD-senzor. Sistem omogoča čitanje limba tudi do 5000-krat na sekundo (Solarić et al., 2011). Vse do sredine druge polovice prvega desetletja 21. stoletja je bilo podjetje Leica Geosystems edini proizvajalec preciznih tahimetrov, ki so zagotavljali natančnost merjenja smeri $\sigma_{\text{ISO-THEO}_{\text{Hz,V}}} = 0,5''$. Od leta 2008 takšne instrumente proizvaja tudi Sokkia (enak instrument se proizvaja tudi pod Topconovim imenom), Trimble pa precizni tahimeter proizvaja od leta 2010 (Topcon, 2018a; Topcon 2018b; Trimble Geospatial, 2018).

Da bi lahko popolnoma izkoristili nove možnosti, ki jih prinaša tehnologija pri merjenju smeri in dolžin, so se v elektronske tahimetre za vrtenje zgornjega sestava tahimetra okrog vertikalne vrtilne osi in daljnogleda okrog horizontalne osi instrumenta namesto stopenjskih motorjev začeli vgrajevati direktni pogoni. Trimble od leta 2005 uporablja magnetne pogone (angl. *MagDrive*) v tahimetrih S6. Leica Geosystems od leta 2009 (v tahimetru TS30) v motorizirane tahimetre vgrajuje pogone piezo (Leica angl. *direct drive*). Novi pogoni so hitrejši: pri stopenjskih motorjih je največja hitrost 85°/s, direktni pogoni pa dosegajo hitrost 180°/s in pospešek do 360°/s². Poleg tega med mehanskimi deli ni trenja, premiki pa so tako rekoč zvezni (Lemmon in Jung, 2005; Solarić et al., 2011). Direktni pogoni se od leta 2016 vgrajujejo tudi v tahimetre proizvajalca Sokkia (Topcon, 2018a).

Moderni univerzalni tahimetri so dobili tudi napredne sisteme samodejnega iskanja, sledenja in viziranja

tarče. Izboljšane so možnosti filtriranja motečih signalov in odzivanja na prekinitve signala v funkciji sledenja. Povečan je doseg teh sistemov, pri samodejnem viziranju tako na primer znaša do 3000 m. Tudi druge komponente so v primerjavi s predhodno generacijo občutno napredovale. Velikost notranjih spominskih enot se meri v gigabajtih, podprta je komunikacija RS232, USB, Bluetooth in WLAN, uporabljajo se baterije Li-Ion, vgrajujejo se zasloni na dotik, najpogosteje izbrani operacijski sistem je Windows. Meritve se shranjujejo v univerzalnih formatih (na primer kot koordinate DXF, LandXML in podobno) oziroma v uporabniško definiranih formatih ASCII. S povečanjem zmogljivosti mikroprocesorjev in velikosti spomina RAM je omogočena kompleksnejša obdelava podatkov na samem instrumentu. Danes se posebna pozornost namenja tudi terenskim računalnikom z zasloni na dotik, ki jih povežemo s tahimetri. Njihova uporaba je odločilna pri merjenju s popolnoma avtomatiziranim elektronskim tahimetrom, kjer celotno izmero izvaja en sam človek. Poleg klasičnega načina shranjevanja podatkov lahko s njihovo uporabo s kompleksno programsko opremo nalogo do konca opravimo neposredno na instrumentu (Pavia, 2006). Vse aktualnejša sta tudi povezava instrumenta z medmrežjem in neposreden prenos podatkov meritev na daljavo. Te možnosti so na voljo tudi za druge geodetske merske tehnike, kot so geometrični nivelman, satelitsko pozicioniranje in lasersko skeniranje.

Še ena zanimivost: Leica Geosystems je na svojih tahimetrih Flexline TS07 in TS10 septembra 2018 kot prva na svetu predstavila sistem za samodejno merjenje višine instrumenta. Višino instrument izmeri z ločenim enostavnim laserskim razdaljemerom. Proizvajalec zagotavlja natančnost 1 mm (1 sigma) na višini od 0,7 m do 2,7 m (URL 2).

Rast kitajske industrije geodetske opreme je v 21. stoletju izjemna. Proizvajalci sledijo svetovnim trendom in v množično proizvodnjo geodetskih instrumentov vgrajujejo tehnološko naj sodobnejše merske senzorje. Zaradi nizke cene postajajo kitajski tahimetri vse zanimivejši za uporabnike širom sveta. Tako je na primer tovarna South izdelala prvi elektronski tahimeter leta 1995, na mednarodnem trgu se je pojavila leta 2002, do konca leta 2010 pa so izdelali že 100.000 teh instrumentov. Samo leta 2009 je s Southovih proizvodnih trakov na trg prišlo 25.000 tahimetrov, kar je daleč največ med vsemi svetovnimi proizvajalci te merske opreme (South, 2018). Takšni trendi so prisilili konkurenčne evropske in japonske proizvajalce, da pospešeno razvijajo nove rešitve in znižajo cene svojih tahimetrov, kar je imelo pozitivne učinke tudi na lastno proizvodnjo. Leica Geosystems je v obdobju od leta 2008 do leta 2013 izdelala 60.000 tahimetrov serije Flexline. Danes je evropski univerzalni tahimeter z video podporo z možnostjo skeniranja do 15 točk na sekundo in standardnim odstopanjem merjenja kotov 1" mogoče kupiti za 27.000 EUR.

6 ELEKTRONSKI TAHIMETER PETE GENERACIJE (2016–DANES)

Pojav instrumenta Trimble SX10 leta 2016 je vzbudil veliko zanimanja geodetskih strokovnjakov, saj instrument vsekakor pomeni začetek nove generacije tahimetrov. Model postavlja nove standarde v proizvodnji tahimetrov in kaže na nove smeri razvoja teh instrumentov. SX10 (slika 5) s svojimi revolucionarnimi tehničnimi rešitvami prinaša velik napredek sodobne tehnologije geodetskih instrumentov.

Največja razlika med tahimetrom SX10 in preostalimi tahimetri je v konstrukciji daljnogleda. Klasični daljnogled z objektivom in okularjem nadomešča premična merska glava, v kateri so tri videokamere, elektronski razdaljemer, vrteča prizma in senzor sistema samodejnega iskanja tarče. Slikovna komponenta instrumenta sloni na treh kalibriranih kamerah ločljivosti 5 Mp – pregledni, glavni in koaksialni-koli-

macijski kameri (angl. *coaxial tele-camera*). Pregledna in glavna kamera imata fiksno goriščno razdaljo. Kolimacijska kamera je koaksialna glede na os elektrooptičnega razdaljemera in ima spremenljivo goriščno razdaljo, izostritev slike pa je lahko samodejna ali ročna (Lachat, Landes, in Grussenmeyer, 2017). Kamere omogočajo skupno osem stopenj povečave slike. Šesta stopnja pomeni 84-kratno optično povečavo z možnostjo dodatne digitalne povečave na 7. in 8. stopnji. Klasično viziranje skozi daljnogled ni mogoče, zato se viziranje izvede s pomočjo digitalnega nitnega križa, ki je prikazan na sliki videokamere, prenesene na zaslon daljinske kontrolne enote. Instrument nima zaslona. Za grobo viziranje se uporabljata pregledna in glavna kamera, za fino viziranje pa uporabimo kolimacijsko kamero. Kamere so dodatno uporabne kot pri vseh tahimetrih s slikovno podporo, fotografije se uporabljajo za dokumentacijo terenskega dela, omogočajo izdelavo digitalnega zapisnika, podprta je izdelava georeferenciranih panoramskih posnetkov itn. Instrument ima tudi posebno kamero za centriranje (angl. *plummet camera*), tako imenovano video grezilo z natančnostjo 0,5 mm/1,55 m (Trimble) (Schrock, 2017).



Slika 5: Tahimeter Trimble SX10 (objavljeno z dovoljenjem © Trimble Geospatial Inc).

Druga pomembna razlika, ki loči SX10 od drugih tahimetrov, je integrirani pravi laserski skener. Pri klasičnih tahimetrih IASTS se mora pri skeniranju vrteti celoten daljnogled tahimetara, da se tako spremeni naklon vizurne osi. Zaradi relativno velike mase daljnogleda in omejene hitrosti direktnih pogonov pri tem ni mogoče doseči velikih hitrosti skeniranja (Wagner, 2017). V daljnogledu SX10 je za skeniranje uporabljeno vrteče poligonsko zrcalo, ki se vrti s stalno kotno hitrostjo okrog svoje vzdolžne osi in s tem odklanja laserski žarek v vertikalni smeri. Največja hitrost skeniranja znaša kar 26.600 točk na sekundo. Elektronsko merjenje dolžin pri skeniranju je zasnovano na impulzni metodi, največji doseg je 600 m. Grobo skeniranje celotne sfere ($360^\circ \times 300^\circ$) s kotnim rastrom 1 mrad (50 mm na oddaljenosti 50 m) traja 12 minut. V primerjavi s standardnimi laserskimi skenerji je hitrost SX10 veliko manjša, ima pa SX10 druge prednosti, kot je na primer manjši šum glede na oddaljenost objekta (1,5 mm do 2,5 mm za dolžine od 50 do 300 m) (Schrock, 2017). Klasično merjenje dolžin z reflektorjem je mogoče do oddaljenosti 5500 m z natančnostjo 1 mm; 1,5 ppm ($\sigma_{\text{ISO-EDM}}$), merjenje brez reflektorja pa je mogoče do oddaljenosti 800 m, natančnost je tu seveda slabša: 2 mm; 1,5 ppm ($\sigma_{\text{ISO-EDM}}$). Kotne vrednosti se določajo z absolutnim statičnim postopkom, natančnost je 1" ($\sigma_{\text{ISO-THEO Hz,V}}$). Doseg sistema za samodejno viziranje reflektorja je 800 m (Trimble Geospatial, 2018).

Obstajajo številne polemike, ali instrument Trimble SX10 sploh lahko uvrstimo med tahimetre. 'Moteča' sta integrirani laserski skener in dejstvo, da se video komponenta ne uporablja več samo kot dodatna funkcija tahimetra. Zaradi neklasičnega daljnogleda brez okularja so kamere nepogrešljive, brez njih je instrument neuporaben. Vseeno pa ima SX10 številne značilnosti tahimetra, kot so osnovna zgradba zgornjega in spodnjega sestava, daljnogled, ki se vrtil okrog horizontalne osi, točkovni način merjenja, zagotavljanje klasičnih merskih vrednosti – polarnih koordinat v merskem prostoru, možnost zakoličbe in drugo. Vse to ga uvršča med tahimetre IASTS.

Instrument Trimble SX10 trenutno stane okrog 45.000 EUR. Cenovno se torej uvršča v skupino najboljših tahimetrov Leica Geosystems. Kako bo cena vplivala na prodajo in kako ga bo sprejela stroka, bo pokazala prihodnost. Vsekakor pa instrument kaže, v katero smer bo šel razvoj merske tehnologije.

7 SKLEP

Od prvega prototipa integriranega elektronskega tahimetra pred petdesetimi leti so ti instrumenti zaradi številnih tehnoloških inovacij nesluteno napredovali. Uporaba novih konstrukcijskih rešitev in sodobnih merskih senzorjev ni namenjena povečevanju natančnosti, ampak predvsem povečanju hitrosti meritev in funkcionalnosti instrumentov. Zaradi visoke stopnje avtomatizacije merskega procesa se je področje uporabe teh instrumentov občutno razširilo. Sodobni tahimetri so v kombinaciji s sistemi pozicioniranja GNSS, laserskega skeniranja in video tehnologije vse bližje končnemu cilju: univerzalnemu geodetskemu merskemu instrumentu.

V pričujočem prispevku so tahimetri razdeljeni v skupine. Opredeljenih je pet generacij glede na značilna merila: zmogljivost, vidik uporabe tehnoloških dosežkov in časovno obdobje. Vrednotenje tahimetrov z uporabo termina 'generacija' ohranja ključno stopnjevanje v smislu sodobnosti in uspešnosti teh instrumentov. Čeprav takšna razdelitev izhaja iz geneze razvoja elektronskih tahimetrov, jo je treba dojemati kot orientacijo (vodilo), kar se posebej nanaša na časovno komponento in se lahko uporablja le za ustvarjanje grobega vtisa o sosledju razvoja teh instrumentov. Nekateri tahimetri, ki so se pojavili v obdobju, značilnem za posamezno generacijo, imajo značilnosti tahimetrov predhodne generacije. V tem smislu ne velja pravilo, da je tahimeter neke generacije v vseh segmentih boljši od predstavnikov prejšnje generacije. Po drugi strani pa imajo nekateri tahimetri značilnosti in sposobnosti naslednje generacije. Stroge ločnice med generacijami ni mogoče določiti. Mogoče bi bilo treba opredeliti medgeneracijske instrumente, kot sta na primer tahimetra Leica Geosystems MS50 in MS60, ki bi ju lahko kompromisno uvrstili v razvojno generacijo 4,5.

Literatura in viri

- Benčić, D., Solarić, N. (2008). *Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici*. Zagreb: Školska knjiga.
- Brooke, G. M. (1988). The use of encoded discs in the angle measurement systems of modern theodolites, *Australian Surveyor*, 34 (1), 27–32. DOI: <https://doi.org/10.1080/00050326.1988.10439001>
- Cheves, M. (1999). Geodimeter – The First Name in EDM. *Professional Surveyor Magazine*. <https://archives.profsurv.com/magazine/article.aspx?i=394>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Courbon, P. (2007). Topographie: un demi-siècle d'évolution technologique, partie 2/4. *Revue XYZ*, 111 (2), 31–42. <http://www.aftopo.org/download.php?matricule=411107>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Deumlich, F. (1982). *Surveying Instruments*. Berlin, New York: de Gruyter.
- Ehrhart, M., Lienhart, W. (2016). Accurate Measurements with Image-Assisted Total Stations and Their Prerequisites. *Journal of Surveying Engineering*, 143 (2), 04016024. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000208](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000208)
- Ferreira, R., Capnor, A., Ferbrita, V. S. (2011). State-of-the-art Total Stations. *GIM*

- International. <https://www.gim-international.com/content/article/state-of-the-art-total-stations>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Geotronics (1991). Geodimeter System 400. Danderyd: Geotronics AB.
- Gort, F. (1980). A Fully Integrated, Microprocessor-Controlled Total Station. *Hewlett-Packard Journal*, 31 (9), 3–12. <http://www.hpl.hp.com/hpjournal/pdfs/IssuePDFs/1980-09.pdf>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Grimm, D. E., Zogg, H.-M. (2013). Leica MS50 White Paper. https://w3.leica-geosystems.com/downloads/123/zz/tps/nova_ms50/white-tech-paper/Leica_Nova_MS50_TPA.pdf, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Hollwey, J. R. (1983). Topcon GTS-2 (Geodetic Total Station). *Survey Review*, 27 (207), 43–44. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.1983.27.207.43>
- Kogoj, D., Bilban, G., Bogatin, S. (2004). Tehnične lastnosti tahimetrov Leica Geosystems. *Geodetski vestnik*, 48 (4), 508–518.
- Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2017). Investigation of a Combined Surveying and Scanning Device: The Trimble SX10 Scanning Total Station. *Sensors*, 17 (4), 730. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17040730>
- Leica Geosystems (2018). Total Stations. <https://leica-geosystems.com/products/total-stations>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Leitz, H. (1970). Two electronic tacheometers by Zeiss. *Survey Review*, 20 (156), 258–264. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.1970.20.156.258>
- Lemmens, M. (2016). Total Stations: the Surveyor's Workhorse. GIM International. <https://www.gim-international.com/content/article/total-stations-the-surveyor-s-workhorse>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Lemmon, T., Jung, R. (2005). Trimble S6 with Magdrive Servo Technology. https://www.neigps.com/wp-content/uploads/2016/02/022543-100_TrimbleS6_MagDrive_WP_1204_Ir.pdf, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Lemmon, T., Wetherbee, L. (2005). Trimble Integrated Surveying. https://www.neigps.com/wp-content/uploads/2016/02/022543-133_Integrated_Surveying_WP_0605.pdf, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Pavia, J. V. R. (2006). The Evolution of the Data Collector. Point of Beginning. Dostupno na: <https://www.pobonline.com/articles/90406-the-evolution-of-the-data-collector>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- POB – Point of Beginning (2000). Survey grade total stations. Point of Beginning, January 2000, 31–58.
- Rawlinson, C. (1976). Automatic angle measurement in the AGA 700 Geodimeter—principles and accuracies, *Survey Review*, 23 (180), 249–270. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.1976.23.180.249>
- Rüeger, J. M. (2006). 75 Years of Change in Survey Technology. *Survey Review*, 38 (300), 459–473. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.2006.38.300.459>
- Scherer, M., Lerma, J. L. (2009). From the conventional total station to the prospective image assisted photogrammetric scanning total station: Comprehensive review. *Journal of Surveying Engineering*, 135 (4), 173–178. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2009\)135:4\(173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2009)135:4(173))
- Schrock, G. (2017). Behind the Big Eye of the SX10: Trimble, Danderyd, Sweden. *xyHT Magazine*, July 2017, 16–23. <http://www.xyht.com/lidarimaging/behind-big-eye>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Smith, J. R. (1999). The History of Geodimeter. Danderyd: Spectra Precision AB.
- Solarič, N., Benčič, D., Barkovič, Đ., Zrinjski, M. (2007). Reading and Registering of Directions by Electronic Theodolites and Electronic Tacheometers Leica. *Kartografija i geoinformacije*, 6, 246–253.
- Solarič, N., Solarič, M., Barkovič, Đ., Zrinjski, M. (2011). Nova tehnološka dostignuća u konstrukcijama integriranih mjernih stanica. *Geodetski list*, 65 (88) (4), 311–322.
- South (2018). Total Station. <http://www.southinstrument.com/products/index2.asp?id=49>, pridobljeno 1. 9. 2018.
- Spectra Precision (1999). Geodimeter System 600 Pro. Darmstadt: Spectra Precision AB.
- Stempfhuber, W. (2009). Verification of the Trimble universal total station (UTS) performance for kinematic applications. V Grün/Kahmen (ur.), *Optical 3-D Measurement Techniques IX* (str. 211–221). Dunaj: FIG Commission 5 and 6, IAG Special Commission 4, ISPRS Commission 5.
- Stempfhuber, W., Wunderlich, T. (2004). Leica System 1200: Auf dem Weg zur Sensorsynchronisation von GPS und TPS für kinematische Messaufgaben. *AVN*, 111 (5), 175–184.
- Topcon (2018a). Sokkia Total Station. <https://www.topcon.co.jp/en/positioning/sokkia/products/product/ts/>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Topcon (2018b). Total Station Solutions. <https://www.topconpositioning.com/total-station-solutions>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Topcon (2018c). Topcon Museum. <https://www.topcon.co.jp/en/positioning/museum/>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Trimble Geospatial (2018). Total Stations. <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/total-stations>, pridobljeno 10. 12. 2018.
- Tuno, N., Mulahusić, A., Kogoj, D. (2012). Od Reg Elta do Spatial Station: Štiri desetletja elektronskih tahimetrov Zeiss (Trimble). *Geodetski vestnik*, 56 (3), 415–426. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2012.03.415-426>
- Tuno, N., Mulahusić, A., Marjetič, A., Kogoj, D. (2010). Pregled razvoja elektronskih tahimetrov Leica Geosystems. *Geodetski vestnik*, 54 (4), 643–660. DOI: <https://doi.org/10.1529210.15292/geodetski-vestnik.2010.04.643-66>
- Valh, M. M., Marjetič, A., Ježovnik, V., Kogoj, D. (2008). Automatski elektronski tahimetri ali kam vodi razvoj TPS sistemov. *Geodetski vestnik*, 52 (3), 487–499.
- Wagner, A. (2017). New Geodetic Monitoring Approaches using Image Assisted Total Stations. Doktorska disertacija. München: Technische Universität München. <https://d-nb.info/1129874605/34>, pridobljeno 3. 10. 2018.
- Wagner, A., Wiedemann, W., Wsmeier, P., Wunderlich, T. (2016). Monitoring Concepts Using Image Assisted Total Stations. V R. Paar, A. Marendić, M. Zrinjski (ur.), *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geodesy – SIG 2016* (str. 137–148). Zagreb: Croatian Geodetic Society.
- Zeiss (1975). Zeiss Vermessungs-Instrumente. Oberkochen: Carl Zeiss.
- URL 1: Monshausen, L. (2009). <https://www.flickr.com/photos/lomo56/3323403364>, pridobljeno 8. 1. 2019.
- URL 2: Leica Geosystems: https://leica-geosystems.com/about-us/news-room/news-overview/2018/10/2018_10_17_flexline-series; pridobljeno 8. 1. 2019.



Tuno N., Mulahusić A., Savšek S., Kogoj D. (2019). Pet generacij integriranih elektronskih tahimetrov. Geodetski vestnik, 63 (1), 41-56.
DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2019.01.41-56>

doc. dr. Nedim Tuno, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Sarajevu, Fakulteta za gradbeništvo
Patriotske lige 30, BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina
e-naslov: nedim_tuno@gf.unsa.ba

izr. prof. dr. Admir Mulahusić, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Sarajevu, Fakulteta za gradbeništvo
Patriotske lige 30, BIH-71000 Sarajevo, Bosna in Hercegovina
e-naslov: admir_mulahusic@gf.unsa

doc. dr. Simona Savšek, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: simona.savsek@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si