

ELEKTRONSKI TEODOLITI – RAZVOJ IN KLASIFIKACIJA

ELECTRONIC THEODOLITES – DEVELOPMENT AND CLASSIFICATION

Nedim Tuno, Simona Savšek, Admir Mulahusić, Dušan Kogoj

UDK: 528.521
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.02
Prispelo: 27. 3. 2020
Sprejeto: 15. 4. 2020

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2020.02.182-197
REVIEW ARTICLE
Received: 27. 3. 2020
Accepted: 15. 4. 2020

IZVLEČEK

Elektronski teodoliti kot samostojni instrumenti za merjenje kotov se v omejenem obsegu še vedno izdelujejo in aktivno uporabljajo po vsem svetu, čeprav prevladuje mnenje, da so zastareli in ob sodobnih tahimetrih že leta neuporabni. V članku podajamo pregled zgodovinskega razvoja teh instrumentov v zadnjih 55 letih. Na podlagi podrobne analize konstrukcije, zmogljivosti, funkcionalnosti in natančnosti smo elektronske teodolite razvrstili v tri skupine – enostavni, univerzalni in precizni. Opisane so osnovne značilnosti posameznih skupin.

ABSTRACT

Although they have long been regarded as obsolete, classical electronic theodolites, which are made as standalone angle-measuring instruments, are still being produced and widely used throughout the world. This paper provides a comprehensive overview of the historical development of these instruments over the previous 60 years. A detailed analysis of the theodolite's purpose, accuracy, construction, capabilities and functionality has resulted in the determination of three main groups of these instruments; a brief description of each category is provided.

KLJUČNE BESEDE

elektronski teodolit, razvoj, klasifikacija, geodetska tehnologija

KEY WORDS

electronic theodolite, development, classification, survey technology

1 UVOD

V šestdesetih letih 20. stoletja so bili v tedanji Zahodni Nemčiji uspešno skonstruirani prvi instrumenti z elektronskim sistemom za čitanje in registracijo kotnih vrednosti na steklenih limbih teodolitov (Zwickert, 1964; Zetche, 1968). To so bili prvi elektronski teodoliti. Njihov tehnološki razvoj je bil v začetku počasen, saj je bil povezan z razvojem elektronike, uporabnost teh instrumentov v geodeziji pa je bila odvisna od razpoložljive dodatne tehnologije, potrebne za samodejno obdelavo podatkov. Tako je prehod z analognih na elektronske teodolite trajal več desetletij. Konec obdobja, v katerem so prevladovali analogni teodoliti, je bilo mogoče zaslutiti v 80. letih. V tem času so v proizvodnih obratih analogne teodolite največje natančnosti zamenjali precizni elektronski instrumenti (Tuno in sod., 2010). Postopno »umiranje« analognih teodolitov opišemo s števkami: leta 1982 je bilo na svetovnem trgu mogoče izbirati med 46 različnimi modeli analognih teodolitov in le tremi elektronskimi; deset let pozneje je bilo dostopnih 18 modelov analognih in 16 modelov elektronskih teodolitov. Do konca 20. stoletja so vsi vodilni proizvajalci geodetske opreme prenehali izdelovati analogne teodolite in se popolnoma usmerili v izdelavo instrumentov z elektronskim načinom čitanja razdelbe na limbih (Rüeger, 2006). Sčasoma so tehnologijo izdelave elektronskih teodolitov osvojile tudi manjše tovarne, zato so trg preplavile desetine novih modelov teh instrumentov.

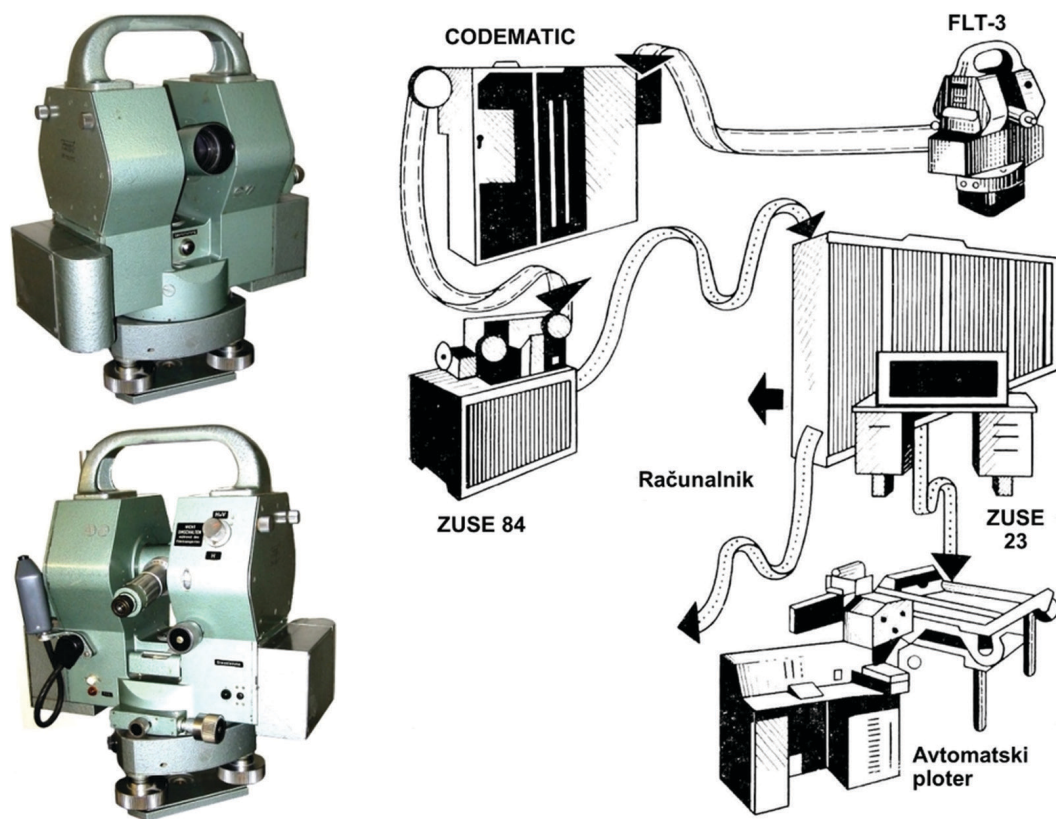
V obstoječi literaturi o elektronskih teodolitih je največ napisanega o razlagah njihove kompleksne zgradbe, še posebej o konstrukciji in delovanju sistema za čitanje limbov in elektronskega kompenzatorja (npr. Cooke, 1968; Aeschlimann, 1978; Katowski in Salzmann, 1983; Brooke, 1988; Benčić, 1990; Deumlich in Staiger, 2002; Solarić in sod., 2011, itd.). Objavljenih je nekaj del, v katerih avtorji opisujejo merske sposobnosti teh instrumentov, njihovo natančnost in uporabnost (npr. Bingley, 1990; Ali, 1991; Solarić in Špoljarić, 1992; Rüeger i Alanko, 1995; Ali, 2001; Tuno, 2005; Yang in sod., 2011, itd.). Z opisi razvoja elektronskih teodolitov se je ukvarjalo zelo malo avtorjev, saj prevladuje mnenje, da je zgodovina teh instrumentov tesno povezana z razvojem elektronskih tahimetrov (Rüeger, 2006; Courbon, 2007). Razvoj elektronskih teodolitov je predstavljen le delno in površno v delih, ki obravnavajo splošni razvoj geodetskih instrumentov. Namen tega članka je prvič na enem mestu podati najpomembnejše mejnike in dinamiko razvoja elektronskih teodolitov v zadnjih 55 letih. V delu skušamo rešiti problem nesistematičnih načinov razvrščanja elektronskih teodolitov. Proizvajalci različne vrste teodolitov poimenujejo kot informacijske, enostavne, gradbene, ekonomske, inženirske, precizne, industrijske in podobno. Najpogosteje pa jim rečejo kar elektronski ali digitalni teodoliti. V strokovni literaturi, kjer strogo upoštevamo osnovno filozofijo delitve optičnih teodolitov glede na natančnost meritev, avtorji razvrščajo elektronske teodolite v dve skupini (Kahmen in Faig, 1988), tri skupine (Matthews, 1996), štiri skupine (Fialovszky, 1991; Benčić in Solarić, 2008) oziroma v šest skupin (Deumlich in Staiger, 2002). Glede na namen se teodoliti običajno delijo na gradbene, inženirske in precizne (Fialovszky, 1991; Matthews, 1996). Zaradi velike heterogenosti razvrščanja elektronskih teodolitov v članku elektronske teodolite razvrstimo ne zgolj glede na namen in natančnost, temveč tudi glede na konstrukcijske koncepte, stopnjo opreme, učinkovitost, merske zmogljivosti, splošno funkcionalnost instrumentov in drugo.

2 PRVI ELEKTRONSKI KODNI IN DIGITALNI TEODOLITI

Prvi elektronski teodoliti so se pojavili v zgodnjih 60. letih. Vanje so vgradili elektronske komponente, ki so omogočale čitanje razdelb limbov in registracijo kotnih vrednosti. S tem so odpravili človeško vlogo v dveh fazah kotnih meritev in dosegli neprekinjen pretok podatkov od teodolita do elektronskega

računalnika. Prvo uspešno konstrukcijo takšnega instrumenta povezujemo z imeni, kot so Eduard Lang, Erwin Zwickert in Walter Faulian (*Theodolite with coded indications*, 1965). Po njihovih idejah je leta 1963 tovarna Otto Fennel GmbH v Kasslu izdelala prototip elektronskega teodolita – kodni teodolit FLT-3 s fotografsko registracijo kodirane razdelbe limba na 35-milimetrski film.

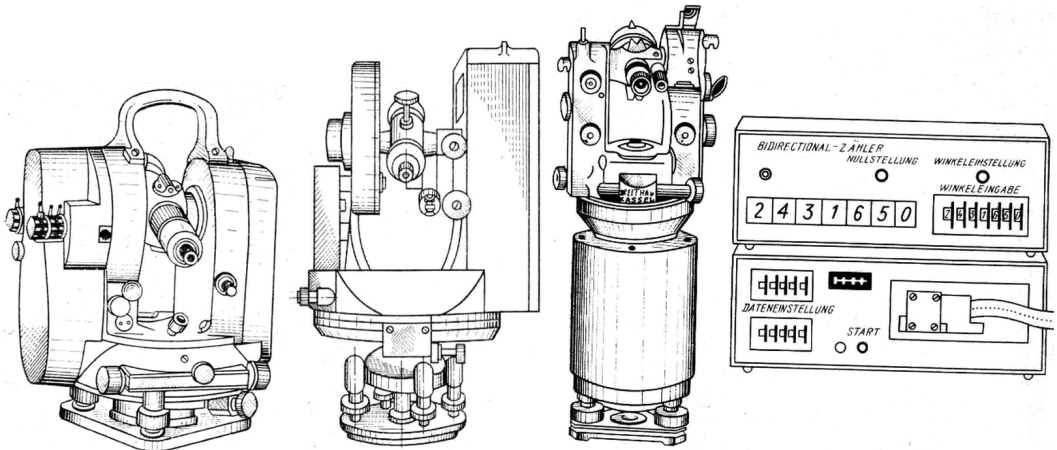
Po razvijanju in fiksiranju filma so se podatki s posebnim fotoelektričnim prevodnikom prenesli na perforirane trakove, s katerih so se odčitali na elektronski računalnik (slika 1). Glede na takratno stanje razvoja elektronike je bil ta sistem izjemno premišljen, njegova uporabnost pa v praksi ni zaživela. Največji pomen instrumenta FLT-3 v razvoju elektronskih teodolitov se kaže v tem, da je njegov pojav spodbudil nadaljnji razvoj naprav za čitanje kotnih razdelb na limbih, registracijo izmerjenih podatkov in njihov prenos brez neprimerne in nepraktične vmesne registracije na filmske trakove (Hauf, 1978; Benčić, 1990; Fialovszky, 1991).



Slika 1: Elektronski kodni teodolit Fennel FLT-3 (Heer, n. d., objavljeno z dovoljenjem Leibniz Universität Hannover) ter prikaz postopka registracije in obdelave izmerjenih podatkov (Hauf, 1978).

Prof. dr. Hans Zetsche z Geodetskega inštituta v Bonnu je konstruktor prvega pravega elektronskega digitalnega teodolita z direktno registracijo. Zetschejev projekt novega instrumenta se je začel skorajda istočasno kot razvoj elektronskega teodolita s kodirano razdelbo FLT-3 v podjetju Fennel. Zaradi slabe podpore se je delo na projektu upočasnilo, zato je bil prvi elektronski teodolit izdelan šele leta 1965.

Naredili so ga v tovarni Breithaupt & Sohn iz Kassla in ga imenovali DIGIGON (*DIGItal GONiometer*). Elektronski teodolit je predelan analogni teodolit TEINS. Na steklene limbe je nanešena inkrementalna razdelba s 5000 inkrementi – svetlo temnimi polji enakih dimenzij. Razdelbo horizontalnega limba zazna elektronski senzor, njegova osnova je Leitzov fotoelektrični pretvornik. Senzor je nameščen na cilindričnem nepremičnem spodnjem delu instrumenta. DIGIGON (slika 2) je omogočal digitalno čitanje vrednosti kotov v realnem času z ločljivostjo 1 mgon. Teodolit je bil s kablom povezan na zunanjo enoto z zaslonom za digitalni prikaz vrednosti opazovane horizontalne smeri, za nastavitev želene začetne vrednosti horizontalne smeri in za vnos dodatnih informacij (številka točke, višina instrumenta ipd.). Zunanja enota je bila povezana z napravo za samodejno registracijo na perforirani trak. Čitanje razdelbe vertikalnega limba je bilo klasično s skalnim mikroskopom. Okvirna cena celotnega sistema je znašala 3000 takratnih britanskih funtov (okoli 55.000 današnjih britanskih funtov). Čeprav je bila nadgradnja elektronskega digitalnega teodolita napovedana za sredino leta 1968, je DIGIGON na koncu ostal le pri prvotnem prototipu, saj Breithaupt pravzaprav ni načrtoval serijske proizvodnje tega instrumenta. Tako je DIGIGON ostal tehnološki prototip, zasnovan kot osnova za razvoj naprednih teodolitov (Cooke, 1968; Sydenham, 1968; Hauf, 1978).



Slika 2: Kodni teodoliti Ko-B1, Digitrin in digitalni teodolit DIGIGON (Hauf, 1978).

Ob koncu 60. let so v madžarski tovarni MOM izdelali teodolit s kodirano razdelbo limba Ko-B1 (slika 2) s pripadajočo elektronsko enoto. Instrument je razvil László Gyomai. Podobno kot pri teodolitu DIGIGON so se vrednosti smeri odčitale elektronsko in zapisale na perforirani trak. Optični mikrometer sistema za odčitavanje limba je deloval neprekinjeno, zato so se s teodolitom lahko spremljali premični cilji, ki so se gibali s kotno hitrostjo do 2 gon/s. Merske vrednosti so se sproti zapisovale, zapisovanje odčitkov obeh limbov je trajalo 0,2 sekunde. Standardni odklon merjenja horizontalne smeri je znašal 0,7", vertikalnega kota pa 1". MOM je izdelal ničelno serijo z nekaj primerki tega teodolita, namenjeno preverjanju sistema pred uvedbo serijske proizvodnje. Te pa nazadnje niso začeli, saj so v tovarni ocenili, da tako velik in težek merski sistem (sam teodolit je imel maso 12,5 kilograma, masa celotnega sistema pa je znašala več kot 40 kilogramov) nima prihodnosti. V začetku 70. let so namreč že obstajali precej bolj praktični elektronski tahimetri tovarn Zeiss in AGA. Kljub temu so se izdelani instrumenti Ko-B1 dolga leta uporabljali na letališčih Ferihegy in Praga za spremljanje pristajanja letal (Hauf, 1978; Fialo-

vszky, 1991; Imre in sod., 2015). S tem so prišli v zgodovino kot prvi operativno uporabni elektronski teodoliti. Prototip elektronskega kodnega teodolita Digitran (slika 2) je razvila tudi ameriška tovarna W. & L. E. Gurley. Zanimivo je, da je imel ta instrument na limbih poleg kodirane tudi klasično razdelbo, čitanje na klasični črtni razdelbi pa je omogočal optični mikrometer (Hauf, 1978). Čeprav so tovarne Fennel, Breithaupt, W. & L. E. Gurley in MOM opustile nadaljnji razvoj in proizvodnjo elektronskih teodolitov, lahko rečemo, da programi razvoja njihovih elektronskih teodolitov niso bili zaman in so opravili svoje poslanstvo. Z uporabo kodiranih in inkrementalnih limbov je bil uveden povsem nov način čitanja, lahko rečemo tudi, da se je z njimi uveljavila elektronika v geodetskih instrumentih. V nadaljnjem burnem razvoju je to močno spremenilo in razširilo vlogo teodolitov.

3 ELEKTRONSKI TEODOLIT KOT DEL INTEGRIRANEGA ELEKTRONSKEGA TAHIMETRA

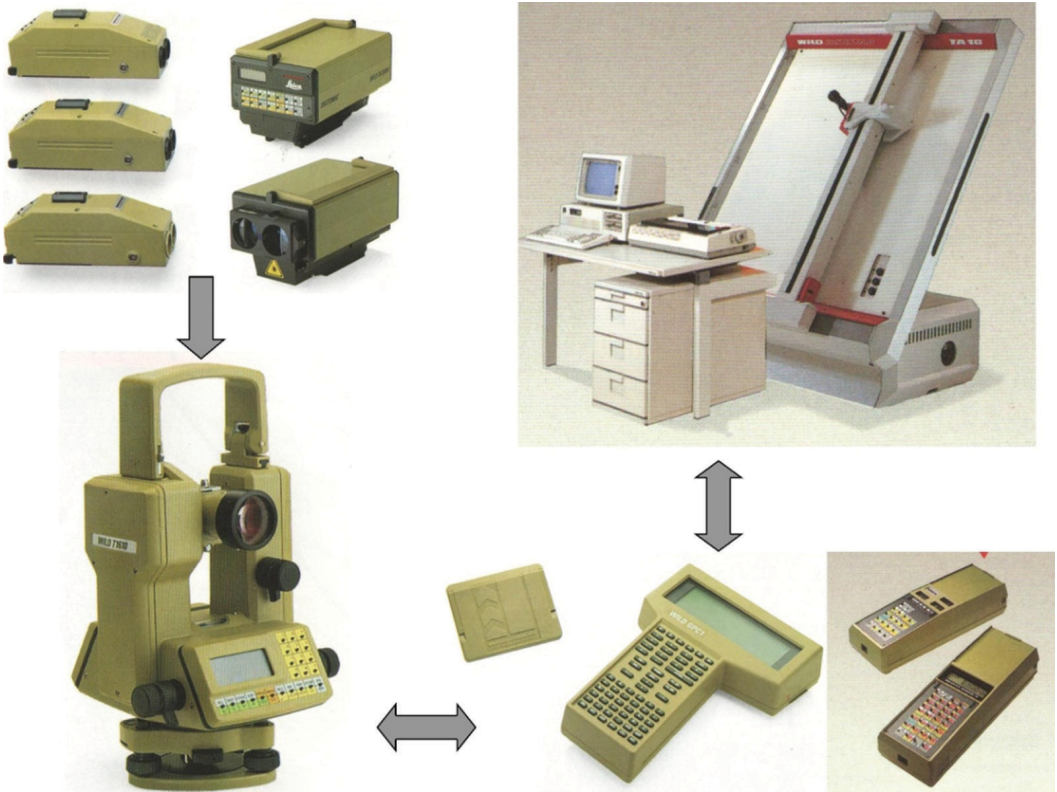
Od začetka 70. let so proizvajalci v elektronski teodolit najpogosteje vgradili elektronski razdaljemer. Takšen merski sistem, z možnostjo samodejnega shranjevanja merskih podatkov, imenujmo integrirani elektronski tahimeter ali skrajšano kar elektronski tahimeter oziroma tahimeter. Ob dobesednih prevodih iz angleščine srečamo tudi poimenovanja, kot so »totalna (popolna) postaja (TS)«, »terestrični (teodolitski) pozicijski sistem (TPS)«. Do sredine 80. let so imeli takšne instrumente v ponudbi vsi pomembnejši proizvajalci geodetske opreme. V vrtočglavem razvoju, ki je sledil in traja vse do danes, se je pojavilo veliko različnih tipov in modelov tahimetrov, ki jih lahko razvrstimo v 5 generacij (Tuno in sod., 2019). Ker v članku obravnavamo teodolite, ki se izdelujejo kot samostojni instrumenti, integriranih teodolitov ne bomo podrobneje opisovali.

4 VEČNAMENSKI ELEKTRONSKI TEODOLIT – SAMOSTOJNI INSTRUMENT IN MODUL KOMBINIRANEGA ELEKTRONSKEGA TAHIMETRA

4.1 Splošne značilnosti večnamenskih elektronskih teodolitov

Večnamenski ali univerzalni elektronski teodoliti so izjemno prilagodljivi instrumenti, ki so bili glede na natančnost in dodatne module namenjeni širokemu spektru uporabe: od enostavnih meritev na gradbiščih do zahtevnih meritev preciznih geodetskih mrež za spremljanje premikov in deformacij. Delimo jih na teodolite srednje natančnosti – standardni odklon smeri po DIN ali ISO je od 2" do 5" ($\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}} \sigma_{\text{ISO-THEO Hz,V}}$) – in teodolite visoke natančnosti – standardni odklon smeri je od 0,5" do 1,5" ($\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}} \sigma_{\text{ISO-THEO Hz,V}}$). Za čitanje razdelbe horizontalnega in vertikalnega limba se uporabljata ali statični (absolutni ali relativni postopek) ali pa dinamični postopek čitanja. Na univerzalne teodolite lahko z ustreznim dodatkom pričvrstimo elektronski razdaljemer. Tako nastane modularni elektronski tahimeter. Osnovni modul modularnega tahimetra je elektronski teodolit. Omogoča neprekinjen pretok podatkov od terenskih meritev do izpisa koordinat točk (slika 3), pri čemer ostaja še naprej samostojni instrument. Modularno zgrajeni instrument je imel nekatere prednosti, saj je lahko geodetski strokovnjak izbral ustrezno kombinacijo – teodolit – razdaljemer – tahimeter. Razdaljemer, ki ga je bilo mogoče s posebnim nosilcem uporabiti tudi samostojno, je bil pritrjen ali na nosilcih daljnogleda teodolita ali neposredno na daljnogledu. Prenos podatkov med razdaljemerom in teodolitom je potekal preko kabla ali neposredno. S priključkom elektronske spominske enote je bilo mogoče vse podatke samodejno shraniti. Nekateri teodoliti so imeli vgrajeno spominsko enoto, najnaprednejši modeli pa so poleg tega

omogočali shranjevanje podatkov na prenosni pomnilnik. Teodoliti so imeli vgrajene mikroprocesorje, ki so omogočali avtomatizacijo merskega procesa v smislu upoštevanja instrumentalnih popravkov in preračunov merskih vrednosti. Obdelava merskih podatkov se je na terenu izvedla prek ločenega modula – elektronskega zapisnika. Najnaprednejši modeli teodolitov so imeli vgrajene programe, ki so omogočali različne izračune (sredine merjenih vrednosti, polarne – pravokotne koordinate, koordinate poligonskih točk ...). Vsi univerzalni elektronski teodoliti imajo elektronske kompenzatorje – enoosne za popravljanje čitanja vertikalnega limba ali dvoosne za samodejno korekcijo zenitnih razdalj in horizontalnih smeri. Nekateri univerzalni elektronski teodoliti so tudi motorizirani.



Slika 3: Različne možnosti sestavljanja modularnega merskega sistema s teodolitom Wild T1610 kot osnovno enoto (Leica, 1993).

4.2 Razvoj večnamenskih elektronskih teodolitov

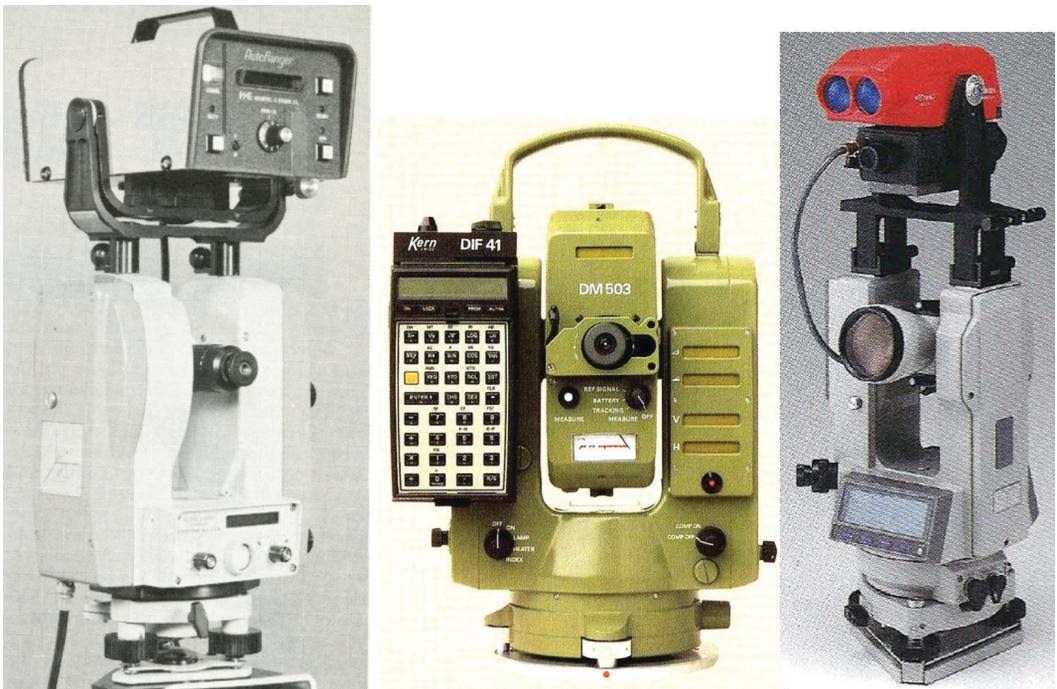
Od izdelave elektronskega digitalnega teodolita DIGIGON do pojava instrumentov, ki bi jih lahko šteli za predhodnike modernih elektronskih teodolitov in tahimetrov in ki so geodezijo resnično pripeljali v elektronsko dobo, je minilo več kot desetletje. Leta 1977 so se pojavili instrumenti, katerih napredni koncepti so določali smer razvoja elektronskih teodolitov in tahimetrov v naslednjih dveh desetletjih. Koncept tovarn Wild (danes Leica Geosystems) in Hewlett Packard je temeljil na integriranih tahimetrih (Tuno in sod., 2019), medtem ko sta Kern (danes Leica Geosystems) in Keuffel & Esser (K & E) oglaševala modularno rešitev z elektronskim teodolitom, elektronskim razdaljemerom in elektronskim zapisnikom kot ločenimi enotami.

Prvi, na trgu dostopni elektronski teodolit z možnostjo modularne rešitve je bil K & E Vectron (slika 4). Instrument ima enoosni kompenzator in mikroročunalnik z mikroprocesorjem. Limbi imajo inkrementalno razdelbo, način čitanja je relativni. Za merjenje zenitnih razdalj je bilo treba ob vklopu instrumenta vedno znova določiti mesto zenita oziroma mesto indeksa vertikalnega limba (orientacijo vertikalnega limba) z enostavnim postopkom inicializacije. Ob horizontiranem instrumentu je bilo treba daljnogled z ustrezno hitrostjo prevrteti preko horizonta. Relativni način določanja odčitkov na limbih z inkrementalno razdelbo je bil takrat veliko zanesljivejši kot absolutni sistem, pri katerem je kompleksna struktura pogosto povzročala napake odčitanih vrednosti kotov. Standardni odklon merjenih horizontalnih smeri in zenitnih razdalj je znašal 3" ($\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}}$). V prvi legi daljnogleda se je nahajala plošča s tipkovnico in LED-zaslonom (8 znakov) za prikaz izmerjenih ali izračunanih vrednosti. Kotne vrednosti so se prikazovale v gonih, stopinjah (seksagezimalna ali decimalna razdelba) ali tisočinah (hiljaditih). Zaslonka ločljivost je bila ali 1 mgon ali 1". Ob naviziranju začetne točke je bilo mogoče s pritiskom na gumb nastaviti odčitek na vrednost 0. Teodolit je bilo mogoče povezati z zunanjo tipkovnico za vnos dodatnih podatkov o stojšču, vizurni točki ipd. Omogočala je tudi nastavitve vrednosti začetne smeri, izbiro zaporedja merjenja horizontalnih smeri, računanje sredin niza nadštevilnih meritev in drugo. S pritrditvijo elektronskega razdaljemera Autoranger na nosilec daljnogleda teodolita je nastal elektronski tahimeter z možnostjo neposrednega prenosa izmerjenih dolžin v mikroročunalnik teodolita. To je omogočilo pretvorbo polarnih koordinat v merskem prostoru v koordinatne razlike v koordinatnem prostoru in naprej v koordinate merjenih točk v koordinatnem sistemu baze izmere. Posebno stikalo na tipkovnici je služilo za izbiro prikaza zelenih izmerjenih ali izračunanih vrednosti. Vektron je bil povezan z zunanjim regulatorjem – terenskim računalnikom (angl. field computer), katerega spominska zmogljivost je znašala od 8 KB do 24 KB. Terenski računalnik je omogočal pregled vseh vpisanih podatkov v pomnilnik, služil pa je tudi za izračune in kontrolo izmerjenih vrednosti na terenu (npr. zapiranje poligonskega vlaka) (Erickson, 1978; Ketteman, 1985).

Na podlagi prototipa teodolita ET2 (konstruiral ga je Hans Koch) je tovarna Kern leta 1980 začela proizvodnjo preprostejše različice instrumenta pod oznako E1 (Aeschlimann, 1978; Aeschlimann, 2008). Elektronski teodolit E1 je imel podobne lastnosti in zmogljivosti kot teodolit Vectron. Podatke je prikazoval na štirih vrstičnih LCD-zaslonih v prvi legi daljnogleda in na dveh zaslonih v drugi legi daljnogleda. Vrednosti horizontalne smeri in zenitne razdalje sta bili določeni istočasno, instrument je potreboval dve sekundi za prikaz. Leta 1983 je Kern začel proizvajati teodolit visoke natančnosti Kern E2 (slika 4). Njegova natančnost je bila osupljiva, standardni odklon merjene horizontalne smeri in zenitne razdalje je bil 0,5" ($\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}}$), to pa je natančnost statičnega načina čitanja današnjih najnatančnejših preciznih tahimetrov. Dvoosni kompenzator je omogočal samodejno korekcijo vrednosti zenitne razdalje in horizontalne smeri zaradi nagiba navpične osi (Kern, 1985a; Kern 1985b). Istega leta je tovarna WILD pričela proizvodnjo teodolita visoke natančnosti Theomat T2000 (50 years of..., 2014; Virtual Archive of..., n. d.). T2000 je bil opremljen z dinamičnim sistemom čitanja limba, ki omogoča visoke natančnosti merjenja horizontalnih smeri in zenitnih razdalj 0,5" ($\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}}$). Razdelba na limbih je inkrementalna, pri tem pa instrument na podlagi merjenja časa določi vrednost kota med fotocelico začetne smeri – ničle razdelbe in fotocelice smeri kolimacijske osi (Katowski in Salzman, 1983). Na nadzorni plošči instrumenta je numerična tipkovnica z ukaznimi tipkami za neposredno upravljanje. Teodolit ima izmenljivo baterijo v posebnem delu instrumenta, kar je veliko priročnejši način napajanja od dotedanjih rešitev z zunanjimi baterijami (Wild, 1985).

V sredini 80. let uvedejo absolutni statični sistem čitanja limbov, pri katerih se uporablja le ena koncentrična linija (Wild Theomat T1000 in T1600). Ta način ima bistveno prednost pred dinamičnim, saj je čas meritev občutno krajši, celoten sistem pa je enostavnejši in veliko cenejši. Teodoliti so opremljeni z izmenljivim spominskim modulom majhnih dimenzij in mase. Nameščen je v posebno ohišje na instrumentu, ki v primerjavi z zunanji enotami občutno poveča funkcionalnost instrumenta. Pri T1000 in T1600 so osnovni programi za računanje shranjeni v instrumentu, dodana je možnost shranjevanja instrumentalnih popravkov in s tem možnost popravkov merskih vrednosti (Virtual Archive..., n.d.; Tuno in sod., 2010).

Evropski in ameriški proizvajalci elektronskih teodolitov kmalu dobijo konkurencu z Daljnega vzhoda – od sredine 80. let se pojavljajo večnamenski instrumenti japonskih tovarn Topcon, Sokkisha (danes Sokkia) in Nikon. Zaradi splošnega napredka računalniške tehnologije in senzorjev, povečane konkurence, ki jo je povzročila hitra rast tržnega deleža japonskih proizvajalcev, in drugih vzrokov je cena elektronskih teodolitov v drugi polovici 80. let močno padla. Tako je na primer elektronski teodolit srednje natančnosti Wild T1000 takrat stal približno 12.000 USD, celotni modularni tahimeter (teodolit Wild T1000 in elektronski razdaljemer Wild DI1000 z zunanjim registratorjem/računalnikom Wild GRE4) pa približno 25.000 USD (približno 56.000 današnjih ameriških dolarjev). Enakovredni modularni tahimetri proizvajalcev Sokkisha in Topcon so bili za tretjino cenejši. Precizni modularni tahimetri so bili veliko dražji. Kernov sistem teodolita E2 in razdaljema DM503 ali DM 504 je stal okrog 37.000 USD, Wildov sistem, ki je temeljil na teodolitu T2000, razdaljemer je bil serije DI2000, pa celo 45.000 USD (Kamphorst, 1987).



Slika 4: Elektronski teodoliti kot osnovni instrumenti sistema modularnega tahimetra: Keuffel & Esser Vectron (Ericson, 1978), Kern E2 (Kern, 1985a) in Sokkia DT4E (Sokkia, n. d.).

Do začetka devetdesetih let se na trgu pojavijo naprednejše izvedbe elektronskih teodolitov (npr. Zeiss, (danes Trimble) ETh2, Sokkisha DT-2E, Wild T2002, Leica T1610 in podobni), izdelane na preverjenih osnovah predhodnih modelov. Modularna struktura je omogočila izdelavo optimalne konfiguracije instrumentov za specifične naloge, zato so bili kombinirani tahimetri v osemdesetih in devetdesetih letih zelo priljubljeni. Tako so se na daljnogled teodolita Leica T1010 (v proizvodnji od 1991. do 1995.) lahko namestili različni fazni in impulzni razdaljemerji (DI1001, DI1600, DI2002, DI3000S, DIOR3002S pa tudi starejši modeli razdaljemerov). Kombinacija teodolita s faznim razdaljemerom DI2002 je omogočala merjenje dolžin visoke natančnosti – standardni odklon $\sigma_{[mm];[ppm]}$: 1 mm; 1 ppm, z impulznim razdaljemerom DI3000S so lahko merili razdalje do 19 kilometrov, medtem ko je DIOR3002S omogočil merjenje dolžin brez uporabe reflektorja do oddaljenosti 350 metrov. Tovarna Leica je hkrati izdelovala integrirani tahimeter TC1010, ki sta ga sestavljala teodolit T1010 in fazni razdaljemer standardne natančnosti $\sigma_{[mm];[ppm]}$: 3 mm; 2 ppm, dosega največ 5,5 kilometra. Lastnosti tahimetra ni bilo mogoče spreminjati. Primer kaže na prednosti in prilagodljivost koncepta kombiniranih tahimetrov, predvsem v smislu možnosti izbire ustreznega razdaljemera glede na zastavljeno nalogo. S postopnimi nakupi je bilo mogoče sestaviti kompleksnejši sistem teodolit-razdaljemer. Na drugi strani pa nekateri uporabniki niso merili dolžin, zato zanje nakup integriranega tahimetra ni bil zanimiv (Courbon, 2007).

Izdelava modularnih tahimetrov doseže vrhunec leta 1995, ko se je pojavila nova generacija instrumentov tovarne Leica, poimenovanih serija TPS 1000 (Theodolit – Positions – Systeme). V serijo TPS 1000 so uvrščeni elektronski teodoliti T(M)1100/1800, ki so bili znatno izboljšani z možnostjo shranjevanja podatkov na notranji pomnilnik in PCMCIA SRAM-kartice, z vgrajenimi stopenjskimi motorji za obratovanje alhidade in daljnogleda (M-različica), neskončnimi vijaki za fino viziranje (M-različica), velikimi LCD-zasloni z možnostjo prikaza enostavne grafike, elektronsko libelo, možnostjo lastnih programskih rešitev »on board« itd. (Leica Geosystems, 1998). Kljub precejšnjemu povečanju učinkovitosti elektronskih instrumentov so njihove cene padale, kompleksni motorizirani teodolit TM1100 (natančnost 3") je bilo mogoče ob koncu devetdesetih kupiti že za približno 11.000 USD (okoli 16.000 današnjih USD) (Point of Beginning, 2000). Takrat se je občutno zmanjšalo povpraševanje po tahimetrih modularnega tipa, zato so proizvajalci geodetske opreme pričeli opuščati proizvodnjo takšnih instrumentov (Rüeger, 2006). Zaradi hitrega razvoja in občutnega padca cen integriranih tahimetrov so prednosti sestavljanja elektronskega tahimetra z ločenimi enotami tako rekoč izginile. Geodeti so se pri nakupih raje odločili za integrirane instrumente, saj so bile takšne rešitve bolj praktične za izvajanje meritev. Po letu 2000 proizvajalci geodetskih instrumentov niso več razvijali novih modelov večnamenskih (univerzalnih) elektronskih teodolitov.

5 ENOSTAVNI ELEKTRONSKI TEODOLITI

5.1 Splošne značilnosti enostavnih elektronskih teodolitov

Enostavni elektronski teodolit je namenjen manj zahtevnim uporabnikom, ki potrebujejo relativno preprost instrument za geodetska dela manjše natančnosti, tehnične meritve v gradbeništvu, gozdarstvu, poljedelstvu in podobno. Pri izdelavi takšnih teodolitov je posebna pozornost namenjena enostavnosti uporabe in robustnosti. Večina tovrstnih teodolitov je odpornih proti prahu in vodi (stopnja zaščite do IP66). Preprosta tipkovnica (od 3 do 10 tipk) je ena sama z enobarvnim dvovrstičnim LCD-zaslonom, prirejena za uporabo le v prvi krožni legi daljnogleda. Razdelba na limbih je pogosto inkrementalna,

natančnost kotnih meritev pa znaša od 2" do 20" ($\sigma_{\text{ISO-THEO Hz,V}}$). Večinoma imajo daljnogled z vgrajenim Reichenbachovim razdaljemerom za optično merjenje dolžin. Starejši modeli enostavnih teodolitov imajo na daljnogledu nivelacijske libele za horizontiranje vizurne osi, s takšnim instrumentom lahko tudi niveliramo. Teodoliti se v večini napajajo s standardnimi baterijami AA 1,5 V. Najenostavnejši modeli enostavnih teodolitov nimajo kompenzatorjev, v nekoliko naprednejših izvedbah pa so vgrajeni kompenzatorji za samodejno popravljanje odčitka vertikalnega limba. Pri merjenju horizontalnih smeri pogosto obstaja možnost shranjevanja vrednosti kolimacijskega pogreška, kar omogoča popravke horizontalne smeri, merjene le v eni krožni legi. Instrumenti običajno ne omogočajo samodejne registracije merskih podatkov. Naprednejši modeli imajo večje zaslone in dvojno tipkovnico, dvoosni kompenzator za samodejno eliminacijo vpliva nagiba stojiščne osi teodolita, lasersko grezilo, priključek za elektronski zapisnik, osnovno programsko podporo in podobno. Razvite so tudi posebne različice, ki materializirajo kolimacijsko os z laserskim žarkom – tako imenovani laserski teodoliti, ki omogočajo direktno signalizacijo ciljne točke. Novejši enostavni teodoliti v splošnem nimajo možnosti modularne zgradbe z elektronskim razdaljemerom. Združitev so sicer omogočali starejši modeli enostavnih tahimetrov, vendar komunikacija med teodolitom in razdaljemerom po navadi ni bila mogoča. Instrumenta sta se tako med delom uporabljala ločeno, zaradi česar je bila funkcionalnost sistema zelo okrnjena.

5.2 Razvoj enostavnih elektronskih teodolitov

Univerzalni elektronski teodoliti in tahimetri iz prve polovice osemdesetih let so bili za večino uporabnikov cenovno nedostopni. Veliki večini strokovnjakov, ki so se ukvarjali pretežno z enostavnimi geodetskimi nalogami, dragi kompleksni elektronski instrumenti in samodejna obdelava podatkov niso bili zanimivi. Še naprej so uporabljali mnogo cenejše optične teodolite. Da bi elektronski instrumenti postali cenovno dostopnejši, so japonske tovarne pričele izdelovati poenostavljene elektronske teodolite, katerih velikost, masa in cena so bile primerljive z enostavnimi optičnimi teodoliti. Na podlagi teh so leta 1983 nastali teodoliti nizke natančnosti, natančnost merjenja je bila 20" ($\sigma_{\text{ISO-THEO Hz,V}}$). Primeri takšnih instrumentov so Topcon DT20, Sokkisha DT20E in Pentax PD20 (Topcon Museum, 2020; Sokkia Museum, 2020). Njihova glavna naloga je bila digitalni prikaz merjenih vrednosti na zaslonu ter s tem hitro in zanesljivo čitanje. To je bila tudi osnovna prednost glede na optične teodolite. Omogočali so priključitev elektronskega regulatorja za shranjevanje rezultatov meritev pa tudi namestitev elektronskega razdaljemera na nosilec daljnogleda. Podobne lastnosti je imel teodolit ETh 4 (Electronic THEodolite) tovarne Zeiss Oberkochen, ki so ga pričeli izdelovati leta 1985 (slika 5). Stroške proizvodnje tega modela so znižali tako, da so uporabili relativni način čitanja razdelbe horizontalnega in vertikalnega limba ter znižali natančnost na 6" ($\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}}$). Poleg tega v instrument niso vgradili dvoosnega kompenzatorja (obstaja le kompenzator vertikalnega limba), vgrajeni so bili le osnovni merski programi. Vseeno pa je proizvajalec dopuščal možnost samodejnega shranjevanja merskih vrednosti, saj je imel teodolit izhodni priključek za zunanji elektronski zapisnik (Opton, 1986; The California Surveyor, 1986). Leta 1985 je teodolit stal okrog 3000 USD, približno enako vrednost je bilo treba nameniti nakupu elektronskega regulatorja. Istega leta je tovarna Nikon na trgu predstavila teodolit NE-10, ki je bil še cenejši. Koncept tega instrumenta (dostopna cena, enostavna uporaba, primerna velikost in masa, nizka natančnost, brez možnosti dodatka elektronskega razdaljemera ipd.) je bil podlaga za samostojni poenostavljeni teodolit, ki je bil v osnovi namenjen nezahtevnim kotnim meritvam. Koncept instrumenta so hitro prevzeli tudi drugi proizvajalci geodetskih instrumentov. V tej skupini je bilo razvitih daleč največ elek-

tronskih teodolitov. Zaradi množične uporabe na gradbiščih jih pogosto imenujemo tudi gradbeni teodoliti. Danes obstaja na desetine različnih modelov enostavnih teodolitov, ki jih izdelujejo različni proizvajalci, kot so Topcon, Sokkia, Pentax, Spectra Precision, Leica Geosystems, CST Berger, Johnson, geo-FENNEL, South, Foif, Boif, Datum, Northwest, Futura, David White, Kolida, Ruide, UOMZ itd. Posebej zanimiva je serija teodolitov Topcon DT-200 (slika 5), ki se neprekinjeno izdeluje od leta 2003 (Topcon, 2009; Topcon, n.d.), kar je redkost v dobi elektronskih instrumentov. Številni teodoliti drugih proizvajalcev se v osnovi zgledujejo po seriji instrumenta DT-200 in so mu zelo podobni. Ko govorimo o elektronskem merjenju dolžin, je treba omeniti teodolit Leica T460D iz leta 1996, ki ga je bilo mogoče uporabljati v kombinaciji z ročnim laserskim razdaljemerom DISTO (Virtual Archive..., n. d.), pa tudi teodolit Ruide Disteo 23 (slika 5) iz leta 2017 z vgrajenim enostavnim elektronskim razdaljemerom za merjenje dolžin do 300 metrov z uporabo reflektorja (Ruide, n. d.). Najenostavnejši teodoliti kitajskih proizvajalcev se lahko danes kupijo že za 500 USD do 1000 USD, medtem ko se najboljši modeli enostavnih teodolitov proizvajalcev Leica Geosystems, Topcon in Sokkia prodajajo za približno 4000 USD.



Slika 5: Enostavni elektronski teodoliti: Zeiss ETH-4 (Opton, 1986), Topcon DT-200 (objavljeno z dovoljenjem GeoWild Sarajevo) in Ruide Disteo 23 (Ruide, n. d.).

6 PRECIZNI ELEKTRONSKI TEODOLITI ZA POSEBNE NAMENE

6.1 Splošne lastnosti preciznih elektronskih teodolitov

Najbolj izpopolnjeno in najmanjšo skupino teodolitov predstavljajo instrumenti visoke natančnosti, ki so namenjeni kompleksnim nalogam. Tu uporaba enostavnih teodolitov in tahimetrov ni primerna. Standardni odklon merjene horizontalne smeri in zenitne razdalje takšnih instrumentov znaša $0,5''$ ($\sigma_{\text{ISO-THEO Hz,V}}$). Uporabljajo dinamični in statični absolutni način čitanja limbov. Opremljeni so z dvoosnimi kompenzatorji in kompleksnimi programi za terensko uporabo. To so posebej zasnovani teodoliti, ki so bili razviti predvsem za industrijsko uporabo, kot so določanje položaja ali usmerjanje strojnih elementov, ugotavljanje premikov

v določeni smeri, merjenje vertikalnih premikov ali zasuka gibljivih delov, laboratorijske meritve itd. Uporabljajo se tudi za kontrolne meritve med gradnjo in obratovanjem raznih objektov ipd. Takšni teodoliti so najpomembnejši del industrijskih merskih sistemov, kjer z zunanjim urezom določamo velikost in obliko objektov z visoko relativno natančnostjo. Za reševanje posebnih merskih nalog so v precizne elektronske teodolite vgrajeni posebni dodatki, kot so panfokalna optika daljnogleda, pogonski stopenjski motorji, CCD-kamere, sistemi za samodejno izostritev slike, sistemi za samodejno viziranje označenih in neoznačenih merskih točk ipd. Za posebne naloge inženirske geodezije so razvili tudi precizne elektronske teodolite, na katere je mogoče namestiti elektronske razdaljemere. V preglednici 1 so prikazani osnovni tehnični podatki izbranih modelov enostavnih, večnamenskih (univerzalnih) in preciznih elektronskih teodolitov.

Preglednica 1: Pregled elektronskih teodolitov (Spectra Geospatial, 2015; Topcon, 2009; Zeiss, 1995; Sokkia, n.d.; Leica Geosystems, 2009).

	Enostavni teodoliti		Univerzalni teodoliti		Precizni teodoliti
Proizvajalec in tip teodolita	Nikon NE-100	Topcon DT205L	Zeiss Eth2	Sokkia DT-4F	Leica TM6100A
Leto izdelave	2005	2003	1989	1999	2010
Način čitanja, kotna razdelba	Relativni, inkrementalna razdelba	Absolutni	Relativni, inkrementalna razdelba	Relativni, inkrementalna razdelba	Absolutni, štiri kodne linije
Natančnost merjenja kotov	10"	5"	0,5"	5"	0,5"
Vrsta kompenzatorja delovno področje / natančnost	–	Enoosni 3' / –	Dvoosni 2'40" / 0,5"	Dvoosni 3' / 1"	Dvoosni 4' / 0,5"
Uporabniški vmesnik	Zaslona (2 vrstici po 20 znakov), 5 tipk – v obeh krožnih legah	Zaslona (7 alfanumeričnih in grafičnih podatkov), 6 tipk – v obeh krožnih legah	Zaslona (2 vrstici s po 10 znaki) v obeh krožnih legah, 3 tipke na desni strani teodolita	Zaslona (4 vrstice po 20 znakov), 5 tipk – v obeh krožnih legah	Barvni zaslon na dotik (resolucija 320 x 240 pikselov), 34 tipk – v obeh krožnih legah
Masa teodolita	4,5 kg z notranjo baterijo	4,2 kg z notranjo baterijo	4,7 kg z notranjo baterijo 2,4 Ah	4,8 kg z notranjo baterijo 1,35 Ah	8,5 kg z notranjo baterijo 4,8 Ah
Registrator podatkov /kapaciteta /masa	–	FC2000* /128 MB /0,8 kg	REC500* /do 352 KB /1,2 kg	SDR 33* /640 KB (razširitev do 4 MB) / 0,74 kg	Notranji spomin / 256 MB CompactFlash kartica/ do 1024 MB / 10 g
Posebnosti	Stopnja zaščite pred prahom in vodo: IP54, napajanje iz 6 standardnih baterij AA	Stopnja zaščite pred prahom in vodo: IP66, napajanje iz 4 standardne baterije AA, laserski daljnogled	Možnost namestitve elektronskih razdaljemerov tipa Eldi 4 in Eldi 10	Kombiniranje s faznim razdaljemerom REDMini3 in MM100 (merjenje dolžin brez reflektorja do 100 m)	Panfokalni daljnogled z avtokolimatorjem (povečava od 13 x do 59 x), direktni piezo pogon alhidate in daljnogleda, lasersko grezilo, programi »on board«

*Zunanji registrator/računalnik, ki se s kablom priključuje na teodolit.

6.2 Razvoj preciznih elektronskih teodolitov

Tovarna Zeiss Oberkochen je na podlagi integriranega tahimetra Elta 2 (Tuno in sod., 2012) leta 1982 dala na trg precizni elektronski teodolit ITh 2. Instrument je opremljen s statičnim absolutnim sistemom čitanja limbov, standardno odstopanje merjene horizontalne smeri in zenitne razdalje pa znaša 0,6" ($\sigma_{\text{DIN18723-THEO-Hz,V}}$). Zeiss je razvil poseben sistem za industrijske meritve, pri katerem so signalizirano točko vizirali istočasno z dvema takšnima teodolitoma (zunanji urez). Prenos merskih podatkov na namizni računalnik je potekal samodejno, s posebnim programom pa so se računale 3D-koordinate opazovanih točk (Zeiss Archiv, n.d.). Podobne sisteme so hitro pričeli razvijati tudi drugi proizvajalci, njihova osnova pa so bili univerzalni precizni teodoliti Wild T2000 in Kern E2 (glej poglavje 4). Od leta 1984 je tovarna Wild izdelovala teodolit T2000S z bistveno boljšim panfokalnim daljnogledom, ki je omogočal vgradnjo avtokolimacijskega dodatka v okularni del. Teodolit T2000S je imel zmogljivosti standardnega T2000, zaradi naprednejšega daljnogleda pa je imel veliko širše področje uporabe (Wild, 1985). Z nadaljnjim izpopolnjevanjem tega instrumenta je leta 1989 nastal teodolit T3000, katerega daljnogled je Wild razvil v sodelovanju z Evropsko vesoljsko agencijo (50 years of..., 2014). Posebej zanimiva je njegova motorizirana različica TM3000D, na katero je mogoče namestiti razdaljemer, instrument pa upravljamo z »joystickom« prek zunanje enote (Wild Leitz, 1989). Podoben servoteodolit E2-ST je nekoliko prej razvila tovarna Kern. Instrument E2-ST je omogočal grobo viziranje na podlagi znanih koordinat stojišča in merjene točke, v postopku finega viziranja pa se je položaj prizme na ciljni točki določil na podlagi maksimalnega odboja žarka pri merjenju dolžin. Precizni motorizirani teodoliti z razdaljemerji so omogočali avtomatizacijo dela pri ugotavljanju premikov in deformacij naravnih in grajenih objektov (Kern Swiss, 1988). Takrat nastanejo tudi prvi serijsko izdelani »inteligentni« merski sistemi, ki omogočajo samodejno fino viziranje. To so videoteodoliti Kern E2-SE in Wild TM3000V, ki so imeli poleg pogonov za vrtenje okrog osi in izostritev slike vgrajeno tudi CCD-videokamero. Merski sistem sta sestavljala dva ali več videoteodolitov, ki sta v povezavi s programsko opremo za grafično obdelavo omogočala visoko precizne kotne meritve na označene ali neoznačene točke objekta. Na podlagi meritev je bilo mogoče določiti prostorske koordinate točk (Benčić in Solarić, 2008).

Novo obdobje v razvoju preciznih elektronskih teodolitov je zaznamoval pojav instrumentov iz serije TPS5000 (TM5005, TM5100 in TM5100A), ki jih je tovarna Leica pričela izdelovati leta 1996. V nasprotju z najbolj natančnimi elektronskimi teodoliti iz osemdesetih let, ki so nastali z razvojem univerzalnih preciznih instrumentov in so imeli zelo široko področje uporabe, je instrument TM5100A zasnovan kot teodolit za posebne industrijske meritve. Od svojega predhodnika T3000 je nasledil panfokalni daljnogled visoke kakovosti. Daljnogled omogoča viziranje merskih točk na razdaljah, večjih od 0,6 metra, povečava daljnogleda pa se spreminja z oddaljenostjo do točke od 13-kratne do 59-kratne, odvisno od uporabljenega okularja. Natančnost viziranja je zato tako rekoč neodvisna od oddaljenosti do merske točke. Avtokolimacijski dodatek je vgrajen v okularnem delu daljnogleda. Namesto dinamičnega načina čitanja limba imajo teodoliti serije TPS5000 vgrajen naprednejši absolutni način, kjer je uporabljeno čitanje na štiri kodne linije in ne le na eno (kot pri na primer T1100). Tako odpravimo sistematične in periodične pogreške, kar omogoča doseganje zelo visoke natančnosti velikosti 0,5" ($\sigma_{\text{ISO-THEO Hz,V}}$) (Gottwald in sod., 1997; Leica Geosystems, 2001).

Leica Geosystems je leta 2010 predstavila najnovejši precizni elektronski teodolit TM6100A. Instrument ima podoben daljnogled kot TM5100A in je oblikovalsko bolj dovršen. Ima VGA LCD-barvni zaslon

na dotik, ki podpira prikaz kompleksne grafike. Notranji pomnilnik ima občutno več prostora (256 MB), PCMCIA-kartice pa so nadomestili z modernimi CompactFlash karticami (Leica Geosystems, 2009). Velik napredek tega instrumenta glede na predhodne modele je viden v vgradnji najsodobnejših pogonov – Leica Direct Drive, ki deluje po načelu obrnjenega piezoelektričnega efekta in neposredno pretvarja električno napetost v mehansko gibanje (Solaric in sod., 2011).



Slika 6: Servoteodolit Kern E2-ST (objavljeno z dovoljenjem Stadtmuseum Aarau, Sammlung Kern. Foto: Aldo Lardelli), video-teodolit Wild TM3000V (Wild Leitz, 1989) in industrijski teodolit Leica Geosystems TM6100A (objavljeno z dovoljenjem Geokom Sarajevo).

7 SKLEP

Zanimivo je spremljati, kako se je elektronski teodolit od svojih prvih okornih prototipov skozi leta razvil v učinkovit merski sistem, ki je uporaben za reševanje različnih nalog. Viden razvoj teh instrumentov sega v zgodnja 80. leta prejšnjega stoletja. Že takrat je mogoče elektronske teodolite razlikovati glede na namen, natančnost, funkcionalnost itd. V tem prispevku so teodoliti razvrščeni v tri osnovne skupine. Meje med skupinami niso strogo določene, saj se njihove značilnosti včasih prepletajo. Univerzalni elektronski teodoliti so kot osnovni sestavni deli modularnega sistema tahimetrov prevladovali v osemdesetih in devetdesetih letih prejšnjega stoletja. Takšne instrumente so postopoma zamenjali integrirani tahimetri in v poznih devetdesetih letih se je zdelo, da »čistokrvni« teodolit nima več kaj iskati med modernimi geodetskimi instrumenti. Kljub vse večji uporabi številnih različnih modelov elektronskih tahimetrov, instrumentov GNSS, laserskih skenerjev itd. klasični elektronski teodolit kot samostojni instrument preživi vse do danes in ima še vedno pomembno vlogo. Razlog so predvsem številni nezahtevni uporabniki, ki potrebujejo predvsem poceni instrument za preproste kotne meritve ter reševanje osnovnih praktičnih nalog na gradbiščih. Za zadovoljevanje takšnih potreb so preprosti elektronski teodoliti najbolj smiselna izbira. Zaradi poceni in tehnološko nezahtevne izdelave jih proizvajajo v številnih tovarnah v različnih državah in jih prodajajo po zelo nizkih cenah. Verjetno se bo razvoj te skupine teodolitov nadaljeval,

tehnične rešitve pa se bodo osredotočale na izboljšanje lastnosti, ki omogočajo delo v oteženih razmerah na gradbiščih. Edini proizvajalec vrhunskih preciznih elektronskih teodolitov je ostala tovarna Leica Geosystems. Aktualni instrument TM6100A dokazuje, da tudi v sodobnih razmerah obstaja potreba po tej vrsti instrumentov. V primerjavi z osemdesetimi in devetdesetimi leti prejšnjega stoletja, za katera so bili značilni večnamenski elektronski teodoliti visoke natančnosti, se je danes obdržal le instrument, ki je namenjen ozkemu segmentu opravil v okviru industrijskih meritev. Leica in panfokalni avtokolimacijski daljnogled neprekosljive kakovosti je zagotovo temelj za razvoj prihodnje generacije industrijskih teodolitov.

Zanimivo je, da so današnji elektronski teodoliti z izjemo modela Leica TM6100 kljub hitremu in nezaprsknemu napredku geodetske merske tehnike v zadnjem času po svojih značilnostih, z izjemo boljše odpornosti proti prahu in vodi, v izrazito podrejenem položaju glede na univerzalne elektronske teodolite, izdelane pred dvema ali tremi desetletji.

Literatura in viri:

- 50 years of Wild Heerbrugg and Leica Geosystems in the UK (2014). <http://www.pvpubs.com/50YearsOfLeica/50YEARSOFLEICA/HTML/files/assets/common/downloads/publication.pdf>, pridobljeno 26. 4. 2019.
- Aeschlimann, H. (1978). Ein Gerätesystem zur automatischen Registrierung von Messwerte. Aarau: Kern & Co. AG.
- Aeschlimann, H. (2008). Some Remarks about the Technical Background of Kern & Co Aarau. Stockholm: Integrating the Generations, FIG Working Week 2008.
- Ali, A. E. (1991). Electronic Theodolites: Comparison Test. *Journal of Surveying Engineering*, 117 (1), 3–8. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(1991\)117:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(1991)117:1(3))
- Ali, A. E. (2001). Stadia Tacheometry with Electronic Theodolites. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 13 (1), 25–36. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1018-3639\(18\)30723-2](https://doi.org/10.1016/S1018-3639(18)30723-2)
- Benčić, D. (1990). Geodetski instrumenti. Zagreb: Školska knjiga.
- Benčić, D., Solarić, N. (2008). Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici. Zagreb: Školska knjiga.
- Bingley, R. M. (1990). Electronic theodolite intersection systems. PhD thesis. University of Nottingham.
- 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>
- Cooke, F. (1968). Breithaupt Digigon Digital Theodolite. *Applied Optics*, 7 (6), 1005–1006. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.7.001005>
- Courbon, P. (2007). Topographie: un demi-siècle d'évolution technologique, partie 2/4. *Revue XYZ*, 111 (2), 31–42.
- Deumlich, F., Staiger, R. (2002). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag.
- Erickson, K. E. (1978). The K&E Vectron Electronic Surveying System. *The Ontario Land Surveyor*, 1978, 6–8.
- Fialovszky, L. (1991). *Surveying Instruments and their Operational Principles*. Developments in Geotechnical Engineering, 62. Amsterdam: Elsevier Science.
- Hauf, M. (1978). *Elektronnye teodolity i taheometry*. Moskva: Nedra.
- Herr, R. (n. d.). Sammlung des Geodätischen Instituts: Heliotrope, Passageinstrumente, Spiegelkreise, Sextanten, Tachymeter, Theodolite, Universalinstrumente und Modelle. Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover. <https://www.gih.uni-hannover.de/fileadmin/gih/pdf/instrumente/theodolite.pdf>, pridobljeno 10. 1. 2019.
- Gottwald, R., Müller, I., Obrist, M. (1997). Leica TDA5000 – Short Range Performance Tests using Corner Cube and Tooling Ball Reflectors. Argonne IL: IWAA97 – 5th International Workshop on Accelerator Alignment.
- Imre, L., Magyar, G., Szántó, T., Telek, G. (2015). *Feyzetek a Magyar Optikai Művek és utódai történetéből 1876–2015*. Budapest: MOM Emlékalapítvány.
- Kamphorst, W. (1987). Marktverzicht tachymeters met registratiemogelijkheden. *Nederlands geodetisch tijdschrift Geodesia*, 29 (7-8), 275–281.
- Katowski, O., Salzmann, W. (1983). The angle measurement system in the Wild Theomat T-2000. Wild Heerbrugg: Wild Heerbrugg AG.
- Kern Swiss (1985a). Kern E2 Elektronischer Präzisions-theodolit. Aarau: Kern & Co. AG.
- Kern Swiss (1985b). Modulares Gerätesystem Kern. Aarau: Kern & Co. AG.
- Kern Swiss (1988). E2-ST Der Servotachymeter. Aarau: Kern Swiss.
- Ketteman, M. R. (1985). The application of automated mine survey systems to mine surveying practice (PhD thesis). Nottingham: University of Nottingham.
- Leica (1993). *Vermessungsinstrumente*. Heerbrugg: Leica AG.
- Leica Geosystems (1998). Leica TPS – System1000, User Manual. Heerbrugg: Leica Geosystems AG.
- Leica Geosystems (2001). TPSS000. Heerbrugg: Leica Geosystems AG.
- Leica Geosystems (2009). Leica TM6100A, User Manual. Heerbrugg: Leica Geosystems AG.
- Matthews, V. (1996). *Vermessungskunde, Teil 1: Fachgebiete Architektur - Bauingenieurwesen – Vermessungswesen*. Stuttgart: Teubner.

Opton (1986). Opton ETH4. Oberkochen: Opton Feintechnik GmbH.

Point of Beginning (2000). Survey grade total stations. Point of Beginning, January 2000, 31–58.

Ruide (n. d.). Disteo 23. Guangzhou: Ruide.

Rüeger, J. M., Alanko, G. (1995). Building monitoring with a surveying robot. *Survey Review*, 33 (258), 218–230. DOI: <https://doi.org/10.1179/sre.1995.33.258.218>

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>

Solarić, N., Solarić, M., Barković, Đ. Zrinjski, M. (2011). Nova tehnološka dostignuća u konstrukcijama integriranih mjernih stanica. *Geodetski list*, 65 (88, 4), 311–322.

Solarić, N., Špoljarić, D. (1992). Accuracy of the automatic astronomical azimuth determination by Polaris with Leica-Kern E2 electronic theodolite. *Surveying and Land Information Systems*, 52 (2), 80–85.

Sokkia (n. d.). DT2E-DT4E-DT4F – Voll-digitale Theodolite mit automatischer Zweiachs-kompensation. Tokyo: Sokkia Co., Ltd.

Sokkia Museum (2020). https://www.topcon.co.jp/positioning/sokkia/sokkia_museum, pridobljeno 3. 1. 2020.

Spectra Geospatial (2015). Nikon NE-100 and NE-101 Theodolites, <https://spectrageospatial.com/nikon-theodolites>, pridobljeno 7. 1. 2019.

Sydenham, P.H. (1969). Manual and automatic large-scale dimensional metrology. PhD thesis. Coventry: University of Warwick.

The California Surveyor (1986). The first E – Zeiss ETH4. *California Surveyor*, (83) 7.

Theodolite with coded indications. (1965). <https://www.google.com/patents/US3200696#forward-citations>, pridobljeno 7. 5. 2018.

Topcon (2009). DT-200/DT-200L Series. Tokyo: Topcon Corporation.

Topcon museum. (2020). <http://www.topcon.co.jp/en/positioning/museum>, pridobljeno 3. 1. 2020.

Tuno, N. (2005). Analiza tačnosti mjerenja pravaca elektronskim teodolitom. *Geodetski glasnik*, 38, 14–22.

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/10.15292/geodetski-vestnik.2010.04.643-66>

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>

Zeiss (1995). ETH2 Electronic Precision Theodolite. Oberkochen: Carl Zeiss.

Zeiss Archiv (n. d.). <http://www.archive.zeiss.de>, pridobljeno 3. 9. 2019.

Zetsche, H. (1968). Die Bildung der Sekundenschritte beim Digitaltheodolit Digigon. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 1968 (1), 22.

Zwickert, E. (1964). Der Fennel-Code-Theodolit FLT. *Vermessungstechnische Rundschau*, 1964 (10), 397.

Virtual Archive of Wild Heerbrugg – Product Overview Theodolites. (n.d.). <http://www.wild-heerbrugg.com/theodolites.htm>, pridobljeno 3. 9. 2019.

Wild (1985). Elektronische Theodolite und Tachymeter WILD T2000, TC2000, T2000S. Heerbrugg: Wild Heerbrugg AG.

Wild Leitz (1989). WILD TM3000 Automatische messstation. Heerbrugg: Wild Leitz AG.

Yang, Z., Li, G., He, L. (2011). Measurement methods and precision analysis of optical collimation. *Infrared and Laser Engineering*, 40 (2), 282–286.



Tuno N., Savšek S., Mulahusić A., Kogoj D. (2020). Elektronski teodoliti – razvoj in klasifikacija. *Geodetski vestnik*, 64 (2), 182–197. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.02.182-197>

izr. prof. dr. Nedim Tuno, univ. dipl. inž. geod.
 Univerza v Sarajevu, Građevinski fakultet
 Patriotske lige 30, BlH-71000 Sarajevo
 e-naslov: nedim_tuno@gf.unsa.ba

doc. dr. Simona Savšek, univ. dipl. inž. geod.
 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
 Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
 e-naslov: simona.savsek@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Admir Mulahusić, univ. dipl. inž. geod.
 Univerza v Sarajevu, Građevinski fakultet
 Patriotske lige 30, BlH-71000 Sarajevo
 e-naslov: admir_mulahusic@gf.unsa.ba

izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.
 Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
 Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
 e-naslov: dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si