

UPORABA AIFM-TEHNOLOGIJE ZA DIMENZIJSKO KONTROLO TURBINSKIH DELOV

USE OF AIFM TECHNOLOGY IN DYMENSIONAL CONTROL OF TURBIN PARTS

Iztok Slatinšek, Dušan Kogoj

UDK: 528.546
 Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.04
 Prispelo: 7.1.2014
 Sprejeto: 12.11.2014

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2014.04.667-680
 PROFESSIONAL ARTICLE
 Received: 7.1.2014
 Accepted: 12.11.2014

IZVLEČEK

Klasični načini dimenzijske kontrole turbinskih delov so zahtevni in časovno potratni, njihova natančnost je zelo odvisna od izkušenosti merske ekipe. Z absolutno interferometrijo laserskih sledilnikov je mogoče zagotoviti boljše merske rezultate, merjenje pa se izvede enostavneje in bistveno hitreje. Vplive na merjenje je v laboratorijskih pogojih mogoče nadzorovati, težave pa se lahko pojavijo med meritvami na odprtih deloviščih. V prispevku sta opisana tehnologija laserskih sledilnikov ter njeno testiranje pri izdelavi in montaži turbinskih delov spodnesavskih hidroelektrarn.

ABSTRACT

Conventional measuring methods in a dimensional control of turbine parts are demanding and time-consuming, their accuracy depends on experiences of measuring team. Absolute interferometry of laser trackers assures higher measuring accuracy, measuring time is considerably shorter. It is possible to control the influences on measurement in laboratory, whereas more problems may arise during outside measurements. This paper presents the laser tracker technology and its testing in dimensional control of turbine parts of hydropower plants on the lower Sava river.

KLJUČNE BESEDE

gradnja hidroelektrarn, turbine, dimenzijska kontrola, laserski sledilnik

KEY WORDS

hydropower stations, turbines, dimensional control, laser tracker

1 UVOD

Pri gradnji hidroelektrarn se srečujemo s kontrolnimi meritvami velikih in zahtevnih strojnih delov. Merjenje je treba opraviti najprej v tovarni po končni izdelavi, nato pa še na kraju vgradnje, in sicer na različnih objektih. Postopek je največkrat zelo zahteven in časovno potraten. Meritve pogosto niso povsem neodvisne. Največkrat so vezane na obdelovalne stroje, na katerih se posamezni strojni deli izdelujejo. Naš cilj je, da z uporabo sodobne tehnologije skrajšamo postopek merjenja, povečamo natančnost in neodvisnost ter znižamo stroške izmere. Na podlagi rezultatov testiranj želimo poenostaviti in poceniti način izmere, ki bi ga opredelili že med pripravo razpisne dokumentacije.

Laserski sledilnik je najsodobnejša tehnologija za merjenje v strojni, avtomobilski in letalski industriji. Pri merjenjih ob izdelavi in montaži strojne opreme za hidrocentrale naj bi opredelili nov, neodvisen merski postopek, s katerim bi zagotovili manjšo merilno negotovost, bolj izločili subjektivno napako operaterja oziroma merilca (človeška napaka) in povečali število izmerjenih merilnih točk.

Uporabnost tehnologije laserskih sledilnikov smo testirali pri dimenzijski kontroli dveh zahtevnih strojnih delov, ki imata zelo kompleksno, prostorsko ukrivljeno geometrijo. To sta gonilnikov obroč, katerega del ima obliko krogle, in gonilna lopata, ki ima za meritve zahtevno prostorsko obliko. Laserski sledilnik nima nobene skupne komponente z obdelovalnimi stroji, na katerih se obdelujejo merjeni strojni deli. Meritve bodo torej popolnoma neodvisne.

2 LASERSKI SLEDILNIKI

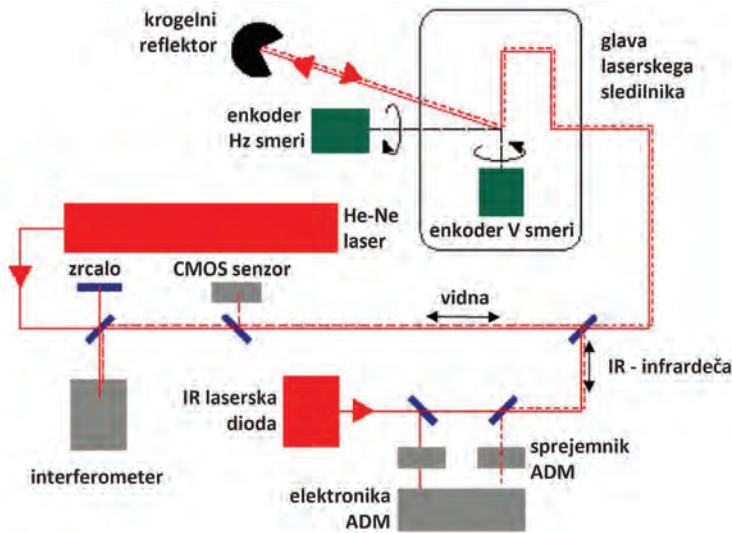
Laserski sledilnik (*laser tracker*, *Lasertracker*) je eden najnatančnejših instrumentov za merjenje prostorskih oblik. Najpogosteje ga srečamo v avtomobilski in letalski industriji. Z njim merimo prostorske koordinate krogelnega reflektorja (SMR-reflektor – *sphere mounted retro reflektor*), s katerim tipamo merjeni objekt. Instrument samodejno sledi premiku reflektorja. Z laserskim sledilnikom lahko izvajamo samostojna merjenja, lahko pa je le del multisenzorskega sistema, na primer v kombinaciji z digitalno kamero (videogrametrija) in triangulacijskim ročnim skenerjem (Staiger, 2009).

Zgodovina laserskih skenerjev sega v pozna osemdeseta leta prejšnjega stoletja, ko so se začeli uveljavljati. Osnovni interferenčni relativni način merjenja dolžin, na katerem meritve temeljijo, je bil v sredini devetdesetih let dopolnjen s sistemom natančnega absolutnega merjenja dolžin. Laserski sledilniki so predvsem laboratorijski instrumenti oziroma instrumenti, namenjeni za uporabo v zaprtih prostorih. Njihova notranja natančnost je tako visoka, da je uporaba v zunanjem okolju največkrat zelo vprašljiva, in sicer zaradi spremenljivih optičnih lastnosti atmosfere, katerih posledica je spremenljiv lomni količnik zraka.

Laserski sledilnik ima podobno kot tahimeter elektronske senzorje za merjenje smeri (horizontalne in vertikalne) in dolžin. To so senzorji največje mogoče natančnosti. Instrument samodejno sledi premikajoči se tarči – treba je torej zagotoviti pogone ter avtomatske sisteme za sledenje tarče (AST) in natančno viziranje tarče (AVT) (Valh et al., 2008). V nekaterih sledilnikih se uporabljajo sistemi usmerjanja, kot jih poznamo pri laserskih skenerjih (Leica AI LT-901 – vertikalno odklanjanje žarka) (URL 8).

Tehnologija laserskih sledilnikov se je razvijala postopoma. Natančni sistemi za merjenje smeri so se razvijali podobno kot tahimetri, le da so bili korak pred njimi. Tudi sistemi za natančno sledenje in natančno viziranje so se razvijali podobno kot tahimetri, le da je pri njih vse prilagojeno merjenju na

krajše oddaljenosti in v zaprtih prostorih. Tudi sistemi za merjenje dolžin so se postopno dopolnjevali.



Slika 1: Shematski prikaz zgradbe laserskega sledilnika (Gallagher, 2003).

Glede na način merjenja dolžin ločimo tri vrste laserskih sledilnikov, in sicer:

- IFM (*InterFeroMetry*) – dolžina se meri le interferenčno;
- AIFM (*Absolute InterFeroMetry*) – osnovna meritev dolžine je interferometrična, v ekstremnih pogojih (prekinitev, daljše oddaljenosti) jo zamenja tehnologija absolutnega merjenja dolžin;
- ADM (*absolute distance measurement*) – dolžina se meri na precizni fazni (ali impulzni način), laserski sledilniki so v bistvu zelo natančni univerzalni tahimetri.

Izvor svetlobe klasičnih IFM-laserskih sledilnikov je plinski laser, običajno helij neonov (He-Ne). Za absolutno merjenje dolžin (AIFM- in ADM-sledilniki) se kot izvor svetlobe uporablja laserska dioda, ki oddaja infrardečo svetlobo (IR-dioda). Instrument usmerja laserski žarek proti reflektorju z zrcalom, ki se odklanja okrog dveh osi – vertikalne Z-osi (zrcalo je na »alhidadi«) in horizontalne Y-osi (slika 1). Pogoni so motorni oziroma piezo. Viziranje tarče je doseženo z dvodimenzionalnim svetlobno občutljivim senzorjem, ki je ključna, kritična točka laserskega sledilnika. Poznamo senzorje CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) v tahimetrih (Valh et al., 2008). Ista tehnologija se uporablja v sledilnikih. Sledenje pa je lahko izvedeno drugače. Žarek se mora vrniti v instrument brez večjih motenj in zamikov. Premikajočemu se krogelnemu reflektorju žarek sledi tako rekoč brez časovnih zakasnitev, kar se zagotavlja z iskanjem največje moči merskega signala – najmanjše razlike med močjo referenčnega in merskega žarka. Ta razlika se izmeri s senzorjem PSD (*position sensitive detector*). PSD-senzor je posebna pravokotna ploskovna fotodioda, sestavljena iz uporovne plasti, pritrjene na silicijevo podlago. Na robovih so nameščene elektrode, ki zaznavajo fotonapetost. Velikost fotonapetosti na elektrodi je odvisna od oddaljenosti mesta vpadlega žarka od elektrode. Koordinate težišča svetlobne lise vpadlega žarka so dovolj, da se izračunajo vrednosti popravka smeri. Na podlagi popravka smeri se določi zasuk zrcala, ki usmerja žarek proti tarči (Joeckl et al., 2008).

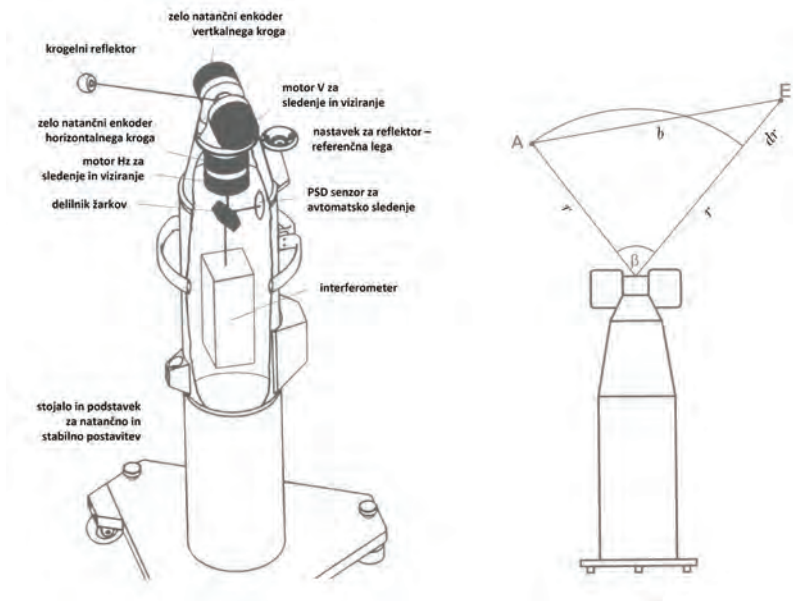
Vertikalna in horizontalna smer se določita na podlagi položaja zrcala z natančnimi enkoderji smeri – elektronski način čitanja, podobno kot pri tahimetru. Prostorska smer laserskega žarka je s tem določena.

2.1 IFM-laserski sledilniki

Pri IFM-laserskih sledilnikih merjenje dolžin temelji na interferenčnem načelu. Interferometer ne meri absolutne dolžine, ampak le radialne premike reflektorja dr (slika 2). Če premaknemo reflektor s točke A v točko E, sistem izmeri radialni premik dr , in iz dveh zenitnih razdalj z_A in z_E ter dveh horizontalnih smeri a_A in a_E določi prostorski kot β .

Polarni dolžini r in $r+dr$ za zdaj še nista poznani. Za določitev vrednosti r obstaja več možnosti:

- izhodiščna točka A je na instrumentu – imenujemo jo referenčno ležišče prizme (domača točka – *home point*);
- na podlagi referenčne – znane dolžine b .



Slika 2: IFM-laserski sledilnik in merjenje dolžine (Joeckl et al., 2008).

Naj bo b referenčna – znana dolžina. Dolžino r izračunamo iz kosinusovega stavka:

$$r = \sqrt{\frac{dr^2}{4} + \frac{b^2 - dr^2}{2 \cdot (1 - \cos \beta)}} - \frac{dr}{2}, \tag{1}$$

$$\cos \beta = \cos z_A \cdot \cos z_E + \sin z_A \cdot \sin z_E \cdot \cos(a_E - a_A)$$

Ob poznanem r lahko izmerimo oddaljenost do vsake naslednje točke i : $D_i = r + dr_i$. Če se žarek med merjenjem prekine, izgubimo referenčno dolžino – merjenje se prekine. Za vnovično določitev absolutne dolžine do merjene točke lahko reflektor postavimo na referenčno ležišče, oddaljenost te točke od in-

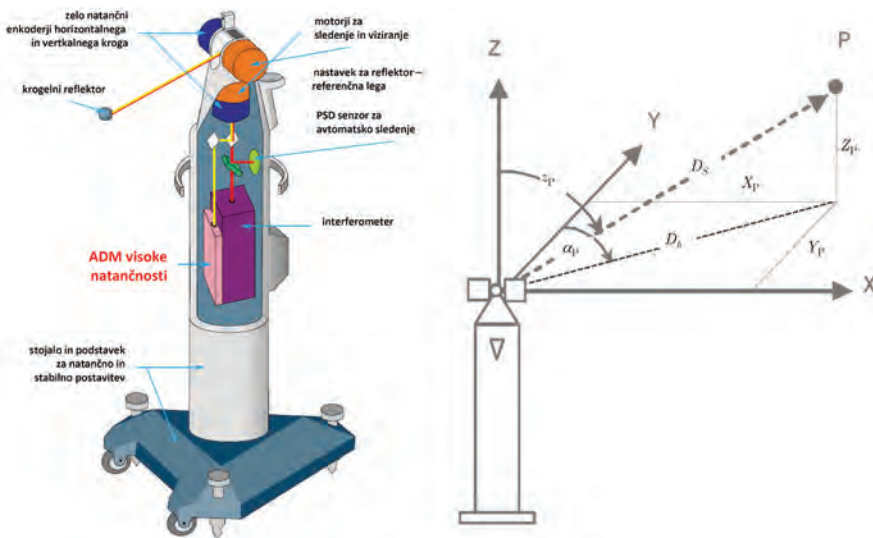
strumenta je točno znana. Točko definira ležišče v obliki polkrogle, v katero položimo krogelni reflektor. Nadaljujemo merjenje in pazimo, da se žarek spet ne prekine.

Na podlagi izmerjenih polarnih koordinat instrument lahko računa pravokotne prostorske koordinate v poljubno izbranem koordinatnem sistemu, običajno je to koordinatni sistem instrumenta, na primer:

$$\begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + (r + dr) \begin{bmatrix} \sin(a_E - a_A) \cdot \sin z_E \\ \cos(a_E - a_A) \cdot \sin z_E \\ \cos z_E \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 AIFM-laserski sledilniki

AIFM-laserski sledilniki merijo dolžine na dva načina (Slika 3). Poleg interferometra ima instrument razdaljemer, ki meri absolutne vrednosti dolžin (*absolute distance meter*) (URL 9). Razdaljemer deluje na faznem ali impulznem načinu in ima v primerjavi s klasičnimi razdaljermi zelo omejen doseg, običajno do 50 metrov (URL 8; URL 3), izjemoma 120 metrov (URL 1). Osnovno merjenje je sicer interferometrično, ob prekinitvi signala pa se dolžina izmeri na način ADM. Vračanje prizme na referenčno točko zato ni potrebno.



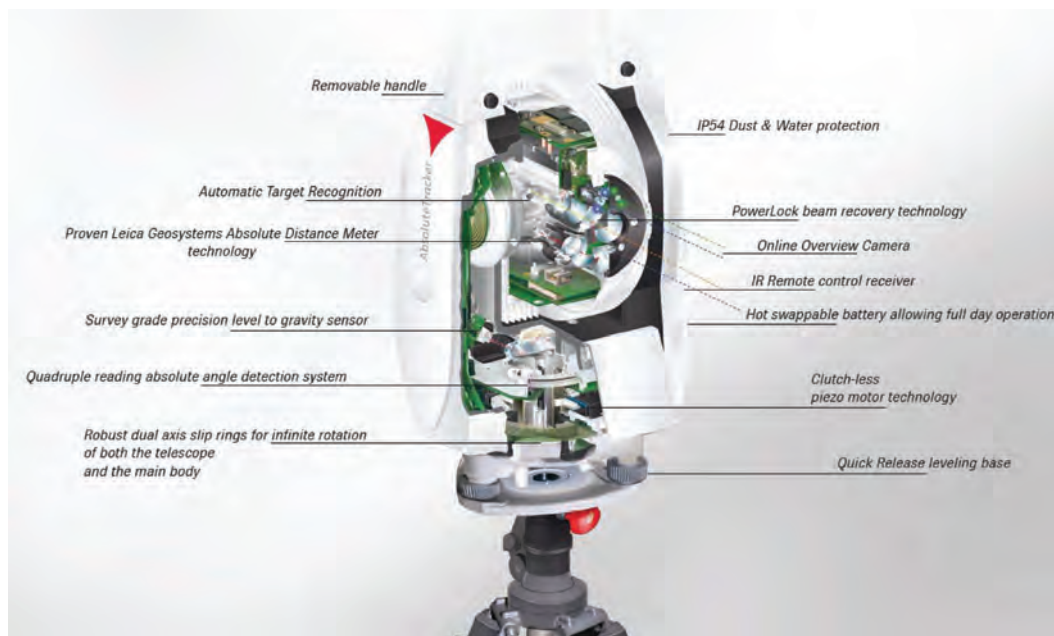
Slika 3: AIFM-laserski sledilnik in merske vrednosti (Gallagher, 2003; Juretzko in Richter, 2006).

Merske vrednosti so v osnovi polarne prostorske koordinate točke P v koordinatnem sistemu sledilnika – horizontalni kot α_p , zenitna razdalja z_p in poševna dolžina D_s . Transformacijo v pravokotni koordinatni sistem sledilnika določimo z enačbo:

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = D_s \begin{bmatrix} \sin \alpha_p \cdot \sin z_p \\ \cos \alpha_p \cdot \sin z_p \\ \cos z_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3 ADM-laserski sledilniki

Laserski sledilniki ADM (*absolute distance measurement*) so po načinu merjenja in konstrukciji podobni sodobnim tahimetrom. Sistem sledenja reflektorju je v bistvu enak kot pri tahimetrih (Leica – sistem ATR), običajno imajo vgrajen tudi sistem samodejnega iskanja AIT (Leica Absolute Tracker AT401 – Power Search) (Slika 4). Dolžine se merijo s tehnologijo ADM, precizna merjenja dolžin s faznim ali impulznim načinom (Joeckl et al., 2008), ki pri Leici sledi tehnologiji, uporabljeni že pri znamenitem instrumentu Kern Mekometer ME 5000 v devetdesetih letih prejšnjega stoletja (URL 8). Interferenčnega merjenja dolžin pri sledilnikih ADM ni več.



Slika 4: ADM laserski sledilnik Leica Absolute Tracker AT401 – izsek iz originalne brošure (URL 6).

Merske vrednosti so polarne prostorske koordinate merjene točke P v koordinatnem sistemu sledilnika – horizontalna smer α_p , zenitna razdalja z_p in poševna dolžina D_s . Preračun v pravokotni koordinatni sistem instrumenta je določen z enačbo (3).

2.4 Proizvajalci in natančnost

Na trgu zasledimo tri glavne ponudnike laserskih sledilnikov – to so švicarska tovarna Leica Geosystems (*Hexagon Metrology*) ter ameriška Faro in Automated Precision Inc. (API). Vsi trije proizvajalci ponujajo tako AIFM- kot ADM-laserske sledilnike, njihove tehnične lastnosti navajajo vsak po svoje (URL 1; URL 2; URL 3; URL 4; URL 5; URL 7; URL 8). Po pravilu so v tehničnih podatkih zbrane najbolj bistvene informacije o instrumentu.

Proizvajalci ločeno podajajo kotno in dolžinsko natančnost za različne oddaljenosti in način merjenja. Natančnost merjenja dolžin IFM-sledilnikov je velikostnega reda nekaj mikrometrov (primer: AI-

FM-sledilnik Leica AT 901 MR natančnost 0,6 μm pri 5 m in 5,7 μm pri 40 m). Kotna natančnost je podana s prečnim odstopanjem glede na dolžino in je pri oddaljenosti 10 m najmanj petkrat slabša od dolžinske natančnosti (primer: AIFM-sledilnik Leica AT 901 MR natančnost 1,8 μm pri 2 m, 5,3 μm pri 10 m in 18,0 μm pri 40 m). Dolžinska natančnost ADM-sledilnikov je pri razdaljah, manjših od 10 m, do desetkrat slabša od dolžinske natančnosti IFM-sledilnikov. Pri razdaljah 50 m pa sta si dolžinski natančnosti obeh tipov sledilnikov podobni (primer: ADM-sledilnik Leica AT 401 natančnost 7,0 μm v območju od 2 do 40 m).

3 IZVEDBA PRAKTIČNIH MERITEV

Pri merjenju smo uporabili laserski sledilnik API Tracker 3. Izbrani sledilnik je kompakten enostavno prenosljiv instrument, primeren tudi za terenska merjenja. API Tracker 3 je AIFM-laserski sledilnik, osnovni tehnični podatki so zbrani v preglednici 1.

Preglednica 1: Tehnične lastnosti laserskega sledilnika API Tracker 3 (URL 5).

Tip laserskega sledilnika	AIFM
Izvor svetlobe	He-Ne laser, IR laser
Laser razred	2, 1
<i>Merjenje dolžin (AIFM)</i>	
doseg	30 m, 80 m, 120 m
IFM-ločljivost	0,08 μm
IFM-natančnost	
Maximum Permissable Error (MPE) (največja dovoljena napaka)	> ± 0,5 ppm
ADM-ločljivost	0,1 μm
ADM-natančnost	
Maximum Permissable Error (MPE) (največja dovoljena napaka)	>± 15 μm + 1,5 μm/m
<i>Merjenje smeri (sledenje)</i>	
Območje meritev Hz/V	320° / - 60° do + 77°
Ločljivost	± 0,018"
Natančnost (MPE)	3,5 μm/m
Ločljivost sistema	0,1 μm
<i>Hitrost – zmožnosti</i>	
Hitrost meritev (ADM)	ni podatka
Največja kotna hitrost	ni podatka
Največja hitrost sledenja: prečno, radialno	> 4 m/s, -
Največji pospešek: prečno, radialno	> 2 g
Absolutna nat. 3D-koordinat – statično	± 5 ppm (2 sigma)
Masa: instrument/kontroler	8,5 kg/3,2 kg

Večji del merjenj je bil opravljen v tovarni Litostroj Power, ki je bila dobavitelj celotne turbinske opreme za HE Krško in je hkrati največji slovenski proizvajalec turbinske opreme. Izmerili smo gonilno lopato in gonilnikov obroč, ki imata zahtevne, prostorsko ukrivljene oblike.

3.1 Primer 1 – gonilna lopata

A. Klasični način izmere

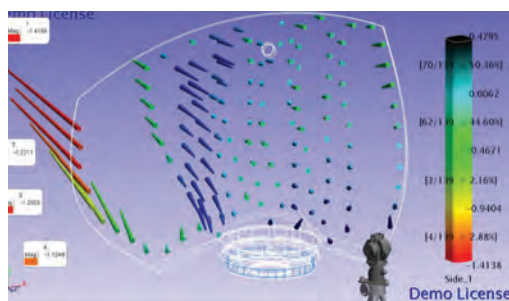
Gonilna lopata se izmeri po končani strojni obdelavi. Nato se v tovarni sestavi v celoto z gonilnikom in se tako sestavljena dostavi na končno montažo na gradbišče. Njena končna oblika se je do sedaj preverjala le na obdelovalnem stroju, na katerem je bila tudi izdelana. Merjenje se izvaja po sistemu tipanja. Pri tem na CMC-krmiljeni stroj namesto orodja vpnemo merilno urico, s katero nato po vnaprej določenih točkah tipamo površino gonilne lopate. Če ob dotiku z določeno točko merilna urica pokaže vrednost 0, to pomeni, da je točka strojnega dela obdelana *točno*. Če pa merilna urica pokaže vrednost, ki se razlikuje od 0, ta vrednost opredeljuje napako obdelave – odstopanje od projektirane vrednosti. Obdelava in meritev potekata na istem stroju, z istimi fizičnimi komponentami. Obstaja velika verjetnost, da morebitne sistematične napake, ki so prisotne na stroju, s tem načinom kontrole kakovosti obdelave sploh ne zaznamo. Opisana meritev ni neodvisna. Izmerjena odstopanja niso odstopanja od idealnega modela, ampak od strojnega modela, za katerega pa ne vemo, kako točen je.

B. Izmera z laserskim sledilnikom

Za povsem neodvisno meritev gonilne lopate potrebujemo merilno napravo, ki nima nič skupnega s CMC-strojem, na katerem se merjeni strojni del izdeluje. Eden takšnih neodvisnih merilnih sistemov je klasična koordinatna merilna naprava, ki zagotavlja visoko stopnjo natančnosti, vendar je njena slabost, da ima razmeroma majhen merilni obseg. Gonilna lopata pa je strojni del velikih dimenzij, pri katerem merjenje s koordinatno merilno napravo ni mogoče. To pomanjkljivost lahko odpravimo z uporabo laserskega sledilnika. Ta je v bistvu prenosna koordinatna merilna naprava velikih natančnosti, ki obenem omogoča merjenje velikih dimenzij.



Slika 5: Merjenje gonilne lopate z laserskim sledilnikom API T3 (Ritlop et al., 2012).



Slika 6: Originalno poročilo meritev – odstopanja dimenzij gonilne lopate (meritve AIFM) od projektiranega modela (Ritlop et al., 2012).

Merjenje z laserskim sledilnikom smo opravili v tovarni Litostroj Power. Tu so gonilno lopato tudi izdelali. Merjenje se je izvajalo kar v skladišču, saj je bilo treba zagotoviti ustrezne delovne razmere oziroma dovolj prostora. Pri merjenju ne potrebujemo veliko opreme (slika 5). Laserski sledilnik postavimo na stativ, z instrumentom komuniciramo prek računalnika. S krogelnim SMR-reflektorjem, ki ga drži operater v roki in z njim drsi po površini lopate, laserski sledilnik izmeri položaj merilnih točk.

C. Primerjava rezultatov meritev

Meritve z laserskim sledilnikom obdelamo, upoštevamo meteorološke in geometrične popravke ter jih primerjamo neposredno z digitalnim, absolutnim matematičnim prostorskim modelom. Rezultati primerjave so odstopanja izdelanega strojnega dela od projektiranih mer in so neodvisni od tehnologije izdelave gonilne lopate. Na sliki 6 je prikazan eden od načinov primerjave.

Rezultate, pridobljene z meritvami z laserskim sledilnikom, težko neposredno primerjamo z rezultati klasičnih meritev. Nemogoče je namreč zagotoviti identičnost merilnih točk v obeh merilnih postopkih. Groba primerjava je pokazala, da so na podobnih mestih na površini gonilne lopate odstopanja od projektiranih mer določena z laserskim sledilnikom po velikosti in predznaku primerljiva z rezultati klasične izmere. Ugotovimo lahko, da neodvisna metoda meritev z laserskim sledilnikom potrjuje rezultate, pridobljene s klasično meritvijo.

3.2 Primer 2 – gonilnikov obroč

A. Merjenje v tovarni

Merjenje gonilnikovega obroča poteka po istem načelu kot pri gonilni lopati. Razlika je le v tem, da po izmeri ob prevzemu v tovarni izmero opravimo še na delovišču na kraju vgradnje. Merjenje se izvede pred betonažo in po njej. Tudi gonilnikov obroč, ki je izdelan skupaj s spodnjim vodilnikovim obročem v enem kosu, ima posebno prostorsko obliko. Njegov spodnji del ima na notranji strani obliko krogle.

Gonilnikov obroč premera 5000 mm se na končno mero izdelata na veliki vertikalni stružnici, kjer se opravi tudi končna merska kontrola. Za ta namen se namesto orodja v stroj vpne merilna urica, ki jo stroj pritisne ob izdelano površino, medtem ko se gonilnikov obroč vrtilno vrti okrog svoje osi. Merijo se točke na obodu pri izbrani višini. Rezultati meritev so opredeljeni pri določenem kotu zasuka. Ker izdelava in izmera zopet potekata na istem stroju, tudi tokrat ne pridobimo neodvisne meritve. Neodvisno izmero lahko izvedemo z dolgim sestavljivim paličnim mikrometrom (slika 7). Končna dimenzija mikrometra je prirejena merjenemu objektu in je določena glede na število uporabljenih podaljškov.

Pri meritvah s paličnim mikrometrom morajo biti prisotni vsaj trije merilci: na začetku, v sredini in na koncu mikrometra. Merilci podpirajo merilno napravo in odčitavajo mere. Pri tem postopku je možnost subjektivne napake merilca velika, moteče so tudi temperaturne spremembe. Montažna dela se namreč izvajajo vse leto, tako da lahko merimo gonilnikov obroč v temperaturnem razponu od 0 °C pozimi do 25 °C poleti. Mikrometer se pred meritvijo sestavi na delovišču, tako da je med merjenjem njegova temperatura čim bolj enaka temperaturi merjenega elementa. Možnost vpliva temperature na dimenzijske spremembe mikrometra je pri novejših izvedbah zmanjšana tako, da so vmesni deli iz kevlarja. Natančnost mikrometra je opredeljena z enačbo:

$$\sigma_L = \left(7 + n + \frac{L}{50} \right) \mu\text{m}, \text{ kjer je} \tag{4}$$

n število podaljškov,

L merjena dolžina.



Slika 7: Palični mikrometer (URL 10).

Ker je palični mikrometer za meritev do 5001 mm sestavljen iz osmih delov, je teoretična natančnost izmerjene vrednosti ob upoštevanju ustreznega postopka meritev $\sigma_L = 0,115$ mm.

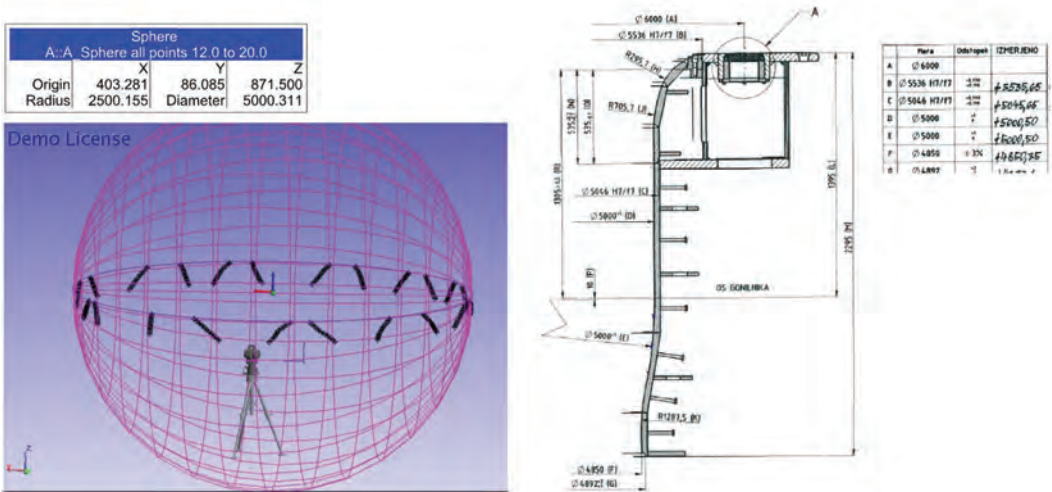
Že ob betoniranju, ki poteka postopno pod strogo kontrolo, se spremlja morebitno premikanje gonilnikovega obroča. Segrevanje betona lahko povzroči prevelika raztezanja in premikanje strojnega dela, kar pa vpliva na natančnost končne pozicije.

Z uporabo laserskega sledilnika smo, podobno kot pri gonilni lopati, že v tovarni opravili primerjavo meritev. Laserski sledilnik je bil lociran v središču gonilnikovega obroča, kar je omogočilo izmero celotnega strojnega del z enega stojišča (slika 8).



Slika 8: Merjenje gonilnikovega obroča z laserskim sledilnikom v tovarni in na terenu.

Meritve so pokazale zelo dobro natančnost obdelave. Obe metodi izmere sta pokazali minimalna odstopanja od projektirane mere. Na višini 871,5 mm (približno v višini osi gonilnika) je bil izmerjen premer 5000,311 mm, na približno isti višini je bila s paličnim mikrometrom izmerjena vrednost 5000,50 mm (slika 9).



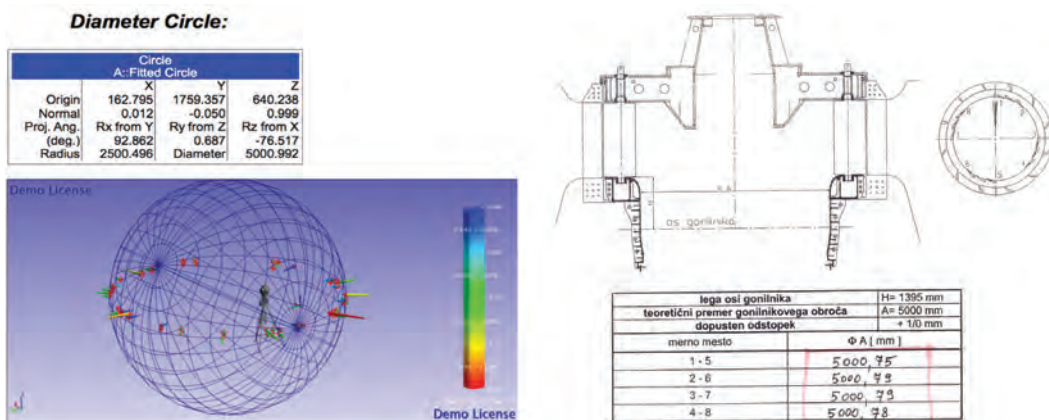
Slika 9: Rezultati meritev gonilnikovega obroča z laserskim sledilnikom (levo) in klasično (desno) (Ritlop et al., 2012).

Primerjava pokaže, da se rezultata klasične meritve in meritve z laserskim sledilnikom razlikujeta za manj kot 0,2 mm. Ob relativno veliki merjeni dimenziji 5000 mm je odstopanje majhno. Dovoljeno odstopanje je namreč + 1 mm. Zaradi dimenzije gonilnika premer ne sme biti manjši od 5000 mm, lahko je največ 5001 mm. Na podlagi načina merjenja in izračuna ter natančnosti merilnega instrumenta sklepamo, da je določitev premera gonilnikovega obroča z laserskim sledilnikom natančnejša. Premer je izračunan iz merjenj množice točk na kogli gonilnikovega obroča, ki določajo krogljo. Merjenje s paličnim mikrometrom pa se po protokolu izvede le na osmih merilnih točkah, določenih na izbranem meridijanu krogle.

B. Izmera na terenu

Izmero po klasični metodi s paličnim mikrometrom smo izvedli dvakrat – pred betonažo in po njej. Premer smo določili na štirih, med seboj enako oddaljenih mestih, tako kot je navedeno v merilnem protokolu (slika 10 desno). V klasičnem postopku se torej zahteva osem merilnih točk. Končna vrednost premera kot povprečje štirih meritev je 5000,78 mm.

Izmero z laserskim sledilnikom smo prav tako izvedli po betonaži nekaj dni po merjenju s paličnim mikrometrom. Premer je bil izračunan na podlagi 90 meritev, srednja vrednost je 5000,99 mm. Razlika glede na klasično meritev znaša 0,21 mm. Na podlagi poznavanja obeh merskih postopkov ter dovoljenega odstopanja 1 mm trdimo, da je razlika minimalna in sta postopka izmere primerljiva. Zanimivo je, da je večja merska vrednost spet pridobljena z laserskim sledilnikom. Ob upoštevanju števila meritev tudi tokrat lahko trdimo, da je končni rezultat z laserskim sledilnikom verjetnejši.



Slika 10: Rezultati meritev gonilnikovega obroča z laserskim sledilnikom (levo) in klasično s paličnim mikrometrom (desno) (Ritlop et al., 2012).

3.3 Natančnost meritev in omejitve

Rezultati meritev dveh povsem različnih metod izmere kompleksnih strojnih delov so pokazali, da sta metodi izmere primerljivi.

Klasična metoda izmere kompleksnih strojnih delov zahteva veliko izkušnost merilcev, število merilnih mest je relativno majhno. Pri merjenju z mikrometrom sodeluje več oseb, ki podpirajo merilno orodje in odčitavajo merske vrednosti. Natančnost merjenja je odvisna od njihove usklajenosti in izkušnosti. Že manjša neskladja v merski ekipi lahko vodijo do grobih merskih napak. Klasična izmera je tudi časovno potratna. Merjenje lahko traja tudi do osem ur in več. Merilci držijo mikrometer večino časa v rokah.

Z laserskim sledilnikom meritve izvedemo veliko enostavneje. Občutno večje število merilnih mest zagotavlja statistično verjetnejši končni rezultat. Izmera je veliko bolj neodvisna in najbolj izključuje možnost človeške napake. Merjenje poteka veliko hitreje. Izmero lahko opravimo le v nekaj urah. Časovni prihranek pri merjenju se pozitivno odraža predvsem pri kontrolnih merjenjih v tovarni. Strojnega dela, ki ga kontroliramo, med merjenjem ne izpenjamo iz orodja. Med merjenjem ni potreben zastojni (mrtvi) čas stroja, ki med klasičnimi merjenji seveda miruje. To je dodatni razlog, da je merjenje opravljeno kakovostno, neodvisno od strojnih komponent in v čim krajšem času. Pri merjenju z laserskim sledilnikom lahko uresničimo vse te pogoje, a se pri njem pojavijo dodatni moteči elementi. Težavo lahko pomenijo naslednji dejavniki:

- Ugotavljanje stanja atmosfere za izračun meteoroloških popravkov: razmere na delovišču so lahko zelo zahtevne. Težava je spremenljiva temperatura. Merimo jo običajno v eni točki (na instrumentu). Če je napaka merjene temperature 1 °C, to povzroči pogrešek dolžine 1 ppm. Pri dolžini 10 metrov to pomeni 10 μm (Kogoj, 2005). Zračni tlak je manj problematičen.
- Tresljaji včasih popolnoma onemogočijo meritve z laserskim sledilnikom. Pri meritvah ob vključenem agregatu na HE Zlatoličje je bil standardni odklon meritev kar 1 mm.

- Težava je lahko tudi slaba vidljivost in refrakcija, ki je posledica spremenljivih zahtevnih pogojev zaradi del na objektu. Interferometrično merjenje dolžin je v takem okolju bistveno manj natančno (Kogoj, 2005).

3.4 Ekonomski vidik

Cene AIFM-laserskih sledilnikov Leica AT901 brez nujne dodatne merske in programske opreme se gibljejo od 85.000 do 140.000 EUR, medtem ko Leicini ADM-sledilniki serije AT401 (402) brez dodatne opreme stanejo blizu 70.000 EUR. En krogelni reflektor stane več kot 2.000 EUR. Vsem tem zneskom je treba dodati še vrednost DDV. Cene paličnih mikrometrov se gibljejo od 4.000 do 5.000 EUR.

Mi smo za dan najema AIFM-laserskega sledilnika API Tracker 3 z operaterjem plačali 2.590 EUR, za tedenski najem opreme brez operaterja pa je bilo treba odšteti 3.760 EUR. Če se odločimo za nabavo merilne naprave z vso potrebno dodatno opremo (prizme, posebni nosilci, stativi itd.), vključno s programsko opremo in šolanjem operaterja, nas bo vse navedeno stalo dobrih 200.000 EUR. Strošek je neprimerljiv s stroški klasičnih meritev s paličnim mikrometrom.

Menimo, da je nabava laserskega sledilnika smiselna predvsem za podjetja, ki se ukvarjajo z montažo na več objektih hkrati, saj lahko le tako zagotovijo zadostno uporabo merilne naprave in s tem pokrivanje njenih stroškov. Tudi izdelovalcem strojne opreme bi se nakup verjetno hitro povrnil, saj bi z laserskim sledilnikom zelo skrajšali zastojne čase velikih obdelovalnih strojev in torej čas obdelovanja strojnih delov. Prednosti pri uporabi merilnega sistema laserskega sledilnika vidimo predvsem v skrajšanju časa montaže, kar ugodno vpliva na uresničevanje končnih rokov.

4 SKLEP

V okviru spodnjesavske verige hidroelektrarn se pripravlja gradnja še dveh hidroelektrarn, predvidena je še gradnja desetih hidroelektrarn na srednji Savi. Izkušnje, predstavljene v članku, bomo lahko uporabili pri naslednjih projektih. Proizvajalec turbinske opreme Litostroj Power je medtem že nabavil ADM-laserski sledilnik in poslal svoje kadre na šolanje.

Laserski sledilnik bi lahko uporabili še pri drugih aplikacijah, ki se izvajajo pri gradnji hidroloških objektov. Ena takih je gotovo kontrola vodoravnosti ležišča nosilnega ležaja, ki predstavlja zgornji del turbinskega pokrova. Ker je za višino ležišča zahtevana visoka natančnost, zagotovljena vodoravnost mora biti namreč v mejah $\pm 0,02$ mm/m, jo je zelo težko doseči samo z natančnim pozicioniranjem strojnih delov. V ta namen se ležišče nosilnega ležaja po končni montaži največkrat zelo fino obdeluje (»tušira«) še na terenu. Pri tem je nujno sprotno spremljanje stanja površine. Med obdelavo je zato treba nenehno opravljati veliko meritev. Merjenje z laserskim sledilnikom ima tu velike prednosti. Opravimo ga hitro in natančno, rezultate meritev pa pridobimo v realnem času. Tako dobimo informacije, kje in koliko je treba dodatno obdelati ležišče, ter jih lahko takoj posredujemo delavcem, ki delo opravljajo. Ker je postopek obdelave zelo zamuden, saj običajno traja od štiri do sedem dni, sta natančna večkratna kontrola ter hitro pridobivanje podatkov še kako pomembna.

Ob vsem naštetem obravnavamo laserski sledilnik kot merilno napravo, ki se bo v prihodnosti zagotovo uveljavila tudi v gradnji hidroenergetskih objektov. Z natančnostjo, objektivnostjo (izločitev človeške

merilne napake, kompenziranje različnih temperaturnih vplivov), kompleksnostjo (možnost zajema velikega števila merilnih točk) in odzivnostjo (hitro pridobljeni podatki) že sedaj počasi nadomešča klasične merilne tehnike ali pa se uporablja vsaj za njihovo neodvisno kontrolo.

Literatura in viri

- Gallagher, B. B. (2003). Optical Shop Applications for Laser Tracker Metrology Systems. Magistrska naloga. The University of Arizona. ZDA.
- Joeckel, R., Stober, M., Huep, W. (2008). Elektronische Entfernungs- und Richtungs-messung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag.
- Juretzko, M., in Richter, E. (2006). Geometrical Survey of Compact Antenna Test Ranges using Laser Tracker Technology. Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe. 12th FIG Symposium, Baden. http://www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/MST2/Juretzko.pdf, pridobljeno: 22. 11. 2013.
- Kogoj, D. (2005) Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljmeri. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Ritlop, S., Weiss, A., Slatinšek, I., Pernat, A. (2012). Laser measurement compared to conventional measuring methods in dimensional control of complex turbine parts. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 15(6).
- Staiger R. (2009). Push the Button – or Does the Art of Measurement Still Exist? International Federation of Surveyors, Article of the Month.
- [URL 1]: API Product Specifications. Tracker 3, Ultra Portable Laser Tracking System. <http://apitechnical.com/Downloads/2012/T3-Product-Specifications.pdf>, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 2]: API Tracker II – Laser Tracking System. <http://www.nor-pro.dk/APItrackerII.pdf>, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 3]: FARO Laser Tracker ION, Features, Benefits & Technical Specifications. http://www.europages.com/filestore/gallery/88/21/8866181_c37a64a1.pdf, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 4]: FARO Laser Tracker Vantage, Features, Benefits & Technical Specifications. <http://obergverktoy.no/sites/default/files/04ref201-478-en-faro-laser-tracker-vantage-tech-sheet.pdf>, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 5]: Leica Absolute Tracker AT401, Factsheet. http://www.geoservis.si/images/stories/PDF/Geoservis/Leica_Absolute_Tracker_AT401_Factsheet_en.pdf, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 6]: Leica Absolute Tracker AT401, White Paper. http://www.geoservis.si/images/stories/PDF/Geoservis/Leica_Absolute_Tracker_AT401_white_paper_en.pdf, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 7]: Leica Absolute Tracker AT401. http://www.leica-geosystems.es/downloads/123/m1/metrology/AT401/brochures/Leica%20Absolute%20Tracker%20AT401_en.pdf, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 8]: PCMM system Specifications, Leica Absolute Tracker AT901 and Leica T-Products. http://www.leica-geosystems.com/downloads/123/m1/metrology/general/brochures-datasheet/Leica%20Absolute%20Tracker%20and%20PCMM%20specs_en.pdf, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 9]: The Leica Absolute Interferometer – A New Approach to Laser Tracker Absolute Distance Meters. http://www.geoservis.si/images/stories/PDF/Geoservis/Leica_Absolute_Interferometer_white_paper_en.pdf, pridobljeno: 6. 1. 2014.
- [URL 10]: Palični mikrometer. www.apexauctions.com, pridobljeno: 1. 10. 2014.
- Valh, M. M., Marjetič, A., Kogoj, D. (2008). Avtomatski elektronski tahimetri ali kam vodi razvoj TPS sistemov. Geodetski vestnik, 52(3), 487–499.

Slatinšek I., Kogoj D. (2014). Uporaba AIFM-tehnologije za dimenzijsko kontrolo turbinskih delov. Geodetski vestnik, 58 (4): 667–680.
DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2014.04.667-680

Iztok Slatinšek, univ. dipl. inž. geod.
Geodetski biro Slatinšek
Cankarjeva cesta 1, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-naslov: iztok.slatinsek@gmail.com

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