

STROJNIŠKI VESTNIK

LETNIK 35 LJUBLJANA, JANUAR-MAREC 1989

ŠTEVILKA 1-3

UDK 531.71/72:681.2

Uvajanje koordinatnih merilnih naprav v izdelovalni proces

ADOLF ŠOSTAR

0. UVOD

Koordinatne merilne naprave (KMN) se vse bolj uveljavljajo kot univerzalni merilni in kontrolni stroji v sistemih zagotavljanja kakovosti. Število računalniško krmiljenih koordinatnih merilnih naprav v izdelavi se izredno hitro povečuje predvsem zaradi treh prednosti:

- časi kontrole in merjenja so krajši in vplivajo na hitrejši pretočni čas izdelkov in čas ukrepanja v sistemu ugotavljanja kakovosti;
- uspešno nadomeščajo in poenostavljajo uporabo kalibrov, etalonov in namenskih merilnih naprav predvsem pri izdelavi večjega števila zahtevnih obdelovancev;
- izpolnjujejo zahteve industrije, ki dobavlja sestavne dele, pri kakovosti ponovljivosti, merni obstojnosti in zanesljivosti izdelave [1].

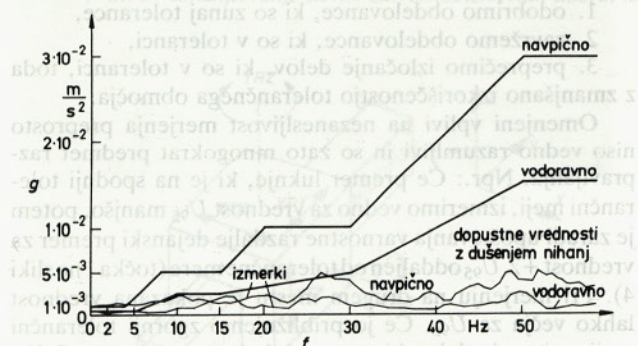
1. VPLIVI OKOLICE IN ZAŠČITA PRED TEMI VPLIVI

Tehniško zelo zahtevne in natančne KMN moramo pred uvajanjem v različna izdelavna okolja in tamkajšnje razmere prilagoditi njihovim vplivom, ki pa jih je treba prej temeljito proučiti.

1.1 Vpliv nihanj

KMN so v izdelavnem procesu lahko vključene v neposreden pretok obdelovancev ali pa so ob tem pretoku. Praviloma se pojavljajo nihanja tal, ki neposredno vplivajo na nenančnost merjenja in delovanje KMN. Nihanja preprečujemo z velikimi stabilnimi temelji lahko pa tudi z aktivnimi pnevmatičnimi blažilnimi elementi. Slednji omogočajo preprosto razporeditev KMN v poljuben prostor [2].

Izdelovalec KMN mora podati uporabniku dopustne vrednosti navpičnih in vodoravnih pospeškov z vnesenimi podatki (sl. 1).

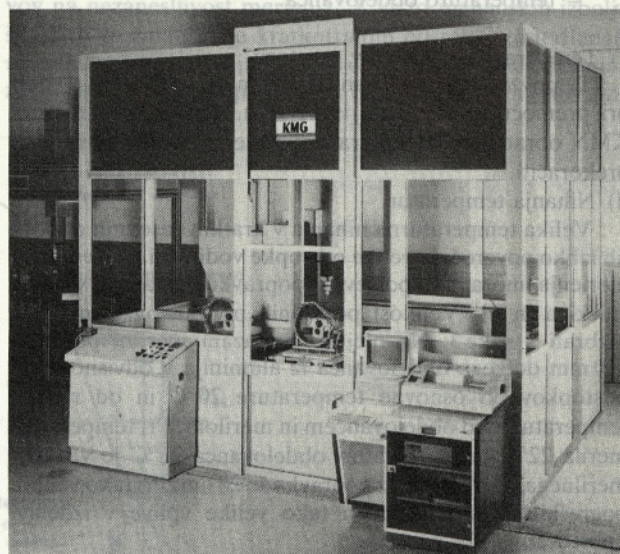


Sl. 1. Podatki izdelovalca KMN o dopustnih vodoravnih in navpičnih pospeških temeljev za KMN UMC in UPMC v odvisnosti od frekvence f

Če so izmerjene vrednosti nad dopustnimi, je za KMN potreben dodatni temelj.

1.2 Onesnaženje zraka

Oljni hlapi, prah sive litine in drugi drobni delci lahko poškodujejo predvsem pri portalnih KMN vodila na stisnjeni zrak. V primeru, da izmerimo količino prašnih usedlin nad $6.100^{-2} \text{ mg/m}^2$ na teden, moramo KMN zaščititi z varovalno kabino, kjer je zrak mogoče čistiti s filtri. Nadtlak onemogoča vstop okoliškega zraka v kabino. Izvedbo take kabine prikazuje slika 2.



Sl. 2. KMN v zaprti kabini za neposredno merjenje v izdelavi

1.3 Vpliv spremembe temperature

Brez posebnih ukrepov veliko število merilnih nalog v zahtevani natančnosti oziroma tolerancah ni izvedljivo. Upoštevati moramo naslednje, od temperature odvisne vplive:

- Višino absolutne temperature. Izmerjene vrednosti moramo preračunati na osnovno temperaturo 20°C .
- Temperaturno razliko med merili (skalami) in obdelovanci.

Ta se mora upoštevati zaradi razlike temperature in različnih razteznostnih količnikov med materiali.

Merilni pogrešek f_t zaradi vpliva temperature:

$$f_t = l_0 \alpha (t_m - t_0) \quad (1),$$

če sta merilo in obdelovanec iz enakega materiala, imata pa različni temperaturi.

$$f_t = l_0 (\alpha_0 \Delta t_0 - \alpha_m \Delta t_m) \quad (2),$$

če sta merilo in obdelovanec iz različnih materialov, imata pa enako temperaturo, ki se razlikuje od normalne temperature 20°C.

$$f_t = l_0(\alpha_o - \alpha_m) \Delta t_o + \alpha_m(t_o - t_m) \quad (3),$$

če sta merilo in obdelovanec iz različnih materialov in imata različni temperaturi.

V enačbah pomenijo:

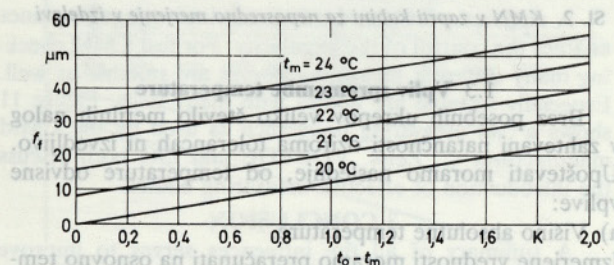
- l_0 – imensko merjeno dolžino,
- α_o – linearno temperaturno razteznost za material obdelovanca,
- α_m – linearno temperaturno razteznost za material merila,
- Δt_o – razliko med temperaturo obdelovanca in normalno temperaturo,
- t_m – temperaturo merila,
- t_o – temperaturo obdelovanca.

c) Temperaturne razlike v prostoru.

Te povzročajo upogibanje vodil in s tem odstopke vodil pri premočrtnem gibanju in vrtenju. Zaradi tega morajo KMN obratovati v temperaturnih mejah, ki jih ne smemo prekoračiti.

d) Nihanja temperatur.

Velika temperaturna nihanja v kratkih časovnih obdobjih lahko povzročajo velike odstopke vodil. Pri daljšem času merjenja moramo upoštevati popravke linearnih vplivov (točki a in b). Velikost potrebnih popravkov je mogoče razbrati s slike 3. Na njej so prikazani merilni pogreški 500 mm dolgega obdelovanca iz aluminija v odvisnosti od odstopkov do osnovne temperature 20°C in od razlike temperatur med obdelovancem in merilom. Pri temperaturi merila 22°C in temperaturi obdelovanca 23°C je velikost merilnega pogreška brez popravka že 28 µm. Pri tako velikih pogreških je seveda treba tako velike vplive v izdelavi upoštevati.



Sl. 3. Vpliv temperature na merilni pospešek

(t_o – temperatura obdelovanca, t_m – temperatura merila)

Večina standardnih programov za merjenje na računalniško krmiljenih KMN ima vključen poseben podprogram, ki upošteva linearne popravke vpliva temperature. Vnesti moramo temperaturo okolice, temperaturo merila in obdelovanca ter raztezne koeficiente merila in obdelovanca. Računalnik izračuna skupen popravek v treh koordinatah in njegova vrednost je posebej prikazana na zaslonu.

Nujno je sledil dodaten poseg v natančnost z uvedbo »računalniško podprte natančnosti« (CAA*) in z njo povečana natančnost na podlagi izboljšane temperature

popravka. Na KMN je vgrajen poseben precizni sistem za natančno merjenje temperatur. Razločljivost tipalnega sistema je 0,02°C pri natančnosti tipala 0,2 vrednosti odstopkov po standardu DIN 45760. Dosežena nezanesljivost merjenja znaša $\pm 0,1^\circ\text{C}$. S tem samodejnim popravkom vpliva temperature sta popravljene tudi veličini, omenjeni pod a in b. Zaradi tega je mogoče dopustne temperaturne meje razširiti. Dopustno je tudi povečati časovna temperaturna nihanja. Nikakor pa se ne sme spremeniti dopustna prostorska temperaturna razlika, ker vplivov pod c trenutno še ne moremo obvladati. KMN mora biti pri postavitvi v izdelavnem prostoru posebno toplotno izolirana.

1.4 Varnostne zahteve

Poleg mehanske opreme KMN moramo zavarovati tudi elektronsko opremo. Na splošno se uporabljajo predpisi varnostnega razreda IP 54 z navodili o zaščiti pred prahom in vodnimi kapljicami. Zaščita strežnih delov mora biti mehanska. Za odvajanje toplote, ki nastaja v elektronskem krmilniku, so potrebni izmenjevalniki toplote. Lega KMN in zaščita elektrovodnikov ter zračnih cevi je predpisana z navodili VDE 0113.

2. NEZANESLJIVOST MERJENJA

2.1 Vpliv nezanesljivosti merjenja na izdelavne tolerance

V navodilih Združenja izdelovalcev koordinatnih merilnih naprav (CMM**) in VDI/VDE 2617 je definirana nezanesljivost merjenja vzporedno k osem in na poljubnem mestu v prostoru merilne naprave. Večina izdelovalcev KMN ta navodila upošteva.

V omenjenih navodilih je nezanesljivost merjenja dolžine U_{95} definirana kot vrednost, za katero lahko razbrana vrednost vseh primerkov odstopa od dejanske vrednosti za plus ali minus 95 %. Pri KMN, ki omogočajo merjenja na različnih mestih, odvisno od oblike izvedbe, moramo izhajati iz dejstva, da izkoristimo dopustne meje pogreškov na določenih mestih znotraj področja merjenja. Naključni delež nezanesljivosti merjenja zmanjšujemo z večjim številom otipanih točk v povezavi s posebnim izravnalnim izračunom. Iz izkušenj lahko trdimo, da v večini primerov prevladuje sistematični delež nezanesljivosti merjenja, zaradi tega pri KMN s ponavljanjem meritev ne izboljšujemo izmerkov.

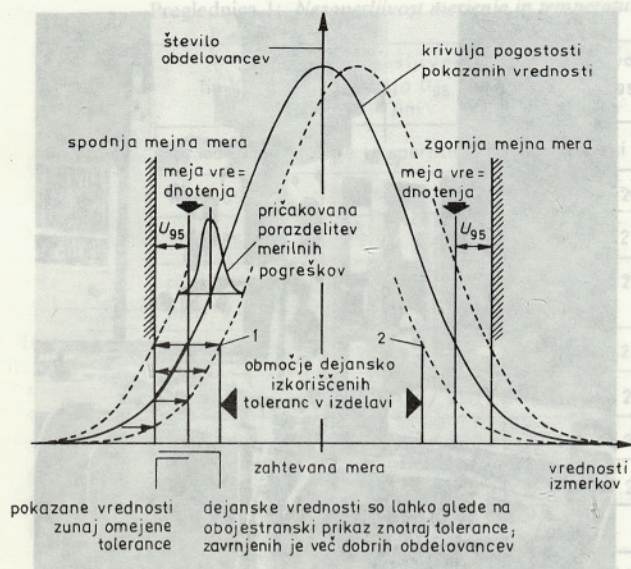
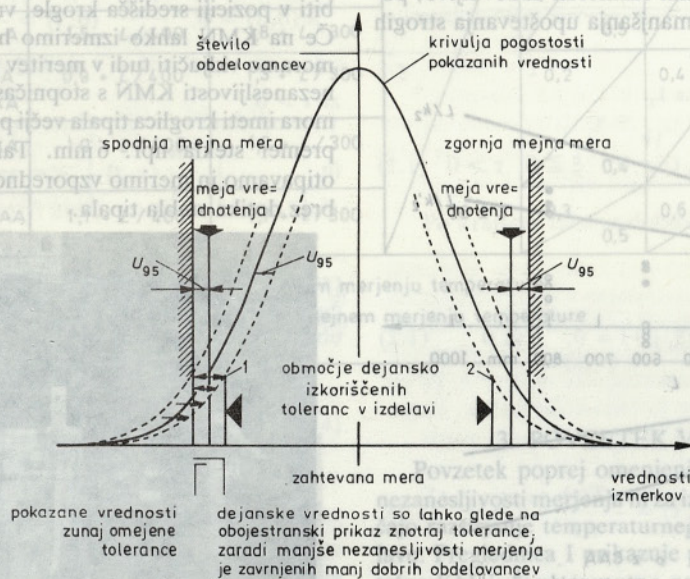
Če upoštevamo nezanesljivost merjenja in njeno zvezo s tolerancami ter njen vpliv na tolerance, ki jih pri izdelavi lahko izkoristimo, potem lahko:

1. odobrimo obdelovance, ki so zunaj tolerance,
2. zavržemo obdelovance, ki so v toleranci,
3. preprečimo izločanje delov, ki so v toleranci, toda z zmanjšano izkoriščenostjo tolerančnega območja.

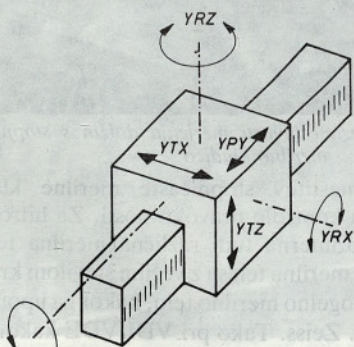
Omenjeni vplivi na nezanesljivost merjenja preprosto niso vedno razumljivi in so zato mnogokrat predmet razpravljanja. Npr.: Če premer luknje, ki je na spodnji tolerančni meji, izmerimo vedno za vrednost U_{95} manjšo, potem je zaradi upoštevanja varnostne razdalje dejanski premer za vrednost $+2 U_{95}$ oddaljen od tolerančne mere (točka 1 na sliki 4). Pri merjenju na drugem mestu je pokazana vrednost lahko večja za U_{95} . Če jo približujemo zgornji tolerančni meji, potem je dejanski premer luknje za vrednost $-2 U_{95}$ oddaljen od tolerančne meje (točka 2 na sliki 5).

* Computer Aided Accuracy

** Coordinate Measuring Machine Manufacturers Association

Sl. 4. Vpliv varnostne vrednosti U_{95} na tolerančno mejo

Sl. 5. Zmanjševanje števila zavrženih/izločenih dobrih kosov/delov obd. zaradi zmanjšane nezanesljivosti merjenja



Sl. 6. Šest prostostnih stopenj vodila

Če lahko nezanesljivost merjenja še zmanjšujemo, se število zavrženih delov, ki so še v toleranci, zmanjšuje in toleranca, ki jo pri izdelavi lahko izkoristimo, se povečuje. V nobenem primeru pa ne smemo pri vrednotenju izmerkov pozabiti na varnostno vrednost, sicer bi potrjevali obdelovance, ki so zunaj tolerance [3].

2.2 Ukrepi izdelovalca KMN za zmanjševanje nezanesljivosti merjenja

Nezanesljivost merjenja je pri KMN sestavljena iz deležev, ki izvirajo iz naključnih in sistematičnih pogreškov. Danes še upoštevamo navodila, ki to razdelitev definirajo v formuli za določitev nezanesljivosti dolžinske mere $U_{95} = K_1 + K_2$.

K_1 je konstanta, ki upošteva naključni delež nezanesljivosti pri merjeni dolžini $L = 0$. Konstanta K_2 je povezana z izmerjeno dolžino L in vsebuje dodatni dolžinski delež v pravilnem razmerju, ki upošteva del sistematičnih vplivov na nezanesljivost merjenja. Z vrsto mehanskih izboljšav, kot so zmanjšanje kratkotrajnih odstopkov merilnega ravnila, računalniški popravek odstopkov pozicioniranja, zmanjšanje histereze pogonskih in vodilnih elementov, iz-

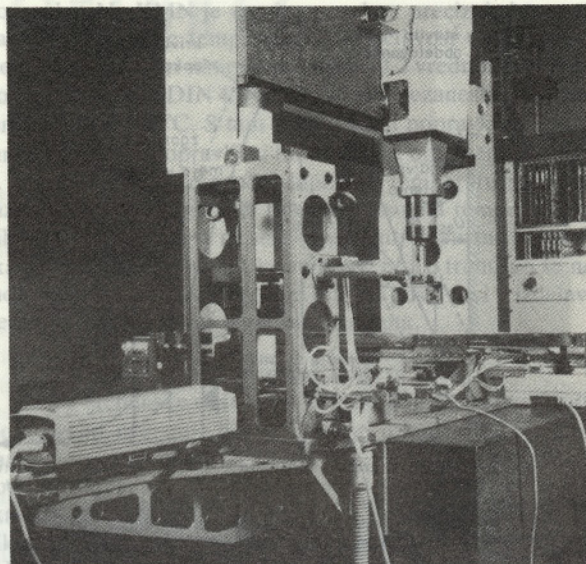
boljšanje popravkov upogibanja tipala, izboljšanje justiranja pravokotnosti, zmanjševanje odstopkov vodil, odprava vplivov okolja, so izdelovalci dosegli pri KMN zahtevnejših kakovostnih razredov nezanesljivost merjenja, ki jo je še komaj mogoče zmanjšati (npr. tip UPMC podjetja C. Zeiss).

Obstaja poseben postopek za računalniško podprto natančnost (CAA), ki je bil že omenjen v poglavju 1.3. Postopek upošteva večino znanih odstopkov, npr. šest samo v eni osi (sl. 6), in tudi še dodatne pogreške pravokotnosti med tremi osmi, tako da imamo 21 sistematičnih odstopkov, upoštevanih in vključenih v izračun nezanesljivosti. Izračunane natančnosti po postopku CAA (sl. 7) vplivajo predvsem na prostorsko (tridimenzionalno) nezanesljivost merjenja. Program za CAA pripravi izdelovalec v posebnih

Tip naprave		po standardu	po CAA
PMC	1D	$2,5 + L/250$	$2,1 + L/400$
	3D	$3,5 + L/200$	$2,5 + L/300$
UMC	1D	$1,9 + L/300$	$1,5 + L/400$
	3D	$3,0 + L/200$	$1,8 + L/300$
UPMC	1D	$1,5 + L/300^{*)}$	$1,2 + L/400$
	3D	$2,1 + L/200^{*)}$	$1,7 + L/300$
ZMC	1D	$1,0 + L/400^{*)}$	$0,9 + L/400$
	3D	$1,5 + L/250^{*)}$	$1,3 + L/300$

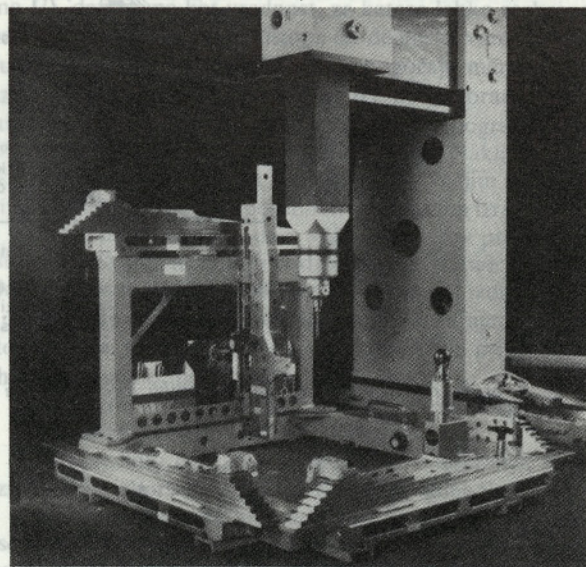
^{*)} Doseđajšnji podatki
V ponudbah ni več naprav brez CAA.

Sl. 7. Zmanjševanje nezanesljivosti merjenja dolžine U_{95} s CAA razmerah (21 podatkov, toleranca klimatizirane komore $0,1^\circ\text{C}$ itd.). To omogoča popravke v vrednosti merjenja natančnosti, kakršna je z laserskim interferometrom. Podatki pomenijo dodatno rezervo uporabniku, če uporablja KMN v enakih okoliščinah, kakršne so bile ob prevzemu določene. Če izhajamo iz nezanesljivosti merjenja, ki so bile poprej dosežene in v določenih razmerah zadovoljive, potem ponuja CAA možnost zmanjšanja upoštevanja strogih pogojev vpliva okolja (sl. 8).



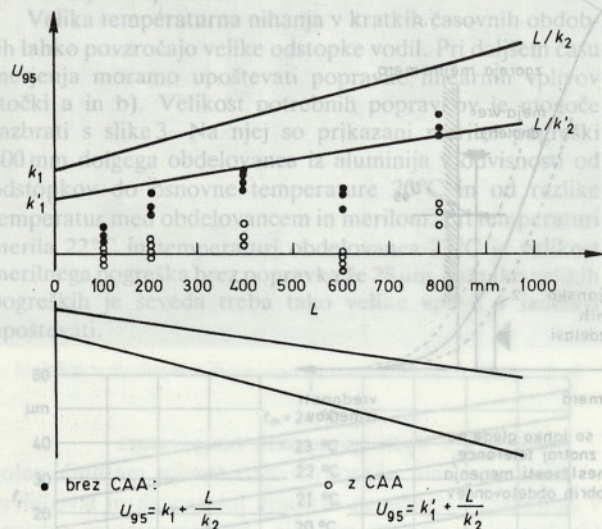
Sl. 9. Avtomatizirani laserski interferometer

Reflektorsko ogledalo laserskega interferometra mora biti v poziciji središča krogle, vnaprej kalibriranega tipala. Če na KMN lahko izmerimo hkrati tudi temperaturo, jo moramo vključiti tudi v meritev pozicioniranja. Pri kontroli nezanesljivosti KMN s stopničasto merilno kladico (sl. 10) mora imeti kroglica tipala večji premer npr. 12 mm in manjši premer stekla npr. 6 mm. Tako lahko z istim tipalom otipavamo in merimo vzporednost osi in prostorske nagibe brez dotika stebila tipala.



Sl. 10. Preverjanje nezanesljivosti merjenja dolžin s stopničasto merilno kladico

Diagonalna namestitvev stopničaste merilne kladice v ravninah omogoča kontrolo pravokotnosti. Za hitro preverjanje KMN so primerna tudi različna merilna telesa. Posebej so primerna merilna telesa z večjim številom krogel. Slika 11 prikazuje krogelno merilno telo, kakor ga uporablja izdelovalec KMN C. Zeiss. Tako pri VDI/VDE kakor tudi pri ISO razpravljajo trenutno o uvajanju učinkovitih merilnih teles.



Sl. 8. Nezanesljivost merjenja dolžin s CAA in brez njega

2.3 Kontrola nezanesljivosti pri uporabniku

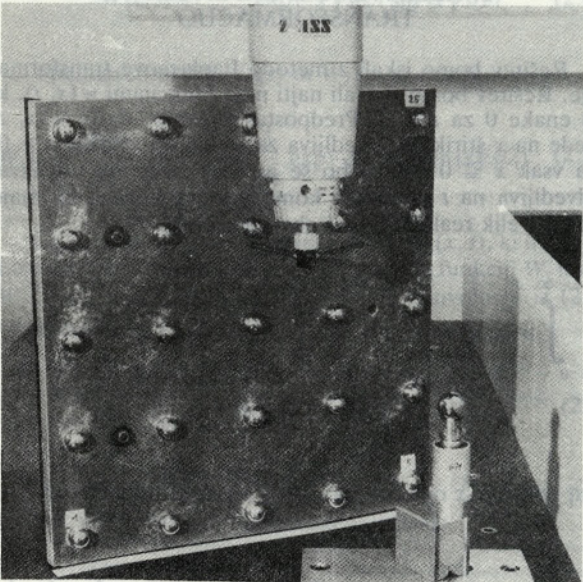
Mnogi uporabniki redno kontrolirajo KMN. Poleg merjenja natančnosti preverjajo tudi posamezne komponente KMN, kar pomeni velik strošek in izgubo časa [4].

Praktične izkušnje izkazujejo možnosti zelo gospodarnega preverjanja KMN brez izgube varnosti. Priporočajo merjenje odstopkov pozicioniranja z laserskim interferometrom v treh oseh kakor tudi kontrolo nezanesljivosti dolžine in pravokotnosti s stopničasto merilno kladico.

Pri merjenju z laserskim interferometrom (sl. 9) je treba KMN pozicionirati z računalniškim programom v standardnem programu za merjenje (npr. program UMESS pri podjetju C. Zeiss). S tem dosežemo, da se vsi izračunani popravki samodejno vključujejo v rezultat merjenja.

Preglednica 1: Nezanestljivost merjenja in temperaturne razmere pri portalnih KMN

Tip KMN	Nezanesljivost merjenja U_{95} v 1D μm	Nezanesljivost merjenja U_{95} v 3D μm	Temperaturno območje $^{\circ}\text{C}$	Temperaturni gradient		
				na uro $^{\circ}\text{C/h}$	na dan $^{\circ}\text{C/dan}$	v prostoru $^{\circ}\text{C/m}$
Samodejno merjenje temperature - zajeto v ceni						
WMM 550	$2,7 + L / 250$	$3,6 + L / 200$	20 ± 3	1	2	1
WMM 850	$2,9 + L / 250$	$4,2 + L / 200$	20 ± 4	1	3	1
PMC 850 PMC V	$2,5 + L / 250$	$3,5 + L / 200$	20 ± 2	0,5	1	0,5
UC 550	$2,5 + L / 250$	$3,5 + L / 200$				
UC 850	$2,5 + L / 250$	$3,5 + L / 200$	20 ± 3	0,8	1,5	0,5
UMC 550	$1,5 + L / 300$	$2,5 + L / 200$				
UMC 850	$1,9 + L / 300$	$3,0 + L / 200$				
Samodejno merjenje temperature - po naročilu						
PMC 850 CAA PMC V - CAA	$2,1 + L / 400$	$2,5 + L / 300$	20 ± 2	0,3	0,6	0,3
UMC 550 - CAA	$1,2 + L / 400$	$1,7 + L / 300$		0,5	1	0,3
UMC 850 - CAA	$1,5 + L / 400$	$1,8 + L / 300$		0,2	0,4	0,2
ZMC 550 - CAA UPMC 550 - CAA	$0,9 + L / 400$	$1,3 + L / 300$	20 ± 3	0,4	0,6	0,2
UPMC 850 - CAA $z = 450$	$1,0 + L / 400$	$1,5 + L / 300$		0,3	0,6	0,3
UPMC 850 - CAA $z = 600$	$1,1 + L / 400$	$1,7 + L / 300$		0,5	1	0,3
A B A - temperaturne razmere pri ročnem merjenju temperature B - temperaturne razmere pri samodejnem merjenju temperature						



Sl. 11. Tridimenzionalno krogelno merilno telo

3. POVZETEK VSEH VPLIVOV

Povzetek poprej omenjenih vplivov rabi za izboljšanje nezanesljivosti merjenja in za izvedbo postopkov, ki omogočajo razširjanje temperaturnega območja v razmerah izdelave. Preglednica 1 prikazuje primerjalne vrednosti za portalne KMN, ki so trenutno največ v rabi in jih tudi največ izdelajo.

LITERATURA:

[1] A. Šostar: Koordinatna merilna tehnika, Zbornik TF 1986
[2] H. J. Neumann: Einbindung von Koordinatenmessgeräten in die Fertigung, VDI-Symposium, Düsseldorf 1988
[3] H. J. Neumann: Messgeschwindigkeit, Messunsicherheit und Umweltempfindlichkeit als Leistungskriterien von KMG, IMT Symposium C. Zeiss 1987, Oberkochen
[4] K. H. Breyer: KMG prüfen Mass, Form und Lage im fertigungsnahen Bereich, VDI Berichte 529, Düsseldorf

Avtorjev naslov:
prof. dr. Adolf Šostar, dipl. inž.
Tehniška fakulteta, VTO strojništvo,
Maribor