

<https://doi.org/10.24867/JPE-1989-06-169>

STRUČNI RAD

Vasić, S., Stankov J.*

USLOVI OKOLINE I TAČNOST KOORDINATNIH MERNIH MAŠINA**

Re z i m e

Tačnost koordinatne merne mašine (KMM) u mnogome zavisi od uslova okoline pod kojim merne mašina radi: temperature, vibracija, vlažnosti vazduha, prešine. U radu se ukratko daje prikaz uzroka grešaka KMM, preporučenih mikroklimatskih uslova i razvijenih metoda ispitivanja tačnosti KMM.

ENVIROMENTAL CONDITIONS AND COORDINATE MEASURING MACHINES ACCURACY

S u m m a r y

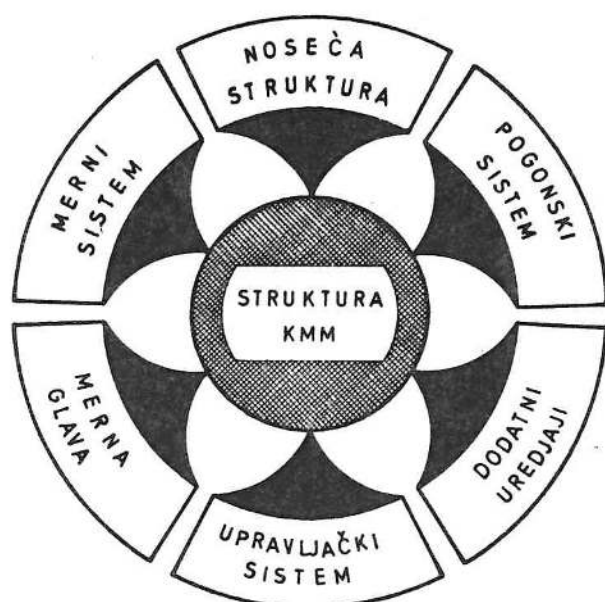
The Coordinate Measuring Machine's (CMM) accuracy depend on the enviromental conditions and ambient conditions under which the measuring machine work: temperature, vibrations, air humidity, dust. In the paper, the short review of error causes, recommended microclimatic conditions and developed methodes of CMM's accuracy examination are given.

1.0 UVOD

Koordinatne merne mašine (KMM) predstavljaju kompleksne metrološke sisteme čija se konstrukcija (hardware) sastoji od nekoliko osnovnih karakterističnih celina (slika 1):

* Vasić Siniša, dipl.ing., asistent, Stankov dr Jelena, red.prof., Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, Vladimira Perića Valtera 2

** Rad je proizašao iz istraživačkog projekta TEHNOLOGIJE I SREDSTVA RADA ZA OBRADU MAŠINSKIH MATERIJALA REZANJEM čiju realizaciju finansira SIZNR Vojvodine.



Slika 1. Osnovne funkcionalne jedinice KMM.

- noseće strukture (postolje, konzole, portali, radni stolovi)
- pogonskog sistema (motor, prenosnik za pretvaranje obrtnog u translatorno kretanje, regulatori brzine i ubrzanja)
- mernog sistema (merne letve, rizolveri, induktosini, fotoelektrični merni sistemi),
- merne glave (univerzalne, kontaktne, bezkontaktne) sa raznovrsnim kombinacijama mernih pipaka,
- upravljačkog sistema (računar, operatorska konzola, AD i DA konvertori, mikroprocesorski BUS, interface),
- dodatnih uređaja (obrtni sto, uređaj za skeniranje, uređaj za izmenu mernih glava i pipaka, eksterne računarske jedinice).

Svaka od ovih funkcionalnih jedinica mora imati takve tehničko-tehnološke i eksploatacione karakteristike koje će obezbediti potrebnu visoku tačnost celokupne KMM. Zahtevi u pogledu tačnosti ovih mernih mašina stalno rastu, tako da su danas u upotrebi i KMM sa mogućnošću merenja i do $0,1 \mu\text{m}$.

Za razliku od konvencionalnih mernih uređaja, tačnost KMM se, zbog njene kompleksnosti koja je posledica prostornog koordinatnog sistema i mnogobrojnih sastavnih elemenata, teško opisuje. Ovo me doprinosi i dosadašnji razvoj koordinatne merne tehnike u toku kog je razvijeno više različitih načina izgradnje KMM, kao i metoda kontrole tačnosti KMM. Da bi se tačnost KMM održala u granicama

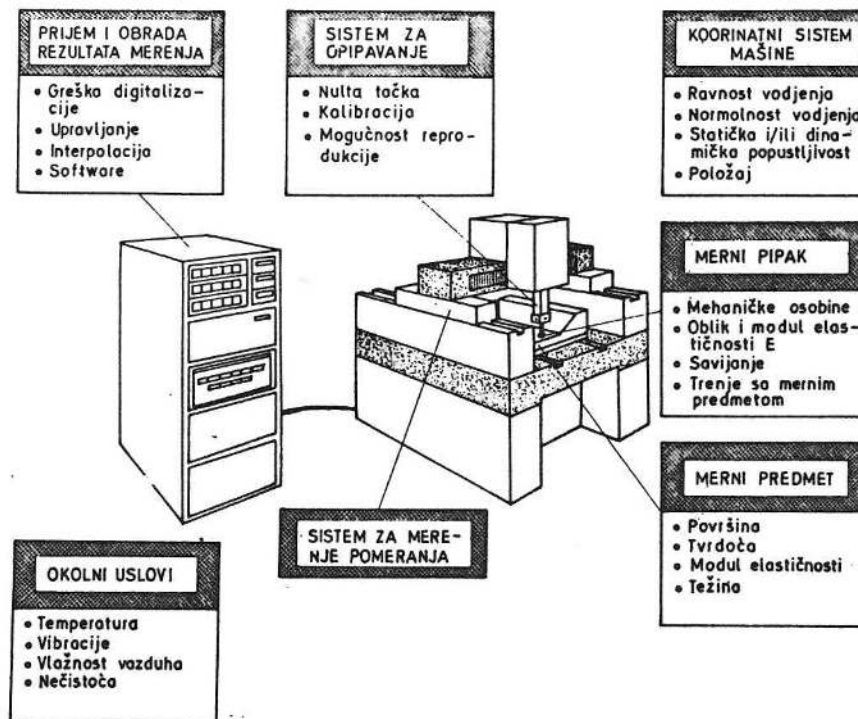
propisanim od strane proizvođača, neophodno je obezbediti određene uslove ambijenta u kom će mašina raditi i pod tim uslovima proveriti njenu tačnost.

U nastavku su ukratko analizirani uzroci grešaka KMM, opisani faktori koji utiču na tačnost KMM i preporučeni mikroklimatski uslovi i navedene najosnovnije metode kontrole tačnosti KMM koje treba sprovesti u prethodno obezbeđenim mikroklimatskim uslovima pri prijemu KMM od strane korisnika.

2.0. UZROCI GREŠAKA KOORDINATNIH MERNIH MAŠINA

Na tačnost rezultata merenja na KMM utiču razne greške čiji se izvori mogu podeliti u dve osnovne grupe (slika 2):

- izvori grešaka koji potiču od pojedinih funkcionalnih elemenata same KMM,
- izvori grešaka koji nisu specifični za mernu mašinu.

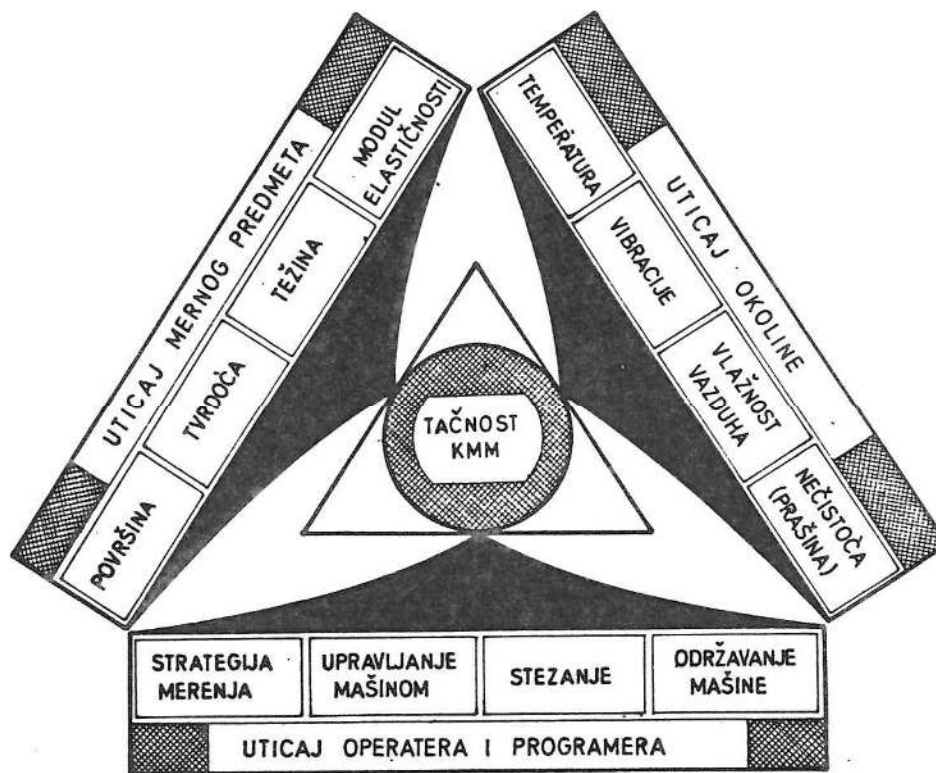


Slika 2. Izvori grešaka koordinatnih mernih mašina [2]

U ovom radu akcenat je na drugoj grupi izvora grešaka, čijim poznavanjem i eliminisanjem korisnik KMM može, obzirom da su najčešće subjektivne prirode, da u značajnoj meri poveća tačnost svoje merne mašine, a time i pouzdanost rezultata merenja.

U grupu izvora grešaka nezavisnih od merne mašine mogu se svrstati (slika 3):

- uslovi okoline u kojoj je instalirana KMM
- merni predmet
- čovek - operater, odnosno programer.



Slika 3. Uticajni faktori na tačnost KMM nezavisni od merne mašine

2.1. UTICAJ OKOLINE NA TAČNOST KMM

Na tačnost merne mašine i rezultate merenja najveći uticaj imaju:

- temperatura,
- vibracije,
- vlažnost vazduha i
- nečistoća (prašina).

2.1.1. Uticaj temperature

Od svih spoljašnjih faktora koji utiču na tačnost KMM najveći uticaj ima temperatura. Elementi merne mašine i merni predmet podvrgnuti su promeni dimenzija pod uticajem promene temperature, a dilatacije (izduženja/skraćenja) pod uticajem istog temperaturskog gradijenta, funkcije su vrste materijala. U tabeli 1. su prikazani koeficijenti širenja materijala koji se najčešće koriste pri gradnji KMM.

TABELA 1.

MATERIJAL	Koeficijent širenja [$\mu\text{m}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$]
Magnezijum	27
Aluminijum	23
Bakar	18
Bronza	18
čelik	11,5
Sivi liv	10,4

Proizvodjači mernih mašina daju podatke o srednjoj temperaturi prostorije u koju se instalira KMM, maksimalne amplitude i frekvencije srednje temperature, temperaturni gradijent okoline, brzinu vazdušne struje. U praksi je za srednju temperaturu merne sobe usvojena vrednost od 20°C . Prema CMMA^{*}) preporukama [5] ona iznosi $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, dozvoljeno variranje temperature u toku merenja iznosi $0,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ a dozvoljeni prostorni gradijent temperature je $0,3^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Italijanski proizvođač mernih mašina DEA preporučuje srednju temperaturu okoline od $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ sa termičkim gradijentom od 2°C u poslednjih 8 sati rada i 1°C u prostoru koji zauzima KMM. Ovakve temperature je u praksi veoma teško održati. Tako recimo, razlika temperatura gornje i donje površine granitne ploče (stola KMM) debljine 300 mm iznosi $\Delta T = 0,5^{\circ}\text{C}$, što na mernoj dužini od jednog metra stvara razliku od $3,2 \mu\text{m}$ [13].

Da bi se ublažio negativan uticaj temperature proizvođači daju određene preporuke:

* CMMA - Coordinate Measuring Machine Manufacturers Association.

- prostorija u koju se postavlja KMM trebalo bi po mogućstvu da bude locirana u sredini zgrade tako da ni jedan od njenih zidova ili tavanica ne bude u kontaktu sa spoljnom atmosferom. Ovakvo rešenje često omogućava izbegavanje instaliranja grejnih elemenata u mernu prostoriju;
- ako prethodno rešenje nije moguće, grejni elementi bi trebalo da budu instalirani na rastojanju ne manjem od najduže merne ose od mašine. Pored toga, grejni elementi moraju imati štitove sa pokretnim panelima radi zaštite mašine od direktne radijacije, što u mnogome može da poveća dimenzionu stabilnost mašine;
- ako merna soba ima prozore prema spoljnoj atmosferi, oni moraju biti snabdeveni duplim staklima, okrenuti severu ili zaštićeni od direktnog sunčevog zračenja. Unutrašnje površine sobe treba obojiti plavom neprozirnom bojom;
- prostoriju u koju je instalirana KMM treba otvarati samo kada je stvarno neophodno. Ako prostorija ostane otvorena duže od 5 minuta, na mašini se ne smeju izvoditi merenja u sledećih nekoliko sati zbog termičkog uravnoteženja;
- ne treba zaboraviti da su svetlosni izvori i tela ljudi prisutnih u okolini, takodje izvori toplote. Svetlosne lampe ne bi trebalo postavljati suviše blizu mernoj mašini, a operater ne bi trebalo da manipuliše mernim predmetom duže vreme pre merenja;
- merni predmet treba da provede najmanje 12 sati u termostatičkoj sobi pre izvodjenja preciznog merenja.

2.1.2. Uticaj vibracija

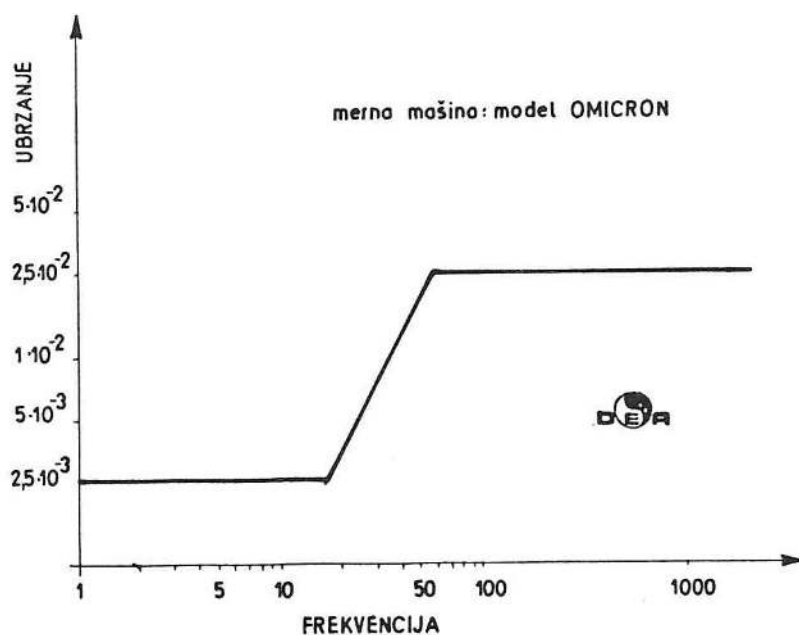
Kao izvori grešaka mogu da se jave i vibracije koje su rezultat bilo nekontrolisanog pomeranja mehaničkih delova obuhvaćenih merenjem (elementi KMM, merni predmet) bilo spoljnjih sila (usled dejstva drugih, obradnih mašina, kompresora, viljuškara itd.). Ove vibracije se preko temelja prenose na mernu mašinu stvaraju-

ći njene sopstvene oscilacije koje smanjuju ukupnu tačnost KMM. Izvesne prekomerne amplitude ovih oscilacija mogu da izazovu i oštećenje merne mašine. Vibracije se mogu eliminisati pravilnim izborom mesta postavljanja KMM, pomoću odredjenih elemenata koji priгуšuju oscilacije i koji se postavljaju pod mernu mašinu ili pomoću odgovarajućih temelja. Za temelje se, prema [5], preporučuje pojačan beton B15 (DIN 1045), dimenzija najmanje 2000 mm x 1800 mm i debljine 250 mm, što zavisi od veličine merne mašine.

Proizvodjači KMM daju podatke o dozvoljenim amplitudama, frekvencijama i ubrzanjima vibracija, npr:

- amplituda: 20 mm/s^2 u pravcu sve tri koordinatne ose,
- frekvencija: 1 do 80 Hz.

Na slici 4. je prikazan dijagram za odredjivanje maksimalno dozvoljenih vibracija za model merne mašine OMICRON italijanskog proizvođača DEA.

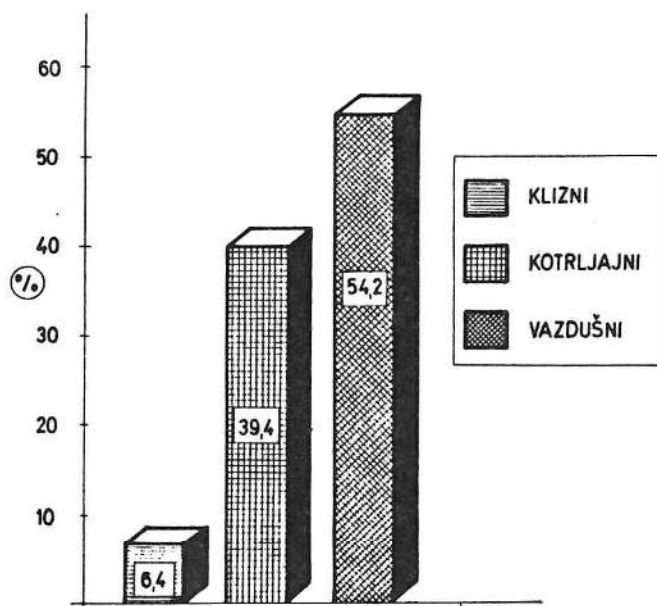


Slika 4. Dijagram maksimalno dozvoljenih vibracija za KMM model OMICRON (DEA).

Smatra se da je uticaj vibracija eliminisan kada se one svedu na veličine koje su manje od rezolucije KMM.

2.1.3. Vlažnost vazduha

Vazduh kojim se snabdeva prostorija u kojoj se nalazi KMM može bitno da utiče na tačnost merne mašine i na njen radni vek. Prisustvo vode i ulja u vazduhu nepovoljno utiče na ležajeve KMM, povećavajući trenje i ubrzavajući habanje.



Slika 5. Pregled primenjenih ležaja na KMM
|11|

lativnu vlažnost.

Prema CMMA preporukama predvidja se:

- pritisak vazduha od 6 bara ± 1 bar
- srednja temperatura od $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,
- relativna vlažnost od $45\% \pm 10\%$ (DEA-65%).

Radi eliminisanja vode i ulja iz vazduha u instalacije se ugradjuju filteri i separatori, a da bi se sprečila korozija metalnih delova KMM, u mernu sobu se instaliraju uredjaji za kontrolu vlažnosti.

2.1.4 Nečistoća

Kako se na mernim mašinama mere dimenzije izražene u mikrometrima, pa i delovima mikrometra, ne može se zanemariti uticaj prašine. Ona se

Zbog toga se u poslednje vreme sve više primenjuju vazdušni ležaji (slika 5) kojima se postiže potrebna stabilnost i tačnost pozicioniranja, ravnomernost pomeranja klizača, stolova, konzola i portala čak i pri dejstvu veoma malih sila. Proizvođači KMM propisuju određene parametre vazduha, koji obuhvataju srednju temperaturu, dozvoljenu varijaciju temperature, pritisak, dozvoljeno odstupanje pritiska i re-

zbog toga mora eliminisati, te je u tom cilju potrebno:

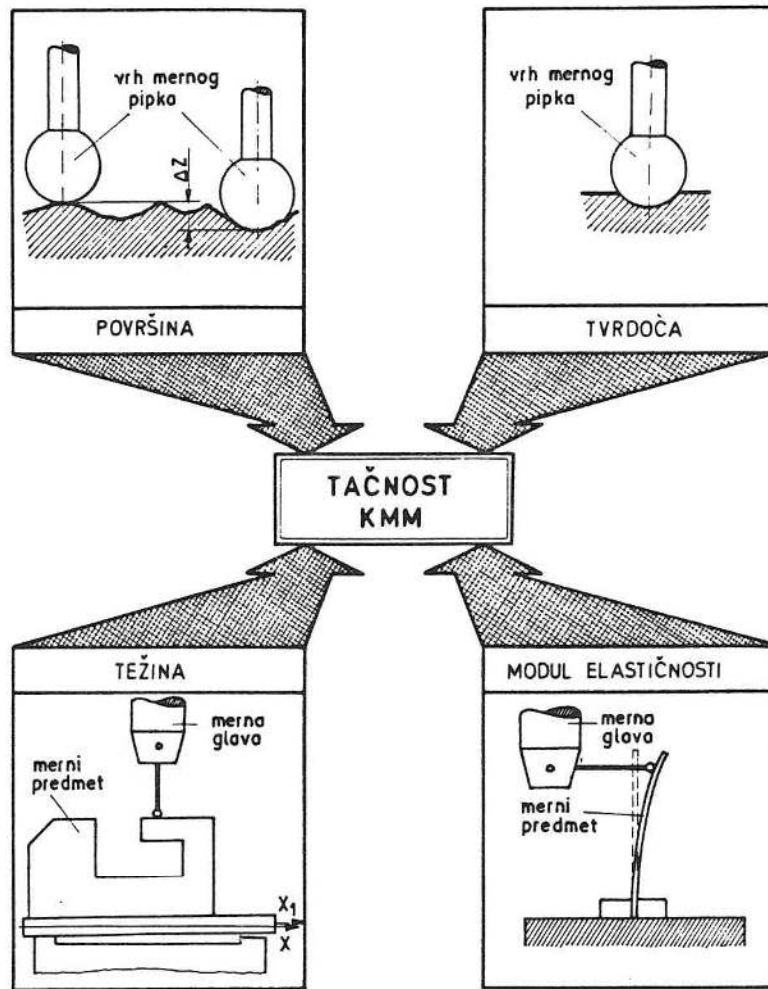
- periodično, pažljivo čišćenje merne mašine, posebno njenih vodjica,
- bojiti zidove merne sobe bojom neosetljivom na prašinu, a pôd pokriti linoleumom otpornim na prašinu,
- dovoditi u mernu sobu čist, filtriran vazduh pod pritiskom,
- ne ulaziti u prostoriju sa KMM sa prašnjavom obućom i odećom,
- ne izvoditi u okolini KMM nikakve mehaničke operacije (bušenje, struganje, glodanje, itd.),
- pri rukovanju mernim predmetima i mašinom koristiti lanene rukavice.

Pored ovih uslova okoline, preporučuju se atmosferski pritisak u prostoriji od 1000 hPa \pm 200 hPa i nivo buke do 80 dB.

2.2. UTICAJ MERNOG PREDMETA NA TAČNOST KMM

Osobine mernog predmeta takodje mogu biti izvor gréšaka. Ovde se pre svega misli na stanje površine, tvrdoću, težinu, oblik i modul elastičnosti (slika 6).

Pri opipavanju veoma hrapavih površina mernog predmeta mernim pipcima sa malim prečnicima mernih kuglica, mogu se dobiti veoma netačni merni rezultati. Isto tako, pri merenju mekih mernih predmeta (guma, veštački materijali) može doći usled neodgovarajuće merne sile do utiskivanja vrha mernog pipka u materijal mernog predmeta, a time i do greške merenja. Sopstvena težina mernog predmeta može izazvati deformacije vodjica (u zavisnosti od statičke i dinamičke krutosti KMM), pa se pri merenju, naročito težih mernih predmeta, mora voditi računa i o mestu postavljanja mernog predmeta na stolu KMM. Posebnu pažnju treba posvetiti merenjima predmeta koji se zbog svog oblika elastično deformišu pod uticajem merne sile.



Slika 6. Uticaj osobina mernog predmeta na tačnost KMM.

2.3. UTICAJ ČOVEKA NA TAČNOST KMM

Programer i operater mogu takodje da budu izvori grešaka pri merenju. Tu se pre svega misli na neodgovarajuće usvojenu strategiju merenja, neadekvatno izabrane koordinatne sisteme, pogrešan izbor sile merenja, pogrešno usvojen prečnik merne kuglice, nepažljivo opsluživanje KMM. Bitan uticaj na tačnost KMM i njen radni vek ima i obezbedjenje navedenih uslova okoline i drugih preporuka proizvođača KMM i periodična kontrola tačnosti merne mašine.

3.0. ISPITIVANJE TAČNOSTI KMM

Na tačnost KMM utiču dakle i mikroklimatski uslovi, pa je potrebno, pre puštanja u rad i nakon izvesnog perioda eksploatacije merne mašine, proveriti:

- da li su ispunjeni propisani uslovi okoline i
- da li merna mašina ostvaruje propisanu tačnost u datim uslovima.

Metode ispitivanja tačnosti KMM najpre su propisivali sami proizvođači, da bi se postepeno u zemljama gde su KMM našle široku primenu razvili odgovarajući standardi koji definišu ovu problematiku.

NMTBA metod za ispitivanje tačnosti KMM je prvi oficijelni poznati metod koji je publikovan u Engleskoj. Prema ovom standardu tačnost svake koordinatne ose merne mašine se ispituje nezavisno jedna od druge, a tačnost se definiše u zavisnosti od maksimalne i minimalne srednje vrednosti i standardne devijacije mernih podataka.

VDI 3254 je slična prethodnoj metodi, ali detaljnije prikazuje statističku analizu podataka. Ovaj standard je kao zastareo zamenjen *VDI/DGQ 3441* standardom čija je osnovna karakteristika da se tačnost KMM određuje na osnovu malog broja eksperimentalnih tačaka.

CMMA je prva publikovana metoda koja tačnost KMM ocenjuje na osnovu geometrijskih grešaka, kao što su pravost i ravnost svake ose. Ona takodje diskutuje i prostornu tačnost koja zahteva sprovođenje testova duž pravača koji nisu paralelni ni jednoj mernoj osi. Ovaj standard ne opisuje tehniku analize podataka, nego tačnost merne mašine definiše kao zbir nekih konstantnih vrednosti i dodatnih vrednosti zavisnih od dužine merenja.

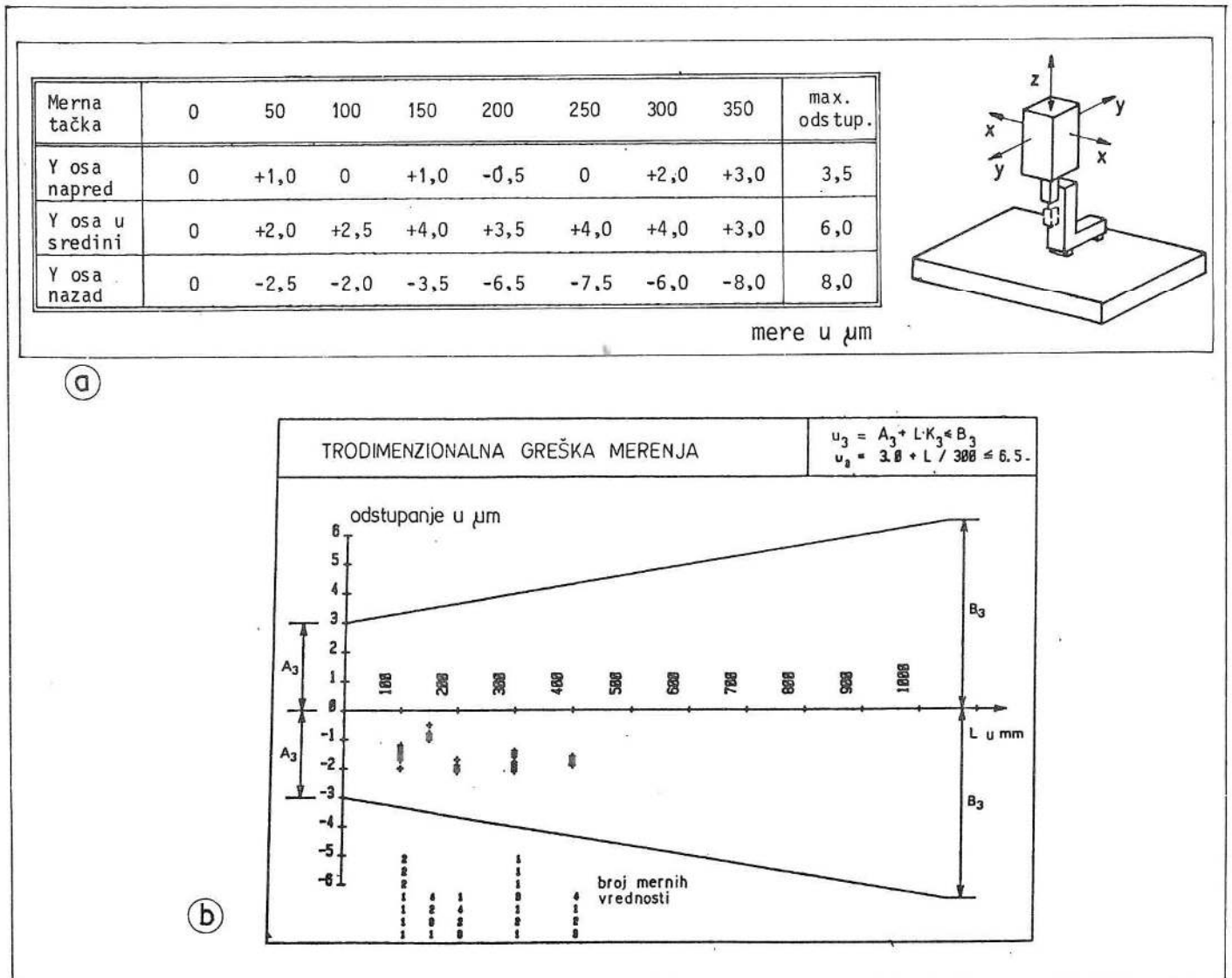
ANSI/ANSME B89.1.12M-1985 je američki standard koji detaljnije opisuje postupak ispitivanja tačnosti linearnih kretanja, prostorne tačnosti i ponovljivosti KMM. Ovaj standard je razvijen u cilju obezbedjenja procedure prijema KMM koja bi bila obavezna i za proizvođača i za korisnika, pošto su do tada svaki proizvođač i svaki korisnik imali svoje sopstvene procedure. Ovaj standard međutim, ne obuhvata specifične procedure za statističku analizu podataka.

VDI/VDE 2617 je zapadno-nemački ekvivalent *CMMA* standardu. Bazira se na statističkim metodama *VDI/DGQ 3441* standarda, a razlikuje

jedno, dvo i trodimenzionalne merne tačnosti koje se specificiraju na 95% nivou pouzdanosti.

Za ispitivanje tačnosti KMM treba definisati:

- geometrijske greške KMM u koje spadaju:
 - greške pravosti osa
 - greške upravnosti osa
 - greške pozicioniranja osa
 - greške rotacija



Slika 7. Rezultati ispitivanja odstupanja upravnosti Z i Y ose (a) i trodimenzionalne dužinske merne nesigurnosti (b).

- ukupnu mernu nesigurnost KMM, odnosno:
 - aksijalnu mernu nesigurnost dužinskih merenja,
 - prostornu mernu nesigurnost dužinskih merenja,
 - ponovljivost dužinskih merenja.

Za sva ova ispitivanja tačnosti razvijeni su i odgovarajući etaloni, šabloni i aparati (autokolimatori, laserski interferometri, elektronske libele itd.), a rezultati ispitivanja se obično daju u obliku dijagrama i tabela (slika 7.).

4.0 ZAKLJUČCI

Tendencije razvoja proizvodnih sistema, sa sve izraženijim potrebama za njihovom fleksibilnošću, nametnula je i neophodnost primene KMM u njima. Da bi se na osnovu rezultata merenja sprovedenih na KMM moglo pouzdano upravljati ovim savremenim sistemima, neophodno je da merne mašine poseduju određenu tačnost. Ova tačnost, između ostalog, zavisi i od raznih uslova koji nisu vezani za njenu konstrukciju. U radu su detaljnije opisani ti uslovi, posebno mikroklimatski uslovi pod kojim merna mašina radi.

5.0 LITERATURA

- [1.] An American National Standard, ANSI/ANSME B89.1.12M-1985, The American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [2.] Bambach M., Breyer K.H., Göpfert U., Hesper H.J. i dr., Zur Genauigkeit von Mehrkoordinaten-Meßgeräten und deren Überprüfung, VDI-Z, 122, (1980), 13
- [3.] Belforte G., Bona M., Canuto E., Donati F. i dr., Coordinate Measuring Machines and Machine Tools Selfcalibration and Error Correction, Annals of the CIRP, Vol. 36/1/1987.
- [4.] British Standard, BS6808
- [5.] CMM, Accuracy Specification for Coordinate Measuring Machine
- [6.] Dimitrijević-Marković Lj., Terzić S., Predlog procedure prijema KMM, prvi međunarodni seminar "Fleksibilna automatizacija u proizvodnoj metrologiji", Beograd, 1988.
- [7.] Radovanović V., Stanić J., Salatić B.: Ispitivanje tačnosti NUMM - metode za ispitivanje rotacionih odstupanja kod NUMM, prvi međunarodni seminar "Fleksibilna automatizacija u proizvodnoj metrologiji", Beograd, 1988.

- [8.] Standard ISO/TC3/WG10, Dimensional and geometrical coordinate measurements, 1987.
- [9.] Stanić J., Majstorović V., Primena, podela i strukturne jedinice NUMM, prvi međunarodni seminar "Fleksibilna automatizacija u proizvodnoj metrologiji", Beograd, 1988.
- [10.] Stankov J., Neka iskustva u korišćenju KMM u LZT-Kikinda, seminar "Koordinatna merilna tehnika v proizvodnji", Maribor, 1982.
- [11.] Vasić S., Koordinatne merne mašine i njihova integracija u fleksibilne proizvodne sisteme, seminarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 1988.
- [12.] VDI/VDE 2617, Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten, Kenngrößen und deren Prüfung, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1983.
- [13.] Ziljcov J., Iskustva laboratorija za tehnološke meritve na Tehnički fakulteti v Mariboru u radu sa CNC koordinatnim merim mašinama, 13. jugoslovenski simpozij o merenjima i mernoj opremi, JUKEM, Split, 1988.
- [14.] Zipin R., Measuring Machine Accuracy, "Test, Measurement and Inspection for Quality Control Conference/Exhibition", Ohio, 1987.