

**OPTIMIZACIJA PROCESA MERENJA NA KOORDINATNOJ MERNOJ MAŠINI
PRIMENOM TAGUČI DIZAJNA EKSPERIMENTA****OPTIMIZATION OF THE MEASUREMENT PROCESS ON A COORDINATE
MEASURING MACHINE USING TAGUCHI DESIGN OF EXPERIMENT**Miloš Ranisavljev, Branko Štrbac, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MAŠINSTVO**

Kratak sadržaj – Iako ih karakterišu visoke metrološke performanse, zbog složenosti procesa merenja na koordinatnim mernim mašinama, postoji mnogo faktora koji utiču na kvalitet rezultata merenja. Cilj ove studije jeste, primenom Tagučići dizajna eksperimenta koji analizira glavne uticajne faktore na kvalitet rezultata merenja, optimizovati proces merenja na mernim mašinama tako da se dobiju najbolje performanse sa aspekta tačnosti i merne nesigurnosti. Studija slučaja je sprovedena na toleranciji ravnosti i merena je ravnost na četiri radna predmeta čije greške oblika ravne površine se značajno razlikuju.

Ključne reči: koordinatne merne mašine, tačnost, merna nesigurnost, Tagučići dizajn eksperimenta

Abstract – Although they are characterized by high metrological performance, due to the complexity of the measurement process on coordinate measuring machines, there are many factors that affect the quality of measurement results. The aim of this study is, by applying the Taguchi experimental design that analyzes the main influencing factors on the quality of measurement results, to optimize the measurement process on measuring machines so as to obtain the best performance in terms of accuracy and measurement uncertainty. The case study was conducted on flatness tolerance and flatness error was measured on four workpieces whose flat surface form errors differ significantly.

Keywords: Coordinate measuring machine, accuracy, measurement uncertainty, Taguchi experimental design.

1. UVOD

Razvoj nauke i tehnologije u oblasti proizvodne metrologije doveo je do pojave koordinatnih mernih sistema. Koordinatni merni sistemi (KMS) predstavljaju kompleksne merne uređaje koji registruju koordinate tačaka na radnom predmetu u tro-dimenzionalnom prostoru kako bi došli do rezultata merenja.

Mogućnost merenja svih makro-tolerancija na radnim predmetima različite konfiguracije, postavila je koordinatne merne sisteme na leadersku poziciju u dimenzionalnoj metrologiji.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Branko Štrbac, docent.

Jedan od najčešće korišćenih KMS jeste koordinatna merna mašina (KMM). Međutim, KMM je veoma složen metrološki sistem i postoji mnoštvo faktora i njihovih interakcija koji utiču na kvalitet rezultata merenja. Kvalitet rezultata merenja na KMM zavisi od izbora merne strategije, uslova okoline u kojima se vrši merenje, grešaka hadverske strukture i mernog senzora, softverks analize, itd. Jedan od načina na koji se može pristupiti problemu optimizacije parametara strategije merenja jeste kroz sprovođenje dizajna eksperimenta (eng. *Design of Experiment - DoE*) [1]. Cilj optimizacije faktora uticaja na kvalite rezultata merenja iskazan kroz tačnost merenja i/ili mernu nesigurnost je izbor odgovarajućih nivoa uticajnih faktora pod kojim će KMM iskazati najviše metrološke performanse [2-4].

U ovom radu sprovedena je optimizacija merenja ravnosti 4 različite pločice čije greške oblika se značajno razlikuju. Kao faktori koji utiču na tačnost merenja i mernu nesigurnost odabrani su prečnik vrha mernog pipka, broj tačaka u mernoj strategiji, položaj radnog predmeta u radnom prostoru KMM i temperatura. Na osnovu izabranih faktora i njihovih nivoa sproveden je Tagučići dizajn eksperimenta sa ciljem da se pronađu optimalne vrednosti pojedinih faktora tj. slučajji gde rezultat merenja na KMM ima najmanju grešku i najmanju mernu nesigurnost. Tačnost merenja je dobijana kao razlika između referente vrednosti i vrednosti merenja na KMM Referentne vrednosti ravnosti pločica su dobijene na KMM veše klase tačnosti nego što je KMM koja je korišćena u sprovođenju studije.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Koordinatna merna mašina koja je korišćena za izvođenje eksperimenta je Carl Zeiss Contura G2 RDS, slika 1. Merna zapremina je 1000 mm, 1200 mm, 600 mm za koordinatne ose X, Y i Z, respektivno. Maksimalna dozvoljena greška (MPE_E) je $1.9+L/330$ (gde je L izraženo u mm). Na nosaču mernog senzora se nalazi obrtna RDS glava sa pasivnim VAST XXT senzorom. Merenja su sprovedena u diskretnom modu uzorkovanja tj. tačka-po-tačka.

Uzorci na kojima je vršen eksperiment su bile četiri pločice sa različitim vrednostima greške oblika i površinske hrapavosti. Tri pločice su bile od čelika dok je četvrta pločica bila plan paralelna merka koja predstavlja etalon ravnosti. Pločice od čelika su prikazane na slici 2., a plan paralelna pločica je prikazana na slici 3.

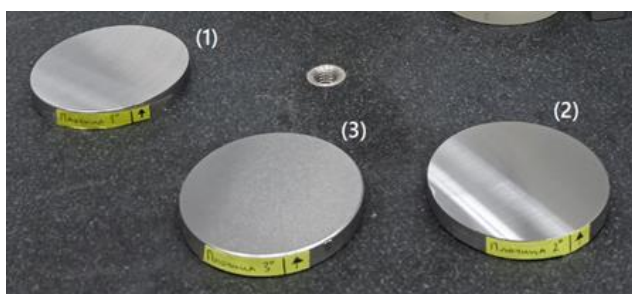


Slika 1. Koordinatna merna mašina Carl Zeiss CONTURA G2 RDS

Za formiranje plana eksperimenta odabran je Tagučići robusan dizajn eksperimenta. Prednosti Tagučići dizajna eksperimenta u odnosu na faktorni plan eksperimenta je u smanjenom broju izvršavanja eksperimenta što donosi znatne uštede u vremenu.

Kao faktori koji su razmatrani u ovom eksperimentu odabrani su: prečnik mernog pipka, broj tačaka, merno mesto i temperatura. Faktori broja tačaka i mernog mesta su varirana na četiri nivoa, dok su faktori prečnika mernog pipka i temperature varirani na dva nivoa.

Na osnovu broja i nivoa faktora odabran je Tagučići L16 dizajn eksperimenta. Razmatrani faktori i njima pripadajući nivoi su prikazani u tabeli 1. Redosled izvođenja razmatranog eksperimenta prikazan je u tabeli 2.



Slika 2. Uzorci pločica 1, 2 i 3 od čelika



Slika 3. Pločica 4 – Plan paralelna merka

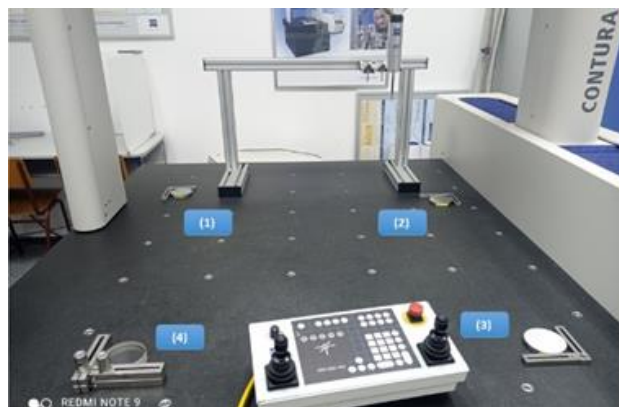
Na slici 4. prikazane su pozicije radnih predmeta tokom izvođenja eksperimenta, koje na ilustrativan način definišu faktor merno mesto u KMM zapremini.

Tabela 1. Faktori i njima pripadajući nivoi

Faktori	Broj nivoa	Vrednost nivoa
Prečnik pipka [mm]	2	0,75 3
Temperatura °C	2	20 26
Broj tačaka	4	10 25 60 100
Merno mesto	4	1 2 3 4

Tabela 2. Tagučići L16 dizajn eksperimenta

Br. tačaka	Merno mesto	Prečnik pipka	Temperatura
10	1	0.75	20
10	2	0.75	20
10	3	3	26
10	4	3	26
25	1	0.75	26
25	2	0.75	26
25	3	3	20
25	4	3	20
60	1	3	20
60	2	3	20
60	3	0.75	26
60	4	0.75	26
100	1	3	26
100	2	3	26
100	3	0.75	20
100	4	0.75	20



Slika 4. Položaj mernih pozicija 1,2,3 i 4, radnih predmeta tokom izvođenja eksperimenta

Uzorkovanjem tačaka sa površine radnih predmeta, prikupljen je skup tačaka sa koordinatama (x , y i z). Obrada uzorkovanih tačaka je vršena u softverkom paketu Calypso 4.8, gde je na osnovu prikupljenih tačaka formirana supstitutivna geometrija. Za algoritam fitovanja podataka korišćena je Metoda najmanjih kvadrata (eng. *Least Squares Method*).

Referentne vrednosti ravnosti radnih predmeta su dobijene na koordinatnoj mernoj mašini više klase tačnosti u metrološkoj laboratoriji „Orao“ Bijeljina.

Tabela 3. Referentne vrednosti

Radni predmet	Ravnost [mm]
Pločica 1	0,02
Pločica 2	0,0086
Pločica 3	0,0067
Plan-paralelno staklo	0,0002

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Analiza rezultata na izlaznu karakteristiku kvaliteta (ravnost), izvedena je pomoću softverskog paketa Minitab 17. Pošto se optimizacija sprovodi za 4 različita radna predmeta, rezultati će se prikazati za svaku pločicu ponaosob. Pomoću Taguči L16 dizajna eksperimenta će se utvrditi koji faktori i nivoi imaju najveći, odnosno, najmanji uticaj na izmerenu srednju vrednost (eng. Means) i standardnu devijaciju (eng. Standard deviation) karakteristike kvaliteta. Metodom analize varijanse (ANOVA) će se utvrditi koji od faktora u studiji ima statističku signifikantnost. Studijom bias-a će se utvrditi koliko svaka od pločica odstupa od referentnih vrednosti i biće glavna studija prema kojoj će se birati optimalni parametri strategije merenja ravnosti. Kako nijedan rezultat merenja nije potpun bez procene merne nesigurnosti, izvršena je i procena merne nesigurnosti za svaku od pločica, koja zbog ograničenog prostora neće biti prikazana.

3.1. Analiza rezultata za proćicu 1

Prema rezultatima ANOVA analize, koji su prikazani u Tabeli 4., od četiri posmatrana faktora, samo su faktori broja taćaka i prećnika pipka statistiĉki signifikantni pošto imaju p vrednost manju od praga znaćajnosti 0,05 ($\alpha=0,05$, za interval poverenja 95%). Najveći uticaj na srednje vrednosti ravnosti imaju broj taćaka sa rangom 1, zatim merno mesto sa rangom 2, prećnik pipka sa rangom 3, i kao najneuticajniji je faktor temperature sa rangom 4. Uticaji faktora i njihovih nivoa su prikazani na slici 5. Najveći raspon srednjih vrednosti nivoa faktora „Broja taćaka“ ukazuje na najveći uticaj ovog faktora na srednje

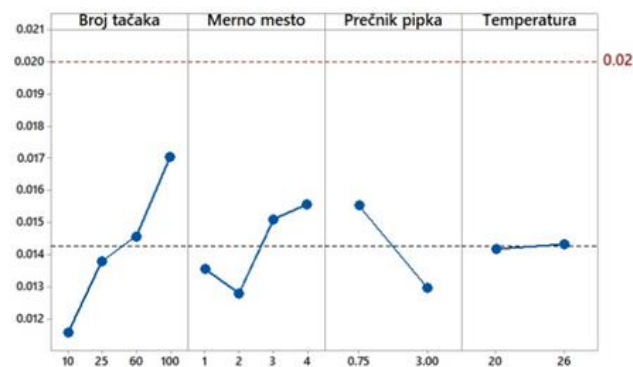
Tabela 4. Rezultati ANOVA analize

Izvor	Stepeni slobode	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	p
Broj taćaka	3	0,000061	0,000061	0,000020	8,53	0,010
Merno mesto	3	0,000020	0,000020	0,000007	2,81	0,117
Prećnik pipka	1	0,000026	0,000026	0,000026	10,97	0,013
Temperatura	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,04	0,855
Rezidualna greška	7	0,000017	0,000017	0,000002		
Ukupno	15	0,000124				

3.2. Kratak pregled rezultata za ploćice 2, 3 i 4

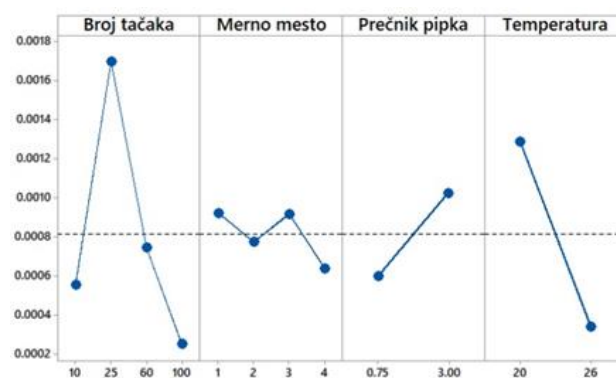
U nastavku će ukratko biti navedeni rezultati za ostale tri ploćice. Analiza svih uzoraka je obradena na indentićan naćin prikazivanjem tabela rezultata sa pratećim

vrednosti ravnosti. Sa druge strane praktićno ravna linija izmeću nivoa faktora temperature ukazuje na neznan uticaj ovog faktora na promenu srednjih vrednosti rezultata merenja.



Slika 5. Dijagram glavnih uticaja faktora na srednje vrednosti izlazne karakteristike kvaliteta

Ako se posmatraju uticajni faktori na rasipanje rezultata, odnosno na standardnu devijaciju, tu je slućaj drugaćiji. Jedini signifikantan faktor na rasipanje rezultata jeste temperatura, što se moće primetiti rasponom taćaka izmeću dva nivoa faktora na slici 6.



Slika 6. Dijagram glavnih uticaja faktora na standardnu devijaciju izlazne karakteristike kvaliteta

dijagramima kako je to prikazano u poglavlju 3.1. Analizom varijanse za srednje vrednosti ploćice 2 utvrđeno je da faktor broja taćaka ima statistićku signifikantnost sa p vrednosti koja iznosi 0,006. Sa druge

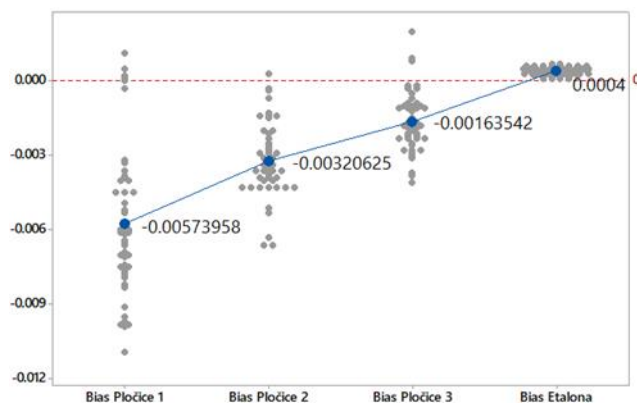
strane uticajni faktori na standardnu devijaciju su broj tačaka, prečnik pipka i temperatura, sa p vrednostima 0,04, 0,04, 0,00, respektivno. Signifikantni faktori za srednju vrednost pločice 3 su broj tačaka ($p=0,000$), merno mesto ($p=0,008$) i prečnik pipka ($p=0,007$). Temperatura je jedino značajna kod promene u standardnoj devijaciji rezultata ($p=0,002$). Rezultati ANOVA za Pločicu 4 – Etalon, nisu pokazali uticajne parametre, tj. p vrednosti svih faktora su bile iznad praga značajnosti 0,05.

3.3. Izračunavanje bias-a i izbor optimalnih vrednosti parametara

Zbog preglednosti, rezultati studije bias-a za sve 4 pločice su prikazani na slici 7. Ono što se može zapaziti je da najveće odstupanje ravnosti od referentnih vrednosti ima pločica 1 sa srednjom vrednošću bias-a od približno -0,00574 mm. Najmanje odstupanje od referentnih vrednosti ima etalon, sa srednjom vrednošću bias-a od 0,0004 mm. Na osnovu prethodno iznetih analiza, utvrđeno je da kod pločice 1 najmanje odstupanje ravnosti se dobija izborom četvrtog mernog mesta, sa najmanjim prečnikom mernog pipka uz najveći broj tačaka merenja (100), na referentnoj temperaturi od 20°. Za pločicu 2 se dobijaju identične vrednosti faktora i njihovih nivoa kao optimalni.

Za pločicu 3 optimalne vrednosti ravnosti se dobijaju odabirom mernog mesta 3, sa najmanjim prečnikom mernog pipka i najvećim brojem tačaka, na referentnoj temperaturi od 20°.

Jedina pločica kod koje optimalne vrednosti imaju značajniju razliku u odnosu na prethodne 3 pločice jeste etalon pločica. Kod etalona, najmanje odstupanje se postiže izborom mernog mesta 4, izborom većeg prečnika mernog pipka u kombinaciji sa manjim brojem tačaka u strategiji (25). Optimalna temperatura iznosi 20°.



Slika 7. Dijagram srednjih vrednosti bias-a za pločicu 1, 2, 3 i 4

4. ZAKLJUČAK

Izbor merne strategije na koordinatnim mernim mašinama direkto utiče na kvalitet rezultata merenja. Često je potrebno pronaći kompromis između različitih uticajnih faktora u mernoj strategiji kao što su broj tačaka, vreme uzorkovanja tačaka itd. Kroz analizu Taguči dizajna eksperimenta i studiju bias-a, ovaj rad je imao za cilj da pronađe kombinaciju faktora koja daje minimalno odstupanje izmerene ravnosti 4 različite pločice u odnosu na njihove referentne vrednosti ravnosti.

5. LITERATURA

- [1] E. M. Barini, G. Tosello, and L. De Chiffre, "Uncertainty analysis of point-by-point sampling complex surfaces using touch probe CMMs. DOE for complex surfaces verification with CMM," *Precis. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 16–21, 2010.
- [2] A. M. A. Al-Ahmari and J. Aalam, "Optimizing parameters of freeform surface reconstruction using CMM," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 64, pp. 17–28, 2015.
- [3] C. X. J. Feng, A. L. Saal, J. G. Salsbury, A. R. Ness, and G. C. S. Lin, "Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study," *Precis. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 94–101, 2007.
- [4] Štrbac, B., Ačko, B., Havrišan, S., Matin, I., Savković, B., & Hadžistević, M. "Investigation of the effect of temperature and other significant factors on systematic error and measurement uncertainty in CMM measurements by applying design of experiments." *Measurement* 158 (2020): 107692.

Kratka biografija:



Miloš Ranisavljev rođen je u Zrenjaninu 1997. god. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Proizvodno mašinstvo – Računarom podržane tehnologije odbranio je 2021.god. kontakt: ranisavljev@uns.ac.rs



Dr Branko Štrbac rođen je u Novom Sadu 1983. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2017. god. i od tada je u zvanju docent. Oblast interesovanja: proizvodna metrologija, KMM, planiranje i obrada eksperimenta.