



KATEDRA ZA PROIZVODNO  
MAŠINSTVO

Predmet:

PRO210A007-0497.000  
**ZAVRŠNI PREDMET**  
**MAŠINE ALATKE**

Broj poena za Uvod (Section I, do 20 poena):	
Broj poena za postavku rešenja (Section II, do 20 poena):	
Broj poena za rezultate (Section III, do 20 poena):	
Broj poena za zaključak (Section IV, do 10 poena):	
Ukupan broj poena za elaborat (do 70 poena):	
Ukupan broj poena na završnom ispitu (Prezentacija, do 30 poena):	
UKUPAN BROJ POENA ZA PREDMET (do 100 poena):	
ZAVRŠNA OCENA:	

**Statistička identifikacija  
toplotnih pomenaja glavnog  
vretena struga**

**ZAVRŠNI RAD**

Ime i prezime studenta:	<b>Boris Najdeski i Nenad Bašić</b>
Potpis studenta:	
Broj indeksa:	343/06 i 31/06
Predmetni nastavnik:	Prof. dr Miloš Glavonjić
Potpis:	

## POSTAVKA PROBLEMA

Univerzitet u Beogradu

Mašinski fakultet

Završni predmet: Mašine alatke

Zadatak za školsku 2008/2009. godinu

Tema: Statistička identifikacija toplotnih pomeraja glavnog vretena struga.

Uzor: S. Segonds, C. Bes, G. Cohen, Y. Landon, *Statistical study of the spindle dilatation phenomena- Application to a NC lathe*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 2307–2311.

Toplotni pomeraji mašine alatke i obradnog sistema sada su aktuelniji više nego ikad zbog povećavanja brzohodnosti mašina alatki. Identifikacija tih pomeraja vrši se u raznim procedurama ispitivanja mašina alatki i obradnih sistema, kako u onim sa direktnim merenjem pokazatelja kvaliteta, tako i u onim sa indirektnim merenjem. Postoje i kompleti standarda za takva ispitivanja. Primer je standard *ISO 230-3 Test code for machine tools - Part 3: Determination of thermal effects*. U ovom slučaju, u raspoloživom vremenu i sa raspoloživom laboratorijskom opremom, treba uraditi od svega po malo zato što cilj učenje o metodima ispitivanja mašina alatki, a ne sprovođenje samog ispitivanja neke mašine alatke, ili obradnog sistema sa njom.

Potrebno je:

Razmotriti referentnu literaturu, a od toga posebno rad koji je odabran kao Uzor.

Planirati potrebne eksperimente za određivanje uzdužnih termičkih pomeraja vrha glavnog vretena odabranog struga.

Opisati korišćene procedure akvizicije i obrade eksperimentalnih podataka.

Protumačiti i uporediti dobijene rezultate.

Proceduru iz Uzora treba posmatrati kao jednu od mnogih koje predlažu razne laboratorije, a koje nisu i predmet nekog standarda. Ta procedura je zasnovana na digitalnoj obradi eksperimentalnih podataka, koji se prikupljaju u akviziciji pomoću pogodnog senzora i A/D konverzije sa odabranom frekvencom odabiranja. Zbog toga je predložena statistička obrada tih podataka pod pretpostavkom da je pripremom eksperimenta isključeno sve što može sistematski poremetiti signal koji treba da bude slika uzdužnog pomeraja vrha glavnog vretena (loš kvalitet uležištenja glavnog vretena, loše pripremljen senzor za akviziciju signala itd). U slučaju da signal o pomeraju vrha vretena ne bude čist, treba primeniti i neku drugu proceduru, da se dođe do nekog zaključka o toplotnom uzdužnom pomeraju vrha glavnog vretena ispitivanog struga zato što se ovo ispitivanje koristi samo za potrebe edukacije.

## SADRŽAJ:

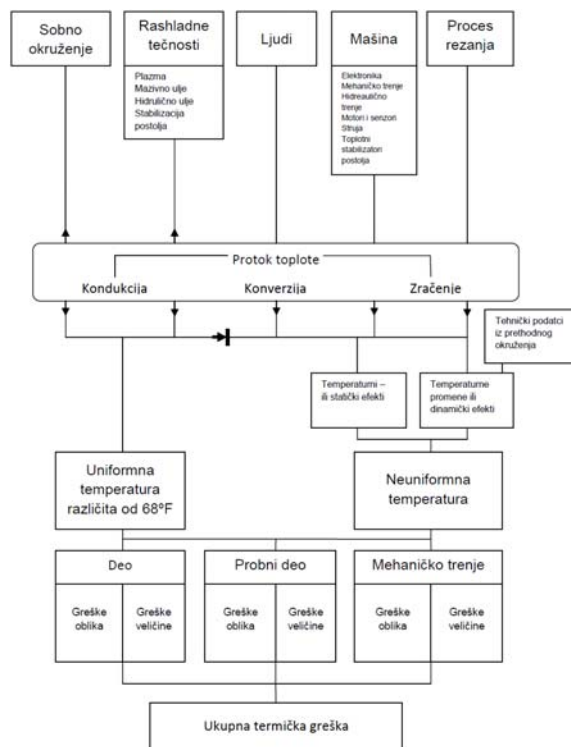
1.	<i>REDUKOVANJE I KOMPENZACIJA GREŠAKA MAŠINE ALATKE</i>	3
1.1	Uvod	3
2.	<i>STATISTIČKA STUDIJA POJAVE DILATACIJE GLAVNOG VRETENA – PRIMENA NA NU STRUGOVE</i>	4
2.1.	Uvodno razmatranje problema	4
2.2.	Postavka eksperimenta	5
2.3.	Kontekst studije	5
2.4.	Raspodela uzoraka	6
2.5.	Standardna devijacija pojave dilatacije glavnog vretena	7
2.6.	<i>Primena neuronskih mreža za kompenzaciju temperaturnih pomeraja petoosnih glodalica</i>	8
3.	PROVERA $\chi^2$ -testa	9
3.1.	Provera dobijenih vrednosti prema primeru iz literature [9]	9
3.2.	Provera dobijenih vrednosti prema primeru iz literature [9] korišćenjem softverskog paketa „matlab“	12
4.	MERENJE	13
4.1.	<i>Rezltati merenja posrednom metodom</i>	16
4.2.	Raspored mernih mesta za merenje neposrednom metodom	23
4.3.	Rezultati merenja neposrednom metodom	23
4.4.	<i>Rezultati ispitivanja uzdužnih termičkih pomeraja vrha glavnog vretena struga Hase Wrede</i>	25
5.	Zaključak	26
6.	Literatura	27

# 1. REDUKOVANJE I KOMPENZACIJA GREŠAKA MAŠINE ALATKE

## 1.1 Uvod

Unutrašnji i spoljašnji toplotni izvor je uzrok termo-elastičnih deformacija mašine alatke što rezultuje u geometrijskim netačnostima radnog dela. Uticaj toplote učestvuje u više od 50% ukupne greške. Potreba za redukovanjem ovog izvora greške primećena je još u ranim 60-tim i istraživanja u ovoj oblasti su započeta u Bryan et al-u. [11,12] Obostrana odgovornost, proizvođača mašine alatke i korisnika te mašine, da uklone toplotno pruzrokovanih grešaka. Slika 1. nam daje pregled problema toplotnih uticaja, greške se manifestuju u vidu grešake oblika i greške veličine. Različiti toplotni izvori u kombinaciji sa različitim mehanizmima za toplotno provođenje dovode do uniformne temperature od 20°C ili do neuniformnih temperaturnih širenja preko strukture mašine, rezultujući odstupanjima od veličine i geometrijskih oblika mašine i predmeta obrade. U ovoj studiji se posmatra toplotno izduženje glavnog vretena univerzalnog struga, kao faktor koji najviše utiče na poremećaj dimenzija oblika.

Radi kompenzacije toplotnog izdužnja glavnog vretena univerzalnog struga, utvrđeni su eksperimenti i modeli namenjeni određivanju srednje vrednosti dilatacije glavnog vretena. Problem utvrđivanja intervala poverenja vezanih za ova predviđanja je još uvek otvoren. Ukoliko je moguće proceniti srednju vrednost dilatacije, bilo koji od postojećih modela može predvideti koliko blizu ili koliko daleko od srednje vrednosti će biti dilatacije glavnog vretena. Ovaj rad bavi se problemom vrste raspodele vrednosti dilatacije. Hi-kvadrat test izvršen na dobijenim vrednostima dilatacije otkriva da li vrednosti dilatacije imaju normalnu raspodelu. Stoga, predstavljen je model koji na osnovu predviđene dilatacije utvrđuje interval poverenja. Zakon raspodele uzoraka dilatacije dozvoljava uspostavljanje ovog modela. Nakon toga se primenjuje metoda za izračunavanje gornje granice standardne devijacije zakona raspodele dilatacije. Ovaj model se koristi za određivanje intervala poverenja pojave dilatacije glavnog vretena. Utvrđeni rezultati omogućavaju korisno predviđanje dilatacije zbog toga što je sada postavljena veza između intervala poverenja i predviđanja.



Slika 1. Dijagram toplotnih uticaja.

## 2. STATISTIČKA STUDIJA POJAVE DILATACIJE GLAVNOG VRETENA – PRIMENA NA NU STRUGOVE

### 2.1. Uvodno razmatranje problema

Proces obrade uklanjanja materijala proizvodi toplotu [1-3]. Postoji nekoliko načina kojima se može ograničiti povećanje temperature mašine, radnog predmeta i alata tokom mašinske obrade [4,5]. Pri struganju, kao i pri glodanju, dolazi do dimenzionalne promene kao jedne od posledica povećanja temperature do kojeg dolazi usled, na primer, procesa odsecanja ili usled trenja koje je posledica pomeraja alata po njenim osama. Glavno vreteno je mašinski deo čija je dimenzionalna promena najzančajnija među delovima mašine koji su uključeni u proces rezanja [4,5]. Disperzije nastale elongacijom (izduživanjem) glavnog vretena u toku mašinske obrade očigledno su štetne po dobijanje tačnih dimenzija po Z-osi. Naravno, sredstva koja se koriste u serijskoj proizvodnji pokušavaju da ograniče dimenzionalnu promenu glavnog vretena tokom mašinske obrade, bilo putem sistema hlađenja ili zagrevanjem glavnog vretena pre puštanja u rad. Čak i ako ovi postupci mogu da ograniče dimenzionalnu promenu, sistem hlađenja ne može poništiti izduženje [6], dok prethodno zagrevanje glavnog vretena, obrtanjem pri brzini koja se koristi prilikom obrade, određeni broj minuta, pre svake izmene te brzine ne može biti izvršeno u industrijskoj proizvodnji. Stoga, neophodno je predvideti izduženje glavnog vretena da bi se mogla uzeti u obzir prilikom obrade.

Struktura mašine i složenost izvora toplote, čine teškim uspostavljanje teoretskog modela sa konačnim brojem promenljivih, koji bi odslikavao pojavu dilatacije glavnog vretena.

Stoga, sprovedena su istraživanja koja su imala za cilj uspostavljanje eksperimentalnog modela izduženja [3,7,8]. Time što su dilatacija i relaksacija izraženi u obliku jednačina, omogućeno je izračunavanje odstupanja u datom vremenskom trenutku. Upotreba ovih modela omogućuje da se predvide i zatim kompenzuju dimenzionalne promene glavnog vretena tokom obrade.

Modeli izduženja glavnog vretena se koriste za procenu izduženja glavnog vretena. Ipak, neophodno je znati nepouzdanost modela raspodele izduženja da bi se predvideli intervali u kojima će dimenzije biti izračunane. Zbog toga, predstavljen je statistički pristup procenivanju neizvesnosti modela raspodele dilatacije. Ovaj metod će omogućiti da se oceni raspodela koja će postojati nakon korekcije procesa obrade prosečnom vrednošću izduženja dobijenom primenom postojećih modela. Interval poverenja modela dilatacije predstavljen u referenci [8] biće ocenjen za slučaj mašinske obrade sa varijacijama u broju obrtaja. Zaista, pojava dilatacije glavnog vretena zavisi od mnogo parametara, od kojih su neki identifikovani [3,8], ali dva faktora, prosečna vrednost i neizvesnost raspodele moraju se računati tokom svih operacija obrtanja da bi se ocenio interval konačnih dimenzija u kojima će deo biti proizveden.

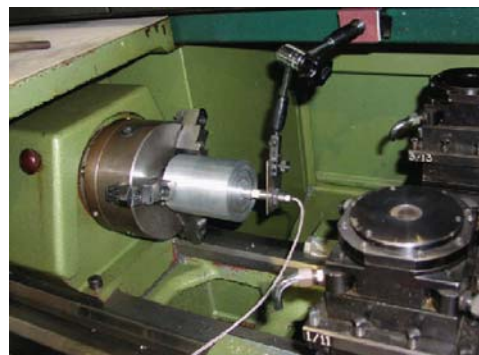
Novi pristup kojim će se opisati interval poverenja vezan za model predviđanja, kojim se utvrđuje izduženje glavnog vretena, će biti predstavljen u nastavku.

Ova karakterizacija je zasnovna na merama dilatacije glavnog vretena mašine kojom raspolažemo u našem proizvodnom odeljenju. Oblik glavnog vretena je standardan. Glavno vreteno pri svojoj rotaciji je najveći izvor toplote mašine [3]. Međutim, rezultati ove studije na našoj mašini zahtevaće dopunski test pre nego što se primene na glavno vreteno mašina alatki u celosti. Cilj ove prve studije je da se testira izvodljivost primene modela neizvesnosti na pojavu dilatacije glavnog vretena mašine. Ovo modeliranje može biti primenjeno na svim mašinama.

Za proizvodnu konfiguraciju, koja koristi merenja izduženja glavnog vretena CNC struga, okarakterisana je raspodela vrednosti izduženja u svakom vremenskom intervalu. Nakon što se utvrdi model raspodele vrednosti izduženja u zadatom vremenskom intervalu, može se dati predlog modela raspodele izduženja u zavisnosti od vremena i broja obrtaja.

## 2.2. Postavka eksperimenta

Mašina koja se koristi je CNC strug Cazeneuve HBCNC2, glavnog vretena snage 11kw, opremljen NUM 760 NC upravljačkom jedinicom. Prikupljanje podataka o elongaciji sprovedeno je korišćenjem strujnog Foucault bez-kontaktnog senzora udaljenosti rezolucije 6.47 V/mm, u paru sa memorijskim multimetrom čija je maksimalna frekvencija prikupljanja pri punoj rezoluciji 40 Hz. Senzor je pričvršćen za ram mašine, zatim kalibriran na test-predmetu obrade kako je prikazano na slici 2.



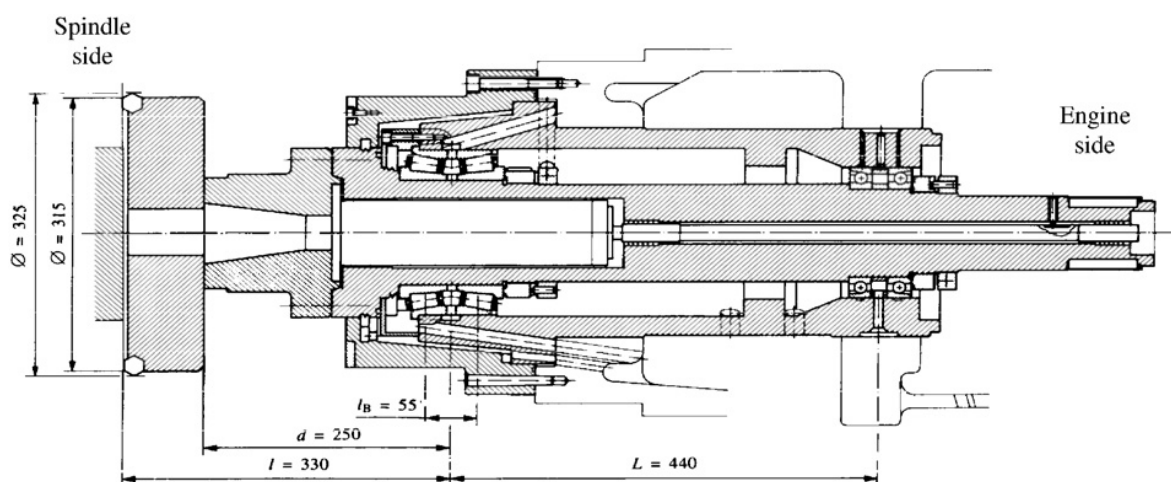
Slika 2. Eksperimentalna oprema. Merenje izduženja glavnog vretena

## 2.3. Kontekst studije

Studije o pojavi izduženja glavnog vretena pokazuju da, za dato glavno vreteno, najznačajniji faktor izduženja glavnog vretena je broj obrtaja [3,8].

Modeli predviđanja koji su danas u upotrebi i bave se izduženjem glavnog vretena uzimaju u obzir samo jedan faktor – broj obrtaja [8].

Ponovljivost pojave dilatacije je proučavana pri fiksiranom broju obrtaja. Karakteristike struga su u manjoj ili većoj meri univerzalne i u mnogome korespondiraju obliku glavnog vretena mašine koja je proučavana, kao što je prikazana na slici 3.



Slika 3. Radionički crtež glavnog vretena jednog struga

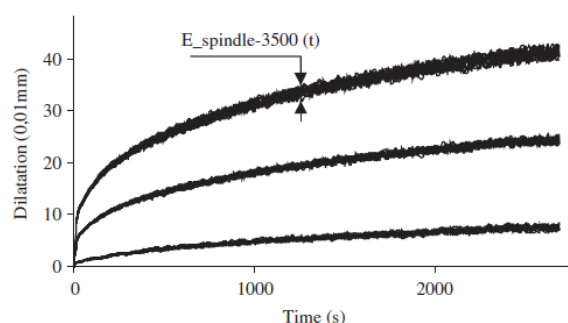
Radionički crtež oblika proučavanog glavnog vretena (prikazan na slici 3.) dozvoljava da se naznače dve bitne stavke koje su uobičajene za strugove iz iste porodice. Te stavke su:

Kuglični ležaj koji navodi jedinicu je napravljen sa dva, prethodno umetnuta, radijalna kuglična ležaja, ugaono kontaktna, postavljenih jedan nasuprot drugog. Ovaj raspored omogućava da se ostvari kontakt bez imalo razmaka

Osovinska postavka je napravljena na paru kugličnih ležajeva postavljenih pored glavnog vretena. Stoga, ovaj raspored koji se obično koristi za vođenje rotacije glavnog vretena omogućava da se ograniči uticaj pojave izduženja – osovinsko pomeranje glavnog vretena koje je posledica dilatacije je proporcionalan temperaturi, ali je takođe proporcionalan razdaljini između tačke osovinske postavke i glavnog vretena, slika 3.

Glavna vretena, napravljena korišćenjem ovih rasporeda, su podvrgnute pojavi dilatacije koja je u najvećoj meri funkcija broja obrtaja [3,5].

Izgled krivih izduženja koje su posledica rotacije glavnog vretena korespondiraju krivama dilatacije prikazanim na slici 4. i mogu biti modelovani po uzoru na model prikazan u referencama [3,8].



U prvom pristupu, proučavane su operacije vršene na NC strugu pri konstantnom broju obrtaja. Zaista, obrada sa promenljivim brojem obrtaja (koja se koristi za *Slika 4. Mere odstupanja za 500, 2000 i 3500* operacije rezanja konstantnim brzinama) mogu se interpolirati iz rezultata studije pri konstantnoj brzini, kao nastavak operacije pri konstantnoj brzini.

Utvrđena je greška ponovljivosti pojave dilatacije glavnog vretena da bi se ocenila vrednost intervala poverenja vezanog za model predviđanja [8].

Realizovana je prva serija merenja korišćenjem ekperimentalne konfiguracije prikazane na slici 3.

Zabeleženo je dvadeset merenja pri broju obrtaja od  $500 \text{ min}^{-1}$ , isto toliko za  $2000 \text{ min}^{-1}$ , i još jednom za  $3500 \text{ min}^{-1}$ . Dilatacija je merena pri broju obrtaja od  $3500 \text{ min}^{-1}$  jer je to najviši mogući broj obrtaja na mašini na kojoj je vršen eksperiment. Broj obrtaja od  $500 \text{ min}^{-1}$  je najniža vrednost za koju su izrađeni modeli dilatacije [3,8].

Rezultati 3. serije merenja dati su na slici 4., takođe je prikazana i teoretska promena dimenzija[8].

$e_{\text{spindle}}-N_i(t)$  je obeleženo kao greška amplitude za model dilatacije za glavno vretano koja se rotira brojem obrtaja od  $N_i [\text{min}^{-1}]$  u trenutku  $t$ .

Analiza slike 4. otkriva da:

Domen amplitude raspodele zavisi od vremena i broja obrtaja

Na mašini na kojoj je proučavana pojava dilatacije, maksimalna vrednost disperzije iznosila je  $0.036 \text{ mm}$ . Ova vrednost je izmerena nakon više od 2500 sekundi pri rotaciji od  $350 \text{ min}^{-1}$

Za utvrđeno vreme, sa povećanjem broja obrtaja raste i dilatacija

Zaista, čak i ukoliko je raspodela pojave slaba u poređenju sa glavnom vrednošću, ova raspodela zahteva razmatranje u slučaju uzastopnih promena broja obrtaja.

Time je utvrđena gornja granica raspodele ponovljivosti pojave dilatacije.

Sa  $N_{\text{max}}$  označena je najviši broja obrtaja dozvoljen na mašini (na mašini koja je u pitanju,  $N_{\text{max}}=3500 \text{ min}^{-1}$ ).

Za mašinsku obradu pri konstantnom broju obrtaja, čini se da je

$$\forall t, e_{\text{spindle}} - N_i(t) \leq e_{\text{spindle}} - N_{\text{max}}(t)$$

Neizvesnost izmerena nakon istog vremena  $t$  rotacije pri  $N_{\text{max}}$  utvrđena rezultatima prikazanim u slici 6. izabrana je za gornju granicu intervala poverenja vrednosti predviđene modelom nakon vremena  $t$  pri rotaciji od  $N_i \text{ min}^{-1}$ .

## 2.4. Raspodela uzoraka

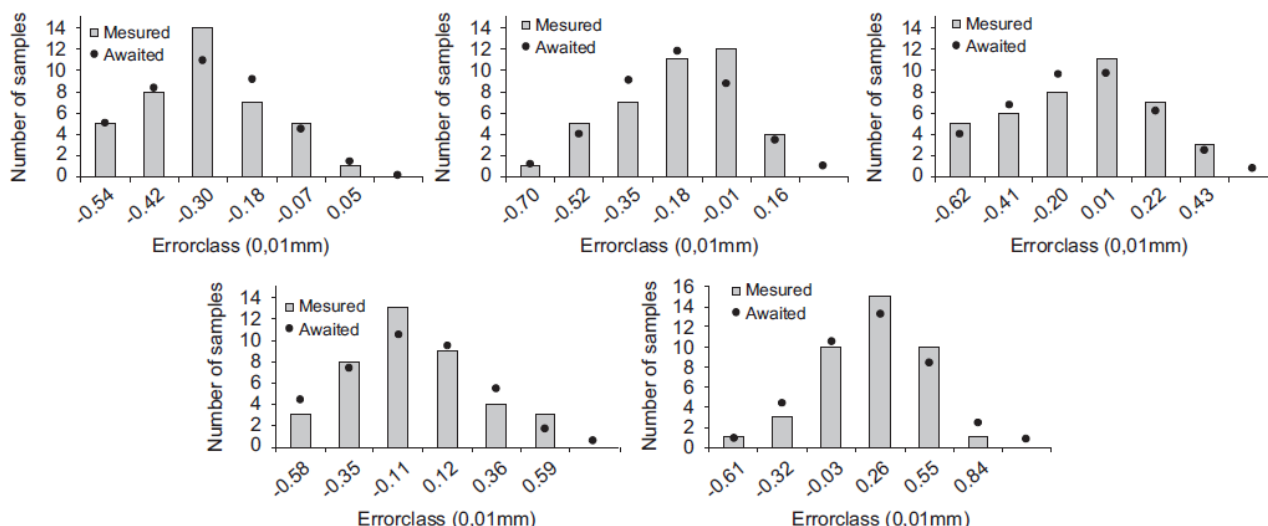
Za uzorke dilatacije izmerene nakon 500, 1000, 1500, 2000 i 2500 sekundi, hi-kvadrat test dozvoljava da se potvrdi normalnost raspodele uzorka.

Podaci su raspoređeni u sedam klasa i statistička varijablnoš koja omogućava da se utvrdi normalnost raspodele definisana je na sledeći način:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

gde je  $O_i$  frekvencija intervala  $i$ , i  $E_i$  je očekivna frekvencija za interval  $i$ , ukoliko uzorku odgovara normalna raspodela, nivo značajnosti je 20%. Broj stepeni slobode je 5 (7 intervala i 2 procenjena parametra: aritmetička sredina i standardna devijacija, dakle  $7-2=5$  stepeni slobode). Dakle, hipoteza da podaci potiču iz populacije koja ima normalnu raspodelu se odbacuje ukoliko je  $\chi^2 \geq 7.289$ . Testovi obavljeni na merenjima dilatacije glavnog vretena na 500, 1000, 1500, 2000 i 2500 sekundi pružaju vrednosti  $\chi^2$  parametra koje su, respektivno, 7.12, 6.95, 5.45, 4.32 i 5.86. Ove vrednosti su manje od 7.289. Iz toga sledi da je verovatnoća da uzorci dilatacije imaju normalnu raspodelu preko 80%.

Grafički rezultati prikazani su na slici 5.



Slika 5. Dijagram hi-kvadrat testa za normalnu raspodelu

Hi-kvadrat test otkriva da za svako vreme, 500, 1000, 1500, 2000 i 2500 sekundi, verovatnoća da uzorci imaju normalnu raspodelu premašuje 80%. Za ma koje vreme u tom intervalu, moguće je pretpostaviti da uzorci u proseku imaju normalnu raspodelu.

## 2.5. Standardna devijacija pojave dilatacije glavnog vretena

Standardna devijacija funkcije dužine perioda vremena rotacije je predstavljena na slici 5., pri broju obrtaja  $N_{max}=3500 \text{ min}^{-1}$ .

Analizom slika 6., otkrivamo da je standardna devijacija funkcija vremena. Evolucija standardne devijacije je modelovana polinomnom regresijom prikazanom na slici 6. Ova regresija omogućuje izračunavanje vrednosti standardne devijacije za datu vrednost vremenske raspodele na dilataciji glavnog vretena. Može se modelovati prema prosečnoj vrednosti koja može biti dobijena iz modela datog u referenci [8], dok standardna devijacija može da se dobije iz izraza:

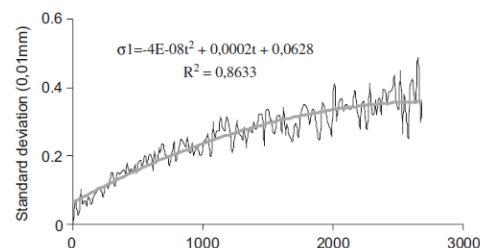
$$\sigma_1 = -4 \times 10^{-8} t^2 - 2 \times 10^{-4} t + 0.0628$$

Ovo omogućava da se izračuna, u trenutku  $t$  realizacije komada koji sadrži  $n$  promena broja obrtaja, gornju granicu intervala poverenja.  $t_{ei}$  se definiše kao ekvivalentno vreme provedeno od izmene broja obrtaja od  $N_{i-1}$  do  $N_i$  (videti sliku 7.).

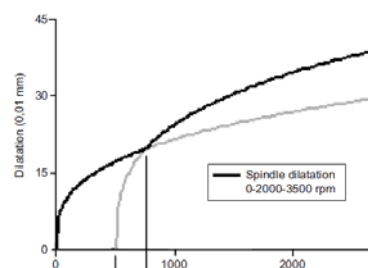
Jednačina (2) omogućuje da se utvrdi gornja granica interval poverenja u 80% mašinskih operacija koje koriste kontantan broj obrtaja

$$e_{broche} - n_i(t) \leq 4 \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (\sigma(t_{ei}))^2} \quad (2)$$

Postoje testovi koji se mogu izvršiti da bi se kompletiralo utvrđivanje domena amplitude neizvesnosti kao funkcije parametara vreme i broj obrtaja. Realizacija ove studije je da se ograniči gornja granica interval poverenja, ranije pomenutog, disperzionog modela.



Slika 6. Standardno odstupanje u funkciji od broja obrta



Slika 7. Obrada sa promenom broja obrta



## 2.6. Primena neuronskih mreža za kompenzaciju temperaturnih pomeraja petoosnih glodalica

Zamena alata sa mernom kuglom i fiksiranjem mernog elementa za sto moguće je izmeriti toplotno odstupanje izmedju alata i obratka. Na slici 8. prikazano je temperaturno odstupanje duž Y ose u odnosu na najtopliju tačku na stubu, posle gašenja softvera i hardverskog temperaturnog kompenzatora. Na slici 8. a) glavno vreteno se obrtalo na brzini od 4000 min<sup>-1</sup> u roku od dva sata potom je isključeno, a na slici 8. b) prikazani su ciklusi različitih brzina i vremenskih intervala. Primećeno je da ne postoji linearna zavisnost temperature i temperaturnog odstupanja. Ovim je dokazano da softvrski kompenzator mašine, dostavljen od strane proizvođača, ne radi pravilno.

Teško je prikazati efekte temperaturnog odstupanja na geometriji kompleksno-skulpturne površine. Ipak, primer jednostavnog dela, sastavljen od tri koncentrična cilindra prikazanih na slici 9. pokazaće kako operacija petoosnog glodanja može da utiče na geometrijska odstupanja. Pretpostavimo da je deo izrađen na idealnoj mašini, samo sa temperaturnim odstupanjem duž Y ose i da post processor odluči da

obrađuje najveći prečnik rotacijom oko A ose dok je alat u najvišoj tački, takođe i drugi cilindar sa rotacijom oko A ose ali je alat u najnižoj tački i treći cilindar alata u XY ravni.

Za toplotno odstupanja od 100 milimetara u Y pravcu:

- da li je prvi cilindar za 200 mikrometara veći

- da li je drugi cilindar za 200 mikrometara manja, dobijajući relativno odstupanje od 400 μm ili 0,4 mm

- da li je treći cilindar teoretski prave veličine, ali je za 100 μm pomeren u odnosu na prethodna 2 cilindra

Važno je znati da ova odstupanja se nemogu kompenzovati podešavanjem dužine alata ili njegovog prečnika. Kada nisu obavljene nikakve kompenzacije skale na mašini, onda moraju biti kompenzovane u post procesoru. Ovo je veoma kritično pri obradi kompleksno-skulpturnih površina.

Kod petoosnog glodanja potrebno je potpuno redukovati ili kompenzovati ova temperaturna odstupanja mašine.

Tabela 1.1 Pomeranja po osama u odnosu na temperaturu

Temperature [°C]	X [μm]	Y [μm]	Z [μm]
12.0	0	0	0
25.0	0	0	0
35.0	0	-35	-10
45.0	0	-50	-20
55.0	0	-65	-30
70.0	0	-80	-50

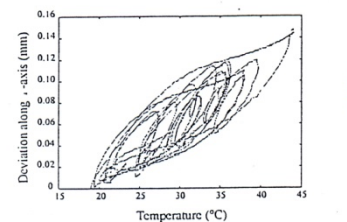
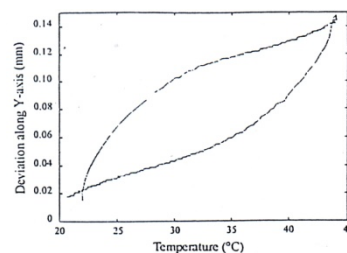
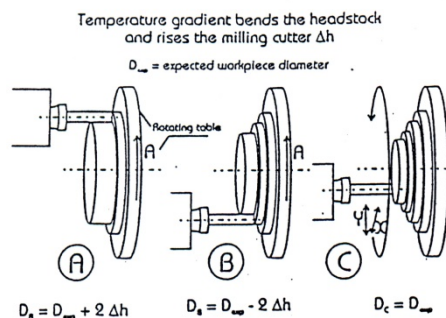


Fig. 1. Y-deviation versus temperature

Slika 8. Odstupanje duž Y-ose u odnosu na temperaturu



Slika 9.

### 3. PROVERA $\chi^2$ -testa

#### 3.1. Provera dobijenih vrednosti prema primeru iz literature [9]

Proveriti normalnost elementarnog skupa, pomoću  $\chi^2$ -testa.

Red. br.	$x_i$ [mm]	$ x_i - \bar{x} $ [mm]	$t = \frac{ x_i - \bar{x} }{\sigma}$	$\varphi(t)$	$f_t = \frac{dn}{\sigma} \varphi(t)$	$f_e$	$N_e$	$N_t$	$ N_e - N_t $	m
1	40.06	0.05	2.175	0.0375	0.56	1	1	0.56	0.44	1.54
2	40.07	0.04	1.740	0.0878	1.32	1	2	1.88	0.12	
3	40.08	0.03	1.305	0.1703	2.56	2	4	4.44	0.44	
4	40.09	0.02	0.870	0.2732	4.10	3	7	8.54	1.54	
5	40.10	0.01	0.435	0.3629	5.45	6	13	13.99	0.99	
6	40.11	0	0	0.3989	6.00	7	20	19.99	0.01	
7	40.12	0.01	0.435	0.3629	5.45	5	25	25.44	0.44	
8	40.13	0.02	0.870	0.2932	4.10	4	29	29.55	0.55	
9	40.14	0.03	1.305	0.1703	2.56	2	31	32.311	0.11	
10	40.15	0.04	1.740	0.0878	1.32	2	33	33.43	0.43	
11	40.16	0.05	2.175	0.375	0.56	1	34	34.00	0	
					-34	34				

Tabela 1.2

Rešenje

Aritmetička sredina i standardna devijacija empiriskog skupa, iznosi  $\bar{x} = 40.11mm$  i  $\sigma = 0.0226mm$ . Vrednost funkcije  $\varphi(t)$  uzete su iz tabele 1, a pripadne teorijske frekvencije empiriskog rasporeda dobijene su iz izraza

$$f = \frac{dn}{\sigma} \varphi(t) = \frac{0.01 \cdot 34}{0.0226} \varphi(t) = 15 \varphi(t)$$

Kako maksimalna razlika kumulativnih empiriskih i teorijskih frekvencija iznosi

$$\max \{ |N_e - N_t| \} = 1.54$$

To se iz naredne jednačine dobija vrednost veličine

$$\lambda = \frac{\max \{ |N_e - N_t| \}}{n} \sqrt{n} = \frac{1.54}{34} \sqrt{34}$$

Red. br.	$x_i$ [mm]	$ x_i - \bar{x} $ [mm]	$t = \frac{ x_i - \bar{x} }{\sigma}$	$\varphi(t)$	$f_t = \frac{dn}{\sigma} \varphi(t)$	$f_e$	$ f_e - f_t $	$\frac{(f_e - f_t)^2}{f_t}$
1	40.06	0.05	2.175	0.0375	0.56	1	1.54	0.278
2	40.07	0.04	1.740	0.0878	1.32	1		
3	40.08	0.03	1.305	0.1703	2.56	2		
4	40.09	0.02	0.870	0.2732	4.10	3		
5	40.10	0.01	0.435	0.3629	5.45	6	0.55	0.55
6	40.11	0	0	0.3989	6.00	7	1.00	0.167
7	40.12	0.01	0.435	0.3629	5.45	5	0.45	0.037
8	40.13	0.02	0.870	0.2932	4.10	4	0.10	0.002
9	40.14	0.03	1.305	0.1703	2.56	2	0.56	0.071
10	40.15	0.04	1.740	0.0878	1.32	2		
11	40.16	0.05	2.175	0.375	0.56	1		
$\Sigma$					-34	34		0.610

$x_i$ [mm]	$f_i$	$x_i - a$	$(x_i - a)^2$	$(x_i - a) f_i$	$(x_i - a)^2 f_i$
40.06	1	-0.05	$2.5 \cdot 10^{-3}$	-0.05	$2.5 \cdot 10^{-3}$
40.07	1	-0.04	$1.6 \cdot 10^{-3}$	-0.04	$1.6 \cdot 10^{-3}$
40.08	2	-0.03	$9 \cdot 10^{-4}$	-0.06	$1.8 \cdot 10^{-3}$
40.09	3	-0.02	$1 \cdot 10^{-4}$	-0.06	$1.2 \cdot 10^{-3}$
40.10	6	-0.01	$1 \cdot 10^{-4}$	-0.06	$0.6 \cdot 10^{-3}$
40.11	7	0	0	0	0
40.12	5	0.01	$1 \cdot 10^{-4}$	0.05	$0.5 \cdot 10^{-3}$
40.13	4	0.02	$4 \cdot 10^{-4}$	0.08	$1.6 \cdot 10^{-3}$
40.14	2	0.03	$9 \cdot 10^{-4}$	0.06	$1.8 \cdot 10^{-3}$
40.15	2	0.04	$1.6 \cdot 10^{-3}$	0.08	$3.2 \cdot 10^{-3}$
40.16	1	0.05	$2.5 \cdot 10^{-3}$	0.05	$2.5 \cdot 10^{-3}$
$\sum$	34			0.05	$1.73 \cdot 10^{-3}$

Tabela 1.3

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{34} = 40.11147$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 \right)} = \sqrt{0.0172125} = 0.0225$$

$$\Delta_1 = \frac{t_2 - t_s}{t_2 - t_1} \delta, \quad \delta = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \varphi_s = \varphi_2 + \Delta$$

$$\Delta_1 = \frac{t_2 - t_s}{t_2 - t_1} \delta = \frac{2.29 - 2.287555}{0.01} (0.02965 - 0.02898) = 0.00017115$$

$$\varphi_1 = 0.029 + 0.00017115 = 0.02917115$$

Upoređivanje sa vrednosti koja se dobija funkcijom  $\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{2.87555^2}{2}} = 0.0291473$

Zaključujem da su vrednosti približne.

$$\Delta_2 = \frac{t_3 - t_s}{t_3 - t_2} \delta = \frac{1.85 - 1.843111}{0.01} (0.0734 - 0.0721) = 0.000089557$$

$$\varphi_2 = 0.0721 + 0.000089557 = 0.072189557$$

$$\Delta_3 = \frac{t_4 - t_s}{t_4 - t_3} \delta = \frac{1.4 - 1.398666}{0.01} (0.1518 - 0.1497) = 0.00027993$$

$$\varphi_3 = 0.1797 + 0.00027993 = 0.179927993$$

$$\Delta_4 = \frac{t_5 - t_s}{t_5 - t_4} \delta = \frac{0.96 - 0.954222}{0.01} (0.2541 - 0.2516) = 0.00144445$$

$$\varphi_4 = 0.2516 + 0.00144445 = 0.25244445$$

$$\Delta_5 = \frac{t_6 - t_s}{t_6 - t_5} \delta = \frac{0.51 - 0.509777}{0.01} (0.3521 - 0.3503) = 0.00004014$$

$$\varphi_5 = 0.3503 + 0.00004014 = 0.3507014$$

$$\Delta_6 = \frac{t_7 - t_s}{t_7 - t_6} \delta = \frac{0.07 - 0.0653333}{0.01} (0.3982 - 0.3980) = 0.00009334$$

$$\varphi_6 = 0.398 + 0.00009334 = 0.39809334$$

$$\Delta_7 = \frac{t_8 - t_s}{t_8 - t_7} \delta = \frac{0.38 - 0.379111}{0.01} (0.3726 - 0.3712) = 0.00012446$$

$$\varphi_7 = 0.3712 + 0.00012446 = 0.3713446$$

$$\Delta_8 = \frac{t_9 - t_s}{t_9 - t_8} \delta = \frac{0.83 - 0.823556}{0.01} (0.2850 - 0.2827) = 0.00148235$$

$$\varphi_8 = 0.2827 + 0.00148235 = 0.28418235$$

$$\Delta_9 = \frac{t_{10} - t_s}{t_{10} - t_9} \delta = \frac{1.27 - 1.268}{0.01} (0.1804 - 0.1781) = 0.00046$$

$$\varphi_9 = 0.1781 + 0.00046 = 0.17856$$

$$\Delta_{10} = \frac{t_{11} - t_s}{t_{11} - t_{10}} \delta = \frac{1.72 - 1.712444}{0.01} (0.0925 - 0.0909) = 0.00120896$$

$$\varphi_{10} = 0.0909 + 0.00120896 = 0.09210896$$

$$\Delta_{11} = \frac{t_{12} - t_s}{t_{12} - t_{11}} \delta = \frac{2.16 - 2.156}{0.01} (0.0396 - 0.0389) = 0.00028008$$

$$\varphi_{11} = 0.0389 + 0.00028008 = 0.03898008$$

Krajnji rezultati su prikazani u narednoj tabeli

Red. br.	$x_i$ [m]	$ x_i - \bar{x} $ [mm]	$t = \frac{ x_i - \bar{x} }{\sigma}$	$\varphi(t)$	$f_t = \frac{dn}{\sigma} \varphi(t)$	$f_e$	$ f_e - f_t $	$\frac{(f_e - f_t)^2}{f_t}$
1	40.06	0.05147	2.287555	0.02917115	0.4405	1 1 2 3	1.7472	0.4002
2	40.07	0.04147	1.843111	0.07299557	1.1022			
3	40.08	0.03147	1.398666	0.14997993	2.2646			
4	40.09	0.02147	0.954222	0.2530445	3.8209			
5	40.10	0.01147	0.509777	0.35034014	5.2901	6	0.7099	0.0923
6	40.11	0.00147	0.065333	0.39809334	6.0112	7	0.9888	0.1626
7	40.12	0.00853	0.379111	0.37132446	5.6069	5	0.6069	0.0656
8	40.13	0.01853	0.823555	0.28418235	4.2911	4	0.2911	0.01975
9	40.14	0.02853	1.268	0.17856	2.6963	2 2 1	0.3243	0.0224
10	40.15	0.03853	1.712444	0.09210896	1.3908			
11	40.16	0.04853	2.1568	0.03898008	0.5886			
$\Sigma$								0.7628

Tabela 1.4

### 3.2. Provera dobijenih vrednosti prema primeru iz literature [9] korišćenjem softverskog paketa „matlab“

```
%priprema za Zavrzni predmet
%Zavrzni_09_02.m
clear all; clc; format long;
%Chi2 test za brojni primer: Zadatak 2.1=Zadatak 8, J.Stanic, Metodi II.
%RB=1. Navedene su sve mere u rastucem redosledu:
x=[40.06 40.07 40.08 40.08 40.09 40.09 40.09 40.1 40.1 40.1 40.1 40.1 40.1 40.11 40.11 40.11 40.11
40.11 40.11 40.11 40.12 40.12 40.12 40.12 40.12 40.13 40.13 40.13 40.13 40.14 40.14 40.15 40.15
40.16];
[h,p,stats]=chi2gof(x,'nparams',2,'nbins',11,'alpha',0.05);
rez1=[h p]; rez2=stats;
disp('RB=1. [h,p,stats]:'); disp(rez1); disp(rez2);
figure(1);
plot(x,'o'); box on, grid on;
xlabel('RB'), ylabel('X u rastucem redosledu');
%Izracunavanje srednje vrednosti i standardne devijacije:
xsred=mean(x); sigma=std(x,1);
%Navedene su samo razlicite mere i koliko puta se svaka ponavlja:
x=[40.06 40.07 40.08 40.09 40.1 40.11 40.12 40.13 40.14 40.15 40.16];
fr=[1 1 2 3 6 7 5 4 2 2 1];
frt=[0.56 1.32 2.56 4.1 5.45 6.9 5.45 4.1 2.56 1.32 0.56];
[h,p,stats]=chi2gof(x,'nbins',11,'frequency',fr);
rez1=[h p]; rez2=stats;
disp('RB=2. [h,p,stats]:'); disp(rez1); disp(rez2);
figure(2);
plot(x,fr,'o'); hold on; plot(x,frt); box on, grid on;
xlabel('X odredjeno vektorom frekvenci'), ylabel('Frekvence fr i frt');
axis([40.04 40.18 0 8]);
%Navedene su sve mere po slucajno odabranom rasporedu:
x=[40.15 40.14 40.11 40.06 40.11 40.07 40.08 40.12 40.08 40.09 40.1 40.11 40.1 40.13 40.11 40.1
40.11 40.12 40.11 40.09 40.1 40.12 40.13 40.12 40.1 40.12 40.13 40.11 40.13 40.14 40.15 40.1 40.09
40.16];
[h,p,stats]=chi2gof(x,'nparams',2,'nbins',11,'alpha',0.05);
rez1=[h p]; rez2=stats;
disp('RB=1. [h,p,stats]:'); disp(rez1); disp(rez2);
figure(3);
plot(x,'o'); box on, grid on;
xlabel('RB'), ylabel('X u proizvoljnom redosledu');
rezk=[xsred, sigma]; disp('xsred, sigma'); disp(rezk);

dobijeni rezultati

xsred=40.111470588235328, sigma=0.022509129251349
```

Rezultati dobijeni primenom  $\chi^2$ -testom i rezultati dobijeni matlabom se poklapaju, zaključujemo da je matlab meradovan za dalju obradu podataka.

## 4. MERENJE

Po uzoru na ugledni primer dat u poglavlju 2. izvršen je eksperiment na produkciomom strugu: Carl Hasse & Wrede g.m.b.h. Berlin tip: Bro 2.

Hebelstellung		Motor	
		langsam	schnell
B	E	75	150
C	E	95	190
A	E	118	235
B	D	300	600
C	D	375	750
A	D	475	950

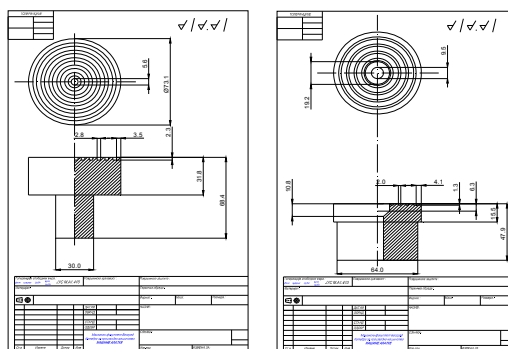
Slika 10. Raspoloživi broj obrtaja ispitivanog struga

Na slici su prikazani raspoloživi brojevi obrtaja na ispitivanom strugu (schnell-brzina brzog motora, langsam-brzina sporog motora)

Pomenuti produkciomni strug ima nepravilno obrtanje glavnog vretena sa aksialnim bacanjem od oko 0,02mm kao i gresku upravnosti poprečnog kretanja, u odnosu na osu glavnog vretena, od 0,066mm na 20mm. Primenjene su dve metode merenja dilatacije vretena:

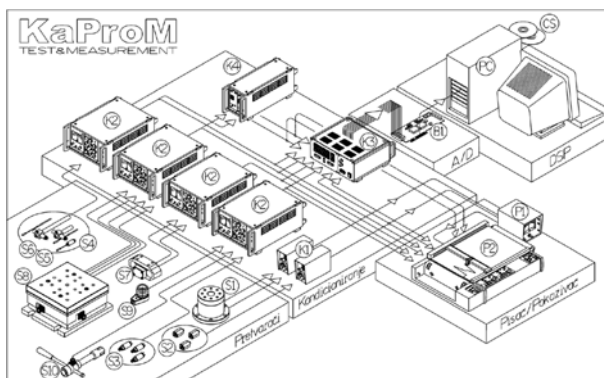
1. Metoda posrednog merenja
2. Metoda neposrednog merenja

1. Metodom posrednog merenja tj. metodom merenja termičkih pomeraja vrha glavnog vretena pomoću probnih delova, koji su prikazani na slici 11. zajedno sa njihovim radioničkim crtežima, vršena je obrada čelone površine na brojevima obrta 150, 300, 475, 600 i 750  $\text{min}^{-1}$ . Neposredno, nakon završetka obrade, vršeno je merenje probnih delova, koje će kasnije biti detaljnije opisano. Komparator je postavljen na poprečni klizač, kontrolisana je čelona površina probnog dela, kretanje poprečnog klizača prilikom kontrole je bilo u smeru obrade. Probni prolazi vršeni su u vremenskim intervalima naznačenim pre svakog merenja, pri čemu je mašina radila na prazno. Obrada je vršena na broju obrtaja od  $n=600\text{min}^{-1}$  da bi obrađivanje površine bile pogodnije za kontrolu. Temperatura prostorije, za svaki eksperiment, bila je oko  $T=20^\circ\text{C}$ . Vreme trljanja eksperimenta je određeno tako da temperatura ne utiče na merenje. Pomoćno poprečno kretanje je ručno pri čemu je udužni klizač blokiran nakon pozicioniranja. Dok je poprečnom klizaču poništen zazor. Za merenje je korišćen komparator firme Tesastast sa podeokom od 0.01mm.



Slika 11. Probni delovi sa njihovim radioničkim crtežima

2. Metoda neposrednog merenja tj. metoda merenja termičkih pomeraja vrha vretena pomoću elektronskog komparatora, prikazana je šematski na slici 12.



Slika 12. Šematski prikaz mernih elemenata određen pre merenja. Merenje je trajalo 40 minuta iz istih razloga kao i u prethodnoj metodi. Prilikom merenja korišćena je merna oprema: električni komparator (koji pretvara pomeraj u električni signal), merni most (koji meri signal i omogućava kontrolu električnog komparatora), pojačavač (koji ima funkciju da pojačava signal), A/D konvertor (analogni signal pretvara u digitalni signal). Prilikom svakog zapisa izmereno je 120 vrednosti u trajanju od 2 sekunde.

U ovom eksperimentu postravljen je deo u steznu glavu, kome je onda obrađena čeonu površina. Na čeonu površinu je, pri merenju, prislonjen električni komparator (slika 14.) i jedan mehanički komparator koji je imao funkciju kontrole električnog komparatora (slika 15). Oba komparatora su postavljena na uzdužnom klizaču mašine. Na vođicu mašine je postavljen još jedan mehanički komparator čija je uloga bila da

obezbedi sigurno vraćanje u nulti položaj koji je



Slika 13. Merni elementi



Slika 14. Električni komparator



Slika 15. Raspored mernih mesta za neposredno merenje pomeraja

Tabela 1.1.1. Specifikacija mernih instrumenata

Tip pretvarača	W1 E/0 Hottinger Br.10918	Napon napajanja mosta	2,5 V	Filter	nis.10Hz
----------------	---------------------------	-----------------------	-------	--------	----------

Opšti parametri	Pokretanje i okončanje akvizicije
-----------------	-----------------------------------

R.B.	Uređaj	Oznaka	Proizvođač
1	Induktivni diferencijalni pretvarač ubrzanja (acelerometar)		
2	Induktivni diferencijalni pretvarač pomeraja sa pokretnim jezgrom ( $\pm 50\text{mm}$ )	W1	Hottinger Br.10918
3	Dvokomponentni dinamometar sa mernim trakama 10000N		
4	Jednokanalni merni most sa nosećom frekvencijom 5kHz i analognim pokazivačem $V_{out}=\pm 10V$	KWS3082A	Hottinger Br.98925
5	Analogni priključni panel, osmokanalni, sa izolacionim pojačivačima	ED1778 AP	Electr. Design
6	Modul za akviziciju podataka, merenje i upravljanje Osnovni modul: A/D sekcija : 12 bitni AD konvertor, 16(8) analognih ulaza ( $\pm 10V$ ) ; DIO: 32 digitalna ulaza/izlaza Proširenje (ED2200 DA) : D/A sekcija : 2 analogna izlaza 0-10V	ED2000	Electronic Design

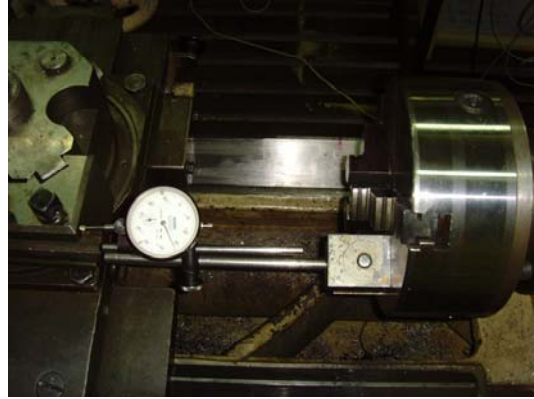
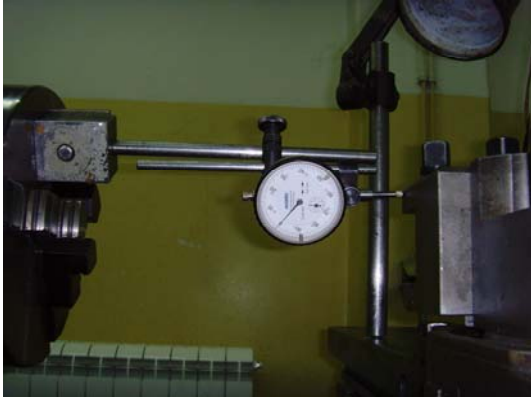
Datoteka sa parametrima akvizicije (Setup file):				s1	Način pokretanja i okončanja (Start/Stop Method)	immed			
<b>NBB</b>				s2	Okidački kanal (Trigger Channel)	1			
g1	Ukupni broj kanala (Number of channels)	2		s3	Vreme kašnjenja[s] Time Delay	0			
g2	Frekvencija odabiranja (Sampling Rate [Hz])	60		s4	Vrednost analognog okidača (Analog Trigger Value)	0			
g3	Trajanje faze[s] (Stage duration)	2		s5	Polaritet analognog okidača (Analog Trigger Polarity)	High			
<b>A. Parametri kanala</b>				<b>B. Specifikacija izlaznih datoteka</b>					
g4	Podešavanje kanala br. (Current channel)	1	2	3	f1.	Broj datoteka (Number of Data Files)	1		
g5	Tip kanala (Channel Type)	time	Analog input		f2.	Tekuća datoteka (Current Data File)	1		
g6	Ime kanala (Channel Name)	t	dz		f3.	Ime datoteke (Data File Name)	XY.dat		
g7	Jedinica mere (Channel Units)	s	$\mu\text{m}$		f4.	Mod zapisivanja (Data Storage Mode)	ASCII real		
g8	Uređaj (Interface Device)				f5.	Broj linija u zaglavlju (Number of Header Lines)	4		
Specifikacija kanala tipa <i>Analog Input</i>				f9.	Način otvaranja datoteke (Data File Opening Mode)	Delite existing file			
a1	Ulazni port br. (Interface Port Number)	0			f1	Način zatvaranja datoteke (Data File Closing Mode)	End of run		
a2	Opseg analog.signala (Input Range)	$\pm 10V$			f1	Br. zapisa do zatvar. datot. (Number of Records to Close File)	0		
a3	Faktor skaliranja (Scale Factor)	-50			f1	Broj sati do zatvaranja datot. (Number of Hours to Close File)	0		
a4	Ofset (Offset Constant)	0			f1	Broj kolona u datoteci (Number of Columns in File)	2		
a5	Kapacitet bafera (Buffer Size)	2048			f1	Kolona broj (File Column Number)	1	2	
Specifikacija kanala tipa <i>Time</i>				f1	Broj kanala (Channel Number)	1	2		
t1.	Početak vremena (Time Origin)	Elapsed time			f1	Ime kanala (Channel Name)	t	dz	
t2.	Format (Format)	ssss.sss			f1	Jedinica mere (Channel Units)	s	$\mu\text{m}$	
t3.	Mod (Mode)	Cumulative			f1	Format zapisa (ukup. mesta) (Field Width -ASCII Files)	12	12	
t4.	Kapacitet bafera (Buffer Size)	2048			f1	Broj decimalnih mesta (Decimal Places - ASCII Real Files)	3	1	



#### 4.1. Rezltati merenja posrednom metodom

Prvo merenje je izvršeno 20.03.2009.

Rezultati su prikazani u tabeli 2.1 Svi rezultati dobijeni merenjem ovom metodom su morali biti korigovani zbog greške upravnosti poprečnog klizača u odnosu na osu glavnog vretena. Vrednost ove greške iznosi 0,33mm na svakih 100mm.



Slika 16. Provera upravnosti poprečnog klizača

Na slici 16. je prikazan komparator u dva položaja: u prvom položaju je prikaza komparator u nultoj poziciji, a u drugom položaju komparator se nalazi u položaju merenja kompenzacije.

Tabela 2.1 Rezultati prvog merenja

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0	0
15	-0.02	-0.000035
30	-0.04	-0.00007
45	-0.06	-0.000105

Drugo merenje je vršeno 27.03.2009.

Napomena: za razliku od prvog merenja, merenje je vršeno kao sto je prikazano na slici 17. (povera metode) i slici 18. (metod merenja)

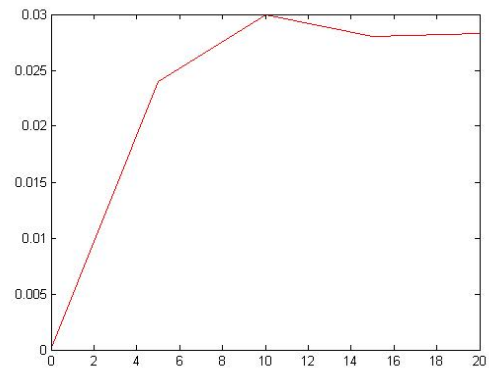


Slika 17. Metod merenja i provera ispravnosti komparatora

- komparator je postavljen na klizač koji se pokreće poprečno u odnosu na obradak
- obradak je postavljen na dva paralelna podmetača iste visine od 20 mm
- komparator(iglica komparatora) je postavljen tako da dodiruje površinu rebara koja se kontrolišu
- br. obrta  $n=475\text{min}^{-1}$
- korak je ručni
- prolazi se vrše na 5 min.
- temperatura  $T=24^{\circ}\text{C}$



Slika 18. Merenje probnog dela



Dijagram 1. Drugo merenje

Rezultati merenja dati su tabeli 2.2a

Tabela 2.2a Rezultati drugog merenja

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
5	-0.045	-0.02454
10	-0.07	-0.02908
15	-0.09	-0.02862
20	-0.1	-0.02816

Deo je rotiran za  $90^{\circ}$  i ponovo meren. Rezultati merenja su dati u tabeli 2.2b

Tabela 2.2b Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za  $90^{\circ}$

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
5	-0.045	-0.02454
10	-0.07	-0.02908
15	-0.09	-0.02862
20	-0.1	-0.02816

Deo je rotiran za još 90° i ponovno meren. Rezultati merenja u tabeli 2.2c

*Tabela 2.2c Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za još 90°*

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
5	-0.045	-0.02454
10	-0.07	-0.02908
15	-0.09	-0.02862
20	-0.1	-0.02816

Trece merenje je izvršeno istog dana nakon sto se mašina ohladila

Napomena:

-br.obrta  $n=600\text{min}^{-1}$

-temperatura  $T=24^{\circ}\text{C}$

-poslednje merenje se vrši nakon 5min., dok su ostala prolazi izrađuju u intervalima od 3 min.

-ostali podaci ostaju isti

Rezultati su dati u tabeli 2.3a

*Tabela 2.3a Rezultati drugog merenja*

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
3	-0.035	-0.01454
6	-0.055	-0.01478
9	-0.085	-0.02362
14	-0.1	-0.02816

Deo je rotiran za 90° pa je merenje izvršeno ponovo. Rezultati su dati u tabeli 2.3b

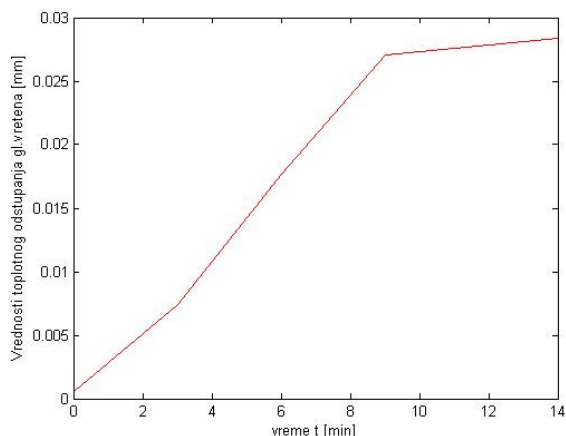
*Tabela 2.3b Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za 90°*

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
3	-0.03	-0.00954
6	-0.055	-0.01478
9	-0.08	-0.02862
14	-0.1	-0.02816

Deo je rotiran za još 90° pa je meren ponovo. Rezultati su dati u tabeli 2.3c

*Tabela 2.3c Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za još 90°*

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
3	-0.025	-0.00454
6	-0.05	-0.00908
9	-0.07	-0.02908
14	-0.9	-0.02962



Dijagram 2. Treće merenje

Četvrto merenje je vršeno 28.03.2009.

Napomena: za razliku od predhodnih merenja, merenje je vršeno na oba priprema, jedan za drugim komparator je postavljen na klizač koji se pokreće poprečno u odnosu na obradak

- temperatura  $T=24^{\circ}\text{C}$
- obradak je postavljen na dva paralelna podmetača iste visine od 20 mm
- komparator(iglica komparatora) je postavljen tako da dodiruje površinu rebara koja se kontrolišu
- br. obrta  $n=300\text{min}^{-1}$
- korak je ručni
- za merenje se koristi komparator firme Tsatast sa podeokom od 0.01mm,dok su prolazi vršeni prvih 5 na 3min., a ostala 3 na 5 min.

Rezultati merenja dati su tabeli 2.4a

Tabela 2.4a Rezultati drugog merenja

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
3	-0.025	-0.00454
6	-0.045	-0.02454
9	-0.08	-0.01862
12	-0.09	-0.02962
17	-0.12	-0.022155
22	-0.14	-0.019385
27	-0.16	-0.016615

Deo je rotiran za  $90^{\circ}$  i ponovo meren. Rezultati merenja u tabeli 2.4b

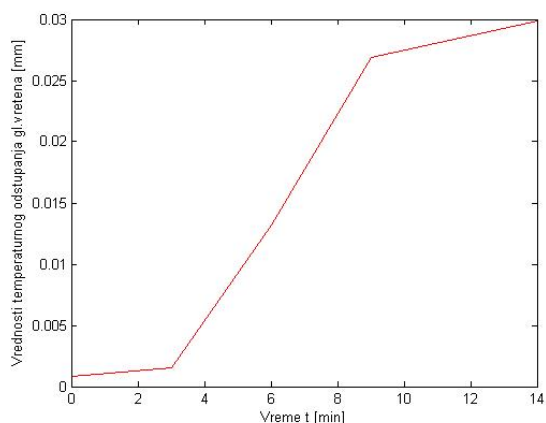
Tabela 2.4b Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za  $90^{\circ}$

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
3	-0.02	0.00046
6	-0.04	0.00092
9	-0.06	0.00138
12	-0.085	-0.00316
17	-0.12	-0.022155
22	-0.14	-0.019385
27	-0.16	-0.016615

Deo je rotiran za još 90° i ponovo meren. Rezutati merenja u tabeli 2.4b

Tabela 2.4b Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za još 90°

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
3	-0.025	-0.00454
6	-0.04	0.00092
9	-0.07	-0.00961
12	-0.085	-0.00316
17	-0.12	-0.022155
22	-0.14	-0.019385
27	-0.16	-0.016615



Dijagram 3. četvrto merenje

Peto merenje je vršeno 28.03.2009. (za menjanje)

Napomena: za razliku od predhodnih merenja, merenje je vršeno na oba priprema, jedan za drugim komparator je postavljen na klizač koji se pokreće poprečno u odnosu na obradak

- temperatura  $T=24^{\circ}\text{C}$
- obradak je postavljen na dva paralelna podmetača iste visine od 20 mm
- komparator (iglica komparatora) je postavljen tako da dodiruje površinu rebara koja se kontrolišu
- br. obrta  $n=750\text{min}^{-1}$
- korak je ručni
- za merenje se koristi komparator firme Tsatast sa podeokom od 0.01mm, dok su prolazi vrše prvih 5 na 2 min. šesti na 3 min. sedmi na 4 min. i osmi na 5 min.

Rezultati merenja dati su tabeli 2.5a

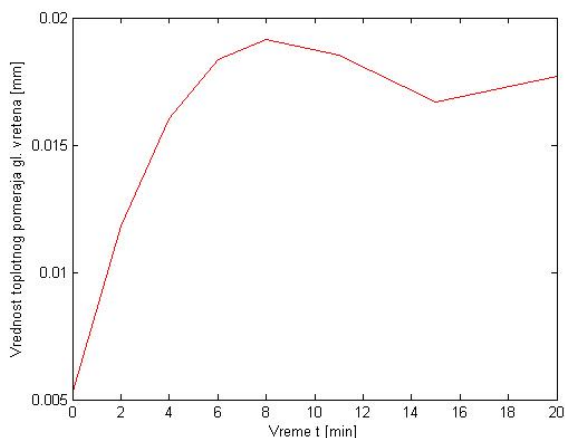
Tabela 2.5a Rezultati drugog merenja

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
2	-0.04	-0.01954
4	-0.06	-0.01908
6	-0.075	-0.01362
8	-0.09	-0.00816
11	-0.12	-0.022155
15	-0.15	-0.029385
20	-0.17	-0.026615

Deo je rotiran za 90° i ponovo meren. Rezutati merenja u tabeli 2.5b

Tabela 2.5b Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za 90°

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
2	-0.04	-0.01954
4	-0.06	-0.01908
6	-0.08	-0.01862
8	-0.09	-0.00816
11	-0.12	-0.022155
15	-0.14	-0.019385
20	-0.16	-0.016615



Dijagram 4. peto merenje

Šesto merenje je vršeno 03.04.2009. (za menjanje)

Napomena: za razliku od predhodnih merenja, merenje je vršeno na oba pripremljena, jedan za drugim komparator je postavljen na klizač koji se pokreće poprečno u odnosu na obradak

- temperatura  $T=25,5^{\circ}$
- obradak je postavljen na dva paralelna podmetača iste visine od 20 mm
- komparator (iglica komparatora) je postavljen tako da dodiruje površinu rebara koja se kontrolišu
- br. obrta  $n=150\text{min}^{-1}$
- korak je ručni
- za merenje se koristi komparator firme Tsastast sa podeokom od 0.01mm, dok su prolazi vrše na po 5 min.

Rezultati merenja dati su tabeli 2.6a

Tabela 2.6a Rezultati drugog merenja

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
5	-0.02	0.00046
10	-0.04	0.00092
15	-0.06	0.00138
20	-0.08	0.00184
25	-0.10	-0.00215
30	-0.13	-0.009385
35	-0.165	-0.021615

Deo je rotiran za 90° i ponovo meren. Rezutati merenja u tabeli 2.6b

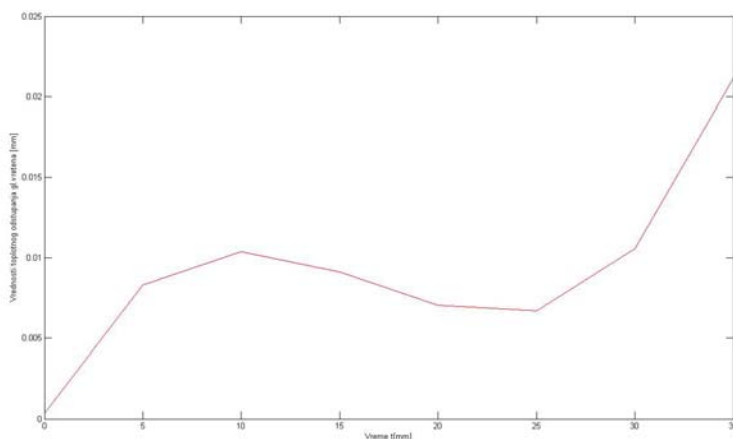
Tabela 2.6b Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za 90°

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
5	-0.03	-0.00954
10	-0.05	-0.00908
15	-0.07	-0.00862
20	-0.09	-0.00816
25	-0.105	-0.007155
30	-0.13	-0.009385
35	-0.165	-0.021615

Deo je rotiran za još 90° i ponovo meren. Rezutati merenja u tabeli 2.6b

Tabela 2.6b Rezultati drugog merenja, deo zarotiran za 90°

Vreme T(min)	Odstupanje(mm)	Korekciono odstupanje(mm)
0	0.0	0
5	-0.03	-0.00954
10	-0.05	-0.00908
15	-0.08	-0.01862
20	-0.10	-0.01816
25	-0.125	-0.027155
30	-0.155	-0.034385
35	-0.17	-0.026615



Dijagram 5. šesto merenje

## 4.2. Raspored mernih mesta za merenje neposrednom metodom

Prilikom merenja neposrednom metodom električni komparator je postavljen da bude saosan sa osom glavnog vretena, dok je kontrlni komparator postavljen tangentno u odnosu na obimnu brzinu čeone površine umetka kao sto je prikazano na slici 19 . Umetak je obrađen sa čela posle baziranja u steznu glavu da bi se eliminisala greška njegovog baziranja.

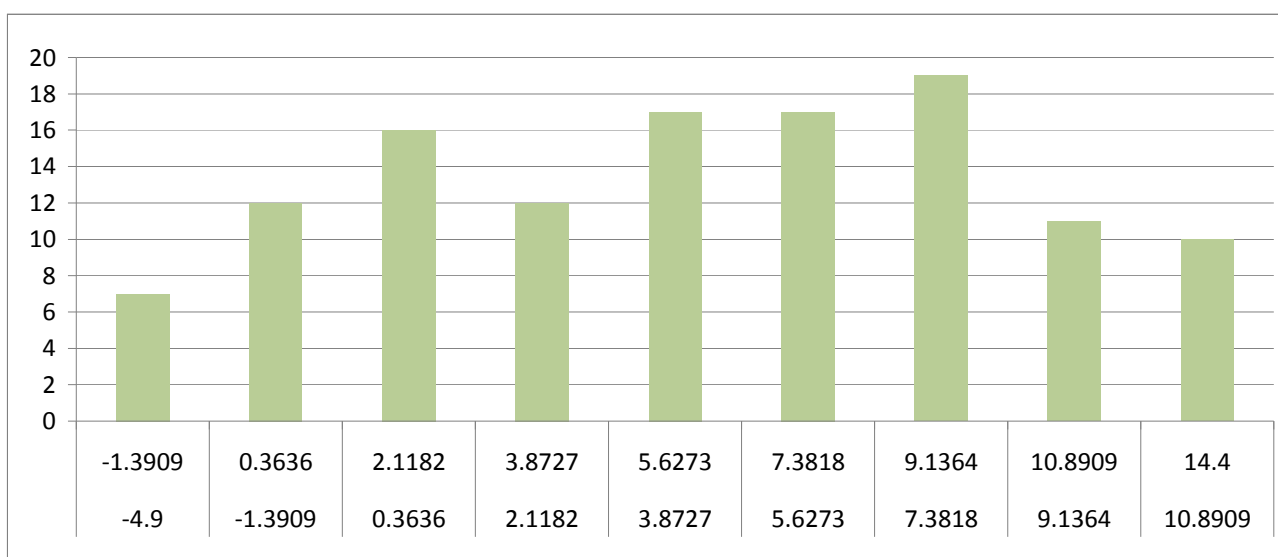


Slika 19. Saosnost električnog komparatora sa osom glavnog vretena

## 4.3 Rezultati merenja neposrednom metodom

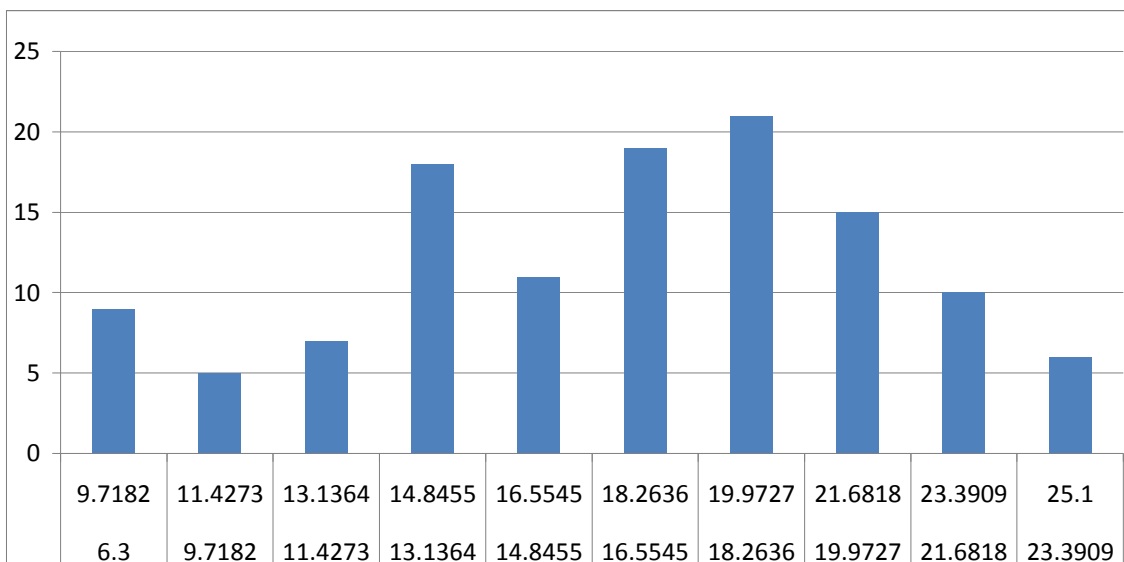
Merenje je vršeno datuma 09.05.2009.

Merenje je izvršeno prema rasporedu mernih mesta za merenje neposrednom metodom. Međutim za razliku od opisanog postupka u literaturi, za dobijanje podataka i obradu izmerenih vrednosti korišćen je softverski paket „matlab“ koji je već proverne u poglavlju... Merenje je vešeno na temperaturi od  $T=20^{\circ}\text{C}$ , dok je merenje vršeno na svakih 3 minuta u trajanju od 2 sekunde. Broj obtaja pri ovom merenju iznosi  $n=95 \text{ min}^{-1}$ .

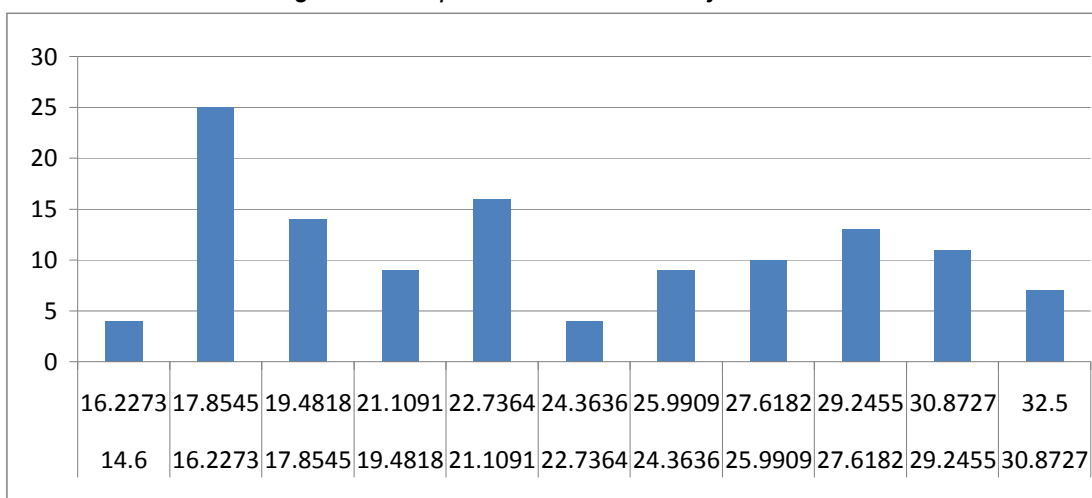


Histogram 1. Raspodela rezultata merenja u nultom minutu





*Histogram 2. Raspodela vednosti merenja u trecem minutu*



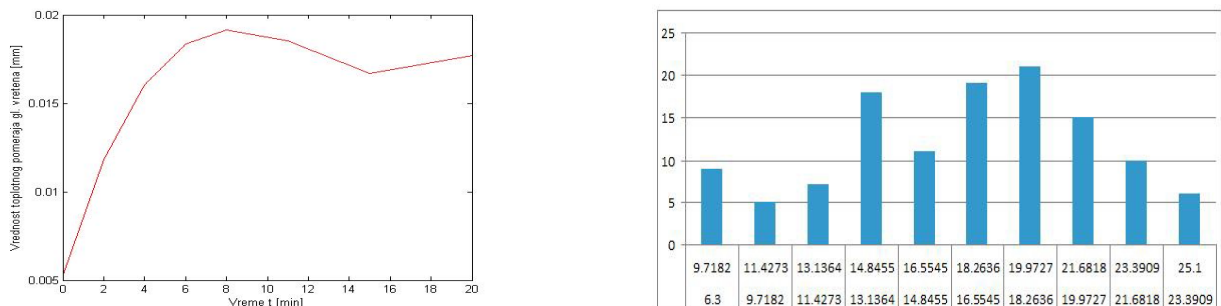
*Histogram 3. Raspodela vrednosti merenja u dvadesetom minutu*

#### 4.4 Rezultati ispitivanja uzdužnih termičkih pomeraja vrha glavnog vretena struga Hase Wrede

Na osnovu rezultata dobijenih merenjem metodom posrednih i metodom neposrednih merenja zaključavamo da očekivana normalna raspodela nije dobijena ka niti željena zavisnost broja obrta i vremena.

Glavni razlog ovakvih rezultata je taj što naše vreteno ima nepravilno obrtanje sa aksijalnim bacanjem koji je oko 0.02mm, kao i greška upravnosti poprečnog klizača u odnosu na osu glavnog vretena. Iako je raspodela nije bila normalna, srednja vrednost nije omela najveću frekvencu.

Na slici 20. prikazana je jedna raspodela rezultata neposrednom metodom i dijagram zavisnosti vremena i toplotnog izduženja.



Slika 20. Poređenje rezultata dobijenih posrednim i neposrednim merenjem

Ono što se može primetiti jeste da srednja vrednost dobijena neposrednim merenjem i vrednost toplotnog pomeraja glavnog vretena dobijena posrednim merenjem se poklapaju u intervalu od 3 do 5 minuta. Što nam govori da rezultati redukovani greškom upravnosti su dali tačne rezultate.

## 5. Zaključak

Ovaj rad je doprineo sticanju više znanja o pojavi toplotnog izduženja glavnog vretena struga. Uporedo su stečena i osnovna znanja o planiranju eksperimenta, akviziciji i obradi eksperimentalnih podataka na primeru identifikacije toplotnih pomeraja vrha glavnog vretena jednog produkcionog struga, koji se nalazi u Laboratoriji za mašine alatke Mašinskog fakulteta.

Hi-kvadrat test primenjen u poglavlju 2., vredosti dilatacije pokazuju da je verovatnoća da će vrednosti imati normalnu raspodelu preko 80%. Ova osobina, zavisno od tehnoloških rešenja u skladu sa kojima je napravljeno vretano, može biti uobičajena među vretenima koje su tehnički rešene kao glavno vreteno koje je korišćeno u ovoj studiji. Za razliku od reprezentativnog primera datog u navedenom poglavlju, naša istraživanja ne dokazuju tu teoriju. Danas se mahom prodaju glavna vretena napravljena sa dva para dupleks kugličnih ležajeva koji stoje jedan naspram drugog. Iz toga sledi da je danas prevashodno zastupljena populacija dilatacije glavnog vretena struga sa normalnom raspodelom.

Predložen je model regresije, zasnovan na neposrednom eksperimentu, koji se može koristiti da se izračuna standardna devijacija raspodele dilatacije, uzimajući u obzir vreme rotacije i broj obrtaja glavnog vretena. Korišćenje ovog modela omogućuje da se utvrdi raspodela populacije mera dilatacije kao funkcije vremena. Ovo je važna tvrdnja da bi se ocenila standardna devijacija prosečne vrednosti dilatacije koja može biti predviđena modelima u referenci [8].

Znajući jednačinu dilatacije glavnog vretena [8], vrednost standardne devijacije i prosečna vrednost kao funkcije vremena, moguće je predvideti dimenzionalne promene glavnog vretena i specifične intervale poverenja vezane za dati mašinski ciklus, a uzimajući u obzir vreme i broj obrtaja.

Kompenzacija dilatacije glavnog vretena tokom mašinske obrade moguća je jer su utvrđeni modeli (kao u referenci [8]), ali sada je moguće izračunati intervale poverenja povezane sa predviđanjem.

Rezultati ovog rada omogućavaju, za datu mašinu i dati plan rada, izračunavanje dimenzionalnog intervala u kome će dimenzije biti izrađene, računajući sa principom dimenzionalne promene mašine, što je pojava dilatacije glavnog vretena. Uzimajući u obzir standardnu arhitekturu glavnog vretena, rezultati koje je iznela ova studija mogu biti primenjeni na mašine opremljene sličnim glavnim vretenom u celosti. Svrha našeg rada bila je edukacija o metodima ispitivanja mašina alatki, a ne sprovođenje samog ispitivanja neke mašine alatke, ili obradnog sistema sa njom.

Dosta istraživanja je izvršeno na temu kompenzacije toplotno prouzrokovanih deformacija mašina alatki. Uglavnom, tehnike kompenzacije su podeljene u grupe na direktne i indirektne kompenzacije. Za direktne kompenzacije temperaturnih pomeranja između alata i obratka su direktno mereni. Indirektne kompenzacije koriste model. Signali u korelaciji sa vrednostima pomeraja su iskorišćeni da bi se sračunala odstupanja pomoću ovog matematičkog modela.

U neposrednom merenju toplotnih pomeraja vrha glavnog vretena ispitivanog struga ostao je nerešen problem sa aksijalnim bacanjem vretena. Ono je bilo reda veličine toplotnih pomeraja vrha vretena u prvih 40 minuta njegovog rada po uključivanju mašine. Zbog toga su i raspodele pomeraja vrha vretena bitno dugačije od očekivane normalne raspodele. To je pokazao i  $\chi^2$  test. Bilo bi potrebno da se nekom vrstom filtriranja eliminiše harmonijski signal koji potiče od tog aksijalnog bacanja. Signal pomeraja vrha vretena filtriran je niskopropusnim filtrom sa gornjom frekvencom od 10 Hz. Taj harmonijski signal je sa frekvencom od oko 1.5 Hz za zapise pomeraja koji su vršeni na  $95 \text{ min}^{-1}$  i sa frekvencom do oko 2 Hz za zapise pomeraja koji su vršeni na  $118 \text{ min}^{-1}$  brzine glavnog vretena.

U posrednom merenju toplotnih pomeraja pomoću probnih delova bilo je moguće probne delove meriti na samoj mašini, ali sa pomeranjem poprečnog klizača u istim granicama u kojima je on radio i za vreme obrade. Uporedo su probni delovi kontrolisani i na probnom stolu, ali je tada morala biti uračunata i greška upravnosti kretanja poprečnog klizača na osu glavnog vretena mašine.

U krajnjem, zaključeno je da je ispitivani strug ima toplotne pomeraje vrha vretena do oko 0.03 mm za vreme od oko 40 min praznog hoda. Ovi pomeraji su čitani kao srednje vrednosti zapisa pomeraja u neposrednom merenju zato što je raspodela pomeraja bila skoro uniformna zbog nefiltriranih uticaja aksijalnog bacanja vrha glavnog vretena.

## 6.Literatura

- [1] T.J. Ko, T.-w. Gim, J.y. Ha, Particular behavior of spindle thermal deformation by thermal bending, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (1) (2003) 17–23.
- [2] R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo, Compensation in machine tools—a review: part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (9) (2000) 1235–1256.
- [3] W.S. Yun, S.K. Kim, D.W. Cho, Thermal error analysis for a CNC lathe feed drive system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 39 (7) (1999) 1087–1101.
- [4] G. Dessen, Qualification et optimisation de la précision d'une machine-outil à commande numérique, Thèse de Génie Mécanique de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1997.
- [5] Sandvik-Coromant, *Techniques Modernes D'usinage*, Impr. Tofters Tryckeri, 1997.
- [6] C. Jenq-Shyong, A study of thermally induced machine tool errors in real cutting conditions, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 36 (12) (1996) 1401–1411.
- [7] R. Cameron, *Technologie Et Usinage A` Commande Numérique*, Editions Saint-Martin.
- [8] S. Segonds, P. Lagarrigue, J.M. Redonnet, W. Rubio, Compensation for machining defects due to spindle dilatation, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41 (10) (2001) 1439–1454
- [9] Joko Stanić, *Upravljanje kvalitetom proizvodnje Model I, Upravljanje kvalitetom proizvodnje Model II*
- [10] prof. P. Vanherck, Application of a neural network for the kompesation of the thermal deformation of our five axes MAHO milling machine when we reduced the error from 75µm to 15µm
- [11] McKeown, P.A. : 1987: The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future, *Annals of the CIRP*, Vol.36/2/1987, pp. 495-501
- [12] Bryan, J.: 1990: Internacional Status of Thermal Error Research, *Annals of the CIRP*, Vol.39/2/1990, pp. 645-656
- [13] Scheafer, W.: 1994, *Steuerungstechnische Kompensation thermoelastischer Verformungen an Werkzeugmaschinen*, dissertation RWTH Aachen
- [14] Weck, M.: 1995, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme Band 3.2 Automatisierung und Steuerungstechnih 2*, VDI-Verlag Daesseldorf