



## PROMENA GEOMETRIJSKIH VELIČINA ZUPČASTIH KAIŠEVA U PERIODU EKSPLOATACIJE

Blaža Stojanović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mašinski fakultet u Kragujevcu, Srbija, blaza@kg.ac.rs

**Apstrakt:** Zupčasto-kaišni prenosnici predstavljaju relativno nove prenosnike koji se javljaju u drugoj polovini 20. veka. Prenos snage i kretanja sa pogonskog na gonjeni kaišnik vrši se preko bočnih površina zuba kaiša, a delimično trenjem između zuba kaiša i međuzublja kaišnika.

U ovom radu data je analiza tribomehaničkih sistema u zupčastim kaišnim prenosnicima i analiza promene geometrijskih veličina zupčastog kaiša u periodu eksploatacije. Ispitivanje triboloških karakteristika zupčastog kaiša izvršeno je na namenski konstruisanom i napravljenom probnom stolu u laboratoriji za Mašinske konstrukcije i mehanizaciju na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu.

**Ključne reči:** Zupčasto-kaišni prenosnici, korak kaiša, širina kaiša, trenje, habanje.

### 1. UVOD

Savremena stremljenja konstruktora uslovljena tržišnim zahtevima za porastom nosivosti, smanjenje šuma i produženjem radnog veka trajanja rezultirala su razvojem novih prenosnika. Zupčasto kaišni prenosnici su kombinacija lančanog i zupčastog prenosa, sa prednostima koje poseduje kaišni prenos [1]. Najveći deo kretanja i snage prenosi se oblikom, dok se samo jedan mali deo prenosi trenjem.

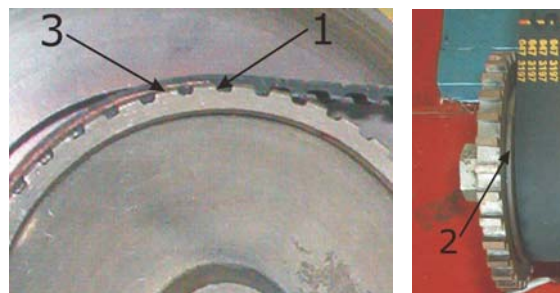
### 2. TRIBOMEHANIČKI SISTEMI KOD ZUPČASTO-KAIŠNIH PRENOSNIKA

Osnovni tribomehanički sistemi u zupčasto-kaišnom prenosniku su (slika 1):

1. zub kaiša – zub kaišnika
2. čelo kaiša – obodni prsten
3. međuzublje kaiša – teme zuba kaišnika

Vrednosti sile trenja su različite u sva tri analizirana tribomehanička sistema. Sila trenja ima najveće vrednosti na bočnoj površini zuba kaiša i kaišnika. Između čelone površine kaiša i obodnog prstena sila trenja ima nešto manje vrednosti, dok su najmanje vrednosti sile trenja između temena zuba kaišnika i međuzublja kaiša [2]. Pravac, smer i

intenzitet ovih sila direktno je vezan za kinematiku spreznjanja zupčastih kaišnih prenosnika.



Slika 1. Zupčasto-kaišni prenosnik i osnovni tribomehanički sistemi

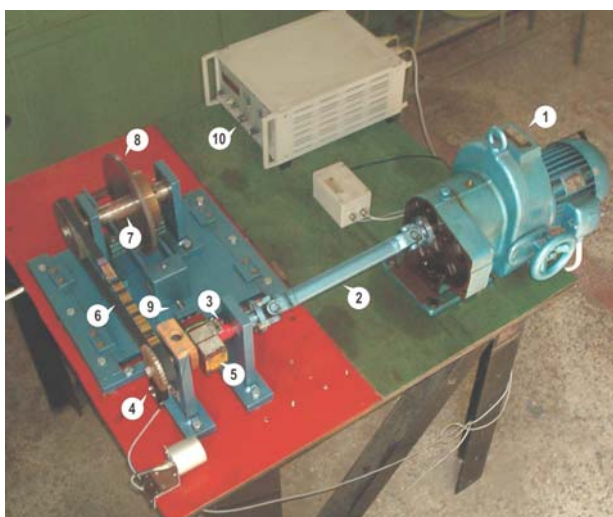
### 3. ISPITIVANJE ZUPČASTOG KAIŠA

Ispitivanje zupčastog kaiša je sprovedeno na probnom stolu koji je namenski konstruisan i napravljen u laboratoriji za Mašinske konstrukcije i mehanizaciju. Probni sto radi na principu otvorenog kola snage.

Osnovni elementi probnog stola su :

1. pogonska mašina,
2. kardanski prenosnik,
3. merno (ulazno) vratilo,
4. davač broja obrtaja ulaznog vratila,
5. davač obrtnog momenta ulaznog vratila,
6. ispitivani prenosnik (zupčasto-kaišni prenosnik),
7. izlazno vratilo,
8. mehanička kočnica,
9. zatezni mehanizam i
10. pojačavački most,

Na slici 2 je prikazan probni sto sa osnovnim elementima



Slika 2. Probni sto za ispitivanje zupčastog kaiša

Da bi se dobila prava slika o tribološkim karakteristikama zupčastog kaiša izvršeno je merenje parametara hrapavosti i određivanje geometrijskih veličina. Merenje ovih veličina vršeno je po unapred utvrđenoj dinamici. Pre početka ispitivanja konstatovano je stanje kontaktnih površina kao i početne vrednosti geometrijskih veličina kaiša. Dalja merenja su vršena posle određenog vremena rada i prikazana su u tabeli 1.

Tabela 1. Vremenski intervali merenja parametara hrapavosti i geometrijskih veličina kaiša

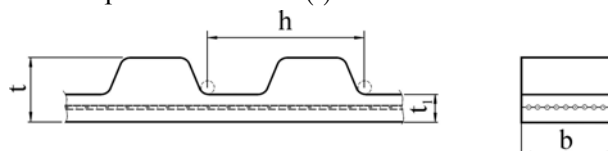
Broj merenja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vreme rada [sati]	0	5	10	20	50	100	150	200	250	300

#### 4. MERENJE GEOMETRIJSKIH VELIČINA

Merenje geometrijskih veličina je vršeno u fabrici Zastava alati u Sektoru osiguranja kvaliteta.

Da bi se dobila potpuna slika o njihovoj promeni, merenje je izvedeno na osam zuba kaiša. Pri tome su merene sledeće veličine (slika 3):

- korak kaiša ( $h$ ),
- širina kaiša ( $b$ ),
- debljina međuzublja ( $t_1$ ) i
- ukupna visina kaiša ( $t$ ).



Slika 3. Merene geometrijske veličine zupčastog kaiša

##### 4.1 Promena koraka kaiša

**Korak kaiša** predstavlja rastojanje između centara dva uzastopna zuba i meri se na tzv. liniji koraka. S obzirom na konstrukciono izvođenje kaiša i dostupnu aparaturu korak kaiša je meren u korenu zuba. Merenje je vršeno na optičkom mikroskopu ZEISS ZKM01-250C.

Promena koraka kaiša ( $\Delta h$ ) se može prikazati pomoću izraza:

$$\Delta h = h - h_0$$

gde su:

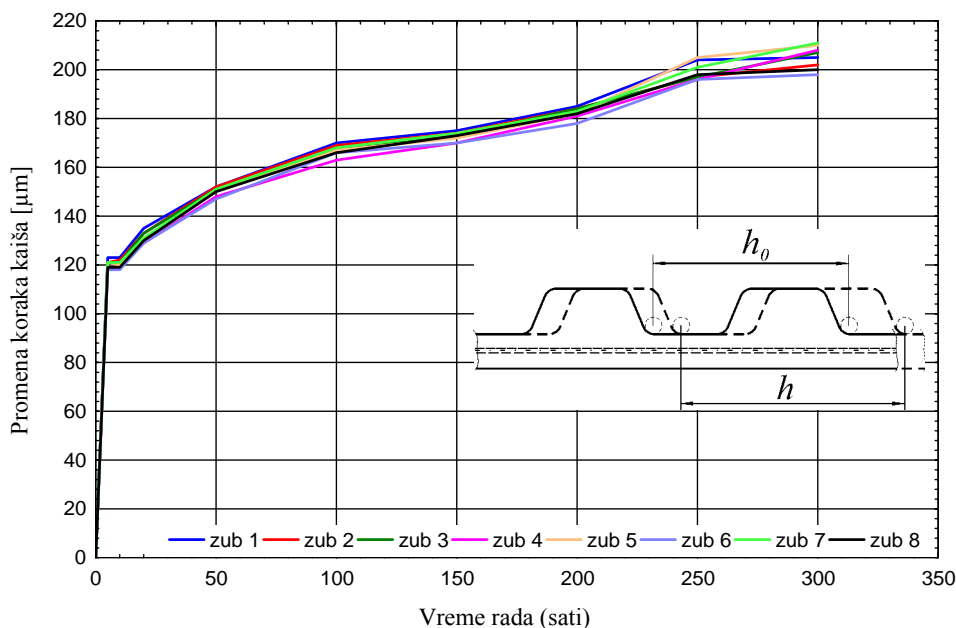
$h$  - izmerena vrednost koraka kaiša u toku ispitivanja i

$h_0$  - početna vrednost koraka kaiša.

Rezultati merenja promene koraka kaiša u toku rada za svih osam zuba dati su u tabeli 2 i prikazani na slici 4.

Tabela 2. Promena koraka kaiša  $\Delta h = h - h_0$  [ $\mu\text{m}$ ]

Vreme rada (sati)	$\Delta h$							
	Zub kaiša							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	123	121	121	118	121	118	121	119
10	123	122	121	119	120	118	121	119
20	135	133	133	129	131	129	131	130
50	152	152	151	148	150	147	151	150
100	170	169	167	163	167	166	168	166
150	175	174	173	170	172	170	174	173
200	185	184	184	181	182	178	183	182
250	204	197	197	196	205	196	201	198
300	205	202	207	208	210	198	211	200



Slika 4. Promena koraka kaiša u toku rada

#### 4.2 Promena širine kaiša

Širina kaiša predstavlja najkraće normalno rastojanje između dve čeonke površine kaiša. Merenje širine kaiša je vršeno na digimaru.

Promena širine kaiša ( $\Delta b$ ) u toku ispitivanja može se izračunati pomoću izraza:

$$\Delta b = b - b_0$$

gde su:

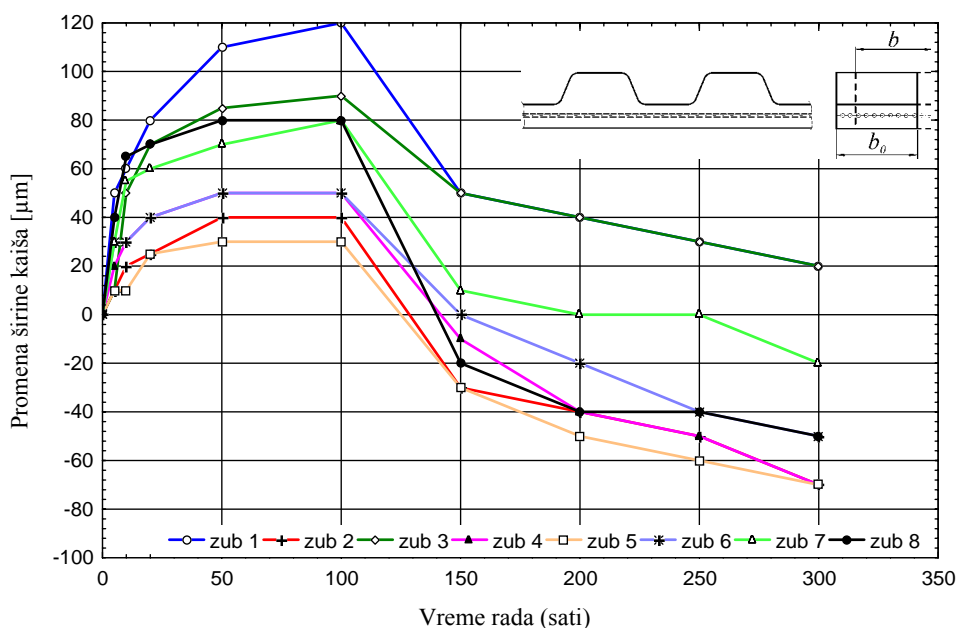
$b$  - izmerena vrednost širine kaiša u toku ispitivanja i

$b_0$  - početna vrednost širine kaiša.

Rezultati merenja promene širine kaiša u toku rada za svih osam zuba dati su u tabeli 3 i prikazani na slici 5.

Tabela 3. Promena širine kaiša  $\Delta b = b - b_0$  [ $\mu\text{m}$ ]

Vreme	$\Delta b$							
	Zub kaiša							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	50	10	10	20	10	30	30	40
10	60	20	50	30	10	30	55	65
20	80	25	70	40	25	40	60	70
50	110	40	85	50	30	50	70	80
100	120	40	90	50	30	50	80	80
150	50	-30	50	-10	-30	0	10	-20
200	40	-40	40	-40	-50	-20	0	-40
250	30	-50	30	-50	-60	-40	0	-40
300	20	-70	20	-70	-70	-50	-20	-50



Slika 5. Promena širine kaiša u toku rada

### 4.3 Promena visine kaiša

Visina kaiša predstavlja najkraće rastojanje između temena zuba kaiša i ledne površine. Merenje visine kaiša je vršeno na digimaru. Promena visine kaiša ( $\Delta t$ ) u toku ispitivanja može se izračunati pomoću izraza:

$$\Delta t = t_o - t$$

gde su:

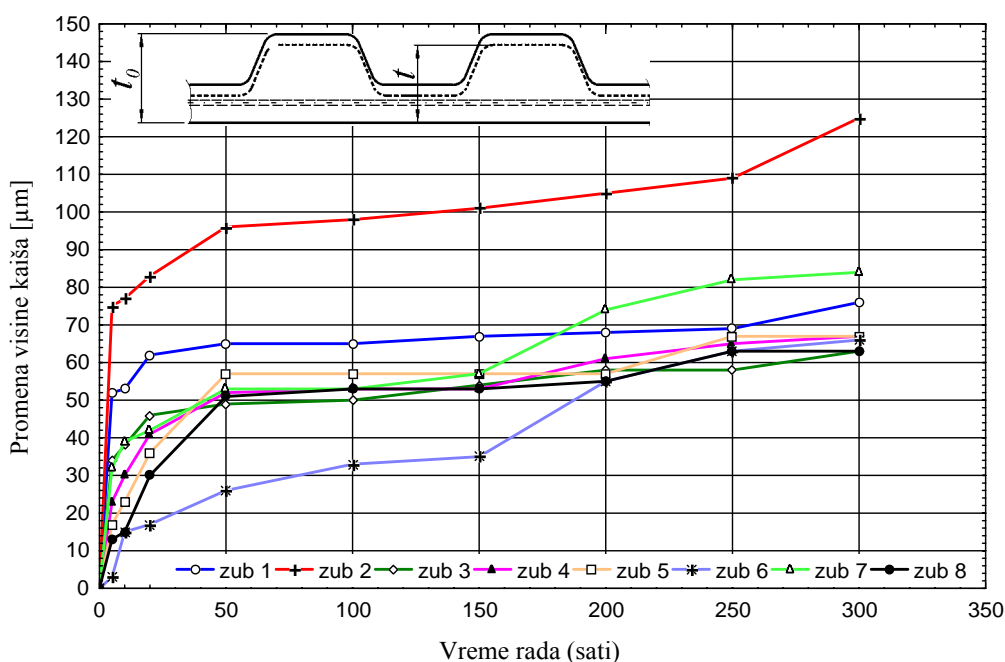
$t$  - izmerena vrednost visine kaiša u toku ispitivanja i

$t_o$  - početna vrednost visine kaiša.

Rezultati merenja promene visine kaiša u toku rada za svih osam zuba dati su u tabeli 4 i prikazani na slici 6.

Tabela 4: Promena visine kaiša  $\Delta t = t_o - t$  [ $\mu\text{m}$ ]

Vreme	$\Delta t$							
	Zub kaiša							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	52	75	34	23	17	3	32	13
10	53	77	38	30	23	15	39	15
20	62	83	46	41	36	17	42	30
50	65	96	49	52	57	26	53	51
100	65	98	50	53	57	33	53	53
150	67	101	54	53	57	35	57	53
200	68	105	58	61	57	55	74	55
250	69	109	58	65	67	63	82	63
300	76	125	63	67	67	66	84	63



Slika 6. Promena visine kaiša u toku rada

### 4.4 Promena debljine međuzublja kaiša

Debljina međuzublja kaiša predstavlja najkraće rastojanje od međuzublja kaiša do ledne površine. Merenje debljine međuzublja kaiša je vršeno na digimaru. Promena debljine međuzublja kaiša ( $\Delta t_1$ ) u toku ispitivanja može se izračunati pomoću izraza:

$$\Delta t_1 = t_{1o} - t_1$$

gde su:

$t_1$  - izmerena vrednost debljine međuzublja kaiša u toku ispitivanja i

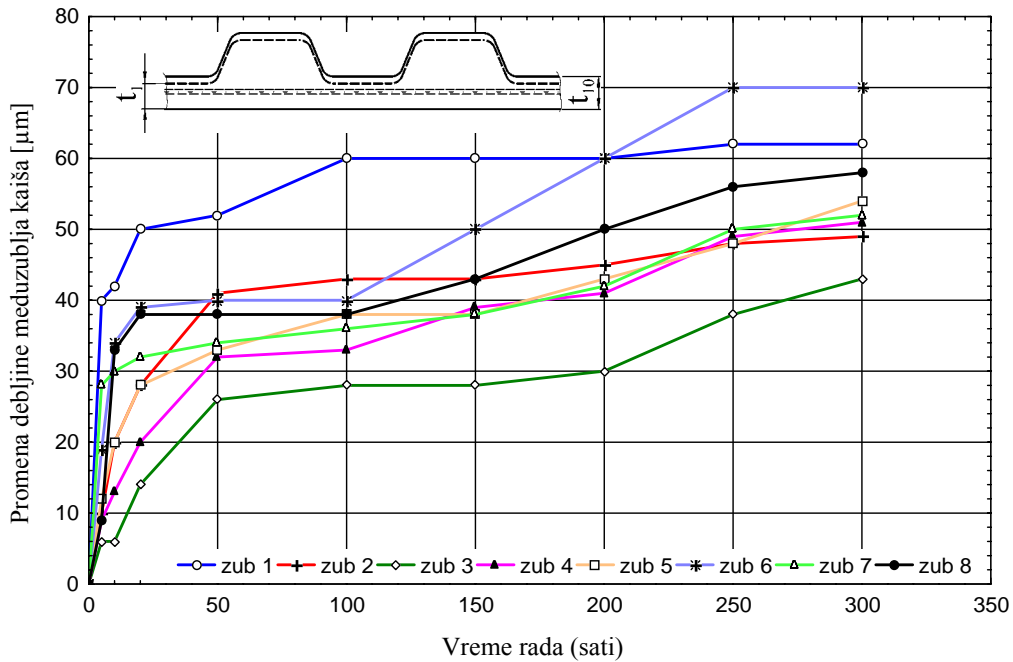
$t_{1o}$  - početna vrednost debljine međuzublja kaiša.

Rezultati merenja promene debljine međuzublja kaiša u toku rada za svih osam zuba dati su u tabeli 5 i prikazani na slici 7.

Tabela 5: Promena debljine međuzublja kaiša

$$\Delta t_1 = t_{1o} - t_1$$
 [ $\mu\text{m}$ ]

Vreme rada (sati)	$\Delta t_1$							
	Zub kaiša							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	40	10	6	9	12	19	28	9
10	42	20	6	13	20	34	30	33
20	50	28	14	20	28	39	32	38
50	52	41	26	32	33	40	34	38
100	60	43	28	33	38	40	36	38
150	60	43	28	39	38	50	38	43
200	60	45	30	41	43	60	42	50
250	62	48	38	49	48	70	50	56
300	62	49	43	51	54	70	52	58



Slika 7. Promena debljine međuzublja kaiša u toku rada

## 5. ANALIZA TRIBOLOŠKIH PROCESA

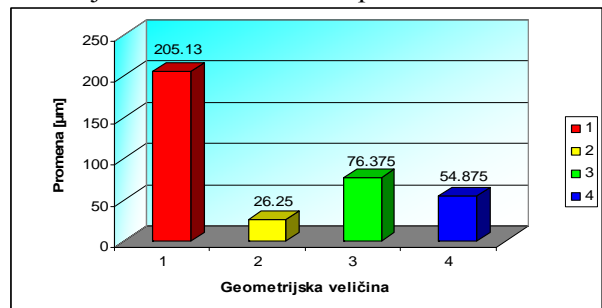
U periodu uhodavanja dolazi do naglog povećanja koraka kaiša. Ovo povećanje nastaje kako usled plastičnih deformacija kaiša, tako i usled habanja bokova zuba. Pri tome je posebno naglašeno valjkasto habanje kaiša (poseban oblik habanja elastomera), što za posledicu ima odnošenje materijala sa zuba kaiša i povećanje koraka. Valjkasto habanje se javlja na temenu i boku zuba kaiša. Vrednost sile trenja na boku zuba je višestruko veća od sile trenja na temenu zuba kaiša, što za posledicu ima veće valjkasto habanje boka zuba kaiša. Pored valjkastog habanja u periodu uhodavanja javlja se i abrazivno habanje. Usled nastalih plastičnih deformacija dolazi do povećanja širine kaiša i smanjenje visine zuba.

U periodu normalnog habanja koji se javlja posle  $\approx 20$  sati rada promena geometrijskih veličina je i dalje izražena. Nakon 20 sati rada korak kaiša se i dalje povećava. Promena koraka kaiša je izraženija u periodu od 20 do 50 sati, da bi nakon toga bila približno linearna. Rezultati dobijeni merenjem na svih osam zuba skoro da ne odstupaju jedan od drugog.

Visina zuba kaiša se dalje smanjuje u periodu normalnog habanja. U periodu od 20 do 50 sati ova promena je očigledna. Posle 50 sati rada, pa sve do 200 sati rada na većini zuba ne dolazi do većih promena visine. Najveće plastične deformacije nastaju u periodu uhodavanja. S obzirom da su u periodu normalnog habanja ove deformacije male, a valjkasto habanje temena zuba nije tako izraženo, visina zuba se neznatno menja. Nakon 200 sati rada opet se javlja promena visine i to na svim zubima.

Promena debljine međuzublja ima sličnu zavisnost kao prethodne dve veličine. Najveća je promena u periodu od 20 do 50 sati, da bi do kraja ona bila neznatna.

Širina kaiša se najviše menja u toku eksploatacije. Širina kaiša raste i posle perioda uhodavanja koji iznosi  $\approx 20$  sati sve do 100 sati rada prenosnika. Povećanje širine kaiša u ovom periodu nastaje usled plastičnih deformacija kaiša. Merenje geometrijskih veličina posle 150 sati rada pokazuje naglu promenu širine kaiša, dok ostale veličine imaju kontinualnu promenu. Rezultati merenja pokazuju da se širina kaiša smanjuje. Do naglog smanjenja širine kaiša (između 100 i 150 sati rada) je došlo zbog kontakta kaiša sa obodnim prstenom. Pri ovom kontaktu dolazi do pojave abrazivnog habanja čeonih površina kaiša. U ispitivanom zupčasto-kaišnom prenosniku pogonski kaišnik je izrađen sa obodnim prstenom.



Slika 8. Srednje vrednosti promena geometrijskih veličina

- 1 - Korak kaiša
- 2 - Širina kaiša
- 3 - Ukupna visina kaiša
- 4 - Debljina međuzublja kaiša

Do kretanja kaiša u aksijalnom pravcu moglo je doći usled neadekvatne montaže, lošeg zatezanja, velikih odstupanja brzine, pada momenta kočenja ili njegovog naglog povećanja. Od 150 do 300 sati rada, širina kaiša se i dalje smanjuje, stim što je ovaj pad kontinualan i odnosi se na sve zube.

Kada je reč o vrednostima promena geometrijskih veličina njihove apsolutne srednje vrednosti su prikazane na slici 8.

Sa histograma se vidi da se najviše menja korak kaiša. Korak kaiša se izdužuje približno 0.2 [mm], što dovodi do povećanja dužine kaiša. Ukupno izduženje kaiša iznosi ~23 [mm]. Veliki deo ovog izduženja je posledica plastičnog deformisanja kaiša, odnosno izduženja vučnog elementa. Međutim 30% promene koraka kaiša izazvano je habanjem bočnih površina zuba. Izduženje koraka je najveće u periodu uhodavanja i iznosi ~60% ukupnog izduženja. U ovom periodu uglavnom dolazi do plastičnih deformacija. Na kraju perioda uhodavanja i u periodu normalnog habanja korak kaiša se prvenstveno menja usled valjkastog habanja bočnih površina zuba.

## 6. ZAKLJUČAK

Analiza dobijenih rezultata pokazuje da je kod zupčastog kaiša posebno izražena pojava valjkastog habanja boka i temena zuba. Valjkasto habanje boka zuba je veće od valjkastog habanja temena zuba zbog specifičnosti tribomehaničkog sistema zub kaiša – zub kaišnika. Naime, početak sprežanja zuba kaiša sa zubom kaišnika započinje udarom

zuba kaiša u zub kaišnika. Nakon toga dolazi do klizanja zuba kaiša niz bočnu površinu zuba kaišnika pri čemu se javlja trenje klizanja sa kotrljanjem. Vrednost ove sile trenja je najveća u poređenju sa silama trenja u ostalim tribomehaničkim sistemima. Pored valjkastog habanja, kod zupčastog kaiša se javlja i abrazivno habanje njegove čone površine. Ove dve vrste habanja su dominantne.

Analizom krivih habanja dobijenih merenjem geometrijskih veličina može se uočiti određena zavisnost. Naime, korak, visina i debljina međuzublja kaiša se menjaju po sličnom zakonu. U početnom periodu, tj. periodu uhodavanja, najveće su promene praćenih veličina. Kontinualni rast njihovih promena, ali manjeg intenziteta, nastavlja se i u periodu normalnog habanja. Jedino promena širine kaiša ima drugačiju promenu, što uslovljeno konstrukcijom kaiša i pojavom abrazivnog habanja na čeonj površini kaiša.

## LITERATURA

- [1] S. Tanasijević: Mehanički prenosnici; lančani prenosnici, zupčasti kaišni prenosnici, kardanski prenosnici, JDT, Kragujevac, 1994.
- [2] B. Stojanović: Karakteristike triboloških procesa zupčastih kaiševa, magistarska teza, Kragujevac, 2007.
- [3] B. Stojanović: Promena koraka zupčastih kaiševa u periodu eksploatacije, SERBIATRIB '07, Kragujevac, 2007.

## THE CHANGE OF GEOMETRIC SIZES OF TIMING BELTS IN PERIOD OF EXPLOITATION

**Abstract:** Timing belt transmitters are relatively new transmitters that have been developed in the second half of the 20<sup>th</sup> century. Transmission of power and motion from a drive pulley to a driven pulley is achieved across the side surfaces of the belt teeth, and partially through friction between the belt teeth and hollows between the teeth of the pulley.

*Analysis of tribomechanical system «belt tooth – pulley tooth» and analysis of the change of geometric sizes of timing belt in period of exploitation are given in the paper. Testing of tribological characteristics of the timing belt was conducted on a test bench, designed and specially made for this purpose, at the Laboratory for Machine Constructions and Mechanisation of the Faculty of Mechanical Engineering from Kragujevac.*

**Keywords:** Timing belt transmitters, pitch belt, friction, wear