



KINEMATIKA SPREZANJA I TRENJE U ZUPČASTO-KAIŠNIM PRENOSNICIMA

Blaža STOJANOVIĆ, Mašinski fakultet, Kragujevac

KINEMATIC CONJUGATE ACTION AND FRICTION IN TIMING BELT TRANSMISSIONS

S u m m a r y

This paper deals with kinematic analysis of timing belt transmissions contacts, as well as, with detailed analysis of tribomechanical systems. Timing belt tooth goes into contact with a drive pulley, stretched to the maximum, because of the previous tension. When the contact begins the peak of the belt tooth makes the contact with the outer surface of the pulley teeth. The process of the teeth entering into the contact zone is accompanied with the relative sliding of their side surfaces and appropriate friction force. The normal force value is changing with the parabolic function, which also leads to the changes of the friction force. The biggest value of the normal force and of the friction force is at the tooth root. Hollow between teeth and the tip of the pulley teeth are also in contact. Occasionally, the face surface of the belt and the flange are also in contact. The friction occurs in those tribomechanical systems, also. Values of these friction forces are lower compared with the friction force, which occurs at the teeth root.

Key words: friction, timing belt

1. UVOD

Zupčasto kaišni prenosnici predstavljaju relativno novu koncepciju u prenosu snage, danas prihvaćenu u svim oblastima industrije. To je zapravo kombinacija lančanog i zupčastog prenosa, sa prednostima koje poseduju kaišni prenos. To su u osnovi pljosnati kaiševi sa serijom jednakih prostornih zuba unutar temenog prečnika [1].

Uprkos prednostima u radu zupčasto kaišni prenosnici su relativno skoro dobili veliku primenu. Tek posle upotrebe zupčastih kaiševa u pogonu bregaste osovine motora sa unutrašnjim sagorevanjem, postala je očigledna svrsishodnost njihove primene.

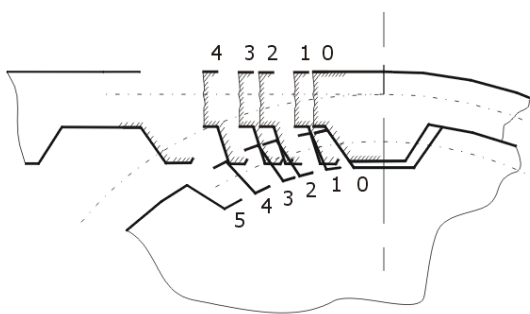
U eksploataciji se najčešće koriste zupčasto kaišni prenosnici sa trapeznim profilom zuba. Kinematska analiza sprezanja i analiza trenja će se odnositi upravo na njih.

2. KINEMATIKA SPREZANJA ZUPČASTIH KAIŠNIH PRENOSNIKA

Bočna površina zuba kaiša posle ulaza u spregu ostvaruje kontakt sa bočnom površinom zuba kaišnika. Pored toga u kontaktu se nalaze unutrašnja površina međuzublja kaiša i spoljna površina kaišnika, a povremeno i čeona površina kaiša sa obodnim prstenom.

Zub kaiša ulazi u spregu sa pogonskim kaišnikom maksimalno istegnut usled prethodnog zatezanja. Pri ulazu u spregu vrh zuba kaiša ostvaruje kontakt sa spoljnom površinom zuba kaišnika. U tom trenutku dolazi do kontakta po liniji. Usled interference zub kaiša zadire u bočnu površinu zuba kaišnika. S obzirom na elastične osobine kaiša i veliku krutost kaišnika dolazi do deformacije zuba kaiša (slika 1, položaj 4). Deformacija zuba kaiša raste, dok se istovremeno

povećava površina kontakta kaiša i kaišnika. Tačka kontakta između zuba kaiša i kaišnika se pomera od vrha zuba kaišnika ka njegovom korenu. Maksimalna deformacija zuba nastaje u položaju 2 (slika 1). Usled dejstva unutrašnjih napona i zaokretanja kaiša i kaišnika dolazi do smanjenja deformacija. Da bi u položaju 0 (slika 1) došlo do potpunog poklapanja bočnih površina zuba kaiša i kaišnika. Sada dolazi do kontakta po površini. Proces ulaska zuba kaiša u spregu sa kaišnikom praćen je relativnim klizanjem njihovih bočnih površina uz pojavu sile trenja. Vrednost normalne sile se menja po paraboličnom zakonu, što dovodi do promene sile trenja [2]. Najveća vrednost normalne sile i sile trenja se javlja u korenu zuba.



Slika 1: Šema ulaza zuba kaiša u spregu sa zubom pogonskog kaišnika

Poklapanje unutrašnje površine kaiša i spoljne površine kaišnika traje veoma kratko. Usled dejstava radijalnih i centrifugalnih sila dolazi do pomeranja površine kontakta u radijalnom pravcu. Pri pomeranju kaiša u radijalnom pravcu dolazi do pojave sile trenja u kontaktu. Ukupna pomeranje dostižu 1/5, odnosno 1/3 visine zuba ako se zanemari sila trenja [2]. Na kretanje u radijalnom pravcu najviše utiče prethodno zatezanje, jer pri nedovoljnom prethodnom zatezanju radijalne sile mogu da izazovu izlazak kaiša iz sprege sa kaišnikom.

Pri kontaktu kaiša i kaišnika u spregu se unosi izvestna količina vazduha. Jedan deo vazduha u aksijalnom pravcu izlazi iz sprege, dok ostatak vazduha ostaje zarobljen. S obzirom na postojanje radijalnog i bočnog zazora između zuba kaiša i kaišnika vazduh se zadržava u tom prostoru. Radijalna komponenta vazduha dodatno opterećuje unutrašnju površinu kaiša i pokušava da izbacii kaiš iz sprege. Komponenta vazduha u pravcu kretanja dodatno opterećuje kaiš i povećava pritisak na kontaktnoj površini što dovodi do dodatne deformacije zuba kaiša.

Usled dejstva radijalne i centrifugalne sile i vazduha nastaje dodatno kretanje kaiša u radijal-

nom pravcu. Pri ovom kretanju dolazi do relativnog klizanja bočnih površina zuba kaiša i kaišnika. Kretanje je praćeno pojavom sile trenja klizanja, čije su vrednosti manje od sile trenja koja nastaje pri ulazu zuba kaiša u spregu sa kaišnikom.

Za vreme kretanja kaiša duž obvojnog ugla kaišnika dolazi do savijanja i istežanja kaiša. Za razliku od pljosnatih kaiševa gde se savijanje vrši po ujednačenoj krivoj, savijanje zupčastih kaiševa se vrši po mnogougaoanom profilu. Savijanje kaiša dovodi do unutrašnjih gubitaka, kao i do zamora kaiša, odnosno vučnog elementa. Savijanje i istežanje kaiša duž obvojnog ugla dovodi do deformacije kaiša. Pored toga opterećenje zuba kaiša opada od ulaza zuba kaiša u spregu sa kaišnikom do njegovog izlaska iz sprege. Najopterećeniji je prvi zub u sprezi kod koga se javljaju i najveće deformacije. S obzirom na različita opterećenja zuba, dolazi do stvaranja nejednakih deformacija zuba kaiša duž obvojnog ugla. Razlika deformacija dovodi do relativnog pomeranja, prvog reda, kaiša u tangencijalnom pravcu. Pored toga kaiš ulazi u spregu maksimalno istegnut, a spregu sa kaišnikom napušta rasterećen. Usled ovih pomeranja kaiša dolazi do relativnog kretanja kaiša u odnosu na kaišnik duž obvojnog ugla. Pri ovom kretanju javljaju se sile trenja između unutrašnje površine kaiša i spoljne površine kaišnika. Pošto se radi o pomeranjima prvog reda, vrednosti ovih sila su veoma male, ali njihov uticaj nije zanemarljiv.

Osim kretanja u tangencijalnom i radijalnom pravcu, kod zupčastog kaiša je izraženo i kretanje u aksijalnom pravcu. Ovo kretanje je uslovljeno konstrukcijom kaiša i helikoidnim namotajem vučnog elementa. Pri aksijalnom kretanju dolazi do kontakta čeonih površina kaiša i obodnog prstena. Kontakt je posebno izražen pri ulazu i izlazu zuba kaiša iz sprege sa kaišnikom. Tada uglavnom i dolazi do oštećenja kaiša, naročito ako postoje greške pri izradi ili montaži kaišnika. Duž obvojnog ugla takođe dolazi do kontakta kaiš-obodni prsten i to uglavnom zbog relativnog pomeranja kaiša u odnosu na kaišnik.

Uticaj aksijalne sile se ogleda u pritiskanju kaiša ka obodnom prstenu. Praksa je pokazala da zupčasti kaiševi pokazuju sklonost da natrčavaju na obodni prsten ili mogu skliznuti sa kaišnika ukoliko nema upravljanja. Ovo je naročito uočeno kod širokih kaiševa. U slučaju da prenosnici rade sa velikim obimnim brzinama, većim osnim rastojanjima ili su znatno prethodno zategnuti javljaju se veći pritisci čeonih površina kaiša ka obodnim prstenovima. U kontaktu se javljaju sile trenja koje dovode do habanja krajeva kaiša. Posle

nekoliko meseci rada od ukupne širine kaiša koristi se samo 80% i manje [3].

Habanje se može smanjiti tačnijom izradom i smanjenjem grešaka pri montaži. Pri tome se moraju poštovati odgovarajuće tolerancije, kada je izrada kaišnik i kaiša u pitanju. Pri balan-siranju i montaži kaišnika mora se voditi računa da ose kaišnika budu paralelne i da se moguća iskošenja nalaze u odgovarajućim granicama.

Pored nabrojanih faktora, na natrčavanje kaiša na kaišnik, veliki uticaj ima i zazor između čeonog površine kaiša i obodnog prstena. Vrednost čeonog zazora mora biti optimizovana. Mali zazor dovodi češćeg kontakta, pojave sile trenja između čeonog površine i obodnog prstena i povećanog habanja kaiša. Ukoliko je čeonni zazor veliki, kaiš dobija veći prostor za kretanje u čeonom pravcu, što izaziva veću neravnomernost pri radu prenosnika.

Kretanje kaiša u radijalnom pravcu uslovljeno je dejstvom radijalne sile, centrifugalne sile, vazduha kao i deformacijom kaiša usled savijanja.

Ulazak vazduha u spregu kaiš-kaišnik dovodi do stvaranja vazdušnog jastuka koji teži da izbacii kaiš iz sprege sa kaišnikom. Izvestno je da se pri većim brzinama kretanja kaiša, vazduh uvučen kaišem, pri nailasku zuba na kaišnik sa obodnim prstenom sabija i istiskuje, što dovodi do neprijatnog zviždućeg zvuka. Ovaj uticaj je moguće smanjiti primenom višežlebnih zupčastih kaiševa. Konstrukcionim izvođenjem višežlebnih zupčastih kaišnika uvučeni vazduh izlazi brže i bolje. Pored toga, poboljšava se sprezanje zuba, ne obrazuje se vazdušni jastuk između kaiša i kaišnika, zupčasti kaiš se ne pridiže, a smanjuje se i specifični pritisak na kontaktnoj površini zuba. Međutim deo vazduha ostaje zarobljen između kaiša i kaišnika. Da bi se smanjio njegov uticaj u korenu međuzublja kaišnika ili na vrhu zuba kaiša izrađuje se kanal za vazduh. Njegove dimenzije zavise od veličine zupčasto kaišnog prenosnika.

Centrifugalne sile takođe pokušavaju da izbace kaiš iz sprege. Vrednosti centrifugalnih sila su znatno manje u odnosu na lančani prenosnik, s obzirom na materijal kaiša. Uticaj ovih sila je posebno izražen pri većim brzinama kaiša i većim dimenzijama kaišnika. Iako je uticaj centrifugalne sile manji od uticaja ostalih sila, njen uticaj je moguće dodatno smanjiti. Primenom fiberglasa umesto čelika za izradu vučnog elementa, smanjuje se masa kaiša, a samim tim i centrifugalne sile.

Radialna sila predstavlja komponentu normalne sile u sprezi kaiš kaišnik. Vrednost radialne sile zavisi od vrednosti obimne sile i ugla

profila kaišnika γ . Ona raste sa povećanjem ugla profila kaišnika. Optimalna vrednost ovog ugla iznosi 40° za kaišnike sa korakom zuba $h_k > 5.08[mm]$ i 50° za $h_k \leq 5.08[mm]$. Osim toga vrednost radijalne sile se menja duž obvojnog ugla. Najveća radijalna sila se javlja pri ulazu zuba kaiša u spregu sa pogonskim kaišnikom, a najmanja vrednost sile je pri izlazu iz sprege.

3. TRENJE U ZUPČASTO KAIŠNIM PRENOSNICIMA

Zupčasto kaišni prenosnici predstavljaju relativno nove prenosnike koji se javljaju u drugoj polovini 20. veka. Najveći deo kretanja i snage prenosi se oblikom, dok se samo jedan mali deo prenosi trenjem. Uticaj trenja u svakom slučaju nije zanemarljiv. Pojava trenja u zupčasto kaišnom prenosniku, kao i njegove posledice nisu dovoljno razjašnjene. Za razliku od ostalih prenosnika snage i kretanja (zupčanika, lančanih prenosnika, kardanskih prenosnika i td.) gde se trenje javlja pri kontaktu dve metalne površine, kod zupčastih prenosnika u kontaktu se nalaze metalna i nemetalna površina odnosno dve nemetalne površine.

U zupčasto kaišnom prenosniku razlikujemo sledeće tribomehaničke sisteme:

- zub kaiša – zub kaišnika
- čelo kaiša – obodni prsten
- međuzublje kaiša – teme zuba kaišnika

U tabeli 1 date su osnovne vrste kretanja koje se javljaju u ovim tribomehaničkim sistemima:

Tabela 1

Tribomehanički sistem	Vrsta kretanja
zub kaiša - zub kaišnika	- udar - klizanje - kotrljanje
čelo kaiša - obodni prsten	- udar - klizanje
međuzublje kaiša - teme zuba kaišnika	- klizanje - kotrljanje

Pri sprezanju zuba kaiša sa zubom kaišnika u kontaktu se nalaze njihove bočne površine. U trenutku ulaza zuba kaiša u spregu sa kaišnikom najpre dolazi do kontakta po liniji. Početak sprezanja započinje udarom zuba kaiša u zub kaišnika. Zub kaiša se, obzirom na svoje elastične osobine, deformiše i dolazi do povećanja kontaktne površine. Nakon povećanja površine kontakta i

zaokretanja kaiša i kaišnika, zub kaiša počinje da klizi niz bočnu površinu kaišnika, pri čemu se javlja trenje kotrljanjem sa klizanjem. Vrednost sile trenja raste sa povećanjem puta klizanja, tako da svoju najveću vrednost ima u korenu zuba kaiša. Istovremeno tačka delovanja rezultujuće komponente normalne sile pomera se od vrha zuba ka njegovom korenu. Normalna sila se menja po paraboličnom zakonu.

Međutim usled deformacije kaiša, dejstva radijalne, centrifugalne sile i vazduha dolazi do relativnog pomeranja kaiša u radijalnom pravcu i to u suprotnom smeru od prethodnog kretanja. Pri ovom pomeranju dolazi do pojave trenja klizanja između bočnih površina zuba kaiša i kaišnika. S obzirom na put klizanja, koji može biti najviše 1/3 visine zuba kaiša, sila trenja klizanja ima manje vrednosti od sile trenja kotrljanja koja se javlja pri prethodnom kretanju.

Drugi tribomehanički sistem koji je takođe bitan pri analizi trenja kod zupčasto kaišnih prenosnika čine čeonu površinu kaiša i obodni prsten. Do kontakta između čeonu površine kaiša i obodnog prstena najčešće dolazi pri ulazu zuba kaiša u spregu sa pogonskim kaišnikom. U slučaju da postoje greške u izradi ili montaži prenosnika udar zuba kaiša u obodni prsten, koji se javlja pri ulazu u spregu, može dovesti do njegovog oštećenja, pa čak i do pucanja. Pored toga duž obvojnog ugla može doći do povremenog kontakta čela kaiša i obodnog prstena. Pri ovom kontaktu dolazi do klizanja kaiša, što izaziva pojavu trenja klizanja.

Trenje u zupčasto kaišnom prenosniku javlja se i duž celog obvojnog ugla i to između međuzublja kaiša i temena zuba kaišnika. Relativno pomeranje kaiša duž obvojnog ugla koje nastaje usled deformacije kaiša i razlike opterećenja pojedinih zuba dovodi do pojave trenja klizanja. S obzirom da je reč o pomeranjima prvog reda, nastale sile predstavljaju sile trenja mirovanja i

njihove vrednosti su manje od vrednosti ostalih sila u zupčasto kaišnom prenosniku.

4. ZAKLJUČAK

Pri kontaktu zuba kaiša i kaišnika dolazi do kretanja kaiša u tangencijalnom, radijalnom i aksijalnom pravcu. Ova kretanja nastaju usled obrtnog momenta, obimne sile, prethodnog zatezanja, radijalne sile, centrifugalne sile, vazduha, deformacije kaiša usled savijanja i istežanja, konstrukcije kaiša, vučnog elementa i kaišnika, tačnosti izrade i montaže, kvaliteta obrađenosti kontaktnih površina i td. S obzirom na veliki broj parametara koji utiču na prenos snage i kretanja, kinematska analiza sprežanja predstavlja vrlo složen proces

U zupčasto kaišnom prenosniku razlikujemo tri karakteristična tribomehanička sistema. U ovim tribomehaničkim sistemima javljaju se sledeće vrste kretanja: udar, kotrljanje i klizanje.

Najveća vrednost sile trenja javlja se pri ulazu zuba kaiša u spregu sa kaišnikom, kao i u korenu zuba kaiša pri samom sprežanju.

LITERATURA

- [1] Tanasijević S., Mehanički prenosnici: lančani prenosnici, zupčasti kaišni prenosnici, kardanski prenosnici, Jugoslovensko tribološko društvo, Mašinski fakultet Kragujevac, 1994.
- [2] Арбусов М.О., Выбор оптимального профиля зуба ремня в плоскозупчатой передаче с точки зрения облегчения входа его в зацепление с зубом шкива, Механические передачи, сборник трудов, с 152-160, НИИМАШ, Москва, 1971.
- [3] Воробьев И.И., Ременные передачи, Машиностроение, Москва, 1979.