Svetislav Marković,
dipl. inž.

ANALIZA UREĐAJA SA ZATVORENIM KOLOM OPTEREĆENJA ZA ISPITIVANJE ZUPČASTIH PRENOSNIKA

Uvod

Utvrdjivanje karakteristika zupčastih parova, kao što su čvrstoća bokova i podnožja zubaca, habanje zubaca i toplotno stanje zbog uticaja na uslove podmazivanja, ostvaruje se prvenstveno na uređajima u kojima se simuliraju radni uslovi.

U eksploataciji zupčastih parova retki su slučajevi rada sa konstantnim opterećenjem. Zbog toga se sve više postavljaju zahtevi za eksperimentalna ispitivanja zupčastih parova sa promenljivim opterećenjem. Dosadašnja ispitivanja su pokazala da postoje određeni uticaji promenljivog opterećenja na radne karakteristike. Uočljiv je i uticaj promene ugaone brzine, jer pri povećanju broja obrtaja rastu dinamičke sile, brzina klizanja i rad sila trenja. Toplotno stanje se određuje prvenstveno radi razmatranja njegovog uticaja na uslove podmazivanja, jer postoji zavisnost viskoznosti ulja od temperature, čija je posledica promena naponskog stanja na dodirnim površinama zubaca zupčanika.

Uređaji sa zatvorenim kolom opterećenja za ispitivanje zupčastih prenosnika

Da bi se smanjila snaga, potrebna za ispitivanje zupčastih prenosnika, koriste se uređaji sa zatvorenim kolom opterećenja. Princip rada ovih uređaja može se objasniti na primeru prikazanom na slici 1.

Elektromotor 1 pokreće parove zupčanika 2—7 i 3—4. Pogonski zupčanici su spojeni kontinualnim vratilom, a gonjeni vratilom sastavljenim iz dva dela, koji na svojim krajevima imaju prirubnice 5 i 6. Ukoliko se jedna prirubnica zaokrene za neki ugao u odnosu na drugu, u sistemu će se uspostaviti moment uvijanja srazmeran ostvarenoj deformaciji celog sistema. Spajanjem prirubnica ceo sistem sa zupčastim parovima je prethodno opterećen obrtnim momentom. U toku rada parovi zupčanika će prenositi snagu srazmernu obrtnom momentu i ugaonoj brzini. Kako u sistemu postoje otpori usled sila trenja (u ležajevima, između bokova zubaca, otpora ulja), zatim usled deformacionog rada pri sprezanju (koji se najvećim delom vraća), radi njihovog savlađivanja mora da se uvede, dopunska spoljna energija od elektromotora.

Na slici 2 prikazana je šema cirkulacije snage u sistemu. Smer cirkulacije važi samo u slučaju poklapanja smera obrtanja i smera dovedenog momenta uvijanja.

Sl. 1 — Uređaj sa zatvorenim kolom opterećenja

Sl. 2 — Šema cirkulacije snage u uređaju sa zatvorenim kolom opterećenja

Na ovaj način potrebna snaga pogonske mašine je znatno manja od snage koja cirkuliše u kolu. Ovaj relativno mali utrošak energije pri ispitivanju predstavlja i glavnu prednost uređaja sa zatvorenim kolom opterećenja.

Nedostaci uređaja sa zatvorenim kolom opterećenja su što su za ostvarenje kola neophodna dva para zupčanika i što se dinamički odnosi jednog zupčastog para prenose na drugi. Ovaj uticaj može da se ublaži povezivanjem parova zupčastih prenosnika elastičnim elementima (elastično vratilo ili elastične spojnice).

Karakteristična osobina uređaja sa zatvorenim kolom za ispitivanje zupčastih prenosnika jeste mogućnost opterećivanja uređaja silama elastičnosti elemenata (u većini slučajeva to je torziono vratilo).

Uređaji mogu biti sa predopterećenjem i opterećivanjem u toku rada. Kod prvih se opterećenje u toku rada ne menja (ispitivanje sa konstantnim obrtnim momentom), a kod drugih se može menjati (ispitivanje sa promenljivim obrtnim momentom). Opterećenje se ostvaruje silama elastičnosti i spoljašnjim dejstvom. Na uređajima sa predopterećenjem kao elementi za opterećivanje služe krute spojnice različite konstrukcije.

Uređaji sa opterećivanjem u toku rada, prema tipu sklopova za opterećivanje (teretnica), mogu biti sa:

- zavojnim mehanizmom,
- obrtnim kućištem,
- radijalnim ili aksijalnim pomeranjem pomoću posebnih zupčanika (najčešće sa kosim zupcima),
- planetarnim i diferencijalnim mehanizmima,
- frikcionim spojnica sa malim proklizavanjem,
- hidrauličkim ili pneumatskim mehanizmima,
- mehanizmima sa programiranim opterećenjem.

Uređaji zatvorenog kola snage mogu se deliti prema:

- objektima ispitivanja (za posebne zupčaste prenosnike i za reduktore),
- broju sekcija (jednosekcijski i višesekcijski),
- kompoziciji (sa usklađenim i razdvojenim kućištima ispitivanih i zupčastih prenosnika koji pripadaju ispitnom uređaju),
- međuosnom rastojanju (sa konstantnim i stepenasto promenljivim međuosnim rastojanjem).

Uređaji sa predopterećenjem

Uređaji sa zatvorenim kolom opterećenja, sa predopterećenjem, jednostavne su konstrukcije, lako se uspostavlja i meri moment uvijanja. Nedostatak im je što se puštanje u rad (startovanje) vrši pod punim opterećenjem kao i mogućnost slabljenja opterećenja. Metode ostvarivanja momenta uvijanja mogu se svrstati prema vrstama i konstrukcionim rešenjima sklopova za opterećenje — teretnica.

Prema principu rada teretnice mogu biti *frikcione* i *zglobne*.

Na slici 3 prikazan je osnovni oblik frikcione teretnice, sa ravnim radnim površinama. Obodi ove teretnice se zaokreću jedan u odnosu na drugi pomoću poluge ili tega, ili polužnim prenosom. Tako zaokrenuti obodi se pritežu posebnim zavrtnjima, koji se po obodu 1 kreću po kružnom T žlebu. Na taj način se ostvaruje otpor prijanjanja. Statički uveden moment uvijanja uravnotežuje se reaktivnim momentom sistema.

Sl. 3 — Frikciona teretnica sa kružnim T žlebovima

Na slici 4 prikazana je varijanta frikcione teretnice sa koničnim rad-

nim površinama. Način uvođenja momenta uvijanja u zatvoreno kolo opterećenja je istovetan kao kod teretnice sa kružnim T žlebovima.

Sl. 4 — Frikciona teretnica sa koničnim radnim površinama

Na slici 5 prikazana je diferencijalna poprečno-uvijajuća teretnica, koja se sastoji od dva oboda, 1 i 2 i čivije 3. Obodi teretnice imaju različit broj istovetnih otvora (najčešće 18 i

Sl. 5 — Diferencijalna poprečno-uvijajuća teretnica

19), u koje se nakon zaokretanja postavljaju čivije za osiguranje.

Na slici 6 prikazana je zglobna teretnica. Na jednoj prirubnici su zavrt-nji čijim se uvrtnjem potiskuje dru-

Sl. 6 — Zglobna teretnica sa zavrtanjima

ga prirubnica. Moment uvijanja meri se pomoću mernih traka ili merenjem deformacija (ugla zaokretanja jedne prirubnice u odnosu na drugu).

Na uređajima sa poprečno-uvijajućim, koničnim i zupčastim teretnicama (prikazani na sl. 7 i 8) uvijanje torzionih vratila vrši se opterećenjem koje se postavlja na rasklapajuće polužne ključeve ili pomoću dizalica (kao kod uređaja prikazanog na slici 9). Za tačno uvijanje vratila, za određeni ugao, otvori za vijke poprečno-uvijajućih teretnica izrađuju se u vidu kružnih žlebova, ili se u jednom obodu teretnice izrađuje jedan otvor više nego u drugom (slika 5). Primena teretnica sa pritisnim vijcima isključuje neophodnost korišćenja polužnih ključeva, tereta i dizalica. Posle uvijanja vratila pritisni vijci se zakočuju. Na uređajima za opterećivanje sa samokočivim pužnim prenosnicima (kao uređaj prikazan na slici 10) kućište pužnog prenosnika sa pužem učvršćuje se na jednom vratilu, a pužni zupčanik na drugom. Torziono vratilo uvija se obrtnjem puža.

Na slici 7 prikazan je uređaj sa poprečno-uvijajućom teretnicom i opterećivanjem teretnom polugom. Ovaj uređaj sastoji se od ispitivanog prenos-

Sl. 7 — Uređaj sa poprečno-uvijajućom teretnicom i opterećivanjem teretnom polugom

nika 1, torzionog vratila 2, registratora zaokretanja torzionog vratila 3 i reduktora 4 koji pripada uređaju za ispitivanje. Pozicija 5 označava obod teretnice koji se obrće teretnom polugom za uvijanje torzionog vratila. Reduktor uređaja za ispitivanje 4 mora imati iste geometrijske i kinematske odnose kao i ispitivani prenosnik 1.

Šema uređaja sa koničnom teretnicom prikazana je na slici 8. Ovakav uređaj sastoji se od ispitivanih zupč-

Sl. 8 — Uređaj sa koničnom teretnicom

nika 1, zupčastih spojnika 2, konične frikcione teretnice 3, poluga 4, tegova 5 i torzionog vratila 6.

Uređaj sa poprečno-uvijajućom teretnicom i pneumatskom dizalicom pri-

kazan je na slici 9. Sastoji se od ispitivanog prenosnika 1, poprečno-uvija-

Sl. 9 — Uređaj sa poprečno-uvijajućom teretnicom i pneumatskom dizalicom

juće teretnice 2, poluga za opterećivanje 3 i pneumatske dizalice 4. Pneumatska dizalica, usled povećanja pritiska u cilindru, širi poluge što dovodi do uvijanja vratila.

Na slici 10 prikazan je uređaj za ispitivanje zupčanika sa pužnom teretnicom. Zatvoreno kolo obrazuju reduktori 5 i 6, koji pripadaju uređaju za ispitivanje, i ispitivani reduktor 9. Vratila ispitivanog reduktora spojena su sa vratilima reduktora koji pripadaju

Sl. 10 — Uređaj sa pužnom teretnicom

uređaju preko spojnice 1 i 2 i kardanskih vratila 3 i 4. Opterećivanje uređaja obrtnim momentom, u granicama od 5 do 10 kNm, ostvaruje se uvijanjem torzionog vratila 8 pomoću pužne teretnice 7.

Uređaji sa zavojnim mehanizmom

Na uređajima sa zavojnim mehanizmom torziona vratila se uvijaju pomoću teretnice sa zavojnim žlebom. Na desnom delu teretnice 1 (slika 11) izrađena su dva aksijalna žleba, a na levom dva žleba sa uglom zavojnice β . Delovanjem silom F na polugu izaziva se aksijalno pomeranje teretnice. Zbog postojanja zavojnog žleba, aksijalno pomeranje tela teretnice izaziva uvijanje vratila. Aksijalna sila F_a , koja deluje na telo teretnice (koju izaziva sila F preko kraka poluge), izaziva opterećivanje uređaja momentom uvijanja, koji iznosi:

$$M = F_a D / 2 \operatorname{tg} \beta \quad (1)$$

gde je D — prečnik tela teretnice.

Prednost ove teretnice je u jednostavnoj konstrukciji, a nedostaci su: stalno dejstvo aksijalne sile, velika normalna sila pri malom uglu zavojnice, odnosno potreba za velikim prečnikom tela teretnice.

Sl. 11 — Uređaj sa teretnicom sa zavojnim žlebom

Na slici 12 prikazana je šema jednog složenijeg uređaja sa teretnicom sa zavojnim žlebom. Vratila ispitivanih zupčastih prenosnika 1 i 3 međusobno su spojena torzionim vratilom 2 sa pokazivačem ugla uvijanja, i preko teretnice sa zavojnim žlebom 4. Prenosnik koji čine vijak i navrtka aksijalno pomera teretnicu. Navrtka ovog prenosnika izrađena je izjedna sa pužnim zupčanikom. Pužni zupčanik 5 se pokreće pomoćnim elektromotorom preko kaišnog prenosnika i puža.

Sl. 12 — Uređaj sa teretnicom sa zavojnim žlebom i pužnim prenosnikom

Uređaji sa teretnicom u vidu zupčanika sa kosim zupcima

Aksijalnim pomeranjem zupčanika sa kosim zupcima (jednog u odnosu na drugi), ostvaruje se i njihovo obrtanje. Ova osobina, u slučaju zatvorenog kola opterećenja, pod dejstvom aksijalne sile F_a , izaziva moment uvijanja, koji se računa prema jednačini (1). Kod ovog uređaja D je kinematski prečnik zupčanika, a β ugao nagiba bočne linije zupca zupčanika.

Postoji više konstrukcionih rešenja ovakvih teretnica. Jedna od varijanti je primena zupčastih spojnice sa kosim zupcima umesto zupčanika.

Princip aksijalnog pomeranja zupčanika sa kosim zupcima korišćen je u uređaju prikazanom na slici 13. Osobine ovog uređaja su vertikalno postavljena vratila ispitivanog prenosnika i postavljanje torzionog vratila 1 unutar šupljeg vratila 2. Opterećivanje se ostvaruje aksijalnim pomeranjem (gore ili dole) zupčanika sa kosim zupcima 3, stavljanjem tega na jednu od poluga 4 ili 5.

Sl. 13 — Vertikalni uređaj zatvorenog kola sa opterećivanjem pri aksijalnom pomeranju zupčanika sa kosim zupcima

tar šupljeg vratila 2. Opterećivanje se ostvaruje aksijalnim pomeranjem (gore ili dole) zupčanika sa kosim zupcima 3, stavljanjem tega na jednu od poluga 4 ili 5.

Na slici 14 prikazan je drugačiji uređaj koji koristi isti princip. Naime, zatvoreno kolo snage, koju daje elektromotor (slika 14.a), preko vratila 1, zatvaraju zupčasti prenosnici 2—5 i 3—7 i ispitivani zupčasti prenosnici. Ovde zupčanik 7 sa obrtnim vratilom 6 obrazuje ožlebljeni spoj (slika 14.b). Zupčanik 7 aksijalno se pomera usled dejstva tereta 10, postavljenog na polugu 9, koja predaje silu preko ležaja 8. Pri aksijalnom pomeranju zupčanika 7 okreće se i uvija torziono vratilo 4, što dovodi do opterećivanja ispitivanih prenosnika.

Osnovni nedostatak ove vrste teretnica je intenzivno habanje pokretnih elemenata, potreba za ostvarivanjem aksijalne sile i veliki gubici energije zbog trenja. Ovaj način nije pogodan za neprekidnu promenu opterećenja u toku rada i ograničava se samo na izazivanje relativno malih opterećenja.

Sl. 14 — Uređaj sa opterećivanjem pomoću aksijalnog pomeranja zupčanika postavljenog na ožlebljeno vratilo

Uređaji sa obrtnim kućištem

Pošto je kućište prenosnika opterećeno obrtnim momentom, koji predstavlja algebarski zbir obrtnih momenata na ulaznom i izlaznom vratilu, opterećivanje zupčastih parova može da se ostvari saopštavanjem obrtnog momenta kućištu.

Pod dejstvom spoljašnjeg momenta jedan zupčanik dobija mogućnost da ostvari obrtanje oko zupčanika sa kojim se spreže. Pri tome je spoljašnji moment u ravnoteži sa reaktivnim momentom elastično uvijenih vratila i drugih elemenata uređaja. Zbog toga se ovakve teretnice nazivaju reaktivnim.

Na uređajima sa obrtnim kućištem opterećenje se, takođe, ostvaruje putem elastične deformacije elemenata koji obrazuju zatvoreno kolo. To je slučaj sa vratilima koja spajaju prenosnike u nepokretnim i pokretnim kućištima. Umesto kućišta mogu se pomerati ose bilo kog zupčanika u odnosu na osu

s njim spregnutog zupčanika. Zatim, mogu se pomerati ose dva i više zupčanika u odnosu na osu zupčanika postavljenog između njih, ili ose dva i više zupčanika koji su postavljeni u posebnom kućištu. Vratila nepokretnih i pokretnih kućišta spajaju se spojnicama, koje omogućavaju povećanje ugla otklona (pomeranja). Pored toga, primenjuju se zupčaste i kardanske spojnice. Opterećivanje se može ostvariti tegovima, navojnim i hidrauličkim dizalicama.

Na slici 15 data je šema uređaja kod kojeg je primenjeno zaokretanje kućišta (sistem opterećivanja V. N. Kudrjavceva). Kućište 2 je nepokretno, dok kućište 6, pod dejstvom opterećenja na kraju poluge, ima mogućnost da se zaokrene oko vratila 4. Ispitivani zupčasti parovi su 3—9 i 5—7, a kardansko vratilo je obeleženo brojem 8. Sistem dovodi u obrtanje elektromotor 1. Obrtni moment kojim se opterećuju zupčanici iznosi:

$$M = l \cdot r \cdot (F + G) / a \quad (2)$$

Sl. 15 — Uređaj zatvorenog kola opterećenja sa obrtnim kućištem

gde je:

F — teret na kraju poluge,

G — ekvivalentni teret na kraju poluge, koji stvara moment jednak momentu usled sopstvene težine kućišta 6 zajedno sa njegovim elementima,

l — rastojanje na poluzi od ose vratila 4, oko koga se vrši zaokretanje, do tereta,

r — poluprečnik podeonog kruga zupčanika 7,

a — međuosno rastojanje zupčanika 5 i 7.

Dobre osobine uređaja sa obrtnim kućištem su: jednostavna konstrukcija mehanizama za opterećivanje; mogućnost lakog uspostavljanja i promene opterećenja; mogućnost opremanja uređajima za programirano opterećivanje, koji nisu složene konstrukcije; lako održavanje momenta u toku rada; jednostavno neposredno određivanje momenta kojim se opterećuju zupčanici i jednostavna eksploatacija.

Nedostatak ovih uređaja je dejstvo unutrašnjih dinamičkih sila, odnosno mikropromene ugaonih brzina, koje za posledicu imaju nastanak vibracija. Neophodno je da se nastale vibracije amortizuju. Osim toga, u slučaju rada sa promenljivim opterećenjem potrebni su dodatni uređaji.

Uređaji sa planetarnim i diferencijalnim mehanizmima

Korišćenjem kinematskih osobina planetarnog kretanja zupčanika razvijeno je više konstrukcija teretnica kod kojih se u toku rada uređaja može menjati opterećenje. Prema kinematskom rešenju teretnice mogu biti nepokretne i obrtne. Prema vrsti primenjenih zupčanika planetarne teretnice mogu biti sa cilindričnim i sa koničnim zupčanicima.

Kod nepokretnih planetarnih teretnica, za vreme rada uređaja, kućište

miruje dok se svi ostali elementi kreću. Moment uvijanja u sistemu moguće je ostvariti zaokretanjem zupčanika sa unutrašnjim ozubljenjem, nosača satelita ili centralnih zupčanika. Nešto povoljniji rad planetarnih teretnica sa cilindričnim zupčanicima je ukoliko se izvede konstrukcija tako da se cela teretnica obrće — obrtna teretnica. U tom slučaju ona radi kao spojnica i nema međusobnog relativnog obrtanja elemenata teretnice. Relativno kretanje elemenata postoji samo u toku uvođenja momenta uvijanja.

Specifičnost nepokretnih planetarnih i diferencijalnih teretnica je u tome što se planetarni i diferencijalni mehanizmi uključuju u zatvoreno kolo tako što nosači satelita (slike 16 i 17) pri radu uređaja ostaju pokretni. Opterećivanje se ostvaruje obrtanjem nosača, koji spojenim vratilima saopštavaju dopunska ugaona pomeranja u suprotnim smerovima.

Nepokretna diferencijalna teretnica sa koničnim zupčanicima prikazana je u sastavu uređaja na slici 16. U zatvoreno kolo, sastavljeno od ispitivanih reduktora, postavljen je diferencijalni mehanizam sa četiri konična zupčanika. Opterećivanje se ostvaruje obrtanjem kućišta diferencijalnog mehani-

Sl. 16 — Uređaj sa nepokretnom diferencijalnom teretnicom

zma odnosno planetarnim kretanjem satelita, usled dejstva tereta G postavljenog na poluzi.

Uređaj sa nepokretnom planetarnom teretnicom sa cilindričnim zupčanicima prikazan je na slici 17. Zatvoreno kolo snage čine ispitivani zupčasti prenosnici 1—2 i 9—10, zupčanik 8 i zupčanici 5 i 7, koji su postavljeni na nosaču satelita 3 izrađenom u vidu kolevke. Nosač je postavljen na cilindrične kotrljajne vođice 4 i 6. Opterećivanje se ostvaruje obrtanjem nosača 3 oko ose vratila 11. Različit broj zu-

Sl. 17 — Uređaj sa nepokretnom planetarnom teretnicom sa cilindričnim zupčanicima

baća zupčanika 5 i 7 uslovljava razliku u uglovima obrtanja vratila 11 i 12 i njihovo uvijanje. Stvaranje momenta uvijanja obavlja se pomoću elektromotora koji nije prikazan na ovoj slici.

Pomoću planetarnih teretnica opterećenje u sistemu se relativno lako uspostavlja.

Nedostaci planetarnih i diferencijalnih teretnica su:

- svi elementi su opterećeni ukupnim opterećenjem sistema, pa moraju biti i dimenzionisani,

- stepen korisnog dejstva, zbog većeg broja elemenata u sprezi, manji je pa je i utrošak energije za pokretanje sistema srazmerno veći, što se ne odnosi na obrtne teretnice,

- složene su konstrukcije i zahtevaju preciznu izradu,

- mora da postoji posebna instalacija za intenzivno podmazivanje teretnice, a ukoliko su obrtni momenti veliki mora da postoji i instalacija za hlađenje ulja,

- neophodan je poseban uređaj za zaokretanje elemenata teretnice (mehanički, električni ili hidraulički).

Može se zaključiti da su ove teretnice skupe i manje pouzdane u radu, jer imaju veliki broj elemenata.

Uređaji sa frikcionim spojnicama sa malim proklizavanjem

Karakteristika uređaja sa frikcionim spojnicama (slike 18 i 19), koje rade sa malim proklizavanjem, jeste razlika u prenosnim odnosima zupčastih prenosnika koji obrazuju zatvorenu konturu za 1 do 3%, što prouzrokuje klizanje u spojnici.

Opterećenje se ostvaruje silama trenja koje nastaju u spojnici. Zbog malih brzina klizanja, snaga koja je potrebna spojnicama je mala i čini neznan deo snage koja cirkuliše u zatvorenom kolu.

Uređaji ovakvog tipa pogodni su za ispitivanje reduktora sa ugrađenim sigurnosnim (zaštitnim) frikcionim spojnicama, koje se koriste kod većine teretnica.

Na slici 18 prikazana je šema uređaja za ispitivanje cilindričnih zupčanika sa frikcionom spojnicom sa malim proklizavanjem. Zatvoreno kolo snage, koju daje elektromotor, čine zupčasti prenosnici 1 i 3, spojnica 2 i frikciona spojnica sa malim proklizavanjem 4. Treba naglasiti da zupča-

sti prenosnici 1 i 3 imaju slične prenosne odnose.

Sl. 18 — Uređaj sa frikcionom spojnicom sa malim proklizavanjem

Šema uređaja za ispitivanje koničnih reduktora, sa frikcionom spojnicom sa malim proklizavanjem, prikazana je na slici 19.

Sl. 19 — Uređaj za ispitivanje koničnih reduktora sa frikcionom spojnicom sa malim proklizavanjem

Snagu od elektromotora primaju zupčasti prenosnici sa sličnim prenosnim odnosima 3 i 5, u čijem je kućištu smeštena i frikciona spojnica sa malim proklizavanjem 4. Snaga se dalje prenosi, preko krutih spojnika 2, na ispitivane cilindrično-konične reduktore 1. Sporohodna vratila cilindrično-koničnih reduktora su čvrsto spojena i zatvaraju kolo opterećenja. Određivanje obrtnog momenta u zatvorenom kolu, vrši se elastičnim dinamometrom 6. Obrtni moment se određuje prema vrednosti aksijalne komponente sile sprezanja u cilindričnom zupčastom prenosniku sa kosim zupcima 5.

Uređaji sa hidrauličkim i pneumatskim teretnicama

Za ostvarivanje većih momenata uvijanja koriste se hidrauličke i pneumatske teretnice. U uređajima sa hidrauličkim i pneumatskim teretnicama koriste se zavojni mehanizmi sa hidrauličkim pogonom, hidrauličke teretnice sa lopaticama ili polužni mehanizmi sa pneumatskim pogonom.

Kod uređaja sa zavojnim mehanizmima koriste se zupčasti prenosnici sa kosim zupcima zatvorenog kola opterećenja (kao na slikama 20 i 21), autonomni (samostalni) zupčasti prenosnik sa kosim zupcima (kao na slici 22) ili zavojne teretnice (kao na slici 23). Zavojne teretnice mogu se izraditi zasebno od hidrauličkih cilindara (kao na slici 23). Moguće ih je ugraditi u hidrauličke cilindre, ili ih izraditi izjedna sa hidrauličkim cilindrima (kao na slici 21).

Na slici 20 prikazan je uređaj sa aksijalnim pomeranjem zupčanika sa kosim zupcima pomoću hidrauličkog cilindra dvostranog dejstva. Ispitivani zupčasti prenosnik sa pravim zupcima 1—2 se opterećuje, pri obrtanju zupčastog prenosnika sa kosim zupcima 3—4, usled aksijalnog pomeranja vratila 5. Vratilo 5 na sebi nosi klip

hidrauličkog cilindra 7 i zupčanik sa kosim zupcima 4, i prolazi kroz hidraulički cilindar 6. Dve radne površine sa obe strane klipa 7 omogućuju promenu smera uvijanja torzionog vratila, dovođenjem ulja pod pritiskom na jednu od ranijih površina hidrauličkog cilindra 6.

Sl. 20 — Uređaj sa aksijalnim pomeranjem zupčanika sa kosim zupcima pomoću hidrauličkog cilindra dvostranog dejstva

Uređaj sa aksijalnim pomeranjem zupčanika sa kosim zupcima izrađenog izjedna sa hidrauličkim cilindrom prikazan je na slici 21. Opterećenje se ostvaruje aksijalnim pomeranjem zupčanika sa kosim zupcima 1, koji sa vra-

Sl. 21 — Uređaj sa aksijalnim pomeranjem zupčanika sa kosim zupcima izrađenog izjedna sa hidrauličkim cilindrom

tilom 2 obrazuje klizni ožlebljeni spoj. Desni kraj vratila 2 služi, istovremeno, i kao klip, a unutrašnja površina glavčine zupčanika 1 kao hidraulički cilindar.

Na slici 22 prikazana je šema uređaja za ispitivanje cilindrično-koničnih reduktora sa autonomnom hidrauličkom teretnicom od zupčanika sa kosim zupcima. Ispitivani cilindrično-konični reduktori 1 uključeni su u zatvoreno kolo opterećenja, koje se sastoji od autonomne hidrauličke teretnice 6 i zupčaste spojnice 2, koja spaja sporohodna vratila ispitivanih reduktora. Opterećivanje se ostvaruje uzajamnim obrtanjem vratila 7 i 10, pri aksijalnom pomeranju zupčanika 5 i 8, zajedno sa srednjim vratilom 4. Vratilo 4 pomera pritisak ulja koje se dovodi u jedan od hidrauličkih cilindara 3 ili 9. Cilindri su, istovremeno, i klizni ležajevi.

Tipičan uređaj sa zavojnom hidrauličkom teretnicom prikazan je na slici 23. Zavojna teretnica sastoji se od poluteretnica 1 i 2, koje su spojene nesamokočivim navojem velikog koraka. Unutrašnja površina teretnice 2 spojena je sa vratilom kliznog ožlebljenog spoja. Opterećivanje se ostvaruje obrtanjem poluteretnica 1 i 2 pri aksijalnom pomeranju vratila 3. Aksijalno pomeranje vratila odvija se usled dovođenja ulja pod pritiskom na jednu od radnih površina (levu ili desnu) hidrauličkog cilindra 4.

Hidrauličke teretnice sa lopaticama su jednostavne konstrukcije. U kućište teretnice koja je vezana za jedan zupčanik, ugrađen je rotor sa lopaticama. Rotor je spojen sa vratilom uređaja. Pod dejstvom pritiska ulja na lopatice dolazi do zaokretanja rotora, odnosno uvijanja vratila uređaja. Pošto uvijanje zavisi od ostvarenog pritiska ulja, ostvareni momenat može se očitavati na manometru. S obzirom na to da cela teretnica rotira, njena primena je ograničena na manje brojeve

Za dinamička ispitivanja u zatvorenom kolu opterećenja može da se koristi obrtni hidraulički cilindar sa serv ventilima.

A detailed technical drawing of a mechanical assembly, likely a pump or valve mechanism. The drawing includes a central vertical shaft (1) with a horizontal cross-section (2) and a vertical cross-section (3). The shaft is connected to a horizontal shaft (4) which is part of a larger assembly (5). This assembly is mounted on a base (6) and is connected to a vertical shaft (7) which is part of a larger assembly (8). The assembly (8) is connected to a horizontal shaft (9) which is part of a larger assembly (10). The drawing shows various components, including a motor or actuator on the left, a central shaft assembly, and a complex mechanical linkage on the right. The drawing is labeled with numbers 1 through 10, corresponding to the numbered circles in the legend.

Opremanjem uređaja za ispitivanje odgovarajućim hidrauličkim i pneumatskim teretnicama sa programiranim regulatorom pritiska, oni mogu biti iskorišćeni za ispitivanje zupčastih prenosnika pri promenljivim režimima opterećenja.

česće, ostvaruje mehaničkim, hidrauličkim ili pneumatskim putem.

Izazivanje i promena momenta uvi-
janja mehaničkim putem može se os-
tvariti:

- promenom kraka sile,
- promenom veličine sile.

Načini ostvarivanja promenljivog opterećenja pri ispitivanju

Opisane mehaničke teretnice, koje svojim konstrukcionim osobinama omogućavaju promenu opterećenja u

nih prenosnika 15 i 3, planetarnog prenosnika 4, sklopa zamenljivih cilindričnih zupčanika 5 i prenosnika sa koničnim zupčanicima 6. Pomoću zamen-

Sl. 23 — Uređaj sa zavojnom hidrauličkom teretnicom

ljivih zupčanika 5 moguće je ostvarivanje različite brzine kretanja točka 11, a samim tim i različite brzine porasta momenta uvijanja. Primenom elektromotora sa konstantnim brojem obrtaja postiže se linearna promena momenta uvijanja u zatvorenom kolu opterećenja. Ukoliko bi se primenio elektromotor sa regulacijom broja obrtaja, brzina kretanja tega mogla bi se regulisati po određenom zakonu.

Na slici 25 šematski je prikazano izazivanje promenljivog opterećenja pomoću promene ugiba, odnosno veličine sile.

Uzimajući u obzir da je moment uvijanja srazmeran ugibu, željeni blok opterećenja može se ostvariti određenim oblikom bregaste ploče 2. Broj

Sl. 24 — Uređaj za izazivanje promenljivog opterećenja promenom kraka sile

promena opterećenja određenog nivoa zavisi od broja obrtaja pogonskog elektromotora 1 i brzine obrtanja bregaste ploče 2. S obzirom na veličinu bloka opterećenja potrebno je da se bregasta ploča 2 vrlo sporo obrće. To nameće primenu prenosnika 3 sa vrlo velikim prenosnim odnosom i pomoćnog elektromotora 4 sa malim brojem obrtaja.

cilindra, praktično izjednačuje ostvarenu i zadatu vrednost sile. Signal zadate vrednosti sile može, pomoću električnog napona, da vremenski bude konstantan ili promenljiv. Kao davač signala zadate vrednosti može se koristiti generator funkcije, programator sa bušenom trakom, digitalni računar ili uređaj sa magnetnom trakom.

Sl. 25 — Uređaj za izazivanje promenljivog opterećenja promenom veličine sile

Hidraulički uređaj za izazivanje promene opterećenja u zatvorenom kolu prikazan je na slici 26. Hidraulički cilindar sa servoventilima 1, koji napaja hidraulički agregat 2, izaziva određenu silu na poluzi. Veličina ostvarene sile na poluzi kontroliše se pomoću merne trake. Preko odgovarajućeg pojačavača ovaj signal se uvodi u elektronski regulator, koji upoređuje ostvarenu (merenu) i zadatu vrednost sile. Regulator, na osnovu razlike ostvarene i zadate vrednosti sile, upućuje signal na servoventil, koji propušta veću ili manju količinu ulja. Na taj način servoventil, preko hidrauličkog

Ovde je prikazana i mogućnost regulacije broja obrtaja preko tiristora ili sličnog električnog uređaja. Signali za zadate brojeve obrtaja mogu se dobiti slično kao i za zadatu silu, na primer, sa magnetne trake.

Dodatni uređaji za izazivanje promenljivog momenta uvijanja, pogotovo ako se želi promena po unapred zadatom zakonu, odnosno bloku opterećenja, složeni su, a samim tim i skuplji. Osim toga, i pogonski troškovi mogu da budu vrlo visoki (utrošak električne energije, utrošak vode za hlađenje hidrauličkog agregata, i drugo).

Primenom hidrauličkog načina opterećivanja, uz odgovarajuću dodatnu opremu, praktično je moguće ostvariti svaki željeni blok opterećenja.

ispitivanje vrlo brzih i srednje brzih prenosnika ($n \geq 3000$ o/min) sa opterećivanjem u toku rada (slike 20 do 23) ili sa ravnomernim porastom brzine do

Sl. 26 — Hidraulički uređaj za izazivanje promenljivog opterećenja u zatvorenom kolu

Konstrukcije uređaja za ispitivanje zupčastih i pužnih prenosnika koje se preporučuju

Velika raznolikost uređaja pretpostavlja mogućnost izbora optimalne konstrukcije za potrebne uslove ispitivanja.

Za ispitivanje brzohodnih prenosnika ($n > 6000$ o/min) svrsishodno je koristiti jednokućišne uređaje sa zatvorenim kolom opterećenja i malom masom obrtnih elemenata. Primena kliznih ležajeva omogućava uprošćavanje teretnice, ukoliko se oni istovremeno koriste i kao hidraulički cilindri za aksijalno pomeranje cilindričnih zupčnika sa kosim zupcima (princip korišćen na uređaju prikazanom na slici 22).

Uređaji sa dva kućišta su jednostavniji za izradu. Preporučuju se za

nominalne. Ovi prenosnici mogu biti ispitivani i na uređajima sa predopterećenjem, sa malogabaritnim lakim spojnicama, koje imaju prirubnice radi povećanja pouzdanosti sklapanja.

Za ispitivanje prenosnika sa malim brzinama ($n < 1500$ o/min) mogu biti primenjeni svi tipovi uređaja sa zatvorenim kolom opterećenja. Od uređaja sa zatvorenim kolom opterećenja sa opterećivanjem u toku rada, preporučuju se uređaji sa obrtnim kućištem (slika 15), ili uređaji sa prostim navojnim teretnicama (slike 12 i 14). Za podešavanje zahtevanog opterećenja ili promenu smera cirkulacije snage u zatvorenom kolu uređaja sa predopterećenjem, pogodne su pužne teretnice (slika 10). Međutim, njihova neuravnoteženost ograničava brzinske mogućnosti uređaja.

Opterećivanje po zadatom programu izuzetno brzih prenosnika ostvaruje se promenom pritiska ulja u hidrauličkom cilindru, a kod uređaja sa obrtnim kućištem pomoću bregastog mehanizma.

Određivanje zagrevanja zupčastih prenosnika može se ostvariti na uređajima sa zatvorenim kolom opterećenja.

Smanjenje površine, potrebne za postavljanje uređaja, postiže se vertikalnim postavljanjem vratila (sika 13).

Zaključak

Postojanje velikog broja različitih uređaja za ispitivanje zupčastih prenosnika omogućava izbor optimalne konstrukcije za zahtevane uslove ispitivanja.

Uređaji sa zatvorenim kolom opterećenja primenjuju se u ispitivanju prenosnika za koje su potrebni veliki obrtni momenti. Ovi uređaji su ekonomični samo pri dužim ispitivanjima, kao što su ispitivanja veka trajanja prenosnika. Konstrukcija uređaja sa zatvorenim kolom opterećenja je složenija od konstrukcije uređaja sa kočnicom.

U praksi su zupčasti prenosnici često remontovani sklopovi. Većina zupčanika koji se ugrađuju u menjače, reduktore, bočne prenosnike, diferencijale, planetare i slično, zahteva prethodno međusobno uparivanje. Time se povećava njihov vek trajanja, remontovani prenosnik ima ravnomerniji i sinhronizovaniji rad, manje je bučan, itd. Uparivanje se može vršiti na gotovo svim navedenim uređajima za ispitivanje, a iz ekonomskih razloga preporučuje se konstrukcija i izrada jednostavnijih uređaja.

Literatura:

- [1] Adam, J. I., Ovumjan, G. G.: Spravočnik zuboreza, »Mašinostroenije«, Moskva, 1964.
- [2] Artoboljevskij, I. I.: Teorija mehanizmov i mašin, »Nauka«, glavna redakcija fiziko-matematičkoj literaturi, Moskva, 1988.
- [3] Bazanjac, D.: Nauka o čvrstoći, »Tehnička knjiga«, Zagreb, 1973.
- [4] Veriga, S.: Mašinski elementi III, Mašinski fakultet, Beograd, 1984.
- [5] Vitas, D. J., Trbojević, M. D.: Mašinski elementi III, »Naučna knjiga«, Beograd, 1981.
- [6] Grič, V. V., Lazarev, G. E.: Laboratornije ispitivanja materijalov na trenje i iznos, »Nauka«, Moskva, 1968.
- [7] Đukić, V., Majstorović, A.: Ispitivanje mašinskih materijala, »Naučna knjiga«, Beograd, 1986.
- [8] Zablonskij, K. I.: Zubčatle peredači, »Tehnika«, Kiev, 1977.
- [9] Zuborezni instrument, »Stankoimport«, Moskva.
- [10] Ivanov, M. N.: Detalji mašin, »Visšaja škola«, Moskva, 1967.
- [11] Iosilevič, G. B.: Detalji mašin, »Mašinostroenije«, Moskva, 1988.
- [12] Judin, V. A., Petrokas, L. V.: Teorija mehanizmov i mašin, »Visšaja škola«, Moskva, 1977.
- [13] Kuklin, N. G., Kuklina, G. S.: Detalji mašin, »Visšaja škola«, Moskva, 1987.
- [14] Litvin, F. L.: Rasčet i konstruirovanije mehanizmov i detalje priborov, »Mašinostroenije« — Leningradskoje otdeljenije, Leningrad, 1975.
- [15] Mijatović, D.: Osvrt na metode ispitivanja zupčastih parova sa promenljivim opterećenjem, Zbornik radova naučno stručnog skupa o zupčanicima i kliznim ležajevima održanog u Zagrebu od 22—24. 01. 1976, Zagreb, 1976.
- [16] Oberšmit, E., Jurjević, Ž., Opalić, M.: Ispitivanje stožastih zupčanika sa zakrivljenim zupcima (eloidni zupčanici) na zaribavanje i trošenje (habanje), Zbornik radova naučno stručnog skupa, Zagreb, 1976.
- [17] Rešetov, D. N.: Detalji mašin, »Mašinostroenije«, Moskva, 1989.
- [18] Rešetov, D. N.: Mašini i stendi dlja ispitivanja detalje, »Mašinostroenije«, Moskva, 1979.
- [19] Savić, Z.: Inženjersko mašinski priručnik, elementi mašinskih konstrukcija, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1987.
- [20] Savić, Z.: Mašinski elementi, Mašinski fakultet, Beograd, 1974.
- [21] Tajc, B. A.: Proizvodstvo zubčatih koles, »Mašinostroenije«, Moskva, 1990.
- [22] Tanasijević, S.: Osnovi tribologije mašinskih elemenata, »Naučna knjiga«, Beograd, 1989.
- [23] Hrušov, M. M.: Laboratornije metodi ispitivanja na iznašivanije materialov zubčatih koles, »Mašinostroenije«, Moskva, 1966.
- [24] Winter, H.: Die wesentlichen einflusse auf die Tragfähigkeit von Zahnradgetrieben, Drezden, 21—23. November, 1983.
- [25] Standardi: GOST, DIN, ISO i JUS.