

Olja Koljesnikov, student
Dr. sc. Ante Bukša
Sveučilište u Rijeci
Pomorski fakultet u Rijeci
Studentska 2
51000 Rijeka

Pregledni članak
UDK:621.833
629.5.03
Primljeno: 7. rujna 2009.
Prihvaćeno: 4. studenoga 2009.

ZUPČANI PRIJENOSI BRODSKOG PORIVNOG SUSTAVA

U radu se daje pregled zupčanih prijenosa u brodskim reduktorima porivnog sustava, koji prenose okretni moment i reduciraju brzinu vrtnje porivnog stroja na brzinu vrtnje brodskog vijka. Zupčani prijenosi u brodskim reduktorima porivnog sustava mogu biti standardni zupčani prijenosi i zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom. Zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom dijele se na obične prijenose s višestrukim zahvatom, planetarne prijenose i kombinirane zupčane prijenose s višestrukim zahvatom. Zbog dijeljenja ili spajanja mehaničke energije kod ovih prijenosa pojavljuje se problem jednake raspodjele okretnog momenta (opterećenja) na pojedine parove zupčanika. Jednaka raspodjela okretnog momenta postiže se preko elastičnih vratila, elastičnih spojki, hidrauličnih cilindara itd.

Svi modeli zupčanih prijenosa porivnog sustava crtani su u računalnom programu Autodesk® Inventor® 2010 Professional.

Ključne riječi: *porivni sustavi, zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom, izjednačenje opterećenja, raspodjela okretnog momenta*

1. UVOD

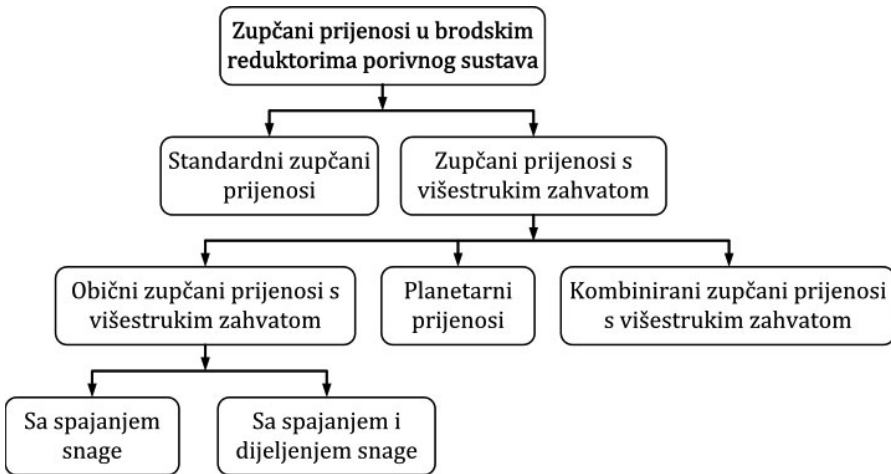
Povećanje tonaže brodova povećava i potrebnu snagu pogonskoga stroja. To ima za posljedicu smanjivanje brzine vrtnje brodskog vijka, što uvjetuje povećanje prijenosnog omjera zupčanih prijenosa reduktora porivnog sustava. Uloga zupčanih prijenosa u brodskim reduktorima porivnog sustava je da reduciraju brzinu vrtnje porivnog stroja na brzinu vrtnje brodskog vijka. Povećanjem snage porivnog stroja povećava se dimenzija zupčanika, a time veličina i težina brodskog reduktora. Iz toga su razloga zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom sa svojim prednostima, odnosno manjim dimenzijama i boljim performansama od standardnih zupčanih prijenosa, vrlo brzo našli svoju primjenu

u brodskom porivnom sustavu. Tvarka Lohman+Stolterfoht prva je počela proizvoditi brodske reduktore s običnim zupčanim prijenosima s višestrukim zahvatom [1]. U porivnom sustavu s parnom turbinom za redukciju brzine vrtnje isključivo se koristi kombinirani zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom (planetarni i obični prijenosi s višestrukim zahvatom).

Kod ovih prijenosa zbog dijeljenja ili spajanja mehaničke energije u točkama zahvata jednaku raspodjelu okretnog momenta (opterećenja) na pojedine parove zupčanika može se postići aksijalno ili radijalno-slobodnim elementima prijenosa preko elastične ili zglobne konstrukcije [2].

2. ZUPČANI PRIJENOSI BRODSKOG PORIVNOG SUSTAVA

Zupčani prijenosi u brodskim reduktorima porivnog sustava mogu se podijeliti na standardne zupčane prijenose i zupčane prijenose s višestrukim zahvatom (Slika 1). Zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom mogu biti obični prijenosi s višestrukim zahvatom, planetarni prijenosi i kombinirani zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom.



Slika 1. Podjela zupčanih prijenosa u brodskim reduktorima porivnog sustava [3]
Figure 1. Gear transmission division in marine gearboxes of propulsion system [3]

2.1. Standardni zupčani prijenosi

Standardni zupčani prijenosi brodskih reduktora porivnog sustava su najjednostavniji jednostupanjski zupčani prijenosi. Pogonski zupčanik ovih prijenosa ima manji broj zubaca, veću brzinu vrtnje, a spojen je s pogonskim strojem, dok gonjeni zupčanik ima veći broj zubaca i manju brzinu vrtnje i spojen je na osovinski vod¹. Takav je zupčani prijenos najčešće spojen elastičnom spojkom. Zupčanici koji se primjenjuju u takvim reduktorima su čelnici s ravnim ili kosim zubima. Ležajevi ovih prijenosa mogu biti klizni i kotrljajući.

2.2. Zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom

Zbog dijeljenja ili spajanja okretnog momenta s jednog na dva para zupčanika ili na više parova, kod zupčanih prijenosa s višestrukim zahvatom manje je opterećenje zupčanika, koristi se manji modul, a ima za posljedicu manji volumen i težinu prijenosa.

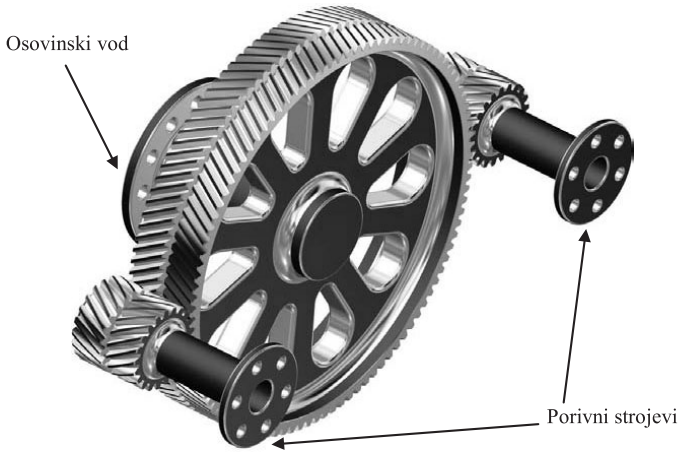
2.2.1. Obični zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom

Obični zupčani prijenosnici s višestrukim zahvatom u brodskim reduktorima prema slici 1 dijele se na obične zupčane prijenose s višestrukim zahvatom sa spajanjem snage i na obične zupčane prijenose s višestrukim zahvatom s dijeljenjem i spajanjem snage.

2.2.1.1. Obični zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom sa spajanjem snage

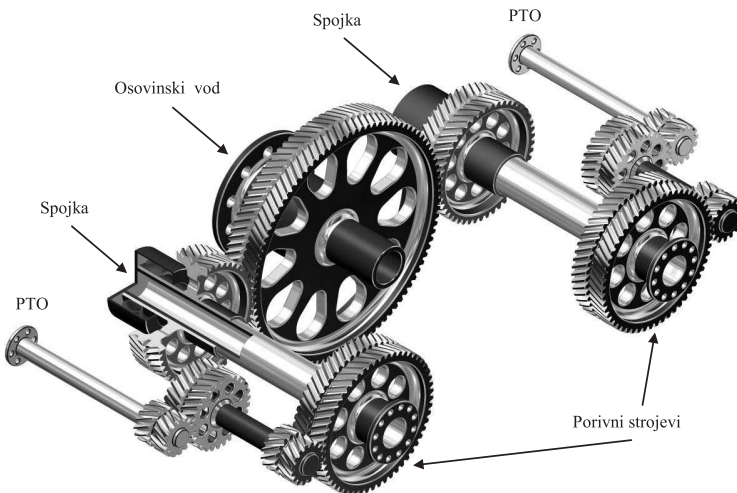
Običnim zupčanim prijenosima s višestrukim zahvatom sa spajanjem snage, moguće je spajati okretno momente s dva ili više međusobno spojena dizelska motora [4]. Spajanje dizelskog motora i reduktora postiže se elastičnim spojkama i spojkama za uključivanje i isključivanje s konusnim tarnim površinama. Zupčanici ovih prijenosa su čelnici s kosim ili strelastim zubima. Model običnog zupčanog prijenosa s višestrukim zahvatom sa spajanjem snage i strelastim ozubljenjem prikazan je na slici 2.

¹ Točan tehnički naziv bio bi vratilni vod



Slika 2. Model običnog zupčanog prijenosa s višestrukim zahvatom sa spajanjem snage
Figure 2. Model of ordinary multiple mesh gear transmission with power linking

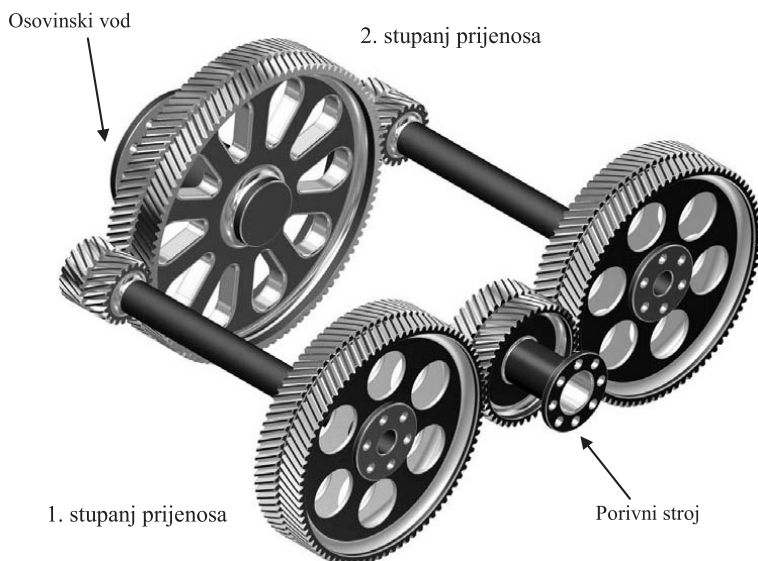
Na slici 3. prikazan je model običnog zupčanog prijenosa sa spajanjem snage koji spaja dva dizelska motora, a opisan je u [2]. Zbog grešaka u izradi i montaži ne može se računati s time da veliki zupčanik, koji je spojen s osovinskim vodom, primi istu veličinu okretnog momenta s dva dizelska motora. Izjednačenje opterećenja u ovom se slučaju postiže pomoću pogonskih elastičnih vratila i elastičnih spojki. Dio momenta pored oznake PTO (Power Take Off) odvaja se za pogon alternatora. Zupčanici u ovom prijenosu su čelnici sa strelastim ozubljenjem.



Slika 3. Model običnog zupčanog prijenosa sa spajanjem snage
Figure 3. Model of ordinary gear transmission with power linking

2.2.1.2. Obični zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom s dijeljenjem i spajanjem snage

Na slici 4. prikazan je model reduktora s običnim zupčanim prijenosom s višestrukim zahvatom s dijeljenjem i spajanjem snage. Reduktor spaja porivni stroj s vratilom brodskog vijak, a opisan je u [5]. Zupčanici ovakvog prijenosa su čelnici sa strelastim zubima dok su ležajevi klizni.



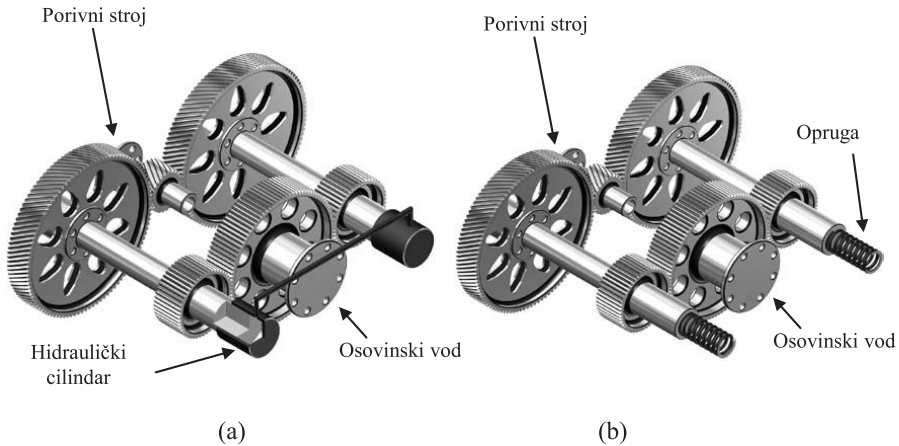
Slika 4. Model običnog zupčanog prijenosa s višestrukim zahvatom s dijeljenjem i spajanjem snage

Figure 4. Model of ordinary multiple mesh gear transmission with distribution and power linking

U prvom dijelu prijenosa okretni moment porivnog stroja dijeli se na dva zupčanika dok se u drugom dijelu prijenosa okretni moment spaja s dva na jedan zupčanic. Prijenosnik je statički neodređen jer se zbog grešaka u izradi ne može računati s time da svaki zupčani par prima polovinu okretnog momenta. Većom točnošću izrade dijelova prijenosa može se smanjiti nejednakost u raspodjeli okretnog momenta, ali se ne može računati na potpuno izjednačenje opterećenja. Međutim, pomoću dugih elastičnih vratila koja spajaju prvi i drugi dio prijenosa može se postići izjednačenje opterećenja u cijelom sustavu.

Kod običnih zupčanih prijenosa s dijeljenjem i spajanjem snage mogu se primijeniti rješenja za izjednačenje opterećenja koja su opisana u [2], a prikazana su na slici 5. Jednaka raspodjela okretnog momenta može se postići aksijalnim pomicanjem vratila pomoću sklopova za izjednačenje opterećenja. Kod ovih se zupčanih prijenosa okretni moment dijeli pomoću zupčanika s kosim

zubima, dok se zupčanicima s ravnim zubima okretni moment zbraja. Prema slici 5. (a) aksijalne sile, kod kosog ozubljenja, koje su proporcionalne okretnom momentu preuzimaju međusobno spojeni hidraulički cilindri istog promjera i izjednačavaju ih. Na slici 5. (b) prikazano je rješenje gdje djelovanje aksijalnih sila preuzimaju cilindrične zavojne torzijske opruge i neovisno jedna od druge utječu na veličinu okretnog momenta.



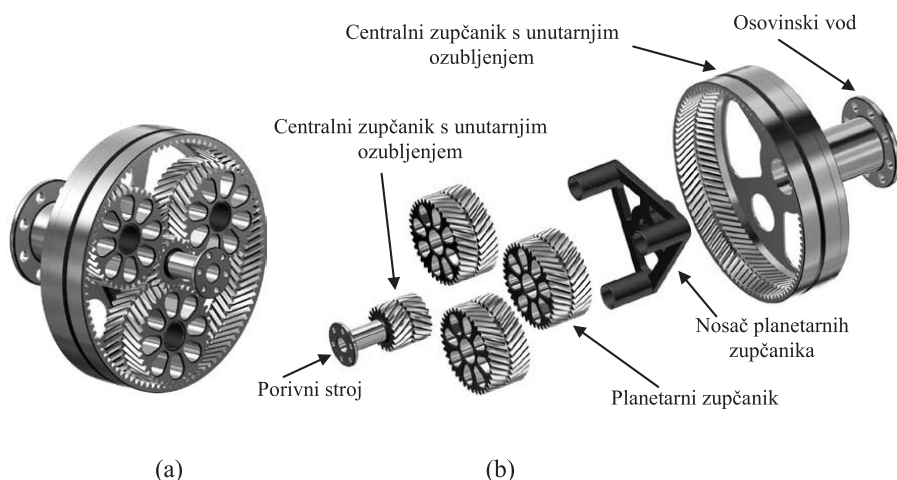
Slika 5. Rješenje za izjednačenje opterećenja kod običnih zupčanih prijenosa s dijeljenjem i spajanjem snage pomoću: (a) hidrauličkih cilindara i (b) cilindričnih zavojnih torzijskih opruga

Figure 5. Solution for load equalization by ordinary multiple mesh gear transmission with distribution and power linking: (a) hydraulic cylinder and (b) cylindrical torsion springs

2.2.2. Planetarni prijenosi

Planetarni prijenosi, koji spadaju u zupčane prijenose s višestrukim zahvatom zbog svojih prednosti nad standardnim prijenosima našli su također veliku primjenu i u brodskom pogonu (Slika 6.). Pri planetarnim prijenosima pojedini njihovi dijelovi (planetarni zupčanici) izvode dva rotacijska gibanja, rotiraju oko svoje osi na nosaču planeta i ujedno oko osi samog prijenosa. Višestruki zahvat centralnog zupčanika s planetarnim zupčanicima dovodi do smanjenja opterećenja u točkama zahvata, a ujedno i do manjeg modula, odnosno do manje veličine i težine brodskog reduktora. Masa pogonskog sustava s planetarnim reduktorom za oko tri puta je lakša od jednako standardnog porivnog sustava [6]. Jedina mana planetarnih prijenosa je njihova komplicirana i skupa izvedba.

Kod ovih prijenosa jednaka raspodjela okretnog momenta postiže se radijalno-slobodnim centralnim zupčanikom s vanjskim ili unutarnjim ozubljenjem, planetarnim zupčanicima ili nosačem planeta [7]. Kombinirani sustav (radijalno slobodna dva elementa) koristi se za rješenja s tri ili više planetarna zupčanika. Radijalno-slobodni centralni zupčanici u kombinaciji osiguravaju dobru raspodjelu okretnog momenta, stoga se najčešće primjenjuju, a posebno kod redukcije brzine vrtnje parnih i plinskih turbina. Kod takvih rješenja koristi se dvostruka zubna spojka. Ozubljenje ovakvih prijenosa može biti ravno ili koso dok se uporabom strelastog ozubljenja postiže dodatna prednost. Aksijalne komponente sila međusobno su jednake, suprotnog smjera i poništavaju se pa ne opterećuju ležajeve planetarnih zupčanika.



Slika 6. Model planetarnog prijenosa s tri planetarna zupčanika i strelastim ozubljenjem:
(a) slika prijenosa i (b) konstruktivna izvedba

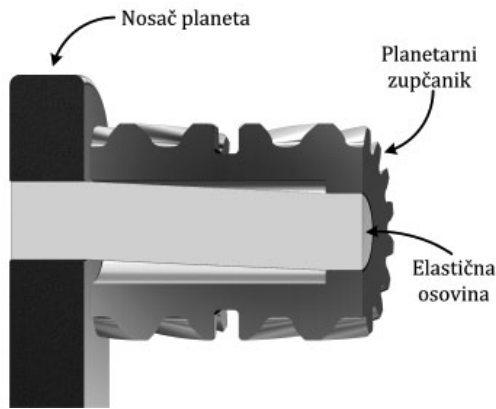
Figure 6. Model of planetary gear transmission with three planetary gears and double helical gears: (a) figure transmission and (b) construction design

Kod nekih izvedaba, zupčanik s unutarnjim ozubljenjem je podijeljen u dvije polovice, svaka sa suprotnim kosim ozubljenjem. Neovisna radijalna sloboda svake polovice izvedena je preko dvostruke zubne spojke. Slobodno oslobođen, ovaj zupčanik ima dovoljnu elastičnost kako bi osigurao automatsku raspodjelu opterećenja na planetarne zupčanike. Osim toga ima sposobnost ublažavanja udarnih opterećenja koja mogu biti uzrokovana ekscentricitetom ili greškama ozubljenja.

Konstruktivne izvedbe sklopova za jednaku raspodjelu okretnog momenta u točkama zahvata mogu biti zglobove ili elastične. Pomoću zglobove konstrukcije jednaka raspodjela okretnog momenta u točkama zahvata, radijalno slo-

bodnim planetarnim zupčanicima, postiže se preko sustava poluga, dok se pomoću elastične konstrukcije jednaka raspodjela okretnog momenta postiže pomoću elastičnih osovina [8] (Slika 7.) ili gumenih ležišta.

Izradom elastične osovine engleska firma VSEL (Vikers Shipbuilding and Engineering Limited) osigurala je kod AI planetarnog prijenosa (A označava vanjsko, a I unutarnje ozubljenje) s pet radijalno-slobodnih planetarnih zupčanika s ravnim ozubljenjem ne samo izjednačenje opterećenja među planetarnim zupčanicima, nego i ravnomjernu podjelu opterećenja po duljini boka zuba. Osim toga, elastične osovine imaju sposobnost ublažavanja udarnih opterećenja, koja nastaju zbog grešaka izrade i pogonskih uvjeta.

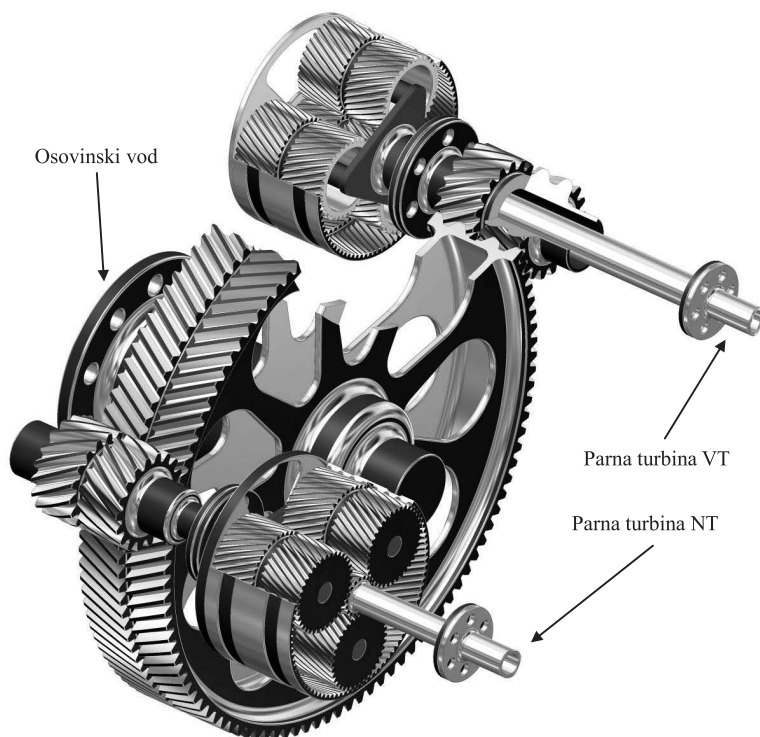


Slika 7. Prikaz opterećene elastične osovine planetarnog zupčanika
Figure 7. Survey of flexible shaft load of planetary gear

2.2.3. Kombinirani zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom

Zupčane prijenose koji se sastoje iz običnog prijenosa s višestrukim zahvatom i planetarnog prijenosa nazivamo kombiniranim prijenosom s višestrukim zahvatom. Svrha ugradnje takvih prijenosa je reduciranje iznimno visoke brzine vrtnje porivnog stroja na brzinu vrtnje brodskog vijka.

Za redukciju brzine vrtnje parne turbine engleska firma Allen Gear koristi kombinirane prijenose s višestrukim zahvatom (Slika 8.) [2][3]. Ovaj prijenos ugrađivan je u seriju kontejnerskih brodova koji za porivni pogon imaju parnu turbinu. Parna turbina sastoji se od visokotlačnog dijela (VT) s brzinom vrtnje od 6000 min^{-1} i niskotlačnog dijela s brzinom vrtnje od 3.500 min^{-1} . Brzina vrtnje brodskog vijka je 127 min^{-1} . Kod ovih prijenosa izjednačenje opterećenja na pojedine točke zahvata zupčanih parova pri dijeljenju ili spajanju okretnog momenta postiže se preko elastičnih vratila.



Slika 8. Model brodskog kombiniranog zupčanog prijenosa s višestrukim zahvatom
Figure 8. Model of marine combined multiple mesh gear transmission

3. ZAKLJUČAK

U brodskim reduktorima porivnog sustava, zupčani prijenosi uz vratila predstavljaju vezu porivnog stroja s brodskim vijkom. Njihova je zadaća reduciranje brzine vrtnje porivnog stroja na brzinu vrtnje brodskog vijka. Upotrebom zupčanih prijenosa s višestrukim zahvatom u brodskim reduktorima porivnog sustava zbog dijeljenja ili spajanja okretnog momenta s jednog na dva para ili na više parova zupčanika dobiva se prijenosnik manje težine i veličine.

Zupčani prijenosi u brodskim reduktorima porivnog sustava dijele se na standardne zupčane prijenose i zupčane prijenose s višestrukim zahvatom. Zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom mogu biti obični, planetarni i kombinirani zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom. Obični zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom dijele se na prijenose sa spajanjem snage i na zupčane prijenose s višestrukim zahvatom sa spajanjem i dijeljenjem snage.

Raspodjela okretnog momenta kod običnih zupčanih prijenosa s višestrukim zahvatom postiže se preko elastičnih punih i šupljih vratila i elastičnih spojki. Predložena su dva rješenja za raspodjelu okretnog momenta koja se mogu primijeniti kod običnih zupčanih prijenosa s višestrukim zahvatom sa spajanjem i dijeljenjem snage. Okretni moment dijeli se pomoću zupčanika s kosim zubima, dok se zupčanicima s ravnim zubima okretni moment zbraja. Aksijalne sile, koje su proporcionalne okretnom momentu, primaju cilindrične zavojne torzijske opruge ili hidraulički cilindri i izjednačavaju ih.

Kod planetarnih prijenosa jednaka raspodjela okretnog momenta na točke višestrukog zahvata postiže se radijalno-slobodnim centralnim zupčanicom s vanjskim i unutarnjim ozubljenjem ili planetarnim zupčanicima. Jednaka raspodjela okretnog momenta s centralnog zupčanika na sve točke zahvata s planetarnim zupčanicima može se postići preko elastičnih osovina.

U brodskim reduktorima porivnog sustava gdje je potrebno reducirati brzinu vrtnje visokotlačnog i niskotlačnog dijela parne turbine, koriste se kombinirani zupčani prijenosi s višestrukim zahvatom. Oni se sastoje od običnih prijenosa s višestrukim zahvatom i planetarnih prijenosa. Jednaka raspodjela okretnog momenta kod ovih prijenosa postiže se preko elastičnih vratila.

LITERATURA

- [1] Schaefer, W. F., Grosse Schiffsgetriebe under anlagentechnischen Aspekten, HANSA, 119 (1982), 18, 1197-1200.
- [2] Bukša, A., Istraživanje raspodjele opterećenja kod običnih zupčanih prijenosa s dijeljenjem ili spajanjem snage u brodskim reduktorima, Naše more, 44 (1997), 3-4, str. 135-141.
- [3] Bukša, A., P. Kralj, Zupčani prijenosi u brodskim reduktorima porivnog sustava, Naše more, 45 (1998), 1-2, str. 33-38.
- [4] Bukša, A., Dizel-motorni porivni sustavi, Zbornik radova Pomorskog fakulteta u Rijeci, 12 (1998), str. 151-157.
- [6]Gearing designs, Marine Propulsion, August, 1997, str. 13-14.
- [7] Bukša, A., Izjednačenje opterećenja kod zupčanih prijenosa s višestrukim zahvatom u brodskim reduktorima i njihova konstruktivna rješenja, Zbornik radova Pomorskog fakulteta u Rijeci, 10 (1996), str. 91-103.
- [8] Bukša, A., Istraživanje raspodjele opterećenja kod zupčanih prijenosa s višestrukim zahvatom, Rijeka, Tehnički fakultet Rijeka, 1988.
- [9] Bukša A., P. Kralj, D. Martinović, Istraživanje raspodjele opterećenja kod planetarnih prijenosa s elastičnim osovinama u brodskim reduktorima, Brodogradnja, 4(2001), 1, str. 66-71.

Summary

GEAR TRANSMISSION IN THE SHIP PROPULSION SYSTEM

The paper provides a survey of gear transmissions in marine propulsion system gearboxes which transmit a torque and reduce the rotational speed of the main propelling engine into the rotational speed of the ship's propeller. Gear transmissions in marine propulsion system gearboxes are divided into standard gear transmissions and multiple mesh gear transmissions. Multiple mesh gear transmissions in marine propulsion system gearboxes are divided into ordinary multiple mesh gear transmission, planetary and combined multiple mesh gear transmissions. Due to the merger or division of the mechanical energy in these transmissions, the problem of equal torque (load) distribution onto individual gear couples appears. An equal torque distribution is achieved by a flexible shaft, flexible couplings, hydraulic cylinder etc.

All gear transmission models are designed on the basis of the relevant literature in the computer program Autodesk® Inventor® 2010 Professional.

Key words: *propulsion system, multiple mesh gear transmission, load equalization, equal torque distribution*

Olja Koljesnikov, student
Ante Bukša, Ph. D.
University of Rijeka
Faculty of Maritime Studies Rijeka
Studentska 2
51000 Rijeka
Croatia