

# NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU MAŠINSKOG FAKULTETA U NIŠU

*Predmet: Izveštaj komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije*

Odlukom Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu broj 612-847-3/2008, od 05. 09. 2008. godine imenovani smo za članove komisije za pregled, ocenu i odbranu doktorske disertacije, kandidata mr Jelene Stefanović-Marinović, dipl. inž. mašinstva, pod nazivom

## **"Višekriterijumska optimizacija zupčastih parova planetarnih prenosnika"**

Nakon pregleda doktorske disertacije, saglasno Zakonu o Univerzitetu i Statutu Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, komisija podnosi sledeći

## **I Z V E Š T A J**

Doktorska disertacija kandidata mr Jelene Stefanović-Marinović, dipl. inž. mašinstva, obuhvata 291 stranicu formata A4 osnovnog teksta, koji je podeljen u 12 delova, uključujući spisak literaturnih navoda i priloge. Rad sadrži ukupno 302 stranice, uzimajući u obzir i 11 uvodnih stranica sa sadržajem. Literaturni navodi čine 7 stranica, sa 133 literaturna citata, a prilozi 56 stranica kroz 8 delova. U radu su prikazane 73 slike sa objašnjenjem i data su 74 tabelarna prikaza.

Uvodne stranice rada počinju Rezimeom, u kome su date osnovne naznake o budućem sadržaju rada, kao i pregled ključnih reči.

*Ključne reči:* planetarni prenosnik, višekriterijumska optimizacija, matematički model, funkcije cilja, skup promenljivih, skup ograničenja, metodi optimizacije.

Celokupna materija doktorske disertacije izložena je u 10 (deset) glava, glave su podeljene na poglavlja, a poglavlja na odeljke. Numeracija objekata (formula, slika i sl.) u okviru glave izvršena je pomoću dva broja, od kojih prvi ukazuje na glavu, a drugi na broj objekta u datoj glavi. Na ovaj način uspostavljena je jednoznačna numeracija objekata u okviru jedne glave. Naslovi glava su sledeći:

1. Uvod
2. Pregled metoda za matematičku optimizaciju
3. Planetarni prenosnici
4. Vreme izrade zupčanika
5. Utvrđivanje matematičkog modela za optimizaciju planetarnih prenosnika
6. Razvoj programa
7. Analiza rezultata teorijskih istraživanja
8. Eksperimentalna istraživanja planetarnih prenosnika
9. Verifikacija razvijenog matematičkog modela optimizacije
10. Zaključak

U **prvoj glavi**, koja ima uvodni karakter, ukazuje se najpre na karakteristike planetarnih prenosnika kao zupčastih prenosnika specijalne kinematske konstrukcije, njihove prednosti i

nedostatke u odnosu na prenosnike sa nepokretnim osama, kao i oblasti primene. U ovom delu je, sa druge strane, bilo neophodno ukazati i na osnovne pojmove optimizacije, kao i probleme koji se javljaju u zadacima optimizacije tehničkih sistema. U ovim zadacima često se javlja situacija da kvalitet rešenja nije moguće izraziti samo jednim kriterijumom, već se mora razmotriti više neusklađenih kriterijuma. Ovo nameće potrebu primene *višekriterijumske optimizacije*. Na osnovu detaljne analize literaturnih izvora iz ove oblasti, kandidat zaključuje da najveće mogućnosti u optimizaciji zupčastih prenosnika postoje pri optimizaciji zupčastih parova. Mogućnosti optimizacije ostalih elemenata prenosnika su ograničene izborom optimalnih parametara zupčastih parova. Zbog toga su zupčasti parovi planetarnih prenosnika odabrani za predmet optimizacije u ovom radu, dok je predmet istraživanja planetarni prenosnik tipa  $2K - h$ , varijanta  $A$ , s obzirom da ovaj planetarni prenosnik ima najširu primenu. Navedeni predmet istraživanja i tema ovog rada zahtevaju utvrđivanje ciljeva koje treba ostvariti i metodologije za njihovu realizaciju. Kandidat kao globalni cilj istraživanja u okviru ovog rada navodi utvrđivanje matematičkog modela koji će omogućiti izbor optimalnih parametara zupčastih parova (optimalnog prenosnika sa aspekta zupčastih parova) za zadate ulazne podatke. Postojanje velikog broja matematičkih metoda postavlja pitanje izbora one koja je najpovoljnija za rešavanje konkretnog problema. U optimizaciji zupčastih prenosnika se javljaju različiti tipovi promenljivih, što upućuje na primenu metoda za rešavanje problema sa mešovitim promenljivim. Prema predviđenim radnim uslovima se određuje na početku i preferencija pojedinih kriterijuma. Eksperimentalno ispitivanje planetarnog prenosnika i poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata dobijenih primenom razvijenog računarskog programa je sledeći cilj. Ovim se omogućava verifikacija proračuna jedne kriterijumske funkcije. Kvalitet dobijenih rešenja ovim programom je bilo neophodno potvrditi upoređenjem konceptijskog rešenja odabranog izvedenog prenosnika sa programski dobijenim rešenjem, što je takođe cilj rada.

U **drugoj glavi** daje se pregled osnovnih pojmova optimizacije. U okviru toga najpre se definišu *promenljive optimizacije* kao kvantitativne veličine za koje treba izabrati vrednosti u procesu optimizacije. Svaka kombinacija promenljivih optimizacije naziva se *rešenjem* ili *konstrukcijom*. Za izbor optimalnog iz skupa dopustivih rešenja mora postojati kriterijum pomoću kog se vrši njihovo upoređenje. Ovaj kriterijum se izražava funkcijom odabranih promenljivih koja se zove *objektivna, kriterijumska* ili *funkcija cilja*. Funkcija cilja je funkcija kojom se matematički definiše kriterijum, odnosno cilj, optimizacije. U matematičkom smislu funkcija cilja se izražava nekom funkcijom  $f(x)$ . Zadatak optimizacije je da se odredi njena ekstremna vrednost, odnosno vektor promenljivih optimizacije za koji funkcija cilja dostiže ekstremnu vrednost. Takođe, u ovom delu se definišu i *ograničenja*. Skup ograničenja je definisan sistemom od  $m$  jednačina i/ili nejednačina u kojima figurišu promenljive optimizacije. Definisanjem promenljivih optimizacije, funkcije cilja i ograničenja postavljen je *matematički model* optimizacionog zadatka, što je omogućilo postavljanje opšte definicije optimizacionog zadatka.

U ovoj glavi su dati i principi optimizacije zupčastih prenosnika. Konstatuje se da je optimizacija prenosnika kao celine složena, pa je pogodno ovako složen zadatak razdvojiti na više manjih, međusobno nezavisnih, zadataka. Optimizacioni zadatak se može postaviti tako da se minimiziraju negativni ili maksimiziraju pozitivni efekti. U optimizaciji zupčastih prenosnika nailazi se na sledeće funkcije cilja: zapremina zupčastih parova, masa zupčastih parova, stepeni sigurnosti bokova i podnožja, osno rastojanje, stepen iskorišćenja, prečnik kućišta, proizvodni troškovi, pouzdanost, odstupanje prenosnog odnosa itd. Bez obzira na izabrani kriterijum optimizacije dobija se složeni matematički model i to iz sledećih razloga: funkcije cilja su složenog, nelinearnog oblika, ograničenja su složenog oblika, često nediferencijabilna, prekidna ili data u obliku nejednakosti, postoji veliki broj uticajnih promenljivih ili ograničenja različitih oblika.

U ovoj glavi se daje i pregled metoda matematičke optimizacije za jednokriterijumsku i višekriterijumsku optimizaciju. Takođe se ukazuje na kriterijume za podelu ovih metoda: oblik funkcija problema, postojanje ograničenja, način rešavanja, tip promenljivih optimizacije, broj kriterijuma, broj promenljivih. Posebno se ukazuje na nelinearno programiranje, s obzirom da problemi optimizacije tehničkih sistema zahtevaju ove metode. Nelinearno programiranje

predstavlja širi skup metoda operacionih istraživanja za rešavanje optimizacionih zadataka čiji matematički model sadrži bar jednu, a obično više, nelinearnih veza. Daju se i osnovni pojmovi iz matematike u vezi sa ovim metodama: stacionarne tačke, konveksnost funkcije, uslovi optimalnosti. Ukazuje se i na metode nelinearnog programiranja, kao i klasifikaciju ovih metoda.

Optimizacioni zadaci sa mešovitim promenljivim predstavljaju posebno poglavlje ove glave. Izboru metode optimizacije se posvećuje značajna pažnja, jer postojanje velikog broja različitih metoda optimizacije postavlja pred konstruktora pitanje izbora najprikladnije za rešavanje konkretnog problema. Može se reći da je u optimizaciji mašinskih sistema mali broj zadataka na koje se direktno mogu primeniti razvijene metode i softver. Sa druge strane razvijati novu metodu za svaki konkretan problem je nemoguće i neracionalno. Konstatuje se da se za najveći broj optimizacionih zadataka koriste postojeće metode uz manje ili veće promene i prilagođavanja konkretnom zadatku. Na izbor metode optimizacije utiče veliki broj faktora, a u radu su nabrojani najvažniji. U softveru koji se razvija za optimizaciju sistema obično se uključuje više različitih metoda optimizacije, pri čemu se prepušta korisniku da izabere metodu koja odgovara problemu koji se rešava. Automatski izbor metode optimizacije, iako izgleda vrlo atraktivno, praktično je onemogućen zbog problema da se formalizuju karakteristike matematičkog modela koje utiču na izbor metode.

Poseban deo u okviru ove glave pripada višekriterijumskoj optimizaciji. Ukazuje se na postavku višekriterijumskog zadatka, osnovne pojmove višekriterijumske optimizacije (kriterijumski skup, marginalna rešenja, idealno rešenje, savršeno rešenje, Pareto optimum, slabi Pareto optimum, MIN - MAX optimum), metode rešavanja zadataka višekriterijumske optimizacije i njihovu podelu. Ove metode se dele u dve velike grupe: metode zasnovane na skalarizaciji funkcije cilja (metoda težinskih koeficijenata, metoda ograničenja u prostoru kriterijumskih funkcija, metoda globalnog kriterijuma, metode hijerarhijske optimizacije, metode ciljnog programiranja) i metode zasnovane na MIN-MAX principu.

Ova glava se završava pregledom stanja istraživanja u cilju identifikacije područja istraživanja. Ne upuštajući se u detaljnu analizu u nastavku se daje pregled primera optimizacije na zupčastim prenosnicima kao vrlo važnim sklopovima skoro svih mašina, sa ciljem potvrde područja istraživanja ovog rada (predmet istraživanja, cilj i tema rada, prva glava).

**Treća glava** se odnosi na planetarne prenosnike. U ovoj glavi se najpre daju karakteristike i primena planetarnih prenosnika opšte namene, zatim označavanje i klasifikacija, uslovi montaže (uslov saosnosti, uslov susednosti, uslov sprezanja) i izbor broja satelita. Poseban problem ovih prenosnika je raspodela opterećenja između satelita, pa ovo pitanje čini poseban deo ove glave.

S obzirom da je u postupak formiranja matematičkog modela uključena i ekonomska kategorija kroz vreme izrade zupčastih parova planetarnih prenosnika, pre uspostavljanja modela neophodno je bilo ukazati na postupak određivanja vremena izrade zupčanika. Ovo je predmet **četvrtе glave**. Najpre se daju ekonomska razmatranja u vezi sa kvalitetom, zatim ekonomski zahtevi pri optimizaciji prenosnika snage. Na osnovu pregleda literature kandidat zaključuje da se ekonomski zahtevi odnose na *proizvodne i pogonske troškove*; proizvodni obuhvataju *troškove za materijal* i *troškove izrade*. S obzirom da su predmet ovog rada samo zupčanici kao delovi prenosnika, ovi troškovi se sastoje od: troškova materijala za zupčanike i troškova izrade zupčanika. Uzimajući u obzir da je u polaznim podacima potrebno zadati materijal, uključivanje osnovne cene materijala i faktora cene u kriterijumsku funkciju nema smisla, jer je materijal konstanta u ovako formulisanom procesu optimizacije, tako da se kao kriterijum za optimizaciju uzima vreme izrade zupčanika. Funkcija za optimizaciju je formulisana kao zbir vremena izrade centralnog sunčanog zupčanika, satelita i ozubljenog venca. U ovom delu se daju matematičke formulacije ovih vremena.

U **petoj glavi** se utvrđuje matematički model za optimizaciju planetarnih prenosnika. U prvom poglavlju se ukazuje na principe utvrđivanja matematičkog modela zupčastih prenosnika, da bi se u sledećem poglavlju utvrdio matematički model za konkretan tip planetarnog prenosnika.

U postupku utvrđivanja matematičkog modela najpre se vrši izbor promenljivih. Za promenljive u ovom radu su usvojeni: broj zubaca centralnog sunčanog zupčanika  $z_1$ , broj

zubaca planetarnih zupčanika (satelita)  $z_2$ , broj zubaca ozubljenog venca  $z_3$ , broj planetarnih zupčanika (satelita)  $n_w$ , modul zupčanika  $m_n$  i širina zupčanika  $b$ . Prema tome, posmatraju se sklopovi planetarnih prenosnika određeni veličinama:  $z_1, z_2, z_3, n_w, m_n, b$ . Pobrojani konstrukcijski parametri za optimizaciju zupčastih parova planetarnih prenosnika nisu nezavisno promenljive veličine, već izbor jedne povlači i promene u drugoj. Povezanost konstrukcijskih parametara ukazuje na opravdanost optimizacije u odnosu na ove parametre. Promenljive optimizacije su mešovitog tipa: brojevi zubaca zupčanika ( $z_1, z_2, z_3$ ) su celi brojevi, pozitivni i negativni, brojevi planetarnih zupčanika ( $n_w$ ) su diskretne vrednosti, moduli ( $m_n$ ) diskretne standardne vrednosti, dok su širine zupčanika ( $b$ ) kontinualne promenljive.

Sledeće poglavlje se odnosi na izbor kriterijuma za optimizaciju. U ovom radu izabrani su sledeći kriterijumi: masa, zapremina, stepen iskorišćenja i troškovi izrade, odnosno: minimalna masa, minimalna zapremina, maksimalni stepen iskorišćenja i minimalni troškovi izrade. Zupčasti prenosnici podležu velikom broju ograničenja u pogledu geometrije, čvrstoće, eksplicitnih ograničenja za pojedine promenljive i karakterističnih uslova za pojedine prenosnike. Ovde predviđena ograničenja obuhvataju: uslove montaže, geometrijske uslove i uslove čvrstoće. Uslovi montaže se odnose na: koaksijalnost ulaznog i izlaznog vratila prenosnika, zazor između satelita i istovremeno sprezanje satelita sa centralnim zupčanicima (uslov saosnosti - koaksijalnosti, uslov susednosti i uslov sprezanja). U okviru geometrijskih uslova predviđena je provera geometrijskih uslova sprezanja spoljašnjeg i unutrašnjeg zupčastog para, dok se u okviru uslova čvrstoće proveravaju stepeni sigurnosti bokova i podnožja svih zupčanika. Provera geometrije i nosivosti vrši se prema aktuelnim ISO standardima.

Na osnovu utvrđenog matematičkog modela razvijen je računarski program koji je opisan u **šestoj glavi**. Ovaj program omogućava izbor optimalnih parametara zupčastih parova, odnosno optimalnog prenosnika sa aspekta zupčastih parova, za zadate ulazne podatke koji obuhvataju: prenosni odnos, ulazni obrtni moment, ulazni broj obrtaja, dozvoljeno odstupanje prenosnih odnosa, materijale za izradu zupčanika, kvalitet izrade, opseg promene  $z_1$ , faktor radnih uslova i minimalne stepene sigurnosti bokova i podnožja.

U prvom poglavlju se detaljno daje postupak optimizacije. Postupak predviđa najpre izbor brojeva zubaca svih zupčanika, kao i broja satelita. U sledećem koraku se uvodi modul, kao sledeća promenljiva, a zatim i aktivna širina dodira. Na ovaj način su za zadate ulazne podatke dobijeni sklopovi planetarnih prenosnika određeni pomoću šest veličina:  $z_1, z_2, z_3, n_w, m_n, b$ . Uvođenjem ovih promenljivih proces je divergirao tako da je u ovom trenutku postignut maksimalan broj kombinacija  $z_1, z_2, z_3, n_w, m_n, b$ . Prolazeći kroz naredne faze proces traženja optimalnog rešenja konvergira uvođenjem uslova geometrije i čvrstoće.

U narednom poglavlju se daje detaljan proračun geometrijskih veličina zupčastih parova. Navode se izrazi za određivanje osnovog rastojanja, uvođenje pomeranja profila, izračunavanje geometrijskih veličina svih zupčanika i proveru uslova sprezanja u toku rada. U daljem toku se vrši proračun nosivosti zupčastih parova. Predviđa se proračun stepena sigurnosti protiv razaranja usled pitinga bokova zubaca zupčanika spoljašnjeg i unutrašnjeg zupčastog para izražen stepenima sigurnosti  $S_{H1}, S_{H2}, S_{H23}$  i  $S_{H3}$  i protiv zamornog loma podnožja zubaca zupčanika spoljašnjeg i unutrašnjeg zupčastog para izražen stepenima sigurnosti  $S_{F1}, S_{F2}, S_{F23}$  i  $S_{F3}$ . Proračun nosivosti bazira na istraživanjima koja su data u dokumentima ISO 6336-1, ISO 6336-2, ISO 6336-3, kao i u standardu DIN 3990.

Na ovaj način je dobijen skup prenosnika određen navedenim konstrukcijskim parametrima koji predstavljaju promenljive optimizacije. Ovi prenosnici zadovoljavaju sva navedena ograničenja, i svaki od njih bi mogao da odgovori zahtevima ulaznih podataka. Iz ove grupe prenosnika potrebno je u narednom delu izdvojiti rešenje koje je prema potrebnim funkcijama kriterijuma optimalno. U ovom trenutku je potrebno odabrati metodu optimizacije od ponuđenih metoda.

Izbor metoda optimizacije je posebno poglavlje ove glave. S obzirom da je u drugoj glavi ukazano na metode koje se mogu koristiti za rešavanje zadataka višekriterijumske optimizacije,

njihovu podelu i osnovne karakteristike pojedinih metoda, u ovom delu se ukazuje na metode koje su primenjene za konkretan problem, imajući u vidu specifičnosti i kompleksnost zadatka. Aktiviranjem programa se dobija mnoštvo varijanti koje zadovoljavaju postavljene uslove i ograničenja. Iza toga je moguće odrediti skup Pareto optimalnih rešenja i skup rešenja agregatne dominacije (generalizacija Pareto optimuma određena metodom ELECTRE). Između skupa Pareto optimuma i ELECTRE optimuma nema relacije, mogu neka rešenja biti i u jednom i u drugom skupu, ali algoritmi ne obavezuju na to. Izbor optimalnog prenosnika iz skupa Pareto je moguć primenom četiri metode: metoda težinskih koeficijenata, metoda  $\varepsilon$  ograničenja, leksikografska metoda i metoda Euklidovog rastojanja. Aktiviranjem ovih metoda potrebno je uneti potrebne podatke za pojedine metode: težinski koeficijenti kod metode težinskih koeficijenata, prioritetnu funkciju i ekstremne vrednosti za ostale funkcije u slučaju primene metode  $\varepsilon$  ograničenja, koordinate idealne tačke kod metode Euklidovog rastojanja, prioritet funkcija i tolerancije funkcija kod leksikografske metode, težinske koeficijente za metodu ELECTRE.

Funkcije cilja se odnose na zapreminu, masu, stepen iskorišćenja i troškove izrade. Masa, zapremina i troškovi treba da se minimizuju, dok stepen iskorišćenja treba da se maksimizuje. S obzirom da je za matematički model potrebno da sve komponente vektora funkcije cilja imaju istu ekstremizaciju, usvojeno je da se vektor funkcije cilja maksimizira, tako da komponente vektora cilja koje treba da budu minimizirane dobijaju negativan predznak. Funkcije cilja su:  $f_1(x) = -V(x)$ ,  $f_2(x) = -m(x)$ ,  $f_3(x) = \eta_p(x)$ ,  $f_4(x) = -T(x)$ .

Kriterijumski skup je određen kao skup "šestorki" konstrukcijskih parametara koje zadovoljavaju ograničenja. Radi se, dakle, o skupu konačno mnogo elemenata i komponentama vektora funkcije cilja koje su nelinearne i zavise od većeg broja parametara.

Ovaj problem višekriterijumske optimizacije je, prema tome, diskretan višekriterijumski problem. Priroda ovako određenog problema višekriterijumske optimizacije je odredila primenu metoda za rešavanje.

U posebnom odeljku ovog poglavlja se daje prikaz rezultata. Prikaz rezultata je moguć na dva načina. U prvom načinu se nakon unošenja polaznih podataka, pritiskom na dugme "start" odmah dobija *lista kombinacija* promenljivih koje zadovoljavaju sva ograničenja. Drugi način prikaza je označen kao *pregled*. Ovim načinom prikaza je moguće pratiti ceo postupak po fazama. Naime, postupak proračuna do optimizacije je podeljen na proračunske faze, programske module koji predstavljaju delove postupka (39 faza). Ispis rezultata je moguće pratiti posle svake faze. Rezultati se daju u vidu tabela koje se u svakoj sledećoj fazi proširuju kolonama sa podacima koji su određeni u toj fazi. Ovako je moguće pratiti koliko ima kombinacija posle koje faze, u kojoj fazi dolazi do odbacivanja koje kombinacije, posle koje faze otpada najveći broj kombinacija itd. Takođe, program pruža mogućnost proračuna konkretnog planetarnog prenosnika prema izloženom postupku za proračun geometrijskih veličina i nosivosti. Ovu opciju treba aktivirati na početku rada sa programom i, osim pobrojanih podataka pri definisanju ulaznih podataka, definisati i podatke koji se određuju programski ( $z_1, z_2, z_3, n_w, m_n, b, x_1, x_2, x_3$ ).

Program je urađen u Borlandovom paketu za razvoj Windows aplikacija Delphi, verzija 7.0. Opis programa sa podacima o unosu podataka, principu rada i štampanju, delovima programa i njihovoj povezanosti je dat u sledećem poglavlju, dok je algoritam za izradu programa prikazan u poslednjem poglavlju ove glave.

U **sedmoj glavi** se vrši analiza rezultata primenom razvijenog računarskog programa. U ovom delu se najpre utvrđuje kako pojedini ulazni podaci utiču na broj kombinacija promenljivih. Najveći broj kombinacija se javlja približno na sredini raspona prenosnog odnosa u svim varijantama i odatle je usvojena kombinacija promenljivih za primere primene metoda optimizacije. Rezultati dobijeni ovim metodama za višekriterijumsku optimizaciju su usaglašeni. Metode, iako polaze od različitih pretpostavki i imaju različite matematičke osnove, dovode do vrlo usklađenih rezultata što im daje i fizički smisao. Naročito je uočljiva usaglašenost između metode težinskih koeficijenata i leksikografske metode. U slučaju postojanja prioriteta funkcija, pogodno je dati prednost metodi težinskih koeficijenata zbog jasnog fizičkog smisla i iskustva u

primeni optimizacije tehničkih sistema. Metoda  $\varepsilon$  ograničenja može biti značajna ako su poznata i bitna ograničenja. Naročito je primenjiva u situacijama kada je presudna jedna funkcija, dok ostale ne smeju preći neke dozvoljene granice. Metoda Euklidovog rastojanja je metoda koja ne uzima u obzir preferenciju pojedinih kriterijuma. Pogodna je u slučaju kada postoji neko rešenje kome se teži, i ovom metodom se nalazi rešenje koje je najbliže tom traženom rešenju, uzimajući u obzir sve funkcije istovremeno. Ovde je za početnu tačku uzeto idealno rešenje. Metoda ELECTRE, za razliku od Pareto pristupa koji sve funkcije tretira ravnopravno, podrazumeva neravnopravnost funkcija (uvodi se preko težinskih koeficijenata).

Rezultati računarskog programa su prikazani u obliku dijagrama - kriterijumskih prostora, na osnovu kojih se mogu otkriti sve uzročno-posledične veze između pojedinih funkcija cilja. Posmatrajući ove zavisnosti zaključuje se da postoji jaka, skoro linearna korelacija između funkcija  $f_1$  i  $f_2$ , značajna između ove dve funkcije sa jedne i funkcije  $f_4$  sa druge strane, pri čemu dijagrami  $f_1 - f_4$  i  $f_2 - f_4$  imaju isti oblik, dok zavisnost funkcija  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_4$  sa jedne strane i funkcije  $f_3$  sa druge strane daje snopove linija paralelnih osi na kojoj je funkcija  $f_3$ . Ovo je u skladu sa prirodom utvrđenih kriterijuma.

U **osmoj glavi** daje se opis merenja i ispitivanja radnih karakteristika prenosnika. Osnovni cilj eksperimentalnih istraživanja sastoji se u parcijalnoj verifikaciji matematičkog modela proverom jedne od postavljenih funkcija cilja - stepena iskorišćenja. Stepenu iskorišćenja se eksperimentalno određuje posredno merenjem veličina na ulazu i izlazu iz prenosnika. Na ulazu se meri snaga uzeta iz mreže, na osnovu koje se preko karakteristika motora određuje snaga na ulazu u prenosnik, a na izlazu obrtni moment i broj obrtaja. Ispitivanje se vrši pri stupnjevitom opterećenju do vrednosti nominalnog momenta. Osim toga, u sklopu eksperimentalnog ispitivanja izvršena je kontrola toplotnog opterećenja prenosnika i merenje nivoa šuma i vibracija. Metodologija ispitivanja je koncipirana prema prethodnoj analizi prenosnika, raspoloživoj instalaciji za ispitivanje i mernoj opremi, kao i potrebnim rezultatima. Najznačajniji od ovih faktora je, svakako, merna oprema i raspoloživa instalacija. Ispitivan je jedan dvostepeni prenosnik i jedna njegova jedinica kao jednostepeni. Eksperimentom su, takođe, potvrđene vrednosti nominalnih prenosnih odnosa i stepena iskorišćenja, nominalnog obrtnog momenta i nominalne snage prenosnika.

Vrednosti za stepene iskorišćenja ovih prenosnika su određene primenom opisanog računarskog programa. Postojanje razlika između teorijskih i eksperimentalnih rezultata je očekivano. Razlog ovome su uvedene aproksimacije pri izvođenju analitičkog izraza sa jedne strane, i zanemarivanje gubitaka snage u ležajima i gubitaka usled otpora ulja u prenosniku sa druge strane. Imajući u vidu odnos snage gubitaka u ozubljenju prema ukupnim gubicima, kao i navedene aproksimacije, zaključuje se da je postignuta visoka usaglašenost između računskog i eksperimentalnog rezultata.

Za potvrdu kvaliteta dobijenih rešenja ovim programom bilo je potrebno uporediti programski dobijeno rešenje sa odabranim izvedenim prenosnikom. Ovo je predmet **devete glave**. Optimizacija je izvršena prema polaznim podacima u skladu sa podacima dobijenim od strane proizvođača, u cilju upoređivanja rezultata dobijenih programom za optimizaciju sa izvedenim prenosnikom. Za upoređenje je odabran prenosnik proizvođača MIN-FITIP-Niš. Ovo je dvostepeni planetarni prenosnik, oba stepena su planetarni prenosnici tipa  $2k - h$ , varijante A. Analiza je izvršena za svaki stepen posebno, kao i za prenosnik kao celinu. Upoređivanjem rezultata zaključuje se da se programom za optimizaciju dobijaju koncepcije prenosnika koje su u odnosu na izvedenu konstrukciju kompaktnije, tj. rešenja koja istu snagu mogu preneti manjim gabaritima (rešenja sa manjim osnim rastojanjem i manjom dodirnom širinom), čime se obezbeđuju povoljnije vrednosti kriterijumskih funkcija. Značajni efekti su postignuti u pogledu smanjenja prve, druge i četvrte funkcije.

U **desetoj glavi** kandidat daje rezime sprovedenih istraživanja koja integrišu projektovanje prenosnika, specifičnosti planetarnih prenosnika i metoda optimizacije. Najvažniji deo ove glave je prikaz naučnog doprinosa i pravaca daljih istraživanja.

Naučni doprinos ovog rada je u sledećem:

- izvršena je identifikacija relevantnih funkcija cilja koje definišu karakteristike planetarnih prenosnika sa tehno-ekonomskog aspekta;
- razvijen je i primenjen originalni matematički pristup za optimizaciju zupčastih parova planetarnih prenosnika;
- implementirane su različite metode matematičke optimizacije koje omogućavaju optimizaciju sa različitim preferencijama pojedinih kriterijuma;
- izvršena je eksperimentalna verifikacija istraživanja i primene odabranih metoda za optimizaciju upoređivanjem realnog konstrukcijskog rešenja i rešenja dobijenog primenom razvijenog matematičkog pristupa;
- aplikativni značaj ovog pristupa je u mogućnosti izbora optimalne konstrukcije sklopa planetarnog prenosnika za zadate ulazne podatke, prema odabranim kriterijumima, čime se postižu značajni efekti u pogledu kompaktnosti konstrukcije, mase i troškova proizvodnje.

Na kraju kandidat daje pravce daljih istraživanja u ovoj oblasti.

Rad ima osam **priloga**. U *prilogu I* su dati programski podaci o prenosniku koji je odabran za primere primene metoda optimizacije u sedmoj glavi. *Prilozi II, III i IV* se odnose na eksperimentalna istraživanja planetarnih prenosnika. U *prilogu II* su dati rezultati ispitivanja motora u ispitnoj stanici MEM u ATB SEVER Subotica. *Prilozi III i IV* daju rezultate ispitivanja jednostepenog i dvostepenog prenosnika date kroz ispitne protokole za prenosnike i motor-prenosnike. U *prilogu V* su prikazani podaci o materijalima koji se koriste za izradu ozubljenog venca, potrebni za izračunavanje vrednosti funkcije troškova. U *prilogu VI* je dat crtež izvedenog planetarnog prenosnika koji se koristi za poređenje sa programski dobijenim rešenjem. U *prilogu VII* je pregled Pareto optimalnih rešenja prvog i drugog stepena prenosa, a u *prilogu VIII* podaci o prenosniku programski dobijenog rešenja i rešenja izvedene konstrukcije u sklopu poređenja rezultata.

## ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu izložene analize doktorske disertacije pod nazivom

### "Višekriterijumska optimizacija zupčastih parova planetarnih prenosnika"

Komisija smatra da:

1. podneti rad u potpunosti odgovara temi prihvaćenoj od strane Nastavno-naučnog veća veća Mašinskog fakulteta u Nišu;
2. kandidat vlada potrebnim znanjima za istraživanja u oblasti projektovanja planetarnih prenosnika, metoda optimizacije i mogućnosti implementacije tih metoda kod ovih prenosnika;
3. kandidat je ispoljila sposobnost da izvrši sintezu naučnih znanja iz raznih oblasti u cilju realizacije postavljenog zadatka;
4. kandidat je ispoljila potpunu samostalnost i inventivnost u naučno-istraživačkom radu;
5. kandidat je došla do značajnih naučnih rezultata koji predstavljaju doprinos rešavanju problema izbora optimalne konstrukcije sklopa planetarnog prenosnika;
6. kandidat je došla do konkretnih praktičnih znanja, čijom implementacijom je moguće uticati na razumevanje značaja optimizacije planetarnih prenosnika, kao i suštine ovog procesa;
7. rad je tehnički korektno i kvalitetno urađen, adekvatno koncipiran i omogućava dobro praćenje dostignutih rezultata istraživanja.

Na osnovu napred izloženog Komisija je konstatovala da rad kandidata mr Jelene Stefanović-Marinović, diplomiranog inženjera mašinstva, predstavlja u potpunosti originalan rad, kako u pogledu identifikacije relevantnih funkcija cilja koje definišu karakteristike planetarnih prenosnika sa tehno-ekonomskog aspekta, razvijanja originalnog matematičkog pristupa za optimizaciju sklopa planetarnih prenosnika verifikovanog uporednom analizom sa prenosnikom izvedene konstrukcije, tako i u pogledu iznetih zaključaka o mogućnostima daljih istraživanja u ovoj oblasti.

Komisija sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Mašinskog fakulteta u Nišu da se rad kandidata mr Jelene Stefanović-Marinović, dipl. inž. maš., pod nazivom

## **"VIŠEKRITERIJUMSKA OPTIMIZACIJA ZUPČASTIH PAROVA PLANETARNIH PRENOSNIKA"**

prihvati kao doktorska disertacija i kandidat pozove na usmenu javnu odbranu.

U Nišu i Kragujevcu,  
septembra 2008. god.

1. \_\_\_\_\_  
dr Aleksandar Vulić, red. prof.  
Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu  
Uža naučna oblast: Mašinske konstrukcije

2. \_\_\_\_\_  
dr Slobodan Tanasijević, red. prof.  
Mašinski fakultet Univerziteta u Kragujevcu  
Uža naučna oblast: Mašinske konstrukcije i  
mehanizacija

3. \_\_\_\_\_  
dr Vojislav Miltenović, red. prof.  
Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu  
Uža naučna oblast: Mašinske konstrukcije

4. \_\_\_\_\_  
dr Ljiljana Petković, red. prof.  
Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu  
Uža naučna oblast: Matematika i informatika