МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ
Примљено: 27.01.2011
| Орг.јед. | Број | Прилог | Вредност |
|---|---|---|---|
| 1 | 612-101/2011 | | |

**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 612-567-6/2010 od 17.12.2010.godine imenovani smo za članove komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije, kandidata mr Slobodana Miladinovića dipl.inž.mašinstva, pod nazivom

**ISTRAŽIVANJE DOMINANTNIH UTICAJNIH PARAMETARA I RAZVOJ SISTEMA ZA KONSTRUISANJE PRENOSNIKA RADNOG TOČKA ROTORNOG BAGERA**

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

# I Z V E Š T A J

Doktorska disetracija kandidata mr Slobodana Miladinovića dipl.inž.mašinstva obuhvata 261 stranice formata A4 osnovnog teksta, koji je podeljen u 7 poglavlja i 4 dodatka. Rad sadrži ukupno 269 stranica, od čega su 8 uvodnih stranica sa sadržajem, dok literaturni navodi čine 7 stranica, sa 121 bibliografskom jedunicom. U radu je dato 117 slika sa objašnjenjima i 31 tabelarni prikaz.
Uvodne stranice rada počinju Rezimeom, u kome su date osnovne naznake o sadržaju rada, kao i pregled ključnih reči.
Ključne reči: Rotorni bager, Zupčasti prenosnici snage, Obrtni moment, Spektar opterećenja.
Celokupna materija doktorske disertacije izložena je u 7 poglavlja i 4 dodatka, koji nose sledeće naslove:

1. Uvod
2. Pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti rotornih bagera
3. Studija i analiza postojećih konstrukcionih rešenja i identifikacija dominantnih uticajnih parametara neophodnih za proračun strukturnih elemenat prenosnika
4. Prikaz metoda koje će se koristiti u istraživanjima
5. Određivanje spektra opterećenja rotornog bagera kao osnove za konstruisanje prenosnika za pogon radnog točka
6. Proračun vratila i zupčanika za slučaj poznatog spektra opterećenja
7. Zaključak

U poglavlju br.1. **„Uvod“,** kandidat ističe značaj dugoročnog planiranja i razvoja energetike u našoj zemolji, koja se zasniva na stalnom povećanju obima u istraživanju i eksploataciji energetskih resursa. Zato aktivnosti na supstituciji uvoznih vrsta energije, njenoj racionalnoj potrošnji i uvođenju novih oblika, imaju veliki značaj. Dalji razvoj i proizvodnja električne i toplotne energije, baziran je na činjenici da naša zemlja još uvek raspolaže velikim količinama niskokvalitetnog uglja – lignita, koji se eksploataiše na površinskim kopima Kostolac i Kolubara. Eksploatacija uglja na površinskim kopovima se vrši korišćenjem savremene rudarske mehanizacije po sistemu **B**ager-**T**ransporter-**O**dlagač (BTO sistem).

Korišćenjem ovog sistema postiže se kontinualnost u radu, veliki kapaciteti, kao i mogućnost rada sistema u svim vremenskim uslovima. Kako energetski sistem Srbije zavisi od proizvodnje električne energije u termoelektranama, to se posebno mora voditi računa o pouzdanosti BTO sistema koji rade na otkopu kako uglja, tako i otkrivke jalovine. Kao ključnu mašina u tehnološkom procesu otkopavanja otkrivke i uglja, kandidat ističe rotorni bager, koji je samohodna mašina kontinualnog dejstva koja vrši otkopavanje uglja i jalovine kašikama pričvršćenim po obodu radnog točka.

U poglavlju br. 2. **„Pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti rotornih bagera“ ,** kandidat daje pregled istraživanja iz obalasti rotornih bagera i prenosnika za pogon radnog točka. Detaljno je dat prikaz konstrukcija rotornih bagera na domaćim ugljenokopima sa njihovim osnovnim karakteristikama. Kandidat, na kraju ovog poglavlja ističe jedan od glavnih ciljeva istraživanja u okviru ove disertacije definisanje optimalne konstrukcije prenosnika snage radnog točka rotornog bagera, koji treba da zadovolji niz različitih zahteva. Da bi to moglo da se ostvari, neophodno je poznavanje eksploatacionih opterećenja, pa kandidat definiše jedan od osnovnih ciljeva disertacije, određivanje merodavnog spektra opterećenja na osnovu eksploatacionih merenja obrtnog momenta na vratilu radnog točka rotornog bagera.

Poglavlje 3. **„ Studija i analiza postojećih konstrukcionih rešenja i identifikacija dominantnih uticajnih parametara neophodnih za proračun strukturnih elemenata prenosnika“,** počinje sa detaljnom analizom klasifikacije i principa konstruisanja rotornih bagera. U daljim analizama prikazane su osnovne karateristike radnih organa rotornog bagera (kašike, struktura rotornog bagera, najvažniji mehanizmi za funkcionisanje bagera).
U ovom delu rada kandidat je prikazao teorijske osnove mehanizma kopanja, i izveo jednačinu putanje kopanja masiva u parametarskom obliku. Ovako izvedena jednačina je od suštinskog značaja za određivanje otpora kopanja, odnosno na radna opterećenja i konstrukciju vitalnih elemenata prenosnika. Kandidat je u ovom poglavlju izveo i opšte obrasce za proračun elemenata odreska i elemenata reza u parametarskom obliku.
Pored toga, u radu su prikazani i osnovni procesi kopanja u toku vremena. Ovde se posmatra proces kopanja kao i spektar gustine za četiri kategorije materijala koji se iskopava na površinskom kopu. U okviru ovih razmatranja vidi se, da se sila smicanja materijala menja od neke vrednosti $F_{min}$ do $F_{max}$ zavisno od vrste materijala koji se iskopava, varirajući u navedenim granicama oko srednje vrednosti. Veće dinamičke promene sile smicanja materijala odgovaraju tvrđim materijalima.
U radu je kandidat izveo i opšte obrasce za proračun otpora kopanja, a na kraju daje algoritam za određivanje opterećenja vratila radnog točka.
U daljem toku, na osnovu sprovedene analize postojećih konstrukcionih rešenja prenosnika za pogon radnog točka, kandidat daje moguća varijantna rešenja. Vrednovanjem varijantnih rešenja, kandidat definiše kao najbolju varijantu prenosnika za pogon radnog točka konusno-cilindrični-planetni prenosnik.

U poglavlju 4 **„Prikaz metoda koje će se koristiti u istraživanjima“**, kandidat je prikazao metode koje je koristio u svojim istraživanjima. S obzirom da je jedan od najbitnijih ciljeva disertacije proračun vitalnih elemenata prenosnika simulacijom eksploatacionih opterećenja, kandidat daje prikaz diskretizacije slučajnih procesa i metoda diskretizacije: metode ekstremnih vrednosti, metode preseka odgovarajućeg nivoa, metode raspona, metode punih ciklusa, metode „kišne kapi“ („rain flow“). U daljem toku kandidat daje statističku obradu rezultata diskretizacije.
U okviru ovog poglavlja kandidat je dao osnovne elemente teorije pouzdanosti: osnovno stanje sistema, klasifikaciju otkaza sistema, osnovne pokazatelje pouzdanosti (funkcija

gustine raspodele pojava osnovnih stanja, funkcija pouzdanosti, funkcija kumulativne raspodele, funkcija intenziteta otkaza), zakoni raspodele otkaza sa posebnim akcentom na Vejbulov zakon raspodele. Na osnovu prethodnih razmatranja kandidat daje verovatnosno-statistički model proračuna elemenata prenosnika za pogon radnog točka rotornog bagera.
U toku eksploatacije mašinskih sistema, kakav je BTO sistem, promena radnih napona je najčešće vremenska neregularna funkcija, čija se amplituda menja u širokim granicama i često prekoračuje dinamičku izdržljivost elementa. Višestruko prekoračenje određenog nivoa napona dovodi do pojave prslina usled zamora materijala, što u krajnjem slučaju dovodi do otkaza sistema. Zbog toga se danas u praktičnim proračunima za procenu radnog veka koristi veći broj hipoteza o akumulaciji oštećenja u materijalu. Kandidat u ovom poglavlju daje prikaz najpoznatijih hipoteza o akumulaciji oštećenja: hipoteza Palmgren-Miner-a, hipoteza Corten-Dolan-a, hipoteza Haibach-a i hipoteza Serensen-Kogaev-a. Shodno ovim hipotezama dati su i izrazi za proračun radnog veka.

U poglavlju 5. **„Određivanje spektra opterećenja rotornog bagera kao osnove za konstruisanje prenosnika za pogon radnog točka“**, kandidat daje uporednu analizu konvencionalnog načina provera sigurnosti protiv razaranja mašinskih delova, koji se vrši određivanjem nominalnog opterećenja, odnosno nominalnog radnog napona koji odgovara najučestalijem naponu u toku rada. Eksploatacioni uslovi, odnosno pojave opterećenja većih od nominalnih uzima se u obzir preko faktora radnih uslova $K_A$, koji se bira približno iz odgovarajućih tabela. Kandidat zaključuje da je ovakav način određivanja radnog napona približan, što dovodi do predimenzionisanja elemenata konstrukcije prenosnika.
Drugi pristup, kojim se postiže visok stepen tačnosti pri dimenzionisanju i proveri sigurnosti protiv razaranja može se postići merenjem eksploatacionih opterećenja i identifikacijom spektra opterećenja vitalnih elemenata prenosnika.
Kandidat je u ovom radu koristio drugi pristup - na osnovu eksploatacionih merenja obrtnog momenta na vratilu radnog točka rotornog bagera odredio je spektar opterećenja, a ovaj koristio za proveru sigurnosti vitalnih elemenata izabranog prenosnika.
Izabrani objekat na kome su vršena eksploataciona merenja je rotorni bager SRs 1300 na kopu Drmno. Karakteristike prenosnika za pogon tadnog točka ovog rotornog bagera su: $P_M$=900$kW$, $n_M$ =1450 $min^{-1}$, prenosni odnos $i$=237,7, broj obrtaja radnog točka $n_{RT}$=6,1 $min^{-1}$.
Kandidat daje karakteristike merne opreme koja je korišćena pri tenzometrijskom merenju (merne trake LZ 12 proizvođača Hotinger Baldwin Messtechnik, merni pojačivač DMC 9012A sa 6 kanala proizvođača Hotinger Baldwin Messtechnik, merni računar Notebook 520 C Apple McIntosh sa softverom BEAM). Merni sistem ima tačnost 0,1% u mernom lancu. Na vratilo radnog točka su lepljene merne trake u konfiguraciji polumost. Merne trake su zalepljene u glavnim pravcima tangencijalnih napona koji nastaju usled obrtnog momenta na vratilu. U okviru ovog poglavlja kandidat daje rezultate tenzometrijskih merenja obrtnog momenta na izlaznom vratilu prenosnika za pogon radnog točka izabranog rotornog bagera SRs-1300 na kopu Drmno, koji je radio na otkopu jalovine.
U daljem toku ovog poglavlja, kandidat daje obradu izmerenih vrednosti obrtnog momenta. Izabrana metoda za diskretizaciju izmerene veličine obrtnog nomenta je dvoparametarska metoda - metoda punih ciklusa. Za diskretizaciju je korišćen softver razvijen na Mašinskom fakultetu u Nišu. Diskretizacijom su dobijeni: korelaciona tabela amplitudnih i srednjih vrednosti $T_a$ i $T_m$, stereogram na osnovu korelacione tabele. Statističkom obradom dobijeni su histogram gustine raspodele amplituda, kumulativna rastuća raspodela $F(x)$ i kumulativna opadajuća raspodela $H(x)$ i na kraju jedinični spektar opterećenja.
Dobijeni spektar kandidat upoređuje sa karakterističnim predstavnicima radnog režima i konstatuje da ovaj spektar odgovara teškom režimu rada.

Obradom rezultata procesa diskretizacije preko Vejbulove raspodele, dobijen je odnos amplitude momenta sa najvećom gustinom i maksimalne amplitude obrtnog momenta $x_m$=0,885 što jasno potvrđuje pretpostavku da se radi o teškom režimu rada. Na kraju ovog poglavlja, kandidat daje ključni rezuzltat diskretizacije – merodavni spektar opterećenja.

U poglavlju br. 6.**„Proračun vratila i zupčanika za slučaj poznatog spektra opterećenja“** kandidat prikazuje proračun vitalnih elemenata prenosnika snage (vratila i zupčanika) na bazi spektra opterećenja, koji ustvari simulira stvarna opterećenja utvrđena merenjem u eksploatacionim uslovima. Proračun vratila kandidat daje prema standradu DIN 743. Za proračun zupčanika za definisani spektar opterećenja, kandidat je razvio originalni softver SPEKTAR koji je složene i heterogene strukture. Sistem je razvijen na modularnom principu koji omogućava izvršenje, uz pomoć računara, pojedinih aktivnosti i zadataka konstruktora u oblasti proračuna zupčanika. U okviru ovog poglavlja kandidat detaljno opisuje proračun zupčanika simulacijom eksploatacionih uslova, daje algoritam proračuna, a u prilogu daje kod razvijenog softvera. Korisnički interfejs softvera SPEKTAR je razvijen u programskom jeziku VISUAL BASIC. Razvijeni programima sledeće mogućnosti:

- proračun geometrije cilindričnih evolventnih zupčanika sa spoljašnjim i unutrašnjim ozubljenjem za zadate parametre alata i proračun konusnih zupčanika,
- proračun nosivosti cilindričnih i konusnih evolventnih zupčanika sa pravim i kosim zupcima,
- automatski izbor osnog rastojanja za unapred zadati standardni red,
- automatsko određivanje temenog zazora i skraćenje glave zupca za ceo broj prečnika temenih krugova,
- raspodela koeficijenta pomeranja profila prema DIN 3992,
- proračun faktora radnih uslova preko spektra opterećenja,
- proračun nosivosti prema DIN-3990, AGMA-standardu i ISO-preporukama,
- proračun elastičnih deformacija zubaca,
- proračun nosivosti u odnosu na piting, nasilni i zamorni lom i u odnosu na zaribavanje,
- proračun nosivosti simulacijom eksploatacionih uslova.

Kandidat vrši proveru svih zupčastih parova prenosnika radnog točka rotornog bagera SRs 1300 u prvoj varijanti za faktor radnih uslova $K_A$=1,5 i u drugoj varijanti simulacijom eksploatacionih opterećenja pomoću spektra opterećenja na osnovu merenja obrtnog momenta u eksploatacionim uslovima pri otkopu jalovine na kopu Drmno.
Na osnovu sprovedenih istraživanja i izvršene analize, kandidat zaključuje na osnovu stepena sigurnosti u odnosu na nosivost bokova $S_H$ i u odnosu na nosivost podnožja $S_F$ da su zupčasti parovi predimenzionisani za 15-50%. Prema tome ukoliko se ne raspolaže podacima o realnim radnim uslovima odnosno stvarnim opterećenjima dovodi do znatnog predimenzionisanja strukturnih elemenata prenosnika.
U cilju projektovanja optimalnih konstrukcija kandidat predlaže, da se proračuni izvode na osnovu merodavnih spektara opterećenja. Odnosno, u slučaju proračuna strukturnih elemenata prenosnika radnog točka rotornog bagera, neophodno je imati familije normiranih spektara opterećenja za svaki ugljenokop, te pri projektovanju rotornih bagera, proračun strukturnih elemenata izvoditi prema radnoj izdržljivosti.
Ovakav pristup proračuna treba koristiti kod svih radnih mašina koje rade u stohastički promenljivim radnim uslovima kao što su drumska i železnička vozila, vetrogeneratori, parne i gasne turbine i slične radne mašine.

U **„Zaključku“**, poglavlje 7., kandidat daje izvod iz prethodno opisanih i sprovedenih teorijskih, numeričkih i eksperimentalnih istraživanja, kao i pregled najvažnijih rezultata ovih

istraživanja. Na osnov ovog pregleda, kandidat u posebnim delovima ovog poglavlja ističe originalni naučni doprinos rada i predlaže pravce daljih istraživanja.
Naučni doprinos rada ogleda se u sledećem:

1. Predložena je nova metoda proračuna vitalnih elemenata prenosnika rotornog bagera, koja pruža mogućnost sagledavanja realnog stanja sistema u eksploatacionim uslovima i dobijanja optimalnih konstrukcionih rešenja.
2. Teorijskim i eksperimentalnim istraživanja izvršena je verifikacija predložene metode proračuna.
3. Primenom razvijene metode kod proračuna vitalnih elemenata rotornog bagera pokazano je da su u odnosu na klasični proračun vitalni elementi prenosnika predimenzionisani za 15-50%.
4. Razvijeni su softveri za efikasnu praktičnu primenu predložene metode, što je od značaja za inženjersku praksu.
5. Primena razvijene metode moguća je na svim rotornim bagerima u Srbiji, čime se znatno utiče na racionalnost i efikasnost rada ovih mašina.

Na osnovu dobijenih rezultata u okviru rada, kandidat na kraju zaključka predlaže pravce daljih istraživanja u ovoj oblasti.

# ZAKLJUČAK I PREDLOG

Na osnovu izložene analize doktorske disertacije pod nazivom **ISTRAŽIVANJE DOMINANTNIH UTICAJNIH PARAMETARA I RAZVOJ SISTEMA ZA KONSTRUISANJE PRENOSNIKA RADNOG TOČKA ROTORNOG BAGERA**

Komisija smatra da:

1. Podneti rad u potpunosti odgovara temi prihvaćenoj od strane Naučno-nastavnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu;
2. Rad je tehnički korektno i kvalitetno urađen, adekvatno koncipiran i omogućava dobro praćenje dobijenih rezultata istraživanja;
3. Na osnovu konkretnih istraživanja, kandidat je došao do značajnih naučnih rezultata, koji predstavljaju originalni naučni doprinos u oblasti prenosnika visokih specifičnih snaga koji su pogonski sistemi rotornih bagera i drugih visoko-sofisticiranih mašina;
4. Kandidat je došao do konkretnih praktičnih saznanja i inovacionih modela, čija primena u oblasti projektovanja i održavanja mašinskih sistema može biti od značaja prilikom izbor optimalnih vrednosti parametara konstrukcije prenosnika.
5. Kandidat vlada potrebnim znanjima za istraživanje u oblasti mašinskih konstrukcija, posebno prenosnika snage, metodama merenja.
6. Kandidat je pokazao sposobnost da izvrši sintezu naučnih znanja iz raznih oblasti u cilju realizacije postavljenog zadatka;
7. Kandidat je ispoljio potpunu samostalnost i inventivnost u naučno-istraživačkom radu.

Na osnovu napred izloženog Komisija je konstatovala da rad kandidata mr Slobodana Miladinovića, diplomiranog inženjera mašinstva, predstavlja originalan naučni rad, koji je ispunio zahteve postavljene teme i prikazanim naučnim doprinosom i teoretskim, analitičkim, i eksperimentalnim analizama i predlozima za dalja istraživanja, objedinio teorijska i praktična iskustva sa potrebama konkretne inženjerske prakse.

Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Mašinskog fakulteta u Nišu da se rad kandidata mr Slobodana Miladinovića, dipl.inž.maš., pod nazivom

**ISTRAŽIVANJE DOMINANTNIH UTICAJNIH PARAMETARA I RAZVOJ SISTEMA ZA KONSTRUISANJE PRENOSNIKA RADNOG TOČKA ROTORNOG BAGERA**

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

U Nišu, Beogradu, Novom Sadu
12.01.2011.

1. _____
dr Vojislav Miltenović, red. prof.
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu
(uža naučna oblast: Mašinske konstrukcije)

2. _____
dr Siniša Kuzmanović, red. prof.
Fakulteta tehničkih nauka Univ. u Novom Sadu
(uža naučna oblast: Mašinski elementi i principi konstruisanja)

3. _____
dr Radivoje Mitrović, red. prof.
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu
(uža naučna oblast: Opšte mašinske konstrukcije)

4. _____
dr Vlastimir Đokić, red. prof.
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu
(uža naučna oblast: Mašinske konstrukcije)

5. _____
dr Dragan Milčić, vanr. prof.
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu
(uža naučna oblast: Mašinske konstrukcije)