AKADEMSKA MISAO – BEOGRAD
EDePro – ENGINE DESIGN AND PRODUCTION - BEOGRAD

Milosav Ognjanović
Nenad Kolarević
Miloš Stanković

REDUKTORI TURBOVRATILNIH MOTORA

Priručnik za konstrukciju i ispitivanja

Beograd, 2024

REDUKTORI TURBOVRATILNIH MOTORA
Priručnik za konstrukciju i ispitivanja

Autori:

Dr Milosav Ognjanović, *profesor emeritus*, Mašinski fakultet Beograd
Dr Nenad Kolarević, *vanredni profesor*, Mašinski fakultet Beograd
Dr Miloš Stanković, *naučni saradnik*, Inovacioni centar Mašinskog fak. Beograd

Recenzenti:

Dr Božidar Rosić, *redovni profesor*, Mašinski fakultet Beograd
Dr Vojislav Miltenović, *redovni profesor*, Mašinski fakultet Niš
Dr Siniša Kuzmanović, *redovni profesor*, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad
Dr Blaža Stojanović, *redovni profesor*, Fakultet inženjerskih nauka Kragujevac

Izdavači:

Akademska misao, Beograd i EDePro – Engine design and Production, Beograd
** Zajedničko izdanje po ugovoru broj 0626001-24 (AM), 7613/2024 (EDEPRO) od 26. 6. 2024. godine.*

Tiraž:

200 primeraka

Štamparija:

Grafoprint, Gornji Milanovac

ISBN 978-86-6200-013-2

Mesto i godina izdanja:

Beograd, 2024.

PREDGOVOR

Izvori mehaničke energije kao što su gasne turbine, mogu biti izuzetno visoke snage pri ekstremno visokoj brzini rotacije. Ova snaga može biti iskorišćena tek ako se smanji brzina rotacije i dovede u prihvatljive granice. Reduktori zasnovani na principu sprezanja zubaca zupčanika su gotovo jedino prihvatljivo rešenje za ovu svrhu. Njihov rad u području ekstremno visokih brzina prati niz fenomena i specifičnih pojava koje moraju biti identifikovane, iznađena specifična konstrukcijska rešenja i eksperimentalno verifikovana sa aspekta ispravnosti rada, radnog veka i pouzdanosti u radu.

U firmi EDePro (Engine Design and Production) Beograd, u skladu sa potrebama i mogućnostima, razvili smo više konstrukcijskih rešenja reduktora turbovratilnih motora snage 200 – 300 kW sa ulaznim brojem obrtaja 40000 - 60000 o/min i izlaznim brojem obrtaja 6000 – 2500 o/min, koji su prikazani u ovoj knjizi. U inovativnom smislu, ova konstrukcijska rešenja uglavnom podrazumevaju odgovarajuća unapređenja konstrukcija reduktora sa manjim iskorakom u oblast novih principa rada. Konstrukcijska unapređenja se u prvom redu odnose na smanjenje mase i gabarita (Lightweight design), ostvarivanje uslova za rad reduktora sa ekstremno visokom brzinom rotacije uz raspoloživi tehnološki nivo za realizaciju. Jedan broj ovih konstrukcijskih rešenja je izrađen, izvedena su odgovarajuća ispitivanja, a rezultati sa analizama prikazani su u tekstu. Ispitivanja su izvedena korišćenjem laboratorijskih instalacija koje su razvijene i izrađene za ovu svrhu.

U realizaciji ovog višegodišnjeg poduhvata, osim autora ove knjige, ušestvovale su kolege, inženjeri i proizvodni radnici firme EDePro uključujući i proizvodnu firmu „Metalac“ iz Inđije, kao i „Zupčanik“ iz Ade. Autori im se najiskrenije zahvaljuju na angažovanju i pomoći u realizaciji brojnih konstruktorskih, proizvodnih i eksperimentatorskih zadataka i poslova.

Beograd, juna 2024 *Autori*

S A D R Ž A J

1. Zupčasti prenosnici ekstremno visokih brzina rotacije 1
   1.1. Koncepcijska i konstrukcijska rešenja 2
   1.2. Radna opterećenja i režimi rada 8
   1.3. Specifičnosti zupčanika 10
   1.4. Dinamika sprezanja zubaca i vibracije reduktora 18
   1.5. Specifičnosti ležaja za visoke brzine rotacije 24
   1.6. Podmazivanje i hlađenje prenosnika 32
   1.7. Unutrašnji otpori ulja u prenosniku 44
   1.8. Stepen iskorišćenja 47
   1.9. Spoljašnje zagrevanje prenosnika 50
   1.10. Ispitivanje prenosnika 51
   1.11. Pouzdanost prenosnika 57
2. Planetarni reduktori 63
   2.1. Konstrukcijsko rešenje 64
   2.2. Unutrašnji otpori i stepen iskorišćenja 68
   2.3. Nosivost, radni vek i pouzdanost 76
   2.4. Dinamička stabilnost 82
3. Reduktori sa fiksnim osama 85
   3.1. Konstrukcijska rešenja 85
   3.2. Unutrašnji otpori i toplotni bilans 104

3.3. Ispitivanje pod opterećenjem 111
3.4. Nosivost, radni vek, pouzdanost 117
3.5. Dinamička stabilnost i vibracije 124
4. Reduktori turbopropelernih motora 127
4.1. Nesaosni reduktor sa paralelnim granama 128
4.2. Diferencijalni planetarni reduktor 135
4.3. Dvostepeni planetarni reduktor 147
4.4. Kombinovani fiksno – planetarni reduktor 151
4.5. Reduktori sa fiksnim osama i paralelnim granama 155
4.6. Poređenje prikazanih konstrukcijskih rešenja 160
5. Vratilo slobodne turbine 163
5.1. Funkcija i granični uslovi 163
5.2. Konstrukcijsko rešenje 166
5.3. Dinamička stabilnost 169
5.4. Podmazivanje i hlađenje 176
5.5. Alternativna konstrukcijska rešenja 182
6. Završna razmatranja 183
7. Zaključak 193
8. Literatura 195
9. Prilog – A : Proračun planetarnog motornog reduktora 203
10. Prilog – B : Proračun koaksijalnih reduktora sa fiksnim osama 213
11. Prilog – C : Proračun reduktora turbopropelernih motora 233
12. Prilog – D : Transmisija bespilotnog helikoptera 285