

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:**

Akadska 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

### **Štamarija:**

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, ušestvovala su kolege, inženjeri i proizvodni radnici firme EDePro uključujući i proizvodnu firmu „Metalac“ iz Indije, 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