



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



Dragoljub Živković
Marko Mančić
Dragan Jovanović

ТОПЛОТНЕ ТУРБОМАШИНЕ

VIBRACIJE LOPATICA



Niš, 2023.

UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET

Dragoljub Živković
Marko Mančić
Dragan Jovanović

TOPLOTNE TURBOMAŠINE
VIBRACIJE LOPATICA



Niš, 2023.

Naslov publikacije: TOPLOTNE TURBOMAŠINE – Vibracije lopatica
Autori: dr Dragoljub Živković, redovni profesor Mašinskog
fakulteta Univerziteta u Nišu,
Marko Mančić, docent Mašinskog fakulteta
Univerziteta u Nišu,
Dragan Jovanović, asistent Mašinskog fakulteta
Univerziteta u Nišu.

Recenzenti: dr Vladimir Stojanović, vanredni profesor
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu,
dr Milan Banić, vanredni profesor
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu

Izdavač: Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu,
ul. Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš.

Štampa: „GALEB”, Niš.

Tiraž: 100 primeraka.

ISBN broj: 978-86-6055-174-2

SADRŽAJ

PREDGOVOR	1
OZNAKE	3
I Deo - teorijske osnove vibracija lopatica toplotnih turbomašina	5
1.1. UVOD	5
1.2. POBUDNE SILE	7
1.3. STATIČKE VIBRACIONE KARAKTERISTIKE	
RADNIH LOPATICA	9
1.3.1. Forme oscilacija lopatica	10
1.4. FREKVENCIJE SOPSTVENIH OSCILACIJA	
LOPATICA KONSTANTNOG PROFILA	12
1.4.1. Statička frekvencija fleksionih oscilacija	12
1.4.2. Frekvencije oscilovanja rotirajućih lopatica	19
1.4.3. Frekvencije torzionih oscilacija lopatica	20
1.5. SOPSTVENA FREKVENCIJA FLEKSIONIH	
OSCILACIJA LOPATICA PROMENLJIVOG PROFILA	22
1.5.1. Proračun po energetskejoj metodi	22
1.5.2. Približne metode za određivanje sopstvenih frekvencija fleksionih oscilacija lopatica	29
1.5.3. Proračun torzionih oscilacija prvog tona lopatica promenljivog profila	31
1.6. FORME FLEKSIONIH OSCILACIJA	
PAKETA LOPATICA	31
1.6.1. Frekvencije sopstvenih fleksionih oscilacija paketa lopatica konstantnog profila	34
1.6.2. Sopstvena frekvencija oscilacija paketa lopatica promenljivog profila	39
1.7. DINAMIČKA NAPREZANJA LOPATICE PRI	
OSCILACIJAMA	45
1.7.1. Dinamička naprezanja lopatica poslednjih stupnjeva parnih turbina	52
1.8. OBEZBEĐENJE SIGURNOSTI RADNOG KOLA PRI OSCILACIJAMA	54
1.8.1. Dinamičke vibracione karakteristike radnih lopatica parnih turbina	59
1.8.2. Provera rezonantnih karakteristika radnih lopatica i mere za povećanje pouzdanosti njihovog rada	63
1.9. ZAKLJUČAK	65
1.10. LITERATURA	66

ii Deo - NUMERIČKA ANALIZA VIBRACIJA LOPATICA TOPLOTNIH TURBOMAŠINA	67
2.1. METODA KONAČNIH ELEMENATA U DINAMICI KONSTRUKCIJA	67
2.1.1. Statička analiza konstrukcije	68
2.1.2. Dinamička analiza konstrukcije	69
2.1.3. Analiza frekvencije i oscilovanja	70
2.2. PRORAČUN VIBRACIJA ROTORSKE LOPATICE I ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA	71
2.2.1. Mreža konačnih elemenata i konvergencija rešenja	72
2.2.2. Numerička analiza vibracija rotirajuće rotorske lopatice	74
2.3. REZULTATI I DISKUSIJA	78
2.4. LITERATURA	81
III Deo - EKSPERIMENTALNA ANALIZA VIBRACIJA LOPATICA TOPLOTNIH TURBOMAŠINA	83
3.1. UVOD	83
3.2. EKSPERIMENTALNA ANALIZA VIBRACIJA KONSTRUKCIJE SA POBUĐIVAČEM PRIKLJUČENIM U JEDNU TAČKU (ISO 7626-2) [3.3]	85
3.2.1. Konfiguracija mernog sistema	86
3.2.2. Vrste pobude	86
3.2.3. Pobuđivači vibracija	88
3.2.4. Kontrola pobude	90
3.3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA VIBRACIJA KONSTRUKCIJE SA POBUĐIVAČEM KOJI NIJE PRIKLJUČEN NA KONSTRUKCIJU (ISO 7626-5) [3.5]	92
3.3.1. Konfiguracija mernog sistema	92
3.3.2. Primena pobude	94
3.4. ODREĐIVANJE SOPSTVENE FREKVENCIJE OSCILOVANJA ROTORSKE LOPATICE POSLEDNJEG STUPNJA PARNE TURBINE	97
3.4.1. Primena aditivne metode za izradu kalupa za stezanje korena lopatice	99
3.4.2. Određivanje sopstvene frekvencije oscilovanja rotorske lopatice parne turbine	103
3.5. Literatura	110

PREDGOVOR

Knjiga „**Toplotne turbomašine – Vibracije lopatica**“ napisana je kao dopunska literatura za potrebe studenata Mašinskog fakulteta u Nišu koji na osnovnim, master i doktorskim studijama izučavaju oblast Toplotnih turbomašina. U ovu grupu mašina spadaju toplotne turbine (parne i gasne turbine) i turbokompresori.

Nadamo se da će sadržaj ove knjige obezbediti bolje razumevanje problematike vibracija lopatica i biti dovoljno inspirativan da studenti mašinstva kao svoje teme za izradu diplomskih i master radova, kao i doktorskih disertacija izaberu probleme iz oblasti vibracija lopatica toplotnih turbomašina. Ovi problemi su po svojoj fizičkoj prirodi multidisciplinarni i zahtevaju specifična znanja iz oblasti toplotnih turbomašina, teorijske mehanike (teorije oscilacija) i teorije i prakse merenja.

Knjiga može biti od koristi i inženjerima u termoelektranama, termoelektranama-toplanama i industrijskim energanama koji se bave problemima eksploatacije i održavanja aksijalnih turbomašina.

U izradi poglavlja knjige koje se odnosi na eksperimentalno određivanje sopstvenih frekvencija oscilovanja lopatice parne turbine pomogli su nam dr Aleksandar Miltenović, vanredni profesor i Marko Perić, master inženjer mašinstva, sa Katedre za Mašinske konstrukcije i razvoj proizvoda i mr Slobodan Jovanović, dipl. inž. maš. sa Katedre za mehatroniku i automatsko upravljanje. Eksperimentalna ispitivanja su urađena u Laboratoriji za mehatroniku Mašinskog fakulteta u Nišu. Svima napred navedenim upućujemo zahvalnost za učinjen napor uz nadu da će se saradnja nastaviti kroz izradu konkretnih naučno-istraživačkih radova i projekata.

Veliku zahvalnost autori upućuju recenzentima ove knjige: dr Vladimiru Stojanoviću i dr Milanu Baniću, vanrednim profesorima Mašinskog fakulteta u Nišu, koji su rukopis pažljivo pročitali i dali veoma korisne primedbe i sugestije.

Autori će biti zahvalni i svim čitaocima ove knjige, posebno studentima i stručnjacima iz prakse, koji budu uputili svoje primedbe i sugestije u cilju poboljšanja njenog sadržaja u novim izdanjima.

U Nišu,

Maja 2023. godine

Autor



Dr Dragoljub Živković, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, rođen je 26.03.1955. godine u Leskovcu. Osnovnu školu i gimnaziju na prirodno-matematičkom smeru završio je u Leskovcu sa odličnim uspehom. Oba puta je nagrađen diplomama „Vuk Stefanović-Karadžić“.

Na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na smeru za temoenergetiku, diplomirao je 15.02.1980.godine odbranom diplomskog rada pod nazivom „Automatsko puštanje u rad parnog turbopostrojenja“. Magistarski rad pod nazivom „Dinamičko ponašanje parne turbine pri dejstvu zaštitnih uređaja“ odbranio je 1985. godine. Doktorsku disertaciju pod nazivom „Izučavanje dinamičkog ponašanja parnih turbina pri nestacionarnim režimima rada“ odbranio je 1993. godine.

U okviru izrade doktorske disertacije boravio je školske 1985/86. godine šest meseci na Mašinskom fakultetu Tehničkog Univerziteta u Pragu radi specijalizacije iz oblasti analize nestacionarnih procesa i višefaznih strujanja u termoenergetskim postrojenjima.

Dr Dragoljub Živković je na Mašinskom fakultetu u Nišu izabran za docenta 1993. godine, vanrednog profesora 1998. godine i redovnog profesora 2003. godine. Držao je nastavu iz većeg broja predmeta na osnovnim, master i doktorskim studijama iz oblasti termoenergetike, termotehnike i procesne tehnike. Bio je mentor većeg broja diplomskih i master radova, kao i tri magistrature i četiri doktorata. Dva urađena doktorata su 2019. i 2021. godine proglašeni za najbolje urađene doktorske disertacije u Srbiji iz oblasti mašinskog inženjerstva.

Profesor dr Dragoljub Živković je objavio 9 univerzitetskih udžbenika i zbirki zadataka, preko 200 radova u domaćim i međunarodnim časopisima, kao i na domaćim i međunarodnim naučnim konferencijama. Učestvovao je u realizaciji većeg broja nacionalnih i međunarodnih naučnih i inovacionih projekata.

Za izuzetan doprinos razvoju Mašinskog fakulteta i Univerziteta u Nišu nagrađen je Poveljom Mašinskog fakulteta 2021. godine i Srebrnim znakom Univerziteta u Nišu 2018. godine. .