

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

Autori

SADRŽAJ

I DEO – TEORIJSKE OSNOVE VIBRACIJA LOPATICA TOPLLOTNIH TURBOMAŠINA

OZNAKE	4
1.1. UVOD	6
1.2. POREMEĆAJNE SILE	8
1.3. STATIČKE VIBRACIONE KARAKTERISTIKE RADNIH LOPATICA	9
1.3.1. Oblici oscilacija slobodnih lopatica	10
1.4. SOPSTVENE FREKVENCIJE OSCILACIJA LOPATICA	
KONSTANTNOG PROFILA	12
1.4.1. Statička frekvencija fleksionih oscilacija lopatica	12
1.4.2. Frekvencije oscilacija rotirajućih lopatica	19
1.4.3. Frekvencije torzionih oscilacija lopatica	20
1.5. SOPSTVENE FREKVENCIJE FLEKSIONIH OSCILACIJA LOPATICA	
PROMENLJIVOG PROFILA	21
1.5.1. Proračun po energetske metode	21
1.5.2. Približne metode za određivanje sopstvenih frekvencija fleksionih oscilacija lopatica	27
1.5.3. Proračun sopstvenih torzionih oscilacija lopatica promenljivog profila	29
1.6. OBLICI FLEKSIONIH OSCILACIJA PAKETA LOPATICA	30
1.6.1. Sopstvene frekvencije fleksionih oscilacija paketa lopatica konstantnog profila	31
1.6.2. Sopstvene frekvencije oscilacija paketa lopatica promenljivog profila	37
1.7. DINAMIČKA NAPREZANJA LOPATICA PRI OSCILACIJAMA	42
1.7.1. Dinamička naprezanja lopatica poslednjih stupnjeva parnih turbina	49
1.8. OBEZBEĐENJE SIGURNOSTI RADNOG KOLA PRI OSCILACIJAMA	51
1.8.1. Dinamičke vibracione karakteristike radnih lopatica parnih turbina	54
1.8.2. Provera rezonantnih karakteristika radnih lopatica i mere za povećanje pouzdanosti njihovog rada	59
1.9. ZAKLJUČAK	60
1.10. LITERATURA	61

II DEO – NUMERIČKA ANALIZA VIBRACIJA LOPATICA TOPLOTNIH TURBOMAŠINA

2.1. METODA KONAČNIH ELEMENATA U DINAMICI KONSTRUKCIJA	62
2.1.1. Statička analiza konstrukcije	63
2.1.2. Dinamička analiza konstrukcije	63
2.1.3. Analiza frekvencije i oblici oscilovanja	64
2.2. PRORAČUN VIBRACIJA ROTORSKE LOPATICE I ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA	65
2.2.1. Mreža konačnih elemenata i konvergencija rešenja	66
2.2.2. Numerička analiza vibracija rotirajuće rotorske lopatice	68
2.3. REZULTATI I DISKUSIJA	71
2.4. LITERATURA	74

III DEO - EKSPERIMENTALNA ANALIZA VIBRACIJA LOPATICA TOPLOTNIH TURBOMAŠINA

3.1. UVOD	75
3.2. EKSPERIMENTALNA ANALIZA VIBRACIJA KONSTRUKCIJE SA POBUĐIVAČEM PRIKLJUČENIM U JEDNU TAČKU (ISO 7626-2)	76
3.2.1. Konfiguracija mernog sistema	77
3.2.2. Vrste pobude	77
3.2.3. Pobuđivači vibracija	79
3.2.4. Kontrola pobude	80
3.3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA VIBRACIJA KONSTRUKCIJE SA POBUĐIVAČEM KOJI NIJE PRIKLJUČEN NA KONSTRUKCIJU (ISO 7626-5)	82
3.3.1. Konfiguracija mernog sistema	82
3.3.2. Primena pobude	84
3.4. ODREĐIVANJE SOPSTVENE FREKVENCIJE OSCILOVANJA ROTORSKE LOPATICE POSLEDNJEG STUPNJA PARNE TURBINE	85
3.4.1. Primena aditivne metode za izradu kalupa za stezanje korena lopatice	90
3.4.2. Opis merenja i analiza	92
3.5. LITERATURA	100