

Edicija: Mehanika fluida i Hidraulične mašine



UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET



MIROSLAV BENIŠEK

# HIDRAULIČNE TURBINE

DRUGO I DOPUNJENO IZDANJE



Beograd, 2020.

Univerzitet u Beogradu  
Mašinski fakultet

---



Edicija:  
Mehanika fluida i  
Hidraulične mašine

Edicija:

## Mehanika fluida i Hidraulične mašine

- **Hidraulične turbine.**  
Benišek M.  
(Drugo izmenjeno i dopunjeno izdanje, 2020. god.) - ova knjiga
- **Hidraulične turbine.**  
Benišek M.  
(Prvo izdanje, 1998. god.)
- **Klasična i uljna hidraulika.**  
Crnojević C.  
(Prvo izdanje, 1998. god.)
- **Izabrana poglavlja iz hidrodinamike.**  
Čantrak S.  
(Prvo izdanje, 1998. god.)
- **Statika i kinematika fluida.**  
Saljnikov V.  
(Drugo izdanje, 1998. god.)
- **Mehanika fluida. Teorija i praksa.**  
Čantrak S., Benišek M., Pavlović M.,  
Marjanović P., Crnojević C.  
(Šesto izdanje, 1998. god.)
- **Priručnik za proračun strujanja stišljivog fluida.**  
Pavlović D. M., Stefanović Z.  
(Peto izdanje, 1997. god.)
- **Tehnika merenja.** Zbirka zadataka iz strujno-tehničkih merenja.  
Benišek M., Nedeljković M., Kilibarda R., Gerasimović D.  
(Prvo izdanje, 1996. god.)
- **Dinamika jednodimenzijских strujanja fluida.**  
Djordjević V.  
(Drugo dopunjeno izdanje, 1995. god.)
- **Pumpe i ventilatori.** Problemi, rešenja, teorija.  
Protić Z., Nedeljković M.  
(Drugo izdanje, 1995. god.)  
Oktobarska nagrada grada Beograda za najvrednije dostignuće  
u oblasti tehničkih nauka za 1992. godinu.

Urednici edicije:

- Prof. dr Vladan Djordjević, redovni član SANU i redovni član AINS
- Prof. dr Miroslav Benišek, redovni član AINS
- Prof. dr Svetislav Čantrak
- Prof. dr Miloš Nedeljković, redovni član AINS

---

Ključne reči: Hidraulične turbine, razvoj, tipovi, strujanje, kavitacija, nomenklatura, zakoni sličnosti, karakteristike, protočni delovi, osnovni parametri turbina, primeri.

# Hidraulične turbine

Autor:

**Prof. dr Miroslav Benišek, dipl. inž. maš.**

Drugo izmenjeno i dopunjeno izdanje



**Izdavač: Mašinski fakultet**  
Univerziteta u Beogradu

Beograd, 2020.

## Hidraulične turbine

- AUTOR:

**Dr Miroslav Benišek,**

redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, u penziji i redovni član AINS

---

- RECENZENTI:

**Dr Svetislav Čantrak,**

redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, u penziji

**Dr Miloš Nedeljković,**

redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu i redovni član AINS

**Dr Milun Babić,**

redovni profesor Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, u penziji i redovni član AINS

- IZDAVAČ:

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd,  
telefon: (011) 3370-760, telefax: +381-11-3370-364.

Za izdavača **prof. dr Radivoje Mitrović, dekan**

Glavni i odgovorni urednik **prof. dr Milan Lečić**

Odobreno za štampu odlukom dekana Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,  
broj 27/2020 od 17.11.2020. god.

- ŠTAMPA:

**PLANETA – print**

Kompjuterski slog: **Zoran T. Filipović, Radomir Kapor i Miroslav Benišek**

Dizajn korica: **Zoran Stamenić**

Tiraž: 200 primeraka

ISBN 978-86-6060-061-7

---

© Autor i Mašinski fakultet, Beograd 2020.

Preštampavanje i umnožavanje nije dozvoljeno.

“Ni jedna kap vode ne sme oteći  
u more, a da pre toga ne posluži  
ljudima.”

*Palanaruva – drevni vladar Šri Lanke.*



# Sadržaj

Predgovor prvom izdanju	13
Predgovor drugom izdanju	18
Uvod	19
<b>1 Razvoj hidrauličnih turbina</b>	<b>25</b>
<b>2 Vrste hidroenergetskih postrojenja i hidrauličnih mašina</b>	<b>45</b>
<b>3 Klasifikacija turbina</b>	<b>55</b>
<b>4 Iskorišćenje vodne energije i osnovni parametri turbina</b>	<b>69</b>
4.1 Energija rečnog toka . . . . .	69
4.2 Osnovni parametri hidroturbina . . . . .	71
<b>5 Teorijske osnove hidrauličnih turbina</b>	<b>85</b>
5.1 Kinematika strujanja u reakcijskim turbinama . . . . .	86
5.2 Osnovne jednačine mehanike fluida . . . . .	94
5.2.1 Jednačina kontinuiteta (Zakon o održanju materije) . . . . .	95
5.2.2 Jednačina količine kretanja . . . . .	96
5.2.3 Jednačina energije . . . . .	109
5.2.4 Zakoni o promeni količine kretanja i o promeni momenta količine kretanja . . . . .	115
5.3 Ojlerova jednačina za turbomašine – turbine . . . . .	117



5.4	Nestacionarnost apsolutnog strujanja viskoznog fluida u obrtnom kolu . . . . .	129
5.5	Stvarno i idealizovano strujanje u kolu turbine . . . . .	130
5.6	Zavisnost strujnih parametara i geometrije strujnog prostora . . . . .	133
5.7	Direktni i indirektni problem proračuna turbinskih kola .	142
5.7.1	Direktni problem . . . . .	142
5.7.2	Indirektni problem . . . . .	150
5.7.3	Konstruisanje strujnica u meridijanskoj ravni turbine . . . . .	154
5.7.4	Konformno preslikavanje prostorno zakrivljenog lopatičnog profila u ravanski profil . . . . .	160
5.7.5	Prave profilne rešetke . . . . .	165
<b>6</b>	<b>Zakoni sličnosti hidrauličnih turbina</b>	<b>207</b>
6.1	Zakoni mehaničke sličnosti turbina . . . . .	208
6.2	Specifična brzina obrtanja, značica brzohodosti i značica prečnika . . . . .	220
6.3	Karakteristični koeficijenti brzina turbina . . . . .	225
6.4	Preračunavanje stepena korisnosti sa modela na glavno izvodjenje turbine . . . . .	230
<b>7</b>	<b>Kavitacija u hidrauličnim turbinama</b>	<b>251</b>
7.1	Zavisnost kavitacije od strujnih uslova u protočnom traktu turbine . . . . .	256
7.2	Odredjivanje usisne visine . . . . .	264
7.3	Preračunavanje kavitacijskog koeficijenta modela turbine na prototip . . . . .	269
<b>8</b>	<b>Karakteristike hidrauličnih turbina</b>	<b>277</b>
8.1	Regulisanje protoka kroz turbine . . . . .	280
8.2	Oblici karakteristika turbina . . . . .	284
8.2.1	Postupak odredjivanja univerzalnih karakteristika	290
<b>9</b>	<b>Protočni delovi turbina</b>	<b>325</b>
9.1	Uvodne komore turbina . . . . .	326
9.1.1	Spiralne uvodne komore - spirale . . . . .	328
9.2	Stator turbine . . . . .	347

9.3	Sprovodni aparat . . . . .	352
9.4	Sifoni turbina . . . . .	361
<b>10</b>	<b>Nomenklatura velikih turbina</b>	<b>387</b>
10.1	Nomenklatura vertikalnih Kaplanovih i Fransisovih turbina . . . . .	389
10.1.1	Obrtno kolo turbine . . . . .	392
10.1.2	Stator turbine . . . . .	395
10.1.3	Sprovodni aparat . . . . .	396
10.1.4	Spiralna kućišta . . . . .	396
10.2	Nomenklatura cevnih turbina . . . . .	398
10.3	Nomenklatura dijagonalnih turbina . . . . .	400
10.4	Nomenklatura Peltonovih turbina . . . . .	401
<b>11</b>	<b>Izbor tipa i osnovnih parametara obrtnog kola prototipa turbine</b>	<b>417</b>
11.1	Statističke zavisnosti parametara prototipova turbina . .	417
11.1.1	Odredjivanje parametara prototipova turbine na osnovu statističkih podataka . . . . .	425
11.1.2	Odredjivanje kavitacijskih parametara prototipova turbine koristeći statističke podatke . . . . .	427
11.1.3	Zavisnost značice prečnika $\delta$ od specifične brzine obrtnja $n'_{SQ}$ . . . . .	430
11.2	Odredjivanje parametara prototipova turbine koristeći univerzalne karakteristike ispitivanja modela turbina . .	433
11.2.1	Odredjivanje parametara prototipova turbina koristeći univerzalne karakteristike ispitivanja modela turbina . . . . .	435
11.2.2	Odredjivanje kavitacijskih parametara turbina koristeći univerzalne karakteristike ispitanih modela . . . . .	439
11.3	Odredjivanje osnovnih parametara akcijskih – Peltonovih turbina . . . . .	440
11.3.1	Odredjivanje osnovnih parametara prototipa Peltonove turbine koristeći statističke podatke .	441

11.3.2	Odredjivanje osnovnih parametara prototipa Peltonove turbine koristeći univerzalne karakteristike ispitanih modela . . . . .	444
11.4	Primeri odredjivanje parametara turbine . . . . .	451
11.4.1	Primer 1: Odredjivanje parametara Fransisove turbine i kavitacijskih karakteristika na osnovu statističkih podataka prototipova turbina . . . . .	451
11.4.2	Primer 2: Odredjivanje parametara Fransisove turbine i kavitacijskih karakteristika korišćenjem univerzalnih dijagrama modela turbine . . . . .	460
11.4.3	Primer 3: Odredjivanje parametara Kaplanove turbine i kavitacijskih karakteristika na osnovu statističkih podataka prototipova turbina . . . . .	477
11.4.4	Primer 4: Odredjivanje parametara Kaplanove turbine i kavitacijskih karakteristika korišćenjem univerzalnih dijagrama modela turbine . . . . .	487
11.4.5	Primer 5: Odredjivanje parametara C cevne turbine i kavitacijskih karakteristika na osnovu statističkih podataka prototipova turbina . . . . .	513
11.4.6	Primer 6: Odredjivanje parametara C cevne turbine i kavitacijskih karakteristika korišćenjem univerzalnih dijagrama modela turbine . . . . .	521
11.4.7	Primer 7: Odredjivanje parametara Peltonove turbine na osnovu statističkih podataka prototipova turbina . . . . .	549
11.4.8	Primer 8: Odredjivanje parametara Peltonove turbine korišćenjem univerzalnih dijagrama modela turbine . . . . .	554
<b>12</b>	<b>Modelska ispitivanja hidroturbina – osnova za odredjivanje eksploatacionih karakteristika prototipova turbina</b>	<b>565</b>
12.1	Uvod . . . . .	565
12.2	Modelska ispitivanja cevne turbine . . . . .	567
12.3	Od modela do energetskih performansi prototipa . . . . .	570
12.4	Kavitacijske karakteristike modela i prototipa . . . . .	577
12.5	Karakteristike pobega agregata . . . . .	579

<b>13 "INDEX TEST" – metoda za odredjivanje kombinarske karakteristike prototipa turbine dvojne regulacije</b>	<b>583</b>
13.1 Uvod . . . . .	583
13.2 Postupak merenja "INDEX TESTOM" . . . . .	584
<b>Literatura</b>	<b>593</b>
<b>Biografija autora</b>	<b>605</b>
<b>Mišljenja i ocene recenzenata</b>	<b>611</b>



## Predgovor prvom izdanju

Hidraulične turbine izučavaju se u svetu više od 200 godina. U tom periodu, a posebno u XX veku njihov razvoj je dobio izuzetan zamah zahvaljujući izuzetnim naporima istraživača podstaknutim prevashodno zahtevima industrije za značajnijim izvorima energije. Takođe, rezultati istraživanja u teorijskoj i eksperimentalnoj mehanici fluida, razvoj novih materijala i nauke o čvrstoći predstavljali su značajan oslonac istraživačima u oblasti hidrauličnih turbina. Očigledno je da su se do današnjih dana sakupila ogromna saznanja o mnogim aspektima hidrauličnog proračuna, konstruisanja, proizvodnje, ispitivanja, regulisanja, ugradnje i eksplotacije turbina.

Smatram da čitaoci ove knjige: studenti, stručnjaci, istraživači i projektanti žele da znaju kako se nauka o hidrauličnim turbinama razvijala kod nas i ujedno osećam dužnost da se zahvalim svojim prethodnicima koji su ostavili traga u istraživanjima i širenju znanja u ovoj oblasti. Iz tih razloga dajem kratak osvrt nastajanja nauke o turbinama u našoj sredini.

Prvi začetci nastave o hidrauličnim turbinama u Srbiji nalaze se u okvirima opšteg predmeta **Mehanika i nauka o mašinama** (mašinama) uvedenog 1873. godine izmenama i dopunama Zakona o **Velikoj školi**<sup>1</sup> u Beogradu. U tim izmenama nabrojani su predmeti koji se dodeljuju u nadležnost **Tehničkom fakultetu Velike škole** između kojih je i navedeni predmet. Predmet Mehanika i nauka o mašinama 1880. god. odlukom Narodne skupštine podeljen je u dva predmeta: **Mehanika i Nauka o mašinama**. Zvanično predavanje predmeta Nauka o mašinama započela su 1887. godine postavljanjem profesora **Svetozara Zorića**<sup>2</sup> (\*1854†1931). Profesor mehaničke tehnologije Tehničkog fakulteta Velike škole **Toša Selesković**<sup>3</sup> (\*1856†1901) konstruisao je prvu srpsku turbinu koja je proizvedena u kragujevačkoj fabrici. U toku razvoja mašinske nauke u Kraljevini Srbiji u okviru Tehničkog fakulteta formira

---

<sup>1</sup>Podaci su pronadjeni u knjigama: Obradović N. M.: U spomen 100 godina nauke o mašinama i Šolaja V. B., Magdić S. A.: Inženjeri u Knjaževstu/Kraljevini Srbiji od 1834. do završetka prvog Svetskog rata, Beograd 1994.

<sup>2</sup>Prof. S. Zorić je diplomirao 1880. god. na politehnici u Karlsruheu.

<sup>3</sup>Prof. T. Selesković je diplomirao 1879. god. na politehnici u Karlsruheu.

se 1897. godine **Mašinski tehnički odsek** i iz opšteg predmeta Nauka o mašinama izdvaja se kao poseban predmet **Gradjenje hidrauličnih motora sa projektovanjem**. Ovaj predmet predavao je prof. S. Zorić. Na Tehničkom fakultetu 1922. godine u okviru posebnog formiranog **Odseka za mašinsko-elektrotehničke inženjere** uvodi se predmet **hidraulične mašine** koji obuhvata i teoriju turbina. Predmet hidraulični motori 1924. godine preuzima **prof. Vladimir Farmakovski**<sup>4</sup> (\*1880†1954). Svoja predavanja prof. V. Farmakovski sredjuje i 1925. godine izdaje prvi udžbenik<sup>5</sup> u Srbiji iz oblasti hidrauličnih turbina. Svoju knjigu “Hidraulični motori” prof. V. Farmakovski zasnovao je na onovremenskim modernim saznanjima o strujanju fluida i hidrauličnih turbina, a čitaoce upućuje na jedanaest referenci stručne literature<sup>6</sup>

Prof. V. Farmakovski ustupa 1930. godine predmet novo izabranom docentu **Nikoli Obradoviću**<sup>7</sup> (\*1900†1982) i ujedno mu predaje rukovodjenje skromno opremljenim **Zavodom za hidraulične mašine** koji je tada bio smešten u novoizgrađenoj zgradi **Tehničkog fakulteta**.<sup>8</sup>

Po preuzimanju predavanja od strane doc. N. Obradovića naziv predmeta Hidraulični motori ponovo se vraća u naziv Hidraulične mašine. Može se slobodno reći da je prof. V. Farmakovski unapredio nastavu iz hidrauličnih turbina, ali tek dolaskom doc. N. Obradovića izučavanje hidrauličnih mašina a takodje i hidrauličnih turbina dolazi do punog izražaja zahvaljujući njegovoj upornosti, entuzijazmu i posvećenosti ovoj oblasti mašinstva. Pored predmeta Hidraulične mašine N. Obradović drži i predavanja iz predmeta **Projektovanje rotacionih mašina i Crpke i ventilatori**.

Opštom uredbom Univerziteta na Mašinsko-elektrotehničkom odseku Tehničkog fakulteta formirana je 1932. godine prvi put posebna **Katedra**

---

<sup>4</sup>Prof. V. Farmakovski je prethodno bio profesor Kijevskog politehničkog instituta.

<sup>5</sup>Farmakovski V.: Hidraulički motori, izdanje Tehničkog društva na beogradskom Univerzitetu, štamparija “Sv. Sava”, Brankova broj 16, Beograd 1925.

<sup>6</sup>Navedene reference predstavljaju tadašnju najsavremeniju literaturu iz oblasti hidrauličnih turbina.

<sup>7</sup>N. Obradović je bio asistent prof. V. Farmakovskom, a u zvanje docenta izabran je 1929. god.

<sup>8</sup>Zgrada Tehničkog fakulteta, u ulici tadašnjeg i sadašnjeg naziva kralja Aleksandra Obrenovića, je podignuta 1930. god.

za **hidraulične mašine i postrojenja**<sup>9</sup> kojoj je pripao i Zavod za hidraulične mašine i postrojenja. Širenjem istraživanja u oblasti mašinstva a takodje i u oblasti hidrauličnih mašina laboratorijski prostor u zgradi Tehničkog fakulteta postaje tesan, tako da je za potrebe Mašinskog odseka podignuta 1940. godine posebna zgrada<sup>10</sup> za smeštaj laboratorija i Zavoda. U toj zgradi pripremljen je prostor i za Zavod za hidraulične mašine. Dalje opremanje Zavoda je prekinuo rat. Izgradnja laboratorijskih instalacija je nastavljena posle rata na **Mašinskom fakultetu**, osnovanom 1948. godine u okviru Tehničke velike škole, kada su izgrađena značajna opitna postrojenja savremena za to vreme (turbinsko postrojenje za ispitivanje modela turbina, pumpno postrojenje, kavitaciono postrojenje i dr.). Izgradnjom je rukovodio prof. N. Obradović. U to vreme prof. N. Obradović intenzivno se bavi razvijanjem malih turbina iz kojih je proistekao i prototip jednostavne seoske turbine ST 1950<sup>11</sup>. Radni vek prof. N. Obradovića ispunjen je stalnim usavršavanjem i doprinosima u razvoju nauke i struke o turbomašinama posebno o hidrauličnim turbinama i hidrauličnim postrojenjima. Tako se u periodu 1929. – 1931. godine usavršavao u Tehničkoj visokoj školi u Hanoveru a zatim u Göttingenu na Univerzitetu i Zavodu cara Viljema. Objavio je veliki broj značajnih radova iz oblasti turbina i uradio je mnoge projekte hidrauličnih mašina i postrojenja. Posebno je značajan projekt Kaplanove turbine koja je prvi put napravljena u našoj sredini (1929. godine). Učestvovao je u projektovanju velikog broja hidroelektrana. Dopisni član Srpske akademije nauka je postao 1961. godine a 1972. godine izabran je za redovnog člana Srpske akademije nauka i umetnosti.

Na poziv prof. N. Obradovića 1956. godine na Mašinski fakultet dolazi prof. **dr. Ivo Vušković** (\*1912. †2005) i bira se u zvanje vanrednog profesora za predmet **Hidraulične turbine**. Do poziva ne dolazi slučajno, jer još 1935. godine prof. N. Obradović uočava sposobnosti studenta I. Vuškovića i daje mu diplomski rad iz oblasti Kaplanovih turbina koji brani 1936. godine. Na Tehničkoj visokoj školi u Minhenu I. Vušković 1939. godine brani disertaciju a mentor mu je bio poznati profesor **dr.**

---

<sup>9</sup>Prva Katedra na spisku od 12 Katedri.

<sup>10</sup>Zgrada se danas nalazi u ulici Ruzveltovoj 1a (tada se nazivala Grobljanska ulica).

<sup>11</sup>Obradović N.: Seoska turbina ST 1950, Zbornik radova, SAN, knjiga XXXVII, Instituta "N. Tesla" knjiga 1, Beograd 1954.



**D. Toma (Dieter Thoma).** Tokom 1938. i 1939. godine radi u istraživačkom odeljenju fabrike hidrauličnih mašina I. M. Fojt (I. M. Voith) u Hajdenhajmu (Heidenheim-u). Od 1940. godine dr. Ivo Vušković radi u fabrici turbina Ešer Vis (Esher Wyss) u Cirihu (Zürich) – Švajcarska na mestu opitnog inženjera u laboratoriji za turbomašine. U to vreme u laboratorijama Ešer Visa osvajani su savremeni oblici hidrauličnih turbina i opreme koje je ova firma nakon rata ugradjivala u mnoge hidroelektrane.

Posle rata 1945. godine I. Vušković dolazi u zemlju gradi i postaje prvi direktor Saveznog instituta za turbomašine<sup>12</sup> u Ljubljani. Po dolasku na Mašinski fakultet prof. dr. Ivo Vušković iskusan i obogaćen mnogim znanjima o turbinama vredno radi na podizanju kadra, opremanju Zavoda za hidraulične mašine, istraživanju i na saradnji sa elektroprivredom. Uvodi sedam novih predmeta iz oblasti turbomašina, hidromašinske opreme, transporta cevi, tehničkih merenja i dr. Učestvuje u projektovanju i ispitivanju mnogih elektrana. Značajan je i njegov doprinos u projektovanju mnogih turbina. Objavio je veliki broj naučnih i stručnih radova. U penziju odlazi 1978. godine, ali ne prestaje da učestvuje u radu Katedre za hidraulične mašine i istraživanju na projektima saradnje sa privredom koji se odnose na oblast turbina i projektovanja hidroelektrana. Sa saradnicima osvaja više tipova turbina za male hidroelektrane koje se ispituju u Zavodu za hidraulične mašine na novo projektovanom opitnom postrojenju.

Za člana Naučnog društva Srbije izabran je 1985. godine. Predavanja iz predmeta **Hidraulične mašine II – turbine**, po odlasku u penziju prof. I. Vuškovića, drži **prof. Ljubisav Krsmanović** (\*1923†2005). Nakon izbora u zvanje docenta 1980. godine predmet Hidraulične mašine II – turbine preuzima **dr Miroslav Benišek**<sup>13</sup> (\*1946 –), asistent i saradnik prof. I. Vuškovića od 1972. godine. U periodu od 1981. do 1993. godine asistent za Hidraulične mašine II - turbine bio je **Miloš Nedeljković** dipl. inž., od 1993. do 1994. godine **Radomir Kilibarda** dipl. inž., a od 1994. godine ovaj posao obavlja asistent pripravnik **Darko Gerasi-**

---

<sup>12</sup>Ovaj institut je osnovan odlukom Ministarstva za mašinogradnju.

<sup>13</sup>Prof. dr M. Benišek 1972. saradnik pripravnik, 1977. asistent, 1980. docent, 1988. vanredni profesor i 1993. redovni profesor za predmete Hidraulične mašine II (turbine) i Tehniku merenja, šef katedre od 1993. do 2011. god., a u penziju odlazi 2011. godine.

**mović** dipl. inž. do 1999. godine.

Svojim prethodnicima, stvaraocima u oblasti nauke i struke u hidrauličnim turbinama u našoj sredini, svi mi a i autor lično duguje zahvalnost. Međutim, iz drugih razloga, autor se zahvaljuje i ljudima koji su potpomogli u stvaranju ove knjige. Naime, knjiga je dobila konačan oblik zahvaljujući angažovanju mnogih istraživača i saradnika. Pre svega, autor želi da izrazi posebnu zahvalnost recenzentima dr. Zoranu Protiću redovnom profesoru u penziji, dr. Svetislavu Čantraku redovnom profesoru i dr. Milošu Nedeljkoviću vanrednom profesoru na primedbama i korisnim sugestijama nakon ogromnog uloženog truda pri pažljivom čitanju teksta. Takodje zahvalnost autor duguje i Zoranu Filipoviću dipl. maš. inž. hidroenergetike na znalačkom i pažljivo komponovanom tekstu na računaru i Miodragu Nejkovu dipl. maš. teh. na pedantnom tuširanju crteža.

Štampanje i tehničko uredjenje prvog izdanja dela ove knjige (do 11 Poglavlja) podpomogla su finansijskom podrškom sledeća preduzeća: EPS JP "Djerdap" p.o. Kladovo; Javno Preduzeće "Elektroprivreda Srbije"; H.K. Janko Lisjak, A.D. Kompanija "Proizvodnja opreme"; D.D. Sistem Inženjering, Smederevo; IHTM – Preduzeće za tehnički razvoj a.d. – CPI Centar za procesno inženjerstvo d.o.o.; Svetlost – Elektrotehničko Preduzeće d.d.; Gradjevinar – Niš; Kapaprojekt – Projektovanje; Inženjering i konsalting – Niš; Metaling plus d.o.o, Beograd; Zanus – Valjevo; Inex Borac – Beograd; Boreta – Preduzeće za proizvodnju i inženjering, Beograd; SCP – Preduzeće za proizvodnju, trgovinu i usluge, Beograd; Moping inženjering – Požarevac; Marčeting – Beograd. Autor im toplo zahvaljuje na njihovoj dobroti i zajedničkoj želji da se ova knjiga pojavi pred čitaocima.

Na kraju autor se nada da će čitaoci, nakon pažljivog čitanja knjige, dati konstruktivne primedbe u vezi sadržaja i načina izložene materije i da će uočiti eventualne omaške.

Beograd, 1998. god.

Autor

## Predgovor drugom izdanju

Prošao je dugi period vremena od prvog izdanja knjige "Hidrauličke turbine". Zbog tehničkih i finansijskih razloga nije bilo mogućnosti da se pojavi drugo izdanje i pored zahtev da se to učini. Zahvaljujući prof. dr Radomiru Kaporu, redovnom profesoru Gradjevinskog fakulteta u Beogradu, njegovoj dobroti i volji ostvarena je mogućnost da se tehnički problemi otklone i da se drugo izdanje pojavi u javnosti. Takodje odlaganjem ponovljenog izdanja, ukazala se prilika da se knjiga upotpuni i novim poglavljima, koja knjizi značajno daju novu dimenziju posebno sa uradjenim brojnim primerima. Nova poglavlja predstavljaju rezultate istraživanja i stečenih iskustava autora, koja će, nadam se, dobro poslužiti istraživačima, inženjerima i studentima hidroenergetike, hidrotehnike i sličnih oblasti. U materijalima knjige prvog izdanja izvršena su izvesna usaglašavanja oznaka sa naknadnom pojavom standarda IEC i ispravljene sitnije greške.

Drugo izdanje je obogaćeno sledećim novim poglavljima:

11. Izbor tipa i osnovnih parametara obrtnog kola prototipa turbine,
12. Modelska ispitivanja hidroturbina – osnova za određivanje eksploatacionih karakteristika prototipova turbina i
13. "INDEX TEST" – metoda za određivanje kombinatorске karakteristike prototipa turbine dvojne regulacije.

Spisak literature je obogaćen novim izvorima.

Autor izražava posebnu zahvalnost recenzentima prof. dr Svetislavu Čantraku, prof. dr Milošu Nedeljkoviću i prof. dr Milunu Babiću na primeđbama i korisnim sugestijama, nakon pažljivog čitanja teksta.

Autor se nada da će čitaoci, nakon pažljivog čitanja dopunjenog izdanja knjige, dati konstruktivne primeđbe u vezi sadržaja izložene materije i da će uočiti eventualne omaške.

Beograd, 2020. god.

Autor

## Uvod

Sagledajući obilje saznanja postignutih u oblasti hidrauličnih turbina u svetu i kod nas, autor ove knjige našao se u dilemi na koji način da pristupi prikazivanju obimne i složene materije, imajući u vidu da ovu knjigu namenjuje: studentima, postdiplomcima, istraživačima i stručnjacima. Sa druge strane, znajući da je glavni oslonac razvoja hidrauličnih turbina teorijska i eksperimentalna mehanika fluida i da je potrebno pojasniti teorijska ishodišta strujnih procesa u mašinama, ova dilema postaje još izraženija. Nakon dužeg razmišljanja autor je odlučio da čitavu materiju o hidrauličnim turbinama prikaže u nekoliko knjiga. Prva, ova knjiga prikazuje opštu teoriju hidrauličnih turbina, dok će ostale knjige biti posvećene pojedinim tipovima savremenih turbina (cevne turbine, Kaplanove turbine, Fransisove turbine i Peltonove turbine) uyimajući sve specifičnosti hidrauličnog proračuna, projektovanja, ugradnje i eksploatacije.

Knjiga **Hidraulične turbine** sastoji se od trinaest poglavlja:

**POGLAVLJE 1. Razvoj hidrauličnih turbina** daje čitaocu sliku osnovnog istorijskog razvoja hidrauličnih turbina, ukazujući pri tome na put obogaćivanja znanja koja su dovela do osvajanja savremenih tipova mašina širokog raspona brzohodosti.

**POGLAVLJE 2. Vrste hidroenergetskih postrojenja i hidrauličnih mašina.** U ovom poglavlju prikazuju se osnovne vrste hidroenergetskih postrojenja i tipovi hidrauličnih mašina ugradjenih u njih. Posebno se ukazuje na mesto i značaj hidrauličnih turbina u širokoj oblasti hidrauličnih mašina i hidroenergetici.

**POGLAVLJE 3. Klasifikacija turbina.** U ovom delu knjige prikazane su uobičajene klasifikacije turbina u zavisnosti od načina pretvaranja strujne energije u mehaničku, a takodje i prema pretežnom pravcu toka vode u obrtnom kolu, odnosno preme specifičnoj brzini obrtanja. Dati su i crteži savremenih turbina kao i oblasti njihove primene.

**POGLAVLJE 4. Iskorišćenje energije rečnog toka i osnovni parametri turbine.** Ovo poglavlje daje odgovore na pitanja odakle potiče energija rečnog toka i kako se ona može iskoristiti. Definišu se osnovni

parametri turbine: protok, bruto pad, neto pad, različite snage, stepeni korisnosti turbine, brzine obrtanja i kavitacijski koeficijent.

**POGLAVLJE 5. Teorijske osnove hidrauličnih turbina.** Ovo poglavlje je najobimnije u knjizi. Razlog ovome leži u činjenici da se u ovom poglavlju daju: teorijske osnove strujanja kroz protočni trakt turbine, uslovi razmene energije u obrtnom kolu i zavisnost strujnih parametara od geometrije strujnog prostora reakcijskih turbina. Posebna pažnja posvećena je direktnom i indirektnom problemu proračuna obrtnih kola turbina.

**POGLAVLJE 6. Zakoni sličnosti hidrauličnih turbina.** Teorija mehaničke sličnosti primenjena je na hidraulične turbine. Karakteristični bezdimenzijski brojevi sličnosti, dobijeni iz geometrijske, kinematske i dinamičke sličnosti dva strujana polja, dovode se u vezu sa jediničnim parametrima turbina. Daje se optimalna veza medju jediničnim parametrima (značicama) različitih tipova turbina. U sklopu ovog poglavlja detaljno je obradjen postupak preračunavanja jediničnih parametara i hidrauličnog stepena korisnosti modela turbine na glavno izvodjenje (prototip) turbine.

**POGLAVLJE 7. Kavitacija u hidrauličnim turbinama.** Poznato je da kavitacija izaziva velike neugodnosti u radu hidrauličnih turbina. Zato u ovom poglavlju posebna pažnja posvećuje se uzrocima nastajanja kavitacije i zavisnosti kavitacije od strujnih uslova u protočnom traktu turbine. Pomoću bezdimenzijske značice sličnosti raspodele pritiska po profilu lopatice dolazi se do definicije kavitacijskog koeficijenta. Utvrđena je veza izmedju kavitacijskog koeficijenta i koeficijenta pritiska po lopatici turbine. Obezbedjenje turbine od pojave kavitacije je prioritetan zadatak projektanta i u ovom poglavlju daje se postupak odredjivanja dubine potapanja (usisne visine) i izbor kavitacijskog koeficijenta turbine. Kriterijum pravilnog izbora kavitacijskog koeficijenta ogleda se u vrednosti koeficijenta kavitacijske rezerve i njenog uticaja na stepen oštećenja. Problem preračunavanja kavitacijskog koeficijenta modela na glavno izvodjenje, zbog svog značaja razradjen je u ovom poglavlju.

**POGLAVLJE 8. Karakteristike turbina.** Ovo poglavlje posvećeno je funkcionalnim zavisnostima dimenzijskih i bezdimenzijskih parametara turbine, njihovom značaju, načinu dobijanja i oblicima prikazivanja. Iz-

medju ostalog obradjeni su i načini regulisanja protoka u turbinama.

**POGLAVLJE 9. Protočni delovi turbina.** U strujnom prostoru obrtnog kola turbine vrši se razmena energije fluida sa mehaničkim sistemom. Ostali protočni prostori od ulaza do izlaza iz turbine imaju značajnu funkciju u stvaranju uslova za uspešnu energetska razmenu. U ovom poglavlju čitalac se upoznaje sa: uvodnim komorama, prstenom statorskih lopatica, sprovodnim aparatima i sifonima turbina. Najveći deo ovog poglavlja posvećen je postupku izbora i proračuna ovih elemenata i gubicima strujne energije koji oni stvaraju u strujnom toku kroz turbinu.

**POGLAVLJE 10. Nomenklatura velikih turbina.** Autor smatra da ova knjiga ne bi bila kompletna a da nema ovog poglavlja. U ovom delu knjige prikazana su sakupljena iskustva optimalnih parametara turbina (geometrijskih, energetskih i kavitacijskih) ruskih proizvođača turbina. Niko do današnjih dana nije objavio tako detaljne podatke o velikim savremenim turbinama i na tome im moramo zahvaliti, što autor u svoje ime čini uvrštavajući ovu materiju u knjigu. Međutim, sa druge strane ovako prikazana nomenklatura, objavljena u više knjiga ruske stručne literature (koja je data u spisku literature) ima ogromnu važnost za konstruktore turbina, projektante hidroelektrana, stručnjake koji rade na revitalizaciji i povećanju snage turbina i one koji počinju da se bave ovom oblašću. Oдавно je uočeno da su globalni geometrijski parametri oblika i energetski parametri turbine strogo medjusobno zavisni za radnu tačku visokog stepena korisnosti. Ovu činjenicu duhovito je prokomentarisao prof. N. Obradović: "Turbina je odelo po meri". Kako su geometrijski oblici vremenom usavršavani tako su i turbine postizale sve više stepene korisnosti. Prikazana ruska nomenklatura daje savršene oblike turbina najvišeg stepena korisnosti.

**POGLAVLJE 11. Izbor tipa turbine i osnovnih parametara obrtnog kola prototipa turbine.** Ovo poglavlje predstavlja prirodni nastavak Poglavlja 10. U prvom izdanju ove knjige osetio se nedostatak detaljnijeg prilaza u izboru tipa i određivanju osnovnih parametara obrtnih kola prototipa turbine. Uvidjajući tu činjenicu i uvažavajući zahteve projektanata, da je neophodno prikazati postupak izbora tipa turbine i određivanje osnovnih parametara prototipa turbine, autor se potrudio da ovim poglavljem, na osnovu svojih istraživanja, upotpuni knjigu dajući svoj

doprinos ovoj problematici.

Na osnovu statističke analize velikog broja izvedenih turbina visokog stepena korisnosti, autor je iznašao i predložio postupak kojim se rešavaju problemi pri izboru tipa turbine i određuju osnovni parametri obrtnih kola. Predložio je analitičke izraze koji, sa visokim stepenom determinacije, daju vezu između parametara za turbine: cevne C, Kaplanove K, dijagonalne D, Fransisove F i Peltonove P. Koristeći ove relacije razvijen je statistički postupak izbora i određivanja dimenzijskih, energetskih i kavitacijskih parametara turbina. Takođe je prikazan postupak kombinacije primene statističkih metoda i korišćenja univerzalnih karakteristika ispitanih modela u cilju određivanja parametara prototipa turbina. Ovo poglavlje osveženo je primerima za sve navedene tipove turbina na osnovu zadatih projektnih podataka.

#### **POGLAVLJE 12. Modelska ispitivanja hidroturbina – osnova za određivanje eksploatacionih karakteristika prototipova turbina.**

U ovom poglavlju prikazan je postupak modelskih ispitivanja, nezamenjivih i pouzdanih osnova za određivanje hidrauličkih i kavitacijskih karakteristika, kao i karakteristika pobega prototipa turbine. Nakon izvršenih proračuna i određivanja oblika konstrukcije i proizvodnje modela, vrše se modelska ispitivanja, jer imaju odlučujuću važnost u istraživanju i razvoju hidrauličkih turbina, a takođe i za utvrđivanje ostvarenih stepena korisnosti i kavitacijskih koeficijenata u radnom području turbine. Opisan je postupak, počev od modelskih ispitivanja i dobijanja univerzalne karakteristike do eksploatacione karakteristike prototipa. Prikazane su univerzalna karakteristika modela i eksploataciona karakteristika postojeće cevne turbine HE Djerdap 2.

#### **POGLAVLJE 13. "INDEX TEST" – metoda za određivanje kombinatorske karakteristike prototipa turbine dvojne regulacije.**

Nakon izvršenih modelskih ispitivanja i preračunavanja na prototip turbine i zadovoljenja projektovanih parametara, izrade i ugradnje u elektranu, vrše se ispitivanje: energetskih, kavitacijskih, regulacionih i dinamičkih karakteristika. Zavisno od primenjenih postupaka merenja po standardima IEC, ispitivanja mogu da budu: apsolutna i relativna – INDEX-na. Apsolutne metode zahtevaju direktno merenje protoka, jednom od propisanih metoda, dok se INDEX metode zasnivaju na us-

vajanju nekih parametara dobijenih preračunavanjem modelskih ispitivanja. Merenjima se dobijaju relativne vrednosti karakteristika prototipa, a dobijaju se pouzdane kombinatorske karakteristike za merene konstantne neto padove. U ovom poglavlju daje se postupak merenja INDEX metodom za tri konstantna neto pada na primeru cevne turbine sa kosim dostrujavanjem vode na hidroelektranu.

Napokon, na kraju knjige, kako je to običaj, daje se spisak literature od 116 bibliografskih jedinica. Ova literatura, citirana je u tekstu, čitaocu jasno ukazuje i na dalja izučavanja. Autor smatra da će ovakav izbor poglavlja koji obuhvata materiju od edukativnog nivoa do istraživačkih rezultata drugih autora i sopstvenih objavljenih u literaturi zadovoljiti većinu stručnih i naučnih zahteva korisnika ove knjige. U budućnosti, u već najavljenim knjigama, pitanja koja su vezana za određene tipove turbine biće značajnije obradjena.



# Poglavlje 11

## Izbor tipa i osnovnih parametara obrtnog kola prototipa turbine

### 11.1 Statističke zavisnosti parametara prototipova turbina

U Poglavlju 3 ove knjige navedeno je, da sa jednim tipom (geometrijskim oblikom) turbine nemoguće je ostvariti kvalitetnu razmenu energije za sve padove i protoke vodotokova. Geometrijski oblik obrtnog kola definiše tip turbine, a koji je okarakterisan specifičnom brzinom obrtanja  $n'_{SPA}$ , odnosno  $n_{SPA}$  (videti u Poglavlju 6.2). Okvirni izbor tipa turbine i njegovih dimenzija, kao i oblici protočnih prostora (spirala, potporne lopatice, lopatice sprovođenog aparata, lopatice obrtnog kola i sifon) izuzetno utiču na kvalitet energetske razmene (voda – mehanički sistem), tj na stepen korisnosti i takođe na kavitacijska svojstva.

Određivanje parametara turbine započinje određivanjem specifične brzine obrtanja  $n'_{SPA}$ . Statističkom obradom podataka dobijenih energetskim merenjima već izvedenih turbina proizvedenih u Rusiji i Svetu, a koje su postizale najviše stepene korisnosti, određeni su koeficijenti nivoa brzohodnosti  $k$  u zavisnosti od neto pada  $H_{\Lambda}$ . Koeficijent nivoa brzohodnosti definiše se izrazom:

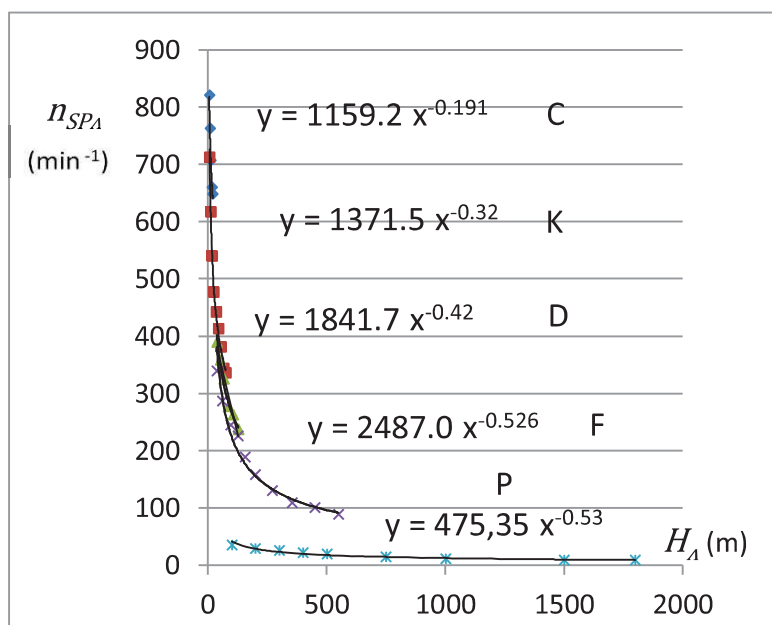
$$k = n'_{SPA} H_{\Lambda}^m \quad (11.1)$$

gde su:  $n'_{SPA}$  – specifična brzina obrtanja:

$$n'_{SP\Lambda} = 1.167nP^{0.5}H_{\Lambda}^{-1.25}\text{min}^{-1} \quad (11.2)$$

$P$  – snaga turbine u kW,  $n$  – brzina obrtanja u  $\text{min}^{-1}$  i  $m$  – eksponent koji zavisi od tipa turbine.

U ovom Poglavlju 11, izvršeno je istraživanje i određivanje statističkih zavisnosti uticajnih veličina u cilju definisanja osnovnih parametara različitih tipova turbina, najviših stepena korisnosti. Koristeći sakupljene podatke za vrednosti  $n'_{SP\Lambda}$  i  $H_{\Lambda}$  za različite tipove turbina, mogu se sačiniti dijagrami za svaki od njih. Dijagrami zavisnosti  $n'_{SP\Lambda}$  od neto pada  $H_{\Lambda}$  prikazani su na Sl.11.1



Slika 11.1: Zavisnosti specifične brzine obrtanja  $n'_{SP\Lambda}$  od neto pada  $H_{\Lambda}$  za različite tipove turbina: **C** – cevne, **K** – Kaplanove, **D** – dijagonalne, **F** – Francisove i **P** – Peltonove.

Tablica T.11.1: Vrednosti koeficijenta  $k_1$  i eksponenta  $m_1$  u zavisnosti od intervala neto padova  $H_\Delta$ .

Tip turbine	$k_1$	$m_1$	$H_\Delta$ m
Cevne turbine C	1159.2	-0.191	$5 < H < 20$
Kaplanove turbine K	1371.5	-0.320	$7 < H < 75$
Dijagonalne turbine D	1841.7	-0.420	$37 < H < 128$
Fransisove turbine F	2487.0	-0.526	$37 < H < 550$
Peltonove turbine P	475.4	-0.530	$100 < H < 1800$

Za različite tipova turbina mogu se napisati sledeći analitički izrazi u obliku:

$$n'_{SP\Delta} = k_1 H_\Delta^{m_1} \text{ min}^{-1} \quad (11.3)$$

gde su vrednosti  $k_1$  i  $m_1$  date u tablici T.11.1

Zavisno od neto pada  $H_\Delta$  određuje se vrednost  $n'_{SP\Delta}$ , ali ponekad za zadanu vrednost  $H_\Delta$  mogu se izabrati alternativno dva različita tipa turbina. Pitanje odluke definitivnog izbora donosi se nakon izbora ostalih parametara i tehnno-ekonomske analize, koja se odnosi na razmatranu hidroelektranu. Takođe treba napomenuti da se umesto vrednosti  $n'_{SP\Delta}$  koristi i vrednost specifične brzine obrtanja  $n'_{SQ\Delta}$ , definisane za protok, videti Poglavlje 6, izraze (6.72) i (6.73), odnosno:

$$n'_{SQ\Delta} = n'_{SP\Delta} / (3.65 \eta_{i\Delta}^{0.5}) = n_{11\Delta} Q_{11\Delta}^{0.5} \text{ min}^{-1} \quad (11.4)$$

gde su:  $\eta_{i\Delta}$  – optimalni unutrašnji stepen korisnosti turbine (videti Poglavlje 4.2), i može se uzeti da je:  $\eta_{i\Delta} = 0.95$ ,  $n_{11\Delta}$  – jedinična brzina obrtanja u optimalnoj tački,  $Q_{11\Delta}$  – jedinični protok u optimalnoj tački.

Na osnovu proizvedenih ispitanih različitih tipova turbina dobijeni su dijagrami zavisnosti  $n_{11\Delta}$  i  $Q_{11\Delta}$  od neto pada  $H_\Delta$ , a prikazani su na Sl.11.2 i Sl.11.3.

Za različite tipove turbina mogu se napisati sledeći analitički izrazi:

$$n_{11\lambda} = k_2 H_\lambda^{m_2} \text{ min}^{-1} \quad (11.5)$$

vrednosti  $k_2$  i  $m_2$  date su u tablici T.11.2.

*Tablica T.11.2:* Vrednosti koeficijenta  $k_2$  i eksponenata  $m_2$  u zavisnosti od intervala padova  $H_\lambda$ .

Tip turbine	$k_2$	$m_2$	$H_\lambda$ m
<b>Cevne turbine C</b>	205.95	-0.113	$5 < H < 20$
<b>Kaplanove turbine K</b>	276.35	-0.230	$7 < H < 75$
<b>Dijagonalne turbine D</b>	274.14	-0.251	$37 < H < 128$
<b>Fransisove turbine F</b>	131.90	-0.129	$37 < H < 550$
<b>Peltonove turbine P</b>	30.515	0.037	$100 < H < 1800$

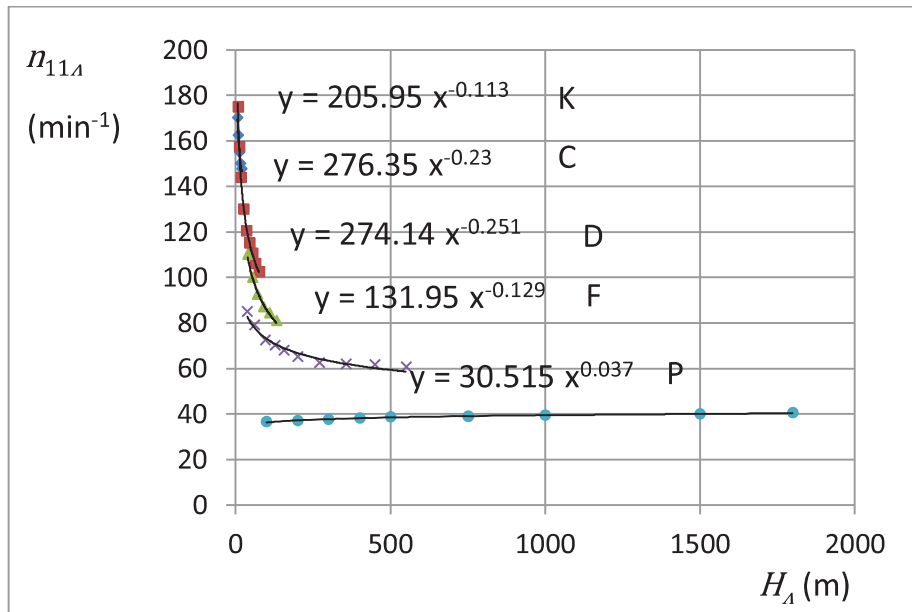
Takođe se mogu napisati i sledeći analitički izrazi za različite tipove turbina:

$$Q_{11\lambda} = k_3 H_\lambda^{m_3} \text{ m}^3/\text{s} , \quad (11.6)$$

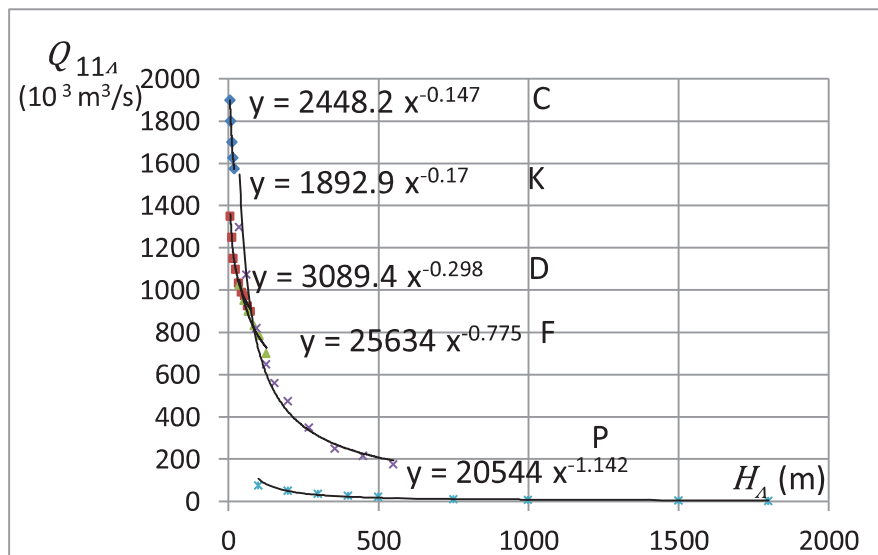
gde su vrednosti  $k_3$  i  $m_3$  date su u tablici T.11.3.

*Tablica T.11.3:* Vrednosti koeficijenta  $k_3$  i eksponenata  $m_3$  u zavisnosti od intervala padova  $H_\lambda$ .

Tip turbine	$k_3$	$m_3$	$H_\lambda$ m
<b>Cevne turbine C</b>	2.4482	-0.147	$5 < H < 20$
<b>Kaplanove turbine K</b>	1.8929	-0.170	$7 < H < 75$
<b>Dijagonalne turbine D</b>	3.0894	-0.298	$37 < H < 128$
<b>Fransisove turbine F</b>	25.634	-0.775	$37 < H < 550$
<b>Peltonove turbine P</b>	20.544	-1.142	$100 < H < 1800$



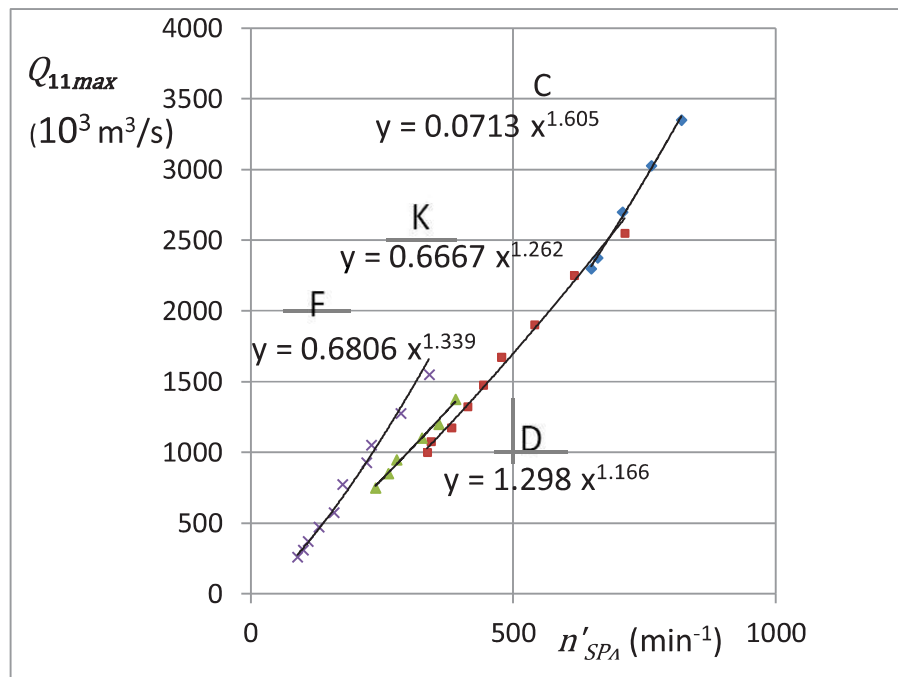
Slika 11. 2: Zavisnosti  $n_{11A}$  od neto pada  $H_A$  za različite tipove turbina: **C** – cevne, **K** – Kaplanove, **D** – dijagonalne, **F** – Fransisove i **P** – Peltonove.



Slika 11.3: Zavisnosti  $Q_{11A}$  od neto pada  $H_A$  za različite tipove turbina: **C** – cevne, **K** – Kaplanove, **D** – dijagonalne, **F** – Fransisove i **P** – Peltonove.

Statističkom obradom podataka kavitacijskih svojstava različitih tipova turbina, može se naći veza kavitacijskog koeficijenta  $\sigma_{max}$  (koji odgovara maksimalnoj vrednosti jediničnog protoka  $Q_{11max}$ ) i specifične brzine obrtnja  $n'_{SP\Delta}$ .

Vrednosti  $Q_{11max}$  za **C**, **K** i **D** uzimaju se na liniji ograničenja po kavitaciji, a vrednosti  $Q_{11max}$  za **F** uzimaju se na liniji 95% ograničenja snage turbine. Na Sl. 11.4 date su zavisnosti  $Q_{11max}$  od  $n'_{SP\Delta}$  za različite tipove turbine.



Slika 11.4: Zavisnosti  $Q_{11max}$  od  $n'_{SP\Delta}$  za različite tipove turbine: **C** – cevne, **K** – Kaplanove, **D** – dijagonalne i **F** – Fransišove.

Analitička zavisnost  $Q_{11max}$  od  $n'_{SP\Delta}$  je:

$$Q_{11max} = k_4 n'_{SP\Delta}{}^{m_4} \text{ m}^3/\text{s}, \quad (11.7)$$

gde su vrednosti  $k_4$  i  $m_4$  date u tablici T.11.4.

Tablica T.11.4: Vrednosti koeficijenta  $k_4$  i eksponenata  $m_4$  u zavisnosti od intervala padova  $H_\Lambda$ .

Tip turbine	$k_4$	$m_4$	$H_\Lambda$ m
<b>Cevne turbine C</b>	7.13E-5	1.605	$5 < H < 20$
<b>Kaplanove turbine K</b>	6.667 E-4	1.262	$7 < H < 75$
<b>Dijagonalne turbine D</b>	1.298 E-3	1.166	$37 < H < 128$
<b>Fransisove turbine F</b>	6.806 E-4	1.339	$37 < H < 550$

Maksimalna vrednost kavitacijskog koeficijenta  $\sigma_{max}$  u dozvoljenoj radnoj oblasti, može se dovesti u jednoznačnu zavisnost od specifičnog strujnog rada  $n'_{SP\Lambda}$ . Zavisnost:  $\sigma_{max} = f(n'_{SP\Lambda})$  može se prikazati analitičkim izrazom:

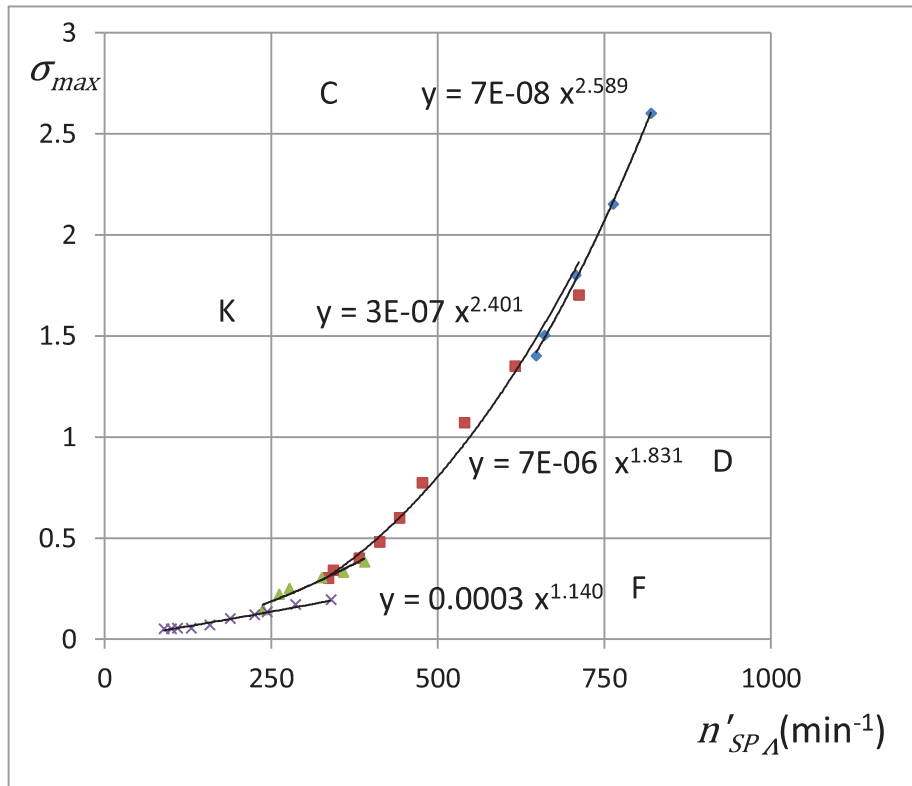
$$\sigma_{max} = k_5 n'_{SP\Lambda}{}^{m_5}, \quad (11.8)$$

gde su vrednosti koeficijenta  $k_5$  i eksponenata  $m_5$  dati u tablici T.11.5.

Tablica T.11.5: Vrednosti koeficijenta  $k_5$  i eksponenata  $m_5$  u zavisnosti od intervala padova  $H_\Lambda$ .

Tip turbine	$m_5$	$k_5$	$H_\Lambda$ m
<b>Cevne turbine C</b>	7E-8	2.589	$5 < H < 20$
<b>Kaplanove turbine K</b>	3E-7	2.401	$7 < H < 75$
<b>Dijagonalne turbine D</b>	7E-6	1.831	$37 < H < 128$
<b>Fransisove turbine F</b>	3E-4	1.140	$37 < H < 550$

Na Sl.11.5 prikazane su zavisnosti  $\sigma_{max}$  od  $n'_{SP\Lambda}$  za različite tipove turbina. Vrednosti  $\sigma_{max}$  odgovaraju vrednostima  $Q_{11max}$ . Vrednosti:  $n'_{SP\Lambda}$ ,  $n_{11\Lambda}$ ,  $Q_{11\Lambda}$ ,  $Q_{11max}$  i  $\sigma_{max}$ , prikazane na: Sl.11.1, Sl.11.2, Sl.11.3, Sl.11.4 i Sl.11.5, odnosno određuju se prema obrascima: (11.3), (11.5), (11.6), (11.7) i (11.8) i statističke su osrednjene vrednosti i mogu se menjati u odnosu na vrednosti datih na dijagramima i određenih po obrascima, za tipove turbina: **C** -  $f_p = \pm 10\%$ , **K** -  $f_p = \pm 5\%$ , **D** -  $f_p = \pm 5\%$ , **F** -  $f_p = \pm 5\%$  i **P** -  $f_p = \pm 2\%$ .



Slika 11.5 Zavisnost  $\sigma_{max}$  od  $n'_{SP_A}$  za različite tipove turbine: **C** – cevne, **K** – Kaplanove, **D** – dijagonalne i **F** – Fransisove.

Određivanje vrednosti parametara izabranog tipa turbine na osnovu podataka ovog poglavlja zasnovano je na statističkim podacima velikog broja izvedenih turbina najvišeg stepena korisnosti.



gde je:

$$\delta_{ref} = (1 - \eta_{hm\Lambda}) / \left[ (Re_{uref} / Re_{um\Lambda})^{0.16} + (1 - V_{ref} / V_{ref}) \right] \quad (12.9)$$

Koeficijent raspodele bezdimenzijskih gubitaka  $V_{ref}$  bira se u zavisnosti od tipa modela turbine: Poglavlje 6, *Tablica 6.3*. Pre pojave normi IEC 60193 1999-11, autor je izveo formule za preračunavanje, date u prvom izdanju ove knjige, kada su upotrebljene sledeće oznake:  $(\varepsilon_{ht})_{nom}$  umesto  $\delta_{ref}$ ;  $V_{nom}$  umesto  $V_{ref}$  i  $nom$  umesto  $ref$ .

Radi međusobnog upoređenja karakteristika modela, svi proizvođači moraju svoje karakteristike svesti na referentni Rejnoldsov broj:  $Re_{uref} = 7 * 10^6$ .

**D. Određivanje univerzalnih optimalnih karakteristika modela za referentni Rejnoldsov broj  $Re_{ref}$ .** Na osnovu preračunatih vrednosti za model pri  $Re_{uref}$ , određuju se propelerne univerzalne karakteristike modela:  $\eta_{hm}^* = f(Q_{11m}^*, \alpha_{SAM})$ , za svaki merni položaj lopatica OK:  $\beta_m = konst.$  (obično:  $\beta_m = -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$  i  $20^\circ$ ) i univerzalna karakteristika  $n_{11m}^* = f(Q_{11m}^*, \beta_m, \alpha_{SAM}, \eta_{hm}^*)$ , za koju je ostvarena kombinatorna veza:  $\beta_m = f(\alpha_{SAM}, n_{11m}^*)$  sa najvišim mogućim stepenima korisnosti  $\eta_{hm}^*$  pogonskih režima modela turbine. Univerzalna karakteristika se obično daje u obliku dijagrama u koordinatama  $(Q_{11m}^*, n_{11m}^*)$  sa parametarskim izolinijama:  $\beta_m = konst., \alpha_{SAM} = konst., \eta_{hm}^* = konst.$  Na slici 3.3 prikazana je univerzalna karakteristika modela postojeće cevne turbine HE Đerdap 2 za:  $Re_{uref} = 7 * 10^6$ .

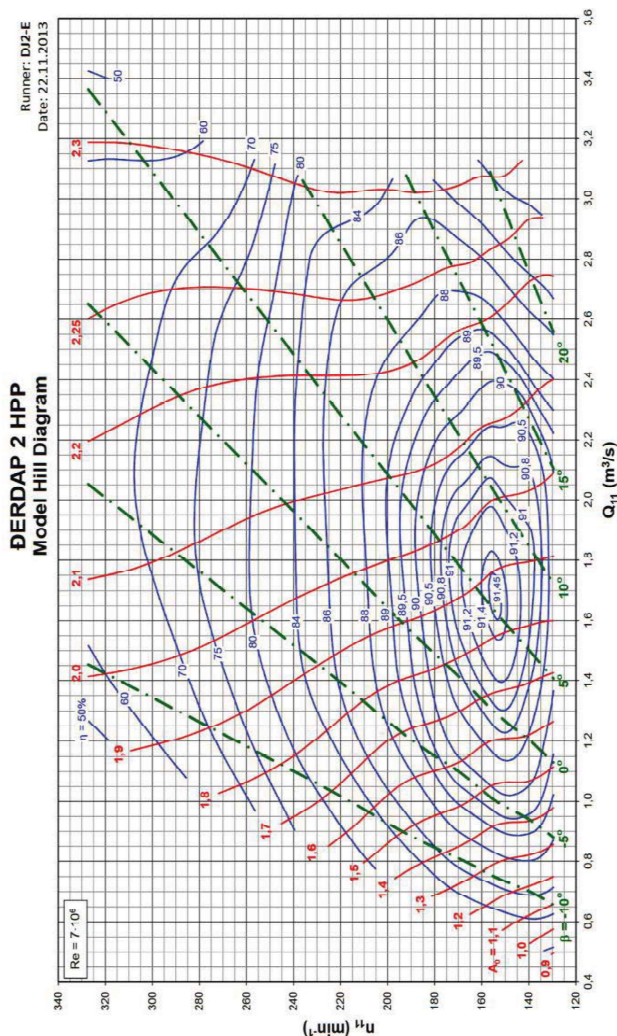
**E i E'. Preračunavanje sa modela na prototip.** Ovaj postupak se može obaviti na dva načina. Postupak E se odnosi na preračunavanje karakteristika modela "m\*" za  $Re_{uref}$ , na prototip, dok se postupak E' odnosi na preračunavanje veličina direktno sa modela "m" za  $Re_{um}$ , na prototip "p" za:  $Re_{up} = u_p D_{1p} / \nu_p$ . Preračunavanje veličina se vrši na osnovu uslova delimične sličnosti mehaničkih sistema po formulama (protok  $Q_p$ , pad  $H_p$  i snaga kola  $P_{hp}$  prototipa):

$$Q_p = Q_m (g_p/g_m)^{0.5} (H_p/H_m)^{0.5} (D_{1p}/D_{1m})^2 (\eta_{hp\Delta}/\eta_{hm\Delta})^{0.5}, \quad (12.10)$$

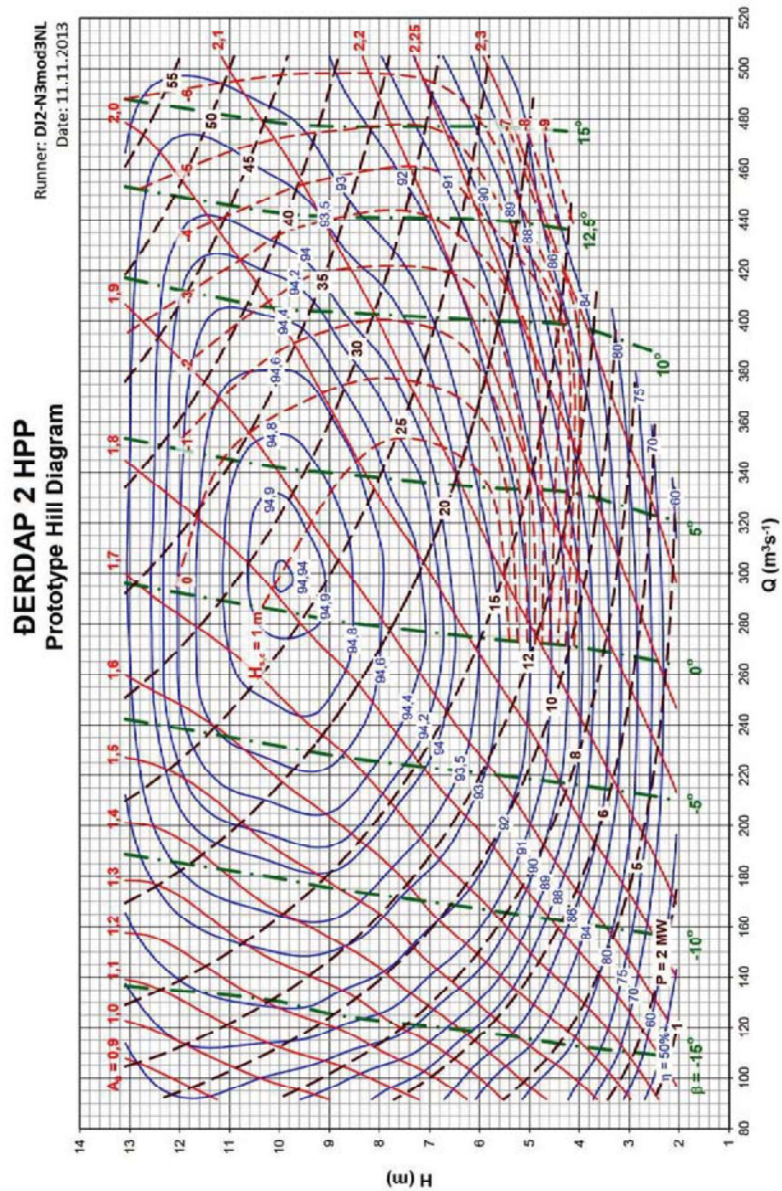
$$H_p = H_m (g_m/g_p) (n_p D_p/n_m D_m)^2 (\eta_{hm\Delta}/\eta_{hp\Delta}) \quad i \quad (12.11)$$

$$P_{hp} = P_{hm} (\rho_p/\rho_m) (g_p/g_m)^{1.5} (H_p/H_m)^{1.5} * \quad * \quad (12.12)$$

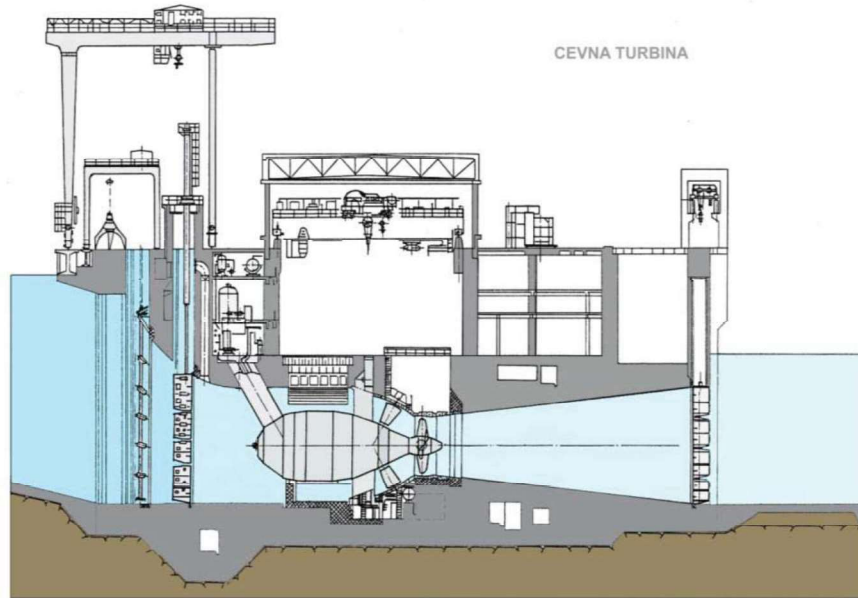
$$(D_{1p}/D_{1m})^2 (\eta_{hp}/\eta_{hm}) (\eta_{hp\Delta}/\eta_{hm\Delta})^{0.5} .$$



Slika 12.5: Univerzalna karakteristika modela postojeće turbine HE Đerdap 2 prečnika:  $D_m = 0.34$  m za  $Re_{uref} = 7 * 10^6$ .



Slika 12.6: Eksploataciona protočna karakteristika prototipa postojeće turbine HE Đerdap 2, prečnika:  $D_{1p} = 7.5\text{m}$  i brzine obrtanja:  $n_p = 62.5\text{min}^{-1}$ .



Slika 12.7: Poprečni presek elektrane HE Đerdap 2, sa cevnim agregatom prečnika obrtnog kola:  $D_{1p} = 7.5$  m.

Stepeni korisnosti  $\eta_{hp}$ , (odnosno  $\eta_{hp\Delta}$ ) se preračunavaju na osnovu formula (12.8) i (12.9):

$$\eta_{hp} = \eta_{hm} + \left[ (Re_{uref}/Re_{um})^{0.16} - (Re_{uref}/Re_{up})^{0.16} \right] \quad (12.13)$$

(pri proračunu  $\eta_{hp\Delta}$  u formulu (3.7) staviti umesto:  $Re_{um} \rightarrow Re_{uref}$  i  $\eta_{hm} \rightarrow \eta_{hm\Delta}$ .)

**F. Određivanje eksploatacionih karakteristika prototipa turbine.** Na Sl.12.6 prikazana je eksploataciona protočna karakteristika postojeće turbine HE Đerdap 2, prečnika:  $D_{1p} = 7.5$  m i brzine obrtanja:  $n_p = 62.5 \text{ min}^{-1}$ .

Na osnovu proračunatih karakteristika za prototip (postupak **E** ili **E'** za  $Re_p$ ) određuju se propelerne karakteristike prototipa turbine:  $\eta_{hp} = f(Q_p, Y_{SA})$  (gde je  $Y_{SA}$  označen hod servomotora usmernog aparata) za svaki

## Biografija autora



**Miroslav Hilarius Benišek** (majka Bisenija) rođen je 03.04.1946. god. u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju završio je u Beogradu. Mašinski fakultet u Beogradu (1965–1970), završio je sa srednjom ocenom 9,64 i diplomski 10 (deset). Vojni rok ŠRO u Zadru 1970–1971. Zaposlio se u preduzeću „Janko Lisjak” u zvanju šefa gradilišta 1 (1971–1972). Od 1972. godine stipendista RZNS u zvanju saradnika na Mašinskom fakultetu, u Beogradu, na Katedrama za hidraulične mašine i mehaniku fluida. Magistarski rad „Hidrodinamička stabilnost vrtložnog strujanja u osnosimetričnim prostorima” odbranio je 1976. god. i izabran je u zvanje asistenta na Katedri za hidraulične mašine. Doktorsku disertaciju „Vihorno strujanje u pravim kružnim cevima” odbranio je 1979. god. Za docenta na Katedri za hidraulične mašine izabran je 1980. god. i redovnog profesora 1993. god. U toku svog rada na Mašinskom fakultetu ostvario je sledeće aktivnosti: Predsednik Saveta OOUR-a za Energetsko mašinstvo Mašinskog fakulteta (1979–1981, 1981–1983, 1994–1996. i 1996–1998); Predstavnik Mašinskog fakulteta u Osnovnoj zajednici nauke Beograda u Komisiji za projekte (1987–1989); Rukovodilac Instituta za energetiku i termotehniku (1989–1984); Šef Katedre za Hidroenergetiku mašinskog fakulteta u Beogradu (1993–2011) i Rukovodilac centra za hidraulične mašine (2003–2011). Otišao u penziju 2011. god.

U zvanju saradnika i asistenta držao je vežbe iz sledećih predmeta: Hidraulične mašine 2 (turbine), Hidraulične mašine 1 (pumpe), Tehnika merenja, Pumpe i ventilatori, Turbomašine, Mehanika fluida i Strujno-tehnička merenja.

U zvanju docenta, vanrednog profesora i redovnog profesora držao je predavanja iz sledećih predmeta: Hidraulične mašine 2, Hidraulične mašine 1, Tehnika merenja, Energetska merenja (Priština), Tehnika merenja (Kraljevo i Niš), Projektovanje hidromašinskih postrojenja, Hidromašinske opreme i Energy and environment (norveški kurs). Poslediplomske studije: Strujno tehnička merenja i Specijalna poglavlja iz hidrauličnih mašina. Mentor: diplomskih radova 353, magistarskih 3 i doktorata 4. U Zavodu za hidraulične mašine izgradio je veći broj eksperimentalnih instalacija za vežbu studenata i naučno istraživački rad.

Objavio je sledeće knjige, i naučno stručne radove: Naučno–stručne knjige, monografije i udžbenici – 10; Poglavlja u monografijama međunarodnog značaja – 5; Časopisi međunarodnog značaja – 37; Međunarodni skupovi (Proceedings) – 52; Skupovi međunarodnog značaja (radovi u izvodu) – 44; Radovi u časopisima nacionalnog značaja – 12; Radovi u časopisima nacionalnog značaja (Zbornici) – 71; Skupovi nacionalnog značaja (radovi u izvodu) – 14; Naučno istraživački projekti, studije, idejni projekti, glavni projekti, ekspertize i dr. – 375; Učešće i rukovodjenje u naučno istraživačkim projektima Ministarstva za nauku i tehnologiju (MNT) – 20 + 8; Učešća na internacionalnim skupovima – 47; Učešća na nacionalnim kongresima – 71 i Projektovane i izvedene mašine i uređaji – 30.

Uporedo sa nastavnim radom na Mašinskom fakultetu ostvario je i sledeće aktivnosti: Izvestioc (Reviewer) Zentarblatt für Mathematik und Mechanik za oblast strujanja izabran (1983); Član Upravnog odbora Drinskih hidro-elektrana (1992–1994); Član odbora za vodoprivredu Privredne komore Srbije (1991–1993); Član Saveta Vlade Republike Srbije za racionalno gazdovanje energijom (1994–1996); Tehnički rukovodilac garancijskih i kompleksnih ispitivanja cevne turbine A.5 HE Djerdap 2 (1987–1989); Ispitivanja hidrauličkih karakteristika pumpnih stanica u priobalju djerdapskog jezera (PS Skorenovac, PS Ibrifor, PS Gaj Nova, PS Vrba, PS Malo Bavanište i PS Gaj Stara) (1989–1991); Član Stručne radne grupe Mešovite komisije jugoslovenskog dela za tehnička pitanja HE Djerdap (1994–2007); Rukovodilac radne grupe Muzeja Nikola Tesla

– „Delo Nikole Tesle u oblasti mašinstva” (1988–1995); Predsednik Upravnog odbora Limskih hidroelektrana (2001–2004); Tehnički rukovodilac uporednih ispitivanja modela postojeće turbine i modela rumunske revitalizovane Kaplanove turbine HE Djerdap 1 (Portile de Fier 1) u laboratoriji ASTRÖ – Grac, Austrija (2002); Strategije privrednog razvoja Srbije do 2010. god. i do 2015. god. – Oblast hidroenergetika (2002); Komisija za tehnički pregled objekata Djerdap 1 i Djerdap 2 – Predsednik dela komisije za mašinsku opremu i instalacije (2003–2004); Tehnički rukovodilac uporednih ispitivanja modela postojeće Kaplanove turbine HE Djerdap 2 i modela rumunske revitalizovane Kaplanove turbine HE Djerdap 2 (Portile de Fier 2) u laboratoriji LMH-EPF Lozana, Švajcarska (2003); Garancijska ispitivanja cevne turbine A.9 HE Djerdap 2 (2006); Tehnički rukovodilac ispitivanja modela revitalizovane Kaplanove turbine HE Djerdap 1 u laboratoriji LMZ Sankt Peterburg, Rusija (2004); Učesnik u modelskim ispitivanjima revitalizovanih turbina: HE Bajina Bašta u Laboratoriji Andritz-Vatech u Lincu, Austrija (Fransisove turbine) (2009); u Laboratoriji „Turboinstitut”-a Ljubljana Slovenija (Kaplanova turbina HE Djerdap 1) (2007) i cevna turbina HE Djerdap 2 (2012–2013) i (2015); HE Zvornik u Laboratoriji Voith-a u York-u u USA (Kaplanova turbina) (2015); Garancijska ispitivanja generatora hidrauličkih turbina Djerdap 1; Analiza primopredajnih ispitivanja turbina Djerdap 1; Rukovodilac sekcije Thermo–fluid dynamic u okviru kurseva Summer Academy u organizaciji DAAD Germany (održanih u: Ohridu, Petrovcu, Budvi i Herceg Novom) (2000–2012). Ostvario je saradnju sa sledećim Univerzitetima i Institutima: Universite Nancy – l’Institut National polytechnique de Lorraine (I.N.P.L.), Francuska; Universität Karlsruhe, Maschinenbau Fakultät Friedrich–Alexander Universität Erlangen Nürnberg, Nemačka; Institut ISPH Bucharest i Institut CCITEH Temisoara, Rumunia.

Za svoj rad dobio je sledeća priznanja: Nagrada Privredne komore Beograda za najbolji diplomski rad u 1970. godini, Nagrada Privredne komore Beograda za najbolji magistarski rad u 1976. godini, Nagrada Privredne komore Beograda za najbolju doktorsku tezu u 1980. godini, Priznanje za izuzetan doprinos razvoju nauke – Osnovna zajednica nauke Beograda 1990. godine. Plaketa prof. dr Vojislav Stojanović za izuzetne rezultate postignute u naučno–istraživačkom radu od Udruženja univerzitetskih profesora i naučnika Srbije (2006) i Povelju „Nikola

Tesla” za izuzetan doprinos u izučavanju imena i dela Nikole Tesle (2007). Zahvalnica Muzeja „Nikola Tesla” za uspešnu saradnju i doprinos u radu Muzeja (2005), Specijalno priznanje za rešenje malih hidroelektrana sa cevnim turbinama (2005) i zlatnu medalju sa likom Nikole Tesle za ventilator za održavanje ekoloških uslova u tunelima (2009) od Udruženja pronalazača Srbije. Plaketa Mašinskog fakulteta za dobročinstvo, doprinos razvoju MF i uspešnu saradnju (2011), Jubilarna medalja „Tesla III Milenijum” od Fondacije Nikola Tesla Srbija (2010), „Tesla silver coin” od Tesla Global forum, „Nikola Tesla – secret connection summit 2013” za izučavanje dela Nikole Tesle u mašinstvu (2013).

Član je sledećih naučnih i stručnih društava: Internacionalno društvo GAMM (Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik), European Mechanics Society – EUROMECH, Srpsko društvo za teorijsku i primenjenu mehaniku, Društvo za male hidroelektrane, SMEITS, YUHR i Inženjerske komore Srbije IKS. Za redovnog člana Akademije inženjerskih nauka Srbije (AINS) izabran je 2004. godine.

Bio je član uredjivačkih odbora sledećih časopisa: „Elektroprivreda” (časopis EPS-a) i „Transactions” FME – Faculty of mechanical engineering Belgrade.

Specijalne naučne oblasti kojima se bavio su: Istraživanja turbulentnih vihornih strujanja u pravim cevima i difuzorima; Istraživanja u domenu teorije preračunavanja sa modela na prototip turbine; Istraživanja u domenu kinetičke ravnoteže nevizkoznih strujanja; Strujni procesi u turbinama i Uticaj Re broja na kalibracione karakteristike Konrad sonde.

Specijalne stručne oblasti kojima se bavio: Modelska ispitivanja turbina; Ispitivanja prototipova turbina u HE; Ispitivanja turbina i pumpi u laboratoriji i na terenu; Hidraulički proračuni pumpi, turbina i ventilatora; Ispitivanja stepena korisnosti generatora turbina i Laboratorijska i terenska strujno tehnička merenja.

Najznačajnija ostvarenja su: Automatski hemijski detektor AHD za merenje toksičkih agenasa u atmosferi; Centrifugalni ventilator za hemijsku industriju; Cevna turbina; Ovitno postrojenje za ispitivanje meteosenzora za borbena vozila; Sonde za strujna merenja; Mlazni aksijalni ventilator za provetravanje tunela; Modeli: Banki turbine, Fransisove turbine i cevne turbine; Postrojenja (malo do 0.050 m<sup>3</sup>/s i veliko do 0.300 m<sup>3</sup>/s) za kalibraciju protokomera visoke tačnosti; Postrojenja za



ispitivanje vihornih strujanja; Instalacija za kalibraciju sonde za merenje brzina i pritisaka u fluidu; Šestokanalna (Konrad) sonda za merenje brzina i pritisaka u 3-D prostoru i Opitno postrojenje za ispitivanje modela turbina.

Beograd, 15.11.2020. god.

Autor

## Mišljenja i ocene recezenata

Knjiga predstavlja nastavak važnog i stalnog doprinosa autora tematici hidrauličkih turbina. Ovo prošireno i dopunjeno izdanje, sa kvalitetno prikupljenim i prikazanim gradivom, u potpunosti zaokružuje kako oblast u turbinama primenjene mehanike fluida, tako i njenu primenu u praksi. Zasnovano je najpre na teorijskim analizama pojedinih problema, a zatim njihovom konkretnom rešavanju, pri čemu posebnu vrednost predstavljaju iskustveni primeri koje autor daje iz dugogodišnjeg ekspertskog iskustva u radu na brojnim hidroelektranama. Autor nije klasični knjiški autor pojedinih delova knjige, već je dao originalna autorska rešenja u konkretnim problemima u praksi koja su zatim prikazana i u knjizi. Klasičan prilaz analizi kombinovan je sa modernim pristupom i to daje posebnu vrednost izloženoj materiji, koju autor, kao dugogodišnji profesor Fakulteta, pažljivo izlaže sveukupnoj javnosti.

Pedagoški je knjiga uradjena vrlo kvalitetno, tako da za one oblasti koje su im potrebne za polaganje ispita, studenti mogu da postupno i sa razumevanjem savladaju gradivo. Tekst i slike su vrlo jasni i predstavljaju lako čitljiv materijal koji puno pomaže učenju.

Obim knjige ističe dragoceni doprinos nauci i praksi hidrauličnih turbina, pa ne samo da predstavlja udžbenički materijal, već u potpunosti predstavlja i jasno monografsko delo. Time je u potpunosti opravdan njen nešto veći obim.

Izlazak u javnosti ove knjige biće dočekan sa radošću i toplim prijemom kako kod studenata, tako kod kolega nastavnika, istraživača, saradnika, a posebno kod inženjera u praksi kojima će predstavljati odličan vodič u rešavanju svakodnevnih problema u radu sa hidrauličnim turbinama. S obzirom da u ovoj oblasti ne postoji brojna stručna literatura, bilo bi potrebno da se ova knjiga štampa u daleko većem tiražu od onog predviđenog samo za studente hidroenergetske grupe.

prof. dr Miloš Nedeljković, Mašinski fakultet u Beogradu

Geometrija, kao kamen temeljac svih nauka, PROKRVLJENA vremenom, opisuje prostornovremenske evolucije raznovrsnih pojava u prirodi, tehnici i društvu. Susret sa ovom originalnom knjigom prof. dr Miroslava Benišeke odveo me je u jedno takvo zdanje ljudskog stvaralaštva. U naučno–stručnom zagrljaju autorovih kazivanja, u znatiželjnom čunu sam, poistovećen sa fluidnim delićem, krstarilo prostorima čudesne geometrije, koja je generisala zadivljujuće razmene energije u hidrauličnim turbinama. Autor je, matematičkim opisom i fizičkom zasnovanošću, te procese iscrpno i razumljivo približio budućim korisnicima ove riznice hidrauličkog materijala.

Predmetna knjiga ima udžbeničko–monografski karakter, sa izraženo-  
nom kako pedagoško–didaktičkom, tako i naučno–stručnom strukturom. Ovo značajno delo prof. dr Miroslava Benišeke u oblasti hidrauličnih turbina IZNEDRAVA moj predlog za štampu i srdačnu podršku njegovog pojavljivanja u znalačkim krugovima.

prof. dr Svetislav Čantrak, Mašinski fakultet u Beogradu

Sadržaj ovog dela i kvalitet i inovacije, koje ono unosi u literaturu iz oblasti hidrauličnih turbina, postavljaju ovaj rukopis prof. dr Miroslava Benišeke na najviše mesto u domaćoj i svetskoj literaturi.

Po obimu onoga što se može okarakterisati kao originalni rezultat istraživačkog i univerzitetskog opusa prof. dr Miroslava Benišeke, a što je on uneo, u pisani tekst, daje ovom njegovom autorskom delu i potrebne monografske karakteristike, pa ga ja, sa zadovoljstvom, preporučujem za štampanje kao udžbenik monografskog karaktera.

prof. dr Milun Babić, Fakultet inženjerskih nauka u Kragujevcu