

Edicija: Mehhanika 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**

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

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 poglavља 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 jednodimenzijskih 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

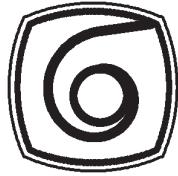
Ključne reči: Hidraulične turbine, razvoj, tipovi, strujanje, kavitacija, nomenklatura, zakoni sličnosti, karakteristike, protočni delovi, osnovni parametri turbina, primeri.

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
1 Razvoj hidrauličnih turbina	25
2 Vrste hidroenergetskih postrojenja i hidrauličnih mašina	45
3 Klasifikacija turbina	55
4 Iskorišćenje vodne energije i osnovni parametri turbina	69
4.1 Energija rečnog toka	69
4.2 Osnovni parametri hidroturbina	71
5 Teorijske osnove hidrauličnih turbina	85
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 zakriviljenog lopatičnog profila u ravanski profil	160
5.7.5	Prave profilne rešetke	165
6	Zakoni sličnosti hidrauličnih turbina	207
6.1	Zakoni mehaničke sličnosti turbina	208
6.2	Specifična brzina obrtanja, značica brzohodosti i značica prečnika	220
6.3	Karakteristični koeficijenti brzina turbine	225
6.4	Preračunavanje stepena korisnosti sa modela na glavno izvodjenje turbine	230
7	Kavitacija u hidrauličnim turbinama	251
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
8	Karakteristike hidrauličnih turbina	277
8.1	Regulisanje protoka kroz turbine	280
8.2	Oblici karakteristika turbina	284
8.2.1	Postupak odredjivanja univerzalnih karakteristika	290
9	Protočni delovi turbina	325
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
10	Nomenklatura velikih turbina	387
10.1	Nomenklatura vertikalnih Kaplanovih i Fransisovih turbina	389
10.1.1	Obрtno 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
11	Izbor tipa i osnovnih parametara obrtnog kola prototipa turbine	417
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 δ od specifične brzine obrtanja n'_{SQ}	430
11.2	Odredjivanje parametara prototipova turbine koristeći univerzalne karakteristike ispitivanja modela turbina	433
11.2.1	Odredjivanje parametara prototipova turbine 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
12	Modelska ispitivanja hidroturbina – osnova za odredjivanje eksplotacionih karakteristika prototipova turbina	565
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

13 "INDEX TEST" – metoda za određivanje kombinatorske karakteristike prototipa turbine dvojne regulacije	583
13.1 Uvod	583
13.2 Postupak merenja "INDEX TESTOM"	584
Literatura	593
Biografija autora	605
Mišljenja i ocene recenzentata	611

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. Takodje, 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 projektni tanzanti 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 opštег predmeta **Mehanika i nauka o mašinama** (mašinama) uvedenog 1873. godine izmenama i dopunama Zakona o **Velikoj školi**¹ u Beogradu. U tim izmenama nabrojani su predmeti koji se dodeljuju u nadležnost **Tehničkom fakultetu Velike škole** izmedju 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 predavanja predmeta Nauka o mašinama započela su 1887. godine postavljanjem profesora **Svetozara Zorića**² (*1854†1931). Profesor mehaničke tehnologije Tehničkog fakulteta Velike škole **Toša Selesković**³ (*1856†1901) konstruisao je prvu srpsku turbinu koja je proizvedena u kragujevačkoj fabriki. U toku razvoja mašinske nauke u Kraljevini Srbiji u okviru Tehničkog fakulteta formira

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

²Prof. S. Zorić je diplomirao 1880. god. na politehnicu u Karlsruheu.

³Prof. T. Selesković je diplomirao 1879. god. na politehnicu 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**⁴ (*1880†1954). Svoja predavanja prof. V. Farmakovski sređuje i 1925. godine izdaje prvi udžbenik⁵ 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 literature⁶

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

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**

⁴Prof. V. Farmakovski je prethodno bio profesor Kijevskog politehničkog instituta.

⁵Farmakovski V.: Hidraulički motori, izdanje Tehničkog društva na beogradskom Univerzitetu, štamparija "Sv. Sava", Brankova broj 16, Beograd 1925.

⁶Navedene reference predstavljaju tadašnju najsavremeniju literaturu iz oblasti hidrauličnih turbina.

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

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

za hidraulične mašine i postrojenja⁹ 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 zgradbi Tehničkog fakulteta postaje tesan, tako da je za potrebe Mašinskog odseka podignuta 1940. godine posebna zgrada¹⁰ za smeštaj laboratorijskih instalacija je nastavljena posle rata na **Mašinskom fakultetu**, osnovanom 1948. godine u okviru Tehničke velike škole, kada su izgradjena 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 1950¹¹. 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.**

⁹Prva Katedra na spisku od 12 Katedri.

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

¹¹Obradović 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 Cirihi (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 turbomašine¹² 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**¹³ (*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-**

¹²Ovaj institut je osnovan odlukom Ministarstva za mašinogradnju.

¹³Prof. 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 pomogli 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 пензији, dr. Svetislavu Čantraku redovnom profesoru i dr. Milošu Nedeljkoviću vanrednom profesoru na primedbama i korisnim sugestijama nakon ogromnog uloženog truda pri pažljivom čitanju teksta. Takođe zahvalnost autor duguje i Zoranu Filipoviću dipl. inž. hidroenergetike na znalačkom i pažljivo komponovanom tekstu na računaru i Miodragu Nejkovu dipl. inž. 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 nade 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 poglavља 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 grešake.

Drugo izdanje je obogaćeno sledećim novim poglavljima:

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

Spisak literature je obogaćen novim izvorima.

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

Autor se nuda da će čitaoci, nakon pažljivog čitanja dopunjeno izdanja knjige, dati konstruktivne primedbe u vezi sadržaja izložene materije i da će uočiti eventualne omaške.

Beograd, 2020. god.

Autor

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 $n'_{SP\Lambda}$, odnosno $n_{SP\Lambda}$ (videti u Poglavlju 6.2). Okvirni izbor tipa turbine i njegovih dimenzija, kao i oblici protočnih prostora (spirala, potporne lopatice, lopatice sprovođnog 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 $n'_{SP\Lambda}$. Statističkom obradom podataka dobijenih energetskim mernjima 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_Λ . Koeficijent nivoa brzohodnosti definiše se izrazom:

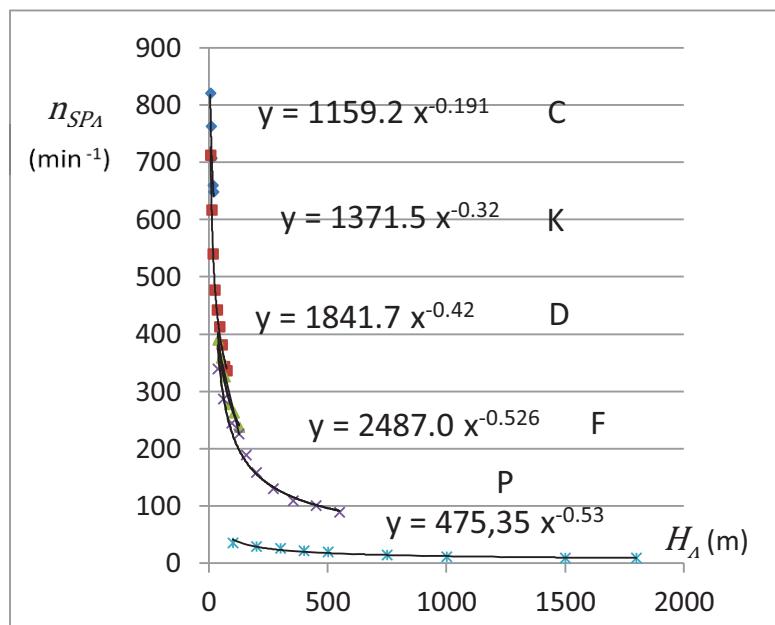
$$k = n'_{SP\Lambda} H_\Lambda^m \quad (11.1)$$

gde su: $n'_{SP\Lambda}$ – specifična brzina obrtanja:

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

P – snaga turbine u kW, n – brzina obrtanja u 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'_{SPA} i H_{Λ} za različite tipove turbina, mogu se sačiniti dijagrami za svaki od njih. Dijagrami zavisnosti n'_{SPA} od neto pada H_{Λ} prikazani su na Sl.11.1



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

Tablica T.11.1: Vrednosti koeficijenata k_1 i eksponenata m_1 u zavisnosti od intervala neto padova H_Λ .

Tip turbine	k_1	m_1	H_Λ 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 tipove turbina mogu se napisati sledeći analitički izrazi u obliku:

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

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

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

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

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

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

Za različite tipove turbina mogu se napisati sledeći analitički izrazi:

$$n_{11\Lambda} = k_2 H_{\Lambda}^{m2} \text{ min}^{-1} \quad (11.5)$$

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

Tablica T.11.2: Vrednosti koeficijenata k_2 i eksponenata m_2 u zavisnosti od intervala padova H_{Λ} .

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

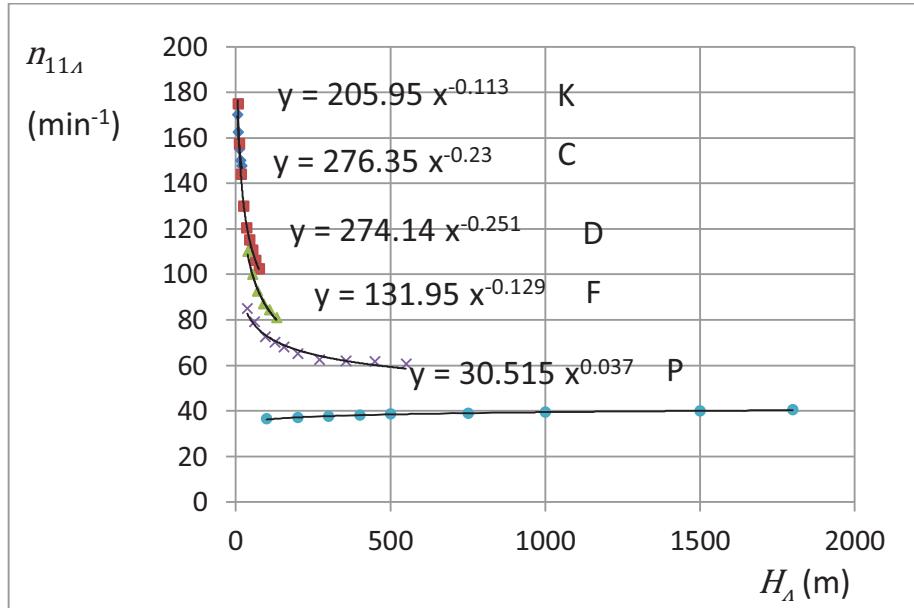
Takođe se mogu napisati i sledeći analitički izrazi za različite tipove turbine:

$$Q_{11\Lambda} = k_3 H_{\Lambda}^{m3} \text{ m}^3/\text{s} , \quad (11.6)$$

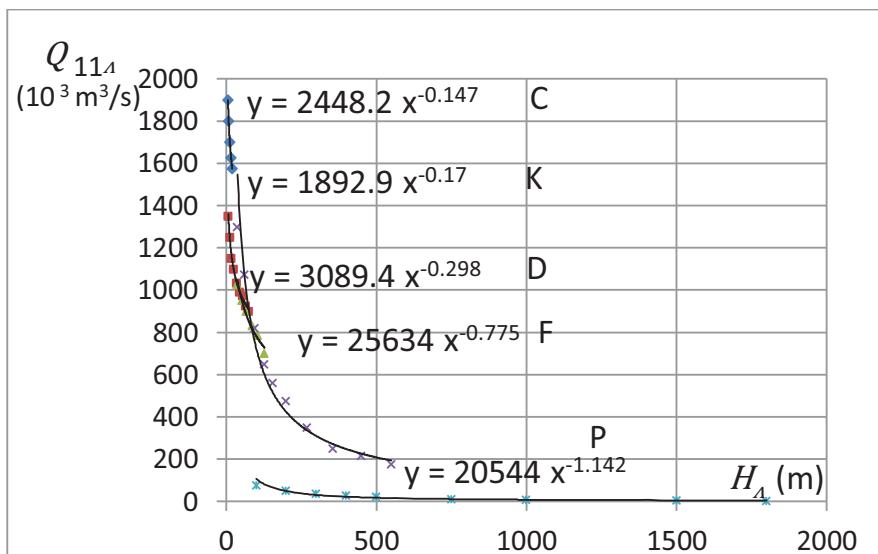
gde su vrednosti k_3 i m_3 date su u tablici T.11.3.

Tablica T.11.3: Vrednosti koeficijenata k_3 i eksponenata m_3 u zavisnosti od intervala padova H_{Λ} .

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



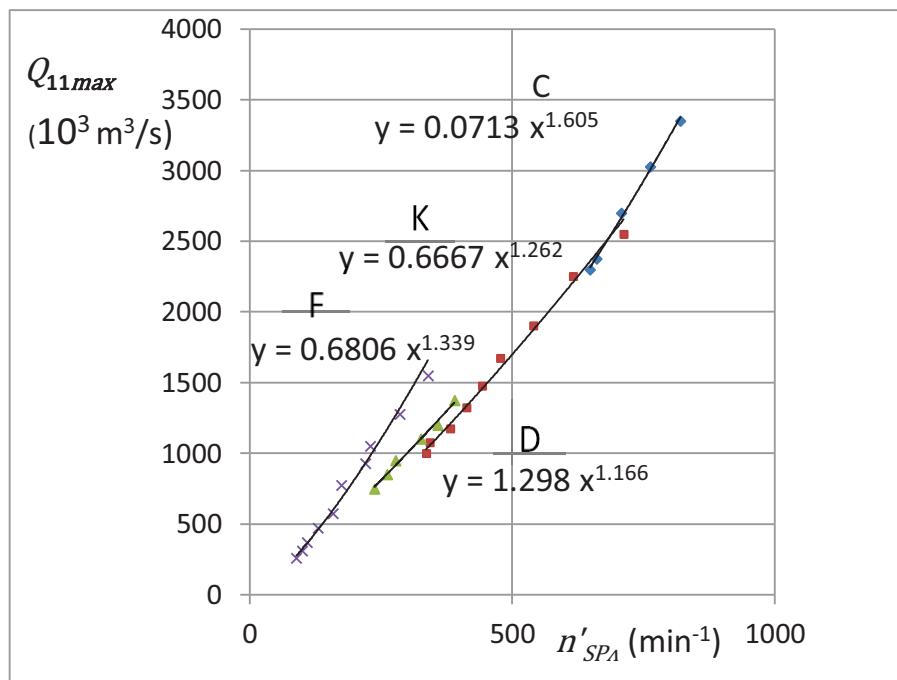
Slika 11.2: Zavisnosti n_{11A} od neto pada H_A za različite tipove turbina:
C – cevne, **K** – Kaplanove, **D** – dijagonalne, **F** – Fransisove i **P** – Peltonove.



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 σ_{max} (koji odgovara maksimalnoj vrednosti jediničnog protoka Q_{11max}) i specifične brzine obrtanja n'_{SP_A} .

Vrednosti Q_{11max} za **C**, **K** i **D** uzimaju se na liniji ograničenja po kavaciji, 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_A} za različite tipove turbine.



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

Analitička zavisnost Q_{11max} od n'_{SP_A} je:

$$Q_{11max} = k_4 n'_{SP_A}^{m4} \text{ m}^3/\text{s}, \quad (11.7)$$

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

Tablica T.11.4: Vrednosti koeficijenata k_4 i eksponenata m_4 u zavisnosti od intervala padova H_Λ .

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

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

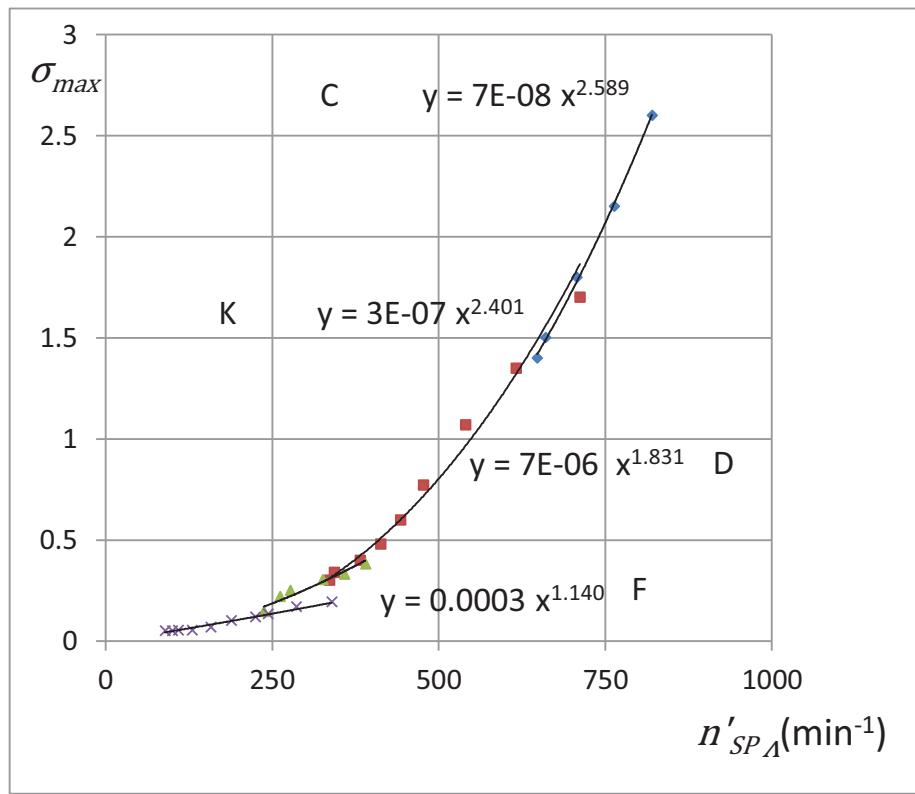
$$\sigma_{max} = k_5 n'^{m_5}_{SPA}, \quad (11.8)$$

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

Tablica T.11.5: Vrednosti koeficijenata k_5 i eksponenata m_5 u zavisnosti od intervala padova H_Λ .

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

Na Sl.11.5 prikazane su zavisnosti σ_{max} od n'_{SPA} za različite tipove turbinu. Vrednosti σ_{max} odgovaraju vrednostima Q_{11max} . Vrednosti: n'_{SPA} , $n_{11\Lambda}$, $Q_{11\Lambda}$, Q_{11max} i σ_{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 σ_{max} od n'_{SPA} za različite tipove turbina: **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:

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

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 označbe: $(\varepsilon_{ht})_{nom}$ umesto δ_{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: $Re_{uref} = 7 * 10^6$.

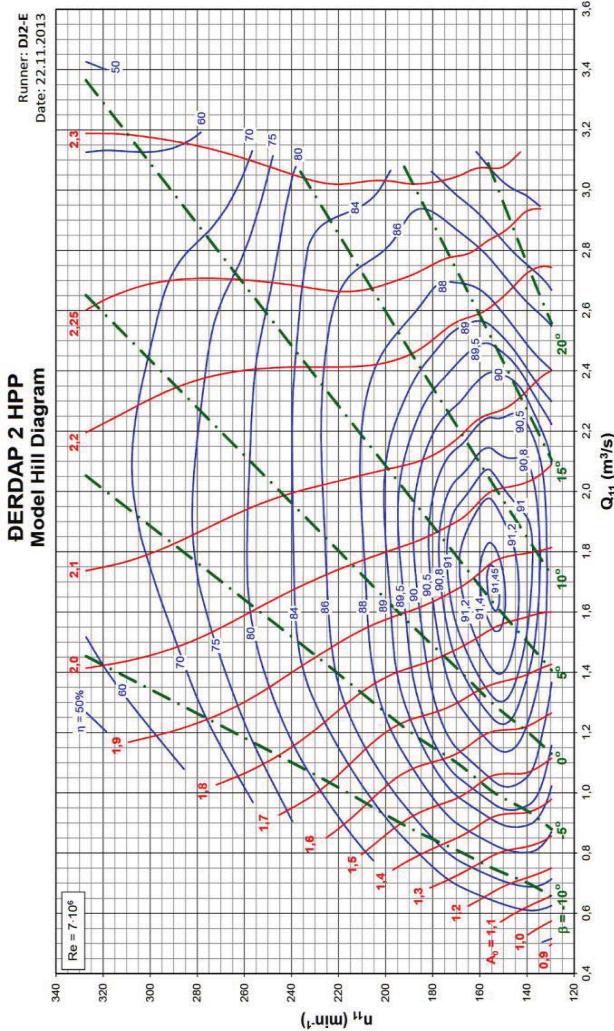
D. Određivanje univerzalnih optimalnih karakteristika modela za referentni Rejnoldov broj Re_{ref} . Na osnovu preračunatih vrednosti za model pri Re_{uref} , određuju se propelerne univerzalne karakteristike modela: $\eta_{hm}^* = f(Q_{11m}^*, \alpha_{SAM})$, za svaki merni položaj lopatica OK: $\beta_m = konst.$ (obično: $\beta_m = -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ i 20°) 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 η_{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 postoeće 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):

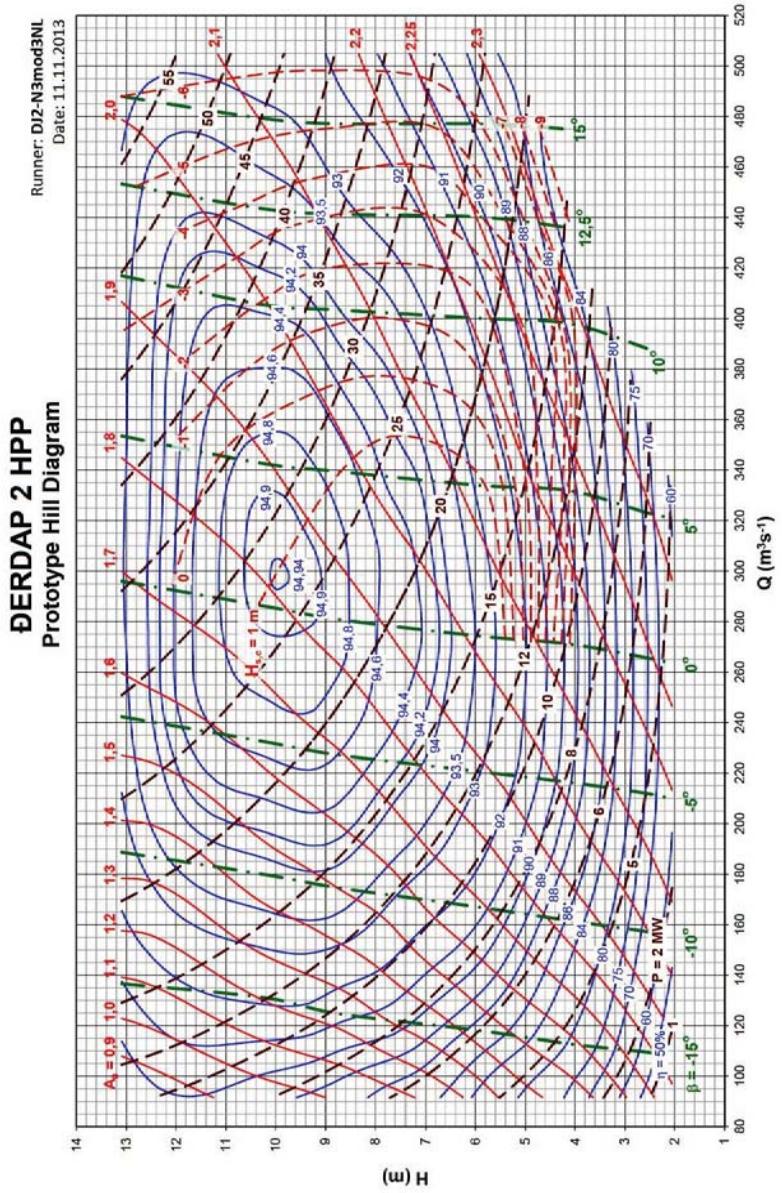
$$Q_p = Q_m \left(g_p / g_m \right)^{0.5} \left(H_p / H_m \right)^{0.5} \left(D_{1p} / D_{1m} \right)^2 \left(\eta_{hp\Lambda} / \eta_{hm\Lambda} \right)^{0.5}, \quad (12.10)$$

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

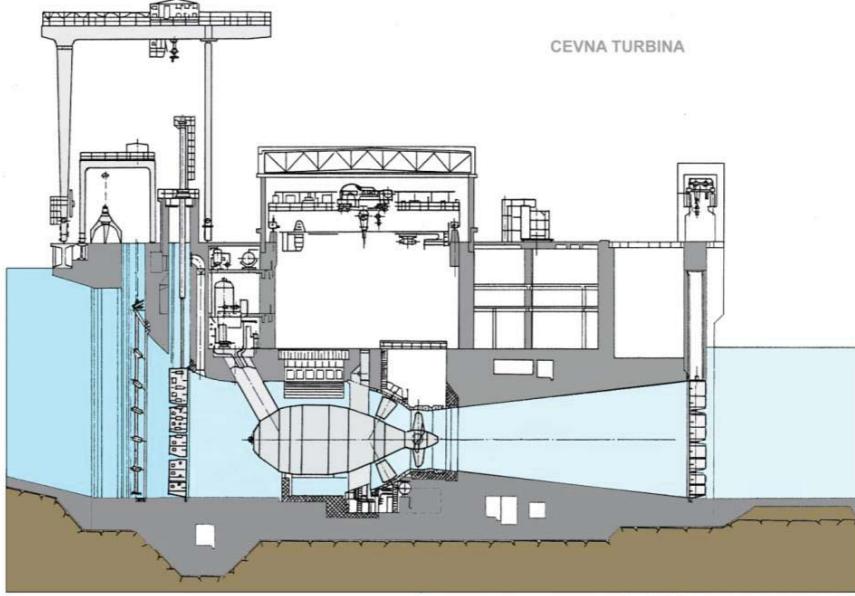
$$P_{hp} = P_{hm} \left(\rho_p / \rho_m \right) \left(g_p / g_m \right)^{1.5} \left(H_p / H_m \right)^{1.5} * \\ \left(D_{1p} / D_{1m} \right)^2 \left(\eta_{hp} / \eta_{hm} \right) \left(\eta_{hp\Lambda} / \eta_{hm\Lambda} \right)^{0.5}. \quad (12.12)$$



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



Slika 12.6: Eksplotaciona 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 η_{hp} , (odnosno $\eta_{hp\Lambda}$) se preračunavaju na osnovu formula (12.8) i (12.9):

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

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

F. Određivanje eksploracionih karakteristika prototipa turbine. Na Sl.12.6 prikazana je eksploraciona 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

Mišljenja i ocene recezenata

Knjiga predstavlja nastavak važnog i stalnog doprinosa autora tematice 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 ekspertskeg 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 opravдан 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 Benišeka odveo me je u jedno takvo zdanje ljudskog stvaralaštva. U naučno–stručnom zagrljaju autorovih kazivanja, u znatiželjnom čunu sam, poistovećen sa fluidnim delićem, krstario prostorima čudesne geometrije, koja je generisala zadržavajuće razmene energije u hidrauličnim turbinama. Autor je, matematičkim opisom i fizičkom zasnovanošću, te procese iscrpljivo i razumljivo približio budućim korisnicima ove riznice hidrauličkog materijala.

Predmetna knjiga ima udžbeničko–monografski karakter, sa izraženom kako pedagoško–didaktičkom, tako i naučno–stručnom strukturom. Ovo značajno delo prof. dr Miroslava Benišeka 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, postavljuju ovaj rukopis prof. dr Miroslava Benišeka 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 Benišeka, 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