

# DIJAGNOSTIKA NJIHANJA SNAGE CIJEVNIH AGREGATA HE DUBRAVA

Branko B a j i ć, Luksemburg/Zagreb

UDK 621.311.21.005  
PRETHODNO PRIOPĆENJE

Na osnovi multidimenzionalnih ispitivanja kavitacije, formulira se i verificira dijagnoza uzroka njihanja snage u ritmu jednom na okret na cijevnim agregatima HE Dubrava snage po 40 MW. Uzrok njihanja je jaka iako slabo erozivna kavitacija, koja, zbog rada izvan projektnog režima, horizontalnog položaja vratila i velikog promjera radnog kola, te neujednačene i nedovoljne kavitacijske kvalitete lopata radnog kola, pulsira jednom na okret.

**Ključne riječi:** fluktuacije snage, kavitacija, multidimenzionalna dijagnostika, cijevna turbina, HE Dubrava.

## Uvod

Od puštanja u pogon 1989. godine, na cijevnim agregatima HE Dubrava dolazi do njihanja snage u ritmu jednom na okret, na agregatu A razmjerno jakog a nešto slabijeg na agregatu B. Njihanje opterećuje konstrukciju i skraćuje životni vijek postrojenja. U periodu od 1990. do 2002. godine, iskušan je niz pristupa ovom problemu 1 – 12, no uzrok pojave nije utvrđen.

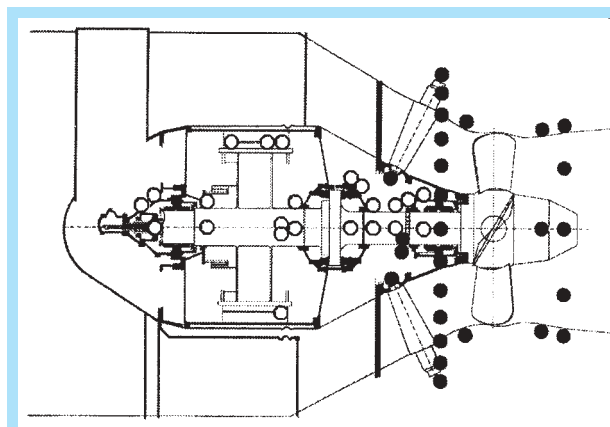
Vibro-akustička dijagnoza kavitacije u turbini\* agregata A na Dubravi, koja je, multidimenzionalnom metodom Korto Cavitation Services 13,14, izvedena 2002. godine (sl. 1), ukazala je na moguću vezu kavitacije i njihanja snage 14. Nakon toga je, uz korištenje svih dostupnih eksperimentalnih podataka o njihanju snage 15 i kavitaciji u turbini A, iz naravi 14 i modelskih 16,17, ta mogućnost detaljno analizirana. Jedan od ciljeva analize bio je da se utvrdi u kojoj je mjeri njihanje snage posljedica okolnosti da turbine na Dubravi rade s oko 1,5 m nižom donjom vodom od projektne jer (još) nije izgrađena planirana nizvodna elektrana.

Ovdje se izvješćuje o rezultatima te analize. Najprije se bilježi izvedena dijagnoza, potom argumenti na kojima se ona zasniva, a na kraju se još razmatraju praktične implikacije nalaza, uključivši one oko utjecaja donje vode.

## DIJAGNOZA

Njihanje snage agregata A HE Dubrava uzrokuje kavitacija, koja, zbog horizontalnog položaja vratila i velikog promjera radnog kola, pulsira jednom na okret.

\* Osnovni podaci o turbinama: snaga 40 MW; nazivni pad 17,5 m; nazivni protok 250 m<sup>3</sup>/s; brzina vrtnje 125 min<sup>-1</sup>; promjer radnog kola 5,4 m; broj lopata radnog kola 4; broj lopata privodnog kola 24.



**Slika 1.** Agregat A HE Dubrava s osjetilima rabljenim u multidimenzionalnim dijagnostičkim ispitivanjima. Za dijagnostiku kavitacije i njihanja snage iskorištena su, uz izvore podataka o režimu, osjetila označena punim kružićima.

Njihanje postaje jako kad se na lopatama radnog kola razvije jaka slojasta kavitacija, a posebno jako kad se na lopatama privodnog kola, naročito gornjim, zaus-tavi smeće; ono kviri nastrujavanje radnog kola, pa pospješuje razvoj kavitacije. Kavitacijska je kvaliteta lopata radnog kola različita; jedna kavitira posebno jako – otud ritam njihanja od jednom na okret.

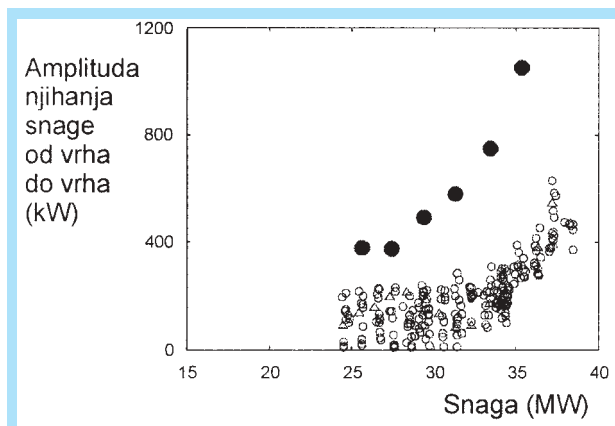
## PODACI IZ ISPITIVANJA

### Njihanje snage

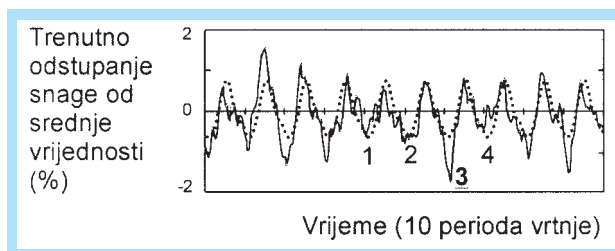
Monitoringom njihanja snage, koji je obuhvatio velik broj različitih režima rada agregata A HED 15, nađene su, u skladu sa zapažanjem osoblja elektrane 18, dvije klase procesa njihanja snage:

- slabo njihanje, koje traje neprestano, i
- jako njihanje, koje nailazi povremeno a može se eliminirati samo zaustavljanjem i ponovnim pokretanjem stroja, ne i samim prelaskom u prazni hod ili mehaničku vrtnju; tijekom ispitivanja naišao je samo jedan slučaj jakog njihanja.

Nađena ovisnost amplitude njihanja o snazi zabilježena je na sl. 2, a na sl. 3 ilustriran je valni oblik promjenljive komponente snage.



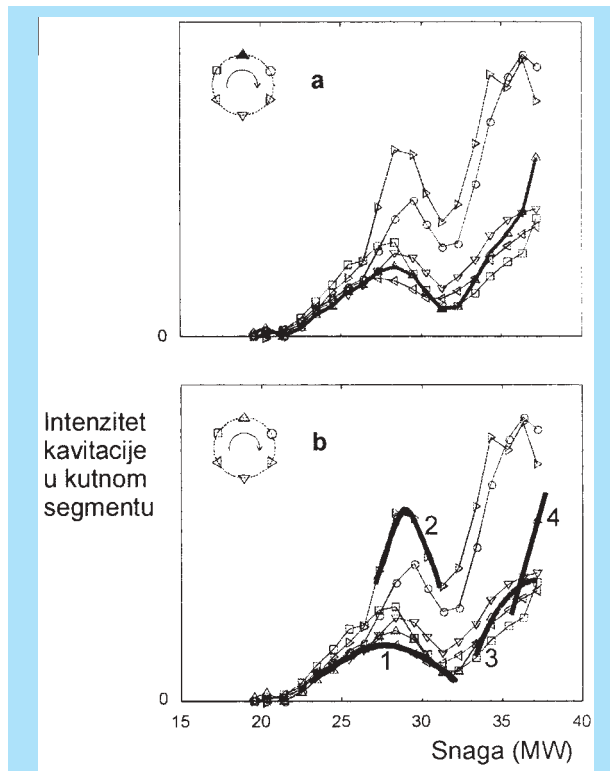
Slika 2. Izmjerena ovisnost o snazi periodične komponente otklona trenutnog iznosa snage od srednje vrijednosti. Prazni kružići – slabo njihanje, puni kružići – jako njihanje.



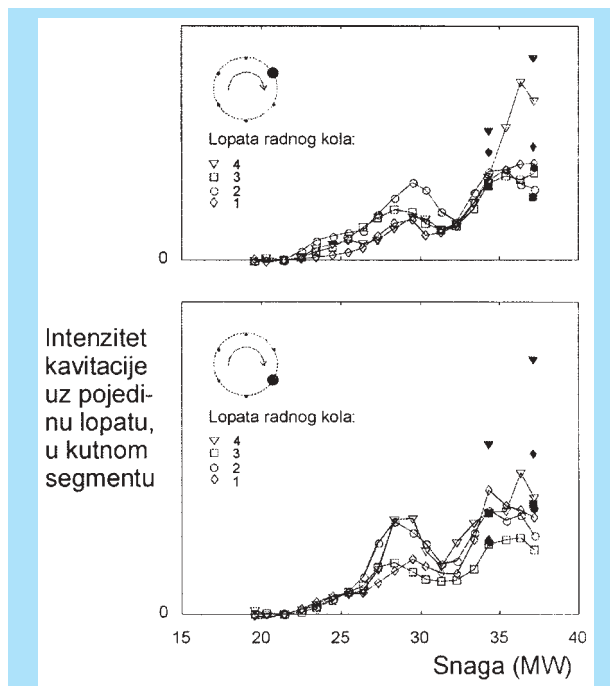
Slika 3. Karakteristični odsječak valnog oblika pojave njihanja snage, snimljen na visokim snagama turbine (puna crta) i aproksimacija njegove determinističke, polagano promjenljive komponente (točkice)

**Kavitacija**

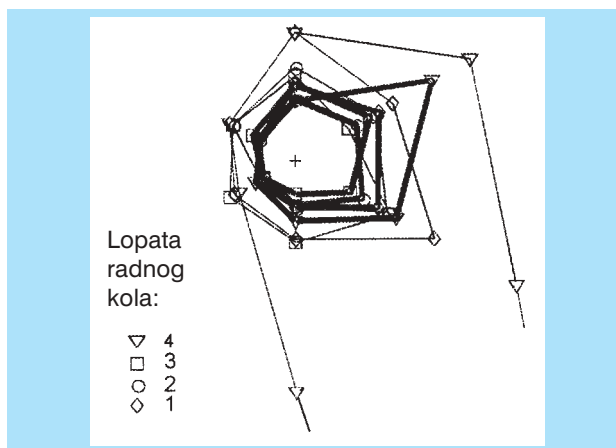
Multidimenzionalna metoda dijagnostike i monitoringa, primijenjena pri ispitivanju kavitacije [14], omogućuje prostorno razlučivanje kavitacije, razlučivanje kavitacije iza pojedinih lopata radnog kola, razlikovanje pojedinih kavitacijskih mehanizama, kao i kombinacije postupaka s takvim razlučivanjima. Uz grubu prostornu rezoluciju (po kutnim segmentima unutar turbine), takvi rezultati ispitivanja prikazani su na sl. 4 – 7 [14], i to na sl. 4 – 6 u prirodnom stanju stroja, a na sl. 7 sa simuliranjem greške koja ilustrira utjecaj nepovoljnog nastrojavanja radnog kola na kavitaciju. Kao intenzitet kavitacije, na slikama je prikazana vibro-akustička veličina koja je u slučaju erozivne kavitacije proporcionalna brzini odnosa metala, a za sve je tipove kavitacije definirana jednako.



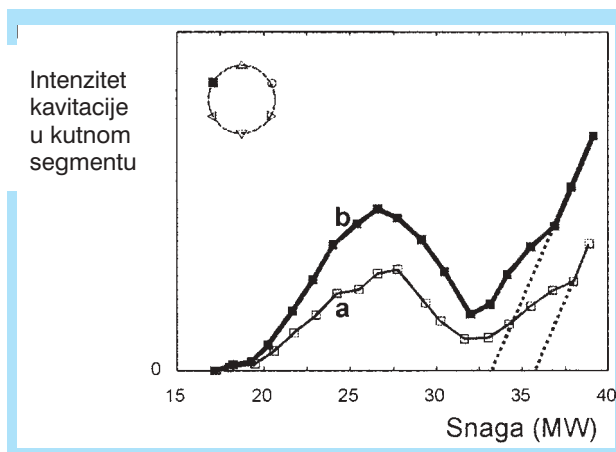
Slika 4. Intenzitet kavitacije u 6 kutnih segmenata turbine označenih sa 6 znakova (pogled nizvodno; strelica označuju smjer vrtnje) [14]. Na slici a posebno je, debelom crtom, označen kutni segment s najnižim tlakom, prema gore, a na slici b tragovi četiri kavitacijska mehanizma koji djeluju u turbini.



Slika 5. Intenzitet kavitacije uz svaku od 4 lopate radnog kola, u dva kutna segmenta – desno gore i desno dolje [14]. Prazni znakovi i crte – režimi sa slabim njihanjem snage, puni znakovi – režimi s jakim njihanjem snage.



Slika 6. Intenzitet kavitacije uz svaku od 4 lopate radnog kola (radijalna koordinata) u ovisnosti o trenutačnom kutnom položaju radnog kola mjerenom položajem lopate 4 (kutna koordinata) [14]. Debele crte – slabo njihanje, tanke crte – jako njihanje snage.

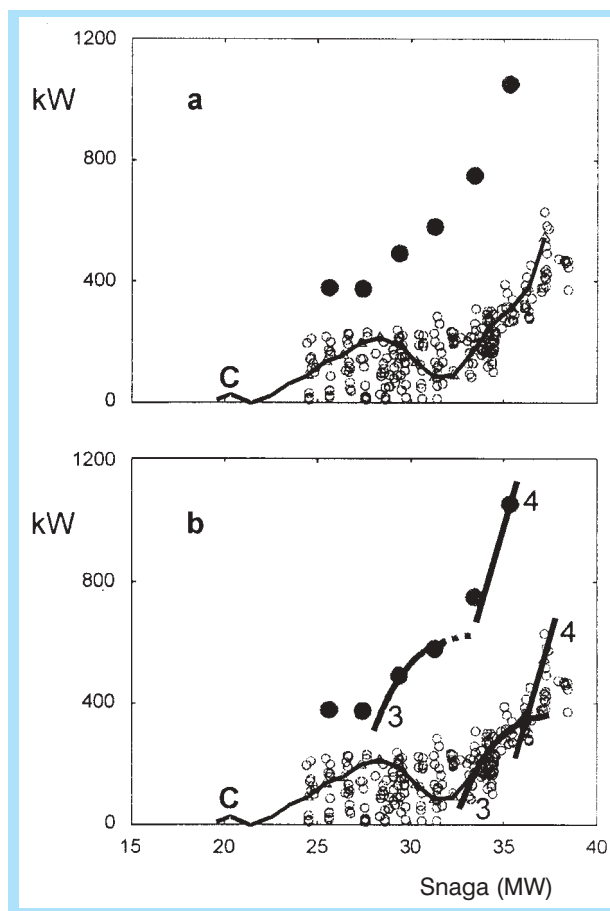


Slika 7. Utjecaj pogrješnog položaja privodne lopate [14] – intenzitet kavitacije u kutnom segmentu iza lopate otvorene za 5° više nego po kulisi: (a) lopata u normalnom položaju, (b) lopata zakrenuta

**ANALIZA**

**Brzina promjene**

Ocjena periodične komponente izmjerenog valnog oblika fluktuacija snage, prikazana na sl. 3, može poslužiti kao svojevrsna referencija pri prosudbi brzine promjene izmjerenog valnog oblika njihanja snage. Kako se vidi iz slijeda perioda 1-2-3-4, promjena trenutnog iznosa snage je vrlo brza: znatan otklon snage od prosjeka događa se već unutar jednog perioda vrtnje. Dva su izravna zaključka: (a) za bilo kakav rezonantni mehanizam (generiranja pojave osnovnog ritma jednom na okret) ovo je prebrzo; (b) kavitacija, za koju je tipično da se, reagirajući na slučajne promjene u uvjetima nastrojavanja, mijenja već unutar dijela okreta, mogla bi – što se brzine promjena tiče – izazvati pojavu poput 1-2-3-4.



Slika 8. Podaci o ovisnosti amplitude njihanja snage o postavljenoj snazi agregata (sa sl. 2), uspoređeni s podacima o ovisnosti intenziteta kavitacije o snazi: (a) njihanje u usporedbi s ovisnošću intenziteta kavitacije u gornjem kutnom segmentu (krivulja C preuzeta sa sl. 4a); (b) njihanje, slabo i jako, u usporedbi s oblicima ovisnosti kavitacijskih mehanizama o snazi (mehanizmi 3 i 4 sa sl. 4b)

**Ovisnost o snazi**

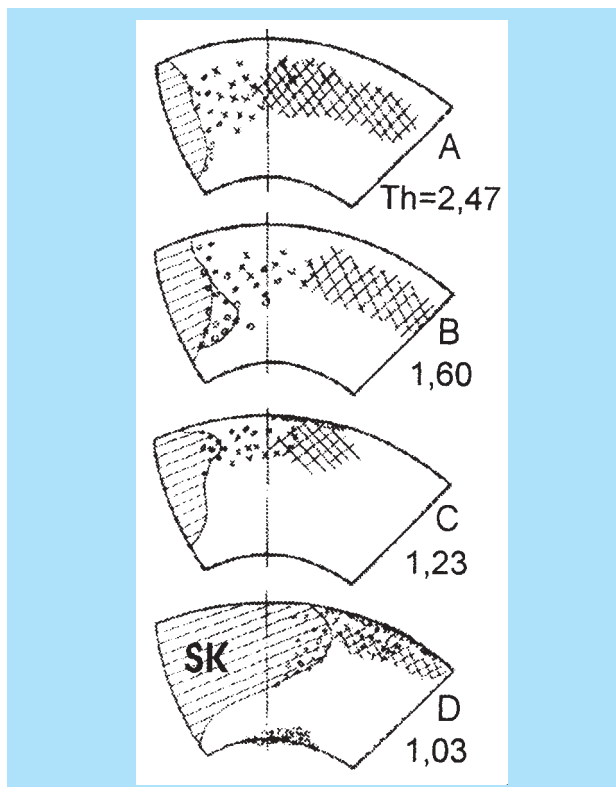
Usporedba podataka o ovisnosti o snazi njihanja i kavitacije, izvedena iz sl. 2 i 4 a prikazana na sl. 8, ukazuje na dobro podudaranje karakterističnih oblika tih ovisnosti. I doista, na višim iznosima snage, gdje njihanje najjače dolazi do izražaja, ono slijedi karakterističan nemonotoni tok ovisnosti o snazi kavitacije (sl. 8a), a u tome se razabiru tragovi kavitacijskih mehanizama što djeluju na višim i visokim snagama (sl. 8b).

**Ovisnost o položaju radnog kola**

Oblik ovisnosti intenziteta kavitacije o trenutnom kutnom položaju radnog kola, sl. 6, ili, točnije, razlika tog oblika u slučaju slabog i jakog njihanja snage, pokazuje da su kavitacija i jako njihanje povezani, te da ta veza ima vremenski tok koji odgovara ritmu njihanja: jednom na okret, unutar manjeg dijela okreta, dolazi do eksplozivnog rasta intenziteta kavitacije kad agregat jako njiše.

**INTERPRETACIJA**

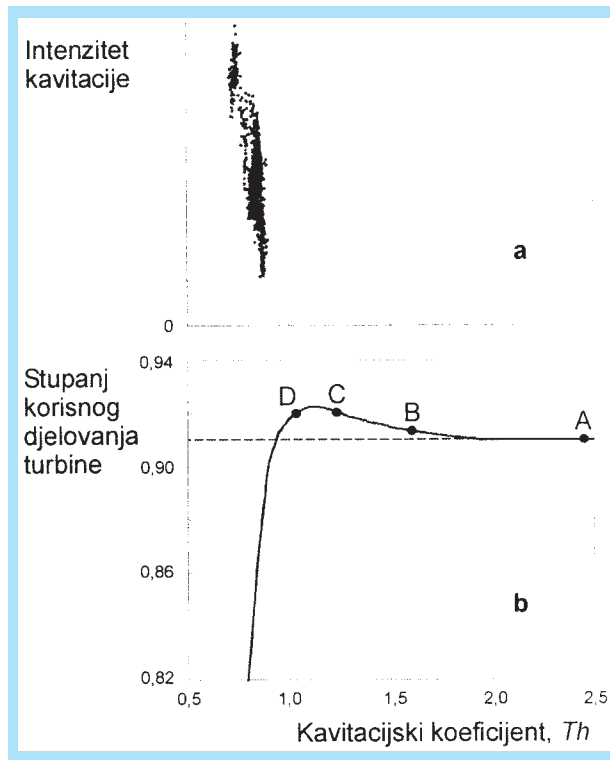
Na sl. 9 i 10b dani su rezultati modelskih ispitivanja kavitacije turbina HE Dubrava provedenih u Turboinštitutu 16 ; zapisi o obliku kavitacije A–D na sl. 9 odnose se na jednako označene režime na sl. 10b. Kavitacijski koeficijent,  $Th$ , definiran je\* kao omjer razlike tlaka na reprezentativnom mjestu i kritičnog tlaka, izraženih u visinama stupca vode, i neto pada; kritični je tlak ocijenjen tlakom pare vode na danoj temperaturi. Pri tom je u naravi (sl. 10a), zbog horizontalnog položaja vratila i velikog promjera radnog kola, kao fizikalno reprezentativno mjesto za ocjenu  $Th$  uzet vrh lopate kad je ona u gornjem položaju.



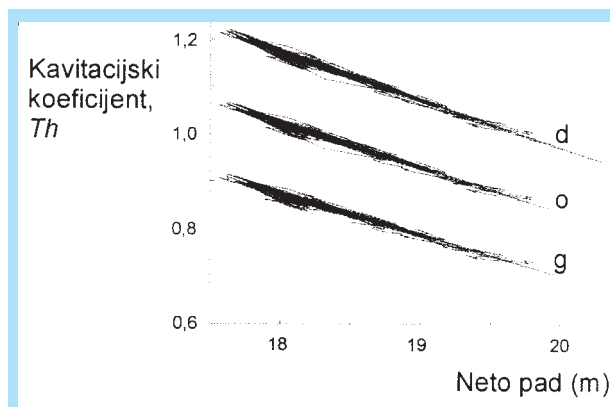
Slika 9. Oblici kavitacije nađeni modelski blizu nazivnih vrijednosti pada i protoka za HE Dubrava, pri 4 iznosa kavitacijskog koeficijenta,  $Th$  [17]; tipovi kavitacije su označeni na način koji se rabi pri ispitivanju brodskih vijčanih propelera. Razni prisutni tipovi kavitacije različito su erozivni; SK po tome nije posebno opasna.

Strmi pad učinkovitosti turbine s padom  $Th$  ispod praga (sl. 10b) praćen je naglim rastom vibro-akustički ocijenjenog intenziteta kavitacije (sl. 10a). Iz sl. 9 se razabire da su ti efekti posljedica snažnog razvoja slojaste kavitacije, SK na slici. Uz veliko opterećenje, a na niskim vrijednostima kavitacijskog koeficijenta, SK zahvaća tako velik dio površine lopate radnog kola, da se uzgon ove osjetno smanji. To smanjuje doprinos koji lopata daje ukupnom momentu, a mjerivi rezultat je trenutni

\* Preuzeta je definicija iz 16 . Važeća norma veličinu blisku ovoj naziva Thomin broj.



Slika 10. Rezultati vibro-akustičkog ispitivanja ovisnosti intenziteta kavitacije o kavitacijskom koeficijentu, provedenog u naravi, na turbini A HE Dubrava (a) i modelski nađeni utjecaj kavitacije na učinkovitost turbina HE Dubrava kod vrijednosti pada i protoka blizu nazivnih [16] (b)



Slika 11. Pregled režima rada agregata HE Dubrava: kavitacijski koeficijent na osi (o), na vrhu lopate radnog kola kad je ona dolje (d) ili gore (g), u ovisnosti o neto padu, a za tipičnu visinu gornje vode

pad snage turbine. Trag kavitacije SK na rezultatima na sl. 4 i 8 je mehanizam na najvišim opterećenjima – mehanizam 4: osim o kavitacijskom koeficijentu, razvoj SK ovisi i o opterećenju lopate, i to jako.

Pregled kavitacijskih prilika na turbinama HE Dubrava u naravi, dan na sl. 11, pokazuje da vrh lopate i njeni dijelovi na višim radijusima prolaze kroz režime s vrlo niskim iznosima kavitacijskog koeficijenta, onima

ispod praga krivulje učinkovitosti sa sl. 10b. Posljedica je jak razvoj kavitacije SK, uočljiv preko vibro-akustički detektiranog mehanizma 4.

Kako se kavitacijske prilike mijenjaju periodično, jer unutar okreta svaki dio lopate prolazi kroz stanja između odgovarajućeg maksimuma i minimuma kavitacijskog koeficijenta (vrh lopate između vrijednosti  $d$  i  $g$  sa sl. 11), i kavitacija SK pulzira. S obzirom na njen slučajni karakter, ove promjene nisu strogo periodične.

Kad bi kavitacijska kvaliteta svih lopata radnog kola bila jednaka, promjene intenziteta kavitacije i promjene učinkovitosti imale bi karakteristični ritam 4 puta na okret. Kako se, međutim, lopate razlikuju po kavitaciji (sl. 5 i 6), i to tako da kavitacija na jednoj lopati, lopati broj 4, dostiže najviši intenzitet, znatno viši od onog na drugima, tipična je periodičnost jednom na okret, dakle ona koja se u njihanju snage i opaža. Zanimljivo je da su geometrija lopata i njihov postav unutar norme; to očito ne osigurava ujednačenost kavitacijske kvalitete.

Osobitosti jakog njihanja – da nailazi samo ponekad i da se ne da eliminirati izlaskom s mreže nego samo zaustavljanjem i ponovnim pokretanjem agregata – mogu se objasniti efektom poput onog sa sl. 7. Na nekoj privodnoj lopati uhvati se smeće, koje se može ukloniti tek zaustavljanjem i pokretanjem agregata. Smeće kviri nastrujavanje lopata radnog kola. To izaziva pojačanu kavitaciju u tragu onečišćene privodne lopate, pa slijedi pad uzgona, momenta i snage. Kako pokazuju sl. 5 i 6, posebno jaka kavitacija razvija se na ovaj način na jednoj, najlošijoj lopati, 4, a iza nje slijedi lopata 1. Smeće djeluje najjače ako se uhvati na nekoj od gornjih privodnih lopata, jer se tu podupiru djelovanje nepovoljnog nastrujavanja i djelovanje niskog tlaka. Alternativnu interpretaciju, po kojoj djeluje smeće uhvaćeno na nekoj od 4 lopate radnog kola, koja onda jako kavitira kad dođe u gornji položaj, eliminira ovdje činjenica da je faza njihanja stalna.

Jaka kavitacija i pad učinkovitosti, nastali na opisani način, traju tek dio okreta; ovo je vezano na boravak vanjskih dijelova lopate 4 u području niskog tlaka. Zbog tromosti razvoja kavitacije, njen puni razvoj dolazi tek nakon prolaska kroz kritično, gornje područje, tj. tek kad je loša lopata već u nekom položaju nešto pomaknutom u smjeru vrtnje. Vibro-akustički pak ona biva najuočljivija još kasnije (sl. 5 i 6), kad se veliki kavitacijski sloj, po izlasku iz područja niskog tlaka, lomi i nestaje.

Kako pokazuje sl. 8b, ova se interpretacija može protegnuti i na slabo njihanje, a razlika među jakim i slabim je samo kvantitativna. I doista, u obadva, i u jakome i u slabome, sudjeluju i mehanizam 4 i mehanizam 3. Međutim, ako se krivulje 3 i 4 (sl. 8b) ekstrapoliraju do maksimalnih snaga, vidi se da u jakome dominira 4 a 3 ne biva značajno, dok u slabome 3 nije zanemarivo. I dalje, i kod slabije razvijene kavitacije preteže najlošija lopata, pa je i kod slabog njihanja održan ritam jednom na okret.

## MODEL PROCESA

Razlike u kavitacijskoj kvaliteti lopata radnog kola, kako se one razabiru na sl. 5 i 6, mogu se opisati krivuljama učinkovitosti sa sl. 10b pomaknutim po osi kavitacijskog koeficijenta: isti stupanj razvoja kavitacije nailazi na raznim lopatama pri različitim iznosima kavitacijskog koeficijenta. Daljnja razlika među lopatama opisiva je preko karakterističnog radijusa na kojem se razvija dominantna kavitacija koja smanjuje učinkovitost. Ako se, ovim tragom, funkcije učinkovitosti poput one sa sl. 10b,  $\eta = \eta(H, Q, Th)$ , gdje je stupanj korisnog djelovanja,  $H$  pad,  $Q$  protok, a  $Th$  kavitacijski koeficijent, ispišu za pojedine lopate,  $n = 1, 2, 3, 4$ , i to u ovisnosti o trenutnom kutnom položaju radnog kola,  $\theta$ , kao  $\eta_n = \eta(H, Q, Th(-n\pi/2 - \theta, r_n) - Th_n)$ , uz  $Th_n(r)$  jednako kavitacijskom koeficijentu na karakterističnom radijusu  $r$  a uz kolo u položaju  $\theta$ ,  $r_n$  karakterističnom radijusu lopate  $n$ ,  $\delta Th_n$  spomenutom pomaku krivulje učinkovitosti po  $Th$ , kojim se opisuje kvaliteta lopate  $n$ , a sa  $\theta_0$  se modelira kašnjenje razvoja kavitacije za uzбудom, priređena je osnova modela za simulaciju procesa njihanja snage prema gore zabilježenoj interpretaciji.

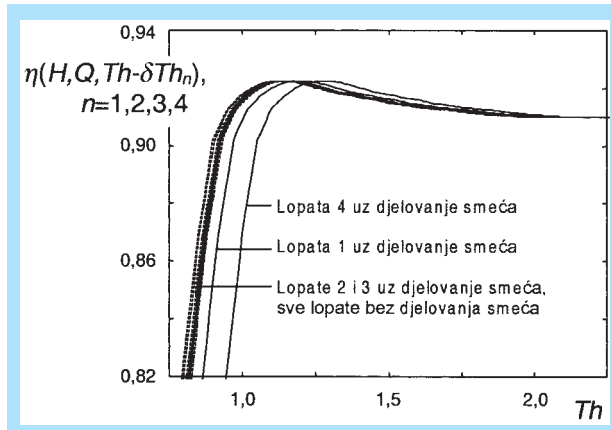
Dalje se pretpostavi da je komponenta momenta koju doprinosi lopata  $n$  proporcionalna  $\eta_n$ , a četvrtina sume  $\eta_n$  svih četiriju lopata,  $(H, Q, Th_{ref})$ , koja se označi nekim referentnim iznosom  $Th$ ,  $Th_{ref}$ , npr. onim na osi, promatra se kao veličina proporcionalna ukupnom momentu i snazi. Tako se za trenutni relativni iznos snage u trenutku kad je radno kolo u  $\theta$ , dobiva  $(H, Q, Th_{ref}) / (H, Q, Th_{ref})$ , gdje  $f(\theta)$  označuje usrednjavanje  $f(\theta)$  po  $\theta_0, 2\theta_0$ . Odstupanje ove veličine od 1 je trenutni relativni otklon snage od srednje vrijednosti uz radno kolo u  $\theta_0$ , a razlika pak maksimuma i minimuma (po  $\theta_0$ ) te veličine je relativna amplituda njihanja snage od vrha do vrha, i to ona u režimu  $(H, Q, Th_{ref})$ .

Zabilježeni model pojave je deterministički. On daje periodičan opis prilika i odnosi se samo na periodičnu komponentu njihanja, ne i na slučajna odstupanja od nje.

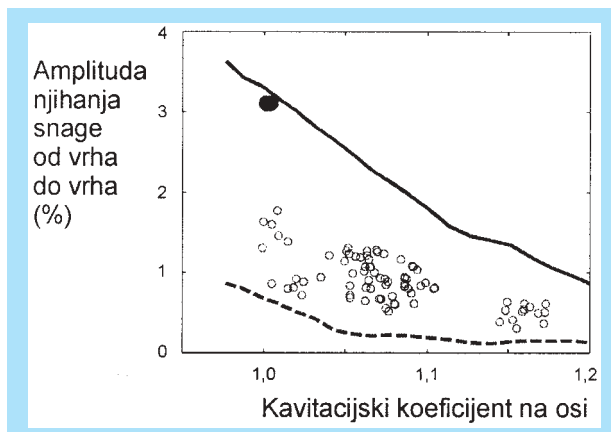
## SIMULACIJA

Pomoću opisanog modela provedena je simulacija njihanja snage. Pretpostavljen je isti karakteristični radijus  $r_n$  za sve lopate,  $n = 1, 2, 3, 4$ , i to jednak 70 % radijusa radnog kola. Pomaci  $Th_n$  procijenjeni su na osnovi razlika vibro-akustički nađenih intenziteta mehanizma 4 na najvišim snagama na raznim lopatama, prema sl. 5. Pri tom je pretpostavljeno da najbolja lopata slijedi ponašanje modela, a za ostale su, iz razlika intenziteta u odnosu na nju, preko ovisnosti sa sl. 10a modelirane pravcem, procijenjeni pomaci  $\delta Th_n$ ; rezultat je predstavljen na sl. 12. Ovaj opis, pa i iz njega izvedeni rezultati, odnose se na pad i protok oko nazivnih vrijednosti, jer se na to odnosi modelski opis prilika sa sl. 9 i 10b.





Slika 12. Kavitacijska kvaliteta lopata radnog kola, procijenjena na osnovi vibro-akustičkih ocjena intenziteta kavitacije; za najbolju se lopatu pretpostavlja da slijedi ponašanje predviđeno modelskim ispitivanjima

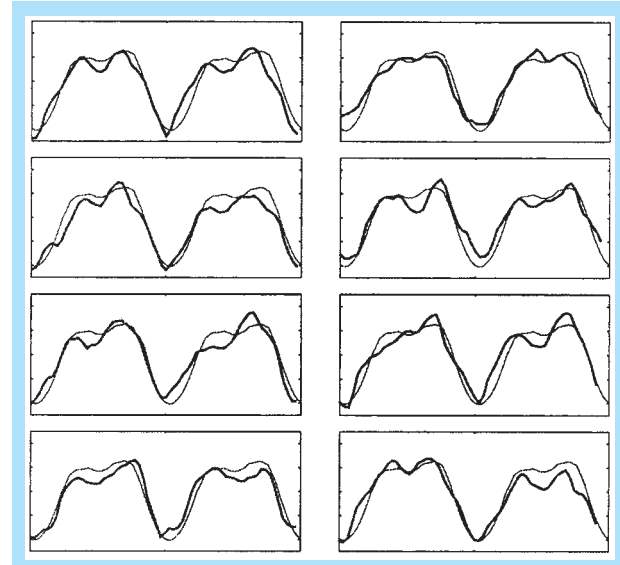


Slika 13. Rezultati simulacije (crte) i mjerenja (točke): puna crta i puni kružići – jako njihanje (smeće na privodnim lopatama djeluje); crtkano i prazni kružići – slabo njihanje (bez smeća). Ovaj opis vrijedi za visoke snage pri padu oko nazivnog.

Usporedba izmjerenih amplituda njihanja snage i onih iz simulacije sa zabilježenim parametrima, prikazana je na sl. 13; globalno su tu kavitacijske prilike opisane onima na osi turbine. Evidentno je da model za slabo njihanje daje samo donju granicu amplituda (mehanizam 3 postaje važan, a nije dobro opisan rabljenim modelom procesa), a što se tiče modela za jako njihanje, on je izveden iz onog slučaja jakog njihanja koji je registriran u sustavnom ispitivanju 15, pa se s njim i slaže. Ako se odstupi od nerealistične pretpostavke o jednakim iznosima karakterističnih radijusa  $r_n$  za sve četiri lopate, simulacija može dati i dobro predviđanje samih valnih oblika njihanja snage, sl. 14.

## OCJENA KVALITETE RADNOG KOLA

Rezultati simulacije sa sl. 13 za tipičnu visinu gornje vode i visoke snage, prikazani su u praktičnijem formatu na sl. 15. Tu su dodani i opisi nekih hipotetičkih



Slika 14. Valni oblik odstupanja trenutne snage od srednje vrijednosti nađen u slučaju jakog njihanja u 82 uzastopnih perioda vrtnje: deblje – izmjereno, tanje – rezultat simulacije

situacija: popravljene lopate, i to najlošija ili sve, te donja voda dignuta sa zatečene na onu za koju je turbina projektirana, tj. sa izgrađenom nizvodnom elektranom. Na osnovi tog prikaza, te sl. 9 – 12, može se zaključiti sljedeće:

*Prvo.* I kavitacijski dobre lopate radnog kola, i to i bez smeća uhvaćenog na lopatama privodnog kola, rade i u režimima sa snažnim padom učinkovitosti. Lopate radnog kola koje su uz to i lošije izrađene rade i duboko u tom području. Tako je to uz danu donju vodu, tj. bez nizvodne elektrane.

*Drugo.* Viša donja voda, ona za koju je turbina projektirana, donijela bi smanjenje amplituda jakog njihanja uz zatečenu kvalitetu lopata radnog kola na ispod polovice (sl. 15, pomak za 1,5 m). Međutim, njihanje bi i dalje ostalo snažno.

*Treće.* Uz danu kvalitetu izrade lopata, na nižim je donjim vodama, i to sa ili bez nizvodne elektrane, jako njihanje neizbježno kad se na gornjim lopatama privodnog kola uhvati smeće.

*Četvrto.* Nedovoljno dobra izrada lopata, od kojih su dvije, iako unutar tolerancija predviđenih odgovarajućom normom, kavitacijski loše, presudna je za njihanje i sa i bez smeća. Čak ako bi se i popravila najlošija lopata, jako je njihanje neizbježno unutar radnog područja turbine u zatečenom stanju. Tek kad se obje loše lopate dovedu na kvalitetu ostalih, može se računati s eliminiranjem jakog njihanja, a preostalo bi tek slabo.

*Dakle,* sa stajališta njihanja snage, kavitacijska kvaliteta projekta, kako je ona opisana modelskim ispitivanjima, bila bi dovoljna za rad u uvjetima iz projektnog zadatka, tj. uz donju vodu koju drži niz-

vodna elektrana, ali i tu samo uz posebno dobro izrađeno radno kolo i kad ne bi djelovalo smeće na privodnim lopatama. Bez velikog rizika, dana kvaliteta projekta nije prihvatljiva ni uz koju praktično ostvarivu točnost izrade.

Dva su aspekta kavitacijske kvalitete radnog kola:

(a) otpornost na kavitaciju izražena karakterističnim iznosima kavitacijskog koeficijenta i

(b) otpornost na promjene u nastrujavanju.

Prva opisuje kavitacijsku kvalitetu radnog kola u normalnim uvjetima, druga s prvom kvalitetu uz rad sa smećem na privodnom kolu. Uz prisutno smeće, kvaliteta danog radnog kola nije dovoljna ni po prvom ni po drugom aspektu.

*Ukratko:* Za njihanje je odgovorna nedovoljno točna izrada radnog kola, a mogućnost da ona tako snažno djeluje proizišla je iz okolnosti da radno kolo radi izvan projektnih režima, te da je projekt kavitacijski rizičan.

## VIBRACIJE VRATILA

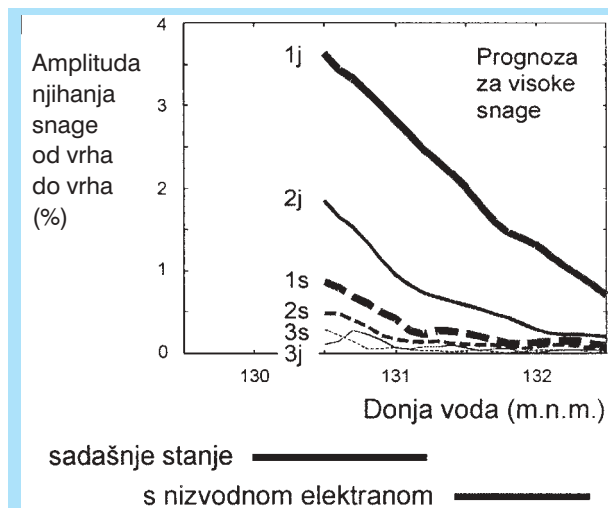
Rezultati četiri nezavisne serije mjerenja vibracija vratila agregata A HE Dubrava, prikazani na sl. 16, ukazuju na moguću povezanost procesa njihanja snage i vibracija vratila na visokim snagama, tj. na njihov zajednički izvor – razvijenu pulzirajuću slojastu kavitaciju, različitu na raznim lopatama radnog kola i posebno jaku na jednoj. Uz oblik ovisnosti amplitude vibracija o snazi na visokim snagama (usp. sl. 8 i 16), na kavitacijski uzrok vibracija vratila na visokim snagama upućuje i okolnost da se – baš poput njihanja, koje jako ovisi o kavitacijskim prilikama – komponenta vibracija na visokim snagama jako mijenja od režima do režima, dok komponenta na nižim snagama, uzrokovana nečim drugim, ostaje podjednaka.

## ZAKLJUČAK

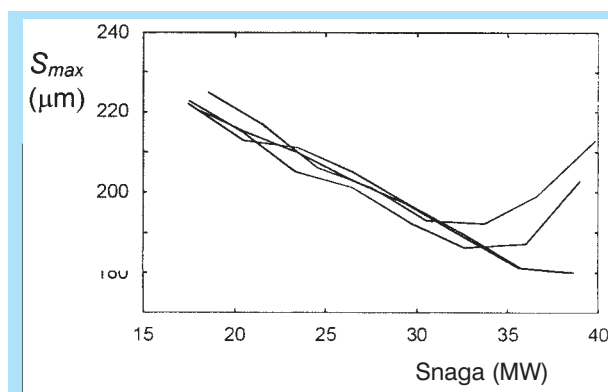
Heurističkom analizom eksperimentalnih podataka i grubim heurističkim modeliranjem procesa, izvedena je predodžba o njihanju snage agregata HE Dubrava kako slijedi.

*Uzrok njihanja snage.* Njihanje snage na HE Dubrava uzrokuje kavitacija na lopatama radnog kola, koja, zbog horizontalnog položaja vratila i velikog promjera radnog kola, pulsira jednom na okret. Njihanje postaje jako kad se razvije jaka slojasta kavitacija, a posebno jako kad se na lopatama privodnog kola, naročito gornjim, zaustavi smeće; ono kviri nastrujavanje radnog kola, pa pospješuje razvoj kavitacije. Zanimljivo je da kavitacija koja uzrokuje njihanje nije jako erozivna.

*Kvaliteta radnog kola.* Za njihanje snage odgovorna je za kavitaciju nedovoljno točna izrada radnog kola – iako je ona unutar tolerancija predviđenih normom. Mogućnost da nedovoljna kvaliteta izrade tako snažno djeluje proizišla je iz okolnosti da je donja voda niža od projektne, te iz kavitacijski rizičnog projekta radnog



Slika 15. Ocjena kvalitete radnog kola u svezi s njihanjem snage, prema situaciji na visokim snagama a uz tipičnu gornju vodu: 1 – zatečeno stanje, 2 – najlošija lopata popravljena do kvalitete sljedeće po redu, 3 – sve lopate poput najbolje; j – smeće djeluje (jako njihanje), s – smeća nema



Slika 16. Amplituda vibracija vratila agregata A HE Dubrava nizvodno od aksijalnog ležaja, u četiri različita stanja [19]

kola. Niti rad u uvjetima na koje je projekt računao, s donjom vodom višom za cca 1,5 m, ne bi eliminoirao njihanje. Mane su projekta što dozvoljava prejaku kavitaciju u normalnim radnim režimima i donosi previsoku osjetljivost na promjene u nastrujavanju.

*Vibracije vratila.* Prikupljeni eksperimentalni materijal upućuje na zaključak da pojačane vibracije vratila na visokim snagama imaju isti uzrok kao i njihanje snage.

*Otklanjanje njihanja.* Budući da je smeće nemoguće eliminirati u potpunosti, a zahtjev da izrada radnog kola bude mnogo bolja od one predviđene normom teško provesti, jako se njihanje može izbjeći samo pomoću novog radnog kola, projektiranog za stvarnu visinu donje vode, ali tako da ima dovoljno veliku rezervu u kavitacijskoj otpornosti i dovoljno nisku osjetljivost na promjene u nastrujavanju. Kriteriji za prosudbu o tome što je tu dovoljno, slijede iz ovdje izvedenog tumačenja pojave njihanja snage.

## Zahvala

Autor zahvaljuje Đ. Dvekaru, dipl. ing., samostalnom inženjeru iz HE Dubrava, za kritičke primjedbe.

## LITERATURA

- 1 V. KERCAN, M. PIŠLJAR, J. SLOKAR, V. ĐELIĆ i Z. PERŠIN: "HE Dubrava - Ispitivanja energetske i dinamičke karakteristika hidroelektrane", Turboinštitut, izvještaj 2050, Ljubljana, Slovenija, 1990.
- 2 Zapisnik o recenziji izvještaja br. 2050 – Ispitivanje energetske i dinamičke karakteristika hidroelektrane Dubrava izvršenih po Turboinštitutu Ljubljana, HE Dubrava, Sveta Marija, 12.11.1990.
- 3 M. BUTKOVIĆ, I. ŠKRTIĆ, B. ORČIĆ, B. KRALJ i M. KUKA: "Proračun torzionih opterećenja agregata HE – Dubrava", Jugoturbina - Institut, izvještaj 100.Č.4.PTV.0001.91, Karlovac, 1991.
- 4 Snimanje parametara generatora i turbine AG1, HE Dubrava, 06.06.1991.
- 5 Izvještaj o ispitivanjima uzroka njihanja snage na glavnim proizvodnim agregatima HE Dubrava, Litostroj, izvještaj 1098;P-96.-35.603, Ljubljana, Slovenija, 1992.
- 6 Opsežna prepiska proizvođača generatora (Končar – Generatori, Zagreb) i proizvođača turbine (Litostroj, Ljubljana, Slovenija), 1993. – 1995. (u arhivi HED).
- 7 J. ŠTEFANČIĆ: "Mjerenje i analiza vlastitih frekvencija rotorskih lopata HED AG1", ENIN Energetski institut, Energetika d.d., izvještaj 4 D 95 I MVT.001, Karlovac, 1995.
- 8 M. BUTKOVIĆ, J. ŠTEFANČIĆ, I. KOBASIĆ, K. PALADIN i J. HOPPE: "Ispitivanje torzionih vibracija AG1 HE Dubrava", ENIN Energetski institut, Energetika d.d., izvještaj 4 D 95 S SST.003, Karlovac, 1995.
- 9 M. MEHMEDOVIĆ, M. STOJSAVLJEVIĆ, E. VARGOVIĆ i D. NEMEC: "Izvještaj o ispitivanju njihanja djelatne snage u HE "Dubrava" - agregati 1 i 2," Institut za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, 1997.
- 10 D. NEMEC, M. STOJSAVLJEVIĆ i M. MEHMEDOVIĆ: "Izvještaj o ispitivanju njihanja djelatne snage u HE Dubrava - agregat 1", Institut za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, 1998.
- 11 D. NEMEC, M. STOJSAVLJEVIĆ i M. MEHMEDOVIĆ: "Izvještaj o mjerenju oscilacija djelatne snage agregata nakon ugradnje "prizona" - HE "Dubrava - agregat 1", Institut za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, 1998.
- 12 B. BAJIĆ i Đ. DVEKAR: "Dijagnostička ispitivanja nestabilnosti AG1 - Ispitivanje njihanja snage: Ispitivanje utjecaja nehomogenosti polja pritjecanja vode radnom kolu, niskofrekventnih prilika na difuzoru, aksijalnog pomaka rotora i torzionih vibracija kruške", Korto Cavitation Services i HED, izvještaj, 2002.
- 13 B. BAJIĆ: "Inteligentni monitoring i dijagnostika kavitacije - Metoda za velik broj lopata radnog kola", Energija, god. 51, br. 3, 2002, str. 195-200; također: International Water Power & Dam Construction, Vol. 53, No. 4, 2001, str. 33-36; teorija u: ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 124, No. 4, 2002, str. 943-950.
- 14 B. BAJIĆ: "Multidimenzionalna dijagnostika i monitoring kavitacije - Metoda za mali broj lopata radnog kola - Primjena na HE Dubrava", Energija, god. 51, br. 5, 2002, str. 387-394; također: International Water Power & Dam Construction, Vol. 56, No. 2, 2003, str. 32-35.
- 15 B. BAJIĆ: "Dijagnostička ispitivanja AG1: Empirijska analiza procesa njihanja snage, Ispitivanja 29.12.2000.-21.01.2001.", Korto Cavitation Services, Trier, Njemačka, izvještaj, 2001.
- 16 V. KERCAN i S. CIZL: "HE Dubrava – Primopredajna ispitivanja modela turbine, Turboinštitut, Ljubljana, Slovenija", izvještaj 1779, 1986.
- 17 M. FANCEV, K. FRANJIĆ i Ž. ĐIGAŠ: "HE Dubrava – Kritički osvrt na izvještaj o primopredajnim ispitivanjima modela turbine", št. 1711 Turboinštitut, Ljubljana, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, izvještaj 103/ZEP/TS, Zagreb, 1986.
- 18 Đ. DVEKAR, Ž. HABUŠ, M. HLADNIK, D. KRAMAR, T. KUKOLIĆ, J. MIHALIĆ, J. SABOLEK, J. SINKOVIĆ i J. ŠAREC – svi iz HE Dubrava, usmeno priopćenje, 2002.
- 19 B. BAJIĆ i Đ. DVEKAR: "Dijagnostička ispitivanja AG 1: Mehanička i magnetna uzbuda, Provjera opletanja, zračnog raspora i magnetskog toka, Stanje AG1 22.03.2002.", Korto Cavitation Services i HE Dubrava, Sveta Marija, izvještaj, 2002.

### DIAGNOSTICS OF TUBE AGGREGATE'S POWER SWINGING IN HPP DUBRAVA

Based on multi dimensional cavitation testing a diagnosis is formulated and verified considering the cause of power swinging in a rhythm one per turn of tube aggregates in 40 MW HPP Dubrava. The cause of swinging is a strong but low erosive cavitation, which because of the operation out of the designed regime, horizontal axle and huge radius of runner as well as because of unequal and insufficiently strong cavitation quality of the runner blades pulses once per turn.

### DAS VERFAHREN DER ERKENNUNG VON LEISTUNGSSCHWANKUNGEN DER ROHRTURBOSÄTZE DES WASSERKRAFTWERKES "DUBRAVA"

Auf Grund mehrdimensionaler Kavitationsprüfungen wurden die Ursachen von Leistungsschwankungen der 40 MW-Rohrturbosätze des Wasserkraftwerkes "DUBRAVA" im Takt einmal je Umdrehung nachgeprüft und niedergeschrieben. Den Anlass für diese Schwankungen gibt eine starke, aber schwach erosionsbildende Kavitation, welche, bei einer im Projekt nicht vorgesehenen Betriebsweise, dank der waagerechten Lage der Hauptwelle und dem großen Durchmesser des Laufrades, sowie der ungleichmässigen und ungenügenden Kavitationsqualität der Laufradschauffeln, Leistungspulsationen einmal je Umdrehung verursacht.

Naslov pisca:

**Dr. sc. Branko Bajić, dipl. ing.**

**Korto Cavitation Services**

**12, rue Ste Zithe; 2763 Luxembourg; Luksemburg**

**korto@cavitation.de**

**www.cavitation.de**

Uredništvo primilo rukopis:

2003 – 05 – 15.