

DIJAGNOSTIKA NJIHANJA SNAGE CIJEVNIH AGREGATA HE DUBRAVA

Branko Bajić

Korto Cavitation Services

12, rue Ste Zithe; 2763 Luxembourg; Luksemburg

korto@cavitation.de

www.cavitation.de

Sažetak: 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 van projekt-nog 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

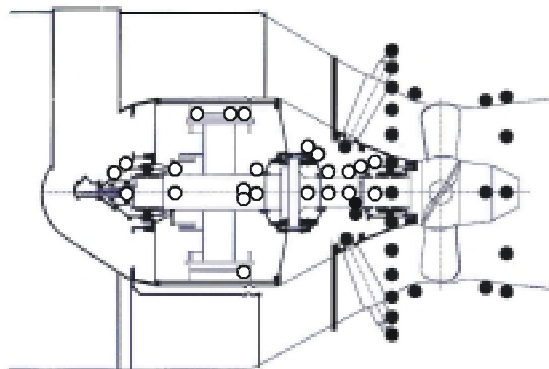
Od puštanja u pogon 1989. godine, na cijevnim agregatima HE Dubrava dolazi do njihanja snage u ritmu jednom na okret, na agregatu A razmjerno jakog a nešto slabijeg na agregatu B. Njihanje opterećuje konstrukciju i skraćuje životni vijek postrojenja. U periodu od 1990. do 2002. godine, iskušan je niz 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 izvještava o rezultatima te analize. Najprije se bilježi izvedena dijagnoza, potom argumenti na kojima se ona zasniva, a na kraju se još razmatraju praktične implikacije nalaža, 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. Njihanje postaje jako kad se na lopatama radnog kola razvije jaka slojasta kavitacija, a posebno jako kad se na lopatama privodnog kola, naročito gornjim, zaustavi smeće; ono kvari 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.



Sl. 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.

* Osnovni podaci o turbinama: snaga 40 MW; nazivni pad 17,5 m; nazivni protok 250 m³/s; brzina vrtnje 125 min⁻¹; promjer radnog kola 5,4 m; broj lopata radnog kola 4; broj lopata privodnog kola 24.

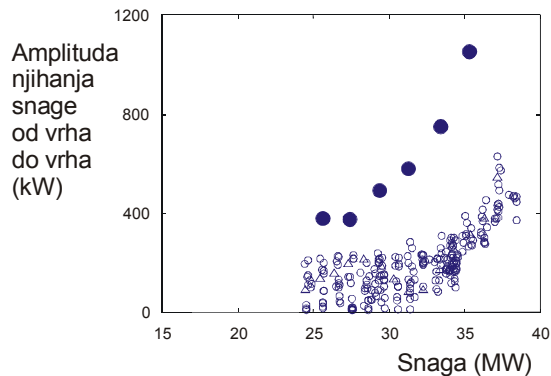
PODACI IZ ISPITIVANJA

Njihanje snage

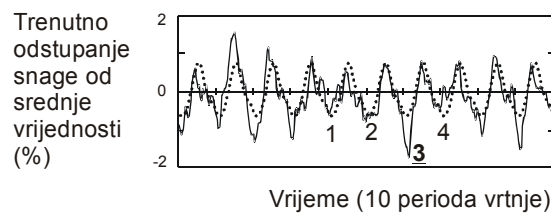
Monitoringom njihanja snage, koji je obuhvatio velik broj različitih režima rada agregata A HED [15], nađene su, u skladu sa zapažanjem osoblja elektrane [18], dvije klase procesa njihanja snage:

- 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.



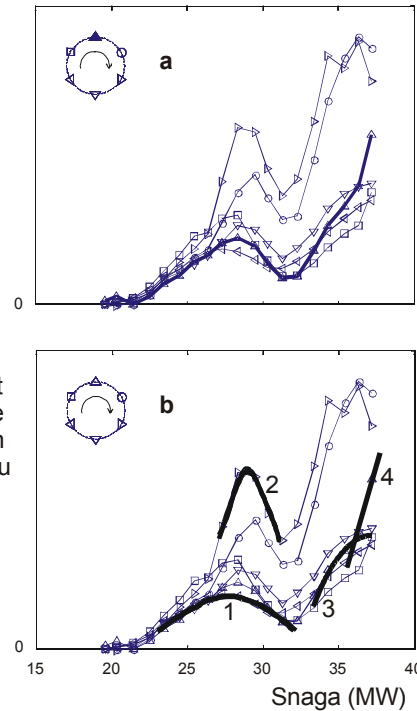
Sl. 2 - Izmjerena ovisnost o snazi periodične komponente otklona trenutnog iznosa snage od srednje vrijednosti. Prazni kružići - slabo njihanje, puni kružići - jako njihanje.



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

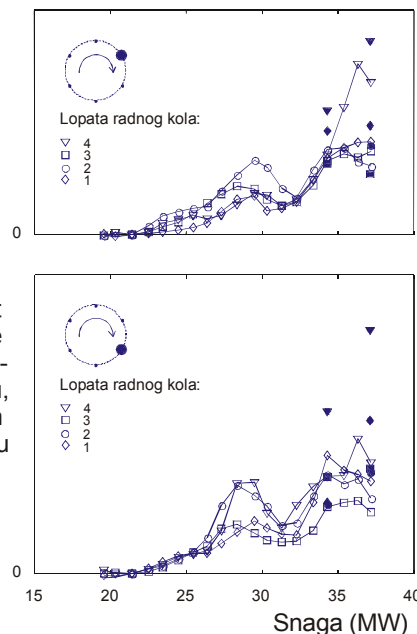
Kavitacija

Multidimenzionalna metoda dijagnostike i monitoringa, primijenjena pri ispitivanju kavitacije [14], omogućuje prostorno razlučivanje kavitacije, razlučivanje kavitacije iza pojedinih lopata



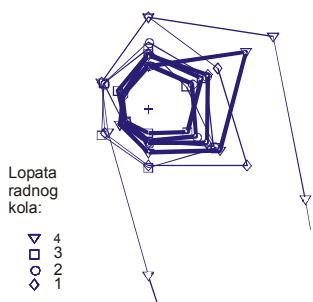
Intenzitet kavitacije u kutnom segmentu

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

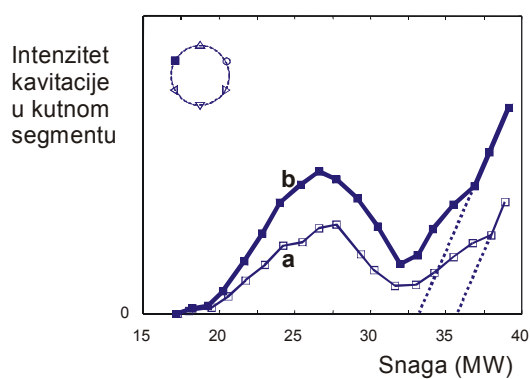


Intenzitet kavitacije uz pojedini lopatu, u kutnom segmentu

Sl. 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, puni znakovi - režimi sa jakim njihanjem snage.



Sl. 6 - Intenzitet kavitacije uz svaku od 4 lopate radnog kola (radijalna koordinata) u ovisnosti o trenutnom kutnom položaju radnog kola mjenom položajem lopate 4 (kutna koordinata) [14]. Debele crte - slabo nihanje, tanke crte - jako nihanje snage.



Sl. 7 - Utjecaj pogrešnog 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

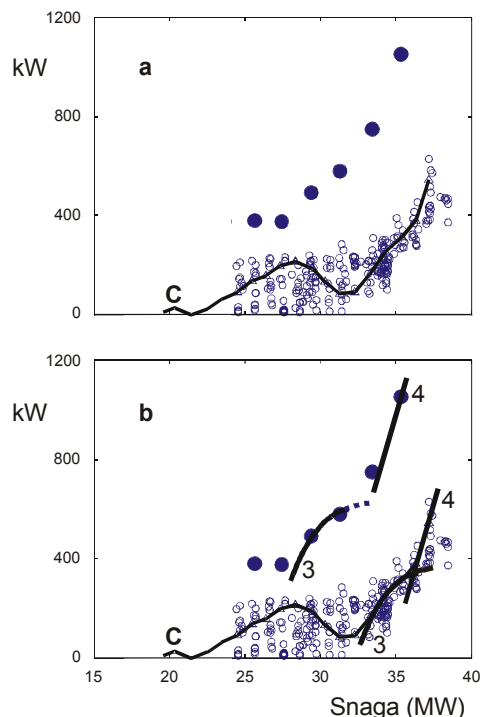
radnog kola, razlikovanje pojedinih kavitacijskih mehanizama, kao i kombinacije postupaka s takvim razlučivanjima. Uz grubu prostornu rezoluciju (po kutnim segmentima unutar turbine), takvi rezultati ispitivanja prikazani su na sl. 4-7 [14], i to na sl. 4-6 u prirodnom stanju stroja, a na sl. 7 sa simuliranjem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

ANALIZA

Brzina promjene

Ocjena periodične komponente izmjenog valnog oblika fluktuacija snage, prikazana na sl. 3, može poslužiti kao svojevrsna referencija pri prosudbi brzine promjene izmjenog valnog oblika nihanja 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.



Sl. 8 - Podaci o ovisnosti amplitude nihanja snage o postavljenoj snazi agregata (sa sl. 2), uspoređeni s podacima o ovisnosti intenziteta kavitacije o snazi:

(a) nihanje u usporedbi s ovisnošću intenziteta kavitacije u gornjem kutnom segmentu (krivulja C preuzeta sa sl. 4a);

(b) nihanje, 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 nihanja 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 nihanje 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).

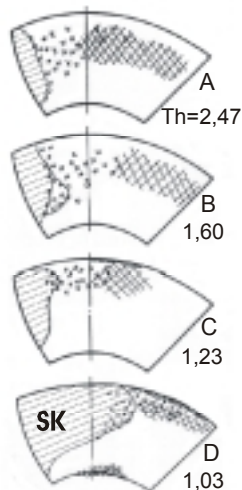
Ovisnost o položaju radnog kola

Oblik ovisnosti intenziteta kavitacije o trenutnom kutnom položaju radnog kola, sl. 6, ili, toč-

nije, 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

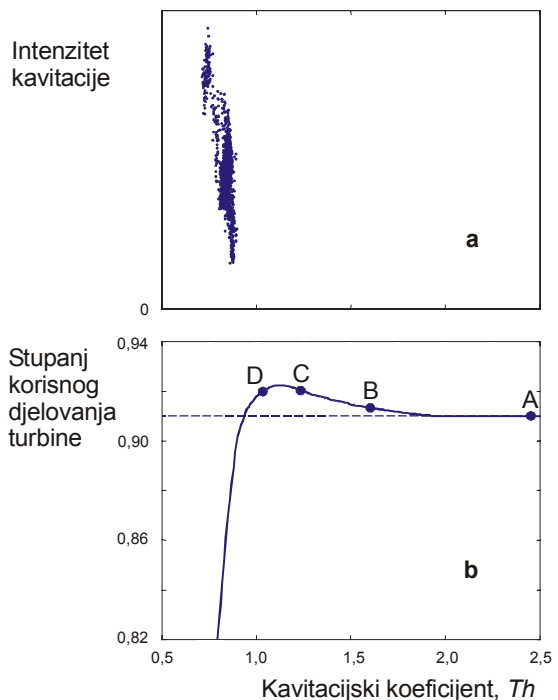
Na sl. 9 i 10b dani su rezultati modelskih ispitivanja kavitacije turbina HE Dubrava provedenih u Turboinštitutu [16]; zapisi o obliku kavitacije A-D na sl. 9 odnose se na jednako označene režime na sl. 10b. Kavitacijski koeficijent, Th , definiran je* kao omjer razlike tlaka na reprezentativnom mjestu 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.



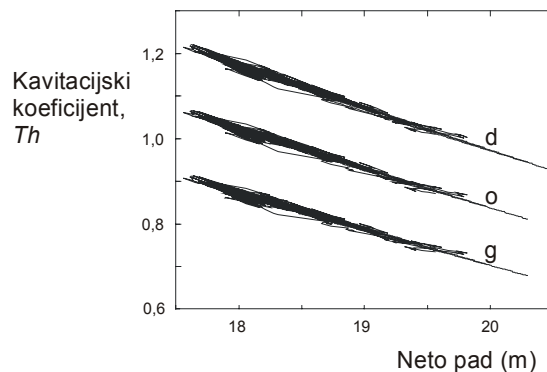
Sl. 9 - Oblici kavitacije nađeni modelski blizu nazivnih vrijednosti pada i protoka za HE Dubrava, pri 4 iznosa kavitacijskog koeficijenta, Th [17]; tipovi kavitacije su označeni na način koji se rabi pri ispitivanju brodskih vijčanih propelera. Razni prisutni tipovi kavitacije različito su erozivni;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

Strmi pad učinkovitosti turbine s padom Th ispod praga (sl. 10b) praćen je naglim rastom vibroakustički 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 pad snage turbine. Trag kavitacije SK na rezultatima sa 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.

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



Sl. 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)



Sl. 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

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 vibroakustički detektiranog mehanizma 4.

Kako se kavitacijske prilike mijenjaju periodično, jer unutar okreta svaki dio lopate prolazi

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 njihvanju 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 kvari nastrojavanje 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 nastrojavanja 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

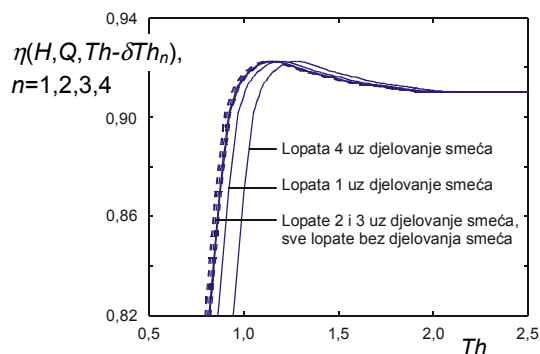
Razlike u kavitacijskoj kvaliteti lopata radnog kola, kako se one razabiru na sl. 5 i 6, mogu se opisati krivuljama učinkovitosti sa sl. 10b pomaknutim po osi kavitacijskog koeficijenta: isti stupanj razvoja kavitacije nailazi na raznim lopatama pri različitim iznosima kavitacijskog koeficijenta. Daljnja 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 η 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, θ , kao $\eta_n = \eta(H, Q, Th(\theta - n\pi/2 - \theta_0, r_n) - \delta Th_n)$, uz $Th(\theta, r)$ jednako kavitacijskom koeficijentu na karakterističnom radijusu r a uz kolo u položaju θ , r_n karakterističnom radijusu lopate n , δTh_n spomenutom pomaku krivulje učinkovitosti po Th , kojim se opisuje kvaliteta lopate n , a sa θ_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 η_n , a četvrtina sume η_n svih četiriju lopata, $\eta(H, Q, Th_{ref}, \theta)$, 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 θ , dobiva $\eta(H, Q, Th_{ref}, \theta) / \eta(H, Q, Th_{ref}, \varphi) > \varphi$, gdje $\langle f(\varphi) \rangle_\varphi$ označuje usrednjavanje $f(\varphi)$ po $\varphi \in [0, 2\pi]$. Odstupanje ove veličine od 1 je trenutni relativni otklon snage od srednje vrijednosti uz radno kolo u θ , a razlika pak maksimuma i minimuma (po θ) te veličine je relativna amplituda njihanja snage od vrha do vrha, i to ona u režimu (H, Q, Th_{ref}) .

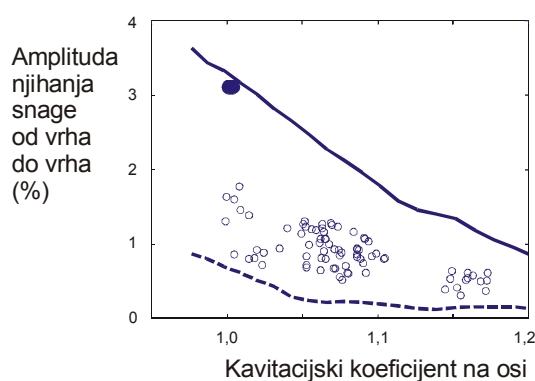
Zabilježeni model pojave je deterministički. On daje periodičan opis prilika i odnosi se samo na periodičnu komponentu njihanja, ne i na slučajna odstupanja od nje.

SIMULACIJA

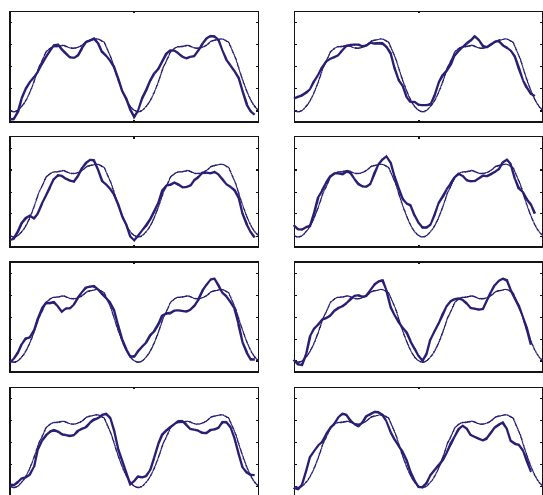
Pomoću opisanog modela provedena je simulacija njihanja snage. Pretpostavljen je isti karakteristični radijus r_n za sve lopate, $n=1,2,3,4$, i to jednak 70% radijusa radnog kola. Pomaci δTh_n procijenjeni su na osnovi razlika vibro-akustički nađenih intenziteta mehanizma 4 na najvišim snagama na raznim lopatama, prema sl. 5. Pri tom je pretpostavljeno da najbolja



Sl. 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.



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



Sl. 14 - Valni oblik odstupanja trenutne snage od srednje vrijednosti nađen u slučaju jakog nihanja u 8×2 uzastopnih perioda vrtnje: deblje - izmjereno, tanje - rezultat simulacije

lopata slijedi ponašanje modela, a za ostale su, iz razlika intenziteta u odnosu na nju, preko ovisnosti sa sl. 10a modelirane pravcem, procijenjeni pomaci δTh_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.

Usporedba izmjerenih amplituda nihanja 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 nihanje daje samo donju granicu amplituda (mehanizam 3 postaje važan, a nije dobro opisan rabljenim modelom procesa), a što se tiče modela za jako nihanje, on je izveden iz onog slučaja jakog nihanja 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 nihanja 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 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 amplitude jakog nihanja uz zatečenu kvalitetu lopata radnog kola na ispod polovice (sl. 15, pomak za 1,5 m). Međutim, nihanje bi i dalje ostalo snažno.

Treće. Uz danu kvalitetu izrade lopata, na nižim je donjim vodama, i to sa ili bez nizvodne elektrane, jako nihanje 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 nihanje i sa i bez smeća. Čak ako bi se i popravila najlošija lopata, jako je nihanje neizbježno unutar radnog područja tur-

bine 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 nizvodna elektranu, 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 van projektnih režima, te da je projekt kavitacijski rizičan.

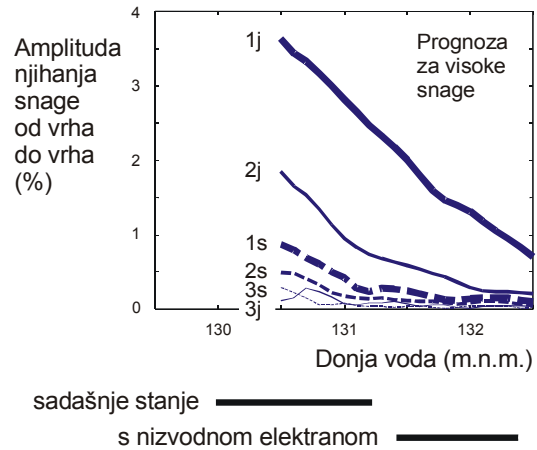
VIBRACIJE VRATILA

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 kavitacijsko porijeklo 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.

ZAKLJUČCI

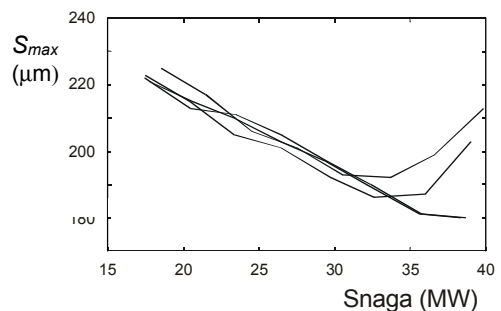
Heurističkom analizom eksperimentalnih podataka i grubim heurističkim modeliranjem procesa, izvedena je predodžba o njihanju snage agregata HE Dubrava kako slijedi.

Uzrok njihanja snage Njihanje snage na HE Dubrava uzrokuje kavitacija na lopatama radnog



Sl. 15 - Ocjena kvalitete radnog kola u vezi s njihanjem snage, prema situaciji na visokim snagama a uz tipičnu gomju vodu:

- 1 - zatečeno stanje,
- 2 - najlošija lopata popravljena do kvalitete slijedeće po redu,
- 3 - sve lopate poput najbolje;
- j - smeće djeluje (jako njihanje),
- s - smeća nema (slabo njihanje)



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

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 kvari 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 kola. Niti rad u uvjetima na koje je projekt računao, s

donjom vodom višom za cca 1,5 m, ne bi eliminirao 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 se zahvaljuje Đ. Dvekaru, dipl.ing., samostalnom inženjeru iz HE Dubrava, za kritičke primjedbe i diskusije.

REFERENCIJE

1. V. Kercan, M. Pišljari, J. Slokar, V. Đelić i Z. Peršin, HE Dubrava - Ispitivanja energetske i dinamičke karakteristike hidroelektrane, Turboinštitut, izvještaj 2050, Ljubljana, Slovenija, 1990.
2. Zapisnik o recenziji izvještaja br. 2050 – Ispitivanje energetske i dinamičke karakteristike hidroelektrane Dubrava izvršenih po Turboinštitutu Ljubljana, HE Dubrava, Sveta Marija, 12.11.1990.
3. M. Butković, I. Škrčić, B. Orčić, B. Kralj i M. Kučka, 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. Nemeč, Izvještaj o ispitivanju njihanja djelatne snage u HE "Dubrava" - agregati 1 i 2, Institut za elektroprivredu i energetiku, Zagreb, 1997.
10. D. Nemeč, 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. Nemeč, 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. Đuro Dvekar, Željko Habuš, Mladen Hladnik, Drago Kramar, Toni Kukolić, Josip Mihalic, Josip Sabolek, Josip Sinković i Josip 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.