

MULTIDIMENZIONALNA DIJAGNOSTIKA I MONITORING KAVITACIJE

Metoda za mali broj lopata radnog kola - Primjena na HE Dubrava

Branko Bajić, Zagreb/Luxemburg

UDK 621.317.7:621.311.42
IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Multi-dimenzionalna metoda vibro-akustičke dijagnostike i monitoringa kavitacije Korto Cavitation Services, u obliku prilagođenom za mali broj lopata radnog kola, primijenjena je na cijevni agregat A snage 40 MW HE Dubrava. Identificirana su 4 kavitacijska mehanizma, ocijenjena je kavitacijska kvaliteta lopata radnog kola, ispitana je razdioba intenziteta kavitacije po prostoru unutar turbine i nađena snažna nehomogenost. Ispitan je slučaj s pogrešnim zakretom jedne lopate privodnog kola, te preliminarno i veza kavitacije i njihanja snage. Uz opis rezultata, ilustrira se i način njihova izvođenja.

Ključne riječi: kavitacija, erozija, turbina, dijagnostika, monitoring.

1. UVOD

U nastavku prikazivanja multi-dimenzionalne metode dijagnostike i monitoringa hidroagregata Korto Cavitation Services, započetog u [1] primjenom na kavitaciju u turbinama s velikim brojem lopata radnog kola prema [2] (što se nastavlja na ranije pristupe prikazane u [3]), ovdje se izvještava o prvoj primjeni u Hrvatskoj, na HE Dubrava na Dravi. Na Dubravi je multi-dimenzionalnom metodom ispitano više dinamičkih procesa [4 - 6]; predmet je ovog članka samo kavitacija, i to po metodi za mali broj lopata radnog kola.

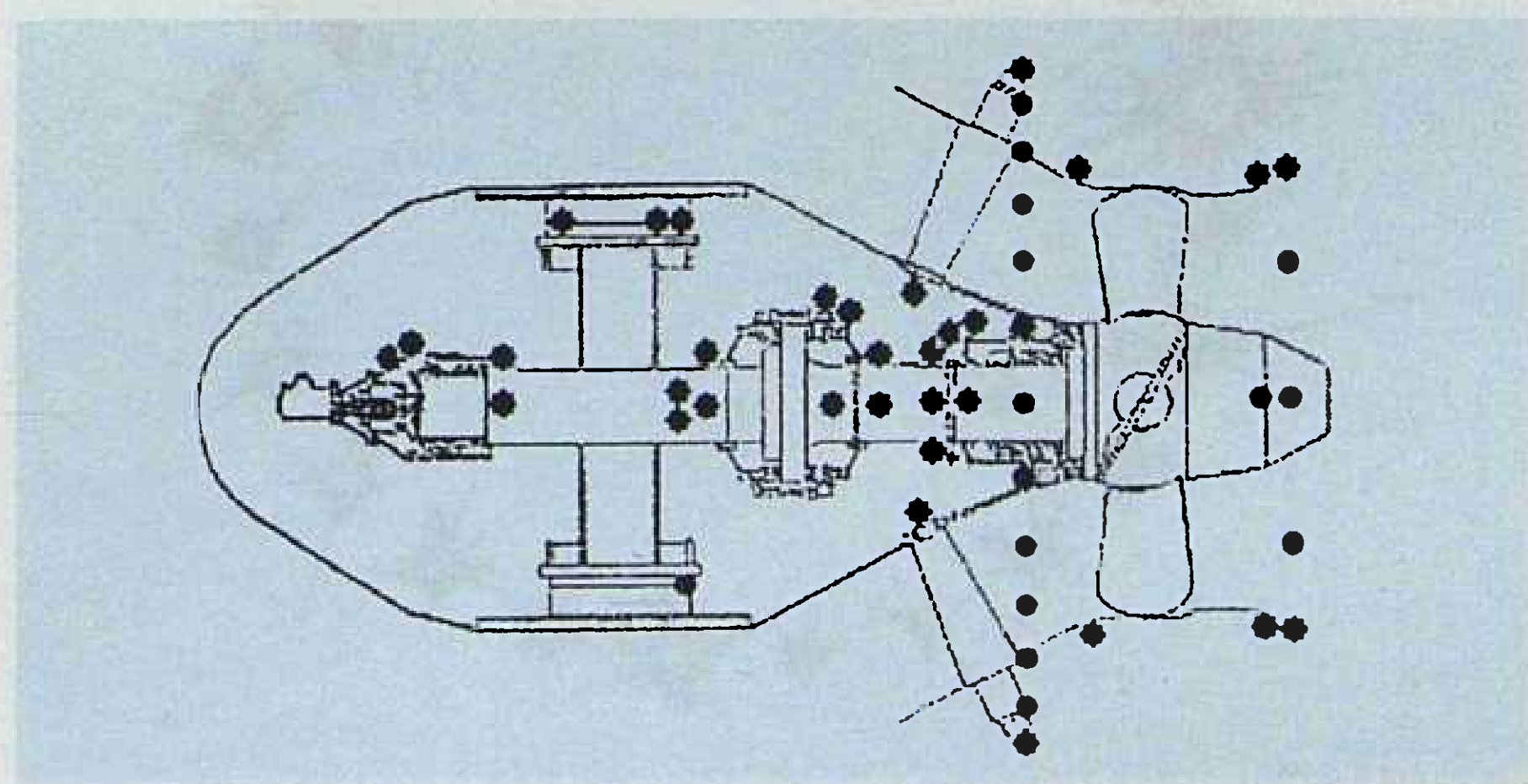
Multi-dimenzionalna metoda se sastoji od:

- gustog uzorkovanja opservabilnih podataka o promatranom procesu u prostoru (sl. 1), vremenu i domeni varijabli stanja;
- istinski multi-dimenzionalnoj analizi veza između ovih podataka;
- konstrukciji empirijskih i teorijskih modela procesa te njihovoj primjeni u analizi;
- izvođenju sofisticiranijih veličina koje kombiniraju dvije ili više primarnih (razine vibracija, tlakovi, temperature itd.) u izravno interpretabilne pouzdanije opise zdravlja stroja; primjer vezan na kavitaciju: ocjena njenog ukupnog intenziteta koja uključuje nepristrane ocjene kavitacije u svim dijelovima turbine.

Mogućnost da se multi-dimenzionalnom metodom dijagnostike i monitoringa izvedu reprezentativne ocjene

potiskivanjem izvora grešaka pristranosti i izdvoje specifični podaci potrebni za ocjenu relevantnih signatura zdravlja stroja, te potisnu smetnje i lažni odzivi mjernog sustava i strukture stroja, rezultiraju u:

- pouzdanoj osnovi za optimiranje rada stroja,
- izuzetno visokoj osjetljivosti pri detekciji štetnih efekata u ranim fazama njihova razvoja,
- bogatim i sigurnim podacima o uzrocima promjena, što omogućuje pouzdanu dijagnostiku i optimiranje plana popravaka.



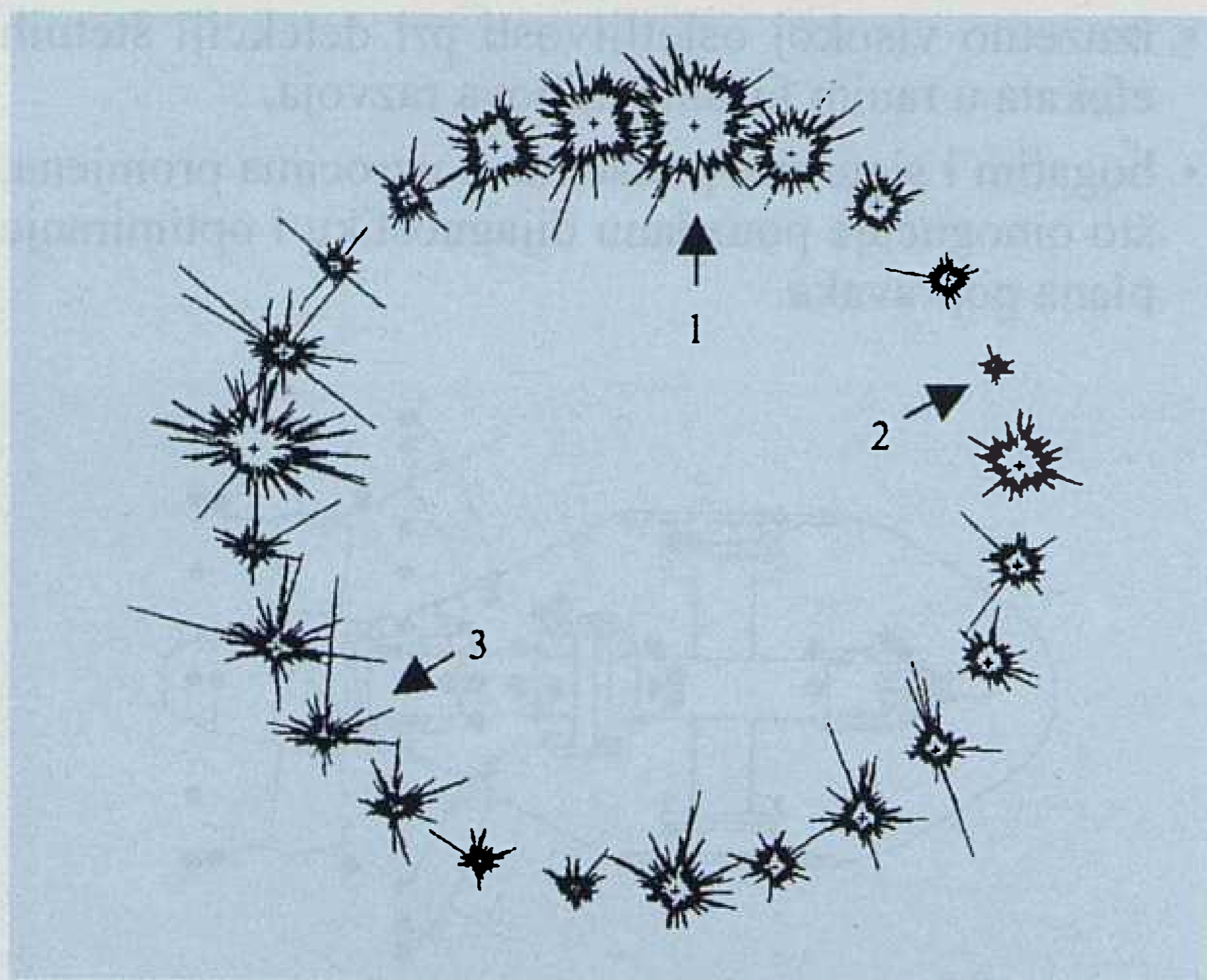
Slika 1. U multidimenzionalnim dijagnostičkim ispitivanjima hidroagregata, koja se provode radi određivanja detaljnih karakteristika stroja, utvrđivanja referencije za buduće provjere, pouzdane ocjene zdravlja stroja te programiranja poboljšanja, rabi se velik broj raznih osjetila montiranih po njemu. Najveći dio osjetila prikazanih ovdje na agregatu A HE Dubrava bio je namijenjen kavitacijskim ispitivanjima. Za trajni monitoring, broj osjetila se smanjuje, ali on, posebno za kavitaciju, ostaje znatno veći nego u jednostavnim izvedbama monitora.

* Rukopis članka predloženog za časopis "Energija". Rad je usmeno predstavljen na HEPP 2002. u Šibeniku, a prihvaćen je i kao referat za konferenciju HYDRO 2002, Kiris, Turska, studeni 2002.

Način funkcioniranja i tipični formati izlaznih podataka iz multi-dimenzionalnog ispitivanja i monitoringa ilustrirani su u nastavku slučajem kavitacije u turbini cijevnog agregata A HE Dubrava (sl. 1: pad 18 m, protok $250 \text{ m}^3/\text{s}$, snaga 40 MW, brzina vrtnje 125 min^{-1} , broj lopata privodnog kola 24, broj lopata radnog kola 4). Pokazuje se kako se mogu dobiti detaljni podaci o kavitaciji, nedohvatljivi jednostavnijim pristupima: identifikacija različitih kavitacijskih mehanizama koji djeluju u turbini (različiti tipovi kavitacije ili isti tip u raznim položajima), te ocjena kavitacijske kvalitete dijelova turbine.

2. NAJJEDNOSTAVNIJI KAVITACIJSKI MONITOR

Kavitacijsko ponašanje turbine A na Dubravi na visokim snagama ilustrirano je na sl. 2. Radijalna koordinata na malim grafovima predstavlja intenzitet kavitacije, a kutna trenutni kutni položaj referentne lopate rotora. Šiljci svjedoče o varijabilnosti kavitacije unutar okreta, koja potiče od obodnih varijacija polja brzina pritjecanja rotoru. Ove su pak uzrokovane smetnjama strujanju koje induciraju predprivodne i privodne lopate. Varijacije polja pritjecanja i razlike u kavitacijskoj kvaliteti privodnih lopata također uzrokuju i razlike u srednjem intenzitetu u raznim položajima oko radnog kola. Kako se vidi na tri označena grafa, razlike u srednjem intenzitetu (usporedite 1 i 2) i obliku krivulja (1 i 3) su velike.



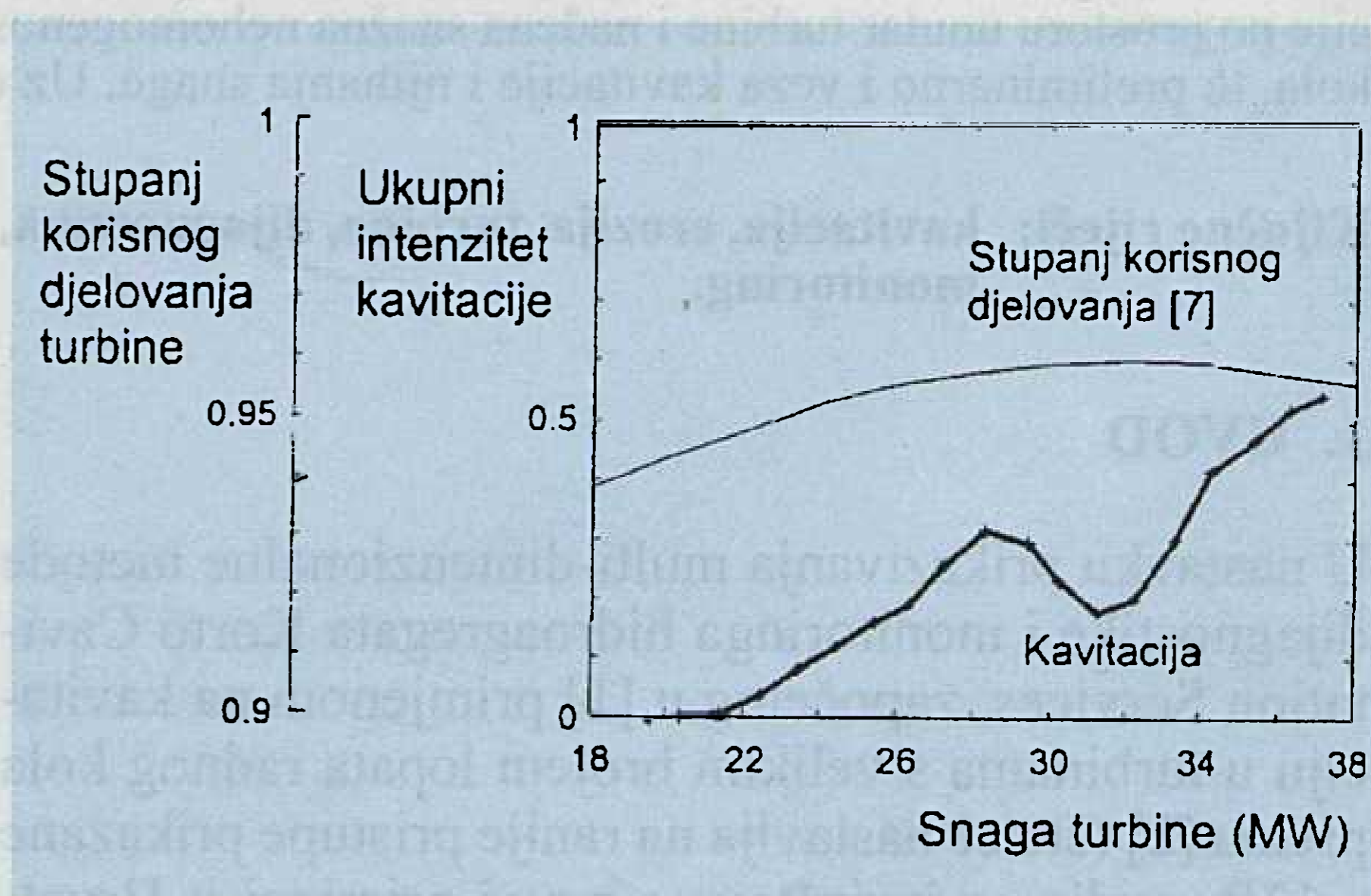
Slika 2. Polarni prikaz ovisnosti intenziteta kavitacije o trenutnom kutnom položaju radnog kola. Intenzitet je ocijenjen pomoću 24 osjetila razmještena oko radnog kola.

Implikacije za kavitacijsko ispitivanje i monitoring su izravne: uzorkuje li se kavitacija samo jednim ili sa samo par osjetila,

- intenzitet kavitacije može biti jako podcijenjen ili precijenjen,

- podaci o strukturi krivulja sa šiljcima – koja, kad se dešifrira, daje podatke o ulozi što u kavitacijskom procesu igraju privodne lopate – ne bi bili reprezentativni i stoga bi vodili do pogrešnih dijagnostičkih zaključaka, a
- čak ako se detalji poput ovih ne razmatraju, proizvoljnost strukture uzorkovanih podataka pokazuje da svi tipovi i položaji kavitacije ne bi bili valjano uzeti u obzir.

Zaključak je izravan: čak i u slučaju najjednostavnijeg kavitacijskog monitora, od kojeg se, kao na sl. 3, očekuje da ocijeni kavitaciju u danom režimu rada turbine samo jednim numeričkim podatkom, kavitaciju valja uzorkovati pomoću dovoljno visokog broja prostorno razdijeljenih osjetila. Jednostavni krajnji rezultat treba tad izvesti iz svih osjetila kombiniranih u jedno sintetičko, prostorno razdijeljeno osjetilo. Na ovakav su način dobivene vrijednosti intenziteta kavitacije prikazane na sl. 3 i 4.



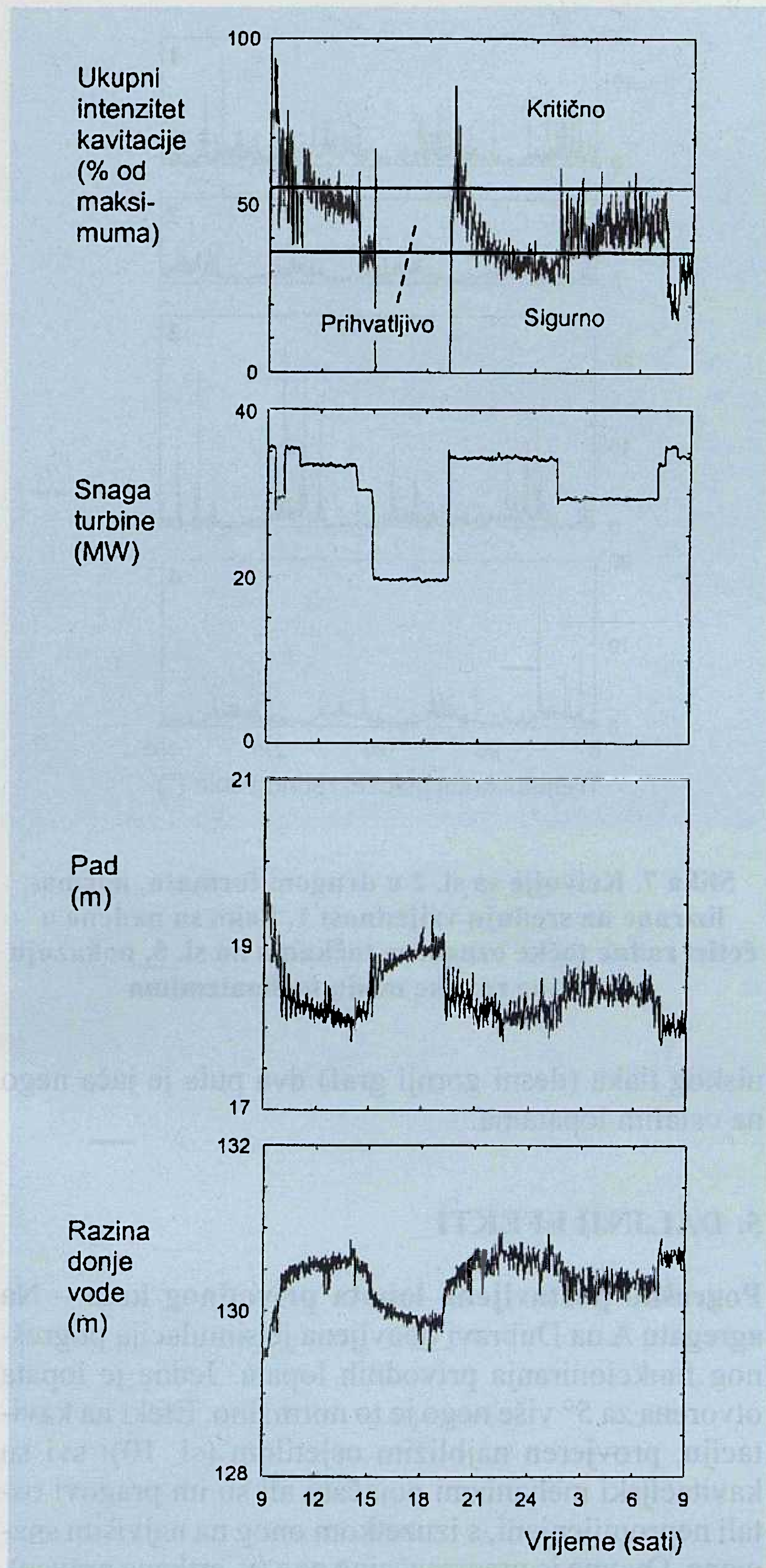
Slika 3. Osnovna kavitacijska karakteristika turbine: cijela turbina – jedna numerička vrijednost

Nakon što su učinjene reprezentativnima, ovakve ocjene kavitacije mogu biti dosta korisne. I doista, nemonotoni oblik kavitacijskih krivulja na sl. 3 može se upotrijebiti za optimiranje rada stroja sa stajališta kavitacije, a podaci o radnim uvjetima iz sl. 4 pri objašnjavanju uzroka kavitacije.

U razmatranom slučaju, intenzitet kavitacije je opisan razmjerno formalno normiranom veličinom – takvom da maksimalna vrijednost koja se može sresti u razmatranom stroju odgovara 1, odnosno 100 %. Moguća je i puna kalibracija u brzinu erozije izraženu u kilogramima metala što se izgubi na godinu [8]. Uz vibroakustičke podatke, tu se traže i statistika snage turbine te podaci o ranijim popravkama kavitacijskih oštećenja. Pragovi intenziteta kavitacije, poput onih nacrtanih na sl. 4, definiraju su na sličan način.

3. DALJNJA ANALIZA: KAVITACIJSKI MEHANIZMI

Multi-dimenzionalna analiza omogućuje utvrđivanje prostorne razdiobe kavitacije unutar turbine. Rezultati

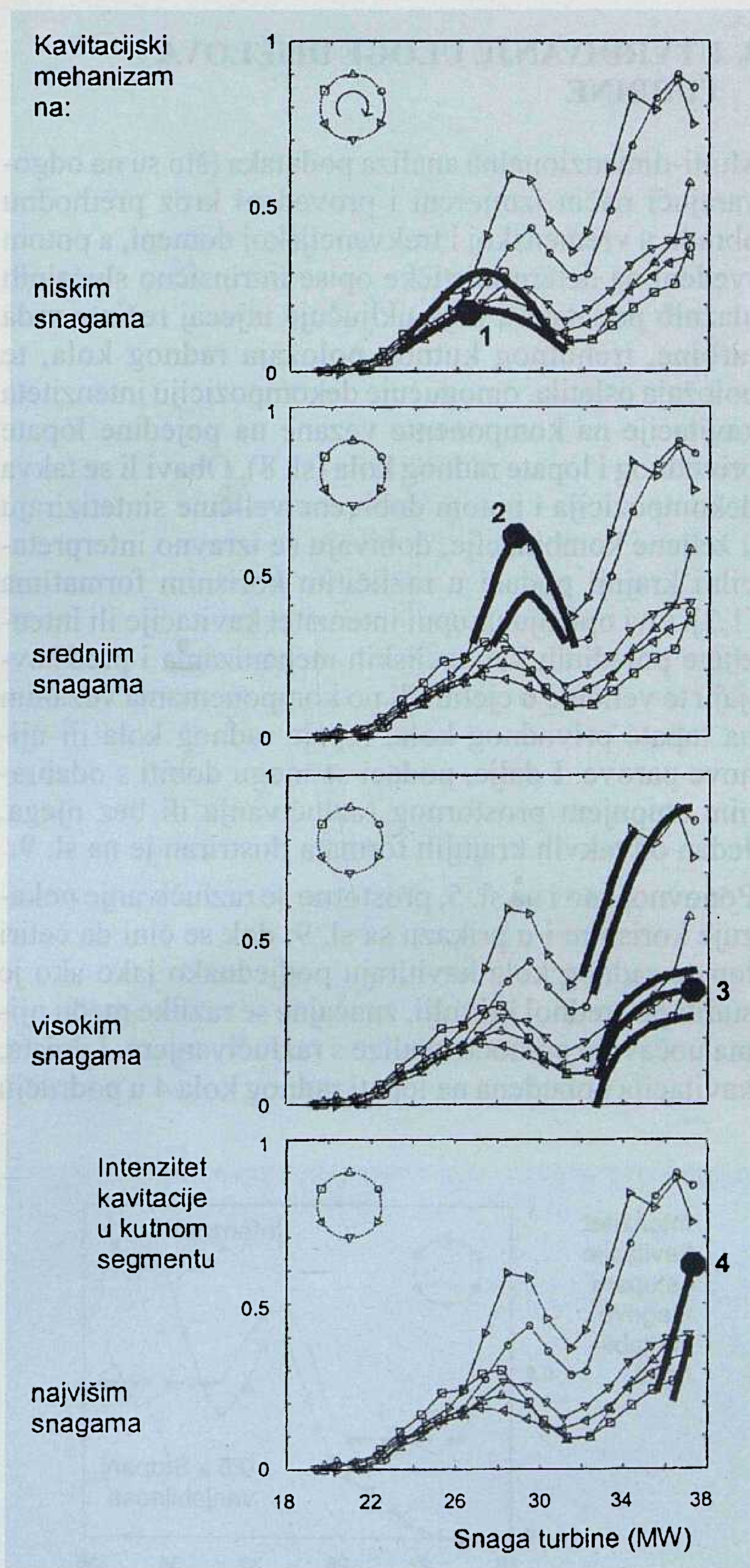


Slika 4. Jednodnevni zapis iz jednostavnog kavitacijskog monitora (zasnovanog na sintetičkom osjetilu)

takvog koraka često daju daljnje uvide u korisne detalje kavitacijskog procesa. Jedan takav primjer prikazan je na sl. 5. Dok krivulja ukupne kavitacije sa sl. 3 samo ukazuje na to da bi proces mogao imati složenu strukturu, krivulje s prostornim razlučivanjem sa sl. 5, praćene nekim daljnjim podacima poput onih što su ilustrirani na sl. 6 i 7, omogućuju njegovu dekompoziciju na različite kavitacijske procese. Valja napomenuti da bi mehanizam na najvišim snagama ostao nezamijećen bez podataka s prostornim razlučivanjem. Ako se opći uvid u kavitaciju u cijevnim turbinama kombinira s predstavljenim i nekim daljnjim rezultatima multi-dimenzionalne analize te rezultatima model-

skih ispitivanja [9], slijede zaključci o kavitacijskom ponašanju turbine A na Dubravi:

Pri tipičnom padu, kavitacijski prag (unutar praktičnog radnog opsega, 18-38 MW) leži dosta nisko, na 22 MW; v. sl. 3 i 5. Pri niskom opterećenju, dolazi do kavitacije glavine (mehanizam na niskim snagama). Samo slaba ili gotovo nikakve kavitacija pojavljuje se na energetskom optimumu. Širina (po snazi) ovog kavitacijskog optimuma je malena. Ispod i iznad njega pojavljuje se kavitacija ulaznog brida na usisnoj strani praćena kavitacijom u rasporu uz vrhove lopata (mehanizmi



Slika 5. Već i gruba dekompozicija kavitacijske krivulje iz sl. 3 na doprinose iz šest kutnih segmenata unutar turbine, predstavljena ovdje pomoću šest simbola, razotkirava postojanje četiri kavitacijska mehanizma u turbini; ovi su ilustrirani debelim krivuljama

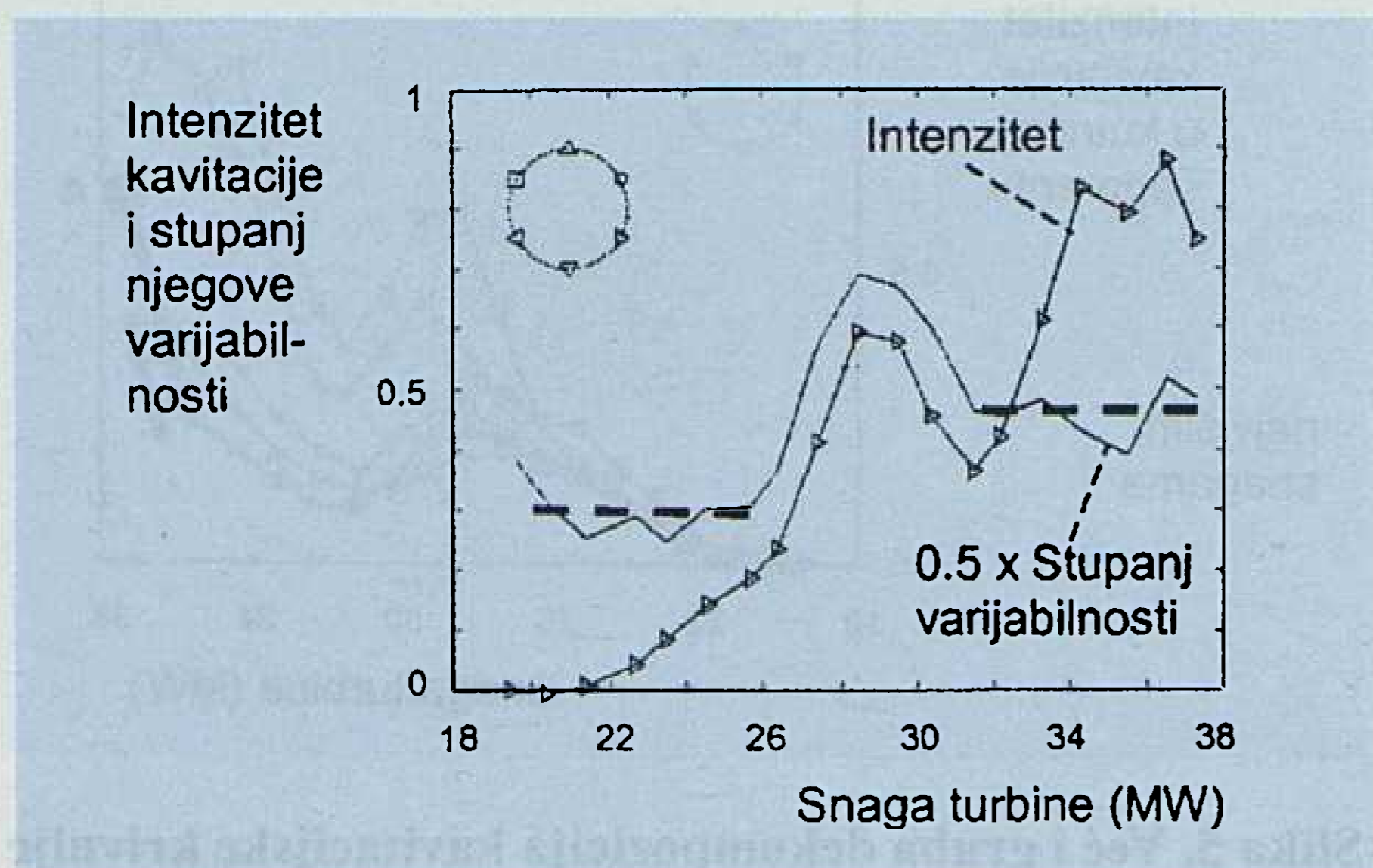
na srednjim i visokim snagama). Konačno, mehanizam na najvišim snagama donosi putpuno razvijenu slojastu kavitaciju na usisnoj strani.

Razlike u kavitacijskim intenzitetima u različitim kutnim položajima unutar turbine (v. dvije posebno visoke krivulje na sl. 5) potiču iz područja niskog tlaka u gornjim položajima. Radno kolo rotira u smjeru kazaljke na satu, pa ova kavitacija generira jak šum i eroziju u položajima u kojima kavitacijske šupljine iščezavaju, tj. u područjima pomaknutim od vertikale u smjeru kazaljke na satu.

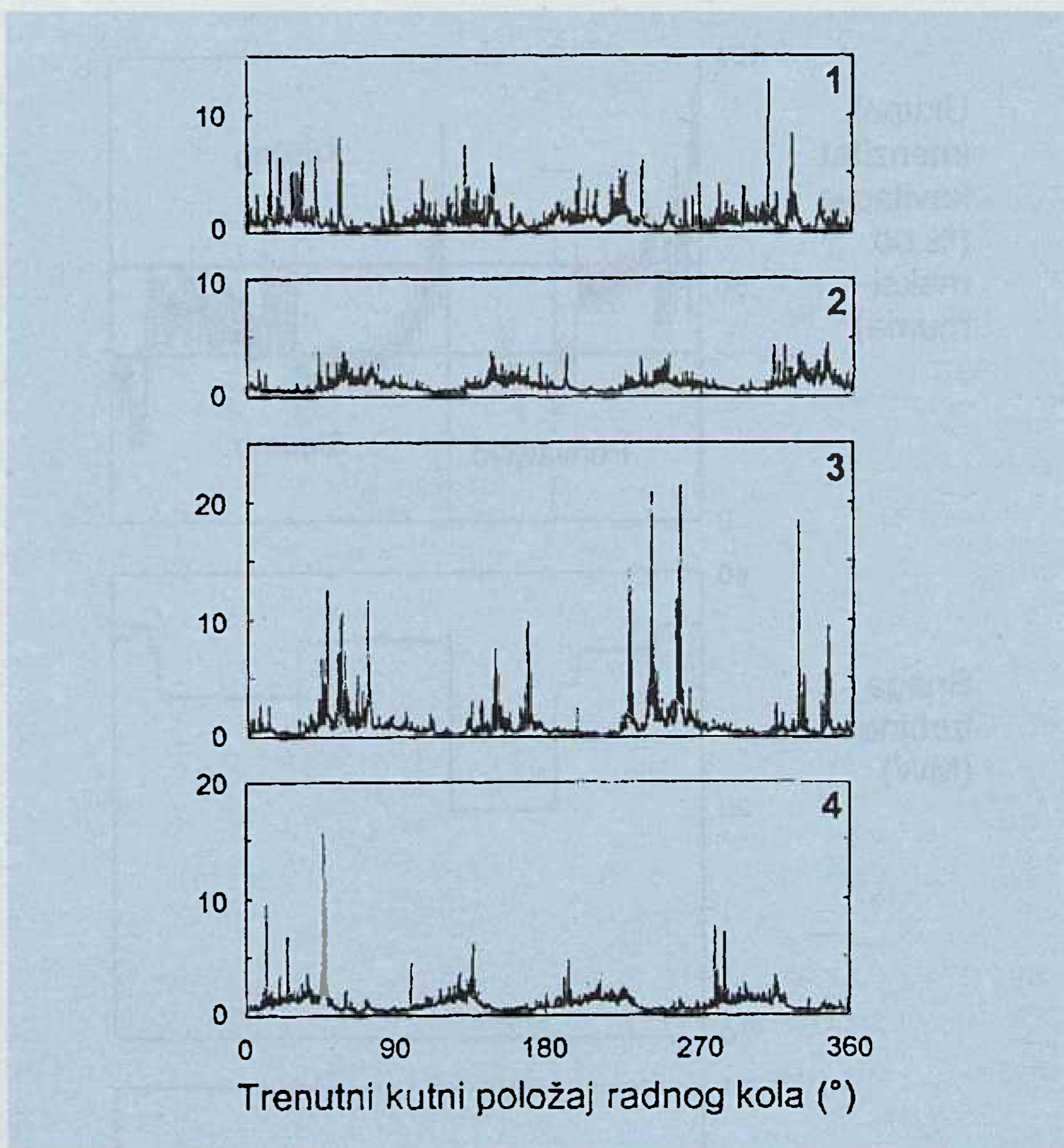
4. UTVRĐIVANJE ULOGE DIJELOVA TURBINE

Multi-dimenzionalna analiza podataka (što su na odgovarajući način izmjereni i provedeni kroz prethodnu obradu u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, a potom svedeni na determinističke opise intrinzično slučajnih ulaznih podataka), koja uključuje utjecaj režima rada turbine, trenutnog kutnog položaja radnog kola, te položaja osjetila, omogućuje dekompoziciju intenziteta kavitacije na komponente vezane na pojedine lopate privodnog i lopate radnog kola (sl. 8). Obavi li se takva dekompozicija i potom dobivene veličine sintetiziraju u željene kombinacije, dobivaju se izravno interpretabilni krajnji podaci u različitim korisnim formatima [1,2]. Ovi opisuju ukupni intenzitet kavitacije ili intenzitete pojedinih kavitacijskih mehanizama i predstavljaju te veličine u cjelini ili po komponentama vezanim na lopate privodnog kola, lopate radnog kola ili njihove parove. I dalje, podaci se mogu dobiti s odabranim stupnjem prostornog razlučivanja ili bez njega. Jedan od takvih krajnjih formata ilustriran je na sl. 9.

Ponovno, kao i na sl. 5, prostorno se razlučivanje pokazuje korisnim i u prikazu sa sl. 9: dok se čini da četiri lopate radnog kola kavitiraju podjednako jako ako je suditi po srednoj krivulji, značajne se razlike među njima uočavaju pomoću analize s razlučivanjem. I doista, kavitacija pobuđena na lopati radnog kola 4 u području



Slika 6. U područjima snage u kojima djeluju razni mehanizmi nađena je različita varijabilnost kavitacije. Ovo pomaže pri prepoznavanju mehanizama.



Slika 7. Krivulje sa sl. 2 u drugom formatu, normalizirane na srednju vrijednost 1, kako su nađene u četiri radne točke označene točkama na sl. 5, pokazuju značajne razlike među mehanizmima

niskog tlaka (desni gornji graf) dva puta je jača nego na ostalim lopatama.

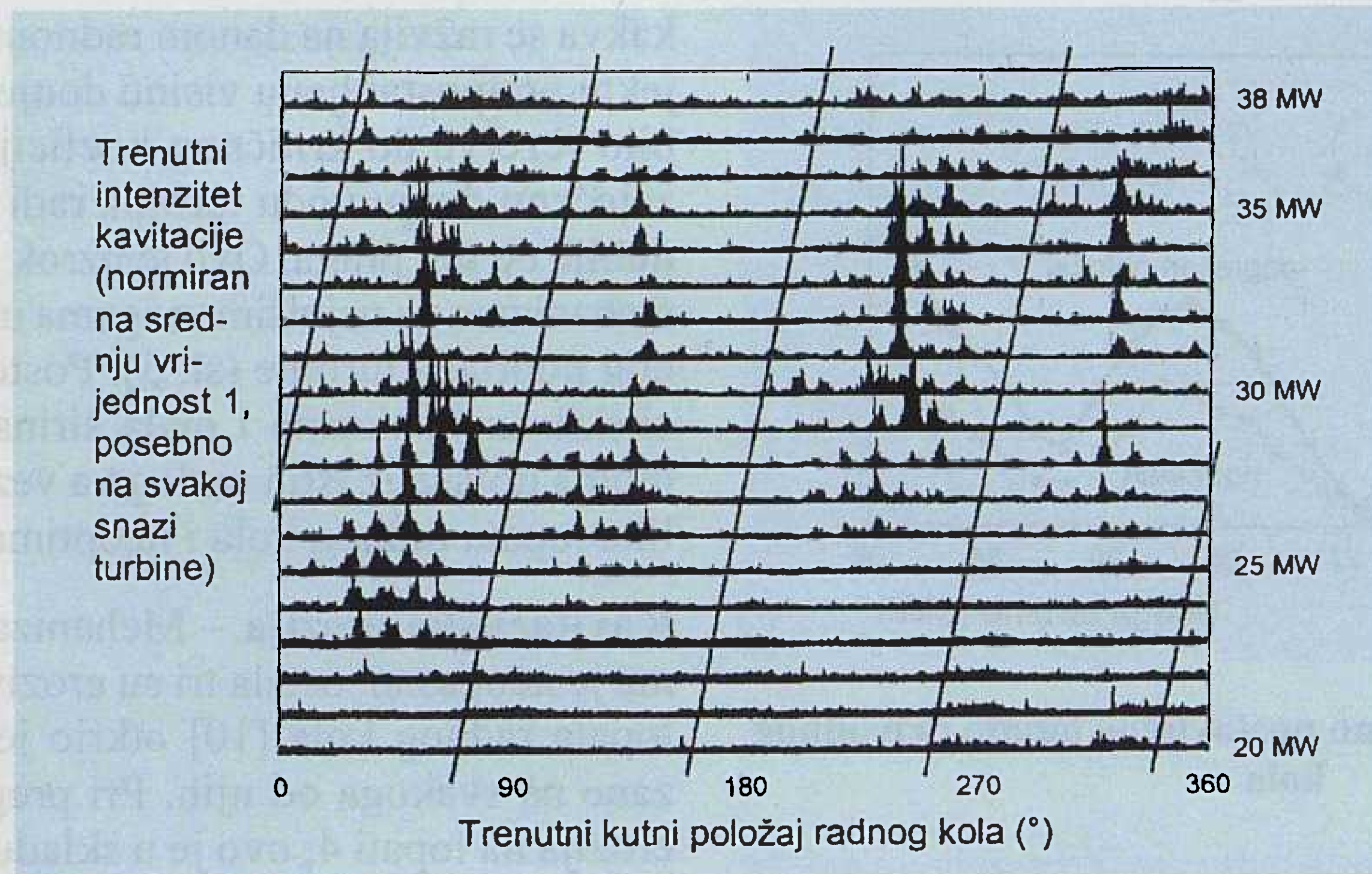
5. DALJNJI EFEKTI

Pogrešno postavljena lopata privodnog kola – Na agregatu A na Dubravi obavljena je simulacija pogrešnog funkcioniranja privodnih lopata. Jedna je lopata otvorena za 5° više nego je to normalno. Efekt na kavitaciju, provjeren najbližim osjetilom (sl. 10): svi su kavitacijski mehanizmi pojačani ali su im pragovi ostali nepromijenjeni, s izuzetkom onog na najvišim snagama. Ovome je prag značajno pao (v. crtkane pravce).

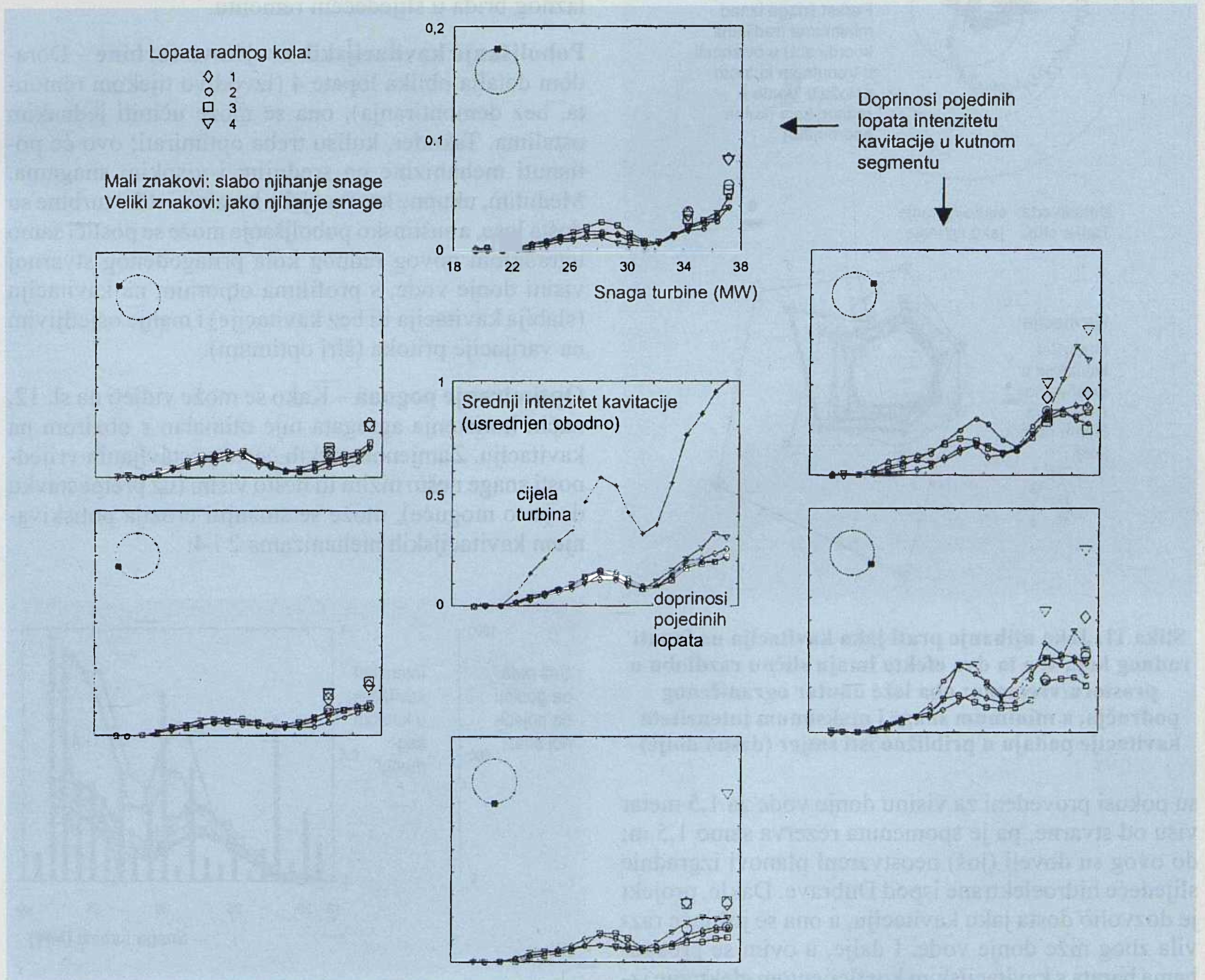
Njihanje snage – Visoka korelacija kavitacije i njihanja snage, jasno izražena na sl. 9 (usporedite velike i male znakove), ispitna je dodatno (sl. 11). Nađeno je jasno podudaranje jake kavitacije na lopati radnog kola 4 i minimuma snage. Oba efekta imaju oblik svojevrsnog udarca koji dolazi jednom na okret.

6. O KAVITACIJI U TURBINI DUBRAVA A

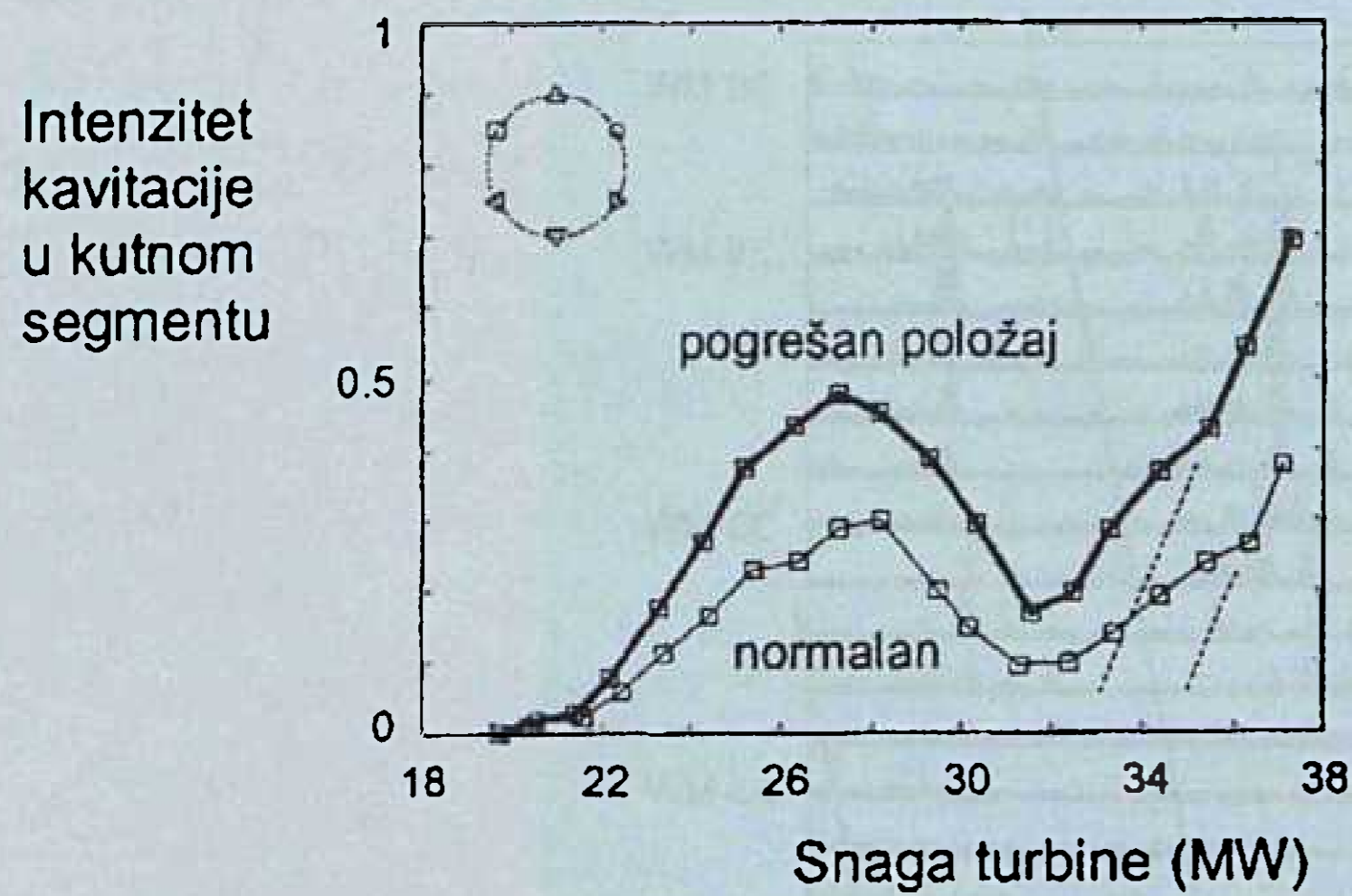
Kavitacijski mehanizmi – Prema modelskim ispitivanjima [9], postoji rezerva od 3 metra stupca vode između kavitacijskog koeficijenta na kojem dolazi do pada učinkovitosti za 1 % i kavitacijskog koeficijenta elektrane pri nazivnom padu i punom protoku. Na modelu je u ovoj točki nađena razmjerno snažno razvijena kavitacija. Međutim, turbina je projektirana i modelski



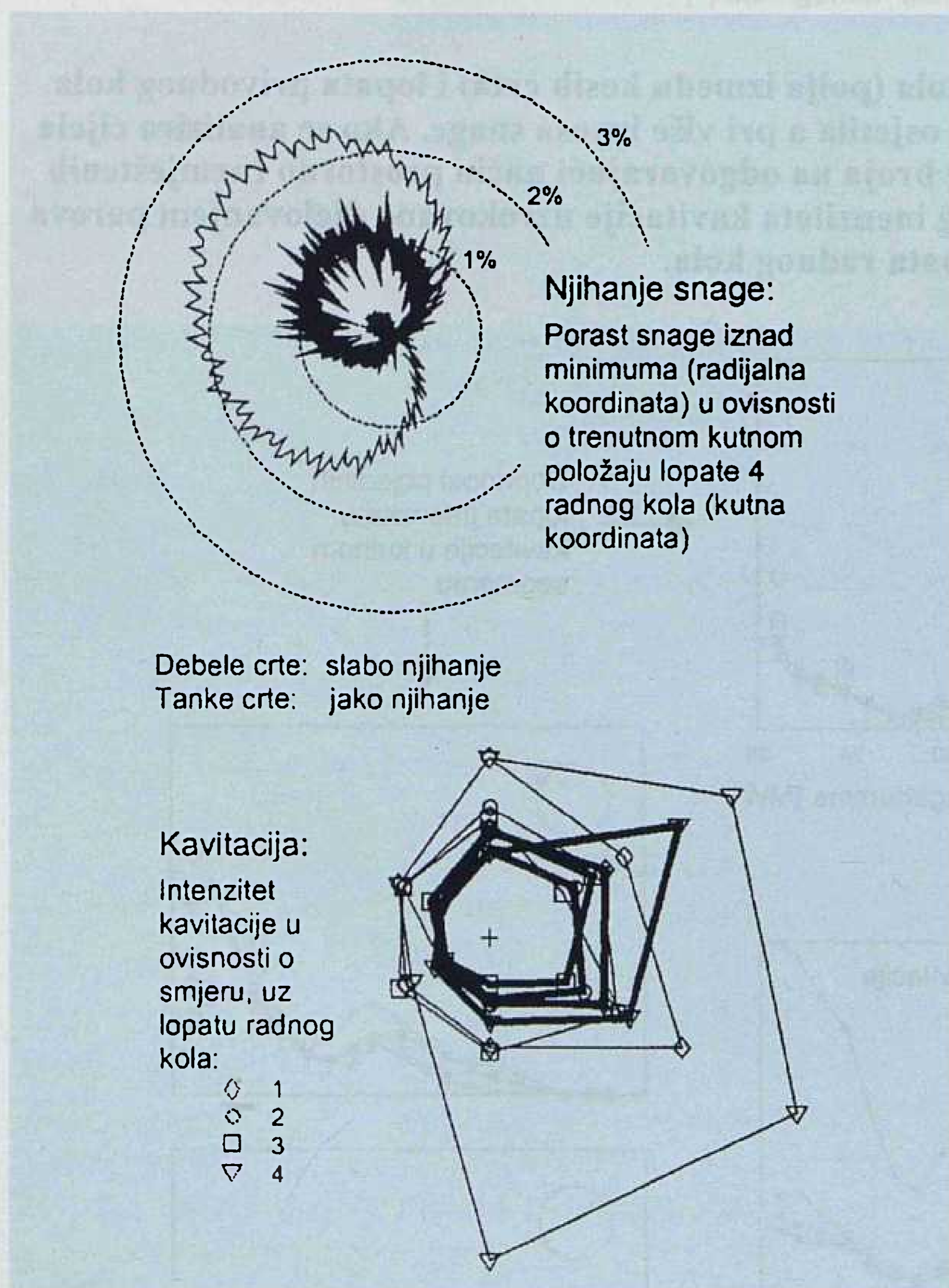
Slika 8. Raspoznatljivi tragovi djelovanja lopata radnog kola (polja između kosih crta) i lopata privodnog kola (grupe šiljaka unutar polja) dolaze u ovom zapisu s jednog osjetila a pri više iznosa snage. Ako se analizira cijela grupa takvih zapisa prikupljena pomoću dovoljno visokog broja na odgovarajući način prostorno razmještenih osjetila, dobivaju se pouzdane i nepristrane ocjene ukupnog intenziteta kavitacije uzrokovane djelovanjem parova lopata privodnog - lopata radnog kola.



Slika 9. Intenzitet kavitacije vezan na četiri lopate radnog kola – srednji intenzitet (graf u sredini) i grubo prostorno razlučeni intenziteti (šest grafova okolo s označenim položajima). Agregat A na Dubravi trpi od razmjerno jakog nihanja snage u ritmu jednom na okret, čija amplituda varira; razmatraju se dva slučaja nihanja



Slika 10. Slučaj pogrešno postavljene lopate privodnog kola



Slika 11. Jako njihanje prati jaka kavitacija na lopati radnog kola 4, a ta dva efekta imaju sličnu razdiobu u prostoru/vremenu: oba leže unutar ograničenog područja, a minimum snage i maksimum intenziteta kavitacije padaju u približno isti smjer (desno dolje)

su pokusi provedeni za visinu donje vode za 1,5 metar višu od stvarne, pa je spomenuta rezerva samo 1,5 m; do ovog su doveli (još) neostvareni planovi izgradnje slijedeće hidroelektrane ispod Dubrave. Dakle, projekt je dozvolio dosta jaku kavitaciju, a ona se još jače razvila zbog niže donje vode. I dalje, u ovim se prosudbama barata s kavitacijskim koeficijentom elektrane izvedenim iz prilika na osi. Za jaku su kavitaciju (sl. 5), međutim, odgovorni gornji položaji, koji su za cca 2,5 m odmaknuti od osi. Slijedi zaključak: za kavitaciju

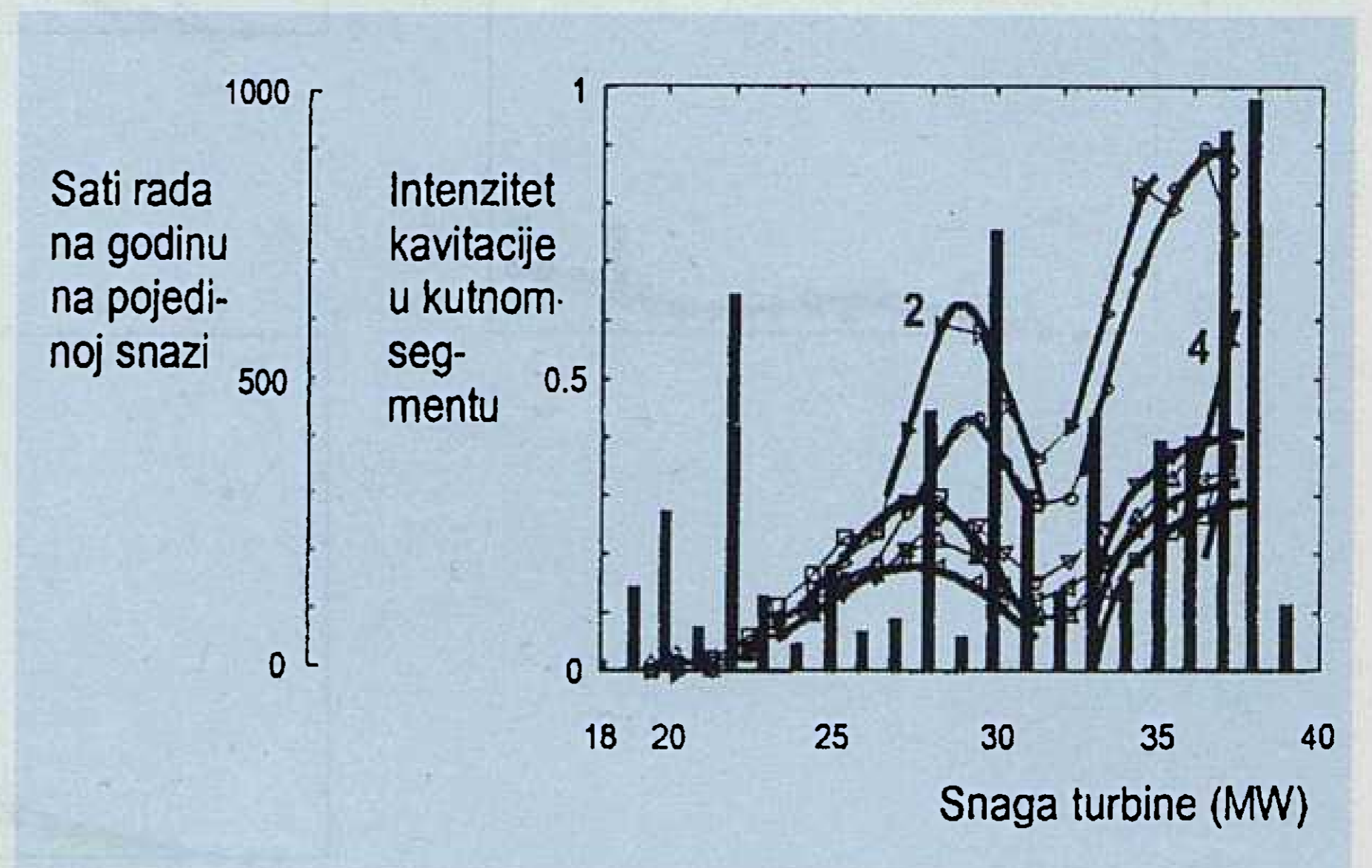
kakva se razvija na danom radnom kolu, čak i uz u projektu pretpostavljenu visinu donje vode gotovo da nije bilo rezerve do kritičnog koeficijenta kavitacije, a uz zatečenu donju vodu turbina radi cca $-3+1,5+2,5=1$ m dublje od tog praga. Ovo je uzrok pojave kavitacijskog mehanizma na najvišim snagama unutar normalnog radnog područja turbine (sl. 5). Postojanje drugih kavitacijskih mehanizama i mala širina kavitacijskog optimuma dolaze iz istih razloga a vezani su na detalje oblika lopata radnog kola i neoptimalnu kulisu.

Kavitacijska erozija – Mehanizam na niskim snagama je neopasan, ostala tri su erozivna. I doista, pregled lopata radnog kola [10] otkrio je tragove erozije vezane na svakoga od njih. Pri pregledu je nađena jača erozija na lopati 4; ovo je u skladu s rezultatima vibroakustičke dijagnoze predstavljenim na sl. 9.

Izuzetna lopata – Preliminarno trodimenzionalno optičko ispitivanje geometrije lopata radnog kola [11] pokazalo je razlike koje bi mogle objasniti izuzetno ponašanje lopate 4. Preporuča se detaljniji pregled ulaznog brida u slijedećem remontu.

Poboljšanje kavitacijskih svojstava turbine – Doradom detalja oblika lopate 4 (izvodivo tijekom remonta, bez demontiranja), ona se može učiniti jednakim ostalima. Također, kulisu treba optimirati; ovo će potisnuti mehanizme na srednjim i visokim snagama. Međutim, ukupne kavitacijske karakteristike turbine su dosta loše, a suštinsko poboljšanje može se postići samo ugradnjom novog radnog kola prilagođenog stvarnoj visini donje vode, s profilima otpornim na kavitaciju (slabija kavitacija ili bez kavitacije) i manje osjetljivim na varijacije pritoka (širi optimum).

Optimiranje pogona – Kako se može vidjeti na sl. 12, način korištenja agregata nije optimalan s obzirom na kavitaciju. Zamjenom nekih često postavljenih vrijednosti snage nešto nižim ili nešto višim (uz pretpostavku da je to moguće), može se smanjiti erozija potiskivanjem kavitacijskih mehanizama 2 i 4:



Slika 12. Rad agregata se može optimirati obzirom na kavitaciju. Podaci za to: podaci iz sl. 5 i godišnja statistika postavljene snage (ovdje: 6-godišnji prosjek).

28 MW na 26 MW,
30 MW na 32 MW,
37 MW i 38 MW na 36 MW.

7. ZAKLJUČAK

Dijagnostička ispitivanja i monitoring kavitacije, zasnovani na multi-dimenzionalnoj analizi podataka prikupljenih pomoću velikog broja osjetila, podržanoj empirijskim i teorijskim modelima, daju više nego drugi pristupi: nepristran i bogat opis kavitacije s raspoznavanjem kavitacijskih mehanizama i ocjenama kavitacijske kvalitete dijelova turbine. Ovo rezultira u pouzdanoj dijagnostici i monitoringu visoko osjetljivom na štetne efekte.

ZAHVALA

D. Magić, dipl. ing., direktor HE Dubrava, omogućio je prvu primjenu multidimenzionalne metode za dijagnostiku i monitoring hidro-agregata u Hrvatskoj. Đ. Ružić, dipl. ing., rukovoditelj Odjela za tehničke poslove HED, te timovi u smjenama u HED i Komandi lanca Varaždin, omogućili su opsežna ispitivanja. Đ. Dvekar iz HED i mr. sc. V. Đelić, dipl. ing. iz Turboinstituta, Ljubljana, sudjelovali su u interpretaciji rezultata ispitivanja kavitacije. Autor se zahvaljuje svima, a također i dr. sc. Vladimiru Koromanu, dipl. ing., iz Brodarskog instituta, Zagreb, i mr. sc. Ivanu Bacingeru, dipl. ing., iz HEP - PP HE Sjever, koji su dali inicijativu za multidimenzionalni dijagnostički rad na kavitaciji na HED.

LITERATURA

- [1] B. BAJIĆ, "Intelligentni monitoring i dijagnostika kavitacije - Metoda za velik broj lopata radnog kola", *Energija*, god. 51, br. 3, 2002; također: *International Water Power & Dam Construction*, Vol. 54, No. 5, 2001.
- [2] B. BAJIĆ, "Multi-dimensional diagnostics of turbine cavitation", 20th IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Systems, Charlotte, North Carolina, SAD, 2000; također: *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, No. 4, 2002.
- [3] B. BAJIĆ, "Nove metode vibroakustičke dijagnostike kavitacije u turbinama", *Energija*, god. 48, br. 4, 1999; također: *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 4, 2002.
- [4] B. BAJIĆ, J. SABOLEK, Đ. DVEKAR, D. MAGIĆ, "Ispitivanja vibracija, zračnog raspora i magnet-skog toka na cijevnom agregatu 1 HE Dubrava", *Simpozij HEPP 2001, Šibenik*, 2001.
- [5] DJ. DVEKAR, B. BAJIĆ, I. BACINGER, D. MAGIC, J. SABOLEK, M. DEMIROVIC, "Suppression of shaft vibration on a bulb unit, based on detailed rotor diagnostics", *HYDRO 2001 Conference, Riva del Garda, Italija*, 2001; također: *Simpozij HEPP 2001, Šibenik*, 2001.
- [6] Ispitivanja njihanja snage agregata A na HED, više internih dokumenata.
- [7] V. KERCAN, M. PIŠLJAR, J. SLOKAR, V. ĐELIĆ, Z. PERŠIN, "HE Dubrava - Ispitivanja energetske i dinamičke karakteristika hidroelektrane", *Turboinštitut, izvještaj 2050, Ljubljana, Slovenija*, 1990.
- [8] B. BAJIĆ, "A practical approach to vibroacoustic assessment of turbine cavitation", *International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 3, No. 6, 1996.
- [9] V. KERCAN, S. CIZL, "HE Dubrava - Primopredajna ispitivanja modela turbine", *Turboinštitut, izvještaj 1779, Ljubljana, Slovenija*, 1986.
- [10] N. ABRAMOVIĆ, "Izvještaj o pregledu nosive čelične konstrukcije, te defektoskopskom pregledu radnih turbinskih lopatica agregata broj 1 (A1) na HE Dubrava", *Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, izvještaj 25-055/01, 2001*.
- [11] M. GOMERČIĆ i N. ABRAMOVIĆ, "Izvještaj trodimenzionalne optičke kontrole geometrije radnog kola turbine agregata A1 u HE-Dubrava", *Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, izvještaj 25-273/01, 2001*.

MULTIDIMENSIONAL CAVITATION DIAGNOSTICS AND MONITORING

Method for a small number of turbine runner blades - Applied to HPP Dubrava

The multidimensional method of vibrating-acoustic diagnostics and monitoring, Korto Cavitation Services, formally adopted for a small number of turbine runner blades, has been applied to tube aggregate A of 40MW at HPP Dubrava. Four cavitation mechanisms have been identified, cavitation quality of turbine runner blades has been evaluated, the distribution of cavitation intensity tested and strong non-homogeneity found. Wrong adjustment of an inlet runner blade has been tested as well as preliminary the connection between cavitation and power swinging. Apart from results, the way of its performance is also illustrated.

MEHRDIMENSIONALE ZUSTANDSBESTIMMUNG UND NACHERKUNDUNG DER KAVITATION

Die Methode für die Wenigschauffelrad-Anwendung im Wasserkraftwerk „Dubrava“

Die „Korto Cavitation Services“ mehrdimensionale Methode der vibro-akustischen Zustandsbestimmung und Nacherkundung der Kavitation, angepasst für die Anwendung am Wenigschauffelrad, wurde an das 40 MW Rohragregat „A“ des Wasserkraftwerkes „Dubrava“ angewendet.

Es wurden: vier Kavitationsvorgangsarten wiedererkannt, die Kavitationsgüte der Radschaufeln beurteilt, die

Verteilung der Kavitationsstärke innerhalb des Turbinenraumes geprüft, und dabei eine starke Ungleichartigkeit gefunden. Geprüft wurde die falsche Verstellung einer Leitradschaukel und -vorderhand- der Zusammenhang zwischen der Kavitation und den Leistungsschwankungen. Zu der Beschreibung von Ergebnissen, wurde auch die Weise der Ermittlung dargestellt.

Naslov pisca:

Dr. sc. Branko Bajić, dipl. ing.
Korto Cavitation Services
Luxembourg

Uredništvo primilo rukopis:
 2002 – 09 – 03.

[8] B. BAJIĆ, "A practical approach to vibracoustic assessment of turbine cavitation", *International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 3, No. 6, 1998.

[9] V. KERČAN, S. CIZI, "HE Dubrava - Primopredajna ispitivanja modela turbine", *Turbomáquina*, izveštaj 1778, Ljubljana, Slovenija, 1980.

[10] N. ABRAMOVIĆ, "Izveštaj o pregledu nosive čelene konstrukcije, te detekcijskim pregledu radnih turbinskih lopatica agregata broj 1 (A1) na HE Dubrava", *Izveštaj gradovinarstva Hrvatske*, Zagreb, izveštaj 25-052/01, 2001.

[11] M. GOMERČIĆ, N. ABRAMOVIĆ, "Izveštaj o trodimenzionalne optičke kontrole geometrije radnog kola turbine agregata A1 na HE Dubrava", *Izveštaj gradovinarstva Hrvatske*, Zagreb, izveštaj 25-273/01, 2001.

MULTIDIMENSIONAL CAVITATION DIAGNOSTICS AND MONITORING

Method for a small number of turbine runner blades - Applied to HPP Dubrava

The multidimensional method of vibrating-acoustic diagnostics and monitoring, Korto Cavitation Services, formerly adopted for a small number of turbine runner blades, has been applied to two aggregates of 40MW at HPP Dubrava. Four cavitation mechanisms have been identified, cavitation quality of turbine runner blades has been evaluated, the distribution of cavitation intensity tested and strong non-homogeneity found. Wrong adjustment of an inlet runner blade has been tested as well as preliminary the connection between cavitation and power swinging. Apart from results, the way of its performance is also illustrated.

MEHRDIMENSIONALE ZUSTANDSBESTIMMUNG UND NACHERKUNDUNG DER KAVITATION

Die Methode für die Wenigschaukel-Anwendung im Wasserkraftwerk „Dubrava“

Die „Korto Cavitation Services“ mehrdimensionale Methode der vibro-akustischen Zustandsbestimmung und Nacherkundung der Kavitation, angepasst für die Anwendung am Wenigschaukelrad, wurde an das 40 MW Kohleaggregat „A“ des Wasserkraftwerkes „Dubrava“ angewendet.

Es wurden vier Kavitationsvorgänge wiederentdeckt, die Kavitationsstärke der Radblätter beurteilt, die

Dijagnostička ispitivanja i monitoring kavitacije, zasnovani na malo-dimenzionalnoj analizi podataka prikupljenih pomoću velikog broja osjetila, podražani su primjenom i teorijskim modelima, daju više nego drugi pristupi: nepristatan i bogat opis kavitacije s raznovrsnim kavitacijskim mehanizmima i ocjenama kavitacijske kvalitete dijelova turbine. Ovo rezultira u pouzdanoj dijagnostici i monitoringu visoko osjetljivom na štetne efekte.

ZAHVALA

D. Magić, dipl. ing., direktor HE Dubrava, omogućio je prvi primjenom multidimenzionalne metode za dijagnostiku i monitoring kavitacije u Hrvatskoj. D. Kerčan, dipl. ing., rukovoditelj Ojela za turbine radne HED, te timovi u njegovom i HED i Kerčanovim laboratorijima omogućili su opsežna ispitivanja. D. Dvekar, mr. sc. V. Belić, dipl. ing. iz Dubrave, Ljubljana, suradnici su u interpretaciji rezultata iz primjene kavitacije. Autor se zahvaljuje svima, a također i dr. sc. Vladimiru Koromanu, dipl. ing. iz Hrvatskog instituta, Zagreb, i mr. sc. Ivanu Baciingeru, dipl. ing., iz HEP - PP HE Špeter, koji su dali vrijedne savjete na multidimenzionalni dijagnostički rad na kavitaciji na HED.

LITERATURA

[1] B. BAJIĆ, "Intelligent monitoring i dijagnostika kavitacije - Metoda za velik broj lopata radnog kola", *Energija*, god. 51, br. 3, 2002; također: *International Water Power & Dam Construction*, Vol. 34, No. 5, 2001.

[2] B. BAJIĆ, "Multi-dimensional diagnostics of turbine cavitation", 20th IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Systems, Charlotte, North Carolina, USA, 2000; također: *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, No. 4, 2002.

[3] B. BAJIĆ, "Nove metode vibracijske dijagnostike kavitacije u turbinama", *Energija*, god. 48, br. 4, 1999; također: *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 4, 2002.

[4] B. BAJIĆ, J. SABOLJK, B. DVEKAR, D. MAGIĆ, "Ispitivanja vibracija, zračnog raspisa i magnet-skop toku na cijevnom agregatu i HE Dubrava", *Simpozij HEP 2001, Šibenik*, 2001.

[5] D. DVEKAR, B. BAJIĆ, I. BACINGER, D. MAGIĆ, J. SABOLJK, M. BRMIROVIĆ, "Suppression of shaft vibration on a bulb unit, based on detailed rotor diag-