

INTELIGENTNI MONITORING I DIJAGNOSTIKA KAVITACIJE

Metoda za velik broj lopata radnog kola*

Branko B a j i ć, Luksemburg

UDK 697.34:658.8.03

IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Prikazuje se nova, multi-dimenzionalna tehnika vibro-akustičke dijagnostike i monitoringa kavitacije, razvijena u Korto Cavitation Services. Tehnika daje detaljan uvid u kavitacijske procese u turbini u radu, nedostižan drugim tehnikama, i osigurava izuzetno visoku osjetljivost i pouzdanost monitoringa kavitacije. Ona omogućuje razlučivanje i ocjenu različitih kavitacijskih mehanizama u turbini, te razlučivanje i ocjenu uloge kritičnih dijelova turbine u kavitaciji. U članku se opisuje varijanta metode pogodna za velik broj lopata radnog kola.

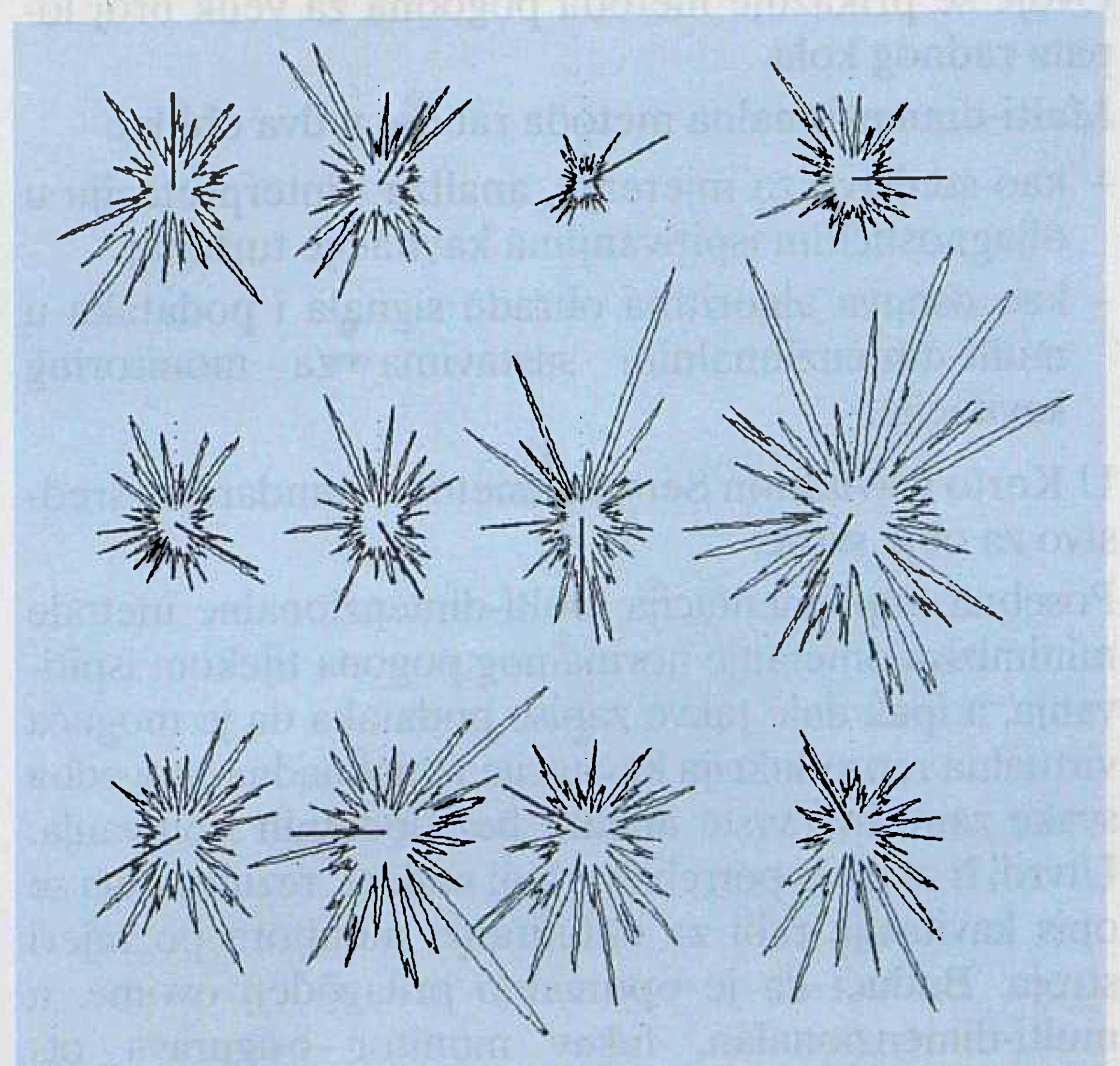
Ključne riječi: turbina, kavitacija, erozija, dijagnostika, monitoring.

1. UVOD

Podaci o kavitacijskom ponašanju turbine potrebni su u nizu situacija, od primopredaje novog stroja do remonta ili obnove u kojima se popravljaju ili prepravljaju dijelovi poput lopata privodnog ili radnog kola. Tijekom eksploatacije također je važno znati da li, pod djelovanjem raznih štetnih procesa, dolazi do promjena u kavitacijskom ponašanju turbine.

Zasad jedini način da se ocijeni intenzitet kavitacije u turbini u radu i stekne uvid u njeno stanje je da se kavitacija "sluša". Kavitacija stvara vibro-akustičko polje koje se prenosi iz vode do suhe strane stroja i nosi podatke o kavitacijskom strujanju i eroziji koju ono izaziva. Brojni su pokusi pokazali da strukturni zvuk i visokofrekventne vibracije dijelova turbine nose svojevrsni "otisak prsta" kavitacije.

Najjednostavniji način da se kavitacija opiše vibro-akustičkim sredstvima je da se vibro-akustičko osjetilo stavi na pogodno mjesto na turbini i da se mjeri intenzitet šuma unutar odgovarajućeg frekvencijskog opsega, ocjenjuje učestalost impulsa šuma (koji odražavaju impulsi karakter kavitacije u turbini), uspoređuju spektri šuma prikupljeni pri raznim vrijednostima snage i sl. Prva mogućnost ovdje je da se kao ocjene intenziteta kavitacije upotrijebe srednje vrijednosti tih veličina. Iako često rabljen, ovakav pristup – jedno osjetilo, rad sa srednjim vrijednostima – nije optimalan. Sl. 1 ilustrira prednosti drukčijeg pristupa – više osjetila, bolja obrada podataka. Prikazane modulationske krivulje sa šiljcima dobivene su pomoću 12 os-



Slika 1. Lopate rotora periodično prolaze kroz nehomogeno polje strujanja iza lopata privodnog kola. Ovo uzrokuje promjene u intenzitetu kavitacije ili čak čini da kavitacija nastaje i nestaje unutar svakog okreta ili njegovog dijela. Analizom rezultirajuće ovisnosti intenziteta kavitacije o trenutnom kutnom položaju rotora, poput ovdje prikazanih, može se identificirati doprinos ukupnom intenzitetu koji dolazi od svakog para lopata privodnog kola – lopata radnog kola.

jetila montiranih oko rotora Kaplanove turbine od 60 MW (pune crte označuju kutne položaje osjetila). Uz rad sa samim srednjim vrijednostima izgubili bi se vrijedni podaci sadržani u ovakvim krivuljama (one prelaze u kružnice), a uporabom samo jednog osjetila može se pak dobiti potpuno pogrešan opis kavitacije. I

* Prikazano na 1. međunarodnom simpoziju Hidroelektrane HEPP 2001., Šibenik, lipanj 2001, i u International Water Power & Dam Construction, svibanj 2001.

doista, kako se vidi na slici, osjetilima u raznim položajima dobivaju se različiti oblici i amplitude razdiobe intenziteta kavitacije po dijelovima turbine.

2. MULTI-DIMENZIONALNA METODA

Multi-dimenzionalni pristup dijagnostici i monitoringu kavitacije, koji se suštinski razlikuje od onoga sa srednjom vrijednošću i samo jednim ili samo par osjetila, uklanja ove mane i donosi niz daljnjih prednosti. Pristup je razvijen u Korto Cavitation Services kroz niz ispitivanja u naravi i istraživačkih koraka. Multi-dimenzionalna je metoda provjerena u praksi i upotrijebljena na Francisovim, Kaplanovim i cijevnim turbinama. Javno je predstavljena na 20. simpoziju o hidrauličkim strojevima i sustavima Međunarodne asocijacije za hidraulička istraživanja, IAHR. Multi-dimenzionalna se metoda sastoji od posebnog načina prikupljanja, obrade i interpretacije vibro-akustičkih podataka izraženih u ovisnosti o položaju osjetila, frekvenciji šuma, trenutnom položaju rotora i stupnju opterećenja turbine. Mjerni postupak i postupak analize razlikuju se ovisno o broju lopata radnog kola. Ovdje se prikazuje metoda pogodna za velik broj lopata radnog kola.

Multi-dimenzionalna metoda rabi se u dva oblika:

- kao sredstvo za mjerenje, analizu i interpretaciju u dijagnostičkim ispitivanjima kavitacije turbina;
- kao osnova algoritma obrade signala i podataka u multi-dimenzionalnim sustavima za monitoring kavitacije.

U Korto Cavitation Services metoda standardno sredstvo za obje svrhe.

Posebna implementacija multi-dimenzionalne metode minimizira ometanje normalnog pogona tijekom ispitivanja, a ipak daje takve zapise podataka da je moguća virtualna reprodukcija kavitacije te naknadna provedba svake zamislive vrste analize bez dodatnih ispitivanja. Utvrdi li se da je potreban trajni nadzor, rezultirajući se opis kavitacije rabi za definiranje monitora po mjeri stroja. Budući da je optimalno prilagođen ovome, a multi-dimenzionalan, takav monitor osigurava otkrivanje svake značajne nepravilnosti iako se u njemu u pravilu radi s manje osjetila i obrađuje manje podataka nego u detaljnom dijagnostičkom ispitivanju.

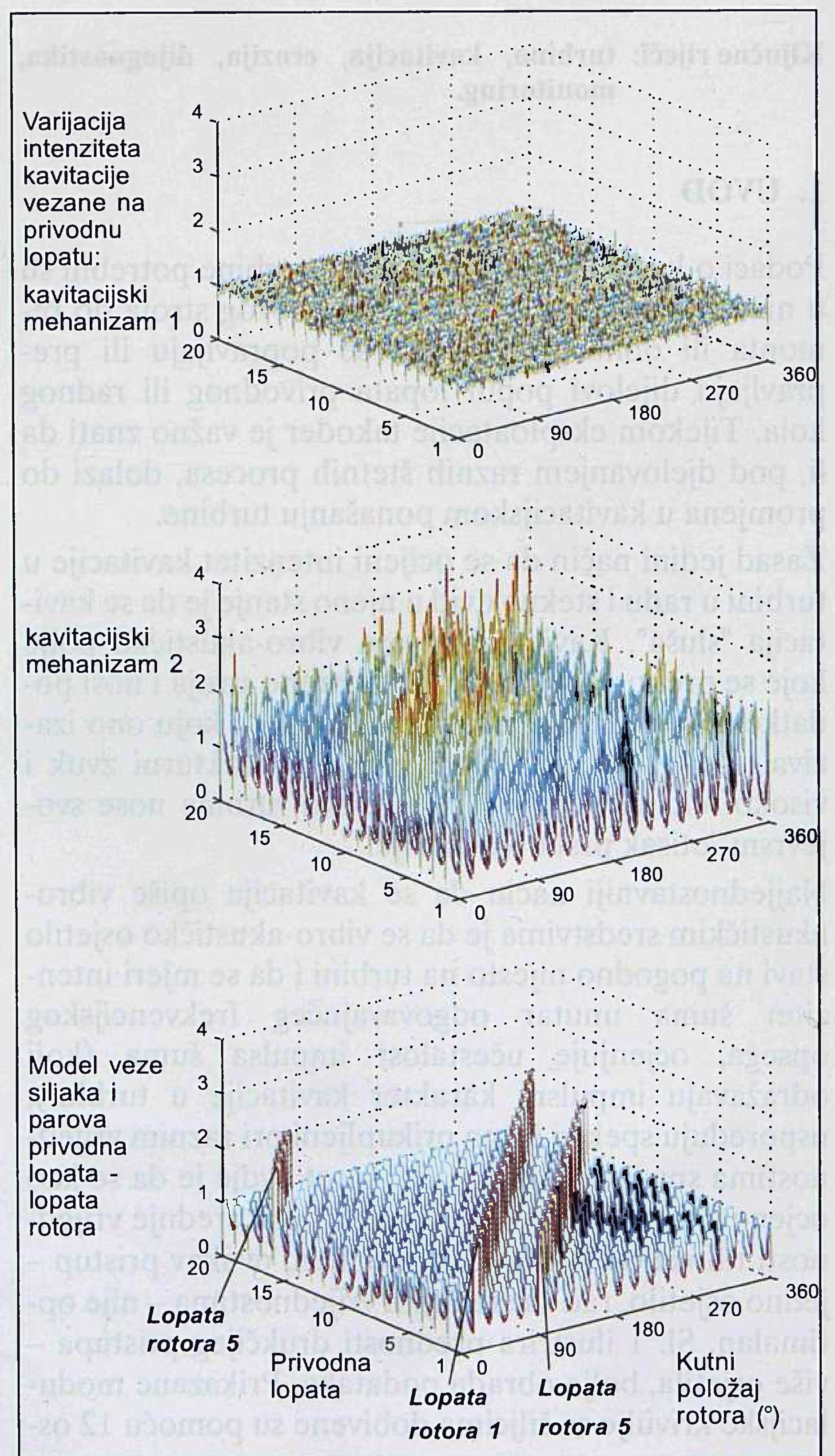
PRAKTIČNI KRAJNJI REZULTATI

- Optimirati rad turbine i elektrane sa stajališta kavitacije.
- Pokazati kako se kavitacijska svojstva turbine mogu poboljšati.
- Provjeriti rezultat remonta, popravka ili dizanja snage.
- Postaviti kavitacijski monitor po mjeri stroja, koji ima visoku osjetljivost i razlikuje dijelove turbine.

3. O OBRADI PODATAKA

U tipičnom dijagnostičkom ispitivanju skuplja se i obrađuje velika količina podataka: više od 40 GB vibro-akustičkih podataka izmjerenih pomoću 20 osjetila u frekvencijskom opsegu od frekvencije rotacije do 1 MHz; svaki se parametar ili funkcija usrednjavaju preko 100 okretaja, sve se radi na 20 vrijednosti snage, a uz kutnu rezoluciju od $0,2^\circ$. Tako provedena dijagnostička ispitivanja daju detaljan opis kavitacije, kakav se ne može dobiti drugim postojećim metodama.

Način na koji se u multi-dimenzionalnoj metodi obrađuju modulacijske krivulje ilustriran je na sl. 2. Na njoj su, na dva gornja grafa, prikazana dva kavitacijska mehanizma što su nađena u ispitivanoj turbini. Kako se vidi, nema modulacije u signalima koje generira mehanizam 1 (gornja slika), dok se na iznosima snage turbine i frekvencijskim opsezima karakterističnim za mehanizam 2 pojavljuje niz snažno izraženih šiljaka



Slika 2. Analiza modulacije u multi-dimenzionalnoj metodi: identifikacija doprinosa dijelova turbine

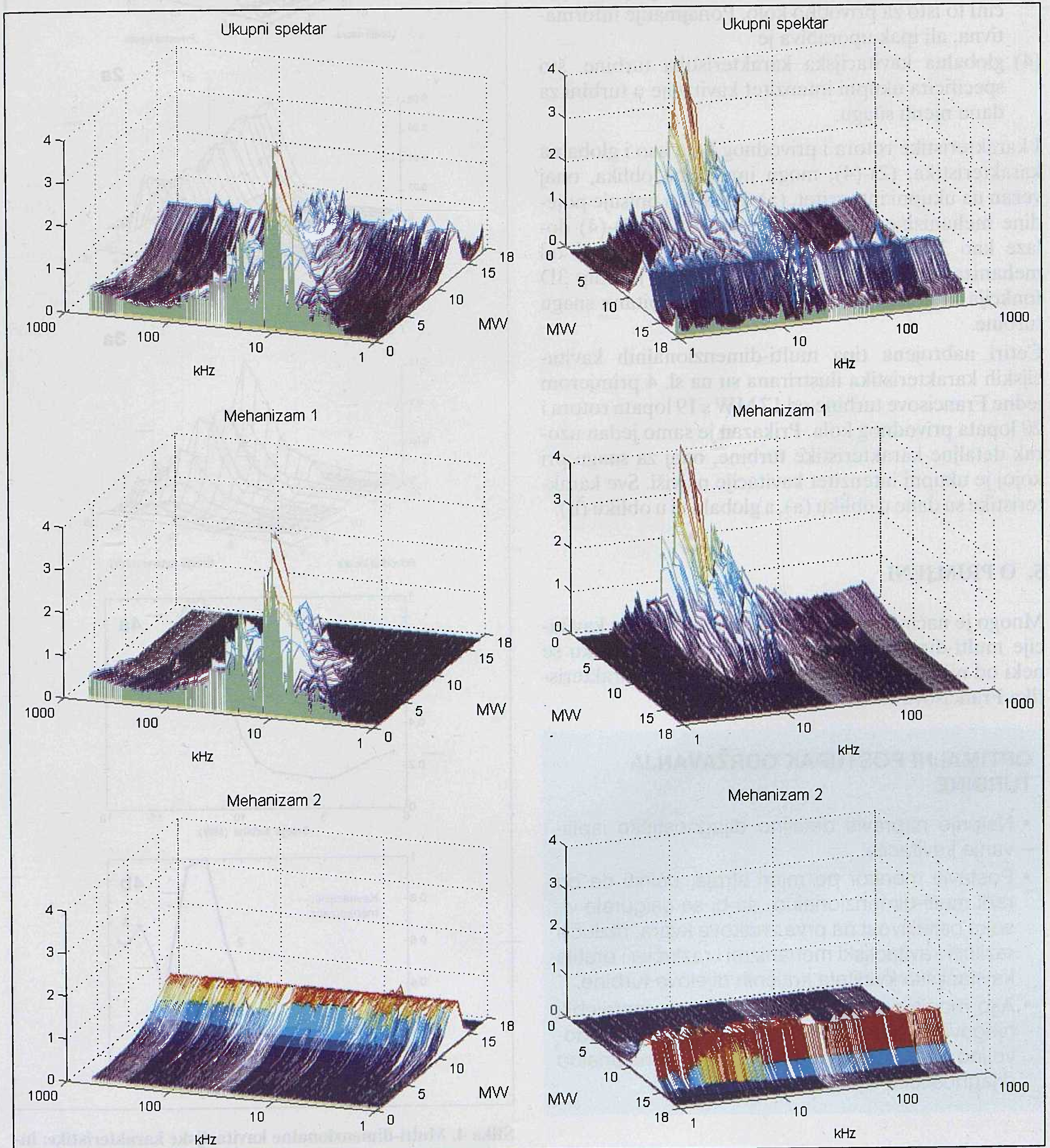
(srednja slika). Iako se ovi oblici čine kaotičnima, ispostavlja se da njima upravlja čvrst red. Donja slika pokazuje kako se podaci o tom redu mogu iskoristiti da bi se ocijenila uloga koju igraju pojedine lopate radnog i privodnog kola.

Jedan korak analize, koji se rabi pri identifikaciji različitih kavitacijskih mehanizama što mogu djelovati u turbini ilustriran je 3D grafovima na sl. 3.

4. KAVITACIJSKE KARAKTERISTIKE TURBINE

Najdetaljniji opis kavitacije koji slijedi iz ovih i više daljnjih koraka multi-dimenzionalne analize daje

(1) detaljna kavitacijska karakteristika turbine, koja precizira intenzitet kavitacije vezane na svaki par lopata privodnog kola – lopata radnog kola. Ona može imati dva oblika, tj. odnositi se na:



Slika 3. U normiranim vrijednostima spektra snage izmjerenog šuma, prikazanim u dva pogleda u gornjem redu kao funkcije frekvencije šuma (kHz) i snage turbine (MW), razabiru se dvije komponente. Ove su izdvojeno prikazane u srednjem i donjem redu. Dekompozicija ukupnog spektra (gore) na dvije aditivne komponente (sredina i dolje) odgovara dekompoziciji kavitacije na dva nezavisna kavitacijska mehanizma, tj. dva oblika kavitacije što dolaze u ispitanoj turbini.

- (a) ukupni intenzitet kavitacije u turbini ili na
 (b) svaki od kavitacijskih mehanizama koji u njoj djeluju.

Manje detaljan opis donose:

- (2) kavitacijska karakteristika rotora, koja pokazuje koliko je snažna kavitacija vezana na pojedine lopate rotora i
- (3) kavitacijska karakteristika privodnog kola, koja čini to isto za privodno kolo. Ponajmanje informativna, ali ipak uporabiva je
- (4) globalna kavitacijska karakteristika turbine, što specificira ukupni intenzitet kavitacije u turbini za danu njenu snagu.

I karakteristike rotora i privodnog kola kao i globalna karakteristika, (2)-(4), mogu imati oba oblika, onaj vezan na ukupni intenzitet, (a), i onaj što opisuje pojedine mehanizme, (b). Dok karakteristike (2)-(4) dolaze kao 3D ili 2D funkcije ili grafovi za svaki od mehanizama ili za ukupnu kavitaciju, (1) je skup 3D funkcija ili grafova, po jedne za svaku ispitanu snagu turbine.

Četiri nabrojena tipa multi-dimenzionalnih kavitacijskih karakteristika ilustrirana su na sl. 4 primjerom jedne Francisove turbine od 17 MW s 19 lopata rotora i 20 lopata privodnog kola. Prikazan je samo jedan uzorak detaljne karakteristike turbine, onaj za snagu pri kojoj je ukupni intenzitet kavitacije najviši. Sve karakteristike su dane u obliku (a), a globalna i u obliku (b).

5. O PRIMJENI

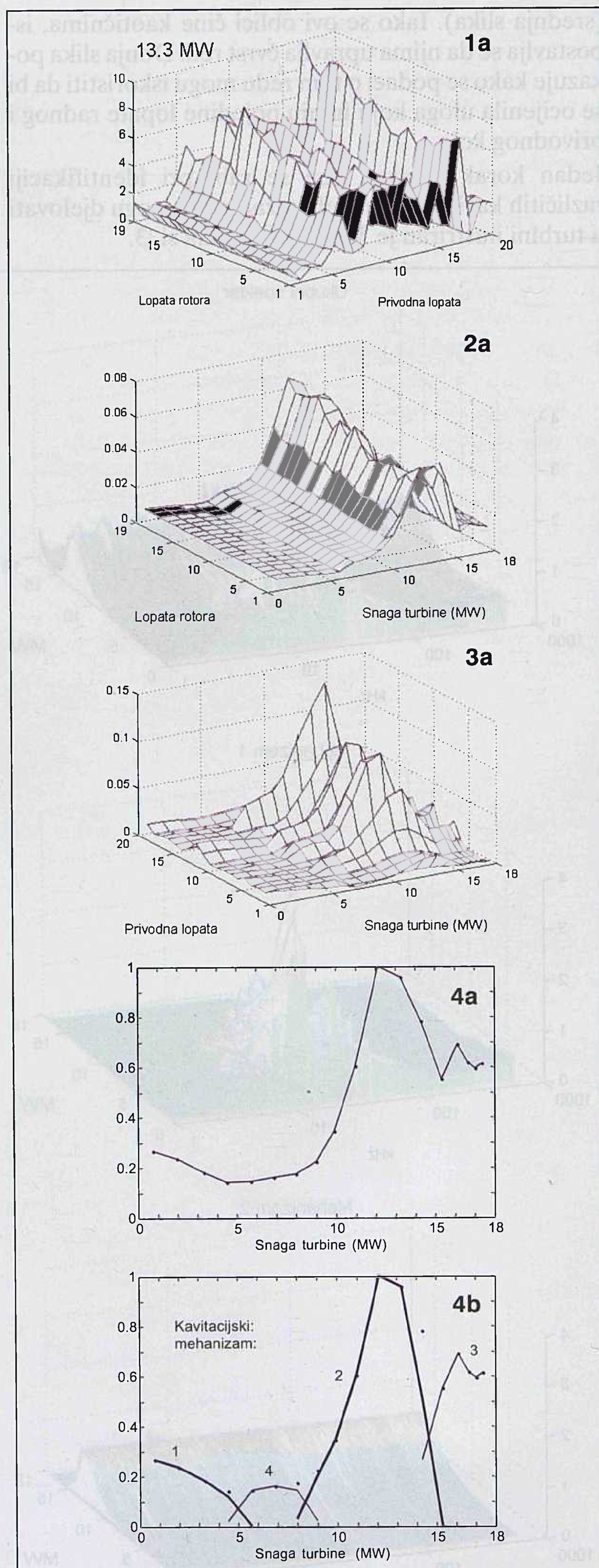
Mnogo je načina primjene rezultata ispitivanja kavitacije multi-dimenzionalnom metodom. U nastavku se neki od njih ilustriraju pomoću prikazanih karakteristika Francisove turbine.

OPTIMALNI POSTUPAK ODRŽAVANJA TURBINE

- Najprije napraviti detaljno dijagnostičko ispitivanje kavitacije.
- Postaviti monitor po mjeri stroja, učiniti da on radi multi-dimenzionalno, da bi se osigurala visoka osjetljivost na prve znakove kvara, razlučili različiti kavitacijski mehanizmi i razlučila i pratila kavitacijska kvaliteta kritičnih dijelova turbine.
- Ako monitor otkrije neku anomaliju, upotrijebiti njegove dijagnostičke funkcije, a ako to nije dovoljno, provesti kontrolno multi-dimenzionalno dijagnostičko ispitivanje.

5.1. Dijagnostika kavitacije

Po informacijskom sadržaju, opis kavitacije kakav daje multi-dimenzionalna metoda približava se teorijskom maksimumu: identificirane su i kvantitativno opisane



Slika 4. Multi-dimenzionalne kavitacijske karakteristike: intenzitet kavitacije kao funkcija prikazanih varijabli. Četiri tipa karakteristika u lijevom stupcu odnose se na ukupni intenzitet, tj. na djelovanje svih kavitacijskih mehanizama. Globalna je karakteristika prikazana u tom obliku (4a) ali i za svaki od četiri mehanizma nađena u ispitanjoj turbini (4b).

uloge svih relevantnih dijelova turbine i svih kavitacijskih mehanizama koji djeluju u njoj. Ovo drugo može biti vrlo korisno. U slučaju ilustriranom na sl. 4 to je omogućilo kvantitativnu ocjenu brzine erozije, što je zadaća koja još uvijek nadilazi mogućnosti samih vibro-akustičkih metoda. Turbina iz primjera radi gotovo isključivo na 16-17 MW. To pokazuje da je mehanizam 3 prikazan u globalnoj karakteristici 4b na sl. 4 odgovoran za eroziju. Dodatna analiza modulacije, koja nije ovdje prikazana, pokazala je da je taj mehanizam vezan na kavitaciju na lopatama privodnog kola. Podaci o utrošku elektroda pri redovitim remontima ovih i vibro-akustički izvedena ocjena veličine koja je proporcionalna brzini erozije rezultirali su tako u potpuno kalibriranoj ocjeni te brzine.

5.2. Popravak turbine

U Francisovoj turbini iz primjera, lopate rotora ne razlikuju se jako (2a na sl. 4), ali su razlike intenziteta kavitacije vezane na razne lopate privodnog kola vrlo velike (3a). Dok polagani trend ovisnosti intenziteta o rednom broju privodne lopate (njegov pad sa smanjenjem rednog broja) dolazi zbog postupne obodne promjene nastrujavanja u spirali neidealna oblika, velike razlike među susjednim lopatama uzrokovane su razlikama u obliku profila i nagiba. Ove razlike mogu biti posljedica loše izrade ili pak posljedica oštećenja nastalih tijekom eksploatacije. Multi-dimenzionalna metoda ne može objasniti ove detalje, ali može pokazati koje su lopate kavitacijski dobre a koje loše, pa se usporedbom u remontu može doći do upute za popravak.

5.3. Optimizacija pogona

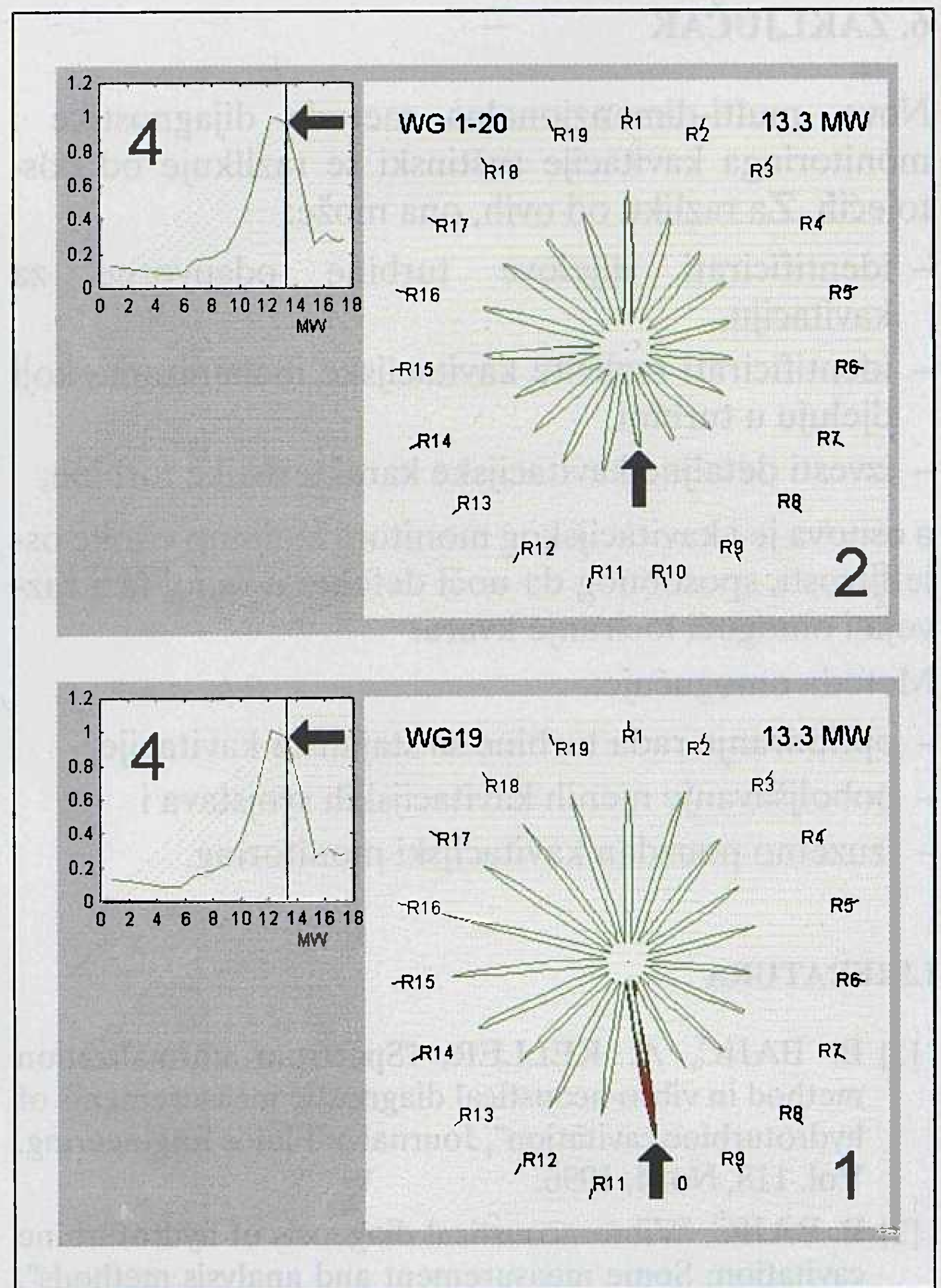
Globalne kavitacijske karakteristike (poput 4a i 4b na sl. 4) pogodne su za optimiranje rada elektrane sa stajališta kavitacije. I doista, ovisno o zahtijevanoj proizvodnji, mogu se postaviti manje ili više stroge granice za intenzitet kavitacije, pa se opterećenja s visokim intenzitetom mogu izbjegavati.

Ako je u elektrani više agregata, granice treba ustanoviti za svaku turbinu posebno, jer se i nominalno identične turbine mogu kavitacijski ponašati vrlo različito. Ovo vrijedi i za novoinstalirane strojeve, a posebno za one što su neko vrijeme u uporabi. Kad vode nema dovoljno za rad elektrane punom snagom ili se puna snaga ne može plasirati, treba rad elektrane optimirati tako što se – za svaku ukupnu snagu – specificira broj agregata u pogonu i opterećenje svakoga od njih.

5.4. Monitoring kavitacije

Prednosti multi-dimenzionalnog monitora kavitacije nad jednostavnima ilustrira sl. 5. Ona donosi izlaze iz monitora koji slijede različite algoritme, a sve pod istim uvjetima:

- u normalnom stanju turbine i
- uz malo oštećenje.



Slika 5. Izlazi iz monitora kavitacije: usporedba triju algoritama

Mjesta na krivuljama na ekranu, na kojima bi se morala pojaviti promjena uzrokovana oštećenjem, označene su strjelicama. Uspoređena su tri algoritma, označena na slici brojevima 4, 2 i 1; oni se oslanjaju na tri kavitacijske karakteristike prema definicijama iz točke 4:

- (4) globalna karakteristika - nema rezolucije po dijelovima turbine,
- (2) karakteristika rotora - postoji rezolucija po lopatama rotora,
- (1) detaljna karakteristika - postoji rezolucija i po lopatama rotora i po lopatama privodnog kola.

Crveni dio krivulje na donjoj slici, onaj što opisuje algoritam (1), jasno pokazuje promjenu; na krivulji (2) jedva se nešto naslućuje, a na (4) nema nikakvog traga od promjene. Multi-dimenzionalni monitor ostvaruje sva tri algoritma - tipičan je za njega algoritam (1) - a obični monitori ostvaruju samo (4) ili neki njegov jednako (ne)kvalitetan analogon. Prednost multi-dimenzionalnog monitora kavitacije je evidentna: dok on jasno uočava promjenu, jednostavni monitor na bazi srednjih vrijednosti i sa samo jednim ili samo par osjetila daleko je od toga. Daljnja prednost multi-dimenzionalnog monitora je i mogućnost dijagnostike: uz rano uočavanje kvara, on pokazuje i uz koji je dio turbine kvar vezan.

6. ZAKLJUČAK

Nova, multi-dimenzionalna metoda dijagnostike i monitoringa kavitacije suštinski se razlikuje od postojećih. Za razliku od ovih, ona može:

- identificirati dijelove turbine odgovorne za kavitaciju,
- identificirati različite kavitacijske mehanizame koji djeluju u turbini,
- izvesti detaljne kavitacijske karakteristike turbine,

a osnova je i kavitacijskog monitora iznimno visoke osjetljivosti, sposobnog da uoči defekte u ranoj fazi razvoja i omogući lociranje kvara.

Metoda omogućuje:

- optimiranje rada turbine sa stajališta kavitacije,
- poboljšavanje njenih kavitacijskih svojstava i
- izuzetno pouzdan kavitacijski monitoring.

LIRERATURA

- [1] B. BAJIĆ, A. KELLER, "Spectrum normalization method in vibro-acoustical diagnostic measurements of hydroturbine cavitation", Journal of Fluids Engineering, Vol. 118, No. 4, 1996.
- [2] B. BAJIĆ, "Vibro-acoustical diagnosis of hydroturbine cavitation: Some measurement and analysis methods", Conference Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Powerplants II, Lausanne, Švicarska, 1996.
- [3] B. BAJIĆ, "A practical approach to vibroacoustical assessment of turbine cavitation", The International Journal on Hydropower & Dams, Vol. 3, No. 6, 1996.
- [4] B. BAJIĆ, "Inflow decomposition: A vibroacoustical technique to reveal details of hydroturbine cavitation", Conference Hydropower Into the Next Century, Portorož, Slovenija, 1997.
- [5] B. BAJIĆ, "Spectrum tracing - A vibroacoustic technique to identify mechanisms of turbine cavitation", Conference Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Powerplants III, Aix-en-Provence, Francuska, 1998.
- [6] B. BAJIĆ, "Nove metode vibroakustičke dijagnostike kavitacije u turbinama", Energija, god. 48, br. 4, 1999.
- [7] B. BAJIĆ, "Turbinenleistungserhöhung - Wäre sie zulässig im Hinblick auf die Kavitation? - Beispiel einer vibroakustischen Diagnose", Wasserwirtschaft, Vol. 89, No. 4, 1999.
- [8] B. BAJIĆ, "Multi-dimensional diagnostics of turbine cavitation", 20th IAHR Symposium Hydraulic Machinery and Systems, Charlotte, North Carolina, SAD, 2000.
- [9] B. BAJIĆ, "Vibro-Acoustical Diagnostics of Turbine Cavitation - Examples of Application", HydroVision 2000 Conference, Charlotte, North Carolina, SAD, 2000.

[10] B. BAJIĆ, "Multi-dimensional analysis: A novel technique for cavitation diagnostics and monitoring", Conference Hydro 2000, Bern, Švicarska, 2000.

[11] B. BAJIĆ, "Intelligent cavitation diagnostics and monitoring", International Water Power & Dam Construction, Vol. 53, No. 4, 2001.

INTELLIGENT CAVITATION MONITORING AND DIAGNOSTICS

A method for a high number of runner blades

A new multi-dimensional vibro-acoustic technique for cavitation diagnostics and monitoring, developed at Korto Cavitation Services, is presented. The technique yields a detailed insight into cavitation processes in an operating turbine that cannot be reached by other techniques, and enables a highly reliable high-sensitivity cavitation monitoring. It resolves and assesses different cavitation mechanisms in a turbine and resolves and assesses the role critical turbine parts play in cavitation. The variant suited for a high number of runner blades is described in the paper.

EINE MIT KÜNSTLICHER INTELLIGENZ BEGLEITETE BEOBACHTUNG UND ERKENNUNG DER HOHLRAUMBILDUNG

Eine für grosse Anzahl von Radschauffeln geeignete Methode

Dargestellt wird das neue multidimensionale Verfahren der vibroakustischen Erkennung und Beobachtung der Hohlraumbildung (in sehr rasch strömenden Flüssigkeiten - Kavitation), entwickelt in der Firma Korto Cavitation Services. Dieses Verfahren ermöglicht eine, anderen Verfahren unerreichbare, ausführliche Einsicht in die Kavitationshergänge im Betrieb der Turbine, und sichert ausserordentlich hohe Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit der Kavitationsbeobachtung. Es ermöglicht die Unterscheidung und Beurteilung verschiedener Kavitationsabläufe sowie der von diesen Abläufen betroffenen Turbinenteile. Im Artikel wird die für einen mehrschaufeligen Rad der Turbine passende Abwandlung dieses Verfahrens beschrieben.

Naslov pisca:

Dr. sc. Branko Bajić, dipl. ing., član HATZ-a Korto Cavitation Services Korto GmbH, Luksemburg c/o Brodarski institut, d.o.o. Sektor za upravljanje sustavima i procesima Av. V. Holjevca 20, 10020 Zagreb

Uredništvo primilo rukopis:
2002-02-19.