

## Provera tačnosti ostvarivanja kombinatorске karakteristike Kaplanove turbine u elektrani

Dane Džepčeski<sup>1</sup>, Slobodan Bogdanović, Vladimir Stanojčić, Radomir Mitrović, Zoran Bojanić, Vesna Njegovan, Dragan Marinović

<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija  
[dane.dzepceski@ieent.org](mailto:dane.dzepceski@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Održivost približno stalnog stepena korisnog dejstva Kaplanove turbine, pri relativno velikoj promeni pada, posledica je promenljive geometrije obrtnog kola turbine. Zavisnost ugla zakretanja lopatica obrtnog kola od otvora između lopatica sprovodnog aparata, predstavlja kombinatorску karakteristiku turbine. Tačnost ostvarivanja zadate kombinatorске karakteristike, od velike je važnosti za ekonomičnu i pravilnu eksploataciju turbine, odnosno agregata kao celine. Zbog navedenih razloga posebna pažnja posvećena je ispitivanju koje je za cilj imalo proveru tačnosti ostvarivanja kombinatorске karakteristike turbine. U radu su izloženi metodologija i rezultati ispitivanja tačnosti ostvarivanja kombinatorске karakteristike jedne Kaplanove turbine nakon njene revitalizacije.

**Ključne reči:** kombinatorска karakteristika, Kaplanova turbina, turbinski regulator

### 1. Uvod

Kaplanova turbina namenjena je za primenu na agregatima koji su ugrađeni u hidroelektranama koje imaju veliki instalisani protok i relativno mali pad. Vertikalna Kaplanova turbina najčešće se ugrađuje za padove od 10 do 70m. Promena pada u elektranama sa velikim instalisanim protokom i malim padom, u relativnom iznosu, može biti značajna. Kaplanova turbina odlikuje se sa relativno malom promenom stepena korisnosti za široki opseg promene pada. Mala promena stepena korisnosti Kaplanove turbine, za široki opseg promene pada, proističe pre svega iz prilagodljivosti oblika obrtnog kola turbine eksploatacionim uslovima, odnosno različitim veličinama pada.

Promena geometrija obrtnog kola turbine postiže se promenom ugla zakretanja njegovih lopatica. Ugao zakretanja lopatica obrtnog kola jednoznačno je određen veličinom otvora između lopatica sprovodnog aparata turbine za određeni pad. Zavisnost ugla zakretanja lopatica obrtnog kola od otvora između lopatica sprovodnog aparata i pada, naziva se kombinatoraska karakteristika turbine. Kombinatoraska karakteristika turbine određuje se prilikom modelskih ispitivanja turbine. Tako određena kombinatoraska karakteristika implementira se u turbinski regulator [1]. U savremenoj izvedbi električnog dela turbinskog regulatora, u digitalnoj tehnologiji, kombinatoraske karakteristike upisuju se u izvršni program regulatora u vidu analitičkog izraza ili, što je češći slučaj, u vidu tabele, odnosno matrice. Ostvarivanje zadate kombinatoraske karakteristike na realnoj turbini u elektrani, zavisi od kvaliteta izrade izvršnog programa turbinskog regulatora, tačnosti njegovog izvršenja i tačnosti pozicioniranja izvršnih organa turbinskog regulatora, servomotora sprovodnog aparata i servomotora obrtnog kola turbine. Zbog direktnog uticaja kombinatoraske karakteristike na stepen korisnog dejstva turbine i vibraciono stanje agregata, tačno zadavanje i tačno ostvarivanje karakteristike od velike je važnosti za ekonomičan i pouzdan rad turbine. Tačnost ostvarivanja kombinatoraske karakteristike, odnosno provera njene verodostojnosti, može se izvršiti sprovođenjem odgovarajućih ispitivanja u elektrani. Zbog definisanog relativno malog dozvoljenog odstupanja između zadate i ostvarene kombinatoraske karakteristike, navedena ispitivanja moraju se izvesti sa posebnom pažnjom. Metodologija i rezultati ispitivanja koje je za cilj imalo proveru tačnosti ostvarivanja kombinatoraske karakteristike jedne Kaplanove turbine, nakon njene revitalizacije, prikazani su u daljem tekstu. Navedena ispitivanja izvršena su u okviru garancijskih ispitivanja turbinskog regulatora agregata, sa ugrađenom vertikalnom Kaplanovom turbinom, A4 u HE „Đerdap 1“.

## 2. Metodologija ispitivanja

Garancijska ispitivanja sistema turbinske regulacije obuhvataju ispitivanja koja se sprovode na zaustavljenom agregatu, kada je agregat u praznom hodu i kada agregat radi sa opterećenjem. Zbog mogućnosti manevrisanja sprovodnim aparatom i obrtnim kolom turbine bez prisutnih pogonskih ograničenja koja su aktivna u normalnom radu, ispitivanje kombinatoraske karakteristike izvedena su na zaustavljenom agregatu, pri čemu je protočni trakt turbine bio osušen.

Kombinatoraska karakteristika turbine za određeni pad predstavlja se izrazom  $\varphi=f(a_0)$ , gde je sa  $\varphi$  označen ugao zakretanja lopatica obrtnog kola izražen u kružnim stepenima, dok je sa  $a_0$  označena veličina otvora između lopatica sprovodnog aparata turbine izražen u milimetrima. Ni prva niti druga navedena veličina ne mogu se meriti neposredno na kompletno montiranoj i funkcionalnoj turbini. Jednoznačno se mogu meriti samo položaji klipova

servomotora sprovodnog aparata i obrtnog kola turbine. Nakon što se položaji klipova servomotora izmere, na osnovu rezultata merenja vrši se izračunavanje veličine otvora između lopatica sprovodnog aparata i ugla zakretanja lopatica obrtnog kola na osnovu montažnih krivih  $a_0=f(Y_{SA})$  i  $\varphi=f(Y_{OK})$ , koje su rezultati merenja sprovedenih prilikom izrade i montaže turbine. Merenja položaja klipova servomotora sprovodnog aparata  $Y_{SA}$  i obrtnog kola turbine  $Y_{OK}$ , vrše se posredno merenjem strujnih signala  $I_{SA}$  i  $I_{OK}$ , sa izlaza iz preciznih linearnih pretvarača promene položaja klipa servomotora u električni signal [2]. Umeravanje zavisnosti intenziteta strujnog signala pretvarača od apsolutnog položaja klipa servomotora, za svaki od servomotora, izvršeno je pre početka sprovođenja ispitivanja. Dakle, trenutni položaj klipa servomotora sprovodnog aparata, iskazan u milimetrima, dobija se iz izmerene veličine strujnog signala, a na osnovu relacije  $Y_{SA}=A_{SA}+B_{SA}I_{SA}$ , gde su koeficijenti  $A_{SA}$  i  $B_{SA}$  dobijeni umeravanjem strujnog signala  $I_{SA}$  sprovedenim pre početka ispitivanja. Zatim se trenutni otvor sprovodnog aparata  $a_0$ , iskazan u milimetrima, izračunava iz zavisnosti  $a_0=f(Y_{SA})$ . Na istovetan način, posredno, meri se i trenutni položaj klipa servomotora obrtnog kola na osnovu relacije  $Y_{OK}=A_{OK}+B_{OK}I_{OK}$ , gde su koeficijenti  $A_{OK}$  i  $B_{OK}$  dobijeni umeravanjem strujnog signala  $I_{OK}$  pre početka ispitivanja. Na kraju se iz linearne zavisnosti  $\varphi=f(Y_{OK})$  izračunava ugao zakretanja lopatica obrtnog kola iskazan u kružnim stepenima.

Ispitivanje ispravnosti i tačnosti ostvarivanja kombinatorskih karakteristika rađeno je poređenjem izmerenih ostvarenih kombinatorskih karakteristika sa zadatim kombinatorskim karakteristikama upisanim u tabele koje su sastavni deo izvršnog programa turbinskog regulatora. Dodatno, kako bi se vršilo poređenje izmerenih otvora sprovodnog aparata i ugla zakretanja lopatica obrtnog kola sa zadatim vrednostima u tabelama, u određenim tačkama zadatih kombinatorskih karakteristika, u toku samih ispitivanja, a pre formiranja kombinatorskih karakteristika koje su rezultat merenja, usvojen je sledeći postupak.

Iz tabele zadatih veličina otvora između lopatica sprovodnog aparata i ugla zakretanja lopatica obrtnog kola turbine, kojom je definisana kombinatorska karakteristika za određeni pad, izdvajana je jedna po jedna veličina otvora lopatica sprovodnog aparata iskazana u milimetrima. Na osnovu veličina otvora lopatica sprovodnog aparata, iz zavisnosti  $Y_{SA}=f(a_0)$  koja je inverzna zavisnosti  $a_0=f(Y_{SA})$  izmerenoj prilikom montaže turbine, izračunata je željena vrednost  $Y_{SA}'$ . Zatim je zadavanjem ručne komande sa panela turbinskog regulatora, klip servomotora sprovodnog aparata doveden u položaj što je moguće bliže izračunatom željenom položaju  $Y_{SA}'$ . Kada je klip servomotora sprovodnog aparata bio doveden u željeni položaj, vršeno je merenje realizovanog položaja klipa servomotora obrtnog kola turbine na način opisan u prethodnom tekstu. U toku ispitivanja, merenje strujnog signala sa lineranog pretvarača položaja klipa servomotora vršeno je sa tačnošću koja je bolja od 0,1‰. Deklarisana tačnost ugrađenog pretvarača položaja bolja je od 0,1‰.

Nakon što su izmereni položaji klipa servomotora sprovodnog aparata i klipa servomotora obrtnog kola, pri jednom padu, preračunati u otvore između lopatica sprovodnog aparata i uglove zakretanja lopatica obrtnog kola, izvršena je interpolacija između dobijenih tačaka polinomom četvrtog stepena. Tako dobijena kriva  $\varphi^{rac}=f(a_0^{rac})$  poređena je sa krivom  $\varphi^{zad}=f(a_0^{zad})$  koja je takođe dobijena interpolacijom polinomom četvrtog stepena između tačaka definisanih u tabeli kombinarske karakteristike iz izvršnog programa turbinskog regulatora. Na kraju, urađeno je određivanje apsolutne greške odstupanja krive  $\varphi^{rac}=f(a_0^{rac})$  od krive  $\varphi^{zad}=f(a_0^{zad})$  za ceo opseg promene veličine otvora između lopatica sprovodnog aparata turbine. Kriterijum tačnosti ostvarene kombinarske karakteristike bilo je garantovano maksimalno dozvoljeno odstupanje ostvarenog ugla zakretanja lopatica obrtnog kola od zadatog ugla zakretanja lopatica. Za određeni otvor sprovodnog aparata turbine, navedena garantovana veličina odstupanje ne sme biti veće od 0,25 kružnih stepeni.

U toku ispitivanja, informacija o neto padu upisivana je ručno preko operatorskog panela turbinskog regulatora. Na ovaj način je, za potrebe ispitivanja, premošćena informacija o trenutnom merenom neto padu čime je izbegnut uticaj promene pada kao i prisustvo greške u merenju pada. Tačnost realizacije zadatih kombinarskih karakteristika proveravane su za ukupno četiri različita neto pada.

### 3. Rezultati ispitivanja

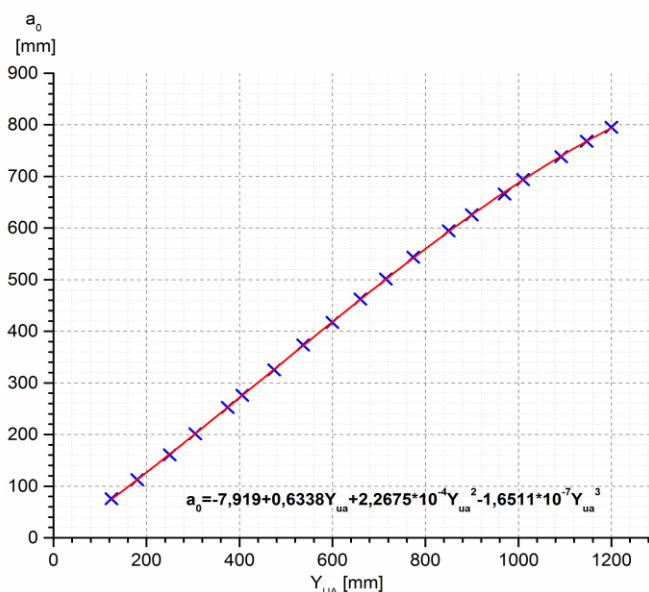
U okviru garancijskih ispitivanja turbinskog regulatora izvršena je provera ispravnosti i tačnosti realizacije kombinarskih karakteristika za četiri različite veličine neto pada. U daljem tekstu biće prikazani rezultati ispitivanja za tzv. računski neto pad od  $H=25,8m$ . U tabeli 1 prikazani su zadate i izmerene veličine otvora između lopatica sprovodnog aparata i ugla zakretanja lopatica obrtnog kola turbine.

**Tabela 1** – Zadate i izmerene veličine otvora sprovodnog aparata i ugla zakretanja lopatica obrtnog kola turbine za  $H=25,8m$ .

$a_0^{zad}$	$\varphi^{zad}$	$Y_{sa}^{zad}$	$Y_{sa}^{mer}$	$Y_{ok}^{mer}$	$Y_{sa}^{mer}$	$Y_{ok}^{mer}$	$a_0^{rac}$	$\varphi^{rac}$
[mm]	[ ° ]	[mA]	[mA]		[mm]		[mm]	[ ° ]
309,78	-10,00	9,55	9,57	19,59	453,90	0,96	311,05	-9,91
371,74	-6,30	10,57	10,55	17,70	533,99	38,63	370,05	-6,47
413,04	-3,70	11,25	11,26	16,23	592,39	67,81	412,80	-3,80
454,35	-1,00	11,95	11,94	14,78	647,93	96,59	453,03	-1,16
495,65	2,00	12,66	12,66	13,11	705,92	129,80	494,42	1,88
536,96	5,70	13,39	13,38	11,09	765,37	170,04	535,99	5,56
578,26	9,75	14,14	14,18	8,64	830,29	218,83	580,15	10,02

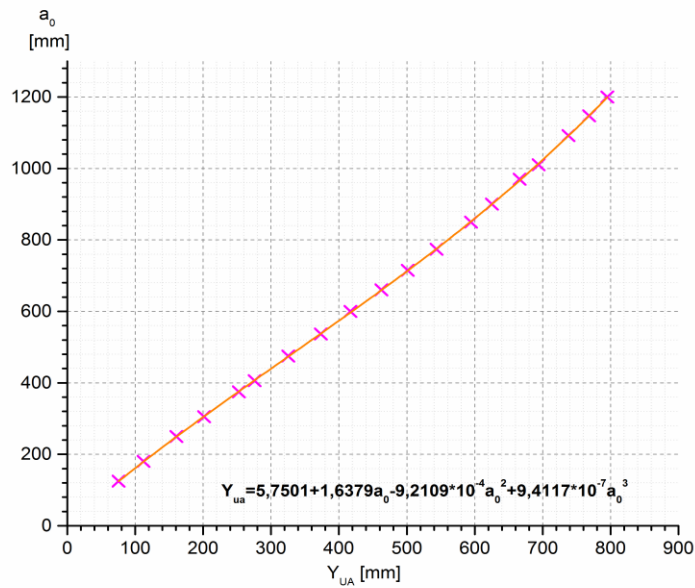
$a_0^{\text{zad}}$	$\varphi^{\text{zad}}$	$Y_{\text{sa}}^{\text{zad}}$	$Y_{\text{sa}}^{\text{mer}}$	$Y_{\text{ok}}^{\text{mer}}$	$Y_{\text{sa}}^{\text{mer}}$	$Y_{\text{ok}}^{\text{mer}}$	$a_0^{\text{rač}}$	$\varphi^{\text{rač}}$
[mm]	[°]	[mA]	[mA]		[mm]		[mm]	[°]
619,57	13,80	14,93	14,92	6,62	890,32	258,99	619,60	13,70
638,15	15,60	15,29	15,30	5,64	921,31	278,32	639,37	15,47
653,23	16,90	15,59	15,60	4,95	945,94	292,17	654,78	16,73

Na sl. 1 prikazana je zavisnost veličine otvora između lopatica sprovodnog aparata turbine od položaja klipa servomotora sprovodnog aparata  $a_0=f(Y_{\text{SA}})$ . Na sl. 2 prikazana je zavisnost položaja klipa servomotora sprovodnog aparata od otvora između lopatica sprovodnog aparata koja je inverzna zavisnosti prikazanoj na sl. 1. Na sl. 3 i sl. 4 prikazane su zadata i izmerena kombinatoraska zavisnost za neto pad  $H=25,8\text{m}$ , dok je na sl. 5 prikazano njihovo poređenje. Na sl. 6 prikazano je određivanje veličine apsolutne greške odstupanja izmerene od zadate kombinatoraske karakteristike. Sa sl. 6 se vidi da apsolutna greška, za ceo opseg promene otvora lopatica sprovodnog aparata, ne prelazi garantovanu vrednost veličine odstupanja od  $0,25^\circ$ .

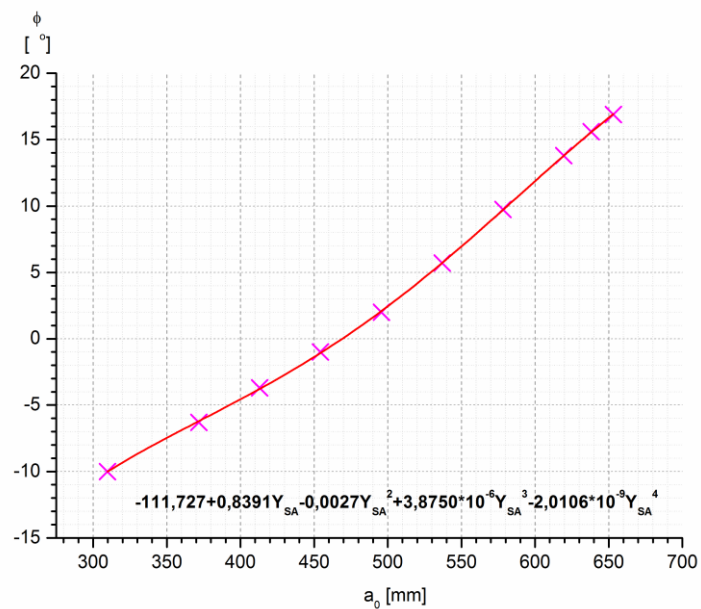


Slika 1. Kriva zavisnosti otvora lopatica sprovodnog aparata od položaja klipa servomotora sprovodnog aparata, snimljena tokom montaže turbine

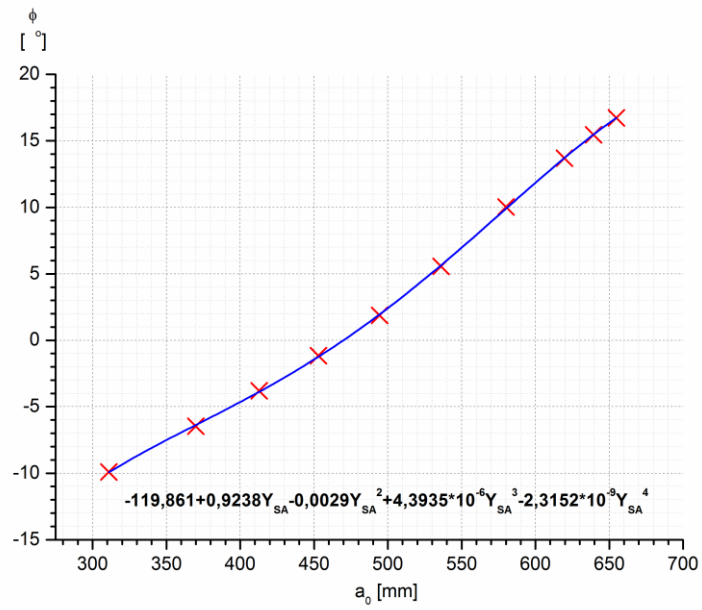
Veličina apsolutne greške odstupanja ostvarene kombinatoraske karakteristike od zadate kombinatoraske karakteristike, koje je manje od  $0,25^\circ$  posledica je veoma dobre tačnosti pozicioniranja izvršnih organa turbinskog regulatora.



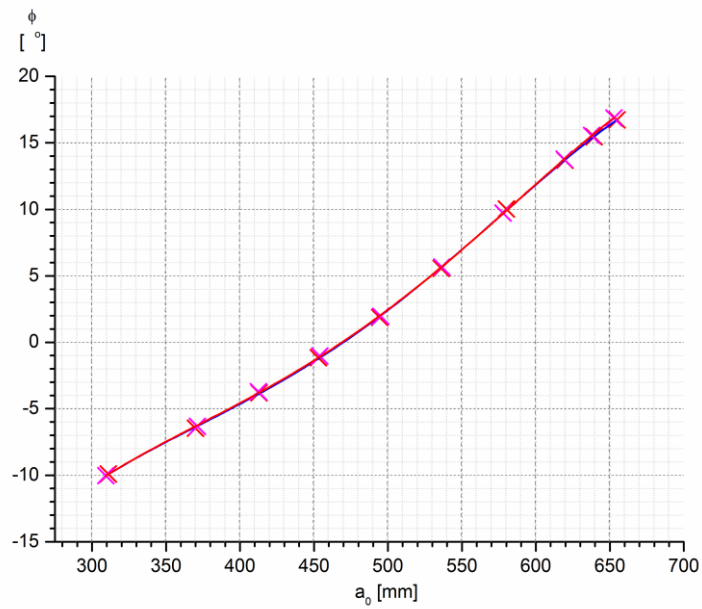
Slika 2. Zavisnost položaja klipa servomotora od otvora lopatica sprovodnog aparata turbine. Inverzna karakteristika karakteristici prikazanoj na sl. 1.



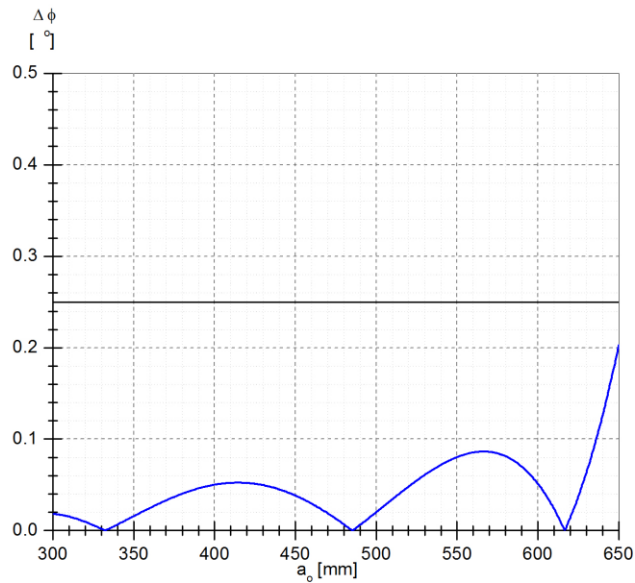
Slika 3. Zadana kombinatoraska karakteristika



Slika 4. Izmerena kombinatorska karakteristika



Slika 5. Poređenje zadate i izmerene kombinatorske karakteristike



Slika 6. Određivanje apsolutne greške odstupanja izmerene od zadate kombinatorske karakteristike

#### 4. Zaključak

Tačnost ostvarivanja kombinatorske karakteristike turbine je od velike važnosti za pravilnu i ekonomičnu eksploataciju Kaplanove turbine. Provera ispravnosti i tačnosti ostvarivanja kombinatorske karakteristike turbine se zbog toga mora izvesti sa posebnom pažnjom. Izrada detaljne metodologije ispitivanja kojim bi se navedena provera izvršila, odabir mernih instrumenata, kao i pravilno i tačno umeravanje električnih signala merenih neelektričnih veličina, osnova su za kvalitetno izvršenje ispitivanja. Prilikom određivanja veličine apsolutnog odstupanja izmerene od zadate kombinatorske karakteristike, potrebno je voditi računa o činjenici da kvalitet određivanja veličine odstupanja direktno zavisi od načina aproksimacije krivih zadate i izmerene kombinatorske karakteristike.

#### Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta TR33020, „Povećanje energetske efikasnosti hidroelektrana i termoelektrana Elektroprivrede Srbije razvojem



tehnologije i uređaja energetske elektronike za regulaciju i automatizaciju“, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## Literatura

- [1] João Gomes P. Jr., Diego H. Kawasaka, „Index test and best cam curves design procedure for Kaplan turbines“ *10th International Conference of Hydraulic Measurement and Efficiency*, Federal University of Itajubá, Itajubá, MG, Brazil, September 16th and 19th, 2014, pp 1.
- [2] D. Arnautović, S. Bogdanović, P. Ristanović, R. Milijanović, V. Vučković – “Izveštaj o garancijskim i kompleksnim ispitivanjima sistema turbinske regulacije hidroagregata br. 5 u HE “Đeradap 2” 1986. god.

**Abstract:** Sustainability of approximately constant value of Kaplan turbine efficiency, for relatively large net head changes, is a result of turbine runner variable geometry. Dependence of runner blades position change on guide vane opening represents the turbine cam curve. The cam curve realization accuracy is of great importance for the efficient and proper exploitation of turbines and consequently complete units. Due to the reasons mentioned above, special attention has been given to the tests designed for cam curves verification. The goal of this paper is to provide the description of the methodology and the results of the tests performed in the process of Kaplan turbine cam curves verification.

**Keywords:** cam curves, Kaplan turbine, turbine governor;

## Verification of Kaplan turbine Cam curves realization accuracy at power plant

Dane Džepčeski<sup>1</sup>, Slobodan Bogdanović, Vladimir Stanojčić,  
Radomir Mitrović, Zoran Bojanić, Vesna Njegovan, Dragan Marinović

Rad primljen u uredništvo: 14.11.2016. godine.  
Rad prihvaćen: 27.11.2016. godine.