

## **Provera verodostojnosti modela hidropostrojenja za potrebe simulacije rada hidroagregata u primarnoj regulaciji učestanosti i snage razmene**

Dane Džepčeski<sup>1</sup>, Nikola Georgijević<sup>1</sup>, Jelena Pavlović<sup>1</sup>, Dušan Arnautović<sup>1</sup>, Sanja Lukić<sup>1</sup>, Vladimir Stanojčić<sup>1</sup>, Slobodan Bogdanović<sup>1</sup>, Dušan Trišić<sup>2</sup>, Boris Jovanović<sup>2</sup>, Aleksandar Latinović<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>JP "Elektroprivreda Srbije", ogrank "Drinsko-Limske elektrane", HE "Bajina Bašta"

<sup>3</sup>JP "Elektroprivreda Srbije", direkcija Beograd

**Kratak sadržaj:** Verodostojnost modela nekog objekta ocenjuje se prema veličini odstupanja rezultata simulacije od rezultata ispitivanja sprovedenih na stvarnom objektu. Veličina odstupanja rezultata simulacije od rezultata ispitivanja, kao i prihvativost veličine odstupanja za određenu namenu modela, određuje se u postupku potvrde verodostojnosti, odnosno verifikacije. U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja, model i verifikacija modela jednog hidropostrojenja. Osnovu za verifikaciju čine rezultati ispitivanja kvaliteta rada hidroagregata R2 u RHE „Bajina Bašta“ u primarnoj regulaciji učestanosti i snage razmene.

**Ključne reči:** model turbine, turbinski regulator, primarna regulacija učestanosti

### **1. Uvod**

Ispitivanje rada agregata u primarnoj regulaciji napona i učestanosti vrši se za potrebe JP Elektroprivrede Srbije (EPS) u okviru realizacije studije „Sistemski parametri regulatora pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a“. Studijom je predviđeno da se na određenim agregatima izvrše ispitivanja sistema pobude i sistema turbinske regulacije i da se na osnovu podataka iz dostupne tehničke dokumentacije i rezultata ispitivanja formira matematički, odnosno simulacioni model postrojenja koji bi kao takav bio uvršten u opštiji model elektroenergetskog sistema (EES) Srbije i njegove interkonekcije sa susednim elektroenergetskim sistemima. Korišćenjem

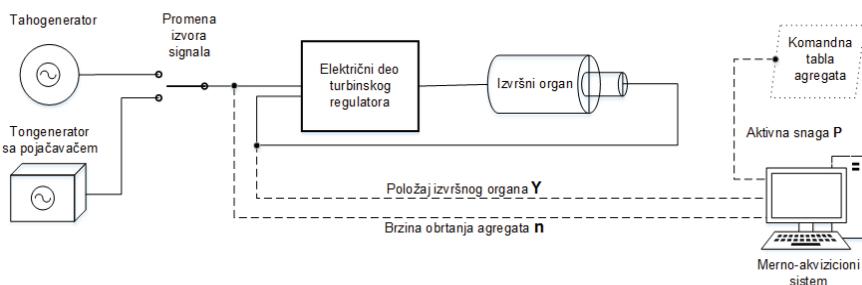
modela EES i interkonekcije moguće je simulirati ispad proizvodnog kapaciteta u okviru EES-a, kao i poremećaje učestanosti i napona sistema, uzrokovanih pojavom energetskog debalansa u interkonekciji. Na osnovu rezultata simulacija došlo bi se do optimalnog skupa parametara pobudnih sistema i sistema turbinske regulacije svakog od agregata koji se nalaze u okviru EPS, za koje bi odziv pojedinačnih agregata i regulacione oblasti kojoj pripadaju bio u skladu sa odredbama važećeg pravila o korišćenju prenosnog sistema [1] i interkonekcije [2].

Nadalje, u ovom radu biće prikazani samo rezultati ispitivanja sistema turbinske regulacije i rada agregata R2 u RHE „Bajina Bašta“ u primarnoj regulaciji učestanosti i snage razmene na osnovu kojih je izvršena izrada odgovarajućeg modela hidropostrojenja i njegova verifikacija.

## 2. Metodologija ispitivanja agregata

U RHE „Bajina Bašta“ izgrađena su dva agregata. Agregati mogu da rade u turbinskom i pumpnom pogonu. Pogonjeni su Francisovom turbinom čija je snaga u turbinskom pogonu  $P_T=315\text{MW}$ , protok  $Q=64,6\text{m}^3/\text{s}$ , brzina obrtanja  $428,6\text{min}^{-1}$  i koja je projektovana za opseg bruto pada  $506,4\div609\text{m}$ . Turbinski regulator je elektrohidrauličkog tipa sa električnim delom izrađenim u analognoj tehnologiji sa diskretnim elektronskim elementima. Regulator posedeuje samo povratnu vezu po brzini obrtanja agregata.

Ispitivanja rada agregata i pripadajućeg turbinskog regulatora u primarnoj regulaciji učestanosti i snage razmene izvršena su prema odredbama tehničkog standarda za ispitivanje turbinskih regulatora hidrauličnih turbina [3], standarda za specifikaciju parametara turbinskih regulatora hidrauličnih turbina [4], i regulative koja se odnosi na primarnu regulaciju učestanosti i snage razmene [2]. Između ostalih rezultata ispitivanja [5], kao rezultat od posebnog interesa sa stanovišta utvrđivanja kvaliteta rada agregata u primarnoj regulaciji učestanosti i snage razmene, u radu će biti prikazani rezultati merenja odziva turbinskog regulatora agregata i agregata u celini pri izazvanoj odskočnoj promeni učestanosti od  $\pm 200\text{mHz}$ . Principska šema veza ispitne opreme prikazana je na sl. 1.

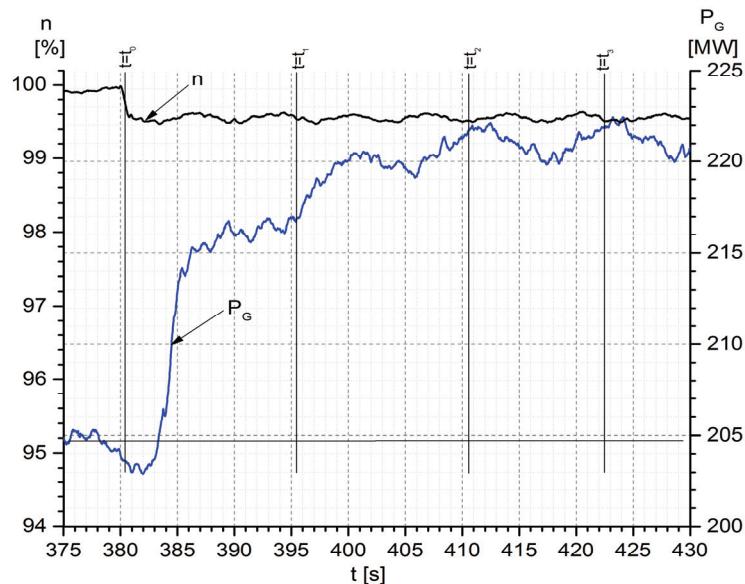


Slika 1 – Principska šema veza ispitne opreme

U toku rada agregata na mreži, u stacionarnom stanju, izazvana je odskočna promena veličine učestanosti napona koji je u regulator uveden po kanalu za merenje brzine obrtanja agregata  $n$ . Umesto stvarnog napona sa tahogeneratora, uveden je napon promenljive učestanosti iz ispitnog tongeneratora sa pojačavačem.

### 3. Rezultati ispitivanja agregata

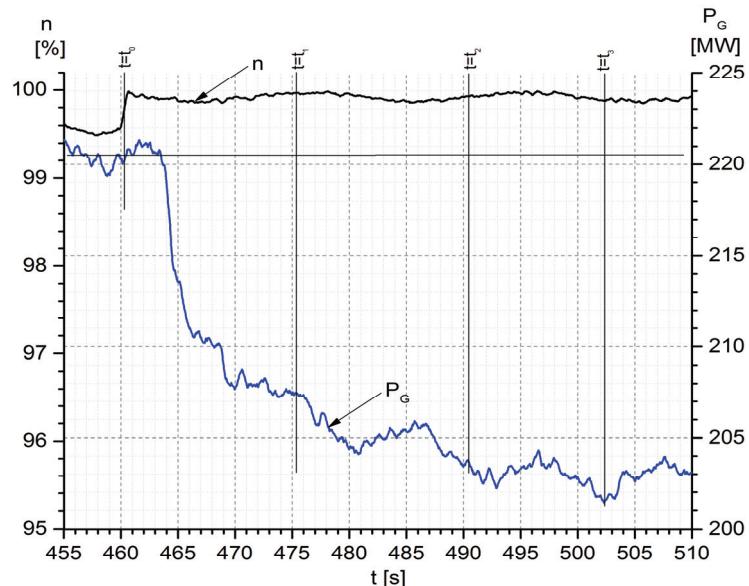
Odskočna promena učestanosti od  $-200\text{mHz}$  načinjena je pri izmerenoj aktivnoj snazi generatora od  $P_G = 204,8\text{MW}$  dok je odskočna promena učestanosti od  $+200\text{mHz}$  načinjena pri izmerenoj aktivnoj snazi generatora  $P_G = 220,5\text{MW}$ . Veličina stalnog statizma bila je postavljena na vrednost  $b_p=6\%$ . Mrtva zona po učestanosti nije bila aktivna. Rezultati ogleda, odnosno odzivi agregata na simulirani poremećaj, prikazani su na sl.2 i sl.3. Na slikama su označeni različiti vremenski trenuci: trenutak  $t_0$  odgovara trenutku nastanka odskočne promene merene brzine obrtanja agregata, dok su  $t_1=t_0+15\text{s}$  i  $t_2=t_0+30\text{s}$ . Vremenski trenutak  $t_3$  odgovara trenutku početka uspostavljanja novog kvazistacionarnog stanja.



Slika 2 – Odziv agregata pri odskočnoj promeni učestanosti od  $-200\text{mHz}$

Odzivi agregata zadovoljavaju regulativom propisane kriterijume za ocenu kvaliteta odziva agregata u primarnoj regulaciji, i u kvantitativnom i u

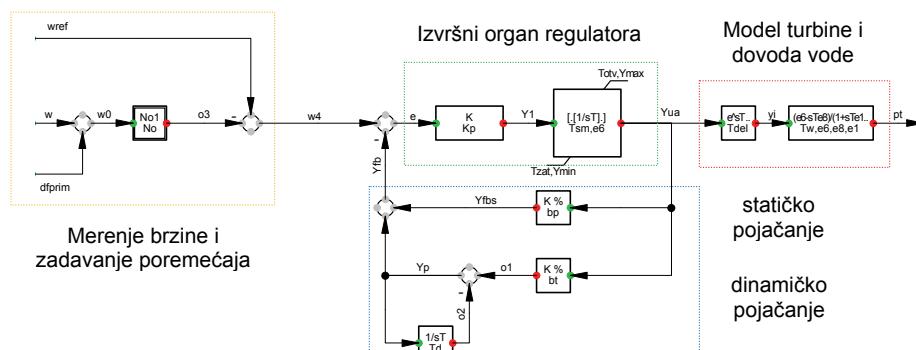
dinamičkom smislu, jer je prelazni proces u oba slučaja praktično završen do 30s nakon nastanka simuliranog poremećaja.



Slika 3 – Odziv agregata pri odskočnoj promeni učestanosti od  $+200\text{mHz}$

#### 4. Model hidropostrojenja

Na sli. 4 prikazan je model hidropostrojenja agregata R2 u RHE „Bajina Bašta“ koji je napravljen u programskom paketu Power Factory proizvođača DlgSILENT [6].



Slika 4 – Model turbine i turbinskog regulatora agregata R2 u RHE „Bajina Bašta“ u programskom paketu Power Factory

Na sl. 4 naznačeni su delovi modela sistema turbinske regulacije: pomoći servomotor modelovan je kao proporcionalno pojačanje, glavni servomotor modelovan je sa prisutnim ograničenjima po brzini kretanja klipa i položaju klipa, električni deo turbinskog regulatora sa kanalom za merenje učestanosti, odnosno brzine obrtanja agregata i sa granama koje definišu odziv regulatora prilikom promene regulisane veličine u dinamičkom i kvantitativnom smislu.

Hidraulična turbina i dovod vode modelovani su uprošćeno, kao linearna prenosna funkcija sa vremenskim kašnjenjem. Prema [7], funkcija prenosa između promene odate snage hidrauličke turbine i promene otvaranja sprovodnog aparata turbine ( $G_{HP}$ ) može se napisati kao:

$$G_{HP}(s) = \frac{e_6 - e_8 T_w s}{1 + e_1 T_w s},$$

gde simboli imaju sledeća značenja:

- $e_6$  - promena snage turbine u zavisnosti od promene otvaranja,
- $e_8$  - parametar linearizovanog modela turbine,
- $T_w$  - vremenska konstanta cevovoda,
- $e_1$  - promena protoka u zavisnosti od promene pada.

U navedenom modelu turbine i dovoda vode zanemarena je dinamika hidraulične turbine usled promene pada. Takođe, zanemareni su i hidraulični gubici u tunelu i cevovodu. Struktura izvršnog organa regulatora je utvrđena na osnovu tehničke dokumentacije proizvođača. Parametri regulatora utvrđeni su eksperimentalno, na osnovu metodologije koja je primenjivana u [8]. U [9] je dat uporedni prikaz različitih metoda za identifikaciju parametara modela iz kontinualnog domena pomoći diskretno sumplovanim podataka. U ovom radu, korišćena je metoda instrumentalnih varijabli, koja je posebno prilagođena za identifikaciju parametara u kontinualnom domenu na osnovu diskretnih podataka. Ova metoda je jedna od tzv. metoda za identifikaciju sistema, u kojoj se informacije o karakteristikama sistema dobijaju na osnovu ulazno/izlaznih podataka. U slučaju identifikacije parametara  $G_{HP}(s)$ , kao ulazni i izlazni podaci korišćena su merenja otvaranja sprovodnog aparata i električne snage agregata.

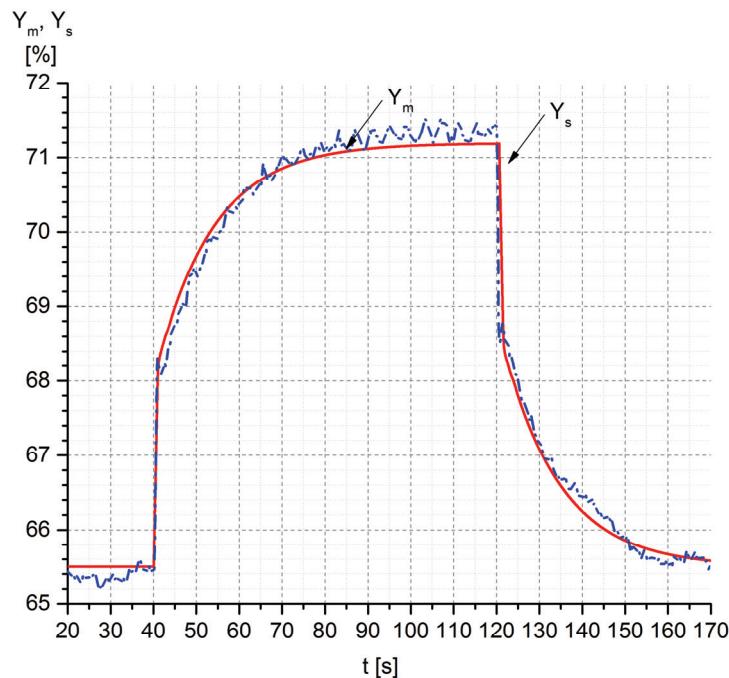
U konkretnom slučaju, vremenska konstanta startovanja vode iznosi 1,83s, dok su vrednosti parametara  $e_6$ ,  $e_8$  i  $e_1$  procenjene navedenom metodom i iznose 1,04, 0,1 i 0,24, redom. Procenjena vrednost transportnog kašnjenja iznosi 2,45s.

## 5. Provera verodostojnosti parametara modela

Početni uslovi simulacije prilagođeni su početnim uslovima pri eksperimentalnom ispitivanju. Pre pojave odskočne promene učestanosti,

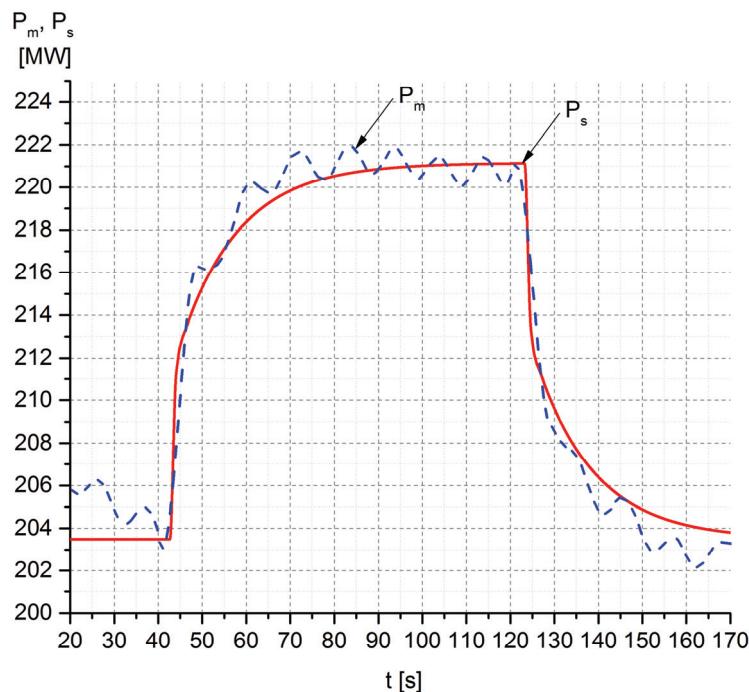
otvor sprovodnog aparata iznosio je 65,5%, aktivna snaga agregata bila je 203,5 MW. Brzina obrtanja je bila na vrednosti vrlo bliskoj nominalnoj.

Na sl. 5 prikazan je odziv sistema turbinske regulacije. Sa  $Y_m$  označen je mereni položaj servomotora sprovodnog aparata, dok je sa  $Y_s$  označen rezultat računarske simulacije.



Slika 5 – Poređenje merenog i simuliranog položaja sprovodnog aparata turbine

Na sl. 6 prikazan je odziv aggregata u primarnoj regulaciji učestanosti i snage razmene, kao celine. Sa  $P_m$  označena je izmerena, dok je sa  $P_s$  označena simulirana aktivna snaga generatora aggregata. Ulaz  $G_{HP}(s)$  čine podaci merene vrednosti položaja klipa servomotora sprovodnog aparata turbine  $Y_m$  koji su prikazani na sl. 5. Standardno odstupanje ( $\sigma$ ) između merenog i simuliranog signala prikazanih na sl. 6 iznosi 0,0024 p.u. U praksi, često se pretpostavlja da su odstupanja iz približno normalno raspodeljene populacije. Ako je ta pretpostavka opravdana, u slučaju navedenog odstupanja, onda se oko 68% vrednosti nalazi u intervalu od plus-minus jedne standardne devijacije, oko 95% vrednosti se nalazi u intervalu od plus-minus dve standardne devijacije, a oko 99,7% se nalazi unutar plus-minus 3 standardne devijacije. U ovom slučaju  $3\sigma=0,0072$  p.u. što je izvesno manje od 1%  $P_n$  koliko uobičajeno iznosi deklarisana tačnost regulacije aktivne snage savremenih sistema turbinske regulacije.



Slika 6 – Poređenje merenog i simuliranog odziva agregata po aktivnoj snazi

## 6. Zaključak

U radu su prikazani rezultati merenja, rezultati modelovanja i rezultati provere verodostojnosti modela hidropostrojenja R2 u RHE „Bajina Bašta“. Formirani su linearani modeli za potrebe simuliranja relativno malih poremećaja regulisane veličine. Poređenjem rezultata simulacije i ispitivanja sprovedenih na realnom objektu, utvrđeno je da korišćeni model hidropostrojenja, uvažavajući korišćena uprošćenja, i posmatrano sa stanovišta elektroenergetskog sistema, verodostojno predstavlja modelovano hidropostrojenje prilikom rada istog u primarnoj regulaciji učestanosti i snage razmene. Kao takav, prikazani model može se koristiti kao sastavni deo složenijeg modela elektroenergetskog sistema i intrekonekcije za navedene potrebe.

## 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] Pravila o radu prenosnog sistema, verzija 2.0, JP Elektromreža Srbije, jun 2014.
- [2] UCTE P1-Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C], March 2009.
- [3] *Hydraulic turbines – Testing of control systems*, International Standard IEC60308, 2005-01.
- [4] *Guide to specification of hydraulic turbine control system*, International Standard IEC61362, 1998-03.
- [5] Izveštaj o ispitivanju turbinskog regulatora agregata R2 u RHE „Bajina Bašta“, elaborat br. 215086, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ a.d., oktobar 2015.
- [6] M. Ćalović, *Regulacija elektroenergetskih sistema; Tom 1-Regulacija učestanosti i aktivnih snaga*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997.
- [7] *PowerFactory User's manual*. "DIgSILENT GmbH." Gomaringen, Germany, May, 2011.
- [8] Studija: "*I Faza - Sistemske parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a*", Tom 2, *Ispitivanje sistema turbinske regulacije*, Institut "Nikola Tesla", 2014.
- [9] H. Garnier, L. Wang i P. C. Young, *Direct identification of continuous-time models from sampled data: Issues, basic solutions and relevance*, Springer London, 2008.

**Abstract:** In this paper, verification of power plant component models is performed by evaluating the deviations between simulation results and test results of the component under study. The obtained deviations of the simulation results from the test results, as well as the acceptability of its value for a particular model and purpose, are determined in the process of verification. In this paper, the test results, the model and the

verification procedure are presented. The basis for the model synthesis and verification are the test results derived from measurements conducted with the aim of deriving the operational performance of hydro unit R2 in PSP "Bajina Bašta" connected to the load frequency control system.

**Keywords:** hydro power plant unit model, turbine governor, load frequency control.

## **Verification of Turbine and Governor Model of Hydro Generator Unit for the Purpose of Load Frequency Control System Simulation**

Rad primljen u uredništvo: 03.11.2015. godine.

Rad prihvaćen: 27.11.2015. godine.

