

## Garancijska ispitivanja sistema pobude agregata A4 u HE "Đerdap 1"

Dušan Joksimović<sup>1</sup>, Zoran Ćirić<sup>1</sup>, Ilija Klasnić<sup>1</sup>, Dušan Arnautović<sup>1</sup>,  
Slobodan Bogdanović<sup>1</sup>, Nemanja Miložčić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a,  
Beograd

[dusan.joksimovic@ieent.org](mailto:dusan.joksimovic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu su prikazani rezultati garancijskih ispitivanja sistema pobude agregata A4 u HE "Đerdap 1". Sistem pobude je pušten u rad u okviru revitalizacije agregata 2013. godine, dok su garancijska ispitivanja obavljena tokom 2014. godine. Cilj ovih ispitivanja je bio dokazivanje garantovanih parametara novougrađenog sistema pobude. Za potrebe ispitivanja je korišćena merna oprema koja u svemu odgovara zahtevima navedenim u tehničkom standardu GOST 11828-66 i koja je prethodno etalonirana.

**Ključne reči:** pobudni sistem / garancijska ispitivanja / revitalizacija

### 1. Uvod

Garancijska ispitivanja sistema pobude agregata A4 u HE "Đerdap 1" su obavljena u okviru garancijskih ispitivanja kompletnog agregata [1] koja su pored sistema pobude obuhvatila generator, turbinu, sistem regulacije brzine i aktivne snage agregata, sisteme upravljanja i monitoringa agregata, hidromehaničkih i relejnih zaštita i pomoćne sisteme agregata. Revitalizovan agregat je pušten u rad u okviru 2013. godine, dok su garancijska ispitivanja obavljena tokom 2014. godine. Cilj ovih ispitivanja je bio dokazivanje garantovanih parametara novougrađene opreme. Nosilac ispitivanja je bio Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" sa svojim višedecenijskim iskustvom u garancijskim ispitivanjima hidro i termo agregata u Elektroprivredi Srbije. Metodologija garancijskih ispitivanja prethodno je usaglašena sa predstavnicima isporučioaca opreme i stručnjacima HE "Đerdap 1".

Garancijska ispitivanja sistema pobude su urađena u skladu sa međunarodnim standardima i tehničkim preporukama GOST 21558, IEEE Std 421, IEC 60034-16. Prilikom ispitivanja korišćena je merna oprema koja u svemu odgovara zahtevima navedenim u tehničkom standardu GOST 11828-

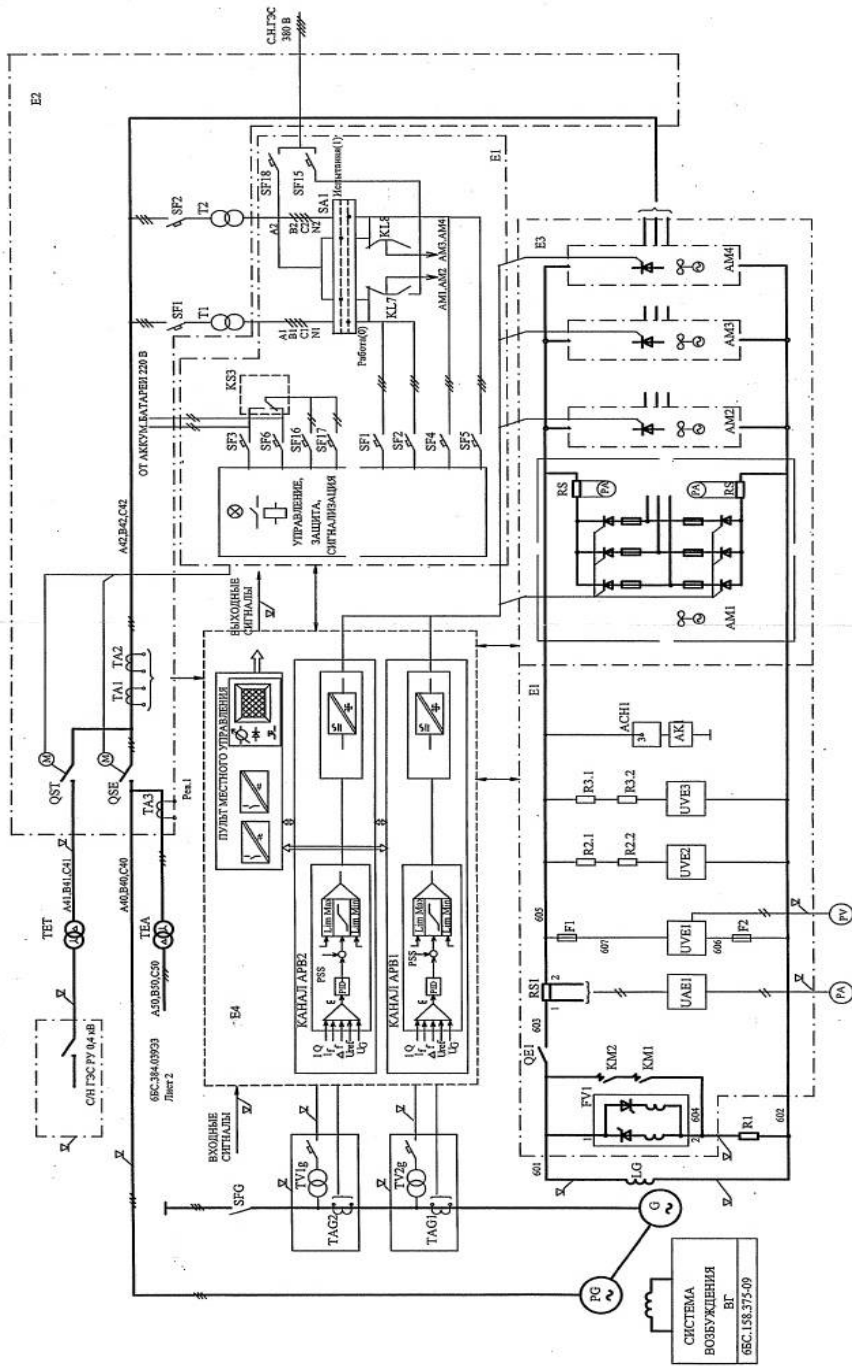
66 i koja je prethodno etalonirana. Za snimanje dinamičkih odziva je korišćen akvizicioni sistem sa učestanošću odabiranja od 10kHz baziran na opremi proizvođača National Instruments i softveru koji je razvijen u Elektrotehničkom institutu "Nikola Tesla".

## 2. Osnovni tehnički podaci za glavni generator

Sistem pobude agregata A4 u HE "Đerdap 1" proizvodnje "Elektrosila" [5] predstavlja statički sistem pobude sa nezavisnim napajanjem, tj. pomoćnim generatorom kao izvorom pobudne energije glavnog generatora. Generator i sistem pobude imaju sledeće osnovne parametre:

• Nominalna prividna snaga:	211,11MVA
• Nominalna aktivna snaga:	190MW
• Nominalni napon statora:	15,75kV
• Nominalna struja statora:	7739A
• Nominalni faktor snage:	0,9
• Pobudna struja pri nominalnoj snazi, naponu i faktoru snage:	1880A
• Pobudna struja pri nominalnoj snazi, naponu i faktoru snage 1:	1480A
• Pobudna struja u praznom hodu pri nominalnom naponu statora:	965A
• Napon pobude pri nominalnoj snazi, naponu i faktoru snage:	385V
• Napon pobude pri nominalnoj snazi, naponu i faktoru snage 1:	280V
• Napon pobude u praznom hodu pri nominalnom naponu statora:	170V

Blok šema sistema pobude je prikazana na slici 1 [5]. Osnovu upravljačkog dela čine automatski regulatori pobude čija je osnovna funkcija automatska regulacija statorskog napona, koja održava napon statora na zadatoj vrednosti uz kompenzaciju po reaktivnim snagama agregata A3 i A4 koji imaju zajednički blok transformator. Kao rezerva automatskoj regulaciji postoji regulacija struje pobude. Sistem pobude ima četiri paralelno vezana tiristorska mosta i dva automatska regulatora napona. Pri ispadu jednog tiristorskog mosta i dalje je moguć rad u svim predviđenim režimima, a u slučaju ispada dva tiristorska mosta moguć je rad, ali samo u režimu  $\cos\varphi=1$  bez mogućnosti forsiranja.



Slika 1: Blok šema sistema pobude glavnog generatora agregata A4 u HE "Đerdap 1"

### 3. Kontrola raspodele struje po paralelnim granama tiristorskih pretvarača pri nominalnoj pobudnoj struji

Sistem pobude obuhvata 4 paralelno vezana tiristorska mosta. Proverena je nesimetrija struja tiristorskih mostova. Struja kroz tiristore je izmerena na ekranu sekcije za upravljanje i regulaciju. Odstupanje struje tiristora od srednje vrednosti ne sme da premašuje  $\pm 5\%$  [4]. Rezultati merenja pri struji pobude od 1884,4A su dati u tabeli 1.

Tabela 1: Raspodela struja tiristora

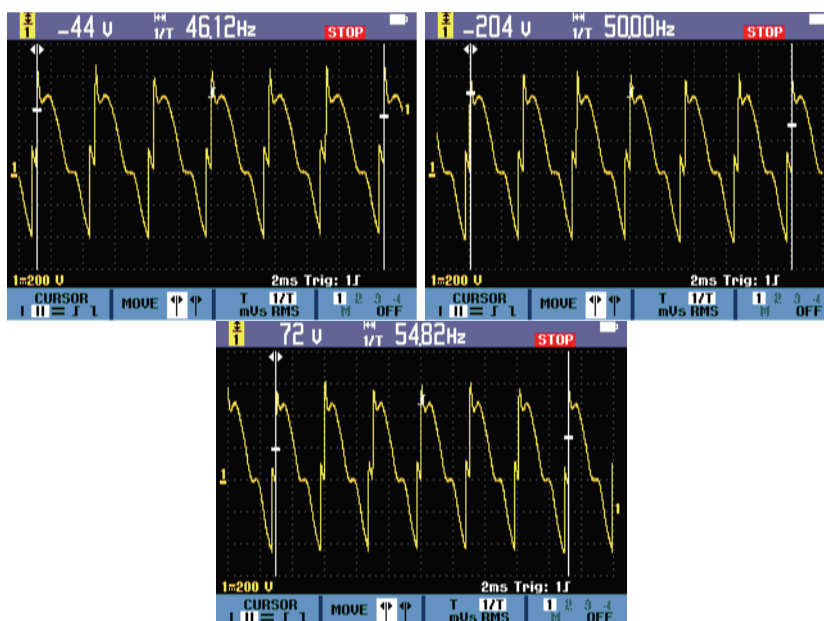
Broj tiristora	Struje tiristora $I_{th}$ , [A]				Srednja vrednost struje tiristora $I_{thm}$ , [A]	Odstupanje $\Delta I_{th}$ , %			
	Most 1	Most 2	Most 3	Most 4					
1	156,5	157,2	155,9	156,1	156,42	0,05	0,50	-0,33	-0,20
2	156,3	156,5	157,0	156,2	156,50	-0,13	0,00	0,32	-0,19
3	155,6	156,4	155,8	155,1	155,72	-0,08	0,44	0,05	-0,40
4	156,9	156,3	155,8	156,4	156,35	0,35	-0,03	-0,35	0,03
5	156,1	156,4	156,0	155,8	156,07	0,02	0,21	-0,04	-0,17
6	157,5	157,4	157,6	156,6	157,27	0,15	0,08	0,21	-0,43

### 4. Kontrola rada automatskog regulatora pobude pri kratkotrajnim odstupanjima frekvencije i napona napajanja

Pri promeni brzine obrtanja agregata u granicama od 45...55Hz [3], proverena je ispravnost merenja napona statora, napona i struje pobude u automatskom regulatoru pobude ARV (tabela 2), kao i ispravnost generisanja impulsa upravljanja tiristorskim pretvaračem po obliku ispravljenog napona (slika 2). Promena frekvencije ne utiče na tačnost merenja i na oblik napona pobude. Pri sve tri frekvencije generisanje impulsa za paljenje tiristora je pravilno. U toku periode je prisutno svih šest komutacija u jednakim vremenskim razmacima od šestine periode.

Tabela 2: Provera ispravnosti merenja u automatskom regulatoru pobude (ARV) pri promeni frekvencije od 45 do 55Hz

f, Hz	Ug, pu		Uf, pu		If, pu	
	u ARV	stvarno	u ARV	stvarno	u ARV	stvarno
46	1	1	0,48	0,48	0,57	0,57
50	1	1	0,40	0,40	0,47	0,47
55	1	1	0,33	0,33	0,4	0,4



Slika 2. Oblik napona pobude pri različitim frekvencijama

U praznom hodu, pri smanjenju frekvencije ispod praga V/Hz-ograničivača, provereno je smanjenje referentne vrednosti napona statora generatora (zavisnost napona statora od frekvencije).

Tabela 3: Vrednosti prorade V/Hz-ograničivača

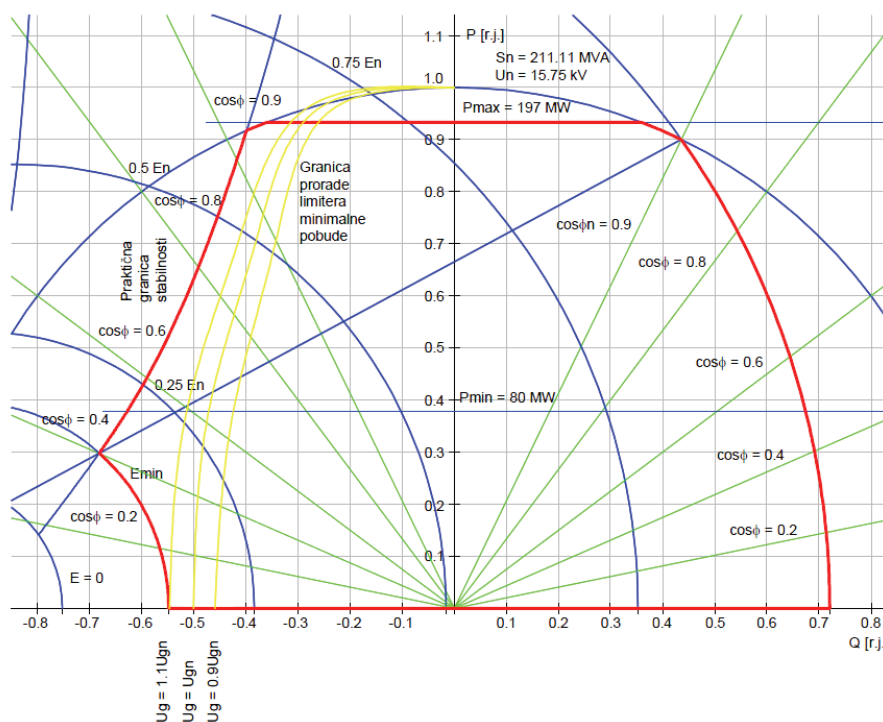
f, Hz	U <sub>g</sub> , kV
45	15,59
47,5	16,45
50	17,32
55	19,05

## 5. Provera rada ograničivača u kapacitivnom i induktivnom režimu rada generatora

Karakteristika prorade ograničenja minimalne pobude je određena pri radu generatora na mreži, smanjivanjem u kontinuitetu referentne vrednosti napona statora generatora do momenta prorade. Nivo ograničenja reaktivne snage treba da odgovara pogonskom dijagramu agregata [6].

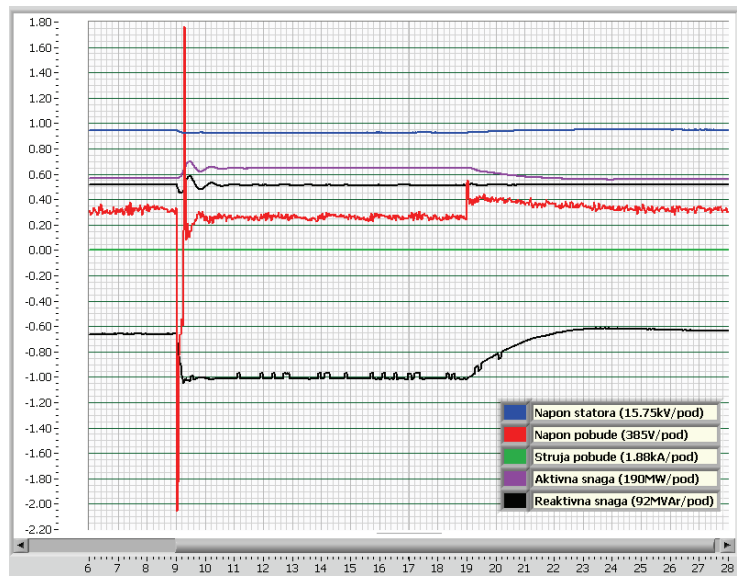
Tabela 4: Vrednosti prorade ograničenja minimalne pobude

P, MW	P, pu	Ug, pu	Q, pu	Q, MVar
0	0	Ug=0,9	-1,051	-97
		Ug=1,0	-1,167	-107
		Ug=1,1	-1,29	-119
77	0,408	Ug=0,9	-0,981	-90
		Ug=1,0	-1,084	-100
		Ug=1,1	-1,187	-109
150	0,789	Ug=0,9	-0,785	-72
		Ug=1,0	-0,867	-80
		Ug=1,1	-0,95	-87
201	1,059	Ug=0,9	-0,549	-51
		Ug=1,0	-0,619	-57
		Ug=1,1	-0,673	-62
211	1,111	Ug=0,9	-0,01	0
		Ug=1,0	-0,01	0
		Ug=1,1	-0,01	0

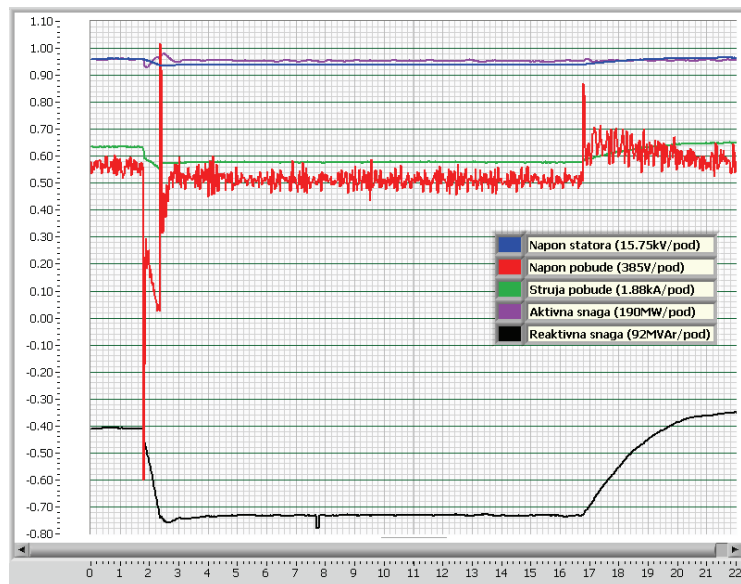


Slika 3. Granica prorade ograničavača minimalne pobude za različite vrednosti napona statora

Stabilnost rada ograničenja minimalne pobude je proverena zadavanjem negativne odskočne promene referentne vrednosti napona statora generatora pri radu generatora na mreži do nivoa ispod uključenja ograničenja.

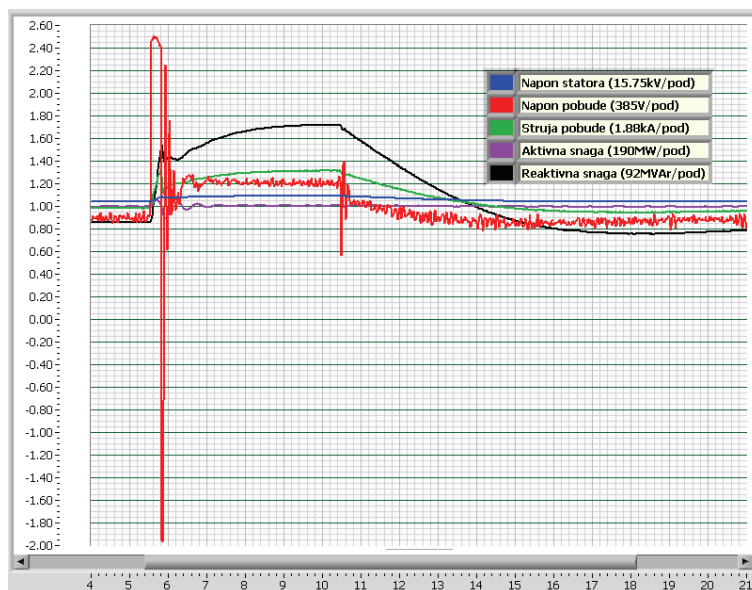


Slika 4. Odrada ograničenja minimalne pobude pri aktivnoj snazi od 100MW



Slika 5. Odrada ograničenja minimalne pobude pri nominalnoj aktivnoj snazi

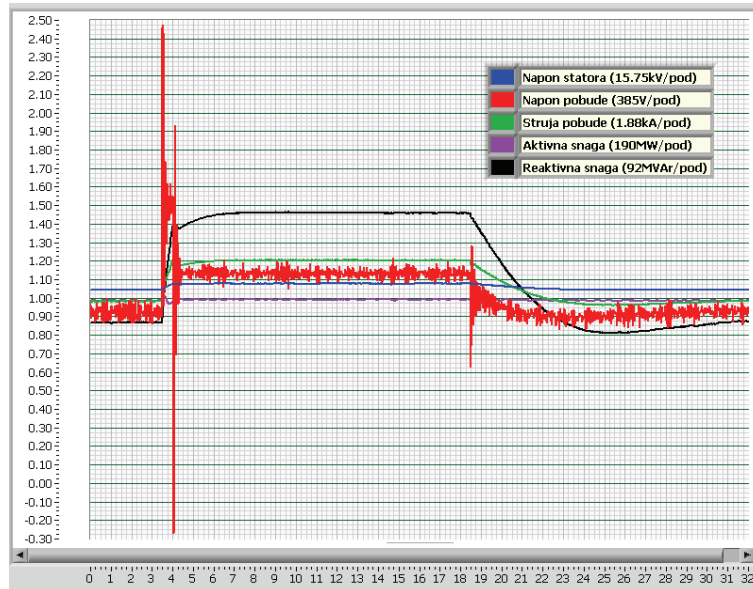
Ograničenje preopterećenja rotora ograničava struju pobude na trajno dozvoljenu vrednost. Ograničenje se aktivira pri porastu struje iznad 115% nominalne vrednosti i deluje nakon vremenske zadržke koja ima inverznu karakteristiku [4]. Rad ograničenja preopterećenja rotora je proveren zadavanjem odskočne promene referentne vrednosti napona statora do snižene vrednosti prorade.



Slika 6. Odrada ograničenja preopterećenja rotora

Ograničenje maksimalne struje pobude trenutno ograničava struju pobude na plafonsku vrednost. Ograničenje se aktivira pri porastu struje pobude iznad 200% nominalne vrednosti i deluje trenutno [4]. Rad ograničenja maksimalne struje pobude je proveren zadavanjem odskočne promene referentne vrednosti napona statora generatora do snižene vrednosti prorade.





Slika 7. Odrada ograničenja maksimalne struje pobude

## 6. Određivanje statizama po reaktivnoj snazi

Određivanje statizma automatske regulacije napona na izvodima statora generatora i na mrežnim sabirnicama agregata vrši se merenjima vrednosti napona statora i napona mreže za različite vrednosti reaktivne snage generatora pri stalnoj naponskoj referenci. Vrednost statizma  $\sigma_g$  na generatorskim sabirnicama i statizma  $\sigma_m$  na mrežnim sabirnicama se određuju na osnovu relacija [4]:

$$\sigma_g = \frac{U_{g1} - U_{g2}}{Q_{g1} - Q_{g2}} \cdot \frac{Q_{g\text{ nom}}}{U_{g\text{ nom}}} 100\%$$

$$\sigma_m = \frac{U_{m1} - U_{m2}}{Q_{g1} - Q_{g2}} \cdot \frac{Q_{g\text{ nom}}}{U_{m\text{ nom}}} 100\%$$

gde su:  $U_{g1}$  i  $U_{g2}$  - vrednosti napona statora pri prvom i drugom merenju,  $U_{m1}$  i  $U_{m2}$  - vrednosti napona mreže pri prvom i drugom merenju,  $Q_{g1}$  i  $Q_{g2}$  - vrednosti reaktivne snage pri prvom i drugom merenju,  $U_{g\text{ nom}} = 15,75\text{kV}$  - nominalni napon statora,  $U_{m\text{ nom}} = 420\text{kV}$  - nominalni napon mrežnih sabirnica,  $Q_{g\text{ nom}} = 92\text{MVar}$  - nominalna reaktivna snaga generatora.

Tabela 5. Rezultati merenja statizma automatske regulacije napona  $\sigma_g$  na izvodima statora generatora

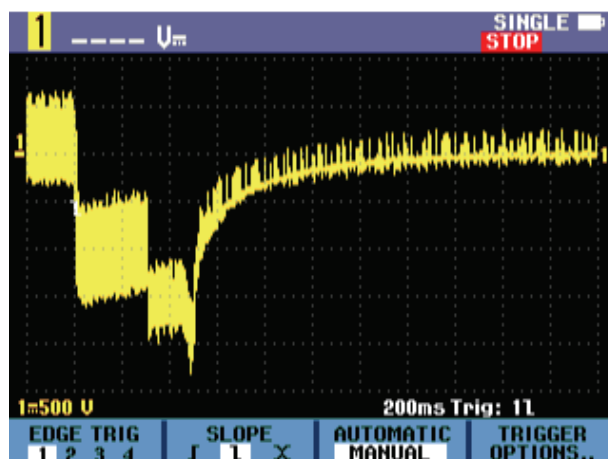
$U_{g1}$ [kV]	$Q_{g1}$ [MVar]	$U_{g2}$ [kV]	$Q_{g2}$ [MVar]	$\sigma_g$ [%]
15,28	-40,11	15,5	15,81	<b>+2,298</b>

Tabela 6. Rezultati merenja statizma automatske regulacije napona  $\sigma_m$  na mrežnim sabirnicama agregata

$U_{m1}$ [kV]	$Q_{g1}$ [MVar]	$U_{m2}$ [kV]	$Q_{g2}$ [MVar]	$\sigma_m$ [%]
416	-40,11	409	15,81	<b>-2,879</b>

## 7. Provera režima gašenja polja rotora isključenjem automata za gašenje polja

Pri radu u praznom hodu je izvršeno isključenje automata za gašenje polja. Maksimalna negativna vrednost napona od 2400V ne prelazi ispitni napon rotora od 4200V [6].



Slika 8. Gašenje polja isključenjem automata za gašenje polja

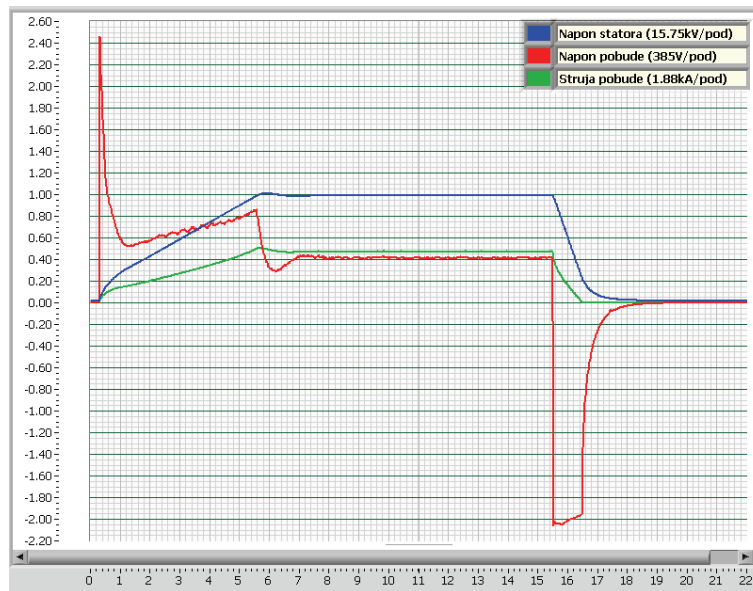
## 8. Snimanje prelaznih procesa pri odzivu na skokovit poremećaj radi ocene kvaliteta podešavanja dinamike sistema regulacije pobude

Prilikom snimanja odziva sinhronog generatora i sistema pobude, izmerene su vrednosti sledećih parametara dinamičkih karakteristika, koji definišu kvalitet odziva:

- vreme uspona merne veličine  $T_u$  koje definiše vreme potrebno da se odskočni odziv veličine promeni sa 10% na 90% stacionarne vrednosti,

- vreme opadanja merne veličine  $T_o$  koje definiše vreme potrebno da se odskočni odziv veličine promeni sa 90% na 10% stacionarne vrednosti,
- vreme smirenja  $T_s$  koje definiše vreme potrebno da odskočni odziv uđe u opseg  $\pm 2\%$  stacionarne vrednosti,
- preskok  $\Delta$  definiše razliku u procentima između vrednosti prvog maksimuma odskočnog odziva u poređenju sa stacionarnom vrednosti merene veličine.

U nastavku su dati snimci dinamičkih odziva sistema pobude i vrednosti pokazatelja na osnovu kojih se može zaključiti da sistem poseduje dobre dinamičke performanse. Preporučene vrednosti pokazatelja su date u [2]



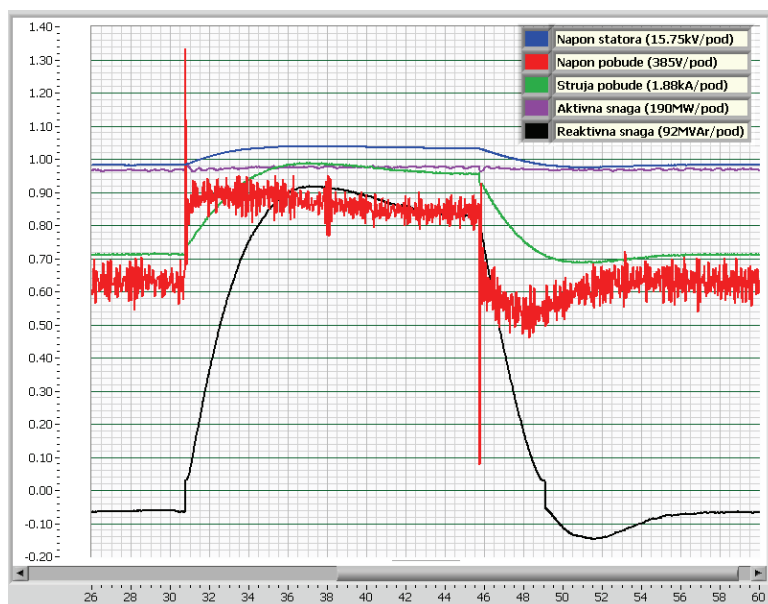
Slika 9. Dinamika pobuđivanja i razbuđivanja generatora u automatskoj regulaciji

$$T_{uUg} = 4,29s, T_{uUf} = 0,02s, T_{oUg} = 1,27s, T_{oUf} = 0,02s, T_{sUg} = 5,27s, \Delta = 1,58\%$$



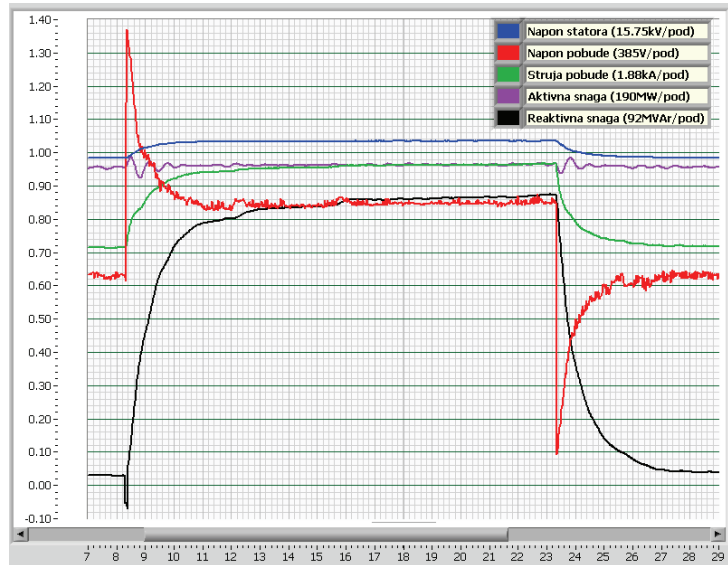
Slika 10. Dinamika odziva na odskočnu promenu reference u automatskoj regulaciji u praznom hodu generatora

$$T_{uUg} = 0,37s, T_{uUf} = 0,02s, T_{oUg} = 0,35s, T_{oUf} = 0,02s, T_{sUg} = 0,84s, \square = 1,87\%$$



Slika 11. Dinamika odziva na odskočnu promenu reference u automatskoj regulaciji na mreži sa uključenim stabilizatorom EESa

$$T_{uUg} = 3,47, T_{uUf} = 0,02s, T_{oUg} = 3,35s, T_{oUf} = 0,02s, T_{sUg} = 4,22s, \square = 1,61\%$$



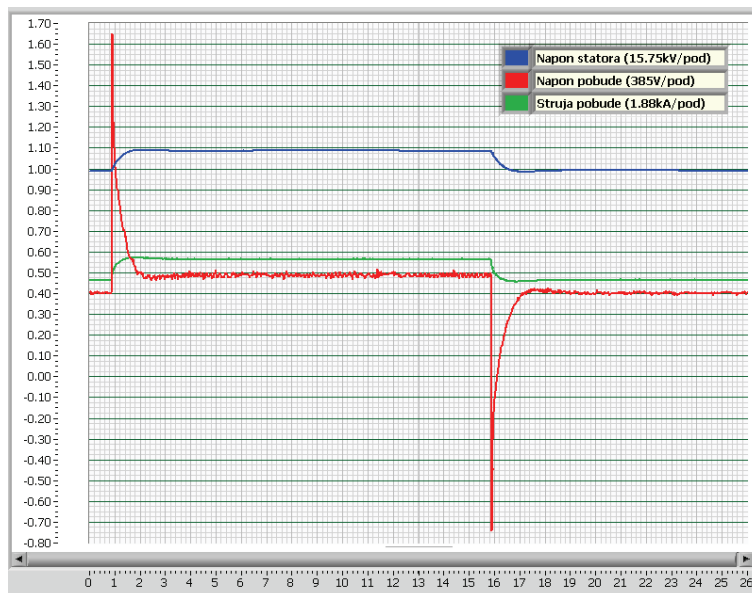
Slika 12. Dinamika odziva na odskočnu promenu reference u automatskoj regulaciji na mreži sa isključenim stabilizatorom EESa

$$T_{uUg} = 1,89s, T_{uUf} = 0,02s, T_{oUg} = 1,92s, T_{oUf} = 0,02s, T_{sUg} = 2,35s, \sigma = 0\%$$



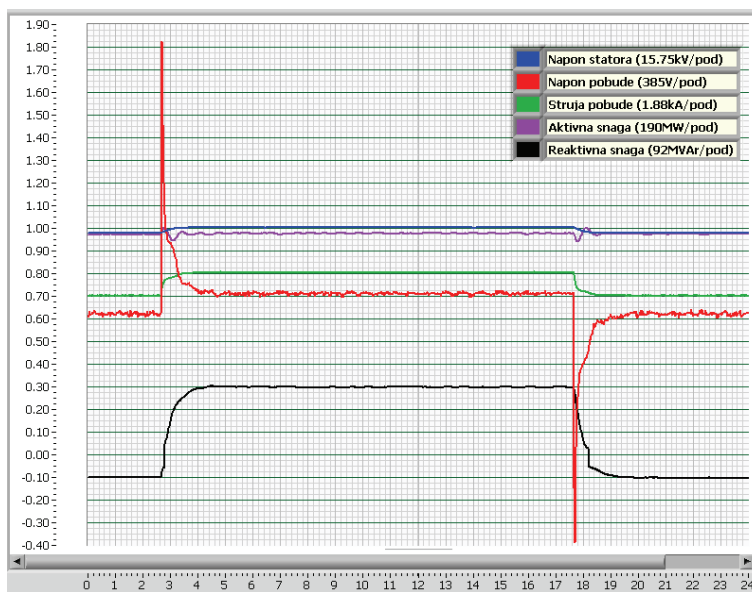
Slika 13. Dinamika pobuđivanja i razbuđivanja generatora u ručnoj regulaciji

$$T_{uff} = 5,12s, T_{uUf} = 0,02s, T_{off} = 1,97s, T_{oUf} = 0,02s, T_{sif} = 5,25s, \sigma = 1,29\%$$



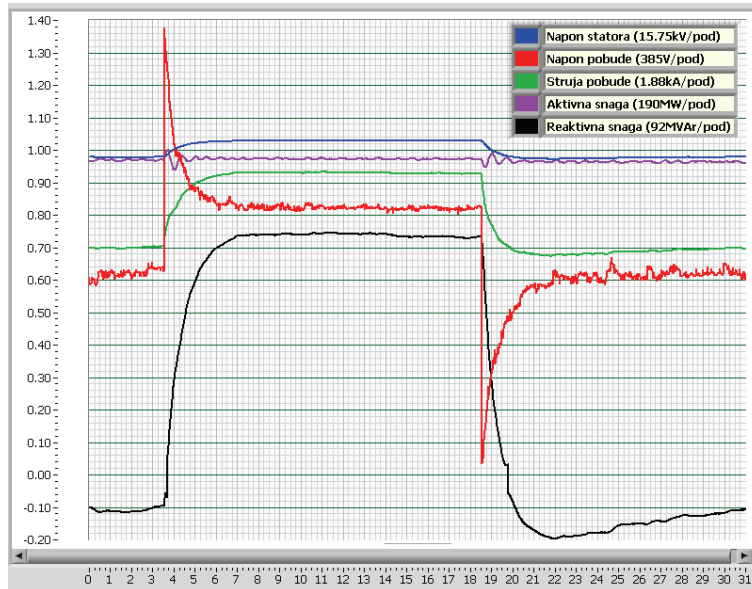
Slika 14. Dinamika odziva na odskočnu promenu reference u ručnoj regulaciji u praznom hodu generatora

$$T_{ulf} = 0,73s, T_{uUf} = 0,02s, T_{oIf} = 0,75s, T_{oUf} = 0,02s, T_{sIf} = 1,25s, \sigma = 2,04\%$$



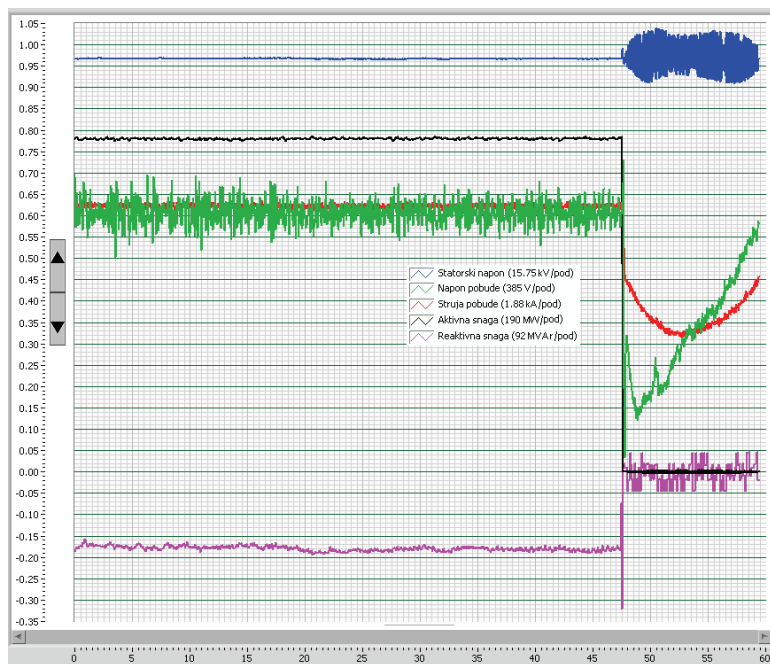
Slika 15. Dinamika odziva na odskočnu promenu reference u ručnoj regulaciji na mreži

$$T_{ulf} = 1,32s, T_{uUf} = 0,02s, T_{oIf} = 1,31s, T_{oUf} = 0,02s, T_{sIf} = 2,32s, \sigma = 0\%$$



Slika 16. Dinamika odziva na odskočnu promenu reference u regulaciji reaktivne snage

$$T_{uQ} = 3,27s, T_{uUf} = 0,02s, T_{oQ} = 3,31s, T_{oUf} = 0,02s, T_{sQ} = 4,72s, \square = 4,47\%$$



Slika 17. Odziv pri zbacivanju 150 MW aktivne snage

## 9. Zaključak

Garancijskim ispitivanjima je potvrđeno da novougrađeni sistem pobude agregata A4 u HE "Đerdap 1" poseduje sve garantovane parametre i spreman je za rad u svim režimima rada koji su predviđeni projektom što je pokazao i dosadašnji rad agregata.

## LITERATURA

- [1] „Izveštaj o primopredajnim ispitivanjima revitalizovanog agregata A4 u HE "Đerdap 1", Sveska 1 - Merenje električnih veličina“, Izveštaj br. 213084, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 2013.
- [2] *IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems*, IEEE Std 421.2-1990
- [3] *Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, Общие технические условия*, ГОСТ 21558-2000
- [4] Протокол наладки системы возбуждения типа СТН 435-2100-2 УХЛ4, зав. №8397891 гидроагрегата №4 ГЭС «Джердап-1»
- [5] „Sistem pobude agregata A4 u HE "Đerdap 1" - tehnička dokumentacija, Elektrosila, 2013.
- [6] „Uputstvo za eksploataciju hidrogenatora tipa SV 1488/175-84 UHL4 u HE "Đerdap 1", Elektrosila, 2004.

**Abstract:** Acceptance test results of the HE "Djerdap 1" unit A4 excitation system are presented. The excitation system under study had been delivered and commissioned during unit A4 refurbishment works in 2013, while acceptance tests were conducted during 2014. The test purpose was to prove the contracted performances of the delivered excitation system. During the test was used calibrated measuring equipment which meets the requirements of technical standard GOST 11828-66.

**Keywords:** excitation system, generator acceptance test, generator refurbishment

## Acceptance Testing of Unit A4 of HE "Đerdap 1" Excitation System

Rad primljen u uredništvo: 16.10.2015. godine.

Rad prihvaćen: 15.12.2015. godine.