

# ANALIZA PRIJELAZNE STABILNOSTI PLANIRANOG ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA NA PODRUČJU SREDNJE DALMACIJE

Davor Bajs, Zagreb

Provedena je analiza prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava na području srednje Dalmacije u budućnosti, s obzirom na razvoj visokonaponske mreže i gradnje novih proizvodnih kapaciteta u Hrvatskoj do 2010. godine. Određene su krivulje njihanja generatora i granične vrijednosti kritičnih vremena za slučajeve nastanka tropskih kratkih spojeva na vodovima koji povezuju elektrane s ostatkom elektroenergetskog sustava.

**Ključne riječi: prijelazna stabilnost elektroenergetskog sustava, granične vrijednosti kritičnih vremena**

## 1. UVOD

Kod planiranja razvoja elektroenergetskog sustava bitno je provesti analizu prijelazne stabilnosti, da bi se ispitalo ponašanje generatora prilikom velikih poremećaja koji mogu nastati, poput kratkih spojeva u mreži, ispada velikih tereta, gubitka važnijih vodova i sl. Ispravnim dimenzioniranjem i odabirom utjecajnih parametara generatora, sustava uzbude, i turbinskih regulatora, moguće je izbjeći teže posljedice i raspade pojedinih dijelova elektroenergetskog sustava u slučajevima nastanka težih poremećaja u visokonaponskoj mreži, te na taj način povećati sigurnost opskrbe potrošača električnom energijom. Iako je to samo jedan od načina povećanja prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava, u našim je prilikama posebno zanimljiv obzirom na starost generatora te primjenjenih sustava uzbude i turbinske regulacije. Zbog toga je neophodno da se tokom budućih revitalizacija starijih postrojenja, i gradnje novih, obrati pažnja na odabir pojedinih parametara generatora, primjenjenih sustava uzbude i turbinske regulacije, te da se investitori odluče za ona rješenja koja će omogućiti ispravan pogon čitavog elektroenergetskog sustava, imajući u vidu ukupne troškove koji bi mogli značajno narasti ukoliko bi se odabrala skupa, a nepotrebna rješenja.

Pod stabilnošću generatora koji radi unutar velikog elektroenergetskog sustava podrazumijeva se njegova sposobnost da u slučajevima nastanka većih poremećaja održi sinhronizam s ostalim generatorima u sustavu. Prilikom nastanka kratkih spojeva u mreži dolazi do velikih njihanja rotora generatora, pa se može dogoditi da generator ispadne iz sinhronizma. Gubitkom stabilnosti jednog generatora nastaje opasnost od preopterećenja i gubitka stabilnosti ostalih generatora što bi dovelo do potpunog raspada sustava. Očuvanje prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava ovisi o pogonskim prilikama prije kvara (opterećenje, proizvodnja, konfiguracija mreže), karakteru poremećaja (vrsta, trajanje, mjesto nastanka kvara), električnim i mehaničkim parametrima generatora i pogonskih strojeva, regulatorima uzbude i brzine vrtnje, te parametrima i dužinama dalekovoda. Međuzavisnosti između svih spomenutih veličina određuju da li će sustav ostati stabilan kod nastanka određenog poremećaja ili ne.

Na elektroenergetski sustav u Dalmaciji priključene su naše najvažnije i najveće hidroelektrane, a planira se izgradnja i jednog većeg termoenergetskog objekta, tako da je taj dio sustava posebno zanimljiv za analizu prijelazne stabilnosti uz planirani razvoj u budućnosti.

## 2. OPIS PRORAČUNA

Proračuni prijelazne stabilnosti su izvršeni pomoću ABB-og programskog paketa POSCOLAB, odn. programom MANISTA [2] koji dozvoljava modeliranje mreže s 1000 sabirnica, i 325 sinkronih generatora prikazanih klasičnim ( $E', x_d'$ ), a 75 generatora prikazanih detaljnim modelom. Generatori na području Dalmacije prikazani su detaljnim modelima, dok su ostali generatori u promatranom sustavu modelirani ovisno o njihovom položaju u mreži i utjecaju tokom prijelaznih pojava jednostavnijim ili detaljnijim modelima. U nedostatku točnijih spoznaja o opterećenju potrošačkih centara na 110 kV naponskoj razini, ona su modelirana kao naponski ovisna ( $P = 50\% I + 50\% Z$ ,  $Q = 100\% Z$ ), pri čemu je provjeren utjecaj i drugačijeg modeliranja tereta na rezultate proračuna, te je posebno napomenuto ukoliko ono utječe bitnije na njih. Modelirani elektroenergetski sustav se sastojao od 44 generatora i 189 vodova. Za korak integracije odabrano je 0.001 sek. Krivulje njihanja rotora generatora nacrtane su u odnosu na zamišljen referentni sinkroni stroj koji rotira trenutnom frekvencijom sustava.

Promatrana su prijelazna stanja uzrokovana nastankom elektranama bliskih trolnih kratkih spojeva na vodovima uz otklanjanje kvara koje odgovara vremenu djelovanja postojeće zaštite u mreži, sa i bez automatskog ponovnog uklapanja voda u kvaru. Također su određene i granične vrijednosti kritičnih vremena (najduže vrijeme trajanja kvara unutar kojega generatori zadržavaju stabilnost, odnosno najduže vrijeme unutar kojega se mora otkloniti kvar koji je uzrokovao poremećaj, a da generator ostane stabilan) za sve slučajeve bliskih trolnih kratkih spojeva na vodovima uz promatrane elektrane u srednjoj Dalmaciji.

### 2.1 Modeli mreže i razmatrana pogonska stanja

Proračuni stabilnosti elektroenergetskog sustava izvršeni su za odgovarajuće pogonsko stanje u modeliranoj mreži (prema lit. [6]), karakterizirano značajnim opterećenjem na području Dalmacije uz veliku proizvodnju hidroelektrana. Za potrebe proračuna modelirana su predvidiva stanja nakon 2000. i 2010. godine 400, 220 i 110 kV mreže Hrvatske i dijela Bosne i Hercegovine, zajedno s 400 i 220 kV vezama prema susjednim zemljama (Slovenija, Mađarska, Srbija, Crna Gora, Makedonija, Grčka). Razvoj elektroenergetskog sustava predviđen je prema planovima Sektora za razvoj HEP-a. Dinamika gradnje novih vodova i transformatorskih stanica ne mora točno odgovarati predviđenom stanju sustava promatranih nazivnih godina (2000. i 2010.) koje bi trebalo shvaćati kao pokazatelje bliže i dalje budućnosti u pogledu izgrađenosti elektroenergetskog sustava.

### 2.2 Elektroenergetski sustav “nazivne 2000. godine” (bliža budućnost)

Na modelu elektroenergetskog sustava 2000. godine (dodatak 1) predviđeno je osposobljavanje svih ratom razrušenih elemenata mreže u Hrvatskoj i Bosni i Hercegovini, te uspostava prijeratnog stanja tako da će elektroenergetski sustav Hrvatske biti potpuno povezan s sustavima susjednih zemalja preko 400, 220, i 110 kV vodova. Iako je ovo predviđanje pomalo preoptimistično, ono će se u svakom slučaju ostvariti ako ne do 2000. godine, onda nekoliko godina poslije. U tom vremenu nije predviđena izgradnja nekog značajnijeg novog objekta u prijenosnoj mreži, kao ni proizvodnog kapaciteta, ali je pretpostavljena revitalizacija generatora u HE Zakućac iz prve faze gradnje (generatora 1 i 2), i generatora HE Peruća [3, 6].

Revitalizacijom HE Zakučac bi se ugradili novi generatori snage 161 MVA,  $\cos\varphi=0.9$ ,  $x_d=95.7\%$ ,  $x_d'=33\%$ ,  $GD^2=4000 \text{ tm}^2$ , uz primjenjeni sustav statičke tiristorske uzbude s napajanjem od stezaljki generatora preko ispravljačkog transformatora (sustav samouzbude), i postojećim turbinskim regulatorima. Identični sustav uzbude bio bi primjenjen na novim generatorima HE Peruča. Instalirana snaga HE Peruča povećala bi se na 2x32 MVA, s  $\cos\varphi=0.95$ , i parametrima generatora  $x_d=113\%$ ,  $x_d'=37\%$ ,  $GD^2=2400 \text{ tm}^2$ .

Stacionarno pogonsko stanje koje prethodi poremećajima u sustavu karakterizirano je raspoloživošću svih elemenata mreže, ukupnim opterećenjem na području Dalmacije  $P_{\max}=486 \text{ MW}$ , i proizvodnjom elektrana prema tablici 1.

Tablica 1.- Proizvodnja elektrana u Dalmaciji na mreži 2000. godine

ELEKTRANA	AGREGAT	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )
HE ZAKUČAC	1	140	24,7
	2	140	21,4
	3	120	17,5
	4	33	17,7
HE PERUČA		41,6	3,3
HE ORLOVAC		240	6,37 *
HE ĐALE		20	0
HE KRALJEVAC		3	0
RHE OBROVAC		200	76,9 *
HE DUBROVNIK	1	100	15 *
	2	100	0

\* kapacitivno područje

### 2.3 Elektroenergetski sustav “nazivne 2010. godine” (dalja budućnost)

Na planiranoj mreži nazivne 2010. godine (dodatak 2) predviđena je izgradnja više značajnijih proizvodnih objekata, transformatorskih stanica i prijenosnih vodova. Predviđena je izgradnja termoelektrane na području Obrovca ukupne snage 700 MW (jedan blok priključen na 400 kV, a drugi na 220 kV), HE Kosinj, HE Virje, HE Podsused, HE Lešće, HE Drenje, TE Plomin II, PTE Osijek, TE Sisak (još jedan blok), TE-TO Zagreb (jedan blok). Od novih transformatorskih stanica predviđenih za izgradnju najznačajnije su Žerjavinec, Krndija, Brinje (400/220/110 kV, 400/110 kV), Obrovac (400/220 kV, ovisno o priključku nove elektrane), Imotski, Metković, Plat, Vrboran (220/110 kV). Na području Dalmacije predviđa se izgradnja dalekovoda Obrovac-Brinje, i Obrovac-Bihać (400 kV), Plat-Metković, Metković-Imotski, Imotski-Jablanica, Zakučac-Konjsko, Metković-Čapljina, i Kaštela-Konjsko (220 kV), te dalekovoda Vrgorac-Ploče, Vrgorac-Metković, Kaštela-Brodogradilište, Brodogradilište-Sučidar, Kaštela-Centar, Centar-Gripe, Gripe-Sučidar, Vrboran-Split 3, Trogir-Bilice, Knin-Konjsko, i Knin-Obrovac (110 kV). Parametri generatora i sustava uzbude novih elektrana su pretpostavljeni, a tokom proračuna provjeravano je da li promjena nekih od bitnih parametara, posebno TE Obrovac, utječe značajnije na rezultate.

Stacionarno pogonsko stanje koje prethodi poremećajima u sustavu karakterizirano je raspoloživošću svih elemenata mreže, ukupnim opterećenjem na području Dalmacije  $P_{\max}=775 \text{ MW}$ , i proizvodnjom elektrana prema tablici 2.

Iz proizvodnje elektrana na mrežama 2000. i 2010. godine vidljiv je problem viškova jalovih snaga na području Dalmacije budući da nije predviđeno postavljanje prigušnice u TS Konjsko, pa dio generatora radi u kapacitivnom području što se negativno odražava na njihovo ponašanje tokom prijelaznih stanja (lakše ispadaju iz sinhronizma, veći početni kut opterećenja).

Tablica 2.- Proizvodnja elektrana u Dalmaciji na mreži 2010. godine

ELEKTRANA	AGREGAT	P (MW)	Q (MVar)
HE ZAKUČAC	1	145	63,4
	2	145	57
	3	135	55,3
	4	135	63,6
HE PERUČA		32	11,2
HE ORLOVAC		240	35,8 *
HE ĐALE		40	0
HE KRALJEVAC		3	0
RHE OBROVAC		270	10,7 *
TE OBROVAC	1	300	100 *
	2	300	85,6 *
HE DUBROVNIK	1	105	15 *
	2	100	40 *

\* kapacitivno područje

## 2.4 Utjecajni parametri generatora

Najveći utjecaj na održanje stabilnosti tokom velikih poremećaja od parametara generatora imaju veličina  $GD^2$ , odnosno mehanička vremenska konstanta  $T_m$  (poželjno je da budu što veće, ali s povećanjem raste cijena generatora), i prijelazna sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi  $x_d'$  (poželjno što manja, smanjenjem također raste cijena generatora). Spomenute veličine postojećih, kao i pretpostavljene vrijednosti novih generatora u srednjoj Dalmaciji s kojima se računalo pri analizama prijelazne stabilnosti navedene su u tablici 3.

Tablica 3.- Vrijednosti  $GD^2$ ,  $T_m$ , i  $X_d'$  većih generatora u srednjoj Dalmaciji

ELEKTRANA	GENERATOR	$GD^2$ ( $tm^2$ )	$T_m$ (s)	$X_d'$ (%)
HE ZAKUČAC	1	4000	7,56	33
	2	4000	7,56	33
	3	4150	8,42	34
	4	4150	8,42	34
HE PERUČA	1, 2	2400	7,22	37
HE ORLOVAC	1, 2, 3	630	5,20	28
HE ĐALE	1, 2	2000	25,4	37
RHE OBROVAC	1, 2	1040	6,62	28
TE OBROVAC	1	-	6,00	23
	2	-	6,00	23

## 2.5 Sustavi uzbude generatora

Uzbudni su sustavi svih generatora na području srednje Dalmacije detaljno modelirani prema podacima proizvođača [4]. U tablici 4 navedeni su osnovni podaci i tipovi sustava uzbude za elektrane u srednjoj Dalmaciji.

Tablica 4.- Sustavi uzbude generatora u Dalmaciji

OBJEKT	KOM	TIP UZBUDE	REGULATOR	UZBUDNIK	GODINA ISPORUKE	PODEŠENJA	
						$K_a$ (pu/pu)	$T_i$ (s)
ZAKUČAC	2	GAB 14 K	ARN 532	YGTB 118-4	1977.	100	0, 2-5
ZAKUČAC	2	SAB 11 K*	ARN 531*	YGTB 118-1*	do 2000.	100*	0, 2-5*
PERUČA	2	DDK 11	DRN 560	YGTN 250/40	1995.	50	0-5
ORLOVAC	3	AMP 12-.15HKP	ABMn -2	la 1203-12	1972.	-	-
OBROVAC	2	EAB 12 BCK	ARN 563	YGTB 118-2	1981.	50	0, 2-5
ĐALE	2	SAB 11 K	ARN 531	YGTB 118-1	1988.	50	0, 2-5
GOLUBIĆ	2	SRA 11	YXRU 002	YGTA 500/600	1982.	30	0
KRALJEVAC	1	SRA 11	YXRU 002	YGTA 500/600	1988.	30	0
TE OBROVAC	2	GAB 14 K*	ARN 532*	YGTB 118-4*	-	50	0, 2-5

\* pretpostavljeno

## 2.6 Podešenje zaštite

Vrsta i vrijeme djelovanja zaštite vrlo su bitni za očuvanje prijelazne stabilnosti sustava jer je potrebno izolirati element u kvaru od ostatka mreže u što kraćem vremenu. U svim proračunima prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava (izuzev kod izračunavanja graničnih vrijednosti kritičnih vremena) računato je s današnjim podešenjem zaštite u visokonaponskoj mreži na području Dalmacije, prema kojem se bliski kvarovi na vodovima isključuju u prvom stupnju, što znači da je vrijeme djelovanja zaštite i prekidača najviše 100 ms (4 do 5 perioda). U pojedinim proračunima predviđa se primjena trolnog automatskog ponovnog uklapanja voda u kvaru nakon 400 ms.

### 3. REZULTATI PRORAČUNA - Elektroenergetski sustav 2000. godine

#### 3.1 Bliski trolejni kratki spojevi na vodovima uz isklapanje voda nakon 100 ms

Ispitani su slučajevi nastanka trolejnih kratkih spojeva u neposrednoj blizini sabirnica elektrane na svim vodovima koji elektranu povezuju s elektroenergetskim sustavom, kao najopasniji kvarovi za gubitak prijelazne stabilnosti sustava. Pretpostavljeno je djelovanje zaštite u prvom stupnju nakon 100 ms, i automatsko ponovno uklapanje nakon 400 ms, za vrijeme kojih kvar još uvijek traje tako da i zaštita i APU djeluju još jednom. Vremenska simulacija je slijedeća:

- 0 s- početak proračuna*
- 0 - 0.1 s- trajanje stacionarnog stanja*
- 0.1 s- nastanak trolejnog kratkog spoja na vodu*
- 0.2 s- djelovanje zaštite, isklapanje voda u kvaru*
- 0.6 s- automatsko ponovno uklapanje voda u kvaru, kvar nije otklonjen*
- 0.7 s- djelovanje zaštite, isklapanje voda u kvaru*
- 1.1 s- automatsko ponovno uklapanje voda u kvaru, kvar je otklonjen*
- 6 s- kraj proračuna*

Rezultati analize prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava na području srednje Dalmacije prikazani su za svaku elektranu posebno.

## HE ZAKUČAC

Slike 1 i 2 prikazuju krivulje njihanja rotora generatora 1 i 2 HE Zakučac u slučajevima nastanka bliskih tropolnih kratkih spojeva na vodovima Zakučac-Konjsko i Zakučac-Dugi Rat.

*Slika 1 - Krivulje njihanja generatora 1 i 2 HE Zakučac u slučaju bliskog tropolnog kratkog spoja na vodu Zakučac-Konjsko*

### SLIKA 1

*Slika 2 - Krivulje njihanja generatora 1 i 2 HE Zakučac u slučaju bliskog tropolnog kratkog spoja na vodu Zakučac-Dugi Rat*

### SLIKA 2

U slučaju nastanka tropolnih kratkih spojeva u neposrednoj blizini HE Zakučac i djelovanja zaštite u vremenu od 100 ms, te primjenu APU, stabilnost je sustava očuvana, bez obzira na kojem vodu iz HE Zakučac se kvar dogodio. Njihanje rotora se prigušuje nakon otprilike 3.5 sekundi, tokom kojih zanjše do maksimalnog kuta opterećenja od  $52^{\circ}$ , što je povećanje od  $\Delta\delta_{\max}=26^{\circ}$  u odnosu na stacionarni pogon. Imajući u vidu da se najveća povećanja kuteva opterećenja pri isključenju kvara u vremenu graničnih vrijednosti kreću oko  $\Delta\delta_{\max}=130^{\circ}$ , a da je djelovanjem postojeće zaštite u najnepovoljnijem slučaju ostvareno povećanje od  $26^{\circ}$ , očito je da postoji još dosta rezerve prije nego što bi neki od generatora izgubio sinhronizam.

Granične vrijednosti kritičnih vremena su najduža vremena unutar kojih se mora otkloniti određeni kvar da bi generatori u elektroenergetskom sustavu zadržali stabilnost tokom prijelazne pojave, pa su stoga dobar pokazatelj poželjnog vremena djelovanja zaštite koja se primjenjuje. Očito je da otklanjanje kvara u kraćem vremenu garantira očuvanje stabilnosti generatora, pa je primjenom bržeg sustava zaštite moguće konstruirati generator s, po stabilnost, nepovoljnijim parametrima kao što su manji  $GD^2$  ili veća  $X_d'$ . Ukupno vrijeme otklanjanja kvara se sastoji od vremena djelovanja releja potrebnog da ustanovi nastanak kvara i slanja signala prekidačima, koji izoliraju elemenat u kvaru od ostatka sustava.

Primjena brze zaštite od kvarova na vodovima kojima je HE Zakučac spojena na elektroenergetski sustav, koja bliske kvarove isključuje u 1. stupnju nakon 80 do 100 ms (vrijeme djelovanja zaštite i prekidača), vrlo je povoljna na održanje sinhronizma generatora prilikom prijelaznih pojava, i glavni je razlog očuvanju stabilnosti sustava u svim dosad promatranim slučajevima. Na dovoljnu rezervu do ispada generatora iz sinhronizma ukazuju i granične vrijednosti kritičnih vremena iz tablice 5.

**Generatori HE Zakučac na mreži 2000. godine zadržavaju stabilnost u svim slučajevima bliskih tropolnih i jednopolnih kratkih spojeva na vodovima, ukoliko se oni isključe djelovanjem zaštite i prekidača u vremenu od najdulje 260 ms.** Obzirom da se u opisanim proračunima kvar otklanjao kroz 100 ms, jasno je zašto u niti jednom slučaju nije dolazilo do gubitka stabilnosti.

Granične vrijednosti kritičnih vremena su ovom prilikom izračunate i za slučajeve nastanka jednopolnih kratkih spojeva, pa se iz njihovih vrijednosti, koje su veće od vrijednosti za tropolne kratke spojeve, može vidjeti da su po očuvanje stabilnosti generatora tropolni kratki spojevi opasniji od jednopolnih.

Tablica 5.- Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini HE Zakučac na mreži 2000. god.

VOD PREMA	redni broj	$T_k$ (ms)	
		TROPOLNI KRATKI SPOJEVI	JEDNOPOLNI KRATKI SPOJEVI
<b>MOSTAR</b>	1	260	310
<b>KONJSKO</b>	1	260	310
<b>BILICE</b>	1	265	310
<b>DUGI RAT</b>	1	265	290
	2	265	290
<b>KRALJEVAC</b>	1	265	290
	2	265	290
<b>METERIZE</b>	1	260	290
	2	260	290
	3	260	290

### HE PERUČA

Slika 3 prikazuje krivulju njihanja rotora generatora HE Peruča u slučaju nastanka bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Peruča-Sinj.

*Slika 3 - Krivulja njihanja generatora HE Peruča u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Peruča-Sinj*

### SLIKA 3

Iz slike je vidljivo da u slučaju isključenja kvara kroz 100 ms (sa ili bez primjene automatskog ponovnog uklapanja voda u kvaru) generatori HE Peruča ostaju u sinhronizmu. Najveći kutevi opterećenja tokom prijelazne pojave dostižu  $47^0$  u slučaju trolnog kratkog spoja na vodu prema Sinju, odnosno  $43^0$  na vodu prema Buškom Blatu. Prigušenje prijelazne pojave je slabo, tako da ona traje i nakon 6 s, a primjena automatskog ponovnog uklapanja voda u kvaru povoljno djeluje na prigušenje njihanja rotora.

Za HE Peruča određena su najduža vremena isključenja kvara uz koje će generatori ostati stabilni, posebno za trolne, posebno za jednopolne bliske kratke spojeve na vodovima Peruča-Sinj i Peruča-Buško Blato. Rezultati su prikazani u tablici 6.

Tablica 6.- Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini HE Peruča na mreži 2000. god.

VOD PREMA	redni broj	$T_k$ (ms)	
		TROPOLNI KRATKI SPOJEVI	JEDNOPOLNI KRATKI SPOJEVI
SINJ	1	315	390
BUŠKO BLATO	1	320	395

Na osnovu prikazanih rezultata možemo reći da **generatori HE Peruča ostaju stabilni na predviđenoj mreži 2000. godine u slučaju nastanka bliskih trolnih i jednopolnih kratkih spojeva, ukoliko se vod u kvaru izolira s vremenom isključenja kvara od najduže 315 ms.**

### RHE OBROVAC

Slika 4 prikazuje krivulju njihanja rotora generatora RHE Obrovac u slučaju nastanka bliskog trolnog kratkog spoja na 400 kV vodu Melina-Obrovac.

*Slika 4 - Krivulja njihanja generatora RHE Obrovac u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Melina-Obrovac*

## SLIKA 4

Najveći kut opterećenja generatora tokom prijelazne pojave za trolni kratki spoj na vodu Melina-Obrovac dostiže vrijednost od  $41.2^{\circ}$ , odnosno  $35^{\circ}$  za kratki spoj na vodu Obrovac-Konjsko. Prigušenje prijelazne pojave je nešto slabije, tako da ona traje i nakon promatranih 6 sekundi. Granične vrijednosti kritičnih vremena prikazani su tablicom 7.

Tablica 7.- Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za trolne kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini RHE Obrovac na mreži 2000. god.

VOD PREMA	redni broj	$T_k$ (ms)
MELINA	1	350
KONJSKO	1	315

Na planiranoj mreži 2000. godine generatori RHE Obrovac će održati stabilnost u slučajevima nastanka kratkih spojeva na 400 kV vodovima prema Melini i Konjskom, ukoliko se vod u kvaru isključi u vremenu manjem od 315 ms.

### HE ORLOVAC

Za HE Orlovac ispitan je slučaj nastanka trolnog kratkog spoja u neposrednoj blizini elektrane na jednom od dva paralelna voda kojima je radijalno povezana na elektroenergetski sustav, pri čemu rotor generatora zanjišu do najvećeg kuta opterećenja od  $62.1^{\circ}$ , uz vrlo dobro prigušenje prijelazne pojave nakon 3 s. **Generatori HE Orlovac u slučaju opisanog kvara gube sinhronizam ukoliko kratki spoj traje duže od 190 ms.** Ukoliko se vod u kvaru isključi u manjem vremenu HE Orlovac može davati snagu u sustav preko zdravog voda, bez opasnosti od gubitka stabilnosti. Uzroci većeg kuta opterećenja i manje granične vrijednosti kritičnog vremena su u zastarjelom elektrostrojnom sustavu uzbude i maloj vrijednosti  $GD^2$  agregata. Usprkos tome, stabilnost elektroenergetskog sustava u slučaju nastanka kvarova u blizini HE

Orlovac nije ugrožena niti uz ove nepovoljne parametre generatora i sustava uzbude, ukoliko zaštita ispravno djeluje.

*Slika 5 - Krivulja njihanja generatora HE Orlovac u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Orlovac-Konjsko*

## SLIKA 5

*Tablica 8. - Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za trolne kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini HE Orlovac na mreži 2000. god.*

VOD PREMA	redni broj	$T_k$ (ms)
KONJSKO	1	190
	2	190

### HE ĐALE

HE Đale je na elektroenergetski sustav vezana samo jednim vodom, pa je stoga vrlo osjetljiva na bliske kvarove budući da u slučaju iskapčanja tog voda ne može dati snagu u sustav. Na slici 6 vidljivo je da u slučaju nastanka trolnog kratkog spoja na vodu Đale-Konjsko isključenog djelovanjem zaštite kroz 100 ms, te uz automatsko ponovno uklapanje voda nakon 400 ms, generatori ispadaju iz sinhronizma.

*Slika 6 - Krivulja njihanja generatora HE Đale u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Đale-Konjsko*

## SLIKA 6

Granična vrijednost kritičnog vremena za trolni kratki spoj na vodu Đale-Konjsko na planiranoj mreži 2000. godine iznosi  $T_k=395$  ms uz pretpostavku da je spomenuti vod u tom trenutku ukopčan tako da elektrana može plasirati snagu u elektroenergetski sustav. U slučaju isključenja voda 100 ms nakon nastanka kvara i uz 400 ms unutar kojih su generatori potpuno rasterećeni dok se vod ne uklopi, ispad iz sinhronizma je neizbježan.

### HE KRALJEVAC

Budući da je HE Kraljevac na mreži 2000. godine angažirana samo s jednim agregatom (6 MVA), ispitana je prijelazna stabilnost tog agregata s obzirom na slučajeve nastanka bliskih trolnih kratkih spojeva na jednom od dva paralelna voda kojima je hidroelektrana povezana na TS Kraljevac.

*Slika 6 - Krivulja njihanja generatora (6 MVA) HE Kraljevac u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu HE Kraljevac-Kraljevac*

## SLIKA 7

Njihanje rotora u opisanom slučaju je zanemarivo, a granične vrijednosti kritičnih vremena određuje ponašanje generatora HE Zakućac budući da oni prije ispadaju iz sinhronizma (400-500 ms nakon nastanka kvara) od agregata HE Kraljevac.

### 3.2 Zaključno o prijelaznoj stabilnosti za planiranu mrežu 2000. godine

Analize pokazuju da razmatrane godine prijelazna stabilnost elektroenergetskog sustava na području srednje Dalmacije uz postojeću zaštitu u visokonaponskoj mreži nije ugrožena, te da postoji dovoljna rezerva do ispada pojedinih generatora iz sinhronizma u slučajevima nastanka troležnih kratkih spojeva na vodovima kojima su elektrane povezane na elektroenergetski sustav. Od najvećih hidroelektrana na tom području (HE Zakučac, RHE Obrovac, HE Orlovac) najosjetljivija na poremećaje u svojoj okolini je HE Orlovac, prvenstveno radi zastarjelog sustava uzbude generatora i male vrijednosti  $GD^2$  agregata, zbog čega generatori mogu u slučaju zakašnjelog djelovanja zaštite i isključenja voda u kvaru izgubiti stabilnost, uz daljnje moguće posljedice po rad elektroenergetskog sustava.

Posebno osjetljiva na nastanak troležnih kratkih spojeva je HE Đale budući da je radijalno povezana samo jednim vodom na TS Konjsko, tako da svaki kvar na tom vodu uzrokuje ispad generatora iz sinhronizma budući da su, uz najkraće vrijeme djelovanja zaštite i automatskog ponovnog uklapanja, ipak predugo potpuno rasterećeni. Razbuđivanje generatora i ponovno uklapanje na mrežu nakon otklanjanja kvara se u opisanom slučaju ne bi mogli izbjeći. Ukoliko troležni kratki spoj nastane na nekom od električki bliskih vodova iz TS Konjsko, ne postoji opasnost od gubitka prijelazne stabilnosti generatora HE Đale.

## 4. REZULTATI PRORAČUNA - Elektroenergetski sustav 2010. godine

### 4.1 Bliski troležni kratki spojevi na vodovima uz isklapanje voda nakon 100 ms

Vremenska simulacija poremećaja za analizu prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava srednje Dalmacije na planiranoj mreži 2010. godine istovjetna je analizama na mreži 2000. godine. Razlike u rezultatima rezultat su drugačije konfiguracije mreže, proizvodnje elektrana, povećanog vršnog opterećenja, i ulaska u pogon nove termoelektrane na tom području.

#### HE ZAKUČAC

Slike 8 i 9 prikazuju krivulje njihanja rotora generatora 1 i 2 HE Zakučac u slučajevima nastanka bliskih troležnih kratkih spojeva na vodovima Zakučac-Konjsko 1 i Zakučac-Dugi Rat.

*Slika 8 - Krivulje njihanja generatora 1 i 2 HE Zakučac u slučaju bliskog troležnog kratkog spoja na vodu Zakučac-Konjsko 1 (mreža 2010. godine)*

#### **SLIKA 8**

*Slika 9 - Krivulje njihanja generatora 1 i 2 HE Zakučac u slučaju bliskog troležnog kratkog spoja na vodu Zakučac-Dugi Rat (mreža 2010. godine)*

#### **SLIKA 9**

Maksimalne promjene kuteva opterećenja slične su kao kod mreže 2000. godine, s razlikom da su najveći kutevi opterećenja veći za desetak stupnjeva ( $\delta_{\max} \approx 61^\circ$ ), budući da su generatori u ovom slučaju opterećeniji. Najveće promjene kuteva opterećenja tokom prijelaznih pojava se kreću oko  $\Delta\delta_{\max} = 24^\circ$  za bliske troležne kratke spojeve na vodovima 220 i 110 kV.

Granične vrijednosti kritičnih vremena se značajnije ne mijenjaju (tablica 9), a **generatori ostaju u sinhronizmu ukoliko je kvar isključen kroz vrijeme od najduže 260 ms**, kao i na mreži nazivne 2000. godine. I u ovom slučaju za gubitak stabilnosti generatora nepovoljniji su bliski trolpolni kratki spojevi. Povoljno djelovanje APU voda u kvaru, uočljivo je i na modelu mreže nazivne 2010. godine, budući da su maksimalni kutevi opterećenja generatora isti u slučaju njegove primjene i bez njega, ali je prigušenje njihanja bolje u slučaju primjene APU, budući da se prije obnavlja stacionarno stanje koje je postojalo prije kvara.

*Tablica 9.- Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini HE Zakučac na mreži 2010. god.*

VOD PREMA	redni broj	$T_k$ (ms)	
		TROPOLNI KRATKI SPOJEVI	JEDNOPOLNI KRATKI SPOJEVI
<b>MOSTAR</b>	1	265	320
<b>KONJSKO</b>	1	265	320
	2	265	320
<b>BILICE</b>	1	265	320
<b>DUGI RAT</b>	1	260	295
	2	260	295
<b>KRALJEVAC</b>	1	265	295
	2	265	295
<b>METERIZE</b>	1	265	295
	2	265	295
	3	265	295

### HE PERUČA

Slika 10 prikazuje krivulju njihanja rotora generatora HE Peruča u slučaju nastanka bliskog trolpolnog kratkog spoja na vodu Peruča-Sinj.

*Slika 10 - Krivulja njihanja generatora HE Peruča u slučaju bliskog trolpolnog kratkog spoja na vodu Peruča-Sinj (mreža 2010. godine)*

### **SLIKA 10**

Generatori ostaju u sinhronizmu i na planiranoj mreži 2010. godine, ali se najveći kutevi opterećenja znatno povećavaju ( $\delta_{\max} \approx 68^\circ$ ). Maksimalne promjene kuteva opterećenja veće su za nekoliko stupnjeva u odnosu na stanje mreže 2000. godine ( $\Delta\delta_{\max} = 30^\circ$ ). Granične vrijednosti kritičnih vremena za bliske trolpolne kratke spojeve manje su u odnosu na prethodni slučaj za 70

ms. Na osnovu gornjih rezultata možemo zaključiti **da će stabilnost generatora HE Peruča biti sačuvana u radu na planirani elektroenergetski sustav 2010. godine, ukoliko se kvar isključi kroz najduže 245 ms.** Uz isključenje kvara u 1. stupnju djelovanjem zaštite i prekidača, postoji još dovoljna vremenska rezerva od stotinjak mili sekundi prije nego što bi generatori ispali iz sinhronizma.

### **RHE OBROVAC**

Slika 11 prikazuje krivulju njihanja rotora generatora RHE Obrovac u slučaju nastanka bliskog trolnog kratkog spoja na 400 kV vodu Melina-Obrovac.

*Slika 11 - Krivulja njihanja generatora RHE Obrovac u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Melina-Obrovac (mreža 2010. godine)*

### **SLIKA 11**

Generator u opisanom slučaju zanjiše do kuta opterećenja od  $\delta_{\max}=62.5^{\circ}$ , s vrlo velikom amplitudom drugog njihaja. Prigušenje prijelazne pojave je slabo, tako da ona traje oko 5 s sa velikim amplitudama njihanja rotora. Granične vrijednosti kritičnih vremena za bliske trolne kratke spojeve na 400 kV vodovima prema Konjskom i TE Obrovac (pretpostavljen je spoj jednog bloka nove termoelektrane na 400 kV, a drugog na 220 kV) prikazane su u tablici 10.

*Tablica 10. - Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za trolne kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini RHE Obrovac na mreži 2010. god.*

<b>VOD PREMA</b>	<b>redni broj</b>	<b><math>T_k</math> (ms)</b>
<b>TE OBROVAC</b>	1	280
<b>KONJSKO</b>	1	265

**Na planiranoj mreži 2010. godine generatori RHE Obrovac će održati stabilnost u slučajevima nastanka kratkih spojeva na 400 kV vodovima prema TE Obrovac i Konjskom, ukoliko se vod u kvaru isključi u vremenu manjem od 265 ms, što je smanjenje od 50 ms u odnosu na istovjetnu analizu na mreži 2000. godine.**

### **TE OBROVAC**

TE Obrovac trebala bi zadovoljiti potrebe za baznom snagom u Dalmaciji, pa je pretpostavljen njen ulazak u pogon prije 2010. godine, pri čemu je spoj blokova 2x350 MW realiziran na 400 i 220 kV mrežu, s novoizgrađenom transformatorskom stanicom 400/220/110 kV. Nova termoelektrana je na modelu mreže spojena s ostatkom elektroenergetskog sustava Hrvatske i Bosne i Hercegovine 400 kV vodovima prema Melini, Bihaću, Brinju, i RHE Obrovac (Konjskom), 220 kV vodovima prema Konjskom i Brinju, te 110 kV vodovima prema TS Obrovac. Rezultati dobiveni analizom prijelazne stabilnosti za slučajeve nastanka bliskih trolnih kratkih spojeva na vodovima ne bi trebalo smatrati konačnima, budući da uvelike ovise o parametrima novih generatora i sustava uzbude koji su u ovim analizama proizvoljno pretpostavljeni bez ozbiljnijeg uvida u stvarne potrebe sustava i ekonomske valorizacije istih.

*Slika 12 - Krivulje njihanja generatora TE Obrovac u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Melina-TE Obrovac 400 kV (mreža 2010. godine)*

### SLIKA 12

*Slika 13 - Krivulje njihanja generatora TE Obrovac u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Konjsko-TE Obrovac 220 kV (mreža 2010. godine)*

### SLIKA 13

U slučaju nastanka bliskih trolnih kratkih spojeva na 400 i 220 kV vodovima kojima je spojena na elektroenergetski sustav, generatori TE Obrovac održavaju sinhronizam. Najveći kutevi opterećenja generatora se za kratke spojeve na 400 kV vodovima kreću oko  $\delta_{\max}=94^{\circ}$ , a za kratke spojeve na 220 kV vodovima  $\delta_{\max}=87^{\circ}$ . U odnosu na ostale elektrane na promatranom području, generatori TE Obrovac postižu najveće kuteve opterećenja tokom prijelaznog stanja, što je posljedica većeg kuta opterećenja u stacionarnom stanju zbog rada generatora u kapacitivnom području radi rješavanja problema viška jalove snage u 400 i 220 kV mreži na području srednje Dalmacije. Rješavanje spomenutog problema na drugi način smanjio bi opasnost od gubitka prijelazne stabilnosti tokom velikih poremećaja u mreži.

*Tablica 11. - Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za trolne kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini TE Obrovac na mreži 2010. god.*

VOD PREMA	redni broj	$T_k$ (ms)
<b>RHE OBROVAC</b>	1	215
<b>MELINA</b>	1	235
<b>BRINJE 400 kV</b>	1	230
<b>BIHAĆ</b>	1	230
<b>KONJSKO 220 kV</b>	1	245
<b>BRINJE 220 kV</b>	1	250

Na osnovu graničnih vrijednosti kritičnih vremena možemo zaključiti da će **generatori TE Obrovac sačuvati stabilnost na mreži 2010. godine ukoliko se vod u kvaru isključi u vremenu od najduže 215 ms ukoliko je kratki spoj nastao na nekom od 400 kV vodova, odnosno 245 ms u slučaju nastanka kratkog spoja na 220 kV vodu.** Ove vrijednosti izračunate su uz pretpostavljenu mehaničku vremensku konstantu novih generatora  $T_m=6$  s, a u slučaju konstrukcije generatora s većom  $T_m$ , granične vrijednosti kritičnih vremena se znatno mijenjaju.

### HE ORLOVAC

Krivulju njihanja generatora HE Orlovac u slučaju nastanka bliskog trolnog kratkog spoja na jednom od vodova HE Orlovac-Konjsko prikazuje slika 14.

Slika 14 - Krivulja njihanja generatora HE Orlovac u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Orlovac-Konjsko (mreža 2010. godine)

## SLIKA 14

Rotor zanjiše do najvećeg kuta  $\delta_{\max}=74^{\circ}$ , nakon čega se njihanje vrlo dobro prigušuje. Granične vrijednosti kritičnih vremena za trolne kratke spojeve na vodovima prema Konjskom se ne mijenjaju u odnosu na mrežu 2000. godine. **Na mreži 2010. godine generatori HE Orlovac ostaju u sinhronizmu s ostalim generatorima u sustavu prilikom nastanka bliskih trolnih kratkih spojeva na vodovima koji je povezuju s elektroenergetskim sustavom, ukoliko se vod u kvaru isključi u vremenu manjem od 190 ms proteklom od nastanka kvara.**

Tablica 12. - Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za trolne kratke spojeve na vodovima u neposrednoj blizini HE Orlovac na mreži 2010. god.

VOD PREMA	redni broj	$T_k$ (ms)
KONJSKO	1	190
	2	190

### HE ĐALE

Očekivano, niti na mreži 2010. godine generatori HE Đale ne mogu očuvati sinhronizam u slučaju nastanka trolnog kratkog spoja na vodu kojim je elektrana radijalno priključena na elektroenergetski sustav.

Slika 15 - Krivulja njihanja generatora HE Đale u slučaju bliskog trolnog kratkog spoja na vodu Đale-Konjsko

## SLIKA 15

Najduže vrijeme trajanja kvara ili isključenja spomenutog voda, tokom kojega su generatori potpuno rasterećeni, uz koje mogu očuvati sinhronizam prilikom ukapčanja voda i otklanjanja kvara u ovom slučaju iznosi 375 ms, 20 ms manje u odnosu na mrežu 2000. godine.

### HE KRALJEVAC

I na mreži 2010. godine njihanje generatora 6 MVA u HE Kraljevac je zanemarivo. U slučaju nastanka trolnog kratkog spoja na jednom od vodova HE Kraljevac-Kraljevac, rotor zanjiše do najvećeg kuta  $\delta_{\max}=4^{\circ}$ , a prijelazna pojava se vrlo brzo nakon toga priguši. U slučaju duljeg trajanja kvara, iz sinhronizma prije ispadaju generatori HE Zakućac nego promatrani generator HE Kraljevac.

## 4.2 Zaključno o prijelaznoj stabilnosti za planiranu mrežu 2010. godine

Izgradnjom novih visokonaponskih vodova i uvođenjem termoelektrane na području srednje Dalmacije u pogon, primjećuje se trend smanjenja prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava, ali ne dovoljan da ozbiljnije poremeti njegov rad u slučaju većih poremećaja. Za promatrano djelovanje zaštite u VN mreži, u slučaju nastanka bliskih trolnih kratkih spojeva na vodovima koji povezuju elektrane sa ostatkom elektroenergetskog sustava, opasnost po gubitak sinhronizma postoji jedino u slučaju HE Đale budući da je radijalno povezana sa

sustavom samo jednim vodom. Granične se vrijednosti kritičnih vremena za kvarove u neposrednoj blizini elektrana smanjuju.

Tablica 13. - Granične vrijednosti kritičnih vremena (ms) za bliske tropolne kratke spojeve na vodovima koji povezuju elektrane s EES-m

ELEKTRANA	$T_k$ (ms)	
	EES 2000. god.	EES 2010. god.
HE ZAKUČAC	260	260
RHE OBROVAC	315	265
TE OBROVAC	-	215
HE ORLOVAC	190	190
HE PERUČA	315	245
HE ĐALE	395*	375*
HE KRALJEVAC (gen. 4)	-	-

\*ako je uključen vod Đale-Konjsko u tom vremenu

## 5. ZAKLJUČAK

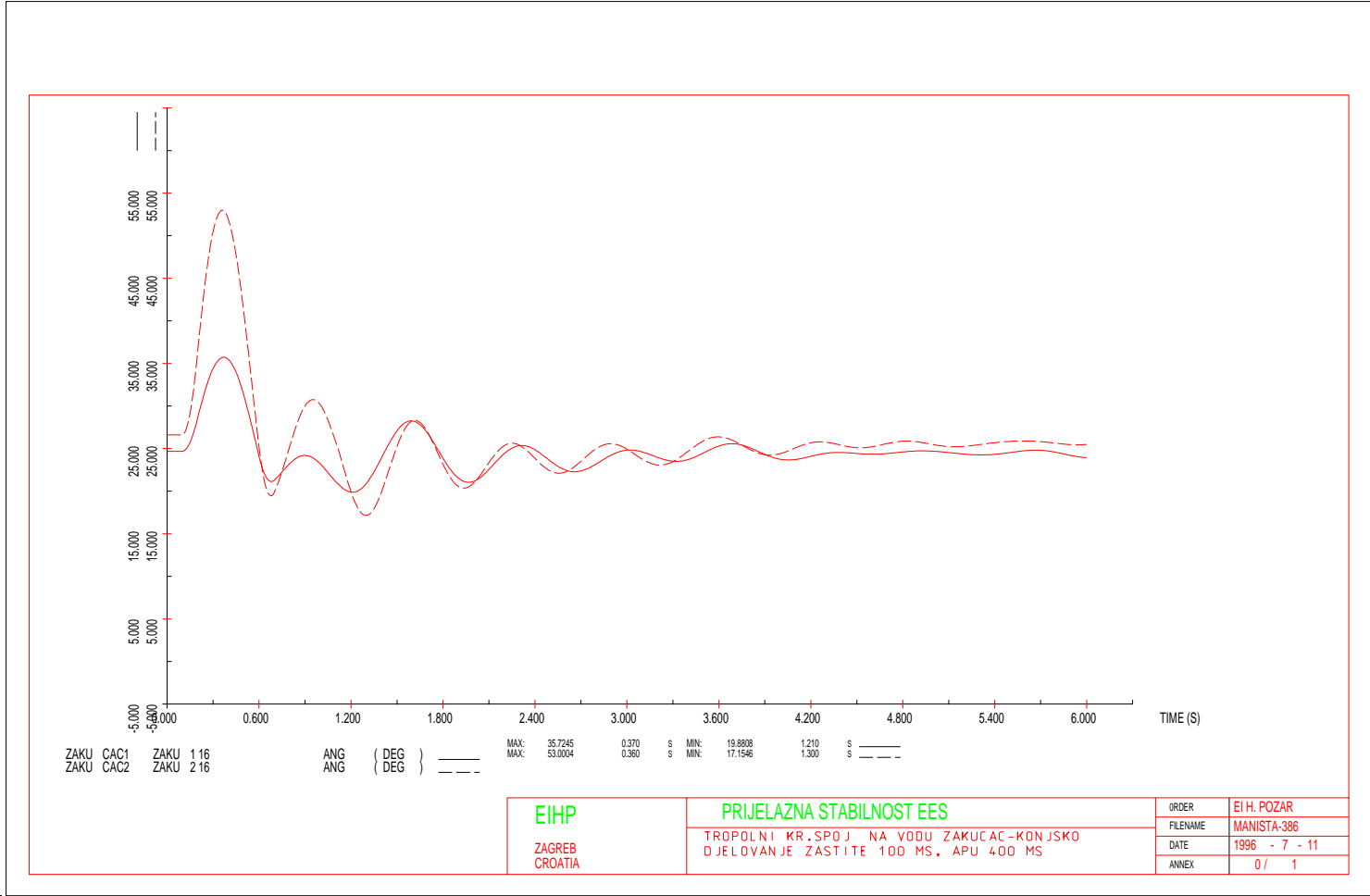
Analizama prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava na području srednje Dalmacije za planirani razvoj visokonaponske mreže i izgradnje novih proizvodnih kapaciteta u budućnosti do 2010. godine, određene su krivulje njihanja generatora i granične vrijednosti kritičnih vremena u slučajevima nastanka bliskih tropolnih kratkih spojeva na vodovima koji povezuju elektrane sa ostatkom sustava. Uz planiranu revitalizaciju generatora iz prve faze HE Zakučac i HE Peruča, te izgradnje termoelektrane na području Obrovca do 2010. godine, ne postoji opasnost od gubitka prijelazne stabilnosti pri nastanku opisanih kvarova, izuzev u slučaju HE Đale koja je radijalno spojena sa elektroenergetskim sustavom, ukoliko zaštita u visokonaponskoj mreži ispravno djeluje i isključuje vod u kvaru u vremenu od 100 ms. S razvojem mreže i uvođenjem u pogon termoelektrane u Obrovcu primjećuje se smanjenje prijelazne stabilnosti sustava, pa je neophodno obratiti pažnju i na taj problem prilikom gradnje novih postrojenja i revitalizacije starih, za koje bi trebalo odrediti optimalne parametre, te primjenjene sustave uzbude generatora i turbinskih regulatora, tako da se postigne zadovoljavajuće ponašanje sustava tokom prijelaznih stanja uz ekonomsku opravdanost svih investicija. Rješavanje problema viška jalove snage u mreži radom pojedinih generatora u kapacitivnom području, negativno se odražava na povećanje prijelazne stabilnosti sustava kojem bi trebalo težiti, pa bi se rješenje tog problema na drugi način (postavljanje prigušnice i sl.) pozitivno odrazilo na rad sustava tokom velikih poremećaja. S obzirom da je u ovom članku promatran samo dio problema u radu sustava tokom prijelaznih stanja potrebno je provoditi daljnje analize prijelazne stabilnosti elektroenergetskog sustava na području srednje Dalmacije, posebno u slučaju izvoza velikih snaga u druge dijelove elektroenergetskog sustava Hrvatske i susjednih zemalja, te u slučaju odabira neke druge lokacije za gradnju termoelektrane.

## LITERATURA

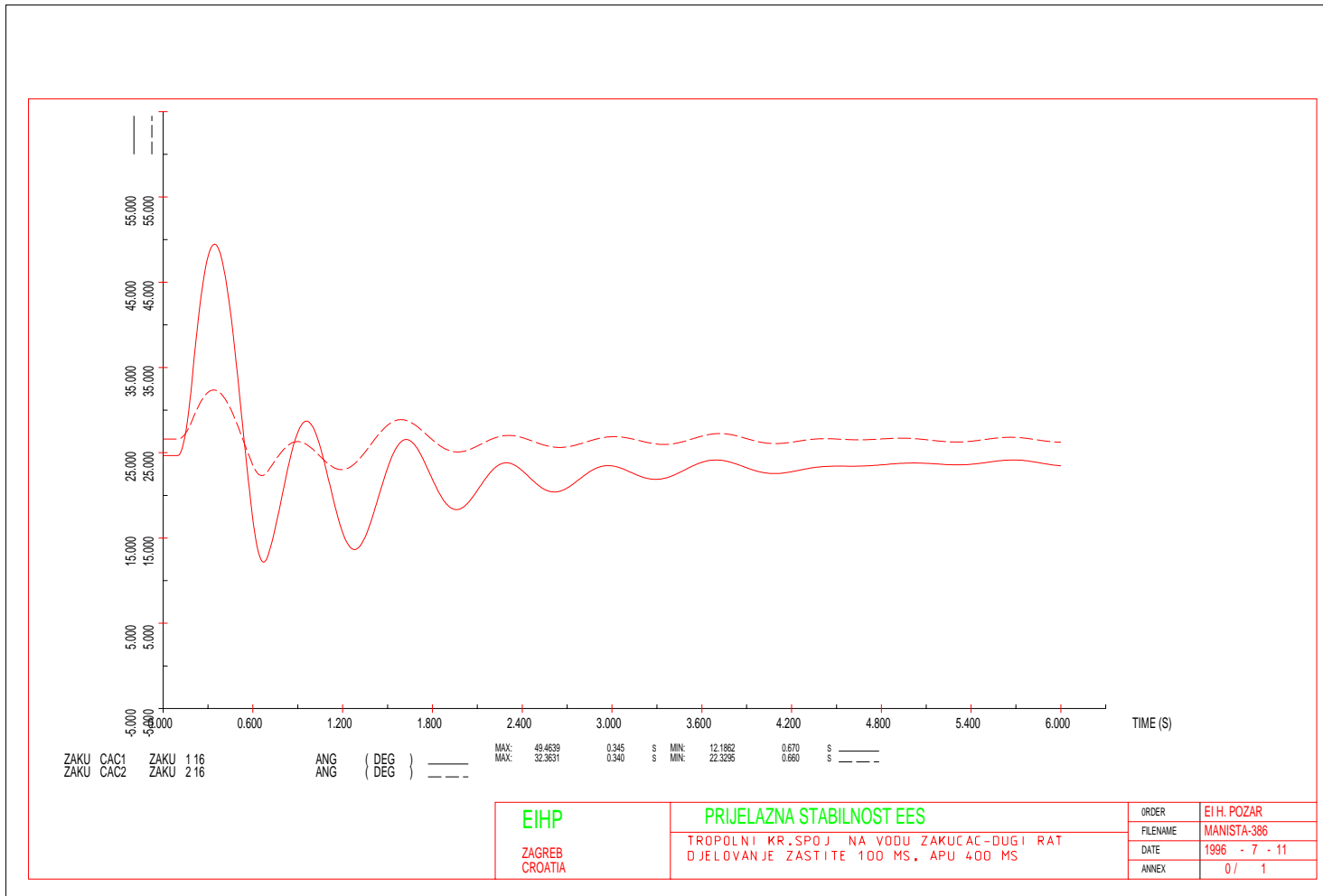
- [1] P. Kundur: POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL, Mc Graw-Hill, 1994.
- [2] POSCOLAB, ABB High Voltage Technologies, Zurich/Switzerland, 1995.
- [3] IDEJNI PROJEKT REVITALIZACIJE SINKRONIH GENERATORA, SUSTAVA UZBUDE, BLOK TRANSFORMATORA I VN KABELA U HIDROELEKTRANI ZAKUČAC, KONČAR-Institut za elektrotehniku, Zagreb, travanj 1995.
- [4] EXCITATION SYSTEM AND VOLTAGE REGULATORS FOR SYNCHRONOUS MACHINES - Reference list, KONČAR INEM, Zagreb
- [5] TURBINE GOVERNOR, FRVA - Technical Description, CONTROL PRINCIPLES
- [6] Dr. Mislav Majstrovic, Mr. Elis Sutlovic, D. Bajs, R. Goic, E. Mudnic: ANALIZA I ODREĐIVANJE PARAMETARA REVITALIZIRANIH AGREGATA 1 I 2 HE ZAKUČAC I REVITALIZIRANIH AGREGATA HE PERUČA S OBZIROM NA ZAHTJEVE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA, Zagreb, lipanj 1996.

Naslov pisca:

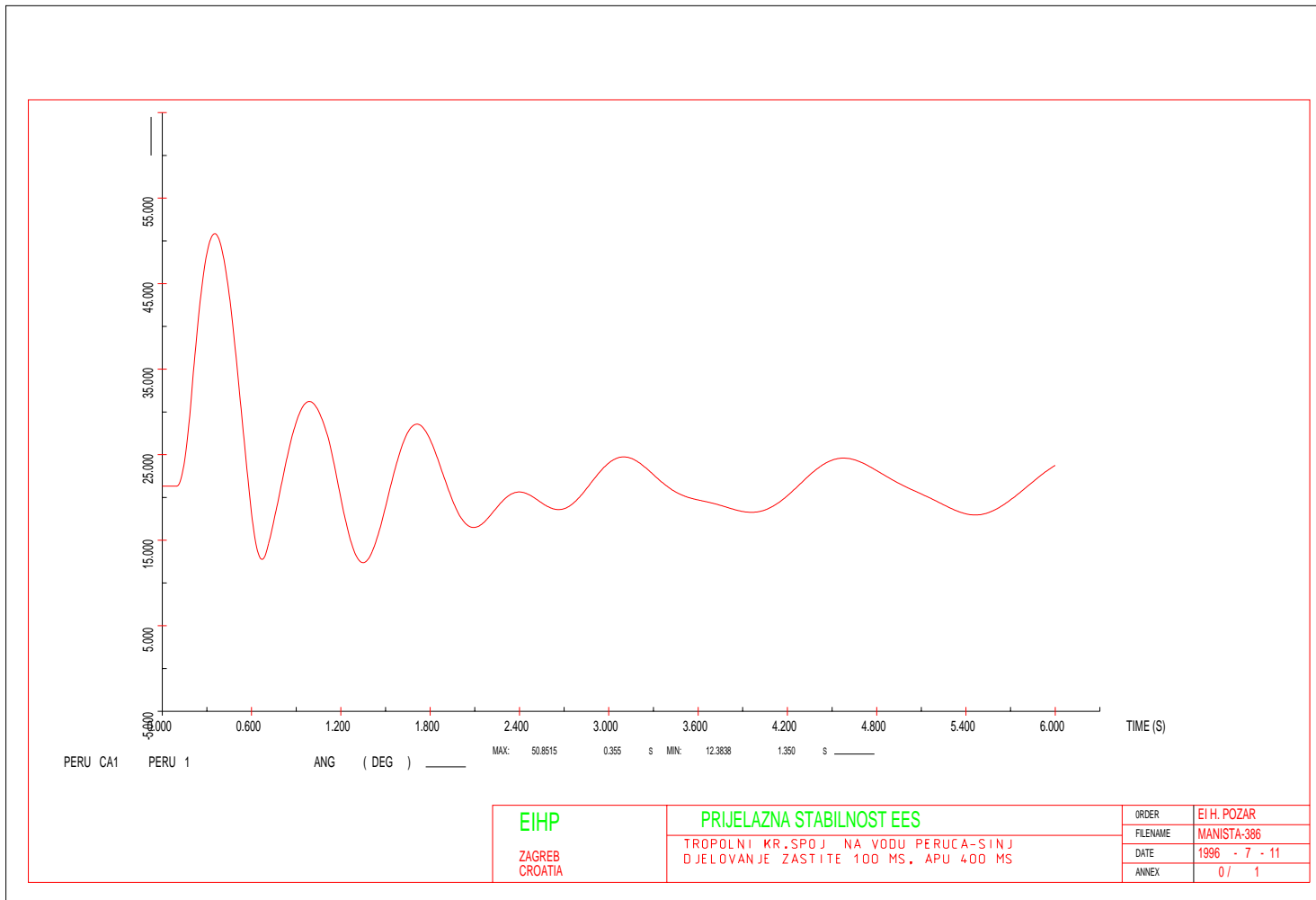
Davor Bajs, dipl. ing.  
Energetski institut "Hrvoje Požar",  
Ulica grada Vukovara 37,  
10000 Zagreb  
Hrvatska



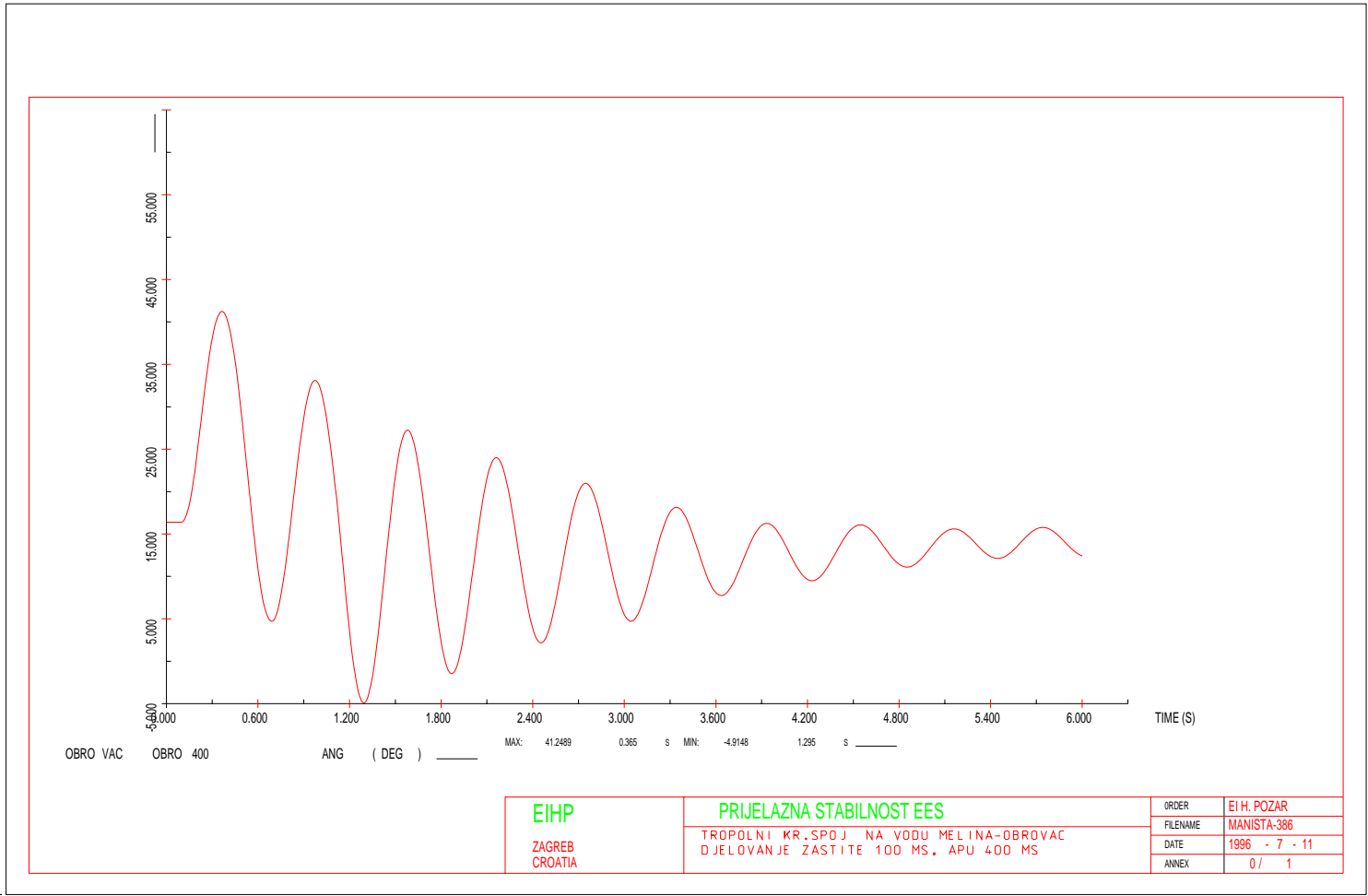
SLIKA 1



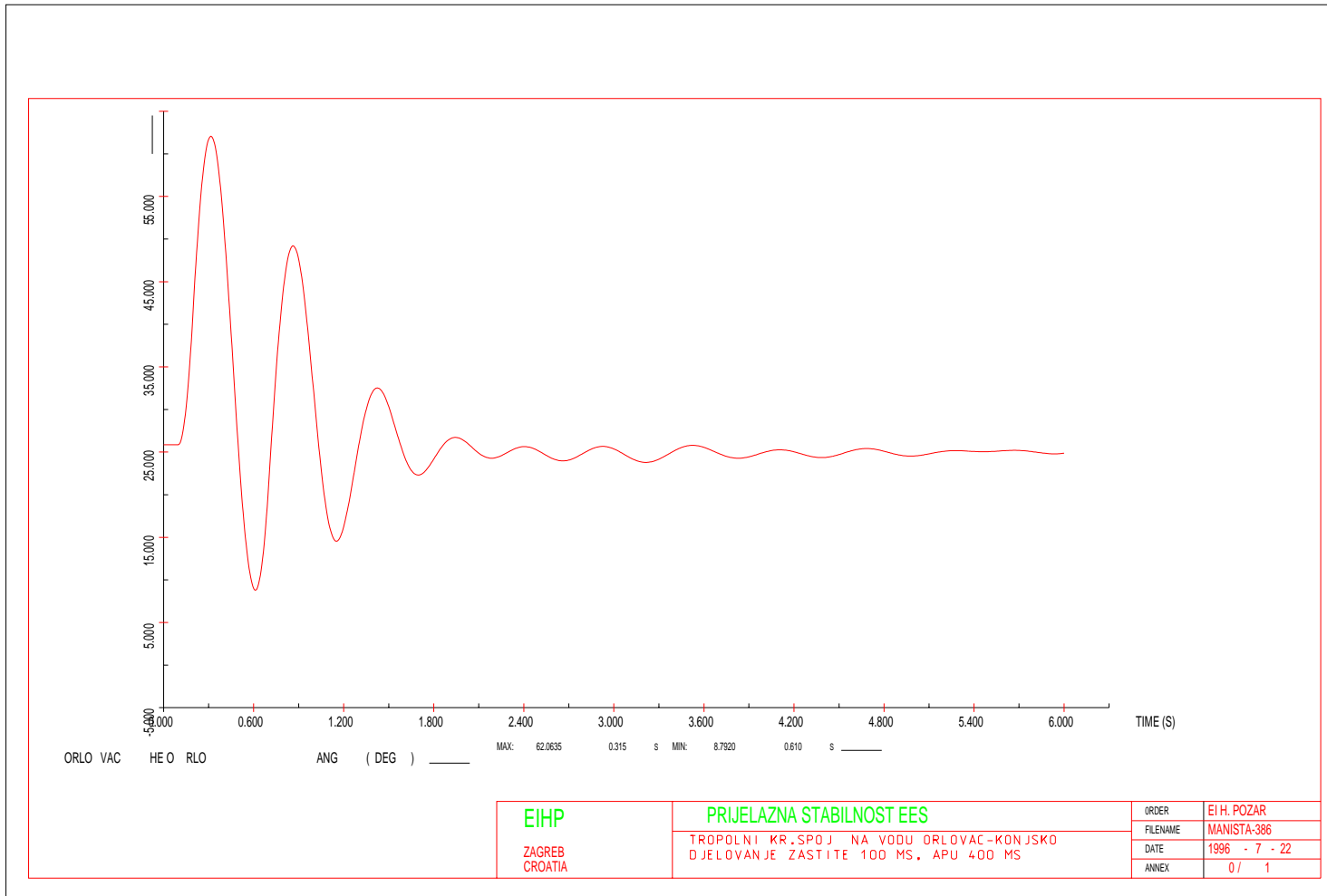
SLIKA 2



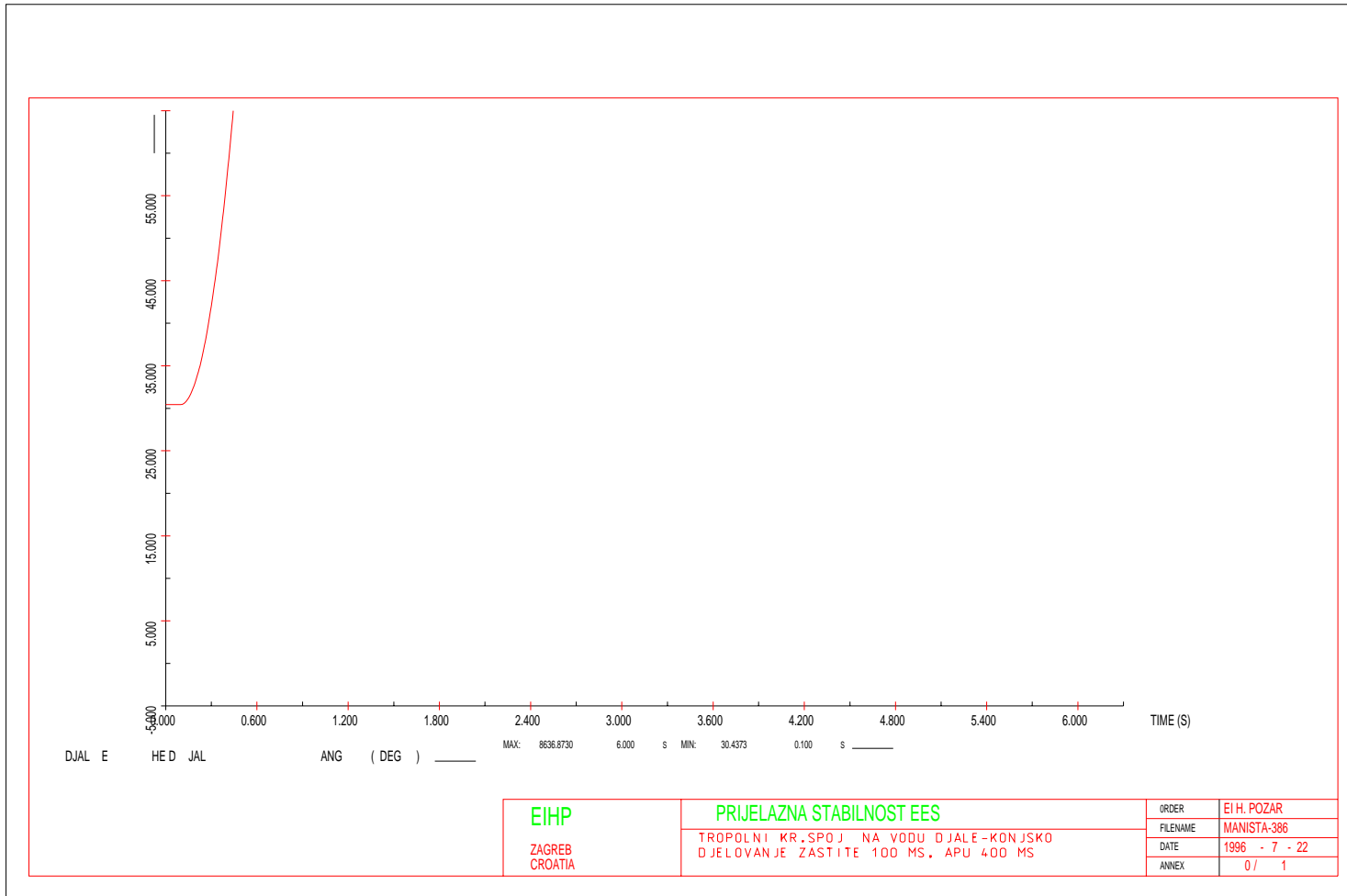
**SLIKA 3**



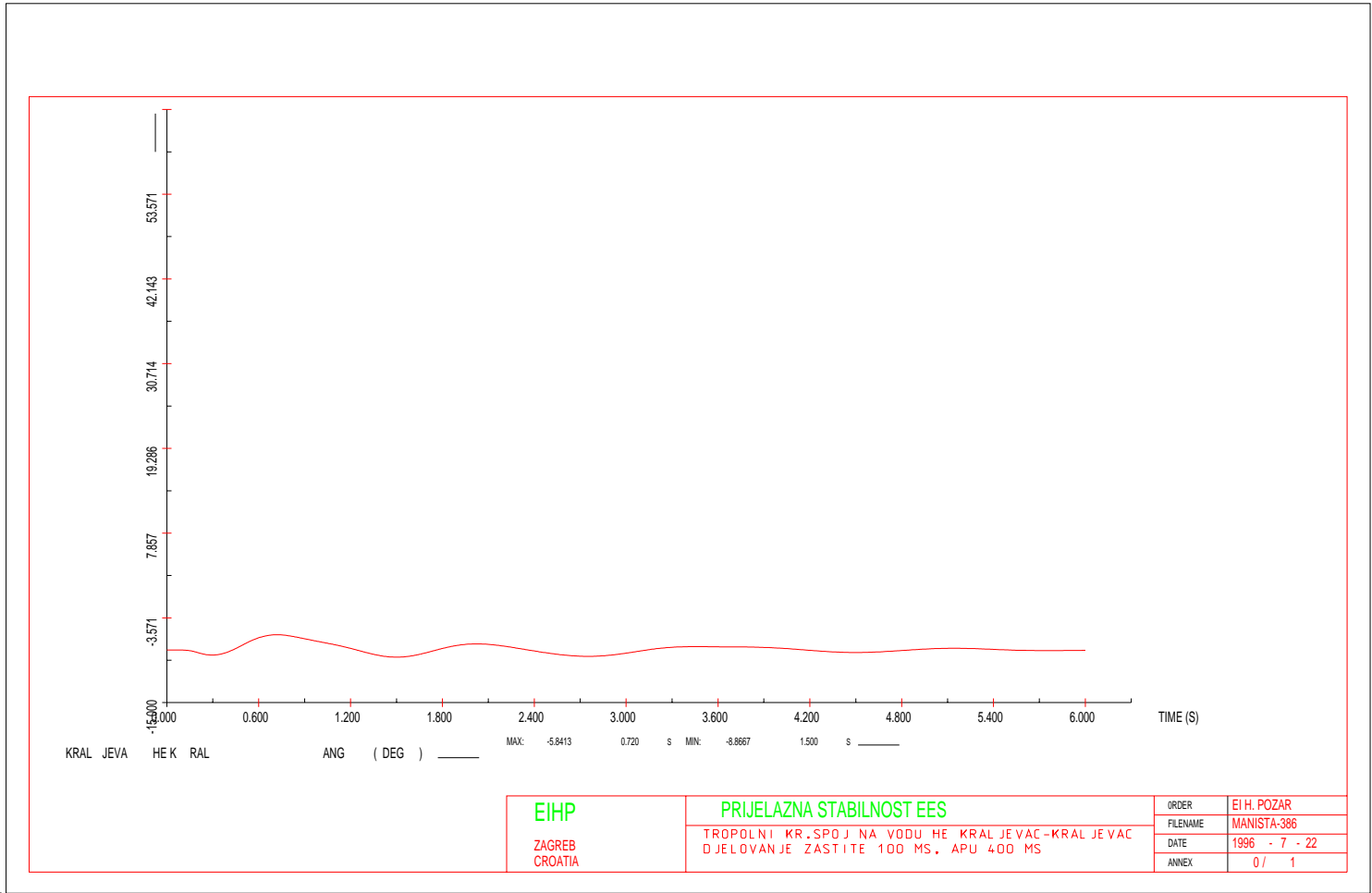
**SLIKA 4**



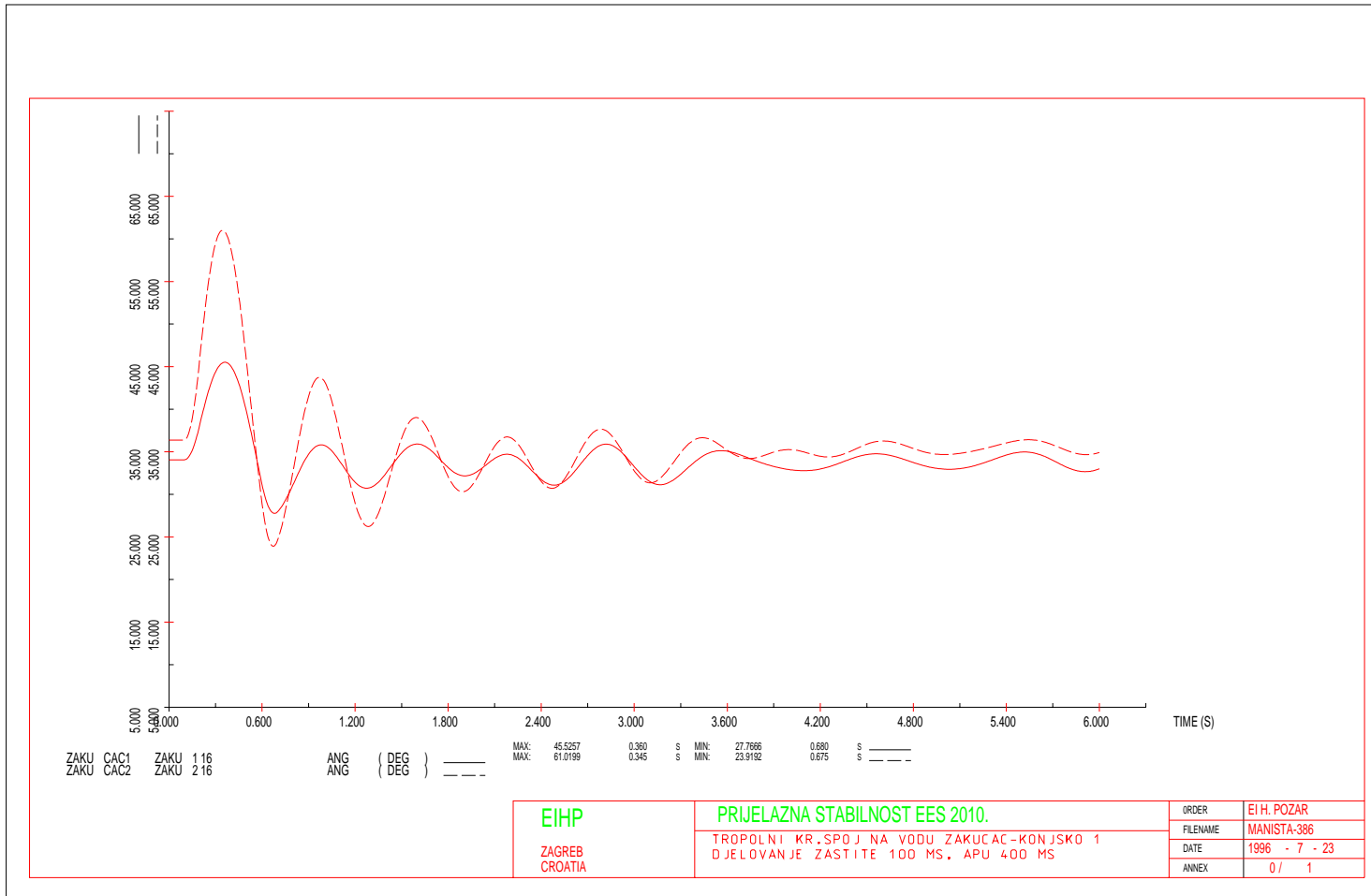
**SLIKA 5**



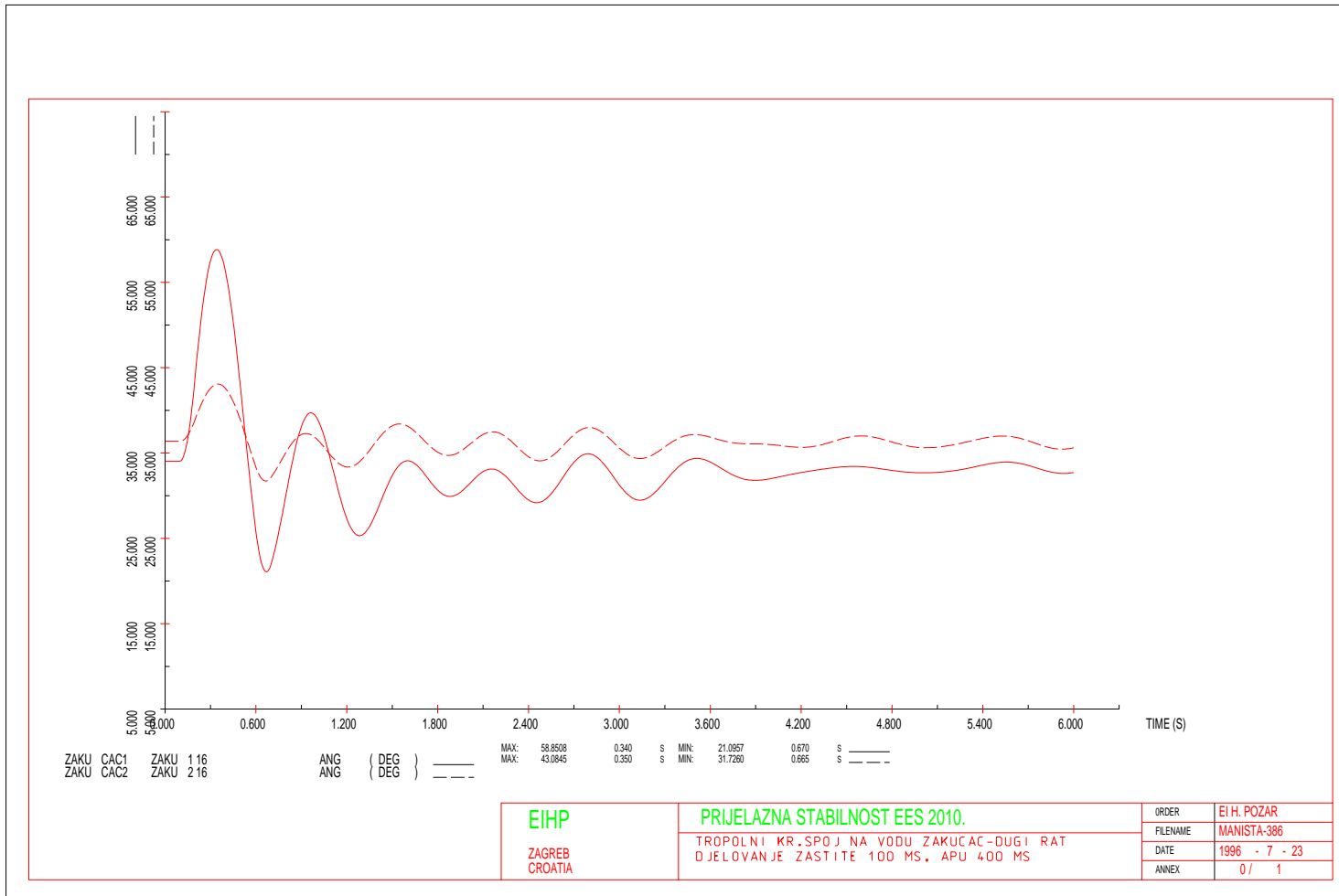
**SLIKA 6**



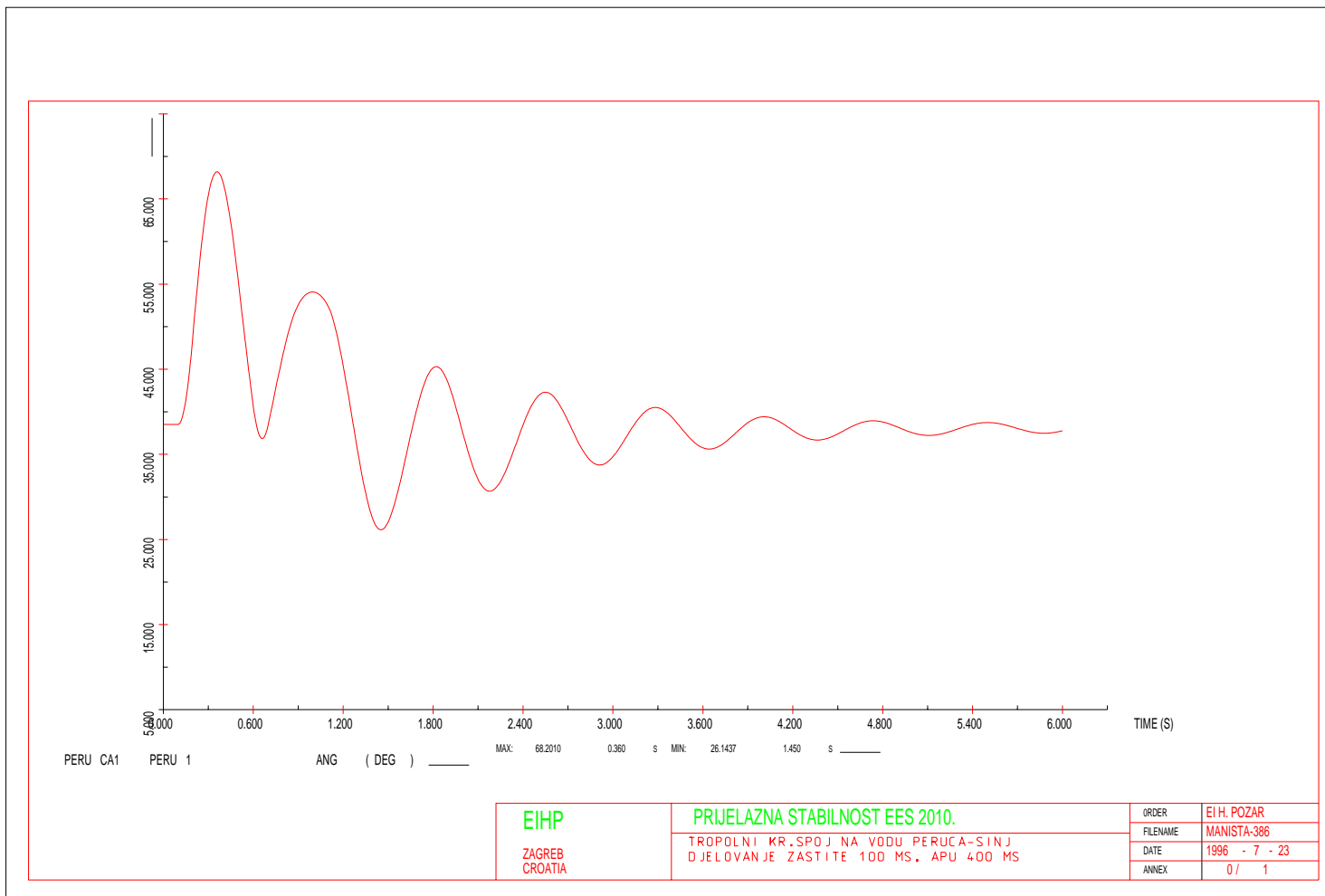
**SLIKA 7**



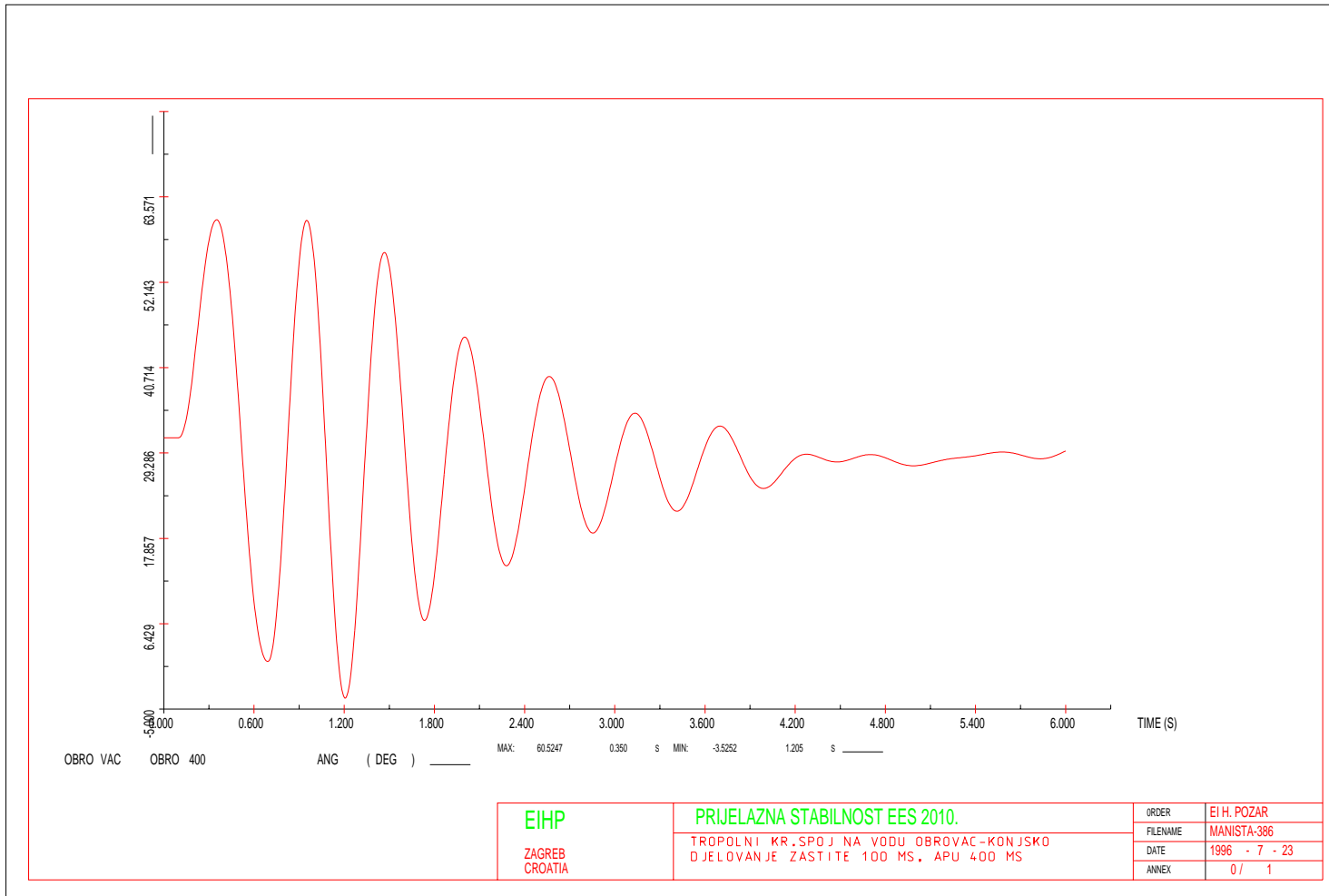
**SLIKA 8**



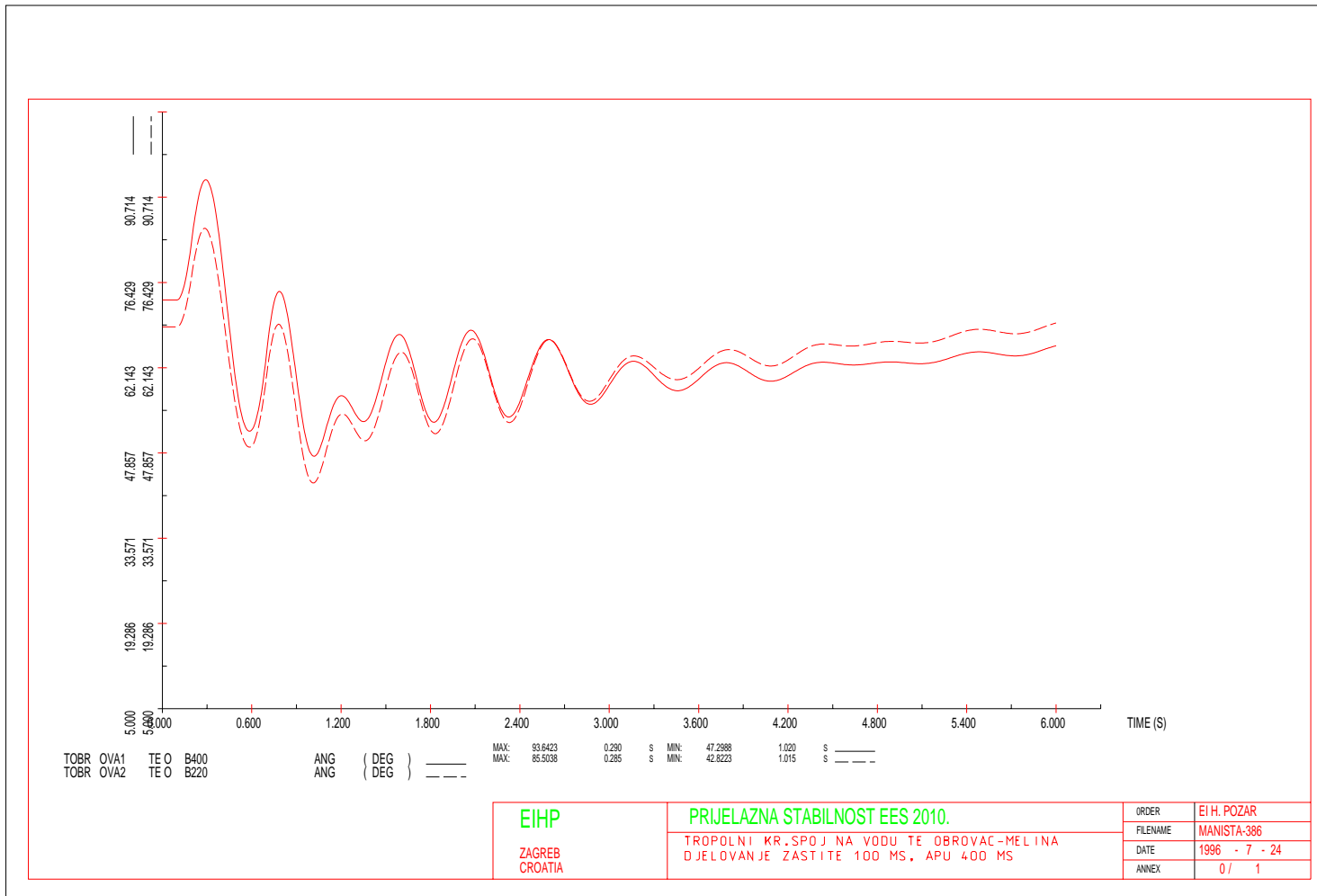
SLIKA 9



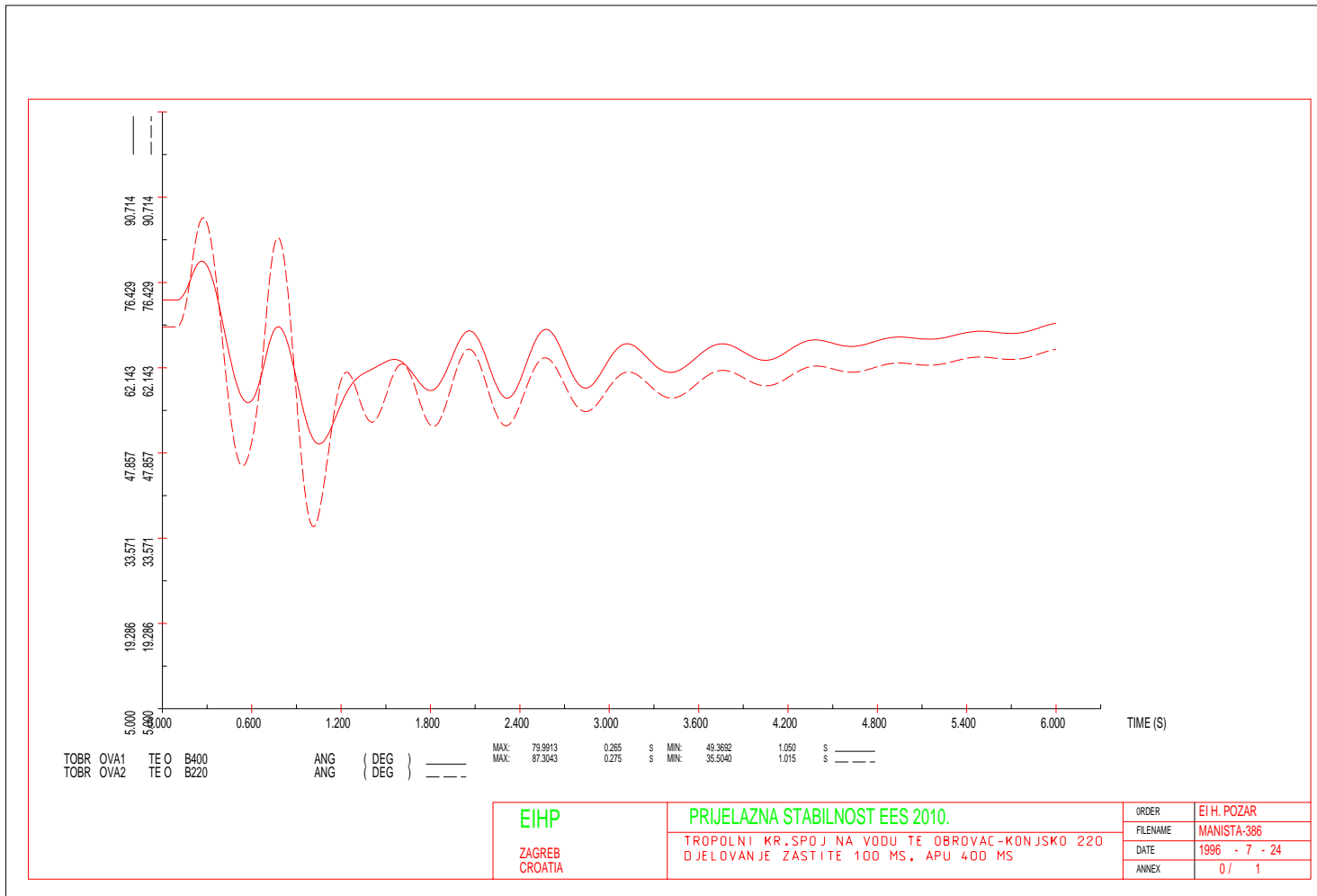
**SLIKA 10**



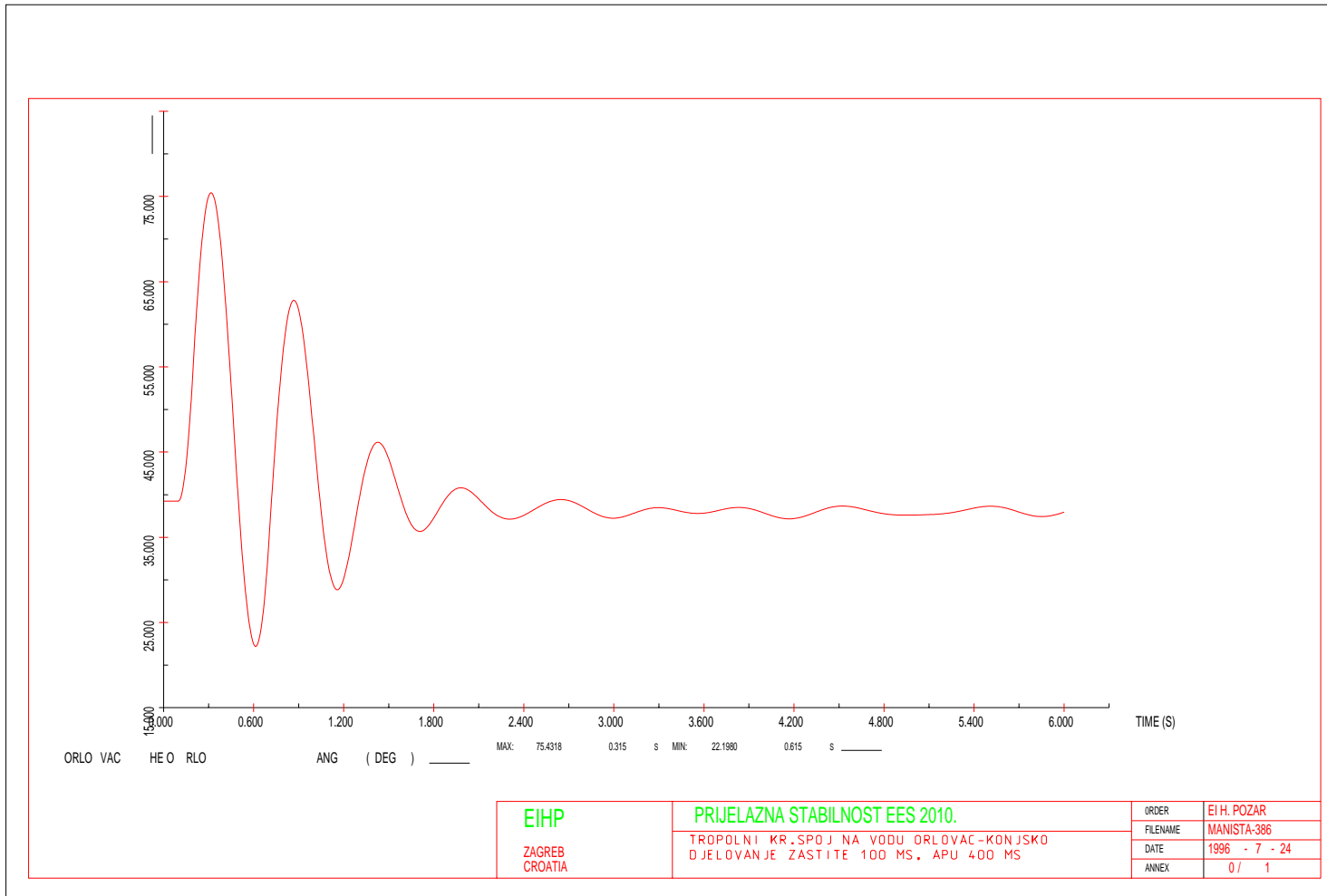
**SLIKA 11**



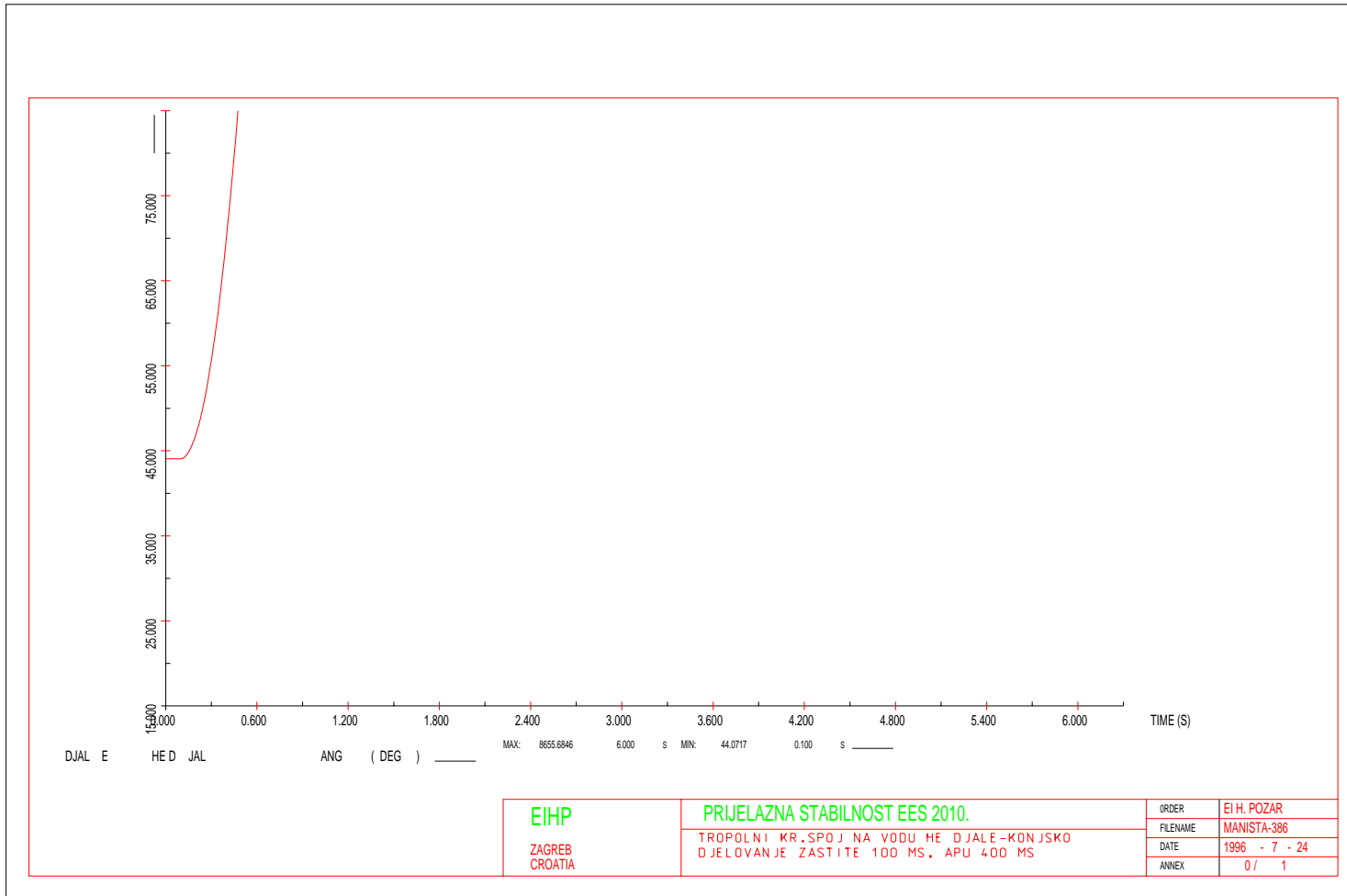
SLIKA 12



SLIKA 13

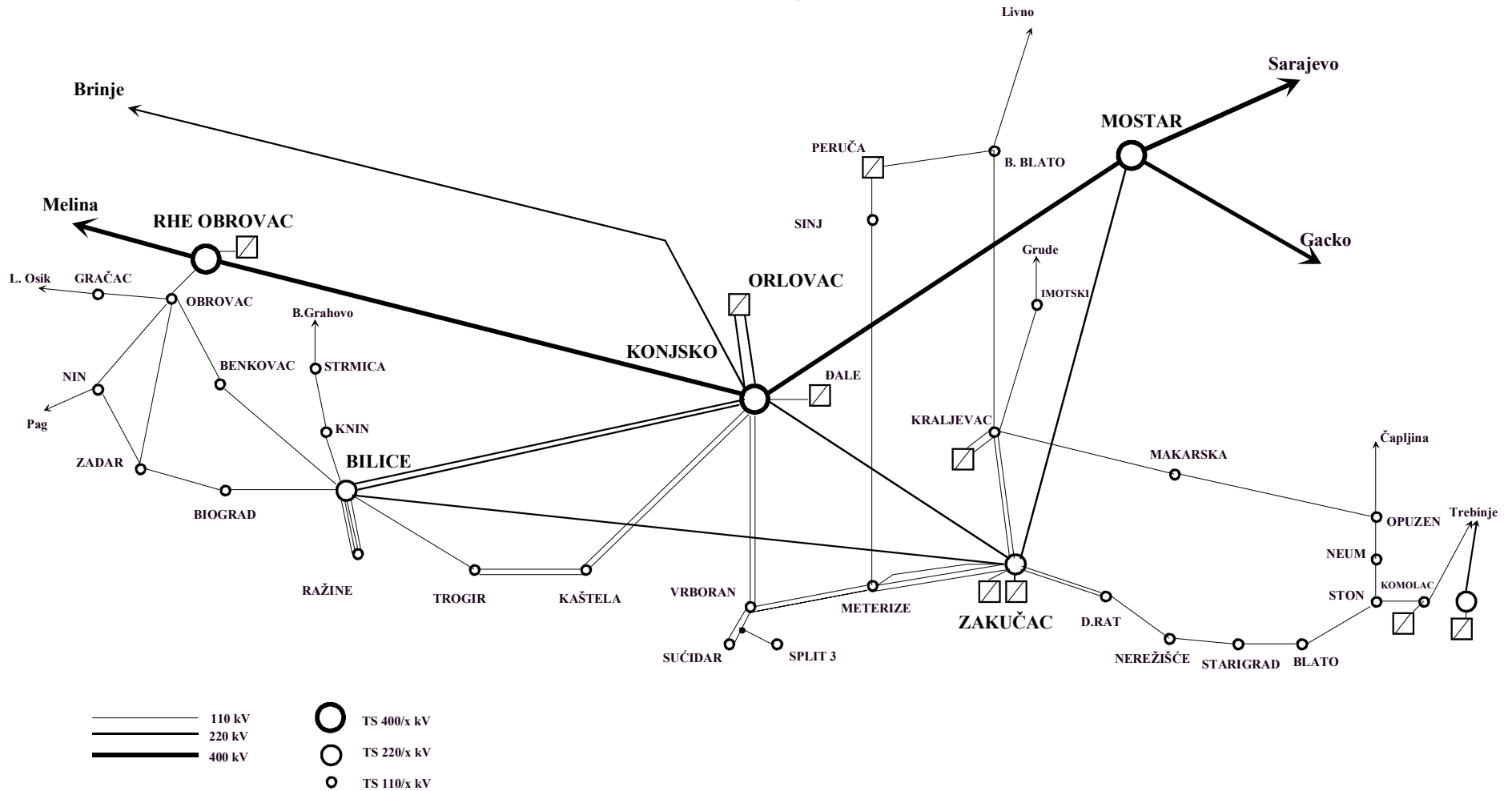


**SLIKA 14**



**SLIKA 15**

**DODATAK 1 - dio modeliranog EES-a:**  
**ELEKTROENERGETSKI SUSTAV DALMACIJE**  
*(bliža budućnost, nazivna 2000. godina)*



## DODATAK 2 - dio modeliranog EES-a:

### ELEKTROENERGETSKI SUSTAV DALMACIJE

(dalja budućnost, nazivna 2010. godina)

