

**Dr Milenko Đurić**

**MODELI ZA ANALIZU  
STABILNOSTI  
ELEKTROENERGETSKIH  
SISTEMA**

**AGM knjiga  
Beograd, 2023**

## **MODELI ZA ANALIZU STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA**

**Autor:** *Dr Milenko Đurić*

**Recenzenti:** *Dr Zoran Radojević, Elektrotehnički fakultet, Beograd*

*Dr Ivan Škokljev, Elektrotehnički fakultet, Beograd*

**Izdavač:** *AGM knjiga d.o.o. Beograd - Zemun*  
*www.agmknjiga.co.rs*  
*email: agmknjiga@gmail.com*  
*tel: + 381638470725, viber +381658470725*

**Glavni i odgovorni urednik:**

*Slavica Sarić-Ahmić*

**Korice:** *Robi Ahmić*

**Štampa:** *Donat graf, Beograd*

**Tiraž:** 200

**ISBN:** 978-86-6048-045-5

CIP - Каталогизacija у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

621.311.016.35:519.87

ЂУРИЋ, Миленко, 1948-

Modeli za analizu stabilnosti elektroenergetskih sistema / Milenko Đurić. -  
Beograd : AGM knjiga, 2023 (Beograd : Donat graf). - 115 str. : ilustr. ; 28 cm

Tiraž 200. - Bibliografija: str. 113-115.

ISBN 978-86-6048-045-5

a) Електроенергетски системи -- Стабилност -- Математички модели

COBISS.SR-ID 127133961

### **SVA PRAVA ZADRŽAVA AUTOR I IZDAVAČ.**

Nijedan deo knjige ne sme se reprodukovati, fotokopirati ili prenositi u bilo kojoj formi: elektronski, mehanički, fotografski ili na drugi način, bez prethodne pismene dozvole autora i izdavača.

## PREDGOVOR

Ova monografija obrađuje problematiku STABILNOSTI EES-a (elektroenergetskih sistema). Stabilnost elektroenergetskih sistema (skraćeno EES-a) je veoma kompleksna oblast i ne može se iscrpiti jednim delom. Na srpskom jeziku, praktično ne postoji knjiga koja celovito obrađuje stabilnost EES-a. Osim monografije Dragana Tasića i Nikole Rajakovića "Uticaj potrošnje na naponsku stabilnost elektroenergetskih sistema", praktično ne postoji ni jedna knjiga koja se bavi stabilnošću EES-a. U svetskoj literaturi postoji veći broj knjiga koje se bave ovom oblašću. Neke od njih navedene su u referencama. Namera autora nije bila da napiše delo koje bi, uz korišćenje raspoložive svetske literature, potpuno pokrilo razmatranu oblast. Osnovna ideja ove monografije je da sažme radove autora koji su već objavljeni kako u domaćim, tako i u inostranim časopisima.

U monografiji se ne startuje od elementarnih pojmova vezanih za stabilnost EES-a, već se daju matematički modeli EES-a koji mogu biti baza za razvoj programskih celina (softvera) za analizu stabilnosti složenih EES-a. Prema tome, monografija podrazumeva da čitalac već vlada osnovnim znanjima vezanim za stabilnost dinamičkih sistema pa i EES-a.

U prvom poglavlju izveden je Parkov matematički model sinhrona mašine na kome se temelje kasnije razvijeni matematički modeli složenih EES-a. Nakon toga, data je analiza parametara sinhrona mašine i način određivanja svih parametara mašine na osnovu pasoških parametara generatora.

U drugom poglavlju razvijeni su matematički modeli sinhrona mašine bez i sa regulatorom pobude i stabilizatorom EES-a. Izvedene su sve moguće varijante matematičkih modela generatora sa različitim veličinama kao promenljivog stanja. Matematički modeli generatora izvedeni su u originalnoj nelinearnoj formi a zatim su date i linearizovane varijante tih modela.

U trećem poglavlju izvedene su SPREŽNE jednačine koje povezuju matematičke modele pojedinih generatora koji rade paralelno u jedinstvenom EES-u i omogućavaju formiranje matematičkih modela složenih višemašinskih EES-a.

U četvrtom poglavlju izvedeni su matematički modeli EES-a za analizu stabilnosti pri malim poremećajima, odnosno linearizovani modeli EES-a. Izvedeno je nekoliko varijanti linearizovanih matematičkih modela EES-a. Analiza stabilnosti EES-a, pri malim poremećajima, vrši se

izračunavanjem sopstvenih vrednosti matrica stanja izvedenih modela EES-a koji sadrže i matrice stanja, ili načine njihovog određivanja.

U petom poglavlju izvedeni su nelinearni modeli složenih EES-a koji služe za analizu stabilnosti pri velikim poremećajima, ili za analizu tranzijentne stabilnosti. Izvedeni modeli pogodni su za analizu tranzijentne stabilnosti metodom INTEGRACIJE diferencijalnih jednačina, koje čine model EES-a.

U šestom poglavlju izvršena je analiza NAPONSKE stabilnosti EES-a, kao poseban segment stabilnosti EES-a. Ovaj odeljak se ne bazira, za razliku od prethodnih, na Parkovom modelu sinhrona mašine. Naponska stabilnost je analizirana pomoću NAPONSKIH KARAKTERISTIKA čvorova mreže EES-a i NAPONSKIH KARAKTERISTIKA potrošača. Drugi metod za analizu naponske stabilnosti, koji je dat u monografiji, bazira se na analizi DETERMINANTE I SOPSTVENIH VREDNOSTI JAKOBIJANA sistema nelinearnih jednačina za proračun tokova snaga i napona u stacionarnom režimu EES-u. Obe date metode polaze od stacionarnog stanja EES-a i koriste jednačine koje to stanje opisuju, za razliku od prethodnih poglavlja u kojima se analiza bazira na diferencijalnim jednačinama, koje čine modele složenih EES-a.

Ova monografija je okosnica kursa "Stabilnost elektroenergetskih sistema" na postdiplomskim studijama na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smeru "Elektroenergetski sistemi" u grupama "Elektroenergetska postrojenja" i "Elektroenergetske mreže".

U Beogradu, 2023.

Dr Milenko Đurić, red. prof.

# SADRŽAJ

<b>1</b>	<b>PARKOV MATEMATIČKI MODEL STANDARDNOG SINHRONOG GENERATORA.....</b>	<b>7</b>
	Diferencijalne jednačine sinhronog generatora u koordinatnom sistemu vezanom za stator.....	7
	Sopstvene induktivnosti namotaja sinhronne mašine.....	11
	Međusobne induktivnosti namotaja sinhronne mašine.....	12
	Transformacija rastezanja.....	14
	Diferencijalne jednačine sinhronne mašine u $(\alpha, \beta, 0)$ sistemu.....	16
	Transformacija rotacije.....	20
	Diferencijalne jednačine mašine u $(d, q, 0)$ koordinatnom sistemu.....	21
	Snaga i moment generatora u $(d, q, 0)$ koordinatnom sistemu.....	26
	Kompletan Parkov model sinhronne mašine.....	27
	Ekvivalentna šema sinhronne mašine.....	28
	Parametri sinhronog generatora.....	29
	Parametri $(g)$ sa prigušenim namotajima po $q$ -osi pri otvorenom statoru..	29
	Parametri po $d$ -osi za generator sa prigušenim namotajima.....	31
	Parametri pod-osi za generator bez prigušnih namotaja.....	34
	Određivanje nestandardnih parametara generatora za $d$ -osu.....	36
	Određivanje nestandardnih parametara generatora za $Q$ -osu.....	37
<b>2</b>	<b>MODIFIKOVANI MODEL STANDARDNE SINHRONE MAŠINE</b>	<b>38</b>
	RIAZ-ov model mašine sa elektromotornim silama.....	38
	Linearizovan RIAZ-ov model neregulisanog sinhronog generatora.....	47
	Linearizovan RIAZ-ov model regulisanog sinhronog generatora.....	47
	Model sinhronog generatora sa fluksevima.....	53
	Linearizovan model neregulisanog generatora sa fluksevima.....	54
	Linearizovan model regulisanog generatora sa fluksevima.....	55
	Model generatora sa strujama.....	57
	Uprošćen model generatora sa strujama.....	58
	Linearizovan model neregulisanog generatora sa strujama.....	60
	Linearizovan model regulisanog generatora sa strujama.....	61
<b>3</b>	<b>POVEZNE JEDNAČINE ZA GENERATORE U SLOŽENOM EES-u.....</b>	<b>63</b>
	Sprežne jednačine za nelinearne modele sinhronne mašine.....	66
	Sprežne jednačine za linearne modele sinhronne mašine.....	68
<b>4</b>	<b>MODELI VIŠEMAŠINSKIH SISTEMA ZA ANALIZU STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA PRI MALIM POREMEĆAJIMA.....</b>	<b>70</b>
	Model EES-a u kome generatori imaju konstantne pobudne napone.....	70

Model EES-a u kome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1	72
Model EES-a u kome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1 sa stabilizatorom EES-a.....	74
Modeli EES-a dobijeni korišćenjem modela generatora sa fluksevima...	75
Model EES-a u kome generatori imaju konstantne pobudne napone.....	75
Model EES-a u kome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1 sa stabilizatorom EES-a.....	77
Modeli EES-a dobijeni korišćenjem modela generatora sa strujama.....	78
Model EES-a u kome generatori imaju konstantne pobudne napone.....	78
Model EES-a u kome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1 sa stabilizatorom EES-a.....	80
<b>5 MODELI VIŠEMAŠINSKIH SISTEMA ZA ANALIZU STABILNOSTI ELEKTROENERGETSKIH SISTEMA PRI VELIKIM POREMEĆAJIMA.....</b>	<b>82</b>
Modeli EES-a zasnovanina RIAZ-ovom modelu generatora.....	82
Model EES-a u kome generatori imaju konstantne pobudne napone.....	82
Određivanje početnih uslova za započinjanje procesa numeričke integracije.....	86
Model EES-a ukome generatori imaju pobudne regulatore IEEE-tipa 1 sa stabilizatorom EES-a.....	88
Modeli EES-a zasnovani na modelu generatora sa fluksevima.....	91
Model EES-a u kome geeneratori imaju konstantne pobudne napone.....	91
Modeli EES-a zasnovani na modelu generatora sa strujama.....	94
Model EES-a u kome generatori imaju konstane pobudne napone.....	94
<b>6 NAPONSKA STABILNOST U ELEKTROENERGETSKIMSISTEMIMA.....</b>	<b>97</b>
Naponska stabilnost u svetlu naponskih karaktersitika čvorova i potrošača	97
Naponske karakteristike čvorova i potrošača u (u-z) koordinatama.....	98
Naponske karakteristike čvorova i potrošača u (u-i) koordinatama.....	100
Naponske karakteristike čvorova i potrošača u (u-s) koordinatama.....	102
Zaključak.....	104
Analiza naponske stabilnosti pomoću Jakobijana nelinearnog sistema jednačina za rešavanje tokova snaga i naponskih prilika u EES-u.....	105
Potrošač je tipa konstantne impedanse.....	107
Potrošač je tipa konstantne struje.....	109
Potrošač je tipa konstantne snage.....	110
<b>6 LITERATURA.....</b>	<b>113</b>



**IZDANJA AUTORA:**

**[www.agmknjiga.co.rs](http://www.agmknjiga.co.rs)**

*Priručnik za SN i NN postrojenja – licenca 350*

*Elektrane*

*Male hidroelektrane*

*Relejna zaštita*

*Algoritmi za digitalne relejne zaštite*

*Visokonaponska razvodna postrojenja*

*Elementi EES-a*