



**Univerzitet u Beogradu**  
**Elektrotehnički fakultet**

# **PROJEKTOVANJE POMOĆU RAČUNARA**

## **U ELEKTROENERGETICI**

**Osnovne akademske studije**

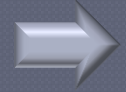
**Dr Zlatan Stojković, redovni profesor**  
**[zstojkovic@etf.rs](mailto:zstojkovic@etf.rs)**  
**<http://ees.etf.rs>**

# MODELOVANJE I SIMULACIJE POMOĆU RAČUNARA

---

# UVOD

pristup  
modelovanju



Ovo poglavlje predstavlja:

1. Definicije modelovanja i simulacija pomoću računara
2. Metode za razvoj modela
3. Principe izvršenja simulacija i ograničenja
4. Primer modelovanja i simulacija pomoću računara

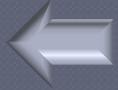
Model je sistem pretpostavki, podataka i zaključivanja. To je matematički sistem jednačina i logičkih pravila ili program za rešavanje tog sistema.

Modelovanje je proces formiranja modela.

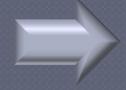
Simulacija je izvršenje modela i formiranje rezultata.

# KATEGORIJE PRISTUPA MODELOVANJU

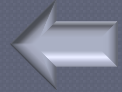
uvod



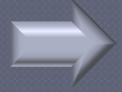
faze  
razvoja



KATEGORIJA	SUPROTNA KATEGORIJA
Deterministički	Stohastički
Kontinualni	Diskretni
Dinamički	Statički
Vremenski promenljiv	Stacionaran
Linearan	Nelinearan
Sistem u realnom vremenu	Paketna obrada podataka

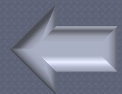


# FAZE RAZVOJA

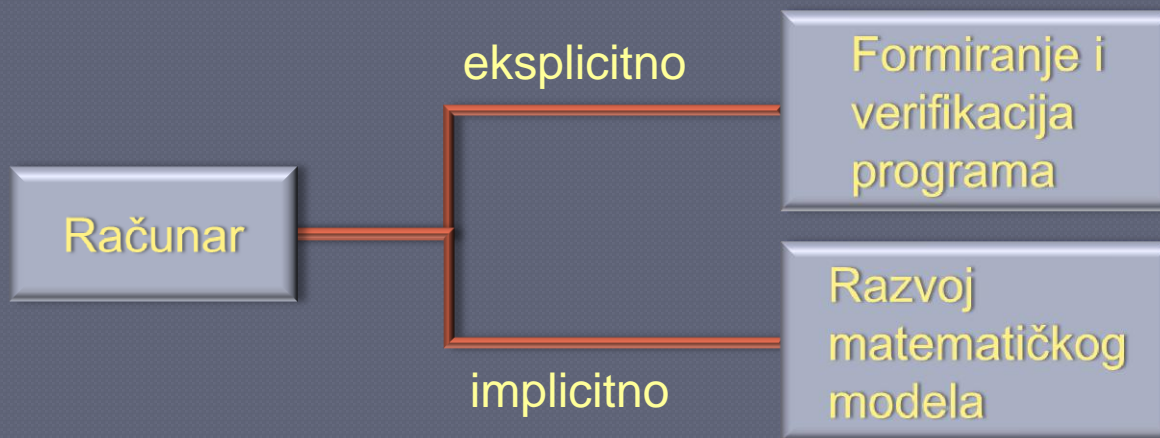
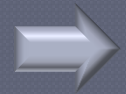


Razvoj računarskih modela i simulacija se vrši u nekoliko koraka:

1. Prelazak sa realnog sistema na matematičku prezentaciju
2. Formiranje matematičkog modela u pisanoj formi
3. Nalaženje odgovarajućih metoda za rešavanje modela
4. Formiranje programa
5. Verifikacija programa



## MODELOVANJU I SIMULACIJAMA

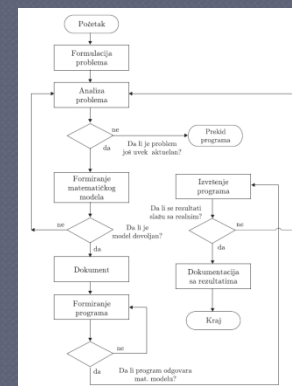


Modeli i način programiranja formirani od različitih autora se uvek razlikuju. N različitih osoba će formirati N različitih modela.

# METODOLOGIJA MODELOVANJA I SIMULACIJA

Metodologija modelovanja i simulacija se sastoji od sledećih koraka:

1. Formulacija problema
2. Analiza problema
3. Formiranje matematičkog modela
4. Izbor računarskih metoda
5. Formiranje programa
6. Verifikacija apovezanosti modela i programa
7. Validnost modela i programa



# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA

Matematički model sadrži brojne prednosti u odnosu na ostale modele.  
Ovakav model omočućava:

1. Jasno definisanje promenljivih
2. Eksplicitno izražavanje pretpostavki
3. Određivanje izlaznih promenljivih na osnovu kompleksnosti  
relacija modela



# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA

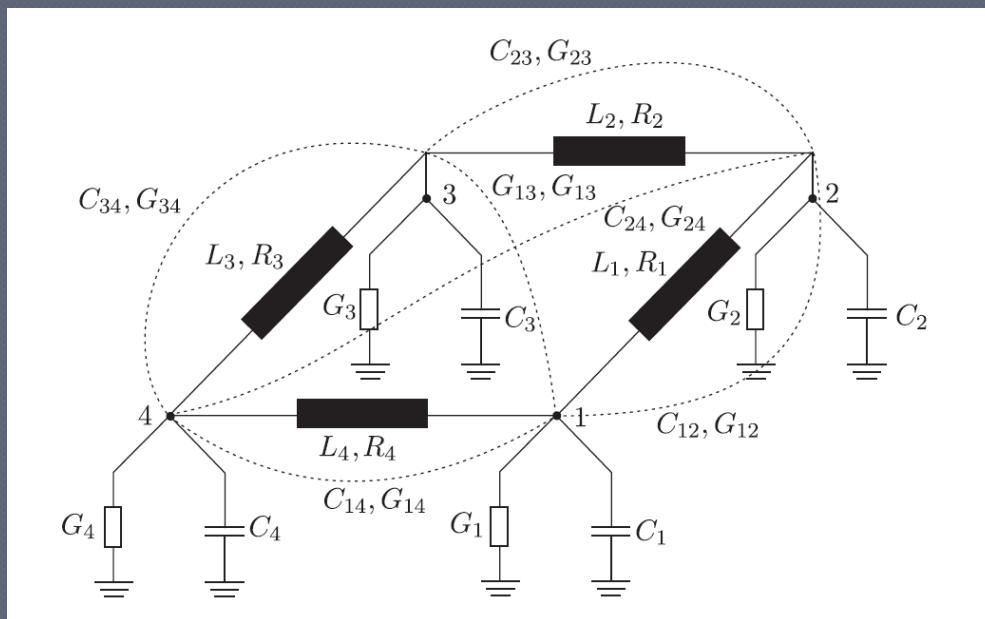
Primer – modelovanje udarnih karakteristika uzemljivača:

1. Ponašanje uzemljivača prilikom odvođenja struje groma
2. Injektiranje udarne struje – vremenski promenljivi naponi i struje
3. Proračun udarnih karakteristika uzemljivača – konstruktivni parametri uzemljivača, električne karakteristike tla, oblik amplituda i mesto injektiranja strujnog talasa

# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA

Parametri uzemljivača:

1. Frekvencijski nezavisni
  2. Frekvencijski zavisni
- } Jednoslojno i dvoslojno tlo



- Otpornost
- Provodnost
- Kapacitivnost
- Induktivnost

# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA

Prva faza u formiranju jednačina stanja – formiranje normalnog stabla.

Normalno stablo sadrži maksimalan broj kapacitivnih grana i minimalan broj induktivnih grana.

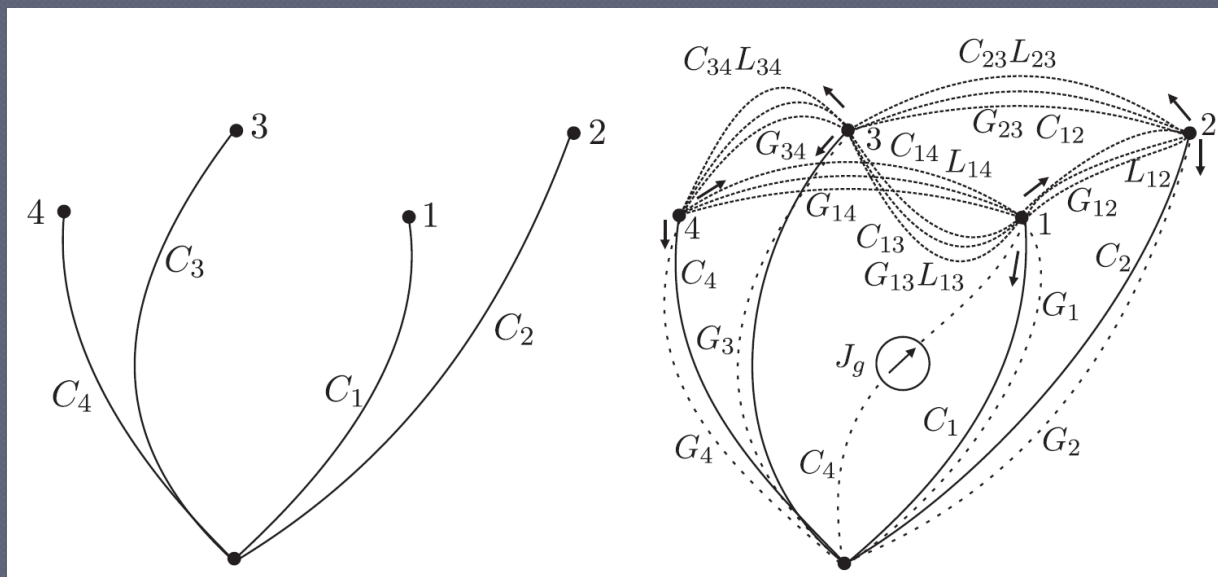
Cilj – da u jednačinama stanja figuriraju samo naponi na kondenzatorima koji pripadaju stablu i struje kroz kalemове koji pripadaju ko-stablu. Tako se postiže minimalan broj jednačina stanja.

$$T = T_C \cup T_{\bar{C},G} \cup T_{\bar{C},\bar{G},R} \cup T_{\bar{C},\bar{G},\bar{R},L}$$

# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA

Grane normalnog stabla označene su punom linijom, a grane komplementa normalnog stabla isprekidanom linijom.

Orijentacija grafa je izvršena proizvoljno, grane normalnog stabla su orijentisane ka referentnom čvoru.



FORMIRANJE  
MATEMATIČKOG MODELA

Normalizovani sistem diferencijalnih jednačina za uzemljivač u udarnom periodu glasi:

$$\begin{bmatrix} \frac{du_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left( \begin{bmatrix} G & K \\ -K^t & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_C \\ e_L \end{bmatrix} \right)$$

C, G

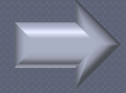
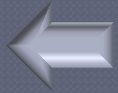
L

R

K

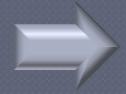
 $I_C$  $e_L$ *početni  
uslovi*

# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA



Generalni principi dobrog modelovanja:

1. Modelovanje započeti onim što je poznato
2. Složene modele razvijati modularno
3. Koristiti iterativni postupak
4. Modelovati samo potrebne elemente
5. Formirati pretpostavke
6. Navesti ograničenja
7. Formirati ekvivalente pogodne za inženjersku praksu



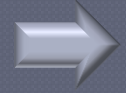
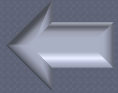
# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA

Modelovati samo potrebne elemente (veliki broj detalja, predugo vreme simulacije).

Uključivanje potrebnih i eliminisanje nepotrebnih elemenata:

1. Jednostavne relacije koje relativno tačno prezentuju sistem
2. Neposredna veza sa nalaženjem efikasne i robustne tehnike rešavanja
3. Koji su parametri obuhvaćeni i kako
4. Koji parametri dominantno utiču na rezultat (analiza osetljivosti)

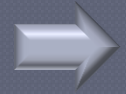
# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA



Formirati pretpostavke.

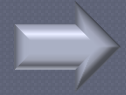
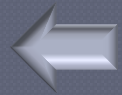
Ponašanje realnih sistema je u određenim segmentima obično teško predvidivo, pa je pri formiranju modela neophodno izvesti određene pretpostavke.

*Primer*





# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA

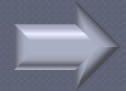


Navesti ograničenja.

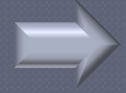
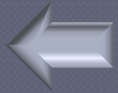
Neophodno je dati odgovore na sledeća pitanja:

1. Pod kojim uslovima prikazan matematički model važi, odnosno gde je granica primenljivosti modela?
2. Kolika je greška u proračunu u slučaju korišćenja modela izvan granica primenljivosti?

*Primer*



# FORMIRANJE MATEMATIČKOG MODELA

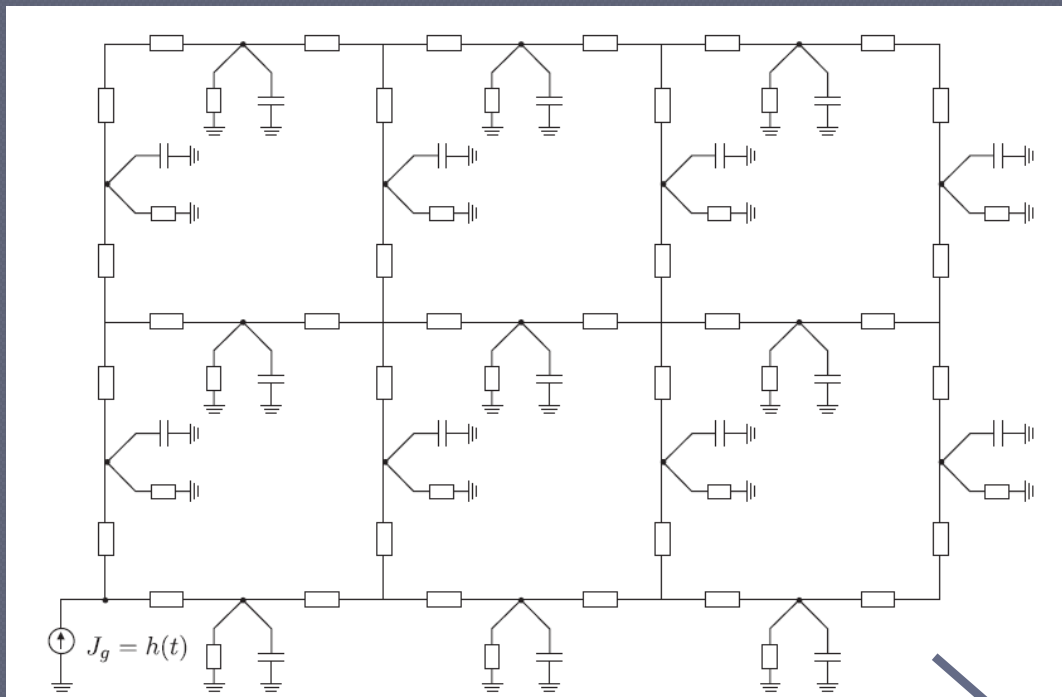


Formirati ekvivalente pogodne za inženjersku praksu.

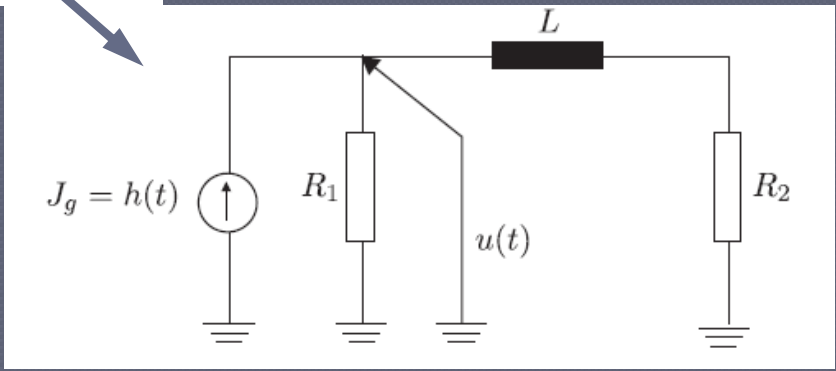
Složena ekvivalentna šema uzemljivača se može svesti na šemu sa samo tri parametra.



Parametri  $R_1$ ,  $R_2$  i  $L$  su funkcije parametara realnog uzemljivača i određuju se na osnovu jednakosti naponskih odziva usled jediničnog strujnog talasa u obliku odskočne funkcije.



$R_1, R_2, L$





# IZBOR RAČUNARSKIH METODA

Zahtevi za računarskim metodima u zavisnosti od oblasti elektroenergetike:

	Elektroenergetski sistemi		Elektromehanički pretvarači
	(Stacionarni procesi)	(Dinamički procesi)	(Dinamički procesi)
1.1 Sistemi linearnih algebarskih jednačina	x	x	
1.2 Sopstvene vrednosti i sopstveni vektori		x	x
1.3 Sistemi nelinearnih algebarskih jednačina	x	x	
2.1 Sistemi linearnih diferencijalnih jednačina		x	x
2.2 Numeričko rešavanje sistema diferencijalnih jednačina		x	x
2.3 Stabilnost sistema diferencijalnih jednačina		x	x

