

## Projektovanje elektronskih kola

### Sadržaj:

1. Uvod - osnovni pojmovi
2. Stilovi projektovanja i izrade prototipova
3. Projektovanje analognih kola
4. Osnove fizičkog projektovanja (projektovanje štampanih ploča)
5. Projektovanje digitalnih kola (vežbe)

LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>



21.03.2019.

Analiza kola

## Analiza kola

### Tipovi analize?

Zavisno od **vrste pobude**, ima smisla analizirati ponašanje kola u

1. jednosmernom domenu (određivanje položaja jednosmerne radne tačke kola).
2. frekvencijskom domenu (frekvencijska karakteristika kola – amplitudska, fazna)
3. vremenskom domenu (talasni oblik napona/struja na izlazu kola pobuđenog impulsima poznatog talasnog oblika)

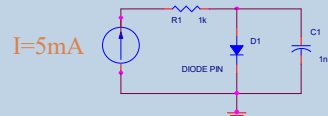
21.03.2019.

2

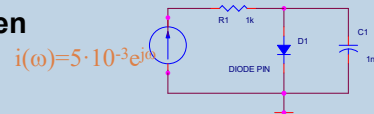
Analiza kola

## Tipovi analize kola

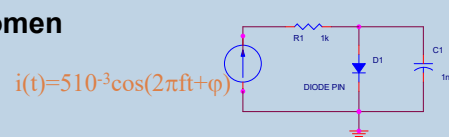
1. Jednosmerni domen (DC analiza)



2. Frekvencijski domen (AC analiza)



3. Vremenski domen (TR analiza)



21.03.2019.

Analiza kola

## Analiza kola

### Tipovi analize?

Zavisno od **vrste elemenata od kojih se kolo sastoji**, različiti tip problema i metoda za analizu

1. Linearna otporna kola (R, linearni generatori, nezavisni i kontrolisani)
2. Linearna reaktivna kola (R, L, C, m, ..)
3. Nelinearna otporna (poluprovodničke komponente, R, ..)
4. Nelinearna reaktivna (poluprovodničke komponente, R, L, C,..)

21.03.2019.

## Tipovi elektronskih kola

1. Linearna otporna R
2. Linearna reaktivna L, C, m, ..
3. Nelinearna otporna dioda, tranzistor, R, ..
4. Nelinearna reaktivna dioda, tranzistor, R, ..

## Tipovi analize kola

1. **Jednosmerni domen (DC analiza)**
2. **Frekvencijski domen (AC analiza)**
3. **Vremenski domen (TR analiza)**

21.03.2019.

## Analiza elektronskih kola

1. Uvod
2. Analiza linearnih kola u DC domenu (jednosmerni režim) elektronskih kola
3. Analiza linearnih kola u AC domenu (frekvencijski domen)
4. Analiza linearnih kola u TR domenu (vremenski domen)
5. Analiza nelinearnih kola u DC domenu
6. Analiza nelinearnih kola u TR domenu

21.03.2019.

6

## Analiza elektronskih kola

1. Uvod
2. Analiza linearnih kola u DC domenu (jednosmerni režim)
3. Analiza linearnih kola u AC domenu (frekvencijski domen)
4. Analiza linearnih kola u TR domenu (vremenski domen)
5. Analiza nelinearnih kola u DC domenu
6. Analiza nelinearnih kola u TR domenu

21.03.2019.

7

**Matematički model**

1. i 2. Linearne jednačine (realne i kompleksne)
3. Linearne diferencijalne jednačine
4. **Nelinearne algebarske jednačine**
5. Nelinearne diferencijalne jednačine

21.03.2019.

**Način rešavanja sistema j-na**

1. i 2. LU faktorizacija (Gauss)
3. Numeričko integraljenje - diskretizacija - svođenje na linearne algebarske (Euler)
4. **Linearizacija - iterativno svođenje na linearne algebarske (Newton-Kantorovič)**
5. Diskretizacija - svođenje na nelinearne algebarske i linearizacija - iterativno svođenje na linearne algebarske

Analiza kola

$$\frac{V_1 - V_2}{R_1} = I$$

$$\frac{V_2 - V_1}{R_1} + i_d(V_2) + \frac{V_2}{R_2} = 0$$

$$i_d(V_2) = I_s(e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1)$$

**Opšti slučaj linearizacije nelinearnog elementa**

$$y = f(x)$$

$$y \cong f(x^m) + \frac{df}{dx} \Big|_{x=x^m} (x - x^m) + \frac{1}{2} \frac{d^2f}{dx^2} \Big|_{x=x^m} (x - x^m)^2 + \dots$$

$$y^{m+1} \approx y^m + \frac{df}{dx} \Big|_{x=x^m} (x^{m+1} - x^m)$$

21.03.2019. 9

Model diode

**VAŽNO model za male signale**

$$r_d \approx \frac{V_T}{I_D}$$

**Otpornost zavisi od položaja mirne radne tačke!**

**Postoji zavisnost između jednosmerne struje i dinamičke otpornosti.**

**Veća struja – manja otpornost**

21.03.2019. Modeli poluprovodničkih komponenta [dalje](#)

Model diode

**VAŽNO model za male signale**

$$r_d \approx \frac{V_T}{I_D}$$

**Otpornost zavisi od položaja mirne radne tačke!**

**Postoji zavisnost između jednosmerne struje i dinamičke otpornosti.**

**Manja struja – veća otpornost**

21.03.2019. Modeli poluprovodničkih komponenta [dalje](#)

Model diode

**VAŽNO model za male signale**

$$r_d \approx \frac{V_T}{I_D}$$

**Otpornost zavisi od položaja mirne radne tačke!**

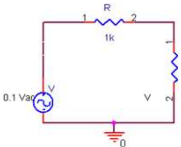
**Postoji zavisnost između jednosmerne struje i dinamičke otpornosti.**

**Manja struja – veća otpornost**

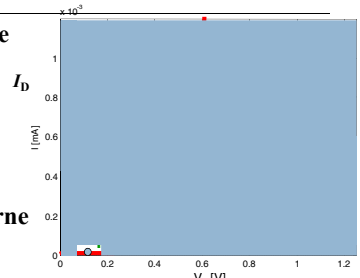
21.03.2019. Modeli poluprovodničkih komponenta [dalje](#)

**Model diode**

**VAŽNO model za male signale**



$r_d \approx \frac{V_T}{I_D}$



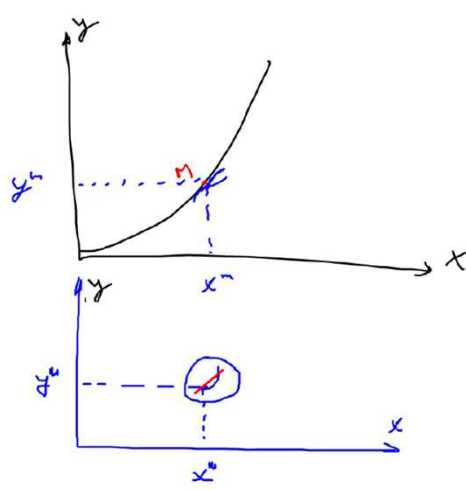
**Otpornost zavisi od položaja mirne radne tačke!**

**Postoji zavisnost između jednosmerne struje i dinamičke otpornosti.**

**Manja struja – veća otpornost**

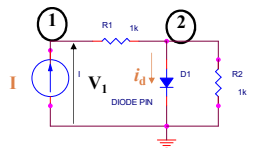
21.03.2019. Modeli poluprovodničkih komponenta [dalje](#)

Analiza kola



21.03.2019. 14

Analiza kola



$\frac{V_1 - V_2}{R_1} = I$

$I = i_d(V_2) + \frac{V_2}{R_2}$

**Linearizacija diode**

$i_d = I_s (e^{\frac{V_2}{V_T}} - 1) = f(V_2)$

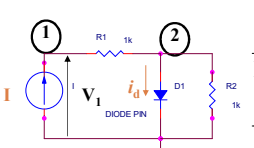
$i_d^{m+1} = I_s (e^{\frac{V_2^{m+1}}{V_T}} - 1) \approx I_s (e^{\frac{V_2^m}{V_T}} - 1) + \frac{df}{dV_2} \Big|_{V_2=V_2^m} (V_2^{m+1} - V_2^m)$

$= I_s (e^{\frac{V_2^m}{V_T}} - 1) + \frac{I_s}{V_T} e^{\frac{V_2^m}{V_T}} (V_2^{m+1} - V_2^m)$

$= i_d^m + G_d^m (V_2^{m+1} - V_2^m)$

21.03.2019. 15

Analiza kola



$\frac{1}{R_1} V_1^{m+1} - \frac{1}{R_1} V_2^{m+1} = I$

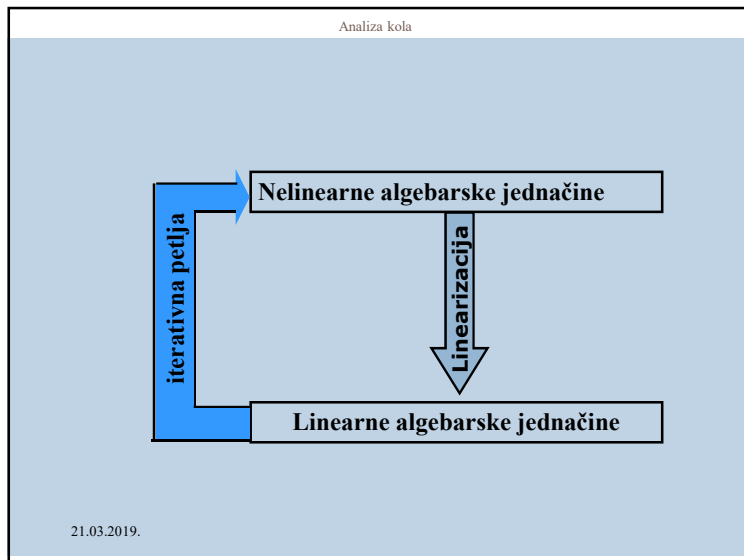
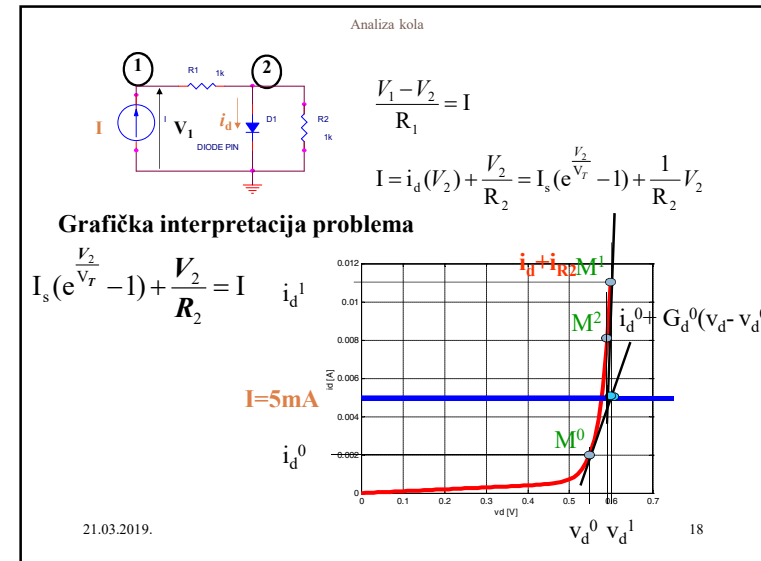
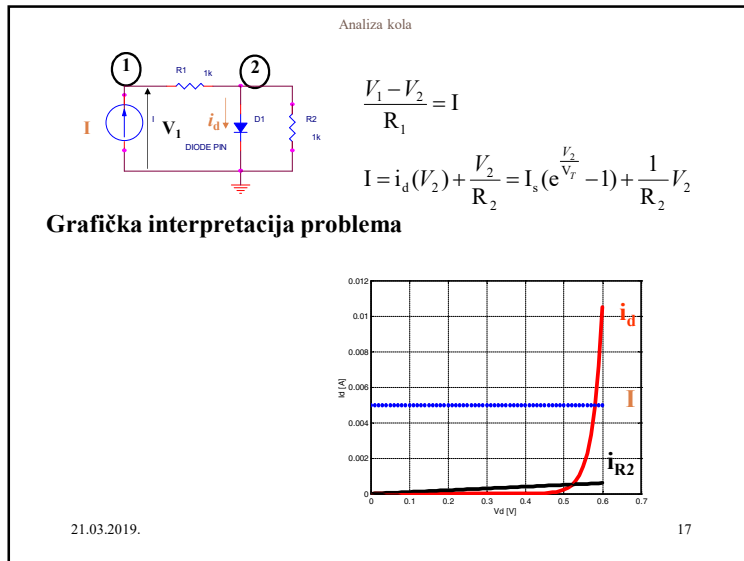
$-\frac{1}{R_1} V_1^{m+1} + \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + G_d^m \right) V_2^{m+1} = -i_d^m + G_d^m V_2^m$

**Sistem linearnih jednačina**

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + G_d^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{m+1} \\ V_2^{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ -i_d^m + G_d^m V_2^m \end{bmatrix}$$

$\tilde{\mathbf{G}}^m \cdot \underline{\mathbf{v}}^{m+1} = \underline{\mathbf{i}}^m$

21.03.2019. 16



Analiza kola

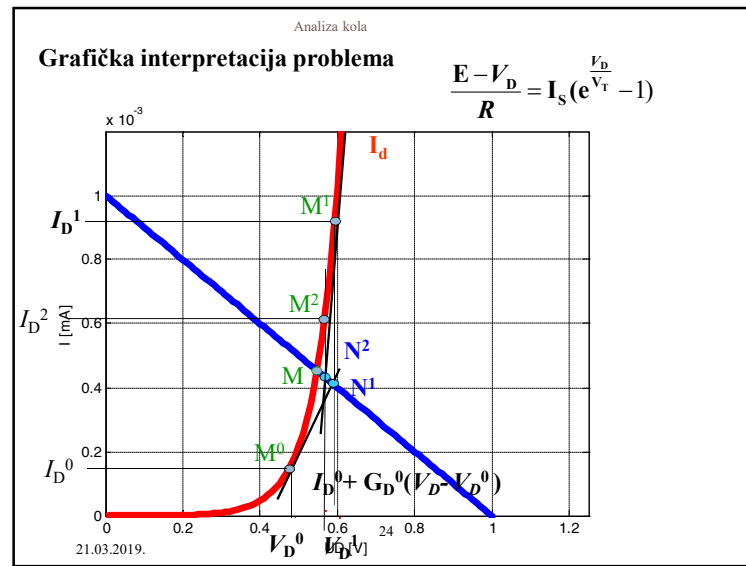
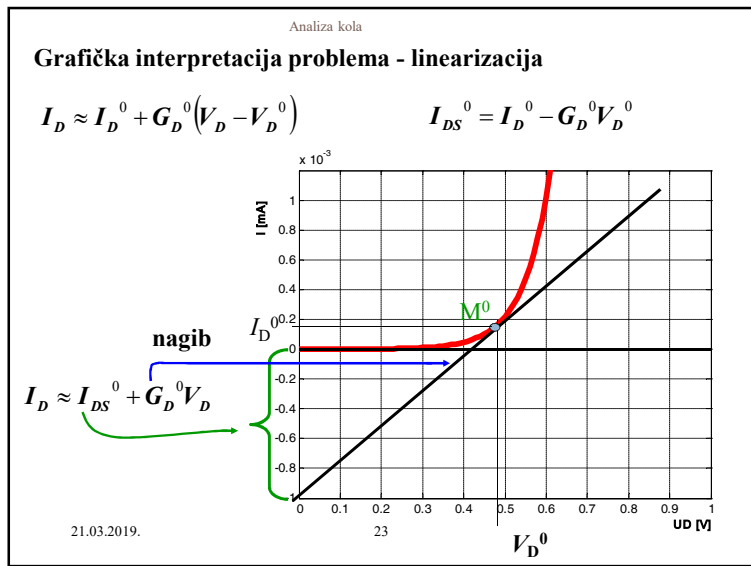
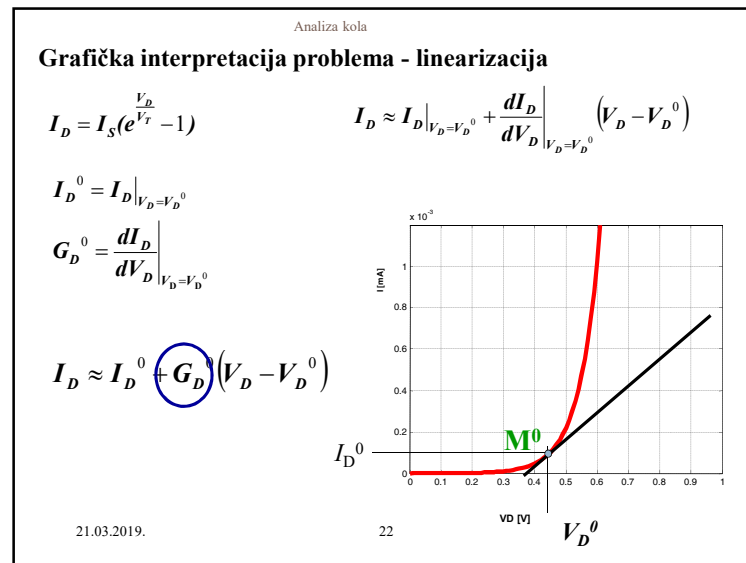
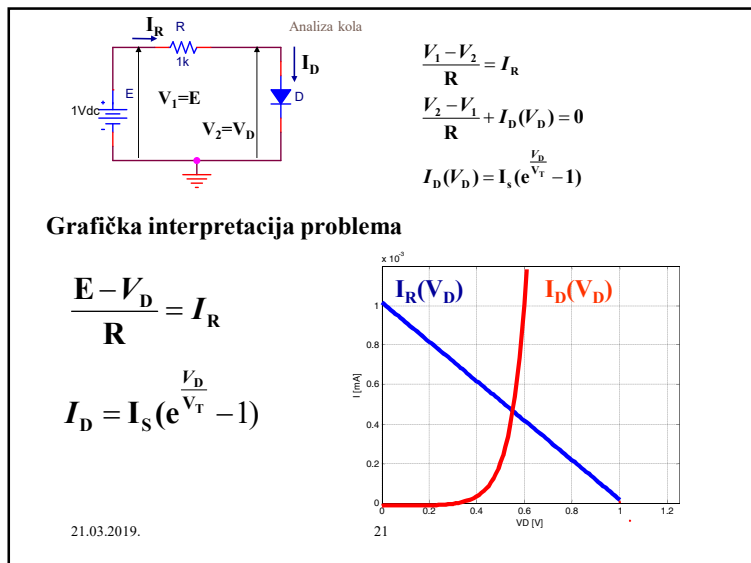
**Linearizacija nelinearne karakteristike (tangentom) u radnoj tački.**

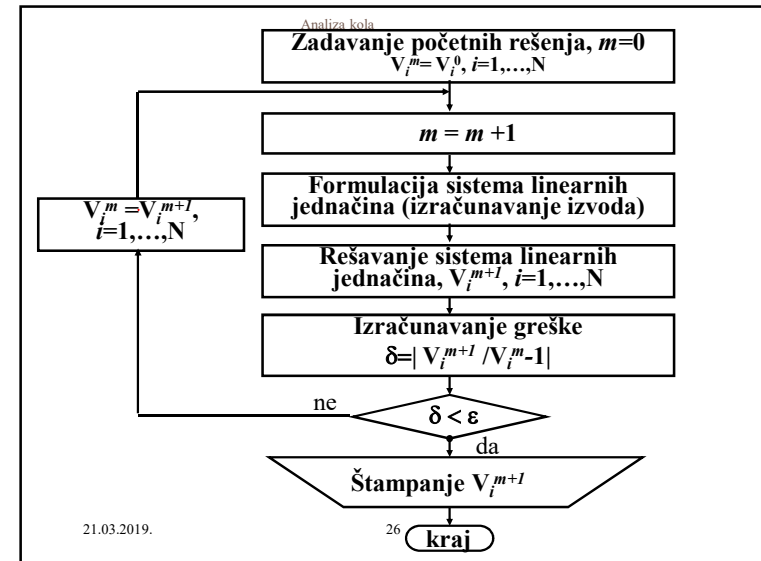
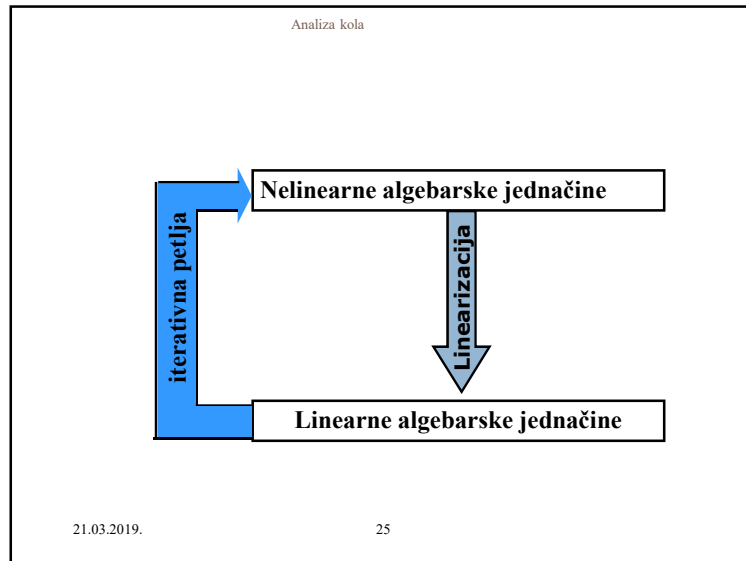
**Iterativno se približava tačnom rešenju do unapred definisane tačnosti.**

**Potrebno je definisati početno rešenje u nultoj iteraciji.**

**Rešenje se nađe u desetak iteracija – toliko puta treba formirati i rešiti sistem linearnih algebarskih jednačina.**

21.03.2019. 20





Analiza kola

Linearizacija nelinearne karakteristike tangentom u radnoj tački.

**Iterativno se približava tačnom rešenju do unapred definisane tačnosti.**

Potrebno je definisati početno rešenje u nultoj iteraciji.

Rešenje se nađe u desetak iteracija – toliko puta treba formirati i rešiti sistem linearnih algebarskih jednačina.

21.03.2019. 27

Analiza kola

**Kako znamo da smo se približili tačnom rešenju?**

Posmatra se razlika između prethodnog i tekućeg rešenja i definiše se norma za relativnu grešku:

$$\delta = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (v_i^{m+1} / v_i^m - 1)^2}$$

i apsolutnu grešku

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N (v_i^{m+1} - v_i^m)^2}$$






21.03.2019. 28

U programu *Spice* relativna greška,  $\varepsilon$ , definisana je parametrom **RELTOL**.

Podrazumevana vrednost je **RELTOL=0.001**

U naredbi **.OPTIONS**, vrednost parametra **RELTOL** može da se promeni.

Ukoliko se **RELTOL** poveća, broj iteracija, a time i vreme analize se smanjuje, ali je smanjena i tačnost.

**RELTOL**   Broj iteracija   
 Vreme analize   
 Tačnost 

21.03.2019.

29

Ukoliko se tačno rešenje nalazi u blizini nule, sa približavanjem tačnom rešenju, raste relativna greška.

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{V_i^{m+1}}{V_i^m} - 1 \right)^2}$$

Zato je u kriterijumu izlaska iz iterativne petlje potrebno da se prati i apsolutna greška.

21.03.2019.

30

U programu *Spice*, apsolutne greške definisane su za struju parametrom **ABSTOL=1pA**  
 za napon parametrom **VNTOL=1μV**  
 za naelektrisanje **CHGTOL=0.01pC**

U naredbi **.OPTIONS**, vrednosti parametara mogu da se promene.

Podrazumevane vrednosti važe kada se očekuju rešenja u kojima su

naponi reda veličine volta 1V-10V

struje reda veličine mA

Linearizacija nelinearne karakteristike tangentom u radnoj tački.

Iterativno se približava tačnom rešenju do unapred definisane tačnosti.

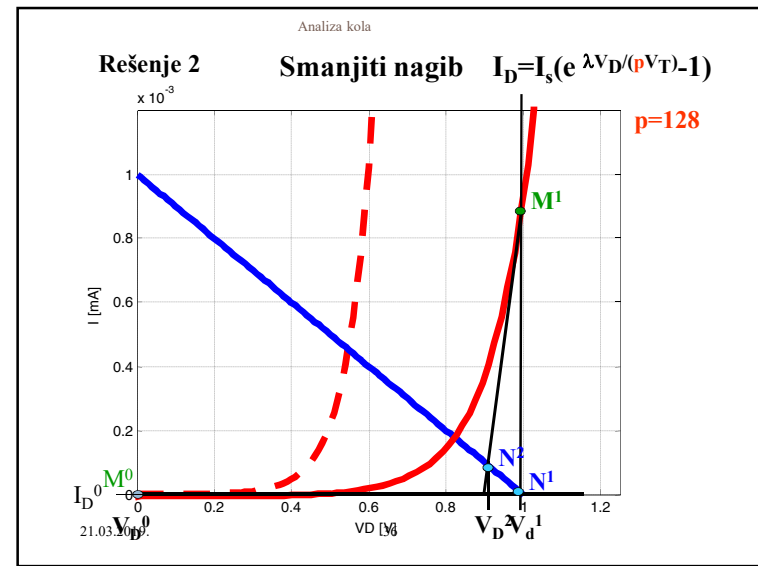
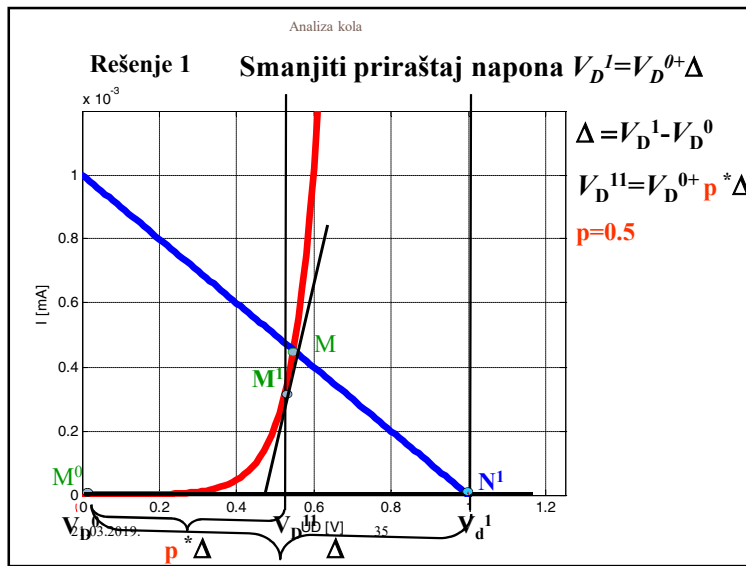
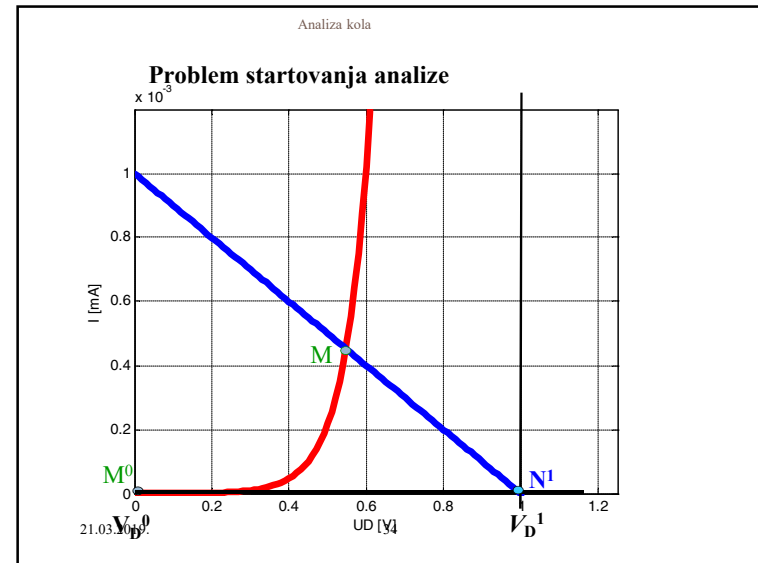
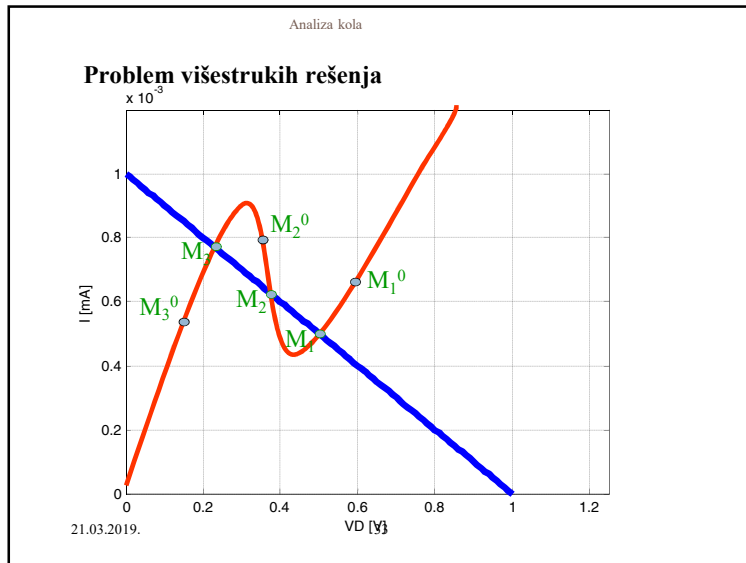
Potrebno je definisati početno rešenje u nultoj iteraciji.

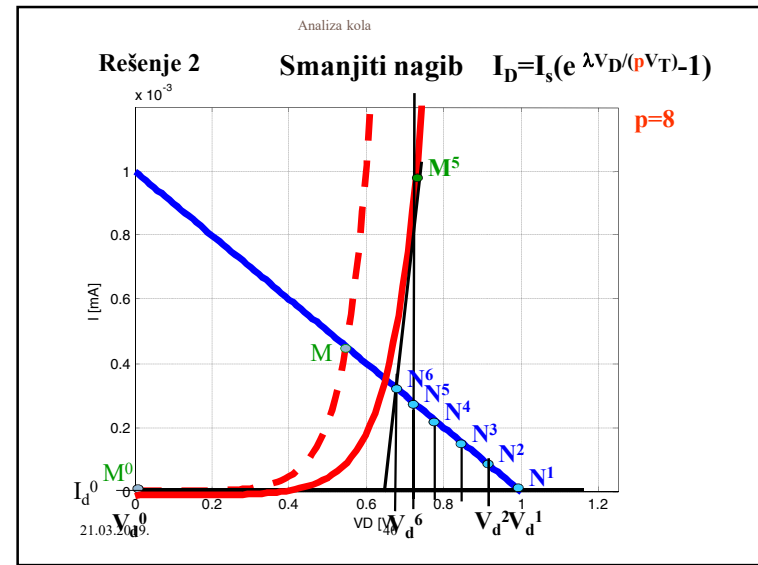
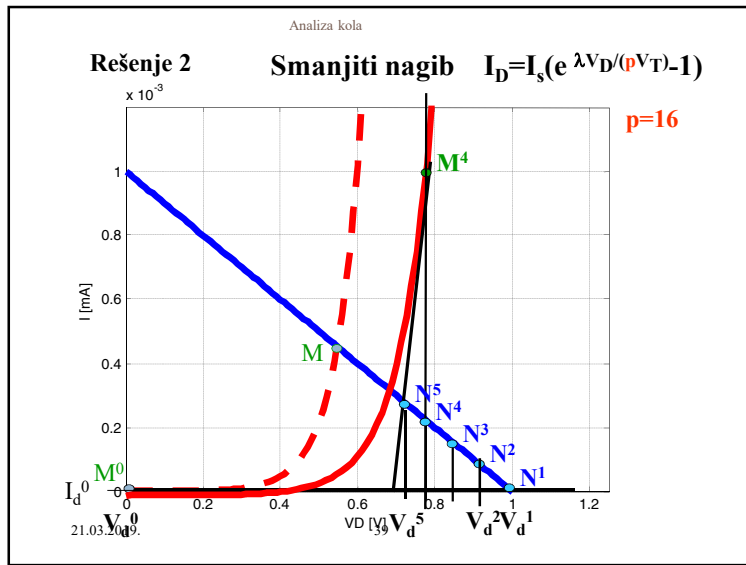
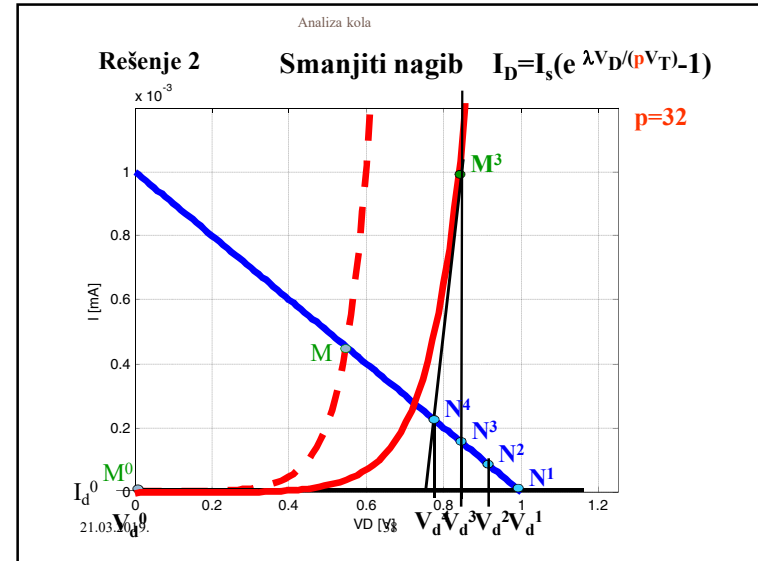
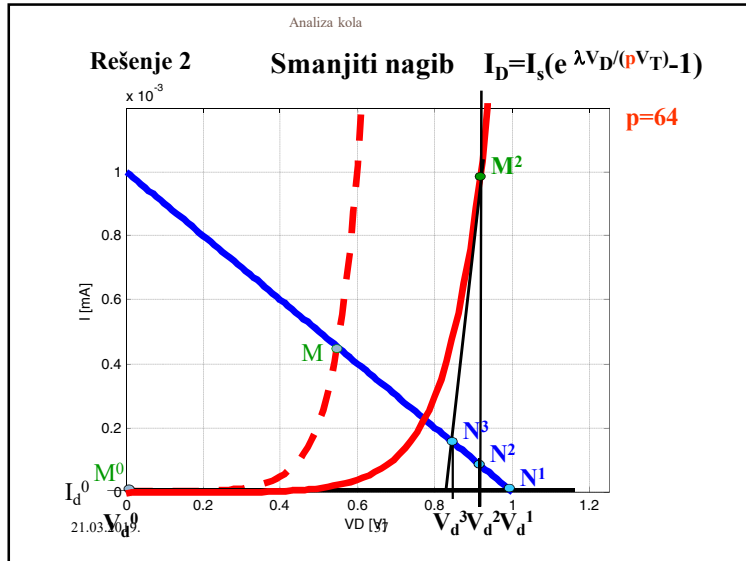
Rešenje se nađe u desetak iteracija – toliko puta treba formirati i rešiti sistem linearnih algebarskih jednačina.

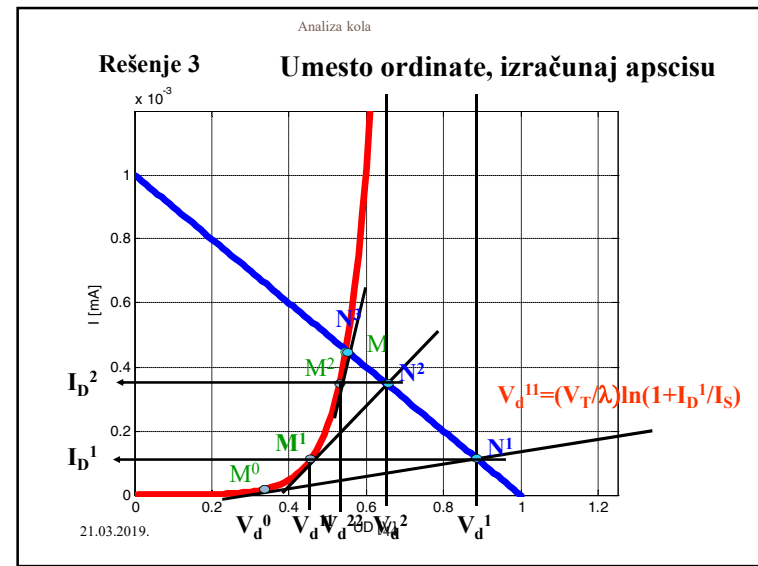
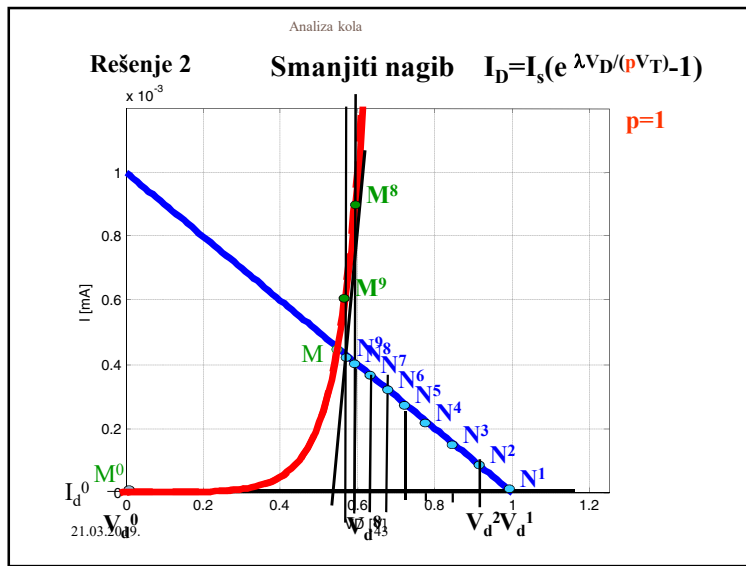
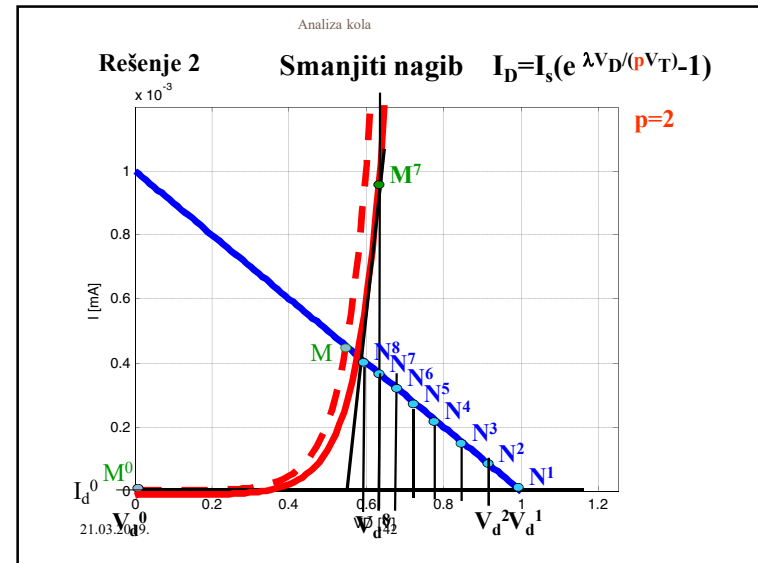
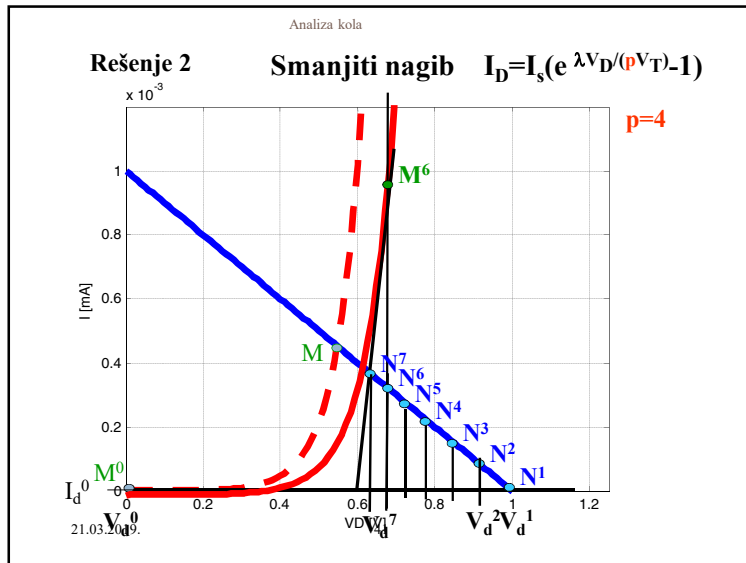
21.03.2019.

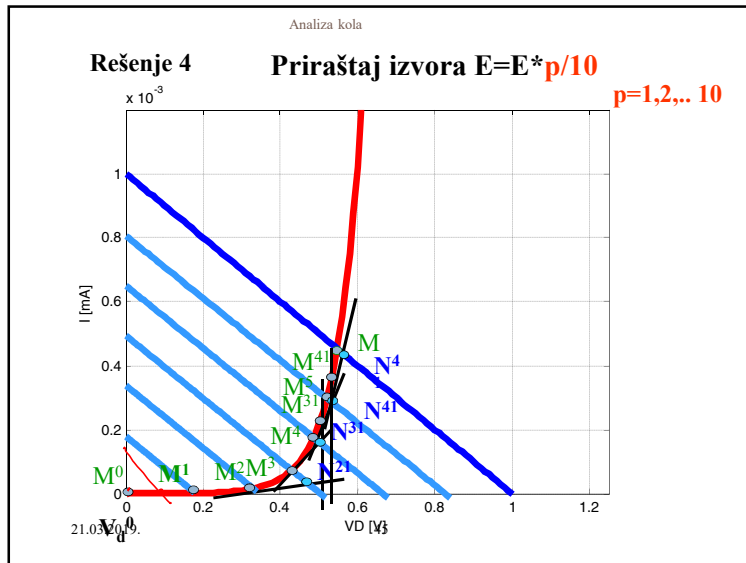
32











Analiza kola

Linearizacija nelinearne karakteristike tangentom u radnoj tački.

Iterativno se približava tačnom rešenju do unapred definisane tačnosti.

Potrebno je definisati početno rešenje u nultoj iteraciji.

Rešenje se nađe u desetak iteracija – toliko puta treba formirati i rešiti sistem linearnih algebarskih jednačina.

21.03.2019. 46

Analiza kola

### Šta može Spice DC nelinearna?

21.03.2019

Primer DC analize

04.04.2019. 47

Analiza kola

### Šta može Spice DC nelinearna?

04.04.2019. 48

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinear

Primer DC analize nelinearnih kola

Simulation Command: `.dc Vg -5 5 0.1 V1 -2V 2V 1V`

04.04.2019. 49

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinearna?

04.04.2019. 50

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinear

Primer nelinearno kolo DC analiza

Simulation Command: `.op`

04.04.2019. 51

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinearna?

Primer nelinearno kolo DC analiza

Operating Point

Node	Value	Unit	Component
V(o1)	5.35452	voltage	
V(b1)	0.80525	voltage	
V(e1)	0.218166	voltage	
V(n001)	10	voltage	
V(via0)	0	voltage	
V(p001)	4.13847e-014	voltage	
V(via)	5.35452e-014	voltage	
I(c(Q1))	0.0009884	device_current	
I(b(Q1))	3.26466e-006	device_current	
I(e(Q1))	-0.000991665	device_current	
I(c)	-5.35452e-018	device_current	
I(Cgs)	8.80525e-019	device_current	
I(Ces)	2.18166e-018	device_current	
I(Rg)	8.80525e-019	device_current	
I(Rb1)	5.35452e-018	device_current	
I(Rb2)	0.000991665	device_current	
I(Re)	0.000991665	device_current	
I(Rp)	4.14522e-006	device_current	
I(RS2)	8.80525e-007	device_current	
I(Vg)	8.80525e-019	device_current	
I(Vcc)	-0.000992545	device_current	

04.04.2019. 52

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinearna?

Edit Simulation Command

Transient AC Analysis DC Sweep Noise DC Transfer DC op print

Compute the DC operating point of a circuit while stepping independent sources and treating capacitances as open circuits and inductances as short circuits.

1st Source: [Vg] 2nd Source: [ ] 3rd Source: [ ]

Name of 1st Source to Sweep: [Vg]

Type of Sweep: [Linear]

Start Value: [0]

Stop Value: [10]

Increment: [1]

Cancel OK

Primer nelinearno kolo DC

04.04.2019. 53

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinearna?

Primer nelinearno kolo DC analiza

04.04.2019. 54

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinearna?

Primer nelinearno kolo DC analiza

04.04.2019. 55

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinearna?

Primer nelinearno kolo DC analiza

04.04.2019. 56

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinearno

Find the DC small-signal transfer function.

Output: V(c)  
Source: V1

Syntax: `.tf V(c) V1`

`.tf V(c) V1`

`.dc V1 0 2 0.05`

Primer nelinearno kolo

04.04.2019. 57

Analiza kola

## Šta može Spice DC nelinearna?

`.tf V(c) V1`

Primer nelinearno kolo DC analiza

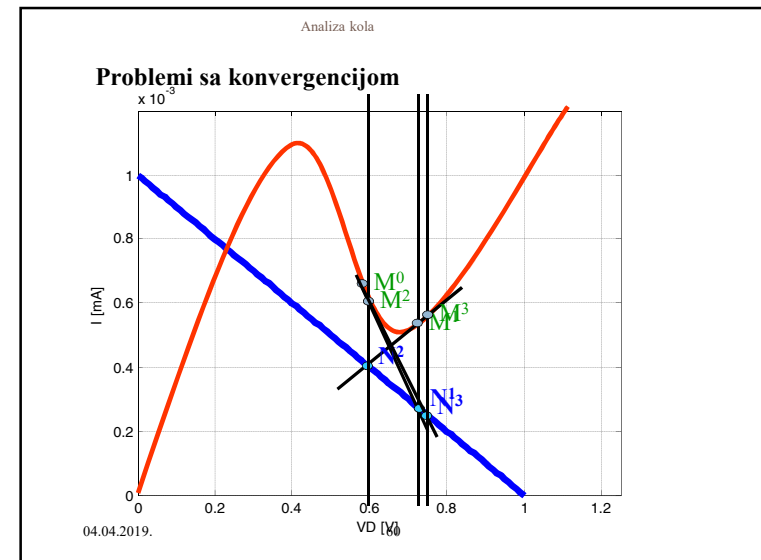
Transfer Function	transfer impedance	transfer impedance	transfer impedance	transfer impedance
<code>.tf V(c) V1</code>	-7.04526	24332	4466.04	<b>V1=0.6V</b>
<code>.tf V(c) V1</code>	-11.3707	8055.7	4479.22	<b>V1=0.7V</b>
<code>.tf V(c) V1</code>	-17.9038	73125.3	4647.45	<b>V1=0.8V</b>
<code>.tf V(c) V1</code>	-19.0141	47594.1	4466.04	<b>V1=0.9V</b>
<code>.tf V(c) V1</code>	-19.5378	62592.9	4441.32	<b>V1=1V</b>
<code>.tf V(c) V1</code>	-19.8442	58718.5	4455.73	<b>V1=1.1V</b>
<code>.tf V(c) V1</code>	0.433777	232.401	32.1477	<b>V1=1.2V</b>

04.04.2019. 58

Analiza kola

## Šta ako se ne nađe rešenje? Kako dolazi do takvog problema?

04.04.2019. 59



### Analiza nelinearnih kola u DC domenu

Šta treba da znamo?

Elementarno (za potpis)

**Koliko puta se formira i rešava sistem jednačina pri jednoj analizi nelinearnog otpornog kola u jednosmernom domenu?**

Osnovna (za 6)

1. **Uticaj veličine parametara RELTOL, ABSTOL i VNTOL na tačnost i brzinu analize programa Spice?**

04.04.2019.

61

### Analiza nelinearnih kola u DC domenu

Šta treba da znamo?

**Ispitna pitanja**

- a) **Analiza nelinearnih otpornih kola (DC režim) – opšti algoritam?**
- b) **Izbor početnog rešenja pri analizi nelinearnih kola.**
- c) **Numerički problemi pri analizi nelinearnih kola.**

04.04.2019.