


Projektovanje elektronskih kola

**Prof. dr Predrag Petković,  
dr Miljana Milić, docent**

**Katedra za elektroniku  
Elektronski fakultet Niš**

LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation  
<http://leda.elfak.ni.ac.yu/>  
23.03.2020.




1

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/>  
23.03.2020.



2

**Da se podsetimo** Projektovanje elektronskih kola

**Koji su koraci potrebni da bi se projektovala  
analogna kola?**

1. Naučiti osobine pojedinih analognih kola  
(pojačavači,...)
2. Izabrati pravu topologiju za dati zadatak  
(strukturno projektovanje).
3. Odrediti vrednosti parametara pojedinih  
komponenta ( $g_m$ , otpornost, kapacitivnost,...)
4. Proveriti da li smo dobili željeni odziv.
5. Ako smo zadovoljni idemo na fizičko  
projektovanje

LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>  
23.03.2020.




3

**Da se podsetimo** Projektovanje elektronskih kola

**Koji su koraci potrebni da bi se projektovala  
analogna kola?**

1. Naučiti osobine pojedinih analognih kola  
(pojačavači,...)
2. Izabrati pravu topologiju za dati zadatak  
(strukturno projektovanje).
3. Odrediti vrednosti parametara pojedinih  
komponenta ( $g_m$ , R, C, L...)
4. Proveriti da li smo dobili željeni odziv.
5. Ako smo zadovoljni idemo na fizičko  
projektovanje

LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation  
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>  
23.03.2020.



4

Da se podsetimo **Projektovanje elektronskih kola**

Sušтина je u

- određivanju vrednosti parametara pojedinih komponenata kola (sinteza) i
- proveru da li je dobijen željeni odziv

Savremeni programi za optimizaciju imaju ugrađene algoritme koji omogućavaju da se vrednosti parametara određuju automatski. Zasnovani su na poređenju dobijenog i željenog odziva i korekciji parametara na bazi osetljivosti odziva na svaki parametar.

Za proveru se koriste programi za **analizu kola**.



23.03.2020.

5

Da se podsetimo **Analiza kola**

Šta podrazumeva?

Odrediti odziv kola kada je poznata pobuda.

**Odziv:** Nepoznati naponi i struje u kolu

**Pobuda:** Poznate struje i naponi u kolu

**Analiza:**

Odrediti nepoznate napone i struje u kolu ako je poznata pobuda i vrednosti elemenata kola

23.03.2020.

6

Da se podsetimo

**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 (frekvencijske karakteristike kola – amplitudska, fazna)
3. vremenskom domenu (talasni oblik napona/struja na izlazu kola pobuđenog impulsima poznatog talasnog oblika)

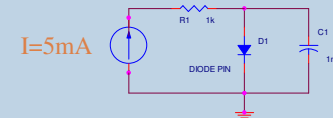
23.03.2020.

7

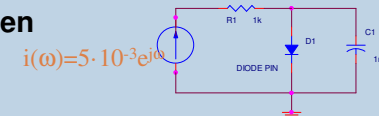
Da se podsetimo

**Analiza kola**  
Tipovi analize kola

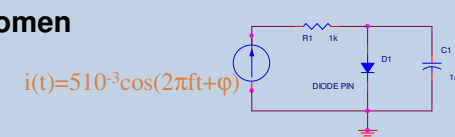
1. Jednosmerni domen (DC analiza)



2. Frekvencijski domen (AC analiza)



3. Vremenski domen (TR analiza)



23.03.2020.

8

Analiza kola

Da se podsetimo

## 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, ...)

23.03.2020. 9

Analiza kola

Da se podsetimo

Tipovi elektronskih kola	Tipovi analize kola
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Linearna otporna R</li> <li>2. Linearna reaktivna L, C, m, ...</li> <li>3. Nelinearna otporna dioda, tranzistor, R, ...</li> <li>4. Nelinearna reaktivna dioda, tranzistor, R, L, C, ...</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Jednosmerni domen (DC analiza)</li> <li>2. Frekvencijski domen (AC analiza)</li> <li>3. Vremenski domen (TR analiza)</li> </ol>

23.03.2020. 10

Analiza kola

Da se podsetimo

## Projektovanje elektronskih kola

### 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

23.03.2020. 11

Analiza kola

Da se podsetimo

## Analiza elektronskih kola

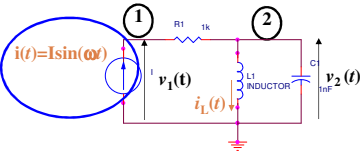
1. Uvod
2. Analiza linearnih kola u DC domenu (jednosmerni režim)
3. Analiza linearnih kola u AC domenu (frekvencijski domen)
4. Analiza linearnih kola u TR domenu (vremenski domen)
5. Analiza nelinearnih kola u DC domenu
6. Analiza nelinearnih kola u TR domenu

23.03.2020. 12

Da se podsetimo

Analiza kola

**Ponašanje linearnih reaktivnih kola u vremenskom domenu opisuje se sistemom linearnih diferencijalnih jednačina**



$$\frac{v_1(t) - v_2(t)}{R_1} = i(t)$$

$$\frac{v_2(t) - v_1(t)}{R_1} + i_L(t) + C_1 \frac{\partial v_2(t)}{\partial t} = 0$$

$$v_2(t) - L \frac{\partial i_L(t)}{\partial t} = 0$$

Tip kola i analize  
**3. Linearna reaktivna u TR domenu**

**3. Linearne diferencijalne jednačine**

09.03.2020.

13

Analiza kola

**Matematički model**

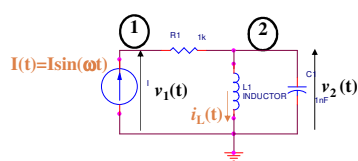
1. i 2. Linearne jednačine (realne i kompleksne)
- 3. Linearne diferencijalne jednačine**
4. Nelinearne algebarske jednačine
5. Nelinearne diferencijalne jednačine

**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

23.03.2020.

Analiza kola



$$\frac{v_1(t) - v_2(t)}{R_1} = i(t)$$

$$\frac{v_2(t) - v_1(t)}{R_1} + i_L(t) + C_1 \frac{\partial v_2(t)}{\partial t} = 0$$

$$v_2(t) - L \frac{\partial i_L(t)}{\partial t} = 0$$

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x)$$

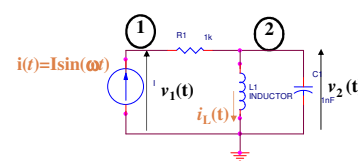
**Diskretizacija vremenske ose**

$$\dot{x}(t_{n+1}) = \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{t_{n+1} - t_n} = \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{h} = \frac{x^{n+1} - x^n}{h}$$

23.03.2020.

15

Analiza kola



$$\frac{v_1(t) - v_2(t)}{R_1} = i(t)$$

$$\frac{v_2(t) - v_1(t)}{R_1} + i_L(t) + C_1 \frac{\partial v_2(t)}{\partial t} = 0$$

$$v_2(t) - L \frac{\partial i_L(t)}{\partial t} = 0$$

$$\frac{v_1(t_{n+1}) - v_2(t_{n+1})}{R_1} = i(t_{n+1})$$

$$\frac{v_2(t_{n+1}) - v_1(t_{n+1})}{R_1} + i_L(t_{n+1}) + C_1 \frac{v_2(t_{n+1}) - v_2(t_n)}{h} = 0$$

$$v_2(t_{n+1}) - L \frac{i_L(t_{n+1}) - i_L(t_n)}{h} = 0$$

23.03.2020.

16

Analiza kola

Sistem linearnih jednačina

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} & 0 \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{C_1}{h} & 1 \\ 0 & 1 & -\frac{L_1}{h} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1^{n+1} \\ v_2^{n+1} \\ i_L^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i^{n+1} \\ \frac{C_1}{h} v_2^n \\ -\frac{L_1}{h} i_L^n \end{bmatrix}$$

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

23.03.2020. 17

Analiza kola

23.03.2020.

Analiza kola

Specifičnosti analize u vremenskom domenu

**Diskretizacija vremenske ose.**

**Zadati vreme završetka analize.**

**Rešenje u trenutku  $t=t_{n+1}$ , zasnovano je na rešenju u prethodnom trenutku, za  $t=t_n$ .**

**Potrebno je definisati granične uslove za  $t=0$ .**

**Za analizu kola u intervalu do 50ms sa korakom 5µs potrebno je formirati i rešiti sistem linearnih algebarskih jednačina 10 000 puta!**

Analiza kola

23.03.2020. 20

Analiza kola

### Izbor vremena završetka analize

$f = 1\text{kHz}$

$T = 1\text{ms}$

$t = \frac{T}{4.0} = 250\mu\text{s}$

Zavisu od pobude (recimo  $n$  perioda)

$C = 10\mu\text{F}$   
 $R = 10\Omega$   
 $4\tau$

$V_c = 5\text{V}$

$\tau = \frac{1}{RC} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0.1\text{s}$

$T_{konj} = 0.4\text{s}$

Zavisu od očekivanog odziva  
Da bi se C napunio treba najmanje  $4\tau$

23.03.2020. 21

Analiza kola

### Šta može Spice? Hoćemo kolo iz primera AC analize linearnih kola da prilagodimo za TR analizu

Primer analize AC linearnih kola

`.ac dec 5 10 500k`

23.03.2020. 22

### Šta može Spice?

Primer analize

SINE(0 1mA 5kHz)

23.03.2020. 23

Analiza kola

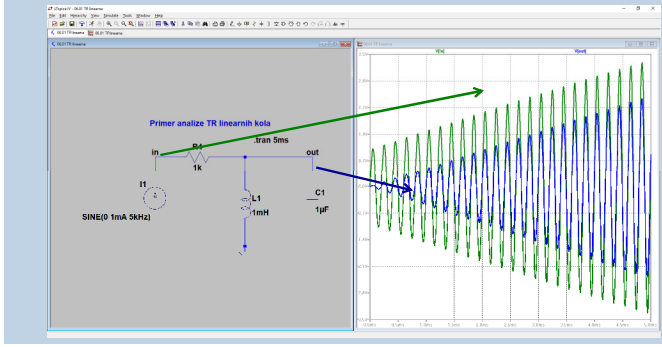
### Šta može Spice?

Primer analize TR linearnih kola

`.tran 5ms`

23.03.2020. 24

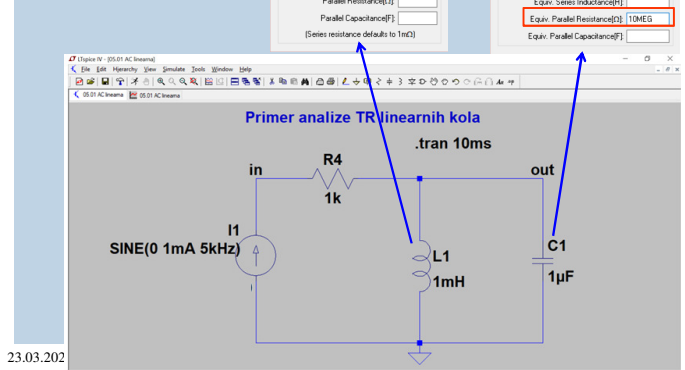
### Šta može Spice?



23.03.2020.

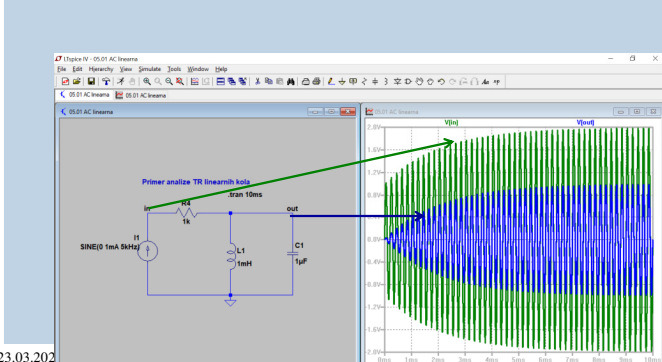
25

### Šta može Spice?



23.03.202

### Šta može Spice?



23.03.202

### Primena Eulerove formule na kapacitivnu granu

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt}$$

$$i_c^{n+1} = C \frac{(v_c^{n+1} - v_c^n)}{h}$$

$$i_c^{n+1} = \frac{C}{h} (v_c^{n+1} - v_c^n)$$

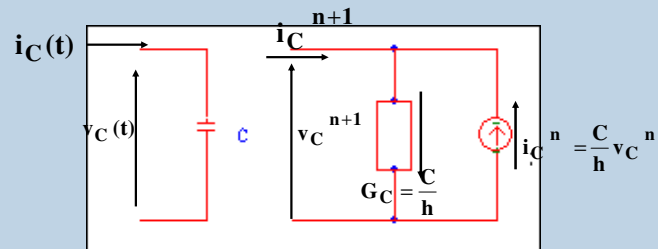
$$i_c^{n+1} = \frac{C}{h} v_c^{n+1} - \frac{C}{h} v_c^n$$

### Primena Eulerove formule na kapacitivnu granu

$$i_C^{n+1} = \frac{C}{h} v_C^{n+1} - \frac{C}{h} v_C^n$$

Struja  $i_C(t_{n+1})$  ima dve komponente:

Jedna zavisi od napona  $v_C(t_{n+1})$  a druga od  $v_C(t_n)$



### Analiza greške diskretizacije

Intuitivno je jasno (a znanja iz numeričke matematike to potvrđuju) da diskretizacija unese određenu grešku, i da može da se očekuje da greška bude manja ako je korak diskretizacije manji i ako je promena sporija.

Želimo da utvrdimo

- koliko iznosi greška  $i$
- od čega zavisi.

### Analiza greške diskretizacije

Neka je  $x(t_{n+1})$  tačna vrednost  
a  $x^{n+1}$  izračunata vrednost pomenljive  $x$ .

Tada je lokalna greška zaokruživanja  
(Local truncation Error, LTE)

$$\epsilon_{Tx} = x(t_{n+1}) - x^{n+1}$$

### Analiza greške diskretizacije

Razvojem funkcije  $x(t)$  u Tajlorov red u okolini  
tačke  $t=t_{n+1}$  dobija se

$$x(t) = x(t_{n+1}) + (t - t_{n+1}) \dot{x}|_{t=t_{n+1}} + \frac{1}{2} (t - t_{n+1})^2 \ddot{x}|_{t=t_{n+1}} + \dots$$

za  $t = t_n$

$$x(t_n) = x(t_{n+1}) + (t_n - t_{n+1}) \dot{x}|_{t=t_{n+1}} + \frac{1}{2} (t_n - t_{n+1})^2 \ddot{x}|_{t=t_{n+1}} + \dots$$

$h = t_{n+1} - t_n$ ,

$$x(t_n) = x(t_{n+1}) - h \dot{x}|_{t=t_{n+1}} + \frac{1}{2} h^2 \ddot{x}|_{t=t_{n+1}} + \dots$$

$$x(t_{n+1}) = x(t_n) + h \dot{x}|_{t=t_{n+1}} - \frac{1}{2} h^2 \ddot{x}|_{t=t_{n+1}} - \dots$$



## Analiza greške diskretizacije

Na osnovu

$$\dot{x}(t_{n+1}) = \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{t_{n+1} - t_n} = \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{h} = \frac{x^{n+1} - x^n}{h}$$

sledi da je približna vrednost promenljive x u trenutku  $t=t_{n+1}$ 

$$x^{n+1} = x^n + h\dot{x}|_{t=t_{n+1}}$$

Dok je tačna vrednost u tom trenutku

$$\left( x(t_{n+1}) \cong x(t_n) + h\dot{x}|_{t=t_{n+1}} - \frac{1}{2}h^2\ddot{x}|_{t=t_{n+1}} \right)$$

Ako se pretpostavi da je u  $t=t_n$ , poznato tačno rešenje i da je  $x(t_n)=x^n$ , tada je

$$\varepsilon_{Tx} = x(t_{n+1}) - x^{n+1}$$

$$\left( x(t_{n+1}) \cong x(t_n) + h\dot{x}|_{t=t_{n+1}} - \frac{1}{2}h^2\ddot{x}|_{t=t_{n+1}} \right) - x^{n+1} = x^n + h\dot{x}|_{t=t_{n+1}}$$

$$\varepsilon_{Tx} = \left( x(t_n) + h\dot{x}|_{t=t_{n+1}} - \frac{1}{2}h^2\ddot{x}|_{t=t_{n+1}} \right) - \left( x^n + h\dot{x}|_{t=t_{n+1}} \right) = -\frac{1}{2}h^2\ddot{x}|_{t=t_{n+1}}$$

23.03.2020.

34

## Analiza greške diskretizacije

$$\varepsilon_{Tx} = x(t_{n+1}) - x^{n+1} = -\frac{1}{2}h^2\ddot{x}|_{t=t_{n+1}}$$

**Lokalna greška zaokruživanja (local truncation error LTE)**  
 proporcionalna je kvadratu veličine koraka  $h$  i  
 brzini promene “nagiba” signala u vremenu  $\ddot{x}$ ,  
 (drugom izvodu)

Vremenski korak  $h$   $\searrow$   $\Rightarrow$  **LTE**  $\searrow$   
 Promena brzine odziva  $\searrow$

## Analiza greške diskretizacije

Tokom izračunavanja izvoda pravi se, takođe,  
 lokalna greška zaokruživanja izvoda

$$\varepsilon_{Td} = \dot{x}(t_{n+1}) - \dot{x}^{n+1}$$

$$x(t) = x(t_{n+1}) + (t - t_{n+1})\dot{x}|_{t=t_{n+1}} + \frac{1}{2}(t - t_{n+1})^2\ddot{x}|_{t=t_{n+1}} + \dots$$

za  $t = t_n$ 

$$x(t_n) = x(t_{n+1}) + (t_n - t_{n+1})\dot{x}|_{t=t_{n+1}} + \frac{1}{2}(t_n - t_{n+1})^2\ddot{x}|_{t=t_{n+1}} + \dots$$

$$h = t_{n+1} - t_n,$$

$$\dot{x}|_{t=t_{n+1}} = \dot{x}(t_{n+1}) = \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{h} + \frac{1}{2}h\ddot{x}|_{t=t_{n+1}} + \dots$$

## Analiza greške diskretizacije

Znajući da je

$$\dot{x}^{n+1} = \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{h}$$

sledi

$$\varepsilon_{Td} = \dot{x}(t_{n+1}) - \dot{x}^{n+1}$$

$$\varepsilon_{Td} = \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{h} + \frac{1}{2} h \ddot{x}|_{t=t_{n+1}} + \dots - \frac{x(t_{n+1}) - x(t_n)}{h}$$

$$\varepsilon_{Td} = \frac{1}{2} h \ddot{x}|_{t=t_{n+1}} + \dots$$

$$\varepsilon_{Td} \approx \frac{1}{2} h \ddot{x}|_{t=t_{n+1}}$$

## Analiza greške diskretizacije

Lokalna greška zaokruživanja izvoda (LTE izvoda)

proporcionalna je veličini koraka **h** i

brzini promene nagiba signal u vremenu  $\ddot{x}$

(drugom izvodu)

Vremenski korak  $h$   $\searrow$   $\Rightarrow$  LTE izvoda  $\searrow$   
 Promena brzine odziva  $\searrow$

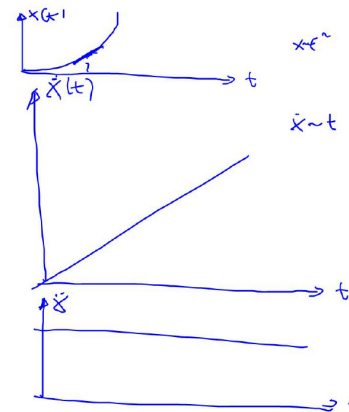
## Analiza greške diskretizacije

$$\varepsilon_{Tx} = x(t_{n+1}) - x^{n+1} = -\frac{1}{2} h^2 \ddot{x}|_{t=t_{n+1}}$$

$$\varepsilon_{Td} = \frac{1}{2} h \ddot{x}|_{t=t_{n+1}}$$

Greška je manja za monotone odzive jer se izvod aproksimira pravom linijom

Da se podsetimo: prvi i drugi izvod funkcije



Funkcija  $x=t^2$

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = 2 \cdot t$$

$$\ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} = 2$$

## Izbor koraka diskretizacije

## Izbor veličine koraka diskretizacije

**Kako izabrati pravu veličinu koraka?**

**Korak se bira na osnovu vrednosti elemenata kola i/ili na osnovu brzine promene signala pobude.**

## Analiza greške diskretizacije

**Brzina promene signala u kolu zavisi od vrednosti vremenskih konstanti u kolu.**

**Dobra je praksa da se izabere korak  $h < \tau/100$  gde je  $\tau$  lokalna vremenska konstanta.**

**Bira se najmanji korak**

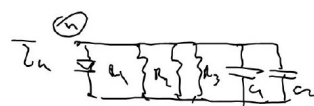
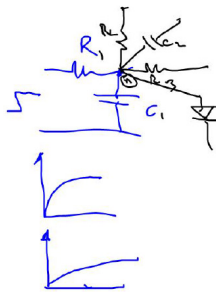
**Naravno, ako je ograničavajuća promena u kolu diktirana brzinom pobude, tada se izabere korak koji je u stanju da prati pobudu.**

23.03.2020.

42

Veličina koraka analize  $h < \tau/100$

$\tau_n$  lokalna vremenska konstanta za čvor  $n$



$$\tau_n = \frac{1}{(R_1 || R_2 || R_3)(C_1 + C_2)}$$

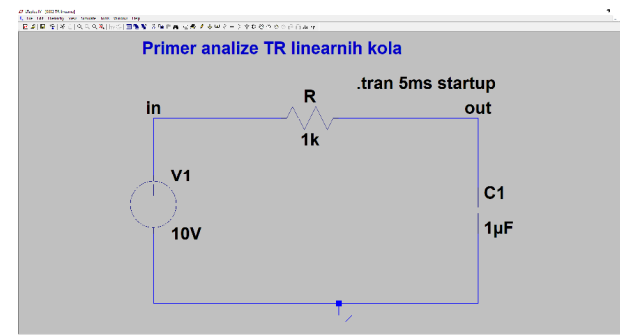
Otpornost diode -  $r_d$  - menja se u zavisnosti od režima



23.03.2020.

43

## Primer

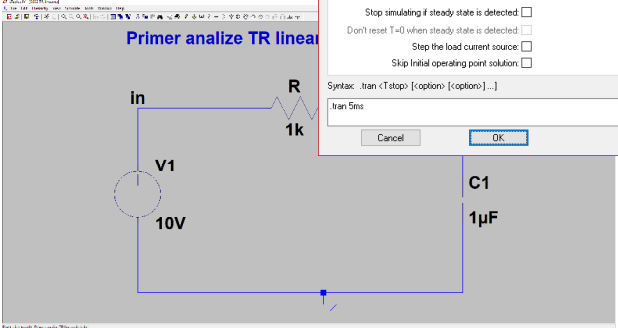
RC kolo  $\tau=1\text{ms}$ 

23.03.2020.

44

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

## Primer RC kolo $\tau=1ms$



**Edit Simulation Command**

Transient AC Analysis DC sweep Noise DC Transfer DC op prt

Perform a non-linear, time-domain simulation.

Stop Time: 5ms

Time to Start Saving Data: [ ]

Maximum Timestep: [ ]

Start external DC supply voltages at 0V:

Stop simulating if steady state is detected:

Don't reset T=0 when steady state is detected:

Skip the load current source:

Skip initial operating point solution:

Syntax: .tran <Tstop> [coption] [coption] ...]

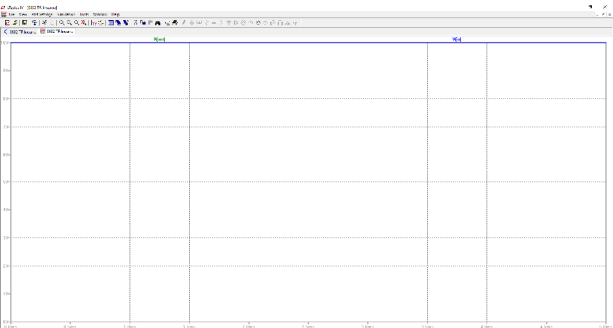
.tran 5ms

Cancel OK

23.03.2020. 45

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

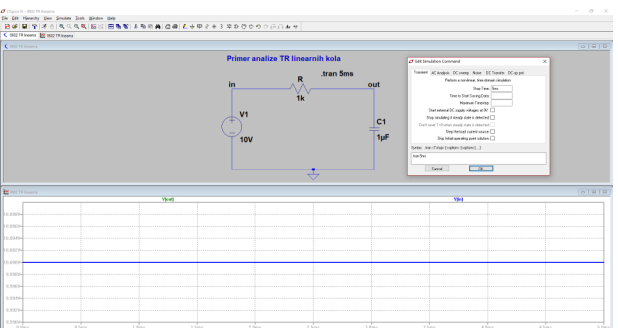
## Primer RC kolo $\tau=1ms$



23.03.2020. 46

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

## Primer RC kolo $\tau=1ms$



**Edit Simulation Command**

Transient AC Analysis DC sweep Noise DC Transfer DC op prt

Perform a non-linear, time-domain simulation.

Stop Time: 5ms

Time to Start Saving Data: [ ]

Maximum Timestep: [ ]

Start external DC supply voltages at 0V:

Stop simulating if steady state is detected:

Don't reset T=0 when steady state is detected:

Skip the load current source:

Skip initial operating point solution:

Syntax: .tran <Tstop> [coption] [coption] ...]

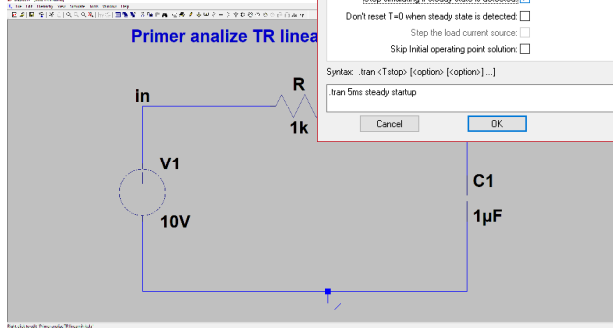
.tran 5ms steady startup

Cancel OK

23.03.2020. 47

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

## Primer RC kolo $\tau=1ms$



**Edit Simulation Command**

Transient AC Analysis DC sweep Noise DC Transfer DC op prt

Perform a non-linear, time-domain simulation.

Stop Time: 5ms

Time to Start Saving Data: [ ]

Maximum Timestep: [ ]

Start external DC supply voltages at 0V:

Stop simulating if steady state is detected:

Don't reset T=0 when steady state is detected:

Skip the load current source:

Skip initial operating point solution:

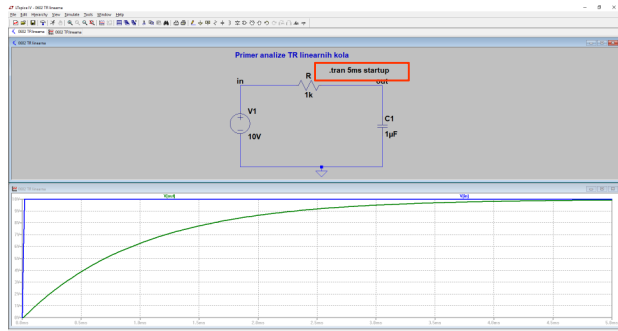
Syntax: .tran <Tstop> [coption] [coption] ...]

.tran 5ms steady startup

Cancel OK

23.03.2020. 48

**Primer**  
**RC kolo  $\tau=1\text{ms}$**



23.03.2020.

49

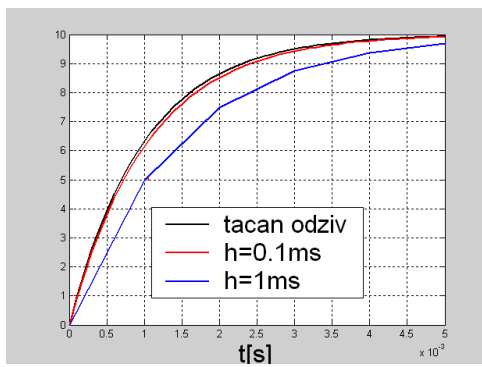
**Primer**  
**RC kolo  $\tau=1\text{ms}$**

t	tačno	h=0.01ms	h=0.1ms	h=1ms
0	0	0	0	0
1E-5	9.900498	9.0099		
1E-4	9.04837	9.05287	9.09091	
1E-3	3.67879	3.69711	3.85543	5.00000

23.03.2020.

50

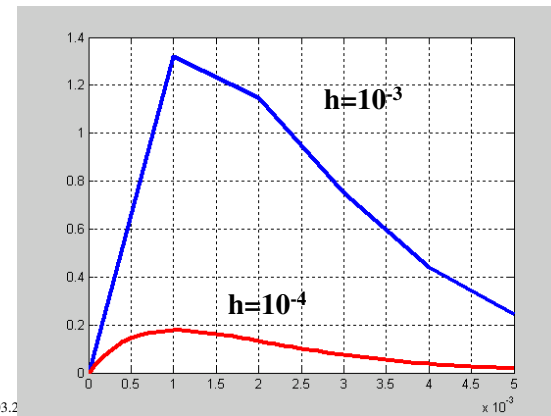
**Odziv RC kola  $\tau=1\text{ms}$**



23.03.2020.

51

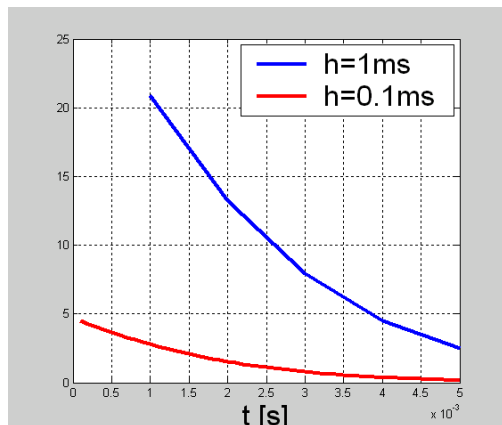
**apsolutna greška**



23.03.2020.

52

### relativna greška



23.03.2020.

### Analiza greške diskretizacije

Greška je proporcionalna veličini koraka  $h$  i brzini promene nagiba  $\ddot{x}$  signala

Da bi se zadržala konstantna greška, treba smanjiti korak tamo gde je brzina promene signala veća i obrnuto.

Ovo je iskorišćeno u algoritmima za automatsku kontrolu koraka (Spice)

23.03.2020.

54

Gde je prvi izvod najveći za sinusnu pobudu?

Kako zavisi od frekvencije?



13.03.2017.

73

### Analiza greške diskretizacije

Primer:

Neka je odziv sinusna funkcija sa amplitudom  $V=4V$  i periodom  $T=5ms$ . Odrediti minimalni korak da bi maksimalna LTE bila  $\epsilon_{Tx} = 10^{-4}V$  dobija se:

$$h_{\min} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Tx}}{\ddot{x}}}$$

$$\ddot{x} = 4 \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} t = 6,3 \cdot 10^6 \text{ V/s}^2 \Rightarrow h_{\min} = 5,6 \mu\text{s}$$

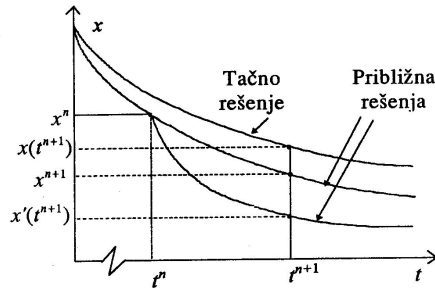
$$N = \frac{T}{h} = \frac{5ms}{5,6 \mu\text{s}} \approx 892$$

Za jednu periodu !!!

23.03.2020.

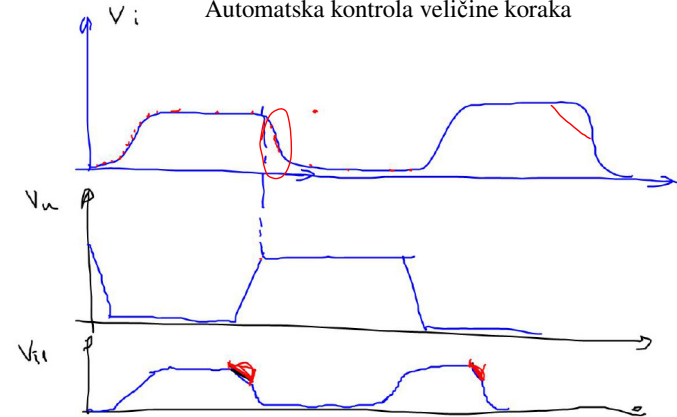
56

### Analiza greške diskretizacije



Greška može da se nagomilava  
Ukoliko se ne povećava greška kaže se da je rešenje stabilno

### Automatska kontrola veličine koraka



### Analiza linearnih kola u TR domenu

Šta treba da znamo?

Elementarno (za potpis)

Šta se dobija kao rezultat analize u vremenskom domenu?

Osnovna (za 6)

1. Koje parametre treba zadati da bi se u programu Spice analiziralo kolo u TR domenu?
2. Šta se aktivira naredbom .IC u programu Spice (odnosno deaktivira sa UIC u programu LTspice)

### Analiza linearnih kola u TR domenu

#### Ispitna pitanja

- a) Od čega zavisi lokalna greška zaokruživanja pri TR analizi?
- b) Odrediti minimalni korak diskretizacije da bi maksimalna LTE bila  $\epsilon_{TX} = 10^{-3}V$ , ako je odziv sinusna funkcija sa amplitudom  $V=4V$  i periodom  $T=5ms$ .
- c) Koje tipovi talasnih oblika mogu da se zadaju naponskim/strujnim generatorima u programu Spice?
- d) Koje parametre treba zadati pobudnom generatoru u programu LTspice da bi se opisala sinusoida sa slike:



### Analiza linearnih kola u TR domenu

#### Ispitna pitanja

- e) Koje parametre treba zadati pobudnom generatoru u programu LTspice da bi se opisao talasni oblik sa slike?



- f) Koje parametre treba zadati pobudnom generatoru u programu Spice da bi se opisao talasni oblik sa slike?

