

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.

1

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)

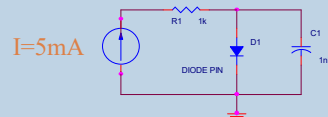
21.03.2019.

2

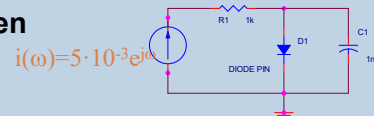
Analiza kola

Tipovi analize kola

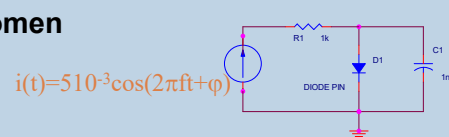
1. Jednosmerni domen (DC analiza)



2. Frekvencijski domen (AC analiza)



3. Vremenski domen (TR analiza)



21.03.2019.

3

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.

4

Analiza kola

Tipovi elektronskih kola	Tipovi analize kola
1. Linearna otporna R	1. Jednosmerni domen (DC analiza)
2. Linearna reaktivna L, C, m, ...	2. Frekvencijski domen (AC analiza)
3. Nelinearna otporna dioda, tranzistor, R, ...	3. Vremenski domen (TR analiza)
4. Nelinearna reaktivna dioda, tranzistor, R, L, C, ...	

21.03.2019. 5

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

21.03.2019. 6

Analiza 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

21.03.2019. 7

Analiza kola

Matematički model	Način rešavanja sistema j-na
1. i 2. Linearne jednačine (realne i kompleksne)	1. i 2. LU faktorizacija (Gauss)
3. Linearne diferencijalne jednačine	3. Numeričko integraljenje - diskretizacija - svođenje na linearne algebarske (Euler)
4. Nelinearne algebarske jednačine	4. Linearizacija - iterativno svođenje na linearne algebarske (Newton-Kantorovič)
5. Nelinearne diferencijalne jednačine	5. Diskretizacija - svođenje na nelinearne algebarske i linearizacija - iterativno svođenje na linearne algebarske

21.03.2019.

Analiza kola

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

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

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

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

Diskretizacija vremenske ose

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

21.03.2019. 9

Analiza kola

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

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

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

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

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

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

21.03.2019. 10

Analiza kola

$$\frac{1}{R_1} v_1^{n+1} - \frac{1}{R_1} v_2^{n+1} = i^{n+1}$$

$$-\frac{1}{R_1} v_1^{n+1} + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{C_1}{h}\right) v_2^{n+1} + i_L^{n+1} = \frac{C_1}{h} v_2^n$$

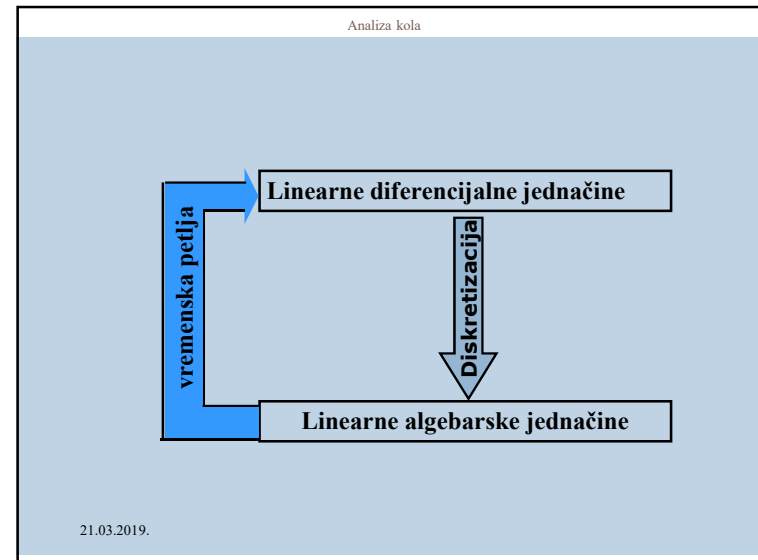
$$v_2^{n+1} - \frac{L}{h} i_L^{n+1} = -\frac{L}{h} i_L^n$$

Sistem linearnih jednačina

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

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

21.03.2019. 11



Diskretizacija vremenske ose.

Da bi se našlo rešenje u trenutku $t=t_{n+1}$, potrebno je da se zna rešenje za trenutak $t=t_n$.

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

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

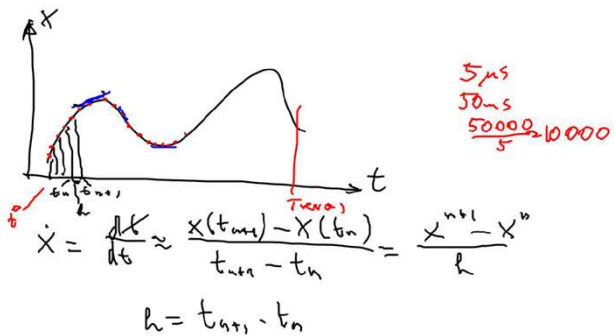
21.03.2019.

Diskretizacija vremenske ose.

Da bi se našlo rešenje u trenutku $t=t_{n+1}$, potrebno je da se zna rešenje za trenutak $t=t_n$.

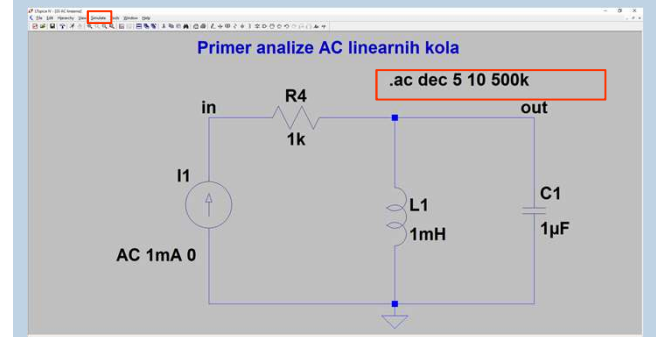
Potrebno je definisati granične uslove za $t=0$.

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



21.03.2019.

15

Šta može Spice?

21.03.2019.

16

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analiz

SINE(0 1mA 1kHz)

R4 1k

L1 1mH

C1 1µF

Independent Current Source - I1

Functions

- None
- PULSE(1 0 2 100ns 100ns 100ns 100ns)
- SINE(Offset Amp Freq Td Theta Phi Noises)
- EXP(1 0 Td1 Twd1 Td2 Twd2)
- SFFM(Offset Amp Freq Mod Freq)
- PULSE(1 0 2 2...)
- TABLE(1 0 2 2...)

DC Value

DC value: []

Make this information visible on schematic:

Small signal AC analysis(AC)

AC Amplitude: []

AC Phase: []

Make this information visible on schematic:

Parasitic Properties

This is an active load:

Make this information visible on schematic:

Additional PSpice Parameters

Make this information visible on schematic:

Cancel OK

21.03.2019. 17

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize TR lin

.tran 5ms

SINE(0 1mA 1kHz)

R4 1k

L1 1mH

C1 1µF

Edit Simulation Command

Transient AC Analysis DC Sweep Noise DC Transfer DC op pre

Perform a non-linear, time-domain simulation

Stop Time: [5ms]

Time to Start Saving Data: []

Maximum Timesteps: []

Start entering DC supply voltages at 0V:

Stop simulating if steady state is detected:

Don't reset: when steady state is detected:

Stop the load current source:

Skip initial operating point solution:

Syntax: []

Cancel OK

21.03.2019. 18

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize TR linearnih kola

SINE(0 1mA 1kHz)

R4 1k

L1 1mH

C1 1µF

tran 5ms

21.03.2019. 19

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize TR linearnih kola

SINE(0 1mA 1kHz)

R4 1k

L1 1mH

C1 1µF

tran 5ms

21.03.2019. 20

Šta može Spice?

Primer analize TR linearnih kola

21.03.2019.

Šta može Spice?

Primer analize TR linearnih kola

21.03.2019.

Analiza kola

Primena Eulerove formule na kapacitivnu granu

$$i_C = C \frac{dv_C}{dt}$$

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

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

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

Analiza kola

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 $v_C(t_n)$

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

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.

21.03.2019.

25

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)

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

21.03.2019.

26

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 $t=t_{n+1}$

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

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

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

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

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 signala \ddot{x}

Vremenski korak h ↓
Promena brzine odziva ↓ ⇒ LTE ↓

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 signala \ddot{x}

Vremenski korak h ↓
Promena brzine odziva ↓ ⇒ LTE izvoda ↓

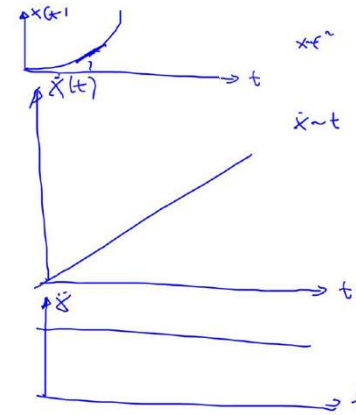
Analiza greške diskretizacije

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

$$\epsilon_{Td} = \frac{1}{2} h \dot{x} \Big|_{t=t_{n+1}}$$

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

Da se podsetimo: prvi i drugi izvod funkcije



Funkcija $x=t^2$

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

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

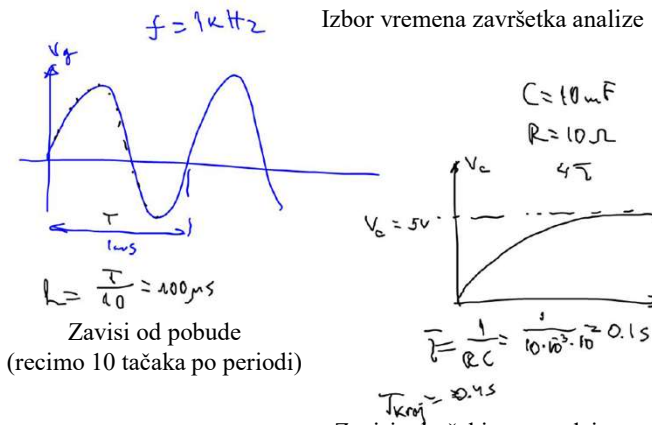
Izbor koraka diskretizacije

Izbor koraka diskretizacije

Kako izabrati pravu veličinu koraka?

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

Izbor vremena završetka analize



Zavisi od očekivanog odziva
Da bi se C napunio treba najmanje $4,3\tau$

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 τ lokalna vremenska konstanta.

Bira se najmanji korak

21.03.2019.

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

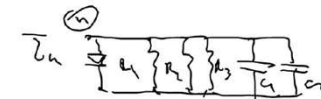
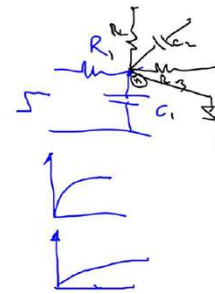
21.03.2019.

37

Analiza kola

Veličina koraka analize $h < \tau/100$

τ_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



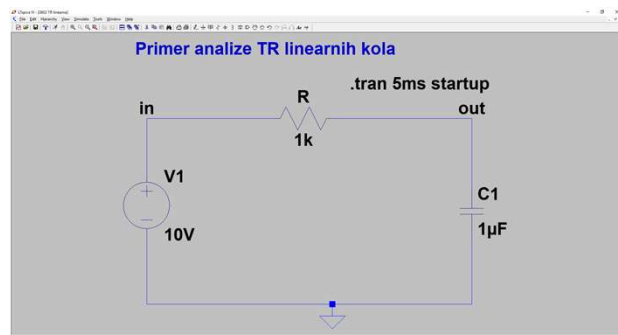
21.03.2019.

38

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

Primer

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



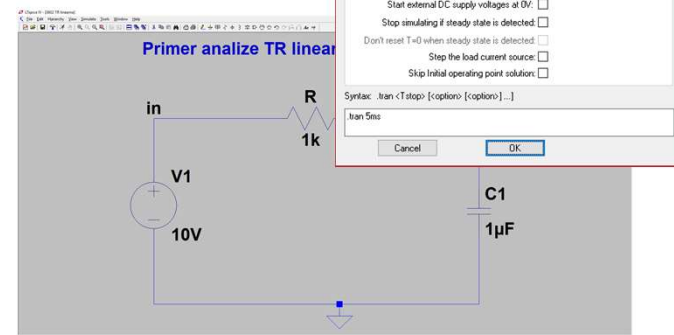
21.03.2019.

39

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

Primer

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

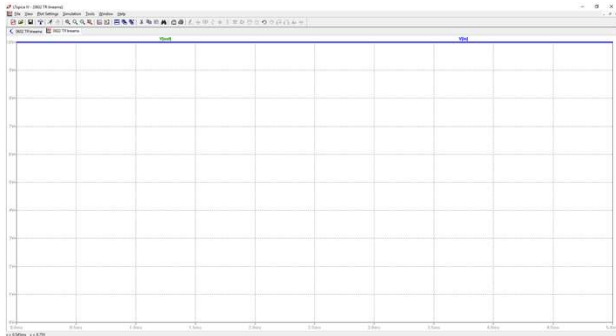


21.03.2019.

40

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

Primer
RC kolo $\tau=1ms$

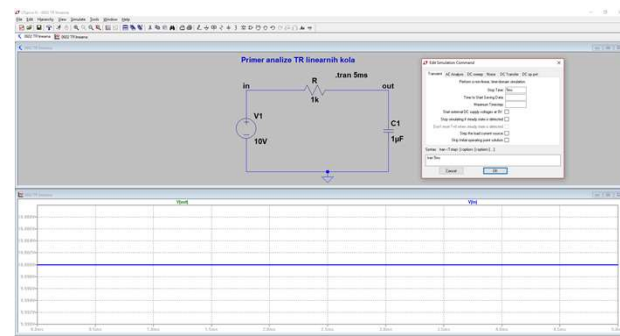


21.03.2019.

41

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

Primer
RC kolo $\tau=1ms$

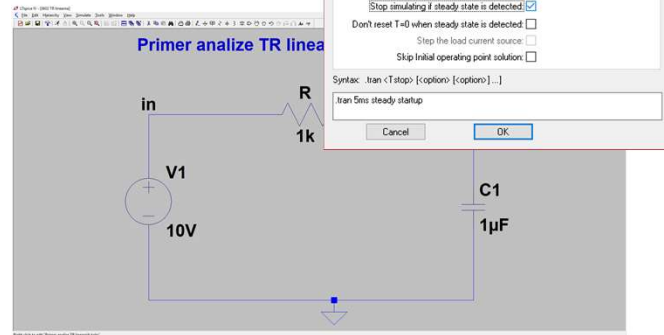


21.03.2019.

42

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

Primer
RC kolo $\tau=1ms$

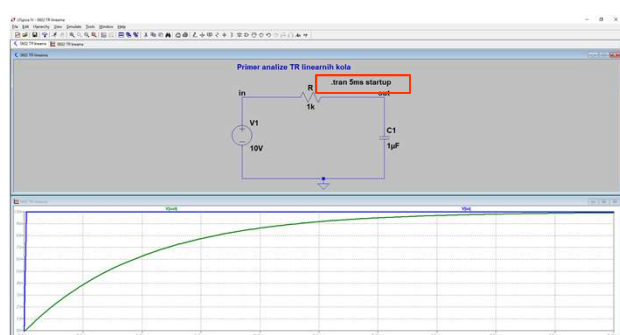


21.03.2019.

43

Analiza linearnih kola u vremenskom domenu

Primer
RC kolo $\tau=1ms$



21.03.2019.

44

Primer

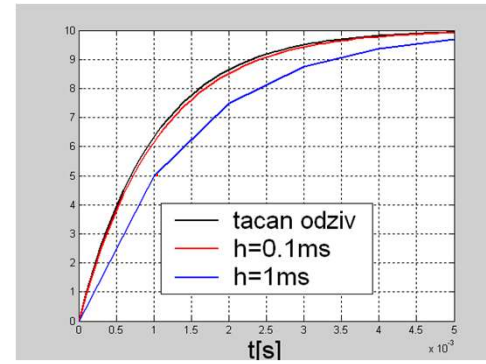
RC kolo $\tau=1\text{ms}$

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

21.03.2019.

45

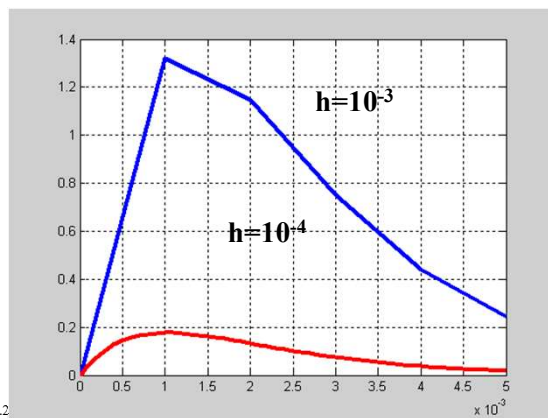
Odziv RC kola $\tau=1\text{ms}$



21.03.2019.

46

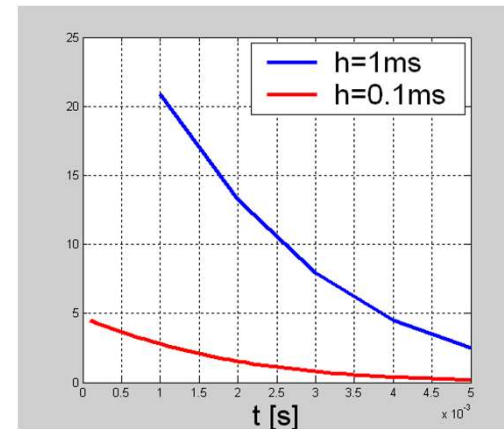
apsolutna greška



21.03.2

47

relativna greška



21.03.2019.

Analiza greške diskretizacije

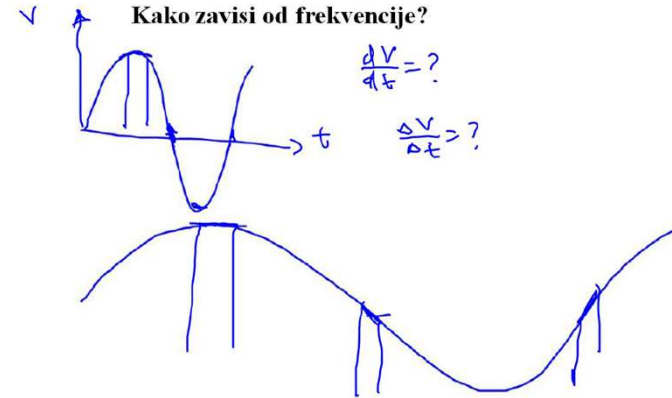
Greška je proporcionalna veličini koraka h i brzini promene \ddot{x} signala

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)

Gde je prvi izvod najveći za sinusnu pobudu?

Kako zavisi od frekvencije?



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:

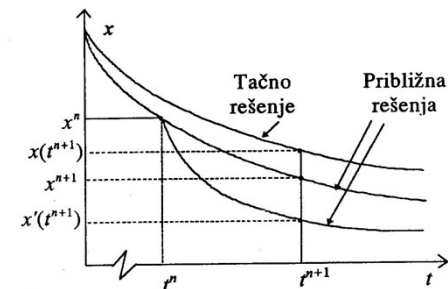
$$h_{min} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Tx}}{\ddot{x}}}$$

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

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

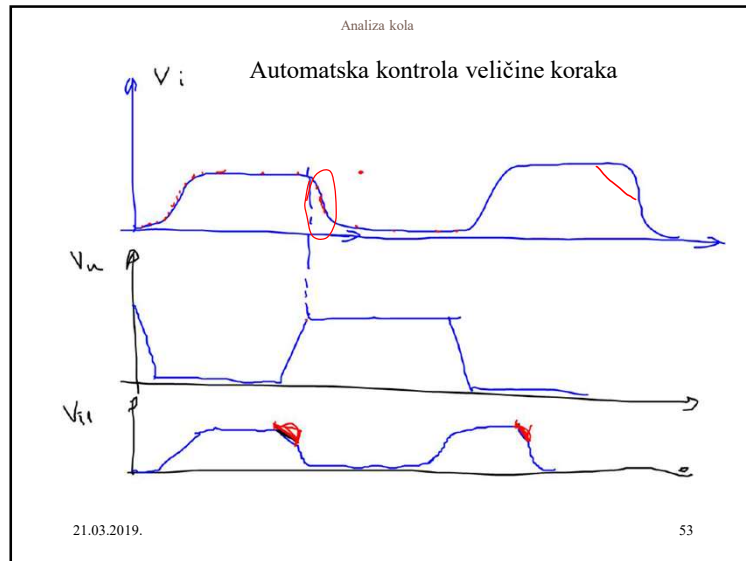
Za jednu periodu !!!

Analiza greške diskretizacije



Greška može da se nagomilava

Ukoliko se ne povećava greška kaže se da je rešenje stabilno



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)

LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation
 21.03.2019. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> **EDA** 54

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:

<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> **EDA** 55

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?