


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/>
30.03.2020.




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/>
30.03.2020.



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 komponenata (gm, 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/>
30.03.2020.



3

Da se podsetimo Projektovanje elektronskih kola


Sušтина je u

- određivanju vrednosti parametara pojedinih komponenata kola (sinteza) i
- proveriti 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**.

LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
30.03.2020.



4

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

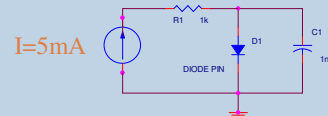
Tipovi analize?

Zavisno od vrste pobude, ima smisla analizirati ponašanje kola u

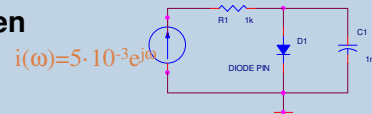
1. jednosmernom domenu (određivanje položaja jednosmerne radne tačke kola).
2. frekvencijskom domenu (frekvencijske karakteristike kola – amplitudska, fazna)
3. vremenskom domenu (talasni oblik napona/struja na izlazu kola pobuđenog impulsima poznatog talasnog oblika)

Tipovi analize kola

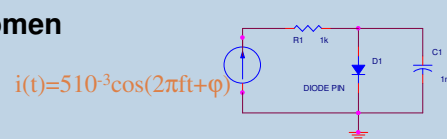
1. Jednosmerni domen (DC analiza)



2. Frekvencijski domen (AC analiza)



3. Vremenski domen (TR analiza)



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, ...)

Da se podsetimo 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, ...	

30.03.2020. 9

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 reaktivnih kola u TR domenu

30.03.2020. 10

Da se podsetimo Analiza kola

Ponašanje nelinearnih reaktivnih kola u vremenskom domenu opisuje se sistemom nelinearnih diferencijalnih jednačina

$v_1(t) - v_2(t) = i(t) R_1$

$v_2(t) - v_1(t) + I_s \left(e^{\frac{v_2(t)}{V_T}} - 1 \right) + C \frac{\partial v_2(t)}{\partial t} = 0$

$v_1(t) = 5 \cdot 10^{-3} \cos(2\pi f t + \varphi)$

Tip kola i analize	Matematički model
5. Nelinearna reaktivna u TR domenu	5. Nelinearne diferencijalne jednačine

30.03.2020.

Da se podsetimo Analiza kola

Tipovi kola i analize	Matematički model
1. Linearna otporna DC domen	1. Linearne algebarske jednačine
2. Linearna reaktivna AC domen	2. Linearne algebarske jednačine (kompleksne)
3. Linearna reaktivna TR domen	3. Linearne diferencijalne jednačine
4. Nelinearna otporna DC domen	4. Nelinearne algebarske jednačine
5. Nelinearna reaktivna TR domen	5. Nelinearne diferencijalne jednačine

30.03.2020. 12

Analiza nelinearnih reaktivnih elektronskih kola

Analiza nelinearnih kola u TR domenu zahteva rešavanje nelinearnih diferencijalnih jednačina (NDJ).

Kao što smo do sada videli, neophodno je transformisati NDJ u sistem linearnih algebarskih jednačina.

To se obavlja u dva koraka:

1. **diskretizacija u vremenu**
2. **za svaku tačku na vremenskoj osi obavlja se linearizacija**

30.03.2020.

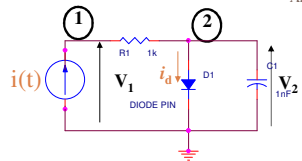
13

Analiza nelinearnih reaktivnih elektronskih kola

1. Diskretizacijom u vremenu, transformiše problem iz kontinualnog vremenskog domena (t) u diskretizovan problem ($t_n, n=0, 1, \dots$), odnosno, sistem nelinearnih diferencijalnih jednačina transformiše se u sistem nelinearnih algebarskih jednačina (za svako t_n).
2. Linearizacijom, za svaku tačku na vremenskoj osi (za svako t_n), sistem nelinearnih algebarskih jednačina transformiše se u sistem linearnih algebarskih jednačina koji se iterativno rešava.

30.03.2020.

14



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

$$\frac{v_2(t) - v_1(t)}{R_1} + I_s \left(e^{\frac{v_2(t)}{V_T}} - 1 \right) + C \frac{\partial v_2(t)}{\partial t} = 0$$

1. Diskretizacija (po vremenskoj osi) –

- nepoznati naponi i struje u trenutku t_{n+1} , $v(t_{n+1}) = v^{n+1}$
- poznate: pobuda u trenutku t_{n+1} , i naponi i struje u trenutku t_n , $v(t_n) = v^n$

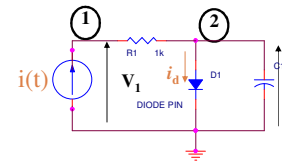
$$\frac{1}{R_1} v_1^{n+1} - \frac{1}{R_1} v_2^{n+1} = i^{n+1}$$

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

Nelinearno

30.03.2020.

15



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

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

2. Linearizacija

- nepoznate: naponi i struje u $m+1$ iteraciji u $n+1$ trenutku, $v(t_{n+1})^{m+1} = v^{n+1, m+1}$
- poznate: pobuda u trenutku t_{n+1} , naponi i struje u naponi i struje u trenutku t_n , $v(t_n) = v^n$ i naponi i struje u trenutku t_{n+1} i prethodnoj, m -toj iteraciji, $v(t_{n+1})^m = v^{n+1, m}$

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

$$-\frac{1}{R_1} v_1^{n+1, m+1} + \frac{1}{R_1} v_2^{n+1, m+1} + i_d^{n+1, m} + G_d^{n+1, m} (v_2^{n+1, m+1} - v_2^{n+1, m}) + \frac{C_1}{h} v_2^{n+1, m+1} = \frac{C_1}{h} v_2^n$$

30.03.2020.

16

Analiza kola

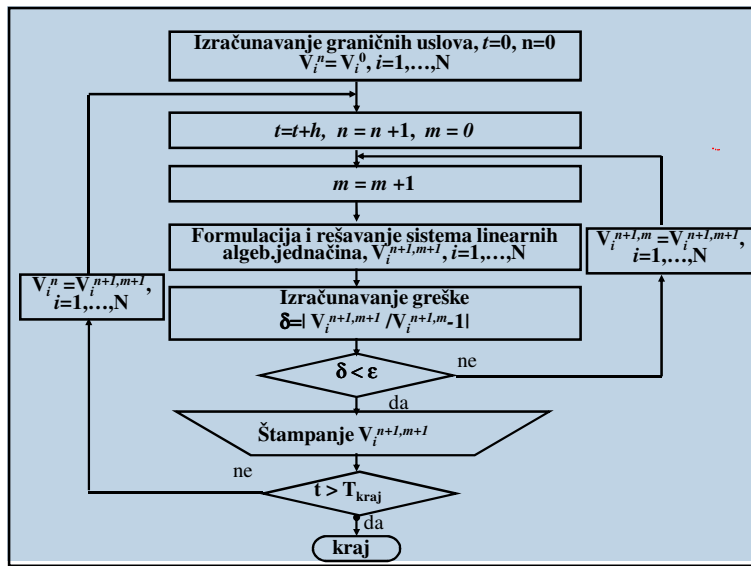
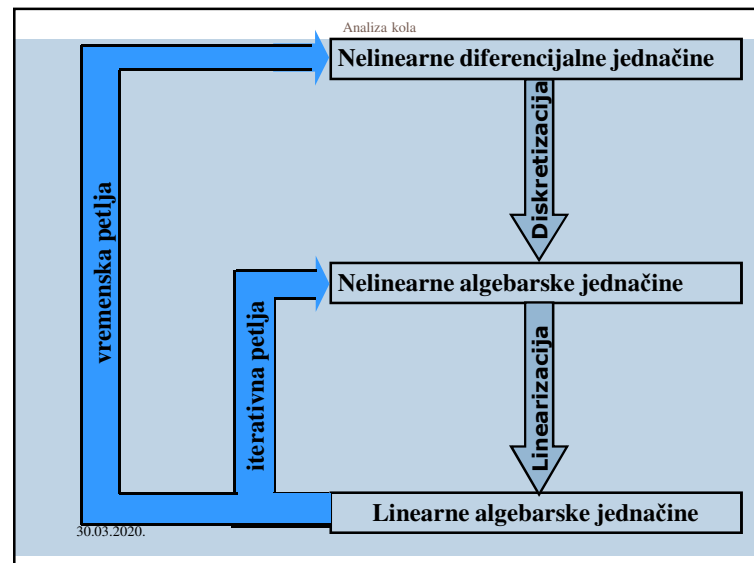
$$\frac{1}{R_1} v_1^{n+1,m+1} - \frac{1}{R_1} v_2^{n+1,m+1} = i^{n+1}$$

$$-\frac{1}{R_1} v_1^{n+1,m+1} + \frac{1}{R_1} v_2^{n+1,m+1} + G_d^{n+1,m} v_2^{n+1,m+1} + \frac{C_1}{h} v_2^{n+1,m+1} = \frac{C_1}{h} v_2^n - i_d^{n+1,m} + G_d^{n+1,m} v_2^{n+1,m}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + G_d^{n+1,m} + \frac{C_1}{h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^{n+1,m+1} \\ v_2^{n+1,m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i^{n+1} \\ \frac{C_1}{h} v_2^n - i_d^{n+1,m} + G_d^{n+1,m} v_2^{n+1,m} \end{bmatrix}$$

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

30.03.2020. 17



Analiza kola

Diskretizacija vremenske ose.

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

Za svaku tačku na vremenskoj osi treba iterativno naći rešenje. Za početno rešenje u trenutku $t=t_{n+1}$ uzima se rešenje izračunato u trenutku $t=t_n$

Ako je vremenska osa diskretizovana u 10 000 tačaka a za rešavanje je potrebno po 10 iteracija, ukupno treba formirati i rešiti sistem linearnih algebarskih jednačina 100 000 puta!

30.03.2020. 20

Analiza kola

Šta može Spice TR nelinearn

Primer TR analize nelinearnih kola

`.tran 10ms`

30.03.2020. 21

Analiza kola

Šta može Spice TR nelinearna?

Primer TR analize nelinearnih kola

30.03.2020. 22

Analiza kola

Time završavamo teoretski deo predavanja iz analize elektronskih kola.

Dalje sledi ukazivanje na neke od problema koji se mogu javiti.

30.03.2020. 23

Analiza kola

Automatska kontrola veličine koraka naročito značajna pri TR analizi nelinearnih kola jer se vremenske konstante u istom čvoru drastično menjaju u zavisnosti od polarizacije poluprovodničkih komponenata.

24

Kod analize realnih kola mogu se uočiti određene situacije, koje na prvi pogled zbunjuju, ali su posledica fizičkih promena u kolu.

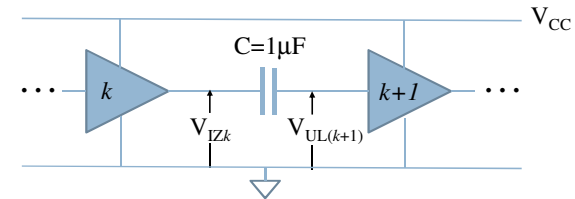
Na primer, poznato je da kapacitivnosti za spregu treba da imaju što veće vrednosti, kako bi njihova impedansa bila što manja i pri najnižim frekvencijama u propusnom opsegu.

Sa druge strane, napon na velikim kapacitivnostima se sporo menja, sporo se puni, odnosno dostiže ustaljeno stanje.

30.03.2020.

25

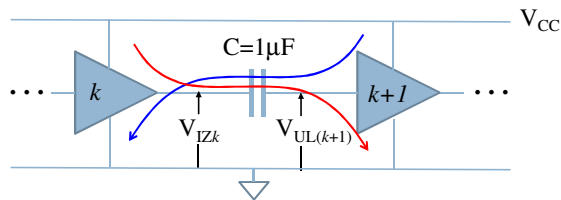
Pretpostavimo da se između dva stepena nalazi kondenzator, $C=1\mu\text{F}$.



On razdvaja DC napon na izlazu k -tog stepena, V_{IZk} , od DC napona na ulazu sledećeg, $k+1$ stepena, $V_{UL(k+1)}$, tako da mora da se napuni na vrednost $V_{IZk} - V_{UL(k+1)}$.

30.03.2020.

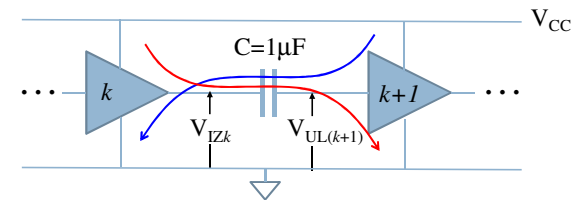
26



Za njegovo punjenje potrebno je najmanje 4τ . Ukoliko se puni preko velikih otpornosti, recimo da su $10k$ (što je realno), potrebno je da prođe 40ms , da bi se napunio.

30.03.2020.

27



Ukoliko se kolo analizira pri pobudi od 10kHz , to bi značilo da će se uspostaviti ustaljeni režim tek posle 400 perioda!!!

To se događa i u realnim kolima ali za kratko vreme, posle uključivanja kola (40ms) tako to osciloskopom ne možemo da vidimo

30.03.2020.

28

Kako odrediti pravu vrednost za kapacitivnosti za spregu C?

Proceniti C tako da reaktansa bude zanemariva u odnosu na ostale otpornosti u kolu pri najmanjoj radnoj frekvenciji f .

Primer:

Za $X_c < 10\Omega$, potrebno je da na $f=20\text{Hz}$:

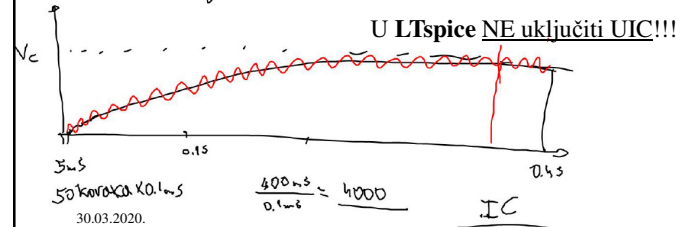
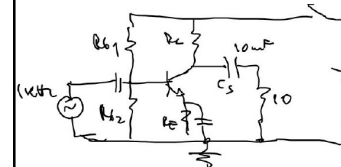
$$|X_c| = \frac{1}{\omega C} < 10$$

$$C > \frac{1}{10\omega C} = \frac{1}{10 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1}{10 \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 20} \approx 800\mu\text{F}$$

Za $C=1\text{mF}$ koji se puni preko $R=0.1\text{k}\Omega$, $\tau=0.1\text{s}$. To znači da se ustaljeni režim može očekivati posle 400ms.

Ukoliko bi se tražila analiza pri $f=1\text{kHz}$, bilo bi potrebno analizirati kolo za 400 perioda, dok se ne dostigne ustaljeni režim.

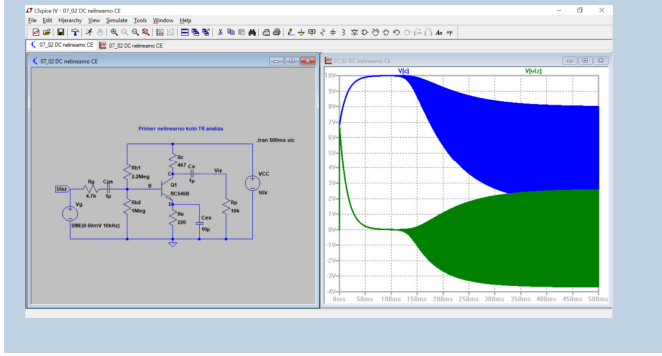
Da ne bismo „čekali“ da se uspostavi ustaljeno stanje (C napunjen na DC, $4\tau=0.4\text{s}$, što je za pobudu od 1kHz 400 perioda) treba koristiti **Spice** naredbu **.IC Initial Condition** čime se mogu zadati inicijalne vrednosti napona na kondenzatorima, odnosno strujama kroz kalemove.



Šta može Spice?

Šta može Spice?

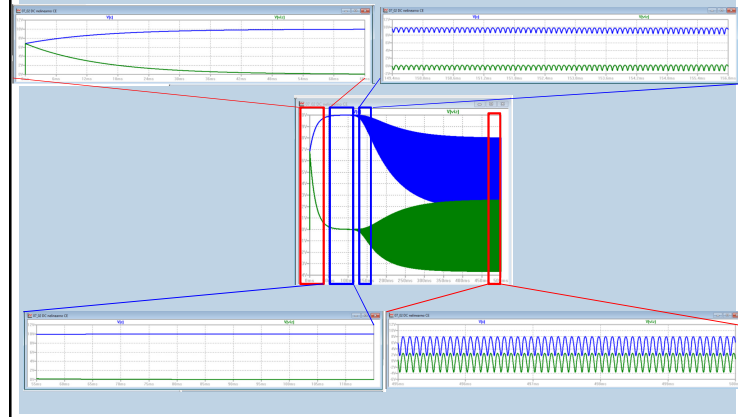
Šta može Spice?



30.03.2020.

33

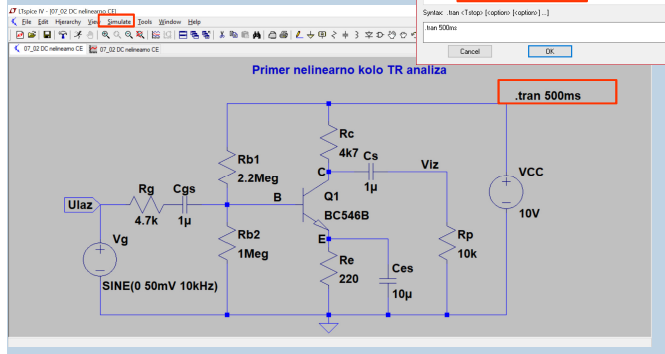
Šta može Spice?



30.03.2020.

34

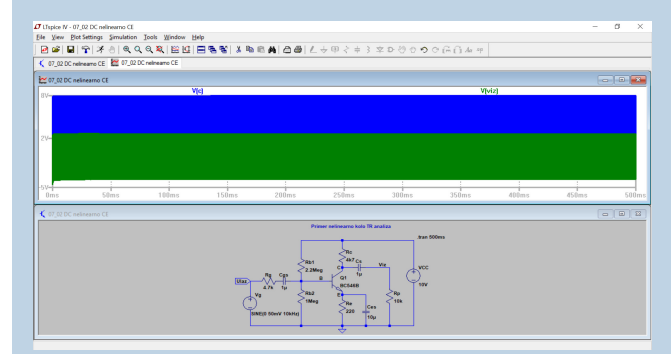
Šta može Spice?



30.03.2020.

35

Šta može Spice?



30.03.2020.

36

Analiza kola

Šta može Spice?

LTSpice IV - 07_03 DC nelinearno CE

Primer nelinearno kolo TR analiza

`.tran 1ms`

30.03.2020. 37

Analiza kola

Šta može Spice?

LTSpice IV - 07_02 DC nelinearno CE

30.03.2020. 38

Analiza kola

Šta može Spice?

LTSpice IV - 07_02 DC nelinearno CE

30.03.2020. 39

Analiza kola

Šta može Spice TR nelinearno

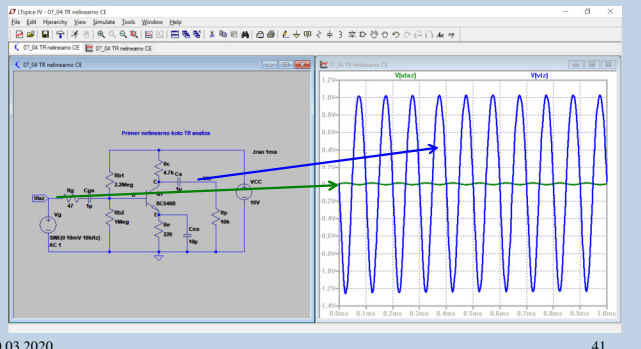
LTSpice IV - 07_04 TR nelinearno CE

Primer nelinearno kolo TR analiza

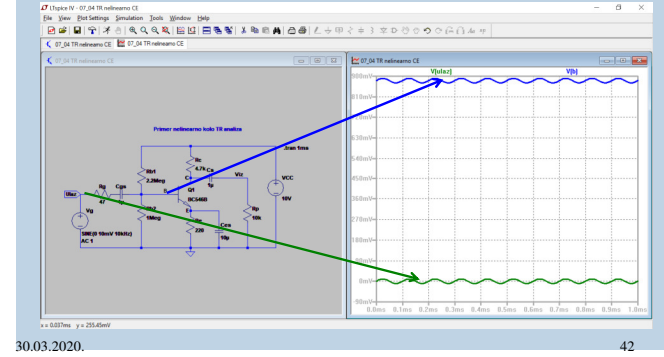
`.tran 1ms`

30.03.2020. 40

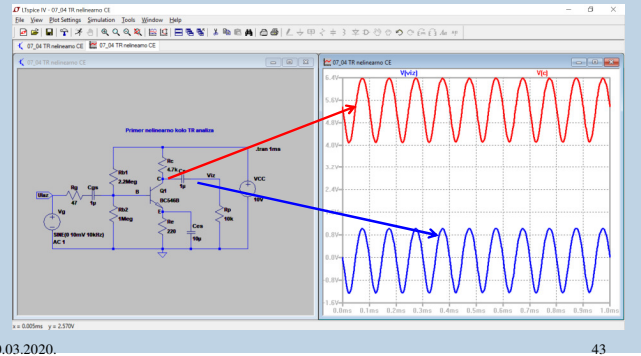
Šta može Spice TR nelinearna?



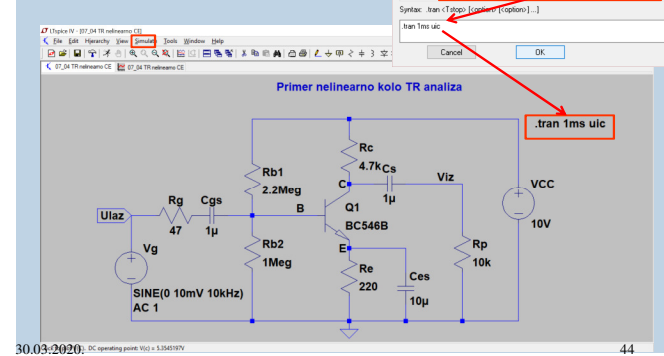
Šta može Spice TR nelinearna?



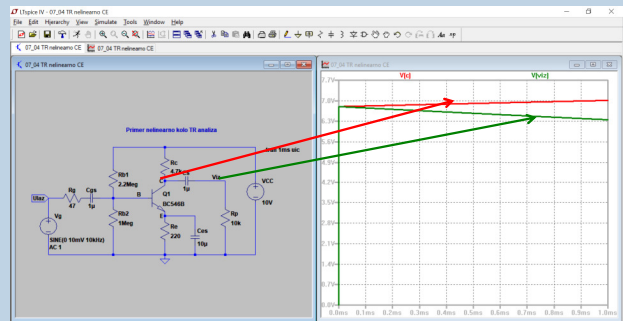
Šta može Spice TR nelinearna?



Šta može Spice TR nelinearna?



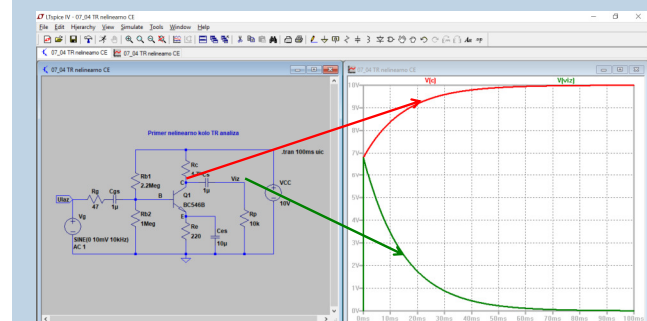
Šta može Spice TR nelinearna?



30.03.2020.

45

Šta može Spice TR nelinearna?



30.03.2020.

46

Postupak analize kola pomoću računara zahteva da se ponašanje kola

- opiše sistemom jednačina,
- rešavanje sistema jednačina

Efikasnost analize kola zavisi od efikasnosti obe navedene aktivnosti

30.03.2020.

47

Algoritme primenjene u programima za analizu kola karakterišu:

1. Jednostavnost formulacije jednačina
2. Optimalno zauzeća memorije
3. Brzina
4. Tačnost rešenja

Pokazalo se da je primena modifikovane metode čvorova (MMC) veoma pogodna za formulaciju sistema jednačina

30.03.2020.

48

Analiza nelinearnih kola u TR domenu

Šta treba da znamo?

Elementarno (za potpis)

Ako je vremenska osa diskretizovana u 10 000 tačaka a za rešavanje sistema nelinearnih jednačina je potrebno po 10 iteracija, koliko puta ukupno treba formirati i rešiti sistem linearnih jednačina.

Osnovno (za 6)

1. **Koji značaj ima zadavanje graničnih vrednosti u trenutku $t=0$ (.IC u programu PSpice, odnosno UIC u programu LTSpice) na rezultat TR analize nelinearnih kola?**

Analiza nelinearnih kola u TR domenu

Šta treba da znamo?

Ispitna pitanja

- a) **Analiza nelinearnih reaktivnih kola (TR domen) – opšti algoritam?**
- b) **Koja vrednost se uzima za početno rešenje u trenutku $t=t_{n+1}$?**
- c) **Objasniti značaj automatske kontrole koraka integracije u analizi nelinearnih reaktivnih kola u TR domenu?**

Projektovanje elektronskih kola

Sadržaj:

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