


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/>
16.03.2020.




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/>
16.03.2020.



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 (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/>
16.03.2020.




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 komponenata (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/>
16.03.2020.



4

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  pla.

16.03.2020.

5

Da se podsetimo **Projektovanje elektronskih kola**

Projektovanje analognih kola

Funkcija => šta hoćemo

Šema => kako realizovati

Šta nedostaje?

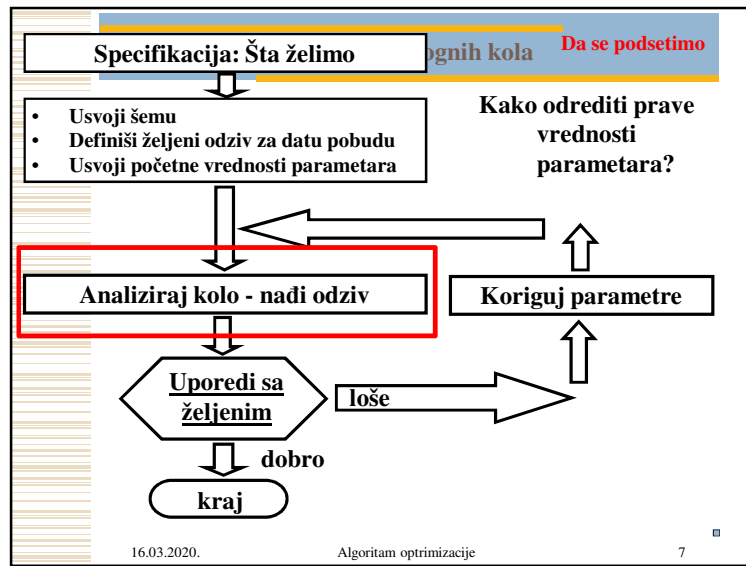
Vrednosti parametara da bi se dobio željeni odziv

Kako odrediti prave vrednosti parametara?

LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation
<http://leda.elfak.ni.ac.rs/>
21.03.2016.



6



16.03.2020.

Algoritam optimizacije

7

Da se podsetimo **Projektovanje elektronskih kola**

Tokom svakog koraka neophodno je **analizirati ponašanje kola** sa korigovanim vrednostima parametara.

Zato ovaj deo projektovanja počinjemo upoznavanjem sa metodama za analizu elektronskih kola u okviru poglavlja

ANALIZA ELEKTRONSKIH KOLA pomoću računara (a kako bi inače?)

16.03.2020.



8

Analiza kola

Da se podsetimo **Analiza kola**

Tipovi analize?

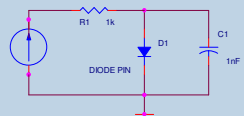
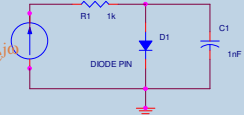
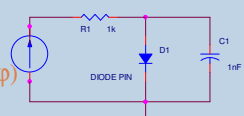
a) Zavisno od vrste pobude, ima smisla analizirati ponašanje kola u

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)

16.03.2020. 9

Analiza kola

Da se podsetimo **Tipovi analize kola**

1. Jednosmerni domen (DC analiza) $I=5\text{mA}$

2. Frekvencijski domen (AC analiza) $i(\omega)=5 \cdot 10^{-3} e^{j\omega t}$

3. Vremenski domen (TR analiza) $i(t)=5 \cdot 10^{-3} \cos(2\pi f t + \varphi)$


16.03.2020. 10

Analiza kola

Da se podsetimo **Analiza kola**

Tipovi analize?

b) 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, ...)

16.03.2020. 11

Analiza kola

Da se podsetimo

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, ...	

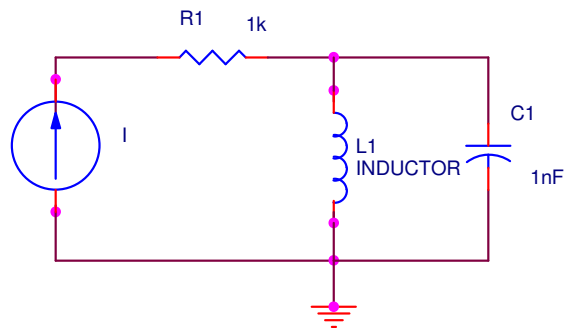
16.03.2020. 12

Analiza elektronskih kola

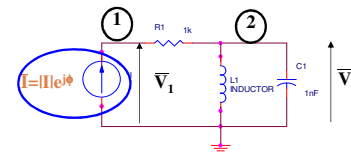
1. Uvod
2. Analiza linearnih kola u DC domenu (jednosmerni režim)
3. Analiza linearnih kola u AC domenu (frekvencijski domen)
4. Analiza linearnih kola u TR domenu (vremenski domen)
5. Analiza nelinearnih kola u DC domenu
6. Analiza nelinearnih kola u TR domenu

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



Ponašanje linearnih reaktivnih kola u frekvencijskom domenu opisuje se sistemom linearnih algebarskih jednačina sa kompleksnim koeficijentima



$$\frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{R_1} = \bar{I}$$

$$\frac{\bar{V}_2 - \bar{V}_1}{R_1} + \frac{\bar{V}_2}{j\omega \cdot L_1} + j\omega \cdot C_1 \bar{V}_2 = 0$$

Tip kola i analize
2. Linearna reaktivna u AC domenu

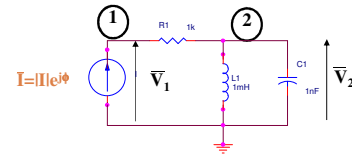
Matematički model
2. Linearne algebarske jednačine sa kompleksnim koeficijentima

Matematički model

- 2. Linearne jednačine kompleksne
- 3. Linearne diferencijalne jednačine
- 4. Nelinearne algebarske jednačine
- 5. Nelinearne diferencijalne jednačine

Način rešavanja sistema j-na

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



$$\frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{R_1} = \bar{I}$$

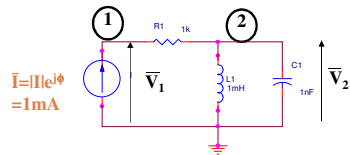
$$\frac{\bar{V}_2 - \bar{V}_1}{R_1} + \frac{\bar{V}_2}{j\omega \cdot L_1} + j\omega \cdot C_1 \bar{V}_2 = 0$$

$$\frac{1}{R_1} \bar{V}_1 - \frac{1}{R_1} \bar{V}_2 = \bar{I}$$

$$-\frac{1}{R_1} \bar{V}_1 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{j\omega \cdot L_1} + j\omega \cdot C_1 \right) \bar{V}_2 = 0$$

$$10^{-3} \bar{V}_1 - 10^{-3} \bar{V}_2 = \bar{I}$$

$$-10^{-3} \bar{V}_1 + \left(10^{-3} + \frac{1}{j\omega \cdot 10^{-3}} + j\omega \cdot 10^{-9} \right) \bar{V}_2 = 0$$

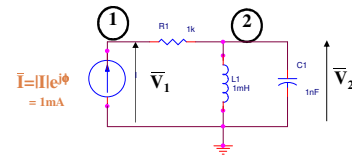


$$\frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{R_1} = \bar{I}$$

$$\frac{\bar{V}_2 - \bar{V}_1}{R_1} + \frac{\bar{V}_2}{j\omega \cdot L_1} + j\omega \cdot C_1 \bar{V}_2 = 0$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{j\omega \cdot L_1} + j\omega \cdot C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{\underline{\mathbf{Y} \cdot \underline{\underline{\mathbf{v}}} = \underline{\underline{\mathbf{i}}}}$$

$$\begin{bmatrix} 10^{-3} & -10^{-3} \\ -10^{-3} & 10^{-3} - \frac{j}{\omega \cdot 10^{-3}} + j\omega \cdot 10^{-9} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} \\ 0 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{j\omega \cdot L_1} + j\omega \cdot C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + j(\omega \cdot C_1 - \frac{1}{\omega \cdot L_1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{1r} + j\bar{V}_{1i} \\ \bar{V}_{2r} + j\bar{V}_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_r + j\bar{I}_i \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 10^{-3} & -10^{-3} \\ -10^{-3} & 10^{-3} + j(\omega \cdot 10^{-9} - \frac{1}{\omega \cdot 10^{-3}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{1r} + j\bar{V}_{1i} \\ \bar{V}_{2r} + j\bar{V}_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} + j0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Analiza kola

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1} + j(\omega \cdot C_1 - \frac{1}{\omega \cdot L_1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1r} + jV_{1i} \\ V_{2r} + jV_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r + jI_i \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11r} + j \cdot Y_{11i} & Y_{12r} + j \cdot Y_{12i} \\ Y_{21r} + j \cdot Y_{21i} & Y_{22r} + j \cdot Y_{22i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{1r} + j \cdot V_{1i} \\ V_{2r} + j \cdot V_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r + j \cdot I_i \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$(\underline{Y}_r + j \cdot \underline{Y}_i) \cdot (\underline{v}_r + j \cdot \underline{v}_i) = \underline{i}_r + j \cdot \underline{i}_i$$

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_r & -\underline{Y}_i \\ \underline{Y}_i & \underline{Y}_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{v}_r \\ \underline{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{i}_r \\ \underline{i}_i \end{bmatrix}; \quad \text{ili} \quad \begin{bmatrix} -\underline{Y}_i & \underline{Y}_r \\ \underline{Y}_r & -\underline{Y}_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{v}_i \\ \underline{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{i}_r \\ \underline{i}_i \end{bmatrix}$$

16.03.2020. 21

Analiza kola

$$\begin{bmatrix} 10^{-3} & -10^{-3} \\ -10^{-3} & 10^{-3} + j(\omega \cdot 10^{-9} - \frac{1}{\omega \cdot 10^{-3}}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{1r} + jV_{1i} \\ V_{2r} + jV_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} + j0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{Y}_r = \begin{bmatrix} 10^{-3} & -10^{-3} \\ -10^{-3} & 10^{-3} \end{bmatrix} \quad \text{ili} \quad \underline{Y}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & j(\omega \cdot 10^{-9} - \frac{1}{\omega \cdot 10^{-3}}) \end{bmatrix}$$

16.03.2020. 22

Analiza kola

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_r & -\underline{Y}_i \\ \underline{Y}_i & \underline{Y}_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{v}_r \\ \underline{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{i}_r \\ \underline{i}_i \end{bmatrix}$$

$$\left[\begin{array}{cc|cc} 10^{-3} & -10^{-3} & 0 & 0 \\ -10^{-3} & 10^{-3} & 0 & -(\omega \cdot 10^{-9} - \frac{1}{\omega \cdot 10^{-3}}) \\ \hline 0 & 0 & 10^{-3} & -10^{-3} \\ 0 & (\omega \cdot 10^{-9} - \frac{1}{\omega \cdot 10^{-3}}) & -10^{-3} & 10^{-3} \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} v_{1r} \\ v_{2r} \\ v_{1i} \\ v_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Red matrice 2x veći, ali je gustina matrice manja

16.03.2020. 23

Analiza kola

$$\text{Za } \omega = 10^3 \text{ rad/s} \quad \begin{bmatrix} 10^{-3} & -10^{-3} & 0 & 0 \\ -10^{-3} & 10^{-3} & 0 & -(10^{-6} - 1) \\ 0 & 0 & 10^{-3} & -10^{-3} \\ 0 & (10^{-6} - 1) & -10^{-3} & 10^{-3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{1r} \\ v_{2r} \\ v_{1i} \\ v_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Za } \omega = 10^6 \text{ rad/s} \quad \begin{bmatrix} 10^{-3} & -10^{-3} & 0 & 0 \\ -10^{-3} & 10^{-3} & 0 & -(0) \\ 0 & 0 & 10^{-3} & -10^{-3} \\ 0 & (0) & -10^{-3} & 10^{-3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{1r} \\ v_{2r} \\ v_{1i} \\ v_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Za } \omega = 10^9 \text{ rad/s} \quad \begin{bmatrix} 10^{-3} & -10^{-3} & 0 & 0 \\ -10^{-3} & 10^{-3} & 0 & -(1 - 10^6) \\ 0 & 0 & 10^{-3} & -10^{-3} \\ 0 & (1 - 10^6) & -10^{-3} & 10^{-3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{1r} \\ v_{2r} \\ v_{1i} \\ v_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

16.03.2020. 24

Analiza kola

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{Y}_i & \mathbf{Y}_r \\ \mathbf{Y}_r & \mathbf{Y}_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_i \\ \mathbf{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_r \\ \mathbf{i}_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 10^{-3} & -10^{-3} \\ 0 & -(\omega \cdot 10^{-9} - \frac{1}{\omega \cdot 10^{-3}}) & -10^{-3} & 10^{-3} \\ 10^{-3} & -10^{-3} & 0 & 0 \\ -10^{-3} & 10^{-3} & 0 & (\omega \cdot 10^{-9} - \frac{1}{\omega \cdot 10^{-3}}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{1i} \\ v_{2i} \\ v_{1r} \\ v_{2r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

16.03.2020. 25

Analiza kola

Za $\omega=10^6 \text{ rad/s}$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 10^{-3} & -10^{-3} \\ 0 & -(0) & -10^{-3} & 10^{-3} \\ 10^{-3} & -10^{-3} & 0 & 0 \\ -10^{-3} & 10^{-3} & 0 & (0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{1i} \\ v_{2i} \\ v_{1r} \\ v_{2r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

16.03.2020. 26

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize AC linearni

`.ac dec 5 10 500k`

16.03.2020. 27

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize AC linearnih kola

16.03.2020. 28

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize AC linearnih kola

ac dec 10 10 500k

16.03.2020. 29

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize AC linearnih kola

ac dec 10 10 500k

16.03.2020. 30

Analiza kola

Postoji potpuna korespondencija sa elementima linearnih otpornih kola

R

Z

C

L

$Z_C = 1/j\omega C$

$Z_L = j\omega L$

16.03.2020. 31

Analiza kola

Spregnute induktivnosti

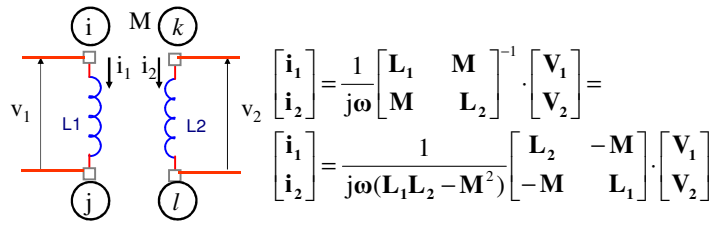
$$V_1 = j\omega L_1 i_1 + j\omega M i_2$$

$$V_2 = j\omega M i_1 + j\omega L_2 i_2$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L_1 & j\omega M \\ j\omega M & j\omega L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

16.03.2020. 32

Spregnute induktivnosti

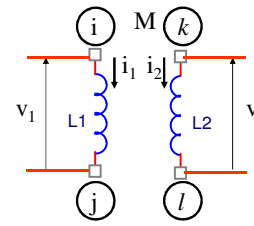


16.03.2020.

33

Automatizacija formulacije jednačina

Spregnute induktivnosti



$$\mathbf{i}_1 = \frac{1}{j\omega\mathbf{L}_{11}} \mathbf{V}_1 - \frac{1}{\mathbf{Z}} \mathbf{V}_2$$

$$\mathbf{i}_2 = -\frac{1}{\mathbf{Z}} \mathbf{V}_1 + \frac{1}{j\omega\mathbf{L}_{22}} \mathbf{V}_2$$

$$\mathbf{L}_{11} = \frac{\mathbf{L}_1\mathbf{L}_2 - \mathbf{M}^2}{\mathbf{L}_2}$$

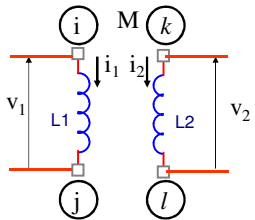
$$\mathbf{L}_{22} = \frac{\mathbf{L}_1\mathbf{L}_2 - \mathbf{M}^2}{\mathbf{L}_1}$$

$$\mathbf{Z} = j\omega \frac{\mathbf{L}_1\mathbf{L}_2 - \mathbf{M}^2}{\mathbf{M}}$$

16.03.2020.

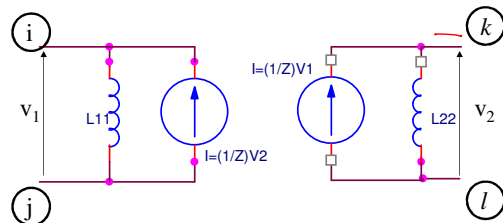
34

Spregnute induktivnosti



$$\mathbf{i}_1 = \frac{1}{j\omega\mathbf{L}_{11}} \mathbf{V}_1 - \frac{1}{\mathbf{Z}} \mathbf{V}_2$$

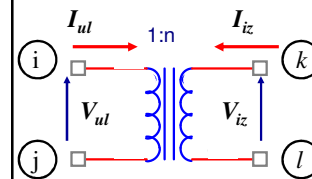
$$\mathbf{i}_2 = -\frac{1}{\mathbf{Z}} \mathbf{V}_1 + \frac{1}{j\omega\mathbf{L}_{22}} \mathbf{V}_2$$



16.03.2020.

35

Transformator



$$\mathbf{I}_{ul} = -n\mathbf{I}_{iz}$$

$$n(\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j) = \mathbf{V}_k - \mathbf{V}_l$$

16.03.2020.

36

Analiza kola

Transformator

$$I_{ul} = -nI_{iz}$$

$$n(V_i - V_j) = V_k - V_l$$

16.03.2020. 37

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize AC linearnih kola

.ac oct 500 100 100MEG

.step param R LIST 10 100 1k

16.03.2020. 38

Analiza kola

Šta može Spice?

Primer analize AC linearnih kola

16.03.2020. 39

Analiza kola

Kako se predstavljaju nelinearne komponente:

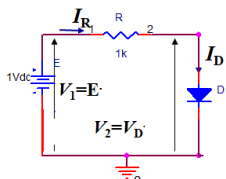
- Diode
- BJT
- MOST

pri AC analizi?

Predstavljaju se modelima za male signale
(kako mali signal vidi nelinearnu karakteristiku)

16.03.2020. 40

-Dioda u elektronskom kolu

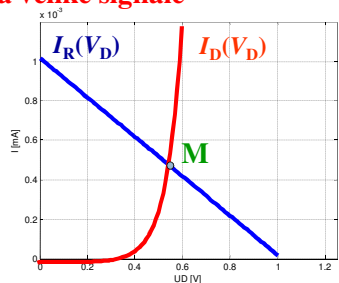


Model diode – nelinearan – za velike signale

$$\frac{E - V_D}{R} = I_R$$

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

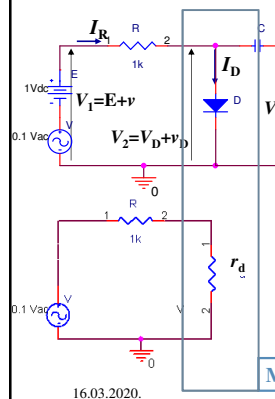
16.03.2020.



Dioda

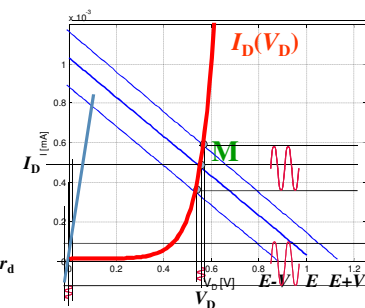
-Dioda u elektronskom kolu

Grafička interpretacija problema

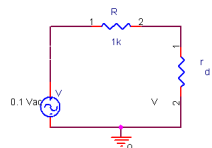


16.03.2020.

Model za male signale



Dioda VAŽNO model za male signale

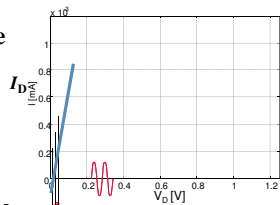


koristi se u analizi ponašanja kola pobuđenih malim naizmeničnim signalima.

Tada se svi elementi kola zamenjuju **dinamičkim parametrima**

Dinamički parametar diode jeste **unutrajnja otpornost diode u radnoj tački.**

16.03.2020.



$$r_d = \frac{dV_D}{dI_D} \approx \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

$$r_d = \frac{1}{\frac{dI_D}{dV_D}} \approx \frac{1}{I_S e^{V_D/V_T} \cdot \frac{1}{V_T}}$$

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

Dioda Spice model:

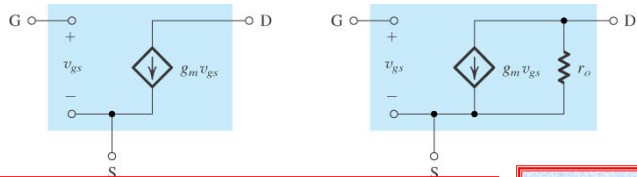
http://www.acsu.buffalo.edu/~wic/applet/spice_pndiode/spice_diode_table.html

Diode SPICE parameters

Symbol	Name	Parameter	Units	Default
IS	IS	Saturation current (diode equation)	A	1E-14
RS	RS	Parasitic resistance (series resistance)	Ω	0
n	N	Emission coefficient, 1 to 2	-	1
TT	TT	Transit time	s	0
CJO(0)	CJO	Zero-bias junction capacitance	F	0
φ0	VJ	Junction potential	V	1
m	M	Junction grading coefficient	-	0.5
-	-	0.33 for linearly graded junction	-	-
-	-	0.5 for abrupt junction	-	-
ES	EG	Activation energy:	eV	1.11
-	-	Si: 1.11	-	-
-	-	Ge: 0.67	-	-
-	-	Schottky: 0.69	-	-
PT	XTI	IS temperature exponent	-	3.0
-	-	pn junction: 3.0	-	-
-	-	Schottky: 2.0	-	-
K1	KF	Flicker noise coefficient	-	0
AF	AF	Flicker noise exponent	-	1
FC	FC	Forward bias depletion capacitance coefficient	-	0.5
BV	BV	Reverse breakdown voltage	V	∞
IBV	IBV	Reverse breakdown current	A	1E-3

16.03.2020.

Model MOS tranzistora za male signale



$$g_m = \mu_n C'_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)} = \frac{2I_D}{V_{OV}} \quad r_o = \frac{V_A}{I_D}$$

$$\left(g_m r_o \equiv \mu = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} = \frac{\partial V_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{2V_A}{(V_{GS} - V_t)} \right) \quad (r_o \equiv R_i)$$

16.03.2020.

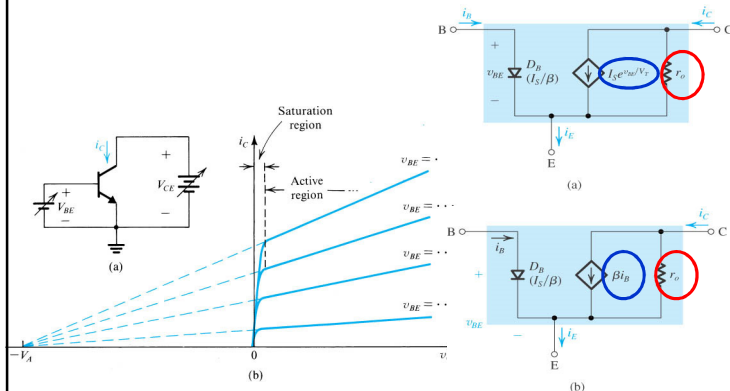
MOS tranzistor Spice model

<https://techweb.rohm.com/knowledge/simulation/s-simulation/01-s-simulation/8331>

https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter7/ch7_5.htm

16.03.2020.

Tranzistor



16.03.2020.

47

BJT Spice model

<https://www.youspice.com/spice-modeling-of-a-bjt-from-datasheet/>

https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter5/pdf/ch5_6_3.pdf

Pri AC analizi sve komponente se zamenjuju linearnim modelima!

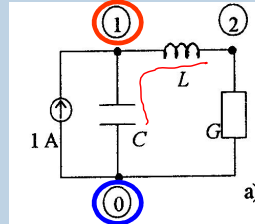
- AC podrazumeva analizu LINEARNIH kola
- Sadrže reaktivne komponente (L i C)

Njih opisuje sistem linearnih algebarskih jednačina sa kompleksnim koeficijentima.

Rešavaju se LU faktorizacijom (Gaus)
Izazovi i specifičnosti AC analize?

Izazovi i specifičnosti AC analize?

Primer



$$\begin{bmatrix} j\omega C - j\frac{1}{\omega L} & j\frac{1}{\omega L} \\ j\frac{1}{\omega L} & G - j\frac{1}{\omega L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Izazovi i specifičnosti AC analize?

$$Y_i = \begin{bmatrix} j\omega C - \frac{j}{\omega L} & +\frac{j}{\omega L} \\ -\frac{j}{\omega L} & -\frac{j}{\omega L} \end{bmatrix}$$

$$Y_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix}$$

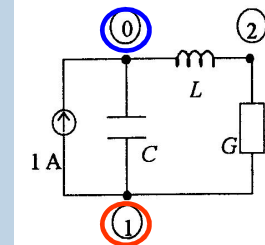
$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

	V_1	V_2	
①	$j\omega C + \frac{j}{\omega L}$	$+\frac{j}{\omega L}$	I
②	$+\frac{j}{\omega L}$	$-\frac{j}{\omega L} \quad L+G$	

$V_C = V_1$
 $V_L = V_1 - V_2$
 $V_G = V_2$

Izazovi i specifičnosti AC analize?

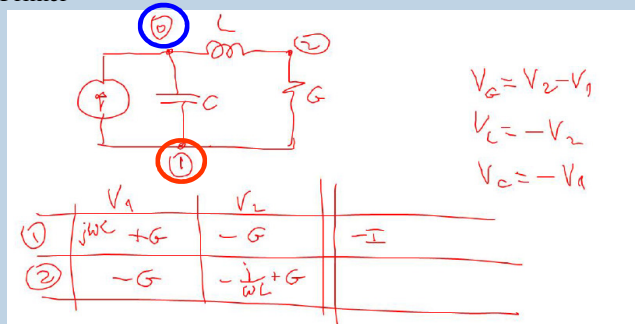
Primer



$$\begin{bmatrix} j\omega \cdot C + G & -G \\ -G & G - \frac{j}{\omega \cdot L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I \\ 0 \end{bmatrix}$$

Izazovi i specifičnosti AC analize?

Primer



16.03.2020.

53

Karakteristike analize u AC domenu:

Analiza od f_d do f_g

Voditi računa o veličini koraka i veličini propusnog opsega kola koje se analizira.

Svi modeli poluprovodničkih komponentata su linearni i malosignalni. U Spice-u uvek se najpre obavi DC analiza, da bi se odredio položaj radne tačke, a zatim se izračunavaju parametri modela.

16.03.2020.

54

Izbor koraka frekvencije

Logaritamska skala

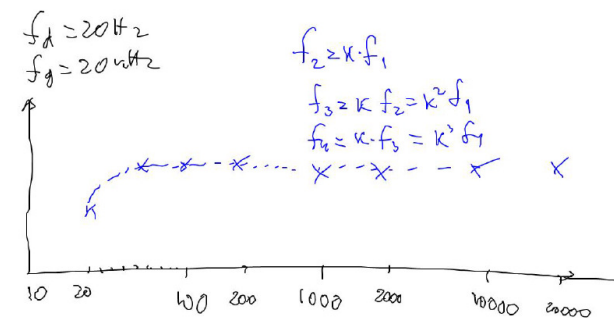
Broj tačaka po dekadi/oktavi

Linearna skala

$$\Delta_f = (f_g - f_d) / N$$

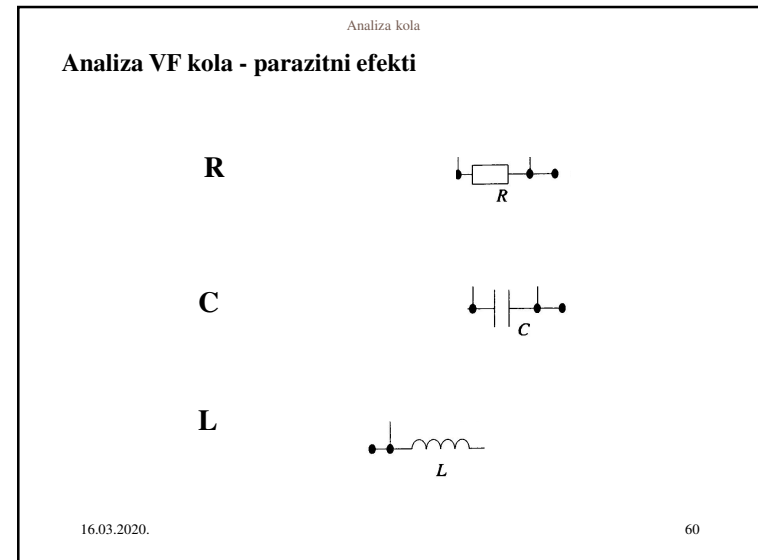
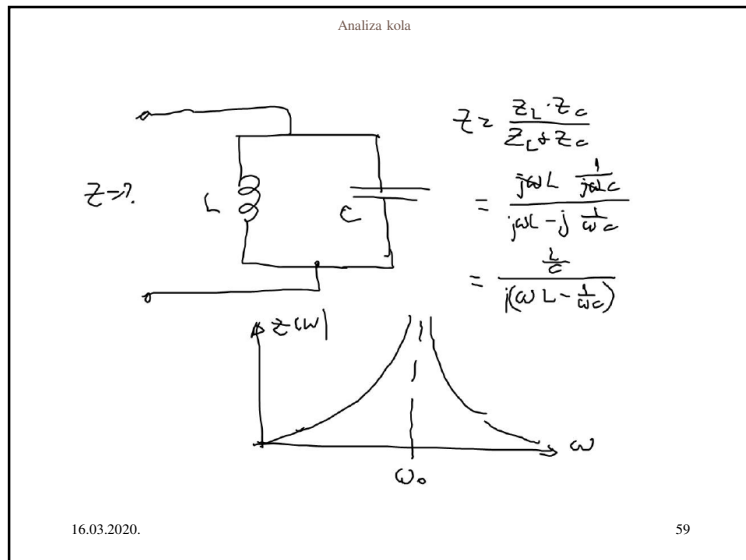
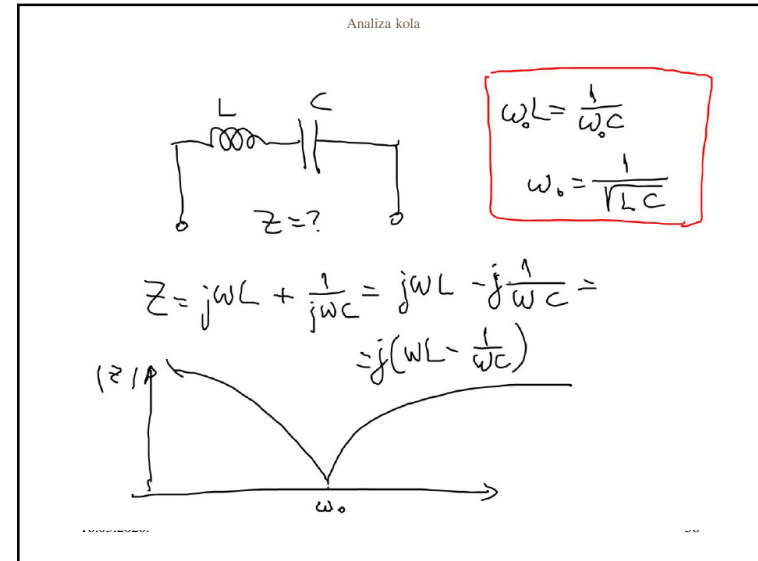
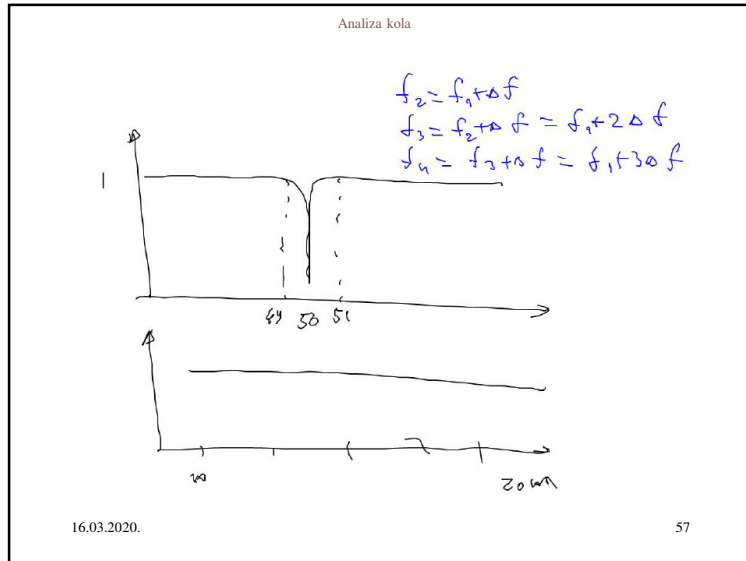
16.03.2020.

55



16.03.2020.

56



Analiza kola

Analiza VF kola - parazitni efekti

R

C

L

16.03.2020. 61

Analiza kola

Spice:
Koje parametre treba zadati da bi se kolo analiziralo u AC domenu?

- Tip analize: AC
- Parametri generatora: magnituda i faza
- Donja granična frekvencija
- Gornja granična frekvencija
- Broj tačaka:
 - Linearno
 - Logaritamski
 - (po dekadi)
 - (po oktavi)

16.03.2020. 62

Analiza kola

Primer AC analiza nelinearnog kola
Nelinearne komponente su zamenjene linearnim modelima parametrima linearnih modela izracunavaju se u radnoj tacki zato AC analizi prethodi DC analiza nelinearnih kola. Ovo Spice radi automatski, čim se pozove AC analiza.

16.03.2020. 63

Analiza kola

Primer AC analiza nelinearnog kola
Nelinearne komponente su zamenjene linearnim modelima parametrima linearnih modela izracunavaju se u radnoj tacki zato AC analizi prethodi DC analiza nelinearnih kola.

16.03.2020. 64

Analiza kola

Primer AC analiza nelinearnog kola
Nelinearne komponente su zamenjene linearnim modelima
parametri linearnih modela izracunavaju se u radnoj tacki
zato AC analizi prethodi DC analiza nelinearnih kola.
Ovo Spice radi automatski, cim se pozove AC analiza.

.include cmos_035.lib

.ac dec 5 1 100MEG

16.03.2020. 65

Analiza kola

Primer AC analiza nelinearnog kola
Nelinearne komponente su zamenjene linearnim modelima
parametri linearnih modela izracunavaju se u radnoj tacki
zato AC analizi prethodi DC analiza nelinearnih kola.
Ovo Spice radi automatski, cim se pozove AC analiza.

.include cmos_035.lib

.ac dec 5 1 100MEG

16.03.2020. 66

Analiza kola

Primer AC analiza nelinearnog kola
Nelinearne komponente su zamenjene linearnim modelima
parametri linearnih modela izracunavaju se u radnoj tacki
zato AC analizi prethodi DC analiza nelinearnih kola.
Ovo Spice radi automatski, cim se pozove AC analiza.

.include cmos_035.lib

.ac dec 5 1 100MEG

16.03.2020. 67

Analiza kola

Primer AC analiza nelinearnog kola
Nelinearne komponente su zamenjene linearnim modelima
parametri linearnih modela izracunavaju se u radnoj tacki
zato AC analizi prethodi DC analiza nelinearnih kola.
Ovo Spice radi automatski, cim se pozove AC analiza.

.include cmos_035.lib

.ac dec 5 1 100MEG

16.03.2020. 68

Analiza kola

Primer AC analiza nelinearnog kola
 Nelinearne komponente su zamenjene linearnim modelima
 parametri linearnih modela izracunavaju se u radnoj tacki
 zato AC analizi prethodi DC analiza nelinearnih kola.
 Ovo Spice radi automatski, cim se pozove AC analiza.

.include cmos_035.lib

.ac dec 5 1 100MEG
 .noise V(Vp) V1 dec 5 10 100MEG

16.03.2020. 69

Analiza kola

Primer AC analiza nelinearnog kola
 Nelinearne komponente su zamenjene linearnim modelima
 parametri linearnih modela izracunavaju se u radnoj tacki
 zato AC analizi prethodi DC analiza nelinearnih kola.
 Ovo Spice radi automatski, cim se pozove AC analiza.

.include cmos_035.lib

.ac dec 5 1 100MEG
 .noise V(Vp) V1 dec 5 10 100MEG

16.03.2020. 70

Analiza linearnih kola u AC domenu

Šta treba da znamo?
Elementarno (za potpis)
Šta se dobija kao rezultat analize u frekvencijskom domenu?
Osnovna (za 6)

1. **Koje parametre treba zadati da bi se u programu Spice analiziralo kolo u frekvencijskom domenu?**
2. **Kakvi se modeli poluprovodničkih komponenta koriste pri AC analizi?**

LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation
 16.03.2020. <http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 71

Analiza linearnih kola u AC domenu

Ispitna pitanja

- a) **Koliko puta se formira i rešava sistem jednačina pri jednoj analizi kola u AC režimu ukoliko se traži analiza u 4 tačke po dekadi u opsegu od 5Hz do 50kHz/Koliko puta se formira i rešava sistem jednačina pri jednoj analizi kola u AC režimu ukoliko se traži analiza u 2 tačke po oktavi u opsegu od 5Hz do 50kHz?**
- b) **Koji su karakteristični problemi vezani za zadavanje koraka u AC analizi?**
- c) **Koji su karakteristični problemi vezani za rezonantnu frekvenciju u AC analizi? Kako ih izbeći?**

<http://leda.elfak.ni.ac.rs/> 72