

Prof. dr Predrag Petković,
dr Miljana Milić, docent

Katedra za elektroniku
Elektronski fakultet Niš

Sadržaj:

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

Analiza kola
Analiza kola

Tipovi analize?

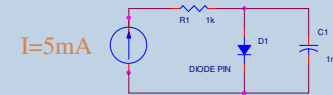
Zavisno od vrste pobude, ima smisla analizirati ponašanje kola u

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)

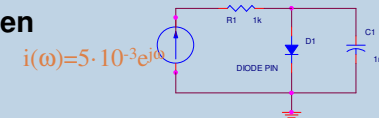
Analiza kola

Tipovi analize kola

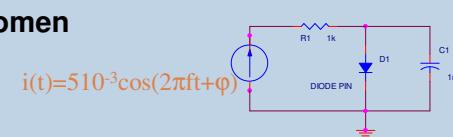
1. Jednosmerni domen (DC analiza)



2. Frekvencijski domen (AC analiza)



3. Vremenski domen (TR analiza)



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, ...)

13.04.2020. 5

Analiza kola

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

13.04.2020. 6

Da se podsetimo

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/>
 13.04.2020. 7

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/>
 13.04.2020. 8

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**.



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

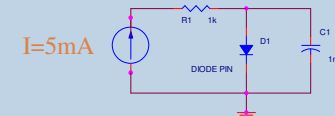
Tipovi analize?

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

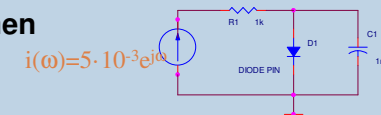
1. jednosmernom domenu (određivanje položaja jednosmerne radne tačke kola).
2. frekvencijskom domenu (frekvencijske karakteristike kola – amplitudska, fazna)
3. vremenskom domenu (talasni oblik napona/struja na izlazu kola pobuđenog impulsima poznatog talasnog oblika)

Tipovi analize kola

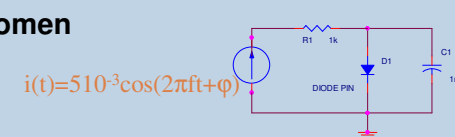
1. Jednosmerni domen
(DC analiza)



2. Frekvencijski domen
(AC analiza)



3. Vremenski domen
(TR analiza)



Analiza kola

Da se podsetimo

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, ...)

13.04.2020. 13

Analiza kola

Da se podsetimo

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

13.04.2020. 14

Analiza kola

Da se podsetimo

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

13.04.2020. 15

Analiza kola

Modeli

Postoje dva "nivoa" modelovanja

1. Model komponenti (D, Q, M, R, C, L, ...)

```

.model <modelname> <DeviceType>
  (<parameter list>)

```

2. Modeli složenih struktura (opamp i sl.)

```

.subckt <modelname> <nodelist>
  <circuit made out of intrinsic devices>
  <definition of intrinsic models>
.ends

```

13.04.2020. 16

Analiza kola

Modeli

`.model <modelName> <DeviceType>`
 (<parameter list>)

Koristi se za definisanje i zadavanje parametara modela komponenta koje su ugrađene u Spice:

`.model IN5373B D`
 (IS=1.54e-17 N=1 XTI=1 Rs=.1 Cjo=10p TT=10n BV=68
 IBV=20m NBV=50 Vpk=68 mfg=OnSemi type=Zener)

13.04.2020. 17

Analiza kola

```

.subckt <modelName> <nodelist>
  <circuit made out
of
intrinsic devices>
  <definition of
intrinsic models>
ends
  
```

```

.subckt LT1761-1.2 1 2 3 4 5
Q1 N006 N004 1 0 PN
Q2 N004 N008 2 0 NA
Q3 N008 N003 N010 0 NP temp=27
C1 N008 N003 12p Rser=350K
Q4 N003 N003 4 0 NP 10 temp=27
R2 4 2 12K
R3 N010 2 10K
.
.
.model NP NPN(Cje=1p Cjc=1p BF=150)
.model FB NPN(Cje=5p Cjc=5p BF=150)
.model F D(Ron=1m Roff=10K)
.model P PNP(BF=100)
.model X D(Ron=10 Vfwd=30)
ends LT1761-1.2
  
```

13.04.2020. 18

Analiza kola

Modeli

WDIODE
wdiode.asy

NMOS
nmos_035.asy

$V_{th} \approx 0.48 \text{ V}$
 $\mu_n C_{ox} \approx 90 \mu\text{A}/\text{V}^2$
 $\lambda_n \approx 0.035 \text{ 1/V}$ ($L=1\mu$)
 0.025 1/V ($L=2\mu$)
 $<0.015 \text{ 1/V}$ ($L>4\mu$)

PMOS
pmos_035.asy

$V_{th} \approx -0.62 \text{ V}$
 $\mu_p C_{ox} \approx 36 \mu\text{A}/\text{V}^2$
 $\lambda_p \approx 0.046 \text{ 1/V}$ ($L=1\mu$)
 0.019 1/V ($L=2\mu$)
 $<0.01 \text{ 1/V}$ ($L>4\mu$)

Gde su smešteni?

13.04.2020. 19

Analiza kola

Modeli

Gde su smešteni?

13.04.2020. 20

Analiza kola

Modeli Potkola Simboli
komponentata (subcircuits)
Gde su smešteni?

13.04.2020.

Analiza kola

Modeli BJT TXT format sa ekstenzijom **.BJT**
.CAP .DIO .IND .RES .MOS

Name	Date modified	Type	Size
standard	12/17/2015 7:22 AM	READ File	11 KB
standard	12/17/2015 7:22 AM	BIT File	79 KB
standard.cap	12/17/2015 7:22 AM	CAP File	237 KB
standard.dio	12/17/2015 7:22 AM	DIO File	96 KB
standard.ind	12/17/2015 7:22 AM	IND File	346 KB
standard	12/17/2015 7:22 AM	JFT File	4 KB
standard.mos	12/17/2015 7:22 AM	MOS File	167 KB
standard.res	12/17/2015 7:22 AM	RES File	8 KB

13.04.2020.

Analiza kola

Potkola (cmos035)
TXT format sa ekstenzijom .lib ili .sub

Name	Date modified	Type	Size
cmos_035	1/2/2016 12:34 PM	PSpice Model Library	14 KB
LTC5	12/17/2015 7:22 AM	PSpice Model Library	69 KB
LTC6	12/17/2015 7:22 AM	PSpice Model Library	67 KB
LTC7	12/17/2015 7:22 AM	PSpice Model Library	67 KB
LTC660.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	1 KB
LTC690.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	7 KB
LTC691.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	9 KB
LTC692.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	7 KB
LTC693.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	9 KB
LTC694.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	7 KB
LTC694-33.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	7 KB

13.04.2020.

Analiza kola

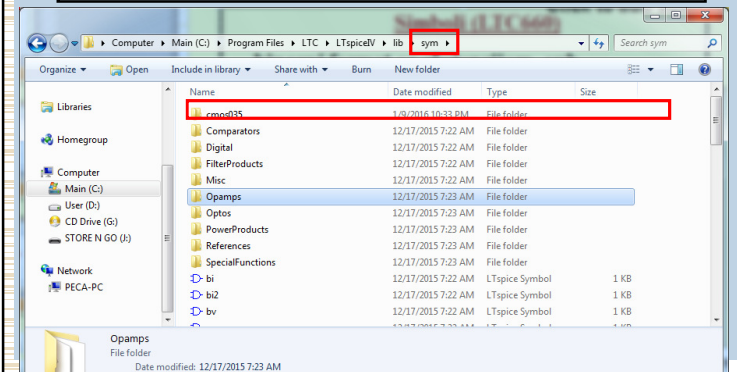
Potkola (LTC660)
binarni format sa ekstenzijom .sub

Name	Date modified	Type	Size
cmos_035	1/2/2016 12:34 PM	PSpice Model Library	14 KB
LTC5	12/17/2015 7:22 AM	PSpice Model Library	69 KB
LTC6	12/17/2015 7:22 AM	PSpice Model Library	67 KB
LTC7	12/17/2015 7:22 AM	PSpice Model Library	67 KB
LTC660.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	1 KB
LTC690.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	7 KB
LTC691.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	9 KB
LTC692.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	7 KB
LTC693.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	9 KB
LTC694.sub	12/17/2015 7:22 AM	SUB File	7 KB

13.04.2020.

Simboli (cmos035 nmos)

TXT format sa ekstenzijom .asy (ista imena)



Modeli

WDIODE
wdiode.asy

NMOS
nmos_035.asy

PMOS
pmos_035.asy

$V_{in} \approx 0.48 \text{ V}$
 $\mu_n C_{ox} \approx 90 \mu\text{A}/\text{V}^2$
 $\lambda_n \approx 0.035 \text{ 1/V (} L=1\mu\text{)}$
 $0.025 \text{ 1/V (} L=2\mu\text{)}$
 $<0.015 \text{ 1/V (} L>4\mu\text{)}$

$V_{tp} \approx -0.62 \text{ V}$
 $\mu_p C_{ox} \approx 36 \mu\text{A}/\text{V}^2$
 $\lambda_p \approx 0.046 \text{ 1/V (} L=1\mu\text{)}$
 $0.019 \text{ 1/V (} L=2\mu\text{)}$
 $<0.01 \text{ 1/V (} L>4\mu\text{)}$

Kako uneti novi model u LTSpice?

Kako uneti novi model u LTSpice?

Kreirati simbol za električnu šemu:

1. Izmeniti ako postoji odgovarajući u biblioteci.
2. Kreirati novi simbol.

Sadržaj modela može da se unese na tri načina:

1. `.include <filename>`
2. `.lib <filename>`
3. Kopiranje direktno u šemu

Kako uneti novi model u LTSpice?

`.include` priključuje fajl sa imenom `<filename>` net listi

`.lib` priključuje biblioteku sa imenom `<filename>` (samo naredbe koje opisuju modele definisane sa `.model` i/ili `.subcircuit`)

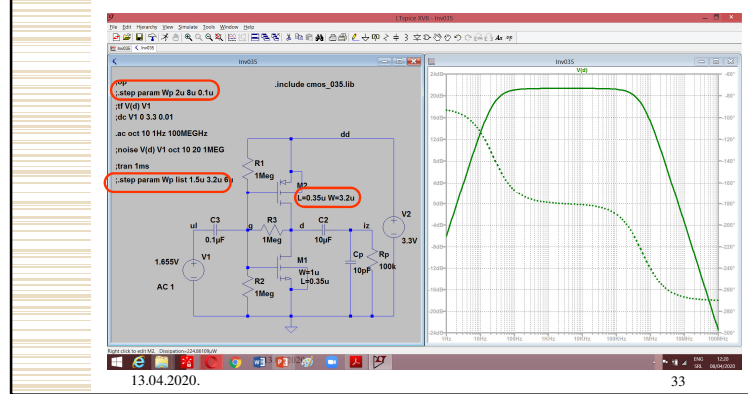
`<filename>` mora da sadrži kompletnu putanju i ekstenziju fajla; može da bude i URL

Kopiranje direktno u šemu

Analiza kola

Primeri analize

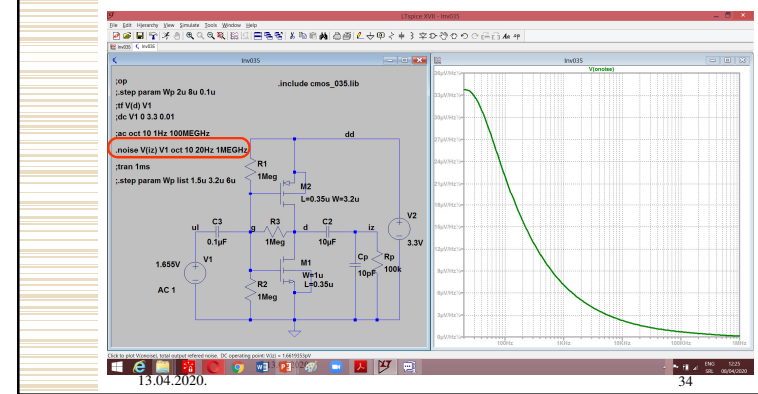
LTSpice Inv035



Analiza kola

Primeri analize

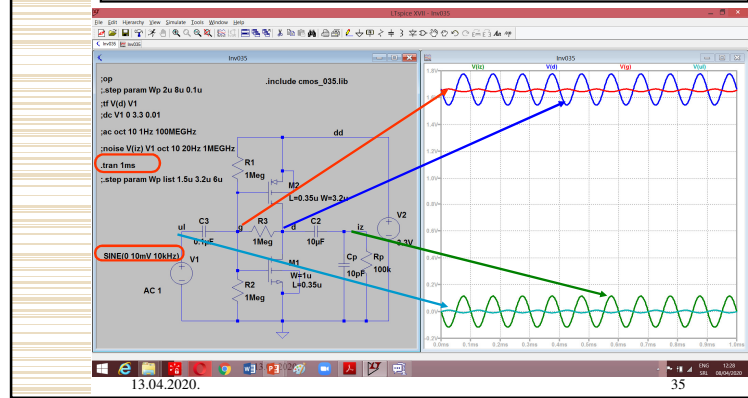
LTSpice Inv035



Analiza kola

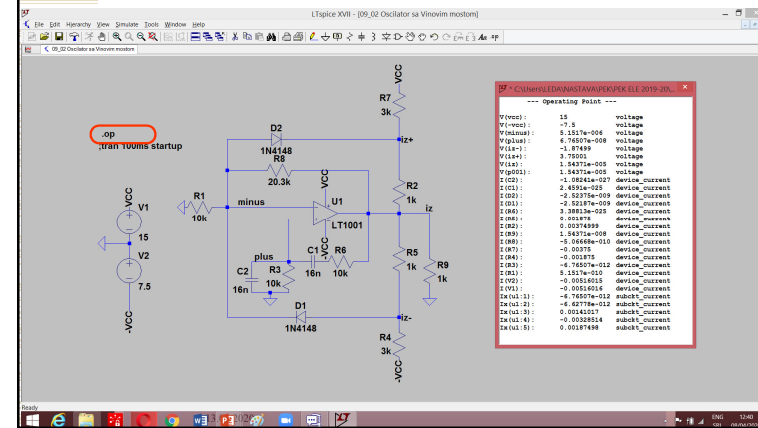
Primeri analize

LTSpice Inv035



Analiza kola

Primeri analize Oscilator



Analiza kola

Primeri analize Oscilator

The screenshot shows a circuit diagram of an oscillator. The circuit includes two 1N4148 diodes (D1, D2), a 20.3k resistor (R8), a 10k resistor (R1), a 16nF capacitor (C2), a 10k resistor (R3), a 10k resistor (R6), a 1k resistor (R2), a 1k resistor (R5), a 1k resistor (R9), a 3k resistor (R4), and a 3k resistor (R7). The output is taken across R2. The plot shows a flat line at 0V, with a red question mark overlaid on it. A red circle highlights the simulation command 'tran 100ms' in the top left corner.

Analiza kola

Primeri analize Oscilator

The screenshot shows the same circuit diagram and plot. An 'Edit Simulation Command' dialog box is open, showing the 'DC Transfer' tab. The 'Start external DC supply voltages at 0V' checkbox is checked. A red circle highlights the 'tran 100ms startup' command in the syntax field.

Analiza kola

Primeri analize Oscilator

The screenshot shows the same circuit diagram and plot. The plot now shows a green oscillating waveform. A red circle highlights the 'tran 100ms startup' command in the top left corner.

Analiza kola

Primeri analize Oscilator

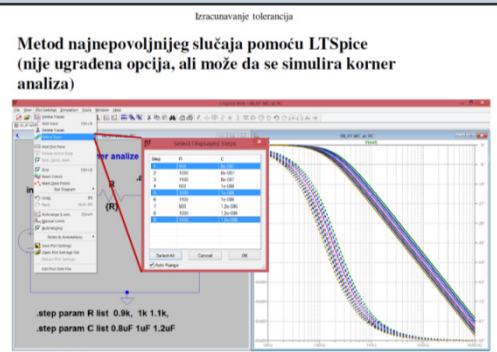
The screenshot shows the same circuit diagram and plot. The plot shows a steady-state green oscillating waveform. A red circle highlights the 'tran 100ms startup' command in the top left corner.

Analiza kola

Primeri analize WC-analysis (iako je korner analiza) primenom korisničkih funkcija

Izracunavanje tolerancija

Metod najnepovoljnijeg slučaja pomoću LTSpice (nije ugrađena opcija, ali može da se simulira korner analiza)



.step param R list 0.9k, 1k 1.1k,
.step param C list 0.8uF 1uF 1.2uF

13.04.2020. 06.04.2020. 42

Izracunavanje tolerancija

Metod analize najnepovoljnijeg slučaja pomoću LTSpice uz korisnički definisane funkcije

<https://www.analog.com/en/technical-articles/ltspice-worst-case-circuit-analysis-with-minimal-simulations-runs.html>

LTSpice omogućava definisanje sopstvenih funkcija

- Sintaksa:


```
.func <ime>([args]) {<izraz>}
```
- Primer:


```
.func Pitagora(x,y) {sqrt(x*x+y*y)}
```

13.04.2020. 42

Analiza kola

Primeri korner analize WC-analysis

```
.func wc(nom, tol, index)
{if(run==numruns,
  nom,
  if(binary(run,index),
    nom*(1+tol),
    nom*(1-tol))}}
```

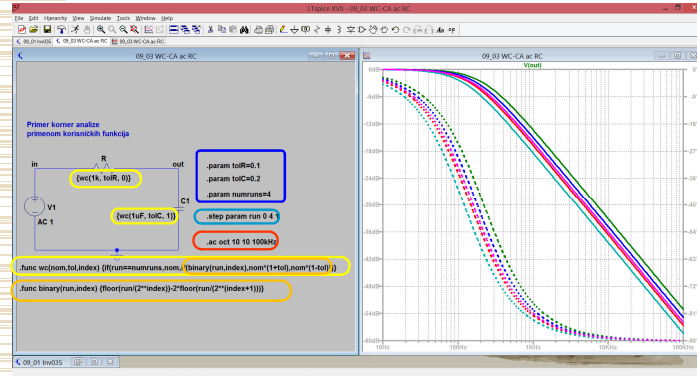
```
.func binary(run, index)
{floor(run/(2**index))-
  2*floor(run/(2**(index+
  1)))}
```

Run	0	1	2	3
Index 0 (R)	0	1	0	1
Index 1 (C)	0	0	1	1

13.04.2020. 43

Analiza kola

Primeri analize WC-analysis



```
.func wc(nom,tol,index) {if(run==numruns,nom,{binary(run,index),nom*(1+tol),nom*(1-tol)}}
```

```
.func binary(run,index) {floor(run/(2**index))-2*floor(run/(2**(index+1)))}
```

.param tol=0.1
.param tolC=0.2
.param numruns=4
.step param run 0 4
.ac oct 10 10 100kHz

13.04.2020. 44

Analiza kola

Primeri analize WC-analysis

Primer korner analize primenom korisničkih funkcija i naredbe .incl

```

.incl wc_func.txt
.param tolR=0.1
.param tolC=0.2
.param numruns=4
.step param run 0 4 1
.ac oct 10 10 100kHz

```

13.04.2020. 45

Analiza kola

Primeri analize

```

Definisanje funkcije "wc(nom, tol, index)"
* namenjena je da vraća ekstremalne vrednosti parametara + nominalni
* za kolo sa dva parametra, vraća 4 kombinacije ekstremalnih
* i jednu za nominalnu vrednost parametara (u 5 analiza)
parametri funkcije:
* non-nominalna vrednost parametra
tol= tolerancija parametra [x/100]
index=(broj_parametara_koji_se_menja -1)
* funkcija vraća
* vrednost nom*(1+tol) ako je binary(run, index)=1 i
* vrednost nom*(1-tol) ako je binary(run, index)=0
func wc(nom,tol,index)
{if(run==numruns,
nom,
if(binary(run,index),
nom*(1+tol),
nom*(1-tol))})
}

Definisanje funkcije "binary(run,index)"
* Najpre treba znati da
* funkcija floor(x) vraća intedžer jednak ili manji od x
primer: floor(2.4)=2 a i floor(2)=2
run=redni broj analize zadat naredbom .step
index=(broj_parametara_koji_se_menja -1)
* Funkcija binary vraća 0 ili 1
primer: za run=0, index=0 vraća 0-floor(0/1)-2**floor(0/2)
run=0, index=1 vraća 0-floor(0/2)-2**floor(0/4)
run=1, index=0 vraća 1-floor(1/1)-2**floor(1/2)
run=1, index=1 vraća 0-floor(1/2)-2**floor(1/4)
func binary(run,index)
{floor(run/(2**index))-2**floor(run/(2**(index+1)))}

```

13.04.2020. 46

Izracunavanje tolerancija

Parametri za kontrolu analize

13.04.2020. 47

Analiza kola - Uvod

Šta treba da znamo?
Elementarno (za potpis)
Tipovi analize u programu Spice?

Osnovna (za 6)

1. Kako se dodaje novi korisnički model u programu Spice?
2. Kako se dodaje nova komponenta postojećoj biblioteci u programu Spice?

13.04.2020. LEDA - Laboratory for Electronic Design Automation
http://leda.elfak.ni.ac.yu/ EDA 48

Analiza kola - Uvod

Šta treba da znamo?

Ispitna pitanja

Koje parametre treba zadati i šta je rezultat

- a) .OP analize?
- b) .DC analize?
- c) .TF analize?
- d) .AC analize?
- e) .noise analize?
- f) .tran analize?