

Radivoje Đurić

OSNOVI ELEKTRONIKE
zbirka rešenih problema

Beograd, 2017.

Osnovi elektronike - zbirka rešenih problema, III izdanje (I izdanje Akademska misao)

Autor: dr Radivoje Đurić

Recezeni:

dr Dragan M. Vasiljević

dr Slavoljub Marjanović

Izdavač:

Akademska misao, Beograd

Štampa:

Akademska misao, Beograd

Tiraž:

200 primeraka

ISBN 978-86-7466-694-4

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.38(075.8)(076)

БУРИТ, Радивоје, 1967-

Osnovi elektronike : zbirka rešenih problema /
Radivoje Đurić. - 3. izd. (1. izd. Akademska misao). -
Beograd : Akademska misao, 2017 (Beograd
: Akademska misao). - 1 knj. (razl. pag.) : graf.
prikazi ; 24 cm

Tiraž 200. - Bibliografija uz svako poglavlje.

ISBN 978-86-7466-694-4

а) Електроника - Задаци
COBISS.SR-ID 246597388

Напомена:

Аutorsка права су заштићена и забрањено је свако умножавање и публиковање – у целини или у деловима без одобрења аутора

Predgovor

Ova zbirka se nadovezuje na materijal koji se, počev od 1997. godine, nalazio na *site-u* za Elektroniku I na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Ona je rezultat velikog broja ispitnih zadataka i zadataka za vežbanje koje je autor kreirao na predmetima Elektronika I, Elektronika II i Osnovi elektronike.

Zbirka je podeljena u sedam delova.

U prvoj glavi obrađeni su karakteristični problemi vezani za poluprovodničke diode. Pokazana su karakteristična kola sa poluprovodničkim diodama i zadaci iz primene dioda u limiterima, ispravljačima i slično.

U drugoj glavi se nalaze problemi vezani za polarizaciju MOS tranzistora i jednostepene pojačavače. Obrađeni su neki problemi polarizacije MOSFET-ova u oblasti jake i slabe inverzije. Pokazane su osnovne pojačavačke sprega sa MOS tranzistorima u diskretnoj i integrisanoj tehnologiji, određivanje mirne radne tačke, pojačanja i maksimalne amplitude simetričnog neizobličenog signala. Razmatran je i uticaj efekata tzv. kratkog kanala u nekim pojačavačima.

U trećoj glavi su obrađeni neki problemi iz polarizacije bipolarnih tranzistora i osnovnih pojačavačkih sprega u diskretnoj i integrisanoj tehnologiji, u režimu malih i velikih signala.

Četvrta glava se bavi osnovnim pojačavačkim spregama sa JFET-ovima.

U petoj glavi se nalaze primeri karakterističnih strujnih izvora sa MOSFET-ovima, bipolarnim tranzistorima i JFET-ovima. Akcenat je stavljen na strujne izvore u CMOS tehnologiji.

Šesto poglavlje sadrži jedan broj primera diferencijalnih pojačavača sa MOSFET-ovima, bipolarnim tranzistorima i JFET-ovima. Obrađeni su karakteristični primeri diferencijalnih pojačavača u režimu malih i velikih signala, određivanje diferencijalnog pojačanja, faktora potiskivanja signala srednje vrednosti i slično.

Poslednja, sedma glava ove zbirke, obrađuje probleme vezane za multipliciranje osnovnih pojačavačkih stepena u višestepenim pojačavačima. Osnovni akcenat ove glave je na CMOS i BICMOS tehnologiji, ali ona sadrži i jedan broj diskretnih višestepenih pojačavača.

Ova zbirka je namenjena prvenstveno studentima elektrotehnike, ali zbog niza praktičnih problema može biti korisna i širem krugu čitalaca. Njena osnovna ideja je da se čitalac, preko niza zanimljivih, praktičnih, modernih i edukativnih primera, uputi u osnovna znanja i rezone u elektronici i zainteresuje za njeno dalje proučavanje u složenijim elektronskim sistemima.

Većina zadataka je detaljno urađena, ali se čitaocu sugeriše da, čitajući ih, rešenja ne uči napamet, već da kroz rešenja zadataka uobličava svoj način razmišljanja o elektronici.

Kako bi se čitaocu skrenula pažnja na težinu problema, složeniji zadaci označeni su sa *, a na kraju svakog poglavlja je dat jedan broj zadataka bez rešenja. Ovo je urađeno sa namerom da čitalac proveri stečeno znanje i razdvoji znanje od prepoznavanja.

Autor se zahvaljuje recenzentima, profesoru dr Draganu Vasiljeviću i profesoru dr Slavoljubu Marjanoviću. Zahvalnost dužuje i profesoru dr Milanu Prokinu i asistentu mr Milanu Ponjaviću na recenziji jednog broja problema koji su se pojavljivali u obliku ispitnih zadataka, kao i svim onim studentima koji su svojim sugestijama i komentarima doprineli da se neka rešenja, ili delovi rešenja, u cilju boljeg razumevanja što pažljivije izlože.

Autor se unapred izvinjava za eventualne propuste i sa zahvalnošću će primiti sve primedbe i sugestije.

U Beogradu, 2. avgust 2005.

Autor

Predgovor uz drugo izdanje

Prvo izdanje ove zbirke je naišlo na dobar odziv čitalaca. Budući da je autor u međuvremenu kreirao veći broj ispitnih zadataka na predmetu Osnovi elektronike na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, neki od njih su ukomponovani u poglavlja 1, 2, 3, 6 i 7. U drugom izdanju su ispravljene uočene slovne greške. Ovo izdanje autor posvećuje sinu Luki.

U Beogradu, 11. septembar 2012.

Autor

Predgovor uz treće izdanje

Problemi obrađeni u prethodnim izdanjima su prilagođeni novim nanometarskim bipolarnim i CMOS integrisanim tehnologijama. Ovo izdanje autor posvećuje sinovima Luki i Nikoli.

U Beogradu, 27. septembar 2017.

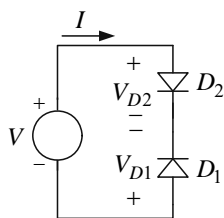
Autor

Sadržaj

1. Dioda	1.1-1.32
2. MOSFET - polarizacija i osnovne pojačavačke sprege	2.1-2.70
3. Bipolarni tranzistor - polarizacija i osnovne pojačavačke sprege	3.1-3.52
4. JFET - polarizacija i osnovne pojačavačke sprege	4.1-4.16
5. Strujni izvori	5.1-5.36
6. Diferencijalni pojačavač	6.1-6.56
7. Višestepeni pojačavači	7.1-7.86

Glava 1

DIODA



Slika 1.1

1.1. U kolu sa slike 1.1 diode imaju različite inverzne struje zasićenja $I_{S2} = 2I_{S1}$, dok je $V_t = kT_0/q = 25,2 \text{ mV}$, $T_0 = 293 \text{ K}$. Ukoliko se drugačije ne naglasi smatrati da je temperatura ambijenta $T = T_0$.

- Ako je $V = 1,5 \text{ V}$, odrediti napone na diodama V_{D1} i V_{D2} .
- Ponoviti prethodnu tačku ako je $V = -1,5 \text{ V}$.
- Za koliko će se promeniti naponi na diodama iz tačke a), ΔV_{D1} i ΔV_{D2} , ako se temperatura ambijenta promeni za $\Delta T = +80^\circ \text{ C}$?

Rešenje:

a) Kada je $V = 1,5 \text{ V}$, dioda D_2 je direktno polarisana, a dioda D_1 inverzno. Pretpostavimo da je struja I jednaka inverznoj struji zasićenja diode D_1

$$I = I_{D2} = -I_{D1} \approx I_{S1} \Rightarrow V_{D2} = V_t \ln \left(\frac{I_{D2}}{I_{S2}} + 1 \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{S1}}{I_{S2}} + 1 \right) = V_t \ln \left(\frac{1}{2} + 1 \right) = 10,2 \text{ mV} \Rightarrow$$

$$V_{D1} = V_{D2} - V \approx -1,49 \text{ V}.$$

Proverom se dobija da je struja diode D_1

$$I_{D1} = I_{S1} \left(e^{V_{D1}/V_t} - 1 \right) = I_{S1} \left(e^{-59} - 1 \right) \approx -I_{S1},$$

što znači da je početna pretpostavka opravdana, a struje i naponi su vrlo približni izračunatim vrednostima.

b) Kada je $V = -1,5 \text{ V}$, dioda D_1 je direktno polarisana, a dioda D_2 inverzno. Sada je struja generatora

$$I = -I_{D1} = I_{D2} \approx -I_{S2} \Rightarrow V_{D1} = V_t \ln \left(\frac{I_{D1}}{I_{S1}} + 1 \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{S2}}{I_{S1}} + 1 \right) = V_t \ln 3 = 27,7 \text{ mV} \Rightarrow$$

$$V_{D2} = V + V_{D1} = -1,472 \text{ V}.$$

c) Na svakih 10° C inverzna struja zasićenja približno se udvostručava:

$$I_S(T) \approx I_S(T_0) \cdot 2^{\frac{T-T_0}{10}},$$

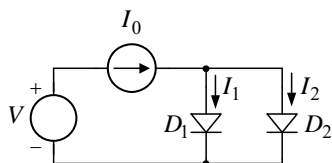
a temperaturno je zavisian i napon V_t ,

$$V_t(T) = kT/q.$$

Međutim, ovde naponi na diodama zavise samo od odnosa inverznih struja zasićenja. Zbog toga je

$$\Delta V_{D2} = V_{D2}(T_2) - V_{D2}(T_0) = \ln \left(\frac{3}{2} \right) (V_t(T_2) - V_t(T_0)) = \ln \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{k}{q} (T_2 - T_0) \right), T_2 = T_0 + \Delta T \Rightarrow$$

$$\Delta V_{D2} = \ln \left(\frac{3}{2} \right) \left(V_t(T_0) \left(\frac{T_2}{T_0} - 1 \right) \right) = 2,8 \text{ mV} \Rightarrow \Delta V_{D1} = \Delta V_{D2} = 2,8 \text{ mV}.$$



Slika 1.2

1.2. U kolu sa slike 1.2 paralelno su povezane silicijumska dioda čija je inverzna struja zasićenja $I_{S1} = 10 \text{ fA}$ i Šotki dioda sa $I_{S2} = 10 \text{ nA}$. Poznato je: $V = 1,5 \text{ V}$, $V_t = kT/q = 25 \text{ mV}$ i $I_0 = 1 \text{ mA}$. Odrediti struje dioda I_1 i I_2 , kao i napon na diodama $V_D = V_{D1} = V_{D2}$.

Rešenje:

Prema Kirhofovim pravilima je

$$I_1 + I_2 = I_0,$$

a pošto su naponi na diodama

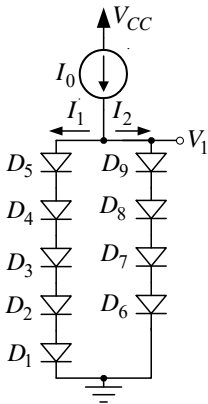
$$V_D = V_{D1} = V_t \ln\left(\frac{I_1}{I_{S1}} + 1\right) = V_{D2} = V_t \ln\left(\frac{I_2}{I_{S2}} + 1\right) \Rightarrow \frac{I_1}{I_{S1}} = \frac{I_2}{I_{S2}} \Rightarrow$$

$$I_2 = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{I_0}{1 + I_{S2}/I_{S1}} \approx \frac{I_{S1}}{I_{S2}} I_0 = 10^{-6} I_0 = 1 \text{ nA} \Rightarrow I_2 = I_0 - I_1 \approx I_0 = 1 \text{ mA},$$

što znači da Šotki dioda praktično provodi svu struju strujnog izvora. Naponi na diodama su

$$V_D = V_{D2} = V_{D1} = V_t \ln\left(\frac{I_1}{I_{S1}} + 1\right) = 288 \text{ mV}.$$

1.3. U kolu sa slike 1.3 upotrebene su diode identičnih parametara. Poznato je: $V_{CC} = 2 \text{ V}$, $V_t = kT/q = 25 \text{ mV}$ i $I_0 = 1 \text{ mA}$. Ako je $V_1 = 1,2 \text{ V}$, odrediti struje dioda I_1 i I_2 .



Slika 1.3

Rešenje:

Zbog redne veze dioda D_{1-5} njihove struje međusobno su jednake

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = I_{D5} = I_1 \Rightarrow$$

$$V_{D1} = V_{D2} = V_{D3} = V_{D4} = V_{D5}.$$

Prema II Kirhofovom zakonu je

$$V_{D1} + V_{D2} + V_{D3} + V_{D4} + V_{D5} = V_1 \Rightarrow V_{D1} = V_1/5.$$

Isti se zaključak može primeniti i na rednu vezu dioda D_{6-9}

$$I_{D6} = I_{D7} = I_{D8} = I_{D9} = I_2, V_{D6} = V_{D7} = V_{D8} = V_{D9} \Rightarrow V_{D6} = V_1/4.$$

Prema I Kirhofovom zakonu je

$$I_1 + I_2 = I_0, I_1 = I_{D1} \approx I_S e^{V_{D1}/V_t} = I_S e^{V_1/(5V_t)},$$

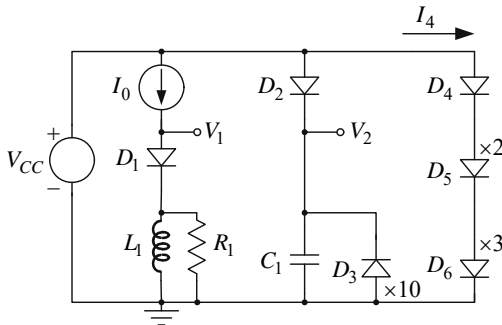
$$I_2 = I_{D6} \approx I_S e^{V_{D6}/V_t} = I_S e^{V_1/(4V_t)} \Rightarrow I_0 = I_1 + I_2 \approx I_S e^{V_1/(5V_t)} + I_S e^{V_1/(4V_t)} \Rightarrow$$

$$I_S \approx I_0 \left(e^{V_1/(5V_t)} + e^{V_1/(4V_t)} \right)^{-1} = 5,63 \text{ nA}.$$

Na osnovu napona na diodama dobijaju se njihove struje

$$I_1 \approx I_S e^{V_1/(5V_t)} = I_0 e^{V_1/(5V_t)} \left(e^{V_1/(5V_t)} + e^{V_1/(4V_t)} \right)^{-1} = I_0 \left(1 + e^{V_1/(20V_t)} \right)^{-1} = 83,2 \mu\text{A} \text{ i}$$

$$I_2 = I_0 - I_1 = 916,8 \mu\text{A}.$$



Slika 1.4

1.4. U kolu sa slike 1.4 su upotrebene poluprovodničke diode čiji su parametri: $I_{S1} = I_{S2} = I_{S4} = I_S = 0,3 \text{ fA}$, $I_{S3} = 10 I_S$, $I_{S5} = 2 I_S$ i $I_{S6} = 3 I_S$, dok je: $V_{CC} = 1,5 \text{ V}$, $V_t = kT/q = 25 \text{ mV}$, $I_0 = 1 \text{ mA}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $L_1 = 1 \text{ nH}$ i $C_1 = 100 \text{ fF}$. Odrediti vrednosti napona V_1 i V_2 i struje I_4 u ustaljenom režimu.

Rešenje:

Srednja vrednost napona na kalemu jednaka