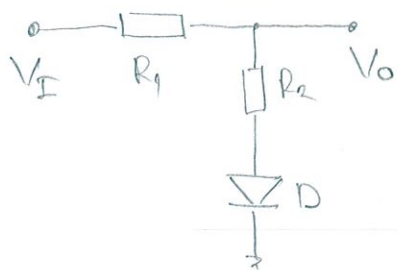


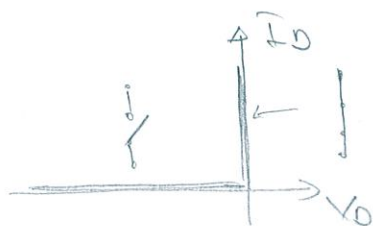
PRIMER 1: Nacrtati prenosnu karakteristiku kola prikazanog na slici koristeći:

- modela idealne diode
- idealizovanog modela



Prenosna karakteristika daje zavisnost izlazne od ulazne veličine  
 $V_O = f(V_I)$

- a) model idealne diode



$V_I < 0$  dioda je otvorena,  $I_D = 0$   
 $V_O = V_I$

$V_I \geq 0$  dioda se uključuje i ponaša se kao kratak spoj

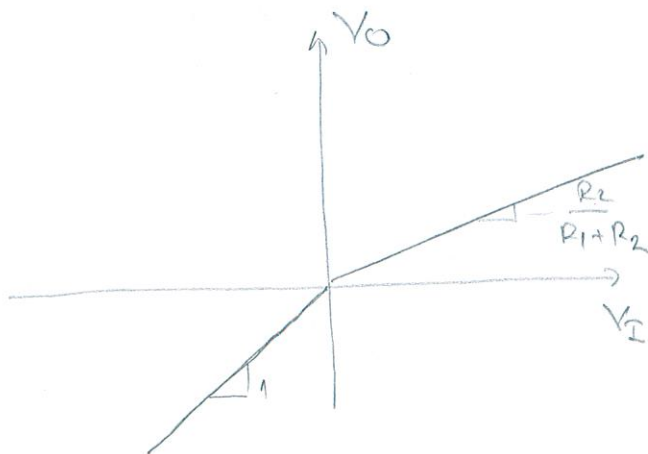


Iz naponskog razdeljka je

$$V_O = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_I$$

Prenosna karakteristika je:

$$V_O = \begin{cases} V_I, & V_I < 0 \\ \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_I, & V_I \geq 0 \end{cases}$$

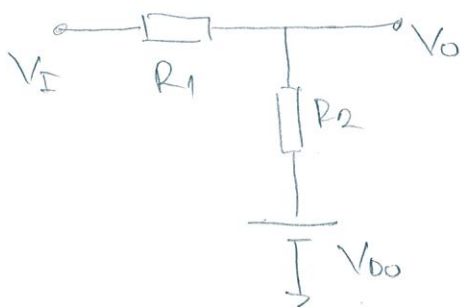


b) idealizovani model



$V_I < V_{D0}$ , dioda je inverzno polarisana  
 $I_D = 0$ , pa je  
 $V_O = V_I$

$V_I \geq V_{D0}$  dioda se uključuje i napajanje se izvoloti  $V_{D0}$

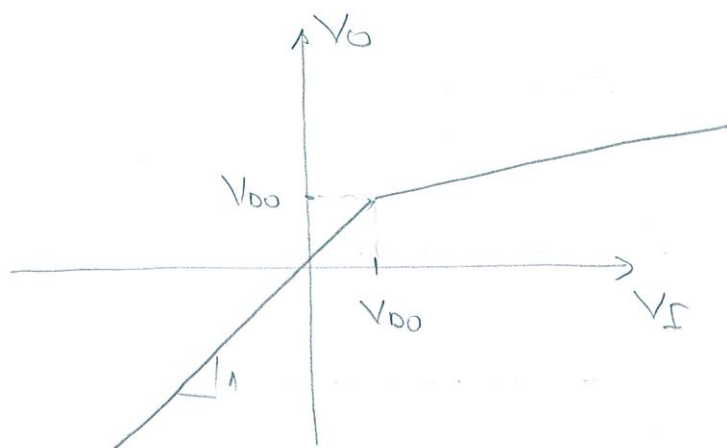


Metodom superpozicije

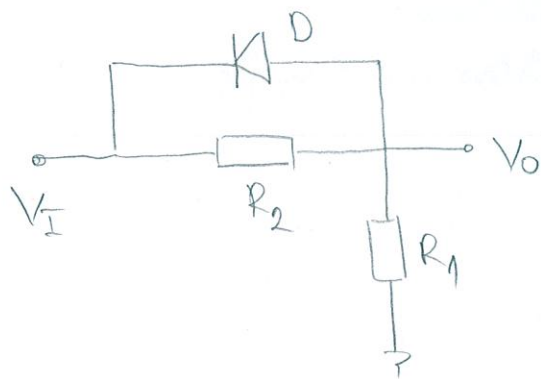
$$V_O = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_I + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{D0}$$

Prenosna karakteristika je:

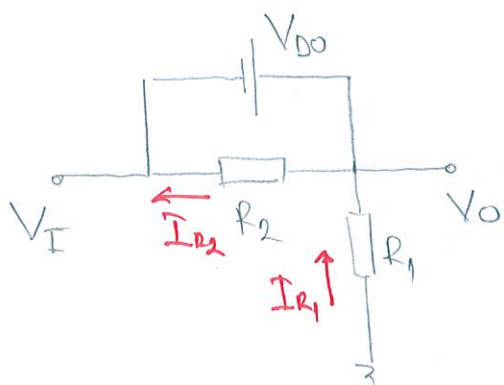
$$V_O = \begin{cases} V_I, & V_I < V_{D0} \\ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_I + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{D0}, & V_I \geq V_{D0} \end{cases}$$



PRIMER 2: Nacrtati prenosnu karakteristiku kola prikazanog na slici. Koristiti model konstantnog napona (idealizovani model).



Pretpostavimo da  $V_I \rightarrow -\infty$ . Tada je potencijal anode veći od potencijala katode, pa dioda vodi (direktno je povezana)



$$V_O = V_I + V_{D0}$$

otpornik  $R_2$  ne igra nikakvu ulogu, jer je na ulazu konstantna napon  $V_{D0}$

Da bi potpuno razumeli rad kola, odredimo struje:

$$I_{R2} = \frac{V_{D0}}{R_2} = \text{const}$$

$$I_{R1} = \frac{0 - V_O}{R_1} = \frac{-V_O}{R_1} = \frac{-V_I - V_{D0}}{R_1} \neq \text{const}$$

U nekom trenutku, za određenu vrednost ulaznog napona, struje  $I_{R1}$  i  $I_{R2}$  se izjednače, pa je struja diode jednaka nuli. Tada dioda prestaje da vodi (isključuje se)

$$I_{R1} = I_{R2} \Rightarrow \frac{V_{D0}}{R_2} = - \frac{V_I - V_{D0}}{R_1}$$

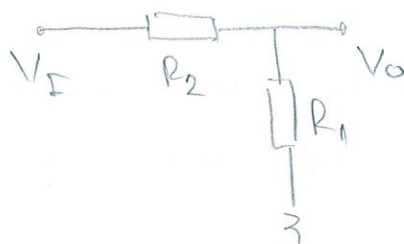
$$\frac{V_I}{R_1} = - \frac{V_{D0}}{R_1} - \frac{V_{D0}}{R_2} = - \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \cdot V_{D0}$$

Odaode sledi da je ulovni napon pri kopem dioda prestuje da vodi,  $V_I = V_{ge}$ , jednot:

$$V_I = V_{Ig} = - \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot V_{00} = - V_{00} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Za  $V_I < V_{ge}$ , dioda vodi  $V_0 = V_{00} + V_I$

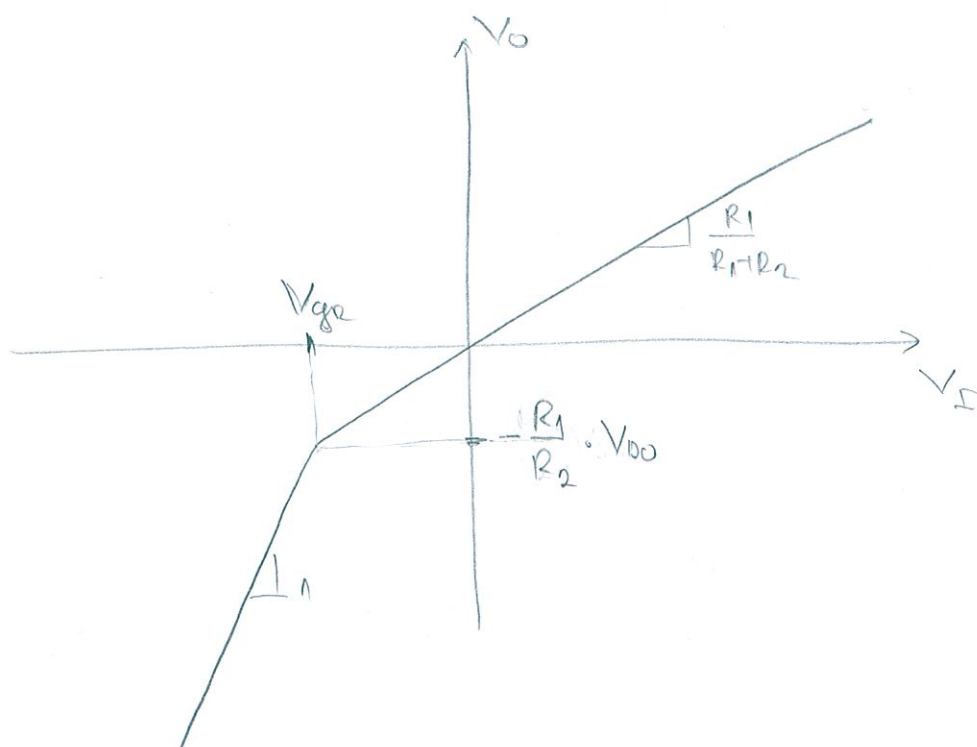
Za  $V_I \geq V_{ge}$  dioda je isklyučena, klo se suodi na:



$$V_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_I$$

Prenosna karakteristika je

$$V_0 = \begin{cases} V_{00} + V_I, & V_I < V_{ge} \\ \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_I, & V_I \geq V_{ge} \end{cases}$$



PRIMER 3: Dioda je direktno polarizovana. Koliko je potrebno povećati napon  $V_D$  da bi se struja povećala 10 puta? Neka je  $n=1$ .

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

za  $n=1$

$$I_D \approx I_S e^{\frac{V_D}{V_t}}$$

za  $V_{D1}$   $I_{D1} = I_S e^{\frac{V_{D1}}{V_t}}$

za  $V_{D2}$   $I_{D2} = 10 I_{D1} = I_S e^{\frac{V_{D2}}{V_t}}$   $\left. \begin{array}{l} V_{D2} = ? \\ \Delta V_D = ? \end{array} \right\}$

$$\Delta V_D = V_{D2} - V_{D1}$$

$$V_{D1} = V_t \ln \frac{I_{D1}}{I_S}$$

$$V_{D2} = V_t \ln \frac{I_{D2}}{I_S}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{D1} = V_t \ln \frac{I_{D1}}{I_S} \\ V_{D2} = V_t \ln \frac{I_{D2}}{I_S} \end{array} \right\} \Delta V_D = V_{D2} - V_{D1} = V_t \ln \frac{I_{D2}}{I_S} - V_t \ln \frac{I_{D1}}{I_S}$$

$$= V_t \ln \frac{I_{D2}}{I_{D1}} = V_t \ln \frac{10 I_{D1}}{I_{D1}}$$

$$= V_t \ln 10$$

$$\Delta V_D = V_t \ln 10$$

za  $V_t \approx 26 \text{ mV}$

$$\Delta V_D = 26 \text{ mV} \cdot 2.3 \approx 60 \text{ mV}$$

za  $V_t \approx 25 \text{ mV}$

$$\Delta V_D = 25 \text{ mV} \cdot 2.3 \approx 57.5 \text{ mV}$$



PRIMER 4: Za Zener diodu u kstu na slike pomoću je

$V_Z = 6.8V$  pri  $I_Z = 5mA$ ,  $r_Z = 20\Omega$  i  $I_{ZK} = 0.2mA$ . Napon napajanja je  $V_{DD} = 10V$  i može se menjati za  $\pm 1V$ .

a) odrediti  $V_O$  bez opterećenja pri nominalnoj vrednosti  $V_{DD}$ ,

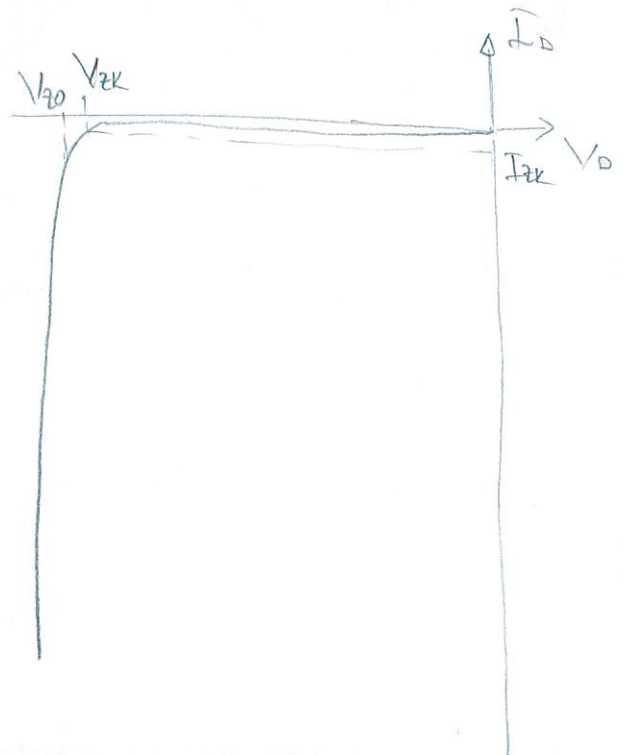
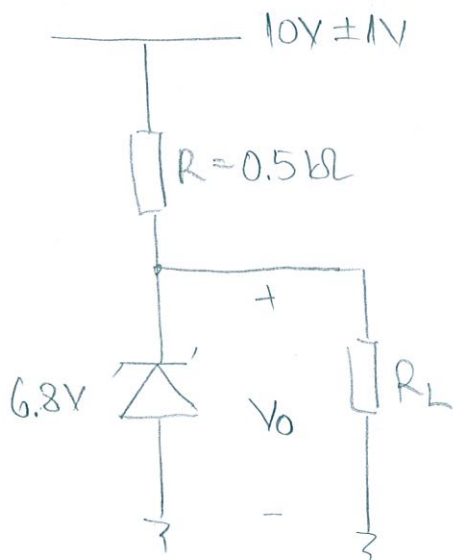
b) odrediti promenu napona  $V_O$  usled promene napona napajanja,

c) odrediti promenu napona  $V_O$  usled opterećenja  $R_L$ , ako je struja opterećenja  $I_L = 1mA$ , a zatim odrediti regulaciju opterećenja  $\Delta V_O / \Delta I_L$  u  $mV/mA$ ,

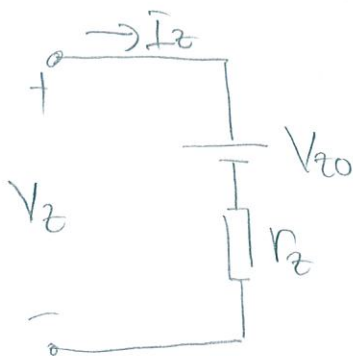
d) odrediti promenu napona  $V_O$  za  $R_L = 2k\Omega$ ,

e) odrediti  $V_O$  za  $R_L = 0.5k\Omega$ ,

f) Pri kojoj minimalnoj vrednosti otpornosti  $R_L$  dioda još radi u oblasti pasivnog?



Odrediti parametar  $V_{z0}$ :



$$V_z = V_{z0} + r_z I_z$$

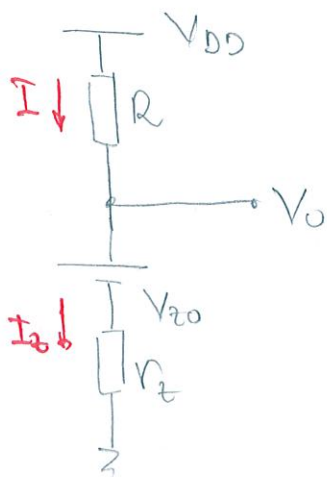
$$V_{z0} = V_z - r_z I_z$$

$$\text{za } V_z = 6.8 \text{ V i } I_z = 5 \text{ mA}$$

$$V_{z0} = 6.8 \text{ V} - 20 \Omega \cdot 0.005 \text{ A}$$

$$V_{z0} = 6.7 \text{ V}$$

a)  $V_0 = ?$  za  $R_L = \infty$  (nema opterećenja)



$$I = I_z = \frac{V_{DD} - V_{z0}}{R + r_z}$$

$$I = I_z = \frac{10 \text{ V} - 6.7 \text{ V}}{0.5 \text{ k} + 0.02 \text{ k}} = 6.35 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} V_0 &= V_{z0} + r_z I_z \\ &= 6.7 \text{ V} + 6.35 \text{ mA} \cdot 0.02 \text{ k}\Omega \\ &= 6.83 \text{ V} \end{aligned}$$

b) Promena  $\frac{\Delta V_0}{\Delta V_{DD}}$  se zove naponska regulacija i obično se izražava u  $\text{mV/V}$ .

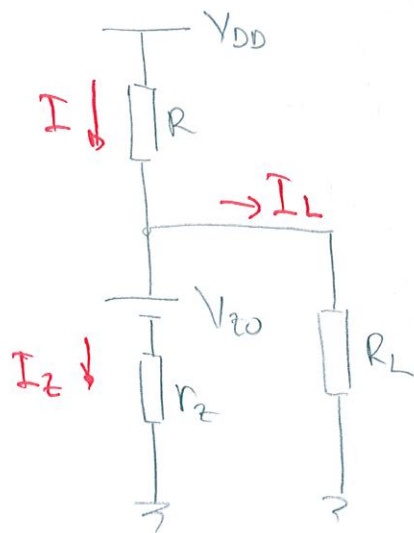
Za promene napona  $V_{DD}$  za  $\pm 1 \text{ V}$  izlazi napon se menja:

$$\Delta V_0 = \frac{r_z}{r_z + R} \cdot \Delta V_{DD} = \pm 1 \text{ V} \cdot \frac{20}{20 + 500} = \pm 38.5 \text{ mV}$$

Dakle je naponska regulacija (stabilizacija):

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta V_{DD}} = \frac{\pm 38.5 \text{ mV}}{\pm 1 \text{ V}} = 38.5 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$$

c) Kad je  $R_L \neq \infty$ , kroz opterećenje postoji struja  $I_L$ , pa je struja Zener diode manja za tu struju.



Promena struje diode je:

$$\Delta I_z = -I_L = -1 \text{ mA}$$

Promena izlaznog napona je:

$$\Delta V_o = r_z \cdot \Delta I_z = 20 \Omega \cdot (-1 \text{ mA})$$

$$\Delta V_o = -20 \text{ mV}$$

Regulacija (stabilizacija) opterećenja je:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = \frac{-20 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = -20 \frac{\text{mV}}{\text{mA}}$$

d) Za  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ , struja opterećenja je:

$$I_L = \frac{V_z}{R_L} = \frac{V_o}{R_L} = \frac{6.8 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 3.4 \text{ mA}$$

Za to se će promeniti struja diode:

$$\Delta I_z = -I_L = -3.4 \text{ mA}$$

Sada je promena izlaznog napona:

$$\Delta V_o = r_z \cdot \Delta I_z = -68 \text{ mV}$$

Posledica je aproksimativna jer se ne uzima struja  $I$ . Tačna analiza daje promenu izlaznog napona:  $-70 \text{ mV}$



e) Za  $R_L = 0.5 \text{ k}\Omega$ , struja opterećenja je:

$$I_L = \frac{V_0}{R_L} = \frac{6.8 \text{ V}}{0.5 \text{ k}\Omega} = 13.6 \text{ mA}$$

ovo nije moguće, jer je struja kroz otpornik  $R$  jednaka:

$$I = \frac{V_{00} - V_0}{R} = \frac{10 \text{ V} - 6.8 \text{ V}}{0.5 \text{ k}\Omega} = 6.4 \text{ mA}$$

Prema tome, Zener dioda je isključena. U ovom slučaju, izlazni napon je određen na osnovu naponskog razdelnika:

$$V_0 = \frac{R_L}{R_L + R} \cdot V_{00} = \frac{0.5 \text{ k}\Omega}{0.5 \text{ k}\Omega + 0.5 \text{ k}\Omega} \cdot 10 \text{ V} = 5 \text{ V}$$

$V_0 < V_Z \Rightarrow$  Zener dioda ne radi u predjelu

f) Za Zener diodu na granici predjela:

$$I_Z = I_{ZK} = 0.2 \text{ mA} \quad V_Z = V_{ZK} \approx 6.7 \text{ V}$$

U ovoj tački, u navedenom slučaju, struja kroz otpornik je:

$$I = \frac{9 \text{ V} - 6.7 \text{ V}}{0.5 \text{ k}\Omega} = 4.6 \text{ mA}$$

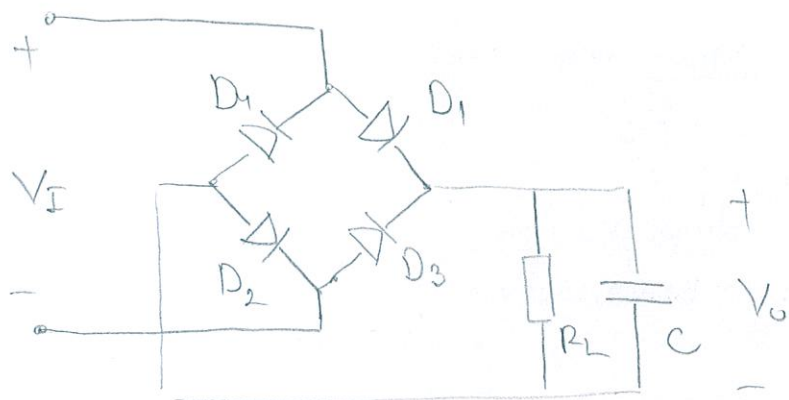
pa je struja opterećenja:

$$I_L = I - I_{ZK} = 4.6 \text{ mA} - 0.2 \text{ mA} = 4.4 \text{ mA}$$

Odgovarajuća vrednost otpornosti opterećenja je:

$$R_L = \frac{V_{ZK}}{I_L} = \frac{6.7 \text{ V}}{4.4 \text{ mA}} \approx 1.5 \text{ k}\Omega$$

PRIMER 5: Projektovati dvostrani ispravljač sledeće snage na izlazu 2W i ulaznog napona 3.6 V, tako da odstupanje ulaznog napona usled praznjenja kondenzatora bude  $V_r \leq 0.2 V$ . Neka je  $V_{D0} = 0.8 V$ .



Ako je na izlazu potrebno 3.6 V, a ulazni napon je:

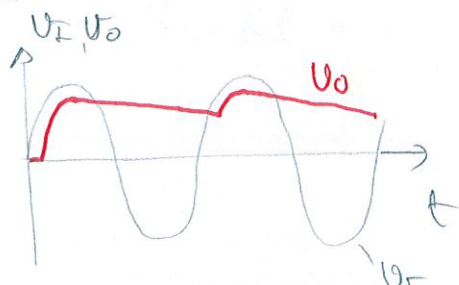
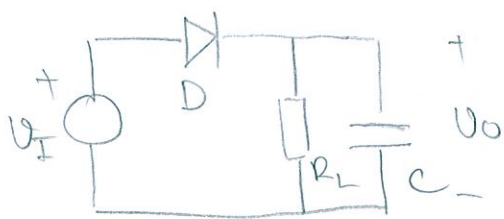
$$V_O = V_I - 2V_{D0}$$

sledi da je  $V_I = V_O + 2V_{D0}$ . Za ulazni napon  $V_O = 3.6 V$ , amplituda ulaznog napona je:

$$V_I = V_O + 2 \cdot V_{D0} = 3.6 V + 2 \cdot 0.8 V = 5.2 V$$

$V_r \leq 0.2 V$  (ripple) - odstupanje usled praznjenja kondenzatora. Tipično je  $V_r$  do (5÷10)% maksimalnog napona na izlazu, a to se reguliše izborom kondenzatora adekvatne kapacitivnosti.

Jednostrani ispravljač:



$$V_O = V_{D0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = (V_{Im} - V_{D0}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \tau = R_L \cdot C$$

Da bi  $V_L$  bilo dovoljno malo, mora biti zadovoljen uslov  $\tau \gg T$ .  
 U tom slučaju je  $e^{-x} \approx 1 - x$  kad je  $x \ll 1$ . Sada je  
 relevantni napori:

$$V_o(t) = (V_{im} - V_{oo}) \left(1 - \frac{t}{R_L C}\right)$$

$$V_o(t) = \underbrace{V_{im} - V_{oo}}_{V_{om}} - \underbrace{\frac{V_{im} - V_{oo}}{R_L} \cdot \frac{t}{C}}_{\text{stepa priručnika konverzibilu}}$$

$V_{om}$   
početna stepa

stepa priručnika  
konverzibilu

napori za koji se konverzibilu  
ispisuje

$$V_L \approx \frac{V_{im} - V_{oo}}{R_L} \cdot \frac{T_I}{C} \Rightarrow V_L = \frac{V_{om}}{R_L} \cdot \frac{T_I}{C} = \frac{V_{om}}{R_L} \cdot \frac{1}{f_I \cdot C}$$

$$V_L = \frac{I_L}{f_I C}$$

Duostrewni isprawy

$$T_R = \frac{T_I}{2} = \frac{1}{f \cdot 2} \Rightarrow V_L = \frac{I_L}{2 f_I C}$$

$$I_2 \quad P_o = V_o \cdot I_L \Rightarrow I_L = \frac{2W}{3.6V} = 0.56 A$$

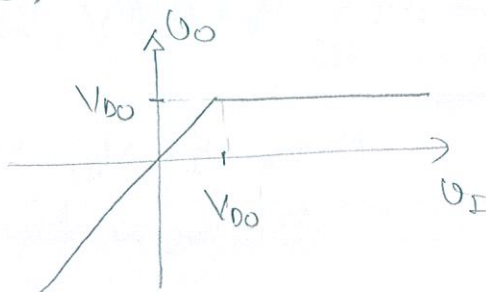
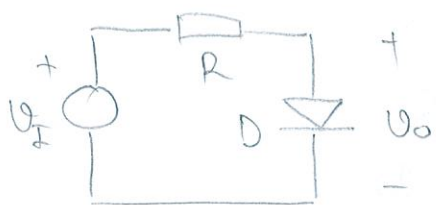
$$I_2 \quad V_L = \frac{I_L}{2 f_I C} \Rightarrow C = \frac{I_L}{2 f_I V_L}$$

$$C = \frac{0.56 A}{2 \cdot 0.2V \cdot 50Hz} = 28 \mu F$$

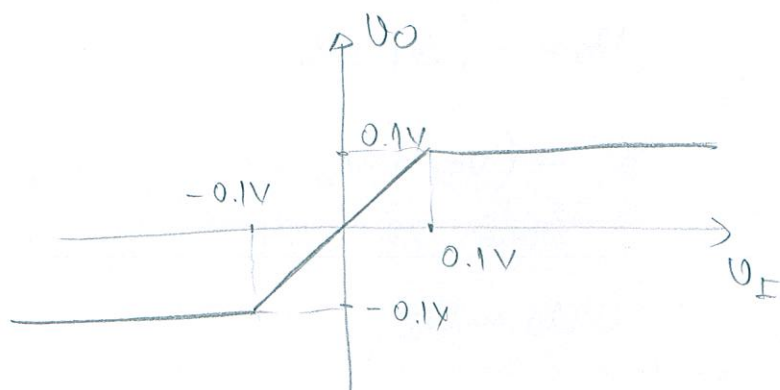
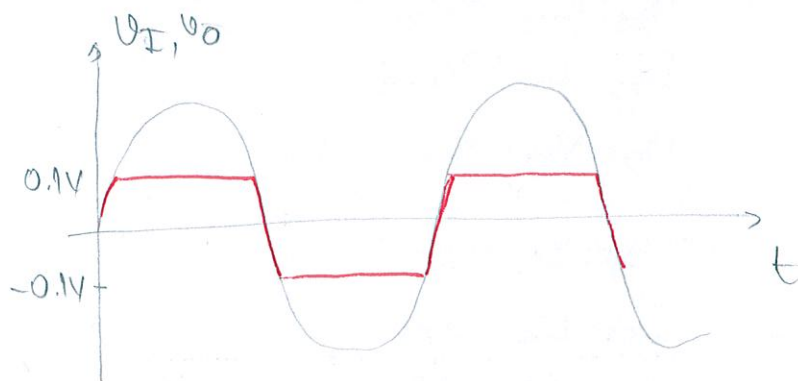
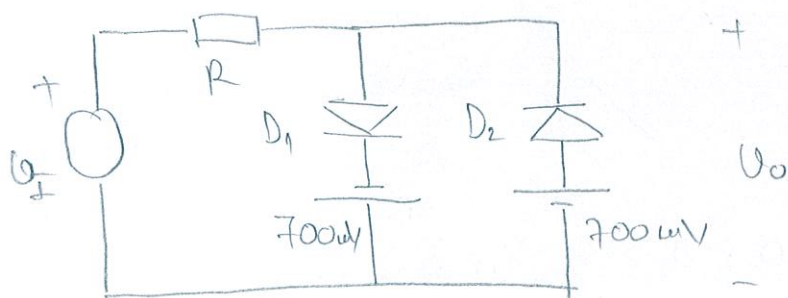


PRIMER 6: Projektovati kolo tako da izlazi napon bude ograničen na vrednost  $\pm 100 \text{ mV}$ . Koristiti idealizovan model diode i smatrati da je  $V_{D0} = 800 \text{ mV}$ .

Jednostavni ograničavač:



Dvostrani ograničavač prema zahtevima:

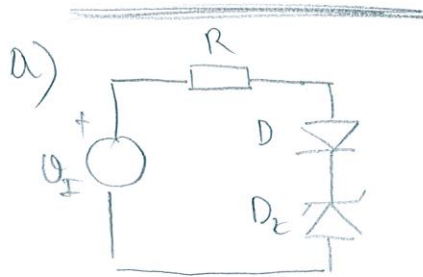




PRIMER 7: a) Nacrtati šemu jednostranog ograničavača sa jednom diodom i jednom Zener diodom. Odešati slike napona i prenosa dju.

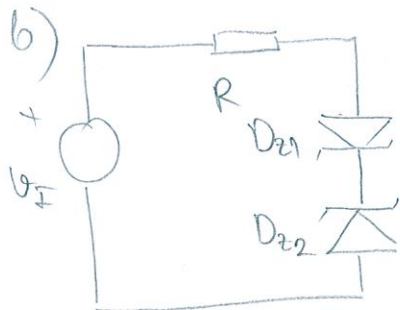
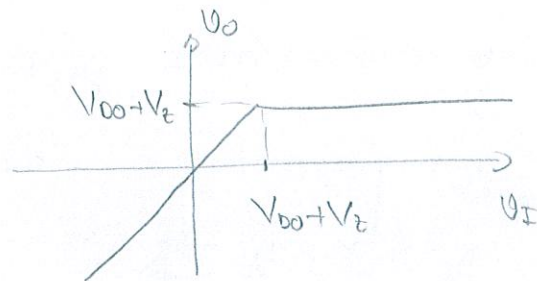
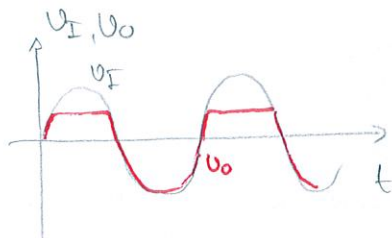
b) Nacrtati šemu dvostranog ograničavača sa dve Zener diode, pa skicirati slike napona i prenosa dju.

Pomoć je  $V_{D0} = 0.7V$ ,  $V_Z = 5.1V$ ,  $U_I(t) = V_{im} \sin \omega t$ ,  $V_{im} > V_Z + V_{D0}$

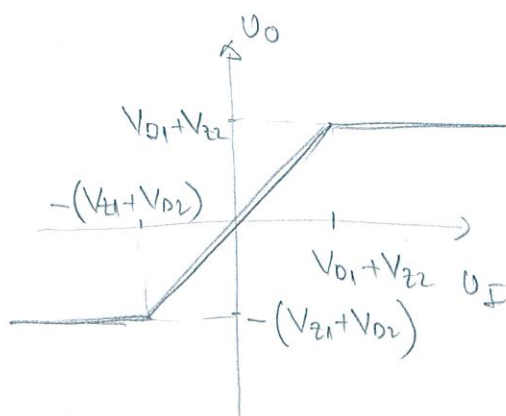
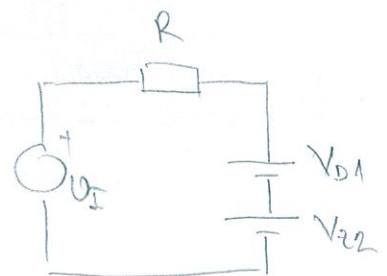


1° za  $U_I < V_{D0} + V_Z$   
 $D$  i  $D_Z$  su isključene  
 $U_0 = U_I$

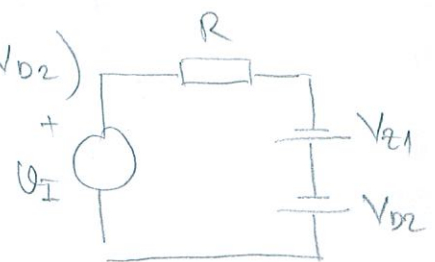
2°  $U_I > V_{D0} + V_Z$   
 $D$  i  $D_Z$  su uključene  
 $U_0 = V_{D0} + V_Z = 5.8V$



1°  $U_I > 0$  i  $U_I > V_{D1} + V_{Z2}$   
 $D_{Z1}$  kao dioda  
 $D_{Z2}$  kao Zener  
 $U_0 = V_{D1} + V_{Z2} = 5.8V$



2°  $U_I < 0$  i  $U_I < -(V_{Z1} + V_{D2})$   
 $D_{Z1}$  kao Zener  
 $D_{Z2}$  kao dioda  
 $U_0 = -(V_{Z1} + V_{D2})$



3°  $-(V_{Z1} + V_{D2}) < U_I < V_{D1} + V_{Z2}$   
 diode ne vode i ne rade u polovici  
 $U_0 = U_I$

