

Петар Бошњаковић



ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНИКЕ

# **ЗБИРКА РЕШЕНИХ ЗАДАТАКА ИЗ ОСНОВА ЕЛЕКТРОНИКЕ**



**ВИША ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКА ШКОЛА  
БЕОГРАД  
2004**

Петар Бошњаковић  
Збирка решених задатака из основа електронике

Рецензенти  
Борислав Хацибабић,  
Ненад Толић

Цртежи, обрада и припрема текста  
Петар Бошњаковић

Корице  
Ненад Толић

Издавач  
Виша електротехничка школа, Београд  
За издавача  
Драгољуб Мартиновић

*Наставно веће Више електротехничке школе у Београду одобрило је издавање и примену овог уџбеника у настави.*

CIP – каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд  
621.38 (075.8)(076)

**БОШЊАКОВИЋ, Петар**

Збирка решених задатака из основа  
електронике / Петар Бошњаковић. –Београд :  
Виша електротехничка школа, 2004  
(Београд : МСТ Гајић).  
– 135 стр. : граф. прикази ; 24 cm

Тираж . 250-

ISBN 86 – 85081-11-4

а) Електроника – Вежбе  
COBISS.SR-ID 119176972

# ПРЕДГОВОР

Збирка решених задатака из предмета Основи електронике намењена је првенствено студентима Више електротехничке школе у Београду, који овај предмет слушају на првој години студија. Књига, која садржи три дела, обликована је тако да читалац може да добије јасну и прецизну представу о садржају и циљевима овог предмета, како се врши провера стеченог знања и која се знања од кандидата на испиту из овог предмета захтевају, а у складу са тим и провери и допуни своја знања. У настојању да се збирка учини приступачнијом читаоцима са различитим нивоом предзнања, текст је пречишћен на бази консултација са студентима.

Први и најобимнији део ове збирке садржи решене задатке са основног, елиминаторног, дела испита. Приказан је поступак анализе основних електронских кола са циљем добијања одговора на постављена питања. Други део садржи решења елементарних задатака, којима се проверава познавање основних електронских кола и структура која се срећу у пракси. Трећи део садржи питања за проверу теоријског знања. Одговоре на ова питања студент треба самостално да формулише на основу градива обрађеног у уџбенику.

Аутор се захваљује рецензентима, Бориславу Хаџибабићу и Ненаду Толићу на корисним саветима у погледу коначног обликовања ове збирке, од које се, надамо се не неоправдано, очекује да ће студентима олакшати савлађивање основних нивоа стручних знања која су предвиђена наставним програмом школе, а неопходна су за даље успешно праћење предмета на вишим семестрима.

29.11.2004

Аутор



# САДРЖАЈ

## 1. ЗАДАЦИ СА ИСПИТА

|      |                |    |
|------|----------------|----|
| 1.1. | ЈУН 2003       | 1  |
| 1.2. | СЕПТЕМБАР 2003 | 21 |
| 1.3. | ОКТОБАР 2003   | 39 |
| 1.4. | ДЕЦЕМБАР 2003  | 59 |
| 1.5. | ЈАНУАР 2004    | 67 |
| 1.6. | ЈУН 2004       | 77 |
| 1.7. | СЕПТЕМБАР 2004 | 95 |

## 2. ЗАДАЦИ СА КОЛОКВИЈУМА

|      |              |     |
|------|--------------|-----|
| 2.1. | ОСНОВНА КОЛА | 107 |
| 2.2. | ДИОДЕ        | 117 |
| 2.3. | ТРАНЗИСТОРИ  | 126 |

## 3. ПИТАЊА ЗА ПРОВЕРУ ЗНАЊА

|      |                               |     |
|------|-------------------------------|-----|
| 3.1. | ФИЗИЧКИ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНИКЕ    | 131 |
| 3.2. | ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНСКИХ УРЕЂАЈА | 132 |
| 3.3. | ДИОДЕ                         | 133 |
| 3.4. | БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ         | 133 |
| 3.5. | ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА   | 134 |
| 3.6. | ТИРИСТОРИ                     | 135 |

1.

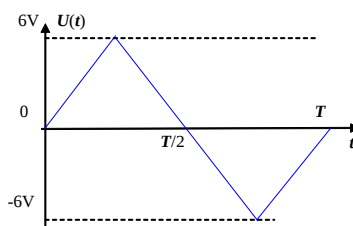
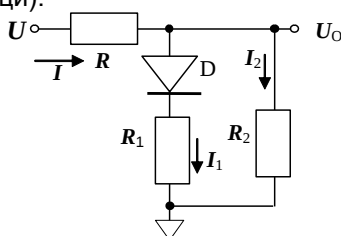
# ЗАДАЦИ СА ИСПИТА

ЈУН 2003

## ЗАДАТАК 1.А.

За коло приказано на слици, под претпоставком да је диода **D** савршена:

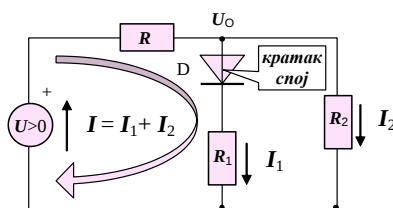
- одредити опште изразе за вредности струја  $I(U)$ ,  $I_1(U)$  и  $I_2(U)$ . Ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$ , ако напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 6 V (приказан на слици).



## РЕШЕЊЕ

Када је, у односу на смерове назначене на слици, напон  $U$  позитиван, диода **D** је поларисана у проводном (пропусном) смеру, па је напон између њених крајева једнак нули (савршена диода). Посматрано нелинеарно коло се у том случају своди на линеарно коло које саржи извор напона  $U$ , отпорник  $R$  и паралелно повезане отпорнике  $R_1$  и  $R_2$ .

$$U \geq 0$$



Струја  $I$  у грани која садржи извор напона  $U$  једнака је:

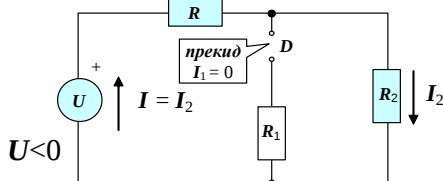
$$I = \frac{U}{R + R_{12}}, \quad I_1 = \frac{U_O}{R_1} = I \frac{R_{12}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_O}{R_2} = I \frac{R_{12}}{R_2}, \quad R_{12} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

$$U_O = I R_{12}.$$

Када је, у односу на смерове назначене на слици, напон  $U$  негативан, диода **D** је поларисана у непроводном смеру, па је струја  $I_1$  једнака нули.

Коло се своди на једну петљу у којој се налазе извор напона  $U$  и редно повезани отпорници  $R$  и  $R_2$ .

$$I = \frac{U}{R + R_2} = I_2, \quad I_1 = 0, \quad U_O = I R_2.$$



а)

За струје  $I$ ,  $I_1$  и  $I_2$ , чији су референтни смерови назначени на слици, важе следеће релације:

$$I = \begin{cases} \frac{U}{R+R_{12}}; U \geq 0 \\ \frac{U}{R+R_2}; U < 0 \end{cases}, \quad I_1 = \begin{cases} \frac{U}{R+R_{12}} \frac{R_{12}}{R_1}; U \geq 0 \\ 0; U < 0 \end{cases}, \quad I_2 = \begin{cases} \frac{U}{R+R_{12}} \frac{R_{12}}{R_2}; U \geq 0 \\ \frac{U}{R+R_2}; U < 0 \end{cases}.$$

б)

Ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке:

$$R = R_1 = R_2, \quad R_{12} = \frac{R}{2},$$

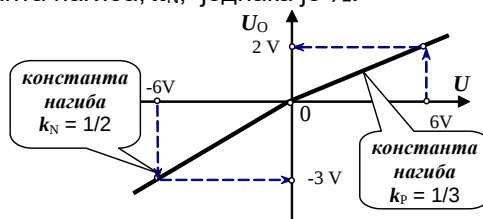
карактеристика преноса,  $U_O(U)$ , одређена је формулом:

$$U_O = I_2 R_2 = \begin{cases} U \frac{R_{12}}{R+R_{12}} = \frac{U}{3}; U \geq 0 \\ U \frac{R_2}{R+R_2} = \frac{U}{2}; U < 0 \end{cases}.$$

Графички приказ карактеристике преноса,  $U_O(U)$  дат је на слици. За позитивне вредности напона  $U$  константа нагиба,  $k_P$ , једнака је  $\frac{1}{3}$ . За негативне вредности напона  $U$  константа нагиба,  $k_N$ , једнака је  $\frac{1}{2}$ .

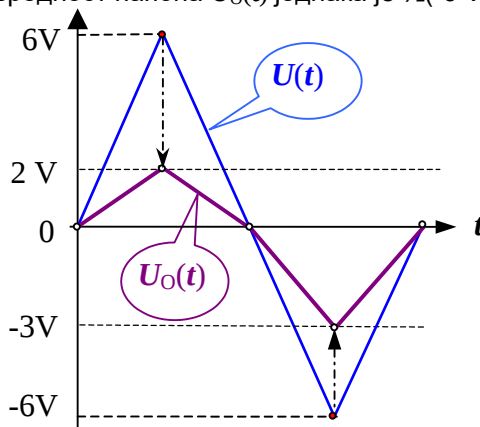
$$U_O = kU$$

$$k = \begin{cases} k_P = \frac{R_{12}}{R+R_{12}} = \frac{1}{3}; U \geq 0 \\ k_N = \frac{R_2}{R+R_2} = \frac{1}{2}; U < 0 \end{cases}$$



в)

Дијаграм таласних облика напона на улазу и излазу кола приказан је на слици. Највећа позитивна вредност напона  $U_O(t)$  једнака је  $\frac{1}{3}(6 \text{ V}) = 2 \text{ V}$ . Највећа негативна вредност напона  $U_O(t)$  једнака је  $\frac{1}{2}(-6 \text{ V}) = -3 \text{ V}$ .



**ЗАДАТАК 2.А.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да је струја гејта N-каналног транзистора са ефектом поља занемарљиво мала, а да су вредности  $U_{GS(OFF)}$ ,  $I_{DSS}$  познате:

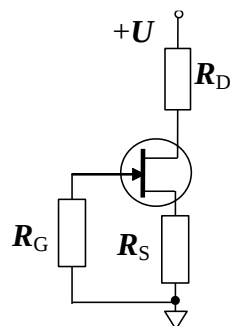
- а) одредити општи израз за вредност отпорности  $R_S$  која одговара задатој вредности мирне радне струје  $I_D$  у области засићења.

За задате вредности параметара кола:

$I_D = 5 \text{ mA}$ ,  $U = 12 \text{ V}$ ,  $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$  и  $U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}$ ;

- б) израчунати бројну вредност отпорности  $R_S$ ;

- в) одредити опсег могућих вредности отпорности  $R_D$  при којима се радна тачка транзистора налази у области засићења.

**РЕШЕЊЕ**

а)

Стање у колу одређено је следећим једначинама:

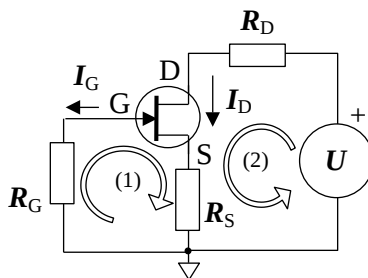
$$R_G I_G - U_{GS} - R_S I_D = 0, \quad (1)$$

(Други Кирхофов закон примењен на петљу гејт-сорс),

$$U - I_D R_D - U_{DS} - I_D R_S = 0, \quad (2)$$

(Други Кирхофов закон примењен на петљу дрејн-сорс),

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \quad (3)$$



(Карактеристика преноса транзистора са ефектом поља при раду у области засићења)

Под претпоставком да је струја гејта занемарљиво мала, пад напона на отпорнику  $R_G$  се може занемарити, па је напон између гејта и сорса,  $U_{GS}$ , једнак паду напона који струја  $I_D$  ствара на отпорнику  $R_S$ ,

$$U_{GS} \cong -R_S I_D.$$

На основу једначине (3) следи:

$$U_{GS} = U_{GS(OFF)} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right),$$

односно:

$$R_S = -\frac{U_{GS}}{I_D} = -\frac{U_{GS(OFF)}}{I_D} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right).$$

б)

За задате бројне вредности добија се:

$$U_{GS} = -2,5 \text{ V}, \quad R_S = 500 \, \Omega.$$

в)

Излазна карактеристика N-каналног транзистора са ефектом поља приказана је на слици. Граница области засићења (приказана испрекиданом линијом) одређена је условом:

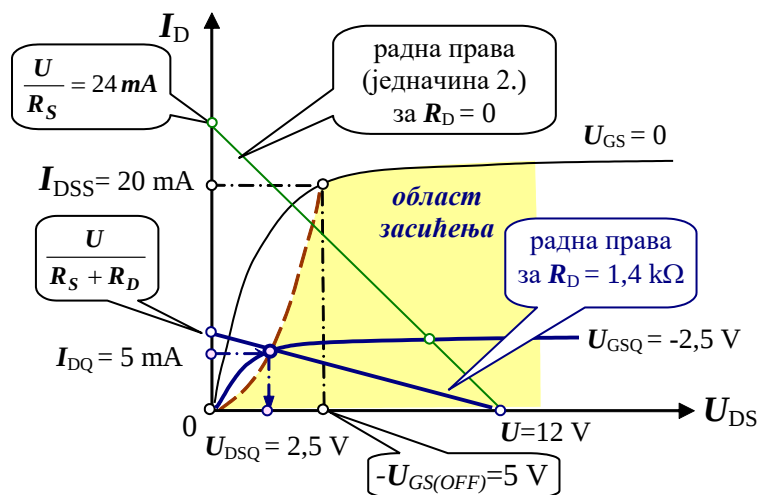
$$U_{GD} = U_{GS(OFF)}$$

Да би транзистор био у засићењу, потребно је да буде задовољен услов:

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} \leq U_{GS(OFF)},$$

односно:

$$U_{DS} \geq U_{GS} - U_{GS(OFF)}. \quad (4)$$



На основу једначина (1), (2) и (4) следи потребан услов да се радна тачка транзистора налази у области засићења:

$$R_D I_D - U \leq U_{GS(OFF)}.$$

$$R_D \leq \frac{U + U_{GS(OFF)}}{I_D}.$$

За задате бројне вредности параметара кола је:

$$0 \leq R_D \leq 1,4 \text{ k}\Omega.$$

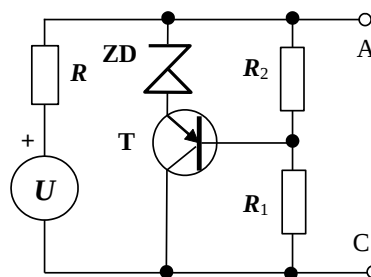
### ЗАДАТАК 3.А.

За коло приказано на слици, под предпоставком да је **T** силицијумски транзистор, чије је појачање струје од базе до колектора довољно велико, да се струја базе може занемарити у односу на остале струје у колу:

- а) одредити општи израз који описује зависност напона  $U_{AC}$  од вредности напона  $U$  ( $U \geq 0$ ) и напона пробоја Ценер-диоде  $U_Z$ .

Ако је напон пробоја Ценер-диоде,  $U_Z$ , једнак 5,6 V, а отпорности  $R_1$  и  $R_2$  једнаке 10 kΩ:

- б) израчунати вредност напона,  $U_{AC}$ , када је  $U = 20$  V;  
в) израчунати вредност струје кроз Ценер-диоду,  $I_Z$ , ако је отпорност  $R$  једнака 1 kΩ.



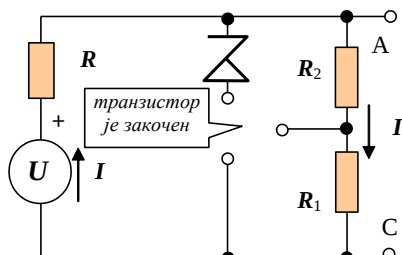
### РЕШЕЊЕ

Могућа су два стања у колу. При малим вредностима улазног напона ( $U \geq 0$ ) транзистор је закочен, струја базе и струја колектора су занемарљиво мале. При довољно великим позитивним вредностима улазног напона, Ценер-диода се налази у стању инверзног пробоја, а транзистор **T** је у проводном стању.

1.

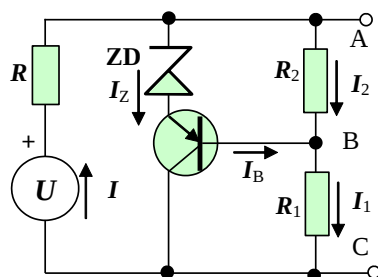
Када је транзистор закочен, коло се понаша као пасивни делитељ напона који образују отпорници  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R$ :

$$U_{AC(1)} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R} U.$$



2.

При довољно великим позитивним вредностима напона  $U$ , када је транзистор **T** у проводном стању, а диода **ZD** се налази у стању инверзног пробоја, за усвојене ознаке и референтне смерове напона и струја у колу, приказане на слици, важе следеће једначине:



$$U_{AB} = R_2 I_2 = U_Z + U_{EB},$$

$$U_{AC(2)} = R_1 I_1 + R_2 I_2, \text{ и}$$

$$I_2 + I_B = I_1.$$

Према предпоставци струја базе,  $I_B$ , се може занемарити у односу на струју  $I_2$ :

$$I_1 = I_2 = \frac{U_Z + U_{EB}}{R_2},$$

$$U_{AC(2)} = (R_1 + R_2)I_2 = (R_1 + R_2) \frac{U_Z + U_{EB}}{R_2}.$$

Дакле, у таквом стању кола, излазни напон не зависи од вредности улазног напона:

$$U_{AC(2)} = (U_Z + U_{EB}) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right).$$

Напон  $U_K$  који одговара вредности када, при повећању напона  $U$ , радна тачка транзистора прелази из области закочења у активну област, одређен је условом:

$$U_{AC(1)}(U_K) = (U_Z + U_{EB}) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right),$$

односно:

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R} U_K = (U_Z + U_{BE}) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right),$$

одакле следи:

$$U_K = (U_Z + U_{BE}) \frac{R_1 + R_2 + R}{R_2},$$

$$U_K = (U_Z + U_{BE}) \left( 1 + \frac{R_1 + R}{R_2} \right),$$

$$U_{AC} = \begin{cases} \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R} U & \text{за } U \leq U_K \\ (U_Z + U_{EB}) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) & \text{за } U > U_K \end{cases}.$$

б)

За силициумски транзистор се може усвојити да је у активној области напон емитор - база,  $U_{EB}$ , приближно једнак:

$$U_{EB} = 0,6V.$$

За задате бројне вредности, гранични напон  $U_K$  једнак је:

$$U_K = 13,02V,$$

$$U_{AC}(20V) = 12,4V.$$

в) За задате бројне вредности је:

$$I = \frac{U - U_{AC}}{R} = 7,6mA$$

$$I_1 = I_2 = \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2} = 0,62mA$$

$$I_Z = I - I_2 = I_C$$

$$I_Z(20V) = 6,98mA.$$

### ЗАДАТАК 4.А.

У колу приказаном на слици употребљене су четири једнаке диоде,  $D_1$  до  $D_4$ , и једна Ценер-диоода,  $ZD$ ; чије  $U-I$  карактеристике се могу приближно представити приказаним дијаграмима;

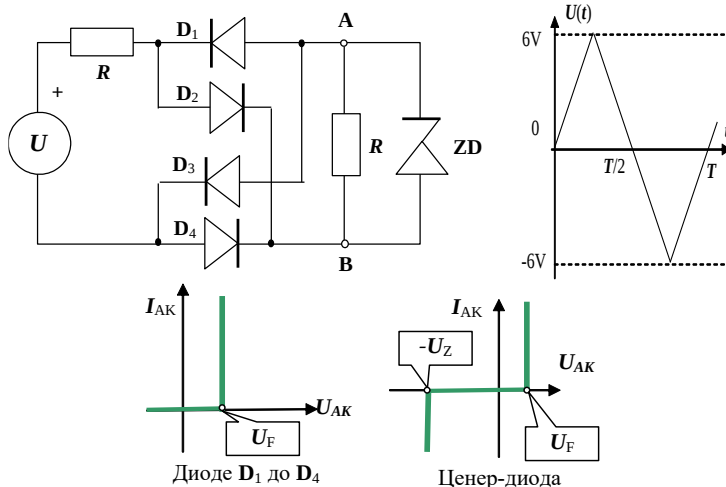
а) одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ .

Ако је напон диоде поларисане у пропусном смеру,  $U_F$ , једнак  $1V$ , а радни напон Ценер-диоде у области пробоја,  $U_Z$ , једнак  $5V$ :

б) одредити вредност напона  $U_{AB}$  за случај  $U = 6V$ .

в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ .

г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако напон  $U(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде  $6V$ .



### РЕШЕЊЕ

Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода,  $(D_1, D_4)$  или  $(D_2, D_3)$ , буде у проводном стању, што значи да напон  $U$  по модулу (интензитету) треба да буде већи од напона  $2U_F$ ,

Када је у односу на референтни смер назначен на слици, напон  $U$  позитиван и већи од напона  $2U_F$  потребног да диоде  $D_2$  и  $D_3$  буду у проводном стању, струја коју даје извор напона  $U$  има такав смер да је тачка B на вишем потенцијалу од тачке A. Напон  $U_{AB}$  је негативан.

Када је у односу на задати референтни смер напон  $U$  негативан, а по интензитету већи од напона  $2U_F$ , потребног да диоде  $D_4$  и  $D_1$  буду у проводном стању, струја коју даје извор напона  $U$  има смер такав да је тачка B на вишем потенцијалу од тачке A. Напон  $U_{AB}$  је негативан.

Напон  $U_{AB}$  по интензитету не може бити већи од напона на Ценер-диодии која проводи струју у директном смеру ( $U_F$ ).

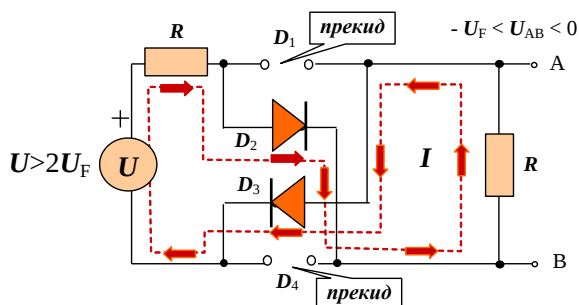
а)

У околини координатног почетка  $U-I$  карактеристике важи:

$$U_{AB} = 0 \text{ за } |U| \leq 2U_F.$$

За позитивне вредности улазног напона, веће од напона  $2U_F$  могућа су два стања у колу.

На слици је приказано стање у колу које одговара условима рада када је излазни напон  $U_{AB}$  по интензитету различит од нуле, али мањи од напона вођења директно поларисане Ценер-диоде.



Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је бројна вредност напона  $U_{AB}$  већа од вредности напона Ценер-диоде која проводи струју у директном смеру:  $(U > 2U_F) \wedge (U_{AB} > -U_F)$ , приказано је на слици.

Напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = -RI_p = -R \frac{U - 2U_F}{2R} = -\frac{U}{2} + U_F < 0 \text{ за } (U > 2U_F) \wedge (U_{AB} > -U_F).$$

Гранична вредност улазног напона,  $U_{GP}$ , при којој струја  $I_p$  ствара на излазном отпорнику напон  $U_{AB}$  једнак напону Ценер-диоде која проводи струју у директном смеру,  $-U_F$ , одређена је једначином:

$$U_{AB}(U_{GP}) = -U_F,$$

одакле следи:

$$-U_F = -\frac{U_{GP}}{2} + U_F,$$

$$U_{GP} = 4U_F$$

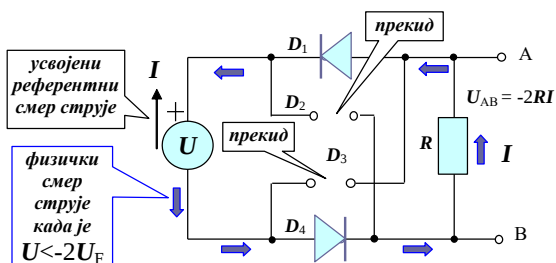
$$U_{AB} = -\frac{U}{2} + U_F < 0 \text{ за } 2U_F < U \leq U_{GP}$$

Када је напон  $U$  већи од напона  $U_{GP}$ , напон  $U_{AB}$  је негативан, по модулу једнак напону  $U_F$ :

$$U_{AB} = -U_F \text{ за } U > U_{GP} = 4U_F$$

За негативне вредности улазног напона, мање од напона  $-2U_F$  могућа су два стања у колу.

Стање у колу, које одговара условима рада када улазни напон  $U$  негативан а по интензитету већи од напона  $2U_F$ , а излазни напон  $U_{AB}$  по интензитету мањи од напона на директно поларисаној Ценер-диоды која проводи струју,  $U_F$ , приказано је на слици.



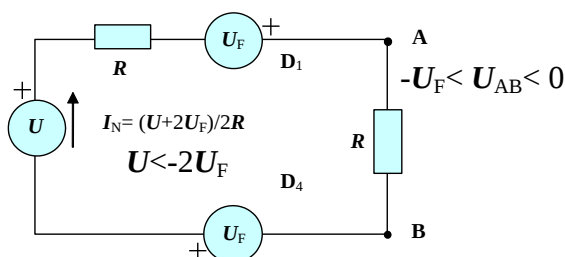
**Физички смер** струје у колу је у овом случају супротан од претходно усвојеног референтног смера, који је био одређен у сагласности са задатим референтним смером извора напона  $U$ .

Еквивалентно коло, које одговара условима рада када диоде  $D_4$  и  $D_1$  проводе струју али је напон  $U_{AB}$  недовољан да Ценер-диоды буде у стању пробоја:

$$(U < -2U_F) \wedge (U_{AB} > -U_F)$$

приказано је на слици.

Напон  $U_{AB}$  је једнак:



$$U_{AB} = RI_N = R \frac{U + 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} + U_F < 0 \text{ за } (U < -2U_F) \wedge (U_{AB} > -U_F).$$

Гранична вредност негативног улазног напона,  $U_{GN}$ , при којој струја  $I_N$  ствара на излазном отпорнику напон  $U_{AB}$  једнак  $-U_F$ , одређена је једначином:

$$U_{AB}(U_{GN}) = -U_F,$$

односно:

$$\frac{U_{GN}}{2} + U_F = -U_F,$$

одакле следи:

$$U_{GN} = -4U_F = -U_{GP}.$$

Када је напон  $U$  мањи од напона  $U_{GN}$ , напон  $U_{AB}$  је негативан, по модулу једнак напону  $U_F$ :

$$U_{AB} = -U_F \text{ за } U < U_{GN} = -4U_F$$

Према томе, за напон  $U_{AB}$  важи:

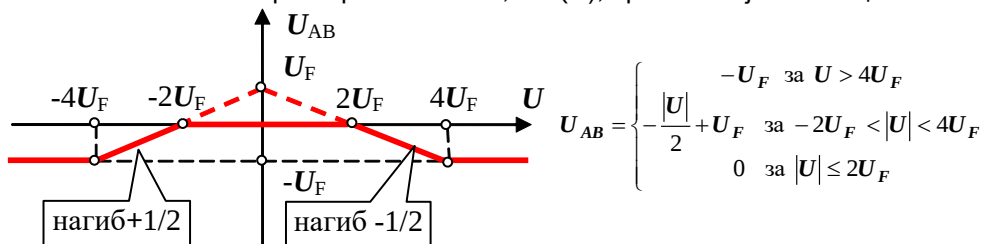
$$U_{AB} = \begin{cases} -U_F & \text{за } U > 4U_F \\ -\frac{U}{2} + U_F & \text{за } 2U_F < U \leq 4U_F \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ \frac{U}{2} + U_F & \text{за } -4U_F < U < -2U_F \\ -U_F & \text{за } U < -4U_F \end{cases}.$$

б)

За задату вредност напона  $U = 6\text{ V} > U_{\text{GP}}$  је:

$$U_{AB}(6\text{ V}) = -U_F = -1\text{ V}$$

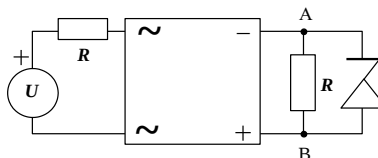
в)

Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(U)$ , приказана је на слици.Функција  $U_{AB}(U)$  је парна.

$$U_{AB}(-U) = U_{AB}(U).$$

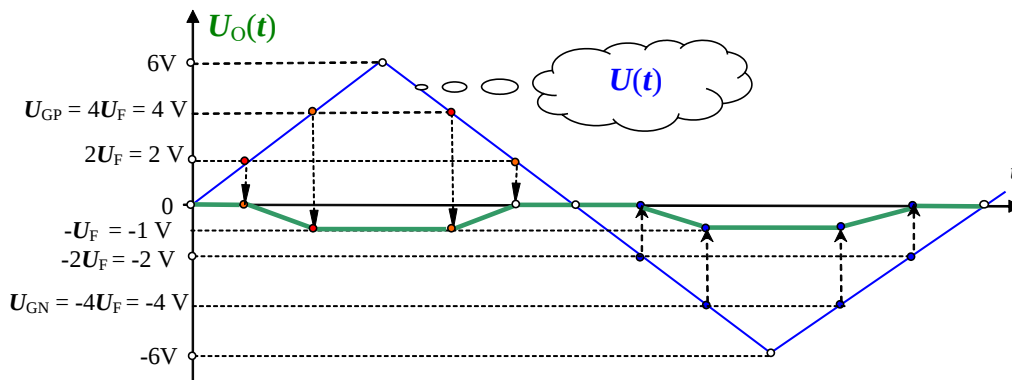
Изрази за вредност напона  $U_{AB}(U)$ , када је  $U < 0$ , добијају се на основу израза  $U_{AB}(U)$  за  $U > 0$ , сменом  $U \rightarrow -U$ .

Диоде  $D_1$  до  $D_4$  образују Грецов мост којим се врши двострано усмеравање. Крајеви моста су тако окренути да напон  $U_{AB}$  не може бити позитиван.



г)

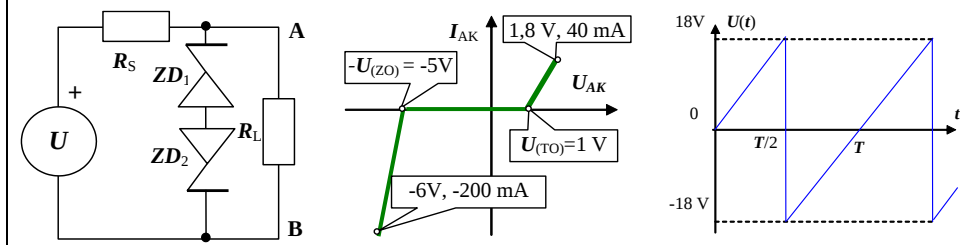
Дијаграми таласних облика у колу приказани су на слици.



### ЗАДАТАК 1.Б.

За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода  $ZD_1$  и  $ZD_2$  може представити приказаним дијаграмом:

- израчунати вредности динамичких отпорности Ценер-диоде при директној,  $r_T$ , и инверзној поларизацији у области пробоја,  $r_Z$ ;
- одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ ;
- израчунати вредност излазног напона  $U_{AB}$  за случај  $U = 18 \text{ V}$ ,  $R_S = 100 \Omega$ ,  $R_L = 100 \Omega$ ;
- нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако напон  $U(t)$  има троугаони таласни облик амплитуде  $18 \text{ V}$  приказан на слици.



### РЕШЕЊЕ

а)

Математички модел Ценер-диоде, који одговара статичкој карактеристици приказаној на слици има облик:

$$U = \begin{cases} U_{(TO)} + r_T I & \text{za } I > 0 \\ -U_{(ZO)} + r_Z I & \text{za } I < 0 \end{cases}, \quad I = 0 \text{ za } -U_{(ZO)} \leq U \leq U_{(TO)}.$$

где су:

$r_T$  отпорност нагиба струјно-напонске карактеристике при директној поларизацији,

$U_{(TO)}$  напон прага при директној поларизацији,

$r_Z$  отпорност нагиба струјно-напонске карактеристике при инверзној поларизацији у области пробоја,

$U_{(ZO)}$  напон прага при инверзној поларизацији (Ценеров напон).

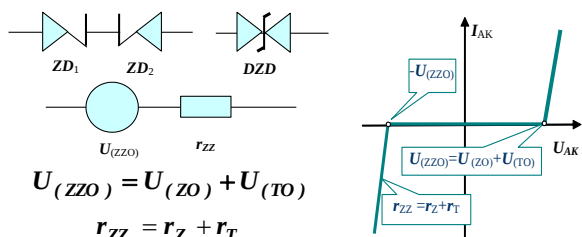
На основу задатих вредности следи:

$$r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,8 \text{ V}}{40 \text{ mA}} = 20 \Omega, \quad r_Z = \frac{\Delta U_R}{\Delta I_R} = \frac{1 \text{ V}}{200 \text{ mA}} = 5 \Omega.$$

б)

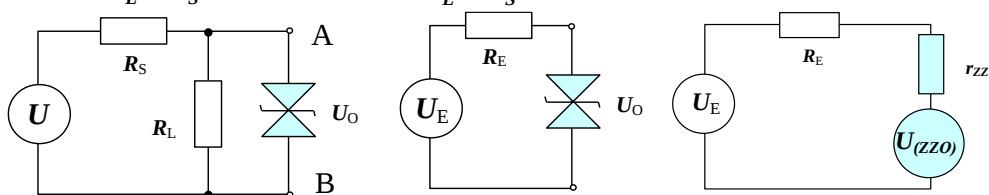
Две редно повезане, супротно оријентисане Ценер-диоде, делују као симетрична Ценер-диода чија су карактеристика и еквивалентно коло у области пробоја приказани на слици. Смер деловања извора напона  $U_{(ZZO)}$  одређен је физичким смером струје, односно смером деловања спољашњег извора напона.

## Симетрична Ценер-диоода



Применом Тевененове теореме, посматрано коло се може представити у једноставнијем облику. Електромоторна сила еквивалентног Тевененовог извора напона,  $U_E$ , и његова унутрашња отпорност,  $R_E$ , једнаки су:

$$U_E = U \frac{R_L}{R_L + R_S} \text{ и } R_E = R_L \parallel R_S = \frac{R_L R_S}{R_L + R_S}.$$



Структура посматраног кола је симетрична у погледу поларитета улазног напона  $U$ , па је и улазно-излазна карактеристика кола симетрична у односу на координатни почетак. Могуће су две области рада.

За вредности еквивалентног напона  $U_E$  мање од напона пробоја двојне Ценер-диоде,  $U_{ZZ}$ , струја кроз грану са Ценер-диодама је једнака нули. Напон  $U_{AB}$  на излазу кола једнак је напону  $U_E$ .

$$U_{AB} = U \frac{R_L}{R_S + R_L}, |U_E| < U_{ZZ}.$$

Када је напон  $U_E$  по интензитету већи од напона пробоја двојне Ценер-диоде  $U_{(ZZO)}$ , напон  $U_{AB}$  на излазу кола једнак је:

$$U_{AB} = U_{(ZZO)} + r_{ZZ} I = U_{(ZZO)} + r_{ZZ} \frac{U_E - U_{(ZZO)}}{R_E + r_{ZZ}}, |U_E| \geq U_{(ZZO)}$$

$$U_{AB} = U_{(ZZO)} \frac{R_E}{R_E + r_{ZZ}} + U_E \frac{r_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}}, |U_E| \geq U_{(ZZO)}.$$

Гранична вредност,  $U_G$ , улазног напона, која одговара преласку из једне у другу област рада, једнака је:

$$U_G = U \Big|_{U_E = U_{(ZZO)}} = U_{(ZZO)} \left( 1 + \frac{R_S}{R_L} \right).$$

$$U_{AB} = \begin{cases} U \frac{R_L}{R_L + R_S} \text{ за } |U| < U_{(ZZO)} \left( 1 + \frac{R_S}{R_L} \right) \\ U_{(ZZO)} \frac{R_E}{R_E + r_{ZZ}} \operatorname{sgn} U + U \frac{R_L}{R_L + R_S} \frac{r_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}} \text{ за } |U| \geq U_{(ZZO)} \left( 1 + \frac{R_S}{R_L} \right) \end{cases}$$

в)

$$r_{ZZ} = r_Z + r_T = 25 \Omega, U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)} = 6V, R_E = R_L \parallel R_S = 50 \Omega,$$

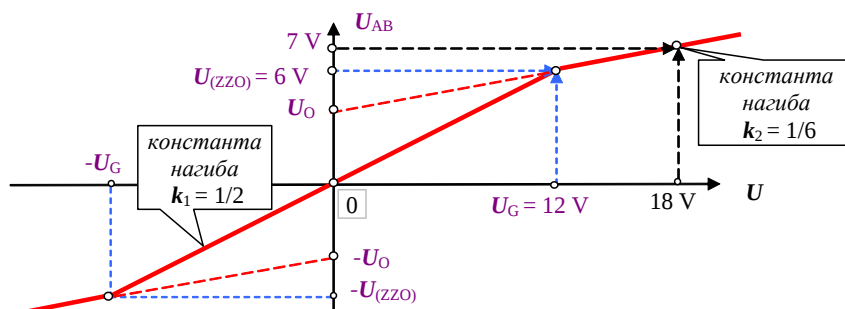
$$U_G = 2U_{(ZZO)} = 12V,$$

$$I = \frac{U_E - U_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}} = 40 \text{ mA} \Big|_{U=18V}.$$

$$U_{AB}(18V) = 7V$$

г) Графички приказ улазно-излазне карактеристике кола дат је на слици.

$$k_1 = \frac{R_L}{R_L + R_S} = \frac{1}{2}, k_2 = \frac{R_L}{R_L + R_S} \frac{r_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}} = \frac{1}{6}$$

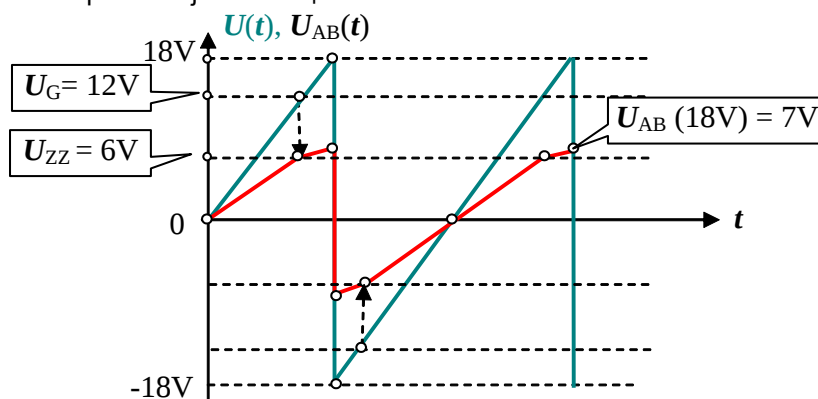


$$U_{AB} = \begin{cases} k_1 U & \text{за } |U| \leq U_G \\ U_0 \operatorname{sgn} U + k_1 U & \text{за } |U| > U_G \end{cases},$$

$$U_0 = U_{(ZZO)} \frac{R_E}{R_E + r_{ZZ}}, U_G = U_{(ZZO)} \left(1 + \frac{R_S}{R_L}\right), U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)}$$

д)

Временски дијаграм одзива кола на побуду несиметричним троугаоним импулсима приказан је на слици.



**ЗАДАТАК 2.Б.**

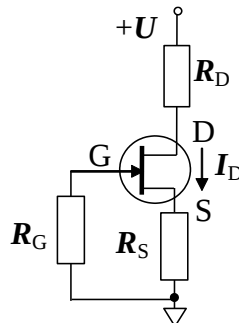
За коло приказано на слици, под претпоставком да је струја гејта N-каналног транзистора са ефектом поља занемарљиво мала, а да су вредности  $U$ ,  $R_S$ ,  $U_{GS(OFF)}$  и  $I_{DSS}$  познате:

- а) одредити општи израз за вредност радне струје  $I_D$  у области засићења зависности од вредности отпорности у посматраном колу.

За задате вредности параметара кола:

$$U = 10V, R_S = 3\text{ k}\Omega, I_{DSS} = 10\text{ mA и } U_{GS(OFF)} = -5\text{ V}$$

- б) израчунати бројну вредност напона  $U_{GS}$ ;  
в) одредити опсег могућих вредности отпорности  $R_D$  при којима се, за задате вредности параметара кола, радна тачка транзистора налази у области засићења.



а)

Под претпоставком да је струја гејта занемарљиво мала, пад напона на отпорнику  $R_G$  се може занемарити, па је једносмерни радни режим кола описан једначинама:

$$U_{GS} = R_G I_G - R_S I_D \cong -R_S I_D, \quad (1)$$

(када се једносмерни пад напона који струја гејта ствара на отпорнику  $R_G$  занемари, на основу другог Кирхофовог закона примењеног на улазну петљу, следи да је једносмерни напон између гејта и сорса,  $U_{GSQ}$ , једнак је паду напона који струја  $I_D$  ствара на отпорнику  $R_S$ ),

$$U_{DS} = U - I_D (R_D + R_S), \quad (2)$$

(на основу другог Кирхофовог закона примењеног на излазну петљу), и

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \quad (3)$$

(карактеристика преноса транзистора са ефектом поља).

На основу једначина (1) и (3) следи:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 + \frac{R_S I_D}{U_{GS(OFF)}} \right)^2.$$

б)

Проблем одређивања вредности мирне радне струје  $I_D$  се своди на решавање квадратне једначине:

$$\frac{I_D}{I_{DSS}} = \left( 1 + \frac{R_S I_{DSS}}{U_{GS(OFF)}} \frac{I_D}{I_{DSS}} \right)^2, \text{ односно:}$$

$$x = (1 + \alpha x)^2; \quad x = \frac{I_D}{I_{DSS}}; \quad \alpha = \frac{R_S I_{DSS}}{U_{GS(OFF)}},$$

која за задате бројне вредности има облик  $\alpha = -6$ :

$$36x^2 - 13x + 1 = 0.$$

Решење  $x = 1/4$  се одбацује, јер на основу једначине (3), за  $x = 1/4$  следи  $U_{GS} = -7,5\text{ V}$ , а то је немогуће, јер би транзистор тада био закочен

( $U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}$ ), па би струја  $I_D$  тада морала да буде једнака нули. Физички стварно решење је  $x = 1/9$  ( $I_D = 1,11 \text{ mA}$ ), на основу којег следи:

$$U_{GS} = -3,33 \text{ V}.$$

в)

Да би N-канални транзистор са ефектом поља био у засићењу, потребно је да буде задовољен услов

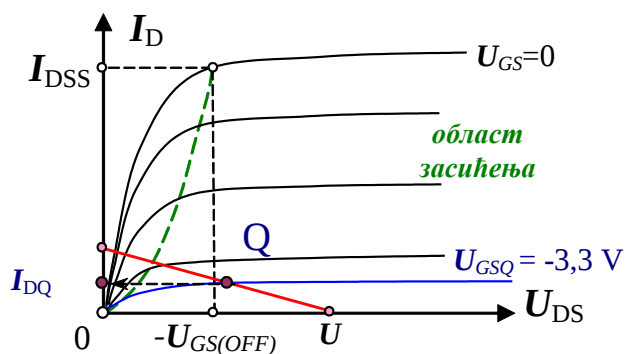
$$U_{DS} \geq U_{GS} - U_{GS(OFF)}.$$

На основу једначина (1) и (2) следи:

$$R_D I_D - U \leq U_{GS(OFF)},$$

односно:

$$R_D \leq \frac{U + U_{GS(OFF)}}{I_D}$$



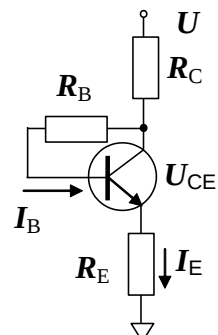
За задате бројне вредности је:

$$\max R_D = 4,5 \text{ k}\Omega.$$

## ЗАДАТАК 3.Б.

За коло приказано на слици,

- а) под претпоставком да су познате вредности напона напајања,  $U$ , отпорности  $R_B$ ,  $R_C$  и  $R_E$ , као и карактеристичних параметара транзистора (појачање струје од базе до колектора,  $\beta$ , напон између базе и емитора транзистора при раду у активној области,  $U_{BE}$ , и инверзна струја засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ ), одредити општи израз за вредност струје  $I_B$ .



- б) израчунати бројне вредности напона  $U_{CE}$  и струје  $I_E$  при задатим вредностима параметара кола:  $U = 10 \text{ V}$ ,  $\beta = 99$ ,  $I_{CBO} = 1 \mu\text{A}$ ;  $R_B = 100 \text{ k}\Omega$ ;  $R_C = R_E = 2 \text{ k}\Omega$ ;

а)

За посматрано коло важе једначине:

$$I = I_B + I_C = I_E, \quad (1)$$

$$U = (R_C + R_E)I_E + U_{CE}, \quad (2)$$

$$U_{CE} = R_B I_B + U_{BE}. \quad (3)$$

На основу односа напона у посматраном колу ( $U_{BE} > 0$ ,  $U_{CE} > 0$ ) следи да транзистор није у засићењу. Ако је  $U \gg U_{BE}$ , радна тачка налази се у активној радној области за коју важи

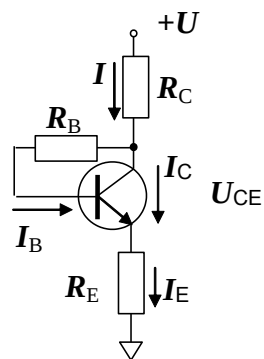
$$I_E = (\beta + 1)(I_B + I_{CBO}). \quad (4)$$

На основу претходних једначина следи:

$$U_{CE} = U - (R_C + R_E)I_E = R_B I_B + U_{BE},$$

$$U - (R_C + R_E)(1 + \beta)(I_B + I_{CBO}) = R_B I_B + U_{BE}$$

$$I_B = \frac{U - U_{BE} - (\beta + 1)(R_C + R_E)I_{CBO}}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)}.$$



б)

На основу задате вредности инверзне струје засићења колекторског споја,  $I_{CBO}$ , закључује се да је транзистор германијумски, за који се усваја да је у активној области напон база-емитор,  $U_{BE}$ , приближно једнак  $0,2 \text{ V}$ .

$$I_B = \frac{10 - 0,2 - 100 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^3 + 100 \cdot 4 \cdot 10^3} \frac{\text{V}}{\Omega} = 18,8 \mu\text{A}$$

На основу једначине (3) следи:

$$U_{CE} = (100 \cdot 10^3 \Omega) (18,8 \cdot 10^{-6} \text{ A}) + 0,2 \text{ V}$$

$$U_{CE} = 2,08 \text{ V}$$

На основу једначине (4) следи:

$$I_E = 100 \cdot (18,8+1) \mu A,$$

$$I_E = 1,98 \text{ mA},$$

$$I_C = I_E - I_B = (1,98 - 0,0188) \text{ mA} = 1,9612 \text{ mA}.$$

### Провера

На основу једначине (2) следи:

$$U_{CE} = U - (R_C + R_E) I_E = 10 \text{ V} - 4 \cdot 10^3 \Omega \cdot 1,98 \text{ mA} = 2,08 \text{ V}.$$

### ЗАДАТАК 4.Б.

У колу приказаном на слици употребљене су четири једнаке диоде,  $D_1$  до  $D_4$ , чија се  $U$ - $I$  карактеристика може приближно представити приказаним дијаграмом.

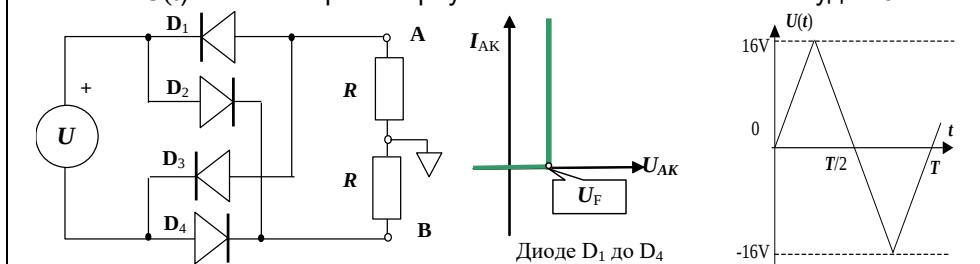
а) Одредити опште изразе за вредности напона  $U_A(U)$ ,  $U_B(U)$  и  $U_{AB}(U)$ .

Ако је напон диоде у проводном стању  $U_F$  једнак 1V:

б) одредити вредност напона  $U_{AB}$  за случај  $U = 16 \text{ V}$ ; .

в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ ;

г) нацртати дијаграме таласних облика напона  $U_A(t)$ ,  $U_B(t)$  и  $U_{AB}(t)$  ако напон  $U(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 16 V.



### РЕШЕЊЕ

Када је улазни  $U$  напон једнак нули, напон  $U_{AB}$  је такође једнак нули (карактеристика  $U_{AB}(U)$  пролази кроз координатни почетак).

Да би напон  $U_{AB}$  био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода, ( $D_1$ ,  $D_4$ ) или ( $D_2$ ,  $D_3$ ), буде директно поларисан, што значи да напон  $U$  по модулу (интензитету) треба да буде већи од напона  $2U_F$ .

Струја коју даје извор напона  $U$  има такав смер да је тачка В на вишем потенцијалу од тачке А. Напон  $U_{AB}$  не може бити позитиван. Напон  $U_A$  (потенцијал тачке А у односу на референтну тачку) такође не може бити позитиван, док напон  $U_B$  не може бити негативан.

Функција  $U_{AB}(U)$  је парна и представља комбинацију зоне неосетљивости (за  $|U| < 2U_F$  је  $U_{AB} = 0$ ) и померене функције потпуног (двостраног) усмеравања (модуо-функција) за  $U > 2U_F$ .

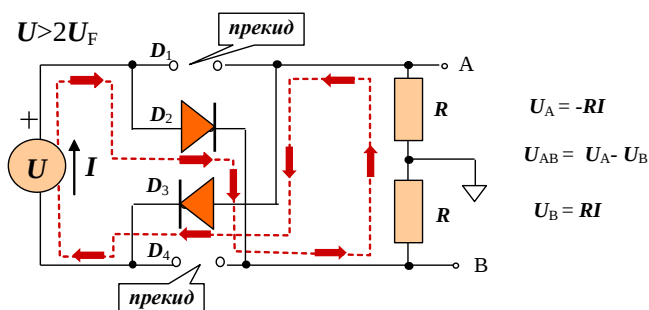
а)

На основу претходног разматрања следи:

$$U_{AB} = 0, U_A = 0, U_B = 0 \text{ за } |U| \leq 2U_F.$$

$$U > 2U_F$$

Стање у колу, које одговара условима рада када напон  $U$  позитиван и већи од напона  $2U_F$ , приказано је на слици.



Еквивалентно коло за  $U > 2U_F$  је приказано на слици.

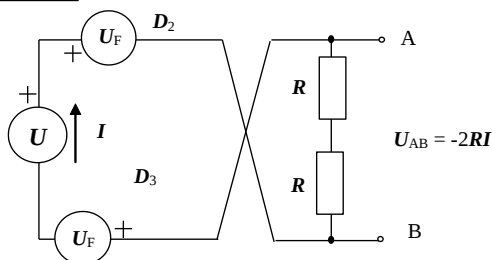
$$I = \frac{U - 2U_F}{2R}.$$

За коло важе следеће једначине:

$$U_{AB} = -2RI = -2R \frac{U - 2U_F}{2R} = -U + 2U_F < 0 \text{ за } U > 2U_F,$$

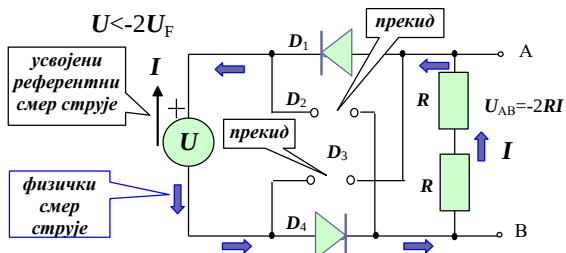
$$U_A = -R \frac{U - 2U_F}{2R} = -\frac{U}{2} + U_F < 0 \text{ за } U > 2U_F,$$

$$U_B = R \frac{U - 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} - U_F > 0 \text{ за } U > 2U_F.$$

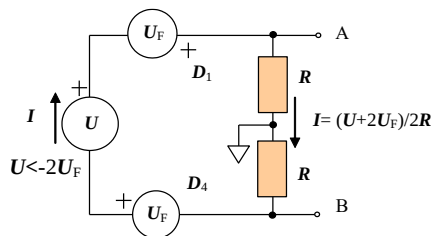


$$U < -2U_F$$

Стање у колу, које одговара условима рада када напон  $U$  негативан, а по интензитету већи од напона  $2U_F$  приказано је на слици.



Смер деловања еквивалентног извора напона  $U_F$  којим се моделује PN-спој (диода) у проводном стању одређен је физичким смером струје: прикључак који представља аноду усмерачке диоде која проводи струју је на вишем потенцијалу од прикључка који представља катоду.



$$I = \frac{U + 2U_F}{2R} < 0, \quad U < -2U_F < 0$$

Према томе, у овим условима рада важе следеће једначине:

$$U_{AB} = 2R \frac{U + 2U_F}{2R} = U + 2U_F < 0 \quad \text{за } U < -2U_F,$$

$$U_A = R \frac{U + 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} + U_F < 0 \quad \text{за } U < -2U_F \text{ и}$$

$$U_B = -R \frac{U + 2U_F}{2R} = -\frac{U}{2} - U_F > 0 \quad \text{за } U < -2U_F,$$

на основу којих следи:

$$U_{AB} = \begin{cases} -U + 2U_F & \text{за } U > 2U_F \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ U + 2U_F & \text{за } U < -2U_F \end{cases}, \quad U_A = \begin{cases} -\frac{U}{2} + U_F & \text{за } U > 2U_F \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ \frac{U}{2} + U_F & \text{за } U < -2U_F \end{cases},$$

$$U_B = \begin{cases} \frac{U}{2} - U_F & \text{за } U > 2U_F \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ -\frac{U}{2} - U_F & \text{за } U < -2U_F \end{cases}.$$

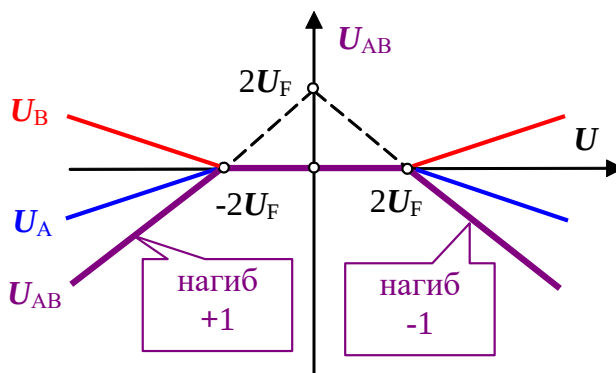
б)

За задату вредност напона  $U$  добија се:

$$U_{AB}(16V) = -U + 2U_F = -14V.$$

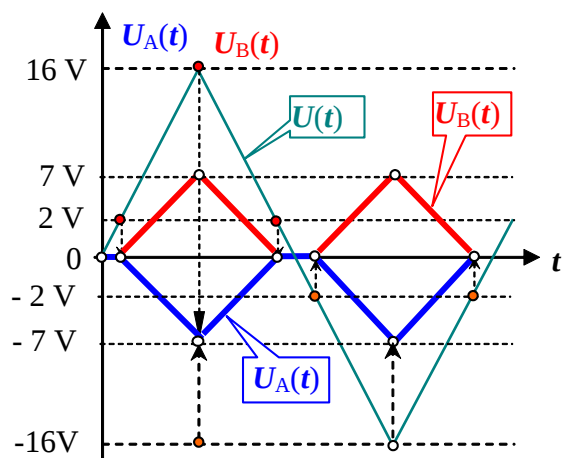
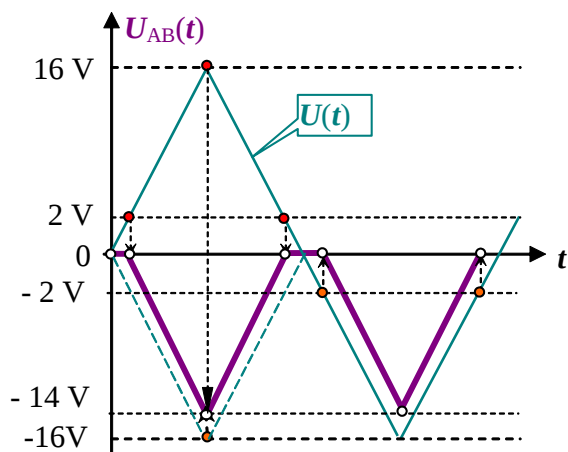
в)

Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(U)$ , је приказана на слици.

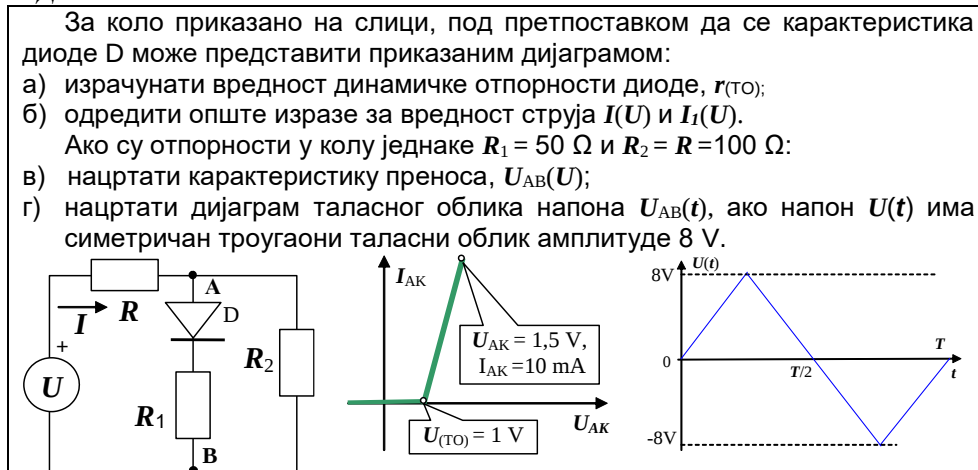


г)

Дијаграми таласних облика  $U_A(t)$ ,  $U_B(t)$  и  $U_{AB}(t)$ , када напон  $U(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 16 V, су приказани на слици.



## ЗАДАТАК 1.А.



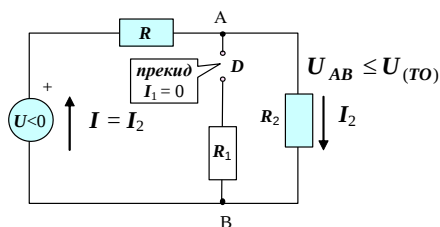
## РЕШЕЊЕ

а) На основу задате карактеристике диоде, вредност динамичке отпорности у стању провођења,  $r_T$ , једнака је:

$$r_T = \frac{\Delta U_{AK}}{\Delta I_{AK}} = \frac{500 \text{ mV}}{10 \text{ mA}} = 50 \Omega.$$

б) У посматраном колу могућа су два стања, зависно од поларитета и вредности напона  $U$ .

Када је, у односу на смерове назначене на слици, напон  $U$  негативан, диода D је поларисана у непроводном смеру, па је струја  $I_1$  једнака нули. Коло се своди на једну петљу у којој се налазе извор напона  $U$  и редно повезани отпорници  $R$  и  $R_2$ .



$$U_{AB} \leq U_{(TO)}$$

Овакво стање у колу постоји и при позитивним вредностима напона  $U$  мањим од граничне вредности  $U_G$ , при којој је напон  $U_{AB}$  на крајевима гране у којој се налази диода једнак напону прага  $U_{(TO)}$ . Вредност  $U_G$  одређује се на основу услова:

$$U_{AB}(U_G) = U_{(TO)}.$$

За стање у колу када диода не проводи струју важе релације:

$$\left. \begin{array}{l} I_1 = 0 \\ I = \frac{U}{R + R_2} \end{array} \right\} U \leq U_G,$$

$$U_{AB} = \frac{R_2}{R + R_2} U \text{ за } U \leq U_G,$$

$$U_G = \frac{R + R_2}{R_2} U = \left(1 + \frac{R}{R_2}\right) U.$$

Када је, у односу на смерове назначене на слици, напон  $U$  позитиван и већи од напона  $U_G$ , диода  $D$  је поларисана у проводном (пропусном) смеру. Посматрано нелинеарно коло се у том случају своди на линеарно коло приказано на слици, које садржи две петље.

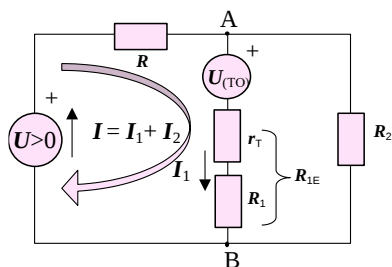
Применом Тевененове теореме, посматрано коло се трансформише у коло које садржи само једну петљу.

$$U_E = U \frac{R_2}{R + R_2}, \quad R_E = \frac{R R_2}{R + R_2} = R \parallel R_2,$$

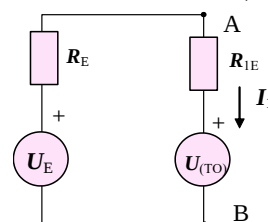
$$I_1 = \frac{U_E - U_{(TO)}}{R_E + R_{1E}} \text{ за } U > U_G,$$

$$U_{AB} = U_{(TO)} + R_{1E} I_1, \quad R_{1E} = R_1 + r_T,$$

$$I = \frac{U - U_{AB}}{R}.$$



$$U_{AB} > U_{(TO)}$$



Према томе, за струје  $I$  и  $I_1$ , чији су референтни смерови назначени на слици, важе следеће релације:

$$I_1 = \begin{cases} \frac{R_2}{R + R_2} \frac{U}{R_E + R_{1E}} - \frac{U_{(TO)}}{R_E + R_{1E}}; & U > U_G \\ 0; & U \leq U_G \end{cases},$$

$$U_{AB} = \begin{cases} U_{(TO)} + R_{1E} I_1; & U > U_G \\ U \frac{R_2}{R + R_2}; & U \leq U_G \end{cases} \quad I = \begin{cases} \frac{U - U_{AB}}{R}; & U > U_G \\ \frac{U}{R + R_2}; & U \leq U_G \end{cases}.$$

в)

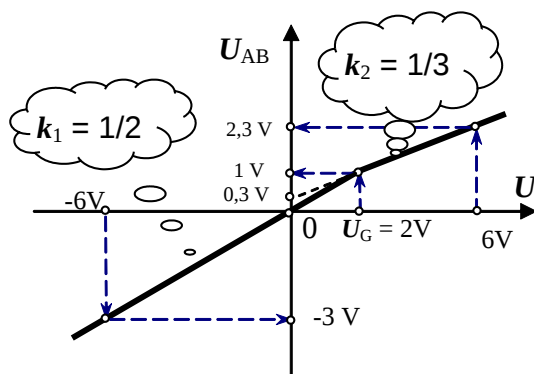
За  $R_1 = 50 \, \Omega$  и  $R_2 = R = 100 \, \Omega$ , следи:

$R_E = 50 \, \Omega$ ,  $R_{1E} = 100 \, \Omega$ ,  $U_G = 2 U_{(TO)} = 2 \, \text{V}$ .

Карактеристика преноса,  $U_{AB}(U)$ , одређена је формулом:

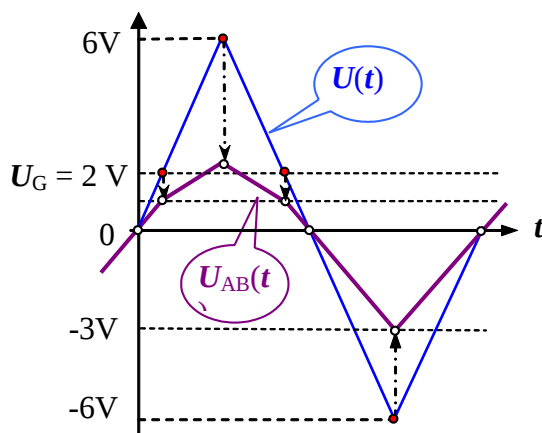
$$U_{AB} = \begin{cases} \frac{U + U_{(TO)}}{3}; & U > U_G \\ \frac{U}{2}; & U \leq U_G \end{cases}.$$

Графички приказ карактеристике преноса,  $U_{AB}(U)$ , дат је на слици. За вредности напона  $U$  веће од граничне вредности  $U_G$  константа преноса кола,  $k_2$ , једнака је  $\frac{1}{3}$ . За вредности напона  $U$  мање од граничне вредности  $U_G$  константа преноса,  $k_1$ , једнака је  $\frac{1}{2}$ .



в)

Дијаграм таласних облика напона на улазу и излазу кола приказан је на слици. Највећа позитивна вредност напона  $U_{AB}(t)$  једнака је  $1\text{ V} + \frac{1}{3}(4\text{ V}) = 2\frac{1}{3}\text{ V}$ . Највећа негативна вредност напона  $U_{AB}(t)$  једнака је  $\frac{1}{2}(-6\text{ V}) = -3\text{ V}$ .



**ЗАДАТАК 2.А.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да се струја гејта N-каналног транзистора са ефектом поља може занемарити, као и да су познати карактеристични параметри транзистора ( $I_{DSS}$ ,  $U_{GS(OFF)}$ ,  $r_{ds}$ ) и кола ( $R_D$ ,  $U$ ,  $U_P$ ):

а) нацртати еквивалентно коло за мале сигнале.

Под претпоставком да се реактанса кондензатора за спрегу може занемарити:

б) одредити општи израз за појачање напона за мале сигнале.

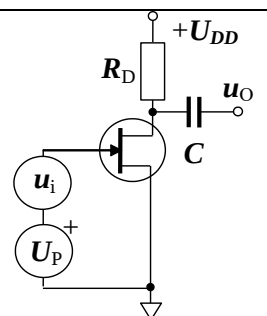
За задате бројне вредности:

$R_D = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{DD} = 12 \text{ V}$ ,  $r_{ds} = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $U_P = -2.5 \text{ V}$ ,  $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$  и  $U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}$ ;

в) израчунати бројне вредности мирне радне струје  $I_{DQ}$  и напона  $U_{DSQ}$ ;

г) израчунати бројну вредност појачања  $A_u$ ;

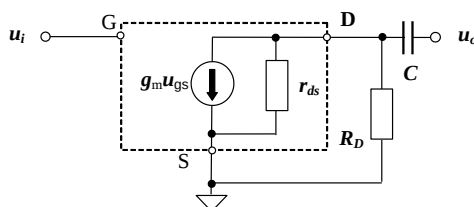
д) одредити највећу амплитуду улазног напона,  $u_i$ , при којој не долази до појаве изобличења при појачању сигнала.

**РЕШЕЊЕ**

а)

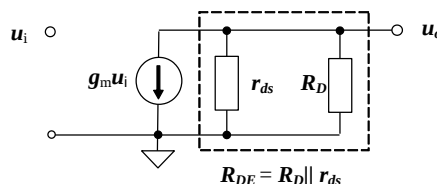
Еквивалентно коло за мале сигнале ниских учестаности (када се паразитне капацитивности транзистора могу занемарити) приказано је на слици.

$$u_{gs} = u_i$$



б)

Појачање напона за мале наизменичне сигнале, када се реактанса кондензатора за спрегу може занемарити једнако је



$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -g_m R_{DE} \cong -g_m R_D,$$

где је:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}=\text{const}},$$

проводност преноса (транскондуктанса) транзистора, а

$$R_{DE} = R_D || r_{ds} \cong R_D,$$

еквивалентна отпорност у излазном колу транзистора.

в)

За посматрано коло важи:

$$U_{GSQ} = U_P$$

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2,$$

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} R_D.$$

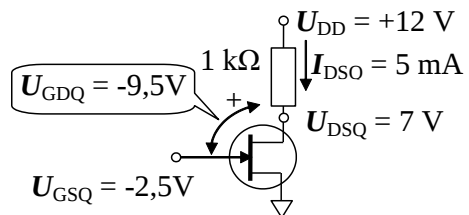
За задате бројне вредности је:

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_P}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 = 5 \text{ mA},$$

$$U_{DSQ} = U - I_{DQ} R_D = 7 \text{ V}.$$

Мирна радна тачка транзистора је у области засићења, јер је:

$$U_{GDQ} = U_{GSQ} - U_{DSQ} = -9,5 \text{ V} < U_{GS(OFF)}$$



г)

Вредност проводности преноса (транскондуктансе) је одређена формулом:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{ds}=0} = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_{DQ} I_{DSS}} = 4 \text{ mS}.$$

За задате бројне вредности појачање напона једнако је:

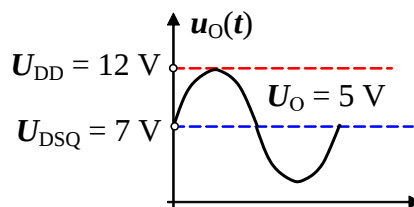
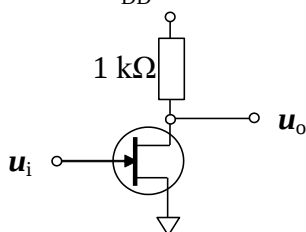
$$A_u \cong -4.$$

д)

Напон на излазу кола одређен је једначином:

$$u_o(t) = U_{DSQ} + u_o(t)$$

$$U_{DD} = 12 \text{ V}$$



Највећа амплитуда излазног напона,  $U_O$ , при којој не долази до појаве изобличења наизменичног сигнала на излазу једнака је:

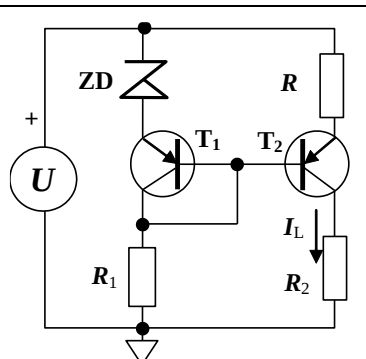
$$U_O = U_{DD} - U_{DSQ}.$$

Највећа амплитуда улазног напона при којој не долази до појаве изобличења наизменичног сигнала на излазу једнака је:

$$\max u_i = \frac{U_{DD} - U_{DSQ}}{A_u} = 1,25 \text{ V}.$$

**ЗАДАТАК 3.А.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да је појачање струје од базе до колектора транзистора довољно велико да се струја базе и инверзна струја засићења колекторског споја могу занемарити у односу на остале струје у колу, као и да је напон  $U$  знатно већи од радног напона Ценер-диоде у области пробоја  $U_Z$ :



- одредити општи израз којим је одређена вредност струје  $I_L$ ;
- израчунати вредност струје  $I_L$  када је  $U = 12 \text{ V}$ , ако су транзистори  $T_1$  и  $T_2$  силицијумски, радни напон Ценер-диоде у области пробоја,  $U_Z$ , једнак  $5 \text{ V}$ , а све отпорности у колу једнаке  $5 \text{ k}\Omega$ ;
- објаснити функцију транзистора  $T_1$ .
- одредити потребан услов у погледу односа вредности  $U$ ,  $U_Z$ ,  $U_{EB1}$ ,  $R$  и  $R_2$ , да струја  $I_L$  не зависи од вредности напона  $U$  и отпорности  $R_2$ .

**РЕШЕЊЕ**

а)

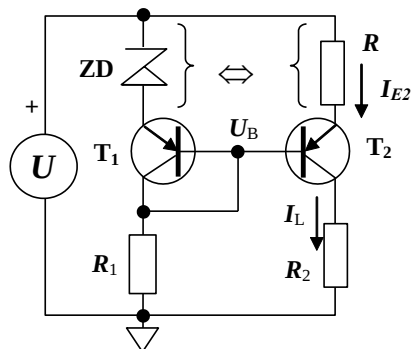
У складу са датим претпоставкама и ознакама назначеним на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

$$I_L = I_{E2} - I_{B2} \cong I_{E2}$$

$$I_{E2} = \frac{U - U_{EB2} - U_B}{R}$$

$$U_B = U - U_Z - U_{EB1},$$

на основу којих следи:



$$I_L = \frac{U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}}{R} \cong \frac{U_Z}{R}$$

б)

За задате вредности параметара добија се:

$$I_L \cong \frac{U_Z}{R} = 1 \text{ mA}.$$

в)

Напон  $U_{EB1}$  компензује утицај напона  $U_{EB2}$  излазног транзистора  $T_2$  на вредност струје  $I_L$ .

У односу на оптерећење, које представља отпорник  $R_2$ , када се транзистор налази у активној области рада, коло делује као извор струје чија је вредност

одређена вредношћу струје кроз отпорник  $R$ . Ако су напони  $U_{EB1}$  и  $U_{EB2}$  једнаки, струја  $I_L$  зависи само од односа напона Ценер-диоде у стању пробоја,  $U_Z$ , и отпорности отпорника  $R$ .

г)

Са повећењем отпорности оптерећења,  $R_2$ , потенцијал колектора транзистора  $T_2$  се повећава. Његова вредност, међутим, не може бити већа од потенцијала базе транзистора  $T_2$ . На основу услова;

$$U_{BC2} \geq 0,$$

добија се:

$$U_{BC2} = U_B - U_{C2} = U - U_Z - U_{EB1} - R_2 I_L \geq 0,$$

одакле следи:

$$R_2 \leq \frac{U - U_Z - U_{EB1}}{U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}} R.$$

#### ЗАДАТАК 4.А.

У колу приказаном на слици употребљене су четири једнаке диоде,  $D_1$  до  $D_4$ , и две Ценер-диоде,  $ZD_1$  и  $ZD_2$ , чије се  $U$ - $I$  карактеристике могу приближно представити приказаним дијаграмима;

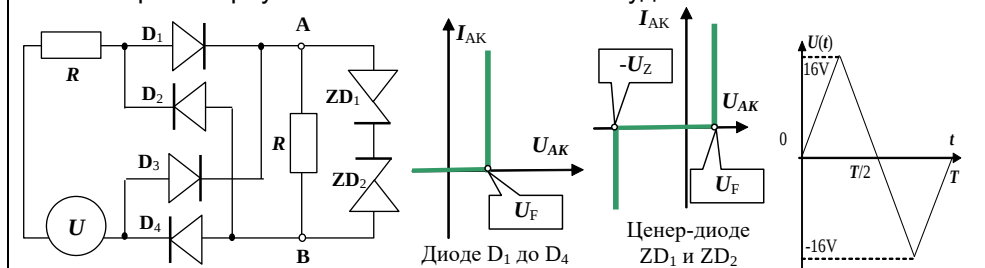
а) одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ .

Ако је напон диоде поларисане у пропусном смеру,  $U_F$ , једнак 1V, а радни напон Ценер-диоде у области пробоја,  $U_Z$ , једнак 5 V:

б) одредити вредност напона  $U_{AB}$  за случај  $U = -16$  V.

в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ .

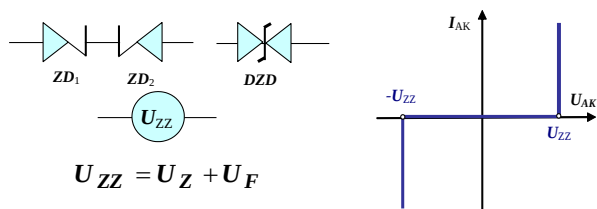
г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако напон  $U(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 16 V.



#### РЕШЕЊЕ

Две редно повезане, супротно оријентисане Ценер-диоде  $ZD_1$  и  $ZD_2$  делују као савршена симетрична Ценер-диода чија карактеристика и еквивалентно коло у области пробоја су приказани на слици. Смер деловања извора напона  $U_{ZZ}$  одређен је физичким смером струје, односно смером деловања спољашњег извора напона.

Савршена  
симетрична  
Ценер-диода



Када је улазни  $U$  напон једнак нули, напон  $U_{AB}$  је такође једнак нули. Ако је излазни напон  $U_{AB}$  различит од нуле, бар један пар диода, ( $D_1, D_4$ ) или ( $D_2, D_3$ ), проводи струју, што значи да је напон  $U$  по модулу (интензитету) већи од напона  $2U_F$ .

Струја коју даје извор напона  $U$  има такав смер да је тачка А на вишем потенцијалу од тачке В. Напон  $U_{AB}$  не може бити негативан, нити већи од напона потребног да двојна Ценер-дioda доспе у област пробоја.

Функција  $U_{AB}(U)$  је парна и представља померену модуо-функцију са зоном неосетљивости и засићењем (ограничењем).

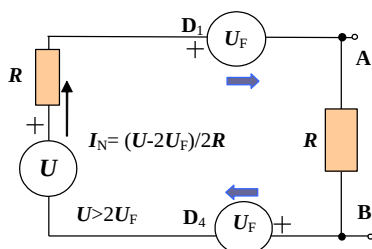
а)

Када је улазни  $U$  напон мањи од  $2U_F$  напона излазни напон је једнак нули:

$$U_O = 0 \text{ за } |U| \leq 2U_F.$$

Еквивалентно коло за случај када је интензитет улазног напона мањи од  $2U_F$ , а напон мањи од напона  $U_{ZZ}$  приказано је на слици.

$$U_{AB} = RI_P = R \frac{U - 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} - U_F > 0, \\ (U > 2U_F) \wedge (U_{AB} < U_{ZZ}).$$

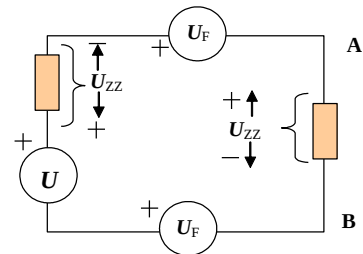


Гранична вредност улазног напона,  $U_{GP}$ , при којој струја  $I_P$  ствара на излазном отпорнику напон  $U_{AB}$  једнак напону двојне Ценер-диode,  $U_{ZZ}$ , одређена је једначином:

$$U_{AB}(U_{GP}) = \frac{U_{GP}}{2} - U_F = U_{ZZ},$$

одакле следи:

$$U_{GP} = 2(U_{ZZ} + U_F).$$



$$U_{AB} = \frac{U}{2} - U_F, 2U_F \leq U \leq U_{GP}.$$

Када је напон  $U$  већи од напона  $U_{GP}$ , напон  $U_{AB}$  је једнак напону  $U_{ZZ}$ :

$$U_{AB} = U_{ZZ} \text{ за } U > U_{GP}.$$

Диоде  $D_1$  до  $D_4$  образују Грецов мост који врши двострано усмеравање улазног напона. Излазни напон је ненегативна величина. Одзив кола на побуду напона мањем од напона  $-2U_F$ , потребног да диоде  $D_2$  и  $D_3$  проводе

струју, добија се сменом  $U \Rightarrow -U$  у добијеним изразима. Гранична вредност негативног улазног напона,  $U_{GN}$ , при којој струја  $I_N$  ствара на излазном отпорнику напон  $U_{AB}$  једнак напону двојне Ценер-диоде,  $U_{ZZ}$ , једнака је:

$$U_{GN} = -U_{GP}.$$

Према томе, за напон  $U_{AB}$  важи:

$$U_{AB} = \begin{cases} U_{ZZ} & \text{за } U > 2(U_{ZZ} + U_F) \\ \frac{U}{2} - U_F & \text{за } 2U_F < U \leq 2(U_{ZZ} + U_F) \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ -\frac{U}{2} - U_F & \text{за } -2(U_{ZZ} + U_F) < U < -2U_F \\ U_{ZZ} & \text{за } U < -2(U_{ZZ} + U_F) \end{cases}.$$

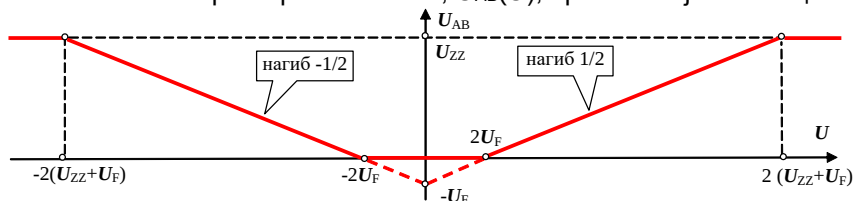
б)

За задате вредности напона  $U = -16 \text{ V} < U_{GN} = -14 \text{ V}$  је:

$$U_{AB}(-16 \text{ V}) = U_{ZZ} = 6 \text{ V}.$$

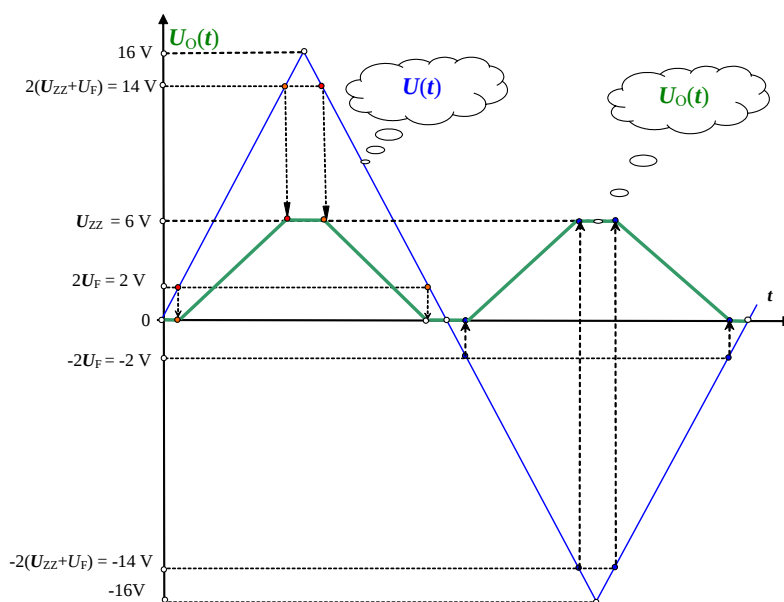
в)

Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(U)$ , приказана је на слици.



г)

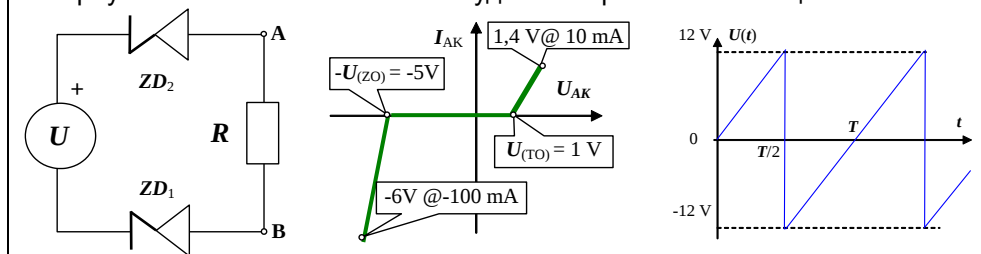
Дијаграми таласних облика у колу приказани су на слици.



**ЗАДАТАК 1.Б.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода  $ZD_1$  и  $ZD_2$  може представити приказаним дијаграмом:

- израчунати вредност динамичке отпорности Ценер-диоде при директној,  $r_T$  и инверзној поларизацији,  $r_Z$ ;
- одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ ;
- израчунати вредност излазног напона  $U_{AB}$  ако је  $U = -12\text{ V}$ ,  $R = 250\ \Omega$ ;
- нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако напон  $U(t)$  има троугаони таласни облик амплитуде  $12\text{ V}$  приказан на слици.

**РЕШЕЊЕ**

Зависно од поларитета и интензитета улазног напона могућа су два стања у колу.

За мале вредности улазног напона струја кроз Ценер-диоде  $ZD_1$  и  $ZD_2$  је једнака нули, па је напон  $U_0$  на излазу кола једнак нули.

Да би се успоставила струја у посматраном колу потребно је да побудни напон по интензитету буде већи од збира напона прага вођења Ценер-диоде при директној и инверзној поларизацији. Наиме, када је интензитет (модуо) напона већи од напона  $U_{(ZO)} + U_{(TO)}$ , једна од диода,  $ZD_1$  или  $ZD_2$  (зависно од поларитета улазног напона), ради у области инверзног пробоја, а друга је проводи струју у директном смеру. Напон на излазу прати промене улазног напона. Константа нагиба улазно-излазне карактеристике кола,  $U_{AB}(U)$ , одређена је односом укупне динамичке отпорности редно повезаних диода које се налазе у проводном стању и отпорности  $R$ .

а)

Динамичке отпорности Ценер-диоде при директној,  $r_T$  и инверзној поларизацији,  $r_Z$  одређене су нагибом  $U(I)$  карактеристике у одговарајућој области. На основу вредности задатих на дијаграму следи:

$$r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,4\text{ V}}{10\text{ mA}} = 40\ \Omega, \quad r_Z = \frac{\Delta U_R}{\Delta I_R} = \frac{1\text{ V}}{100\text{ mA}} = 10\ \Omega.$$

Индекси F и R означавају директну ( $U_{AK} > 0$ ) и инверзну ( $U_{AK} < 0$ ) поларизацију, респективно.

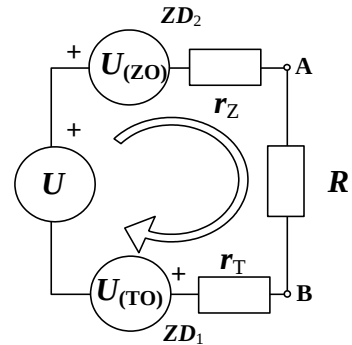
б)

На основу претходног разматрања следи:

$$U_{AB} = 0 \text{ за } |U| \leq U_{(ZO)} + U_{(TO)}.$$

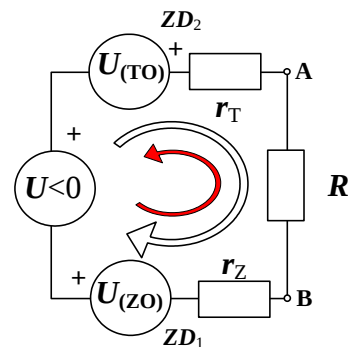
Еквивалентно коло које одговара стању побуди позитивним напонам када диода  $ZD_2$  проводи струју у инверзном, а диода  $ZD_1$  у директном смеру, приказано је на слици.

$$U_{AB} = \frac{U - U_{(ZO)} - U_{(TO)}}{R + r_Z + r_T} R$$



Еквивалентно коло које одговара стању побуди негативним напонам када диода  $ZD_2$  проводи струју у директном, а диода  $ZD_1$  у инверзном смеру, приказано је на слици. Испрекидана обојена стрелица приказује физички смер струје на основу којег су одређени смерови деловања еквивалентних генератора  $U_{(ZO)}$  и  $U_{(TO)}$ .

$$U_{AB} = \frac{U + U_{(ZO)} + U_{(TO)}}{R + r_Z + r_T} R$$



Вредност напона  $U_{AB}(U)$  одређена је изразом:

$$U_{AB} = \begin{cases} k(U - U_{ZZ}), & \text{за } U > U_{ZZ} \\ 0, & \text{за } -U_{ZZ} \leq U \leq U_{ZZ} \\ k(U + U_{ZZ}), & \text{за } U < -U_{ZZ} \end{cases}$$

у којем  $U_{ZZ}$  представља еквивалентни напон пробоја двојне Ценер-диоде коју образују диоде  $ZD_1$  и  $ZD_2$ ,

$$U_{ZZ} = U_{(ZO)} + U_{(TO)},$$

а  $k$  представља константу нагиба улазно-излазне карактеристике када је  $|U| > U_{ZZ}$ :

$$k = \frac{R}{R + r_Z + r_T}.$$

карактеристика преноса посматраног кола може се представити и у облику:

$$U_{AB} = \begin{cases} 0 & \text{за } |U| \leq U_{ZZ} \\ U_0 \cdot \text{sgn} U + kU & \text{за } |U| > U_{ZZ} \end{cases}, \quad U_0 = kU_{ZZ}.$$

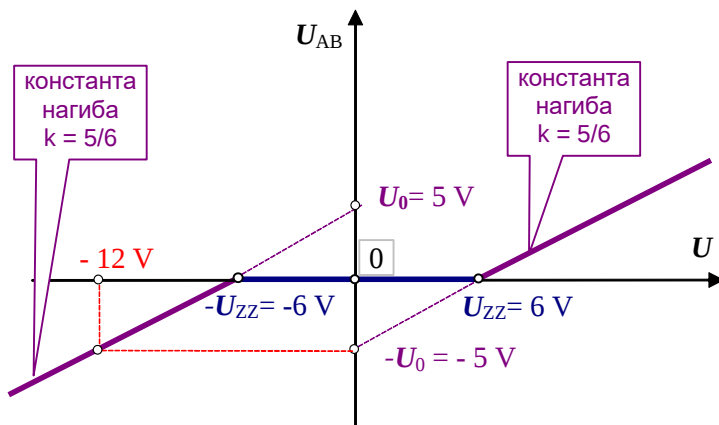
в)

За задате вредности  $U = -12 \text{ V} < -U_{ZZ} = 6 \text{ V}$ ,  $R = 250 \Omega$  и  $r_{ZZ} = 50 \Omega$ , следи  $k = 5/6$ ,  $U_0 = 5 \text{ V}$ :

$$U_{AB}(-12 \text{ V}) = -5 \text{ V}.$$

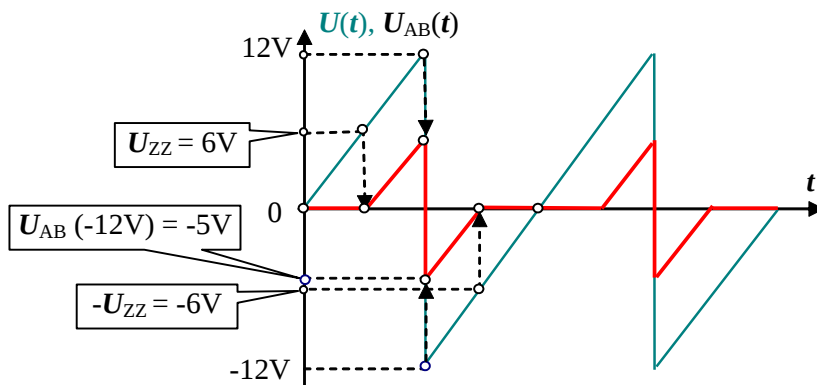
г)

Карактеристика  $U_{AB}(U)$  је приказана на слици.



д)

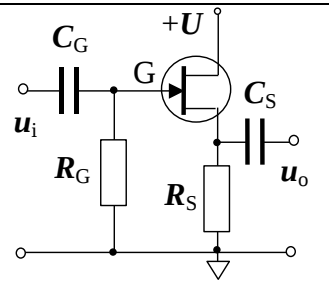
Временски дијаграм одзива кола на побуду троугаоним импулсима приказан је на слици.



### ЗАДАТАК 2.Б.

За коло приказано на слици, под претпоставком да је струја гејта N-каналног транзистора са ефектом поља занемарљиво мала и да су познате вредности  $R_G = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_S = 1200 \Omega$ ,  $U_{GS(OFF)} = -3 \text{ V}$  и  $I_{DSS} = 5 \text{ mA}$ :

- израчунати бројну вредност мирне радне струје  $I_{DQ}$  у области засићења;
- нацртати еквивалентно коло за наизменичне сигнале.



### РЕШЕЊЕ

а)

У одсуству наизменичног побудног сигнала, стање у колу одређено је следећим једначинама:

$$R_G I_{GQ} - U_{GSQ} - R_S I_{DQ} = 0, \quad (1)$$

(други Кирхофов закон примењен на контуру гејт-сорс),

$$U - U_{DSQ} - I_{DQ} R_S = 0, \quad (2)$$

(други Кирхофов закон примењен на контуру дрејн-сорс),

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \quad (3)$$

(карактеристика преноса транзистора са ефектом поља при раду у области засићења)

Под претпоставком да је струја гејта занемарљиво мала, пад напона на отпорнику  $R_G$  се може занемарити, па је напон између гејта и сорса,  $U_{GSQ}$ , једнак паду напона који струја  $I_{DQ}$  ствара на отпорнику  $R_S$ :

$$U_{GSQ} \cong -R_S I_{DQ}. \quad (4)$$

На основу једначина (1) и (3) следи:

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left( 1 + \frac{R_S I_{DQ}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2.$$

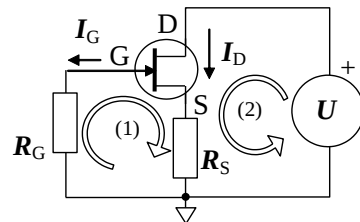
Ако се задата вредност напона  $U_{GS(OFF)}$  изрази у волтима, вредност отпорности  $R_S$  у омима, а вредност струје  $I_{DSS}$  у милиамперима, добија се једначина:

$$I_{DQ} = 5 \left( 1 - \frac{1,2}{3} I_{DQ} \right)^2,$$

у којој  $I_{DQ}$  представља бројну вредност струје  $I_{DQ}$  изражену у милиамперима.

Сређивањем добија се квадратна једначина:

$$0,8 I_{DQ}^2 - 5 I_{DQ} + 5 = 0$$



која има два решења:

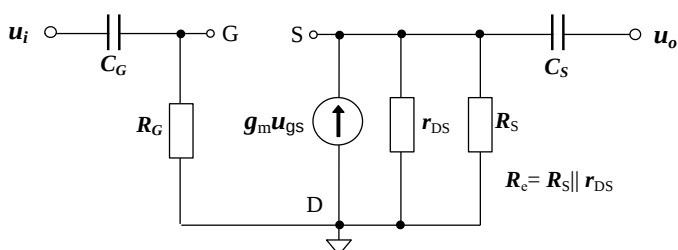
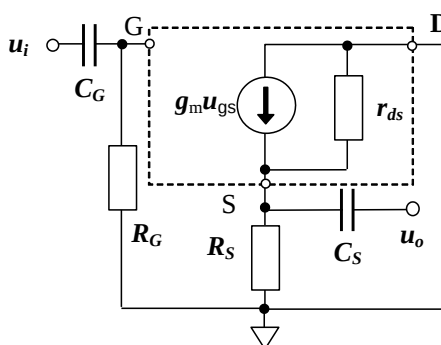
$$I_{DQ1} = 5 \text{ и } I_{DQ1} = 1,25.$$

Прво решење се одбацује, јер према формули (3) струја  $I_{DQ}$  може бити једнака струји засићења  $I_{DSS}$  (5 mA) само ако је напон  $U_{GSQ}$  једнак нули, што није у сагласности са једначином (4). Друго решење представља стварну, физички могућу вредност струје  $I_{DQ}$ :

$$I_{DQ} = 1,25 \text{ mA}.$$

б)

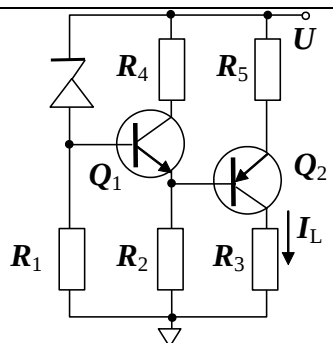
Заменом транзистора одговарајућим еквивалентно колом добија се коло приказано је на слици, које важи за мале наизменичне сигнале на учестаностима при којима се паразитне капацитивности транзистора могу занемарити.



**ЗАДАТАК 3.Б.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да је појачање струје од базе до колектора транзистора  $Q_1$  и  $Q_2$  веома велико, а да је инверзна струја засићења колекторског споја занемарљиво мала,

- а) одредити општи израз за вредност струје  $I_L$ ,  
 б) израчунати вредност струје  $I_L$  када је  $U = 12\text{ V}$ , ако су транзистори  $Q_1$  и  $Q_2$  силицијумски, радни напон Ценер-диоде у области пробоја,  $U_Z$ , једнак  $5\text{ V}$ , а све отпорности у колу једнаке  $1\text{ k}\Omega$ ;  
 в) одредити потребан услов у погледу односа вредности напона  $U$  и вредности параметара елемената у посматраном колу, да струја  $I_L$  не зависи од вредности отпорности  $R_3$ ,


**РЕШЕЊЕ**

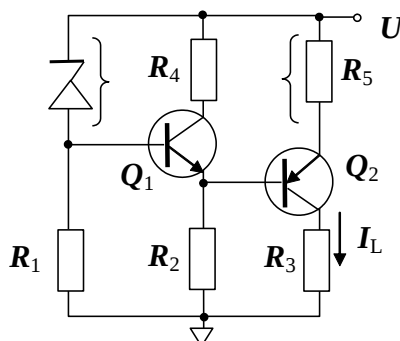
а) У складу са датим претпоставкама и ознакама на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

$$I_L = I_{E2} - I_{B2} \cong I_{E2},$$

$$U_{B2} = U - U_Z - U_{BE1} = U - R_5 I_{E2} - U_{BE1},$$

на основу којих следи:

$$I_L = \frac{U_Z + U_{BE1} - U_{BE2}}{R_5} \cong \frac{U_Z}{R_5}.$$



У односу на оптерећење, које представља отпорник  $R_3$ , када се радна тачка транзистора налази у активној области, коло делује као извор струје чија је вредност одређена вредношћу струје кроз отпорник  $R_5$ . Ако су напони  $U_{BE1}$  и  $U_{BE2}$  једнаки, струја  $I_L$  зависи само од односа напона Ценер-диоде у стању пробоја,  $U_Z$ , и отпорности отпорника  $R_5$ .

б)

$$I_{C2} = \frac{U_Z + U_{BE1} - U_{BE2}}{R_5} = \frac{U_Z}{R_5} = 1\text{ mA}$$

в)

Вредност потенцијала колектора транзистора  $Q_2$  не може бити већа од вредности потенцијала базе транзистора  $Q_2$ . На основу услова;

$$U_{BC2} \geq 0,$$

(у активној области спој база-колектор је инверзно поларисан), добија се:

$$U_{BC2} = U_B - U_{C2} = U - U_Z - U_{BE1} - R_3 I_L \geq 0,$$

$$R_3 \leq \frac{U - U_Z - U_{BE1}}{U_Z + U_{BE1} - U_{BE2}} R.$$

**ЗАДАТАК 4.Б.**

У колу приказаном на слици употребљене су четири једнаке диоде,  $D_1$  до  $D_4$ , и једна Ценер-диоде,  $ZD$ , чије се  $U$ - $I$  карактеристике могу приближно представити приказаним дијаграмима.

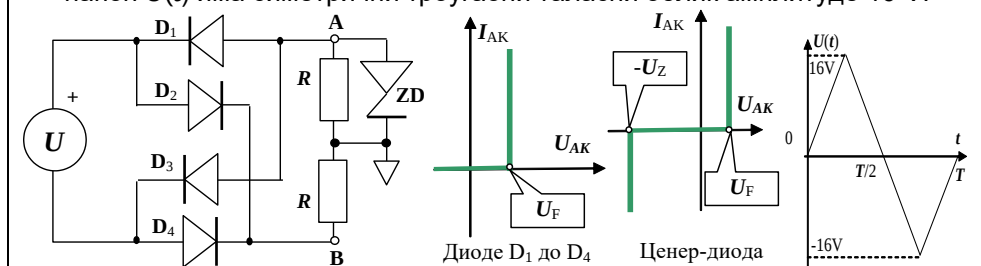
а) Одредити опште изразе за вредности напона  $U_A(U)$ ,  $U_B(U)$  и  $U_{AB}(U)$ .

Ако је напон диоде поларисане у пропусном смеру,  $U_F$ , једнак 1V, а радни напон Ценер-диоде у области пробоја,  $U_Z$ , једнак 5 V:

б) одредити вредности напона  $U_{AB}$ ,  $U_A$  и  $U_B$  за случај  $U = 16$  V;

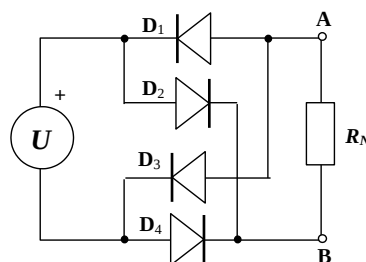
в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ ;

г) нацртати дијаграме таласних облика напона  $U_A(t)$ ,  $U_B(t)$  и  $U_{AB}(t)$ , ако напон  $U(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 16 V.

**РЕШЕЊЕ**

а)

Два отпорника, једнаких отпорности  $R$ , и Ценер-диоде  $ZD$  представљају нелинеарно оптерећење,  $R_N$ , двостраног (потпуног) усмерача који чине диоде  $D_1$  до  $D_4$ , образујући Грецов мост који обезбеђује да струја кроз оптерећење увек има увек исти смер: од тачке В ка тачки А, независно од поларитета побудног напона  $U$ .



Вредност напона  $U_{AB}(U)$  одређена је изразом:

$$U_{AB} = \begin{cases} -U + 2U_F, & \text{за } U > 2U_F \\ 0, & \text{за } -2U_F \leq U \leq 2U_F \\ U + 2U_F, & \text{за } U < -2U_F \end{cases}$$

односно:

$$U_{AB} = \begin{cases} 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ 2U_F - |U| & \text{за } |U| > 2U_F \end{cases}$$

Уколико је напон  $U_A$  по интензитету мањи од напона инверзног пробоја Ценер-диоде, два једнака отпорника чине делитељ напона  $U$ . Однос интензитета напон  $U_A$  и  $U_B$  је 1:1:

$$U_A = -\frac{U}{2} + U_F < 0 \text{ за } (U > 2U_F) \wedge (U_A \geq -U_Z)$$

$$U_B = -U_A = \frac{U}{2} - U_F < 0 \text{ за } (U > 2U_F) \wedge (U_A \geq -U_Z).$$

Гранична вредност улазног напона,  $U_G$ , при којој струја коју даје извор побудног напона  $U$  ствара на излазном отпорнику напон  $U_A$  једнак по интензитету напону Ценер-диоде,  $U_Z$ , одређена је једначином:

$$U_A = -U_Z = -\frac{U_G}{2} + U_F,$$

одакле следи:

$$U_G = 2(U_Z + U_F).$$

Када је напон  $U$  по интензитету већи од напона  $U_G$ , напон  $U_A$  је једнак напону  $-U_Z$ :

$$U_A = -U_Z \text{ за } |U| > U_G.$$

Према томе, за напон  $U_A$  важи:

$$U_A = \begin{cases} -U_Z & \text{за } U > 2(U_Z + U_F) \\ -\frac{U}{2} + U_F & \text{за } 2U_F < U \leq 2(U_Z + U_F) \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ \frac{U}{2} + U_F & \text{за } -2(U_Z + U_F) < U < -2U_F \\ -U_Z & \text{за } U < -2(U_Z + U_F) \end{cases}.$$

Напон  $U_B$  је ненегативан (супротног знака од напона  $U_{AB}$  и  $U_A$ ), по интензитету једнак половини напона  $U_{AB}$ , ако је улазни напон  $U$  по интензитету мањи од напона  $U_G$ :

$$U_B = \frac{U}{2} - U_F = -U_A > 0 \text{ за } U > U_G.$$

С обзиром да за напоне  $U_{AB}$ ,  $U_A$  и  $U_B$  важи једначина:

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

за напон  $U_B$  важи:

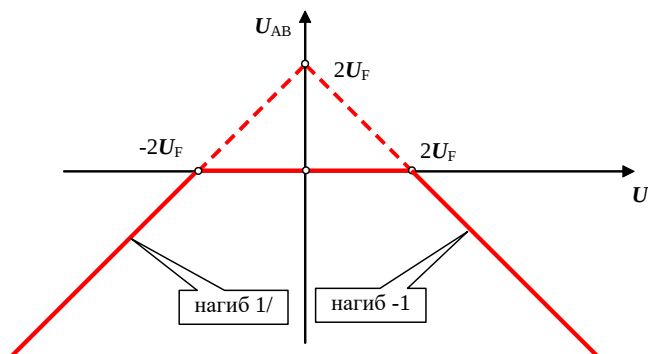
$$U_B = U_A - U_{AB} = \begin{cases} U - U_Z - 2U_F & \text{за } U > 2(U_Z + U_F) \\ \frac{U}{2} - U_F & \text{за } 2U_F < U \leq 2(U_Z + U_F) \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ -\frac{U}{2} - U_F & \text{за } -2(U_Z + U_F) < U < -2U_F \\ -U - U_Z - 2U_F & \text{за } U < -2(U_Z + U_F) \end{cases}$$

б)

За задате вредности напона  $U = 16 \text{ V} > U_G = 12 \text{ V}$  је:

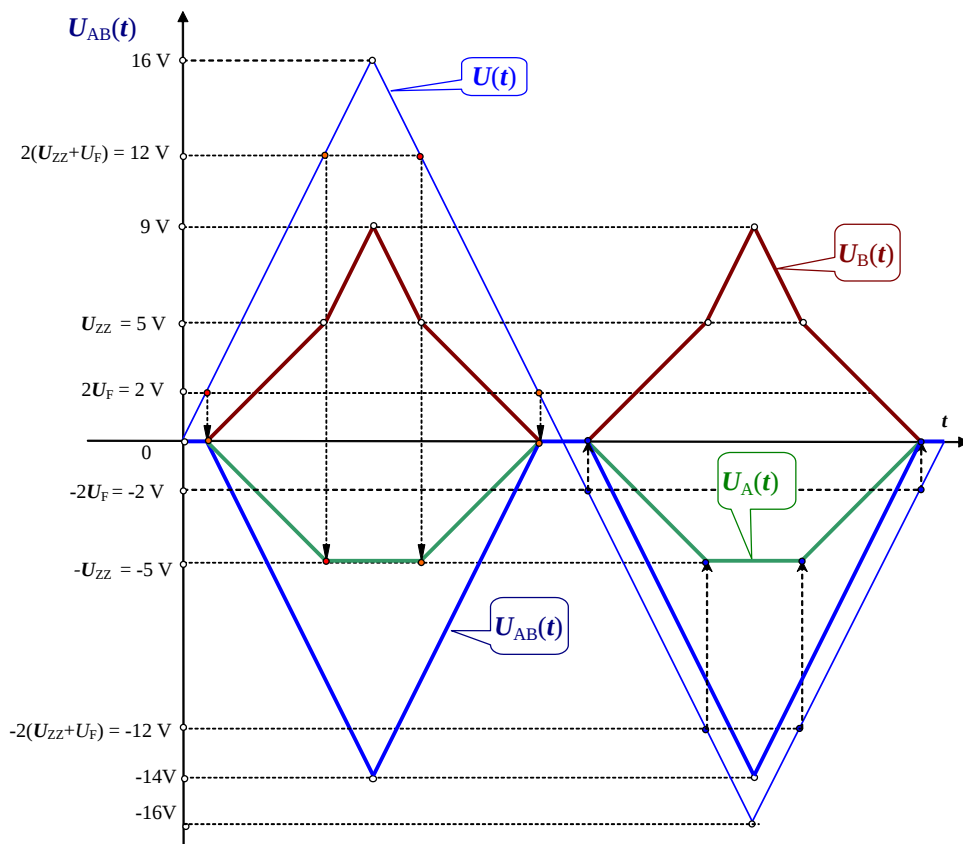
$$\begin{aligned} U_{AB}(-16 \text{ V}) &= -14 \text{ V}, \\ U_A(-16 \text{ V}) &= -U_Z = -5 \text{ V}, \\ U_B(-16 \text{ V}) &= U_A - U_{AB} = 9 \text{ V}. \end{aligned}$$

в)

Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(U)$ , приказана је на слици.

г)

Дијаграми таласних облика у колу су приказани на слици.



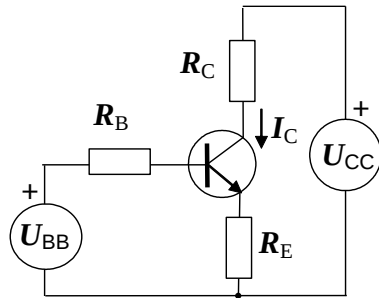
## ЗАДАТАК 1.А.

У колу, приказаном на слици, познате су вредности карактеристичних параметара транзистора (појачање струје од базе до колектора,  $\beta$ , напон између базе и емитора,  $U_{BE}$ , и инверзна струја засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ ).

- а) Под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у активној области и да су познате вредности напона напајања,  $U_{CC}$  и  $U_{BB}$ , као и отпорности  $R_B$ ,  $R_C$  и  $R_E$ , одредити општи израз за вредност струје  $I_C$ .

- б) Одредити бројне вредности струја у колу,  $I_C$ ,  $I_B$  и  $I_E$ , као и напона  $U_{CE}$ , ако је  $U_{CC} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{BB} = 5 \text{ V}$ ,  $I_{CBO} = 1 \text{ nA}$  ( $t = 25^\circ\text{C}$ ),  $\beta = 100$ ,  $R_C = 1,5 \text{ k}\Omega$ ;  $R_B = 65 \text{ k}\Omega$ ;  $R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$ .

- в) Одредити вредност показатеља нестабилности мирне радне тачке посматраног кола услед промена инверзне струје засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ .



## РЕШЕЊЕ

а)

За приказано коло важе једначине:

$$U_{BB} = R_B I_B + U_{BE} + R_E I_E$$

$$I_E = (1 + \beta)(I_B + I_{CBO}),$$

$$U_{BB} = [R_B + R_E(1 + \beta)]I_B + U_{BE} + R_E(1 + \beta)I_{CBO},$$

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} - \frac{(1 + \beta)R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E} I_{CBO}$$

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta)I_{CBO},$$

на основу којих следи:

$$I_C = \beta \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta)R_E} + (1 + \beta) \frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E} I_{CBO}.$$

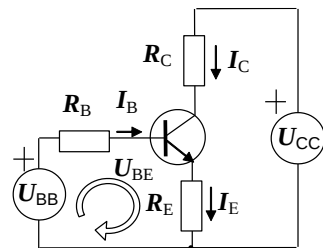
б)

На основу задате вредности струје,  $I_{CBO} = 1 \text{ nA}$  (@  $25^\circ\text{C}$ ), закључује се да је у питању силицијумски транзистор, за који се усваја  $U_{BE} \approx 0,6 \text{ V}$ .

$$I_B = \frac{5 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{65 \text{ k}\Omega + 101 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega} - \frac{101 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega}{65 \text{ k}\Omega + 101 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega} \cdot 1 \text{ nA} \approx \frac{4,4 \text{ V}}{216,5 \text{ k}\Omega} = \frac{4400 \text{ mV}}{216,5 \text{ k}\Omega} \approx 20,3 \mu\text{A},$$

$$I_C = 100 \cdot 20,3 \mu\text{A} + 101 \cdot 1 \text{ nA} \approx 2,03 \text{ mA},$$

$$I_E = I_C + I_B$$



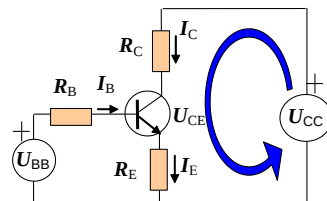
$$I_E = 2,03 \text{ mA} + 20,3 \mu\text{A} \approx 2,05 \text{ mA}$$

На основу другог Кирхофовог закона примењеног на петљу колектор-емитор:

$$U_{CC} = R_C I_C + U_{CE} + R_E I_E$$

следи:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C - R_E I_E$$



$$U_{CE} = 10 \text{ V} - 1,5 \text{ k}\Omega \cdot 2,03 \text{ mA} - 1,5 \text{ k}\Omega \cdot 2,05 \text{ mA} = 3,88 \text{ V}.$$

в)

Показатељи нестабилности мирне радне тачке се дефинишу као парцијални изводи струје  $I_C$  посматране као функције више променљивих.

Диференцирањем добијеног израза за вредност струје  $I_C$ , узимајући да инверзна струја засићења  $I_{CBO}$  представља независно променљиву, док су све остале величине константне, добија се:

$$K_{I_{CBO}} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = \frac{(1 + \beta)(R_B + R_E)}{R_B + (1 + \beta)R_E},$$

$$K_{I_{CBO}} = \frac{101 \cdot 66,5 \text{ k}\Omega}{65 \text{ k}\Omega + 101 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega} \approx 31.$$

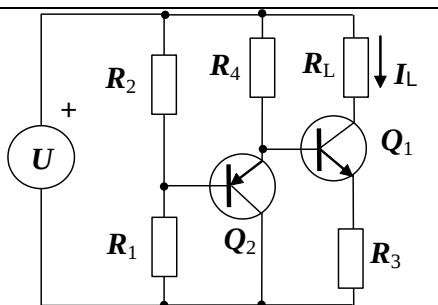
### ЗАДАТАК 2.А.

За коло приказано на слици, под претпоставком да је инверзна струја засићења колекторског споја,  $I_{CBO}$ , занемарљиво мала, а да је појачање струје од базе до колектора,  $\beta$ , довољно велико да се струје базе транзистора могу занемарити у односу на остале струје у колу:

а) одредити општи израз за вредност струје  $I_L$ ,

б) одредити потребан услов у погледу односа вредности напона  $U$  и вредности параметара елемената у посматраном колу, да струја  $I_L$  не зависи од вредности отпорности  $R_L$ ,

в) објаснити функцију транзистора  $Q_2$ .



### РЕШЕЊЕ

а)

С обзиром на задате услове и усвојене референтне смерове, назначене на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

$$I_L = I_{C1} = \alpha I_{E1} \approx I_{E1}, \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \cong 1, \beta \gg 1,$$

$$I_{E1} = \frac{U_{E1}}{R_3},$$

$$U_{E1} = U_{B1} - U_{BE1} = U_{E2} - U_{BE1},$$

$$U_{E2} = U_{B2} + U_{EB2},$$

$$U_{B2} = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}, (I_{B2} \approx 0),$$

$$U_{E1} = U_{B2} + U_{EB2} - U_{BE1} \approx U_{B2},$$

на основу којих следи:

$$U_{E1} \approx U \frac{R_1}{R_1 + R_2} + U_{EB2} - U_{BE1} \approx U \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

$$I_L \approx \frac{U_{E1}}{R_3} \approx \frac{U}{R_1 + R_2} \frac{R_1}{R_3}.$$

У односу на оптерећење, које представља отпорник  $R_L$ , када се транзистор налази у активној области рада, коло делује као извор струје  $I_L$ , чија је вредност одређена вредношћу струје кроз отпорник  $R_3$ , односно вредностима напона  $U$  и отпорности  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , а не зависи од вредности отпорности  $R_L$ .

б)

Са повећењем отпорности оптерећења,  $R_L$ , потенцијал колектора транзистора  $Q_1$  се смањује. Његова вредност, међутим, не може бити мања од потенцијала емитора транзистора  $Q_2$ . На основу услова да се радна тачка транзистора  $Q_1$  налази у активној области рада:

$$U_{CB1} \geq 0$$

следи:

$$U_{CB1} = U_{C1} - U_{B1} = U - R_L I_L - (U_{B2} + U_{EB2}) \geq 0,$$

$$U - \frac{R_L}{R_3} \frac{R_1}{R_1 + R_2} U - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U - U_{EB2} \geq 0,$$

$$\frac{U}{R_1 + R_2} \left( R_2 - R_L \frac{R_1}{R_3} \right) - U_{EB2} \geq 0,$$

$$R_2 \geq R_L \frac{R_1}{R_3} + \frac{U_{EB2}}{U} (R_1 + R_2),$$

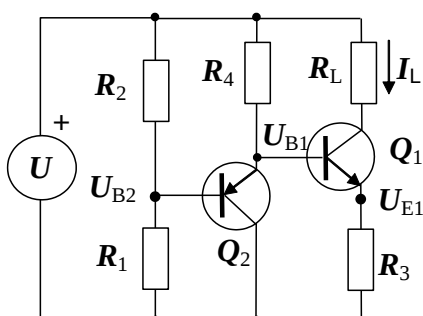
$$R_L \leq \frac{R_2 R_3}{R_1} - \frac{U_{EB2}}{U} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) R_3.$$

Ако се вредност напона  $U_{EB2}$  може да занемари у односу на напон напајања  $U$ , услов да струја  $I_L$  не зависи од вредности отпорности  $R_L$  се своди на:

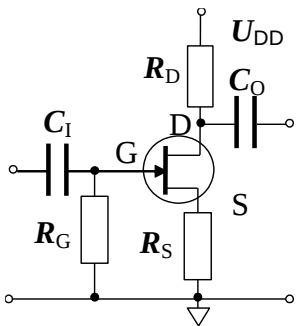
$$\Rightarrow R_L \leq \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

в)

Напон  $U_{EB2}$  транзистора  $Q_2$  компензује утицај напона  $U_{BE1}$  транзистора  $Q_1$  на вредност излазне струје  $I_L$ .



## ЗАДАТАК 3.А.



За коло приказано на слици:

а) одредити општи израз за вредност мирне радне струје  $I_D$  под претпоставком да је струја гејта занемарљиво мала, а да су вредности  $U_{DD}$ ,  $R_S$ ,  $I_{DSS}$  и  $U_{GS(OFF)}$  познате;

б) одредити бројну вредност мирне радне струје  $I_D$  за случај:  
 $U_{DD} = 15V$ ,  $R_S = 1\text{ k}\Omega$ ,  $I_{DSS} = 10\text{ mA}$  и  $U_{GS(OFF)} = -5\text{ V}$ ;

в) одредити највећу вредност отпорности  $R_D$  тако да транзистор ради у засићењу;

г) нацртати еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналимa ниских учестаности.

## РЕШЕЊЕ

а)

С обзиром на задате услове за посматрано коло важе следеће једначине:

$$U_{GS} = R_G I_G - R_S I_D \cong -R_S I_D \quad (1)$$

Када се једносмерни пад напона који струја гејта ствара на отпорнику  $R_G$  може да занемари, на основу другог Кирхофовог закона примењеног на улазну петљу, следи да је једносмерни напон између гејта и сорса,  $U_{GS}$ , једнак је паду напона који струја  $I_D$  ствара на отпорнику  $R_S$ :

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S) \quad (2)$$

Други Кирхофов закон примењен на излазну петљу.

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \quad (3)$$

Карактеристика преноса транзистора са ефектом поља при раду у области засићења.

На основу претходних једначина следи:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 + \frac{R_S I_D}{U_{GS(OFF)}} \right)^2.$$

б)

Добијен израз којим је одређена вредност струје  $I_D$  у зависности од вредности параметара елемената у колу може се написати у облику:

$$\frac{I_D}{I_{DSS}} = \left( 1 + \frac{R_S I_{DSS}}{U_{GS(OFF)}} \frac{I_D}{I_{DSS}} \right)^2,$$

односно:

$$x = (1 + \alpha x)^2;$$

где је :

$$x = \frac{I_D}{I_{DSS}} ; \alpha = \frac{R_S I_{DSS}}{U_{GS(OFF)}} .$$

За задате бројне вредности је  $\alpha = -2$ , па се проблем одређивања вредности мирне радне струје  $I_D$  своди на проблем решавања квадратне једначине:

$$4x^2 - 5x + 1 = 0 .$$

Корени ове једначине су

$$x_1 = 1 \text{ и } x_2 = 1/4 .$$

Решење  $x = 1$  се одбацује. Вредност  $x = 1$  би значила да је струја  $I_{DQ}$  једнака струји  $I_{DSS}$ , што је, на основу једначине (3), могуће само ако је напон  $U_{GS} = 0$ , а то је према једначини (1) немогуће, јер је отпорност  $R_S$  различита од нуле.

Физички стварно решење је  $x = 1/4$ , на основу којег следи:

$$I_D = 2,5 \text{ mA} .$$

в)

Да би N-канални фет, био у засићењу, потребно је да буде задовољен услов  $U_{GD} \leq U_{GS(OFF)}$ .

На основу једначина (1) и (2) следи:

$$R_D I_D - U_{DD} \leq U_{GS(OFF)} , \text{ односно:}$$

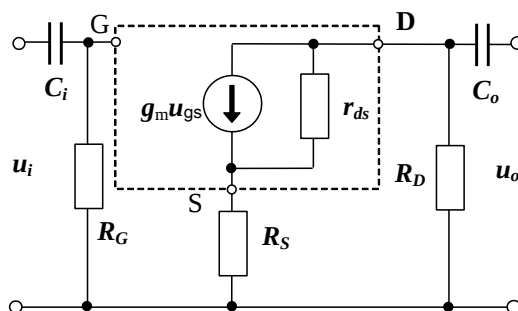
$$R_D \leq \frac{U_{DD} + U_{GS(OFF)}}{I_D} .$$

За задате бројне вредности је:

$$\max R_D = 4 \text{ k}\Omega .$$

в)

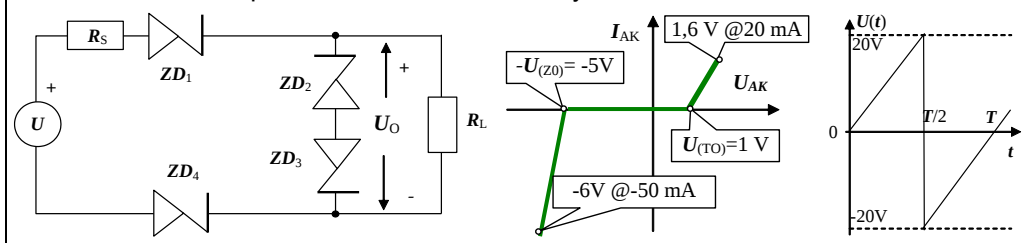
Еквивалентно коло за мале сигнале ниских учестаности (када се паразитне капацитивности транзистора могу занемарити) приказано је на слици.



**ЗАДАТАК 4.А.**

За коло приказано на слици:

- одредити општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  на излазу кола под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода  $ZD_1$  до  $ZD_4$  може представити дијаграмом на слици;
- одредити вредност излазног напона  $U_O$  када је:  $U = 20 \text{ V}$ ,  $R_S = 300 \Omega$  и  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ ;
- нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_O(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$  ако напон  $U(t)$  има троугаони таласни облик приказан на слици, амплитуде  $20 \text{ V}$ .

**РЕШЕЊЕ**

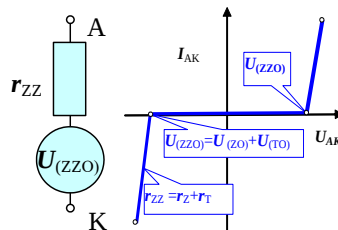
Две редно повезане, супротно оријентисане Ценер-диоде, делују као симетрична Ценер-диода. Смер деловања извора напона  $U_{(ZZO)}$  одређен је физичким смером струје кроз грану у којој се двојна Ценер-диода налази.

DZD
   
Двојна
   
Ценер-диода
   

$$U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)}$$

$$r_{ZZ} = r_Z + r_T$$

$$U_{ZZ} = U_{(ZZO)} + r_Z I_Z$$



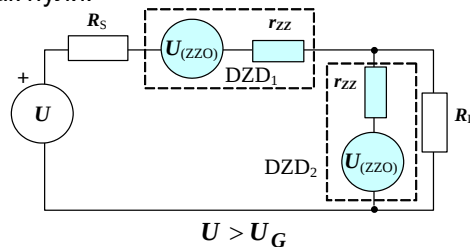
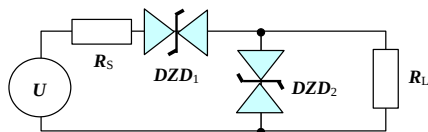
Еквивалентно коло је приказано на слици. Структура посматраног кола је симетрична у погледу поларитета улазног напона  $U$ , па је и улазно-излазна карактеристика кола симетрична у односу на координатни почетак:

$$U_O(-U) = -U_O(U).$$

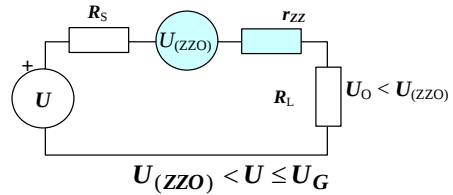
Могуће су три области рада.

За вредности улазног напона по модулу мање од  $U_{(ZZO)}$ , струја кроз грану кола у којој се налазе Ценер-диоде  $ZD_1$  и  $ZD_4$  (двојна Ценер-диода  $DZD_1$ ) једнака је нули, па је и напон  $U_O$  на излазу кола једнак нули.

При довољно великој вредности улазног напона обе двојне Ценер-диоде,  $DZD_1$  и  $DZD_2$ , доспевају у област пробоја, па је напон  $U_O$  на излазу кола једнак напону двојне Ценер-диоде  $DZD_2$  у области пробоја,  $U_{ZZ}$ , што значи да сразмерно мало зависи од вредности улазног напона.



Између ове две области је прелазна област: двојна диода  $DZD_1$  се налази у режиму пробоја, док је струја кроз  $DZD_2$  једнака нули. У овој области промене улазног напона се пресликавају као сразмерне промене излазног напона.



а)

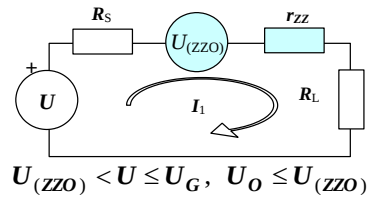
У околини координатног улазно-излазне карактеристике почетка, важи:

$$U_O = 0 \text{ за } |U| \leq U_{(ZZO)}$$

Када је улазни напон по модулу већи, а напон  $U_O$  на отпорнику  $R_L$  по модулу мањи од напона  $U_{(ZZO)}$ , важе релације:

$$U_O = R_L I_1 \text{ за } |U_O| \leq U_{(ZZO)},$$

$$I_1 = \begin{cases} \frac{U - U_{(ZZO)}}{R_S + r_{ZZ} + R_L} & \text{за } U_{(ZZO)} < U \leq U_G \\ \frac{U + U_{(ZZO)}}{R_S + r_{ZZ} + R_L} & \text{за } -U_G \leq U < -U_{(ZZO)} \end{cases},$$



где је  $U_G$  вредност улазног напона  $U$  која одговара граници ове области (када је  $|U_O| = U_{(ZZO)}$ ).

$$U_O = \begin{cases} (U - U_{(ZZO)}) \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L} & \text{за } U_{(ZZO)} < U \leq U_G \\ (U + U_{(ZZO)}) \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L} & \text{за } -U_G \leq U < -U_{(ZZO)} \end{cases}.$$

Нагиб карактеристике у овом делу је:

$$k_1 = \frac{dU_O}{dU} = \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L}$$

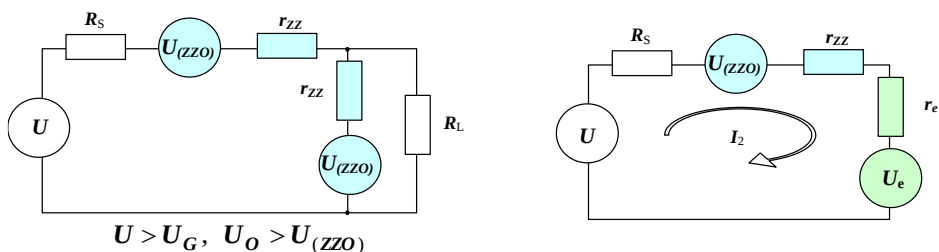
Вредност  $U_G$  улазног напона  $U$ , при којој напон на отпорнику  $R_L$  достиже вредност напона пробоја дуалне диоде  $DZD_2$ , представља горњу границу ове области одређену условом:

$$U_O(U_G) = (U_G - U_{(ZZO)}) \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L} = U_{(ZZO)},$$

на основу којег се добија:

$$U_G = U_{(ZZO)} \frac{1 + k_1}{k_1}.$$

Када је улазни напон  $U$  по модулу већи од граничног напона  $U_G$  обе двојне Ценер-диоде,  $DZD_1$  и  $DZD_2$ , проводе струју. Еквивалентно коло дато је на слици. Применом Тевененове теореме, ово коло се своди на једну петљу.



$$U_O = U_e + r_e I_2; U \leq U_G,$$

$$U_e = U_{(zzo)} \frac{R_L}{R_L + r_{zz}} \approx U_{(zzo)} \Big|_{R_L \gg r_{zz}}, \quad r_e = \frac{R_L r_{zz}}{R_L + r_{zz}} \approx r_{zz} \Big|_{R_L \gg r_{zz}}.$$

На основу израза за вредност струје у посматраном еквивалентном колу:

$$I_2 = \frac{U - U_{(zzo)} - U_e}{R_S + r_{zz} + r_e}$$

може се одредити нагиб улазно-излазне карактеристике у овој области:

$$k_2 = \frac{dU_O}{dU} = r_e \frac{dI_2}{dU} = \frac{r_e}{R_S + r_{zz} + r_e} \approx \frac{r_{zz}}{R_S + 2r_{zz}} \Big|_{R_L \gg r_{zz}}.$$

Функција  $U_O(U)$  је непрекидна, за  $U > U_G$  напон  $U_O(U)$  се може приказати изразом:

$$U_O = U_{(zzo)} + k_2(U - U_G); U \geq U_G.$$

$$U_O = \begin{cases} U_{(zzo)} + k_2(U - U_G) & \text{за } U > U_G \\ (U - U_{(zzo)}) \frac{R_L}{R_S + r_{zz} + R_L} & \text{за } U_{(zzo)} < U \leq U_G, U_G = U_{(zzo)} \frac{1+k}{k} \\ 0 & \text{за } |U| \leq U_{(zzo)}, U_{zz} = U_z + U_{(to)} \\ (U + U_{(zzo)}) \frac{R_L}{R_S + r_{zz} + R_L} & \text{за } -U_G < U \leq -U_{(zzo)} \\ -U_{(zzo)} + k_2(U + U_G) & \text{за } U < -U_G \end{cases}.$$

б)

За задате бројне вредности ( $U = 20 \text{ V}$ ,  $R_S = 300 \Omega$  и  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ ) добија се:

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} = 20 \Omega, r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = 30 \Omega;$$

$$U_{(zzo)} = U_{(zo)} + U_{(to)} = 6 \text{ V}.$$

$$k_1 = \frac{R_L}{R_S + r_{zz} + R_L} = 0,966,$$

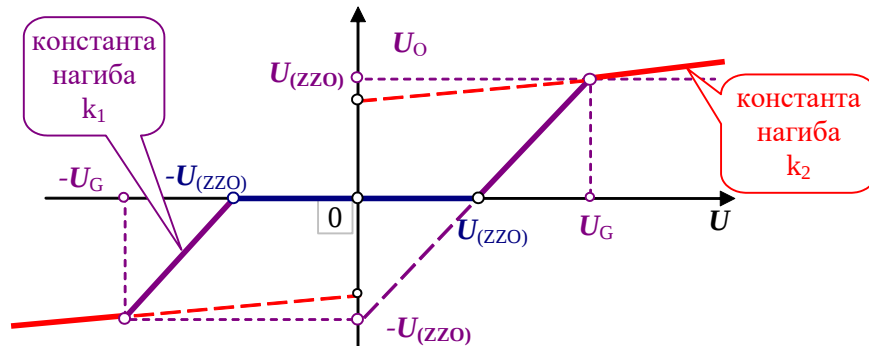
$$U_G = U_{(zzo)} \frac{1+k_1}{k_1} = 12,21 \text{ V},$$

$$k_2 \approx \frac{r_{zz}}{R_s + 2r_{zz}} = \frac{1}{8},$$

$$U_o(20V) = 6,973V \approx 7V \Big|_{R_L \gg R_s + r_{zz}}.$$

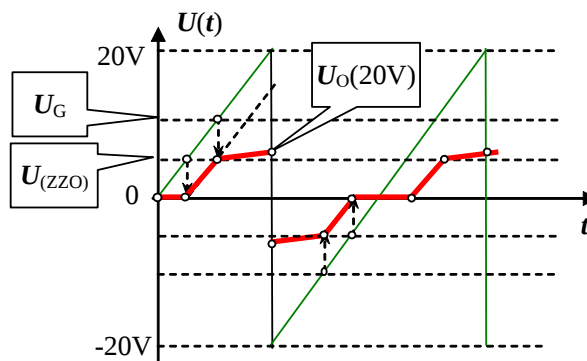
в)

Графички приказ улазно-излазне карактеристике кола дат је на слици.



г)

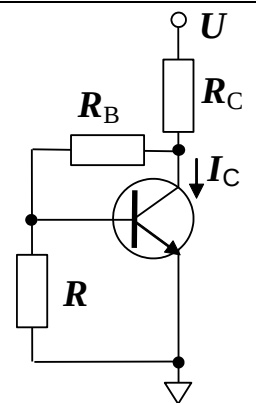
Временски дијаграм одзива кола дат је на слици.



**ЗАДАТАК 1.Б.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да су познате вредности карактеристичних параметара транзистора (појачање струје од базе до колектора,  $\beta$ , напон између базе и емитора транзистора при раду у активној области,  $U_{BE}$ , и инверзна струја засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ ), напона напајања,  $U > 0$ , и отпорности отпорника,  $R$ ,  $R_B$  и  $R_C$ , као и да се радна тачка транзистора налази у активној области:

- одредити општи израз за вредност струје  $I_C$ ,
- одредити показатељ нестабилности мирне радне тачке у посматраном колу услед промена инверзне струје засићења колекторског споја,  $I_{CBO}$ .

**РЕШЕЊЕ.**

а)

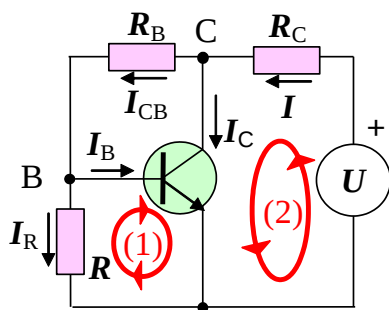
С обзиром на задате услове и усвојене референтне смерове, за посматрано коло важе следеће једначине:

$$(1) RI_R - U_{BE} = 0$$

(Други Кирхофов закон за петљу база-емитор),

$$(2) U - R_C I_C - U_C = 0$$

(Други Кирхофов закон за петљу колектор-емитор),



$$(3) U_C - R_B I_{CB} - U_{BE} = 0$$

(Други Кирхофов закон за путању колектор-база-емитор).

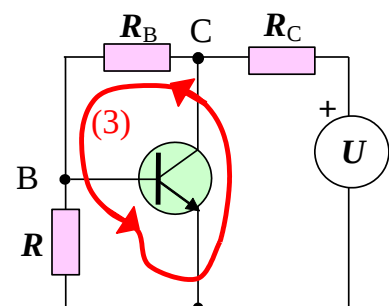
$$(4) I_S = I_C + I_{CB}$$

(Први Кирхофов закон за чвор С),

$$(5) I_{CB} = I_R + I_B$$

(Први Кирхофов закон за чвор В),

$$(6) I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO}$$



На основу једначине (6) струја  $I_B$  се може изразити преко струје  $I_C$ :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} - \frac{1 + \beta}{\beta} I_{CBO}.$$

На основу једначине (1) следи:

$$I_R = \frac{U_{BE}}{R}.$$

На основу једначине (5) и претходне једначине следи:

$$I_{CB} = I_B + \frac{U_{BE}}{R}.$$

На основу једначине (4) и претходне једначине следи:

$$I_S = I_C + I_B + \frac{U_{BE}}{R}, \text{ односно:}$$

$$I_S = I_C + \frac{I_C}{\beta} - \frac{1+\beta}{\beta} I_{CBO} + \frac{U_{BE}}{R}.$$

На основу једначина (2) и (3) се може написати:

$$U_C = U - R_C I_S = U_{BE} + R_B I_{CB}, \text{ односно:}$$

$$U - R_C \left( I_C + \frac{I_C}{\beta} - \frac{1+\beta}{\beta} I_{CBO} + \frac{U_{BE}}{R} \right) = U_{BE} + R_B \left( \frac{I_C}{\beta} - \frac{1+\beta}{\beta} I_{CBO} + \frac{U_{BE}}{R} \right).$$

Сређивањем последње једначине:

$$U - R_C \left( I_C + \frac{I_C}{\beta} - \frac{1+\beta}{\beta} I_{CBO} + \frac{U_{BE}}{R} \right) = U_{BE} + R_B \left( \frac{I_C}{\beta} - \frac{1+\beta}{\beta} I_{CBO} + \frac{U_{BE}}{R} \right),$$

$$U - U_{BE} \left( \frac{R_C}{R} + 1 + \frac{R_B}{R} \right) + R_C \frac{1+\beta}{\beta} I_{CBO} + R_B \frac{1+\beta}{\beta} I_{CBO} = I_C \left( \frac{R_B}{\beta} + R_C + \frac{R_C}{\beta} \right),$$

долази се до траженог израза за струју  $I_C$ :

$$I_C = \beta \frac{U - U_{BE} \left( 1 + \frac{R_B + R_C}{R} \right)}{R_B + (1+\beta)R_C} + \frac{(R_C + R_B)(1+\beta)}{R_B + (1+\beta)R_C} I_{CBO}.$$

б)

Показатељ нестабилности мирне радне тачке услед промена инверзне струје засићења колекторског споја,  $I_{CBO}$  представља парцијални извод функције  $I_C(U, U_{BE}, I_{CBO}, \beta)$ , посматрајући инверзну струју засићења као независно променљиву, а све остале величине као константе:

$$K_{I_{CBO}} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = \frac{(R_C + R_B)(1+\beta)}{R_B + (1+\beta)R_C}.$$

**ЗАДАТАК 2.Б.**

У приказаном колу употребљене су идентичне Ценер-диоде чија се  $U-I$  карактеристика може представити линеаризованим дијаграмом приказаним на слици.

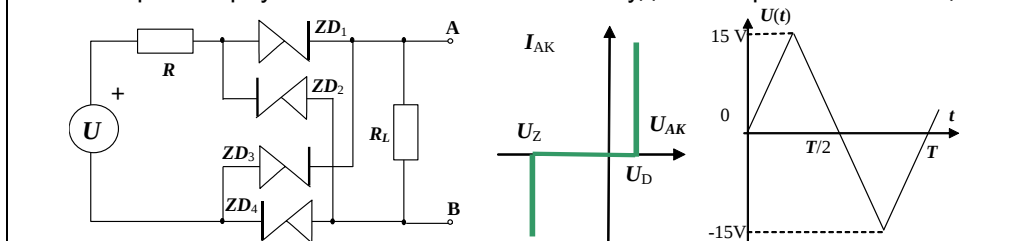
а) Одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ .

Ако је  $U_Z = 5\text{ V}$ ,  $U_D = 1\text{ V}$ ,  $R_L = R$ :

б) одредити вредност напона  $U_{AB}$  за случај  $U = 15\text{ V}$ ,

в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ ,

г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако напон  $U(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде  $15\text{ V}$  приказан на слици.

**РЕШЕЊЕ.**

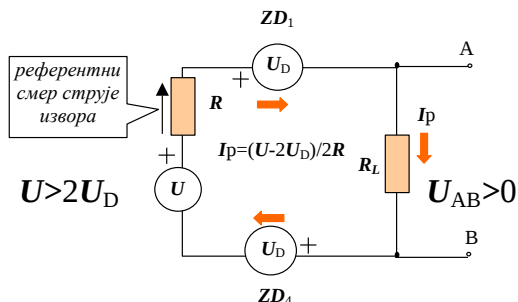
а)

Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода,  $(ZD_1, ZD_4)$  или  $(ZD_2, ZD_3)$ , проводи струју при директној поларизацији, што значи да напон  $U$  по модулу (интензитету) треба да буде већи од напона  $2U_D$ :

$$U_{AB} = 0 \quad \text{за} \quad |U| \leq 2U_D.$$

Када је у односу на референтни смер назначен на слици, напон  $U$  позитиван и већи од пада напона на директно поларисаним диодама  $ZD_1$  и  $ZD_4$  ( $2U_D$ ), струја  $I_p$ , коју у тим условима даје извор напона  $U$ , има такав смер да је напон  $U_{AB}$  позитиван.

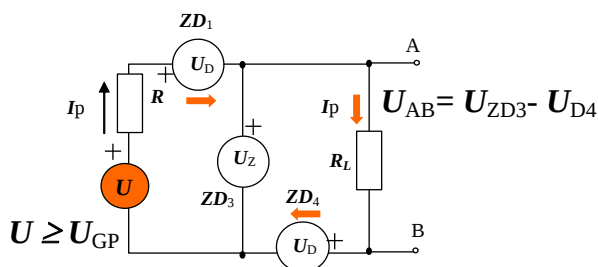
Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је збир напона на отпорнику  $R_L$  и напона на Ценер-диоиди  $ZD_4$  мањи од напона прага  $U_Z$  инверзног пробоја Ценер-диоде  $ZD_3$ , приказано је на слици. Напон  $U_{AB}$  је једнак:



$$U_{AB} = R_L I_p = R_L \frac{U - 2U_D}{R + R_L} > 0 \quad \text{за} \quad U > 2U_D; \quad U_{AB} + U_D < U_Z.$$

Напон  $U_{AB}$  достиже највећу вредност када Ценер-диоиди  $ZD_3$ , доспе у област инверзног пробоја.

Гранична вредност улазног напона,  $U_{GP}$ , при којој напон између крајева диоде  $ZD_3$  достиже вредност напона прага инверзног пробоја Ценер-диоде,  $U_Z$ , одређена је условом:



$$U_{AB}(U_{GP}) + U_{D4} = U_{Z3},$$

односно:

$$U_{AB} = R_L \frac{U_{GP} - 2U_D}{R + R_L} = U_Z - U_D,$$

одакле следи:

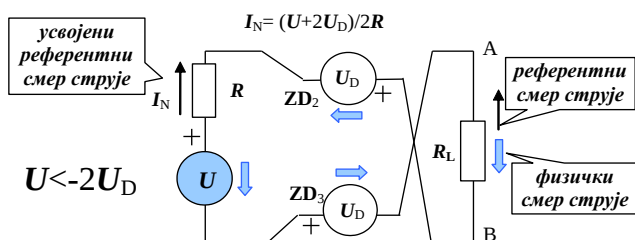
$$U_{GP} = U_Z \left( 1 + \frac{R}{R_L} \right) + U_D \left( 1 - \frac{R}{R_L} \right).$$

### Напомена

До истих закључака се долази и ако се уместо диода  $ZD_4$  и  $ZD_3$  посматрају диоде  $ZD_1$  и  $ZD_2$ .

Еквивалентно разматрање важи у случају када је у односу на референтни смер напон  $U$  негативан. Када је напон  $U$  негативан, а по интензитету већи од напона  $2U_D$  потребног да диоде  $ZD_3$  и  $ZD_2$  проводе струју у директном смеру, струја  $I_N$  (чији је референтни смер исти као и смер струје  $I_P$ ), коју даје извор напона  $U$  при овим условима, има такав смер кроз грану која садржи отпорник  $R_L$  да је напон  $U_{AB}$  позитиван.

Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је збир напона на отпорнику  $R_L$  и напона на Ценер-диоди  $ZD_4$  мањи од напона прага  $U_Z$  инверзног пробоја Ценер-диоде  $ZD_1$ , приказано је на слици.



Напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = -R_L I_N = -R_L \frac{U + 2U_D}{R + R_L} \text{ за } U < -2U_D$$

Напон  $U_{AB}$  је позитиван и достиже највећу вредност када Ценер-диода  $ZD_4$ , доспе у област пробоја. Дакле, и у овом случају важи иста једначина као при  $2U_D < U \leq U_{GP}$ .

Гранична вредност улазног напона,  $U_{GN}$ , при којој напон између крајева диоде  $ZD_4$  достиже вредност напона прага инверзног пробоја Ценер-диоде,  $U_Z$ , одређена је условом:

$$U_{AB} + U_{D3} = U_{Z4},$$

односно:

$$U_{AB} = -R_L \frac{U_{GN} + 2U_D}{R + R_L} = U_Z - U_D,$$

одакле следи:

$$U_{GN} = -U_Z \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) - U_D \left(1 - \frac{R}{R_L}\right) = -U_{GP}.$$

На основу претходних разматрања може се написати општи израз за вредност напона  $U_{AB}$ :

$$U_{AB} = \begin{cases} U_Z - U_D & \text{за } U \geq U_G \\ \frac{U - 2U_D}{R + R_L} R_L & \text{за } 2U_D \leq U < U_G, \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_D, \\ -\frac{U + 2U_D}{R + R_L} R & \text{за } -U_G < U \leq -2U_D \\ U_Z - U_D & \text{за } U \leq -U_G \end{cases}, \quad U_G = U_Z \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) + U_D \left(1 - \frac{R}{R_L}\right)$$

односно:

$$U_{AB} = \begin{cases} 0 & \text{за } |U| \leq 2U_D \\ \frac{|U| - 2U_D}{R + R_L} R_L & \text{за } 2U_D \leq |U| < U_G \\ U_Z - U_D & \text{за } |U| \geq U_G \end{cases}.$$

б)

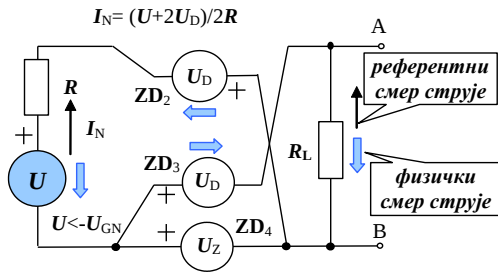
Ако је  $R_L = R$

$$U_{GP} = 2U_Z = 10 \text{ V}, \quad U_{GN} = -2U_Z = -10 \text{ V}.$$

$$U_{AB} = \begin{cases} U_Z - U_D & \text{за } U > 2U_Z \\ \frac{U}{2} - U_D & \text{за } 2U_D < U \leq 2U_Z \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_D \\ -\frac{U}{2} - U_D & \text{за } -2U_Z \leq U < -2U_D \\ U_Z - U_D & \text{за } U < -2U_Z \end{cases}$$

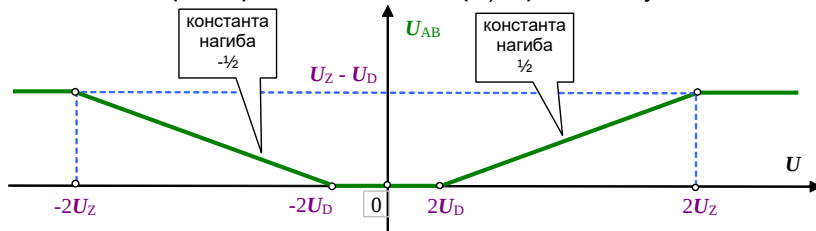
За задате вредности напона  $U = 15 \text{ V} > U_{GP}$  је:

$$U_{AB}(15 \text{ V}) = U_Z - U_D = 4 \text{ V}$$



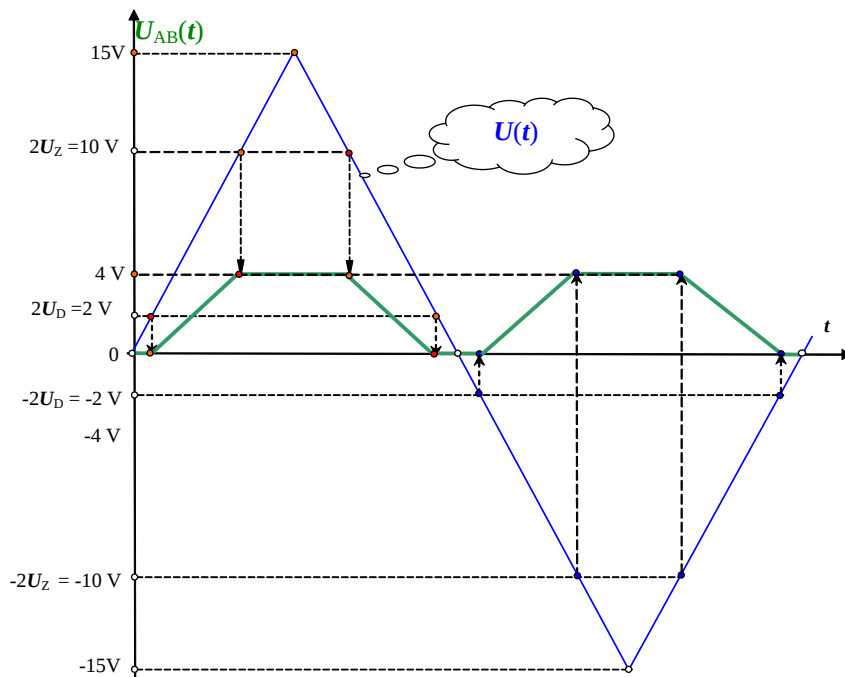
в)

Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(U)$ , приказана је на слици.



г)

Дијаграми таласних облика у колу приказани су на слици.



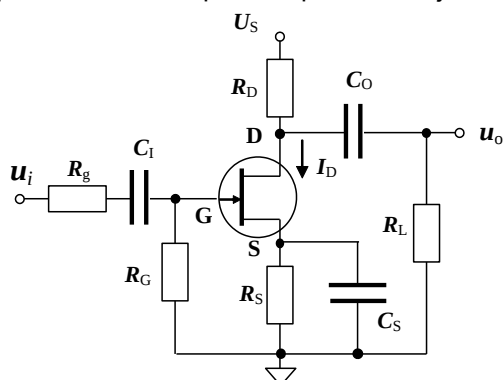
**ЗАДАТАК 3.Б.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да су вредности напона напајања  $U_S$ , отпорности  $R_G$ ,  $R_g$ , и  $R_L$ , као и параметара транзистора  $I_{GSS}$ ,  $U_{GS(OFF)}$ ,  $I_{DSS}$  и  $r_{DS}$ , познате:

- а) одредити вредности отпорности  $R_D$  и  $R_S$  при којима је мирна радна струја  $I_D$  једнака 2,5 mA, а напон  $U_{DS}$  једнак 5 V;  
 б) нацртати еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналим.

Ако се може претпоставити да је капацитивност  $C_S$  довољно велика да кондензатор  $C_S$  представља кратак спој за наизменичне сигнале:

- в) одредити општи израз за вредност појачања за мале сигнале  $A_U = u_o/u_i$ .



$$\begin{aligned} I_{GSS} &= -1 \text{ nA}, \\ I_{DSS} &= 10 \text{ mA}, \\ U_{GS(OFF)} &= -5 \text{ V}, \\ r_{DS} &= 40 \text{ k}\Omega, \\ R_g &= 5 \text{ k}\Omega, \\ R_G &= 1 \text{ M}\Omega; \\ R_L &= 100 \text{ k}\Omega; \\ U_S &= 15 \text{ V}. \end{aligned}$$

**РЕШЕЊЕ**

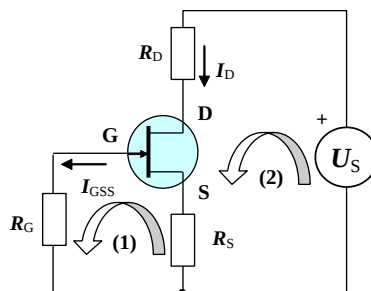
а)

Једносмерни радни режим кола описан је једначинама:

$$U_G - U_{GS} - R_S I_D = 0, \quad (1)$$

$$U_S - (R_D + R_S) I_D - U_{DS} = 0, \quad (2)$$

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 \quad (3)$$



Напон  $U_G$  се може занемарити у односу на вредности осталих напона у колу:

$$U_G = R_G I_{GSS} = 1 \text{ mV} \approx 0.$$

Једначина (1) своди се на једначину:

$$R_S = -\frac{U_{GS}}{I_D} \quad (\text{за N-канални фет, напон } U_{GS} \text{ је негативан}).$$

На основу једначине (3) одређује се, за задате вредности параметара транзистора,  $I_{DSS}$  и  $U_{GS(OFF)}$ , и мирне радне струје,  $I_D$ , вредност напона  $U_{GS}$ :

$$U_{GS} = U_{GS(OFF)} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right).$$

На основу претходних једначина следи општи израз за вредност отпорности  $R_S$  и  $R_D$ :

$$R_S = -\frac{U_{GS(OFF)}}{I_D} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right), \quad R_D = \frac{U_S - U_{DS}}{I_D} - R_S,$$

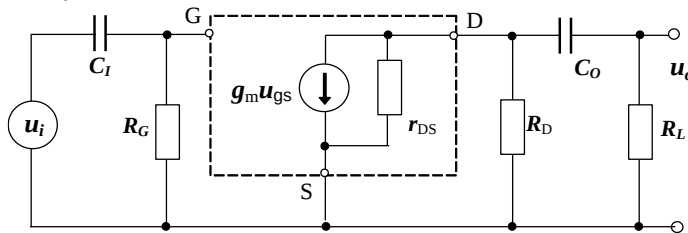
$$U_{GS} = -2,5V; R_S = 1k\Omega; R_D = 3k\Omega.$$

б)

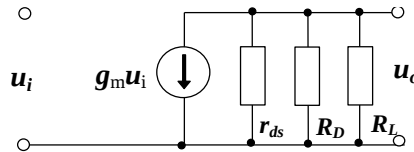
Ако је капацитивност  $C_S$  довољно велика да се може претпоставити да кондензатор  $C_S$  представља кратак спој за наизменични сигнал:

$$X_S = \frac{1}{\omega C_S} \approx 0.$$

еквивалентно коле се, с обзиром да је отпорност  $R_g$  много мања од отпорности  $R_G$ , своди на коло приказано на слици.



Ако су улазна и излазна капацитивност,  $C_I$  и  $C_O$ , довољно велике да се реактансе  $X_I$  и  $X_O$  могу занемарити, односно да се може претпоставити да кондензатори  $C_I$  и  $C_O$  представљају кратак спој, еквивалентно коло приказано је на слици.



в)

Вредност појачања напона, када су капацитивности  $C_S$ ,  $C_I$  и  $C_O$  довољно велике да се може претпоставити да одговарајући кондензатори представљају кратак спој за наизменични сигнал, одређена је изразом:

$$A_U = \frac{u_O}{u_I} = -g_m \cdot r_{ds} \parallel R_D \parallel R_L \approx -g_m \cdot R_D,$$

где је  $g_m$  динамичка проводност преноса:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS}=0} = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}}.$$

За задате вредности параметара у колу је:

$$g_m = 2 \text{ mS}; A_U = -6.$$

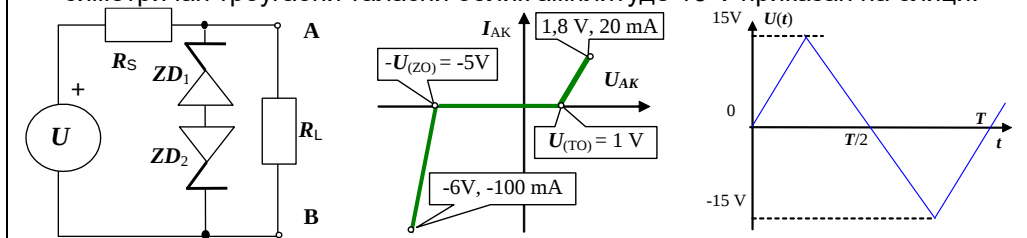
**ЗАДАТАК 4.Б.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода  $ZD_1$  и  $ZD_2$  може представити приказаним дијаграмом:

- а) одредити вредност динамичке отпорности Ценер-диоде у проводном стању  
 б) одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ .

Ако је  $U = 15\text{ V}$ ,  $R_S = 200\ \Omega$ ,  $R_L = 200\ \Omega$

- в) израчунати вредност излазног напона  $U_{AB}$  и струје кроз Ценер диоду;  
 г) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ ;  
 д) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде  $15\text{ V}$  приказан на слици.

**РЕШЕЊЕ**

а)

На основу вредности задатих на дијаграму који приказује линеаризовану карактеристику употребљених Ценер-диоде, следи:

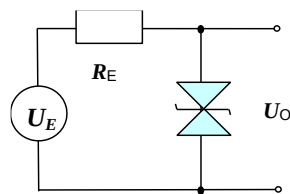
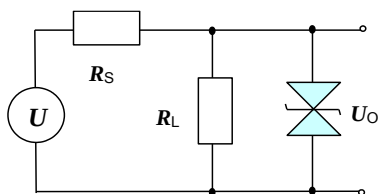
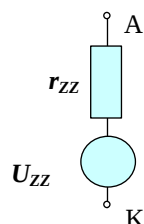
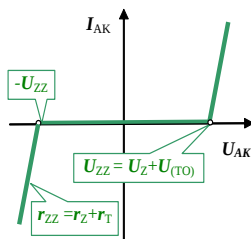
$$r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,8\text{ V}}{20\text{ mA}} = 40\ \Omega, \quad r_Z = \frac{\Delta U_R}{\Delta I_R} = \frac{1\text{ V}}{100\text{ mA}} = 10\ \Omega.$$

б)

Диоде  $ZD_1$  и  $ZD_2$  образују симетричну Ценер-диоду.

$$U_{ZZ} = U_{(ZO)} + U_{(TO)}$$

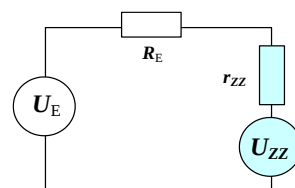
$$r_{ZZ} = r_Z + r_T$$



Применом Тевененове теореме, посматрано коло се може представити у једноставнијем облику, као коло које садржи једну контуру. Електромоторна сила еквивалентног Тевененовог извора напона,  $U_E$ , и његова унутрашња отпорност,  $R_E$ , једнаки су:

$$U_E = U \frac{R_L}{R_L + R_S} \text{ и } R_E = R_L \parallel R_S = \frac{R_L R_S}{R_L + R_S}.$$

Структура посматраног кола је симетрична у погледу поларитета улазног напона  $U$ , па је и улазно-излазна карактеристика кола симетрична у односу на координатни почетак.



Могуће су две области рада.

За вредности еквивалентног напона  $U_E$  мање од напона пробоја двојне Ценер-диоде,  $U_{ZZ}$ , струја кроз грану са Ценер-диодама је једнака нули. Напон  $U_{AB}$  на излазу кола једнак је напону  $U_E$ .

$$U_{AB} = U \frac{R_L}{R_S + R_L}, |U_E| < U_{ZZ}.$$

Када је напон  $U_E$  по интензитету већи од напона пробоја двојне Ценер-диоде  $U_{ZZ}$ , напон  $U_{AB}$  на излазу кола једнак је:

$$U_{AB} = U_{ZZ} + r_{ZZ} I = U_{ZZ} + r_{ZZ} \frac{U_E - U_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}} = U_{ZZ} \frac{R_E}{R_E + r_{ZZ}} + U_E \frac{r_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}}, |U_E| \geq U_{ZZ}.$$

Гранична вредност,  $U_G$ , улазног напона, која одговара преласку из једне у другу област рада, једнака је:

$$U_G = U \Big|_{U_E = U_{ZZ}} = U_{ZZ} \left( 1 + \frac{R_S}{R_L} \right).$$

$$U_{AB} = \begin{cases} U \frac{R_L}{R_L + R_S} & \text{за } |U| < U_{ZZ} \left( 1 + \frac{R_S}{R_L} \right) \\ U_{ZZ} \frac{R_E}{R_E + r_{ZZ}} + U \frac{R_L}{R_L + R_S} \frac{r_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}} & \text{за } |U| \geq U_{ZZ} \left( 1 + \frac{R_S}{R_L} \right) \end{cases}.$$

в)

За задате бројне вредности добија се:

$$r_{ZZ} = r_Z + r_T = 50 \, \Omega, \quad U_{ZZ} = U_Z + U_{(TO)} = 6 \, \text{V}, \quad R_E = R_L \parallel R_S = 100 \, \Omega,$$

$$U_G = 2U_{ZZ} = 12 \, \text{V}$$

$$U_E = \frac{1}{2} U,$$

$$U_{AB}(15 \, \text{V}) = 6,5 \, \text{V}$$

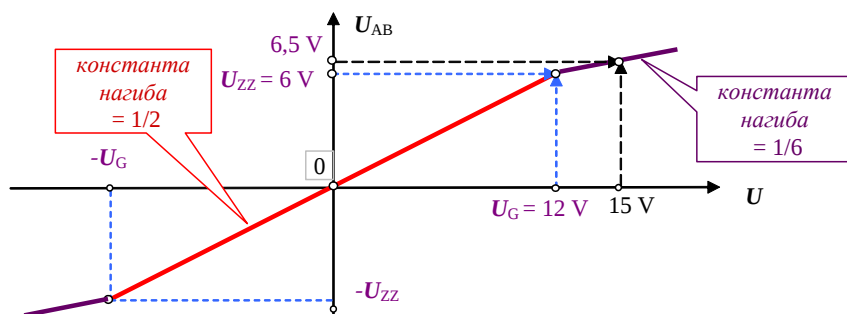
$$I_Z \Big|_{U=15 \, \text{V}} = \frac{U_E - U_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}} = 10 \, \text{mA}$$

Провера:

$$I_L|_{U=15\text{ V}} = \frac{6,5\text{ V}}{200\ \Omega} = 32,5\text{ mA}, \quad I_S|_{U=15\text{ V}} = \frac{15 - 6,5\text{ V}}{200\ \Omega} = 42,5\text{ mA} = I_L + I_Z$$

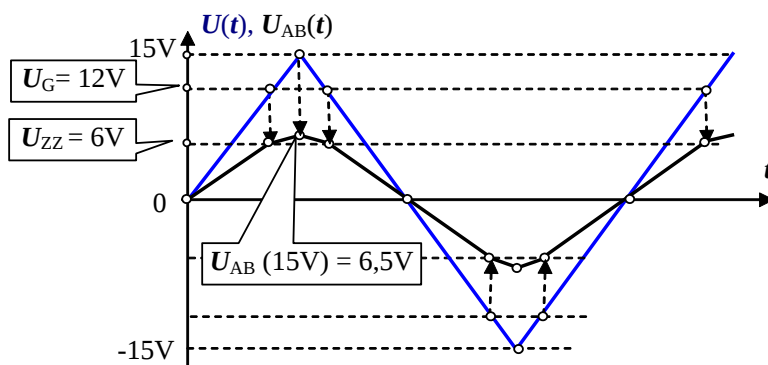
г)

Графички приказ улазно-излазне карактеристике кола је дат на слици.



д)

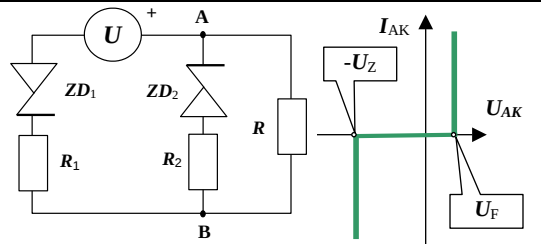
Временски дијаграм одзива кола дат је на слици.



## ЗАДАТАК 1.

За коло приказано на слици, под претпоставком да карактеристика Ценер-диода може представити приказаним дијаграмом:

- одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ ;
- нацртати карактеристику  $U_{AB}(U)$ , ако је  $R_1 = R = 200 \Omega$ ,  $R_2 = 100 \Omega$ ,  $U_F = 1 \text{ V}$ ,  $U_Z = 5 \text{ V}$ .



## РЕШЕЊЕ

Да би напон  $U_{AB}$  био позитиван, потребно је да се Ценер-диода  $ZD_1$  налази у стању инверзног пробоја, што значи да је улазни напон позитиван и већи од Ценеровог напона  $U_Z$ .

При довољно великој позитивној вредности улазног напона диода  $ZD_2$  је такође у стању инверзног пробоја. Гранична вредност  $U_{GP}$  позитивног улазног напона при којем долази до инверзног пробоја диоде  $ZD_2$  одређена је условом:  $U_{AB}(U_{GP}) = U_Z$ .

Да би напон на излазу кола био негативан, потребно је да Ценер-диода  $ZD_1$  проводи у директном смеру, што значи да је улазни напон негативан, по интензитету већи од напона директно поларисане Ценер-диоде у проводном стању,  $U_F$ .

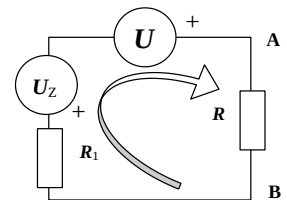
При довољно великој негативној вредности улазног напона диода  $ZD_2$  такође доспева у стање директног пробоја. Гранична вредност  $U_{GN}$  негативног улазног напона при којем долази до директног пробоја диоде  $ZD_2$  одређена је условом:  $U_{AB}(U_{GN}) = -U_F$ .

а)

Када се вредност улазног напона  $U$  налази у границама од  $-U_F$  до  $U_Z$ , напон  $U_{AB}$  је једнак нули:.

$$U_{AB} = 0 \text{ за } -U_F \leq U \leq U_Z.$$

Када се вредност улазног напона  $U$  налази у границама од  $U_Z$  до  $U_{GP}$ , коло се своди на једну петљу приказану на слици.



$$U_{AB} = (U - U_Z) \frac{R}{R + R_1}, \quad U_Z < U < U_{GP}.$$

Константа нагиба овог дела улазно-излазне карактеристике,  $k_{1P}$ , једнака је:

$$k_{1P} = \frac{R}{R + R_1}, U_Z < U < U_{GP},$$

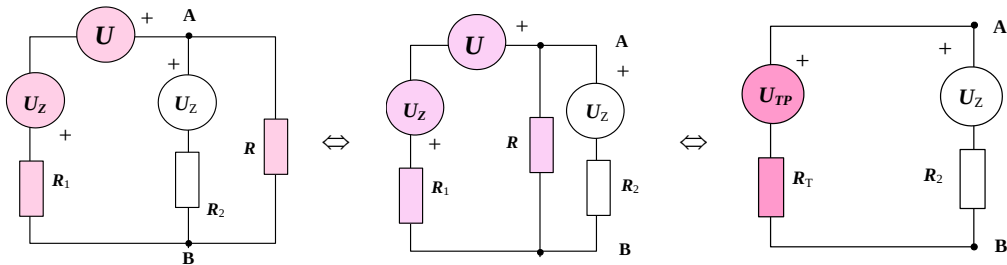
Граница ове области (вредност улазног напона  $U_{GP}$  при којој почиње да тече струја у грани која садржи диоду  $ZD_2$ ) одређена је условом:

$$U_{AB}(U_{GP}) = (U_{GP} - U_Z) \frac{R}{R + R_1} = U_Z$$

на основу којег следи:

$$U_{GP} = U_Z \frac{R_1 + 2R}{R}.$$

Када је вредност улазног напона  $U$  већа од  $U_{GP}$ , коло садржи две петље које се применом Тевененове теореме могу свести на једну, као што је приказано на слици.



$$U_{TP} = (U - U_Z) \frac{R}{R_1 + R}, R_T = R \parallel R_1 = \frac{R_1 R}{R_1 + R}.$$

$$U_{AB} = U_Z + (U_{TP} - U_Z) \frac{R_2}{R_T + R_2}, U > U_{GP}$$

У области  $U > U_{GP}$  напон  $U_{AB}(U)$  се може приказати изразом:

$$U_{AB} = U_Z + k_{2P} (U - U_{GP}), U > U_{GP},$$

где је  $k_{2P}$  константа нагиба овог дела улазно-излазне карактеристике:

$$k_{2P} = \frac{dU_{AB}}{dU} = \frac{R_2}{R_T + R_2} \frac{dU_{TP}}{dU} = \frac{R_2}{R_T + R_2} k_{1P}, U > U_{GP},$$

$$U_{AB} = U_Z + k_{2P} (U - U_{GP}), U > U_{GP}$$

Функција  $U_{AB}(U)$  је непарна. Релације које описују улазно-излазну карактеристику у делу који одговара негативним вредностима улазног напона добијају се сменом:

$$U_Z \Rightarrow -U_F.$$

$$U_{AB} = (U + U_F) \frac{R}{R + R_1}, U_{GN} < U < -U_F,$$

$$k_{1N} = k_{1P} = \frac{R}{R + R_1} = k_1,$$

$$U_{GN} \Big|_{U_{AB}=-U_F} = -U_F \frac{R_1 + 2R}{R},$$

$$k_{2N} = k_{2P} = \frac{R_2}{R_2 + R_T} \frac{R}{R + R_1} = k_2,$$

$$U_{TN} = (U + U_F) \frac{R}{R + R_1},$$

$$U_{AB} = -U_F + k_{2N} (U - U_{GN}), U < U_{GN}.$$

6)

За задате вредности  $R_1 = R = 200 \, \Omega$ ,  $R_2 = 100 \, \Omega$ ,  $U_F = 1 \, \text{V}$ ,  $U_Z = 5 \, \text{V}$  добија се:

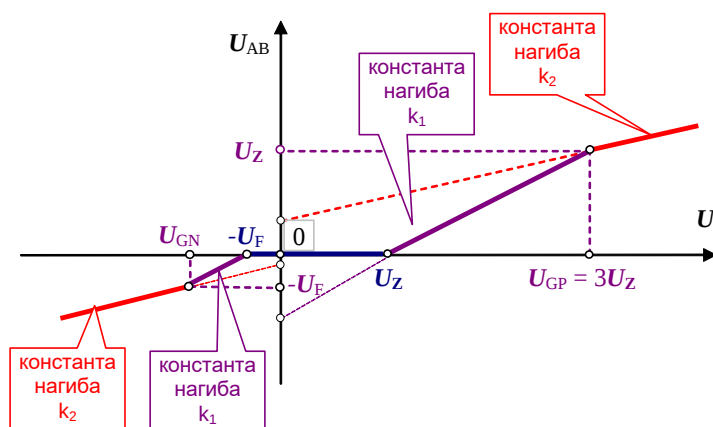
$$U_{GP} \Big|_{U_{AB}=U_Z} = 3U_Z,$$

$$U_{GN} \Big|_{U_{AB}=-U_F} = -3U_F,$$

$$k_1 = \frac{1}{2}, \quad k_2 = \frac{1}{4}.$$

$$U_{AB} = \begin{cases} U_Z + \frac{1}{4}(U - 3U_Z) & \text{за } U > 3U_Z \\ \frac{1}{2}(U - U_Z) & \text{за } U_Z < U \leq 3U_Z \\ 0 & \text{за } -U_F \leq U \leq U_Z \\ \frac{1}{2}(U + U_F) & \text{за } -3U_F \leq U \leq -U_F \\ -U_F + \frac{1}{4}(U + 3U_Z) & U \leq -3U_F \end{cases}$$

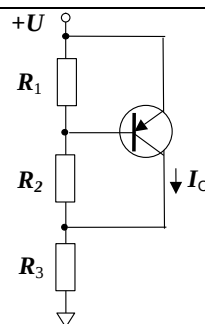
Карактеристика  $U_{AB}(U)$  је приказана на слици.



**ЗАДАТАК 2**

За коло приказано на слици, под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у нормалној радној (активној) области, као и да се инверзна струја засићења колекторског споја  $I_{CBO}$  може занемарити;

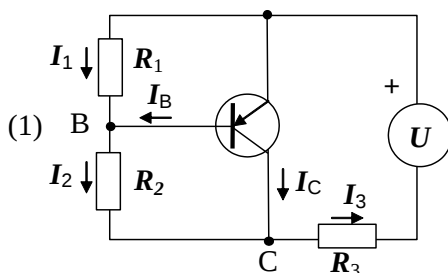
- одредити општи израз за вредност струје  $I_C$ ;
- одредити општи израз за показатељ нестабилности струје  $I_C$  у зависности од промена напона  $U_{EB}$ .

**РЕШЕЊЕ**

а)

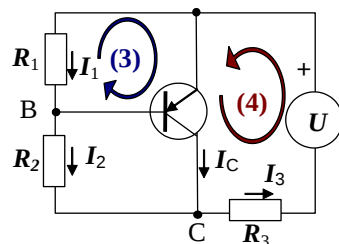
У складу са ознакама назначеним на слици, за чворове В и С важе следеће једначине, написане према првом Кирхофовом закону:

- $I_2 = I_1 + I_B$  (чвор В),
- $I_3 = I_C + I_2$  (чвор С).



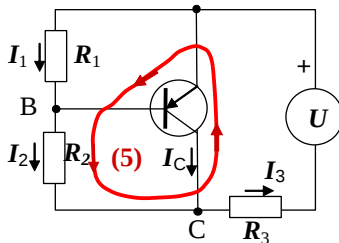
Према другом Кирхофовом важе следеће једначине:

- $U_{EB} + R_1 I_1 = 0$  (петља емитор-база),
- $U - U_{EC} - R_3 I_3 = 0$  (петља емитор-колектор),



као и једначина:

- $U_{EC} - R_2 I_2 - U_{EB} = 0$  (петља емитор-база-колектор).



С обзиром да се, према претпоставци, радна тачка транзистора налази у нормалној (активној) радној области, важи:

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} \approx \beta I_B,$$

односно:

$$(6) \quad I_B = \frac{I_C}{\beta}.$$

На основу једначине (3) следи:

$$I_1 = \frac{U_{EB}}{R_1}.$$

На основу једначине (1) и претходне једначине следи:

$$I_2 = I_B + \frac{U_{EB}}{R}.$$

На основу једначине (2) и претходне једначине следи:

$$I_3 = I_C + I_B + \frac{U_{EB}}{R}, \text{ односно:}$$

$$I_3 = I_C + \frac{I_C}{\beta} + \frac{U_{EB}}{R}.$$

На основу једначина (4) и (5) може се написати:

$$U_{EC} = U - R_3 I_3 = U_{EB} + R_2 I_2,$$

односно:

$$U - R_3 \left( I_C + \frac{I_C}{\beta} + \frac{U_{EB}}{R} \right) = U_{EB} + R_2 \left( \frac{I_C}{\beta} + \frac{U_{EB}}{R_1} \right).$$

Сређивањем последње једначине:

$$U - U_{EB} \left( \frac{R_3}{R_1} + 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = I_C \left( \frac{R_2}{\beta} + R_3 + \frac{R_3}{\beta} \right),$$

долази се до траженог израза за струју  $I_C$ :

$$I_C = \beta \frac{U - U_{EB} \left( 1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1} \right)}{R_2 + (1 + \beta) R_3}$$

б)

Диференцирањем добијеног израза по напону  $U_{EB}$  као променљивој величини добија се:

$$K_{U_{EB}} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{EB}} = \beta \frac{1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}}{R_2 + (1 + \beta) R_3}$$

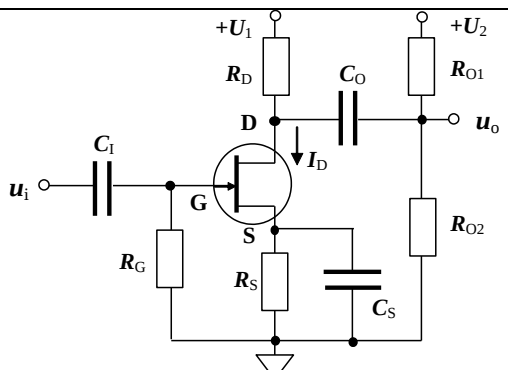
## ЗАДАТАК 3.

За коло приказано на слици, познате су вредности напона напајања  $U$ , отпорности  $R_G$  и  $R_L$ , као и параметара транзистора  $I_{GSS}$ ,  $U_{GS(OFF)}$ ,  $I_{DSS}$  и  $r_{DS}$ .

а) Одредити вредности отпорности  $R_D$  и  $R_S$  при којима је мирна радна струја  $I_D$  једнака 2 mA а напон  $U_{DS}$  једнак 6 V;

б) Ако се може претпоставити да је капацитивност  $C_S$  довољно велика да кондензатор  $C_S$  представља кратак спој за наизменичне сигнале, нацртати еквивалентно коло за побуду наизменичним сигналимa.

в) Ако су капацитивности  $C_i$ ,  $C_o$  и  $C_s$  довољно велике да се може сматрати да кондензатори  $C_i$ ,  $C_o$  и  $C_s$  представљају кратак спој за наизменичне сигнале, одредити општи израз за вредност појачања за мале сигнале  $A_U = u_o/u_i$ ;



$$I_{GSS} = -1 \text{ nA}, I_{DSS} = 8 \text{ mA}, \\ U_{GS(OFF)} = -4 \text{ V}, r_{DS} = 40 \text{ k}\Omega \\ R_G = 2 \text{ M}\Omega; R_L = 100 \text{ k}\Omega; \\ U_1 = 12 \text{ V}, U_2 = 5 \text{ V}$$

## РЕШЕЊЕ

а)

Под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у области засићења, важи формула:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2$$

За петљу гејт-сорс важи једначина:

$$U_G - U_{GS} - R_S I_D = 0.$$

С обзиром на задате вредности струје и отпорности, напон  $U_G$  се може занемарити у односу на вредности осталих напона у колу:

$$U_G = R_G I_{GSS} = 2 \text{ mV} \approx 0.$$

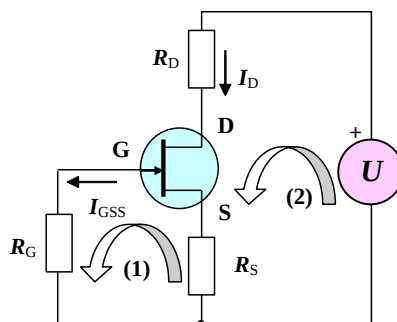
На основу прве једначине следи:

$$R_S = -\frac{U_{GS}}{I_D} \quad (\text{за N-канални фет, напон } U_{GS} \text{ је негативан})$$

Вредност напона  $U_{GS}$  одређена је задатом вредношћу мирне радне струје,  $I_D$ , и карактеристикама транзистора:

$$U_{GS} = U_{GS(OFF)} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right).$$

На основу претходних једначина добија се општи израз за вредност отпорности  $R_S$ :



$$R_S = -\frac{U_{GS(OFF)}}{I_D} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right).$$

На основу једначине која се добија применом другог Кирхофовог закона на петљу дрејн-сорс

$$U_1 - (R_D + R_S)I_D - U_{DS} = 0 ,$$

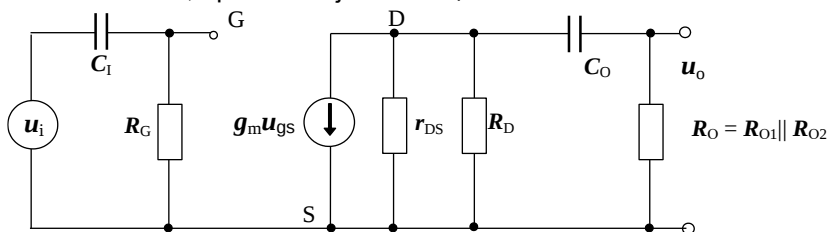
слиди општи израз за вредност отпорности  $R_D$ :

$$R_D = \frac{U_1 - U_{DS}}{I_D} - R_S .$$

$$U_{GS} = -2V ; R_S = 1k\Omega ; R_D = 2k\Omega .$$

б)

Еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналимa, када је капацитивност  $C_S$  довољно велика да кондензатор  $C_S$  представља кратак спој за наизменичне сигнале, приказано је на слици.



в)

Вредност појачања напона, када су капацитивности  $C_S$ ,  $C_i$  и  $C_o$  довољно велике да се може претпоставити да одговарајући кондензатори представљају кратак спој за наизменични сигнал у опсегу учестаности који је од интереса, одређена је изразом:

$$A_U = \frac{u_O}{u_I} = -g_m \cdot r_{ds} \parallel R_D \parallel R_O \approx -g_m \cdot R_D .$$

где је  $g_m$  динамичка проводност преноса:

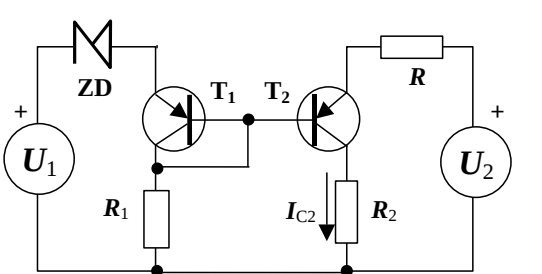
$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}=0} = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}} .$$

За задате вредности параметара у колу је:

$$g_m = 2 \text{ mS} ; A_U \cong -4$$

**ЗАДАТАК 4.**

За коло приказано на слици, под претпоставком: да је појачање струје од базе до колектора транзистора довољно велико да се струје базе могу занемарити у односу на остале струје у колу, као и да је инверзна струја засићења колекторског споја транзистора занемарљиво мала:



- одредити општи израз којим је одређена вредност струје  $I_{C2}$ ;
- израчунати вредност струје  $I_{C2}$  када је  $U_1 = U_2 = 10 \text{ V}$ , ако су транзистори  $T_1$  и  $T_2$  силицијумски, радни напон Ценер-диоде у области пробоја,  $U_Z$ , једнак  $5 \text{ V}$ , а све отпорности у колу једнаке  $1 \text{ k}\Omega$ ;
- одредити потребан услов у погледу односа вредности  $U_2$ ,  $U_Z$ ,  $U_{BE}$ ,  $R$  и  $R_2$  да струја  $I_{C2}$  не зависи од вредности отпорности  $R_2$ .

**РЕШЕЊЕ**

а)

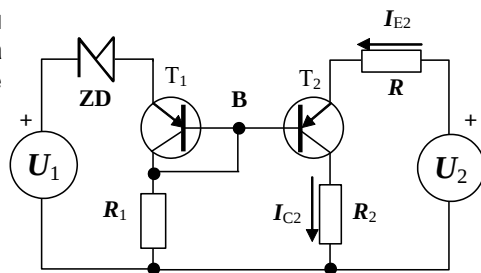
У складу са датим претпоставкама и ознакама назначеним на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

$$I_{C2} = I_{E2} - I_{B2} \cong I_{E2}$$

$$U_B = U_1 - U_Z - U_{EB1} = U_2 - RI_{E2} - U_{EB2},$$

на основу којих следи:

$$I_{C2} = \frac{U_2 - U_1 + U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}}{R}.$$



У односу на оптерећење, које отпорник  $R_2$  представља, када се транзистор налази у активној области рада, коло делује као извор струје чија је вредност одређена вредношћу струје кроз отпорник  $R$ . Струја  $I_{C2}$  зависи од вредности напона  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_Z$ , као и отпорности  $R$ , а не зависи од вредности отпорности  $R_2$ . Ако су напони  $U_1$  и  $U_2$  једнаки, струја  $I_{C2}$  зависи само од односа напона Ценер-диоде у стању пробоја,  $U_Z$  и отпорности отпорника  $R$ .

б) За задате вредности добија се:

$$I_{C2} = \frac{U_2 - U_1 + U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}}{R} \cong \frac{U_Z}{R} = 5 \text{ mA}.$$

в)

Са повећењем отпорности оптерећења,  $R_2$ , потенцијал колектора транзистора  $T_2$  се повећава. Његова вредност, међутим, не може бити већа од потенцијала базе транзистора  $T_2$ . На основу услова;

$$U_{BC2} \geq 0,$$

добија се:

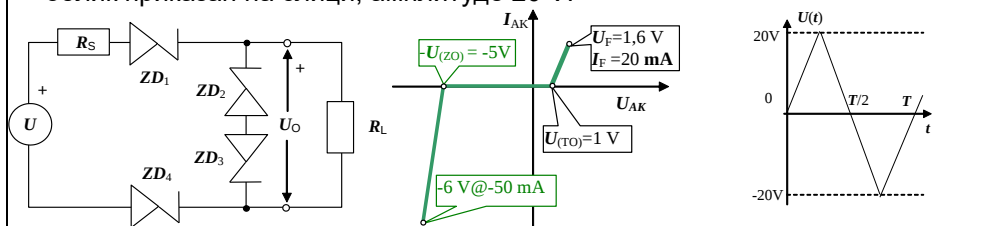
$$U_{BC2} = U_B - U_{C2} = U_1 - U_Z - U_{EB1} - R_2 I_{C2} \geq 0$$

$$R_2 \leq \frac{U_1 - U_Z - U_{EB1}}{U_2 - U_1 + U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}} R.$$

## ЗАДАТАК 1.

За коло приказано на слици :

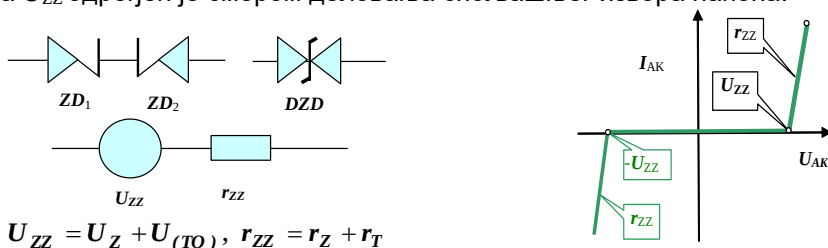
- а) одредити општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  на излазу кола под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода  $ZD_1$  до  $ZD_4$  може представити дијаграмом на слици;
- б) одредити вредност излазног напона  $U_O$  ако је  $U = 20\text{ V}$ ,  $R_S = 300\ \Omega$  и  $R_L = 10\text{ k}\Omega$ ;
- в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_O(U)$ ;
- г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$  ако напон  $U(t)$  има таласни облик приказан на слици, амплитуде  $20\text{ V}$ .



## РЕШЕЊЕ

а)

Две редно повезане супротно оријентисане Ценер-диое делују као диода са симетричном карактеристиком. Еквивалентно коло "двојне Ценер-диое" приказано је на слици. Динамичке отпорности Ценер-диое поларисане у инверзном и директном смеру означене су са  $r_Z$  и  $r_T$ . Смер деловања извора напона  $U_{ZZ}$  одређен је смером деловања спољашњег извора напона.

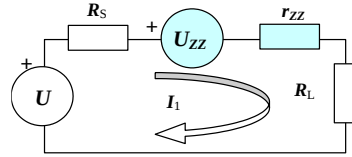
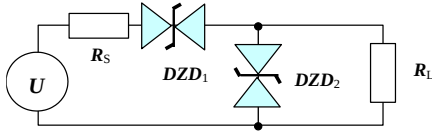


$$U_{ZZ} = U_Z + U_{(TO)}, \quad r_{ZZ} = r_Z + r_T$$

Структура кола је симетрична у погледу поларитета улазног напона  $U$ , па је и улазно-излазна карактеристика кола  $U_O(U)$  симетрична у односу на координатни почетак. Могу се разликовати три стања у колу.

За вредности улазног напона мање од  $U_{ZZ}$ , струја кроз грану кола у којој се налазе Ценер-диое  $ZD_1$  и  $ZD_4$  је једнака нули, па је и напон  $U_O$  на излазу кола једнак нули. При довољно великој вредности улазног напона једна од диода,  $ZD_2$  или  $ZD_3$  (зависно од поларитета улазног напона), доспева у област пробоја, а друга је директно поларисана, па је напон на излазу кола једнак је напону двојне Ценер-диое  $DZD_2$ , што значи да релативно мало зависи од вредности улазног напона. Између ове две области је прелазна област: двојна диода  $DZD_1$  се

налази у стању пробоја, док је струја кроз  $DZD_2$  једнака нули. У овој области промене улазног напона пресликавају се као једнаке промене излазног напона.



У околини координатног почетка, улазно-излазна карактеристика дефинисана је релацијама:

$$U_O = 0 \text{ за } |U| < U_{ZZ}.$$

Када је улазни напон по модулу већи, а напон  $U_O$  на отпорнику  $R_L$  мањи од напона  $U_{ZZ}$ , важе релације:

$$U_O = R_L I_1 \text{ за } |U_O| < U_{ZZ},$$

$$I_1 = \frac{U - U_{ZZ}}{R_S + r_{ZZ} + R_L},$$

$$U_O = (U - U_{ZZ}) \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L}.$$

Нагиб карактеристике у овом делу је:

$$k_1 = \frac{\Delta U_O}{\Delta U} = \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L}.$$

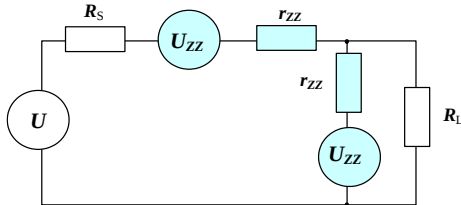
Вредност  $U_G$  улазног напона  $U$ , при којој напон на отпорнику  $R_L$  достиже вредност напона пробоја дуалне диоде  $DZD_2$ , представља горњу границу ове области, а одређена је условом:

$$(U_G - U_{ZZ}) \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L} = U_{ZZ},$$

на основу којег се добија:

$$U_G = U_{ZZ} \frac{1 + k_1}{k_1}.$$

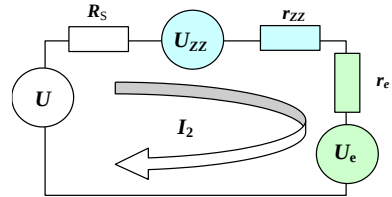
Еквивалентно коло, за случај када је улазни напон  $U$  већи од граничног напона  $U_G$ , дато је на слици. Применом Тевененове теореме, ово се коло своди на једну петљу приказану на слици.



$$U_O = U_e + r_e I_2; U_G \leq |U|,$$

$$U_e = U_{ZZ} \frac{R_L}{R_L + r_{ZZ}} \approx U_{ZZ} \left| R_L \gg r_{ZZ} \right., \quad r_e = \frac{R_L r_{ZZ}}{R_L + r_{ZZ}} \approx r_{ZZ} \left| R_L \gg r_{ZZ} \right..$$

На основу израза за вредност струје у посматраном еквивалентном колу:



$$I_2 = \frac{U - U_{ZZ} - U_e}{R_S + r_{ZZ} + r_e},$$

може се одредити нагиб улазно-излазне карактеристике у овој области:

$$k_2 = \frac{\Delta U_O}{\Delta U} = r_e \frac{\Delta I_2}{\Delta U} = \frac{r_e}{R_S + r_{ZZ} + r_e} \approx \frac{r_{ZZ}}{R_S + 2r_{ZZ}} \Big|_{R_L \gg r_{ZZ}}.$$

С обзиром да је функција  $U_O(U)$  непрекидна, следи:

$$U_O = U_{ZZ} + k_2(U - U_G); |U| \geq U_G.$$

$$U_O = \begin{cases} 0; |U| < U_{ZZ}, U_{ZZ} = U_Z + U_{(TO)} \\ (U - U_{ZZ}) \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L}; U_{ZZ} \leq |U| < U_G, U_G = U_{ZZ} \frac{1+k_1}{k_1} \\ U_{ZZ} + k_2(U - U_G); |U| \geq U_G \end{cases}$$

б)

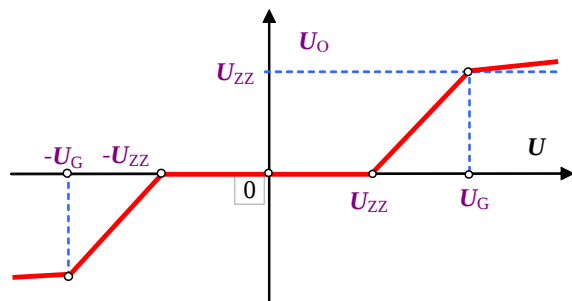
За задате вредности  $U = 20 \text{ V}$ ,  $R_S = 300 \Omega$  и  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$  добија се:

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} = 20 \Omega, r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = 30 \Omega; U_O(20 \text{ V}) = 6,96946 \text{ V} \approx 7 \text{ V} \Big|_{R_L \gg R_S + r_{ZZ}}.$$

в)

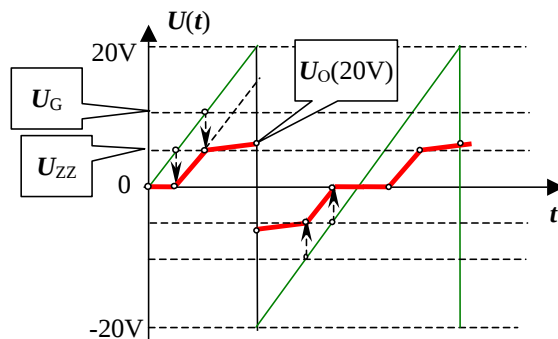
Графички приказ улазно-излазне карактеристике кола дат је на слици.

$$k_1 \cong 1, \quad k_2 \cong \frac{1}{8}, \quad U_G \cong 2U_{ZZ}$$



г)

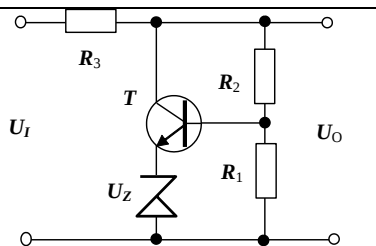
Временски дијаграм одзива кола дат је на слици.



## ЗАДАТАК 2.

За коло приказано на слици, под претпоставком да је појачање струје од базе до колектора транзистора довољно велико да се струја базе може занемарити у односу на остале струје у колу,:

- одредити општи израз за вредност излазног напона  $U_O$  и зависности од вредности улазног напона  $U_I$  ( $U_I \geq 0$ ) и вредности параметара елемената у колу,
- Ако је Т германијумски транзистор, а све отпорности у колу су међусобно једнаке, одредити вредност излазног напона  $U_O$  за  $U = 20 \text{ V}$ .



## РЕШЕЊЕ

а)

За позитивне вредности улазног напона  $U$ , блиске нули, транзистор је закочен, струје  $I_B$  и  $I_C$  се могу занемарити. Коло се понаша као пасивни делитељ напона који образују отпорници  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ :

$$U_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} U$$

При довољно великим позитивним вредностима улазног напона  $U_I$ , када је транзистор Т у проводном стању, а диода ZD се налази у режиму пробоја, за усвојене ознаке и референтне смерове напона и струја у колу (слика 1.2.a), важе следеће једначине:

$$U_B = U_Z + U_{BE},$$

$$U_O = U_B + R_2 I_2, \text{ и}$$

$$I_2 = I_B + I_1 = I_B + \frac{U_B}{R_1} \cong \frac{U_B}{R_1},$$

на основу којих следи:

$$U_O = (U_Z + U_{BE}) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

б)

За задате вредности  $U = 20 \text{ V}$ ,  $R_3 = R_1 = R_2$ , усвајајући за германијумски транзистор  $U_{BE} = 0,2 \text{ V}$  добија се:

$$U_O(20\text{V}) = 11,6\text{V}$$

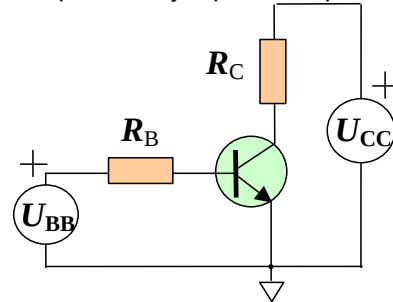
Коло које сачињавају Ценер-диода ZD, транзистор Т и отпорници  $R_1$  и  $R_2$ , делује као еквивалентна Ценер-диода чији се “напон пробоја” подешава помоћу отпорника  $R_1$  и  $R_2$ . Струја  $I_3$  кроз отпорник  $R_3$  зависи од вредности напона  $U$  и отпорности оптерећења прикљученог на излаз кола.

**ЗАДАТАК 3.**

За коло приказано на слици,

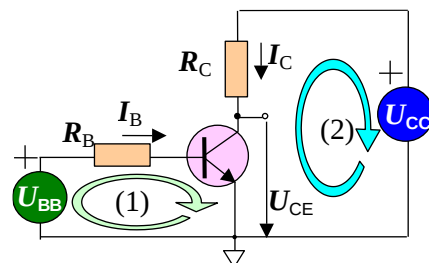
под претпоставком да су познате вредности једносмерних напона,  $U_{BB}$  и  $U_{CC}$  ( $U_{CC} > U_{BB}$ ), као и карактеристичних параметара транзистора (појачање струје од базе до колектора,  $\beta$ , напон између базе и емитора транзистора при раду у активној области,  $U_{BE}$ , и инверзна струја засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ ) одредити:

- опште изразе за вредности отпорности  $R_B$  и  $R_C$  тако да је, при задатој струји колектора  $I_C$ , напон  $U_{CE}$  између колектора и емитора једнак половини напона  $U_{CC}$  којим се врши поларизација колекторског споја транзистора;
- бројне вредности отпорности  $R_B$  и  $R_C$  за које је напон  $U_{CE}$  транзистора једнак 6 V при напонима  $U_{CC} = 10$  V,  $U_{BB} = 5$  V, струји колектора  $I_C = 1$  mA, уколико је  $I_{CBO} = 1$  nA ( $t = 25^\circ\text{C}$ ) и  $\beta = 100$ ;
- услов у погледу односа отпорности  $R_B$  и  $R_C$ , који треба да буде испуњен да се мирна радна тачка транзистора налази у области засићења, под претпоставком да је вредност напона засићења споја база-емитор,  $U_{BEsat}$ , такође позната.
- показатељ нестабилности мирне радне тачке посматраног кола у односу на промене фактора појачања струје  $\beta$ .


**РЕШЕЊЕ**

а)

На основу односа задатих вредности напона ( $0 < U_{BE} < U_{CE} < U_{CC}$ ) следи да је спој база-емитор NPN транзистора поларисан у директном смеру ( $U_{BE} > 0$ ), а спој база-колектор у инверзном смеру ( $U_{BC} < 0$ ). Дакле, **транзистор није закочен, нити је у засићењу**. Према томе, за ово коло важе следеће једначине:



$$U_{BB} - R_B I_B - U_{BE} = 0, \quad (1)$$

$$U_{CC} - R_C I_C - U_{CE} = 0, \quad (2)$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO}. \quad (3)$$

На основу једначина (1) и (3) следи:

$$R_B = \beta \frac{U_{BB} - U_{BE}}{I_C - (1 + \beta) I_{CBO}}.$$

Вредност отпорности  $R_C$  одређује се на основу једначине (2):

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_C}, \quad (4)$$

и задатог услова  $U_{CE} = \frac{U_{CC}}{2}$  :

$$R_C = \frac{U_{CC}}{2I_C}.$$

б)

За задате вредности  $U_{CE} = 6 \text{ V}$ ,  $I_C = 1 \text{ mA}$ , и  $U_{CC} = 10 \text{ V}$ , применом једначине (4) добија се:

$$R_C = 4 \text{ k}\Omega.$$

На основу задате вредности инверзне струје засићења колекторског споја  $I_{CBO} = 1 \text{ nA}$ , закључује се да је у питању силицијумски транзистор, за који важи  $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$ . За задату вредност напона поларизације споја база-емитор,  $U_{BB} = 5 \text{ V}$ , добија се:

$$R_B = 440 \text{ k}\Omega.$$

в)

За NPN транзистор у засићењу важе релације:

$$U_{BE} > 0, U_{CB} \leq 0, \quad (5)$$

$$I_{Csat} < \beta I_{Bsat} + (1 + \beta) I_{CBO}. \quad (6)$$

Из једначина (1) и (2) следи:

$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = U_{CC} - R_C I_C - U_{BE},$$

па се на основу услова (5) добија:

$$R_C \geq \frac{U_{CC} - U_{BEsat}}{I_{Csat}}. \quad (A)$$

На основу једначине (1) и услова (6), занемарујући инверзну струју засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ , следи:

$$I_{Csat} < \beta \frac{U_{BB} - U_{BEsat}}{R_B}. \quad (B)$$

На основу релација (A) и (B) следи услов да транзистор буде у засићењу:

$$R_B < \beta R_C \frac{U_{BB} - U_{BEsat}}{U_{CC} - U_{BEsat}}.$$

$$\frac{R_B}{R_C} < \beta \frac{U_{BB} - U_{BEsat}}{U_{CC} - U_{BEsat}}$$

г)

На основу једначина (1) и (3) добија се:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} + (\beta + 1)I_{CBO}.$$

Показатељ нестабилности мирне радне тачке посматраног кола у односу на промене фактора појачања струје  $\beta$  једнак је:

$$K_\beta = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} + I_{CBO}$$

#### ЗАДАТАК 4.

У колу приказаном на слици употребљене су четири једнаке диоде,  $D_1$  до  $D_4$ , и једна Ценер-диоода,  $ZD$ , чије се  $U$ - $I$  карактеристике могу приближно представити приказаним дијаграмима;

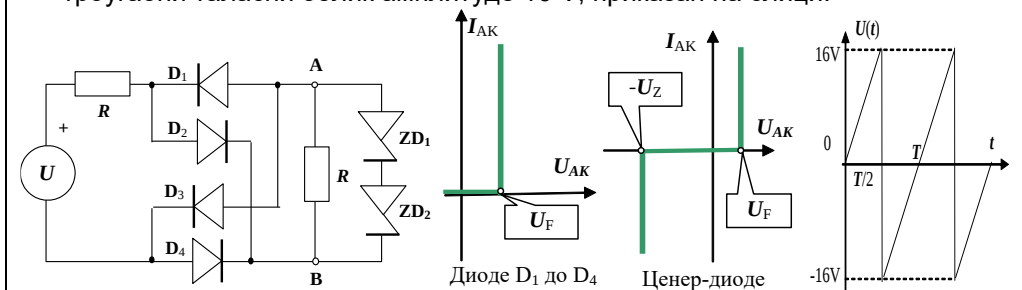
а) одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ .

Ако је напон прага  $U_{(TO)}$  једнак 1V, а напон пробоја  $U_{(ZO)}$  једнак 2,5 V:

б) одредити вредност напона  $U_{AB}$  за случај  $U = 16$  V;

в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ ;

г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако напон  $U(t)$  има троугаони таласни облик амплитуде 16 V, приказан на слици.



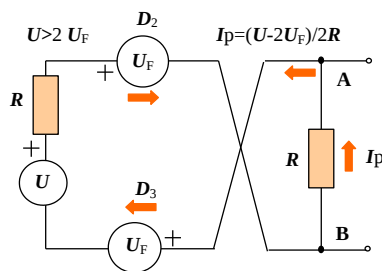
#### РЕШЕЊЕ

Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода, ( $D_1, D_4$ ) или ( $D_2, D_3$ ), буде у проводном стању, што значи да напон  $U$  по модулу (интензитету) треба да буде већи од напона  $2U_F$ ,

$$U_O = 0 \text{ за } U \leq 2U_F$$

Када је у односу на референтни смер назначен на слици, напон  $U$  позитиван и већи од напона  $2U_F$  потребно да диоде  $D_2$  и  $D_3$  буду у проводном стању, струја  $I_F$  коју даје извор напона  $U$  има такав смер да је тачка В на вишем потенцијалу од тачке А. Напон  $U_{AB}$  је негативан.

Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је излазни напон по интензитету мањи од напона вођења две Ценер-диоде поларисане у инверзном смеру,  $2U_Z$ , приказано је на слици. Смер деловања еквивалентног извора напона  $U_F$  којим се моделује диода поларисана у проводном смеру, одређен је назначеним физичким смером струје  $I$ . Напон  $U_{AB}$  је једнак:



$$U_{AB} = -RI_P = -R \frac{U - 2U_F}{2R} = -\frac{U}{2} + U_F < 0 \text{ за } (U > 2U_F) \wedge (U_{AB} > -2U_Z)$$

Гранична вредност улазног напона,  $U_{GP}$ , при којој струја  $I_P$  ствара на излазном отпорнику напон  $U_{AB}$  једнак  $-2U_Z$  одређена је једначином:

$$U_{AB} = -2U_Z = -\frac{U_{GP}}{2} + U_F,$$

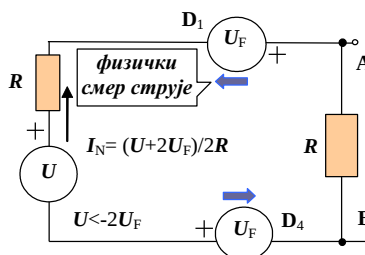
одакле следи:

$$U_{GP} = 2(U_F + 2U_Z).$$

Када је напон  $U$  већи од напона  $U_{GP}$ , напон  $U_{AB}$  је негативан, по модулу једнак напону  $2U_Z$ :

$$U_{AB} = -2U_Z \text{ за } U > U_{GP}.$$

Када је у односу на изабрани референтни смер напон  $U$  негативан, а по интензитету већи од напона  $2U_F$ , потребно да диоде  $D_4$  и  $D_1$  буду директно поларисане, струја  $I_N$  коју даје извор напона  $U$  има смер такав да је тачка В на вишем потенцијалу од тачке А. Напон  $U_{AB}$  је негативан. Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је излазни напон мањи од напона вођења две Ценер-диоде у стању инверзног пробоја,  $2U_Z$ , приказано је на слици.



Напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = RI_N = R \frac{U + 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} + U_F < 0 \text{ за } (U < -2U_F) \wedge (U_{AB} > -2U_Z)$$

Гранична вредност улазног напона,  $U_{GN}$ , при којој струја  $I_N$  ствара на излазном отпорнику напон  $U_{AB}$  једнак  $-2U_Z$ , одређена је једначином:

$$U_{AB} = -2U_Z = \frac{U_{GN}}{2} + U_F,$$

одакле следи:

$$U_{GN} = -2(2U_Z + U_F) = -U_{GP}$$

Када је напон  $U$  мањи од напона  $U_{GN}$ , напон  $U_{AB}$  је негативан, по модулу једнак напону  $U_{(TO)}$ :

$$U_{AB} = -U_F \text{ за } U < U_{GN}.$$

Према томе, за напон  $U_{AB}$  важи:

$$U_{AB} = \begin{cases} -2U_Z & \text{за } U > 2(2U_Z + U_F) \\ -\frac{U}{2} + U_F & \text{за } 2U_F < U \leq 2(2U_Z + U_F) \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ \frac{U}{2} + U_F & \text{за } -2(2U_Z + U_F) < U < -2U_F \\ -U_F & \text{за } U < -2(2U_Z + U_F) \end{cases}.$$

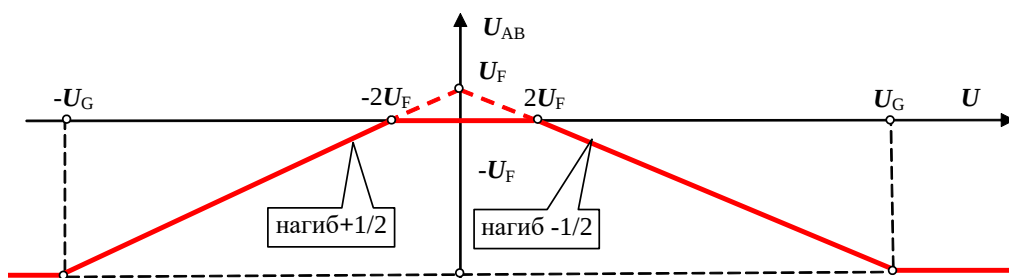
б)

За задате вредности напона  $U = 16 \text{ V} > U_{GP}$  је:

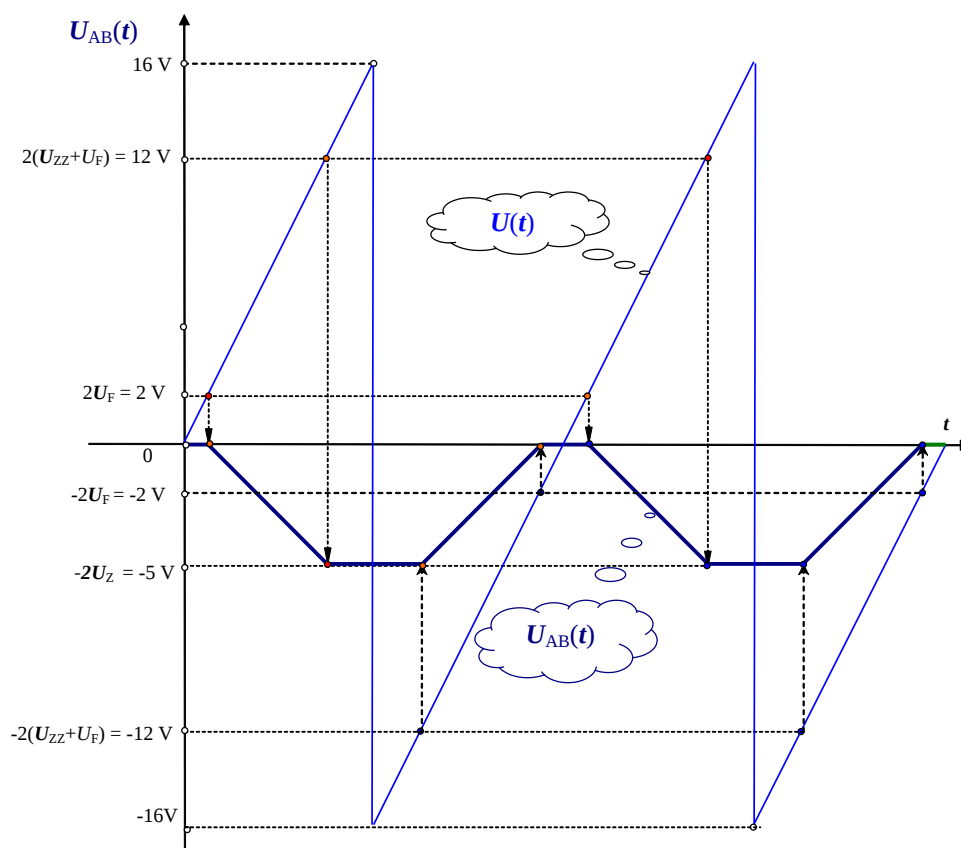
$$U_{AB}(16 \text{ V}) = -2U_Z = -5 \text{ V}$$

в)

Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(U)$ , приказана је на слици.



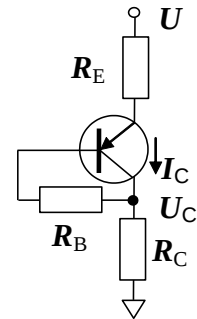
г) Дијаграми таласних облика у колу приказани су на слици.



## ЗАДАТАК 1.А.

За коло приказано на слици,

- а) под претпоставком да су познате вредности напона напајања,  $U$ , отпорности  $R_B$ ,  $R_C$  и  $R_E$ , као и карактеристичних параметара транзистора (појачање струје од базе до колектора,  $\beta$ , напон између емитора и базе транзистора при раду у активној области,  $U_{EB}$ , и инверзна струја засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ ), одредити општи израз за вредност струје  $I_C$ .
- б) израчунати бројне вредности напона  $U_C$  и струје  $I_E$  при задатим вредностима параметара кола:  $U = 10 \text{ V}$ ,  $\beta = 99$ ,  $I_{CBO} = 1 \text{ nA}$ ;  $R_B = 100 \text{ k}\Omega$ ;  $R_C = R_E = 2 \text{ k}\Omega$ ;



## РЕШЕЊЕ

- а) За приказано коло важе једначине:

$$I = I_B + I_C = I_E,$$

$$U - R_E I_E - U_{EB} - R_B I_B - R_C I_E = 0,$$

На основу односа напона у посматраном колу ( $U_{EB} > 0$ ,  $U_{CB} > 0$ ) следи да транзистор није у засићењу. Ако је напон  $U$  довољно велики,  $U \gg U_{EBT}$ , радна тачка транзистора се налази у активној радној области:

$$I_E = (\beta + 1)(I_B + I_{CBO}).$$

На основу претходних једначина следи:

$$U - (R_C + R_E)(I_B + I_{CBO}) = R_B I_B + U_{EB}$$

$$U - (R_C + R_E)(1 + \beta)(I_B + I_{CBO}) = R_B I_B + U_{BE}$$

$$I_B = \frac{U - U_{EB} - (\beta + 1)(R_C + R_E)I_{CBO}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)}.$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO} = \beta \frac{U - U_{EB}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)} + \frac{R_B}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)} I_{CBO}.$$

- б)

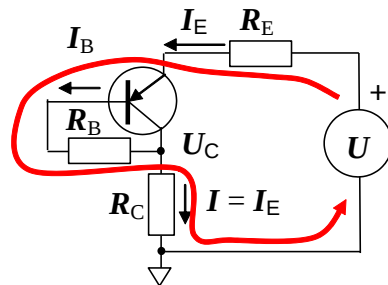
На основу задате вредности инверзне струје засићења колекторског споја,  $I_{CBO}$ , закључује се да је транзистор германијумски, за који се може усвојити да је у активној области напон емитор - база,  $U_{EB}$ , приближно једнак  $0,2 \text{ V}$ .

$$I_B = \frac{10 - 0,6 - 100 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^3 + 100 \cdot 4 \cdot 10^3} \frac{\text{V}}{\Omega} \cong 18,8 \mu\text{A},$$

$$I_E = 100 \cdot (18,8 + 10^{-3}) \mu\text{A}, I_E = 1,88 \text{ mA},$$

$$I_C = I_E - I_B = (1,88 - 0,0188) \text{ mA} = 1,8612 \text{ mA}$$

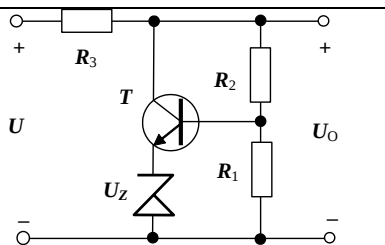
$$U_C = R_C I_E = 2 \cdot 10^3 \Omega \cdot 1,88 \text{ mA} = 3,76 \text{ V}$$



**ЗАДАТАК 2.А.**

За коло приказано на слици, под претпоставком да је Т силицијумски транзистор чија је инверзна струја засићења колекторског споја занемарљиво мала у односу на остале струје у колу:

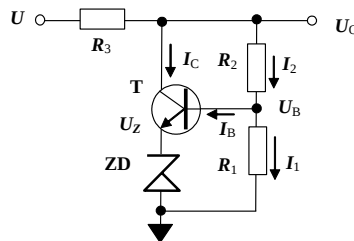
- одредити општи израз за вредност излазног напона  $U_O$  и зависности од вредности улазног напона  $U$  ( $U \geq 0$ ) и вредности параметара елемената у колу,
- нацртати карактеристику преноса  $U_O(U)$  ако су све отпорности у колу једнаке, а појачање струје од базе до колектора транзистора довољно велико да се струја базе може занемарити у односу на остале струје у колу.

**РЕШЕЊЕ**

а)

За позитивне вредности улазног напона  $U$ , блиске нули, транзистор је закочен, струје  $I_B$  и  $I_C$  се могу занемарити. Коло се понаша као пасивни делитељ напона који образују отпорници  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ :

$$U_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} U.$$



При довољно великим позитивним вредностима улазног напона  $U_i$ , када је транзистор Т у проводном стању, а диода ZD се налази у режиму пробоја, за усвојене ознаке и референтне смерове напона и струја у колу, важе следеће једначине:

$$U_B = U_Z + U_{BE},$$

$$U_O = U_B + R_2 I_2, \text{ и}$$

$$I_2 = I_B + I_1 = I_B + \frac{U_B}{R_1},$$

на основу којих следи:

$$U_O = (U_Z + U_{BE}) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + R_2 I_B.$$

б)

Ако се струја  $I_B$  занемари:

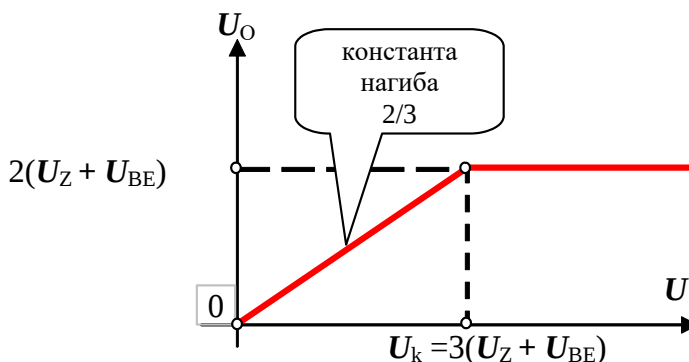
$$U_O = (U_Z + U_{BE}) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

Линеаризована улазно-излазна карактеристика кола приказана је на слици. Када се струја  $I_B$  занемари, напон  $U_K$  који одговара преломној тачки карактеристике одређен је условом:

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} U_K = (U_Z + U_{BE}) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right),$$

одакле следи:

$$U_k = (U_Z + U_{BE}) \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1}.$$



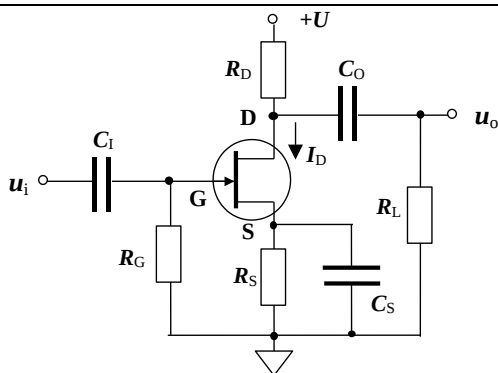
### ЗАДАТАК 3.А.

У колу, приказаном на слици, познате су вредности напона напајања  $U$ , отпорности  $R_G$ , и  $R_L$ , као и параметара транзистора  $I_{GSS}$ ,  $U_{GS(OFF)}$ ,  $I_{DSS}$  и  $r_{DS}$ .

- а) Одредити вредности отпорности  $R_D$  и  $R_S$  при којима је мирна радна струја  $I_D$  једнака 2,5 mA а напон  $U_{DS}$  једнак 5 V.

Ако су капацитивности  $C_I$ ,  $C_O$  и  $C_S$  довољно велике да се може сматрати да кондензатори  $C_I$ ,  $C_O$  и  $C_S$  представљају кратак спој за наизменичне сигнале:

- б) нацртати еквивалентно коло за побуду наизменичним сигналим;  
в) одредити општи израз за појачање напона за мале сигнале;  
г) за задате и израчунате бројне вредности параметара кола, одредити бројну вредност појачања напона за мале сигнале.



$$I_{GSS} = -1 \text{ nA}, I_{DSS} = 10 \text{ mA}, \\ U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}, r_{DS} = 50 \text{ k}\Omega \\ R_G = 1 \text{ M}\Omega; R_L = 200 \text{ k}\Omega; U = 10 \text{ V}$$

### РЕШЕЊЕ

а)

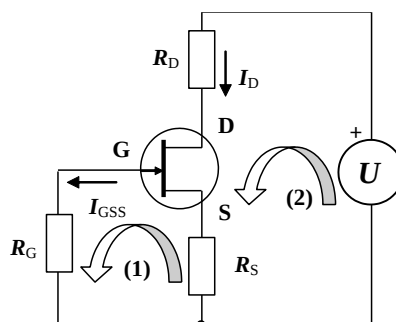
С обзиром на задате вредности струје и отпорности, напон  $U_G$  се може занемарити у односу на вредности осталих напона у колу:

$$U_G = R_G I_{GSS} = 1 \text{ mV} \approx 0.$$

Једносмерни радни режим кола описан је једначинама које следе на основу другог Кирхофовог закона.

За петљу гејт-сорс (1) важи:

$$U_{GS} + R_S I_D = 0,$$



Када се радна тачка транзистора налази у области засићења струја  $I_D$  једнака је:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2.$$

На основу претходних једначина следи општи израз за вредност отпорности  $R_S$  у зависности од вредности параметара транзистора,  $I_{DSS}$  и  $U_{GS(OFF)}$ , и задате мирне радне струје,  $I_D$ :

$$R_S = -\frac{U_{GS}}{I_D} = -\frac{U_{GS(OFF)}}{I_D} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right),$$

(за N-канални фет, напон  $U_{GS}$  је негативан).

Применом другог Кирхофовог закона на петљу дрејн-сорс (2):

$$U - (R_D + R_S) I_D - U_{DS} = 0,$$

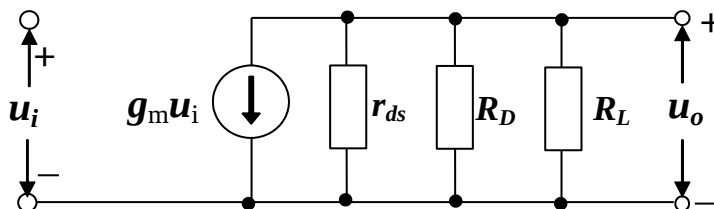
добива се општи израз за вредност отпорности  $R_D$ :

$$R_D = \frac{U - U_{DS}}{I_D} - R_S,$$

$$U_{GS} = -2,5 \text{ V}; R_S = 1 \text{ k}\Omega; R_D = 1 \text{ k}\Omega.$$

б)

Еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналимa, када су капацитивности  $C_S$ ,  $C_i$  и  $C_o$  довољно велике да се може претпоставити да одговарајући кондензатори представљају кратак спој за наизменични сигнал у опсегу учестаности који је од интереса, приказано је на слици.



в)

Вредност појачања напона, одређена је изразом:

$$A_U = \frac{u_O}{u_I} = -g_m \cdot r_{ds} \parallel R_D \parallel R_L \approx -g_m \cdot R_D.$$

где је  $g_m$  динамичка проводност преноса:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}=0} = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}}.$$

За задате вредности параметара у колу је:

$$g_m = 2 \text{ mS}; A_U \cong -2.$$

#### ЗАДАТАК 4.А.

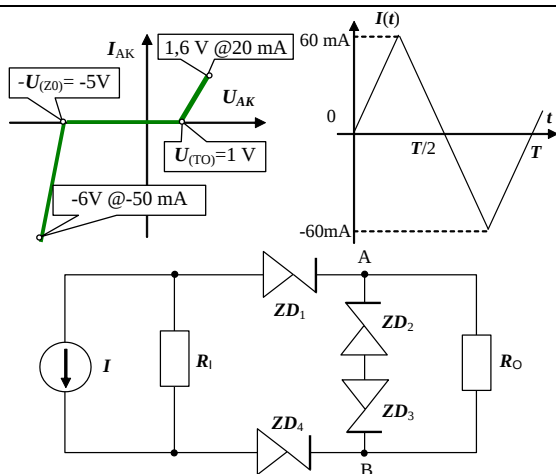
За коло приказано на слици:

а) одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(I)$  на излазу кола под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода ZD1 до ZD4 може представити приказаним дијаграмом;

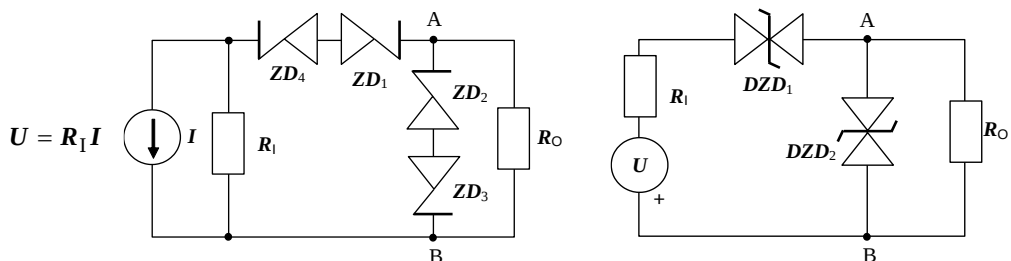
б) одредити вредност излазног напона  $U_{AB}$  ако је:  $I = 60 \text{ mA}$ ,  $R_I = 300 \Omega$  и  $R_O = 10 \text{ k}\Omega$ ;

в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(I)$ ;

г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$  ако струја  $I(t)$  има таласни облик приказан на слици, амплитуде  $60 \text{ mA}$ .



#### РЕШЕЊЕ



Коло има идентичан облик за оба смера улазног сигнала (струје  $I$  односно напона  $U$ ). Функција  $U_{AB}(U)$ , односно  $U_{AB}(I)$ , је непарна:

$$U_{AB}(-U) = -U_{AB}(U).$$

Довољно је анализирати одзив кола за само један смер улазног сигнала.

Могуће су три области рада.

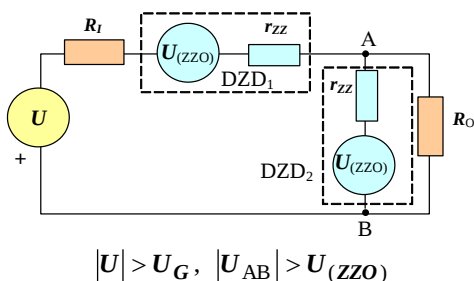
**А)** За вредности напона  $U$  по модулу мање од напона прага еквивалентне двојне Ценер-диоде:

$$U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)},$$

струја кроз грану кола у којој се налазе Ценер-диоде  $ZD_1$  и  $ZD_4$  (двојна Ценер-диола  $DZD_1$ ) једнака је нули, па је и напон  $U_{AB}$  на излазу кола једнак нули.

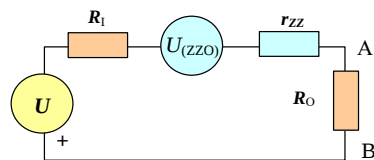
**Б)** При довољно великом интензитету струје  $I$  (напона  $U$ ) обе двојне Ценер-диоде,  $DZD_1$  и  $DZD_2$ , доспевају у стање пробоја, па је напон  $U_{AB}$  на излазу кола једнак напону двојне Ценер-диоде  $DZD_2$  у области пробоја, што значи да сразмерно мало зависи од промена вредности улазне струје  $I$  (напона  $U$ ):

$$r_{ZZ} = r_Z + r_T$$



$$|U| > U_G, |U_{AB}| > U_{(ZZO)}$$

**В)** Између ове две области је прелазна област: двојна диода  $DZD_1$  се налази у стању пробоја, док је струја кроз  $DZD_2$  једнака нули. У овој области се промене напона  $U$  (струје  $I$ ) пресликавају као сразмерне промене излазног напона, али са супротним знаком.



$$U_{(ZZO)} < U \leq U_G, |U_{AB}| \leq U_{(ZZO)}$$

Вредност  $U_G$  напона  $U$ , односно граничне вредности улазне струје,  $I_{G2}$ , при којој напон на отпорнику  $R_L$  достиже вредност напона пробоја двојне Ценер-диоде  $DZD_2$ , представља границу ових области.

а)

У околини координатног почетка, карактеристика  $U_{AB}(U)$  дефинисана је релацијама:

$$U_{AB} = 0 \text{ за } |U| \leq U_{(ZZO)}.$$

Вредност струје  $I_{G1}$  која представља границу ове области (када је  $|U| = U_{(ZZO)}$ ) једнака је:

$$I_{G1} = \frac{U_{(ZZO)}}{R_I}.$$

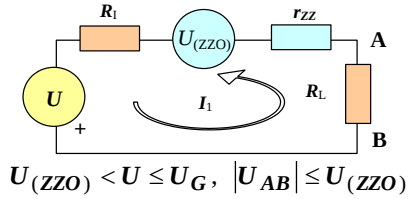
У околини координатног почетка, улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(I)$ , дефинисана је релацијама:

$$U_{AB} = 0 \text{ за } |I| \leq I_{G1} = \frac{U_{(ZZO)}}{R_I}.$$

Када је напон  $U$  по модулу већи, а напон  $U_{AB}$  на отпорнику  $R_L$  по модулу мањи од напона  $U_{(ZZO)}$ , важе релације:

$$U_{AB} = -R_O I_1 \text{ за } |U_{AB}| \leq U_{(ZZO)},$$

$$I_1 = \frac{U - U_{(ZZO)}}{R_I + r_{ZZ} + R_O} \text{ за } U_{(ZZO)} < U \leq U_G,$$



где је  $U_G$  вредност напона  $U$  која одговара граници ове области (када је  $|U_{AB}| = U_{(ZZO)}$ ).

$$I_1 = \frac{R_I I - U_{(ZZO)}}{R_I + r_{ZZ} + R_O} \text{ за } \frac{U_{(ZZO)}}{R_I} < I \leq \frac{U_G}{R_I}.$$

$$U_{AB} = -\left(U - U_{(ZZO)}\right) \frac{R_O}{R_I + r_{ZZ} + R_O} \text{ за } U_{(ZZO)} < U \leq U_G,$$

$$U_{AB} = -\left(R_I I - U_{(ZZO)}\right) \frac{R_O}{R_I + r_{ZZ} + R_O} \text{ за } I_{G1} < I \leq I_{G2}.$$

Нагиб карактеристике  $U_{AB}(U)$  у овом делу одређен је константом  $k_{1U}$ :

$$k_{1U} = \frac{dU_{AB}}{dU} = -\frac{R_O}{R_I + r_{ZZ} + R_O}.$$

Одговарајући нагиб  $U_{AB}(I)$  карактеристике је:

$$k_{1I} = \frac{dU_{AB}}{dI} = k_{1U} R_I.$$

$$k_{1I} = -\frac{R_O R_I}{R_I + r_{ZZ} + R_O}.$$

Вредност  $U_G$  напона  $U$ , при којој напон на отпорнику  $R_L$  достиже вредност  $U_{(ZZO)}$ , представља горњу границу ове области одређену условом:

$$|U_{AB}(U_G)| = \left(U_G - U_{(ZZO)}\right) \frac{R_O}{R_I + r_{ZZ} + R_O} = U_{(ZZO)},$$

на основу којег се добија:

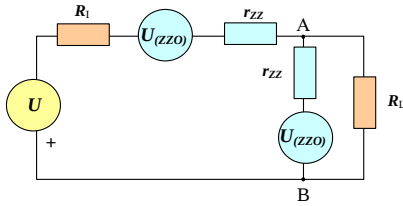
$$U_G = U_{(ZZO)} \frac{1 + k_{1U}}{k_{1U}} = U_{(ZZO)} \left(2 + \frac{R_I + r_{ZZ}}{R_O}\right).$$

Вредност струје  $I_{G2}$  која представља границу ове области (када је  $|U_{AB}| = U_{(ZZO)}$ ) једнака је:

$$I_{G2} = \frac{U_G}{R_I} = \frac{U_{(ZZO)}}{R_I} \frac{1 + k_{1U}}{k_{1U}},$$

$$I_{G2} = I_{G1} \left(2 + \frac{R_I + r_{ZZ}}{R_O}\right).$$

Када је напон  $U$  по модулу већи од граничног напона  $U_G$  обе двојне Ценер-диоде,  $DZD_1$  и  $DZD_2$ , проводе струју. Еквивалентно коло дато је на слици. Применом Тевененове теореме, ово коло се своди на једну петљу.



$$U > U_G, \quad U_{AB} > U_{(ZZO)}$$

$$U_{AB} = -U_e - r_e I_2; \quad U > U_G,$$

$$U_e = U_{(ZZO)} \frac{R_L}{R_L + r_{ZZ}} \approx U_{(ZZO)} \Big|_{R_L \gg r_{ZZ}}, \quad r_e = \frac{R_L r_{ZZ}}{R_L + r_{ZZ}} \approx r_{ZZ} \Big|_{R_L \gg r_{ZZ}}$$

Вредност струје у посматраном еквивалентном колу одређена је изразом:

$$I_2 = \frac{U - U_{(ZZO)} - U_e}{R_I + r_{ZZ} + r_e},$$

на основу којег се може одредити нагиб карактеристике  $U_{AB}(U)$  у овој области:

$$k_{2U} = \frac{dU_{AB}}{dU} = -r_e \frac{dI_2}{dU} = -\frac{r_e}{R_I + r_{ZZ} + r_e} \approx -\frac{r_{ZZ}}{R_I + 2r_{ZZ}} \Big|_{R_L \gg r_{ZZ}}.$$

Функција  $U_{AB}(U)$  је непрекидна, напон  $U_{AB}(U)$  за  $U > U_G$  се може приказати изразом:

$$U_{AB} = U_{(ZZO)} + k_{2U}(U - U_G) \quad \text{за } U \geq U_G.$$

У општем случају вредност напона  $U_{AB}(I)$  на излазу кола одређена је релацијама:

$$U_{AB} = \begin{cases} U_{(ZZO)} + k_{2U}(U - U_G) & \text{за } U > U_G \\ -(U - U_{(ZZO)})k_{1U} & \text{за } U_{(ZZO)} < U \leq U_G, \\ 0 & \text{за } |U| \leq U_{(ZZO)}, \\ -(U + U_{(ZZO)})k_{1U} & \text{за } -U_G \leq U \leq -U_{(ZZO)} \\ -U_{(ZZO)} + k_2(U + U_G) & \text{за } U < -U_G \end{cases},$$

у којима и представљају константе нагиба карактеристике  $U_{AB}(U)$  у појединим деловима, а  $U_G$  границу области.

$$U_{AB} = \begin{cases} U_{(ZZO)} + k_{2I}(I - I_{G2}) & \text{за } I > I_{G2} \\ -(I - I_{G1})k_{1I} & \text{за } I_{G1} < I \leq I_{G2}, \\ 0 & \text{за } |I| \leq I_{G1}, \\ -(I + I_{G1})k_{1I} & \text{за } -I_{G2} \leq I \leq -I_{G1} \\ -U_{(ZZO)} + k_{2I}(I + I_G) & \text{за } I < -I_{G2} \end{cases},$$

$$k_{1I} = -\frac{R_I R_O}{R_I + r_{ZZ} + R_O}, \quad k_{2I} \approx -\frac{R_I r_{ZZ}}{R_I + 2r_{ZZ}}, \quad I_{G1} = \frac{U_{(ZZO)}}{R_I}, \quad I_{G2} = I_{G1} \left(2 + \frac{R_I + r_{ZZ}}{R_O}\right).$$

б)

За задате вредности параметара у колу ( $I = 60 \text{ mA}$ ,  $R_I = 300 \text{ } \Omega$  и  $R_O = 10 \text{ k}\Omega$ ) добија се:

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} = 20 \Omega, r_I = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = 30 \Omega; U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)} = 6V.$$

$$I_{G1} = \frac{U_{(ZZO)}}{R_I} \approx 20 \text{ mA}$$

$$k_1 = \frac{R_O}{R_I + r_{ZZ} + R_O} = -0,966 \approx -1$$

$$k_{11} = k_{1U} R_I \cong R_I = 300 \Omega$$

$$U_G = U_{(ZZO)} \frac{1 + k_{1U}}{k_{1U}} = 12,21 \text{ V} \approx 12 \text{ V}$$

$$I_{G2} = I_{G1} \left( 2 + \frac{R_I + r_{ZZ}}{R_O} \right) \approx 40 \text{ mA}$$

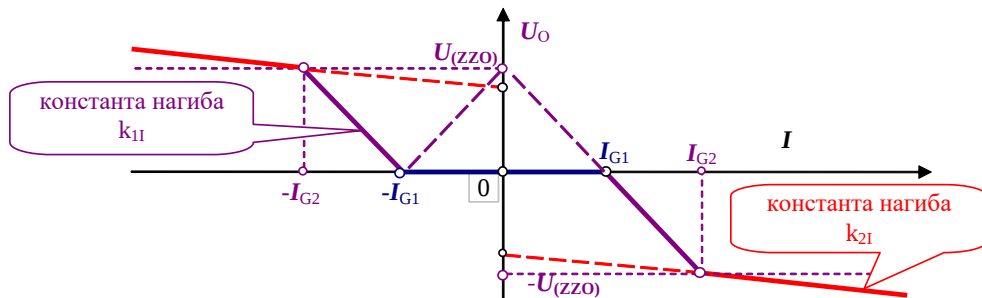
$$k_2 \approx -\frac{r_{ZZ}}{R_I + 2r_{ZZ}} = -\frac{1}{8}$$

$$k_{21} = k_{2U} R_I \approx -\frac{R_I}{8}$$

$$U_O(60 \text{ mA}) \cong 6,75 \text{ V}.$$

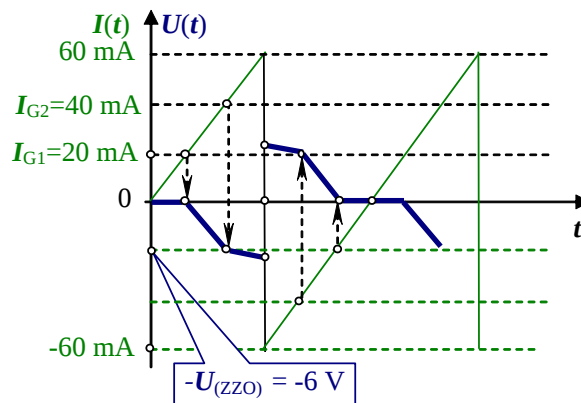
в)

Графички приказ улазно-излазне карактеристике кола дат је на слици.



г)

Временски дијаграм одзива кола дат је на слици.

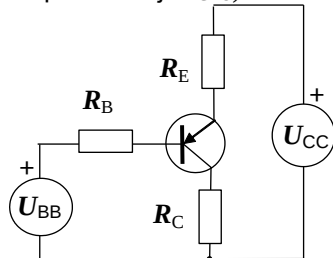


## ЗАДАТАК 1.Б.

За коло приказано на слици, познате су вредности карактеристичних параметара транзистора (појачање струје од базе до колектора,  $\beta$ , напон између емитора и базе,  $U_{EB}$ , и инверзна струја засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ ).

Под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у нормалној (активној) области и да су познате вредности напона напајања,  $U_{CC}$  и  $U_{BB}$ , као и отпорности  $R_B$ ,  $R_C$  и  $R_E$ ,

- одредити општи израз за вредност струје колектора  $I_C$ ;
- одредити бројну вредност напона  $U_{CE}$  ако је  $U_{CC} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{BB} = 5 \text{ V}$ ,  $I_{CBO} = 1 \text{ nA}$  ( $t = 25^\circ\text{C}$ ),  $\beta = 100$ ,  $R_C = 1,5 \text{ k}\Omega$ ;  $R_B = 65 \text{ k}\Omega$ ;  $R_E = 1,5 \text{ k}\Omega$ ;
- одредити вредност показатеља нестабилности мирне радне тачке посматраног кола у односу на промене напона емитор-база  $U_{EB}$ .



## РЕШЕЊЕ

- У складу са датим претпоставкама и референтним смеровима струја усвојеним у складу са физичким смеровима струја PNP транзистора, за посматрано коло важе следеће једначине:

$$U_{CC} - R_E I_E - U_{EB} - R_B I_B - U_{BB} = 0$$

$$I_E = (1 + \beta)(I_B + I_{CBO}),$$

на основу којих следи:

$$U_{CC} - U_{BB} - U_{EB} = [R_B + R_E(1 + \beta)]I_B + R_E(1 + \beta)I_{CBO},$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BB} - U_{EB}}{R_B + (1 + \beta)R_E} - \frac{(1 + \beta)R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E} I_{CBO}$$

За транзистор чија се радна тачка налази у активној области важи:

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta)(I_{CBO}),$$

одакле следи:

$$I_C = \beta \frac{U_{CC} - U_{BB} - U_{EB}}{R_B + (1 + \beta)R_E} + (1 + \beta) \frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E} I_{CBO}$$

- 

На основу задате вредности струје  $I_{CBO} = 1 \text{ nA}$  (@  $25^\circ\text{C}$ ) може се закључити да је у питању силицијумски транзистор, за који се усваја  $U_{EB} \approx 0,6 \text{ V}$ .

$$I_B = \frac{5 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{65 \text{ k}\Omega + 101 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega} - \frac{101 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega}{65 \text{ k}\Omega + 101 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega} \cdot 1 \text{ nA} \approx \frac{4,4 \text{ V}}{216,5 \text{ k}\Omega} = \frac{4400 \text{ mV}}{216,5 \text{ k}\Omega} \approx 20,3 \mu\text{A},$$

$$I_C = 100 \cdot 20,3 \mu\text{A} + 101 \cdot 1\text{nA} \approx 2,03 \text{ mA} ,$$

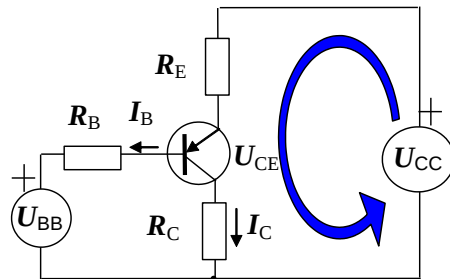
$$I_E = 2,03 \text{ mA} + 20,3 \mu\text{A} \approx 2,05 \text{ mA} .$$

На основу другог Кирхофовог закона примењеног на петљу емитор-колектор:

$$U_{CC} = R_C I_C + U_{CE} + R_E I_E$$

следи:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C - R_E I_E$$



За задате вредности параметара у колу је:

$$U_{CE} = 10 \text{ V} - 1,5 \text{ k}\Omega \cdot 2,03 \text{ mA} - 1,5 \text{ k}\Omega \cdot 2,05 \text{ mA} = 3,88 \text{ V}$$

в)

Диференцирањем добијеног израза за вредност струје  $I_C$ , узимајући да напон емитор-база  $U_{EB}$  представља независно променљиву, док су све остале величине константне, добија се општи израз за вредност показатеља нестабилности мирне радне тачке посматраног кола у односу на промене напона емитор-база  $U_{EB}$ :

$$K_{U_{EB}} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{EB}} = \frac{\beta}{R_B + (1 + \beta)R_E} ,$$

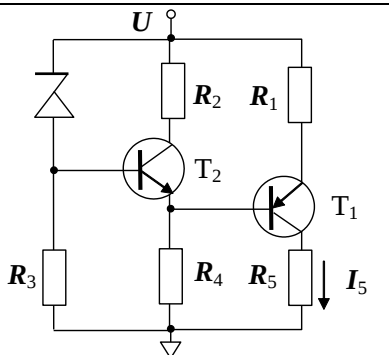
на основу којег следи:

$$K_{I_{CBO}} = \frac{100}{65 \text{ k}\Omega + 101 \cdot 1,5 \text{ k}\Omega} \approx 0,46 \text{ mS} .$$

## ЗАДАТАК 2.Б.

За коло приказано на слици, под претпоставком да је инверзна струја засићења колекторског споја транзистора занемарљиво мала, а да је појачање струје од базе до колектора довољно велико да се струја базе може занемарити у односу на остале струје у колу:

- одредити општи израз за вредност струје  $I_5$  ако се радне тачке транзистора  $T_1$  и  $T_2$  налазе у активној области;
- израчунати вредност струје  $I_5$  када је  $U = 12 \text{ V}$ , ако су транзистори  $T_1$  и  $T_2$  силицијумски, радни напон Ценер-диоде у области пробоја,  $U_Z$ , једнак  $5 \text{ V}$ , а све отпорности у колу једнаке  $1 \text{ k}\Omega$ ;
- одредити потребан услов у погледу односа вредности напона  $U$  и вредности параметара елемената у посматраном колу, да струја  $I_5$  не зависи од вредности отпорности  $R_5$ ,



## РЕШЕЊЕ

а)

У складу са датим претпоставкама и ознакама назначеним на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

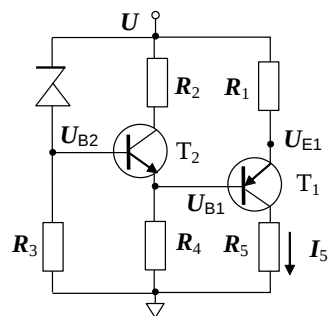
$$I_5 = I_{C1} \cong I_{E1}$$

$$U_{B2} = U - U_Z,$$

$$U_{B1} = U_{E2} = U_{B2} - U_{BE2},$$

$$U_{E1} = U_{B1} + U_{EB1},$$

$$I_{E1} = \frac{U - U_{E1}}{R_1}.$$



$$I_5 = \frac{U_Z + U_{BE2} - U_{EB1}}{R_1} \cong \frac{U_Z}{R_1}.$$

б)

$$I_5 = 5 \text{ mA}$$

в)

Са повећењем отпорности,  $R_5$ , потенцијал колектора транзистора  $T_1$  се повећава. Његова вредност, међутим, не може бити већа од потенцијала емитора транзистора  $T_2$ . На основу услова:  $U_{BC1} \geq 0$ , добија се:

$$U_{BC1} = U_{B1} - U_{C1} = U - U_Z - U_{EB2} - R_5 I_5 \geq 0,$$

$$R_5 \leq \frac{U - U_Z - U_{EB2}}{U_Z + U_{BE2} - U_{EB1}} R_1.$$

**ЗАДАТАК 3.Б.**

За коло приказано на слици, познате су вредности напона напајања  $U$ , отпорности  $R_G$  и  $R_L$ , као и параметара транзистора  $I_{GSS}$ ,  $U_{GS(OFF)}$ ,  $I_{DSS}$  и  $r_{DS}$ .

а) Одредити вредности отпорности  $R_D$  и  $R_S$  при којима је мирни радна напон  $U_{GS}$  једнак  $-2,5\text{ V}$  а напон  $U_{DS}$  једнак  $7\text{ V}$ ;

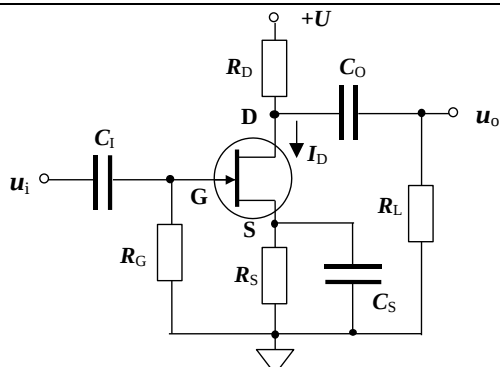
Ако је капацитивност  $C_S$  довољно велика да се може сматрати да кондензатор  $C_S$  представља кратак спој за наизменични сигнал:

б) нацртати еквивалентно коло појачавача за побуду малим наизменичним сигналом;

Ако су капацитивности  $C_i$  и  $C_o$  довољно велике да се може сматрати да кондензатори  $C_i$  и  $C_o$  представљају кратак спој за наизменични сигнал:

в) одредити општи израз за појачање напона за мале сигнале;

г) за задате и израчунате бројне вредности параметара кола, одредити бројну вредност појачања напона за мале сигнале.



$$I_{GSS} = -1\text{ nA}, I_{DSS} = 8\text{ mA},$$

$$U_{GS(OFF)} = -4\text{ V}, r_{DS} = 50\text{ k}\Omega$$

$$R_G = 1\text{ M}\Omega; R_L = 200\text{ k}\Omega; U = 12\text{ V}$$

**РЕШЕЊЕ**

а)

Једносмерни радни режим кола описан је једначинама:

$$U_{GS} = -R_S I_D,$$

(за N-канални фет, напон  $U_{GS}$  је негативан),

$$U - (R_D + R_S) I_D - U_{DS} = 0,$$

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2$$

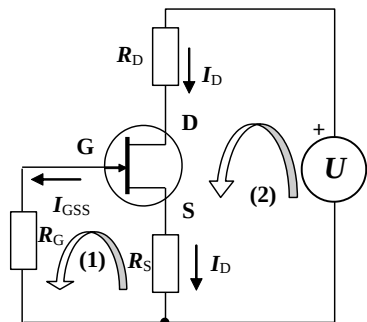
С обзиром на задате вредности струје и отпорности, напон  $U_G$  се може занемарити у односу на вредност напона  $U_S$ :

$$U_G = R_G I_{GSS} = 1\text{ mV} \approx 0.$$

$$R_S = -\frac{U_{GS}}{I_D}$$

$$R_D = \frac{U - U_{DS}}{I_D} - R_S.$$

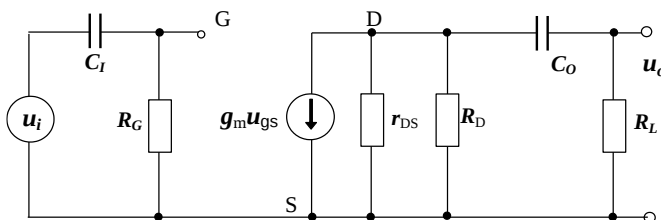
$$I_D = 8\text{ mA} \left( 1 - \frac{2,5}{4} \right)^2 = 1,125\text{ mA}$$



$$R_S = 2,22\text{ k}\Omega; R_D = 2,22\text{ k}\Omega$$

б)

Еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналимa, приказано је на слици.



в)

Вредност појачања напона, када су капацитивности  $C_S$ ,  $C_I$  и  $C_O$  довољно велике да се може претпоставити да одговарајући кондензатори представљају кратак спој за наизменични сигнал у опсегу учестаности који је од интереса, одређена је изразом:

$$A_U = \frac{u_O}{u_I} = -g_m \cdot r_{ds} \parallel R_D \parallel R_L \approx -g_m \cdot R_D,$$

где је  $g_m$  динамичка проводност преноса:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}=0} = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}}.$$

г)

За задате вредности параметара у колу је:

$$g_m = 1,5 \text{ mS}; A_U \approx -3,33.$$

#### ЗАДАТАК 4.Б.

У приказаном колу употребљене су идентичне Ценер-диоде чија се  $U$ - $I$  карактеристика може представити линеаризованим дијаграмом приказаним на слици.

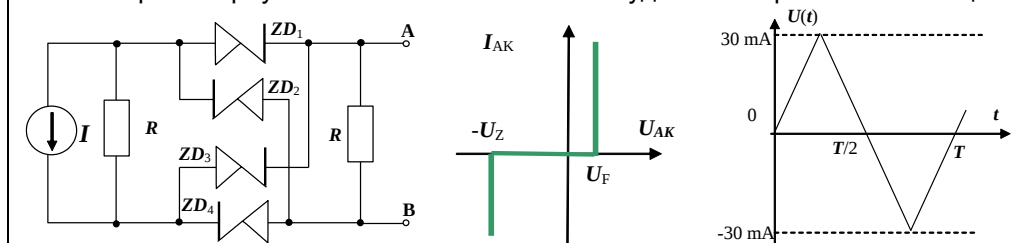
а) Одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(I)$ .

Ако је  $U_Z = 5 \text{ V}$ ,  $U_F = 1 \text{ V}$ :

б) одредити вредност напона  $U_{AB}$  за случај  $I = 30 \text{ mA}$ ,  $R = 500 \Omega$ ,

в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(I)$ ,

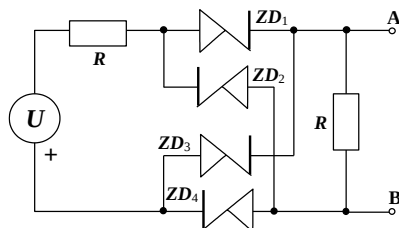
г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако струја  $I(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде  $30 \text{ mA}$  приказан на слици.



# РЕШЕЊЕ

а)

Применом Тевененове теореме, посматрано коло се трансформише у коло приказано на слици



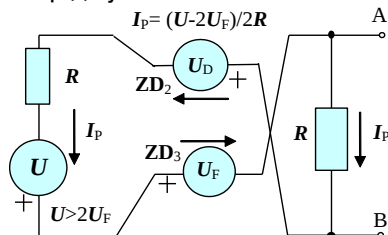
Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар Ценер-диода, (ZD<sub>1</sub>, ZD<sub>4</sub>) или (ZD<sub>2</sub>, ZD<sub>3</sub>), проводи струју при директној поларизацији, што значи да напон  $U$  по модулу (интензитету) треба да буде већи од напона  $2U_F$ :

$$U_{AB} = 0 \quad \text{за} \quad |U| \leq 2U_F.$$

$$U_{AB} = 0 \quad \text{за} \quad |I| \leq I_{G1} = \frac{2U_F}{R}.$$

Када је у односу на референтни смер назначен на слици, напон  $U$  позитиван и већи од пада напона на директно поларисаним диодама ZD<sub>3</sub> и ZD<sub>2</sub>,  $2U_F$ , струја  $I_P$  коју даје извор напона  $U$  има такав смер да је напон  $U_{AB}$  позитиван.

Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је збир напона на отпорнику  $R$  и напона на Ценер-диоци ZD<sub>3</sub>, која проводи струју у директном смеру, мањи од напона прага  $U_Z$  инверзног пробоја Ценер-диоде ZD<sub>4</sub>, приказано је на слици. Напон  $U_{AB}$  је једнак:



$$U_{AB} = RI_P = \frac{U - 2U_F}{2} > 0 \quad \text{за} \quad U > 2U_F; \quad U_{AB} + U_F < U_Z.$$

$$U_{AB} = \frac{R}{2} I - U_F > 0 \quad \text{за} \quad I > I_{G1} = \frac{2U_F}{R}; \quad U_{AB} + U_F < U_Z$$

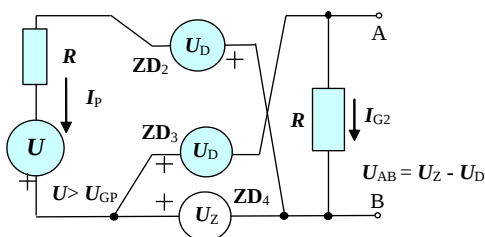
Напон  $U_{AB}$  достиже највећу вредност када Ценер-диода ZD<sub>4</sub>, доспе у област инверзног пробоја.

$$U_{AB} = U_Z - U_F \quad \text{за} \quad U > U_{GP}$$

Гранична вредност напона,  $U_{GP}$ , при којој напон између крајева диоде ZD<sub>4</sub> достиже вредност напона прага инверзног пробоја Ценер-диоде,  $U_Z$ , одређена је условом:

$$U_{AB}(U_{GP}) + U_{D3} = U_{Z4},$$

односно:



$$U_{AB}(U_{GP}) = \frac{U_{GP} - 2U_F}{2} = U_Z - U_F ,$$

одакле следи:

$$U_{GP} = 2U_Z .$$

$$I_{G2} = \frac{2U_Z}{R} ,$$

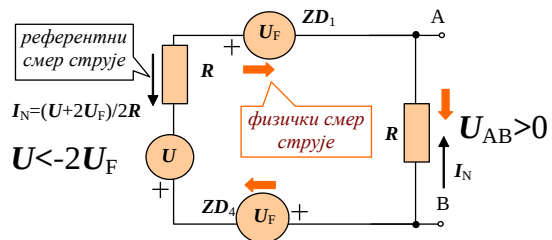
$$U_{AB} = \frac{R}{2} I - U_F \quad \text{за} \quad I_{G1} < I < I_{G2} ,$$

$$U_{AB} = U_Z - U_F \quad \text{за} \quad I > I_{G2} = \frac{2U_Z}{R} .$$

Еквивалентно разматрање важи и у случају када је у односу на референтни смер напон  $U$  негативан.

Када је напон  $U$  негативан, а по интензитету већи од напона  $2U_F$  потребног да диоде  $ZD_1$  и  $ZD_4$  проводе струју у директном смеру, струја  $I_N$  (чији је референтни смер исти као и смер струје  $I_F$ ), коју даје извор напона  $U$  при овим условима, има такав смер да је напон  $U_{AB}$  позитиван.

Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је збир напона на отпорнику  $R$  и напона на Ценер-диоде  $ZD_4$  мањи од напона прага  $U_Z$  инверзног пробоја Ценер-диоде  $ZD_3$ , приказано је на слици. Напон  $U_{AB}$  је једнак:

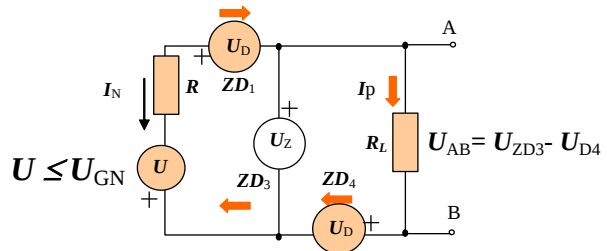


$$U_{AB} = -RI_N = -\frac{U + 2U_F}{2} > 0 \quad \text{за} \quad U < -2U_F ; \quad U_{AB} + U_F < U_Z .$$

Напон  $U_{AB}$  достиже највећу вредност када Ценер-диоде  $ZD_3$ , доспе у област инверзног пробоја.

Гранична вредност улазног напона,  $U_{GN}$ , при којој напон између крајева диоде  $ZD_3$  достиже вредност напона прага инверзног пробоја Ценер-диоде,  $U_Z$ , одређена је условом:

$$U_{AB}(U_{GN}) + U_{D4} = U_{Z3} ,$$



односно:

$$U_{AB}(U_{GN}) = -\frac{U_{GN} + 2U_F}{2} = U_Z - U_F , \text{ одакле следи:}$$

$$U_{GN} = -2U_Z = -U_{GP} .$$

### Напомена

До истих закључака се долази и ако се уместо диода  $ZD_4$  и  $ZD_3$  посматрају диоде  $ZD_1$  и  $ZD_2$ .

На основу претходних разматрања може се написати општи израз за вредност напона  $U_{AB}$  у зависности од напона  $U$ :

$$U_{AB} = \begin{cases} U_Z - U_F & \text{за } U \geq U_G \\ \frac{U - 2U_F}{2} & \text{за } 2U_F \leq U < U_G, \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F, \\ -\frac{U + 2U_F}{2} & \text{за } -U_G < U \leq -2U_F \\ U_Z - U_F & \text{за } U \leq -U_G \end{cases}, \quad U_G = 2U_Z,$$

односно, општи израз за вредност напона  $U_{AB}$  у зависности од вредности улазне струје  $I$ :

$$U_{AB} = \begin{cases} U_Z - U_F & \text{за } I > I_{G2} \\ \frac{R}{2} I + U_F & \text{за } I_{G1} < I \leq I_{G2} \\ 0 & \text{за } |I| \leq I_{G1} \\ -\frac{R}{2} I - U_F & \text{за } -I_{G2} \leq I < -I_{G1} \\ U_Z - U_F & \text{за } I < -I_{G2} \end{cases},$$

у којем  $I_{G1}$  и  $I_{G2}$  представљају граничне вредности појединих области карактеристике  $U_{AB}(I)$ . Струја  $I_{G1}$  представља границу области неосетљивости (када је излазни напон једнак нули независно од вредности улазне струје):

$$I_{G1} = \frac{2U_F}{R},$$

док  $I_{G2}$  представља границу области пропорционалности, у којој су промене излазног напона сразмерне променама улазне струје:

$$I_{G2} = \frac{2U_Z}{R}.$$

б)

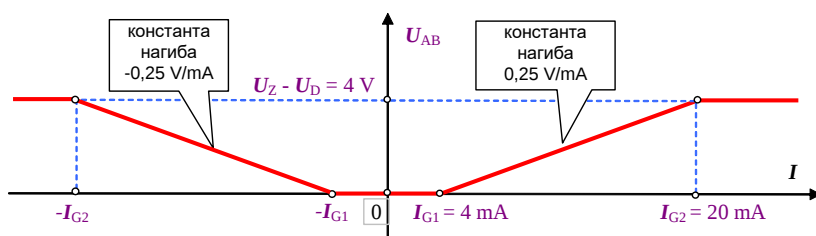
За задате вредности  $U_Z = 5 \text{ V}$ ,  $U_F = 1 \text{ V}$ ,  $R = 500 \Omega$ ,

$$I_{G1} = 4 \text{ A}, \quad I_{G2} = 20 \text{ mA}.$$

$$U_{AB}(30 \text{ mA}) = U_Z - U_F = 4 \text{ V}.$$

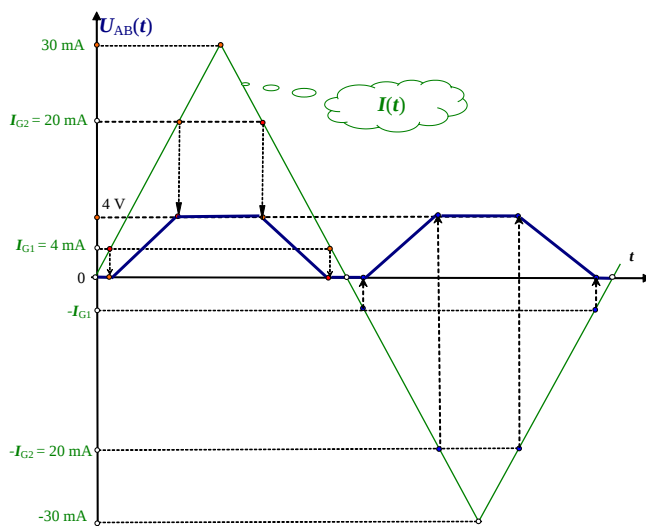
в)

Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(I)$ , приказана је на слици.



г)

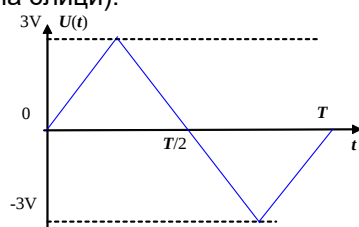
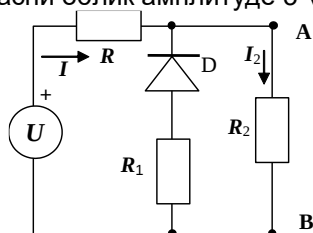
Дијаграми таласних облика у колу када струја  $I(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 30 mA приказани су на слици.



## СЕПТЕМБАР 2004

### ЗАДАТАК 1.А.

- За коло приказано на слици, под претпоставком да је диода D савршена:
- одредити опште изразе за вредности струја  $I(U)$  и  $I_2(U)$ ;
  - нацртати карактеристику преноса,  $U_{AB}(U)$ , ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке;
  - нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке, а напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 3 V (приказан на слици).

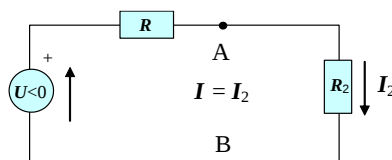


### РЕШЕЊЕ

Могућа су два стања у колу.

$$U \geq 0$$

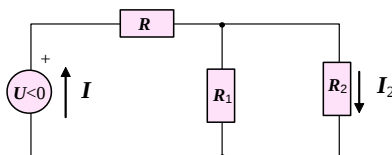
$$I = \frac{U}{R + R_2} = I_2, \quad U_{AB} = IR_2.$$



$$U < 0$$

$$I = \frac{U}{R + R_{12}}, \quad R_{12} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$U_{AB} = IR_{12}, \quad I_2 = \frac{U_{AB}}{R_2} = I \frac{R_{12}}{R_2}.$$



а)

$$I = \begin{cases} \frac{U}{R + R_2}; U \geq 0 \\ \frac{U}{R + R_{12}}; U < 0 \end{cases}, \quad I_2 = \begin{cases} \frac{U}{R + R_2}; U \geq 0 \\ \frac{U}{R + R_{12}} \frac{R_{12}}{R_2}; U < 0 \end{cases}.$$

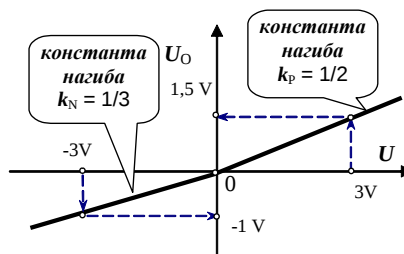
б)

Ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке добија се:

$$R = R_1 = R_2, \quad R_{12} = \frac{R}{2},$$

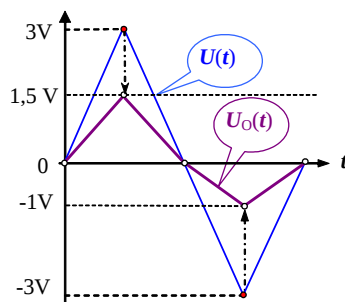
$$U_{AB} = I_2 R_2 = \begin{cases} U \frac{R_2}{R + R_2} = \frac{U}{2}; U \geq 0 \\ U \frac{R_{12}}{R + R_{12}} = \frac{U}{3}; U < 0 \end{cases},$$

$$U_O = kU, \quad k = \begin{cases} k_P = \frac{R_2}{R + R_2} = \frac{1}{2}; U \geq 0 \\ k_N = \frac{R_{12}}{R + R_{12}} = \frac{1}{3}; U < 0 \end{cases}.$$



в)

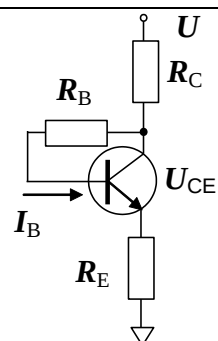
Дијаграм талсног облика напона  $U_{AB}(t)$ , када су отпорности свих отпорника у колу једнаке, а напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 3 V, приказан је на слици.

**ЗАДАТАК 2.А.**

За коло приказано на слици,

а) под претпоставком да су познате вредности напона напајања,  $U$ , отпорности  $R_B$ ,  $R_C$  и  $R_E$ , као и карактеристичних параметара транзистора (појачање струје од базе до колектора,  $\beta$ , напон између базе и емитора транзистора при раду у активној области,  $U_{BE}$ , и инверзна струја засићења колекторског споја  $I_{CBO}$ ), као и да се радна тачка транзистора налази у активној области, одредити општи израз за вредност струје  $I_B$ .

б) израчунати бројне вредности напона  $U_{CE}$  и струје  $I_E$  при задатим вредностима параметара кола:  $U = 10 \text{ V}$ ,  $\beta = 99$ ,  $I_{CBO} = 1 \mu\text{A}$ ;  $R_B = 100 \text{ k}\Omega$ ;  $R_C = R_E = 2 \text{ k}\Omega$ ;

**РЕШЕЊЕ**

а)

За посматрано коло важе једначине:

$$I = I_B + I_C = I_E, \quad (1)$$

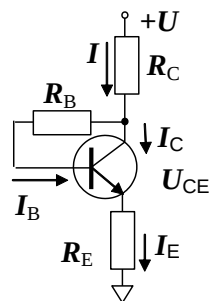
$$U = (R_C + R_E)I_E + U_{CE}, \quad (2)$$

$$U_{CE} = R_E I_E + U_{BE}. \quad (3)$$

$$I_E = (\beta + 1)(I_B + I_{CBO}). \quad (4)$$

На основу којих следи:

$$U_{CE} = U - (R_C + R_E)I_E = R_E I_E + U_{BE}.$$



$$U - (R_C + R_E)(1 + \beta)(I_B + I_{CBO}) = R_B I_B + U_{BE},$$

$$I_B = \frac{U - U_{BE} - (\beta + 1)(R_C + R_E)I_{CBO}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)}.$$

б)

За задате вредности добија се:

$$I_B = \frac{10 - 0,2 - 100 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^3 + 100 \cdot 4 \cdot 10^3} \frac{V}{\Omega} = 18,8 \mu A,$$

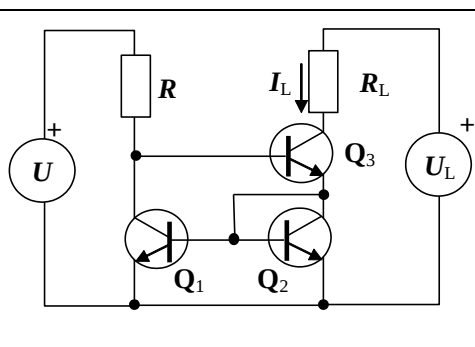
$$U_{CE} = (100 \cdot 10^3 \Omega) (18,8 \cdot 10^{-6} A) + 0,2 V = 2,08 V,$$

$$I_E = 100 \cdot (18,8 + 1) \mu A = 1,98 mA.$$

$$I_C = I_E - I_B = (1,98 - 0,0188) mA = 1,9612 mA.$$

### ЗАДАТАК 3.А.

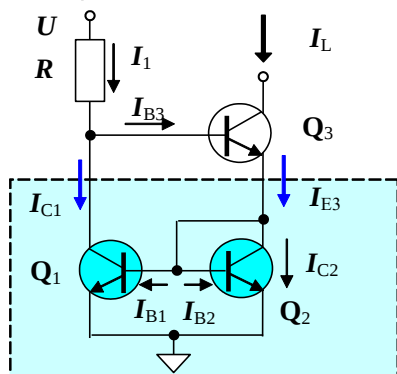
За коло приказано на слици, под претпоставком да транзистори имају једнаке и познате вредности појачања струје од базе до емитора,  $\beta$ , и напона директне поларизације споја база-емитор,  $U_{BE}$ , као и да су познате вредности отпорности и напона у колу, одредити општи израз за вредност струје  $I_L$ , ако се радне тачке транзистора налазе у активној области.



### РЕШЕЊЕ

Транзистори  $Q_1$  и  $Q_2$  образују “струјно огледало” за које важи:

$$I_{C1} = \frac{\beta}{\beta + 2} I_{E3}.$$



Вилсонов (Wilson) извор струје.

$$I_1 = \frac{U - 2U_{BE}}{R}.$$

Ако се радна тачка транзистора  $Q_2$  налази у активној области:

$$I_L = I_{C3} = \frac{\beta}{\beta + 1} I_{E3}.$$

На основу једначина:

$$I_{C1} = I_1 - I_{B3}, \text{ и } I_{B3} \cong \frac{I_{C3}}{\beta},$$

може се одредити општи израз за вредност струје  $I_L$ :

$$I_L = I_{C3} \cong \frac{\beta(\beta + 2)}{\beta^2 + 2\beta + 2} I_1.$$

**ЗАДАТАК 4.А.**

У приказаном колу су употребљена два пара идентичних диода чије се  $U$ - $I$  карактеристика могу представити линеаризованим дијаграмима приказаним на слици.

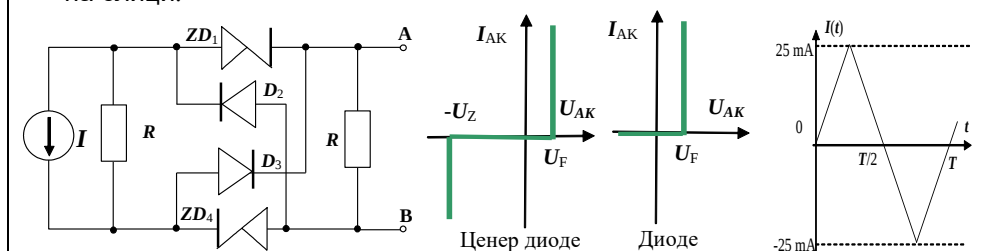
а) Одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(I)$ .

Ако је  $U_Z = 5\text{ V}$ ,  $U_F = 1\text{ V}$ :

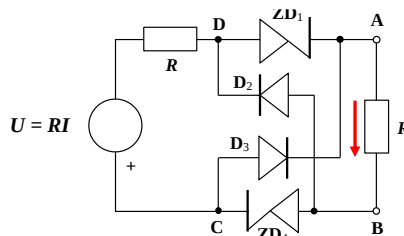
б) одредити вредност напона  $U_{AB}$  ако је  $I = 25\text{ mA}$ ,  $R = 600\ \Omega$ ,

в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(I)$ ,

г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако је  $R = 600\ \Omega$ , а струја  $I(t)$  има симетрични троугаони таласни облик амплитуде  $25\text{ mA}$  приказан на слици.

**РЕШЕЊЕ**

Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода, ( $ZD_1, ZD_4$ ) или ( $D_2, D_3$ ), буде у проводном стању, што значи да напон  $U=RI$  по модулу (интензитету) треба да буде већи од напона  $2U_F$ .



Струја кроз отпорник  $R$  у грани која повезује чворове А и В има такав смер да је чвор А увек на вишем потенцијалу од чвора В. Напон  $U_{AB}$  је позитиван.

Када је напон  $U=RI$  негативан, напон  $U_{CB}$  по интензитету не може бити већи од напона на Центер-диоде  $ZD_4$  која проводи струју у инверзном смеру ( $U_Z$ ).

а)

У околини координатног почетка  $U$ - $I$  карактеристике важи:

$$U_{AB} = 0 \text{ за } |U| \leq 2U_F.$$

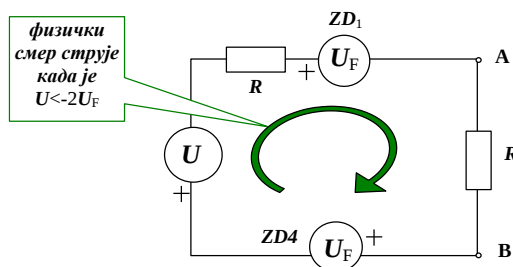
Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је

$$U < -2U_F,$$

приказано је на слици.

Напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = -R \frac{U + 2U_F}{2R} = -\frac{U}{2} - U_F.$$



Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је улазни напон позитиван и већи од пада напона на директно поларисаним диодама  $D_2$  и  $D_3$ :

$$U > 2U_F,$$

приказано је на слици.

Напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = R \frac{U - 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} - U_F$$

Гранична вредност напона  $U = RI$ ,  $U_{GP}$ , при којој је напон  $U_{AB}$  једнак напону Ценер-диоде  $ZD_4$  која проводи струју у инверзном смеру,  $U_Z$ , одређена је једначином:

$$U_{CD}(U_{GP}) = U_Z.$$

На основу једначине

$$U_{CD} = U_{AB} + U_F,$$

следи:

$$\frac{U_{GP}}{2} - U_F + U_F = U_Z,$$

односно:

$$U_{GP} = 2U_Z.$$

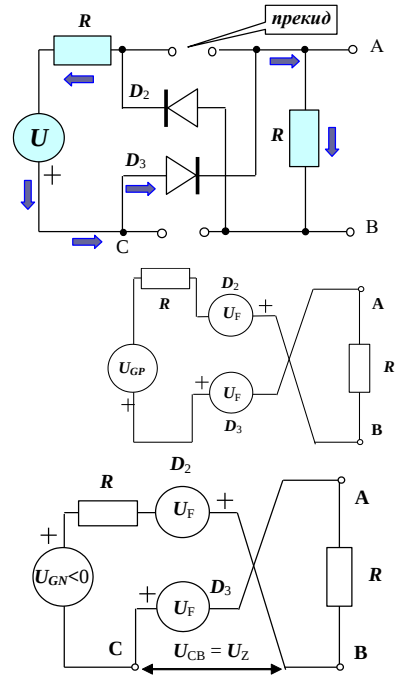
Када је напон  $U$  мањи од напона  $U_{GP}$ , напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = U_Z - U_F.$$

Према томе, за напон  $U_{AB}$  важи:

$$U_{AB}(U) = \begin{cases} U_Z - U_F & \text{за } U > 2U_Z \\ \frac{U}{2} - U_F & \text{за } 2U_F < U \leq 2U_Z \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ -\frac{U}{2} - U_F & \text{за } U < -2U_Z \end{cases},$$

$$U_{AB}(I) = \begin{cases} U_Z - U_F & \text{за } I > \frac{2U_Z}{R} \\ \frac{R}{2}I - U_F & \text{за } \frac{2U_F}{R} < I \leq \frac{2U_Z}{R} \\ 0 & \text{за } |I| \leq \frac{2U_F}{R} \\ -\frac{R}{2}I - U_F & \text{за } I < -\frac{2U_Z}{R} \end{cases}.$$

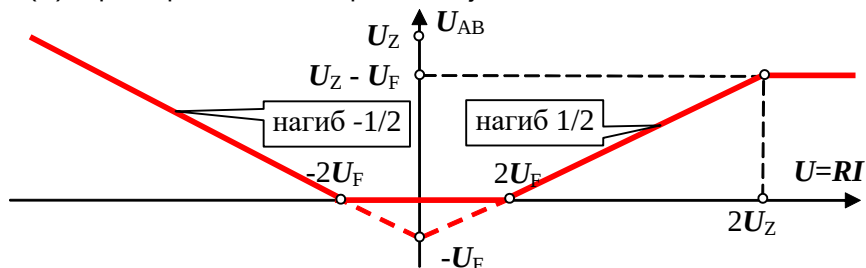
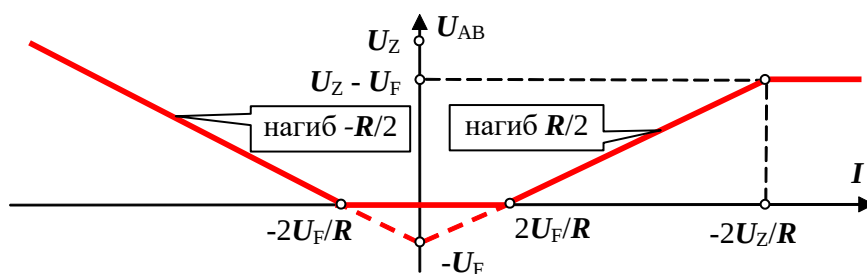


б)

За задату вредност струје  $I = 25 \text{ mA}$  је  $U = 15 \text{ V} > 2U_Z$ .

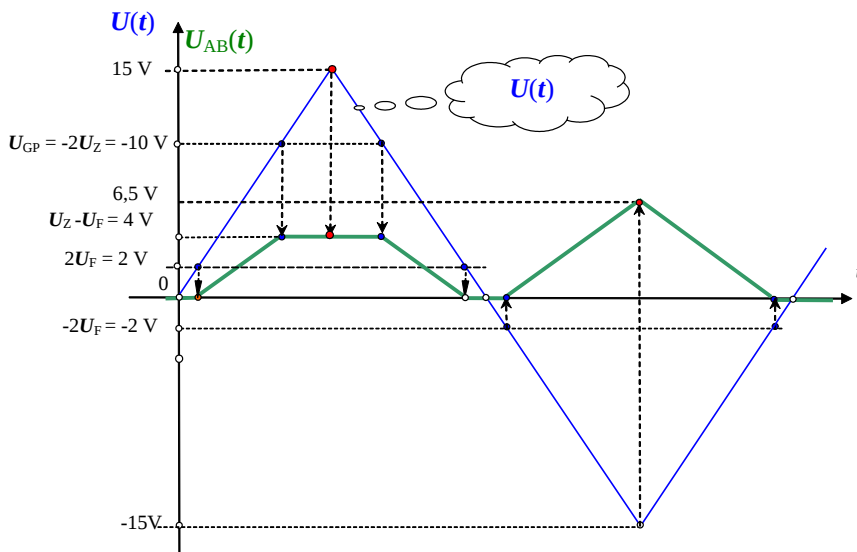
$$U_{AB}(25 \text{ mA}) = 4 \text{ V}.$$

в)

 $U_{AB}(U)$  карактеристика кола приказана је на слици.Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(I)$ , је приказана на слици.

г)

Дијаграми таласних облика у колу су приказани на слици.



**ЗАДАТАК 1.Б.**

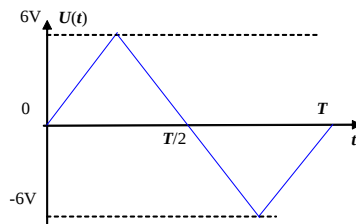
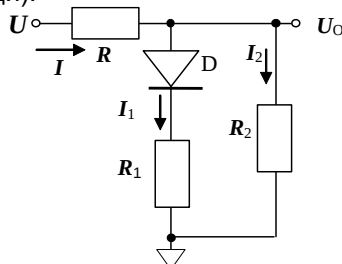
За коло приказано на слици, под претпоставком да је диода D савршена:

а) одредити опште изразе за вредности струја  $I(U)$ ,  $I_1(U)$  и  $I_2(U)$ .

Ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке:

б) нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ ;

в) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$ , ако напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 6 V (приказан на слици).


**РЕШЕЊЕ**

$$U \geq 0$$

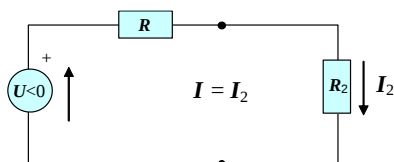
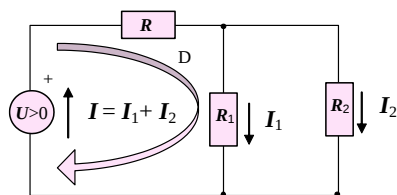
$$I = \frac{U}{R + R_{12}}, I_1 = \frac{U_O}{R_1} = I \frac{R_{12}}{R_1},$$

$$I_2 = \frac{U_O}{R_2} = I \frac{R_{12}}{R_2}, R_{12} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$U_O = I R_{12}.$$

$$U < 0$$

$$I = \frac{U}{R + R_2} = I_2, I_1 = 0, U_O = I R_2.$$



а)

За струје  $I$ ,  $I_1$  и  $I_2$ , чији су референтни смерови назначени на слици, важе следеће релације:

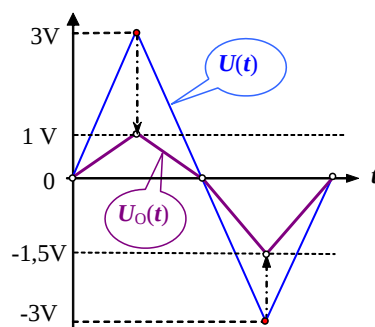
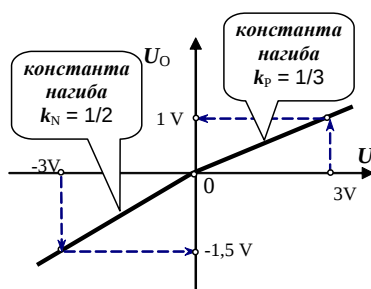
$$I = \begin{cases} \frac{U}{R + R_{12}}; U \geq 0 \\ \frac{U}{R + R_2}; U < 0 \end{cases}, I_1 = \begin{cases} \frac{U}{R + R_{12}} \frac{R_{12}}{R_1}; U \geq 0 \\ 0; U < 0 \end{cases}; I_2 = \begin{cases} \frac{U}{R + R_{12}} \frac{R_{12}}{R_2}; U \geq 0 \\ \frac{U}{R + R_2}; U < 0 \end{cases}$$

б)

$$R = R_1 = R_2, R_{12} = \frac{R}{2}$$

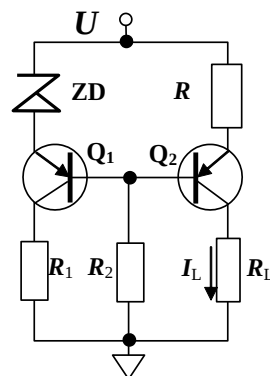
$$U_O = I_2 R_2 = \begin{cases} U \frac{R_{12}}{R + R_{12}} = \frac{U}{3}; U \geq 0 \\ U \frac{R_2}{R + R_2} = \frac{U}{2}; U < 0 \end{cases},$$

$$U_O = kU, \quad k = \begin{cases} k_P = \frac{R_{12}}{R + R_{12}} = \frac{1}{3}; U \geq 0 \\ k_N = \frac{R_2}{R + R_2} = \frac{1}{2}; U < 0 \end{cases}.$$

**ЗАДАТАК 2.Б.**

За коло приказано на слици, под предпоставком да је појачање струје од базе до колектора транзистора довољно велико да се струја базе може занемарити у односу на остале струје у колу:

- одредити општи израз којим је одређена вредност струје  $I_L$  ако се радне тачке транзистора налазе у активној области;
- израчунати вредност струје  $I_L$  ако је  $U = 10 \text{ V}$ ;  $Q_1$  и  $Q_2$  су транзистори једнаких карактеристика, радни напон Ценер-диоде у области пробоја је једнак  $5 \text{ V}$ , а све отпорности у колу једнаке  $1 \text{ k}\Omega$ ;
- објаснити функцију транзистора  $Q_1$ ;



- одредити потребне услове у погледу односа вредности  $U$ ,  $U_Z$ ,  $U_{EB}$ ,  $R$  и  $R_L$ , да струја  $I_L$  не зависи од вредности напона  $U$  и отпорности  $R_L$ .

**РЕШЕЊЕ**

а)

У складу са датим претпоставкама и ознакама назначеним на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

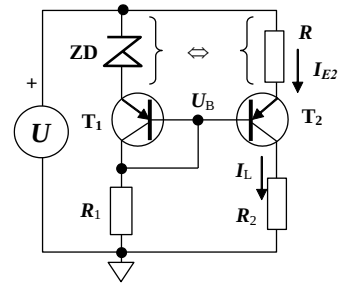
$$I_L = I_{E2} - I_{B2} \cong I_{E2}$$

$$I_{E2} = \frac{U - U_{EB2} - U_B}{R}$$

$$U_B = U - U_Z - U_{EB1},$$

на основу којих следи:

$$I_L = \frac{U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}}{R} \cong \frac{U_Z}{R}.$$



б)

За задате вредности параметара добија се:

$$I_L \cong \frac{U_Z}{R} = 5 \text{ mA}.$$

в)

Напон  $U_{EB1}$  компензује утицај напона  $U_{EB2}$  излазног транзистора  $T_2$  на вредност струје  $I_L$ . Ако су напони  $U_{EB1}$  и  $U_{EB2}$  једнаки, струја  $I_L$  зависи само од односа напона Ценер-диоде у стању пробоја,  $U_Z$ , и отпорности отпорника  $R$ .

г)

Са повећењем отпорности оптерећења,  $R_2$ , потенцијал колектора транзистора  $T_2$  се повећава. Његова вредност, међутим, не може бити већа од потенцијала базе транзистора  $T_2$ . На основу услова;

$$U_{BC2} \geq 0,$$

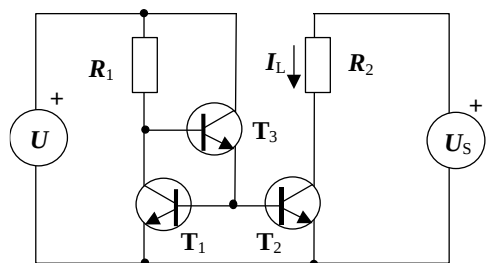
добија се:

$$U_{BC2} = U_B - U_{C2} = U - U_Z - U_{EB1} - R_2 I_L \geq 0,$$

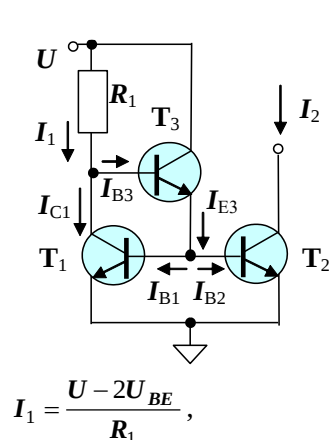
$$R_2 \leq \frac{U - U_Z - U_{EB1}}{U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}} R.$$

### ЗАДАТАК 3.Б.

За коло приказано на слици, под претпоставком да транзистори имају једнаке и познате вредности појачања струје од базе до емитора,  $\beta$ , и напона директне поларизације споја база-емитор,  $U_{BE}$ , као и да су познате вредности отпорности и напона у колу, одредити општи израз за вредност струје  $I_L$ , ако се радне тачке транзистора налазе у активној области.



### РЕШЕЊЕ



$$\begin{aligned} I_{B1} &= I_{B2} = I_B, \\ I_{C1} &\cong \beta_1 I_{B1} = \beta I_B, \quad I_{C2} \cong \beta_2 I_{B2} = \beta I_B, \\ I_{B1} + I_{B2} &= I_{E3} = (1 + \beta) I_{B3}. \\ I_{B3} &= \frac{2I_B}{1 + \beta} \cong \frac{2I_{C1}}{(1 + \beta)\beta}, \\ I_1 = I_{B3} + I_{C1} &\cong \frac{2I_{C1}}{\beta(\beta + 1)} + I_{C1} = \frac{\beta^2 + \beta + 2}{\beta(\beta + 1)} I_{C1}, \\ I_2 = I_{C2} = I_{C1} &\cong \frac{\beta(\beta + 1)}{\beta^2 + \beta + 2} I_1, \end{aligned}$$

$$I_{C2} \approx \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta(\beta+1)}} \frac{U - 2U_{BE}}{R_1}.$$

### ЗАДАТАК 4.Б.

У приказаном колу су употребљена два пара идентичних диода чије се  $U-I$  карактеристика могу представити линеаризованим дијаграмима приказаним на слици.

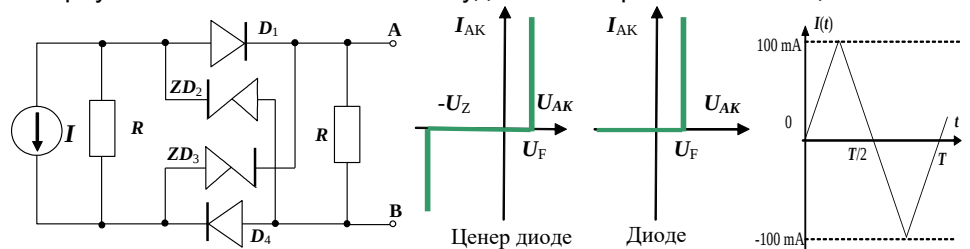
а) Одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(I)$ .

Ako je  $U_Z = 5 \text{ V}$ ,  $U_F = 1 \text{ V}$ :

б) одредити вредност napona  $U_{AB}$  ako je  $I = 100 \text{ mA}$ ,  $R = 150 \Omega$ ,

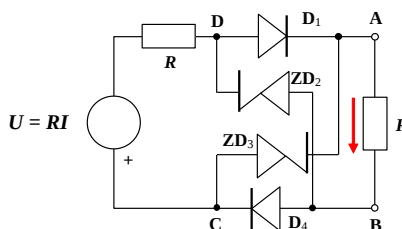
в) нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(I)$ ,

г) нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако струја  $I(t)$  има троугаони таласни облик амплитуде  $100\text{ mA}$  приказан на слици.



## РЕШЕНИЕ

Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода, ( $D_1, D_4$ ) или ( $ZD_2, ZD_3$ ), буде у проводном стању, што значи да напон  $U=RI$  по модулу (интензитету) треба да буде већи од напона  $2U_F$ .



Струја кроз отпорник  $R$  у грани која повезује чворове  $A$  и  $B$  има такав смер да је чвор  $A$  увек на вишем потенцијалу од чвора  $B$ . Напон  $U_{AB}$  је позитиван.

Када је напон  $U=RI$  негативан, напон  $U_{AC}$  по интензитету не може бити већи од напона на Ценер-диоди  $ZD_3$  која проводи струју у инверзном смеру.

а)

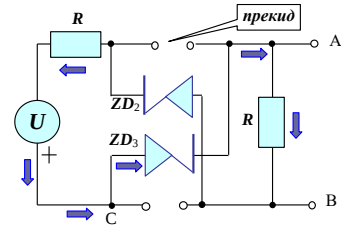
У околини координатног почетка  $U-I$  карактеристике важи:

$$U_{AB} = 0 \text{ за } |U| \leq 2U_F.$$

Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је улазни напон позитиван и већи од пада напона на директно поларисаним диодама  $ZD_2$  и  $ZD_3$ :

$$U > 2U_F,$$

приказано је на слици.



Напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = R \frac{U - 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} - U_F = \frac{RI}{2} - U_F.$$

Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је

$$U < -2U_F,$$

приказано је на слици.

Напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = -R \frac{U + 2U_F}{2R} = -\frac{U}{2} - U_F = -\frac{RI}{2} - U_F.$$

Гранична вредност напона  $U=RI$ ,  $U_{GN}$ , при којој је напон  $U_{AB}$  једнак напону Ценер-диоди  $ZD_3$  која проводи струју у инверзном смеру,  $U_Z$ , одређена је једначином:

$$U_{AC}(U_{GN}) = U_Z.$$

С обзиром на једначину:

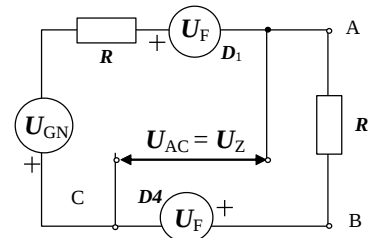
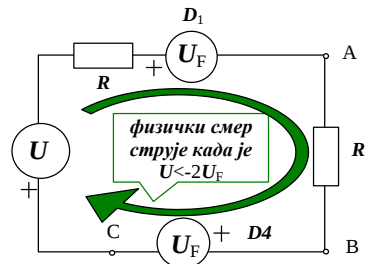
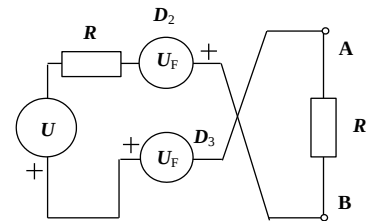
$$U_{AC} = U_{AB} + U_F \text{ добија се } -\frac{U_{GN}}{2} - U_F + U_F = U_Z, \text{ односно:}$$

$$U_{GN} = -2U_Z$$

Када је напон  $U$  мањи од напона  $U_{GN}$ , напон  $U_{AB}$  је једнак:

$$U_{AB} = U_Z - U_F.$$

Према томе, за напон  $U_{AB}$  важи:



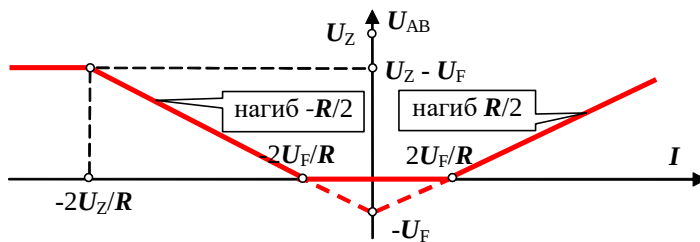
$$U_{AB}(I) = \begin{cases} \frac{R}{2}I - U_F & \text{за } \frac{2U_F}{R} < I \\ 0 & \text{за } |I| \leq \frac{2U_F}{R} \\ -\frac{R}{2}I - U_F & \text{за } -\frac{2U_Z}{R} < I < -\frac{2U_F}{R} \\ U_Z - U_F & \text{за } I < -\frac{2U_Z}{R} \end{cases}$$

б)

За задате вредности  $I = 100 \text{ mA}$ ,  $R = 150 \Omega$  је  $U = 15 \text{ V}$ ,

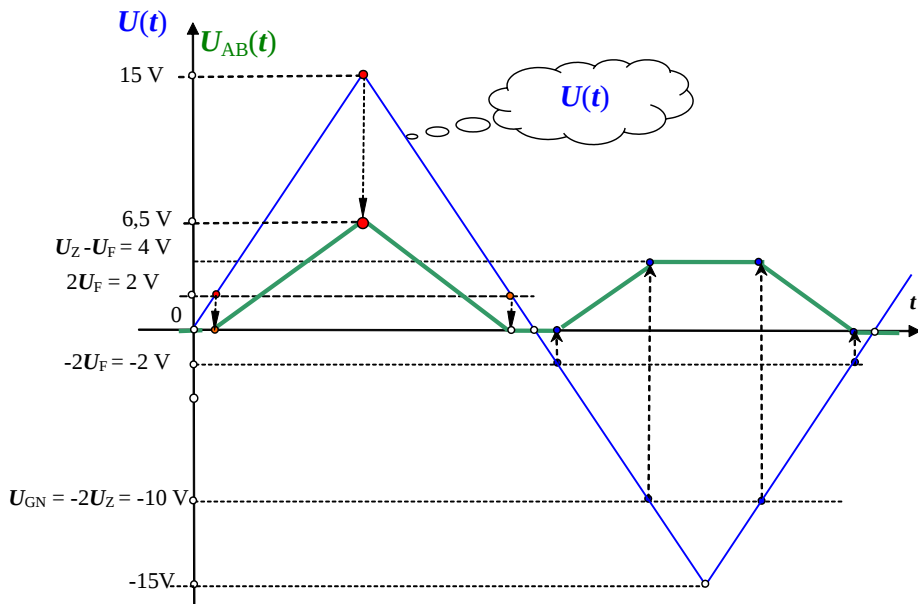
$$U_{AB}(100 \text{ mA}) = 6,5 \text{ V}.$$

в)

Улазно-излазна карактеристика кола,  $U_{AB}(I)$ , је приказана на слици.

г)

Дијаграми таласних облика у колу су приказани на слици.

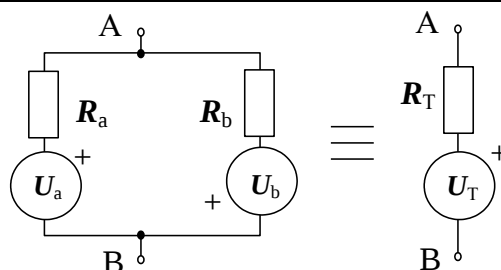


## 2.

# ЗАДАЦИ СА КОЛОКВИЈУМА

### 2.1. ОСНОВНА КОЛА

1. За коло приказано на слици, написати опште изразе за вредности напона  $U_T$  и унутрашње отпорности  $R_T$  еквивалентног Тевененовог генератора.

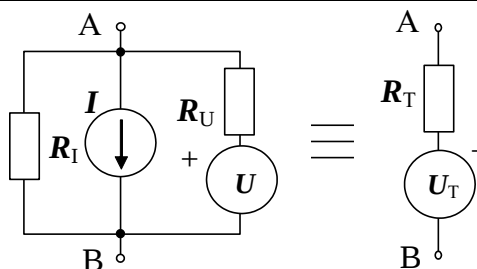


РЕШЕЊЕ

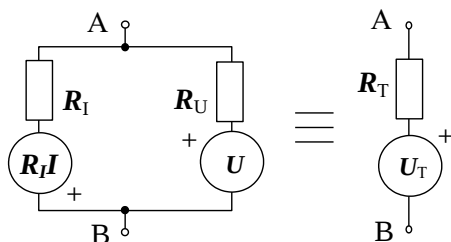
$$U_T = \frac{R_b}{R_a + R_b} U_a - \frac{R_a}{R_a + R_b} U_b$$

$$R_T = R_a \parallel R_b = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}$$

2. За коло приказано на слици, написати опште изразе за вредности напона  $U_T$  и унутрашње отпорности  $R_T$  еквивалентног Тевененовог генератора.



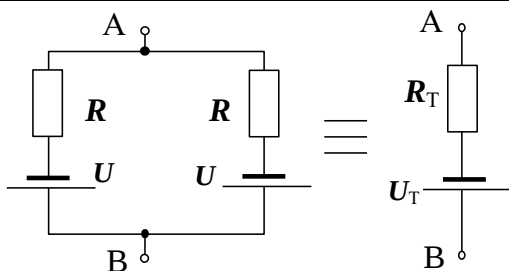
РЕШЕЊЕ



$$U_T = \frac{R_I}{R_I + R_U} U - \frac{R_U R_I}{R_I + R_U} I$$

$$R_T = R_I \parallel R_U = \frac{R_I R_U}{R_I + R_U}$$

3. За коло приказано на слици, написати опште изразе за вредности напона  $U_T$  и унутрашње отпорности  $R_T$  еквивалентног Тевененовог генератора.

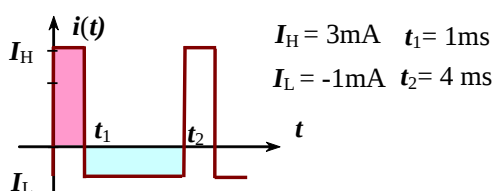


## РЕШЕЊЕ

$$U_T = U, \quad R_T = \frac{R}{2}.$$

Паралелним везивањем извора напона једнаких карактеристика добија се еквивалентни извор двоструко мање унутрашње отпорности.

4. Одредити средњу вредност периодичне струје чији је таласни облик приказан на слици.



## РЕШЕЊЕ

Према дефиницији, средња вредност струје једнака је количнику оренете количине наелектрисања и протеклог времена.:

$$\overline{i(t)} = \frac{Q}{T}, \quad Q = Q_1 + Q_2.$$

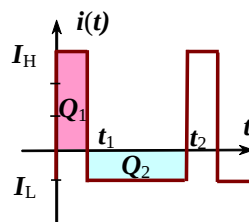
За задате вредности:

$$T = t_2 = 4\text{ms},$$

$$Q_1 = I_H t_1 = 3\mu\text{C},$$

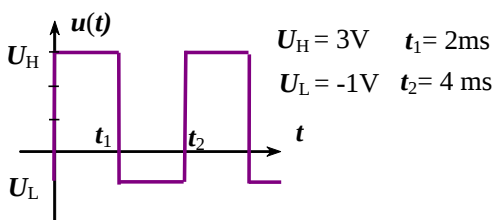
$$Q_2 = I_L (t_2 - t_1) = -3\mu\text{C},$$

слиди:



$$\overline{i(t)} = \frac{Q}{T} = 0.$$

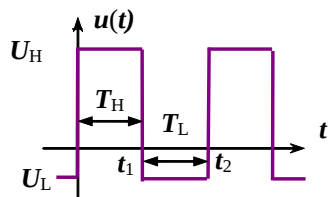
5. Одредити средњу вредност периодичног напона чији је таласни облик приказан на слици.



## РЕШЕЊЕ

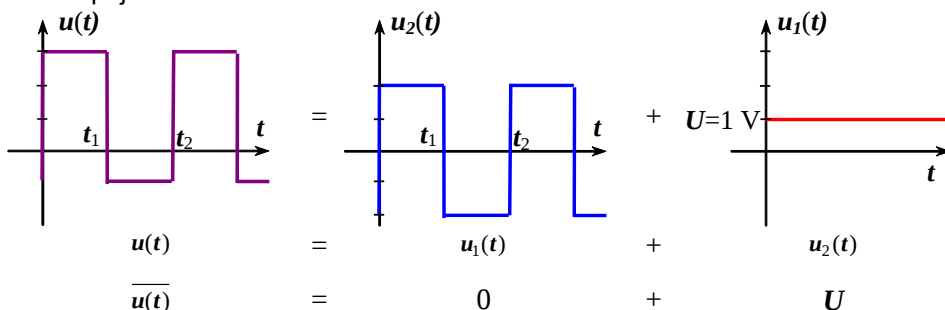
$$\overline{u(t)} = \frac{U_H T_H + U_L T_L}{T_H + T_L},$$

$$T_H = t_1, T_L = t_2 - t_1, T = T_H + T_L.$$

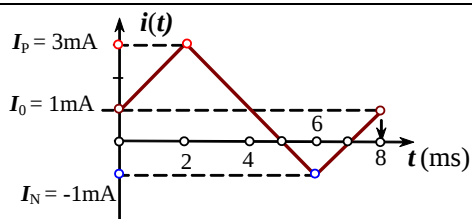


$$\overline{u(t)} = \frac{3V \cdot 2ms - 1V \cdot 2ms}{4ms} = 1V.$$

## Геометријска анализа



6. Одредити средњу вредност периодичне струје чији је таласни облик приказан на слици.

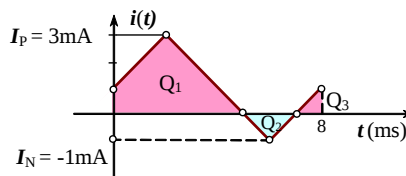


## РЕШЕЊЕ

$$\overline{i(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt,$$

$$T = 8ms,$$

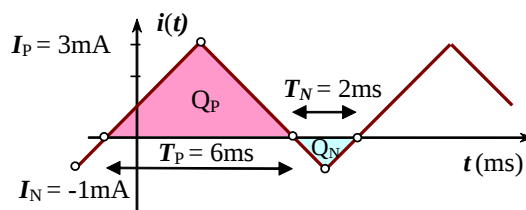
$$\overline{i(t)} = \frac{Q_1 - Q_2 + Q_3}{T}.$$



Средња вредност, одређена за временски интервал једнак периоди посматране величине, не зависи од избора почетног тренутка. Уместо да се израчунавање врши у задатом интервалу од 0 ms до 8 ms, може да се посматра временски интервал од -1 ms до 7 ms.

$$\overline{i(t)} = \frac{Q_P - Q_N}{T}$$

$$Q_P = \frac{I_P T_P}{2}, \quad Q_N = \frac{I_N T_N}{2}$$



$$\overline{i(t)} = \frac{9\mu\text{C} - 1\mu\text{C}}{8\text{ms}} = 1\text{mA}$$

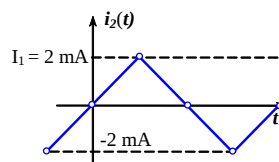
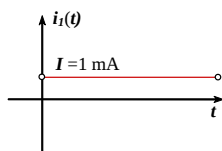
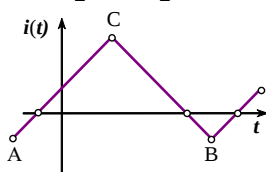
Геометријска анализа

Средња вредност  $I$  сигнала троугаоног таласног облика се налази на средини између највеће и најмање вредности (медијана троугла ABC):

$$I = \frac{I_P + I_N}{2}$$

Амплитуда променљиве (наизменичне) компоненте једнака је половини распона (размака између највеће и најмање вредности):

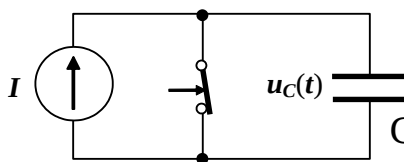
$$I_1 = \frac{I_P - I_N}{2} = \frac{\Delta I}{2}$$



$$\begin{aligned} i(t) &= i_1(t) + i_2(t) \\ \overline{i(t)} &= I + 0 \end{aligned}$$

$$\overline{i(t)} = 1\text{mA}$$

7. У колу приказаном на слици је  $I = 2\text{ mA}$ . Одредити трајање временског интервала потребног да, након отварања прекидача, напон на кондензатору  $C = 3,3\ \mu\text{F}$  достигне вредност  $3\text{ V}$ .



### РЕШЕЊЕ

Ако се струја кроз кондензатор посматра као побудни сигнал, а напон на његовим крајевима као одзив, савршени кондензатор представља интегратор чија је константа преноса једнака  $1/C$ .

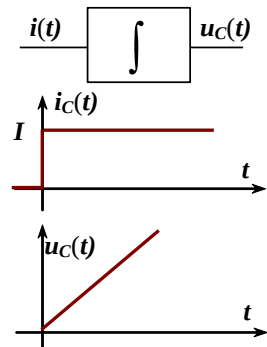
При побуди одскочном функцијом:

$$i_c(t) = h(t)I,$$

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{за } t \geq 0 \\ 0 & \text{за } t < 0 \end{cases},$$

одзив савршеног интегратора представља нагибну функцију:

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt + U_{C0} = \frac{1}{C} It \Big|_0^t + U_{C0} = \frac{1}{C} It + U_{C0}.$$

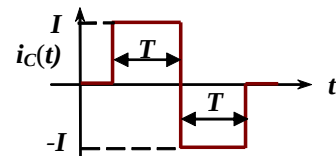


Дакле, напон на крајевима кондензатора кроз који протиче стална струја мења се линеарно са временом. Брзина промене напона  $u_c$  (константа нагиба функције  $u_c(t)$ ) је једнака  $I/C$ .

У посматраном колу почетна вредност напона,  $U_{C0}$ , је једнака нули (кондензатор је испразњен кроз прекидач који представља кратак спој када је затворен. Временски интервал  $T$  потребан да напон  $u_c(t)$ , након отварања прекидача у тренутку  $t = 0$  достигне вредност  $U$  је једнак:

$$T = \frac{CU}{I} = \frac{3,3 \mu\text{F} \cdot 3\text{V}}{2\text{mA}} = 4,95 \text{ ms}.$$

8. На слици је приказан таласни облик струје кроз кондензатор чија је капацитивност  $C$ . Ако је почетна вредност напона на крајевима кондензатора једнака  $U_{C0}$ , нацртати таласни облик и одредити највећу вредност напона  $u_c(t)$ .



### РЕШЕЊЕ

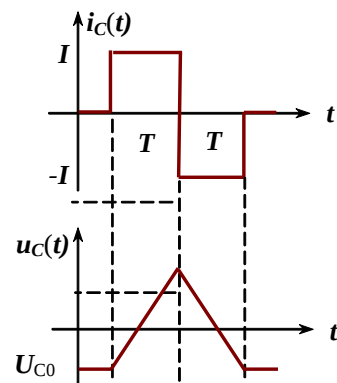
Напон на крајевима кондензатора кроз који протиче стална струја представља линеарну функцију времена. Нагиб (брзина промене) функције  $u_c(t)$  је сразмеран вредности струје  $I$ .

На основу израза којим је дефинисана капацитивност савршеног кондензатора:

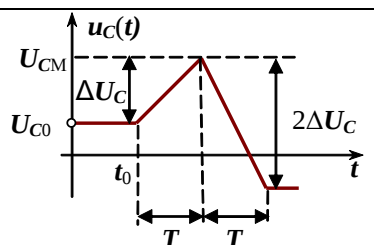
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U},$$

може да се одреди вредност промене напона  $\Delta U$ , коју стална струја  $I$  произведе током временског интервала  $T$ :

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{IT}{C}, \quad \max u_c(t) = U_{C0} + \Delta U$$



9. На слици је приказан таласни облик напона на крајевима кондензатора. Нацртати таласни облик струје кроз кондензатор и написати општи израз којим је одређена њена вредност.



## РЕШЕЊЕ

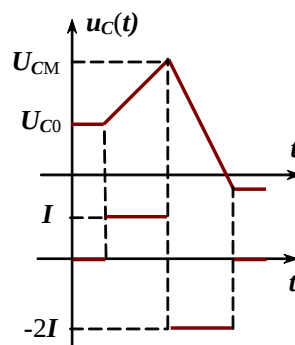
$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

Нагиб функције  $u_c(t)$  сразмеран је интензитету струје  $i_c(t)$ .

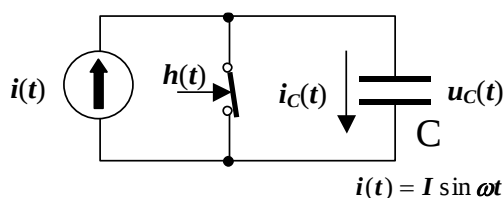
$$\Delta U_C = U_{CM} - U_{C0}$$

$$I = C \frac{\Delta U_C}{\Delta T},$$

$$i(t) = \begin{cases} I & \text{за } t_0 \leq t < t_0 + T \\ 0 & \text{за } t < t_0 \text{ и } t > t_0 + 2T \\ -2I & \text{за } t_0 + T \leq t \leq t_0 + 2T \end{cases}$$



10. За коло приказано на слици, одредити општи израз за напон на крајевима кондензатора ако струја  $i(t)$  представља синусну функцију времена.



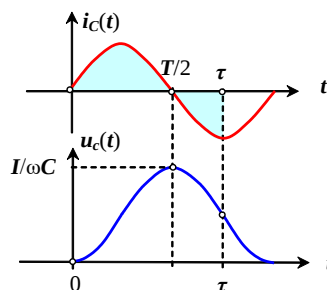
## РЕШЕЊЕ

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt + U_{C0}, \quad U_{C0} = u_C(0) = 0.$$

$$i_c(t) = h(t)i(t) = h(t)I \sin \omega t$$

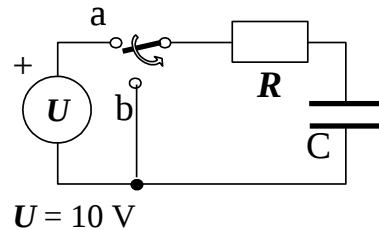
$$u_C(t) = \frac{1}{\omega C} (-\cos \omega t) \Big|_0^t = \frac{I}{\omega C} (1 - \cos \omega t)$$

Наизменична компонента напона,  $u_C(t)$ , на крајевима кондензатора кроз који протиче наизменична струја  $i(t)$  заостаје за  $T/4$  односно, фазно је померена за  $\pi/2$ .



$$u_C(t) = \frac{I}{\omega C} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

11. За коло приказано на слици, одредити трајање временског интервала  $t_p$  потребног да, након пребацивања прекидача из положаја "a" у положај "b", напон на крајевима кондензатора  $C = 2.2 \text{ nF}$ , који се празни kroz отпорник  $R = 39 \text{ k}\Omega$ , достигне вредност  $100 \text{ mV}$ .



### РЕШЕЊЕ

Вредност напона  $u_c(t)$  одређена диференцијалном једначином:

$$u_c + RC \frac{du_c}{dt} = 0, u_c(0) = U$$

чије је решење функција:

$$u = Ue^{-\frac{t}{RC}}.$$

На основу које се могу одредити гранична вредност:

$$u_c(\infty) = 0$$

и брзина промене напона  $u_c$  у почетном тренутку:

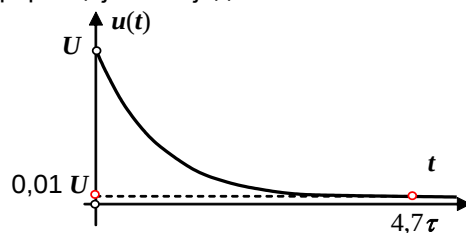
$$\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = u'(0) = -\frac{U}{\tau}.$$

На основу задатог услова:

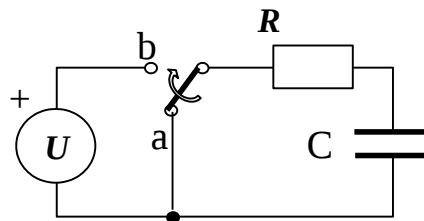
$$u(t_p) = Ue^{-\frac{t_p}{RC}} = 0,01 U,$$

следи:

$$t_p = RC \ln 100 \cong 395 \mu s.$$



12. За коло приказано на слици, одредити трајање временског интервала довољног да, након пребацивања прекидача из положаја "a" у положај "b", напон на крајевима кондензатора  $C = 4.7 \text{ nF}$ , који се преко отпорника  $R = 22 \text{ k}\Omega$  пуни из извора једносмерног напона  $U = 10 \text{ V}$ , достигне вредност  $9,9 \text{ V}$ .



### РЕШЕЊЕ

Ако је прекидач био довољно дуго у положају "a" да се може сматрати да је у почетном тренутку, након пребацивања у положај "b", напон на крајевима

кондензатора једнак нули, вредност напона  $u_c(t)$  одређена диференцијалном једначином:

$$u_c + \tau \frac{du_c}{dt} = U, u_c(0) = 0, \tau = RC$$

чије је решење функција:

$$u = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

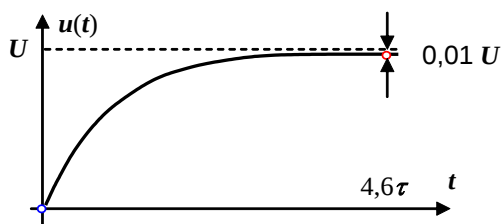
На основу једначине која важи у тренутку  $t$  када је напон  $u_c(t)$  достигао вредност  $U_p = 0,99 U$ :

$$U_p = u(t_p) = U(1 - e^{-\frac{t_p}{\tau}})$$

следи

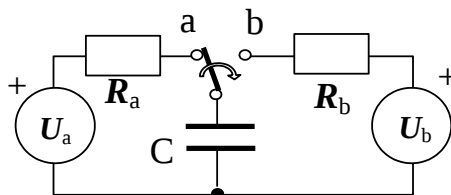
$$t_p = \tau \ln \frac{U}{U - U_p} = \tau \ln 100 \approx 4,6\tau \approx 476 \text{ ms}$$

Временски интервал потребан да се оствари 99% укупне промене напона на крајевима кондензатора, при његовом пуњењу из извора сталног напона кроз отпорник сталне вредности, приближно је 4,6 пута дужи од интервала који одговара временској константи кола  $\tau = RC$ .



13. За коло приказано на слици, написати израз којим је одређена вредност напона на крајевима кондензатора  $C$ , након пребацивања прекидача из положаја "а" у положај "b", под претпоставком да је прекидач био у положају "а" довољно дуго да се у тренутку непосредно пре пребацивања прекидача пад напона на отпорнику  $R_a$  може занемарити.

$$U_b > U_a$$



РЕШЕЊЕ

Вредност напона  $u_c(t)$  одређена диференцијалном једначином:

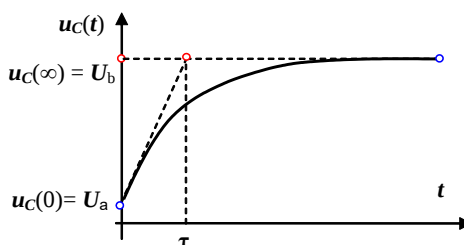
$$u_c + \tau \frac{du_c}{dt} = U_b, u_c(0) = U_a$$

чије је решење функција:

$$u_c(t) = U_a + (U_b - U_a)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

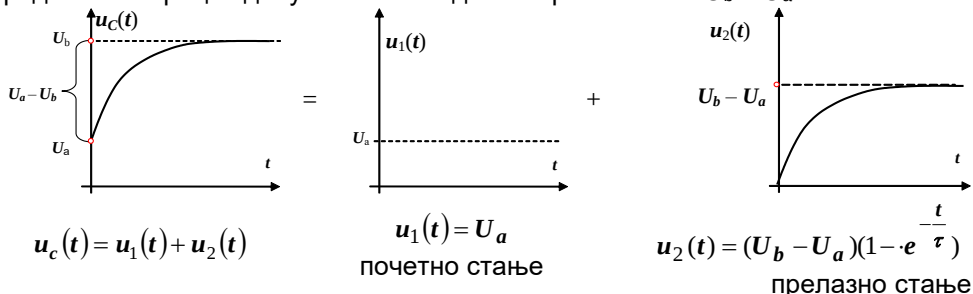
Константа нагиба функције  $u_C(t)$  у почетном тренутку је једнака:

$$\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = u'(0) = \frac{U_b - U_a}{\tau}$$

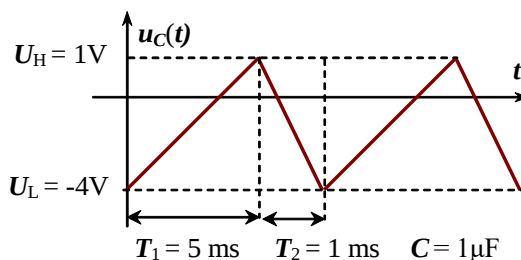


Геометријска анализа

Функција којом се описује напон на крајевима кондензатора у периоду када је он пуни у затворено коло са извором напона може се представити као збир две функције: једне, непроменљиве у времену, која представља почетно стање напона на крајевима кондензатора, и друге, експоненцијалне, која представља процес допуњавања кондензатора за напон  $U_b - U_a$ .



14. На слици је приказан таласни облик напона на крајевима кондензатора. Нацртати таласни облик струје кроз кондензатор и одредити њене вредности током временских интервала  $T_1$  и  $T_2$ .



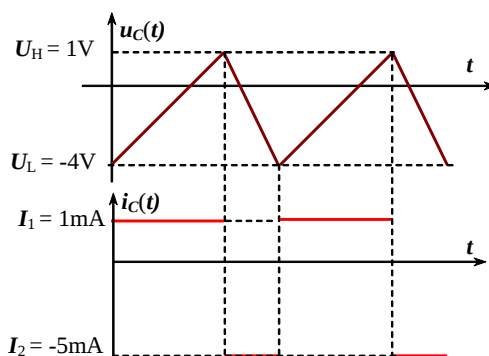
РЕШЕЊЕ

Када се напон  $u_C$  мења линеарно са временом, струја кроз кондензатор има сталну вредност.

Смер струје кроз кондензатор одређен је знаком константе нагиба функције  $u_C(t)$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{I \Delta T}{\Delta U}$$

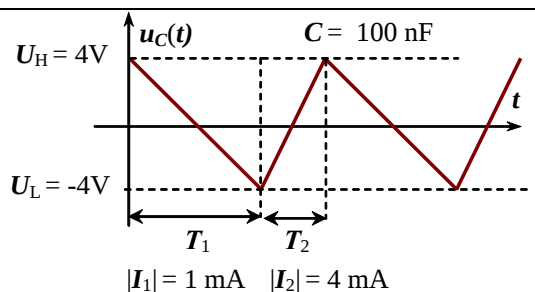
$$\Delta U = U_H - U_L = 5 \text{ V} ,$$



$$I_1 = C \frac{\Delta U}{T_1} = 1 \text{ mA} ,$$

$$I_2 = -C \frac{\Delta U}{T_2} = -5 \text{ mA} .$$

15. На слици је приказан таласни облик напона на крајевима кондензатора. Нацртати таласни облик струје кроз кондензатор и одредити трајање временских интервала  $T_1$  и  $T_2$ .



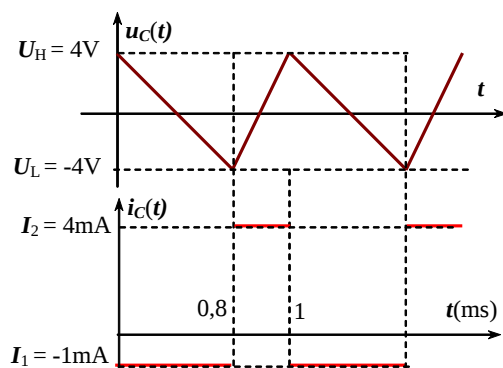
### РЕШЕЊЕ

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{I \Delta T}{\Delta U} ,$$

$$\Delta U = U_H - U_L = 8 \text{ V} ,$$

$$T_1 = C \frac{\Delta U}{|I_1|} = 0,8 \text{ ms} ,$$

$$T_2 = C \frac{\Delta U}{I_2} = 0,2 \text{ ms} .$$



## 2.2. ДИОДЕ

16. Одредити вредност динамичке отпорности силицијумског PN-споја на собној температури, при струји од 2 mA.

### РЕШЕЊЕ

Динамичка отпорност дефинисана је изразом:

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{1}{g} = \frac{1}{\frac{dI}{dU}},$$

На основу израза којим је описана напонско-струјна карактеристика PN-споја:

$$I = I_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1),$$

где је  $U_T$  термички напон, а  $I_s$  инверзна струја засићења PN-споја, добија се израз за динамичку проводност PN-споја:

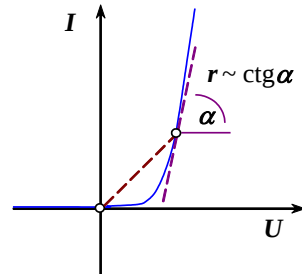
$$g = \frac{dI}{dU} = \frac{I_s e^{\frac{U}{U_T}}}{U_T} = \frac{I + I_s}{U_T},$$

на основу којег следи:

$$r = \frac{1}{g} = \frac{U_T}{I + I_s} \cong \frac{U_T}{I}, U \gg U_T \Rightarrow I \gg I_s.$$

На собној температури термички напон  $U_T$  је приближно једнак 26 mV, одакле следи:

$$r \cong \frac{U_T}{I} = \frac{26 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = 13 \Omega$$



17. Одредити однос статичке и динамичке отпорности полупроводничке диоде при директној поларизацији напонем  $U \gg U_T$ .

### РЕШЕЊЕ

Према дефиницији, статичка отпорност диоде једнака је количнику напона и струје:

$$R = \frac{U}{I}$$

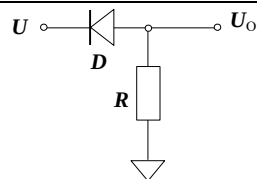
При директној поларизацији напонем  $U \gg U_T$  може се сматрати да је динамичка отпорност полупроводничке диоде (PN-споја) обрнуто сразмерна струју кроз диоду (задатак 16.):

$$r = \frac{U_T}{I}.$$

Према томе, однос статичке и динамичке отпорности при  $U \gg U_T$  је једнак:

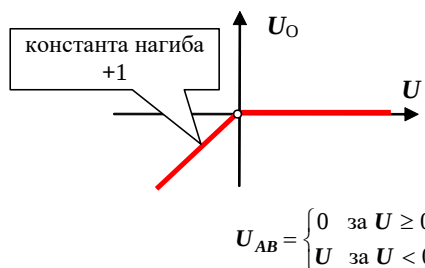
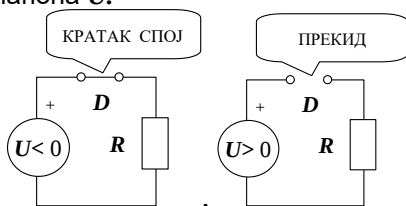
$$\frac{R}{r} = \frac{U}{U_T}.$$

18. За коло приказано на слици, под претпоставком да је диода D савршена:
- написати општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  на излазу кола;
  - нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ .

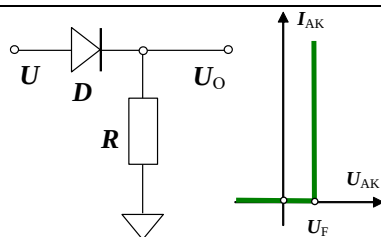


## РЕШЕЊЕ

Могућа су два стања у посматраном колу, у зависности од поларитета напона  $U$ .



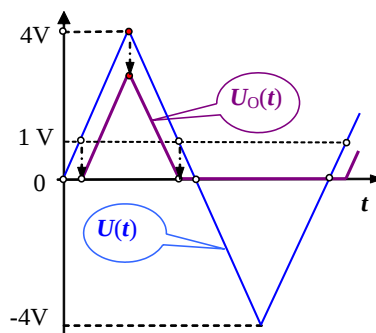
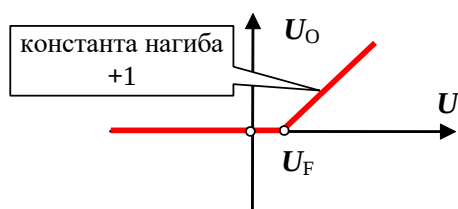
19. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диоде D може представити приказаним дијаграмом:



- написати општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  на излазу кола;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ .
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$ , ако је напон вођења диоде поларисане у пропусном смеру,  $U_F$ , једнак 1 V, а улазни напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 4 V.

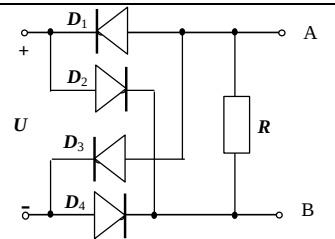
## РЕШЕЊЕ

$$U_O = \begin{cases} U - U_F & \text{за } U \geq U_F \\ 0 & \text{за } U < U_F \end{cases}$$



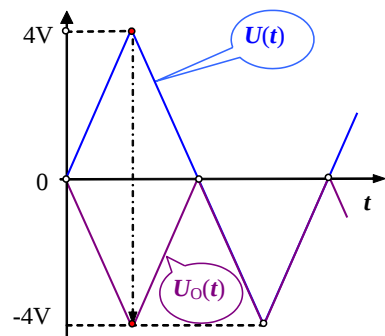
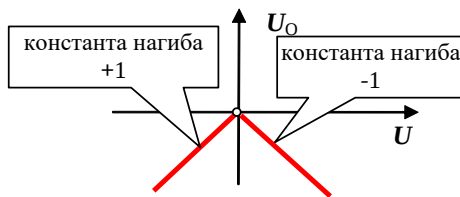
20. У колу приказаном на слици употребљене су савршене диоде.

- Написати општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$  на излазу кола.
- Нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ .
- Нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$ , ако улазни напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 4 V.



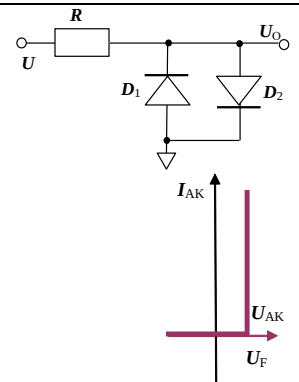
РЕШЕЊЕ

$$U_{AB} = \begin{cases} -U & \text{за } U \geq 0 \\ U & \text{за } U < 0 \end{cases} = -|U|$$



21. За коло приказано на слици:

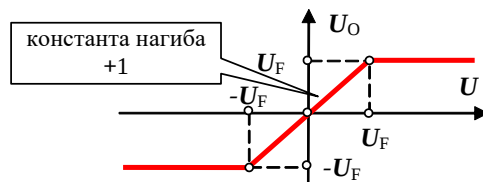
- одредити општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  под претпоставком да се карактеристика диода  $D_1$  и  $D_2$  може представити дијаграмом приказаним на слици;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$ , ако је напон прага диоде поларисане у пропусном смеру,  $U_F$ , једнак 1 V, а улазни напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 2 V.



РЕШЕЊЕ

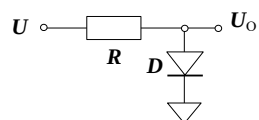
$$U_O = \begin{cases} U_F & \text{за } U > U_F \\ U & \text{за } |U| \leq U_F \\ -U_F & \text{за } U < -U_F \end{cases}$$

$$U_O = \begin{cases} U & \text{за } |U| \leq U_F \\ U_F \operatorname{sgn} U & \text{за } |U| > U_F \end{cases}$$



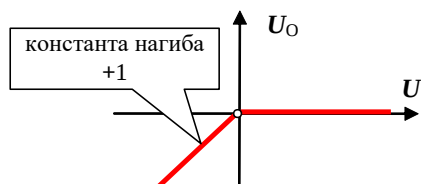
22. За коло приказано на слици, под претпоставком да је диода D савршена:

- написати општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  на излазу кола;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ .



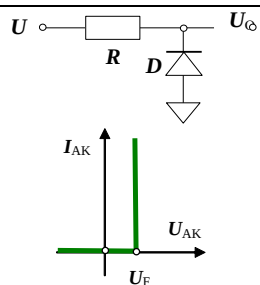
РЕШЕЊЕ

$$U_O = \begin{cases} 0 & \text{за } U \geq 0 \\ U & \text{за } U < 0 \end{cases}$$



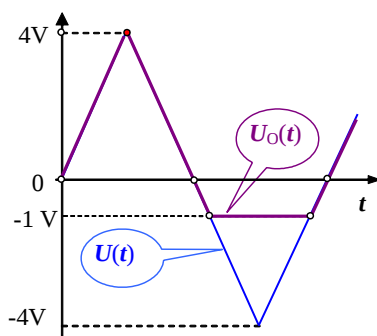
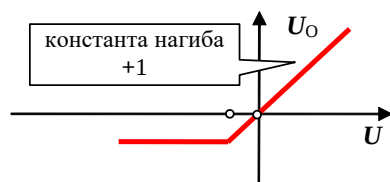
23. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диоде D може представити приказаним дијаграмом:

- написати општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  на излазу кола;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$ , ако је напон вођења диоде поларисане у пропусном смеру,  $U_F$ , једнак 1 V, а улазни напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 4 V.



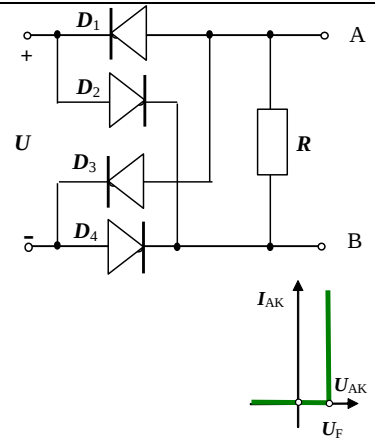
РЕШЕЊЕ

$$U_O = \begin{cases} U & \text{за } U \geq -U_F \\ -U_F & \text{за } U < -U_F \end{cases}$$



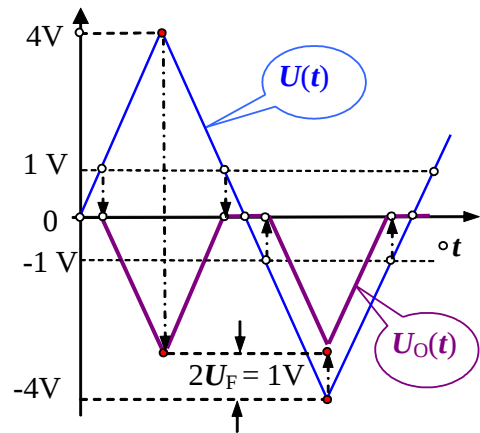
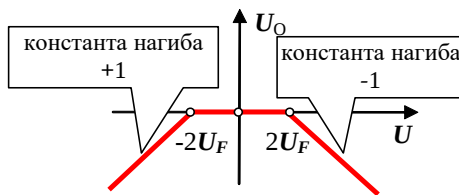
24. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диода може представити приказаним дијаграмом:

- написати општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$  на излазу кола.
- нацртати улазно-излазну карактеристику кола,  $U_{AB}(U)$ .
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако је напон вођења диоде поларисане у пропусном смеру,  $U_F$ , једнак 0,5 V, а улазни напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 4 V.



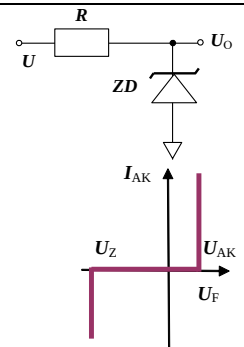
### РЕШЕЊЕ

$$U_{AB} = \begin{cases} -U + 2U_F & \text{за } U \geq 2U_F \\ 0 & \text{за } |U| < 2U_F \\ U + 2U_F & \text{за } U \leq -2U_F \end{cases}$$



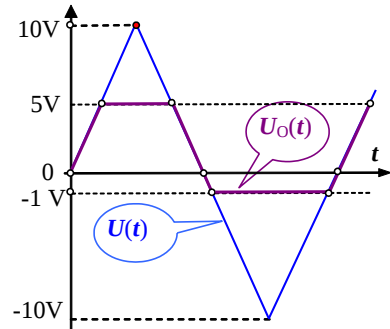
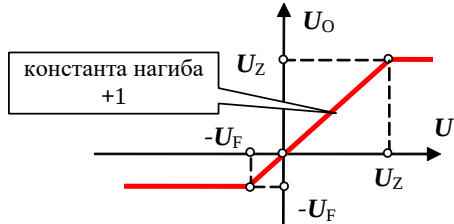
25. За коло приказано на слици:

- одредити општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  под претпоставком да се карактеристика Ценер-диоде ZD може представити дијаграмом приказаним на слици;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$ , ако је  $U_F = 1$  V,  $U_Z = 5$  V а улазни напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 10 V.



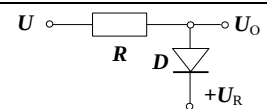
## РЕШЕЊЕ

$$U_O = \begin{cases} U_Z & \text{за } U > U_Z \\ U & \text{за } -U_F \leq U < U_Z \\ -U_F & \text{за } U \leq -U_F \end{cases}$$



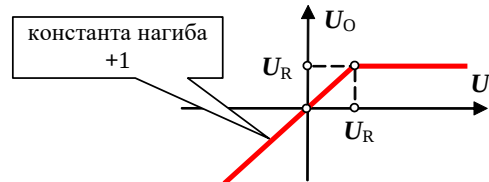
26. За коло приказано на слици, под претпоставком да је диода D савршена:

- написати општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  на излазу кола;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ .



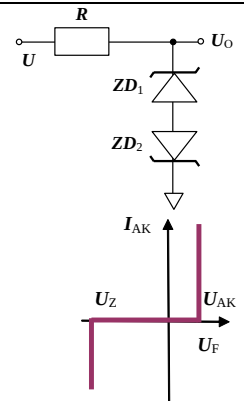
## РЕШЕЊЕ

$$U_O = \begin{cases} U & \text{за } U \leq U_R \\ U_R & \text{за } U > U_R \end{cases}$$



27. За коло приказано на слици:

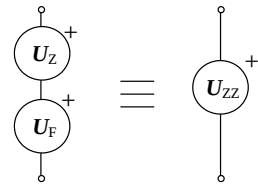
- одредити општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода  $ZD_1$  и  $ZD_2$  може представити дијаграмом приказаним на слици;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_O(t)$ , ако је  $U_F = 1 \text{ V}$ ,  $U_Z = 5 \text{ V}$  а улазни напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде  $10 \text{ V}$ .



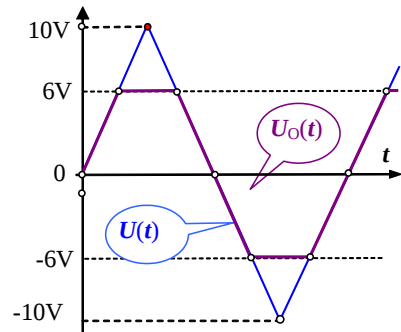
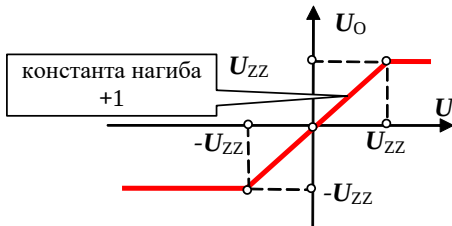
## РЕШЕЊЕ

Еквивалентно коло две редно повезане, супротно оријентисане Ценер-диоде приказано је на слици.

$$U_{ZZ} = U_Z + U_F$$

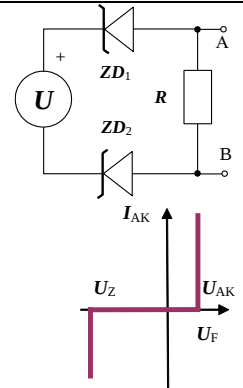


$$U_O = \begin{cases} U_{ZZ} & \text{за } U > U_{ZZ} \\ U & \text{за } |U| < U_{ZZ} \\ -U_{ZZ} & \text{за } U \leq -U_{ZZ} \end{cases}$$



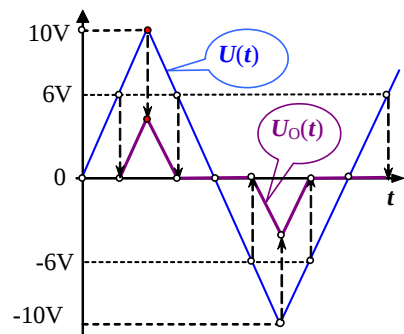
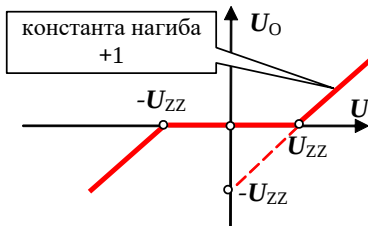
28. За коло приказано на слици:

- одредити општи израз за вредност напона  $U_{AB}(U)$ , под претпоставком да се карактеристика Ценер-диоде  $ZD_1$  и  $ZD_2$  може представити дијаграмом приказаним на слици;
- нацртати карактеристику преноса,  $U_{AB}(U)$ ;
- нацртати дијаграм таласног облика напона  $U_{AB}(t)$ , ако је  $U_F = 1 \text{ V}$ ,  $U_Z = 5 \text{ V}$ , а улазни напон  $U(t)$  има симетричан троугаони таласни облик амплитуде  $10 \text{ V}$ .



## РЕШЕЊЕ

$$U_O = \begin{cases} U - U_{ZZ} & \text{за } U > U_{ZZ} \\ 0 & \text{за } |U| < U_{ZZ} \\ U + U_{ZZ} & \text{за } U \leq -U_{ZZ} \end{cases}$$



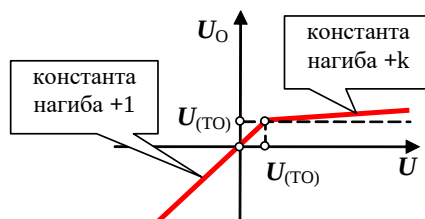
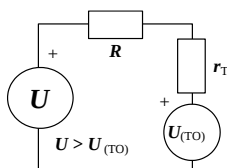
29. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диоде  $D$  може представити приказаним дијаграмом:

а) одредити вредност динамичке отпорности диоде у проводном стању;  
 б) написати општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  на излазу кола;  
 в) нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ .

## РЕШЕЊЕ

Динамичка отпорност диоде при директној поларизацији једнака је:

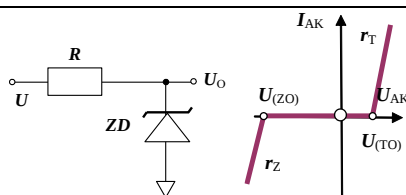
$$r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,4 \text{ V}}{100 \text{ mA}} = 4 \Omega,$$



$$U_O = \begin{cases} U_{(TO)} + k(U - U_{(TO)}) & \text{за } U \geq U_{(TO)} \\ U & \text{за } U < U_{(TO)} \end{cases}, \quad k = \frac{r_T}{R + r_T}$$

30. За коло приказано на слици:

- а) одредити општи израз за вредност напона  $U_O(U)$  под претпоставком да се карактеристика Ценер-диоде  $ZD$  може представити приказаним дијаграмом;  
 б) нацртати карактеристику преноса,  $U_O(U)$ .

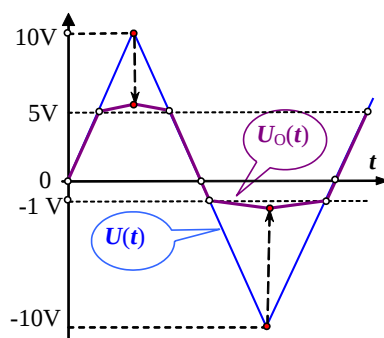
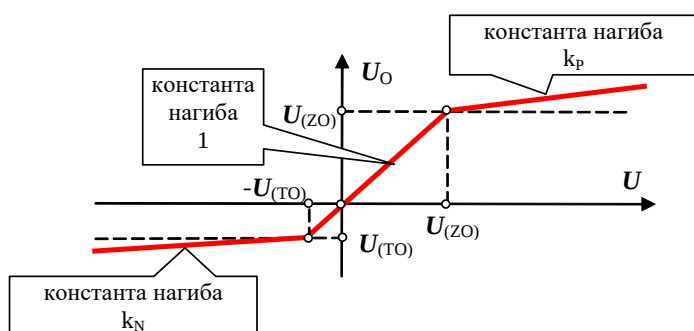


## РЕШЕЊЕ

Могућа су три стања у посматраном колу, у зависности од интензитета и поларитета напона  $U$ .

Када је напон  $U$  мањи од напона пробоја Ценер-диоде у директном смеру,  $U_{(TO)}$ , а већи од напона пробоја у инверзном смеру,  $U_{(ZO)}$ , струја кроз диоду, а то значи и кроз грану у којој се налази отпорник  $R$ , једнака је нули. Излазни напон  $U_O$  једнак је улазном напону  $U$ . Изван овог опсега излазни напон је једнак напону Ценер-диоде кроз коју протиче струја у директном или инверзном смеру.

$$U_O = \begin{cases} U_{(ZO)} + k_P(U - U_{(ZO)}) & \text{за } U > U_{(ZO)} \\ U & \text{за } U_{(TO)} \leq U < U_{(ZO)} \\ -U_{(TO)} + k_N(U - U_{(TO)}) & \text{за } U \leq -U_{(TO)} \end{cases}, \quad k_P = \frac{r_Z}{R + r_Z}, \quad k_N = \frac{r_T}{R + r_T}.$$



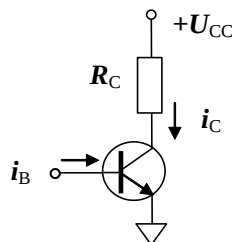
## 2.3. ТРАНЗИСТОРИ

31. Нацртати појачавач са транзистором у споју са заједничким емитором и одредити појачање струје за мале сигнале.

РЕШЕЊЕ

$$i_C = \beta i_B + (1 + \beta) I_{CBO}$$

$$A_I = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} = \frac{i_c}{i_b} = \beta$$



32. Нацртати спој транзистора који представља Дарлингтонов пар еквивалентан NPN транзистору. Одредити појачања струје од базе до емитора еквивалентног транзистора.

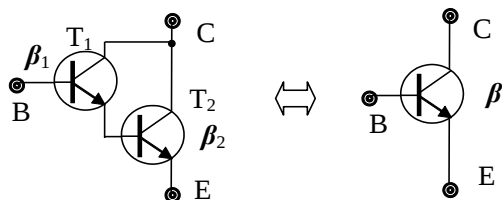
РЕШЕЊЕ

$$I_B = I_{B1}$$

$$I_{E1} = (1 + \beta_1)(I_{B1} + I_{CBO1}) = I_{B2}$$

$$I_E = I_{E2} = (1 + \beta_2)(I_{B2} + I_{CBO2})$$

$$I_E = (1 + \beta)(I_B + I_{CBO})$$

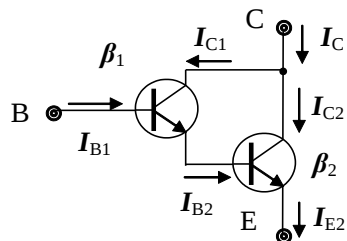


$$I_{E2} = (1 + \beta_2)[(1 + \beta_1)(I_B + I_{CBO1}) + I_{CBO2}]$$

$$I_{E2} = (1 + \beta_2)(1 + \beta_1) \left( I_B + I_{CBO1} + \frac{I_{CBO2}}{1 + \beta_1} \right)$$

$$\beta = \beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2$$

$$I_{CBO} = I_{CBO1} + \frac{I_{CBO2}}{(1 + \beta_1)}$$

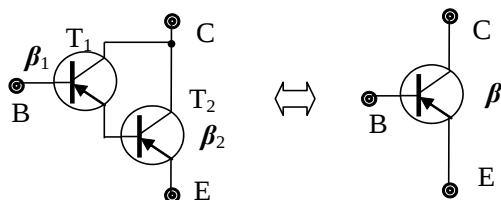


33. Нацртати спој транзистора који представља Дарлингтонов пар еквивалентан PNP транзистору. Написати изразе за појачање струје од базе до емитора и напон база-емитор еквивалентног транзистора.

РЕШЕЊЕ

$$u_{BE} = u_{BE1} + u_{BE2},$$

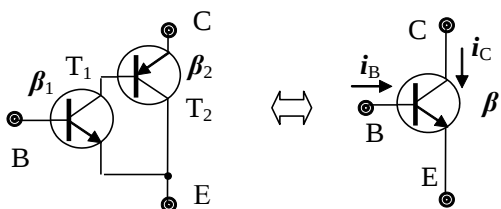
$$\beta = \beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2$$



34. Нацртати спој комплементарних транзистора који је еквивалентан NPN транзистору.

РЕШЕЊЕ

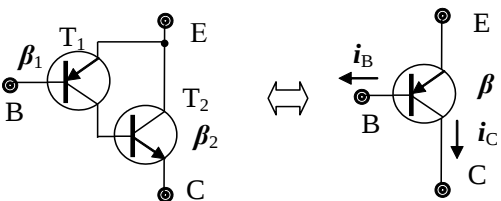
$$\beta \cong \beta_1 \beta_2$$



35. Нацртати спој комплементарних транзистора који је еквивалентан PNP транзистору.

РЕШЕЊЕ

$$\beta \cong \beta_1 \beta_2$$



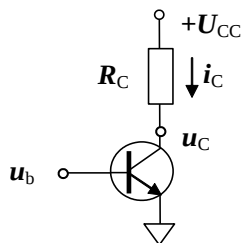
36. Нацртати инверујући појачавач са биполарним транзистором и одредити појачање напона за мале сигнале.

РЕШЕЊЕ

$$i_c = g_m u_b.$$

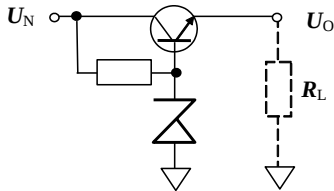
$$u_c = -R_c i_c$$

$$A_U = \frac{u_c}{u_b} = -g_m R_c$$



37. Нацртати коло за стабилизацију позитивног једносмерног напона са Ценер-диодом и биполарним транзистором.

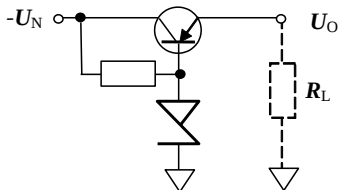
РЕШЕЊЕ



$$U_O = U_Z - U_{BE}$$

38. Нацртати коло за стабилизацију негативног једносмерног напона са Ценер-диодом и биполарним транзистором.

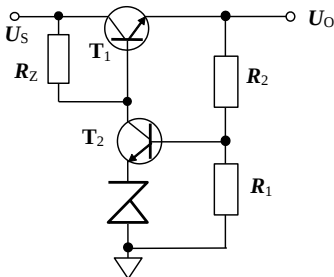
РЕШЕЊЕ



$$U_O = -U_Z + U_{EB}$$

39. Нацртати стабилизатор позитивног једносмерног напона са дискретним елементима, који омогућује подешавање вредности излазног напона.

РЕШЕЊЕ



$$U_O = (U_Z + U_{BE2}) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + R_2 I_{B2}$$

Вредност излазног напона се подешава односом отпорности  $R_2$  и  $R_1$ .

40. Нацртати спој NPN транзистора који представља “струјно огледало” и одредити израз за вредност излазне струје.

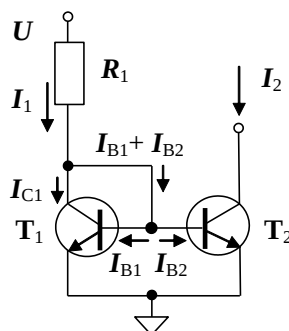
РЕШЕЊЕ

$$I_{C1} \cong \beta_1 I_{B1} = \beta I_B, \Rightarrow I_B \cong \frac{I_{C1}}{\beta}$$

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + 2I_B \cong \frac{\beta+2}{\beta} I_{C1}$$

$$I_2 = I_{C2} = I_{C1} \cong \frac{\beta}{\beta+2} I_1$$

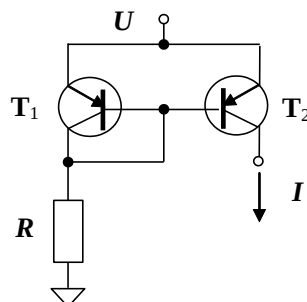
$$I_2 \cong \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \frac{U - U_{BE}}{R_1}$$



41. Нацртати спој PNP транзистора који представља “струјно огледало” и написати израз за вредност излазне струје.

РЕШЕЊЕ

$$I_2 \cong \frac{\beta}{\beta+2} \frac{U - U_{BE}}{R}$$

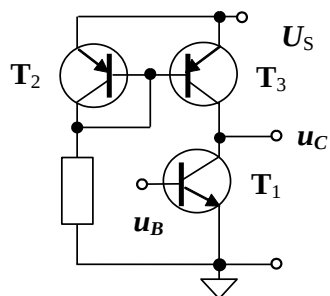


42. Нацртати инвертујући појачавач са комплементарним биполарним транзисторима и објаснити начин његовог рада.

РЕШЕЊЕ

Транзистори  $T_2$  и  $T_3$  образују извор струје (струјно огледало) који представља активно оптерећење појачавачког транзистора  $T_1$ .

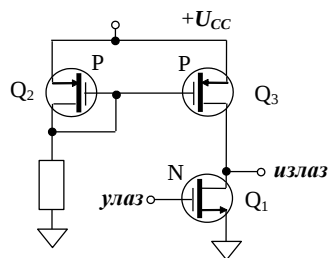
$$A_U = \frac{u_c}{u_b} = -g_m r_{CE3}$$



43. Нацртати инвертујући појачавач са комплементарним MOS-транзисторима и објаснити начин његовог рада.

## РЕШЕЊЕ

Транзистори  $Q_2$  и  $Q_3$  образују извор струје (струјно огледало) који представља активно оптерећење појачавачког транзистора  $Q_1$ .

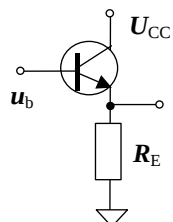


44. Нацртати неинвертујући појачавач са биполарним транзистором и написати изразе за улазну и излазну отпорност у линеарној области рада.

## РЕШЕЊЕ

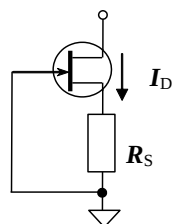
$$R_i = (1 + h_{fe}) R_E,$$

$$R_o = \frac{r_\pi}{1 + h_{fe}}, \quad r_\pi = \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} = \frac{h_{FE}}{g_m}.$$



45. Нацртати извор струје са N-каналним спојним транзистором са ефектом поља.

## РЕШЕЊЕ



### 3.

## ПИТАЊА ЗА ПРОВЕРУ ЗНАЊА

### 3.1. ФИЗИЧКИ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНИКЕ

1. Шта је специфична електрична отпорност, како је дефинисана и од чега зависи?
2. Шта је покретљивост слободних носилаца наелектрисања, како је дефинисана и од чега зависи?
3. Шта је полупроводник? Која су основна обележја полупроводничких материјала?
4. Шта је термички напон, како је дефинисан и колика је његова вредност на температури 300 K?
5. Шта је енергијски дијаграм електрона у атому? Нацртати дијаграм енергијских нивоа усамљеног атома водоника.
6. Шта је електронволт и колика је његова вредност?
7. По чему се дијаграм енергије електрона у кристалној решетки разликује од дијаграма енергије електрона усамљеног атома?
8. По чему се разликују енергијски дијаграми проводника, полупроводника и изолатора?
9. Шта је шупљина? Како се наелектрисање преноси шупљинама?
10. Шта је сопствена концентрација чистог полупроводника и од чега зависи?
11. Шта је полупроводник са примесама? Зашто се у кристал полупроводника уносе примесе?
12. Какав је однос концентрација електрона и шупљина у полупроводнику са примесама у стању термодинамичке равнотеже?
13. Шта су већински, а шта мањински носиоци наелектрисања у полупроводнику?
14. У чему се разликују полупроводници I-, N- и P-типа?
15. Шта је прелазна област PN-споја?
16. Како се мења ширина прелазне области PN-споја при повећању напона инверзне поларизације?
17. Како се мења висина потенцијалне препреке (баријере) прелазне области PN-споја при повећању напона директне поларизације?
18. Написати израз који описује зависност густине струје од напона поларизације PN-споја?

19. У чему се разликују  $U$ - $I$  карактеристике германијумског и силицијумског PN-споја?
20. Шта је пробој PN-споја и како настаје?
21. Шта је лавински пробој? Како се напон пробоја лавинским ефектом мења са температуром.
22. Шта је пробој тунелским ефектом? Како се напон пробоја тунелским ефектом мења са температуром?
23. Шта је капацитивност прелазне области PN-споја,  $C_T$ , и од чега зависи? Који је ред величине капацитивности  $C_T$ ?
24. Шта је дифузиона капацитивност PN-споја,  $C_D$ , и од чега зависи? Који је ред величине капацитивности  $C_D$ ?
25. Чему је једнак производ дифузионе капацитивности  $C_D$  и динамичке отпорности директно поларисаног PN-споја.
26. Шта је температурска осетљивост напона директно поларисаног PN-споја при сталној струји, у којим јединицама се изражава, и колика је њена приближна вредност?
27. Шта је инверзна струја засићења PN-споја и како се мења у зависности од температуре?
28. Како се динамичка отпорност PN-споја мења: а) у зависности од температуре, б) у зависности од вредности струје.
29. Нацртати и анализирати  $U$ - $I$  карактеристику PN-споја.
30. Колика је приближна вредност динамичке отпорности силицијумског PN-споја на собној температури, при струји од 1 mA.

## 3.2. ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНСКИХ УРЕЂАЈА

31. Шта је елемент електронског уређаја?
32. Шта је савршени (идеални) елемент?
33. Која су својства пасивних, а која активних електронских елемената?
34. Која су својства савршене диоде?
35. Која су својства савршених извора напона и струје?
36. Дефинисати независни извор напона и нацртати његову карактеристику.
37. Дефинисати независни извор струје и нацртати његову карактеристику.
38. Навести основне врсте отпорника који се користе у електроници. Нацртати еквивалентно коло стварног (физичког) отпорника.
39. Како је дефинисан сачинилац промене отпорности у зависности од температуре и у којим јединицама се изражава?
40. Колика је типична вредност температурског коефицијента металослојних отпорника?
41. Навести основне врсте кондензатора који се користе у електроници. Нацртати еквивалентно коло стварног (физичког) кондензатора.
42. Како је дефинисан сачинилац промене капацитивности кондензатора у зависности од температуре и у којим јединицама се изражава?
43. Шта је диелектрична апсорпција?
44. Шта је варистор и где се примењује?
45. Нацртати хибридно еквивалентно коло елемента са два приступа и написати једначине које представљају одговарајући математички модел.

46. Шта је савршени (идеални) филтер?
47. Написати опште изразе којима су дефинисани појачање напона, појачање струје, улазна отпорност и излазна отпорност појачавача.
48. Шта је негативна динамичка отпорност? Који електронски елементи се одликују својством негативне динамичке отпорности.

### 3.3. ДИОДЕ

49. Која је основна подела диода према намени?
50. У чему се разликују карактеристике германијумских и силицијумских диода?
51. Како је дефинисан сачинилац промене инверзне струје засићења диоде у зависности од температуре и колика је његова приближна вредност?
52. Који су основни параметри диоде и како зависе од температуре?
53. У којој области статичке  $U-I$  карактеристике ради Ценер-диоде у уобичајеним условима?
54. Која су основна својства Шотки-диоде?
55. Шта је варикап-диоде и где се користи?
56. Шта је тунел-диоде. Нацртати  $U-I$  карактеристику тунел-диоде.
57. Нацртати еквивалентна кола савршене (идеалне) диоде поларисане у проводном и непроводном смеру.
58. Како је дефинисан сачинилац промене напона диоде, поларисане у пропусном смеру, у зависности од температуре и колика је његова приближна вредност?
59. Нацртати  $U-I$  карактеристику и назначити основне параметре полупроводничке диоде.
60. У чему се разликују статичка и динамичка отпорност диоде?
61. Како су дефинисани напон прага  $U_{(TO)}$  и отпорност нагиба  $r_T$ ?
62. Нацртати линеаризовану  $U-I$  карактеристику полупроводничке диоде. Колика је приближна вредност напона прага за силицијумске, а колика за германијумске диоде?
63. Нацртати еквивалентна кола Ценер-диоде у проводном стању: а) поларисане у директном и б) поларисане у инверзном смеру.

### 3.4. БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

64. Која су основна својства униполарних, а која биполарних транзистора?
65. Написати потпуне изразе којима су дефинисана појачање струје биполарног транзистора: а) од емитора до колектора и б) од базе до колектора.
66. Графички приказати однос струја код биполарних транзистора PNP и NPN типа.
67. Објаснити појаву која се назива Ерлијев ефекат.
68. Нацртати улазну статичку карактеристику NPN транзистора и написати израз који описује зависност струје базе од напона база-емитор.

69. Нацртати статичку карактеристике преноса NPN транзистора и написати израз који описује зависност струје колектора од напона база-емитор.
70. Нацртати излазну статичку карактеристику NPN транзистора, назначити области рада и написати услове којима су одређене.
71. Нацртати излазну статичку карактеристику NPN транзистора, назначити и објаснити границе радне области.
72. Написати једначине које представљају математички  $h$ -модел биполарног транзистора. Како је дефинисан и шта представља параметар  $h_{ie}$ ?
73. Написати једначине које представљају математички  $h$ -модел биполарног транзистора. Како је дефинисан и шта представља параметар  $h_{ie}$ ?
74. Написати једначине које представљају математички  $h$ -модел биполарног транзистора. Како је дефинисан и шта представља параметар  $h_{ib}$ ?
75. Написати једначине које представљају математички  $h$ -модел биполарног транзистора. Како је дефинисан и шта представља параметар  $h_{oe}$ ?
76. Нацртати дијаграм који показује зависност појачања струје биполарног транзистора од учестаности.
77. Нацртати дијаграм који показује зависност појачања струје од базе до емитора биполарног транзистора од вредности струје колектора.
78. Објаснити појаву која се назива "термичко бежање".
79. Нацртати хибридно еквивалентно коло транзистора за мале сигнале и објаснити физичку природу појединих параметара.
80. Нацртати појачавач са транзистором у споју са заједничким колектором и написати изразе за а) појачање струје за мале сигнале, б) појачање напона за мале сигнале, в) улазну отпорност и г) излазну отпорност.

### 3.5. ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

81. Како је дефинисана струја  $I_{DSS}$ ?
82. Како је дефинисана динамичка излазна проводност транзистора са ефектом поља, шта геометријски представља и од чега зависи?
83. Нацртати излазну статичку карактеристику N-каналног спојног транзистора са ефектом поља.
84. Нацртати статичку карактеристику преноса N-каналног спојног транзистора са ефектом поља.
85. Нацртати еквивалентно коло транзистора са ефектом поља и написати једначине које представљају његов математички модел за мале сигнале.
86. Написати изразе којима су одређене вредности струје и динамичке проводности преноса транзистора са ефектом поља у области засићења.
87. Како је дефинисана динамичка проводност преноса транзистора са ефектом поља, шта геометријски представља и од чега зависи?
88. Нацртати графички симбол и скицирати пресек N-каналног спојног транзистора са ефектом поља.
89. Нацртати графички симбол и скицирати поједностављен приказ пресека NMOS-транзистора са уграђеним каналом.
90. Нацртати графички симбол и статичку карактеристику преноса N-каналног MOS-транзистора са подстакнутим (индукованим) каналом.

### 3.6. ТИРИСТОРИ

91. Шта је тиристор и која су његова основна својства?
92. Нацртати  $U-I$  карактеристику и објаснити које су области рада тиристора.
93. Нацртати спој транзистора којим се може представити диодни тиристор.
94. Шта је диак? Скицирати поједностављен приказ пресека диака и нацртати симбол којим се графички представља диак у електричним шемама.
95. Шта је триодни тиристор Р-типа и како се може представити? Нацртати симбол којим се графички представља тиристор Р-типа у електричним шемама.
96. Шта је триодни тиристор N-типа и како се може представити? Нацртати симбол којим се графички представља тиристор N -типа у електричним шемама.
97. Како се све тиристор може довести у проводно стање?
98. Набројати врсте тиристора.
99. Шта је триак? Нацртати симбол којим се графички представља триак у електричним шемама.
100. Нацртати релаксациони осцилатор са диодним тиристором.