

**ВИСОКА ШКОЛА
ЕЛЕКТРОТЕХНИКЕ И РАЧУНАРСТВА
БЕОГРАД**

Петар Бошњаковић

**ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОНИКЕ
ЗБИРКА ЗАДАТАКА**

2010.

др Петар Бошњаковић
Основи електронике – збирка задатака

Рецензенти

Др Славица Маринковић,
Мр Борислав Хаџибабић.

Обрада и припрема текста
Др Петар Бошњаковић

Корице
Ненад Толић

Издавач

Висока школа електротехнике и рачунарства,
Војводе Степе 283, Београд

Наставно веће Високе школе електротехнике и рачунарства, на својој седници одржаној 24.12.2009. године одобрило је издавање и коришћење овог приручника у настави.

ПРЕДГОВОР

Ова збирка решених задатака из основа електронике намењена је студентима Високе школе електротехнике и рачунарства, који се са основама електронике упознају на првој години студија. Њен циљ је да студентима омогући ефикасније и темељитије савлађивање основних појмова и поступака анализе електронских кола, у складу са наставним програмима предмета којима се студенти уводе у област електронике, као и стицање знања која су потребна за даље успешно праћење стручних предмета основних и специјалистичких струковних студија Високе школе електротехнике и рачунарства. У том смислу, она је намењена и студентима чије интересовање превазилази ниво програма образовања Високе школе струковних студија.

Садржај збирке у основи је обликован сагласно са захтевима програма предмета Основи електронике 1 и Основи електронике 2. Организација уџбеника је прилагођена реализацији задатака наставе на високој школи струковних студија. Материја која је у њему обухваћена подељена је у десет целина. Првих шест поглавља (Увод у електронику, Диодна кола, Биполарни транзистори, Транзистори са ефектом поља, Стабилизатори једносмерног напона и Извори сталне струје) представљају тематске јединице усаглашене са програмима предмета којима је збирка намењена. Уводни део сваког поглавља садржи приказ теоријске основе у којем су у сажетом облику истакнути елементи који представљају полазну основу за решавање задатака који следе. Кроз брижљиво изабрани низ задатака из одређене области, приказани су разноврсни поступци анализе основних електронских кола који воде до одговора на постављена питања. Овакв приступ има за циљ да олакша савладавање градива и омогући да студенти са разумевањем примењују одређене поступке при решавању проблема из електронике.

Седмо и осмо поглавље садрже питања која су намењена за проверу теоријског знања, кроз колоквијуме који се држе у току семестра у којем се настава изводи. Прву групу представљају питања са понуђеним одговорима (тест-питања). У другој групи су питања и елементарни задаци којима се проверава познавање основних електронских кола и структура која се срећу у пракси. Одговоре на ова питања студент треба самостално да формулише на основу градива обрађеног на предавањима и доступне литературе.

У настојању да се збирка учини приступачнијом читаоцима са различитим нивоом предзнања, у деветом поглављу дати су полазни елементи анализе кола и сигнала на којима се заснива решавање задатака из области електронике. У сажетом облику разматрају се основни појмови који се при анализи и пројектовању електронских кола

и система користе за описивање њихових својстава и појава које се у њима дешавају. Објашњења ових појмова заснована су на међународно усаглашеним дефиницијама. Првенствено су коришћени одговарајући речници које је објавила Међународна електротехничка комисија (*IEC*).

Полазећи од става да графички приказ има велику когнитивну моћ, завршно поглавље ове збирке посвећено је графичкој анализи основних електронских кола. Иако се графичка метода решавања све мање примењује у свакодневној инжењерској пракси, њено познавање доприноси бољем сагледавању својстава електронских кола и разумевању њиховог рада.

У прилогу су дата општа правила означавања сигнала у електроници, графички симболи електронских компоненета, словне ознаке и скраћенице које Међународна електротехничка комисија препоручује својим стандардима.

Аутор се захваљује рецензентима, Славици Маринковић и Бориславу Хаџибабићу 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 високе школе, а неопходна су за даље успешно праћење предмета у другој и трећој години студија. Своју захвалност аутор дугује и Радославу Јекићу, Ненаду Толићу, Јелени Гавриловић и Милутину Нешићу.

13.01.2010.

Аутор

САДРЖАЈ

1. Увод у електронику	1
2. Диодна кола	41
3. Биполарни транзистори	127
4. Транзистори са ефектом поља	179
5. Стабилизатори једносмерног напона	215
6. Извори сталне струје	245
7. Питања за проверу теоријског знања	269
8. Тест	281
9. Елементи анализе кола и сигнала	297
10. Графичка анализа електронских кола	321
11. Прилог	351
12. Ознаке	355

1.

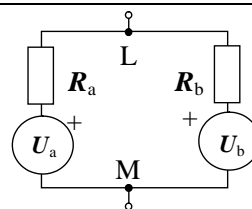
УВОД У ЕЛЕКТРОНИКУ

Електроника представља врло пространу област која обухвата различита научна знања и мноштво техничких примена. У практичном смислу може се дефинисати као “подручје електротехнике у којем се користи својство несиметричне проводности” [1]. У најопштијем смислу, електроника је “област физике која се бави емисијом, понашањем и деловањем електрона, и електронским уређајима” [2]. Познавање својстава средине у којој постоји кретање наелектрисања је несумњиво значајно за сагледавање процеса образовања електричне струје у њима, правилну употребу елемената заснованих на појавама електричне проводности у вакууму, гасовима и чврстим телима, развој и коришћење електронских елемената, компонената и склопова. Теоријска подлога електронике, међутим, знатно је шира. Њу, поред физике, чине и теорија система, анализа и синтеза електричних кола, прекидачка алгебра и математичка логика. Са техничке стране она се ослања на различите технологије производње електронских елемената, компонената и склопова, као и њиховог повезивања у све сложеније уређаје, док њену практичну суштину обликује конкретно подручје употребе.

Улазак у област електронике подразумева обнављање и систематизовање неких знања стечених из физике, електротехнике и математике, њихово повезивање и обликовање у нешто што се може назвати “инжењерским начином размишљања”.

2.1. ОСНОВНА ЕЛЕКТРИЧНА КОЛА

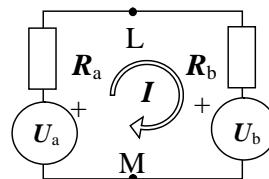
1. За коло приказано на слици одредити општи израз за вредност напона U_{LM} , у зависности од вредности напона U_a и U_b , и отпорности R_a и R_b .



РЕШЕЊЕ

У складу са датим ознакама, на основу другог Кирхофовог правила, примењеног на петљу која садржи изворе напона U_a и U_b , као и отпорнике R_a и R_b , важи једначина:

$$U_a - R_a I - R_b I - U_b = 0,$$



чијим решавањем се добија израз за вредност струје у овом колу:

$$I = \frac{U_a - U_b}{R_a + R_b}.$$

За вредност напона U_{LM} важи:

$$U_{LM} = U_a - R_a I_a.$$

Сређивањем ових израза добија се:

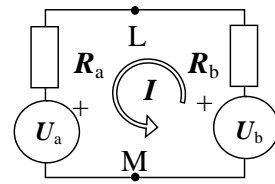
$$U_{LM} = U_a - R_a \frac{U_a - U_b}{R_a + R_b} = \frac{R_b}{R_a + R_b} U_a + \frac{R_a}{R_a + R_b} U_b.$$

НАПОМЕНА

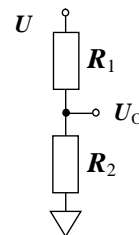
Истоветан резултат се добија ако се за референтни смер струје у колу своји смер који одговара поларитету извора напона U_b .

$$U_{LM} = U_b - R_b I = U_b - R_b \frac{U_b - U_a}{R_a + R_b}.$$

$$U_{LM} = \frac{R_a}{R_a + R_b} U_b + \frac{R_b}{R_a + R_b} U_a$$



2. Коло приказано на слици представља отпорнички делитељ напона (атенуатор). Под претпоставком да је отпорност оптерећења које се везује на његов излаз, бесконачно велика, одредити општи израз за вредност излазног напона U_O у зависности од вредности улазног напона U , и отпорности R_1 и R_2 .



РЕШЕЊЕ

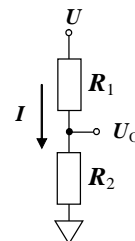
За посматрано коло важе једначине:

$$U_O = R_2 I, \text{ и}$$

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2},$$

на основу којих следи:

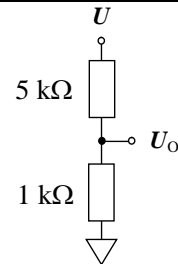
$$U_O = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U.$$



Тренутна вредност излазног напона U_O сразмерна је вредности улазног напона U . Константа преноса је одређена односом отпорности R_1 и R_2 :

$$k = \frac{U_O}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} < 1.$$

3. Напон U_O на излазу неоптерећеног отпорничког делитеља напона, приказаног на слици, једнак је 2 V. Одредити вредност улазног напона U .



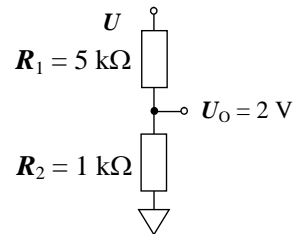
РЕШЕЊЕ

На основу једначине којом је одређен однос излазног и улазног напона отпорничког делитеља напона:

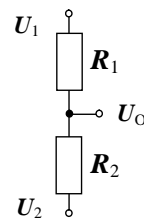
$$U_O = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U,$$

следи:

$$U = U_O \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 2 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{5 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega}\right) = 12 \text{ V}.$$

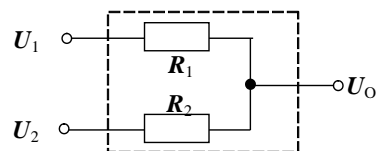


4. За коло приказано на слици одредити општи израз за вредност напона U_O у зависности од вредности напона U_1 и U_2 , и отпорности R_1 и R_2 .



РЕШЕЊЕ

Посматрано коло представља линеаран систем који има два улаза, U_1 и U_2 , и један излаз, U_O .

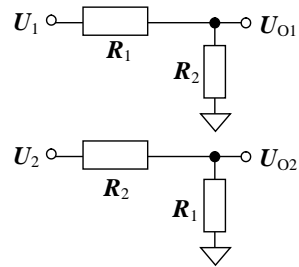


За линеарне системе важи **принцип суперпозиције**: одзив система, на побуду која представља збир више побуда, једнак је збиру појединачних одзива на појединачне побуде. За одзив линеарног система са два улаза, U_1 и U_2 , и једним излазом, U_O , важи:

$$U_O(U_1, U_2) = U_O(U_1) \Big|_{U_2=0} + U_O(U_2) \Big|_{U_1=0},$$

$$U_O(U_1) \Big|_{U_2=0} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1$$

$$U_O(U_2) \Big|_{U_1=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_2$$



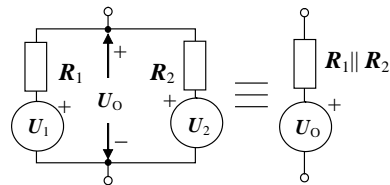
на основу чега следи:

$$U_O = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_2.$$

НАПОМЕНА

Истоветан резултат се добија применом Тевененове теореме.

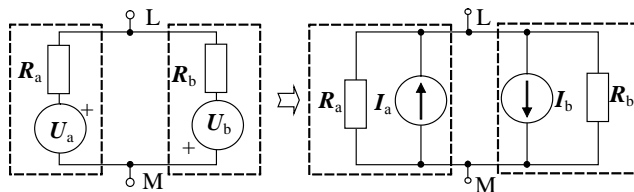
Напон U_O једнак је напону на излазу неоптерећеног извора напона који је, са стране излаза, еквивалентан посматраној мрежи.



5. За коло приказано на слици написати опште изразе за вредности напона U_T и унутрашње отпорности R_T еквивалентног (Тевененовог) генератора.

РЕШЕЊЕ

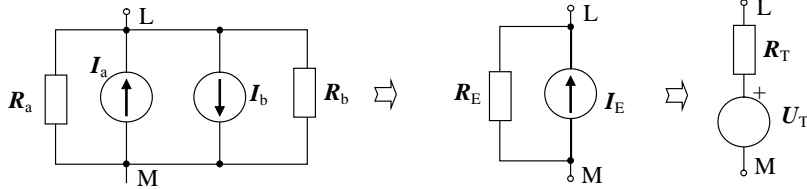
Применом теореме о еквиваленцији напонског и струјног извора:



$$I_a = \frac{U_a}{R_a},$$

$$I_b = \frac{U_b}{R_b}$$

и одговарајућим трансформацијама:



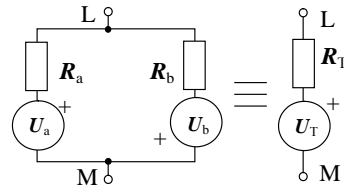
$$R_E = R_a \parallel R_b = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}, \quad I_E = I_a - I_b,$$

$$U_T = R_E I_E, \quad R_T = R_E,$$

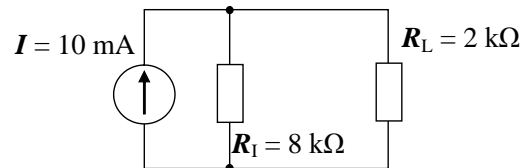
добијају се изрази за параметре еквивалентног генератора:

$$U_T = \frac{R_b}{R_a + R_b} U_a - \frac{R_a}{R_a + R_b} U_b,$$

$$R_T = R_E = R_a \parallel R_b = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}.$$



6. Одредити вредност струје кроз отпорник R_L у колу приказаном на слици.

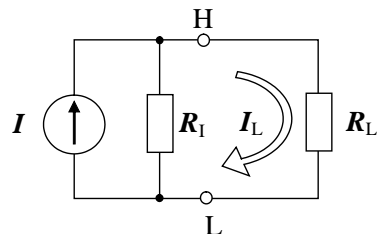


РЕШЕЊЕ

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{U_{HL}}{R_L} = \frac{I \cdot R_1 \parallel R_L}{R_L} \\ &= I \frac{R_1 R_L}{R_1 + R_L} = I \frac{R_1}{R_1 + R_L} \end{aligned}$$

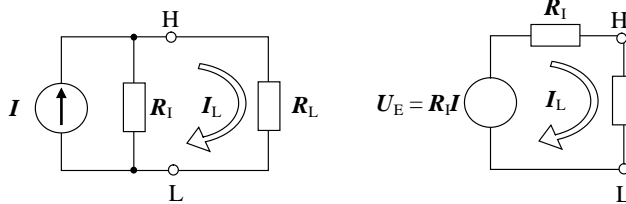
За задате бројне вредности је:

$$I_L = \frac{8 \text{ k}\Omega}{8 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} 10 \text{ mA} = 8 \text{ mA}.$$



ПРОВЕРА

Задатак се може решити и применом теореме о еквиваленцији извора напона и извора струје.



$$I_L = \frac{U_E}{R_1 + R_L} = \frac{IR_1}{R_1 + R_L}.$$

7. За коло приказано на слици, написати опште изразе за вредности напона U_T и унутрашње отпорности R_T еквивалентног генератора.

РЕШЕЊЕ

Применом принципа суперпозиције, доби ја се:

$$U_T = U_{HL}(U_1, U_2, U_3) = U_{HL}(U_1) \Big|_{U_2 = U_3 = 0} + U_{HL}(U_2) \Big|_{U_1 = U_3 = 0} + U_{HL}(U_3) \Big|_{U_1 = U_2 = 0},$$

$$U_T = \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} U_1 + \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + R_1 \parallel R_3} U_2 + \frac{R_1 \parallel R_2}{R_3 + R_1 \parallel R_2} U_3,$$

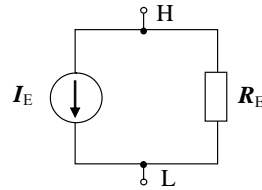
$$R_T = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3.$$

8. За коло приказано на слици, написати опште изразе за вредности струје I_E и унутрашње отпорности R_E еквивалентног генератора.

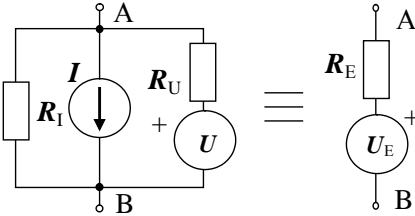
РЕШЕЊЕ

$$I_E = I_1 - I_2 + I_3 ,$$

$$R_E = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 .$$

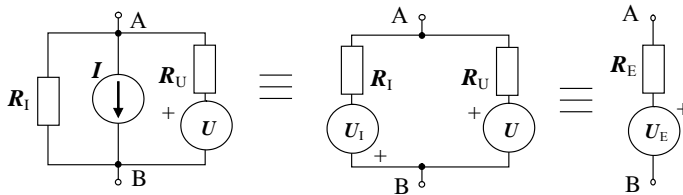


9. За коло приказано на слици, написати опште изразе за вредности напона U_E и унутрашње отпорности R_E еквивалентног генератора напона.



РЕШЕЊЕ

Применом теореме о еквиваленцији напонског и струјног извора и одговарајућим трансформација добија се:



где је:

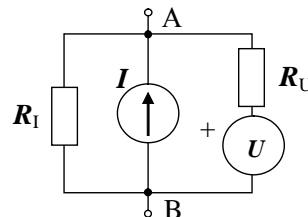
$$U_E = \frac{R_I}{R_I + R_U} U - \frac{R_U}{R_I + R_U} U_1 ,$$

$$R_E = R_I \parallel R_U = \frac{R_I R_U}{R_I + R_U} , \quad U_1 = R_I I .$$

Сређивањем израза за напон еквивалентног генератора добија се:

$$U_E = \frac{R_I}{R_I + R_U} U - \frac{R_U R_I}{R_I + R_U} I = \frac{R_I}{R_I + R_U} (U - R_U I) = R_E \left(\frac{U}{R_U} - I \right) .$$

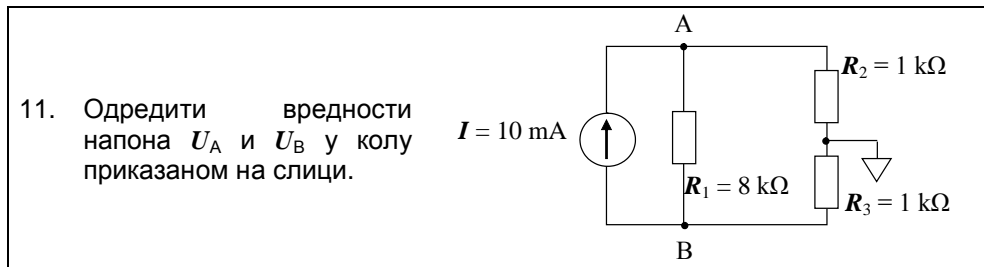
10. За коло приказано на слици, написати општи израз за напон U_{AB} у зависности од вредности струје I , напона U и отпорности у колу, R_I и R_U .



РЕШЕЊЕ

Напон U_{AB} једнак је напону еквивалентног Тевененовог генератора мреже између чворова А и В:

$$U_{AB} = \frac{R_I}{R_I + R_U} U + \frac{R_U R_I}{R_I + R_U} I.$$



РЕШЕЊЕ

У посматраном колу струја кроз отпорник R_2 једнака струји кроз отпорник R_3 (не постоји затворена струјна петља која би омогућила протицање струје кроз прикључак за референтни потенцијал означен троуглом):

$$I_2 = I_3, I_0 = 0.$$

На основу задатих вредности $R_2 = R_3$ следи:

$$U_A = U_B = \frac{U_{AB}}{2}.$$

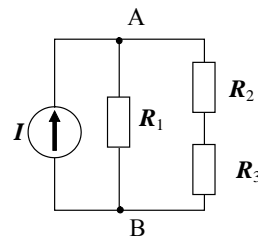
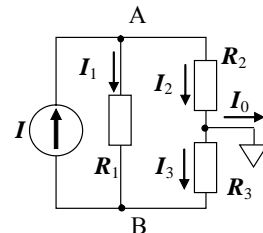
Напон U_{AB} одређен изразом:

$$U_{AB} = I \cdot R_1 \parallel (R_2 + R_3).$$

За задате вредности добија се:

$$U_{AB} = 10 \text{ mA} \cdot 1,6 \text{ k}\Omega = 16 \text{ V},$$

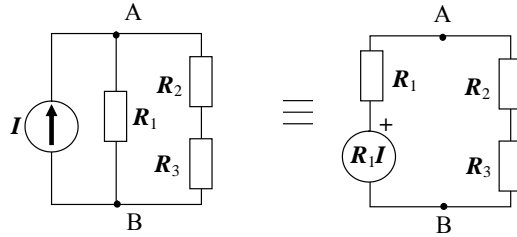
$$U_A = U_B = 8 \text{ V}$$



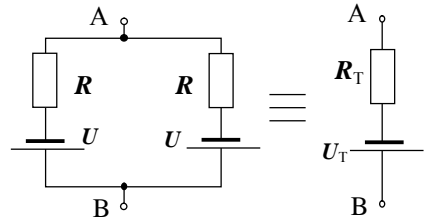
ПРОВЕРА

До истог резултата се долази ако се струјни извор замени напонским:

$$U_{AB} = \frac{IR_1}{R_1 + R_2 + R_3} (R_2 + R_3)$$



12. За коло приказано на слици, написати опште изразе за вредности напона U_T и унутрашње отпорности R_T еквивалентног Тевененовог генератора.



РЕШЕЊЕ

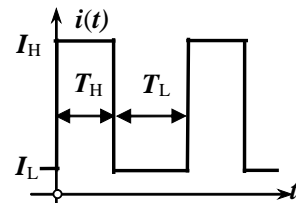
$$U_T = \frac{R}{R+R}U + \frac{R}{R+R}U, \quad R_T = R \parallel R = \frac{RR}{R+R}.$$

Паралелним везивањем извора напона једнаких карактеристика добија се еквивалентни извор чија је унутрашња отпорност двоструко мања.

$$U_T = U,$$

$$R_T = \frac{R}{2}.$$

13. Одредити општи израз за средњу вредност периодичне струје правоугаоног таласног облика (приказан на слици).



РЕШЕЊЕ

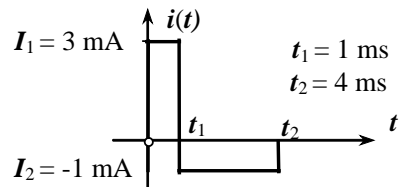
Према дефиницији, средња вредност периодичне струје, $\overline{i(t)}$, једнака је количнику укупне количине наелектрисања, Q , пренете током једног потпуног циклуса промене посматране струје, и трајања временског интервала T , који представља период понављања таласног облика:

$$\overline{i(t)} = \frac{Q(T)}{T} = \frac{Q(T_H + T_L)}{T_H + T_L} = \frac{Q(T_H) + Q(T_L)}{T_H + T_L},$$

$$Q(T_H) = I_H T_H, \quad Q(T_L) = I_L T_L,$$

$$\overline{i(t)} = \frac{I_H T_H + I_L T_L}{T_H + T_L}.$$

14. Одредити средњу вредност периодичне струје $i(t)$, чији је временски дијаграм приказан на слици.



РЕШЕЊЕ

Према дефиницији, средња вредност периодичне електричне струје једнака је количнику укупне количине наелектрисања, пренете током временског интервала чије је трајање једнако периоди, и трајања периода понављања:

$$\overline{i(t)} = \frac{Q(T)}{T}.$$

За задате вредности, добија се:

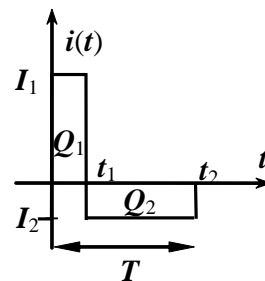
$$T = t_2 = 4 \text{ ms}$$

$$Q_1 = I_1 t_1 = 3 \mu\text{C},$$

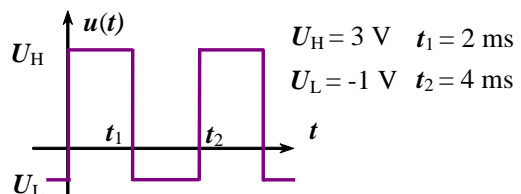
$$Q_2 = I_2 (t_2 - t_1) = -3 \mu\text{C}.$$

$$Q(T) = Q_1 + Q_2 = 0,$$

$$\overline{i(t)} = \frac{Q(T)}{T} = 0$$



15. Одредити средњу вредност напона чији је таласни облик приказан на слици.



РЕШЕЊЕ

Напон представља периодичну функцију времена:

$$u(t+T) = u(t); T = t_2,$$

за коју важи:

$$u(t) = \begin{cases} U_H & \text{за } 0 \leq t < t_1 \\ U_L & \text{за } t_1 \leq t < t_2 \end{cases}.$$

$$\overline{u(t)} = \frac{U_H T_H + U_L T_L}{T_H + T_L}, \quad T_H = t_1, \quad T_L = t_2 - t_1,$$

$$\overline{u(t)} = \frac{3 \text{ V} \cdot 2 \text{ ms} - 1 \text{ V} \cdot 2 \text{ ms}}{4 \text{ ms}} = 1 \text{ V},$$

Геометријска анализа

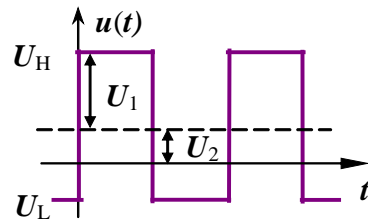
Променљиви напон $u(t)$, чији је таласни облик задат, може да се посматра као пулсирајући сигнал који је настао суперпозицијом (сабирањем) наизменичног сигнала правоугаоног таласног облика, $u_1(t)$, чија је амплитуда:

$$U_1 = \frac{U_H - U_L}{2} = 2 \text{ V},$$

и сталног (једносмерног) сигнала, $u_2(t)$, чија је вредност:

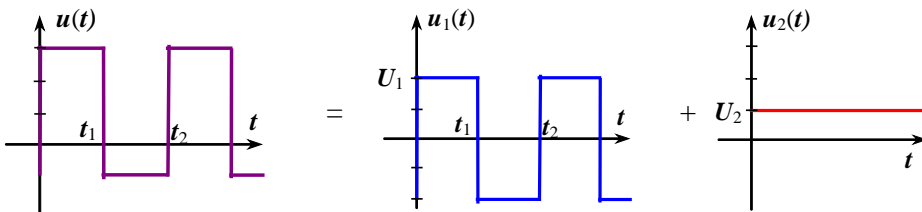
$$U_2 = \frac{U_H + U_L}{2} = 1 \text{ V}.$$

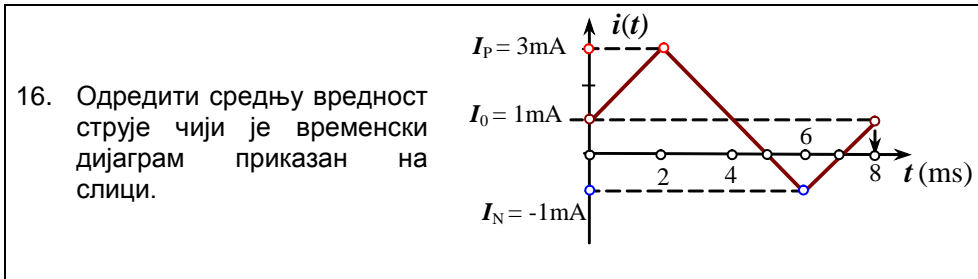
$$u(t) = u_1(t) + u_2(t).$$



Средња вредност сигнала $u(t)$ једнака је збиру средњих вредности сигнала $u_1(t)$ и $u_2(t)$.

$$\overline{u(t)} = \overline{u_1(t) + u_2(t)} = \overline{u_1(t)} + \overline{u_2(t)} = 0 + U_1 = 1 \text{ V}.$$





РЕШЕЊЕ

Према дефиницији је:

$$\overline{i(t)} = \frac{Q_A - Q_B + Q_C}{T}$$

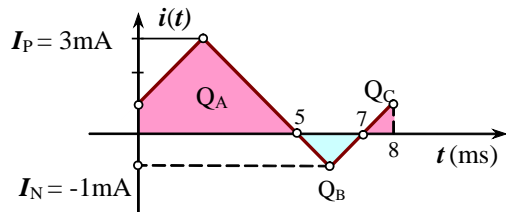
где је:

$$T = 8 \text{ ms}$$

Q_A наелектрисање пренето током временског интервала од 0 до 5 ms,

Q_B наелектрисање пренето током временског интервала од 5 ms до 7 ms, и

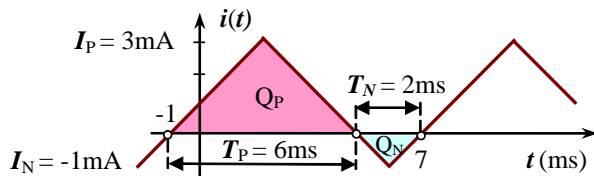
Q_C наелектрисање пренето током временског интервала од 7 ms до 8 ms.



Решавање задатка се поједностављује, ако се променљива величина, задата у временском интервалу од 0 до 8 ms, посматра као периодична величина. Средња вредност променљиве величине, одређена за временски интервал чије је трајање једнако периоду T , не зависи од избора почетног тренутка. Захваљујући томе, уместо да се израчунавање врши у задатом интервалу (од 0 до 8 ms), може да се посматра временски интервал од -1 ms до 7 ms.

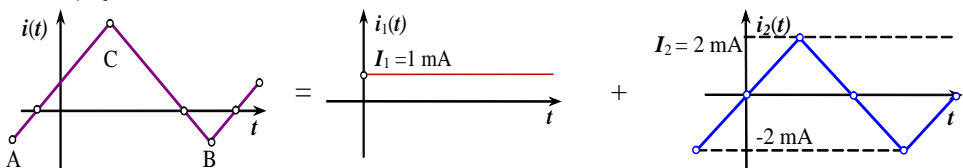
$$\overline{i(t)} = \frac{Q_P - Q_N}{T}$$

$$Q_P = \frac{I_P T_P}{2}, \quad Q_N = \frac{I_N T_N}{2}$$



$$\overline{i(t)} = \frac{9 \mu\text{C} - 1 \mu\text{C}}{8 \text{ ms}} = 1 \text{ mA}$$

Геометријска анализа



$$i(t) = i_1(t) + i_2(t)$$

Стална компонента пулсирајућег сигнала троугаоног таласног облика се налази на средини између највеће и најмање вредности (медијана троугла ABC):

$$I = \frac{I_P + I_N}{2} = 1 \text{ mA} .$$

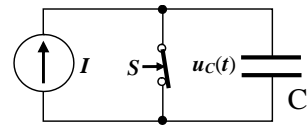
Амплитуда променљиве (наизменичне) компоненте једнака је половини распона (размака између највеће и најмање вредности):

$$I_2 = \frac{I_P - I_N}{2} = \frac{\Delta I}{2} = 2 \text{ mA} .$$

Средња вредност сигнала $i(t)$ једнака је збиру средњих вредности сигнала $i_1(t)$ и $i_2(t)$.

$$\overline{i(t)} = \overline{i_1(t)} + \overline{i_2(t)} = I_1 + 0 = 1 \text{ mA} .$$

17. Струја I , коју даје извор сталне струје у колу приказаном на слици, једнака је 2 mA. Одредити трајање временског интервала T потребног да, након отварања прекидача S , напон на савршеном кондензатору, чија је капацитивност $C = 3,3 \mu\text{F}$, достигне вредност 3 V.



РЕШЕЊЕ

Однос количине наелектрисања садржане (сакупљене, акумулисане) у савршеном кондензатору, Q , и разлике потенцијала између његових крајева, U , сразмеран је капацитивности кондензатора, C :

$$C = \frac{Q}{U} .$$

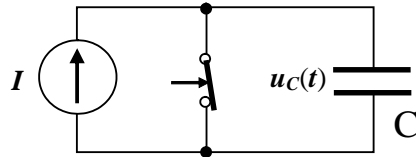
У посматраном колу, почетна количина наелектрисања садржана у кондензатору једнака је нули (кондензатор је испразњен кроз прекидач који представља кратак спој када је затворен). Пуњење се остварује сталном струјом I . Наелектрисање унето у кондензатор током временског интервала T једнако је:

$$Q = IT .$$

На основу претходних једначина следи:

$$T = \frac{Q}{I} = \frac{CU}{I} = \frac{3,3\mu\text{F} \cdot 3\text{V}}{2\text{mA}} = 4,95\text{ms}.$$

18. Под претпоставком да струја I у посматраном колу има сталну вредност, нацртати временски дијаграм који приказује напон између крајева кондензатора након отварања прекидача.



РЕШЕЊЕ

Промена напона између крајева савршеног кондензатора, Δu_C , сразмерна је количини унетог наелектрисања:

$$\Delta u_C = \frac{1}{C} \Delta Q.$$

Вредност напона u_C , посматрана у било ком тренутку t , једнака је збиру вредности напона на крајевима кондензатора у почетном тренутку t_0 , и прираштаја Δu_C који је настао услед наелектрисања ΔQ , унетог током временског интервала од t_0 до тренутка t :

$$u_C(t) = U_{C0} + \Delta u_C = U_{C0} + \frac{1}{C} \Delta Q,$$

где је U_{C0} вредност напона $u_C(t)$ у почетном тренутку $t = t_0$.

Ако струја I има сталну вредност, важи:

$$\Delta Q = I\Delta t = I(t - t_0).$$

Функција $u_C(t)$ је одређена изразом:

$$u_C(t) = \frac{1}{C} I(t - t_0) + U_{C0}.$$

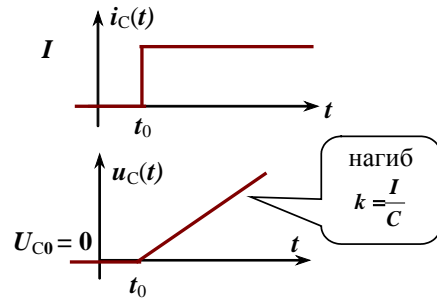
Напон на крајевима кондензатора, кроз који протиче стална струја, представља линеарну функцију времена.

У посматраном колу почетна вредност напона, U_{C0} , је једнака нули (кондензатор је испразњен кроз прекидач који представља кратак спој када је затворен).

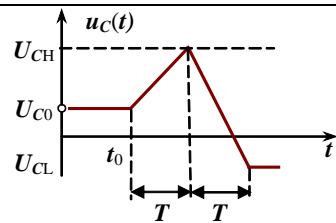
Брзина промене, константа нагиба функције $u_C(t)$, сразмерна је вредности струје I , а обрнуто сразмерна капацитивности кондензатора C :

$$k = \frac{\Delta u_C}{\Delta t} = \frac{I}{C}.$$

$$u_C(t) = \frac{1}{C} I t.$$



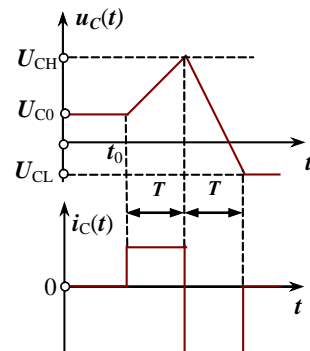
19. На слици је приказан таласни облик напона на крајевима кондензатора. Нацртати таласни облик струје кроз кондензатор.



РЕШЕЊЕ

Када се напон између крајева кондензатора не мења ($t < t_0$ и $t > t_0 + 2T$) струја кроз кондензатор је једнака нули.

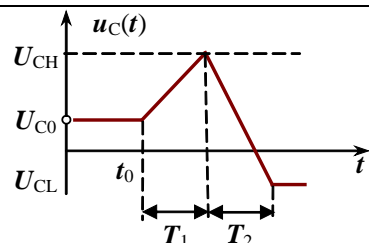
Током временског интервала $[t_0, t_0 + T]$ напон на кондензатору расте (кондензатор се пуни). Притом је брзина пораста напона константна, функција $u_C(t)$ има сталан, позитиван нагиб. То значи да је струја која у том временском интервалу тече кроз кондензатор, стална и позитивна.



Током временског интервала $(t_0 + T, t_0 + 2T)$ напон на кондензатору опада (кондензатор се празни). Брзина опадања напона је константна. Струја која у том временском интервалу тече кроз кондензатор је стална и негативна. Нагиб функције $u_C(t)$ је сразмеран интензитету струје $i_C(t)$. Интензитет струје пражњења је већи од интензитета струје пуњења.

20. На слици је приказан таласни облик напона на крајевима савршеног кондензатора.

Одредити општи израз којим је одређена вредност струје кроз кондензатор.



РЕШЕЊЕ

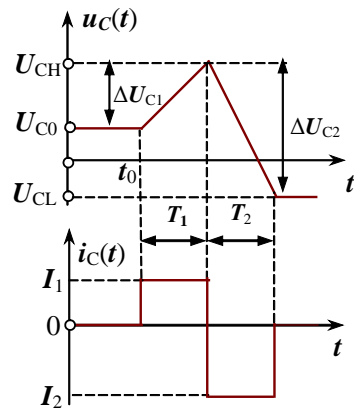
Током временског интервала који траје до тренутка t_0 , напон између крајева савршеног кондензатора, $u_C(t)$, се не мења. То значи да је струја кроз кондензатор тада једнака нули. Након тренутка t_0 напон $u_C(t)$ расте, што значи да је струја кроз кондензатор позитивна. Након тога напон $u_C(t)$ опада. Кондензатор се празни. Струја кроз кондензатор је тада негативна.

Нагиб функције $u_C(t)$ је сразмеран интензитету струје $i_C(t)$.

$$I_1 = C \frac{\Delta U_{C1}}{T_1}, \Delta U_{C1} = U_{CH} - U_{C0} > 0;$$

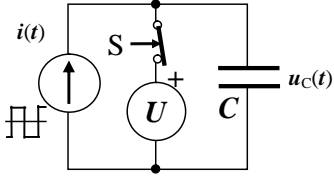
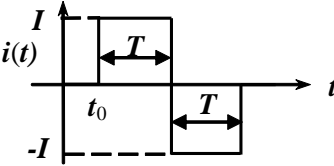
$$I_2 = C \frac{\Delta U_{C2}}{T_2}, \Delta U_{C2} = U_{CL} - U_{CH} < 0,$$

$$i_C(t) = \begin{cases} I_1 > 0 & \text{за } t_0 \leq t < t_0 + T_1 \\ 0 & \text{за } t < t_0 \text{ и } t > t_0 + T_1 + T_2 \\ I_2 < 0 & \text{за } t_0 + T_1 \leq t \leq t_0 + T_1 + T_2 \end{cases}$$



21. У колу приказаном на слици примењени су савршени елементи.

Нацртати временски дијаграм напона $u_C(t)$ ако временски дијаграм струје $i(t)$, након отварања прекидача S у почетном тренутку t_0 , има облик приказан на слици.

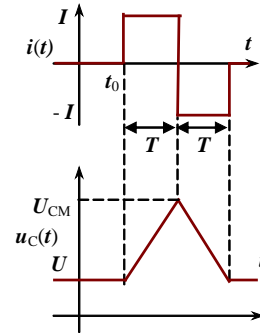
РЕШЕЊЕ

Под претпоставком да је прекидач савршен (унутрашња отпорност затвореног прекидача једнака је нули), почетна вредност напона на кондензатору једнака је напону $U_{C0} = U$.

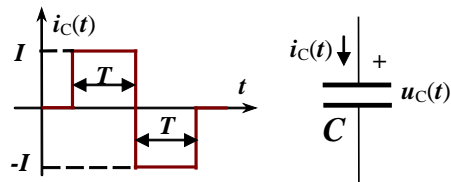
Након отварања прекидача, савршени извор струје пуни кондензатор сталном струјом, $i_C(t) = I$, коју извор даје током временског интервала чије је трајање једнако T . Напон на кондензатору линеарно расте са временом.

Након промене смера струје (у тренутку $t_0 + T$), кондензатор се празни струјом $-I$. Почетну вредност у овом процесу представља напон на кондензатору на крају интервала пуњења.

Процес празњења се прекида у тренутку $t_0 + 2T$. После тога, струја кроз кондензатор је једнака нули, напон између његових крајева се не мења.



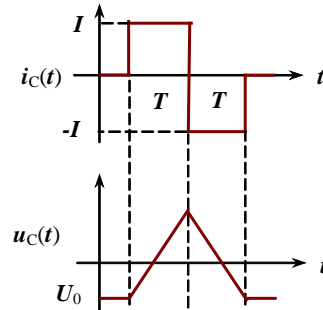
22. На слици је приказан таласни облик струје кроз кондензатор. Ако је почетна вредност напона на крајевима кондензатора једнака $U_{C0} < 0$, нацртати таласни облик напона $u_C(t)$.



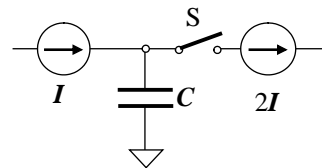
РЕШЕЊЕ

Када је струја кроз кондензатор једнака нули, напон између његових крајева се не мења.

Када кроз кондензатор протиче стална струја, напон на кондензатору се линеарно мења са временом. Када је, у односу на назначене референтне смерове, струја $i_C(t)$ позитивна, напон $u_C(t)$ расте. Када је струја негативна, напон $u_C(t)$ се смањује.



23. У колу приказаном на слици примењени су генератори сталне струје. У почетном тренутку ($t_0 = 0$) напон између крајева кондензатора једнак је нули, а прекидач S је отворен. Након истека временског интервала T , прекидач S се затвара. Одредити израз којим је одређена вредност напона на кондензатору.



РЕШЕЊЕ

На основу дефиниције капацитивности кондензатора:

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta u_C},$$

следи:

$$i_C(t) = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C \frac{\Delta u_C}{\Delta t}.$$

Ако струја кроз кондензатор има сталну вредност I , напон $u_C(t)$ линеарно расте са временом, брзином која је сразмерна вредности струје I :

$$u_C(t) = U_{C0} + \frac{I}{C}(t - t_0),$$

где је U_{C0} вредност напона $u_C(t)$ у почетном тренутку t_0 .

Укупна промена напона $u_C(t)$ током интервала пуњења кондензатора, Δu_C , једнака је:

$$\Delta u_C = \frac{IT}{C}.$$

Након промене смера струје (у тренутку $t_0 + T$), кондензатор се празни од почетне вредности:

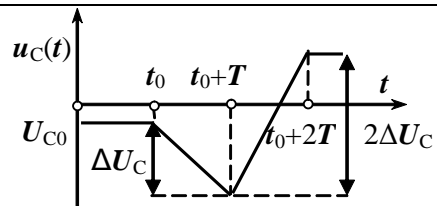
$$\max u_C(t) = U_{CM} = U_{C0} + \frac{IT}{C},$$

$$u_C(t) = \frac{IT}{C} - \frac{I}{C}(t - t_0 - T) < 0 \text{ за } t \geq t_0 + T.$$

У посматраном случају је $t_0 = 0$, $U_{C0} = 0$. Струја кроз кондензатор одређена је изразом:

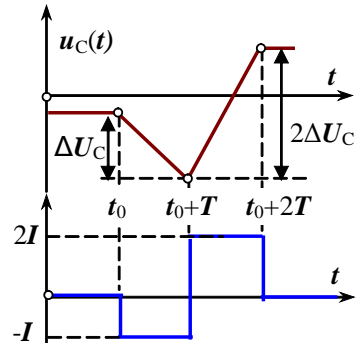
$$i_C(t) = \begin{cases} I > 0 & \text{за } 0 \leq t < T \\ -I < 0 & \text{за } t \geq T \end{cases}, \quad u_C(t) = \begin{cases} \frac{I}{C}t & \text{за } 0 \leq t < T \\ \frac{I}{C}(2T - t) & \text{за } t \geq T \end{cases}.$$

24. На слици је приказан таласни облик напона на крајевима кондензатора. Нацртати таласни облик струје кроз кондензатор.

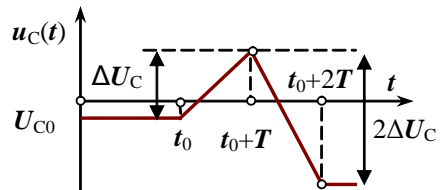


РЕШЕЊЕ

У временским интервалима једнаког трајања, промена напона $u_C(t)$ је двоструко већа при пуњењу него при пражњењу. Нагиб узлазне ивице напона $u_C(t)$, током временског интервала (t_0+T, t_0+2T) , када се кондензатор пуни, двоструко је већи од нагиба силазне ивице током временског интервала (t_0, t_0+T) , када се кондензатор празни. То значи да је интензитет струје којом се кондензатор пуни двоструко већи од интензитета I , струје којом се претходно празнио.



25. На слици је приказан таласни облик напона на крајевима кондензатора. Написати општи израз којим је одређена вредност струје кроз кондензатор.

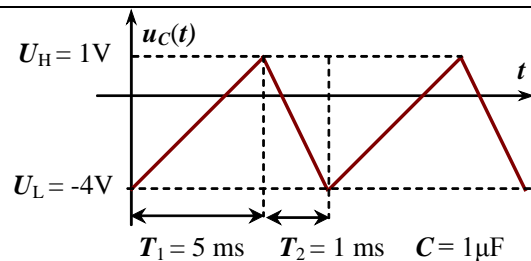


РЕШЕЊЕ

Задатом таласном облику напона одговара струја одређена изразом:

$$i(t) = \begin{cases} I, & \text{за } t_0 \leq t < t_0 + T \\ 0, & \text{за } t < t_0 \text{ и } t > t_0 + 2T \\ -2I, & \text{за } t_0 + T \leq t \leq t_0 + 2T \end{cases}, \quad I = C \frac{\Delta U_C}{T}.$$

26. 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 $u_C(t)$.

Током временског интервала T_1 напон између крајева кондензатора расте, што значи да је струја кроз кондензатор позитивна.

Током временског интервала T_2 напон између крајева кондензатора опада, што значи да је струја кроз кондензатор негативна.

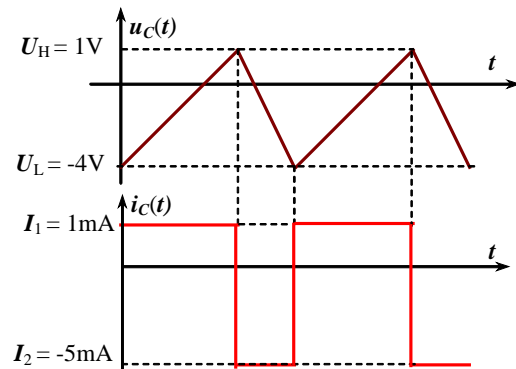
Интензитет струје одређен је изразом:

$$I = C \frac{\Delta U}{\Delta T},$$

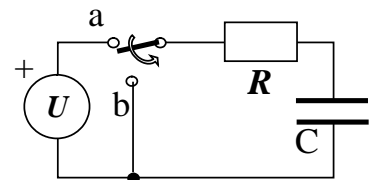
на основу којег следи:

$$I_1 = C \frac{U_H - U_L}{T_1} = 1 \text{ mA},$$

$$I_2 = C \frac{U_L - U_H}{T_2} = -5 \text{ mA}$$



27. Под претпоставком да је у колу приказаном на слици, прекидач S био у положају “а” довољно дуго, да је у почетном тренутку, након пребацивања у положај “б”, напон на крајевима кондензатора једнак напону извора U , одредити трајање временског интервала t_p потребног да, након пребацивања прекидача из положаја “а” у положај “б”, напон на крајевима кондензатора достигне вредност 100 mV .



$$U = 10 \text{ V}, C = 2.2 \text{ nF}, R = 39 \text{ k}\Omega.$$

РЕШЕЊЕ

Према претпоставци, након пребацивања у положај “б”, почетна вредност напона на крајевима кондензатора једнака U .

$$u_C(0) = U.$$

Струја којом се кондензатор празни, кроз отпорник чија је отпорност једнака R , опада од почетне вредности I_0 :

$$I_0 = i_C(0) = \frac{U}{R},$$

ка нули као коначној вредности. Када је кондензатор испразњен, електрична енергија, коју је претходно примио из извора напона U , претворена је у топлоту Џуловим ефектом у отпорнику, кроз који се кондензатор испразнио.

Функција $i(t)$, којом је представљена вредност струје кроз кондензатор током прелазног процеса пражњења, има експоненцијални облик:

$$i_C(t) = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Вредност напона $u_C(t)$ се такође мења по експоненцијалном закону, од почетне вредности U , ка нули као граничној вредности када време t тежи бесконачности:

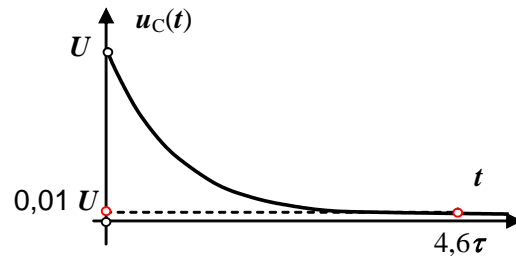
$$u_C(t) = R i_C(t) = U e^{-\frac{t}{RC}}$$

На основу задатог услова:

$$u_C(t) = U e^{-\frac{t_p}{RC}} = 0,01 U,$$

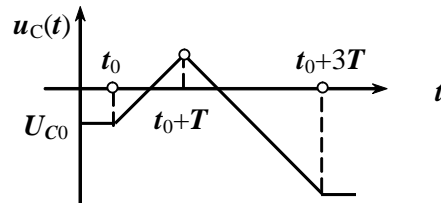
следи:

$$t_p = RC \ln 100 \cong 4,6 RC \approx 395 \mu s.$$



При пражњењу кондензатора кроз отпорник сталне отпорности, временски интервал потребан да се напон између крајева кондензатора смањи до 1% почетне вредности, приближно је 4,6 пута дужи од интервала који одговара временској константи кола $\tau = RC$.

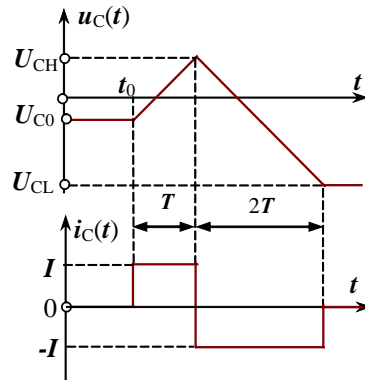
28. На слици је приказан таласни облик напона на крајевима кондензатора. Нацртати таласни облик струје кроз кондензатор.



РЕШЕЊЕ

Када се напон између крајева кондензатора не мења, струја кроз кондензатор је једнака нули.

Током временског интервала $(t_0, t_0 + T)$ напон на кондензатору расте (кондензатор се пуни). Притом је брзина пораста напона константна: функција $u_C(t)$ има сталан, позитиван нагиб. То значи да је струја, I , која у том временском интервалу тече кроз кондензатор, стална и позитивна.



Током временског интервала $(t_0 + T, t_0 + 3T)$ напон на кондензатору опада (кондензатор се празни). Брзина опадања напона је стална, по интензитету једнака брзини пораста у претходном интервалу. Струја која протиче кроз кондензатор је $-I$.

Након тренутка $t_0 + 3T$ напон u_C се не мења: струја кроз кондензатор је једнака нули.

29. 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

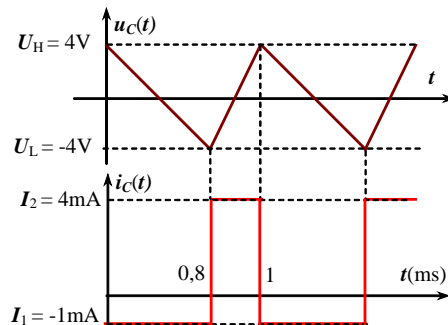
Током временских и интервала T_1 и T_2 напон $u_C(t)$ представља линеарну функцију времена. Одговарајуће струје I_1 и I_2 су сталне. Интензитет струје кроз кондензатор одређеном је брзином промене напона између његових крајева

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{I \Delta T}{\Delta U},$$

$$\Delta U = U_H - U_L = 8 \text{ V},$$

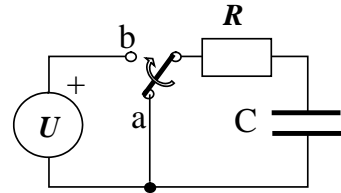
$$T_1 = C \left| \frac{\Delta U}{I_1} \right| = 0,8 \text{ ms},$$

$$T_2 = C \left| \frac{\Delta U}{I_2} \right| = 0,2 \text{ ms}.$$



30. За коло приказано на слици, може се сматрати да је прекидач био довољно дуго у положају “а” да је у почетном тренутку, након пребацивања у положај “b”, напон на крајевима кондензатора једнак нули.

Одредити трајање временског интервала довољног да, након пребацивања прекидача из положаја “а” 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

Напон између крајева кондензатора, који се кроз отпорник R , пуни из извора сталног напона U , при чему је почетна вредност напона на кондензатору једнака нули, мења се у времену по експоненцијалном закону. Облик функције $u_c(t)$ дефинисан је изразом:

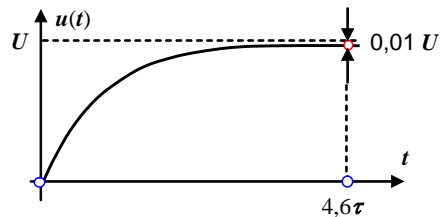
$$u = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau = RC$$

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:

$$t_p = \tau \ln \frac{U}{U - U_p} = \tau \ln 100 \cong 476 \text{ ms}.$$



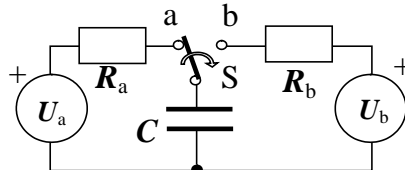
Временски интервал:

$$T_p = 4,7 RC,$$

довољан је да се оствари више од 99% коначне (укупне) промене напона на крајевима кондензатора капацитивности C , који се пуни(празни) кроз отпорник отпорности R .

31. За коло приказано на слици, под претпоставком да је прекидач S био довољно дуго у положају “а”, тако да се у тренутку непосредно пре његовог пребацивања у положај “б”, пад напона на отпорнику R_a може занемарити, написати израз којим је одређена вредност напона на крајевима кондензатора C , након пребацивања прекидача из положаја “а” у положај “б”.

$$U_b > U_a$$



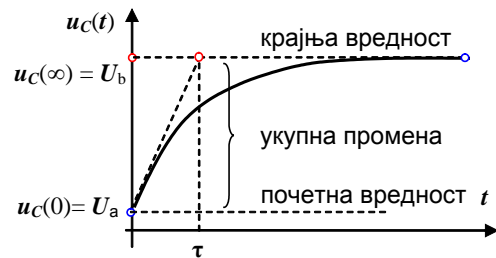
РЕШЕЊЕ

Након промене стања прекидача, у колу, које образују кондензатор C , отпорник R_b и извор напона U_b , започиње прелазни процес који траје све док постоји разлика између потенцијала крајева отпорника R_b .

Вредност напона $u_C(t)$ се мења по експоненцијалном закону, од почетне вредности U_a , ка вредности U_b :

$$u_C(t) = U_a + (U_b - U_a)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

$$u_C(0) = U_a$$

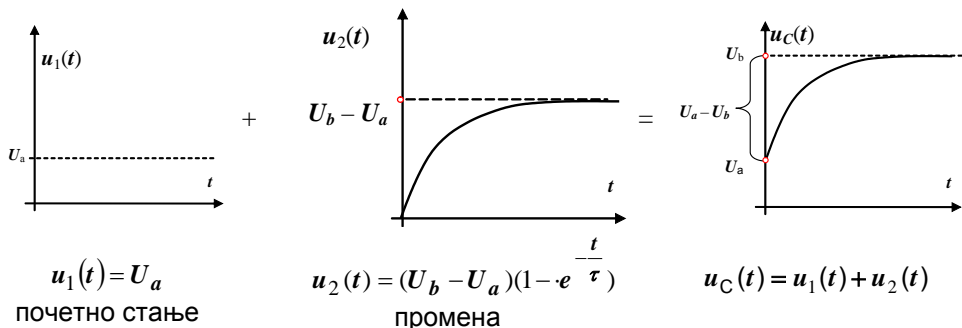


Геометријска анализа

У затвореном колу које садржи извор сталног напона, отпорник и кондензатор, функција којом се описује напон на крајевима кондензатора може се представити као збир две функције:

- константе (непроменљиве у времену), која представља почетно стање напона на крајевима кондензатора, $u_C(0) = U_a$; и
- експоненцијалне функције, $\Delta u_C(t)$, која представља промену напона $u_C(t)$ током процеса допуњавања кондензатора за напон $U_b - U_a$.

$$u_C(t) = u_C(0) + \Delta u_C(t).$$



НАПОМЕНА

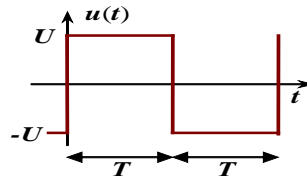
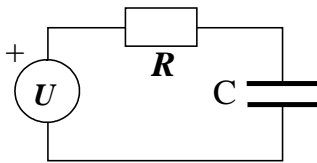
До истоветног резултата се долази и ако се напон на крајевима кондензатора посматра као разлика коначног стања напона на крајевима кондензатора, $u_C(\infty) = U_b$, и експоненцијалне функције, $\delta u_C(t)$, која представља разлику тренутне и коначне вредности (која се доводи до нуле процесом допуњавања кондензатора):

$$u_C(t) = u_C(\infty) - \delta u_C(t),$$

$$\delta u_C(t) = (U_b - U_a) e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

32. За коло приказано на слици:

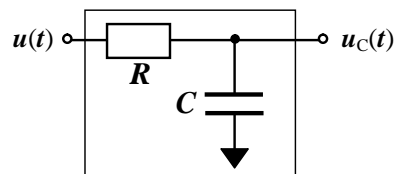
- нацртати таласни облик напона на крајевима кондензатора када напон на излазу генератора сигнала представља периодичну функцију времена, симетричног правоугаоног таласног облика, који је приказан на слици, при чему је $\tau = RC = T$;
- одредити амплитуду излазног сигнала.



РЕШЕЊЕ

Посматрано коло представља линеаран систем са једним улазом, $u(t)$ и једним излазом, $u_C(t)$. Средња вредност излазног напона једнака је средњој вредности улазног напона.

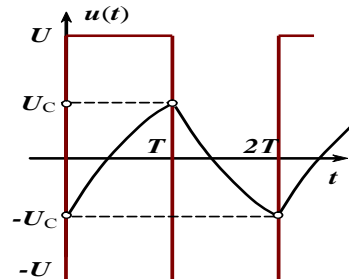
$$\overline{u_C(t)} = \overline{u(t)} = 0$$



а) У стационарном стању, излазни сигнал је такође периодичан, исте учестаности као и улазни сигнал, симетричног таласног облика.

Када је улазни напон $u(t)$ позитиван, излазни напон $u_C(t)$ расте по експоненцијалном закону од почетне вредности $-U_C$ ка напону U .

Када је улазни напон негативан, напон на излазу опада по експоненцијалном закону од почетне вредности U_C ка напону $-U$.



б) Током позитивне полупериоде улазног напона вредност напона $u_C(t)$ одређена је изразом:

$$u_C(t) = -U_C + (U + U_C)\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

На основу услова:

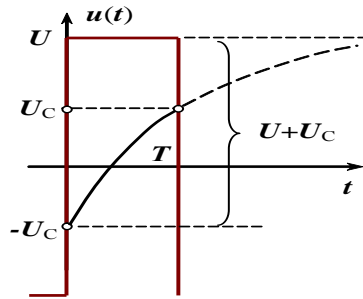
$$u_C(T) = U_C$$

добива се:

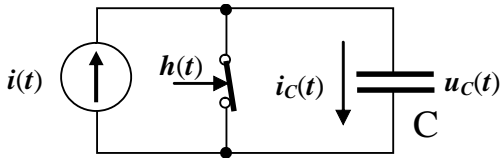
$$(U + U_C)\left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right) = 2U_C,$$

одакле следи:

$$U_C = \frac{e-1}{e+1}U.$$



33. За коло приказано на слици, одредити општи израз за напон на крајевима савреног (идеалног) кондензатора, ако струја $i(t)$ представља синусну функцију времена.



$$i(t) = I \sin \alpha t,$$

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{за } t \geq 0 \\ 0 & \text{за } t < 0 \end{cases}$$

РЕШЕЊЕ

Према дефиницији, прираштај напона на крајевима савреног кондензатора, du_C , сразмеран је прираштају наелектрисања, dq , а обрнуто сразмеран капацитивности C :

$$du_C = \frac{1}{C} dq.$$

Према дефиницији, интензитет електричне струје једнак је количнику количине пренетог наелектрисања и прираштаја времена у којем је она пренета:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

На основу претходних једначина следи:

$$u_C(t) = U_{C0} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt.$$

где је U_{C0} вредност напона $u_C(t)$ у почетном тренутку $t = 0$.

Прекидач у посматраном колу се отвара у почетном тренутку $t = 0$ када је интензитет струје коју даје генератор струје, једнак нули:

$$i_C(t) = h(t) \cdot i(t), \quad h(t) = \begin{cases} 1 & \text{за } t \geq 0 \\ 0 & \text{за } t < 0 \end{cases}$$

За напон на крајевима кондензатора након отварања прекидача важи:

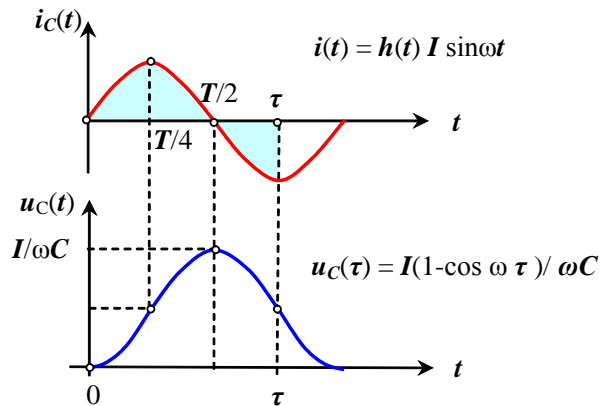
$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = \frac{I}{C} \int_0^t \sin \omega t dt,$$

одакле следи:

$$u_C(t) = \frac{I}{\omega C} (-\cos \omega t) \Big|_0^t + U_{C0} = \frac{I}{\omega C} (1 - \cos \omega t).$$

.Наизменична компонента напона на крајевима кондензатора фазно заостаје за струјом која пуни кондензатор за угао $\pi/2$ (касни за $T/4$).

Таласни облик напона $u_C(t)$ приказан је на слици.



34. Одредити температуру отпорника чија је чија је отпорност једнака 250Ω кроз који протиче струја од 20 mA , ако је температура околине $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, а температурска отпорност елемента $200 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$.

РЕШЕЊЕ

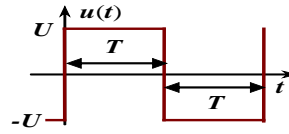
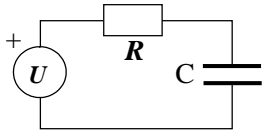
Снага дисипације једнака је:

$$P = UI = RI^2 = 250 \Omega (20 \text{ mA})^2 = 250 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \text{ W} = 0,1 \text{ W}.$$

Температура елемента једнака је:

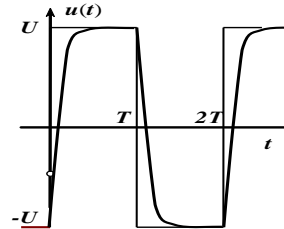
$$T = T_a + \theta P = -20 \text{ }^\circ\text{C} + 200 \cdot 0,1 \text{ }^\circ\text{C} = 0 \text{ }^\circ\text{C}.$$

35. За коло приказано на слици, нацртати таласни облик напона на крајевима кондензатора када напон на излазу генератора сигнала представља периодичну функцију времена, симетричног правоугаоног таласног облика, који је приказан на слици, при чему је $T = 10 RC$.

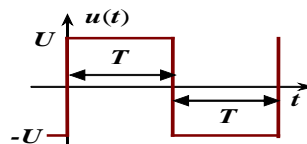
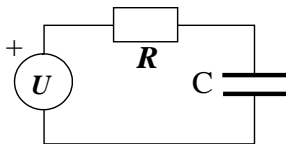


РЕШЕЊЕ

Када је трајање полупериоде улазног сигнала десет пута дужи од временске константе кола, може се сматрати да је на крају сваке полупериоде процес пуњења односно пражњења кондензатора у потпуности завршен. Амплитуда излазних импулса је једнака амплитуди улазних.



36. За коло приказано на слици, нацртати таласни облик напона на крајевима кондензатора када напон на излазу генератора сигнала представља периодичну функцију времена, симетричног правоугаоног таласног облика, који је приказан на слици, при чему је $T = 0,1 RC$.

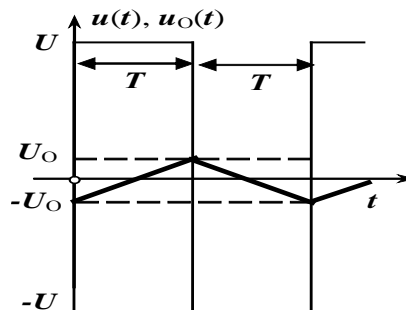


РЕШЕЊЕ

Када је трајање полупериоде улазног сигнала десет пута краће од временске константе кола, промена напона на крајевима кондензатора су мале. Напон $u(t)$ представља наизменичну величину, па је и средња вредност излазног напона $u_0(t)$ једнака нули. Може се сматрати да се кондензатор пуни односно празни сталном струјом:

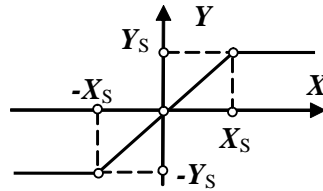
$$i_C = \frac{U - u_0}{R} \approx \frac{U}{R}.$$

$$\Delta u_0 = \frac{I_C T}{C} = \frac{U}{RC} T = 2U_0.$$



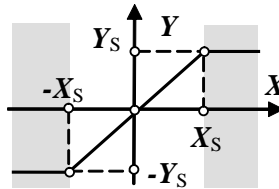
2.2. КАРАКТЕРИСТИКА ПРЕНОСА

37. Написати аналитички израз за статичку карактеристику преноса система чији је графички приказ дат на слици.



РЕШЕЊЕ

Посматрана карактеристика $Y(X)$ представља у деловима линеарну функцију чија је област дефинисаности подељена на три дела.



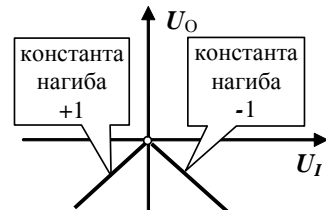
$$Y = \begin{cases} Y_S & \text{за } X > X_S \\ X \frac{Y_S}{X_S} & \text{за } |X| \leq X_S \\ -Y_S & \text{за } X < -X_S \end{cases}$$

Аналитички израз функцију $Y(X)$ се може представити и у облику:

$$Y = \begin{cases} kX \frac{Y_S}{X_S} & \text{за } |X| \leq X_S \\ Y_S \operatorname{sgn} X & \text{за } |X| > X_S \end{cases}, k = \frac{Y_S}{X_S}, \operatorname{sgn} X = \begin{cases} 1 & \text{за } X > 0 \\ -1 & \text{за } X < 0 \end{cases}$$

38. За коло чија је статичка карактеристика улаз-излаз, $U_O(U)$, приказана на слици:

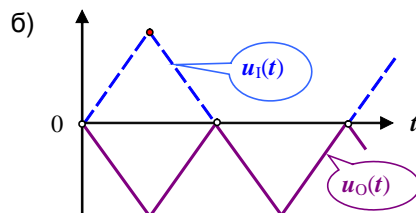
- написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;
- нацртати временски дијаграм сигнала, $u_O(t)$, који се добија на излазу кола када на његовом улазу делује напон $u_I(t)$ симетричног троугаоног таласног облика.



РЕШЕЊЕ

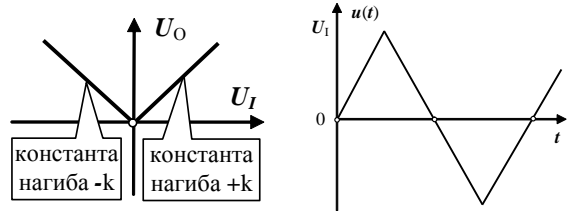
$$a) U_O = \begin{cases} -U_I & \text{за } U_I \geq 0 \\ U_I & \text{за } U_I < 0 \end{cases} = -|U_I|$$

Коло остварује операцију добијања апсолутне вредности улазног сигнала.



39. За коло чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:
 а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) ако је $k = 2$, нацртати временски дијаграм сигнала, $u_O(t)$, који се добија на излазу кола када на његовом улазу делује сигнал чији је таласни облик приказан на слици.

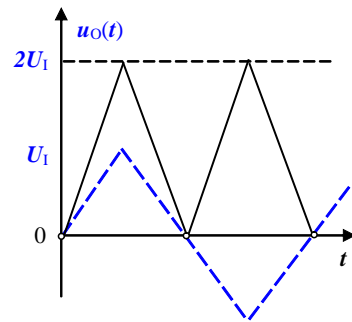


РЕШЕЊЕ

а)

$$U_O = \begin{cases} kU_I & \text{за } U_I \geq 0 \\ -kU_I & \text{за } U_I < 0 \end{cases} = k|U_I|$$

б)

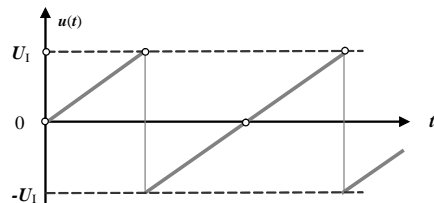


40. За коло чија је карактеристика улаз-излаз, $U_O(U)$, одређена изразом:

$$U_O = \begin{cases} -2U & \text{за } U \geq 0 \\ 2U & \text{за } U < 0 \end{cases}$$

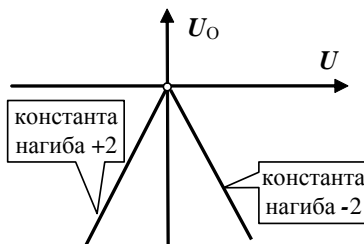
а) графички приказати карактеристику кола:

б) нацртати временски дијаграм сигнала, $u_O(t)$, који се добија на излазу кола када на његовом улазу делује сигнал чији је таласни облик приказан на слици.

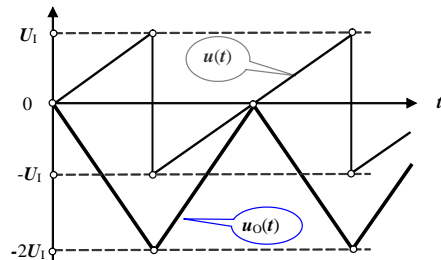


РЕШЕЊЕ

а)



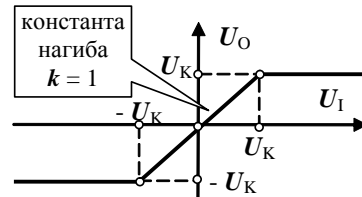
б)



41. За коло чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:

а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) нацртати временски дијаграм сигнала на излазу кола, $u_O(t)$, када на улазу делује сигнал симетричног троугаоног таласног облика амплитуде 10 V, ако је $U_K = 5$ V.

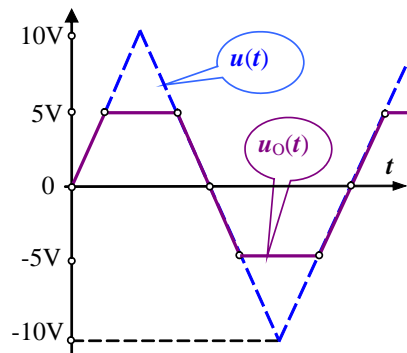


РЕШЕЊЕ

а)

$$U_O = \begin{cases} U_K & \text{за } U > U_K \\ U & \text{за } |U| \leq U_K \\ -U_K & \text{за } U < -U_K \end{cases}$$

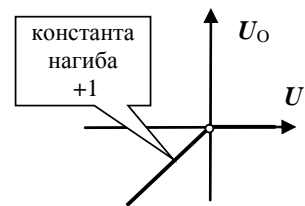
б)



42. За коло чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:

а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) нацртати временски дијаграм сигнала на излазу кола, $u_O(t)$, на чијем улазу делује сигнал симетричног троугаоног таласног облика.

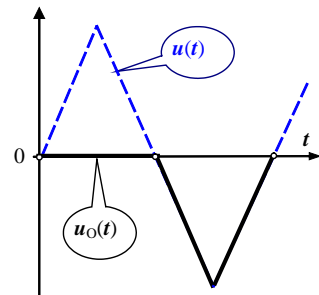


РЕШЕЊЕ

а)

$$U_O = \begin{cases} 0 & \text{за } U \geq 0 \\ U & \text{за } U < 0 \end{cases}$$

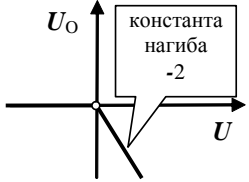
б)



43. За коло, чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:

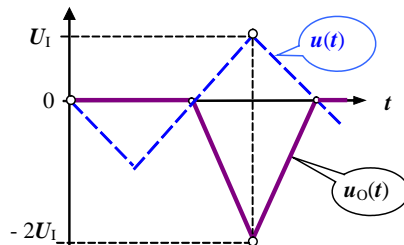
а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) нацртати временски дијаграм сигнала на излазу кола на чијем улазу делује периодични сигнал симетричног троугаоног таласног облика, чија је амплитуда U_I .



РЕШЕЊЕ

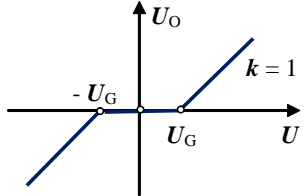
а)
$$U_O = \begin{cases} -2U & \text{за } U \geq 0 \\ 0 & \text{за } U < 0 \end{cases}$$
 б)



44. За коло чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:

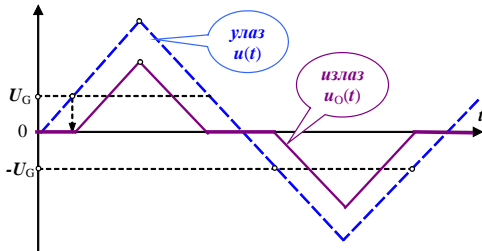
а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) нацртати временски дијаграм сигнала на излазу кола на чијем улазу делује сигнал симетричног троугаоног таласног облика, чија је амплитуда U_I већа од напона U_G .



РЕШЕЊЕ

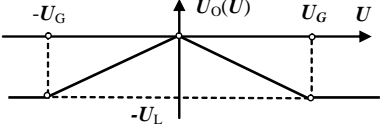
а)
$$U_O = \begin{cases} U - U_G & \text{за } U \geq U_G \\ 0 & \text{за } |U| \leq U_G \\ U + U_G & \text{за } U \leq -U_G \end{cases}$$
 б)



45. За коло чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:

а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) нацртати временски дијаграм сигнала на излазу кола на чијем улазу делује сигнал симетричног троугаоног таласног облика, чија је амплитуда U_I већа од U_G .

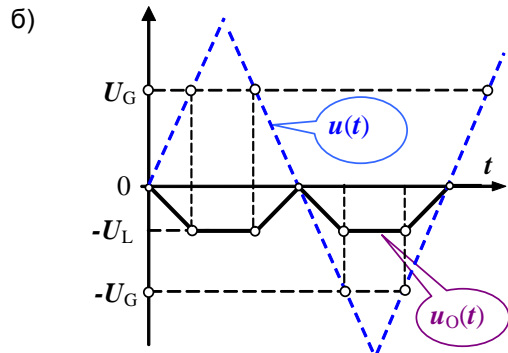


РЕШЕЊЕ

а)

$$U_O = \begin{cases} -k|U| & \text{за } |U| \leq U_G \\ -U_L & \text{за } |U| > U_G \end{cases},$$

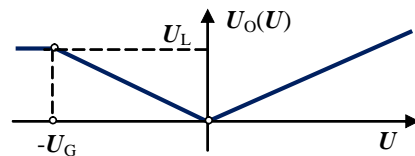
$$k = \frac{U_L}{U_G}$$



46. За коло чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:

а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) нацртати временски дијаграм сигнала на излазу кола на чијем улазу делује сигнал симетричног троугаоног таласног облика, чија је амплитуда U_1 већа од U_G .

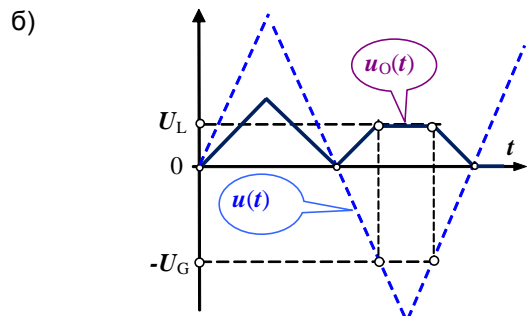


РЕШЕЊЕ

а)

$$U_O = \begin{cases} k|U| & \text{за } U \geq -U_G \\ U_L & \text{за } U < -U_G \end{cases},$$

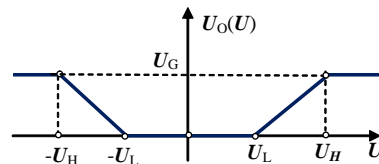
$$k = \frac{U_L}{U_G}$$



47. За коло чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:

а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) нацртати временски дијаграм сигнала на излазу кола на чијем улазу делује сигнал симетричног троугаоног таласног облика, чија је амплитуда U_1 већа од U_H .

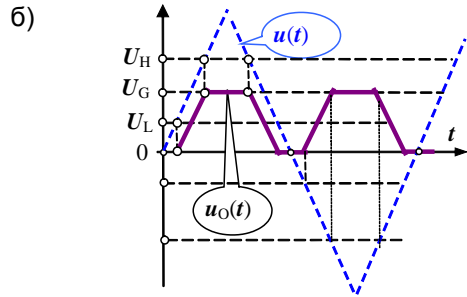


РЕШЕЊЕ

а)

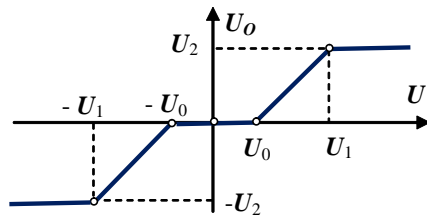
$$U_0 = \begin{cases} U_G & |U| > U_H \\ k(|U| - U_L) & U_L < |U| \leq U_H \\ 0 & \text{за } |U| \leq U_L \end{cases},$$

$$k = \frac{U_G}{U_H - U_L}$$



48. За коло чија је карактеристика улаз-излаз приказана на слици:

- а) написати општи израз за вредност напона $U_0(U)$ на излазу кола;
- б) нацртати временски дијаграм сигнала на излазу кола, $u_0(t)$, ако на улазу делује сигнал симетричног троугаоног таласног облика, чија је амплитуда U_1 већа од U_1 .

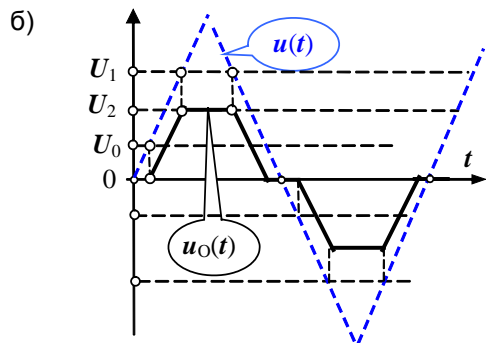


РЕШЕЊЕ

а)

$$U_0 = \begin{cases} U_2 & U > U_1 \\ k(U - U_0) & U_0 \leq U \leq U_1 \\ 0 & \text{за } |U| \leq U_0 \\ k(U + U_0) & -U_1 \leq U \leq -U_0 \\ -U_2 & U < -U_1 \end{cases},$$

$$k = \frac{U_2}{U_1 - U_0}$$



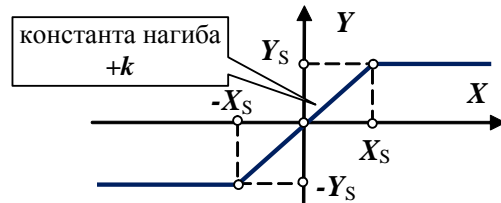
49. Нацртати графички приказ статичке карактеристике преноса система задате изразом:

$$Y = \begin{cases} Y_S & \text{за } X > X_S \\ kX & \text{за } |X| \leq X_S \\ -Y_S & \text{за } X < -X_S \end{cases}$$

РЕШЕЊЕ

Функција $Y(X)$ је непрекидна
уколико је испуњен услов:

$$Y_S = kX_S.$$



50. Нацртати графички приказ статичке карактеристике преноса система задате изразом:

$$U_O = \begin{cases} U_{OH} & U > U_{SH} \\ k_1(U - U_{TH}) & U_{TH} \leq U \leq U_{SH} \\ 0 & \text{за } U_{TL} \leq U \leq U_{TH} \\ k_2(U + U_{TL}) & U_{TL} \leq U \leq U_{SL} \\ U_{OL} & U < U_{SL} \end{cases}, \quad k_2 > k_1 > 0$$

РЕШЕЊЕ

Функција $U_O(U)$ је непрекидна уколико су испуњени услови:

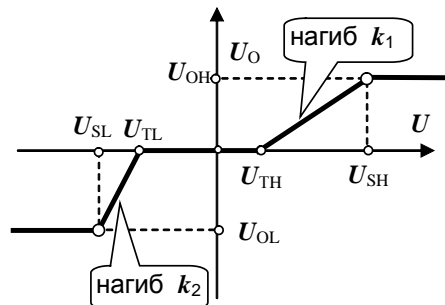
$$U_{OH} = k_1(U_{SH} - U_{TH}) \quad \text{и}$$

$$U_{OL} = k_2(U_{SL} - U_{TL}).$$

На слици је приказан график функције $U_O(U)$ за случај:

$$0 < U_{TH} < U_{SH},$$

$$U_{SL} < U_{TL} < 0.$$



2.3. PN-СПОЈ

51. Ако је инверзна струја засићења PN -споја једнака 10 pA , одредити струју кроз PN -спој на собној температури, када је напон поларизације једнак:

- а) 260 mV б) 520 mV

РЕШЕЊЕ

Вредност интензитета електричне струје, којом се наелектрисање преноси кроз PN -спој при поларизацији напонам U , описује се изразом:

$$I = I_S (e^{\frac{U}{U_T}} - 1),$$

у којем величина I_S представља инверзну струју засићења PN -споја:

$$\lim_{U \rightarrow \infty} I = -I_S.$$

Величина U_T , која се назива термички напон (електрични еквивалент температуре), дефинисана је формулом:

$$U_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11600} (\text{V}).$$

На собној температури ($T = 300 \text{ K}$), термички напон U_T је приближно једнак 26 mV , одакле следи:

а) $I(260 \text{ mV}) \approx 0,22 \text{ }\mu\text{A}$,

б) $I(520 \text{ mV}) \approx 4,8 \text{ mA}$.

52. Одредити општи израз за вредност динамичке отпорности PN -споја.

РЕШЕЊЕ

Динамичка отпорност, r , елемента који има само два прикључка (један приступ) дефинисана је изразом:

$$r = \frac{dU}{dI},$$

у којем U представља напон између његових прикључака, а I струју кроз елемент.

На основу израза за вредност интензитета струје кроз PN -спој који је поларисан напонем U :

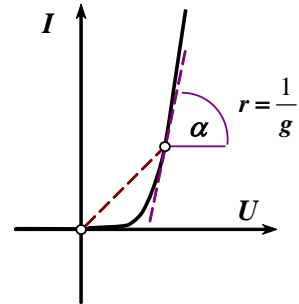
$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right),$$

може се одредити израз за динамичку проводност g :

$$g = \frac{dI}{dU} = \frac{I_S e^{\frac{U}{U_T}}}{U_T} = \frac{I + I_S}{U_T},$$

на основу којег следи:

$$r = \frac{1}{g} = \frac{U_T}{I + I_S}.$$



53. Одредити вредност динамичке отпорности силицијумског PN -споја на собној температури, при струји од 2 mA.

РЕШЕЊЕ

При напону $U \gg U_T$ се може сматрати да је динамичка отпорност PN -споја обрнуто сразмерна струји кроз спој:

$$r = \frac{U_T}{I + I_S} \cong \frac{U_T}{I},$$

где је U_T термички напон, а I струја кроз спој.

На собној температури (300 K), термички напон U_T је приближно једнак 26 mV, одакле следи:

$$r \cong \frac{U_T}{I} = \frac{26 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = 13 \Omega.$$

54. Одредити општи израз за однос статичке и динамичке отпорности PN -споја при поларизацији напоном $U \gg U_T$.

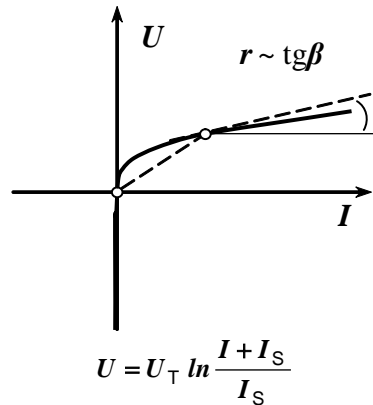
РЕШЕЊЕ

Према дефиницији, статичка отпорност PN -споја једнака је количнику напона и струје:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Динамичка отпорност представља нагиб $U(I)$ карактеристике диоде:

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{U_T}{I + I_S}.$$



При поларизацији напоном $U \gg U_T$ може се сматрати да је динамичка отпорност PN -споја обрнуто сразмерна струји кроз спој.

$$r = \frac{U_T}{I + I_S} \cong \frac{U_T}{I}, (U \gg U_T \Rightarrow I \gg I_S)$$

Однос статичке и динамичке отпорности при $U \gg U_T$ приближно је једнак односу напона U и U_T :

$$\frac{R}{r} \cong \frac{U}{U_T}.$$

55. Ако је сачинилац промене инверзне струје засићења PN -споја у зависности од промене његове температуре сталан и једнак $0,07 \text{ } 1/^\circ\text{C}$, одредити вредност релативног повећања инверзне струје засићења PN -споја при промени температуре за $10 \text{ } ^\circ\text{C}$.

РЕШЕЊЕ

Сачинилац промене неке величине у зависности од промене температуре (температурски коефицијент TC) се дефинише као релативна промена посматране величине по јединици температуре:

$$TC = \frac{1}{I} \frac{dI}{dt}.$$

Полазећи од задате вредности за TC инверзне струје засићења PN -споја:

$$\frac{dI}{Idt} = 0,07 \frac{1}{^{\circ}C},$$

следи:

$$\frac{dI}{I} = 0,07 dt .$$

Интеграцијом обе стране ове једначине, у границама које одговарају почетном и крајњем стању долази се до једначине:

$$\int_{I_T}^{I_{T+10}} \frac{dI}{I} = 0,07 \int_T^{T+10} dt .$$

Интеграцијом леве стране ове једначине у опсегу струје од I_T до I_{T+10} добија се:

$$\int_{I_T}^{I_{T+10}} \frac{dI}{I} = \ln I \Big|_{I_T}^{I_{T+10}} = \ln I_{T+10} - \ln I_T = \ln \frac{I_{T+10}}{I_T} .$$

Интеграцијом десне стране полазне једначине у опсегу температуре од T до $T+10$ добија се:

$$0,07 \int_T^{T+10} dt = 0,07t \Big|_T^{T+10} = 0,7$$

одакле следи:

$$I_{T+10} = e^{0,07} I_T = 2,013 I_T .$$

При промени температуре PN -споја за десет степени, инверзна струја засићења се приближно удвостручује.

56. Ако је сачинилац промене инверзне струје засићења у зависности од промене температуре PN -споја једнак $7 \text{ } \%/^{\circ}C$, приближно одредити релативно повећање ове струје при промени температуре за $10 \text{ } ^{\circ}C$.

Ако је на почетној температури T вредност инверзне струје засићења једнака I_T , након пораста температуре за један степен, нова вредност струје I_{T+1} биће једнака:

$$I_{T+1} = 1,07 I_T.$$

При сваком порасту температуре за један степен, инверзна струја се повећава за фактор 1,07:

$$I_{T+2} = 1,07 \cdot I_{T+1} = 1,07 \cdot 1,07 \cdot I_T = (1,07)^2 I_T.$$

Према томе, биће:

$$I_{T+10} = 1,07 \cdots 1,07 \cdot I_T = (1,07)^{10} I_T = 1,967 I_T,$$

што је у сагласности са решењем претходног задатка.

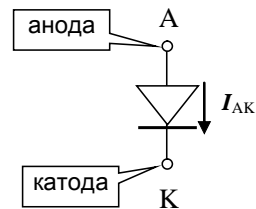
ЛИТЕРАТУРА

- 1 Међународни електротехнички речник, Савезни завод за стандардизацију, 1996.
- 2 Electronics, Encyclopedia Britannica, www.britannica.com

2. ДИОДНА КОЛА

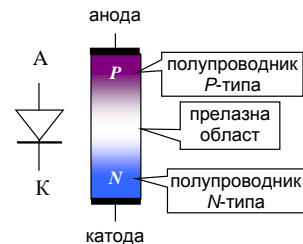
2.1. ТЕОРИЈСКА ОСНОВА

Диода је пасивни елемент са два краја (једним приступом) који се одликује изразито нелинеарном везом напона између крајева диоде и струје која кроз њу протиче. Независно од природе процеса преношења наелектрисања кроз диоду, њено основно својство је несиметрична проводност, зависна од смера струје.



При директној поларизацији проводност диоде је велика - диода “пропушта струју” од прикључка који се назива “анода: ка прикључку који се назива “катода”. При инверзној поларизацији проводност диоде је мала, диода “не пропушта струју”.

Математички модел диоде описује узајамну зависност вредности напона U_{AK} , који делује између прикључака за аноду и катоду, и струје I_{AK} , која протиче кроз диоду (у односу на референтни смер од аноде према катоди). Статичка карактеристика, $I(U)$, полупроводничке диоде са једним PN -спојем описује се функцијом која има експоненцијални облик:



$$I_{AK} = I_S \left(e^{\frac{U_{AK}}{U_T}} - 1 \right),$$

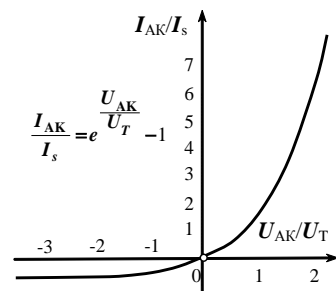
где је I_S инверзна струја засићења PN -споја:

$$I_S = \lim_{U_{AK} \rightarrow -\infty} I_{AK}(U_{AK}),$$

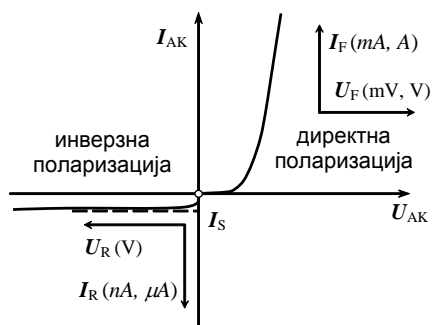
а U_T представља термички напон (електрични еквивалент температуре):

$$U_T = \frac{kT}{q} \cong 26 \text{ mV} @ 300 \text{ K}.$$

Графички приказ ове функције дат је на слици.

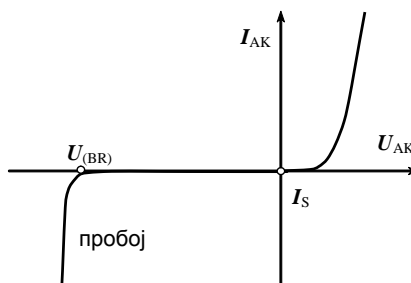


У уобичајеним условима рада, струја која протиче кроз диоду при директној поларизацији ($U_{AK} > 0$) је за неколико редова величине мања од струје која протиче при инверзној поларизацији ($U_{AK} < 0$). Због тога се статичка карактеристика диоде приказује са различитим размерама у првом и трећем квадранту U - I равни.



Уобичајено је да се струја и напон означавају индексима који указују на стање диоде. Индекс "R" (reverse) одговара поларизацији у инверзном (непропусном) смеру. За поларизацију у директном (пропусном) смеру користи се индекс "F" (forward).

При великим вредностима напона инверзне поларизације функција $I_{AK}(U_{AK})$ значајно одступа од аналитичког модела. Нагиб U - I карактеристике постаје веома велики (динамичка отпорност је мала). Ова појава се назива пробој (breakdown). Вредност напона пробоја зависи од својстава материјала од којег је образован PN -спој.

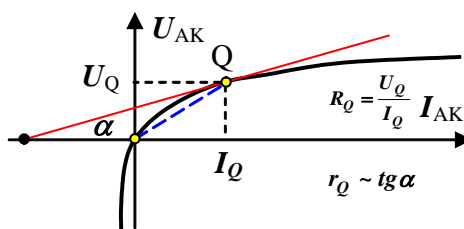


Статичка отпорност диоде дефинисана је количником напона и струје у посматраној тачки:

$$R = \frac{U_{AK}}{I_{AK}}$$

Динамичка отпорност, r , одређена је нагибом I - U карактеристике:

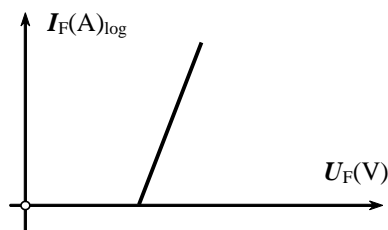
$$r = \frac{dU_{AK}}{dI_{AK}}$$



Понекад се међусобни однос напона и струје приказује у облику:

$$\log I_F \cong \log I_S + 0,434 \frac{U_F}{U_T}$$

којем одговара линеарна функција ако оса струје има логаритамску скалу.

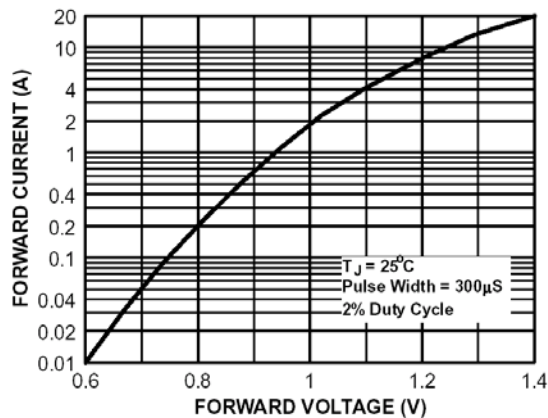


Основне карактеристике неких типичних диода су дате у табели.

Параметар	симбол	јед.	1N4148	1N4007	SSiE44	RD65FV
Највећа средња вредност директне струје	$I_{F(AV)}$	A	0,15	1	35	11745
Директни напон (max)	U_F	V	1 @ 10 mA	1,1 @ 1 A	1,2 @ 50 A	0,75 @ 6,8 kA
Највећа вршна вредност периодичног напона	U_{RRM}	V	100	1 000	1 500	600
Инверзна струја	$I_R @ U_{RRM}$	mA	0,005 max	0,01 max	4	150 max
Највиша дозвољена температура споја	T_J	°C	200	175	175	225
Димензије	$\varnothing \times L$	mm	1,8 × 4	3,5 × 7	16 × 15,2	112,5 × 25

Карактеристични параметри диода

На слици је приказана карактеристика диоде 1N4007 при пубуди импулсима чија је ширина 300 μ s, а период понављања једнак 150 ms.



Математичко моделовање диода

Однос између струја и напона у колу у којем постоји диода одређен је одговарајућим системом једначина од којих је бар једна нелинеарна. Аналитичко решавање подразумева итеративни поступак што захтева примену рачунара. Проблем се поједностављује коришћењем линеаризованих математичких модела $U-I$ карактеристике PN -споја.

Модел савршене диоде

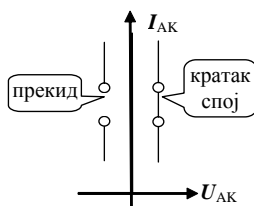
Савршена (идеална) диода је нелинеарни пасивни елемент са два краја чија је отпорност једнака нули, за смер струје од аноде према катоди, односно бесконачно велика, за супротан смер преношења наелектрисања.

- При директној поларизацији, напон између аноде и катодe диоде једнак је нули. Савршена диода тада делује као кратак спој.

- При инверзној поларизацији, струја I_{AK} једнака је нули. Савршена диода тада делује као отворена веза.

$$U_{AK} = 0 \text{ за } I_{AK} \geq 0$$

$$I_{AK} = 0 \text{ за } U_{AK} < 0$$



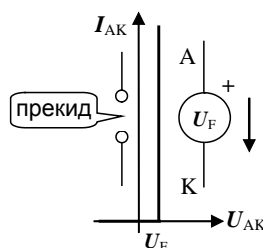
Линеаризовани математички модели стварне диоде

При поларизацији у пропусном смеру напон између аноде и катоде диоде једнак је U_F .

$$U_{AK} = U_F \text{ за } I_{AK} \geq 0$$

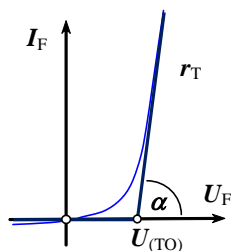
Када је напон између аноде и катоде диоде мањи од U_F , струја кроз диоду једнака је нули. Диода делује као отворена веза.

$$I_{AK} = 0 \text{ за } U_{AK} < U_F$$



Вредност напона U_F зависи од својстава материјала. За силицијумску сигналну диоду 1N4148 U_F је приближно 0,62 V при струји од 1 mA.

IEC-модел диоде



$U_{(TO)}$ **напон прага (threshold voltage)** при директној поларизацији;

r_T **отпорност нагиба (slope resistance)** струјно-напонске карактеристике, при директној поларизацији.

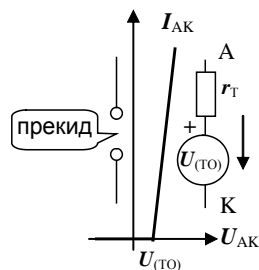
$$r_T = \text{arctg } \alpha$$

При поларизацији у пропусном смеру, напон између аноде и катоде диоде зависи од вредности струје.

$$U_{AK} = U_{(TO)} + r_T I_{AK} \text{ за } I_{AK} \geq 0$$

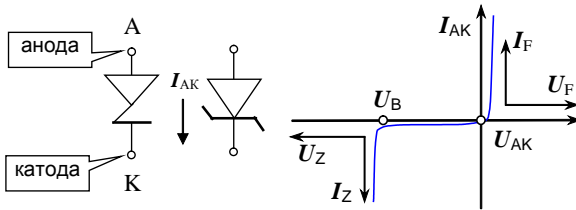
Када је напон између аноде и катоде диоде мањи од $U_{(TO)}$, струја кроз диоду једнака је нули.

$$I_{AK} = 0 \text{ за } U_{AK} < U_{(TO)}$$



Ценер-диода

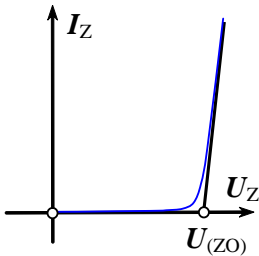
Под називом Ценер-диода (*Zener diode*) подразумевају се полупроводничке диоде намењене за рад у стању пробоја (*breakdown diode*), пројектоване тако да могу да издрже повећану дисипацију у тим условима.



Статичка напонско-струјна (U - I) карактеристика Ценер - диоде.

U_Z Ценеров напон;
 I_Z струја кроз диоду у стању пробоја.

По аналогији са *IEC*-моделом диоде, за Ценер-диоду у области инверзног пробоја, могу се дефинисати напон прага вођења, $U_{(ZO)}$, и отпорност нагиба, r_z .



r_z отпорност нагиба струјно-напонске карактеристике у области инверзног пробоја,

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

$$U_Z = U_{(ZO)} + r_z I_Z.$$

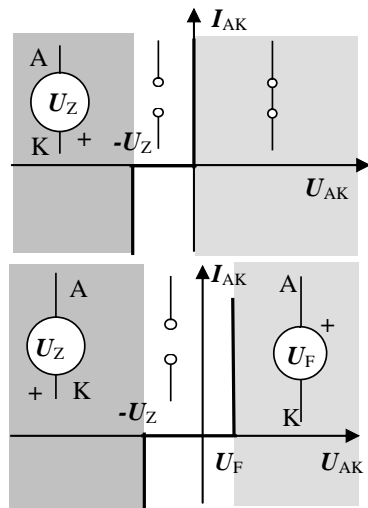
Линеаризовани математички модели Ценер-диоде

А
$$U_{AK} = \begin{cases} 0 & \text{за } I_{AK} > 0 \\ -U_Z & \text{за } I_{AK} < 0 \end{cases}$$

$$I_{AK} = 0 \text{ за } -U_Z \leq U_{AK} \leq 0$$

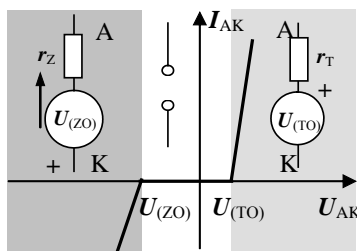
Б
$$U_{AK} = \begin{cases} U_F & \text{за } I_{AK} > 0 \\ -U_Z & \text{за } I_{AK} < 0 \end{cases}$$

$$I_{AK} = 0 \text{ за } -U_Z \leq U_{AK} \leq U_F$$

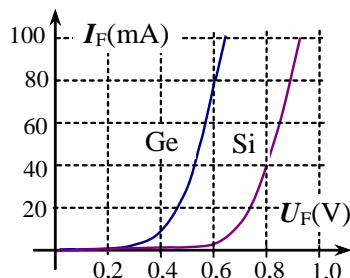


$$\mathbf{B} \quad U_{AK} = \begin{cases} U_{(TO)} + r_T I_{AK} & \text{за } I_{AK} > 0 \\ -U_{(ZO)} + r_Z I_{AK} & \text{за } I_{AK} < 0 \end{cases}$$

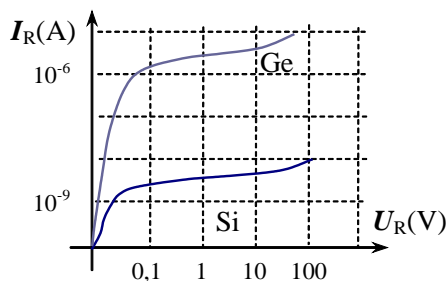
$$I_{AK} = 0 \quad \text{за } -U_{(ZO)} \leq U_{AK} \leq U_{(TO)}$$



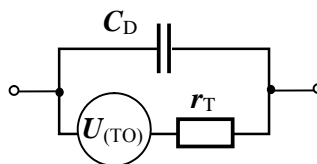
Вредност напона прага зависи од својстава материјала. На слици су приказане упоредне карактеристике германијумског и силицијумског PN -споја при директној поларизацији.



Пад напона на германијумској диоди је мањи од пада напона на одговарајућој диоди израђеној од силицијума, али је инверзна струја засићења око хиљаду пута већа. На слици су приказане упоредне карактеристике германијумског и силицијумског PN -споја при инверзној поларизацији.



У динамичким условима рада када се напон између крајева диоде брзо мења, за мале промене напона U_{AK} еквивалентно коло диоде при поларизацији у проводном смеру садржи и кондензатор којим се моделује капацитивности PN -споја).

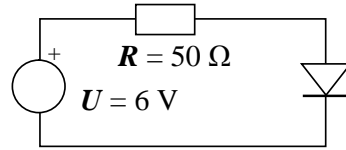


При сталној струји, напон диоде поларисане у проводном смеру, U_F , смањује се са порастом температуре. Обично се као показатељ температурске зависности напона U_F користи приближна вредност:

$$\frac{dU_F}{dT} \approx -2,2 \frac{mV}{^\circ C}$$

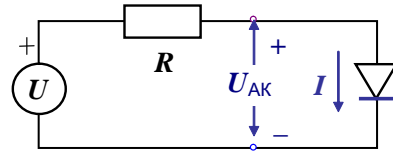
2.2. ОСНОВНА ДИОДНА КОЛА

1. Пад напона на диоди у посматраном колу једнак је 0,92 V. Одредити вредност инверзне струје засићења употребљене диоде.



РЕШЕЊЕ

За посматрано коло са диодом која се, из извора сталног напона U , преко отпорника чија је отпорност R , побуђује струјом I , важи, на основу другог Кирхофовог правила, једначина:



$$U - RI - U_{AK} = 0 \quad (1)$$

у којој U_{AK} представља напон између аноде и катоде диоде.

За задате бројне вредности добија се:

$$I = \frac{U - U_{AK}}{R} = 101,6 \text{ mA} .$$

На основу израза којим се описује веза између вредности струје I , која кроз диоду протиче, и вредности напона U_{AK} , који делује између крајева који представљају аноду и катоду:

$$I = I_s \left(e^{\frac{U_{AK}}{U_T}} - 1 \right) \cong I_s e^{\frac{U_{AK}}{U_T}} \quad (2)$$

следи:

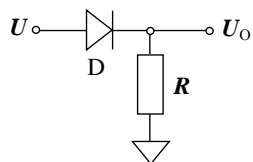
$$I_s \cong I e^{-\frac{U_{AK}}{U_T}} = \frac{U - U_{AK}}{R} e^{-\frac{U_{AK}}{U_T}} .$$

На основу задате вредности за напон U_{AK} и израчунате вредности за струју I која одговара том напону у посматраном колу, добија се:

$$I_s \cong I e^{-\frac{U_{AK}}{U_T}} \cong 100 e^{-\frac{920}{26}} \approx 0,43 \cdot 10^{-15} \text{ A} .$$

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

- одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;
- нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$.



РЕШЕЊЕ

а) Могућа су два стања у посматраном колу:

- диода води,
- диода не води.

Савршена диода води, ако је поларисана у проводном смеру (струја кроз савршену диоду може да тече само у смеру од аноде ка катоди). Да би то било остварено, у посматраном колу напон U треба да буде позитиван. Пад напона између крајева директно поларисане савршене диоде је једнак нули, диода која води представља кратак спој, као што је приказано на слици. То значи да је за $U \geq 0$ излазни напон једнак улазном напону:

$$U \geq 0 \Rightarrow U_O = U .$$

Ако је напон U негативан, диода је инверзно поларисана, струја кроз диоду и отпорник R је једнака нули. Диода представља прекид, а то значи да је и излазни напон U_O тада једнак нули:

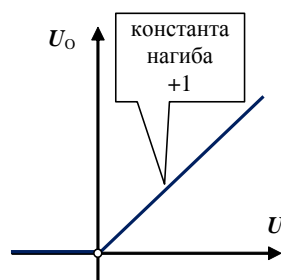
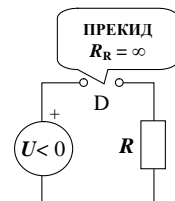
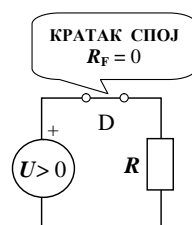
$$U < 0 \Rightarrow 0 .$$

На основу претходног разматрања, карактеристика преноса, $U_O(U)$, може се представити изразом:

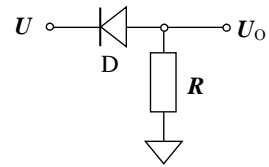
$$U_O = \begin{cases} U & \text{за } U \geq 0 \\ 0 & \text{за } U < 0 \end{cases} .$$

б) У посматраном колу диода делује као "усмерач" (*rectifier*) који "пропушта" само сигнал представљен позитивним напоном. Карактеристика преноса, $U_O(U)$, приказана је на слици. Константа нагиба (коэффициент правца) карактеристике за $U > 0$ једнака је јединици (улазни напон се преноси на излаз):

$$k = \frac{\Delta U_O}{\Delta U} = 1 .$$



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



- a) одредити општи израз за вредност напона $U_o(U)$ на излазу кола;
 б) нацртати карактеристику преноса, $U_o(U)$.

РЕШЕЊЕ

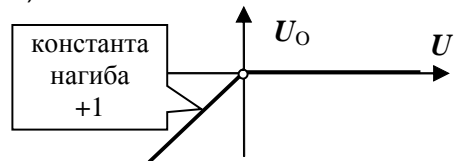
Ако је улазни напон позитиван, диода је инверзно поларисана. Струја кроз диоду, а то значи и струја кроз отпорник R , једнака је нули, па је и излазни напон U_o једнак нули.

Да би напон U_o био различит од нуле, потребно је да струја тече кроз отпорник R . Да то било остварено у посматраном колу, напон U треба да буде негативан.

a)

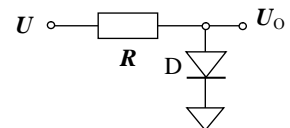
$$U_o = \begin{cases} 0 & \text{за } U \geq 0 \\ U & \text{за } U < 0 \end{cases}$$

б)



У посматраном колу, диода делује као једностранни (полуталасни, *half-wave*) усмераач који “пропушта” улазни напон ако је негативан.

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



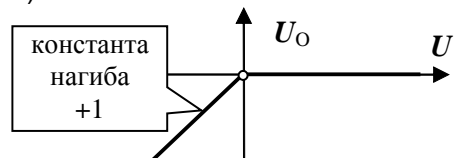
- a) написати општи израз за вредност напона $U_o(U)$ на излазу кола;
 б) нацртати карактеристику преноса, $U_o(U)$.

РЕШЕЊЕ

a)

$$U_o = \begin{cases} 0 & \text{за } U \geq 0 \\ U & \text{за } U < 0 \end{cases}$$

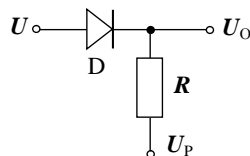
б)



У посматраном колу, диода делује као “ограничавач” (*limiter*) који “не дозвољава” да излазни напон буде већи од нуле.

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

- одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;
- нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$,
- нацртати дијаграм таласног облика излазног напона, ако улазни напон има симетричан троугаони таласни облик амплитуде $2U_P$.

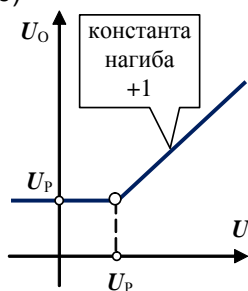


РЕШЕЊЕ

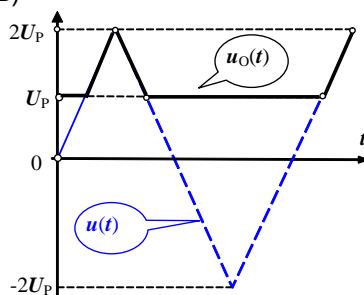
а)

$$U_O = \begin{cases} U; & U \geq U_P \\ 0; & U < U_P \end{cases}$$

б)



в)



НАПОМЕНЕ

Посматрано коло може да се посматра као:

- усмерач, који пропушта улазни напон ако је већи од напона U_P ;

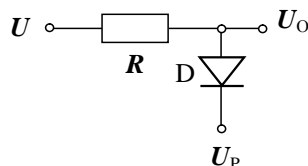
или, као

- ограничавач, који не дозвољава да излазни напон буде мањи од напона U_P .

Напон U_P може да буде позитиван или негативан.

6. 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, $U_O(U)$, ако је напон U_P позитиван.

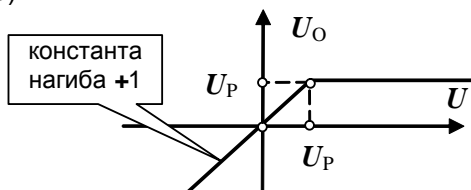


РЕШЕЊЕ

а)

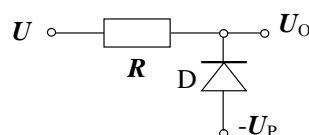
$$U_O = \begin{cases} U_P & \text{за } U \geq U_P \\ U & \text{за } U < U_P \end{cases}$$

б)



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

- а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;
 б) нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$.

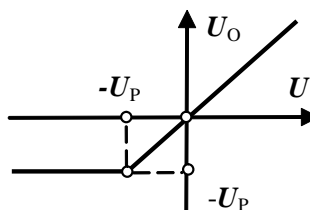


РЕШЕЊЕ

а)

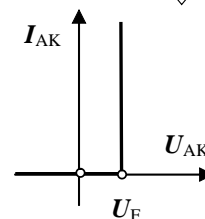
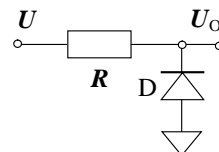
$$U_O = \begin{cases} U & \text{за } U \geq -U_P \\ -U_P & \text{за } U < -U_P \end{cases}$$

б)



8. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диоде D може представити датим дијаграмом $I_{AK}(U_{AK})$:

- а) написати општи израз којим је дефинисана статичка карактеристика кола;
 б) нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$;
 в) нацртати дијаграм таласног облика напона на излазу ако је напон прага вођења диоде поларисане у пропусном смеру, U_F , једнак 1 V, а улазни напон има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 4 V.



РЕШЕЊЕ

Да би излазни напон био различит од улазног напона потребно је да постоји пад напона на отпорнику R , односно да диода D води. То значи да

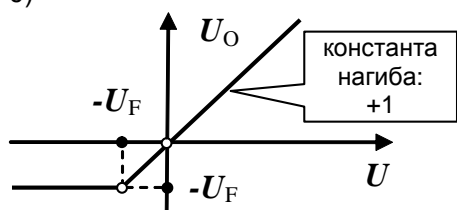
улазни напон U мора да буде негативан а по интензитету већи од напона прага вођења диоде, U_F . Излазни напон је тада једнак $-U_F$.

Када је улазни напон мањи од U_F , струја кроз диоду је једнака нули, па је и излазни напон је једнак улазном напону.

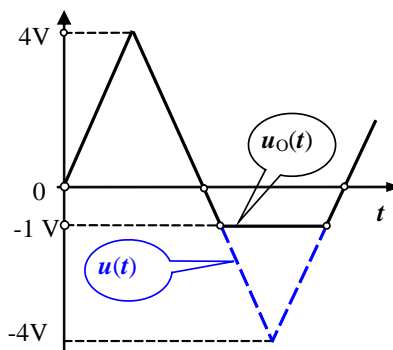
а)

$$U_O = \begin{cases} U & \text{за } U \geq -U_F \\ -U_F & \text{за } U < -U_F \end{cases}$$

б)

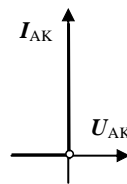
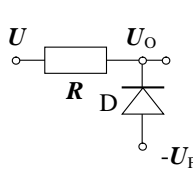
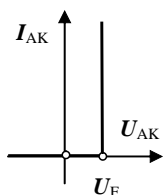
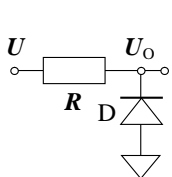


в)



НАПОМЕНА

Посматрано коло у којем је примењена диода са задатом карактеристиком, еквивалентно је колу са савршеном диодом у претходном задатку ($U_P = U_F$).

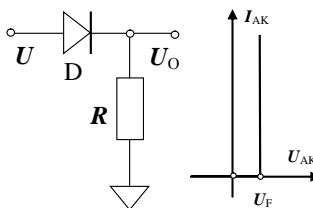


9. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диоде D може представити датим дијаграмом $I_{AK}(U_{AK})$:

а) написати општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;

б) нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$.

в) нацртати дијаграм таласног облика напона на излазу кола, ако је напон вођења диоде поларисане у пропусном смеру, U_F , једнак 1 V , а улазни напон има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 4 V .



РЕШЕЊЕ

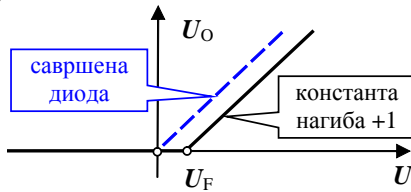
Да би излазни напон био различит од нуле потребно је да диода D води. То значи да улазни напон U мора да буде већи од напона прага вођења диоде, U_F . Излазни сигнал тада “прати” улазни, “заостајући” за њим за пад напона на директно поларисаној диоди, U_F .

Када је улазни напон мањи од U_F , струја кроз диоду је једнака нули, па је и излазни напон је једнак нули.

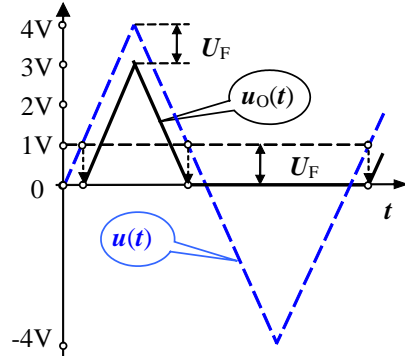
а)

$$U_O = \begin{cases} U - U_F & \text{за } U \geq U_F \\ 0 & \text{за } U < U_F \end{cases}$$

б)

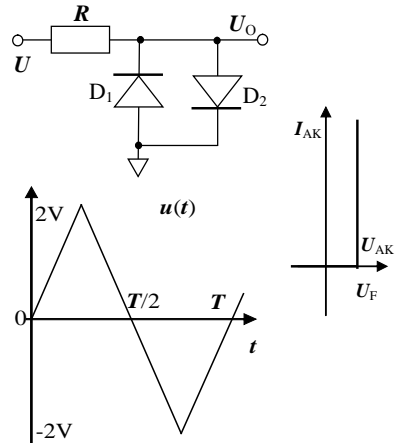


в)



10. 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 датим дијаграмом $I_{AK}(U_{AK})$;
- нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$;
- нацртати дијаграм таласног облика излазног напона, ако је напон прага диоде поларисане у пропусном смеру, U_F , једнак 1 V , а улазни напон има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 2 V .



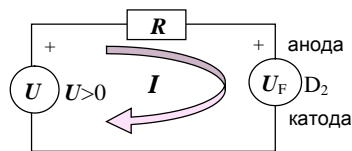
РЕШЕЊЕ

а) Када је напон U по интензитету мањи од напона U_{F3} , струја кроз обе диоде је једнака нули, па је и пад напона на отпорнику R једнак нули. Излазни напон је једнак улазном напону:

$$|U| \leq U_F \Rightarrow U_O = U .$$

Када је напон U позитиван, а по интензитету већи од напона U_F , диода D_2 је у проводном стању. Диода D_1 је поларисана у непропусном (непроводном) смеру.

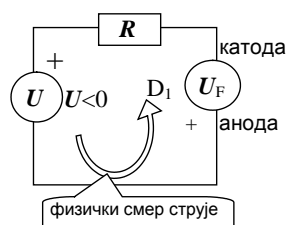
Према U - I карактеристици диоде, напон између њених крајева, када се налази у проводном стању једнак је U_F (не зависи од вредности струје). Коло се своди на једну петљу у којој, осим отпорника R , постоји еквивалентни извор напона U_F , који представља диоду D_2 , а делује у супротном смеру од извора напона побуде U .



$$U > U_F \Rightarrow U_O = U_F$$

Када је напон U негативан, а по интензитету већи од напона U_F , диода D_1 је у проводном стању, а диода D_2 је поларисана у непроводном смеру.

Смер деловања еквивалентног извора напона U_F , којим се моделује диода D_1 , одређен је физичким смером струје (када диода проводи, анода је на вишем потенцијалу од катоде).



$$U < U_F \Rightarrow U_O = -U_F$$

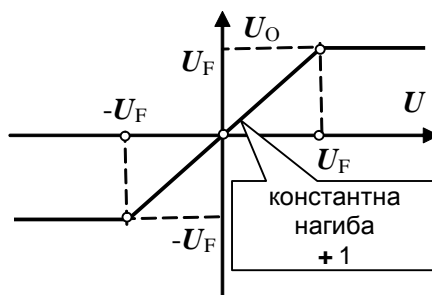
Карактеристика преноса, $U_O(U)$ је одређена изразом:

$$U_O = \begin{cases} U_F & \text{за } U > U_F \\ U & \text{за } |U| \leq U_F \\ -U_F & \text{за } U < -U_F \end{cases}$$

б) Графички приказ карактеристика преноса посматраног кола дат је на слици.

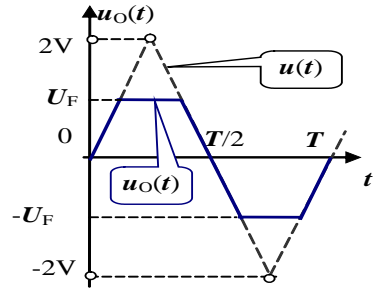
$$U_O = \begin{cases} U & ; |U| < U_F \\ U_F \operatorname{sgn} U & ; |U| \geq U_F \end{cases},$$

$$\operatorname{sgn} U = \frac{U}{|U|} = \begin{cases} 1; & U \geq 0 \\ -1; & U < 0 \end{cases}$$



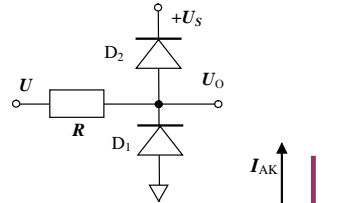
Посматрано коло делује као ограничавач који не дозвољава да амплитуда сигнала који пропушта буде већа од напона U_F .

в) Временски дијаграм одзива посматраног кола, при побуди напоном који има симетричан троугаони таласни облик, приказан је на слици.

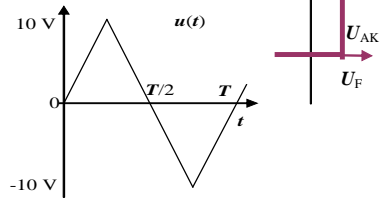


11. За коло приказано на слици:

а) 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;



б) нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$;

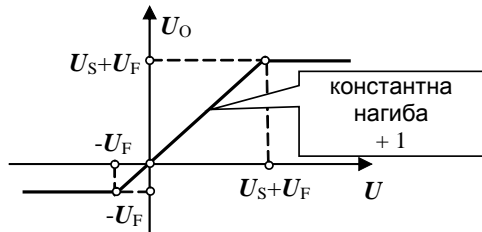


в) нацртати дијаграм таласног облика излазног напона, ако је $U_S = 5\text{ V}$, напон прага диоде поларисане у пропусном смеру, U_F , једнак 1 V , а улазни напон има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 10 V .

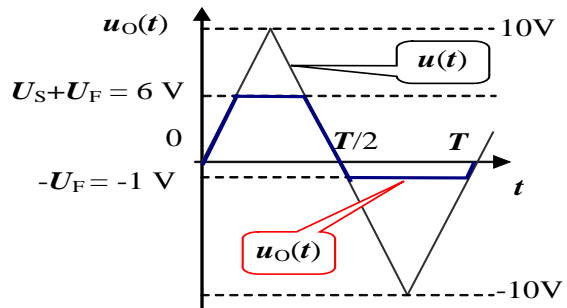
РЕШЕЊЕ

а) Карактеристика преноса, $U_O(U)$ је одређена изразом:

$$U_O = \begin{cases} U_S + U_F & \text{за } U > U_S + U_F \\ U & \text{за } -U_F \leq U \leq U_S + U_F \\ -U_F & \text{за } U < -U_F \end{cases}$$

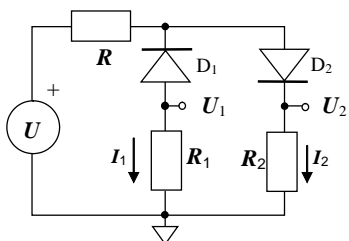


в) Временски дијаграм одзива кола приказан је на слици.



12. За коло приказано на слици, под претпоставком да су диоде D_1 и D_2 савршене:

а) одредити опште изразе за вредности струја $I_1(U)$ и $I_2(U)$;



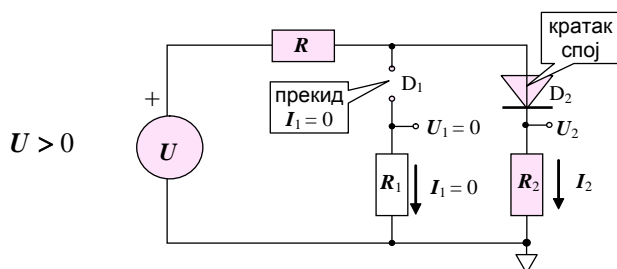
б) нацртати карактеристике преноса, $U_1(U)$ и $U_2(U)$, ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке ($R = R_1 = R_2$);

в) нацртати дијаграм таласног облика напона $u_1(t)$ и $u_2(t)$, ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке, а напон $u(t)$ има синусни таласни облик амплитуде 5 V.

РЕШЕЊЕ

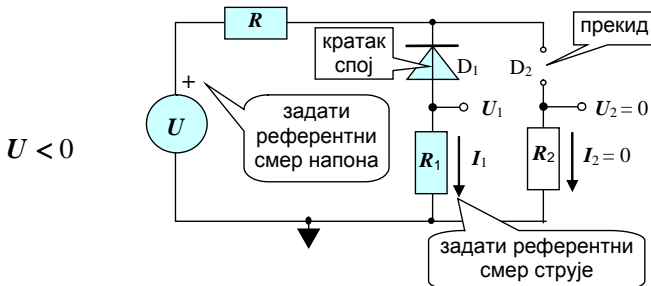
а) Могућа су два различита стања у посматраном колу.

□ Када је, у односу на референтне смерове назначене на слици, напон U позитиван, диода D_1 је поларисана у непроводном (непропусном) смеру, па је, према претпоставци да су у колу примењене савршене диоде, струја I_1 једнака нули. Диода D_2 је поларисана у пропусном (проводном) смеру, па је напон између њених крајева једнак нули. Коло се своди на једну петљу (контуру) коју образују извор напона U и редно повезани отпорници R и R_2 .



D_1 не проводи:
 $I_1 = 0$,
 $U_1 = 0$,
 D_2 проводи:
 $I_2 = \frac{U}{R + R_2}$,
 $U_2 = R_2 I_2$

□ Када је напон U негативан, диода D_1 је поларисана у проводном смеру. У колу, које образују извор напона U и редно повезани отпорници R и R_1 , тече струја $I = I_1$.



D_1 проводи:
 $I_1 = \frac{U}{R + R_1}$,
 $U_1 = R_1 I_1$.
 D_2 не проводи:
 $I_2 = 0$,
 $U_2 = 0$.

За струје I_1 и I_2 важе следећи општи изрази:

$$I_1 = \begin{cases} 0 & \text{за } U \geq 0 \\ \frac{U}{R+R_1} & \text{за } U < 0 \end{cases};$$

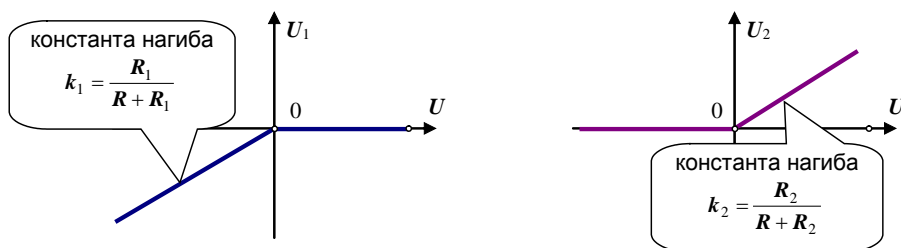
$$I_2 = \begin{cases} \frac{U}{R+R_2} & \text{за } U \geq 0 \\ 0 & \text{за } U < 0 \end{cases}.$$

б) Карактеристике преноса, $U_1(U)$ и $U_2(U)$, одређене су изразима:

$$U_1 = I_1 R_1 = \begin{cases} 0 & \text{за } U \geq 0 \\ \frac{R_1}{R+R_1} U = k_1 U & \text{за } U < 0 \end{cases},$$

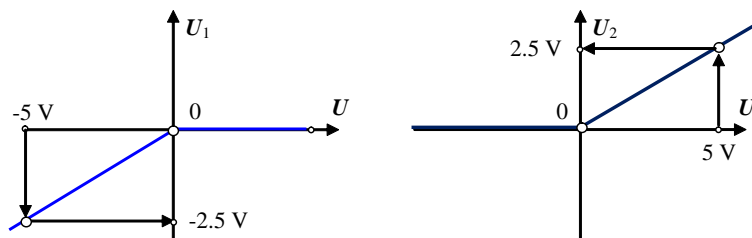
$$U_2 = I_2 R_2 = \begin{cases} \frac{R_2}{R+R_2} U = k_2 U & \text{за } U \geq 0 \\ 0 & \text{за } U < 0 \end{cases}.$$

Графички прикази карактеристика преноса $U_1(U)$, и $U_2(U)$ су дати на слици.

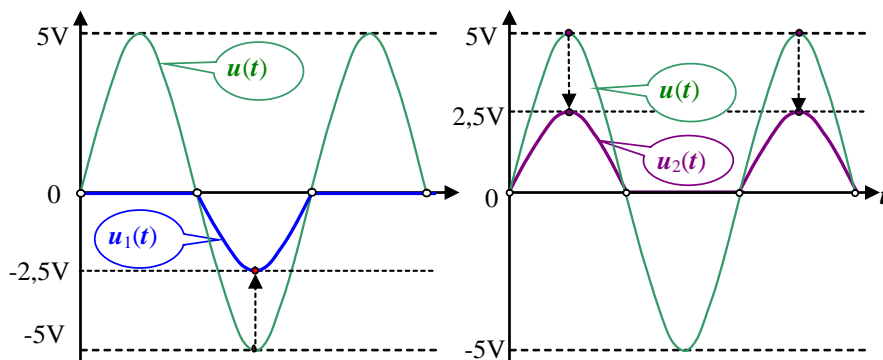


Напон U_1 не може бити позитиван. Напон U_2 не може бити негативан.

в) Када су отпорности свих отпорника у колу једнаке ($R = R_1 = R_2$) добија се: $k_1 = k_2 = \frac{1}{2}$.

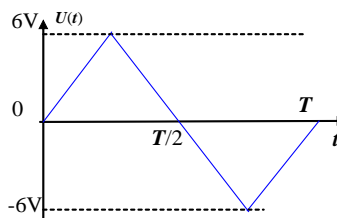
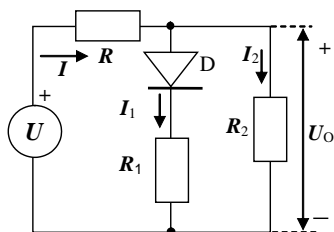


Дијаграм таласних облика напона у колу, при побуди синусним напонам амплитуде 5 V, приказан је на слици. Највећа негативна вредност напона $u_1(t)$ једнака је -2,5 V. Највећа позитивна вредност напона $u_2(t)$ једнака је 2,5 V.



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

- а) одредити опште изразе за вредности струја $I_1(U)$, $I_2(U)$ и $I(U)$;
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).

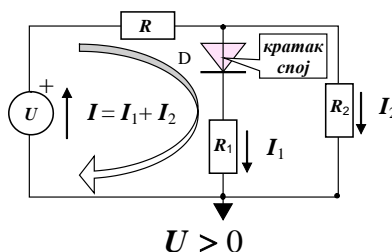


РЕШЕЊЕ

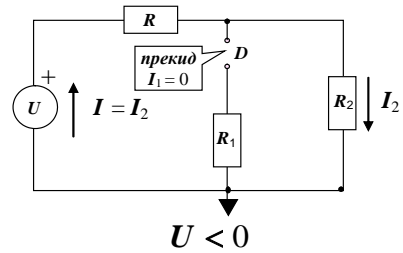
а) Могућа су два различита стања у посматраном колу.

□ Када је, у односу на референтне смерове назначене на слици, напон U позитиван, диода D је поларисана у проводном (пропусном) смеру. Напон између њених крајева је тада једнак нули (савршена диода).

Посматрано нелинеарно коло се своди на линеарно коло које саржи извор напона U , отпорник R и паралелно повезане отпорнике R_1 и R_2 .



□ Када је, у односу на референтне 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 контуру у којој се налазе извор напона U и редно повезани отпорници R и R_2 .



За струју I , чији је референтни смер назначен на слици, важи:

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

На основу израза за струју I може се одредити општи израз за излазни напон U_O :

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

На основу израза за напон U_O добијају се изрази за струје I_1 и I_2 .

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

ПРОВЕРА

Струја I , у грани која садржи извор напона U , једнака је: $I = I_1 + I_2$.

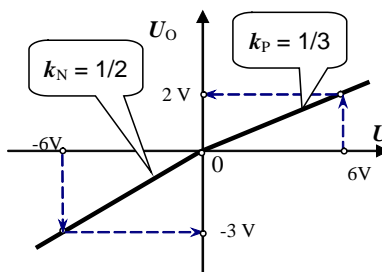
$$I = \begin{cases} \frac{U}{R + R_{12}} \frac{R_{12}}{R_1} + \frac{U}{R + R_{12}} \frac{R_{12}}{R_2} = \frac{U}{R + R_{12}} R_{12} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{U}{R + R_{12}} R_{12} \frac{1}{R_{12}} = \frac{U}{R + R_{12}}; U \geq 0 \\ 0 + \frac{U}{R + R_2}; U < 0 \end{cases}$$

б) Ако су отпорности свих отпорника у колу једнаке, карактеристика преноса, $U_O(U)$, одређена је формулом:

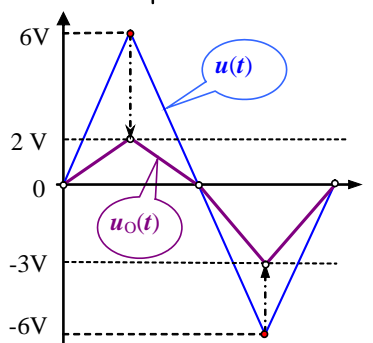
$$U_O = I_2 R_2 = \begin{cases} \frac{U}{3} & \text{за } U \geq 0 \\ \frac{U}{2} & \text{за } U < 0 \end{cases}, \quad R = R_1 = R_2, \quad R_{12} = \frac{R}{2}$$

Графички приказ карактеристике преноса, $U_O(U)$, дат је на слици.

За позитивне вредности напона U константа нагиба карактеристике преноса, k_P , једнака је $\frac{1}{3}$. За негативне вредности напона U константа нагиба, k_N , једнака је $\frac{1}{2}$.

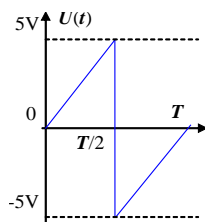
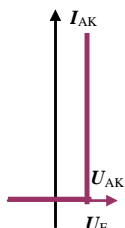
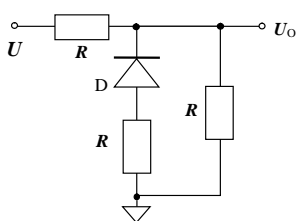


в) Дијаграм таласних облика напона на улазу и излазу кола приказан је на слици. Највећа позитивна вредност напона $u_O(t)$ једнака је $\frac{1}{3}(6 \text{ V}) = 2 \text{ V}$. Највећа негативна вредност напона $u_O(t)$ једнака је $\frac{1}{2}(-6 \text{ V}) = -3 \text{ V}$.



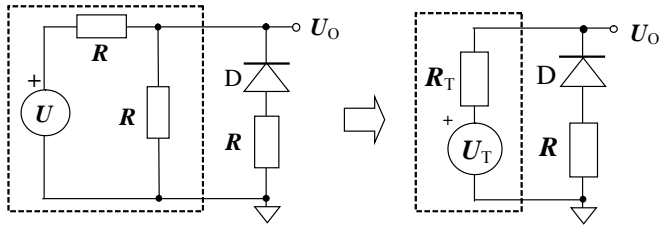
14. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диоде може представити приказаним дијаграмом:

- нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$;
- нацртати дијаграм таласног облика излазног напона, $u_O(t)$, ако је $U_F = 1 \text{ V}$, а напон $u(t)$ има троугаони таласни облик амплитуде 5 V , приказан на слици.



РЕШЕЊЕ

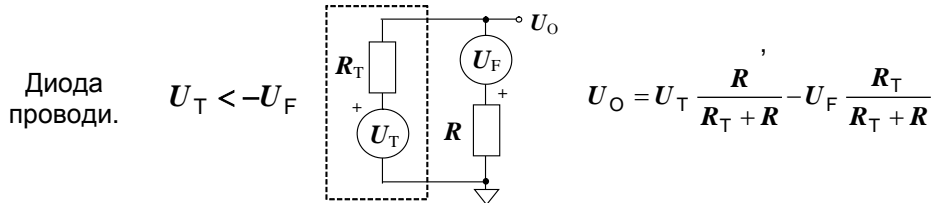
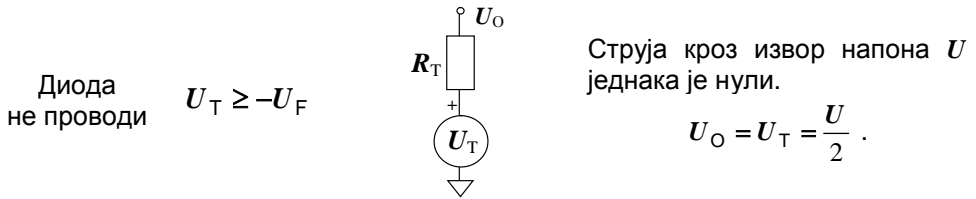
а) Применом Тевененове теореме, посматрано коло се може представити у једноставнијем облику, као коло које садржи само једну петљу.



$$R_T = \frac{R}{2}$$

$$U_T = \frac{U}{2}$$

Могућа су два стања у овом колу.



Карактеристика преноса, $U_O(U)$, одређена је изразом:

$$U_O = \begin{cases} \frac{1}{2}U & \text{за } U \geq -2U_F \\ \frac{1}{3}(U - U_F) & \text{за } U < -2U_F \end{cases}$$

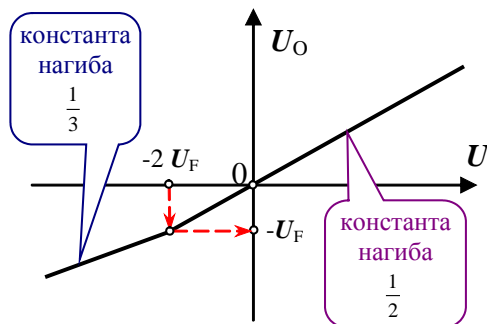
Графички приказ карактеристике преноса је дат на слици.

За вредности напона U веће од $-U_F$ константа нагиба карактеристике $U_O(U)$, k_1 , једнака је:

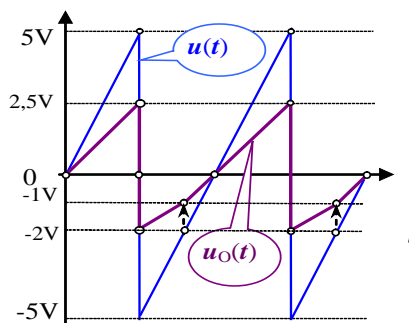
$$k_1 = \frac{1}{2}$$

За вредности напона U мање од $-U_F$ константа нагиба, k_2 , једнака је:

$$k_2 = \frac{1}{2} \frac{R}{R + R_T} = \frac{1}{3}$$

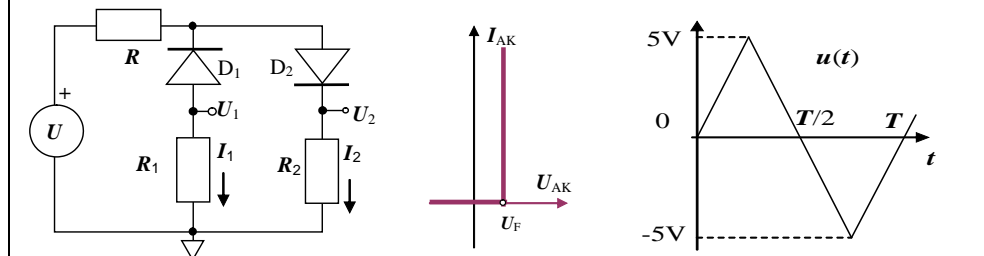


в) Дијаграм таласних облика напона на улазу и излазу кола је приказан на слици. Највећа позитивна вредност напона $u_o(t)$ једнака је $\frac{1}{2}(5 \text{ V}) = 2,5 \text{ V}$. Највећа негативна вредност напона $u_o(t)$ једнака је $\frac{1}{3}(-6 \text{ V}) = -2 \text{ V}$.



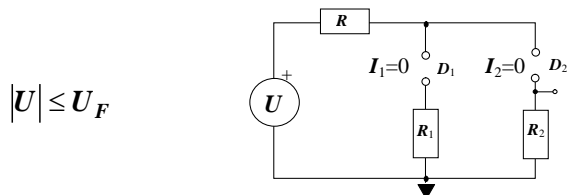
15. За коло приказано на слици:

- а) одредити опште изразе за вредности струја $I_1(U)$ и $I_2(U)$ под претпоставком да се карактеристика диода D_1 и D_2 може представити приказаним дијаграмом;
- б) нацртати дијаграм таласног облика напона $u_1(t)$ и $u_2(t)$, ако су отпорности свих отпорника у колу међусобно једнаке, напон прага диоде поларисане у пропусном смеру, U_F , једнак 1 V , а улазни напон $u(t)$ има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 5 V .



РЕШЕЊЕ

а) Када је, у односу на назначене референтне смерове напон U позитиван, али мањи од напона вођења диоде, U_F , струје I_1 и I_2 су једнаке нули, па су и излазни напони једнаки нули.



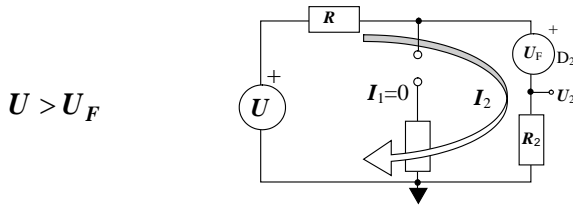
$$|U| \leq U_F$$

D_1 не проводи:
 $I_1 = 0, U_1 = R_1 I_1 = 0,$

D_2 не проводи:
 $I_2 = 0, U_2 = R_2 I_2 = 0$

Када је напон U позитиван, а по интензитету већи од напона U_F , D_2 је поларисана у проводном (пропусном) смеру. Диода D_1 је поларисана у непропусном (непроводном) смеру. Еквивалентно коло има једну затворену петљу у којој, осим отпорника R и R_2 , постоји еквивалентни извор напона U_F ,

који представља диоду D_2 , а делује у супротном смеру од извора напона буде U .



D_1 не проводи:

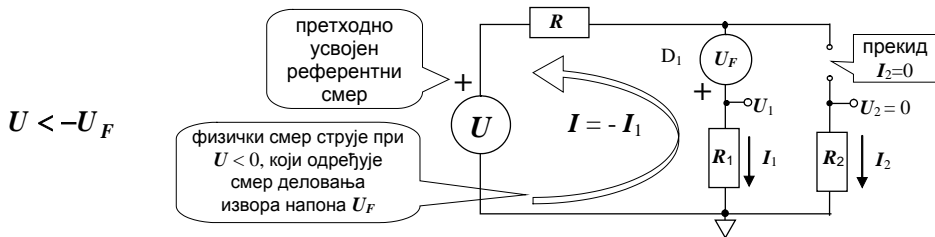
$$I_1 = 0,$$

D_2 проводи:

$$I_2 = \frac{U - U_F}{R + R_2}.$$

У поређењу са колом са савршеним диодама, струја I_2 је по интензитету мања.

Када је напон U негативан, а по интензитету већи од напона U_F , диода D_1 је поларисана у проводном смеру. Диода D_2 је тада поларисана у непроводном смеру, па је струја I_2 једнака нули. Физички смер струје кроз грану у којој се налази извор напона назначен је на слици, која представља еквивалентно коло које одговара оваквим условима рада. Смер деловања еквивалентног извора напона U_F којим се моделује диода поларисана у проводном смеру, одређен је физичким смером струје.



У поређењу са колом са савршеним диодама, струја I_1 је по интензитету мања.

За усвојене референтне смерове струје I_1 и I_2 одређене су изразима:

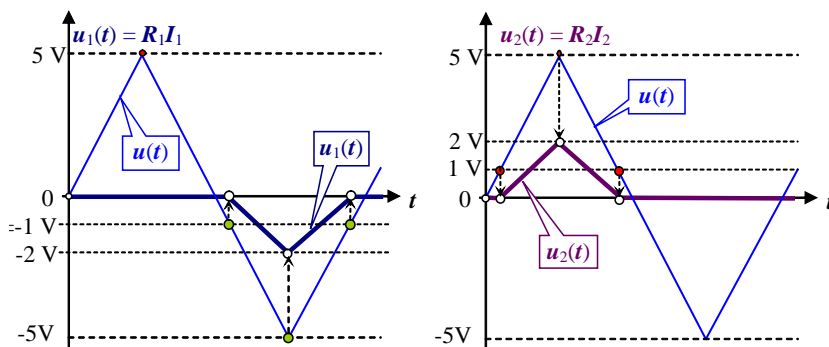
$$I_1 = \begin{cases} 0 & \text{за } U \geq -U_F \\ \frac{U + U_F}{R + R_1} & \text{за } U < -U_F \end{cases}; \quad I_2 = \begin{cases} \frac{U - U_F}{R + R_2} & \text{за } U > U_F \\ 0 & \text{за } U \leq U_F \end{cases}.$$

б) За излазне напоне и важе једначине:

$$U_1 = R_1 I_1, \quad U_2 = I_2 R_2$$

На основу претходног разматрања следи да је напон U_1 непозитивна величина (не може да буде већи од нуле), која је различита од нуле ако је улазни напон мањи од $-U_F$. Напон U_2 је ненегативна величина (не може да буде мањи од нуле), која је различита од нуле ако је улазни напон већи од U_F .

Дијаграми таласних облика напона $u_1(t)$ и $u_2(t)$, када су отпорности свих отпорника у колу једнаке ($R = R_1 = R_2$), приказани су на слици.



Највећа по интензитету негативна вредност напона $u_1(t)$ једнака је:

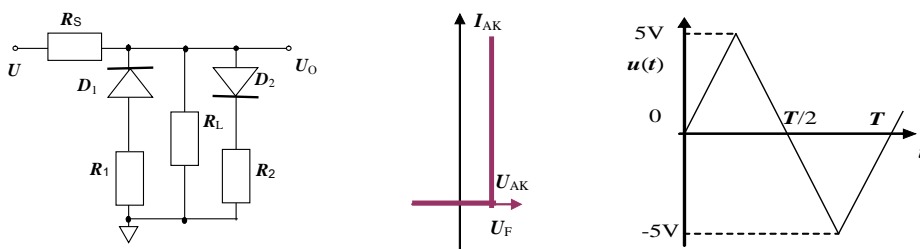
$$\frac{1}{2}(-5-1) \text{ V} = -2 \text{ V}.$$

Највећа позитивна вредност напона $u_2(t)$ једнака је

$$\frac{1}{2} (5-1) \text{ V} = 2 \text{ V}.$$

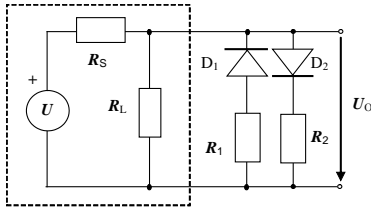
16. За колу приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диода D_1 и D_2 може представити приказаним дијаграмом:

- одредити општи израз за вредност напона U_O ;
- нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$, ако су отпорности свих отпорника у колу међусобно једнаке;
- 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 5 V.



РЕШЕЊЕ

- Применом Тевененове теореме, посматрано колу се може представити у једноставнијем облику, као колу које садржи само две петље.

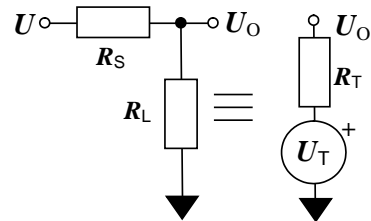


$$R_T = R_L \parallel R_S = \frac{R_L R_S}{R_L + R_S}, \quad U_T = U \frac{R_L}{R_L + R_S}.$$

Могућа су три различита стања у колу.

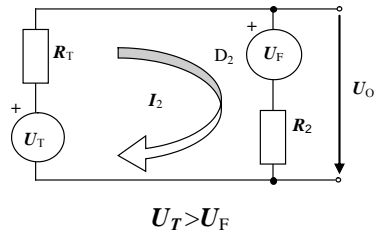
◆ Када је интензитет улазног напона мали, тако да је напон U_T по модулу мањи од напона прага диоде U_F , ни једна од диода не води. Коло делује као делитељ напона.

$$U_O = U \frac{R_L}{R_L + R_S} = U_T$$



◆ Када је напон U_T позитиван и већи од напона U_F , диода D_2 проводи, коло се своди на једну петљу приказану на слици.

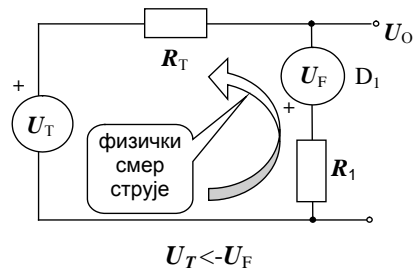
$$U_O = (U_T - U_F) \frac{R_2}{R_2 + R_T} + U_F$$



Гранична вредност улазног напона, U_G , при којој почиње да се успоставља струја у грани у којој се налази диода D_2 , одређује се из услова:

$$U_T(U_G) = U_G \frac{R_L}{R_L + R_S} = U_F, \quad U_G = \left(1 + \frac{R_S}{R_L}\right) U_F.$$

◆ Када је напон U_T негативан и по вредности мањи од напона $-U_F$ (по модулу већи напона U_F), диода D_1 проводи, коло се своди на једну петљу приказану на слици (смер деловања извора напона U_F , којим се у еквивалентној шеми приказује диода D_1 , одређен је физичким смером струје кроз грану у којој се налази диода D_1).



$$U_O = (U_T + U_F) \frac{R_1}{R_1 + R_T} - U_F$$

$$U_O = \begin{cases} U \frac{R_L}{R_L + R_S}; \text{ за } |U| \leq U_G = (1 + \frac{R_S}{R_L})U_F \\ U \frac{R_L}{R_L + R_S} \frac{R_2}{R_2 + R_T} + U_F \frac{R_T}{R_2 + R_T}; \text{ за } U > U_G \\ U \frac{R_L}{R_L + R_S} \frac{R_1}{R_1 + R_T} - U_F \frac{R_T}{R_1 + R_T}; \text{ за } U < -U_G \end{cases}$$

Карактеристика преноса посматраног кола, $U_O(U)$, може се представити и у облику:

$$U_O = \begin{cases} kU; \text{ за } |U| \leq U_G \\ k_P U + U_F \frac{R_T}{R_2 + R_T}; \text{ за } U > U_G \\ k_N U - U_F \frac{R_T}{R_1 + R_T}; \text{ за } U < -U_G \end{cases}$$

где су:

$$k = \frac{R_L}{R_L + R_S}, k_P = \frac{R_2}{R_2 + R_T} \frac{R_L}{R_L + R_S}, k_N = \frac{R_1}{R_1 + R_T} \frac{R_L}{R_L + R_S},$$

константе нагиба појединих сегмената.

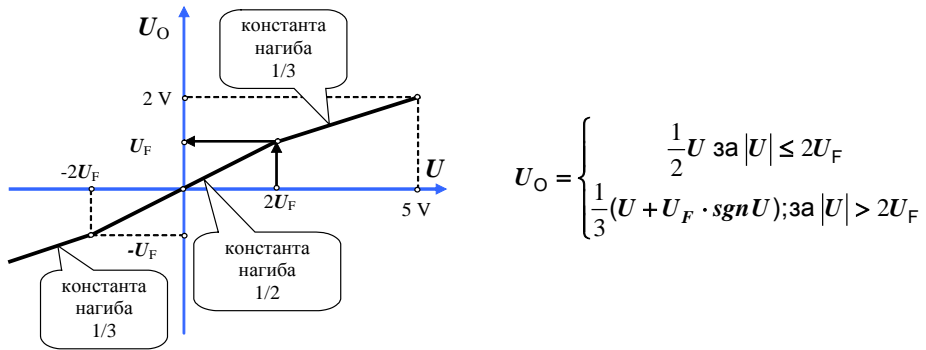
б) Када су све отпорности у колу једнаке:

$$R_S = R_L = R_1 = R_2 = R, \text{ важи:}$$

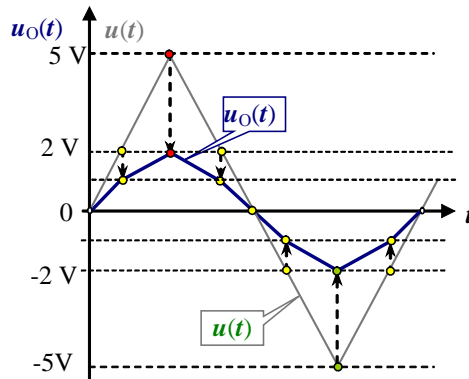
$$R_T = \frac{R}{2}, U_T = \frac{U}{2}, U_G = 2U_F, \text{ односно:}$$

$$U_O = \begin{cases} \frac{U}{2} \text{ за } |U| \leq 2U_F \\ \frac{U}{2} \cdot \frac{2}{3} + U_F \frac{1}{3} = \frac{U + U_F}{3}; \text{ за } U > 2U_F \\ \frac{U}{2} \cdot \frac{2}{3} - U_F \frac{1}{3} = \frac{U - U_F}{3}; \text{ за } U < -2U_F \end{cases}$$

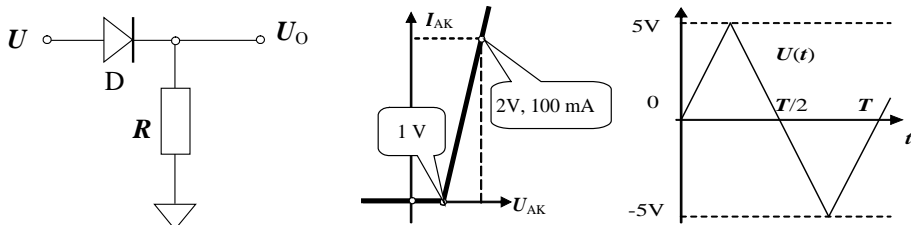
Графички приказ карактеристике преноса, $U_O(U)$, када су све отпорности у колу међусобно једнаке, дат је на слици. У области $|U| < 2U_F = 2\text{ V}$ напон на излазу кола сразмеран је улазном напону. Константа сразмере (нагиб карактеристике) једнака је $\frac{1}{2}$. Изван ове области, $|U| > 2U_F$, константа преноса једнака је $\frac{1}{3}$.



в) Када су све отпорности у колу једнаке, одзив кола на побуду наизменичним симетричног троугаоног таласног облика амплитуде 5 V, приказан је на слици.



17. За колу приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диоде D може представити датим дијаграмом:
- одредити вредност динамичке отпорности диоде у проводном стању;
 - одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола;
 - нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$ ако је отпорност R једнака 90Ω ;
 - нацртати дијаграм таласног облика излазног напон, ако улазни напон има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 5 V.



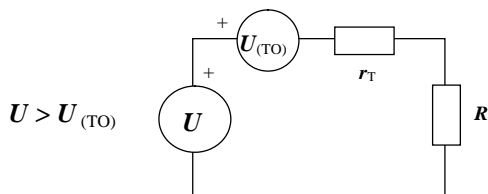
РЕШЕЊЕ

- а) Динамичка отпорност диоде при директној поларизацији једнака је:

$$r_T = \frac{\Delta U_{AK}}{\Delta I_{AK}} = \frac{1 \text{ V}}{100 \text{ mA}} = 10 \Omega .$$

б) Када је улазни напон мањи од напона прага вођења диоде, $U_{(TO)}$, излазни напон U_O је једнак нули.

Еквивалентно коло, када је улазни напон U већи од напона прага вођења диоде, $U_{(TO)} = 1 \text{ V}$, приказано је на слици.



Напон U_O на излазу кола одређен је изразом:

$$U_O = \begin{cases} \frac{U - U_F}{R + r_T} R ; U \geq U_F \\ 0 ; U < U_F \end{cases} .$$

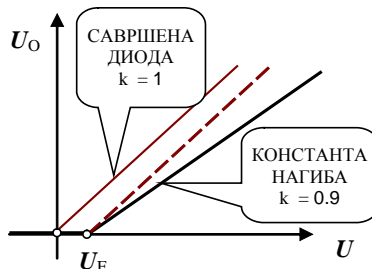
в) Карактеристика преноса посматраног кола приказана је на слици.

Нагиб карактеристике $U_O(U)$, за U одређен је изразом:

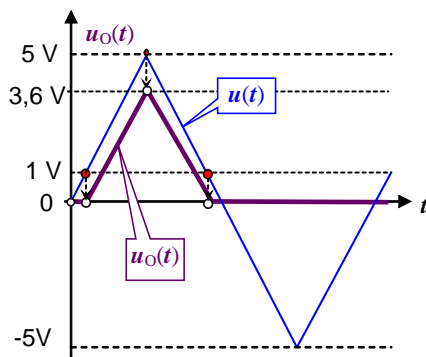
$$k = \frac{R}{R + r_T} .$$

За задате вредности је:

$$k = 0,9 .$$

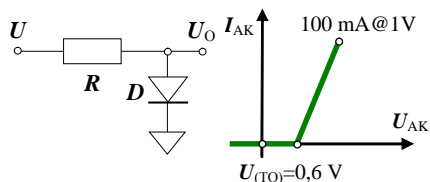


г) Одзив кола на побуду напонем симетричног троугаоног таласног облика приказан је на слици.



18. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика диоде може представити датим 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, $U_O(U)$, ако је $R = 96 \Omega$.

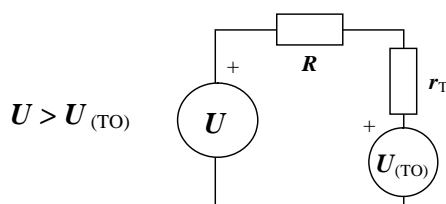


РЕШЕЊЕ

а) Динамичка отпорност диоде при директној поларизацији једнака је:

$$r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,4 \text{ V}}{100 \text{ mA}} = 4 \Omega.$$

б) Еквивалентно коло, када је улазни напон већи од напона прага вођења диоде, приказано је на слици.



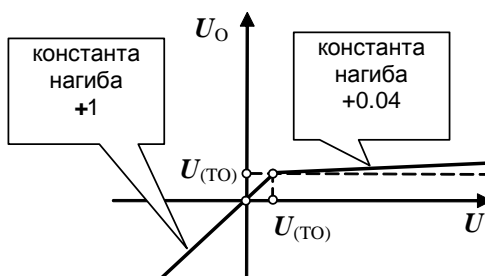
$$U_O = U_{(TO)} + r_T I$$

$$I = \frac{U - U_{(TO)}}{R + r_T} = U_T$$

Напон U_O на излазу кола одређен је изразом:

$$U_O = \begin{cases} U_{(TO)} + k(U - U_{(TO)}) & \text{за } U \geq U_{(TO)} \\ U & \text{за } U < U_{(TO)} \end{cases}, \quad k = \frac{r_T}{R + r_T} = 0,04.$$

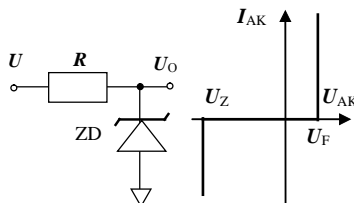
в) Карактеристика преноса посматраног кола приказана је на слици.



2.3. ЦЕНЕР-ДИОДЕ

19. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диоде може представити датим дијаграмом:

- одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$;
- нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$;
- нацртати дијаграм таласног облика напона на излазу кола ако је $U_F = 1\text{ V}$, $U_Z = 5\text{ V}$, а улазни напон има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 10 V .

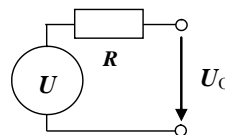


РЕШЕЊЕ

а) Зависно од поларитета и интензитета улазног напона, могућа су три стања у посматраном колу.

За мале, позитивне и негативне вредности улазног напона, када је струја кроз Ценер диоду ZD једнака нули, напон U_O на излазу кола једнак је улазном напону. Границе ове области рада су $+U_Z$ и $-U_F$.

$$-U_F \leq U \leq U_Z \Rightarrow U_O = U.$$



Ако је улазни напон позитиван и већи од напона инверзног пробоја Ценер-диоде, U_Z , напон на излазу кола је позитиван и једнак U_Z .

$$U > U_Z \Rightarrow U_O = U_Z.$$

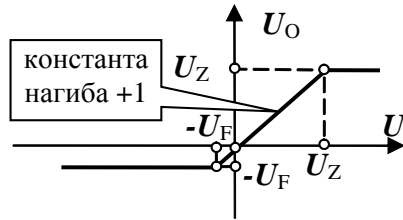
Ако је улазни напон негативан, по интензитету већи од напона вођења у смеру директне поларизације, U_F , напон на излазу кола је негативан и једнак $-U_F$.

$$U < -U_F \Rightarrow U_O = -U_F.$$

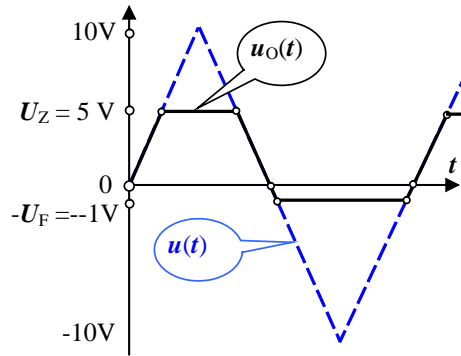
Карактеристика преноса посматраног кола одређена је изразом:

$$U_O = \begin{cases} U_Z & \text{за } U > U_Z \\ U & \text{за } -U_F \leq U \leq U_Z \\ -U_F & \text{за } U < -U_F \end{cases}$$

б) Графички приказа карактеристике преноса дат је на слици.



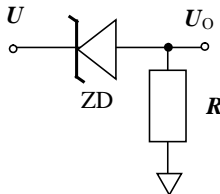
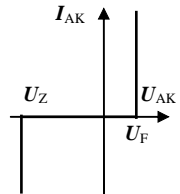
в) Одзив кола на побуду периодичним напонам симетричног троугаоног таласног облика, амплитуде 10 V, дат је на слици.



20. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диоде може представити датим дијаграмом:

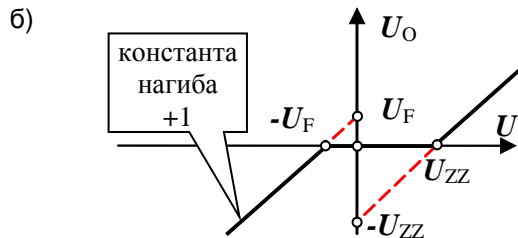
а) одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$;

б) нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$.

РЕШЕЊЕ

а)
$$U_O = \begin{cases} U - U_{ZZ} & \text{за } U > U_{ZZ} \\ 0 & \text{за } U_F \leq U \leq U_{ZZ} \\ U + U_F & \text{за } U \leq -U_F \end{cases}$$

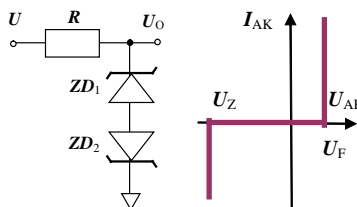


21. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода ZD_1 и ZD_2 може представити датим дијаграмом:

а) одредити општи израз за вредност напона $U_0(U)$;

б) нацртати карактеристику преноса, $U_0(U)$;

в) нацртати дијаграм таласног облика напона на излазу кола ако је $U_F = 1\text{ V}$, $U_Z = 5\text{ V}$, а улазни напон има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 10 V .

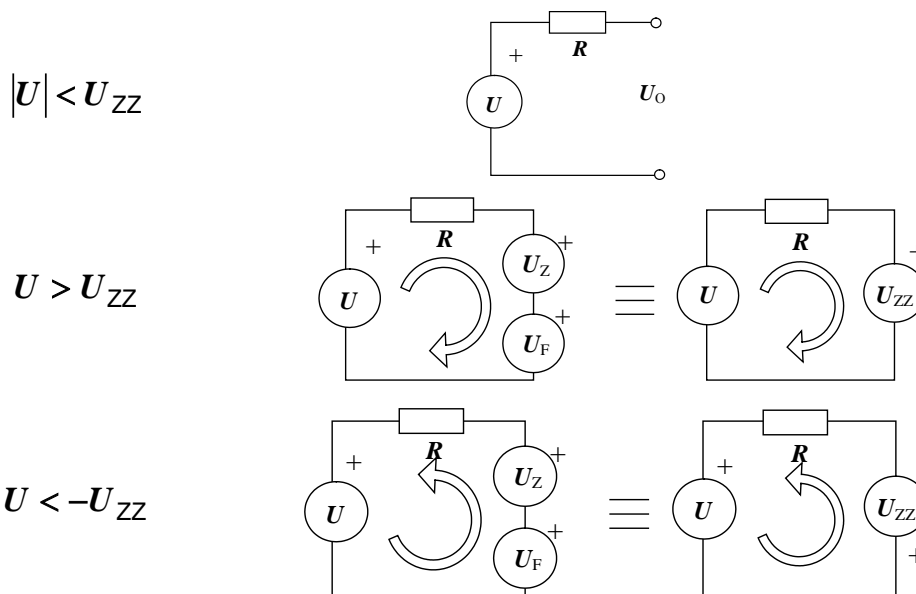


РЕШЕЊЕ

При довољно великој вредности улазног напона једна од диода, ZD_1 или ZD_2 (зависно од поларитета улазног напона), доспева у област инверзног пробоја, а друга је проводи струју у директном смеру. Две редно повезане, супротно оријентисане Ценер-диоде делују као Ценер-диода са симетричном карактеристиком чији је напон пробоја, U_{ZZ} , једнак:

$$U_{ZZ} = U_Z + U_F$$

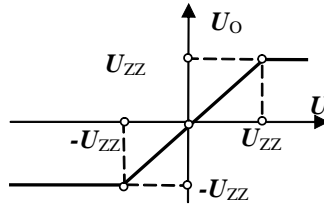
Еквивалентна кола су приказана на слици. Смер деловања извора напона U_{ZZ} одређен је смером (поларитетом) спољашњег извора напона, односно физичким смером струје кроз грану у којој се диоде налазе. Диода у проводном стању смањује интензитет струје у грану у којој се налази.



Карактеристика преноса посматраног кола одређена је изразом:

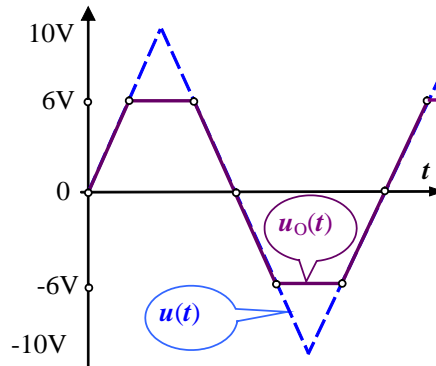
$$U_0 = \begin{cases} U_{ZZ} & \text{за } U > U_{ZZ} \\ U & \text{за } |U| < U_{ZZ} \\ -U_{ZZ} & \text{за } U \leq -U_{ZZ} \end{cases}$$

б) Графички приказа карактеристике преноса дат је на слици.



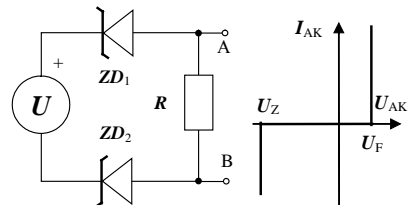
Посматрано коло делује као прецизни симетрични ограничавач који не дозвољава да амплитуда сигнала који пропушта буде већа од напона U_{ZZ} .

в) Одзив кола на побуду периодичним напном симетричног троугаоног таласног облика, амплитуде 10 V, дат је на слици.



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

- одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$;
- 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 има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 10 V.

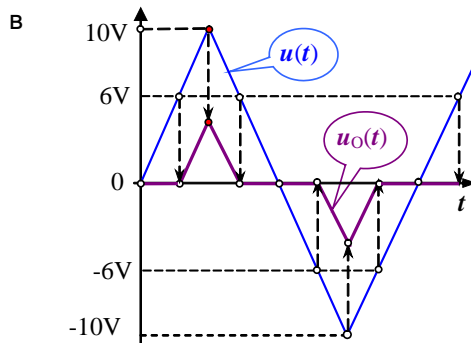
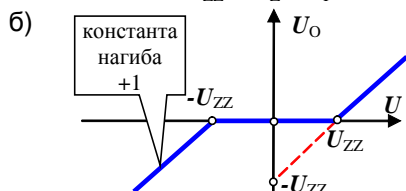


РЕШЕЊЕ

а)

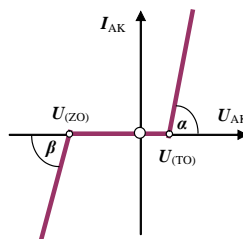
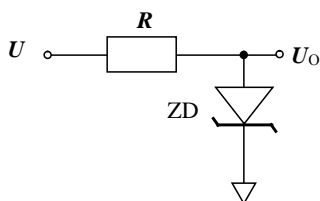
$$U_O = \begin{cases} U - U_{ZZ} & \text{за } U > U_{ZZ} \\ 0 & \text{за } |U| < U_{ZZ} \\ U + U_{ZZ} & \text{за } U \leq -U_{ZZ} \end{cases},$$

$$U_{ZZ} = U_Z + U_F$$



23. 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

Математички модел диоде, који одговара задатој статичкој струјно-напонској карактеристици, има облик:

$$I_{AK} = 0 \text{ за } -U_{(ZO)} \leq U_{AK} \leq U_{(TO)}$$

$$U_{AK} = U_{(TO)} + r_T I_{AK} \text{ за } I_{AK} \geq 0,$$

$$r_T = \text{ctg } \alpha$$

$$U_{AK} = -U_{(ZO)} - r_Z I_{AK} \text{ за } I_{AK} < 0,$$

$$r_Z = \text{ctg } \beta$$

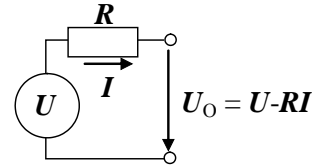
Када је напон између аноде и катодe Ценер-диоде мањи од $+U_{(TO)}$, а већи од $-U_{(ZO)}$, струја кроз диоду једнака је нули. (непроводно стање - диода делује као отворена веза).

Директна поларизација, проводно стање.

Инверзна поларизација, проводно стање.

а) Могућа су три стања у посматраном колу, у зависности од интензитета и поларитета напона U .

За мале вредности улазног напона струја кроз Ценер диоду ZD, а то значи да је и струја кроз отпорник R једнака је нули. Напон U_O једнак је улазном напону.



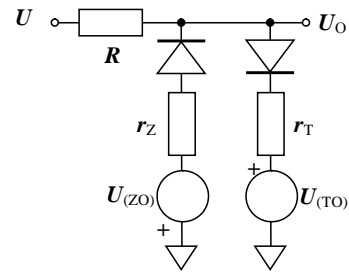
$$-U_{(ZO)} \leq U \leq U_{(TO)} \Rightarrow I = 0 \Rightarrow U_O = U$$

Границе ове области рада су $+U_{(TO)}$ и $-U_{(ZO)}$. Изван овог опсега излазни напон U_O је једнак напону Ценер-диоде кроз коју протиче струја у директном ($U > U_{(TO)}$) или инверзном смеру ($U < -U_{(ZO)}$).

Посматрано коло се може моделовати еквивалентним колом које садржи савршене диоде.

$$U > U_{(TO)} \Rightarrow U_O = U_{(TO)} + r_T \frac{U - U_{(TO)}}{R + r_T},$$

$$U < -U_{(ZO)} \Rightarrow U_O = -U_{(ZO)} + r_Z \frac{U + U_{(ZO)}}{R + r_Z}$$



Карактеристика $U_O(U)$ представља монотono растућу функцију чији је нагиб:

$$k = \frac{\Delta U_O}{\Delta U} = \begin{cases} k_p, \text{ за } U > U_{(TO)} \\ 1, \text{ за } -U_{(ZO)} \leq U \leq U_{(TO)} \\ k_n, \text{ за } U < -U_{(ZO)} \end{cases}$$

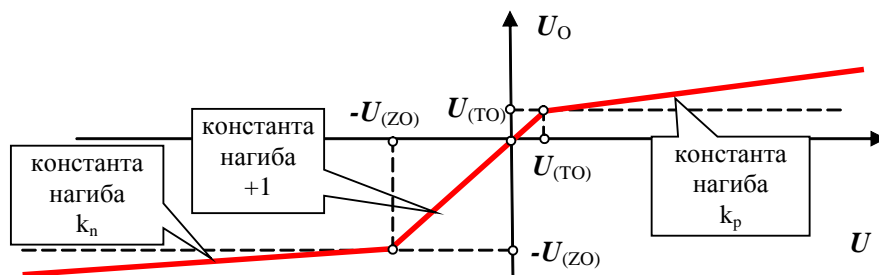
$$k_p = \frac{\Delta U_O}{\Delta U} \Big|_{U \geq U_{(TO)}} = \frac{r_T}{R + r_T},$$

$$k_n = \frac{\Delta U_O}{\Delta U} \Big|_{U \leq -U_{(ZO)}} = \frac{r_Z}{R + r_Z}.$$

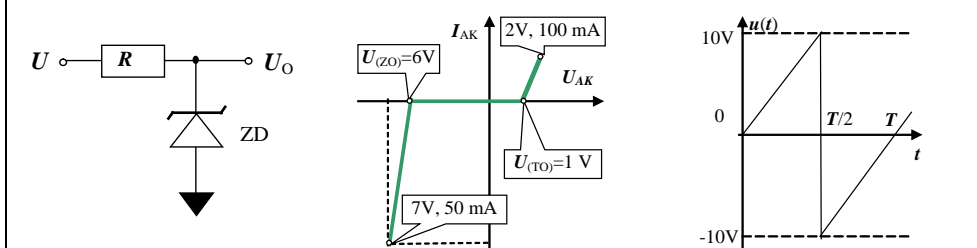
Статичка карактеристика преноса, $U_O(U)$, одређена је изразом:

$$U_O = \begin{cases} U_{(TO)} + k_p(U - U_{(TO)}) & \text{ за } U > U_{(TO)} \\ U & \text{ за } -U_{(ZO)} \leq U \leq U_{(TO)} \\ -U_{(ZO)} + k_n(U - U_{(ZO)}) & \text{ за } U \leq -U_{(ZO)} \end{cases}.$$

а) Графички приказ карактеристике $U_O(U)$ је дат на слици.



24. За коло приказано на слици, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диоде ZD може представити датим дијаграмом:
- одредити општи израз за вредност напона на излазу кола, $U_O(U)$;
 - нацртати улазно-излазну карактеристику кола, $U_O(U)$, ако је $R = 80 \Omega$;
 - нацртати дијаграм таласног облика напона на излазу кола ако је $R = 80 \Omega$, а улазни напон има таласни облик приказан на слици. Одредити амплитуду излазног напона.



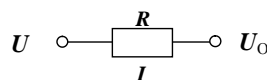
РЕШЕЊЕ

На основу задате карактеристике Ценер-диоде могу се одредити вредности динамичких отпорности при директној, r_T , и инверзној поларизацији у условима пробоја, r_Z :

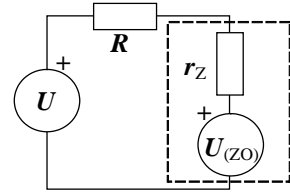
$$r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{1V}{100 \text{ mA}} = 10 \Omega, \quad r_Z = \frac{\Delta U_R}{\Delta I_R} = \frac{1V}{50 \text{ mA}} = 20 \Omega.$$

а) Када је напон U мањи од напона пробоја Ценер-диоде у инверзном смеру, $U_{(ZO)}$, а већи од напона $-U_{(TO)}$, струја кроз диоду и отпорник R једнака је нули. Излазни напон U_O једнак је улазном напону U .

$$-U_{(TO)} \leq U \leq U_{(ZO)} \Rightarrow U_O = U.$$

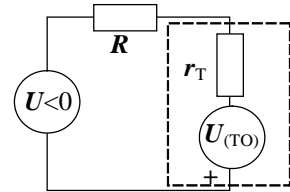


При позитивној вредности улазног напона, већој од $U_{(ZO)}$, диода ZD доспева у област инверзног пробоја. Динамичка отпорност U - I карактеристике у овој области, r_z , је мала, па напон на излазу релативно мало зависи од вредности улазног напона.



$$U > U_{(ZO)} \Rightarrow U_O = U - R \frac{U - U_{(ZO)}}{R + r_z} = U \frac{r_z}{R + r_z} + U_{(ZO)} \frac{R}{R + r_z}.$$

При негативној вредности улазног напона, мањој од $-U_{(TO)}$, диода ZD проводи струју у директном смеру. Динамичка отпорност директно пларисане диоде, r_T , је мала, па напон на излазу релативно мало зависи од вредности улазног напона.



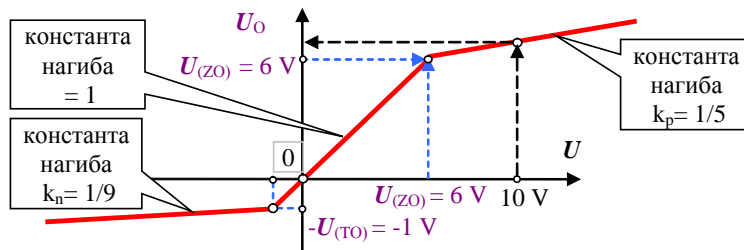
$$U < -U_{(TO)} \Rightarrow U_O = U - R \frac{U + U_{(TO)}}{R + r_T} = U \frac{r_T}{R + r_T} + U_{(TO)} \frac{R}{R + r_T}.$$

$$U_O = \begin{cases} \frac{R}{R+r_z} U_{(ZO)} + \frac{r_z}{R+r_z} U & \text{за } U > U_{(ZO)} \\ U & \text{за } -U_{(TO)} \leq U \leq U_{(ZO)} \\ -\frac{R}{R+r_T} U_{(TO)} + \frac{r_T}{R+r_T} U & \text{за } U < -U_{(TO)} \end{cases}$$

б) За задате бројне вредности добија се:

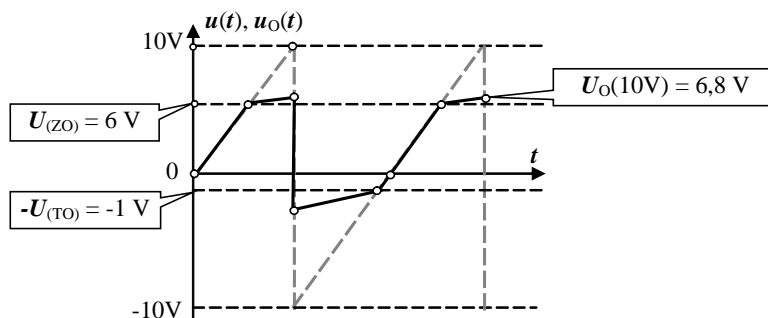
$$U_O = \begin{cases} 4,8 \text{ V} + 0,2 U & \text{за } U > 6 \text{ V} \\ U & \text{за } -1 \text{ V} \leq U \leq 6 \text{ V} \\ -0,88 \text{ V} + 0,11 U & \text{за } U < -1 \text{ V} \end{cases}$$

Графички приказ улазно-излазне карактеристике кола дат је на слици. У средишњем делу, нагиб карактеристике преноса посматраног кола, $U_O(U)$, је једнак 1 (стање улаза се без промене преноси на излаз). Изван ове области, нагиб је позитиван, знатно мањи од нагиба у средишњем делу, који одговара стању када је струја кроз диоду једнака нули.



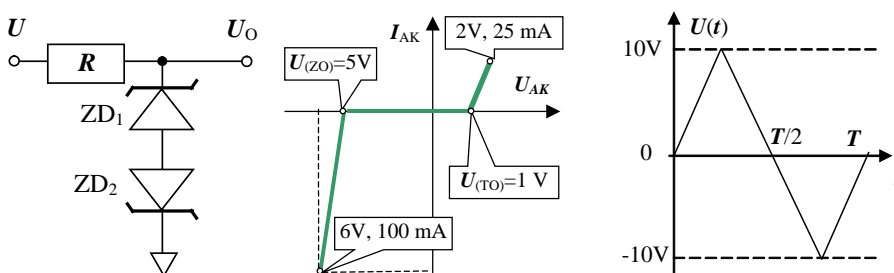
в) Временски дијаграм одзива кола дат је на слици. Амплитуда излазног напона једнака је:

$$U_O(10\text{ V}) = 4,8\text{ V} + 0,2 \cdot 10\text{ V} = 6,8\text{ V}$$



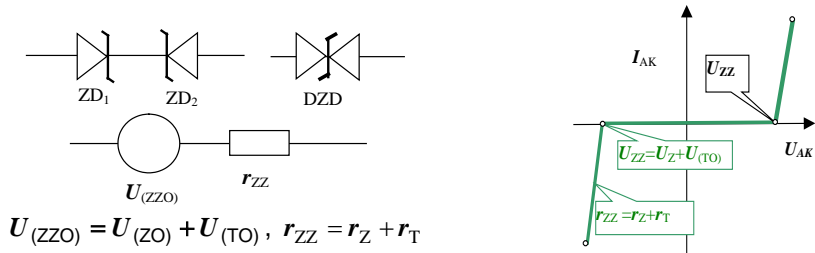
25. За коло приказано на слици:

- одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода може представити приказаним дијаграмом;
- одредити вредност излазног напона U_O ако је:
 $U = 10\text{ V}$, $R = 350\ \Omega$;
- нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$;
- нацртати дијаграм таласног облика излазног напона ако улазни напон има таласни облик приказан на слици.



РЕШЕЊЕ

Две редно повезане супротно оријентисане Ценер-диоде “понашају” се као једна диода са симетричном карактеристиком. Еквивалентно коло “двојне Ценер-диоде” приказано је на слици. Динамичке отпорности Ценер-диоде 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.



$$r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{1 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 40 \Omega, \quad r_Z = \frac{\Delta U_R}{\Delta I_R} = \frac{1 \text{ V}}{100 \text{ mA}} = 10 \Omega,$$

Параметри еквивалентне двојне Ценер-диоде су:

$$r_{ZZ} = r_Z + r_T = 50 \Omega, \quad U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)} = 6 \text{ V}.$$

а) Структура посматраног кола је симетрична у погледу поларитета улазног напона U . То значи да је карактеристика преноса кола, $U_O(U)$, симетрична у односу на координатни почетак.

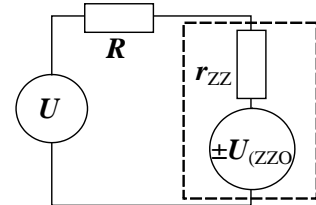
У околини координатног почетка, константа преноса једнака је 1 (за мале вредности улазног напона струја кроз отпорник R једнака је нули).

$$|U| \leq U_{(ZZO)} \Rightarrow U_O = U$$

Када је напон U по интензитету већи од напона пробоја двојне Ценер-диоде U_{ZZ} , за напон U_O на излазу кола важи:

$$|U| > U_{(ZZO)} \Rightarrow U_O = \pm U_{(ZZO)} + r_{ZZ} I.$$

Предзнак првог (константног) члана овог израза одређен је поларитетом улазног напона.



На основу једначине којом је одређена вредност струје у посматраном колу:

$$I = \frac{U \mp U_{(ZZO)}}{r_{ZZ} + R},$$

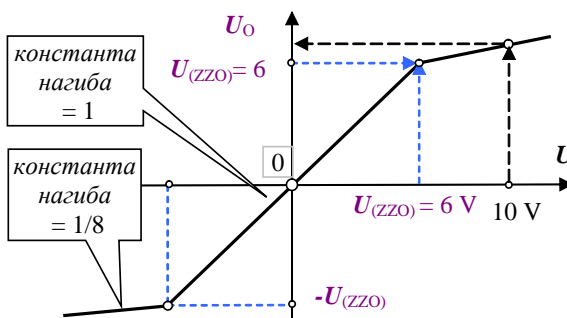
следи:

$$|U| \geq U_{(ZZO)} \Rightarrow U_O = \pm U_{(ZZO)} \frac{R}{R + r_{ZZ}} + U \frac{r_{ZZ}}{R + r_{ZZ}} = \pm U_{(ZZO)} \frac{R \parallel r_{ZZ}}{r_{ZZ}} + U \frac{R \parallel r_{ZZ}}{R}.$$

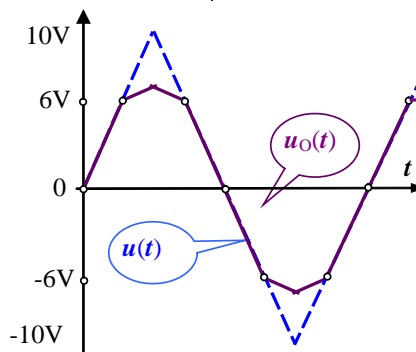
б) За задате бројне вредности добија се:

$$U_O(10 \text{ V}) = 6,5 \text{ V}.$$

в) Графички приказ карактеристике преноса $U_o(U)$ дат је на слици.

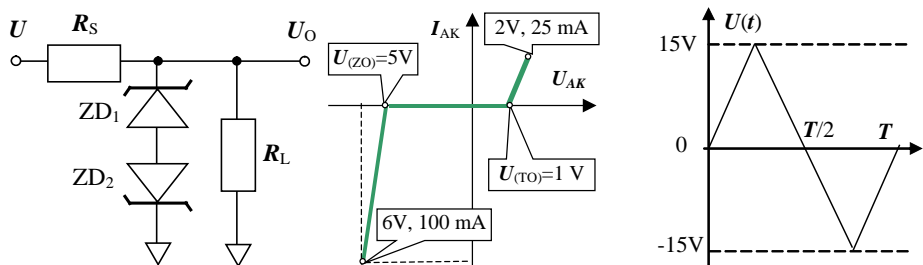


г) Временски дијаграм одзива кола дат је на слици.



26. За коло приказано на слици:

- одредити општи израз за вредност напона $U_o(U)$, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диода може представити приказаним дијаграмом;
- одредити вредност излазног напона U_o ако је:
 $U = 15 \text{ V}$, $R_s = R_L = 200 \Omega$;
- нацртати карактеристику преноса, $U_o(U)$;
- нацртати дијаграм таласног облика напона $u_o(t)$ ако напон $u(t)$ има симетричан троугаони таласни облик амплитуде 15 V .

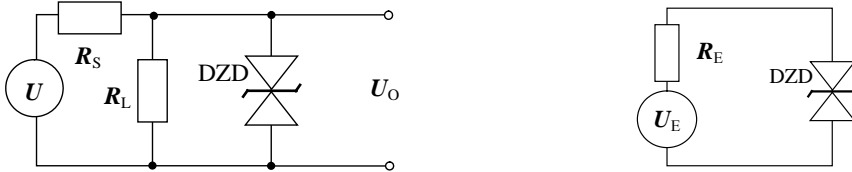


РЕШЕЊЕ

На основу задате карактеристике Ценер-диода одређују се вредности динамичких отпорности при директној, r_T , и инверзној поларизацији у условима пробоја, r_Z :

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

Применом Тевененове теореме, посматрано коло се може представити у једноставнијем облику, као коло које садржи једну петљу.



Електромоторна сила еквивалентног Тевененовог извора напона, U_E , и његова унутрашња отпорност, R_E , једнаки су:

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

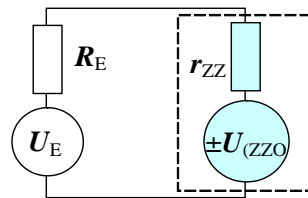
а) Структура кола је симетрична у погледу поларитета улазног напона U , па је и функција којом је описана зависност улаз-излаз, $U_O(U)$, симетрична у односу на координатни почетак.

Ако је вредност еквивалентног напона U_E мања од напона пробоја двојне Ценер-диоде, U_{ZZ} , струја кроз грану са Ценер-диодама је једнака нули. Напон U_O на излазу кола једнак је напону U_E .

$$U_O = U \frac{R_L}{R_S + R_L}, \quad |U_E| < U_{ZZ}, \quad U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)}.$$

Еквивалентно коло, које важи када је напон U_E по интензитету већи од напона пробоја двојне Ценер-диоде U_{ZZ} , приказано је на слици.

$$|U_E| \geq U_{(ZZO)} \Rightarrow U_O = \pm U_{(ZZO)} + r_{ZZ} I.$$



За вредност излазног напона U_O , у овом случају оважи:

$$U_O = \pm U_{(ZZO)} + r_{ZZ} \frac{U_E \mp U_{(ZZO)}}{R_E + r_{ZZ}} = \pm U_{(ZZO)} \frac{R_E}{R_E + r_{ZZ}} + U_E \frac{r_{ZZ}}{R_E + r_{ZZ}}, \quad |U_E| \geq U_{(ZZO)}$$

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

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

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

б) За задате бројне вредности добија се:

$$r_{ZZ} = r_Z + r_T = 50 \Omega,$$

$$U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)} = 6 \text{ V},$$

$$R_E = R_L \parallel R_S = 100 \Omega,$$

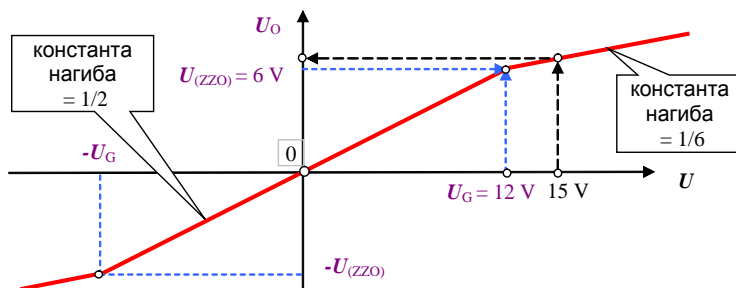
$$U_G = 2U_{(ZZO)} = 12 \text{ V},$$

$$U_E = U \frac{R_L}{R_L + R_S} = \frac{1}{2} U,$$

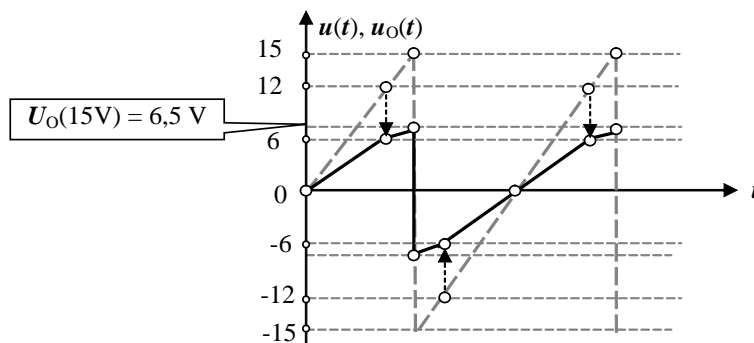
$$I(U = 15 \text{ V}) = \frac{U_E - U_{(ZZO)}}{R_E + r_{ZZ}} = 10 \text{ mA},$$

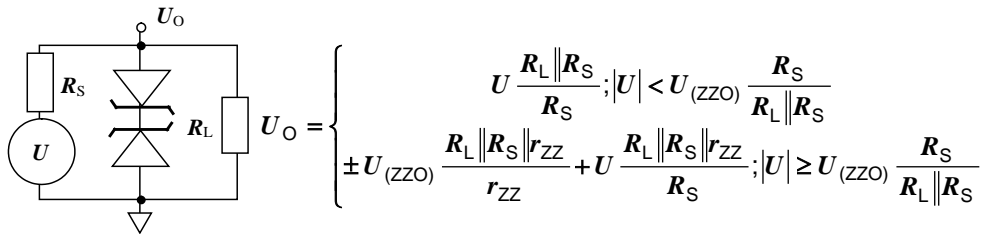
$$U_O(15 \text{ V}) = 6,5 \text{ V}.$$

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



г) Временски дијаграм одзива кола дат је на слици.





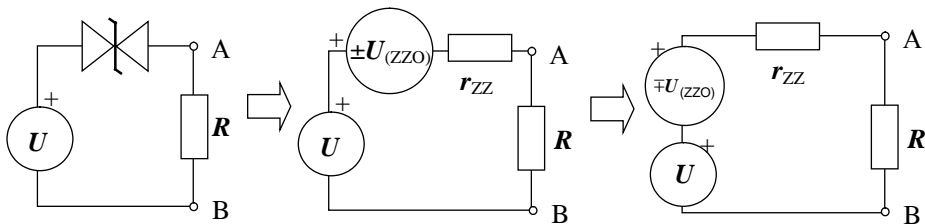
27. За коло приказано на слици:

а) одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$, под претпоставком да се карактеристика Ценер-диоде може представити приказаним дијаграмом;

б) нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$;

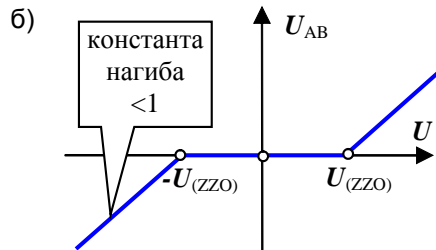
РЕШЕЊЕ

Када је улазни напон мањи од напона пробоја двојне Ценер-диоде ($U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)}$) излазни напон је једнак нули. Када диоде воде, отпорност r_{ZZ} делује на ред са изворима напона U и $U_{(ZZO)}$.

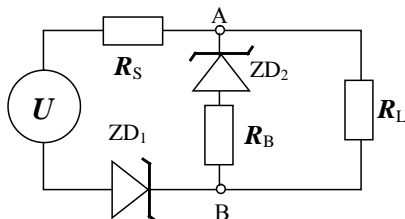


а)
$$U_{AB} = \begin{cases} 0 \text{ за } |U| < U_{(ZZO)} \\ \frac{R}{R + r_{ZZ}} (U \mp U_{(ZZO)}) \text{ за } |U| \geq U_{(ZZO)} \end{cases}$$

$r_{ZZ} = r_z + r_T$



28. За коло приказано на слици, под претпоставком да Ценер-диоде ZD_1 и ZD_2 имају једнаке карактеристике и да су познате вредности њихових параметара ($U_{(TO)}$, r_T , $U_{(ZO)}$ и r_Z):
- одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$;
 - нацртати карактеристику преноса, $U_{AB}(U)$ ако је:
 $R_S = R_L = 250 \Omega$, $R_B = 200 \Omega$, $U_{(TO)} = 1 \text{ V}$, $r_T = 10 \Omega$, $U_{(ZO)} = 5 \text{ V}$, $r_Z = 50 \Omega$.



РЕШЕЊЕ

Да би напон на излазу кола био позитиван, потребно је да Ценер-диола ZD_1 буде инверзно поларисана тако да се налази у стању пробоја, што значи да је улазни напон позитиван и већи од напона прага $U_{(ZO)}$.

Да би напон на излазу кола био негативан, потребно је да Ценер-диола ZD_1 буде директно поларисана, што значи да је улазни напон негативан, по интензитету већи од напона прага $U_{(TO)}$.

Када се вредност улазног напона U налази у границама од $-U_{(TO)}$ до $U_{(ZO)}$, напон U_O је једнак нули.

$$-U_{(TO)} \leq U \leq U_{(ZO)} \Rightarrow U_{AB} = 0$$

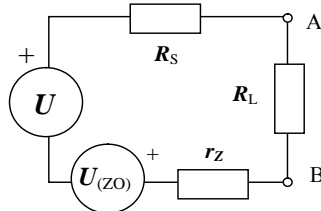
При довољно великој позитивној вредности улазног напона, диода ZD_2 такође доспева у стање инверзног пробоја. Гранична вредност, U_{GP} , позитивног улазног напона при којем долази до инверзног пробоја диоде ZD_2 одређена је условом:

$$U_{AB}(U_{GP}) = U_{(ZO)}.$$

Када се вредност улазног напона U налази у границама од $U_{(ZO)}$ до U_{GP} , коло се своди на једну контуру приказану на слици. На основу једначине:

$$U_{AB} = (U - U_{(ZO)}) \frac{R_L}{R_S + R_L + r_Z},$$

одређују се константа нагиба k_{1P} овог дела улазно-излазне карактеристике:



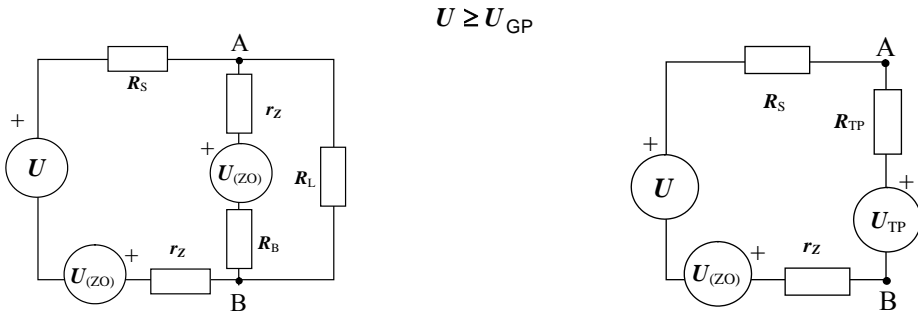
$$k_{1P} = \frac{\Delta U_{AB}}{\Delta U} = \frac{R_L}{R_S + R_L + r_Z} < 1. \quad U_{(ZO)} \leq U \leq U_{GP}$$

и гранична вредност U_{GP} ове области (при којој долази до инверзног пробоја диоде ZD_2):

$$U_{GP} \left| U_{AB}(U_{GP}) = U_{(ZO)} = U_{(ZO)} \frac{R_S + 2R_L + r_Z}{R_L} \right.$$

$$\boxed{U_{(ZO)} \leq U \leq U_{GP} \Rightarrow U_{AB} = k_{1P}(U - U_{(ZO)})}$$

Када је вредност улазног напона U већа од U_{GP} , коло садржи две контуре које се применом Тевененове теореме могу свести на једну, приказану на слици.



$$U_{TP} = U_{(ZO)} \frac{R_L}{R_B + R_L + r_Z}, \quad R_{TP} = R_L \parallel (R_B + r_Z) = \frac{R_L(R_B + r_Z)}{R_L + R_B + r_Z}.$$

За разматрано стање ($U > U_{GP} > U_{(ZO)}$) важи једначина:

$$U > U_{(ZO)} \Rightarrow U_{AB} = U_{TP} + R_{TP} \frac{U - U_{(ZO)} - U_{TP}}{R_S + R_{TP} + r_Z}$$

на основу које се може да одреди константа нагиба k_{2P} овог дела улазно-излазне карактеристике:

$$k_{2P} = \frac{\Delta U_{AB}}{\Delta U} = \frac{R_{TP}}{R_{TP} + R_S + r_Z} < k_{1P}.$$

$$\boxed{U_{GP} \leq U \Rightarrow U_{AB} = U_{(ZO)} + k_{2P}(U - U_{GP})}$$

Улазно-излазна карактеристика која одговара негативним вредностима улазног напона добија се сменом:

$$U_{(ZO)} \Rightarrow -U_{(TO)}; r_Z \Rightarrow r_T.$$

Параметри овог дела карактеристике су:

$$U_{GN} \left| U_{AB} = -U_{(TO)} = -U_{(TO)} \frac{R_S + 2R_L + r_T}{R_L}, \right.$$

$$k_{1N} = \frac{R_L}{R_S + R_L + r_T},$$

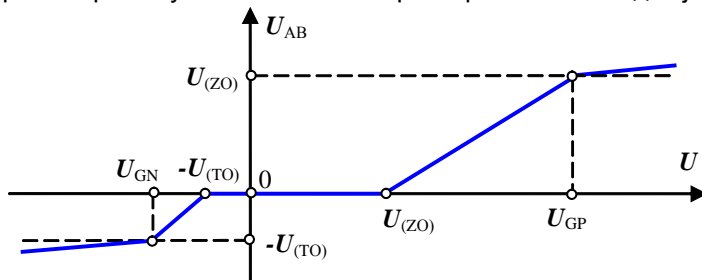
$$k_{2N} = \frac{R_{TN}}{R_{TN} + R_S + r_T},$$

$$R_{TN} = R_L \parallel (R_B + r_T) = \frac{R_L (R_B + r_T)}{R_L + R_B + r_T}.$$

$$U_{AB} = \begin{cases} U_{(ZO)} + k_{2P}(U - U_{GP}) & \text{за } U > U_{GP} \\ k_{1P}(U - U_{(ZO)}) & \text{за } U_{(ZO)} < U \leq U_{GP} \\ 0 & \text{за } -U_{(TO)} \leq U \leq U_{(ZO)}, \\ k_{1N}(U - U_{(TO)}) & \text{за } U_{GN} < U \leq -U_{(TO)} \\ -U_{(TO)} + k_{2N}(U - U_{GN}) & \text{за } U < U_{GN} \end{cases}$$

$$U_{GP} = U_{(ZO)} \frac{R_S + 2R_L + r_Z}{R_L}, \quad U_{GN} = -U_{(TO)} \frac{R_S + 2R_L + r_T}{R_L}.$$

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



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

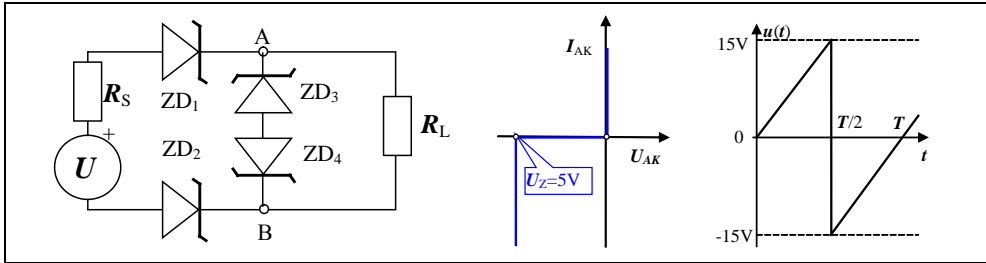
а) одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$;

б) одредити вредност излазног напона U_{AB} ако је:

$$U = 12 \text{ V}, R_S = 1 \text{ k}\Omega \text{ и } R_L = 100 \text{ k}\Omega;$$

в) нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$;

г) нацртати дијаграм таласног облика напона $u_{AB}(t)$, ако напон $u(t)$ има таласни облик приказан на слици.



РЕШЕЊЕ

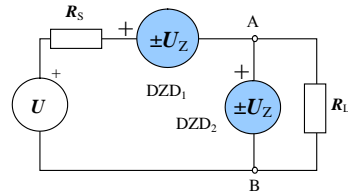
Еквивалентно коло је приказано на слици. Структура је симетрична у погледу поларитета улазног напона U . **Карактеристика преноса кола је симетрична** у односу на координатни почетак:

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

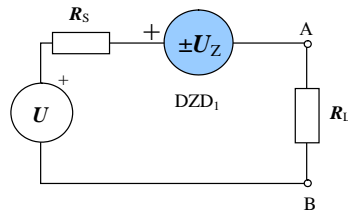
Могућа су три стања у овом колу.

За вредности улазног напона по модулу мање од U_Z , струја кроз грану кола у којој се налазе Ценер-диоде ZD_1 и ZD_2 (двојна Ценер-диоода DZD_1) једнака је нули, па је и напон U_{AB} 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, $+U_Z$, односно $-U_Z$, зависно од поларитета 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 U се пресликавају као сразмерне промене излазног напона U_{AB} . Константа преноса осрешена је односом отпорности R_S и R_L .



а) Излазни напон U_O једнак је нули све док улазни напон по интензитету не достигне граничну вредност $U_{G1} = U_Z$, када двојна диода DZD_1 почиње да води:

$$|U| \leq U_{G1} = U_Z \Rightarrow U_{AB} = 0.$$

Када је улазни напон по модулу већи од напона U_{G1} , а напон U_O на отпорнику R_L по модулу мањи од напона прага вођења двојне диоде DZD_2 , важе релације:

$$U_{AB} = R_L I_1 \text{ за } |U_{AB}| < U_Z,$$

$$I_1 = \frac{U \mp U_Z}{R_S + R_L},$$

на основу којих следи:

$$\boxed{|U_{AB}| < U_Z \Rightarrow U_{AB} = (U \mp U_Z) \frac{R_L}{R_S + R_L}}.$$

Нагиб карактеристике у овом делу је:

$$k_1 = \frac{\Delta U_{AB}}{\Delta U} = \frac{R_L}{R_S + R_L}.$$

Вредност улазног напона U , при којој напон на отпорнику R_L достиже вредност напона пробоја дуалне диоде DZD_2 , $+U_Z$, односно $-U_Z$, представља горњу границу ове области, U_{G2} , која је одређена условом:

$$U_{AB}(\pm U_{G2}) = \pm U_Z, \text{ односно}$$

$$(\pm U_{G2} \mp U_Z) \frac{R_L}{R_S + R_L} = \pm U_Z,$$

на основу којег следи:

$$\pm U_{G2} = \pm U_Z \frac{1+k_1}{k_1}.$$

Радна тачка се налази у прелазној области, када се промене улазног напона пресликавају у пропорционалне промене излазног напона, ако је улазни напон по модулу већи од U_{G1} , а мањи од U_{G2} .

$$\boxed{|U_{AB}| < U_Z \Rightarrow |U| < U_{G2} = U_Z \frac{1+k_1}{k_1}}.$$

Карактеристика преноса посматраног кола, $U_{AB}(U)$, описана је формулом:

$$U_{AB} = \begin{cases} 0; |U| \leq U_Z \\ (U \mp U_Z) \frac{R_L}{R_S + R_L}; U_Z < |U| \leq 2U_Z \left(1 + \frac{R_S}{2R_L}\right) \\ U_Z \operatorname{sgn} U; |U| \geq U_G \end{cases}$$

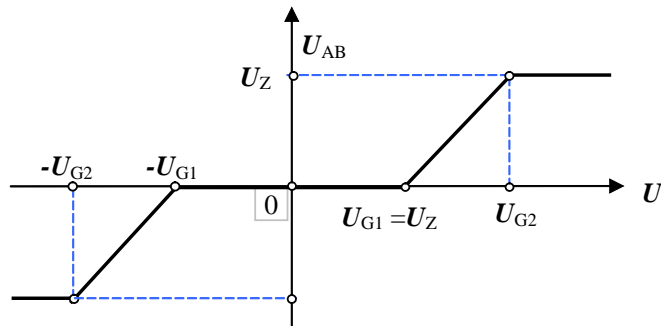
б) За задате бројне вредности ($U_Z = 5 \text{ V}$, $U = 20 \text{ V}$, $R_S = 1 \text{ k}\Omega$ и $R_L = 100 \text{ k}\Omega$) добија се:

$$k_1 = \frac{R_L}{R_S + R_L} = 0,99;$$

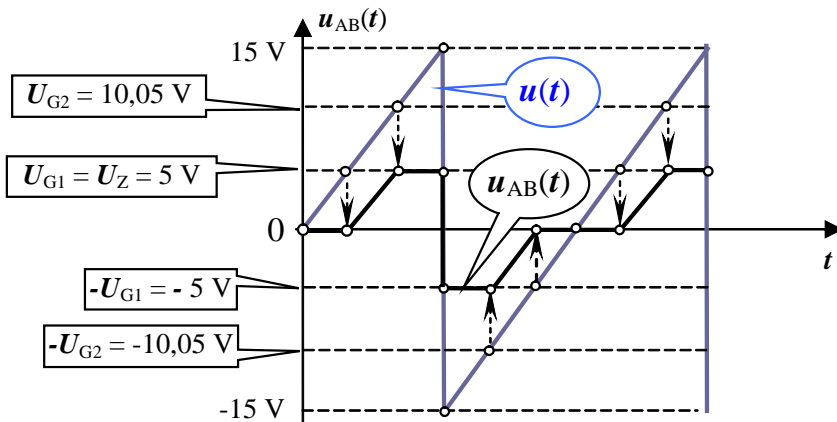
$$U_{G2} = 2U_Z \left(1 + \frac{R_S}{2R_L}\right) = 10,05 \text{ V};$$

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

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

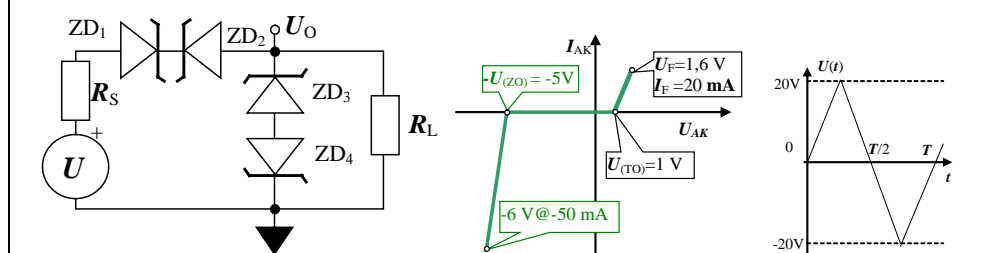


г) Временски дијаграм одзива кола дат је на слици.



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

- а) одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$;
- в) нацртати карактеристику преноса, $U_O(U)$, ако је $R_S=300 \Omega$ и $R_L=10 \text{ k}\Omega$;
- г) нацртати дијаграм таласног облика напона $u_{AB}(t)$, ако напон $u(t)$ има таласни облик приказан на слици.



РЕШЕЊЕ

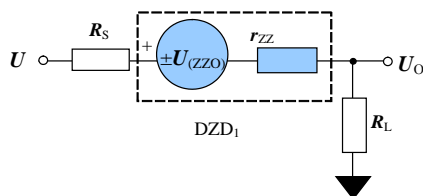
Карактеристика преноса $U_O(U)$ је симетрична у односу на координатни почетак. Средишњи део представља област неосетљивости: излазни напон је једнак нули докле год је улазни напон по својој вредности мањи од граничне вредности U_{G1} , коју представља напон пробоја двојне Ценер-диоде, $U_{(ZZO)}$:

$$|U| \leq U_{G1} = U_{(ZZO)} \Rightarrow U_O = 0.$$

Када је улазни напон већи од напона $U_{(ZZO)}$, диоде ZD_1 и ZD_2 су у проводном стању, па се промене улаза се пресликавају на промене излаза. Притом су могућа два стања, зависно од стања у којем се налазе диоде ZD_3 и ZD_4 .

1) Диоде ZD_3 и ZD_4 не воде.

$$|U| > U_{G1} = U_{(ZZO)} \wedge |U_O| < U_{(ZZO)}$$



$$U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)}, r_{ZZ} = r_Z + r_T.$$

Функција $U_O(U)$ у овој области дефинисана је изразом:

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

на основу којег може да се одредити константа нагиба:

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

Функција преноса има облик:

$$U_O = k_1(U \mp U_{(ZZO)}).$$

Границу ове области представља вредност улазног напона U , при којој је напон на отпорнику R_L једнак напону пробоја дуалне диоде DZD_2 , $+U_{(ZZO)}$, односно $-U_{(ZZO)}$, зависно од поларитета улазног напона. Гранична вредност, U_{G2} , одређена је условом:

$$U_O(\pm U_{G2}) = \pm U_{(ZZO)}, \text{ односно:}$$

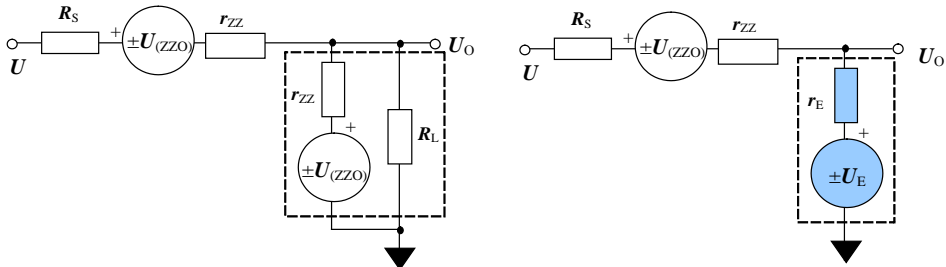
$$(\pm U_{G2} \mp U_{(ZZO)}) \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L} = \pm U_{(ZZO)}, \text{ на основу којег следи:}$$

$$U_{G2} = U_{(ZZO)} \frac{1+k_1}{k_1} = 2U_{(ZZO)} \left(1 + \frac{R_S + r_{ZZ}}{2R_L}\right).$$

II) Диоде ZD_3 и ZD_4 воде.

$$|U| > U_{G2} \Leftrightarrow |U| > U_{(ZZO)} \wedge |U_O| \geq U_{(ZZO)}.$$

Еквивалентно коло дато је на слици. Применом Тевененове теореме, ово коло се своди на једну петљу.



$$U_O = \pm U_E + r_E \frac{U \mp U_{(ZZO)} \mp U_E}{R_S + r_{ZZ} + r_E},$$

$$U_E = U_{(ZZO)} \frac{R_L}{R_L + r_{ZZ}}, r_E = R_L \parallel r_{ZZ} = \frac{R_L r_{ZZ}}{R_L + r_{ZZ}}.$$

$$k_2 = \frac{dU_O}{dU} = \frac{r_E}{R_S + r_{ZZ} + r_E} < k_1.$$

Функција $U_O(U)$ је непрекидна, за $U > U_{G2}$ напон $U_O(U)$ у овој области се може приказати изразом:

$$U_O = \pm U_{(ZZO)} + k_2(U \mp U_{G2}); U_{G2} < |U|.$$

На основу спроведене анализе, следи да је карактеристика преноса посматраног кола, $U_O(U)$, описана формулом:

$$U_{AB} = \begin{cases} U_{(ZZO)} + k_2(U - U_G); U > U_G \\ k_1(U - U_{(ZZO)}); U_{(ZZO)} < U \leq U_G \\ 0; |U| \leq U_{(ZZO)} \\ k_1(U + U_{(ZZO)}); -U_G < U \leq -U_{(ZZO)} \\ -U_{(ZZO)} + k_2(U + U_G); U < -U_G \end{cases} \quad \begin{aligned} k_1 &= \frac{R_L}{R_S + r_{ZZ} + R_L}, \\ k_2 &= \frac{r_E}{R_S + r_{ZZ} + r_E}, \\ r_E &= R_L \parallel r_{ZZ} = \frac{R_L r_{ZZ}}{R_L + r_{ZZ}} \end{aligned}$$

$$U_G = 2U_{(ZZO)} \left(1 + \frac{R_S + r_{ZZ}}{2R_L}\right),$$

или, у “сажетом” облику:

$$U_O = \begin{cases} 0; |U| \leq U_{(ZZO)} \\ (U \mp U_{(ZZO)})k_1; U_{(ZZO)} < |U| \leq U_G \\ \pm U_{(ZZO)} + k_2[U \mp U_G]; |U| > U_G \end{cases}$$

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

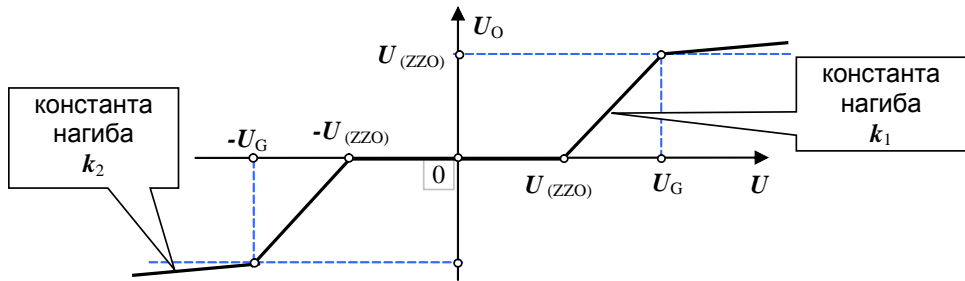
$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} = 20 \text{ } \Omega, r_T = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = 30 \text{ } \Omega, r_{ZZ} = r_Z + r_T = 50 \text{ } \Omega,$$

$$U_{(ZZO)} = U_{(ZO)} + U_{(TO)} = 6 \text{ V}, r_E = 49,75 \text{ } \Omega \cong 50 \text{ } \Omega = r_{ZZ},$$

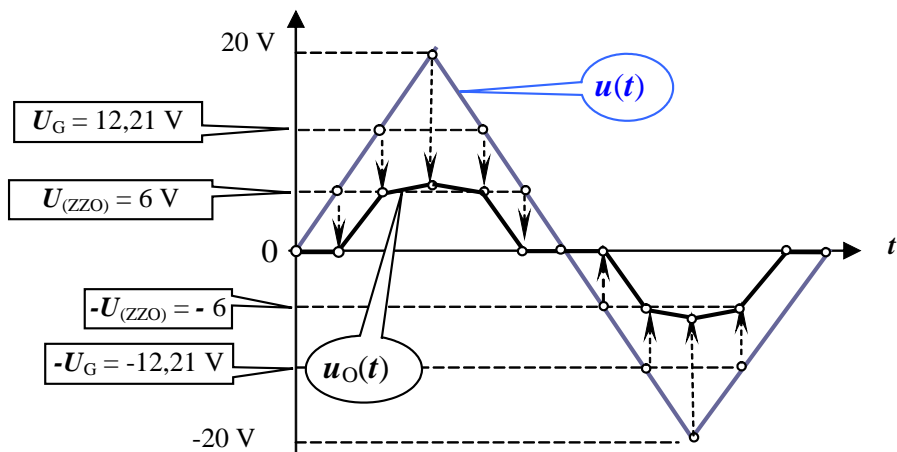
$$k_1 = 0,966 \cong 1, k_2 = 0,1245 \cong \frac{1}{8}$$

$$U_G = 2,035U_{(ZZO)} = 12,21 \text{ V}.$$

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



г) Временски дијаграм одзива кола дат је на слици.

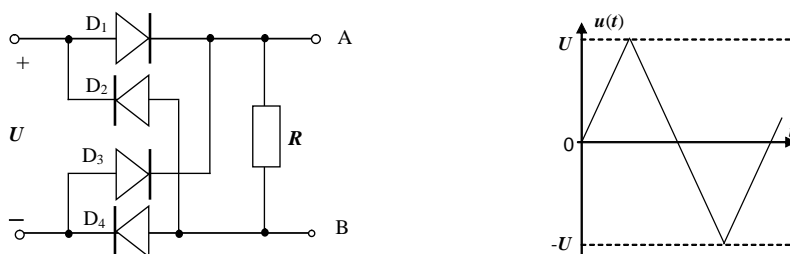


Вршна вредност напона на излазу једнака је:

$$U_O(U = 20 \text{ V}) = U_{(ZZO)} + k_2(U - U_G) = 6 \text{ V} + 0,1245(20 - 12,21) \text{ V} = 6,973 \text{ V}$$

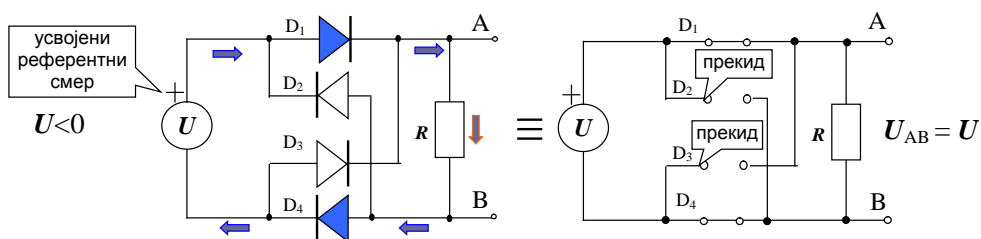
2.4. ДИОДНИ МОСТОВИ

31. У колу приказаном на слици употребљене су савршене диоде.
- Одредити 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 на улазу кола делује периодични напон $u(t)$ симетричног троугаоног таласног облика.



РЕШЕЊЕ

- а) Када је улазни U напон једнак нули, излазни напон U_{AB} је такође једнак нули. Када је, у односу на назначен референтни смер, улазни напон U позитиван, стање у колу, које одговара таквим условима рада, приказано је на слици.



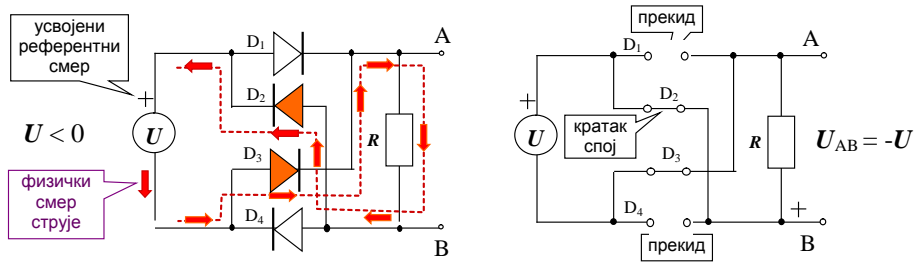
Воде диоде D_1 и D_4 . Диоде D_2 и D_3 су инверзно поларисане. Струја кроз отпорник R тече у смеру од тачке A ка тачки B . Напон U_{AB} је позитиван, по интензитету једнак улазном напону (пад напона на савршеним диодама D_1 и D_2 је једнак нули):

$$U \geq 0 \Rightarrow U_{AB} = U \geq 0.$$

Када је напон U негативан воде диоде D_2 и D_3 . Диоде D_1 и D_4 су инверзно поларисане. Струја кроз отпорник R тече у смеру од тачке A ка тачки B .

Физички смер струје у посматраном колу када на његовом улазу делује негативан напон, назначен је на слици. Излазни напон U_{AB} је позитиван, по интензитету једнак улазном напону (пад напона на савршеним диодама D_1 и D_4 је једнак нули).

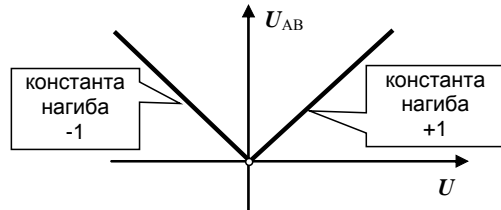
$$U < 0 \Rightarrow U_{AB} = U < 0$$



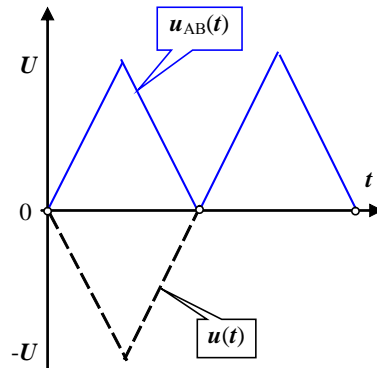
Нелинеарна мрежа коју чине четири диоде делује као модуо-коло.

$$U_{AB} = \begin{cases} U; U \geq 0 \\ -U; U < 0 \end{cases} = |U|$$

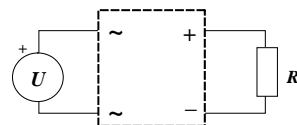
б) Карактеристика преноса $U_{AB}(U)$ приказана је на слици.



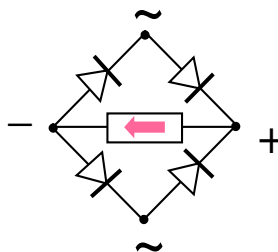
в) Дијаграми таласних облика напона у посматраном колу приказани су на слици.



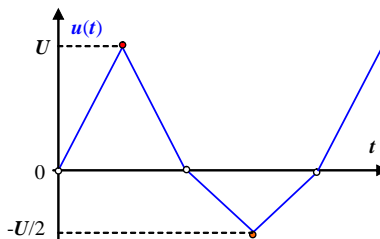
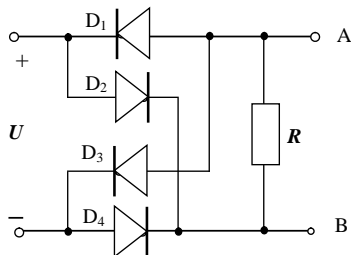
Четири диоде образују мост којим се остварује двострано (пуноталасно, full-wave) усмеравање (*rectifier bridge*). Овакву структуру први је применио немачки физичар Лео Греџ (Leo Grätz), па је уобичајено да се она назива Греџов спој или Греџов мост.



Често се у шемама Грецов спој црта на начин који је уобичајен за приказивање структуре моста у мерној техници. Улазни напон се прикључује између крајева дијагонале чији су прикључци означени симболом “~”, а оптерећење између крајева дијагонале чији су прикључци означени са “+” и “-”. Струја кроз оптерећење увек има смер од прикључка који је означен са “+” ка прикључку који је означен са “-” .

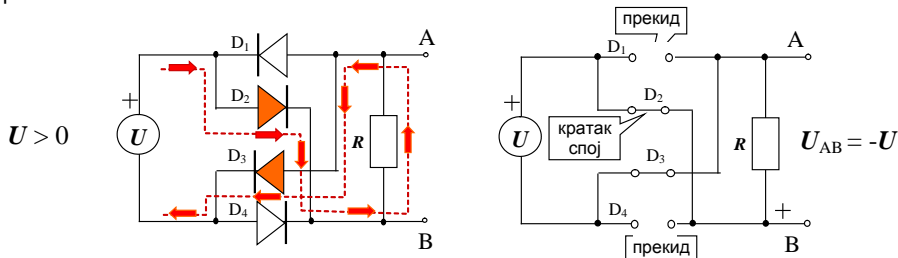


32. У колу приказаном на слици употребљене су савршене диоде.
- Одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$ на излазу кола.
 - Нацртати улазно-излазну карактеристику кола, $U_{AB}(U)$.
 - Нацртати дијаграм таласног облика напона $u_{AB}(t)$, ако на улазу кола делује променљиви напон $u(t)$, чији је таласни облик приказан на слици.



РЕШЕЊЕ

а) Када је улазни U напон једнак нули, излазни напон U_{AB} је такође једнак нули. Када је, у односу на назначен референтни смер, улазни напон U позитиван, стање у колу, које одговара таквим условима рада, приказано је на слици.

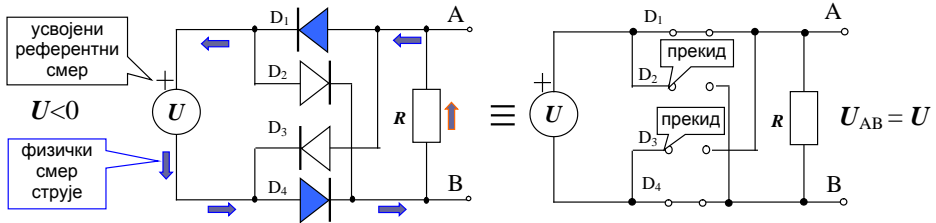


Струја кроз отпорник тече у смеру од тачке В ка тачки А. Напон U_{AB} је негативан, по интензитету једнак улазном напону (пад напона на савршеним диодама D_2 и D_3 је једнак нули):

$$U < 0 \Rightarrow U_{AB} = -U < 0.$$

Када је напон U негативан, физички смер струје је назначен на слици. Напон U_{AB} је негативан, по интензитету једнак улазном напону (пад напона на савршеним диодама D_1 и D_4 је једнак нули).

$$U < 0 \Rightarrow U_{AB} = U < 0$$

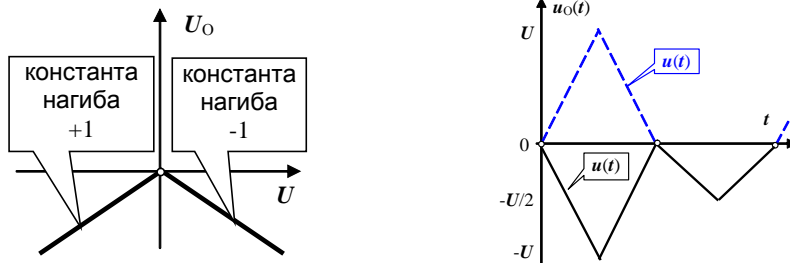


Посматрана мрежа делује као инвертујуће модуло-коло.

$$U_{AB} = \begin{cases} -U; U \geq 0 \\ U; U < 0 \end{cases} = -|U|$$

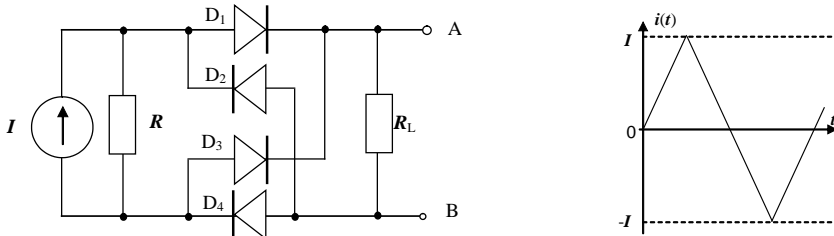
б) Улазно-излазна карактеристика кола, $U_{AB}(U)$, приказана је на слици.

в) Дијаграм таласних облика напона $u_o(t)$, када на улазу кола делује променљиви напон $u(t)$, чији је таласни облик задат, приказан је на слици.



33. У колу приказаном на слици употребљене су савршене диоде.

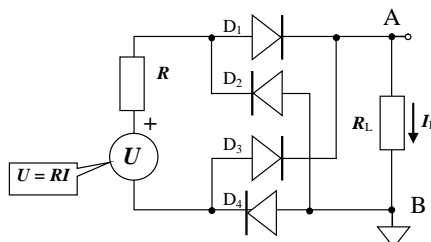
- Одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(I)$ на излазу кола.
- Нацртати улазно-излазну карактеристику кола, $U_{AB}(I)$.
- Нацртати дијаграм таласног облика напона $u_{AB}(t)$, ако на улазу кола делује периодична струја $i(t)$ симетричног троугаоног таласног облика.



РЕШЕЊЕ

Применом Тевененове теореме, посматрано коло се трансформише у коло приказано на слици.

Струја I_L кроз отпорник R_L (који представља оптерећење) има увек исти смер, без обзира на поларитет напона U (односно смер струје I). Напон U_{AB} је ненегативан.



а) Математички модел овог кола чине једначине:

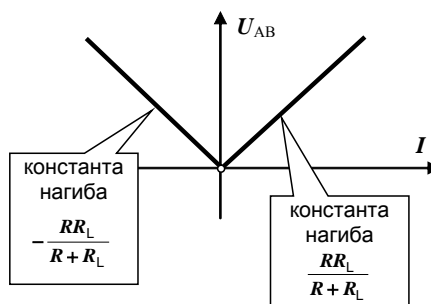
$$U_{AB} = R_L I_L$$

$$I_L = \begin{cases} \frac{U}{R + R_L}; U \geq 0 \\ -\frac{U}{R + R_L}; U < 0 \end{cases} = \frac{|U|}{R + R_L} = \frac{R}{R + R_L} |I|,$$

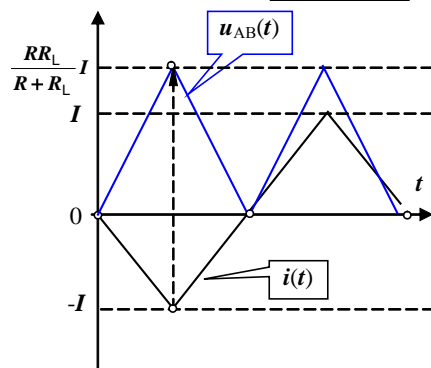
на основу којих следи:

$$U_{AB} = \frac{RR_L}{R + R_L} |I| = R \parallel R_L \cdot |I| \cdot \frac{RR_L}{R + R_L}$$

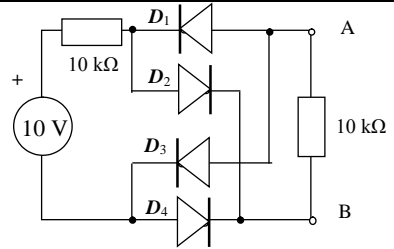
б) Улазно-излазна карактеристика кола, $U_{AB}(I)$, приказана је на слици.



в) Дијаграм таласних облика напона $u_{AB}(t)$, када на улазу кола делује периодична струја $i(t)$ симетричног троугаоног таласног облика, приказан је на слици.



34. Под претпоставком да су у колу, приказаном на слици, примењене савршене диоде, одредити вредност напона U_{AB} на излазу кола.

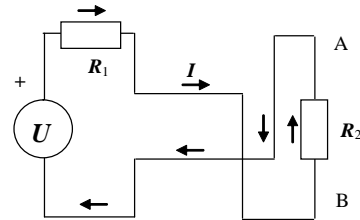


РЕШЕЊЕ

Смер струје у посматраном колу назначен је на слици. Напон U_{AB} је негативан:

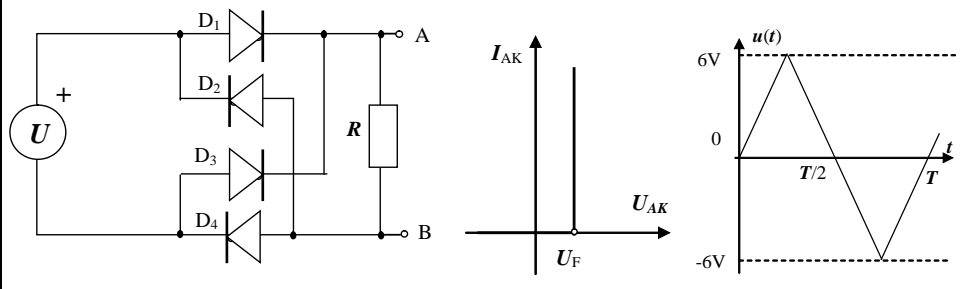
$$U_{AB} = -R_2 I < 0, \quad I = \frac{U}{R_1 + R_2},$$

$$U_{AB} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} U = -\frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} 10 \text{ V} = -5 \text{ V}$$



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

- Одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$ на излазу кола.
- Нацртати улазно-излазну карактеристику кола, $U_{AB}(U)$.
- Нацртати дијаграм таласног облика напона на излазу кола, $u_{AB}(t)$, ако је $U_F = 1 \text{ V}$, а напон $u(t)$ има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 6 V .

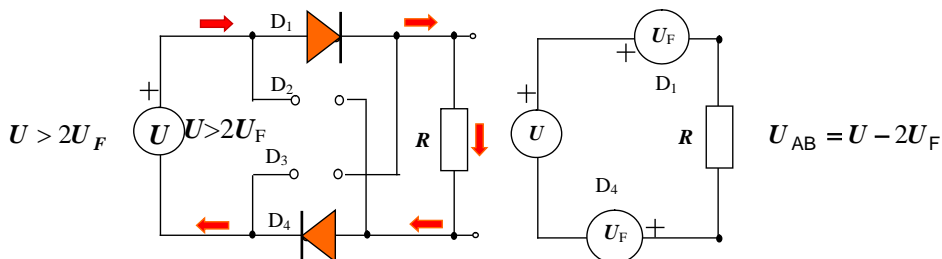


РЕШЕЊЕ

- Када је улазни U напон једнак нули, излазни напон U_O је такође једнак нули. Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода, (D_1, D_4) или (D_2, D_3) , проводи струју, што значи да напон U по модулу треба да буде већи од напона $2U_F$,

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

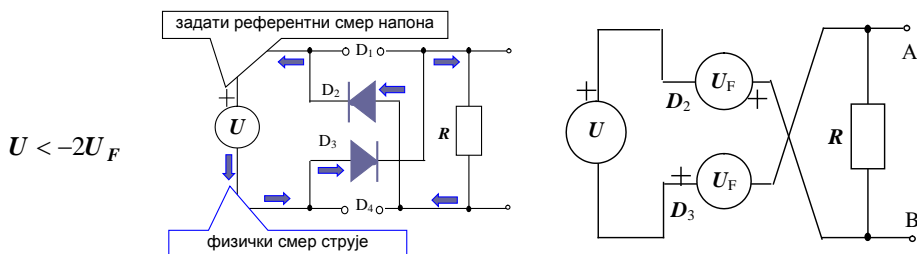
Када је, у односу на назначен референтни смер, улазни напон U позитиван и већи од напона $2U_F$ (потребног да диоде D_1 и D_4 буду у проводном стању), еквивалентно коло, које одговара таквим условима рада приказано је на слици. Смер деловања еквивалентног извора напона U_F којим се моделује диода поларисана у проводном смеру, одређен је назначеним физичким смером струје I .



Напон U_{AB} је једнак:

$$U_{AB} = U - 2U_F > 0 \text{ за } U > 2U_F .$$

Када је у односу на референтни смер назначен на слици, напон U негативан, а по интензитету већи од напона $2U_F$ (потребног да диоде D_3 и D_2 буду у проводном стању), еквивалентно коло, које одговара таквим условима рада, са назначеним поларитетима еквивалентних извора напона U_F , приказано је на слици.



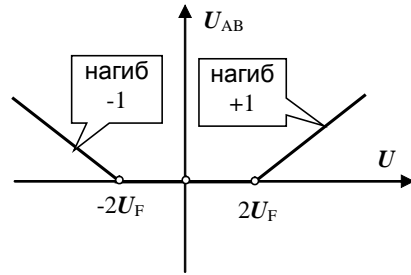
Напон U_{AB} је једнак:

$$U_{AB} = -U - 2U_F \text{ за } U < -2U_F .$$

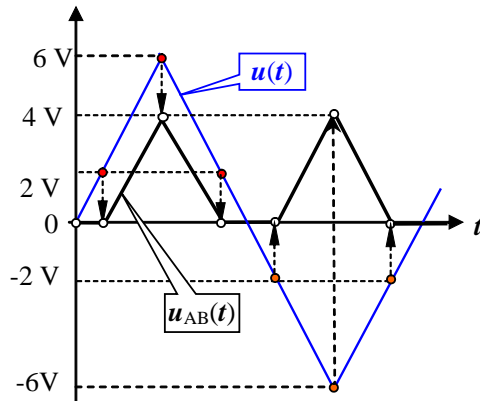
На основу спроведене анализе може се написати општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$ на излазу кола:

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

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

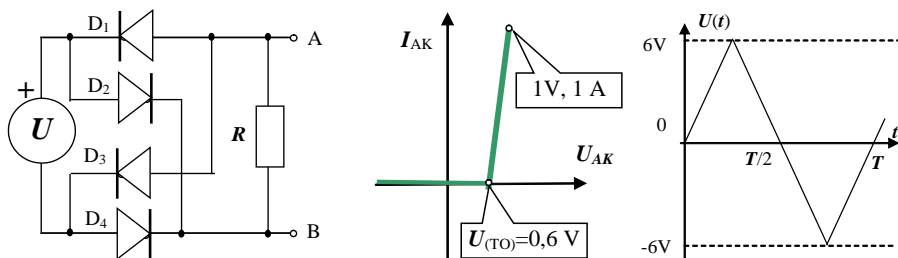


в) Дијаграми таласних облика у колу приказани су на слици. Вршна вредност излазног напона једнака је 4 V.



36. У колу приказаном на слици употребљене су силицијумске диоде типа 1N4001 чија се $U-I$ карактеристика може приближно представити приказаним дијаграмом.

- Одредити вредност отпорности нагиба, r_T , диоде 1N4001.
- Одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$ на излазу кола.
- Одредити вредност излазног напона U_{AB} ако је $U = 6\text{ V}$ и $R = 8,8\ \Omega$.
- Нацртати линеаризовану улазно-излазну карактеристику кола, $U_O(U)$.
- Нацртати дијаграм таласног облика напона $u_{AB}(t)$, ако напон $u(t)$ има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 6 V.



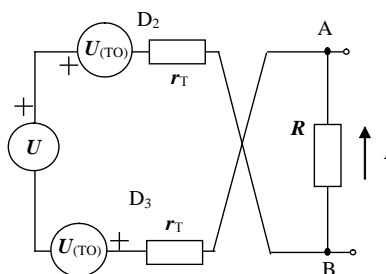
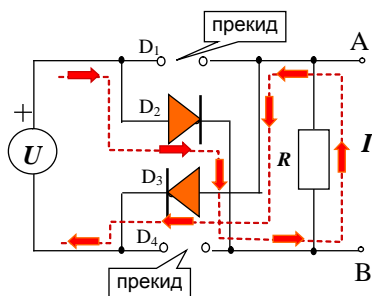
РЕШЕЊЕ.

а) $r_T = \frac{1V - 0,6V}{1A} = 0,4 \frac{V}{A} = 0,4 \Omega$

б) $|U| \leq 2U_{(TO)} \Rightarrow U_{AB} = 0$

Еквивалентно коло, које одговара условима када је, у односу на референтне смерове назначене на слици, напон U позитиван и већи од напона $2U_{(TO)}$ (односно, када диоде D_2 и D_3 воде) приказано је на слици. Смер деловања еквивалентног извора напона $U_{(TO)}$, којим се моделује диода у проводном стању, одређен је назначеним физичким смером струје I .

$U > 2U_{(TO)} \Rightarrow U_{AB} < 0$

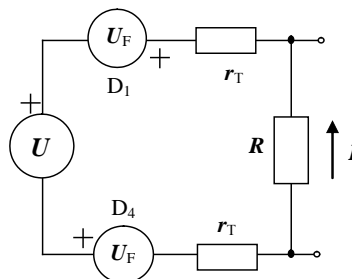
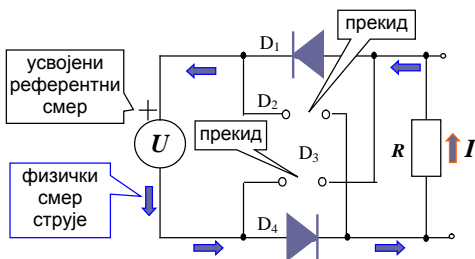


$U_{AB} = -RI$,

$I = \frac{U - 2U_{(TO)}}{R + 2r_T}$,

$U > 2U_{(TO)} \Rightarrow U_{AB} = -R \frac{U - 2U_{(TO)}}{R + 2r_T} < 0$.

Еквивалентно коло, које одговара условима када је у односу на референтне смерове назначене на слици, напон U негативан, а по интензитету већи од напона $2U_{(TO)}$ (потребног да диоде D_4 и D_1 буду директно поларисане), са назначеним поларитетима еквивалентних извора напона $U_{(TO)}$, приказано је на слици.



$$I = \frac{U + 2U_{(TO)}}{R + 2r_T},$$

$$U < -2U_{(TO)} \Rightarrow U_{AB} = R \frac{U + 2U_{(TO)}}{R + 2r_T} < 0.$$

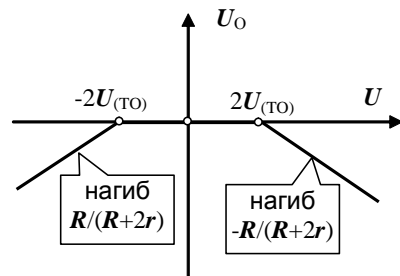
$$U_{AB} = \begin{cases} 0 & \text{за } |U| \leq 2U_{(TO)} \\ -\frac{U - 2U_{(TO)}}{R + 2r} R & \text{за } U > 2U_{(TO)} \\ \frac{U + 2U_{(TO)}}{R + 2r} R & \text{за } U < -2U_{(TO)} \end{cases}$$

в) За задате вредности напона и отпорности добија се:

$$U_{AB} = -(U - 2U_{(TO)}) \frac{R}{R + 2r} = -(6 - 1,2) \frac{8,8}{9,6} \text{ V} = -4,4 \text{ V}.$$

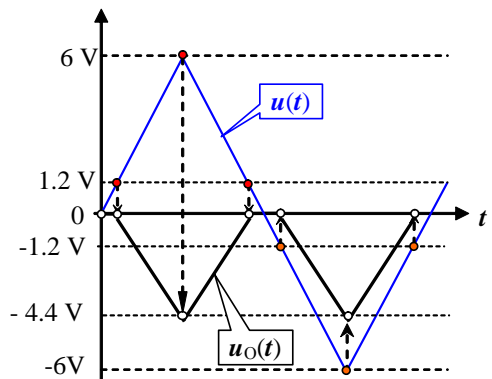
г) Карактеристика преноса $U_{AB}(U)$, приказана је на слици.

Отпорност нагиба струјно-напонске карактеристике при директној поларизацији диоде, смањује нагиб карактеристике преноса у делу када диоде воде.

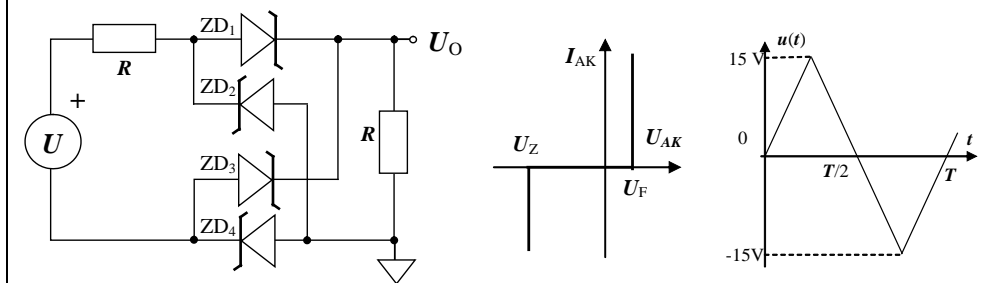


д) Дијаграми таласних облика напона у посматраном колу приказани су на слици.

Пад напона на диодама које воде смањује амплитуду излазног сигнала.



37. У колу приказаном на слици употребљене су Ценер-диоде чија се $U-I$ карактеристика може представити датим дијаграмом.
- Одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола.
 - Нацртати улазно-излазну карактеристику кола, $U_O(U)$.
 - Нацртати таласни облик напона $u_O(t)$, ако је $U_Z = 5 \text{ V}$, $U_F = 1 \text{ V}$, а напон $u(t)$ има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 15 V .



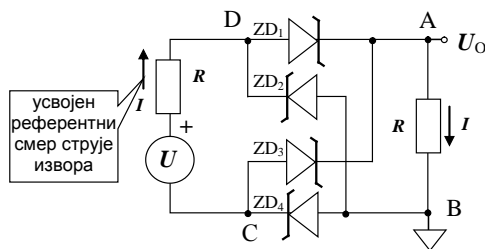
РЕШЕЊЕ.

Ако је напон на улазу посматраног кола једнак нули, излазни напон U_O је такође једнак нули. Улазно-излазна карактеристика посматраног кола, $U_O(U)$, пролази кроз координатни почетак.

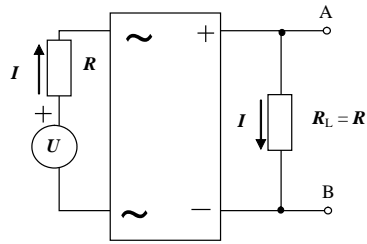
Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода, (ZD_1, ZD_4) или (ZD_2, ZD_3), проводи струју, што значи да напон U по модулу (интензитету) треба да буде већи од укупног пада напона на два диода у проводном стању при директној поларизацији. С обзиром на задати облик $U-I$ карактеристике диода, следи:

$$|U| \leq 2U_F \Rightarrow U_O = 0.$$

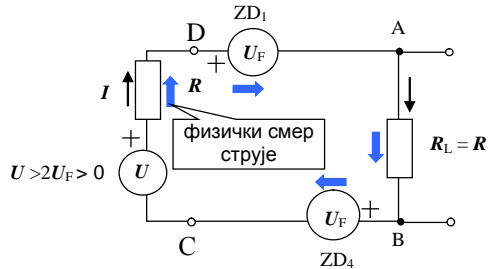
Када је у односу на референтни смер назначен на слици, напон U позитиван и већи од укупног пада напона на директно поларисаним диодама ZD_1 и ZD_4 , струја кроз отпорник R_L , коју у тим условима даје извор напона U , има такав смер да је напон $U_O = U_{AB}$ позитиван.



Када је улазни напон U по модулу само нешто мало већи од напона $2U_F$, четири Ценер-диоде делују као Грецов мост који струју, који даје извор напона U , усмерава тако да кроз оптерећење R_L тече увек у истом смеру, од тачке А ка тачки В, без обзира на поларитет напона U .



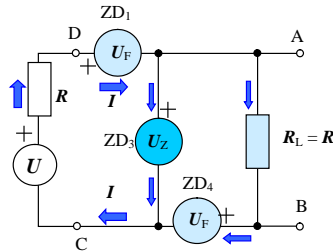
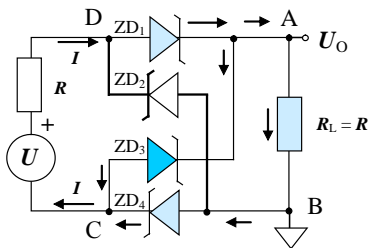
Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је $U > 2U_F > 0$, приказано је на слици. Физички смер струје се подудара са усвојеним референтним смером



Напон U_{AB} једнак је:

$$U_O = U_{AB} = R_L I = R_L \frac{U - 2U_F}{R + R_L} > 0$$

Са повећањем напона U повећава се и напон U_{AB} . Овакво стање постоји у колу све док струја која тече кроз отпорник R_L не порасте толико да напон између тачака А и С достигне напон инверзног пробоја Ценер-диоде ZD_3 која је прикључена између тачака А и С.



На основу једначине која важи за напон U_{AC} :

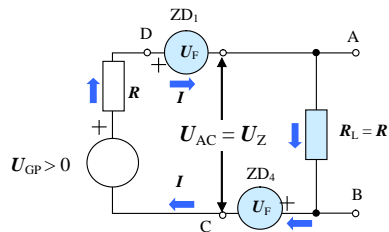
$$U_{AC} = U_{ZD3} = U_{ZD4} + U_{AB},$$

слиди да, када се Ценер-диода ZD_3 налази у стању инверзног пробоја, важи:

$$U_{AB} = -U_{ZD4} + U_{ZD3} = U_Z - U_F.$$

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

$$U_{AB}(U_{GP}) + U_{F4} = U_{Z3}.$$



За посматрано коло у овом стању важи:

$$U_{AB}(U_{GP}) = R_L I(U_{GP}) = R_L \frac{U_{GP} - 2U_F}{R + R_L}.$$

На основу претходног разматрања важи једначина:

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

из које следи:

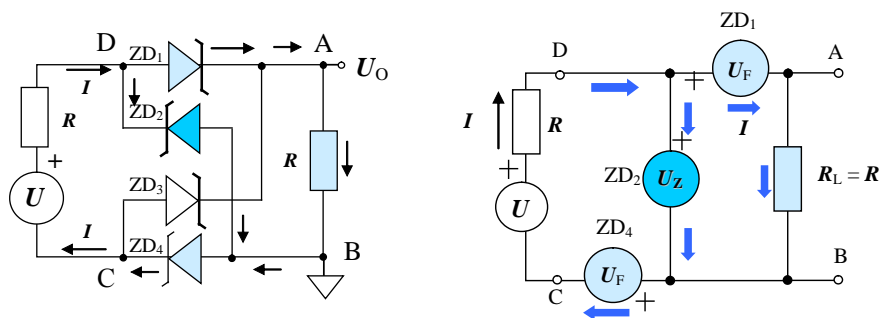
$$U_{GP} = U_Z \left(1 + \frac{R}{R_L} \right) + U_F \left(1 - \frac{R}{R_L} \right).$$

НАПОМЕНА

До истих закључака се долази и ако се уместо диоде ZD₃ посматра диода ZD₂. Напон између тачака D и B, U_{DB} , не може бити већи од напона инверзног пробоја Ценер-диоде ZD₂:

$$U_{DB} = U_{AB} + U_{ZD1} \leq U_Z.$$

$$U_{DB}(U_{GP}) = U_{AB}(U_{GP}) + U_{F1} = U_Z.$$

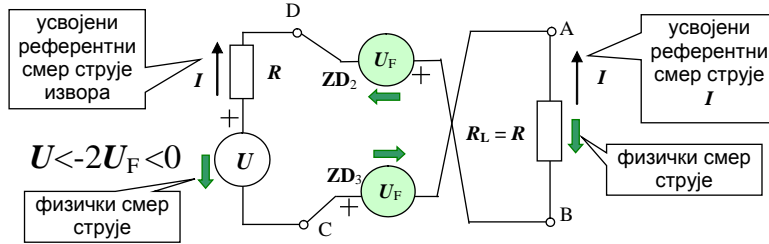


Према томе, у посматраном колу, напон U_{CD} не може да буде већи од збира напона U_Z и U_F . Напон U_{AB} не може да буде већи од разлике напона U_Z и U_F .

Еквивалентно разматрање важи и ако је, у односу на усвојени референтни смер, напон U негативан.

Када је напон U мањи од нуле, а по интензитету већи од напона $2U_F$ потребног да диоде ZD₃ и ZD₂ проводе струју у директном смеру, струја коју даје извор напона U при таквим условима, кроз грану која садржи отпорник R_L протиче у смеру од тачке A ка тачки B. Напон U_{AB} је позитиван.

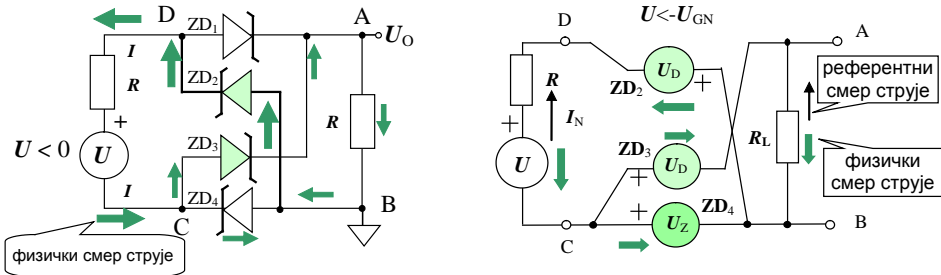
Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је збир напона на отпорнику R_L и напона на Ценер-диоди ZD_4 мањи од напона прага U_Z инверзног пробоја Ценер-диоде ZD_1 , приказано је на слици.



Напон U_{AB} је при наведеним условима једнак:

$$U_{AB} = -R_L I = -R_L \frac{U + 2U_F}{R + R_L} > 0$$

Овакво стање постоји у колу све док струја која протиче кроз отпорник R_L не порасте толико да напон између тачака С и В достигне вредност напона инверзног пробоја Ценер-диоде ZD_4 која је прикључена између тачака С и В.



На основу једначине која важи за напон U_{CB} :

$$U_{CB} = U_{ZD4} = U_{ZD3} + U_{AB},$$

слиеди да, када се Ценер-диода ZD_4 налази у стању инверзног пробоја, важи:

$$U_{AB} = U_{ZD4} - U_{ZD3} = U_Z - U_F.$$

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

$$U_{AB}(U_{GN}) + U_{F3} = U_{Z4}.$$

За посматрано коло у овом стању важи:

$$U_{AB}(U_{GN}) = -R_L I(U_{GN}) = -R_L \frac{U_{GN} + 2U_F}{R + R_L}.$$

На основу претходне две једначине следи:

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

односно:

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

а) На основу спроведених разматрања може се написати општи израз за вредност напона $U_O = U_{AB}$:

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

односно:

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

б) Ако је $R_L = R$:

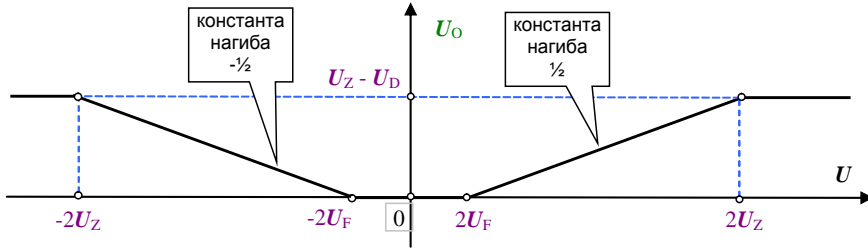
$$U_{GP} = 2U_Z = 10V, \quad U_{GN} = -2U_Z = -10V,$$

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

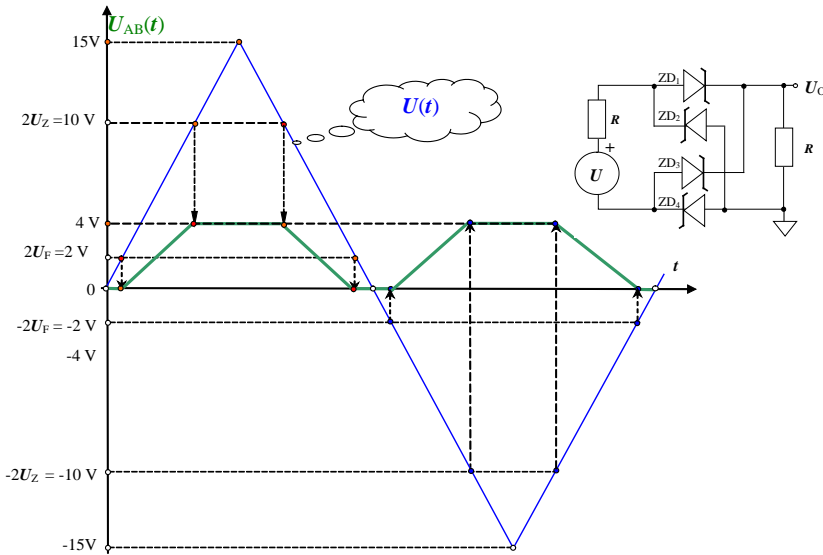
За задате вредности напона $U = 15V > U_{GP}$ је:

$$U_O(15V) = U_Z - U_D = 4V.$$

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

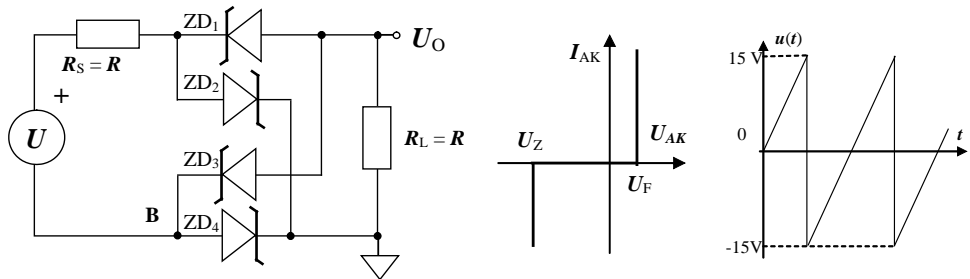


г) Дијаграми таласних облика у колу приказани су на слици.



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

- а) Одредити општи израз за вредност напона $U_O(U)$ на излазу кола.
- б) Нацртати улазно-излазну карактеристику кола, $U_O(U)$.
- в) Нацртати таласни облик напона $u_O(t)$, ако је $U_Z = 5\text{ V}$, $U_F = 1\text{ V}$, а напон $u(t)$ има троугаони таласни облик амплитуде 15 V , приказан на слици.



РЕШЕЊЕ

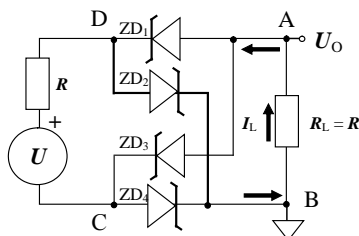
а) Анализом посматраног кола долази се до следећих закључака:

а.1. Када је напон на улазу посматраног кола по модулу мањи од од укупног пада напона на двама диодама у проводном стању, (ZD_2 и ZD_3 , ако је $U > 0$, односно ZD_4 и ZD_1 , ако је $U < 0$), излазни напон U_O је једнак нули.

$$|U| \leq 2U_F \Rightarrow U_O = 0.$$

а.2. Ако извор напона U даје струју кроз оторник R_L , њен физички смер је од тачке В ка тачки А, без обзира на поларитет улазног напона U . Излазни напон U_O је непозитивна величина:

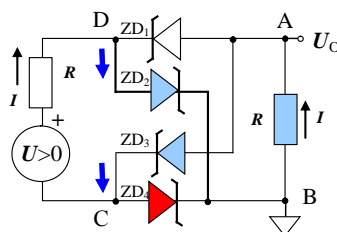
$$U_O \leq 0$$



а.3. Када је напон U позитиван и виши од напона $2U_F$, воде Ценер-диоде ZD_2 и ZD_3 .

Ценер диода ZD_4 не дозвољава да напон U_{CB} постане нижи од напона $-U_Z$.

Ценер диода ZD_1 не дозвољава да напон U_{DA} постане већи од напона U_Z .



$$U_{CB} = U_{AB} + U_{ZD3} \geq -U_Z \Rightarrow U_{AB} \geq -U_Z + U_F,$$

$$U_{DA} = -U_{AB} + U_{ZD2} \leq U_Z \Rightarrow U_{AB} \geq -U_Z + U_F$$

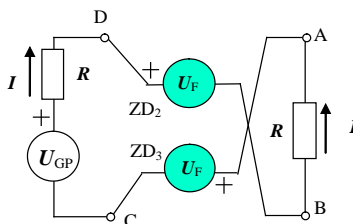
То значи да напон U_O не може да буде нижи (негативнији) од разлике напона U_F и U_Z .

Гранична вредност улазног напона, U_{GP} , при којој напон U_{BC} достиже вредност напона прага инверзног пробоја Ценер-диоде ZD_4 , одређена је условом:

$$U_{BC}(U_{GP}) = U_F - U_{AB}(U_{GP}) = U_Z.$$

Притом, за посматрано коло у овом стању, важи:

$$U_{AB}(U_{GP}) = -RI(U_{GP}) = -R \frac{U_{GP} - 2U_F}{R + R_L}.$$



На основу претходног разматрања следи једначина:

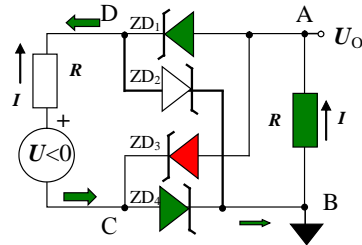
$$R_L \frac{U_{GP} - 2U_F}{R + R_L} = U_Z - U_F,$$

на основу које се добија:

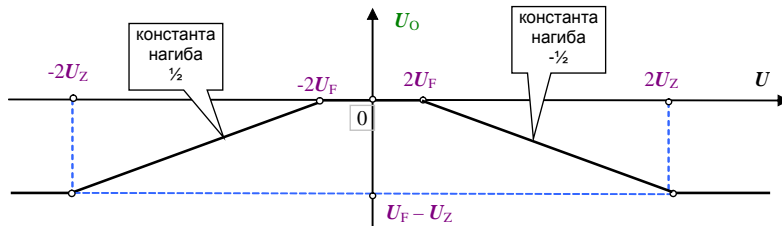
$$U_{GP} = U_Z \left(1 + \frac{R}{R_L} \right) + U_F \left(1 - \frac{R}{R_L} \right).$$

а.4. Када је напон U негативан и мањи од напона $-2U_F$, воде Ценер-диоде ZD_4 и ZD_1 . Диоде имају једнаке карактеристике па је коло симетрично у односу на поларитет улазног напона. Карактеристика $U_O(U)$ представља парну функцију:

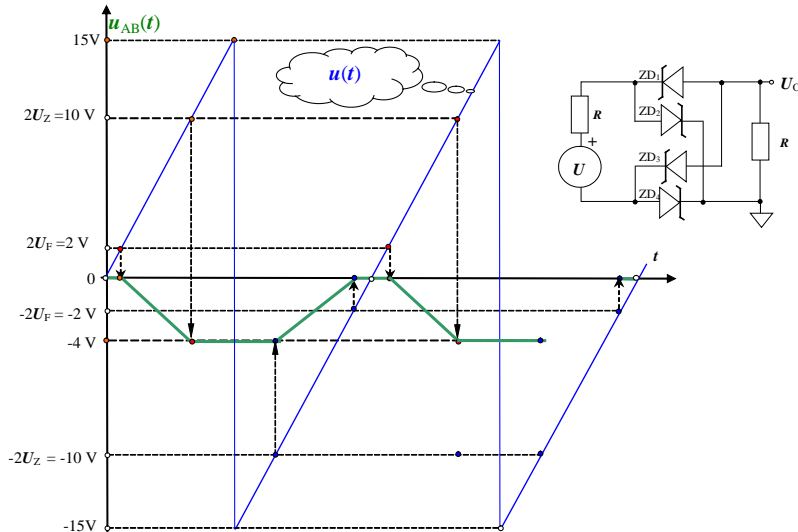
$$U_O(-U) = -U_O(U).$$



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



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



39. У колу приказаном на слици употребљене су диоде чије се $U-I$ карактеристике могу приближно представити приказаним дијаграмима;

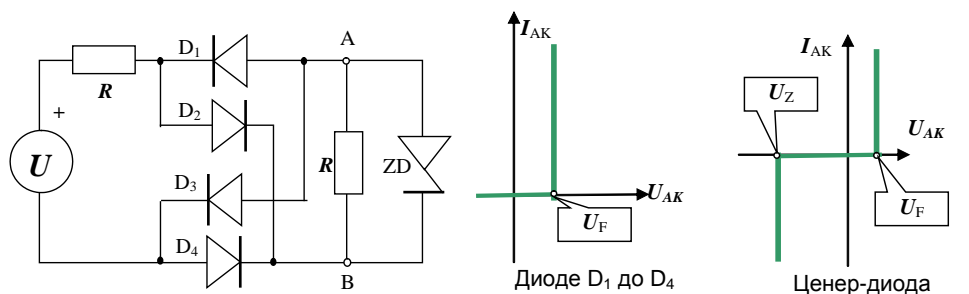
а) одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$.

Ако је напон прага U_F једнак 1V, а Ценеров напон U_Z једнак 5 V:

б) одредити вредност напона U_{AB} кадо је $U = 16$ V;

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

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



РЕШЕЊЕ

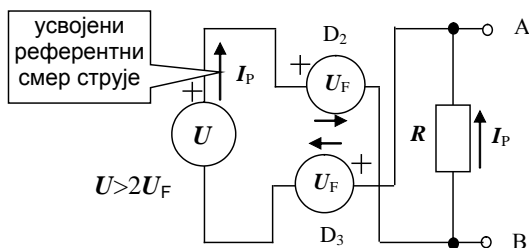
а) Могућа су три различита стања у посматраном колу.

Ако је напон U по модулу (интензитету) мањи од напона $2U_F$ струја кроз грану у којој се налази извор напона једнака је нули, па је и излазни напон једнак нули:

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

□ Када је у односу на референтни смер назначен на слици, напон U позитиван и већи од напона $2U_F$ (потребног да диоде D_2 и D_3 проводе струју), струја I_P 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 пробоја Ценер-диоде, U_Z , приказано је на слици.



Напон U_{AB} је једнак:

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

Овакав модел важи уколико је напон U_{AB} који струја I_P ствара на излазном отпорнику мањи од напона пробоја Ценер-диоде. Гранична вредност улазног напона, U_{GP} , при којој струја I_P ствара на излазном отпорнику пад напона U_{AB} једнак Ценеровом напону U_Z одређена је једначином:

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

из које следи:

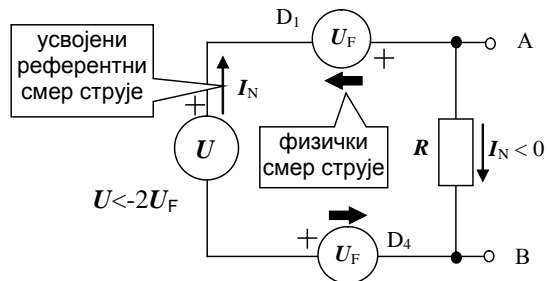
$$U_{GP} = 2(U_Z + U_F).$$

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

$$U_{AB} = -U_Z \text{ за } U > U_{GP} = 2(U_Z + U_F)$$

□ Када је у односу на изабрани референтни смер напон U негативан, а по интензитету већи од напона $2U_F$, потребног 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 улазни напон негативан, а излазни напон по интензитету мањи од напона пробоја Ценер-диоде, U_Z , приказано је на слици.



Напон U_{AB} је једнак:

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

Гранична вредност улазног напона, U_{GN} , при којој струја I_N ствара на излазном отпорнику напон U_{AB} који одговара Ценеровом напону диоде ZD , одређена је једначином:

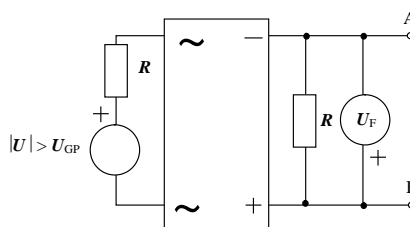
$$U_{AB} = -U_Z = \frac{U_{GN}}{2} + U_F,$$

одакле следи:

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

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

$$U_{AB} = -U_F \text{ за } |U| \geq U_{GP} = 2(U_Z + U_F)$$



Према томе, за напон U_{AB} важи:

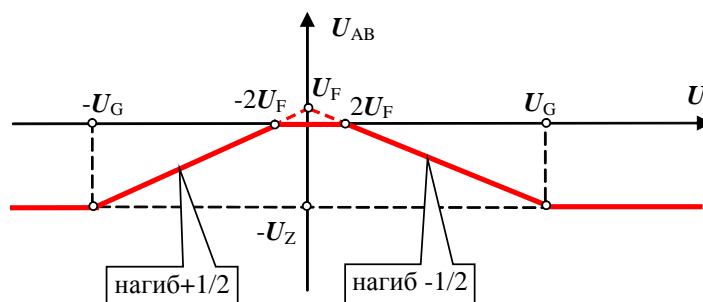
$$U_{AB} = \begin{cases} -U_F & \text{за } U > U_G \\ -\frac{U}{2} + U_F & \text{за } 2U_F < U \leq U_G \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ \frac{U}{2} + U_F & \text{за } -U_G < U < -2U_F \\ -U_F & \text{за } U < -U_G \end{cases}.$$

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

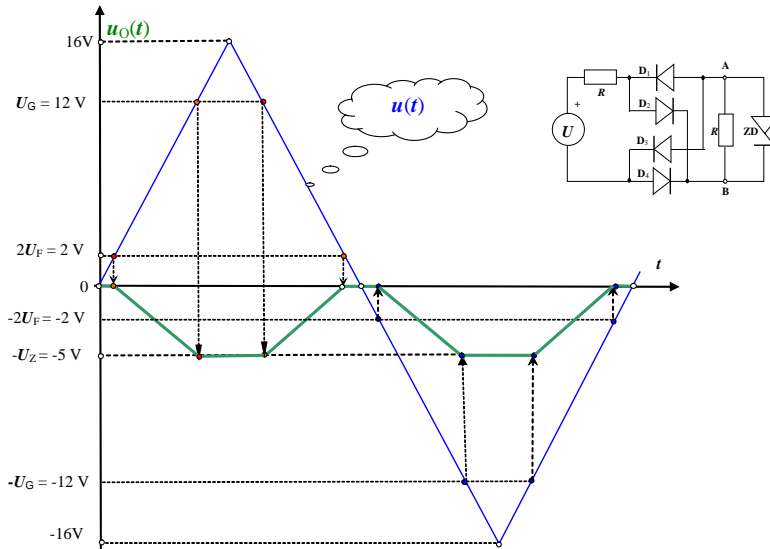
б) За задате вредности напона ($U = 16 \text{ V} > U_{GP} = 12 \text{ V}$) је:

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

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



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



40. 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;

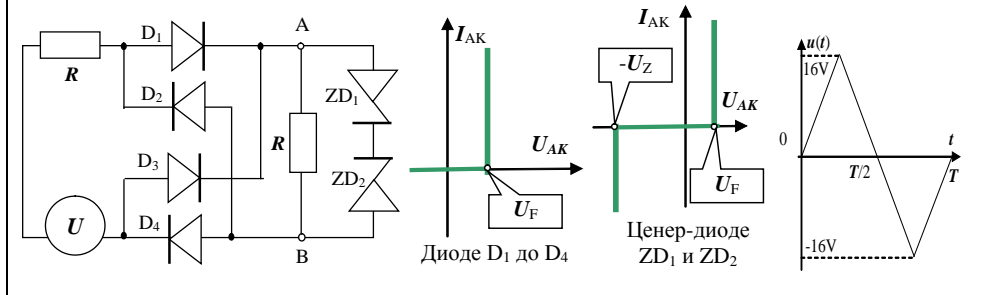
а) одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(U)$.

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 на излазу кола, $u_{AB}(t)$, ако напон $u(t)$ има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 16 V.



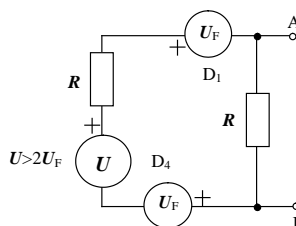
РЕШЕЊЕ

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

$$U_{AB} = R \frac{U - 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} - U_F > 0$$

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

$U_{ZZ} = U_Z + U_F$ (пробојни напон двојне Ценер-диоде коју образују ZD_1 и ZD_2).



Гранична вредност улазног напона, U_G , при којој струја, коју извор улазног напона даје, ствара на излазном отпорнику напон U_{AB} једнак напону двојне Ценер-диоде, U_{ZZ} , одређена је једначином:

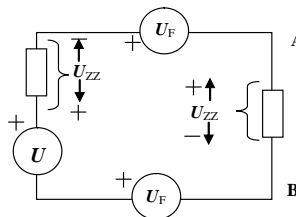
$$U_{AB}(U_G) = \frac{U_G}{2} - U_F = U_{ZZ},$$

одакле следи:

$$U_G = 2(U_{ZZ} + U_F)$$

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

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



Диоде D_1 до D_4 образују Грецов мост којим се остварује двострано усмеравање улазног напона. Излазни напон је ненегативна величина. Одзив кола на побуду негативним напонем мањем од напона $-2U_F$, потребног да диоде D_2 и D_3 постану проводне, добија се сменом $U \Rightarrow -U$ у добијеним изразима. Гранична вредност негативног улазног напона при којој струја I_N ствара на излазном отпорнику напон U_{AB} једнак напону двојне Ценер-диоде, U_{ZZ} , једнака је $-U_G$.

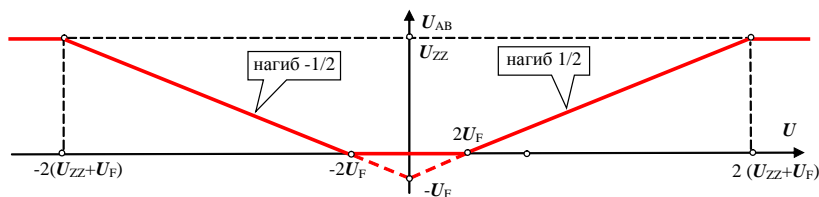
Према томе, за напон U_{AB} важи:

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

б) За задате вредности напона $U = -16 \text{ V} < -U_G = -14 \text{ V}$ је:

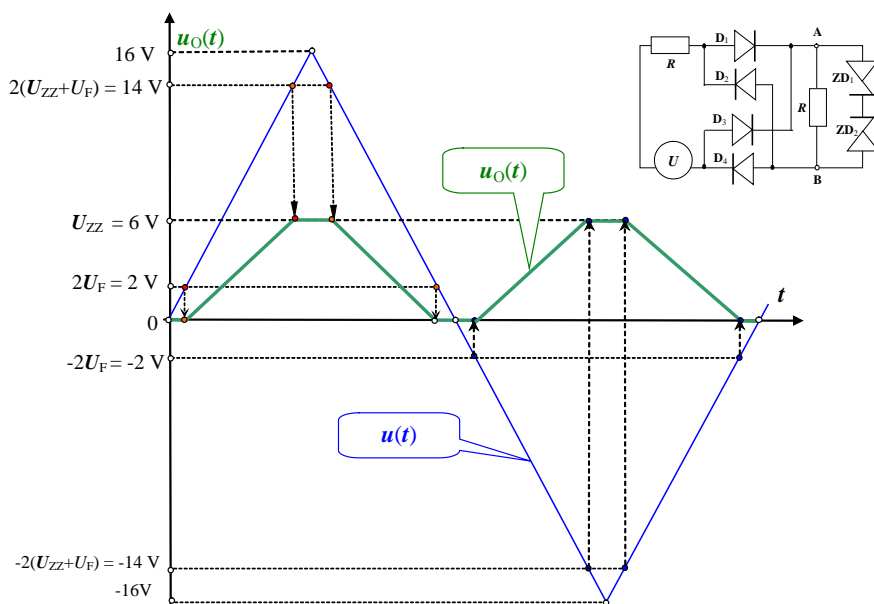
$$U_{AB}(-16 \text{ V}) = U_{ZZ} = 6 \text{ V}$$

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

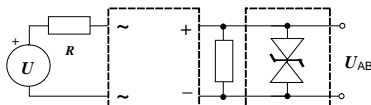


Посматрано коло представља двострани (пуноталасни, *full-wave*) усмерач са зоном неосетљивости (када је $|U| \leq 2U_F$ излазни напон је једнак нули) и zasiћењем (када је $|U| \geq 2(U_{ZZ} + U_F)$ излазни напон је једнак U_{ZZ}).

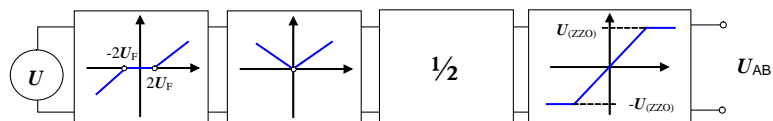
г) Дијаграми таласних облика у овом колу дати су на слици.



Посматрано коло:



представља нелинеаран систем који се може представити блок дијаграмом приказаним на слици.



41. У приказаном колу су употребљена два пара идентичних диода чије се U - I карактеристика могу представити линеаризованим дијаграмима приказаним на слици.

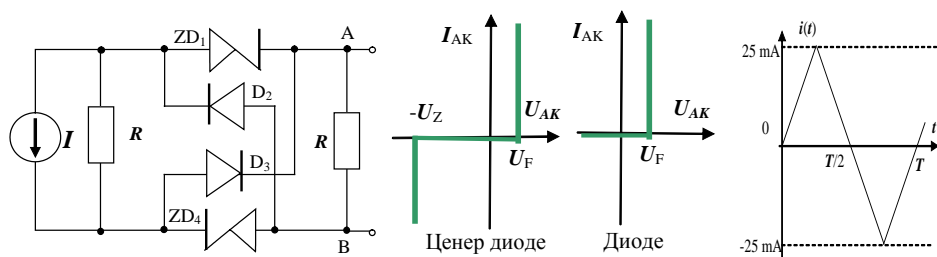
а) Одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(I)$.

Ако је 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} ако је $I = 25 \text{ mA}$, $R = 600 \Omega$;

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

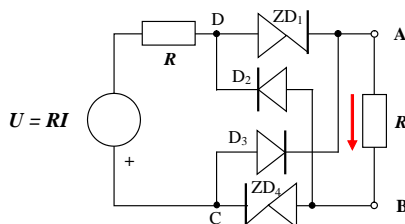
г) нацртати дијаграм таласног облика напона на излазу кола, $u_{AB}(t)$, струја $i(t)$ има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 25 mA приказан на слици.



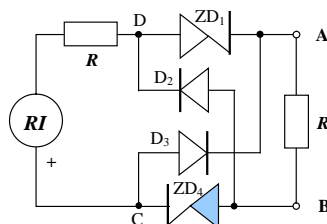
РЕШЕЊЕ

Применом Тевененове теореме, посматрано коло се трансформише у коло приказано на слици.

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.



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 еквивалентног извора треба по модулу (интензитету) да буде већи од напона $2U_F$.



Када је напон $U = RI$ негативан, напон U_{CB} по интензитету не може бити већи од напона на Ценер-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. Ценер-диоде су поларисане у директном смеру.

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 два директно поларисаним диодама ($U > 2U_F$) приказано је на слици (воде диоде D_2 и D_3).

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

Гранична вредност напона $U = RI$, U_G , при којој је напон U_{CB} једнак напону Ценер-диоде ZD_4 која проводи струју у инверзном смеру, U_Z , одређена је једначином:

$$U_{CD}(U_G) = U_Z.$$

На основу једначине:

$$U_{CD} = U_{AB} + U_F, \text{ следи: } \frac{U_G}{2} - U_F + U_F = U_Z,$$

односно:

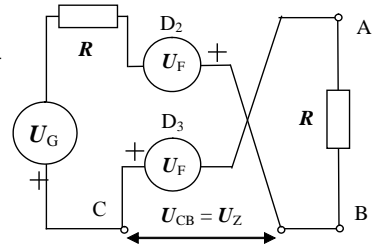
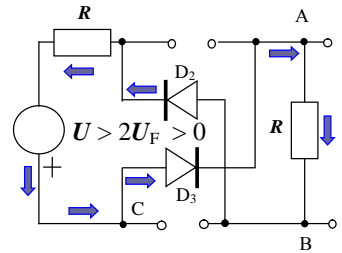
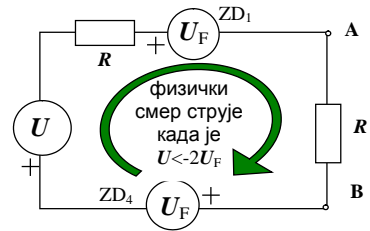
$$U_G = 2U_Z.$$

Када је напон U већи од напона U_G , напон U_{AB} је једнак:

$$U_{AB} = U_Z - U_F.$$

Према томе, за напон U_{AB} важи:

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



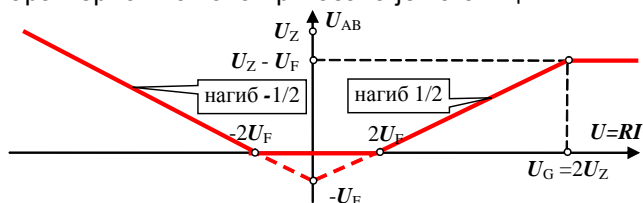
односно:

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

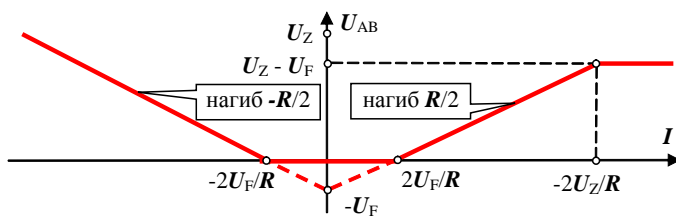
б) За задату вредност струје $I = 25 \text{ mA}$ је $U = 15 \text{ V} > 2U_Z$.

$$U_{AB}(25 \text{ mA}) = 4 \text{ V}.$$

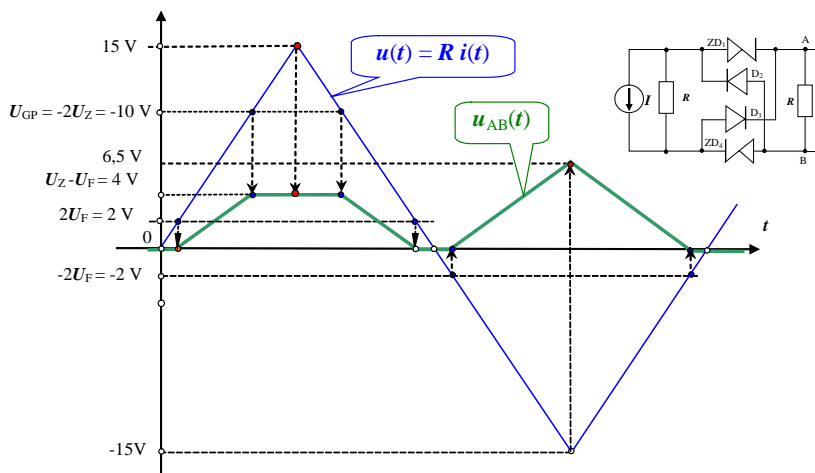
в) $U_{AB}(U)$ карактеристика кола приказана је на слици.



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



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



42. У приказаном колу су употребљена два пара идентичних диода чије се U - I карактеристика могу представити линеаризованим дијаграмима приказаним на слици.

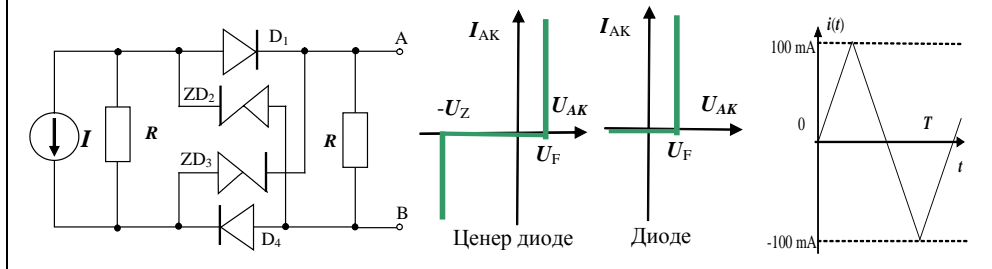
а) Одредити општи израз за вредност напона $U_{AB}(I)$.

Ако је 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} ако је $I = 100 \text{ mA}$, $R = 150 \Omega$;

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

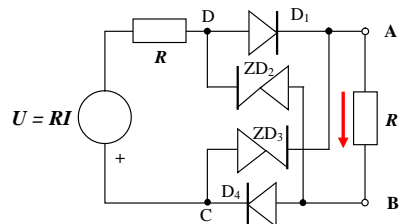
г) нацртати дијаграм таласног облика напона на излазу кола, $u_{AB}(t)$, ако а струја $i(t)$ има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 100 mA , приказан на слици.



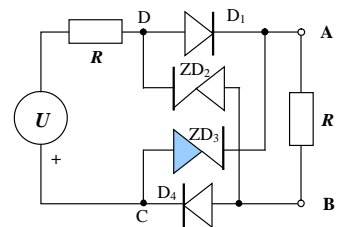
РЕШЕЊЕ

Применом Тевененове теореме, посматрано коло се трансформише у коло приказано на слици.

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.



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 еквивалентног извора треба по модулу (интензитету) да буде већи од напона $2U_F$.

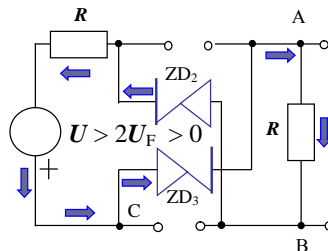


Када је напон $U = RI$ негативан, напон U_{AC} по интензитету не може бити већи од напона на Ценер-диоде ZD_3 која проводи струју у инверзном смеру (U_Z).

а) У околини координатног почетка U - I карактеристике важи:

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

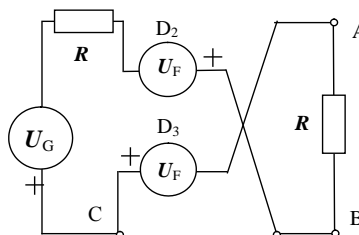
Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је напон U позитиван и већи од пада напона на два директно поларисаним диодама ($U > 2U_F$) приказано је на слици (воде Ценер-диоде ZD_2 и ZD_3 , поларисане у директном смеру).



Напон U_{AB} је једнак:

$$U_{AB} = R \frac{U - 2U_F}{2R} = \frac{U}{2} - U_F = \frac{RI}{2} - U_F,$$

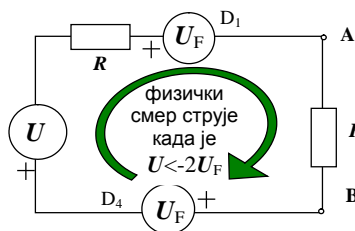
$$U \geq 2U_F, I \geq \frac{2U_F}{R}.$$



Еквивалентно коло, које одговара условима рада када је $U < -2U_F$, приказано је на слици. Води диоде D_1 и D_2 .

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_{AC} једнак напону Ценер-диоде ZD_4 која проводи струју у инверзном смеру, U_Z , одређена је једначином:

$$U_{AC}(U_{GN}) = U_Z.$$

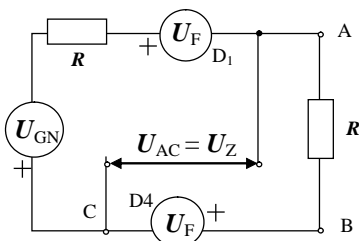
На основу једначине:

$$U_{AC} = U_{AB} + U_F \text{ добија се}$$

$$-\frac{U_{GN}}{2} - U_F + U_F = U_Z, \text{ односно:}$$

$$U_{GN} = -2U_Z$$

Када је напон U негативнији од напона U_{GN} , напон U_{AB} је једнак:



$$U_{AB} = U_Z - U_F.$$

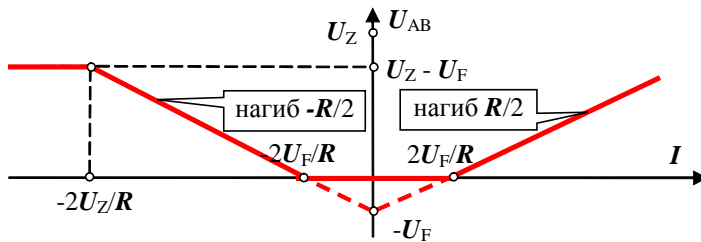
Према томе, за напон U_{AB} важи:

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

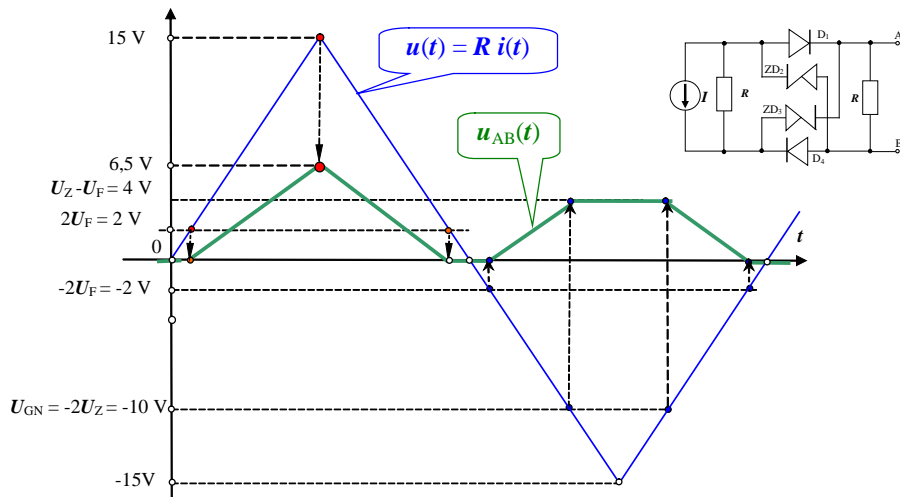
б) За задате вредности $I = 100 \text{ mA}$, $R = 150 \Omega$ је $U = 15 \text{ V}$,

$$U_{AB}(100 \text{ mA}) = 6,5 \text{ V}.$$

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



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



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

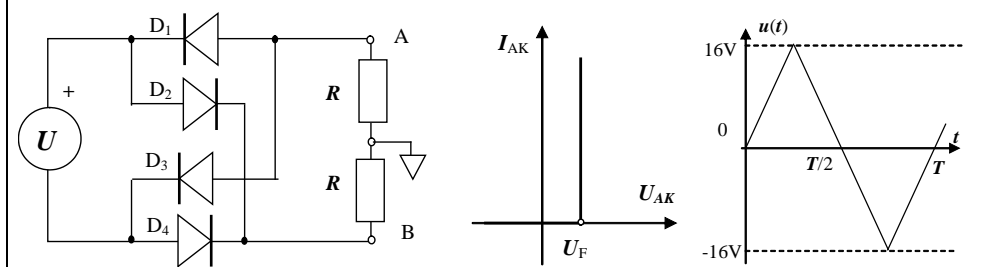
а) Одредити општи израз за вредност напона $U_A(U)$, $U_B(U)$ и $U_{AB}(U)$.

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

б) одредити вредност напона U_{AB} када је $U = 16\text{ V}$;

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

г) нацртати дијаграм таласних облика напона $u_{AB}(t)$, $u_A(t)$ и $u_B(t)$ ако напон $u(t)$ има симетрични троугаони таласни облик амплитуде 16 V.



РЕШЕЊЕ

Када је улазни U напон једнак нули, излазни напон U_{AB} је такође једнак нули. Карактеристика $U_{AB}(U)$ пролази кроз координатни почетак. Да би излазни напон био различит од нуле, потребно је да бар један пар диода, (D_1, D_4) или (D_2, D_3), проводи струју, 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 B на вишем потенцијалу од тачке A. Напон U_{AB} не може бити позитиван. Напон U_A (потенцијал тачке A у односу на референтну тачку) такође не може бити позитиван, док напон U_B не може бити негативан.

а) На основу претходног разматрања следи:

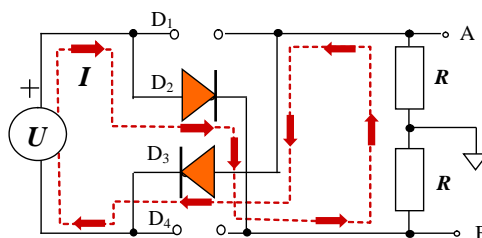
$$U_{AB} = 0, U_A = 0, U_B = 0 \text{ за } |U| \leq 2U_F.$$

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

$$U_A = -RI,$$

$$U_{AB} = U_A - U_B \text{ и}$$

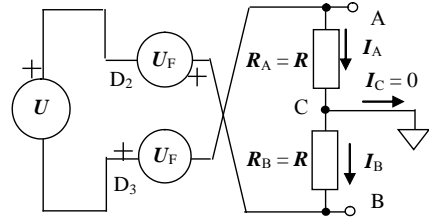
$$U_B = RI$$



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

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

$$U_{AB} = -2RI$$



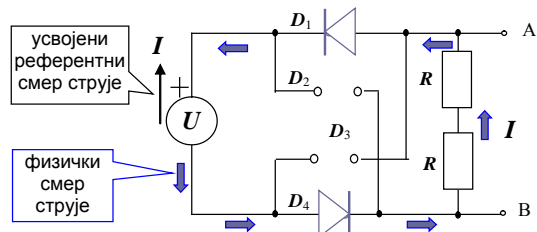
Треба уочити да је струја I_A , која протиче кроз отпорник R_A , једнака струји I_B која протиче кроз отпорник R_B . Струја I_C је једнака нули, јер не постоји затворена петља кроз коју би текла ова струја.

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

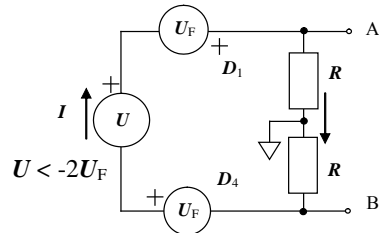
$$U_A = -R \frac{U - 2U_F}{2R} = -\frac{U}{2} + U_F < 0 \quad \text{за } U > 2U_F,$$

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

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 (диоде) 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:

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

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

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

на основу којих следи:

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

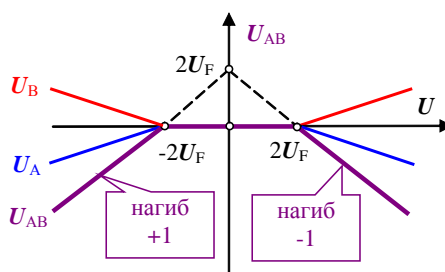
$$U_A = \begin{cases} -\frac{U}{2} + U_F & \text{за } U > 2U_F \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ \frac{U}{2} + U_F & \text{за } U < -2U_F \end{cases}, \quad U_B = \begin{cases} \frac{U}{2} - U_F & \text{за } U > 2U_F \\ 0 & \text{за } |U| \leq 2U_F \\ -\frac{U}{2} - U_F & \text{за } U < -2U_F \end{cases}.$$

б) За задату вредност напона U добија се:

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

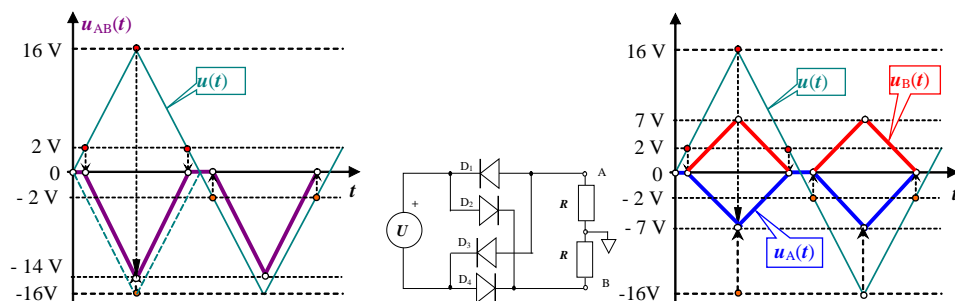
в)

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



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 $U > 2U_F$.

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.



3.

БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

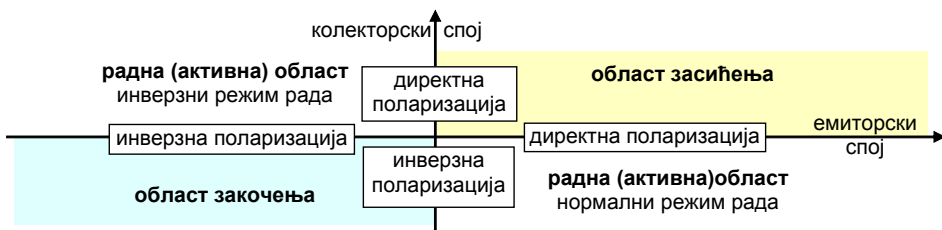
3.1. ТЕОРИЈСКА ОСНОВА

Биполарни спојни транзистор (*Bipolar Junction Transistor - BJT*) је полупроводнички елемент који садржи најмање два *PN*-споја. Структура и графички симбол *NPN*- односно *PNP*-транзистора приказани су на слици 3.1. Прикључци транзистора: емитор¹, база² и колектор³, означени су одговарајућим великим словом. Спој база-емитор назива се емиторски спој (*emitter junction - J_E*). Спој база-колектор назива се колекторски спој (*collector junction - J_C*). Стрелица у графичком симболу транзистора означава физички смер струје при директној поларизацији споја база-емитор.



Слика 3.1. Структура и графички симбол биполарног транзистора

Стање транзистора зависи од поларизације спојева. Четири могућа стања транзистора приказана су на слици.



Слика 3.2. Области рада транзистора

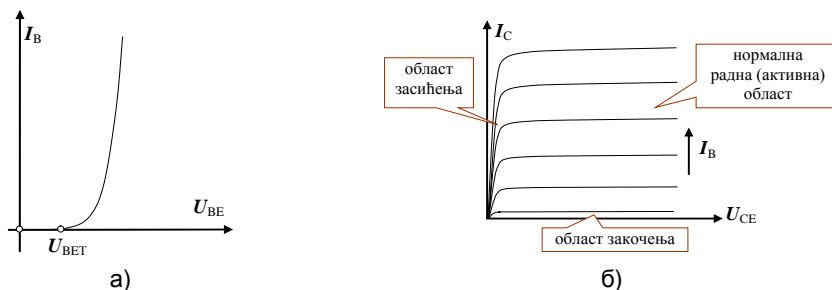
¹ Емитор (*emitter*) је скраћени назив за емиторску област. То је област биполарног транзистора из које, при одговарајућој поларизацији, већински слободни носиоци наелектрисања дифузијом прелазе у област базе (лат. *emissio*, одавање, испуштање).

² База (*base*) је област кроз коју се слободни носиоци наелектрисања преносе између области емитора и колектора (грч. *basis*, основа, подлога).

³ Колектор (*collector*) је спољашња област у којој се сакупљају слободни носиоци наелектрисања који су из емитора доспели у базу (лат. *collectare*, сакупљати).

Када су оба споја инверзно поларисана струје кроз улазне прикључке (емитор, база и колектор) су веома мале⁴. Проводна веза између колектора и емитора је прекинута, транзистор је закочен. Овакво стање одговара стању електричног прекидача који је отворен (*OFF*). Напон колектор-емитор, U_{CE} , одређен је стањем спољашњег кола.

Да би транзистор био у проводном стању, напон база-емитор, U_{BE} , мора да буде већи од напона прага вођења емиторског споја, U_{BET} (слика 3.3.а). Када је напон U_{BE} мањи од U_{BET} струја базе I_B је занемарљиво мала, транзистор је закочен.



Слика 3.3. Улазна и излазна статичка карактеристика *NPN*-транзистора у споју са заједничким емитором

Када је емиторски спој поларисан у пропусном, а колекторски спој у непропусном смеру омогућено је преношење наелектрисања између колектора и емитора⁵. Вредност струје колектора одређена је првенствено напонем база-емитор, а веома мало зависи од напона колектор-емитор. У овим условима транзистор делује као појачавачки елемент: промена струје колектора, I_C , сразмерна је промени напона база-емитор, U_{BE} .

У U_{CE} - I_C равни, карактеристика транзистора се приказује фамилијом кривих које одговарају различитим вредностима струје базе, као параметра (слика 3.3.б). Област која одговара стању када је емиторски спој директно, а колекторски инверзно поларисан, представља нормалну радну област транзистора као појачавача⁶.

Када су оба споја директно поларисана, каже се да је биполарни транзистор у стању засићења (*saturation*). Напон између колектора и емитора је тада мали, а струја између колектора и емитора одређена стањем кола у којем се транзистор налази. Ово стање одговара стању прекидача који је затворен (*ON*).

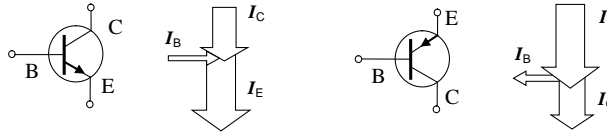
Радна тачка којом се стање транзистора представља у U_{CE} - I_C равни је у нормалној радној (активној) области када је емиторски спој поларисан у

⁴ Када би транзистор био савршен, ове струје би биле једнаке нули.

⁵ Преношење наелектрисања кроз спој засновано је на процесу дифузије.

⁶ У англоамеричкој литератури, ово подручје се назива "активна област" (*active region of operation*).

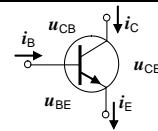
пропусном, а колекторски спој у непропусном смеру. За *NPN* транзистор то значи да је напон U_{BE} већи од напона прага вођења, U_{BET} , а напон U_{CB} већи од нуле. Струја колектора I_C је тада сразмерна струји базе (слика 3.3.б).



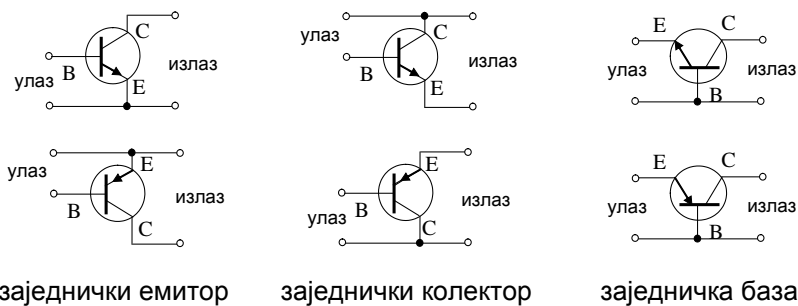
Слика 3.4. Физички смер и однос интензитета струја транзистора као појачавачког елемента са три прикључка

За транзистор, као елемент са три прикључка, у сваком тренутку важи:

$$i_E = i_B + i_C, \text{ и } u_{CE} = u_{BE} + u_{CB}$$



Биполарни спојни транзистор је трополни појачавачки елемент који се у електрично колу прикључује као елемент са два приступа, од којих један представља улаз, а други излаз. У зависности од тога који је прикључак заједнички⁷ разликују се три начина повезивања приказана на слици 3.5.



Слика 3.5. Спојеви транзистора

Прикључак за базу увек припада улазном приступу. Прикључак за колектор увек припада излазном приступу.

Када је емиторски спој поларисан у директном, а колекторски у инверзном смеру, радна тачка којом је представљено стање транзистора у U_{CE} - I_C равни налази се нормалној радној области (слика 3.3.б). У таквим условима, статичка карактеристика биполарног транзистора, се моделује једначином:

$$i_C = \beta i_B + (\beta + 1)I_{CBO}, \quad (3.1)$$

⁷ Заједнички прикључак је прикључак за који се може сматрати да се његов потенцијал не мења услед деловања побуде (улазног сигнала).

у којој β представља величину која се назива појачање струје од базе до колектора:

$$\beta = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B - I_{CBO}}, \quad (3.2)$$

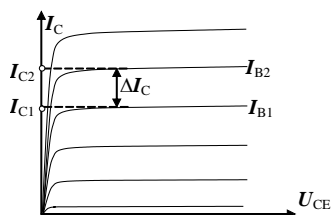
а I_{CBO} је инверзна струја колекторског споја⁸ (*collector-base reverse current*).

На основу 3.1 и 3.2 следи:

$$i_E = (1 + \beta)(i_B + I_{CBO}). \quad (3.3)$$

Вредност појачања β може да се одреди графичким путем, на основу дијаграма који приказује излазну статичку карактеристику транзистора у споју са заједничким емитором:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{B2} - I_{B1}}$$



Ако струја I_{CBO} може да се занемари, важи:

$$i_C = \beta i_B, \quad i_E = \beta + 1 i_B, \quad i_C = \frac{\beta}{\beta + 1} i_E = \alpha i_E. \quad (3.4)$$

Величина се назива појачање струје од емитора до колектора:

Једначина 3.1 представља само апроксимацију у којој нису обухваћени ефекти свих процеса који се одвијају у транзистору. При повећању напона колектор-база долази до повећања вредности величине β , што се манифестује као повећање струје колектора. Ова појава се назива Ерлијев ефекат⁹. На $I_C(U_{CE})$ дијаграму испољава се као нагиб карактеристике у нормалној радној области. У првој апроксимацији, зависност $i_C(i_B, u_{CE})$ се моделује једначином:

$$i_C(i_B, u_{CE}) \cong i_C(i_B) + \Delta i_C(i_C, u_{CE}), \quad (3.5)$$

у којој је прираштај струје колектора, који настаје услед Ерлијевог ефекта, Δi_C , одређен изразом:

$$\Delta i_C(i_C, u_{CE}) \cong i_C \frac{u_{CE}}{U_{EY}}, \quad (3.6)$$

⁸ Потпун назив ове величине је “инверзна струја колекторског споја при отвореном емитору”. Велико слово О у индексу означава да величина I_{CBO} представља струју која тече између колектора и базе када је емиторски прикључак отворен (*open*), што имплицира да је струја емитора једнака нули (користи се и назив: струја прекида, *collector cut-off current*).

⁹ У литератури се, понекад, користи и назив “реакција колектора”.

Величина U_{EY} у овом изразу назива се Ерлијев напон¹⁰. Прираштај струје колектора може да се представи у облику:

$$\Delta i_C(u_{CE}) = \frac{u_{CE}}{r_{CE}}, \quad (3.7)$$

којим је дефинисана инкрементална (диференцијална) излазна отпорност r_{CE} , која одговара нагибу $I_C(U_{CE})$ карактеристике у нормалној радној области:

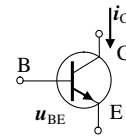
$$r_{CE} = \frac{U_{CY}}{i_C}. \quad (3.8)$$

Типичне вредности ове величине налазе се у границама од 50 kΩ до 100 kΩ.

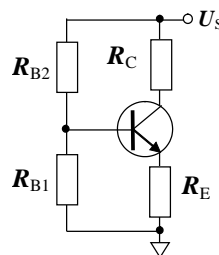
Процес преношења наелектрисања кроз транзистор је такав да струја колектора I_C зависи од напона база-емитор U_{BE} . Однос ових величина се моделује једначином:

$$i_C \cong I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}, \quad (3.9)$$

где је I_S параметар транзистора зависан од његове конструкције¹¹.



Да би се транзистор довео у стање када делује као појачавачки елемент, потребно је да његови спојеви буду поларисани на одговарајући начин. Основна структура којом се остварује подешавање мирне радне тачке¹², коришћењем једног извора напона напајања, приказана је на слици 3.6. Положај радне тачке на $I_C(U_{CE})$ дијаграму зависи не само од напона напајања и отпорности у колу, него и од својстава транзистора. Вредност мирне радне струје I_{CQ} зависи од појачања струје од базе до колектора, β , напона база-емитор при раду у активној области, U_{BE} , и инверзне струја колекторског споја I_{CBO} .



Слика 3.6. Поларизација транзистора

Стабилност мирне радне тачке описује се посредно, преко показатеља осетљивости струје I_C на промене утицајних величина. Ови показатељи

¹⁰ У англоамеричкој литератури, ова величина се обично обележава са V_A .

¹¹ Струја I_C представља струју засићења (*saturation current*) емиторског споја. Њена вредност је, типично, у опсегу од 10^{-12} А до 10^{-15} А.

¹² Мирна радна тачка (*quiescent point*) дефинише стање транзистора у одсуству променљивог улазног сигнала.

дефинишу се као први извод функције више променљивих $I_C(U, I_{CBO}, U_{BE}, \beta)$, одређен у односу на изабрану утицајну величину посматрану као независну променљиву, при чему све остале величине имају сталну вредност. Као показатељи нестабилности мирне радне тачке посматрају се одговарајући парцијални изводи:

$$S_{I_{CBO}} = \frac{\partial i_C}{\partial I_{CBO}} = \frac{di_C}{dI_{CBO}} \Big|_{u_{BE} = \text{const}; \beta = \text{const}}$$

$$S_{U_{BE}} = \frac{\partial i_C}{\partial u_{BE}} = \frac{di_C}{du_{BE}} \Big|_{I_{CBO} = \text{const}; \beta = \text{const}}$$

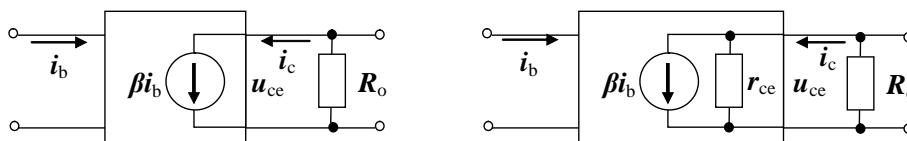
$$S_{\beta} = \frac{\partial i_C}{\partial \beta} = \frac{di_C}{d\beta} \Big|_{I_{CBO} = \text{const}; u_{BE} = \text{const}}$$

3.1.1. ЛИНЕАРНИ МОДЕЛИ БИПОЛАРНОГ ТРАНЗИСТОРА

У довољно малој околини мирне радне тачке, нелинеарна карактеристика се може заменити линеарним моделом. Ако се уместо укупних вредности посматрају само промене карактеристичних величина, транзистор се, на основу једначине 3.1, може да представи као појачавач струје (*current amplifier, current controlled current source*) чији је основни параметар појачање струје од базе до колектора транзистора у споју са заједничким емитором” (*short circuit forward current transfer ratio in common emitter configuration*)

$$\beta \equiv \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \Big|_{u_{CE} = \text{const}} = \frac{i_C}{i_b} \Big|_{u_{ce} = 0} \quad (3.10)$$

Одговарајуће еквивалентно коло “савршеног транзистора” приказано је на слици 3.7.а.



Слика 3.7. Еквивалентна кола биполарног транзистора као појачавача струје

Однос наизменичне компоненте струје колектора и наизменичне компоненте струје базе одређен је линеарном једначином:

$$i_c = \beta i_b \quad (3.11)$$

За примену транзистора као појачавача малих сигнала одступање стварне карактеристике од једноставног модела који представља једначина

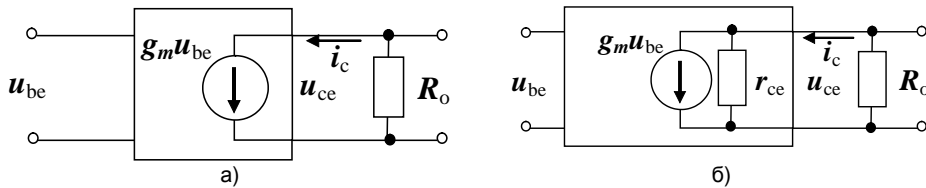
3.11, често се не може занемарити. Ерлијев ефекат се моделује динамичком отпорношћу¹³ r_{ce} , која делује паралелно извору струје βi_b (слика 3.7.б):

$$r_{ce} \equiv \left. \frac{\partial u_{CE}}{\partial i_C} \right|_{u_{BE} = const} = \frac{1}{\left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{u_{BE} = const}} = \frac{u_{ce}}{i_c} \Big|_{i_b = 0} \quad (3.12)$$

Преношење наелектрисања између емитора и колектора омогућује се одговарајућом поларизацијом емиторског и колекторског споја. У довољно малој околини мирне радне тачке, експоненцијална карактеристика преноса (3.9) се може заменити линеарним моделом:

$$i_c = g_m u_{be} \quad (3.13)$$

који транзистор описује као савршени транскондуктансни појачавач¹⁴, чије је еквивалентно коло приказано на слици 3.8.а.



Слика 3.8. Еквивалентна кола биполарног транзистора као транскондуктансног појачавача

Величина g_m је проводност преноса (транскондуктанса):

$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{BE}} \right|_{u_{CE} = const} = \frac{i_c}{u_{be}} \quad (3.14)$$

која приказује зависност излазне струје од улазног напона.

На основу једначине (3.9) следи:

$$g_m = \frac{i_C}{U_T} \quad (3.15)$$

¹³ Ова величина представља излазну отпорност транзистора као појачавача. У литератури се понекад означава са r_o .

¹⁴ Количник излазне и улазне величине (константа преноса појачавача) има димензију проводности (*conductance*). Отуда потиче и назив за ову врсту активних електронских елемената типа улаз-излаз (*transconductance amplifier*). По својој природи он представља напонски управљани извор струје (*voltage controlled current source*).

Нагиб излазне карактеристике у радној области представља динамичку излазну проводност транзистора, посматраног као извор струје:

$$g_{ce} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{u_{BE} = const} = \frac{1}{r_{ce}}. \quad (3.16)$$

У споју са заједничком базом карактеристични параметри транзистора су појачање струје од емитора до колектора транзистора (*short circuit forward current transfer ratio in common base configuration, common base current gain*):

$$\alpha \equiv \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_E} \right|_{u_{CB} = const} = \left. \frac{i_C}{i_E} \right|_{u_{cb} = 0} = \frac{\beta}{1 + \beta}. \quad (3.17)$$

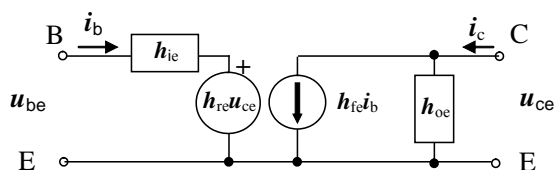
и улазна отпорност за мале сигнале (унутрашња отпорност емиторског споја, посматрана са стране емитора):

$$r_e \equiv \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_E} \right|_{u_{CB} = const} = \frac{1}{\left. \frac{\partial i_E}{\partial u_{BE}} \right|_{u_{CB} = const}} = \left. \frac{u_{be}}{i_e} \right|_{u_{cb} = 0} = \frac{r_\pi}{1 + \beta}, \quad (3.18)$$

При математичкој анализи кола са биполарним транзисторима најчешће се користи линеаризован модел, заснован на h -параметрима¹⁵ који, за транзистор у споју са заједничким емитором, има облик:

$$\begin{aligned} u_{be} &= h_{ie} i_b + h_{re} u_{ce} \\ i_c &= h_{fe} i_b + h_{oe} u_{ce}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

у којем h -параметри представљају реалне бројеве, а величине u_{be} , u_{ce} , i_b и i_c су функције времена. Једначинама (3.16) одговара еквивалентно електрично коло приказано на слици 3.9.



Слика 3.9. h -модел транзистора са заједничким емитором

Коефицијенти у овом једначинама су параметри транзистора за мале сигнале, који се специфицирају при назначеним вредностима поларизације и учестаности улазног сигнала. Тако, коефицијент h_f представља **појачање**

¹⁵ Хибридни параметри имају различиту физичку природу (димензије). Параметар h_i има димензију отпорности, а параметар h_o димензију електричне проводности. Параметри h_f и h_r су бездимензионе величине.

струје за мале сигнале при краткоспојеном излазу¹⁶, односно, при сталном излазном напону. За транзистор у споју са заједничким емитором важи:

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{u_{ce} = 0} = \beta.$$

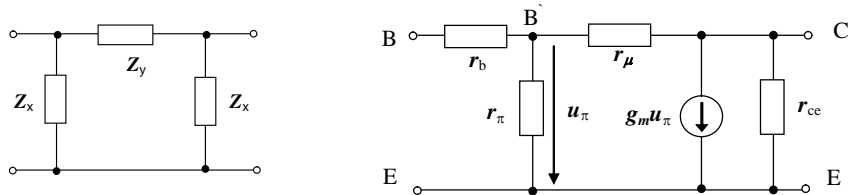
Параметар h_r представља **напонски повратни сачинилац** за мале сигнале при отвореном улазу (најчешће се занемарује). Параметар h_i симболизује **улазну отпорност** за мале сигнале при краткоспојеном излазу.

$$h_{ie} = \left. \frac{u_{be}}{i_b} \right|_{u_{ce} = 0} = \frac{u_{be}}{i_c} \frac{i_c}{i_b} = \frac{\beta}{g_m}$$

Параметар h_o симболизује **излазну проводност** за мале сигнале при отвореном улазу:

$$h_{oe} = \left. \frac{i_c}{u_{ce}} \right|_{u_{be} = 0} = g_{ce} = \frac{1}{r_{ce}}.$$

Посебан облик h -модела је π -модел, који је заснован на структури мреже приказаној на слици 3.10.а. Потпуни хибридни π -модел транзистора дат је на слици 3.10.б.



Слика 3.10. Хибридно еквивалентно π -коло транзистора са заједничким емитором

Отпорност r_b симболизује унутрашњу отпорност базе. Типичне вредности су од неколико десетина ома до неколико стотина ома.

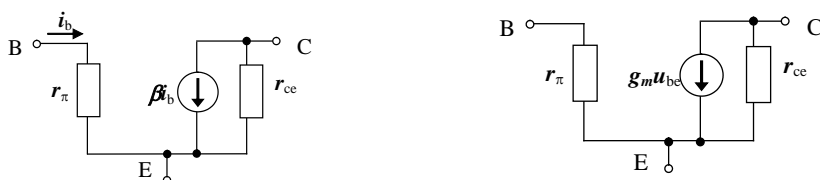
Величина r_π представља улазну отпорност за мале сигнале транзистора у споју са заједничким емитором:

$$r_\pi \equiv \frac{u_{be}}{i_b} = h_{ie} = \frac{\beta}{g_m},$$

чија је вредност у опсегу од неколико стотина до неколико хиљада ома. Параметар r_μ представља утицај излазног напона на улазну струју. Ова отпорност је веома велика и често се њен утицај занемарује.

¹⁶ Под кратким спојем за мале сигнале подразумева се занемарљива импеданса за наизменичну струју у излазном колу.

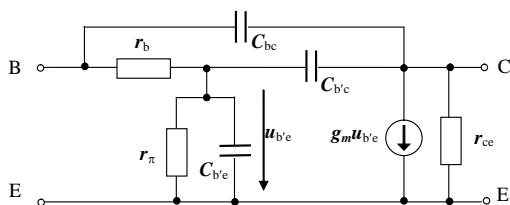
Поједностављени модели, који се највише примењују при анализи електронских кола са биполарним транзисторима, приказани су на слици 3.11.



Слика 3.11. Поједностављена еквивалентна кола биполарног транзистора

Описани модели не садрже реактивне елементе. За сагледавање динамичких карактеристика транзистора, процеси који се симболизују реактивним елементима се морају узети у обзир. Када побуда представља синусну функцију времена, променљиве представљају одговарајуће ефективне вредности одговарајућих наизменичних величина, а h -параметри у општем случају зависе од учестаности.

При вишим учестаностима узимају се у обзир паразитне капацитивности. Слика 3.12. приказује коло које се користи као прва апроксимација, а важи за већину транзистора унутар одређеног опсега учестаности.



Слика 3.12. Модификовано еквивалентно π -коло транзистора са заједничким емитором

Еквивалентна кола описују, са одређеним апроксимацијама, елемент који моделују. Различити модели засновани на истим претпоставкама међусобно су еквивалентни, што значи да између скупова параметара који одговарају различитим моделима истог елемента постоји одређена веза. На основу једног скупа параметара могу одредити сви остали скупови. Вредности параметара за модел одређеног типа зависе од начина спреге којом је остварена веза транзистора и других елемената. На пример, између параметра који представља појачање струје транзистора у споју са заједничким емитором $h_{FE} = \beta$ и параметра који представља појачање струје транзистора у споју са заједничком базом $h_{FB} = \alpha$, постоји однос:

$$h_{FE} = \frac{h_{FB}}{1 - h_{FB}} \quad (3.20)$$

Притом, за један одређени транзистор, постоји једнозначна веза између h -параметара за спој са заједничким емитором и h -параметара за спој са заједничким колектором односно базом. Када је познат скуп параметара који

описује транзистор у једној од веза, одговарајућим трансформацијама се могу одредити параметри за друге облике спајања.

За транзистор BC307A, на пример, у споју са заједничким емитором, у радној тачки: $I_C = 2 \text{ mA}$ и $U_{CE} = 5 \text{ V}$, при побуди наизменичним сигналом учестаности $f = 1 \text{ kHz}$, типичне вредности h -параметара за мале сигнале, су:

$$\begin{aligned} h_{ie} &= 2,7 \text{ k}\Omega; & h_{re} &= 3 \cdot 10^{-4}, \\ h_{fe} &= 220, & h_{oe} &= 25 \text{ }\mu\text{S}. \end{aligned}$$

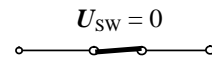
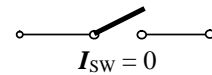
Типична вредност појачања једносмерне струје од базе до колектора за овај транзистор је $h_{FE} = 170$.

3.1.2. БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОР КАО ПРЕКИДАЧ

Електронски прекидач (*electronic switch*) је елемент чија се унутрашња отпорност R_{SW} веома много мења у зависности од стања у којем се налази. Када је прекидач искључен, струјно коло је прекинуто (отворено, *open*). Када је прекидач укључен струјно коло је затворено (*closed*).

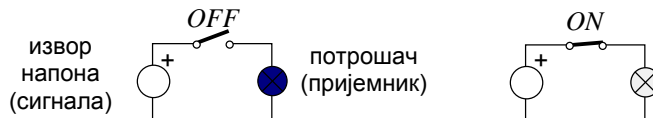
Струја у грани кола у којем се налази савршен прекидач у стању “отворен” једнака је нули, а напон U_{SW} између крајева прекидача има вредност одређену стањем кола у којем се прекидач налази.

Када је савршени прекидач “затворен” напон U_{SW} је једнак нули, а струја у грани кола у којем се прекидач налази има вредност одређену параметрима других елемената кола.



Отпорност савреног прекидача је једнака нули, када је прекидач “затворен”, односно бесконачно велика, када је прекидач “отворен”.

Стање прекидача (отворен, затворен) представља бинарну променљиву. Уобичајено је да се ова стања означавају са “OFF” и “ON”.

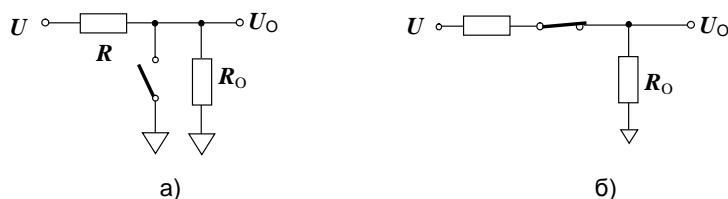


Управљани електронски прекидач је елемент са три прикључка. Његово стање је одређено вредношћу бинарне управљачке променљиве S . Када је прекидач отворен ($S = 0$), струјно коло је прекинуто. Када је прекидач затворен ($S = 1$), струјно коло је затворено.



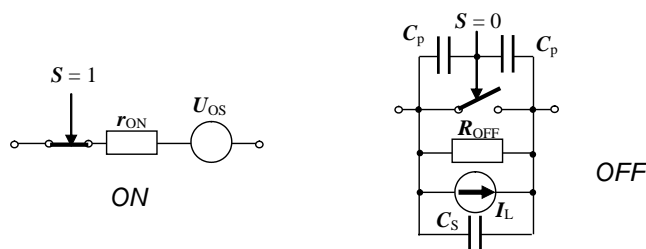
Помоћу управљаних прекидача се мења конфигурација аналогних електронских кола и остварују све функције обраде сигнала у дигиталној електроници. Електронски прекидач је основни елемент на којем се заснива рад дигиталних кола уређаја и система.

Разликују се два начина везивања прекидача у колу: паралелно и на редно. У првом случају (слика 3.13.а), улазни сигнал се прослеђује на излаз када је прекидач отворен. Затварањем прекидача, излаз се “баца на нулу”. У другом случају, улазни сигнал се прослеђује на излаз када је прекидач затворен. Отварањем прекидача раскида се веза улаз-излаз.



Слика 3.13. Паралелни и редни спој прекидача

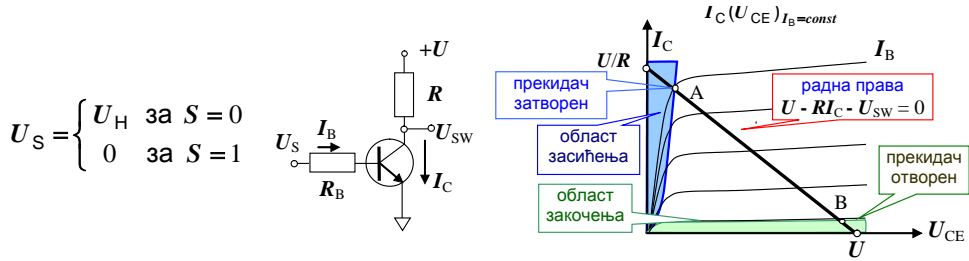
При пројектовању прекидачких кола треба имати у виду да стварни прекидач у затвореном стању (*ON*) има сопствену унутрашњу отпорност, r_{ON} која није једнака нули. Осим тога, између крајњих тачака (контаката) затвореног прекидача може да постоји разлика потенцијала (напон помераја, офсет, U_{OS}) и када је струја кроз прекидач једнака нули (слика 3.14).



Слика 3.14. Еквивалентно коло отвореног и затвореног прекидача

Када је прекидач отворен (*OFF*) треба узимати у обзир коначну паралелну отпорност, R_{OFF} , паразитне капацитивности, C_p , као и струју цурења (одвода) I_L , коју код полупроводничких елемената одређује инверзна струја *PN*-споја.

Биполарни транзистор може да се посматра као елемент чијом се унутрашњом отпорношћу (отпорност између колектора и емитора) управља помоћу сигнала који се доводи на његову базу (слика 3.15). Тачке А и В на радној правој у U_{CE} - I_C равни представљају границе нормалне радне области у којој транзистор ради као појачавач.



Слика 3.15. Биполарни транзистор као прекидач

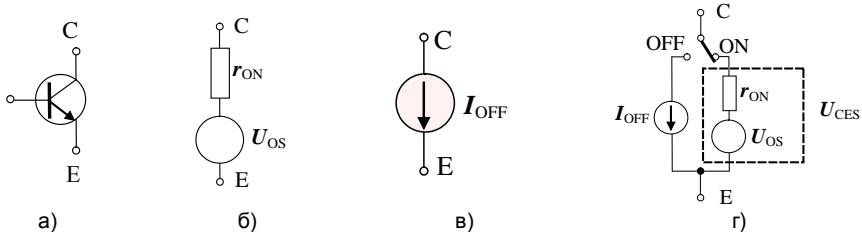
Да би напон на затвореном прекидачу био што је могуће мањи, радна тачка транзистора треба да се налази у области засићења. Тачка А на радној правој одређује граничну вредност струје колектора која одговара струји побуде I_B .

Да би унутрашња отпорност отвореног прекидача, R_{OFF} , била што је могуће већа, радна тачка треба да се налази у области закочења. Тачка В одређује струју која тече када је прекидач отворен (потрошач искључен).

Када транзистор ради као појачавач, радна тачка се помера унутар сегмента АВ. У прекидачком режиму рада, радна тачка транзистора се скоковито пребацује из положаја А у положај В, и обрнуто.

Карактеристике транзистора у засићењу и закочењу одговарају стањима затвореног и отвореног несавршеног прекидача. Када се налази у засићењу, биполарни транзистор се може моделовати редном везом извора напона U_{OS} , и отпорника r_{ON} који представља унутрашњу отпорност затвореног прекидача (слика 3.16.б). Закочен транзистор се може приказати као извор струје “цурења” I_{OFF} (слика 3.16.в). Еквивалентно коло транзисторског прекидача, приказано на слици 3.16.г, садржи савршени прекидач и изворе несавршености које представљају извор струје цурења, I_{OFF} , и извор напона засићења, U_{CES} :

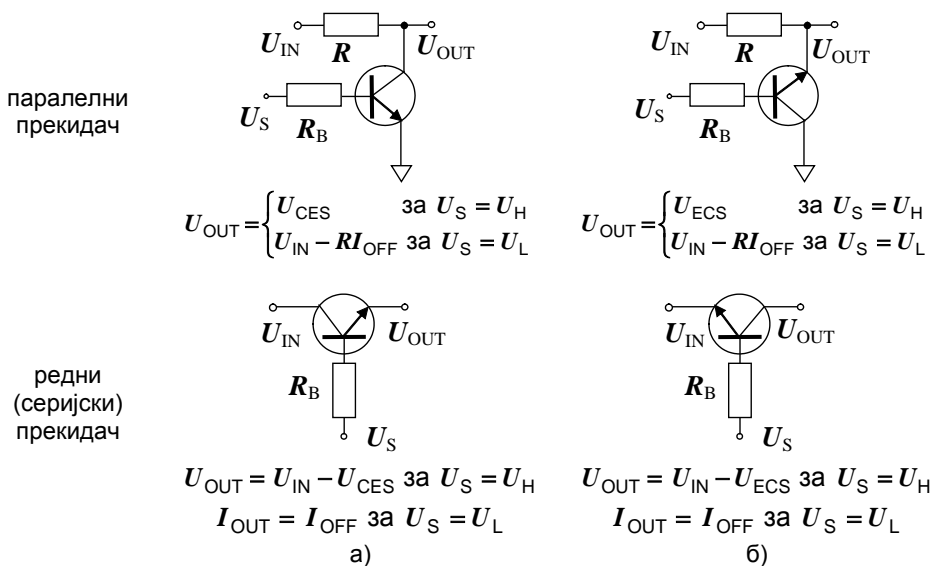
$$U_{CES} = U_{ON} + r_{ON} I_C$$



Слика 3.16. Еквивалентно коло транзистора као прекидача

Разликују се два начина везивања прекидача у колу: паралелно оптерећењу и на ред са оптерећењем (слика 3.15). У инверзном режиму рада

транзистора (колона б), појачање струје је много мање, али је и напон засићења U_{ECS} мањи од напона U_{CES} .



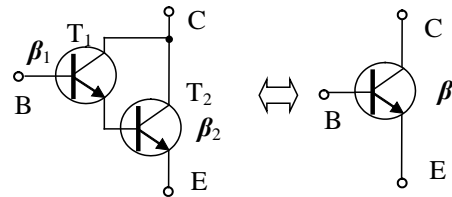
Слика 3.17. Основни облици везивања прекидача

3.2. ЗАДАЦИ

1. Нацртати спој два *NPN* транзистора који еквивалентан једном *NPN* транзистору. Под претпоставком да се инверзна струја колекторског споја при отвореном емитору, I_{CBO} , може занемарити, одредити појачање струје од базе до колектора, β , еквивалентног транзистора.

РЕШЕЊЕ

Спој два *NPN* транзистора, повезана тако да делују као један еквивалентан *NPN* транзистор, приказан на слици, назива се Дарлингтонов спој.



У складу са датим ознакама, за еквивалентни транзистор важи:

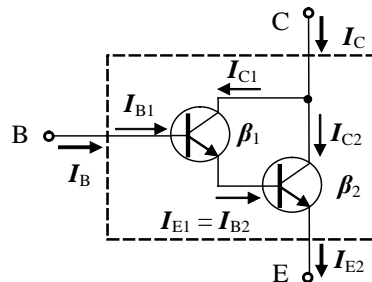
$$I_B = I_{B1},$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2},$$

$$I_E = I_{E2},$$

при чему је је спој транзистора такав да је:

$$I_{E1} = I_{B2}.$$



Величине I_B , I_C и I_E представљају струју базе, колектора и емитора еквивалентног транзистора.

Ако се занемари инверзна струја колекторског споја при отвореном емитору, I_{CBO} , важе једначине:

$$I_{E1} = (1 + \beta_1)I_{B1},$$

$$I_{E2} = (1 + \beta_2)I_{B2} \text{ и}$$

$$I_E = (1 + \beta)I_B,$$

на основу којих следи:

$$I_E = I_{E2} = (1 + \beta_2)I_{B2} = (1 + \beta_2)I_{E1} = (1 + \beta_2)(1 + \beta_1)I_{B1}$$

За струју емитора еквивалентног транзистора важи израз:

$$I_E = (1 + \beta_2)(1 + \beta_1)I_B,$$

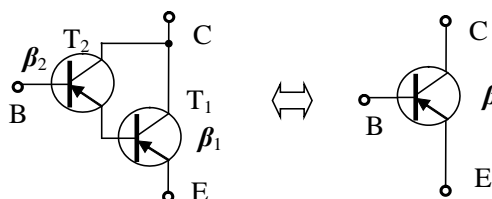
на основу којег следи:

$$\beta = \beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2.$$

2. Нацртати спој два *PNP* транзистора који еквивалентан једном *PNP* транзистору. Одредити параметре еквивалентног транзистора: појачање струје од базе до колектора, β , инверзну струја засићења колекторског споја при отвореном емитору, I_{CBO} , и напон база-емитор, U_{EB} .

РЕШЕЊЕ

Спој два *PNP* транзистора еквивалентан једном *PNP* транзистору (Дарлингтонов пар) приказан је на слици.



У складу са ознакама на слици, математички модел оваквог споја транзистора чине једначине:

$$I_B = I_{B2},$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2},$$

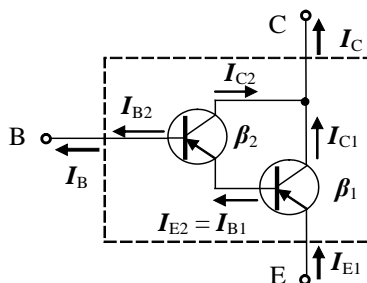
$$I_E = I_{E1},$$

$$I_{E2} = I_{B1},$$

$$I_{E1} = (1 + \beta_1)(I_{B1} + I_{CBO1}),$$

$$I_{E2} = (1 + \beta_2)(I_{B2} + I_{CBO2}) \text{ и}$$

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



на основу којих следи

$$\begin{aligned} I_E = I_{E1} &= (1 + \beta_1)(I_{B1} + I_{CBO1}) = (1 + \beta_1)(I_{E2} + I_{CBO1}) = \\ &= (1 + \beta_1)[(1 + \beta_2)(I_{B2} + I_{CBO2}) + I_{CBO2}]. \end{aligned}$$

Израз за вредност струје емитора еквивалентног транзистора се може представити у облику:

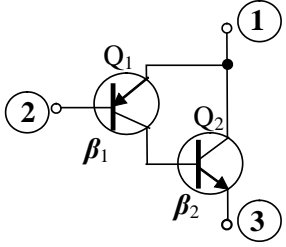
$$I_E = (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(I_B + I_{CBO2} + \frac{I_{CBO1}}{1 + \beta_2}),$$

из којег следе тражени изрази за појачање струје од базе до колектора еквивалентног транзистора, β , и одговарајућу инверзну струју колекторског споја при отвореном емитору, I_{CBO} :

$$\beta = \beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2 \cong \beta_1 \beta_2, \quad I_{CBO} = I_{CBO2} + \frac{I_{CBO1}}{1 + \beta_2}.$$

Напон између емитора и базе еквивалентног транзистора, U_{EB} , једнак је:
 $U_{EB} = U_{EB1} + U_{EB2}.$

3. На слици је приказан спој комплементарних биполарних транзистора који је еквивалентан једном транзистору¹⁷. Нацртати еквивалентни транзистор и одредити израз за појачање струје од базе до колектора, β , еквивалентног транзистора, у зависности од одговарајућих појачања, β_1 и β_2 , појединачних транзистора Q_1 и Q_2 .



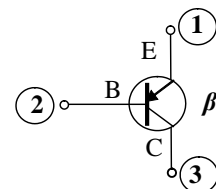
РЕШЕЊЕ

Да би се омогућило да струја протиче између прикључака 1 и 3 потребно је да води транзистор Q_2 . Да би транзистор Q_2 био у проводном стању потребно је да “добије” струју базе, а то значи да треба да води транзистор Q_1 .

Да би оба транзистора била у проводном стању потребно је да прикључак 2 буде на нижем потенцијалу од потенцијала прикључка 1. Струја кроз еквивалентни транзистор тече од прикључка 1 ка прикључку 3.

Посматрани спој комплементарних биполарних транзистора делује као један *PNP* транзистор. Транзистор Q_2 проводи највећи део емиторске, односно колекторске струје еквивалентног транзистора. Транзистор Q_1 омогућује ефективно појачање струје од базе до колектора еквивалентног транзистора.

PNP транзистор, еквивалентан датом споју комплементарних транзистора, приказан је на слици.



¹⁷ Уобичајено је да се овакав спој два транзистора назива “Дарлингтонов комплементарни пар”. Исправно би било “*Sciklai*-ев спој”.

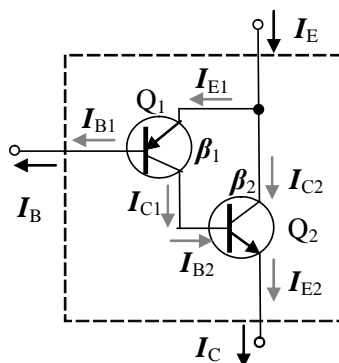
У складу са датим ознакама, математички модел оваквог споја транзистора чине једначине:

$$I_B = I_{B1},$$

$$I_E = I_{E1} + I_{C2},$$

$$I_C = I_{E2},$$

$$I_{C1} = I_{B2}.$$



Ако се занемари инверзна струја колекторског споја при отвореном емитору, важе једначине:

$$I_{E2} = (1 + \beta_2)I_{B2},$$

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1},$$

$$I_C = \beta I_B,$$

$$I_C = I_{E2} = (1 + \beta_2)I_{B2} = (1 + \beta_2)I_{C1} = (1 + \beta_2)\beta_1 I_{B1},$$

$$\beta = \beta_1 + \beta_1\beta_2 \cong \beta_1\beta_2.$$

4. Нацртати спој комплементарних транзистора који је еквивалентан једном *NPN* транзистору. Одредити појачање струје од базе до колектора и напон база-емитор еквивалентног транзистора.

РЕШЕЊЕ

$$I_C = I_{E2}, \quad I_{E2} = (1 + \beta_2)I_{B2}$$

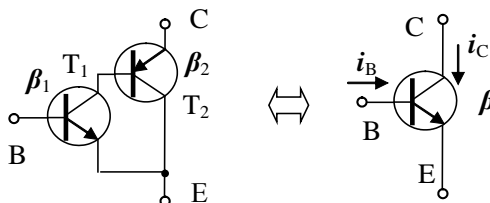
$$I_{B2} = I_{C1}, \quad I_{C1} = \beta_1 I_{B1}$$

$$I_{B1} = I_B, \quad I_C = \beta I_B.$$

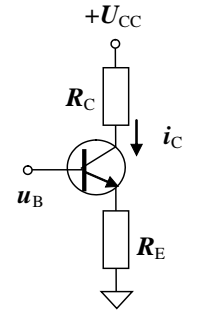
$$\begin{aligned} I_C = I_{E2} &= (1 + \beta_2)I_{B2} = \\ &= (1 + \beta_2)I_{C1} = \\ &= (1 + \beta_2)\beta_1 I_{B1}, \end{aligned}$$

$$\beta = \beta_1\beta_2 + \beta_1 \cong \beta_1\beta_2,$$

$$U_{BE} = U_{BE1}.$$



5. У колу приказаном на слици примењен је силицијумски транзистор чије је појачање струје од базе до колектора, β , много веће од један, а инверзна струја колекторског споја при отвореном емитору, I_{CBO} , се може занемарити. Одредити услове који треба да буду испуњени тако да струја кроз отпорник R_C не зависи од вредности напона U_{CC} .



РЕШЕЊЕ

Да струја i_C у посматраном колу не зависи од напона U_{CC} потребно је да се радна тачка транзистора налази у нормалној (активној) радној области, када биполарни транзистор делује као појачавач. Уколико је тај услов испуњен, вредност струје колектора биће одређена само вредношћу струје емитора:

$$i_C = \frac{\beta}{\beta + 1} i_E \cong i_E.$$

која је одређена вредношћу напона u_B :

$$i_E = \frac{u_E}{R_E} = \frac{u_B - u_{BE}}{R_E}$$

Радна тачка транзистора се налази у активној области ако је спој база-емитор поларисан у директном, а спој база-колектор у инверзном смеру. Да би се радна тачка NPN транзистора у посматраном налазила у активној области, потребно је да напон u_B буде већи од напона прага вођења, U_{BE} , мањи од напона U_{CC} , као и да буде испуњен услов:

$$u_{CB} = u_C - u_B > 0,$$

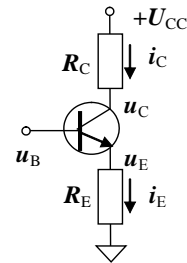
За посматрано коло важи:

$$u_C = U_{CC} - R_C i_C,$$

па се тражени услов може написати у облику:

$$U_{CC} - R_C i_C > u_B.$$

Сређивањем овог израза добија се:

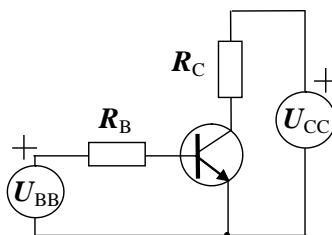


$$R_C < \frac{U_{CC} - u_B}{i_C} = \frac{\beta + 1}{\beta} \frac{U_{CC} - u_B}{i_E} = R_E \frac{\beta + 1}{\beta} \frac{U_{CC} - u_B}{u_B - u_{BE}}$$

Струја i_C не зависи од вредности напона U_{CC} ако је напон u_B мањи од напона U_{CC} , а вредности отпорности R_C се налазе у опсегу:

$$0 < R_C < R_E \frac{U_{CC} - u_B}{u_B - U_{BE}}$$

6. За коло приказано на слици, под претпоставком да су познате вредности карактеристичних параметара транзистора, као и вредности једносмерних напона којима се остварује поларизација емиторског и колекторског споја транзистора ($U_{CC} > U_{BB} > U_{BET}$), одредити:

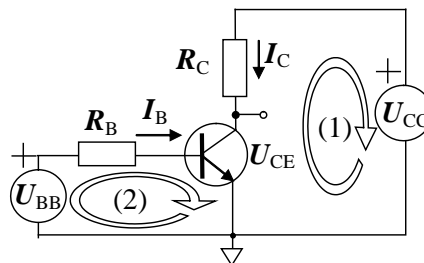


- а) опште изразе за вредности отпорности R_B и R_C који одговарају задатим вредностима струје колектора, I_C , и напона између колектора и емитора, U_{CE} , када се радна тачка транзистора налази у активној области;
- б) бројне вредности отпорности R_B и R_C , тако да напон U_{CE} буде једнак половини напона U_{CC} , при струји колектора $I_C = 10 \text{ mA}$, ако је $U_{CC} = 10 \text{ V}$, $U_{BB} = 5 \text{ V}$, појачање струје од базе до колектора, $\beta = 100$ и инверзна струја засићења колекторског споја $I_{CBO} = 1 \text{ }\mu\text{A}$ ($t = 25^\circ\text{C}$).

РЕШЕЊЕ

- а) На основу задатих односа вредности напона U_{BET} , U_{BB} и U_{CC} , следи да је спој база-емитор NPN транзистора поларисан у директном смеру ($U_{BB} > U_{BET}$). Транзистор није закочен.

У складу са усвојеним референтним смеровима назначеним на слици, а под претпоставком да радна тачка транзистора није у области засићења ($U_{CB} > U_{BEsat}$), важе следеће једначине:



$$U_{CC} - R_C I_C - U_{CE} = 0, \quad (1)$$

$$U_{BB} - R_B I_B - U_{BE} = 0, \quad (2)$$

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

Вредност отпорности R_C одређује се помоћу једначине (1) и задате вредности напона U_{CE} :

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_C}.$$

На основу једначина (2) и (3) следи, да је за добијање задате струје I_C потребно да буде:

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

б) На основу задатог услова, $U_{CE} = \frac{1}{2} U_{CC} > U_{BET}$, следи да се радна тачка транзистора у посматраном колу налази у активној области: спој база-емитор је поларисан у проводном ($U_{BE} > U_{BET}$), а спој колектор-база у непроводном смеру ($U_{CB} > 0$). То значи да се при прорачуну кола могу применити изведени изрази.

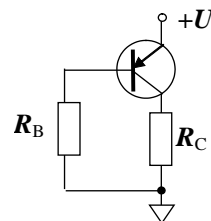
За задате бројне вредности струје и напона ($I_C = 10 \text{ mA}$, $U_{CC} = 10 \text{ V}$), добија се:

$$R_C = \frac{U_{CC}}{2I_C} = 500 \Omega.$$

На основу податка о вредности инверзне струје засићења колекторског споја ($I_{CBO} = 1 \mu\text{A}$), закључује се да се струја може занемарити у односу на струју I_C , као и да је у питању германијумски транзистор, за који се обично усваја $U_{BE} \approx 0,2 \text{ V}$. За задату вредност напона поларизације споја база-емитор, $U_{BB} = 5 \text{ V}$, добија се:

$$R_B \cong \beta \frac{U_{BB} - U_{BE}}{I_C} = 48 \text{ k}\Omega.$$

7. За коло приказано на слици, одредити показатеље осетљивости струје I_C на промене параметара транзистора: напона емитор-база, U_{EB} , инверзне струје засићења колекторског споја I_{CBO} и појачања струје од базе до колектора, β :



РЕШЕЊЕ

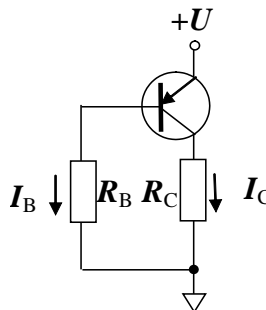
На основу једначина:

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

$$I_B = \frac{U - U_{EB}}{R_B},$$

добија се израз за струју колектора транзистора у посматраном колу:

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO} = \beta \frac{U - U_{EB}}{R_B} + (1 + \beta)I_{CBO},$$



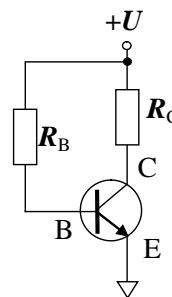
који показује да вредност струје I_C зависи, не само од напона напајања и отпорности у колу, него и од својстава транзистора: појачања струје од базе до колектора, β , напона емитор-база при раду у активној области, U_{EB} , и инверзне струја засићења колекторског споја I_{CBO} . Показатељ осетљивости (S) струје колектора на промене једног од ових параметара добија се диференцирањем функције $I_C(I_{CBO}, U_{EB}, \beta)$ када се тај параметар усвоји као независно променљива, док све остале величине (параметри кола) посматрају као константе.

$$S_{I_{CBO}} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = \frac{dI_C}{dI_{CBO}} \Big|_{\beta, U_{EB} = \text{const}} = \beta + 1 \cong \beta,$$

$$S_{U_{EB}} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{EB}} = \frac{dI_C}{dU_{EB}} \Big|_{\beta, I_{CBO} = \text{const}} = -\frac{\beta}{R_B},$$

$$S_{\beta} = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} = \frac{dI_C}{d\beta} \Big|_{I_{CBO}, U_{EB} = \text{const}} = \frac{U_{BB} - U_{EB}}{R_B} + I_{CBO} = \frac{I_C - I_{CBO}}{\beta} \approx \frac{I_C}{\beta}.$$

8. У колу, приказаном на слици, примењен је силицијумски транзистор чије је појачање струје од базе до емитора, β , једнако 100.
- а) Одредити бројне вредности отпорности R_B и R_C за које је напон између колектора и емитора једнак 6 V, при напону напајања $U = 10$ V и струји колектора једнакој 1 mA.
- б) Одредити потребан услов у погледу односа отпорности R_B и R_C , да се радна тачка транзистора не налази у области засићења.



РЕШЕЊЕ

а) На основу односа задатих вредности напона ($0 < U_{\text{BET}} < U$), закључује се да је спој база-емитор NPN транзистора поларисан у директном смеру. Транзистор није закочен.

На основу услова $U_{\text{CE}} = 6 \text{ V}$ следи да је спој база-колектор је поларисан у инверзном смеру ($U_{\text{CE}} > U_{\text{BE}}$). Транзистор није у засићењу.

Спроведена анализа показује да се, при задатим вредностима, радна тачка транзистора налази у нормалној радној (активној) области.

Математички модел посматраног кола чине једначине:

$$U - R_C I_C - U_{\text{CE}} = 0,$$

$$U - R_B I_B - U_{\text{BE}} = 0,$$

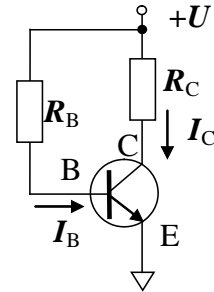
$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{\text{CBO}} \cong \beta I_B.$$

Сређивањем прве једначине добија се општи израз којим је одређена вредност отпорности R_C :

$$R_C = \frac{U - U_{\text{CE}}}{I_C} = \frac{10 \text{ V} - 6 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 4 \text{ k}\Omega$$

На основу друге и треће једначине следи:

$$R_B = \frac{U - U_{\text{BE}}}{I_B} = \beta \frac{U - U_{\text{BE}}}{I_C} = 100 \frac{10 \text{ V} - 0,6 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 940 \text{ k}\Omega.$$



б) Радна тачка транзистора је у активној области када је емиторски спој поларисан у пропусном, а колекторски у непропусном смеру. За NPN транзистор то значи да је напон U_{CB} позитиван:

$$U_{\text{CB}} = U_{\text{CE}} - U_{\text{BE}} = U - R_C I_C - U_{\text{BE}} > 0,$$

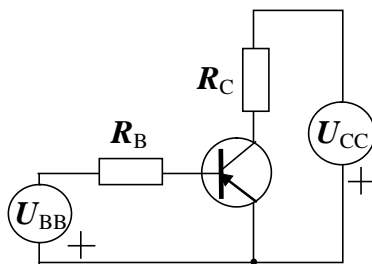
одакле следи:

$$R_C < \frac{U - U_{\text{BE}}}{I_C} < \frac{U - U_{\text{BE}}}{\beta I_B} = \frac{R_B}{\beta}.$$

На основу претходних релација следи довољан услов да транзистор у посматраном колу не буде у засићењу:

$$R_B > \beta R_C.$$

9. За коло приказано на слици, под претпоставком да су познате вредности карактеристичних параметара транзистора, као и једносмерних напона којима се остварује поларизација емиторског и колекторског споја транзистора ($U_{CC} > U_{BB} > U_{BE}$) одредити:



- а) однос отпорности R_B и R_C тако да се радна тачка транзистора налази у активној области;
- б) вредности напона U_{CE} и струје I_C при задатим вредностима параметара кола: $U_{BB} = 5 \text{ V}$, $U_{CC} = 10 \text{ V}$, $R_B = 481 \text{ k}\Omega$; $R_C = 4,42 \text{ k}\Omega$, $\beta = 100$, $I_{CBO} = 1 \text{ nA}$ ($t = 25^\circ\text{C}$).

РЕШЕЊЕ.

Спој база-емитор транзистора поларисан је у пропусном смеру, напонем који је већи од напона прага вођења ($U_{BB} > U_{BE}$). Транзистор није закочен.

За посматрано коло важе једначине:

$$U_{BB} - R_B I_B - U_{BE} = 0 \text{ и}$$

$$U_{CC} + U_{CE} - R_C I_C = 0.$$

На основу прве једначине одређује се израз за вредност струје I_B :

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

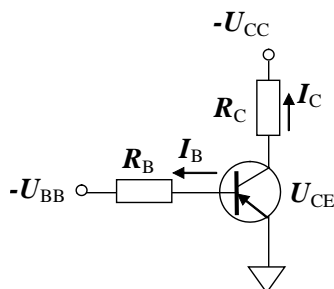
Када се радна тачка транзистора налази у активној области, однос струја I_B и I_C одређен је формулом:

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

на основу које следи:

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

Вредност напона између колектора и емитора одређена је изразом:



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

а) Да би се радна тачка *PNP* транзистора налазила у активној области потребно је да спој колектор база буде инверзно поларисан. То значи да мора буде испуњен услов:

$$U_{CB} = U_{CE} + U_{EB} = -U_{CC} + R_C I_C + U_{EB} < 0,$$

односно:

$$R_C < \frac{U_{CC} - U_{EB}}{I_C} < \frac{U_{CC} - U_{EBT}}{\beta I_B} = \frac{R_B}{\beta} \frac{U_{CC} - U_{EBT}}{U_{BB} - U_{EB}}.$$

На основу претходног разматрања закључује се да је за рад транзистора као појачавачког елемента довољно да у посматраном колу буде испуњен услов:

$$\frac{R_B}{R_C} > \beta \frac{U_{BB} - U_{EB}}{U_{CC} - U_{EB}}.$$

б) На основу задате вредности инверзне струје засићења колекторског споја $I_{CBO} = 1 \text{ nA}$, закључује се да је у питању силицијумски транзистор, за који се обично усваја $U_{BE} \approx 0,6 \text{ V}$.

На основу претходно изведеног услова закључује се да се радна тачка транзистора налази у активној области:

$$\frac{481}{4,42} > 100 \frac{5 - 0,6}{10 - 0,6},$$

што значи да се могу применити изведени изрази за вредности струје:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,6}{481} \text{ mA} \cong 9,1 \mu\text{A},$$

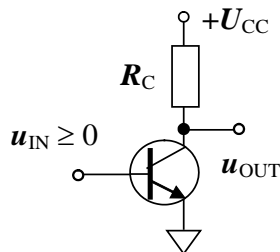
$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO} = 914 \mu\text{A} + 101 \mu\text{A} = 1,015 \text{ mA},$$

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C = 10 \text{ V} - 4,42 \cdot 1,01 \text{ V} = 5,54 \text{ V}.$$

10. На слици је основна електрична шема појачавача напона са *NPN*-биполарним транзистором у споју са заједничким емитором.

Ако се отпорник R_C посматра као пријемник сигнала, а Ерлијев ефекат се може занемарити, одредити опште изразе за:

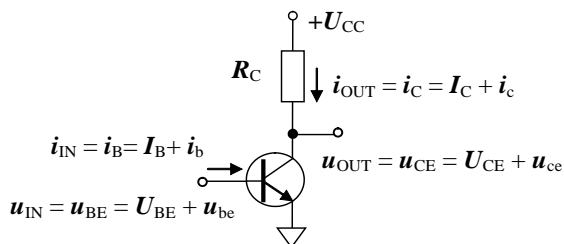
- појачање струје за мале сигнале, A_i ,
- улазну отпорност, R_{in} , и
- појачање напона за мале сигнале, A_u .



РЕШЕЊЕ

Појачање струје за мале сигнале дефинисано је изразом:

$$A_i = \frac{\partial i_{OUT}}{\partial i_{IN}} = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} = \frac{i_c}{i_b}.$$



Полазећи од основне једначине биполарног транзистора:

$$i_C = \beta i_B + (1 + \beta) I_{CBO},$$

добија се:

$$A_i = \beta.$$

Улазна отпорност овог појачавача, R_{in} , једнака је улазној отпорности транзистора у споју са заједничким емитором:

$$R_{in} = \frac{\partial u_{IN}}{\partial i_{IN}} = \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} = \frac{u_{be}}{i_b} = r_\pi.$$

где је r_π динамичка отпорност споја база-емитор при директној поларизацији.

Појачање напона за мале сигнале дефинисано је изразом:

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}} = - \frac{R_C i_c}{u_{be}} = - \frac{R_C i_c}{r_\pi i_b} = - \frac{R_C}{r_\pi} \beta = - g_m R_C,$$

где је g_m динамичка проводност преноса (транскондуктанса) транзистора:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{BE}} \right|_{u_{CE} = const} = \frac{i_c}{u_{be}}.$$

која приказује зависност наизменичне компоненте струје колектора од наизменичне компоненте напона база-емитор.

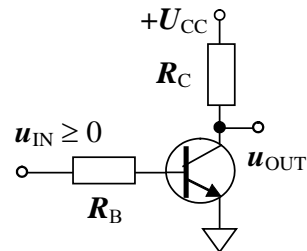
Ако је $\beta = 100$, $r_\pi = 1 \text{ k}\Omega$, $R_C = 10 \text{ k}\Omega$, појачање напона, A_u , једнако је 1000 V/V .

Појачавач напона са биполарним транзистором у спрези са заједничким емитором (*common emitter*) мења знак наизменичне компоненте сигнала који појачава (инвертујући појачавач). Вредност појачања зависи од вредности параметара транзистора,

11. На слици је приказана принципска електрична шема појачавача напона са *NPN*-биполарним транзистором у споју са заједничким емитором.

Ако се отпорник R_C посматра као пријемник сигнала, а Ерлијев ефекат се може занемарити, одредити опште изразе за:

- улазну отпорност, R_{in} , и
- појачање напона за мале сигнале, A_u .



РЕШЕЊЕ

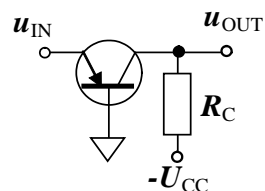
$$R_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = \frac{u_{in}}{i_b} = R_B + r_\pi \cong R_B,$$

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}} = -\frac{R_C i_c}{(R_B + r_\pi) i_b} = -\frac{R_C}{R_B + r_\pi} \beta \cong -\beta \frac{R_C}{R_B}.$$

12. На слици је приказана основна шема појачавача напона са *PNP*-биполарним транзистором у споју са заједничком базом.

Ако се отпорник R_C посматра као пријемник сигнала, а Ерлијев ефекат се може занемарити, одредити опште изразе за:

- појачање струје за мале сигнале, A_i ,
- улазну отпорност, R_{in} , и
- појачање напона за мале сигнале, A_u .



РЕШЕЊЕ

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{i_c}{i_e} = \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}.$$

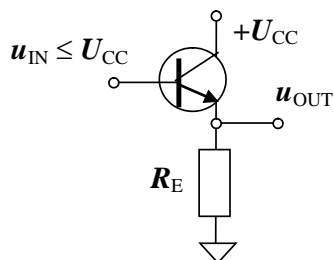
$$R_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = \frac{u_{eb}}{i_e} = r_e,$$

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{R_C i_c}{r_e i_e} = \frac{R_C}{r_e} \alpha = \frac{R_C}{\frac{r_\pi}{1 + \beta}} \frac{\beta}{1 + \beta} = \frac{R_C}{r_\pi} \beta.$$

13. На слици је приказана принципска електрична шема појачавача напона са *NPN*-биларним транзистором у споју са заједничким колектором.

Ако се отпорник R_E посматра као пријемник сигнала, а Ерлијев ефекат се може занемарити, одредити опште изразе за:

- појачање струје за мале сигнале, A_i ,
- улазну отпорност, R_{in} , и
- појачање напона за мале сигнале, A_u .



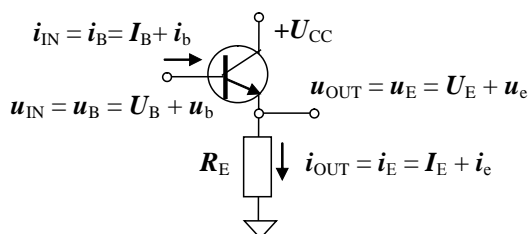
РЕШЕЊЕ

На основу једначине:

$$i_E = (1 + \beta)(i_B + I_{CBO}),$$

следи:

$$A_i = \frac{\partial i_{OUT}}{\partial i_{IN}} = \frac{\partial i_E}{\partial i_B} = \frac{i_e}{i_b} = 1 + \beta.$$



У околини мирне радне тачке транзистора може се сматрати да се напон база-емитор не мења. То значи да се (мале) промене напона базе преносе се на промене напона емитора. Наизменична компонента излазног напона једнака је наизменичној компоненти улазног напона. Појачање напона је једнако јединици:

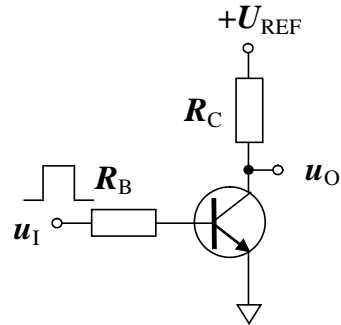
$$A_i = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{u_e}{u_b} = 1.$$

За улазну отпорност важи:

$$R_{in} = \frac{\partial u_B}{\partial i_B} \cong \frac{\partial u_E}{\partial i_B} = \frac{R_E \partial i_E}{\partial i_B} = R_E A_i = R_E (1 + \beta).$$

Појачавач са са биполарним транзистором у спреси са заједничким колектором делује као одвојни степен (бафер) који одваја оптерећење од извора сигнала $u_{in}(t)$. Улазни напон се пресликава на излаз (*emitter follower*), али је отпорност, којом је извор сигнала оптерећен, за фактор $1+\beta$ већа од отпорности у колу емитора.

14. Коло приказано на слици је намењено за уобличавање импулса правоугаоног таласног облика. Одредити потребне услове да напонски ниво излазног сигнала не зависе од напонских нивоа сигнала побуде. Примењен је силицијумски транзистор чије је појачање струје од базе до емитора, β , једнако 200.



РЕШЕЊЕ

Транзистор треба да буде закочен када је на улазу низак напонски ниво импулсног сигнала, U_{IL} :

$$U_{IL} < U_{BET},$$

где је U_{BET} напон прага вођења споја база-емитор. Висок излазни ниво излазних импулса је тада једнак:

$$U_{OH} = U_{REF} - R_C I_L,$$

где је I_L струја која “цури” (*leakage current*) кроз закочен транзистор.

Транзистор треба да буде у засићењу када је на улазу висок напонски ниво U_{IH} .

$$U_{OL} = U_{CEsat}$$

Да би радна тачка транзистора била у области засићења треба да буде испуњен услов:

$$I_B > \frac{I_C}{\beta}, \text{ односно:}$$

$$\frac{U_H - U_{BE}}{R_B} > \frac{U_{REF} - U_{CEsat}}{\beta R_C},$$

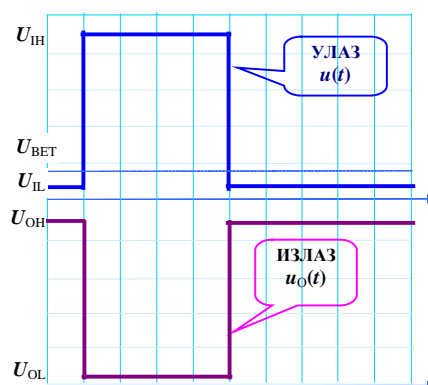
где је U_{CEsat} напон колектор-емитор транзистора у стању засићења.

На основу претходног разматрања следи довољан услов да транзистор у посматраном колу буде у засићењу, без обзира на стварну вредност напона који представља амплитуду улазних импулса:

$$R_B < \beta R_C \frac{\min U_{IH} - U_{BE}}{U_{REF} - U_{CEsat}}$$

Таласни облици сигнала на улазу и излазу посматраног кола приказани су на слици.

Посматрано коло представља логички инвертор



15. За коло, приказано на слици, одредити вредност напона између колектора и емитора која одговара задатим вредностима параметара кола:

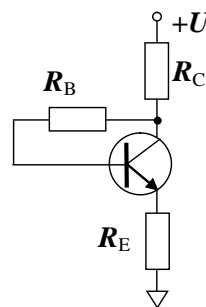
$$U = 10 \text{ V},$$

$$\beta = 99,$$

$$I_{CBO} = 1 \mu\text{A};$$

$$R_B = 100 \text{ k}\Omega,$$

$$R_C = R_E = 2 \text{ k}\Omega.$$



РЕШЕЊЕ

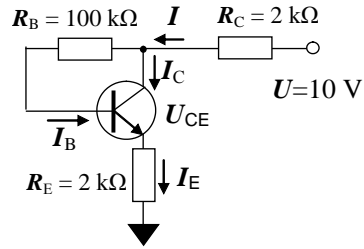
Спој база-емитор транзистора у посматраном колу је директно поларисан, а напон колектор-база је већи од нуле. Следи да транзистор није закочен, нити је у засићењу. Математички модел овог кола чине једначине:

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

$$U_{CE} = R_B I_B + U_{BE},$$

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

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



На основу задате вредности инверзне струје засићења колекторског споја ($I_{CBO}=1 \mu\text{A}$), закључује се да је у питању германијумски транзистор, за који се усваја $U_{BE} = 0,2 \text{ V}$.

Да би се одредила вредност напона U_{CE} применом друге једначине, потребно је одредити вредност струје I_B . На основу друге и треће једначине следи:

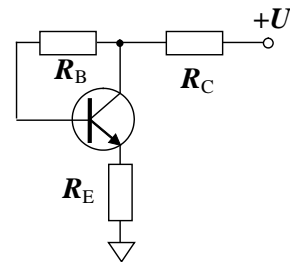
$$U - (R_C + R_E) I_B = U - (R_C + R_E)(1 + \beta)(I_B + I_{CBO}).$$

Сређивањем се добија израз за вредност струје I_B :

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{U - U_{CE}}{R_B} = \frac{U - U_{BE} - (1 + \beta)(R_C + R_E) I_{CBO}}{R_B + (R_C + R_E)(1 + \beta)} = \\ &= \frac{10 - 0,2 - 100 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^3 + 4 \cdot 100 \cdot 10^3} \frac{\text{V}}{\Omega} = 18,8 \mu\text{A}. \end{aligned}$$

$$U_{CE} = R_B I_B + U_{BE} = 100 \cdot 10^3 \Omega \cdot 18,8 \cdot 10^{-6} \text{ A} + 0,2 \text{ V} = 2,08 \text{ V}.$$

16. За коло приказано на слици, под претпоставком да су познате вредности напона напајања, U , отпорности R_B , R_C и R_E , као и карактеристичних параметара транзистора, одредити општи израз за вредност показатеља осетљивости струје колектора на промене напона база-емитора транзистора.



РЕШЕЊЕ

Математички модел овог кола чине једначине:

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

$$U_{CE} = R_B I_B + U_{BE},$$

$$U = (R_C + R_E)(I_C + I_B) + U_{CE}.$$

При анализи осетљивости струје колектора, I_C , на промене напона база-емитор, U_{BE} , инверзна струја засићења колекторског споја, I_{CBO} , може да се занемари:

$$I_C = \beta I_B.$$

Одговарајућом сменом у трећој једначини добија се :

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

односно:

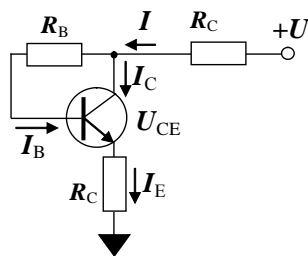
$$I_B = \frac{U - U_{BE}}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)}.$$

На основу општег израза за струју базе може се израчунати показатељ осетљивости струје колектора на промене напона база-емитор:

$$S_{U_{BE}} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \Big|_{\beta, I_{CBO} = \text{const}} = \beta \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} \Big|_{\beta, I_{CBO} = \text{const}}.$$

За посматрано коло важи:

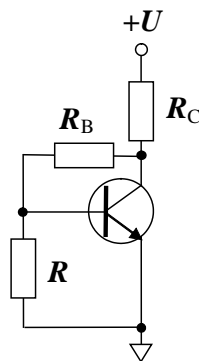
$$S_{U_{BE}} = - \frac{\beta}{R_B + (R_C + R_E)(\beta + 1)}.$$



17. У колу, приказаном на слици, познате су вредности карактеристичних параметара транзистора (појачање струје од базе до колектора, β , напон између базе и емитора транзистора при раду у активној области, U_{BE} , и инверзна струја засићења колекторског споја I_{CBO}), вредност напона напајања, $U > 0$, и вредности отпорности отпорника, R , R_B и R_C .

Под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у нормалној радној (активној) области:

- одредити општи израз за вредност струје колектора;
- одредити показатељ осетљивости струје колектора на промене инверзне струје засићења колекторског споја, I_{CBO} .



РЕШЕЊЕ

а) У складу са ознакама назначеним на слици, математички модел посматраног кола чине једначине:

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

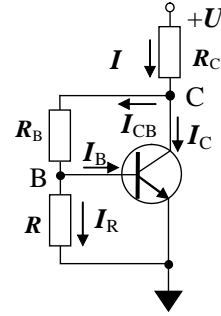
$$R I_R - U_{BE} = 0 \quad (2)$$

$$I_{CB} = I_R + I_B \quad (3)$$

$$I = I_C + I_{CB} \quad (4)$$

$$U_C - R_B I_{CB} - U_{BE} = 0 \quad (5)$$

$$U - R_C I - U_C = 0 \quad (6)$$



Сменом променљивих I_B и I_R из једначина (1) и (2) у једначину (3), а потом у једначину (4), добија ју се изрази за струје I_{CB} и I :

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

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

На основу пете и шесте једначине важи :

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

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

Сређивањем последње једначине:

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

долази се до траженог израза за струју I_C :

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

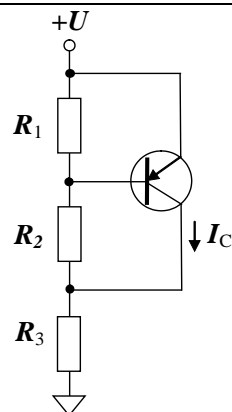
б) Добијени израз за струју I_C показује да она зависи не само од напона напајања и отпорности у колу, него и од својстава транзистора: појачања струје од базе до колектора, β , напона база-емитор при раду у активној области, U_{BE} , и инверзне струја засићења колекторског споја I_{CBO} .

Показатељ осетљивости струје колектора на промене једног од ових параметара добија се диференцирањем функције $I_C(U, I_{CBO}, U_{BE}, \beta)$ када се тај параметар усвоји као независно променљива, док сви остали параметри у колу посматрају као константе.

Осетљивост на промене инверзне струја засићења колекторског споја I_{CBO} одређена је изразом:

$$S_{I_{CBO}} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} \Big|_{U_{BE}, \beta = const} = \frac{(R_C + R_B)(1 + \beta)}{R_B + (1 + \beta)R_C}.$$

18. За коло приказано на слици, под претпоставком да се инверзна струја засићења колекторског споја I_{CBO} може занемарити, као и да се мирна радна тачка транзистора налази у нормалној радној (активној) области, одредити општи израз за вредност струје I_C .

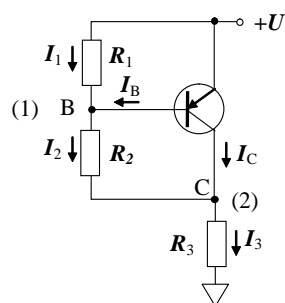


РЕШЕЊЕ

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

$$(1) \quad I_2 = I_1 + I_B \quad (\text{чвор В}),$$

$$(2) \quad I_3 = I_C + I_2 \quad (\text{чвор С}).$$



Према другом Кирхофовом правилу важе следеће једначине:

$$(3) \quad U_{EB} + R_1 I_1 = 0$$

(петља емитор-база),

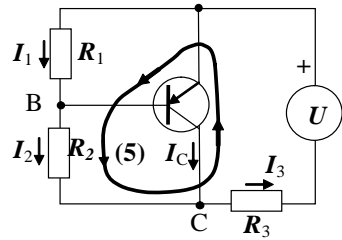
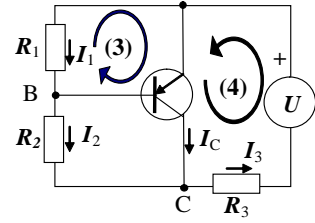
$$(4) \quad U - U_{EC} - R_3 I_3 = 0$$

(петља емитор-колектор),

као и једначина:

$$(5) \quad U_{EC} - R_2 I_2 - U_{EB} = 0$$

(петља емитор-база-колектор).



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

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

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) следи:

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

односно:

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

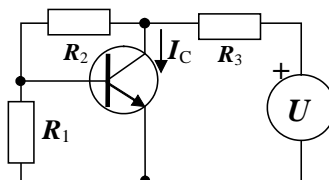
Сређивањем последње једначине:

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

долази се до траженог израза за струју I_C :

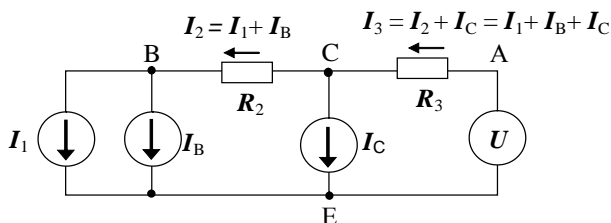
$$I_C = \beta \frac{U - U_{EB} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1} \right)}{R_2 + (1 + \beta) R_3}.$$

19. За коло приказано на слици, под претпоставком да се инверзна струја zasiћења колекторског споја I_{CBO} може занемарити, као и да се мирна радна тачка транзистора налази у нормалној радној (активној) области, одредити показатељ осетљивости струје I_C на промене напона U_{BE} .



РЕШЕЊЕ

а) Посматрано коло се може представити еквивалентном шемом која је приказана на слици.



На основу датих претпоставки важе следеће једначине:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}, \quad I_1 = \frac{U_{BE}}{R_1}, \text{ и}$$

$$U_{BE} = U - R_3(I_1 + I_B + I_C) - R_2(I_1 + I_B),$$

из којих следи:

$$U_{BE} = U - R_3\left(\frac{U_{BE}}{R_1} + I_B + \beta I_B\right) - R_2\left(\frac{U_{BE}}{R_1} + I_B\right).$$

Сређивањем се добија:

$$I_B = \frac{U - U_{BE} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}\right)}{R_2 + (1 + \beta)R_3}, \text{ одакле следи израз за струју колектора:}$$

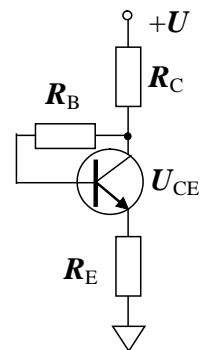
$$I_C = \beta \frac{U - U_{BE} \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_1}\right)}{R_2 + (1 + \beta)R_3}.$$

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

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

20. 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, β , 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 посматраног кола: $U = 10 \text{ V}$, $\beta = 99$, $I_{CBO} = 1 \text{ }\mu\text{A}$; $R_B = 100 \text{ k}\Omega$; $R_C = R_E = 2 \text{ k}\Omega$.

РЕШЕЊЕ

а) Метематички модел приказаног кола чине једначине:

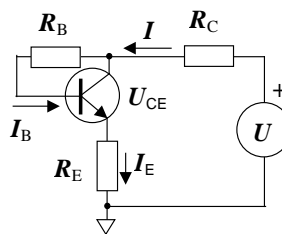
$$I = I_B + I_C = I_E, \quad (1)$$

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

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

На основу односа напона у посматраном колу ($0 < U_{BE}$, $0 < U_{CE}$) следи да транзистор није закочен, нити је у засићењу:

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



Из претходних једначина следи:

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

б) На основу задате бројне 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 база-емитор, U_{BE} , приближно једнак 0,2 V. Одатле следи:

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

Вредност напона U_{CE} се израчунава из једначине (3):

$$U_{CE} = (100 \cdot 10^3 \Omega) (18,8 \cdot 10^{-6} \text{ A}) + 0,2 \text{ V} = 2,08 \text{ V}.$$

На основу једначине (1) следи:

$$I_E = 100 \cdot (18,8 + 1) \mu\text{A} = 19,8 \text{ mA},$$

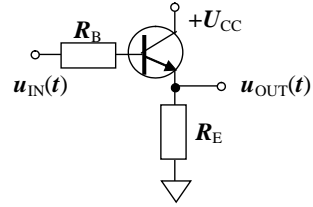
$$I_C = I_E - I_B = (19,8 - 0,0188) \text{ mA} = 18,7812 \text{ mA}.$$

ПРОВЕРА

На основу једначине (2) следи:

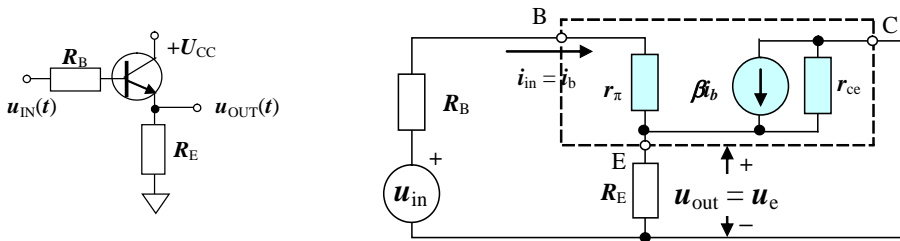
$$U_{CE} = U - (R_C + R_E)I_E = 10 \text{ V} - 4 \cdot 10^3 \Omega \cdot 19,8 \text{ mA} = 2,08 \text{ V}.$$

21. За појачавач напона са биполарним транзистором у споју са заједничким колектором, под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у нормалној радној (активној) области, одредити опште изразе за појачање напона, A_u , улазну, R_{in} , и излазну отпорност за мале сигнале, R_{out} .



РЕШЕЊЕ

Еквивалентна шема појачавача, у којој је појачавачки елемент (транзистор) замењен одговарајућим хибридном π -моделом за мале сигнале, приказана је на слици. Величина $u_{in}(t)$ представља наизменичну компоненту напона $u_{IN}(t)$. Напон U_{CC} је стална величина, па је у еквивалентном колу за мале сигнале колектор транзистора (тачка С) спојен са масом.



Појачање напона за мале сигнале, дефинисано је количником наизменичних компоненти излазног и улазног сигнала:

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}}.$$

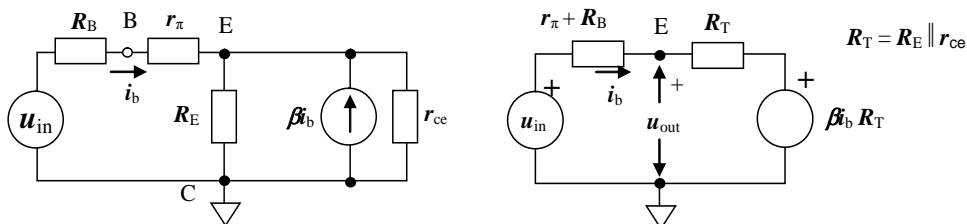
Улазна отпорност једнака је, према дефиницији:

$$R_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}}.$$

Вредност улазне струје, $i_{in} = i_b$, одређена је једначином:

$$i_b = \frac{u_{in} - u_{out}}{R_B + r_{\pi}}. \quad (1)$$

Применом Тевененове теореме посматрано коло се може трансформисати у коло које садржи само једну петљу.



Напон u_e одређен је изразом:

$$u_{out} = \frac{R_T}{R_B + r_\pi + R_T} u_{in} + \frac{R_B + r_\pi}{R_B + r_\pi + R_T} \beta R_T i_b, \quad (2)$$

$$R_T = R_E \parallel r_{ce} = \frac{R_E r_{ce}}{R_E + r_{ce}}$$

На основу једначина (1) и (2) следи

$$i_b (R_B + r_\pi) = u_{in} - u_{out} = u_{in} \left(1 - \frac{R_T}{R_B + r_\pi + R_T}\right) - \frac{R_B + r_\pi}{R_B + r_\pi + R_T} \beta R_T i_b, \text{ односно:}$$

$$i_b (R_B + r_\pi) = u_{in} \frac{R_B + r_\pi}{R_B + r_\pi + R_T} - \frac{R_B + r_\pi}{R_B + r_\pi + R_T} \beta R_T i_b$$

Сређивањем се добијају општи изрази за вредност улазне струје у зависности од улазног напона:

$$i_b = \frac{u_{in}}{R_B + r_\pi + R_T (1 + \beta)}, \quad (3)$$

и израз за вредност излазног напона u_{out} :

$$u_{out} = \frac{(1 + \beta) R_T}{R_B + r_\pi + (1 + \beta) R_T} u_{in}, \quad (4)$$

На основу једначине (3) следи израз за појачање напона појачавача напона са биполарним транзистором у спреси са уједничким колектором, A_{ue} :

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{(1 + \beta) R_T}{R_B + r_\pi + (1 + \beta) R_T} = \frac{1}{1 + \frac{R_B + r_\pi}{(1 + \beta) \cdot R_E \parallel r_{ce}}} < 1.$$

Вредност појачања A_u је мања од један. У уобичајеним условима рада је $R_B + r_\pi \ll (1 + \beta)R_T$, па се може сматрати да је појачање напона појачавача са биполарним транзистором у спреси са заједничким колектором једнако јединици.

На основу једначине (4) следи израз за улазну отпорност:

$$R_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = r_\pi + R_T(1 + \beta) = (1 + \beta)(r_e + R_T) = (1 + \beta)(r_e + R_E \parallel r_{ce}),$$

где је r_e унутрашња отпорност емиторског споја (за мале сигнале), посматрана са стране емитора:

$$r_e \equiv \frac{u_{be}}{i_e} = \frac{r_\pi}{1 + \beta}.$$

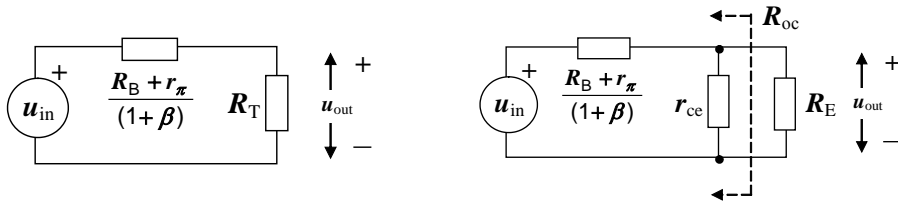
У практичним решењима је $r_e \ll R_E \ll r_{ce}$, одакле следи:

$$R_{in} \cong R_E(1 + \beta).$$

Израз за вредност излазног напона (4) може да се представи у облику:

$$u_{out} = \frac{R_T}{\frac{R_B + r_\pi}{(1 + \beta)} + R_T} u_{in} = \frac{R_E \parallel r_{ce}}{\frac{R_B + r_\pi}{(1 + \beta)} + R_E \parallel r_{ce}} u_{in},$$

којем одговара еквивалентно коло приказано на слици.

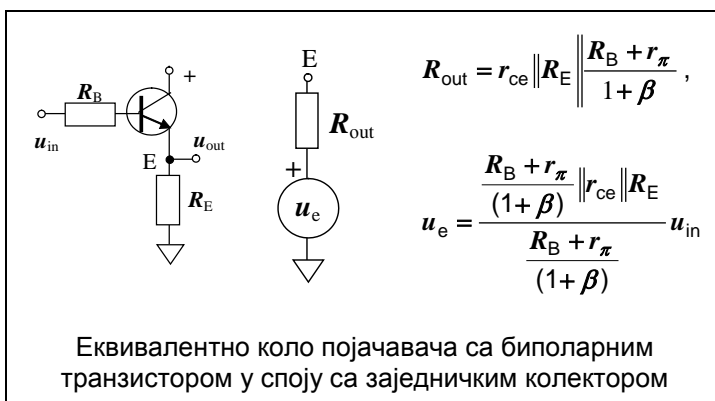


На основу овако трансформисане еквивалентне шеме закључује се да је излазна отпорност посматраног кола, R_{out} , одређена паралелном везом отпорности R_E и излазне отпорности појачавача са транзистором у споју са заједничким колектором, R_{oc} :

$$R_{out} = R_{oc} \parallel R_E,$$

где је:

$$R_{oc} = r_{ce} \parallel \frac{R_B + r_\pi}{1 + \beta} \cong \frac{R_B + r_\pi}{1 + \beta}.$$



НАПОМЕНА 1

Излазна отпорност транзистора у споју са заједничким колектором, R_{oc} може да се одреди као количник излазног напона неоптерећеног појачавача (напон празног хода, u_{eo}) и излазне струје при краткоспојеним излазним прикључцима појачавача (струја кратког споја, i_{es}):

$$R_{oc} = \frac{u_{eo}}{i_{es}}.$$

На основу једначине (4) за празан ход ($R_E = \infty$) следи:

$$u_{eo} = \frac{(1 + \beta)r_{ce}}{R_B + r_{\pi} + (1 + \beta)r_{ce}} u_{in}.$$

На основу једначине (3) за кратак спој на излазу ($R_E = 0 \Rightarrow R_T = 0$) следи:

$$i_{bs} = \frac{u_{in}}{R_B + r_{\pi}}.$$

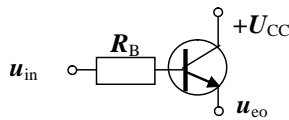
$$R_{oc} = \frac{u_{eo}}{i_{es}} = \frac{u_{eo}}{(1 + \beta)i_{bs}} = \frac{(R_B + r_{\pi})r_{ce}}{R_B + r_{\pi} + (1 + \beta)r_{ce}} = \frac{\frac{R_B + r_{\pi}}{1 + \beta} r_{ce}}{\frac{R_B + r_{\pi}}{1 + \beta} + r_{ce}} = \frac{R_B + r_{\pi}}{1 + \beta} \parallel r_{ce}.$$

НАПОМЕНА 2

Излаз за излазну отпорност R_{oc} може да се одреди на основу поједностављене анализе, без решавања једначина које представљају потпун математички модел посматраног кола.

Анализа се заснива на следећем разматрању:

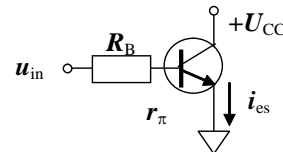
- Када $R_E \rightarrow \infty$, појачавач је неоптерећен (празан ход) струја базе је једнака нули. Излазни напон је једнак улазном напону u_{in} .
- Када је излаз у кратком споју, струја базе је одређена отпорностима R_B и r_π



одређивање напона празног хода

$$(i_{b0} = 0)$$

$$u_{e0} = u_{in}$$



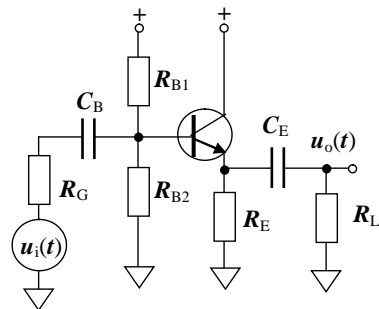
одређивање струје кратког споја

$$(u_{es} = 0)$$

$$i_{es} = (1 + \beta)i_{bs} = (1 + \beta) \frac{u_{in}}{R_B + r_\pi}$$

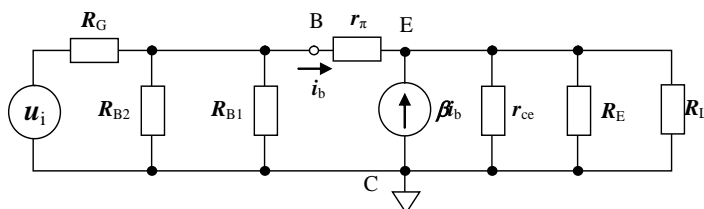
$$R_{oc} = \frac{u_{e0}}{i_{es}} = \frac{u_{in}}{(1 + \beta) \frac{u_{in}}{R_B + r_\pi}} = \frac{R_B + r_\pi}{1 + \beta}$$

22. На слици је приказан појачавач напона са биполарним транзистором у споју са заједничким колектором. Под претпоставком да је капацитивност кондензатора за спрегу, C_B и C_E , довољно велика да се у радном опсегу учестаности улазног сигнала њихова реактанса може занемарити, одредити општи израз за појачање напона.

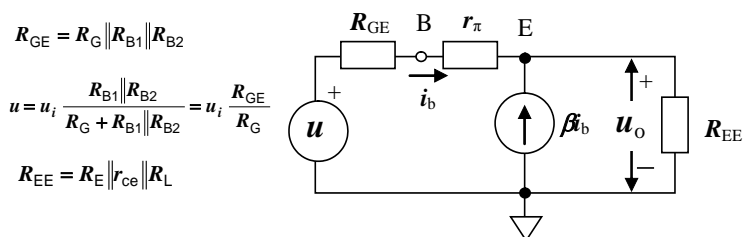


РЕШЕЊЕ

Ако се радна тачка транзистора налази у нормалној радној (активној) области, потпуно еквивалентно коло посматраног појачавача приказано је на слици. У складу са полазном претпоставком, у радном опсегу учестаности, кондензатори C_B и C_E представљају кратак спој.



Након поједностављивања, добија се мрежа која садржи само две петље као што је то приказано на слици.



За коло важе једначине:

$$u_o = R_{EE} i_e = (1 + \beta) R_{EE} i_b, \text{ и } i_b = \frac{u - u_o}{R_{GE} + r_\pi}.$$

на основу којих следи:

$$i_b = \frac{u}{R_{GE} + r_\pi + R_{EE}(1 + \beta)} = \frac{\frac{R_{GE}}{R_G} u_i}{R_{GE} + r_\pi + R_{EE}(1 + \beta)},$$

$$u_o = \frac{(1 + \beta) R_{EE}}{R_{GE} + r_\pi + (1 + \beta) R_{EE}} \frac{R_{GE}}{R_G} u_i.$$

Појачање напона једнако је:

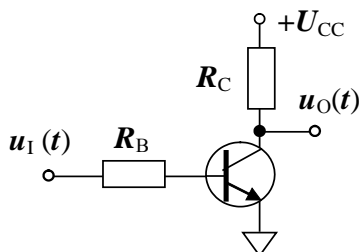
$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(1 + \beta) R_{EE}}{R_{GE} + r_\pi + (1 + \beta) R_{EE}} \frac{R_{GE}}{R_G}.$$

У практичним решењима обично важи: $R_G \ll R_{B1}, R_{B2}$ и $R_E \ll r_{ce}, R_L$

$$A_u = \frac{(1 + \beta) R_E}{R_G + r_\pi + (1 + \beta) R_E}.$$

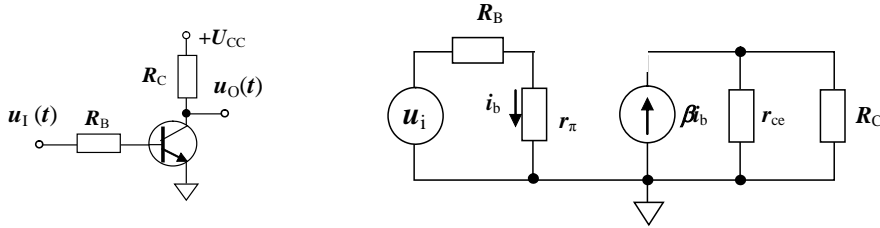
23. На слици је приказана принципска електрична шема појачавача напона са *NPN*-биларним транзистором у споју са заједничким емитором.

- Одредити општи израз којим је одређено појачање напона за мале сигнале.
- Одредити општи израз којима је одређена излазна отпорност овог кола.



РЕШЕЊЕ

Ако се радна тачка транзистора налази у нормалној радној (активној) области, еквивалентна шема овог појачавача, заснована на хибридном π -моделу за мале сигнале, приказана је на слици. Величина $u_i(t)$ представља наизменичну компоненту напона $u_i(t)$. Напон U_{CC} је стална величина, па је у еквивалентном колу за мале сигнале одговарајући крај отпорника R_C спојен са масом.



Математички модел овог кола чине једначине:

$$u_o = u_c = -\beta i_b \cdot (r_{ce} \parallel R_C) = -\beta i_b \cdot R_{CE},$$

$$i_b = \frac{u_i}{R_B + r_\pi},$$

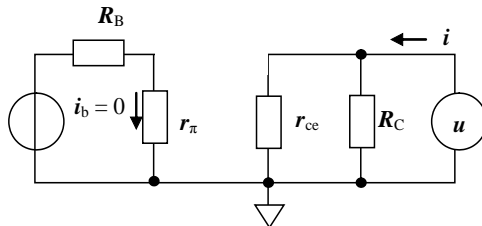
на основу којих следи:

$$u_o = -\beta \cdot \frac{r_{ce} \parallel R_C}{R_B + r_\pi} u_i \cong -\beta \cdot \frac{r_{ce} \parallel R_C}{R_B} u_i, \text{ односно}$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\beta \cdot \frac{r_{ce} \parallel R_C}{R_B + r_\pi} \cong -\beta \cdot \frac{r_{ce} \parallel R_C}{R_B}.$$

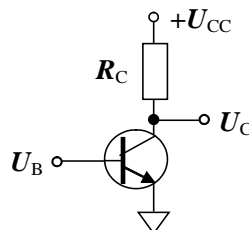
Појачање је негативно. Појачавач напона са транзистором у споју са заједничким емитором “обрће фазу” сигнала који се појачава.

Изразна отпорност се може одредити симулацијом стања у колу када је побуда (напон u_i) једнака нули, а на излаз кола је прикључен извор испитног напона u .



$$R_{out} = \frac{u_o}{i} = R_C \parallel r_{ce}.$$

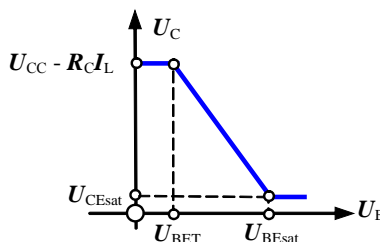
24. На слици је приказан појачавач напона са биполарним транзистором у споју са заједничким емитором.
- а) Нацртати линеаризовану статичку карактеристику преноса, $U_C(U_B)$.
- б) Одредити израз којим је одређено појачање напона за мале сигнале.



РЕШЕЊЕ

- а) Линеаризована карактеристика преноса, $U_C(U_B)$, приказана је на слици.

Разликују се три области рада (стања у посматраном колу), у зависности од вредности улазног напона.



- Када је улазни напон мањи од напона прага вођења споја база-емитор U_{BEt} , транзистор је закочен. Излазни напон је једнак:

$$U_C = U_{CC} - R_C I_L ; U_B \leq U_{BEt} ,$$

где је I_L струја цурења транзистора у непроводном стању.

- Када је улазни напон већи од напона U_{BEsat} , радна тачка транзистора се налази у области засићења:

$$U_C = U_{CEsat} ; U_B \geq U_{BEsat} .$$

где је U_{CEsat} , напон колектор-емитор транзистора у стању засићења.

- Када је улазни напон U_B већи од напона U_{BEt} и мањи од напона U_{BEsat} , радна тачка транзистора се налази у нормалној радној (активној) области. Са порастом улазног напона повећава се колекторска струја па се излазни напон U_C смањује.

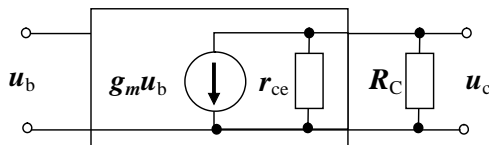
- б) Еквивалентно коло појачавача, када се радна тачка транзистора налази у активној области, приказано је на слици.

На основу израза за напон на излазу кола:

$$u_c = -g_m u_b \cdot (r_{ce} \parallel R_C) ,$$

добија за израз за појачање напона:

$$A_u = \frac{u_c}{u_b} = -g_m \cdot (r_{ce} \parallel R_C) .$$



25. 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 у споју са заједничким емитором.

Мирна радна струја I_C транзистора T_1 једнака је:

$$I_C = \frac{U - U_{EB}}{R}.$$

Динамичко оптерећење у колектору транзистора T_1 једнако је излазној динамичкој отпорности транзистора T_3 који је у споју са заједничким емитором.

Напон на излазу кола једнак је:

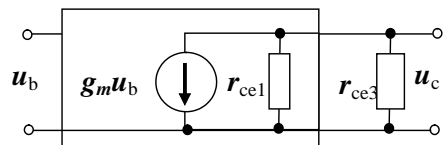
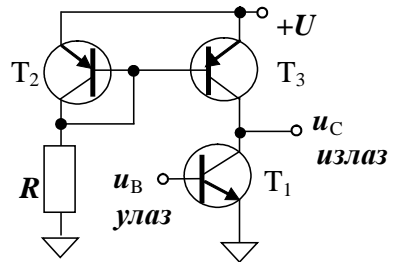
$$u_c = -g_m u_b \cdot (r_{ce1} \parallel r_{ce3}),$$

где је g_m проводност преноса (транскондуктанса) транзистора T_1 :

$$g_m = \frac{I_C}{U_T}$$

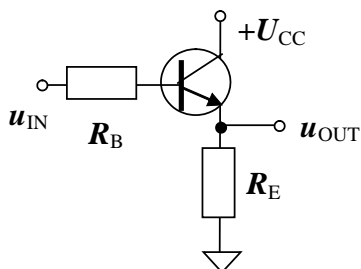
Појачање напона појачавача са комплементарним биполарним транзисторима једнако је:

$$A_u = \frac{u_c}{u_b} = -g_m (r_{ce1} \parallel r_{ce3})$$



26. Нацртати појачавач напона са биполарним транзистором у споју са заједничким колектором и написати изразе за улазну и излазну отпорност у линеарној области рада. Нацртати линеаризовану статичку карактеристику преноса, $U_o(U)$, и приказати таласни облик напона на излазу при побуди наизменичним напонем синусног таласног облика чија је амплитуда мања од напона U_{CC} којим се коло напаја.

РЕШЕЊЕ

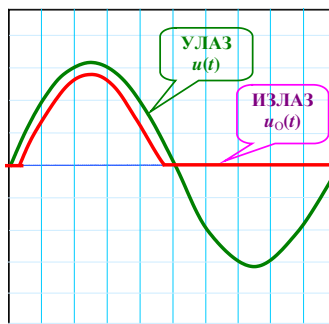
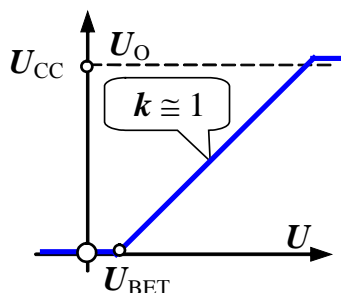


Улазна отпорност:

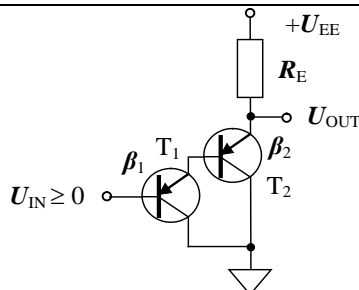
$$R_i = R_B + (1 + h_{FE})R_E, \quad h_{FE} = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} = \beta.$$

Излазна отпорност:

$$R_o = \frac{R_B + r_\pi}{1 + h_{FE}}, \quad r_\pi = \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} = \frac{h_{FE}}{g_m}.$$



27. Нацртати линеаризовану статичку карактеристику преноса кола приказаног на слици.



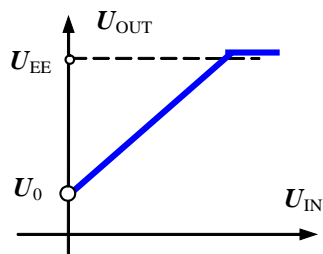
РЕШЕЊЕ

Линеаризована карактеристика преноса посматраног кола приказана је на слици.

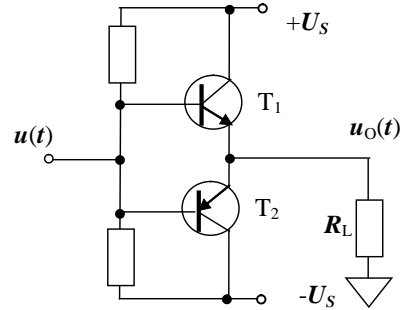
Када је улазни напон једнак нули, оба транзистора воде:

$$U_0 = U_{EB1} + U_{EB2}.$$

Када је улазни напон U_{IN} већи од напона U_{EE} оба транзистора су закочена. Кроз отпорник R_E тече инверзна струја еквивалентног PNP -транзистора (транзистори $T1$ и $T2$ представљају Дарлингтонов пар).

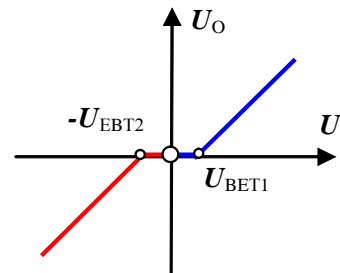


28. За коло приказано на слици:
- нацртати линеаризовану статичку карактеристику преноса: $U_O(U)$, $|U| \leq U_S$.
 - нацртати таласни облик напона на излазу при побуди наизменичним напонам синусног таласног облика, чија је амплитуда мања од напона напајања U_S .



РЕШЕЊЕ

а) Посматрано коло представља јединични појачавач напона (*voltage follower*) остварен са паром комплементарних транзистора. Транзистор T_1 пресликава на излаз улазни сигнал када је он позитиван, док транзистор T_2 пресликава на излаз улазни сигнал када је он негативан. Линеаризована карактеристика преноса, $U_O(U)$, приказана је на слици.



У зависности од вредности улазног напона, Разликују се три области рада:

- $U \geq U_{\text{BET}1}$,
- $-U_{\text{EB}2} \leq U \leq U_{\text{BET}1}$,
- $U \leq -U_{\text{EB}2}$.

□ Када улазни напон U позитиван и мањи од напона прага вођења транзистора T_1 , $U_{\text{BET}1}$, оба транзистора су закочена. Излазни напон је једнак нули.

□ Када је улазни напон позитиван и већи од напона $U_{\text{BET}1}$, радна тачка транзистора T_1 се налази у нормалној радној (активној) области. Излазни сигнал “прати” вредност улазног сигнала:

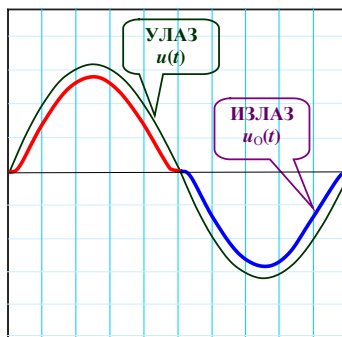
$$U_O = U - U_{\text{BET}1}; U \geq U_{\text{BET}1}.$$

□ Када је улазни напон U негативан, али по интензитету мањи од напона прага вођења транзистора T_1 , $U_{\text{EB}2}$, оба транзистора су закочена. Излазни напон је једнак нули.

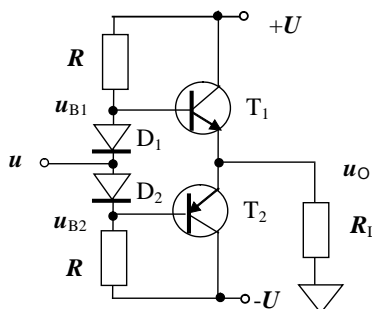
□ Када је улазни напон U мањи од напона $-U_{\text{EB}2}$ радна тачка транзистора T_2 се налази у нормалној радној (активној) области. Излазни сигнал “прати” вредност улазног сигнала:

$$U_O = U + U_{\text{EB}2}; U \leq -U_{\text{EB}2}.$$

б) Одзив кола на побуду наизменичним напонам синусног таласног облика, чија је амплитуда мања од напона напајања, приказан је на слици.



29. Објаснити рад кола приказаног на слици. Под претпоставком да је $U_{F1} = U_{BE1}$ и $U_{F2} = U_{BE2}$, нацртати таласни облик напона $u_o(t)$ и $u_{B1}(t)$, при побуди наизменичним напонам синусног таласног облика, чија је амплитуда мања од напона напајања U_S .



РЕШЕЊЕ

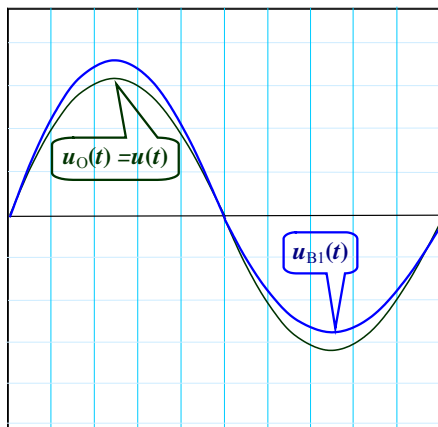
Посматрано коло представља појачавач напона јединичног појачања. Комплементарни транзистори T_1 и T_2 прикључени су у споју са заједничким колектором. Транзистор T_1 пресликава позитивне вредности напона u , док транзистор T_2 преноси на излаз улазни сигнал када је он негативан. Диоде D_1 и D_2 смањују утицај напона база-емитор на нелинеарност карактеристике преноса $U_o(U)$.

Пад напона на диоди D_1 компензује пад напона између базе и емитора транзистора T_1 . Пад напона на диоди D_2 компензује пад напона између емитора и базе транзистора T_2 .

Ако се може сматрати да је $U_{F1} = U_{BE1}$ и $U_{F2} = U_{BE2}$, биће:

$$U_o = U,$$

$$U_{B1} = U + U_{F1}.$$



30. Нацртати логички инвертор у *TTL*-техници и објаснити начин његовог рада. Нацртати карактеристику преноса улаз-излаз.

РЕШЕЊЕ

Електрична шема *TTL* логичког инвертора приказана је на слици.

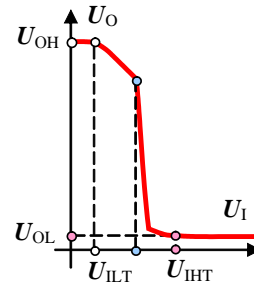
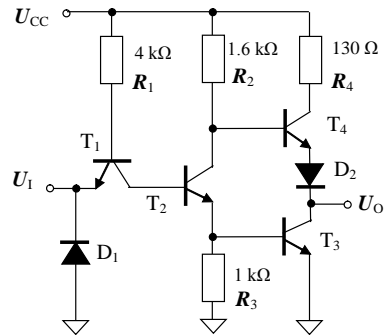
Транзистор T_4 и диода D_2 представљају “активно оптерећење” излазног транзистора T_3 (“*totem-pole*”).

Транзистор T_2 обезбеђује комплементарну побуду транзистора T_3 и T_4 . Када транзистор T_3 води транзистор T_4 је закочен, и обрнуто).

Диода D_1 има заштитну улогу.

Када је на улазу кола низак напонски ниво (логичка нула), транзистори T_2 и T_3 су закочени, а транзистор T_4 је у засићењу. На излазу кола је висок напонски ниво који представља логичку јединицу.

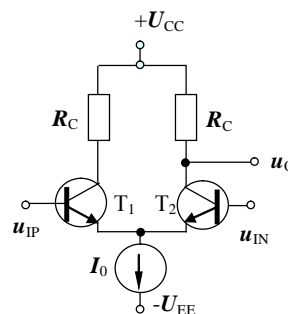
Када је на улазу кола висок напонски ниво (логичка јединица), транзистор T_2 води у инверзном режиму рада (колектор и емитор су “заменили” места). Транзистор T_3 је у засићењу, а транзистор T_4 је закочен. На излазу кола је низак напонски ниво који представља логичку нулу.



31. Нацртати принципску електричну шему диференцијалног појачавача са *NPN*-транзисторима. Објаснити начин рада и нацртати карактеристику преноса.

РЕШЕЊЕ

Диференцијални појачавач је појачавач разлике два напона. Принципска електрична шема диференцијалног појачавача обрзованог помоћу *NPN*-транзистора приказана је на слици. Под претпоставком да транзистори имају идентичне карактеристике, напон u_O одређен је изразом:



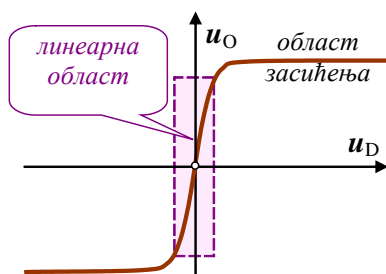
$$u_O = A(u_{IP} - u_{IN}) = Au_D,$$

Диференцијално појачање A једнако је:

$$A = g_m R_C.$$

где је g_m проводност преноса транзистора.

Карактеристика преноса је приказана на слици. Линеарни опсег рада је приближно од -60 mV до $+60\text{ mV}$.



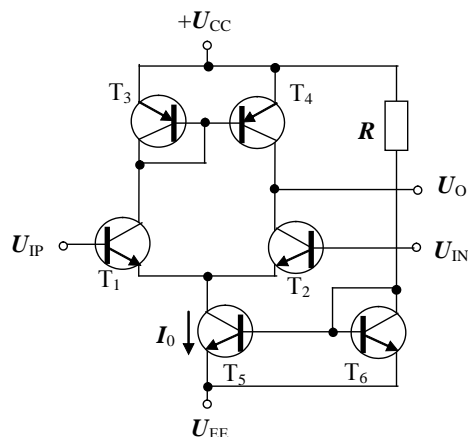
32. Нацртати диференцијални појачавач са комплементарним биполарним транзисторима и објаснити начин његовог рада.

РЕШЕЊЕ

NPN транзистори T_1 и T_2 образују диференцијални пар са емиторском спрегом, који омогућује добијање напона чија је вредност сразмерна разлици напона u_{IP} и u_{IN} .

PNP транзистори T_3 и T_4 представљају "активно оптерећење" диференцијалног пара транзистора.

Транзистори T_5 и T_6 са отпорник R образују извор сталне струје I_0 (струјно огледало) којим је одређена струја поларизације диференцијалног пара.



Под претпоставком да транзистори имају идентичне карактеристике, појачање овог појачавача одређено је изразом:

$$A = \frac{U_O}{U_{IP} - U_{IN}} = g_m R_C,$$

где је g_m проводност преноса транзистора.

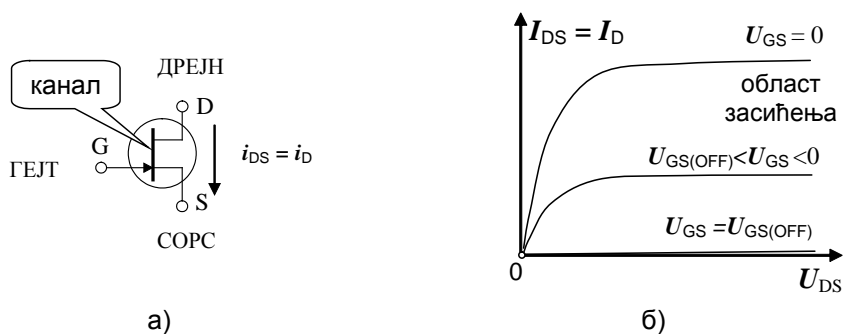
4. ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

4.1 ТЕОРИЈСКА ОСНОВА

Транзистори са ефектом поља (*field effect transistor - FET*) су активни електронски елементи код којих у процесу преношења наелектрисања учествују слободни носиоци наелектрисања само једне врсте: електрони (транзистори *N*-типа) односно шупљине (транзистори *P*-типа).

Транзистори са *PN*-спојем

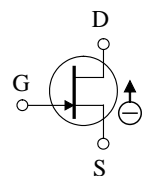
Графички симбол *N*-каналног спојног транзистора са ефектом поља (*junction field effect transistor - JFET*) приказан је на слици 4.1.а (стрелица показује област *N*-типа). Слободни носиоци наелектрисања (електрони) се крећу кроз проводну област, која се назива канал (*channel*), од прикључка који се назива сорс (*source*) према прикључку који се назива дрејн (*drain*). Дрејн је на нижем потенцијалу од сорса. Струја кроз канал, i_{DS} , је позитивна. Управљачка електрода назива се гејт (*gate*). Гејт и канал образују *PN*-спој (*junction*).



Слика 4.1. *N*-канални спојни транзистор са ефектом поља

У уобичајеним радним условима, спој гејт-канал је инверзно поларисан (напон U_{GS} *N*-каналног фета је негативан). Струја кроз канал одређена је напоном u_{GS} . Уколико је интензитет напона инверзне поларизације споја гејт-канал већи, утолико је проводност канала мања. Када је напон u_{GS} , по интензитету, једнак или већи од напона прекида (*cutoff voltage*), $U_{GS(OFF)}$, струја дрејна, $i_D = i_{DS}$, је веома мала, транзистор је непроводан (закочен).

Слободни носиоци наелектрисања у N -каналном спојном транзистору са ефектом поља су електрони који се кроз канал крећу од сорса према дрејну.
 N -канални $JFET$ се кочи негативним напонам.



Статичка карактеристика транзистора посматраног са стране излазног приступа (дрејн-сорс) приказана је на слици 4.1.б. Када се транзистор са ефектом поља примењује као активни (појачавачки) елемент, радна тачка, којим је приказано његово стање на дијаграму $I_D(U_{DS})$, налази се у области засићења. Спој гејт-канал је инверзно поларисан, струја гејта се може занемарити. Утицај напона између дрејна и сорса на вредност струје кроз канал је мали. Ако се улазни напон (између гејта и сорса) не мења, транзистор са ефектом поља се “понаша” као извор сталне струје. Струја кроз канал веома мало зависи од напона између крајева канала, u_{DS} .

Нагиб излазне карактеристике у области засићења представља динамичку излазну проводност транзистора, посматраног као извор струје:

$$g_{ds} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{u_{GS}=\text{const}} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{u_{gs}=0} = \frac{i_d}{u_{ds}}.$$

Величина i_d представља променљиви део (наизменичну компоненту) укупне струје кроз канал i_D :

$$i_D = I_D + i_d.$$

I_D је стална (константна) компонента струје i_D .

Величина u_{ds} представља променљиви део укупног напона између дрејна и сорса, u_{DS} :

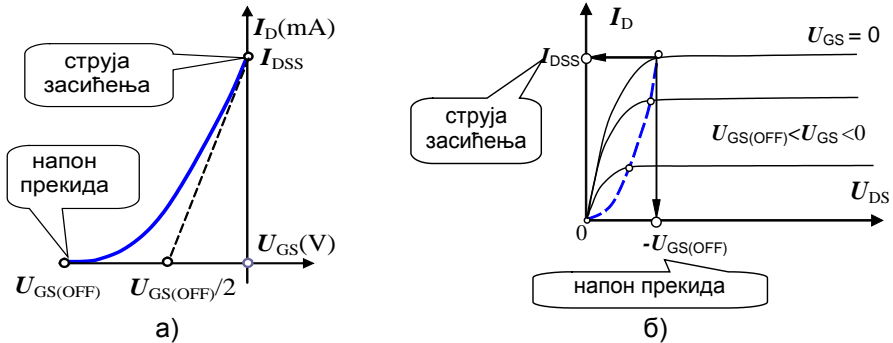
$$u_{DS} = U_{DS} + u_{ds}.$$

U_{DS} је стална (константна) компонента напона u_{DS} .

Зависност струје кроз канал од разлике потенцијала гејта и сорса, када се радна тачка транзистора налази у области засићења, приказана је на слици 4.2.а. При анализи кола са фетовима, функција $i_D(u_{GS})$, која представља карактеристику преноса транзистора са ефектом поља, моделује се квадратном једначином:

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

где је I_{DSS} **струја zasiћења** (*saturation drain current*) када је напон u_{GS} једнак нули (*zero-gate-voltage drain current*), слика 4.2.б.



Слика 4.2. Карактеристика преноса и карактеристика излаза N -каналног спојног транзистора са ефектом поља

Радна тачка спојног транзистора са ефектом поља се налази у области zasiћења ако је PN -спој гејт-канал инверзно поларисан, а интензитет напона између дрејна и гејта већи од интензитета напона прекида $U_{GS(OFF)}$.

Граница области zasiћења (приказана испрекиданом линијом на слици 4.2.б) одређена је условом да је напон између гејта и дрејна транзистора који води једнак напону прекида:

$$U_{GD} = U_{GS(OFF)} \cdot \text{односно:}$$

$$U_{DS} = U_{GS} - U_{GS(OFF)}, \text{ одакле следи}$$

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

Да би радна тачка N -каналног спојног транзистора била у области zasiћења, потребно је да буде задовољен услов:

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} \leq U_{GS(OFF)} < 0,$$

односно:

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

Својства транзистора са ефектом поља описују се функцијом која приказује зависност струје кроз канал од напона гејт-сорс и дрејн-сорс, понаосб.

Основни параметар којим се описују својства трополних појачавачких елемената је проводност преноса (транскондуктанса, *mutual conductance*). Код транзистора са ефектом поља динамичка проводност преноса је дефинисана формулом:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}=\text{const}} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{ds}=0} = \frac{i_d}{u_{gs}}.$$

Величина u_{gs} представља променљиви део укупног напона између гејта и сорса, u_{GS} .

На основу израза за функцију $I_D(U_{GS})$ у области засићења добија се:

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(\text{OFF})}|} \sqrt{I_D I_{DSS}}.$$

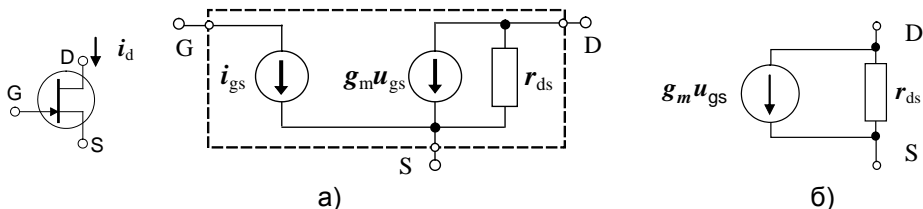
Геометријски, проводност преноса представља нагиб карактеристике преноса у посматраној тачки (слика 4.2.а).

Други карактеристични параметар је динамичка излазна отпорност, која је дефинисана формулом:

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_{u_{GS}=\text{const}} = \frac{1}{g_{ds}},$$

а одређена је нагибом карактеристике $I_D(U_{DS})$ у области засићења (слика 4.2.б)

Еквивалентно коло за мале сигнале приказано је на слици 4.3.а. Величина i_{gs} представља променљиви део струје кроз спој гејт-канал.

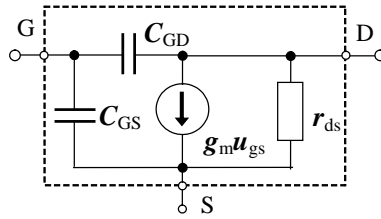


Слика 4.3. Еквивалентно коло транзистора са ефектом поља

Струја која отиче кроз инверзно поларисани спој гејт-сорс је веома мала и практично не зависи од вредности напона u_{GS} , тако да се величина i_{gs} може занемарити. Еквивалентно коло које се обично користи при анализи електронских кола са фетовима, приказано је на слици 4.3.б.

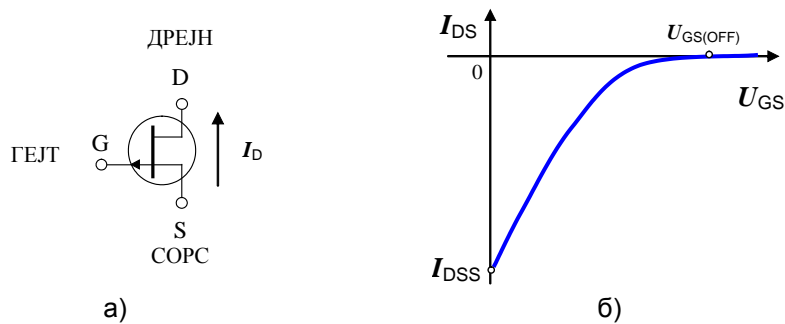
Потпуно еквивалентно коло транзистора са ефектом поља приказано је на слици 4.4. Капацитивности фета C_{GS} и C_{GD} су реда величине неколико

пикофарада, тако да је на нижим учестаностима оправдано занемарити њихово постојање.



Слика 4.4. Потпуно еквивалентно коло транзистора са ефектом поља

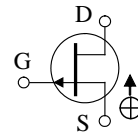
Графички симбол P -каналног спојног транзистора са ефектом поља приказан је на слици 4.5.а. Слободни носиоци наелектрисања су шупљине, које се кроз канал крећу од сорса према дрејну (дрејн је на нижем потенцијалу од сорса). У уобичајеним радним условима напон U_{GS} P -каналног фета је позитиван (спој гејт-канал је инверзно поларисан). Струја I_{DS} је негативна. Карактеристика преноса приказана је на слици 4.5.б.



Слика 4.5. P -канални спојни транзистор са ефектом поља

Математички модел P -каналног спојног транзистора има истоветан облик као и за N -канални транзистор.

Слободни носиоци наелектрисања у P -каналном спојном транзистору са ефектом поља су шупљине који се кроз канал крећу од сорса према дрејну.
 P -канални JFET се кочи позитивним напонам.



Сорс је прикључак кроз који слободни носиоци наелектрисања улазе у канал. Код N -каналног транзистора, сорс је онај прикључак канала који се налази на нижем потенцијалу у односу на дрејн. Код P -каналног транзистора, сорс је онај прикључак канала који се налази на вишем потенцијалу.

Типичне вредности параметара, који се обично наводе у спецификацијама произвођача транзистора са ефектом поља, дате су у табели.

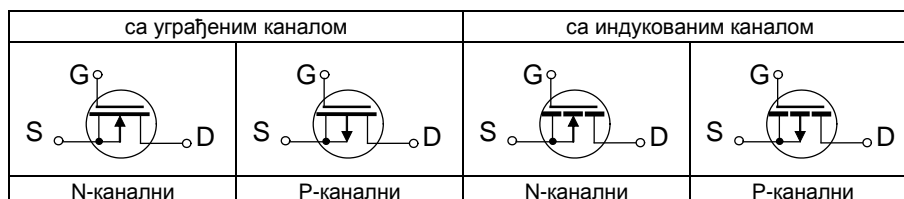
параметар	ознака	јединица	опсег вредности
струја засићења	I_{DSS}	mA	од 5 до 500
струја цурења		pA	од 10 до 100
инверзна струја гејта	I_{GSS}	nA	од 0,01 до 1
пробојни напон	$U_{(BR)}$	V	од 20 до 100
напон кочења	$ U_{GS(OFF)} $	V	од 1 до 10
излазна проводност	$g_{ds}(g_{os})$	μS	од 1 до 500
проводност преноса	$g_m(g_{fs})$	μS	од 100 до 18 000
улазна капацитивност	$C_{GS}(C_{iss})$	pF	од 3,5 до 45
излазна капацитивност	$C_{GD}(C_{rss})$	pF	од 0,85 до 10

Транзистори са изолованим гејтом

Код транзистора са изолованим гејтом (*Insulated-Gate FET, IGFET*) метална електрода која представља гејт је слојем изолатора галвански одвојена од канала, тако да не постоји спој две области полупроводника различитог типа који може бити поларисан у проводном смеру. Захваљујући томе, управљачки напон гејт-сорс може имати оба поларитета. Проводност канала зависи од напона U_{GS} .

Према начину рада разликују се транзистори са уграђеним каналом (*depletion IGFET*) и транзистори са индукованим (успостављеним, подстакнутим) каналом (*enhancement IGFET*). Као и код спојних транзистора са ефектом поља, према садржају примеса у полупроводнику од којег је канал образован, разликују се *N*-канални и *P*-канални транзистори.

Стандардизовани графички симболи транзистора са изолованим гејтом приказани су на слици 4.6. Стрелица указује на тип материјала који представља канал. Када је стрелица окренута ка каналу, канал је полупроводник *N*-типа. Стрелица окренута од канала означава да је канал полупроводник *P*-типа.

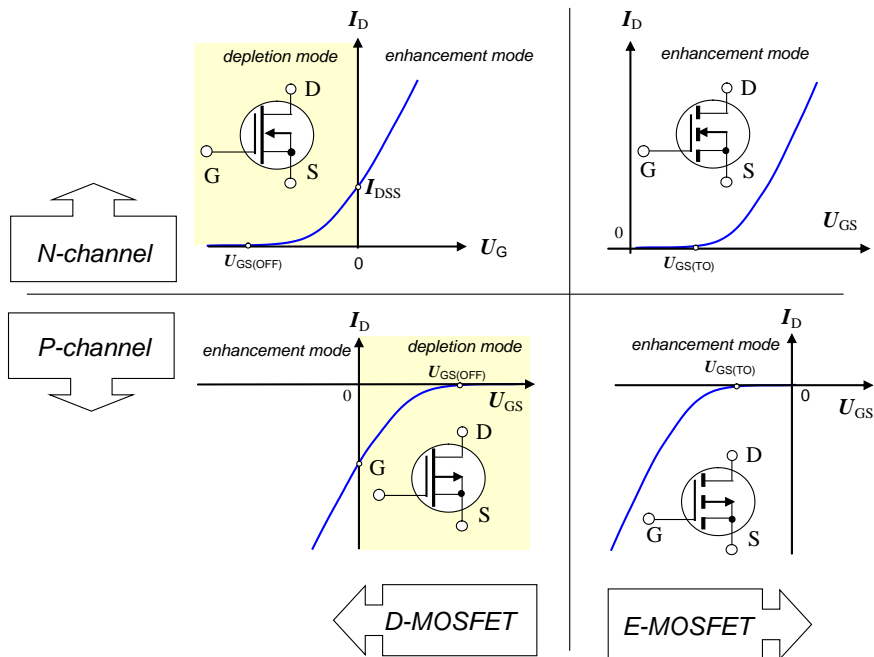


Слика 4.6. Графички симболи транзистора са изолованим гејтом

Транзистори са индукованим каналом су непроводни када је напон U_{GS} једнак нули. Протицање струје између дрејна и сорса је могуће тек након довођења напона одговарајућег поларитета на управљачку електроду кола. На тај начин се повећава концентрација слободних носилаца наелектрисања у подручју између прикључака за дрејн и сорс. Ово повећање (*enhancement*), омогућује успостављање (индуковање) проводног канала. Транзистори са индукованим каналом се означавају префиксом *E* (*enhancement type*).

Транзистори са уграђеним каналом су, слично транзисторима са *PN*-спојем, проводни када је напон U_{GS} једнак нули. Струја кроз канал може да тече и када је прикључак за гејт слободан (неповезан). Довођењем напона одговарајућег поларитета на гејт, област канала се “обогаћује” слободним носиоцима наелектрисања, услед чега се проводност канала повећава. Довођењем напона супротног поларитета слободни носиоци наелектрисања се потискују из области канала. Ово “осиромашење” (*depletion*), доводи до смањивања проводности канала. Транзистори са уграђеним каналом се означавају префиксом *D* (*depletion type*).

На слици 4.7. приказане су карактеристике преноса појединих типова транзистора.



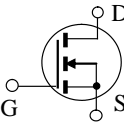
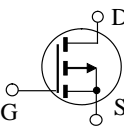
Слика 4.7. Карактеристике преноса MOS-транзистора

Технологија заснована на примени процеса оксидације са циљем добијања танког слоја изолатора између гејта и канала назива се MOS-технологија (*Metal Oxide Semiconductor*). Транзистор са ефектом поља

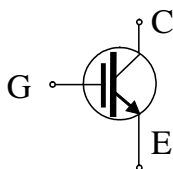
са гејтом изолованим слојем силицијум-оксида (SiO_2) се назива *MOSFET*. Захваљујући веома доброј изолацији између гејта и канала, улазна отпорност ове врсте транзистора је веома велика, реда величине $10^{10} \Omega$ до $10^{15} \Omega$.

MOS-транзистори са уграђеним каналом се означавају са *D-MOSFET*.

MOS-транзистори са подстакнутим каналом се означавају са *E-MOSFET*.

<p><i>N</i>-канални <i>E-MOSFET</i> је непроводан када је напон U_{GS} једнак нули.</p> <p><i>N</i>-канални <i>E-MOSFET</i> је проводан када је напон U_{GS} позитиван, једнак или већи од напона прага $U_{GS(TO)}$.</p>		<p>OFF $U_{GS} = 0$</p> <p>ON $U_{GS} \geq U_{GS(TO)}$</p>
<p><i>P</i>-канални <i>E-MOSFET</i> је непроводан када је напон U_{GS} једнак нули.</p> <p><i>P</i>-канални <i>E-MOSFET</i> је проводан када је напон U_{GS} негативан, једнак или мањи од напона прага $U_{GS(TO)}$.</p>		<p>OFF $U_{GS} = 0$</p> <p>ON $U_{GS} \leq U_{GS(TO)}$</p>

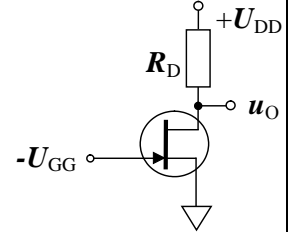
За примену у енергетици развијени су елементи који представљају спој биполарне и *MOS*-технике. Графички симбол биполарног транзистора са изолованим гејтом (*Insulated Gate Bipolar Transistor- IGBT*) приказан је на слици 4.8. Мешовита технологија омогућује да брзина прекидања, снага управљања и робусност оваквог елемента буде као код *MOS*-транзистора, а да се истовремено одликује малом унутрашњом отпорношћу у засићењу, као код биполарног транзистора.



Слика 4.8. Графички симбол биполарног транзистора са изолованим гејтом

ЗАДАЦИ

1. За коло са N -каналним транзистором са ефектом поља, приказано на слици, задате су бројне вредности: $R_D = 2 \text{ k}\Omega$, $U_{DD} = 10 \text{ V}$, $r_{ds} = 100 \text{ k}\Omega$, $U_{GG} = 2 \text{ V}$, $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ и $U_{GS(OFF)} = -4 \text{ V}$. Израчунати вредности струје кроз канал и напона дрејн-сорс.

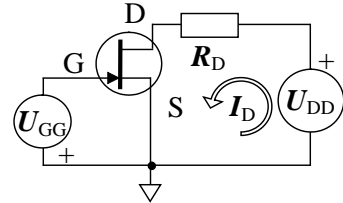


РЕШЕЊЕ

Применом другог Кирхофовог правила на петљу дрејн-сорс добија се:

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D, \quad (1)$$

где је U_{DS} вредност напона дрејн-сорс.



Ако се радна тачка налази у области zasiћења, за спојни транзистор са ефектом поља важи:

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

У посматраном колу је $U_{GS} = -U_{GG}$, одакле следи:

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

За задате бројне вредности, струја кроз канал једнака је:

$$I_D = 10 \text{ mA} \left(1 + \frac{2 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right)^2 = \frac{10}{4} \text{ mA} = 2,5 \text{ mA}.$$

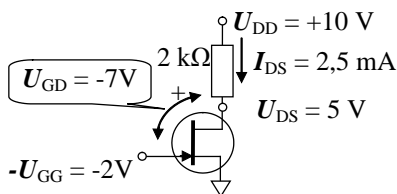
На основу једначине (1) следи:

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D = 5 \text{ V}.$$

ПРОВЕРА

Полазна претпоставка, да се радна тачка транзистора налази у области засићења, је тачна. За задате вредности, напон између гејта и дрејна, U_{GD} , је негативан, а по интензитету већи од напона прекида $U_{GS(OFF)}$:

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = -5 \text{ V} < U_{GS(OFF)}$$

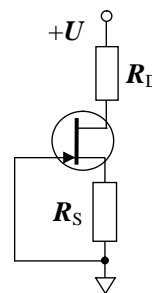


2. За коло приказано на слици:

а) одредити вредност отпорности R_S која одговара задатим вредностима:

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

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



РЕШЕЊЕ

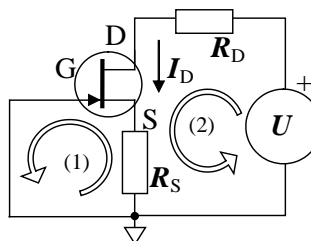
а) За посматрано коло важе следеће једначине:

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

(друго Кирхофово правило, примењено на петљу гејт-сорс);

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

(петља која обухвата дрејн и сорс);



и, под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у области засићења:

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

(карактеристика преноса транзистора са ефектом поља у области засићења).

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

$$U_{GS} = U_{GS(OFF)} \left(1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right) = (-5) \left(1 - \sqrt{\frac{5}{20}} \right) = -2,5 \text{ V},$$

којој одговара вредност отпорности R_S :

$$R_S = -\frac{U_{GS}}{I_D} = -\frac{U_{GS(OFF)}}{I_D} \left(1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right) = 500 \Omega.$$

б)

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

$$U_{GD} \leq U_{GS(OFF)} < 0. \quad (4)$$

На основу једначина (1) и (2), следи:

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = -I_D R_S - [U - I_D (R_D + R_S)] = I_D R_D - U.$$

Услов да се у посматраном колу радна тачка транзистора налази у области засићења може се написати у облику:

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

Опсег могућих вредности отпорности R_D , при којима се радна тачка транзистора налази у области засићења, одређен је релацијама:

$$0 \leq R_D \leq \frac{U + U_{GS(OFF)}}{I_D}.$$

За задате бројне вредности параметара кола је:

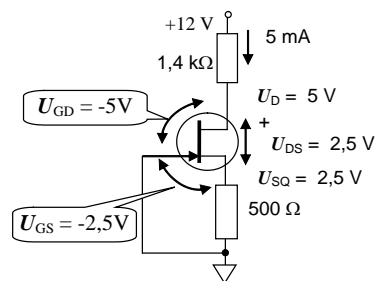
$$0 \leq R_D \leq 1,4 \text{ k}\Omega.$$

ПРОВЕРА

Вредности струје и напона у посматраном колу, за $R_D = 1,4 \text{ k}\Omega$, назначене су на слици.

$$I_{DSS} = 20 \text{ mA}, U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}.$$

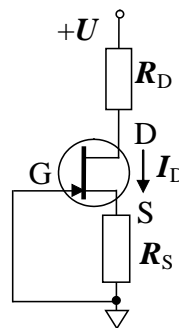
$$U_{GD} = -5 \text{ V} = U_{GS(OFF)}$$



3. За задате вредности параметара кола приказаног на слици: $U = 10\text{V}$, $R_S = 3\text{ k}\Omega$, $I_{DSS} = 10\text{ mA}$ и $U_{GS(OFF)} = -5\text{ V}$;

а) одредити вредност струје I_D и напона U_{GS} , под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у области засићења;

б) одредити највећу могућу вредност отпорности R_D при којој се, за задате вредности параметара кола, радна тачка транзистора налази у области засићења.



РЕШЕЊЕ

а)

Стање посматраног кола описано једначинама:

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

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

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

На основу једначина (1) и (3) следи:

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

Проблем одређивања вредности струје I_D се своди на решавање квадратне једначине која, за задате бројне вредности, када се струја I_D изрази у милиамперима, има облик:

$$3,6 I_D^2 - 13 I_D + 10 = 0,$$

Ознака I_D представља бројну вредност физичке величине I_D , изражену у милиамперима. Математички, ова једначина има два решења, али је само једно од њих и физички могуће.

Решење $I_D = 2,5$ се одбацује, јер на основу једначине (3), за $I_D = 2,5\text{ mA}$ следи $U_{GS} = -7,5\text{ V}$, а то је немогуће, јер је напон прекида $U_{GS(OFF)}$ једнак -5 V , па би транзистор тада био закочен, а у таквом стању струја I_D , која одређује напон U_{GS} је једнака нули.

Физички могуће решење је $I_D = 10/9 = 1,11$; на основу којег следи:

$$I_D = 1,11 \text{ mA} ,$$

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

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

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

који се може исказати у облику:

$$U_{GS} - U_{DS} \leq U_{GS(OFF)} , \text{ односно}$$

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

На основу једначина (1) и (2) следи:

$$U - I_D(R_D + R_S) \geq -I_D R_S - U_{GS(OFF)} ,$$

односно:

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

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

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

За задате бројне вредности је:

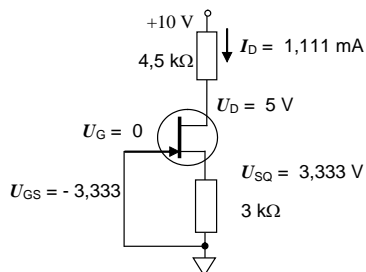
$$\max R_D = 4,5 \text{ k}\Omega .$$

ПРОВЕРА

Вредности струје и напона у посматраном колу, за $R_D = 4,5 \text{ k}\Omega$, назначене су на слици.

$$I_{DSS} = 20 \text{ mA} , U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V} .$$

$$U_{GD} = -5 \text{ V} = U_{GS(OFF)}$$



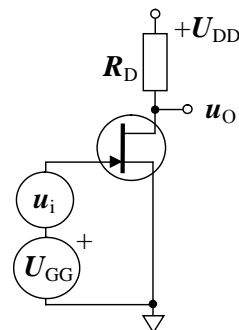
4. На слици је приказан инвертујући појачавач остварен помоћу N -каналног транзистора у споју са заједничким сорсом (*common source*).

а) Одредити општи израз за вредност појачања напона за мале сигнале:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i};$$

б) Израчунати вредност појачања A_u за задате бројне вредности:

$$R_D = 4 \text{ k}\Omega, U_{DD} = 15 \text{ V}, r_{ds} = 100 \text{ k}\Omega, \\ U_{GG} = -2 \text{ V}, I_{DSS} = 10 \text{ mA} \text{ и } U_{GS(OFF)} = -4 \text{ V}.$$



РЕШЕЊЕ

а)

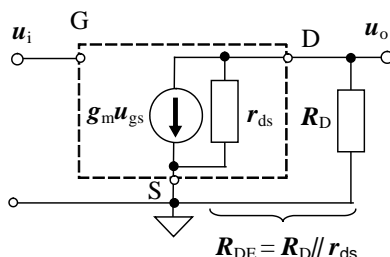
Да би посматрано коло представљало појачавач, који појачава сигнал на излазу извора напона u_i , потребно је да се мирна радна тачка транзистора налази у области засићења. У том случају промене напона инверзне поларизације споја гејт-канал, које настају услед деловања напона u_i , пресликавају се у промене струје кроз канал, односно промене напона u_o на излазу кола. Ако се занемаре сопствене (паразитне) капацитивности транзистора, еквивалентно коло за мале сигнале има облик приказан на слици.

Математички модел овог кола представљају једначине:

$$u_{gs} = u_i,$$

$$i_d = g_m u_{gs},$$

$$u_o = -i_d R_{DE}$$



где је:

g_m проводност преноса транзистора, а

R_{DE} еквивалентна отпорност у излазном колу (која представља излазну отпорност појачавача):

$$R_{DE} = R_D \parallel r_{ds},$$

r_{ds} динамичка излазна отпорност:

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

На основу претходног разматрања следи:

$$u_o = -g_m u_{gs} \cdot R_{DE}.$$

Појачање напона за мале сигнале једнако је:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -g_m R_{DE}.$$

Појачање је негативно. Транзистор у споју са заједничким сорсом делује као инвертујући појачавач. Вредност појачања A_u зависи од отпорности R_D и проводности преноса (транскондуктансе) транзистора, g_m . Њена је вредност одређена вредношћу струје која одговара мирној радној тачки, I_D :

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}}.$$

Мирна радна тачка представља стање транзистора у отсуству побуде ($u_i = 0$). Одговарајућа вредност напона гејт-сорс, U_{GS} , је тада једнака:

$$U_{GS} = U_{GG}.$$

Ако се мирна радна тачка транзистора налази у области засићења, за посматрано коло важи:

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

одакле следи:

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|U_{GS(OFF)}|} \left(1 - \frac{U_{GG}}{U_{GS(OFF)}}\right),$$

односно:

$$A_u = -\frac{2R_{DE} I_{DSS}}{|U_{GS(OFF)}|} \left(1 - \frac{U_{GG}}{U_{GS(OFF)}}\right).$$

б)

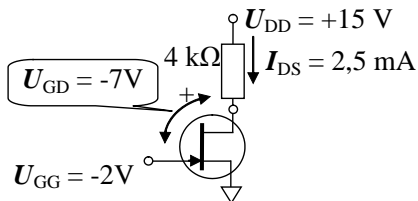
За задате бројне вредности је:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GG}}{U_{GS(OFF)}}\right)^2 = \frac{I_{DSS}}{4} = 2,5 \text{ mA},$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D = 5 \text{ V}.$$

Мирна радна тачка транзистора налази се у области засићења. Напон између гејта и дрејна, U_{GD} , је негативан, а по интензитету већи од напона прекида $U_{GS(OFF)}$:

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = -7 \text{ V} < U_{GS(OFF)}.$$



За задате бројне вредности у посматраном колу важи:

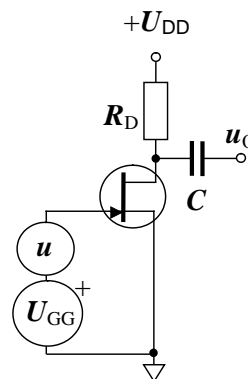
$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|U_{GS(OFF)}|} \left(1 - \frac{U_{GG}}{U_{GS(OFF)}} \right) = 2,5 \text{ mS},$$

$$A_u = -\frac{2R_{DE}I_{DSS}}{|U_{GS(OFF)}|} \left(1 - \frac{U_{GG}}{U_{GS(OFF)}} \right) = -10.$$

5. На слици је приказан инвертујући појачавач намењен за појачање сигнала ниских учестаности (који даје извор напона u).

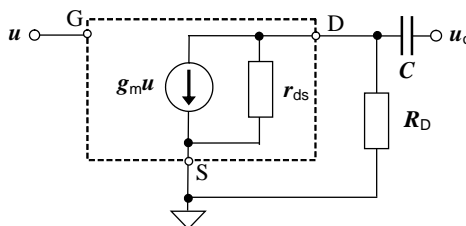
- Нацртати еквивалентно коло за мале сигнале.
- Одредити општи израз за вредност излазне отпорности појачавача.
- Одредити општи израз за вредност излазне отпорности појачавача.

г) За задате бројне вредности: $R_D = 1 \text{ k}\Omega$, $U_{DD} = 12 \text{ V}$, $r_{ds} = 100 \text{ k}\Omega$, $U_{GG} = -2,5 \text{ V}$, $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$ и $U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}$, под претпоставком да се реактанса кондензатора за спрегу може занемарити, одредити највећу амплитуду улазног напона при којој не долази до појаве изобличења при појачању сигнала.



РЕШЕЊЕ

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



б)

На основу еквивалентног кола следи да је излазна отпорност појачавача једнака:

$$R_O = r_{ds} \parallel R_D .$$

в)

Напон поларизације споја гејт-сорс, U_{GS} , у посматраном колу је негативан, а по интензитету мањи од интензитета напона прекида транзистора који је примењен. То значи да транзистор није закочен.

Ако се мирна радна тачка транзистора налази у области засићења, а реактанса кондензатора за спрегу се може занемарити, појачање напона за мале сигнале једнако је:

$$A_u = \frac{u_o}{u} = -g_m r_{ds} \parallel R_D .$$

Вредност проводности преноса (транскондуктансе) транзистора одређена је вредношћу струје која одговара мирној радној тачки:

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}} .$$

г)

Највећа амплитуда улазног напона при којој не долази до појаве изобличења при појачању сигнала одређена је положајем мирне радне тачке и вредношћу појачања напона у посматраном колу.

За излазну петљу, која обухвата дрејн сорс, важи:

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D ,$$

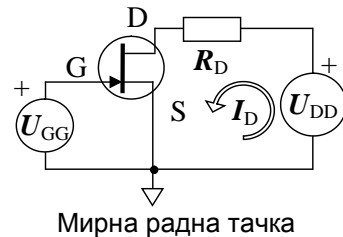
где је где је I_D мирна радна струја, а U_{DS} вредност напона дрејн-сорс која одговара стању у одсуству побуде ($u = 0$).

Ако се мирна радна тачка транзистора у посматраном колу налази у области засићења, струја I_D је једнака:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GG}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2 = 5 \text{ mA} .$$

Напон U_{DS} , који одговара мирној радној тачки, једнак је:

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D = 7 \text{ V} .$$



На основу добијених резултата следи да је полазна претпоставка, да се мирна радна тачка транзистора налази у области засићења, тачна. Напон између гејта и дрејна је нижи (негативнији) од напона прекида:

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = -9,5V < U_{GS(OFF)}.$$

Вредност проводности преноса (транскондуктансе) транзистора у посматраном колу, која одговара задатој мирној радној тачки, једнака је:

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}} = 4 \text{ mS}.$$

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

$$A_u = \frac{u_o}{u} = -g_m r_{ds} \parallel R_D \cong -4.$$

Напон на излазу кола, u_o , одређен је једначином:

$$u_o(t) = U_{DS} + u_o(t),$$

где је U_{DS} једносмерна компонента, која одговара мирној радној тачки, а $u_o(t)$ наизменична компонента укупног напона $u_o(t)$,

При побуди хармонијским сигналом мале амплитуде:

$$u(t) = U \sin \omega t,$$

излазни напон, $u_o(t)$, садржи наизменичну компоненту која је у противфази са улазним сигналом:

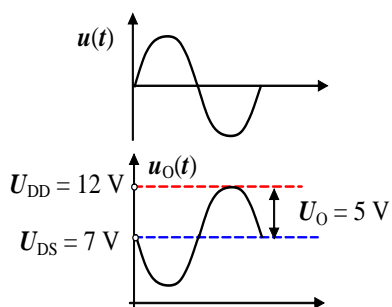
$$u_o(t) = U_{DS} + A_u u(t), A_u < 0.$$

Највећа амплитуда наизменичне компоненте излазног напона, U_o , при којој не долази до појаве изобличења једнака је разлици напона напајања, U_{DD} , и напона дрејн-сорс, U_{DS} , који одговара мирној радној тачки:

$$U_o = U_{DD} - U_{DS} = 5 \text{ V}.$$

Највећа амплитуда улазног напона, $u(t)$, при којој не долази до појаве изобличења наизменичног сигнала на излазу, једнака је:

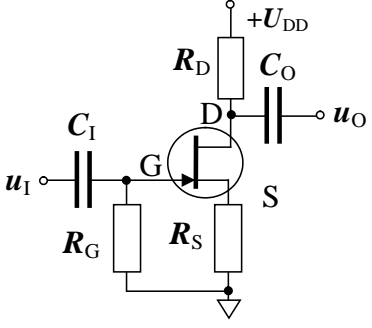
$$\max U = \frac{U_{DD} - U_{DS}}{|A_u|} = 1,25 \text{ V}.$$



6. За коло приказано на слици:

а) одредити вредност мирне радне струје I_D ако је: $U_{DD} = 15V$, $R_S = 1\text{ k}\Omega$, $I_{DSS} = 10\text{ mA}$ и $U_{GS(OFF)} = -5V$, $R_G = 1\text{ k}\Omega$, $I_{GSS} = -1\text{ nA}$.

в) нацртати еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналом ниске учестаности.



РЕШЕЊЕ

а) У одсуству сигнала побуде ($u_i = 0$) стање у колу представљено је једначинама:

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

(петља гејт-сорс);

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

(петља која обухвата дрејн и сорс);

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

С обзиром на задате вредности параметара, напон U_G се може занемарити у односу на вредности осталих напона у колу:

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

Једначина (1) се своди на једначину:

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

На основу претходних једначина следи:

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

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

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

односно:

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

где је :

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

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:

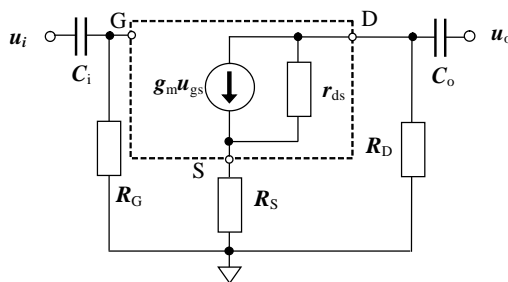
$$x_1 = 1 \text{ и } x_2 = \frac{1}{4}.$$

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

Физички стварно решење је $x = \frac{1}{4}$, на основу којег следи:

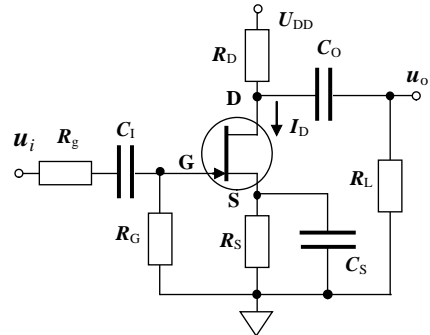
$$I_D = 2,5 \text{ mA}.$$

б) Еквивалентно коло за мале сигнале ниских учестаности приказано је на слици.



7. На слици је приказан инвертујући појачавач са N -каналним транзистором са ефектом поља. Под претпоставком да је струја гејта занемарљиво мала:

- 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;
- нацртати потпуно еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналимa.



$$I_{DSS} = 10 \text{ mA}; U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}; \\ r_{DS} = 40 \text{ k}\Omega; R_g = 5 \text{ k}\Omega; R_G = 1 \text{ M}\Omega; \\ R_L = 100 \text{ k}\Omega; U_{DD} = 15 \text{ V}.$$

РЕШЕЊЕ

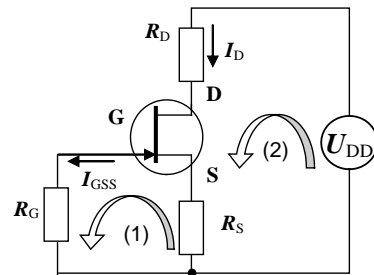
a)

У одсуству побуде ($u_i = 0$), стање у колу је представљено једначинама:

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

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

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



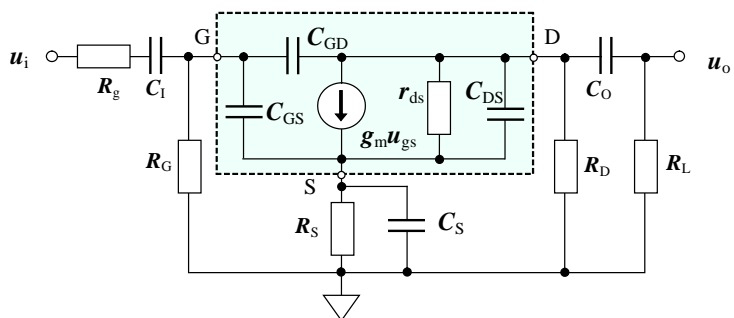
на основу којих се, за задате вредности параметара транзистора, I_{DSS} и $U_{GS(OFF)}$, и мирне радне струје, I_D , одређују вредност отпорности R_S :

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

и вредност отпорности R_D , која одговара задатој (жељеној) вредности напона U_{DS} :

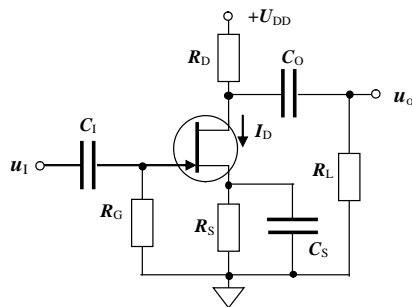
$$R_D = \frac{U_{DD} - U_{DS}}{I_D} - R_S = 3 \text{ k}\Omega.$$

б) Потпуно еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналимa, у којем су приказане и сопствене капацитивности транзистора (C_{GS} , C_{GD} и C_{DS}), приказано је на слици.



Кондензатори за спрегу уносе слабљење. Због тога се вредности капацитивности C_1 , C_S и C_O бирају тако да, у радном опсегу учестаности, њихова реактанса буде довољно мала.

8. Коло приказано на слици представља инвертујући појачавач са N -каналним транзистором у споју са заједничким сорсом (*common source FET-amplifier*). Капацитивности C_1 , C_O и C_S су довољно велике да се може сматрати да у посматраном колу кондензатори представљају кратак спој за наизменичне сигнале у радном опсегу учестаности. Одредити вредности отпорности R_D и R_S тако да, при мирној радној струји I_D од 2 mA, вредност појачања за мале сигнале буде једнако -6.



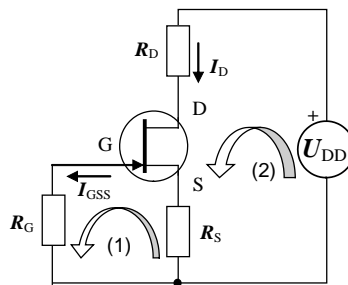
$I_{GSS} = -1 \text{ nA}$;
 $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$;
 $U_{GS(OFF)} = -4 \text{ V}$;
 $r_{ds} = 50 \text{ k}\Omega$;
 $R_G = 2 \text{ M}\Omega$;
 $R_L = 100 \text{ k}\Omega$;
 $U_{DD} = 12 \text{ V}$.

РЕШЕЊЕ

а) Када се пад напона који струја инверзно поларисаног споја гејт-канал, I_{GSS} , ствара на отпорнику R_G , занемари, математички модел, који одговара мирној радној тачки посматраног кола представљају једначине:

$$U_{GS} = R_S I_D,$$

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

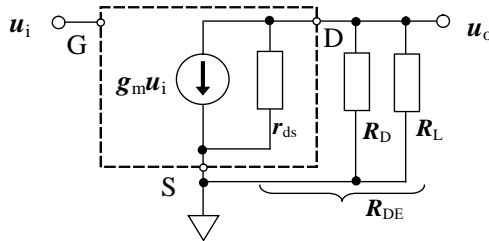


$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^2,$$

на основу којих, за задате вредности параметара, следи:

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

Еквивалентно коло за побуду малим сигналимa, када се може предпоставити да кондензатори C_i , C_o и C_s представљају кратак спој за наизменичне сигнале, приказано је на слици.



Вредност појачања напона је одређена изразом:

$$A_U = \frac{u_o}{u_i} = -g_m \cdot R_{DE} = -g_m \cdot r_{ds} \parallel R_D \parallel R_L,$$

где је g_m динамичка проводност преноса, која је одређена мирном радном струјом транзистора:

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}}.$$

Ако је испуњен услов $R_D \ll R_L \parallel r_{ds} \cong 33 \text{ k}\Omega$, може се користити приближан израз

$$A_U \approx -g_m \cdot R_D.$$

За задате вредности добија се:

$$g_m = \frac{2}{|-4|} \sqrt{2 \cdot 8} \frac{\text{mA}}{\text{V}} = 2 \text{ mS},$$

$$R_D = \frac{A_U}{-g_m} = 3 \text{ k}\Omega.$$

9. За N -канални транзистор са ефектом поља, у колу приказаном на слици, познате су декларисане границе могућих вредности карактеристичних параметара:

$I_{DSS} \in (\min I_{DSS}, \max I_{DSS})$ и
 $U_{GS(OFF)} \in (\min U_{GS(OFF)}, \max U_{GS(OFF)})$,

где је I_{DSS} струја засићења (струја између дрејна и сорса, при кратком споју између гејта и сорса), а $U_{GS(OFF)}$ напон прекида.



а) одредити општи израз за вредност отпорности R_S тако да мирна радна струја транзистора, чија се радна тачка налази у области засићења, буде у задатом опсегу од $\min I_D$ до $\max I_D$;

б) одредити потребне вредности напона U_G и отпорности R_S тако да, за декларисане вредности дате у табели, мирна радна струја транзистора у посматраном колу, I_D , буде у опсегу од 20 mA до 30 mA.

декларисане карактеристике	назив	ознака	јед.	min	max
	струја засићења	I_{DSS}	mA	50	150
	напон прекида	$U_{GS(OFF)}$	V	- 4	- 10

РЕШЕЊЕ

а) За вредности које одговарају радној тачки у области засићења важе једначине:

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

$$U_G - U_{GS} - R_S I_D = 0. \quad (2)$$

Једносмерни напон на гејту, U_G , дефинисан је отпорничким делитељем напона, R_{G1} и R_{G2} , и напона извора за поларизацију U_{DD} .

$$U_G = U_{DD} \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}}. \quad (3)$$

Вредност отпорности R_S треба одредити тако да се за било који транзистор, чији су параметри I_{DSS} и $U_{GS(OFF)}$ унутар декларисане производне толеранције, вредност мирне радне струје транзистора у посматраном колу налази у задатом (жељеном) опсегу (од 20 mA до 30 mA).

Из таблице декларисаних вредности параметара транзистора види се да максималној декларисаној вредности струје I_{DSS} , $max I_{DSS} = 150 \text{ mA}$, одговара највећа, по апсолутној вредности, декларисана вредност напона прекида:

$$max U_{GS(OFF)} = -10 \text{ V}.$$

Минималној вредности струје I_{DSS} (50 mA) одговара, минимална по интензитету (модулу), вредност напона прекида:

$$min U_{GS(OFF)} = -4 \text{ V}.$$

На основу једначине (1) одређује се, за декларисане параметре транзистора, $max I_{DSS} = 150 \text{ mA}$ и $max U_{GS(OFF)} = -10 \text{ V}$, и задату највећу вредност мирне радне струје у колу, $max I_D$, одговарајућа (максимална по интензитету) вредност напона гејт-сорс, $max U_{GS}$:

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

Притом, на основу једначине (2), мора да буде испуњен услов:

$$U_G = max U_{GS} + R_S max I_D.$$

За декларисане минималне вредности параметара транзистора, $min I_{DSS}$ и $min U_{GS(OFF)}$, и задату (жељену) најмању вредност мирне радне струје, $min I_D$, одређује се одговарајућа (минимална по интензитету) вредност напона гејт-сорс, $min U_{GS}$:

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

Притом, на основу једначине (1), мора да буде испуњен услов:

$$U_G = min U_{GS} + R_S min I_D.$$

НАПОМЕНА

За N -канални транзистор са ефектом поља, напони U_{GS} и $U_{GS(OFF)}$ су негативни. Префикси "min" и "max" испред ознаке величине указују, у овом случају, да тако означене посматране величине одговарају минималној, односно максималној вредности интензитета струје I_{DSS} , (декларисаној од стране произвођача). Математички је:

$$max U_{GS(OFF)} < min U_{GS(OFF)}, \text{ односно: } max U_{GS} < min U_{GS}.$$

На основу претходног разматрања следи:

$\max U_{GS} + R_S \max I_D = \min U_{GS} + R_S \min I_D$, односно:

$$R_S = \frac{\min U_{GS} - \max U_{GS}}{\max I_D - \min I_D}.$$

б)

Из изведених израза, за задате опсеге (толеранције) вредности параметара I_{DSS} и $U_{GS(OFF)}$, и задат жељени опсег вредности мирне радне струје, I_D , одређују се вредности напона гејт-сорс $\min U_{GS}$ и $\max U_{GS}$:

$$\min U_{GS} = -4 \left(1 - \sqrt{\frac{20}{50}} \right) = -1,47 \text{ V} > \max U_{GS(OFF)} = -10 \text{ V},$$

(транзистор није закочен), и

$$\max U_{GS} = -10 \left(1 - \sqrt{\frac{30}{150}} \right) = -5,53 \text{ V} > \min U_{GS(OFF)} = -4 \text{ V}.$$

Уношењем задатих и израчунатих вредности у изведен израз за отпорност R_S добијаја се тражена вредност отпорности:

$$R_S = \frac{\min U_{GS} - \max U_{GS}}{\max I_D - \min I_D} \cong 406 \Omega.$$

Вредност напона поларизације гејта, U_G , одређује се на основу једначине (2), примењене на вредности $\max U_{GS}$ и $\max I_D$:

$$U_G = \max U_{GS} + R_S \max I_D = -5,53 \text{ V} + (406 \Omega)(30 \cdot 10^{-3} \text{ A}) \cong 6,65 \text{ V}.$$

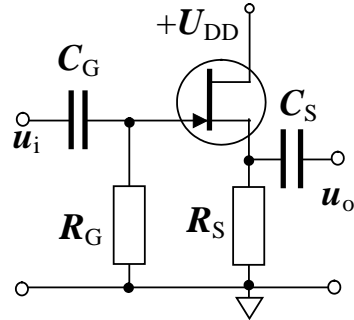
ПРОВЕРА

Израчунате вредности важе и када се једначина (2) примени за вредности $\min U_{GS}$ и $\min I_D$:

$$U_G = \min U_{GS} + R_S \min I_D = -1,47 \text{ V} + (406 \Omega)(20 \cdot 10^{-3} \text{ A}) \cong 6,65 \text{ V}.$$

10. Коло приказано на слици представља неинвертујући појачавач са N -каналним транзистором у споју са заједничким дрејном (*common drain FET-amplifier, source-follower*). Под претпоставком да је струја гејта занемарљиво мала и да су познате вредности:

$$U_{DD} = 10 \text{ V}, R_G = 1 \text{ M}\Omega, R_S = 1200 \Omega, I_{DSS} = 5 \text{ mA}, U_{GS(OFF)} = -3 \text{ V}, r_{ds} = 40 \text{ k}\Omega:$$



- одредити вредност мирне радне струје I_D и напона U_{DS} ;
- нацртати еквивалентно коло за побуду наизменичним сигнализма ниских учестаности;
- Ако се може претпоставити да су реактансе кондензатора C_G и C_S занемарљиво мале, одредити вредност појачања за мале сигнале $A_U = u_o/u_i$.

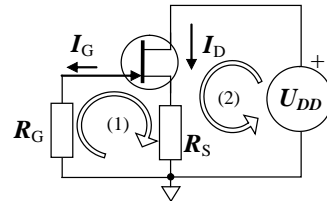
РЕШЕЊЕ

- У одсуству променљивог побудног сигнала, радна тачка N -каналног транзистора у споју са заједничким дрејном налази се у области засићења. Стање у колу одређено је следећим једначинама:

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

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

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



Ако је струја гејта занемарљиво мала, биће:

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

На основу једначина (1) и (3) следи:

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

Када 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:

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

у којој I_D представља бројну вредност струје I_D , изражену у милиамперима.

Сређивањем, добија се квадратна једначина:

$$0,8I_D^2 - 5I_D + 5 = 0 ,$$

која има два решења:

$$I_{D1} = 5 \text{ и } I_{D2} = 1,25.$$

Решење I_{D1} се одбацује, јер, према једначини (3), струја I_D може бити једнака струји засићења I_{DSS} (5 mA), само ако је напон U_{GS} једнак нули, што није у сагласности са једначином (1).

На основу вредности мирне радне струје:

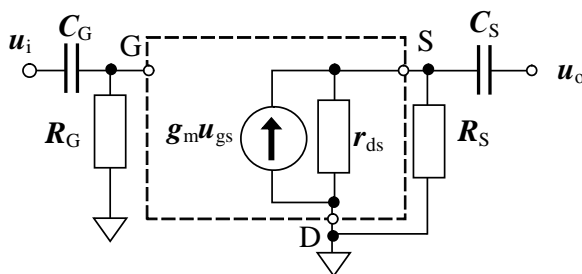
$$I_D = 1,25 \text{ mA} ,$$

одређује се вредност напона U_{DS} :

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_S = 8,5 \text{ V} .$$

б)

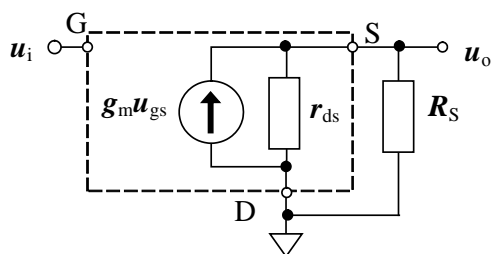
Еквивалентно коло за мале сигнале ниских учестаности, приказано је на слици.



в)

Ако су капацитивности C_G и C_S довољно велике, тако да кондензатори C_G и C_S представљају кратак спој за наизменичне сигнале, еквивалентно коло се поједностављује.

$$u_{gs} = u_i - u_o .$$

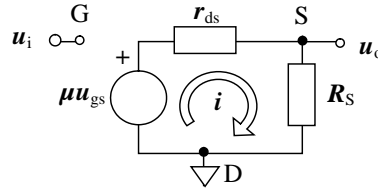


Применом теореме о еквиваленцији струјног и напонског генератора, посматрано коло се своди на једну петљу, за коју важе једначине:

$$u_o = u_s = iR_S,$$

$$\mu i_{gs} - i(R_S + r_{ds}) = 0,$$

$$u_{gs} = u_g - u_s = u_i - iR_S.$$



у којима представља сачинилац појачања напона:

$$\mu = g_m r_{ds}.$$

Одговарајућом сменом променљивих добија се:

$$\mu i_{gs} = \mu u_{gs} = \mu(u_g - u_s) = \mu(u_i - iR_S) = i(R_S + r_{ds}).$$

Даљим сређивањем ове једначине:

$$\mu i = i[(1 + \mu)R_S + r_{ds}]$$

долази се до израза за вредност струје i :

$$i = \frac{\mu i}{r_{ds} + (1 + \mu)R_S},$$

на основу којег се добија општи израз за појачање напона A_u :

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{\mu R_S}{r_{ds} + (1 + \mu)R_S} \cong \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S}.$$

За задате вредности параметара је:

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(OFF)}|} \sqrt{I_D I_{DSS}} = 1,7 \text{ mS},$$

односно:

$$A_u \cong \frac{2}{3}.$$

11. Нацртати електричну шему инвертујућег појачавача оствареног помоћу N -каналног MOS -транзистора са уграђеним каналом примењеним у споју са заједничким сорсом. Нацртати еквивалентно коло за мале сигнале и одредити одговарајуће изразе за појачање напона, улазну и излазну отпорност појачавача.

РЕШЕЊЕ

Принципска електрична шема инвертујућег појачавача са N -каналним D - $MOSFET$ -ом приказана је на слици.

Помоћу делитеља напона, који образују отпорници R_{G1} и R_{G2} , дефинише се напон U_{GS} који одговара жељеном положају мирне радне тачке транзистора:

$$U_{GS} = U_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}.$$

Еквивалентно коло за мале сигнале, у случају када се може сматрати да је реактанса улазног кондензатора занемарљиво мала у поређењу са отпорностима R_{G1} и R_{G2} , приказано је на слици. На основу једначине:

$$u_o = -g_m R_{DE} u,$$

следи:

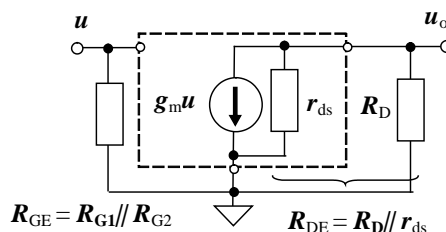
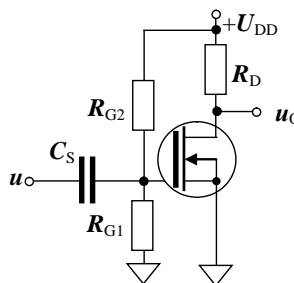
$$A_u = \frac{u_o}{u} = -g_m R_{DE}.$$

Улазна отпорност појачавача, R_{IN} , једнака је:

$$R_{IN} = R_{GE} = R_{G1} \parallel R_{G2} = \frac{R_{G1} R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}}.$$

Излазна отпорност овог појачавача, R_O , једнака је отпорности R_{DE} :

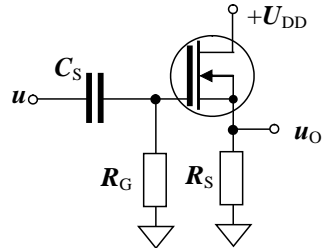
$$R_O = R_{DE} = \frac{r_{ds} R_D}{r_{ds} + R_D}.$$



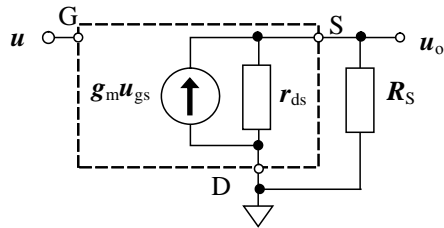
12. Нацртати електричну шему неинвертујућег појачавача оствареног помоћу N -каналног MOS -транзистора са уграђеним каналом примењеним у споју са заједничким дрејном (*source-follower*). Нацртати еквивалентно коло за мале сигнале и одредити одговарајуће изразе за појачање напона, улазну и излазну отпорност појачавача.

РЕШЕЊЕ

Принципска електрична шема неинвертујућег појачавача са N -каналним D - $MOSFET$ -ом приказана је на слици.



Ако се реактанса кондензатора за спрегу може занемарити, еквивалентно коло за мале сигнале има облик приказан на слици.



Применом теореме о еквиваленцији струјног и напонског генератора, посматрано коло се своди на једну петљу, за коју важи:

$$r_{ds} g_m u_{gs} - i_o (R_S + r_{ds}) = 0,$$

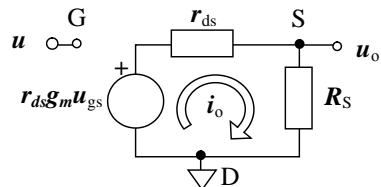
$$u_{gs} = u - u_o,$$

$$u_o = i_o R_S$$

Сређивањем се добија:

$$u_o = \frac{r_{ds} g_m R_S u}{r_{ds} + (1 + r_{ds} g_m) R_S},$$

одакле следи:



$$A = \frac{u_o}{u} = \frac{r_{ds} g_m R_S}{r_{ds} + (1 + r_{ds} g_m) R_S} \cong \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} \Big|_{r_{ds} g_m \gg 1}$$

Улазна отпорност појачавача једнака је отпорности R_G :

$$R_{IN} = R_G.$$

Изазна отпорност овог појачавача једнака је количнику напона празног хода, u_{oO} , и струје кратког споја, i_{oS} :

$$R_O = \frac{u_{oO}}{i_{oS}} = \frac{u_o}{i_o} \Big|_{R_S = \infty} \Big|_{R_S = 0}$$

Одређивање напона празног хода.

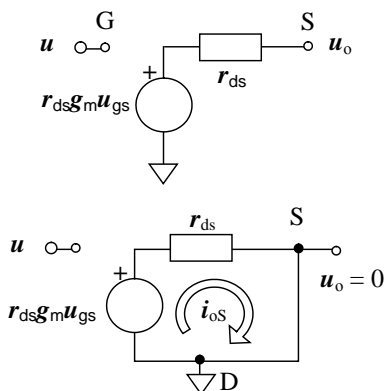
$$u_{oO} = r_{ds} g_m u_{gs} = r_{ds} g_m (u - u_{oO}).$$

$$u_{oO} = \frac{r_{ds} g_m}{1 + r_{ds} g_m} u.$$

Одређивање струје кратког споја.

$$i_{oS} = \frac{r_{ds} g_m u_{gs}}{r_{ds}} = g_m u.$$

$$R_O = \frac{u_{oO}}{i_{oS}} = \frac{\frac{r_{ds} g_m}{1 + r_{ds} g_m} u}{g_m u} = \frac{r_{ds}}{1 + r_{ds} g_m}.$$

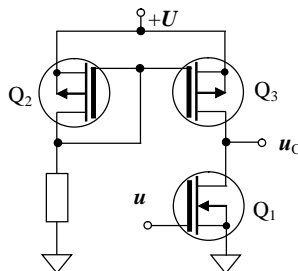


13. Нацртати инвертујући појачавач са комплементарним MOS-транзисторима и објаснити начин његовог рада.

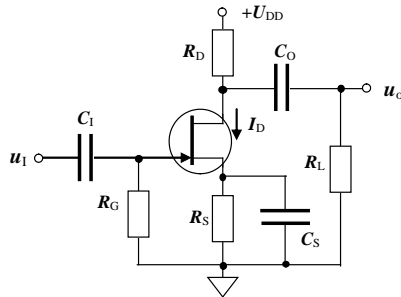
РЕШЕЊЕ

N -канални транзистор Q_1 , повезан у споју са заједничким сорсом, делује као инвертујући појачавач.

P -канални транзистори Q_2 и Q_3 образују извор струје који представља "активно оптерећење" транзистора Q_1 .



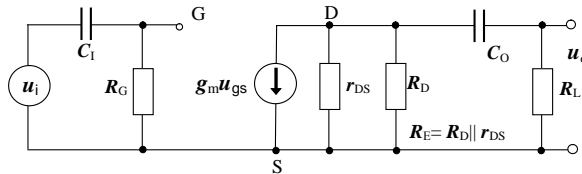
14. За коло са N -каналним транзистором са ефектом поља, приказано на слици, познате су вредности свих параметара. Капацитивности фета, C_{GS} и C_{GD} , се могу занемарити. Капацитивност C_S је довољно велика да се може претпоставити да кондензатор C_S представља кратак спој за наизменични сигнал у радном опсегу учестаности.
- a) одредити општи израз за фреквенцијску карактеристику кола, $W(j\omega)$
- b) нацртати асимптотску логаритамску амплитудску фреквенцијску карактеристику кола, ако је $C_1 = 100 \text{ nF}$, $C_0 = 1 \text{ }\mu\text{F}$.



$$\begin{aligned} I_{GSS} &= -1 \text{ nA}; \\ I_{DSS} &= 8 \text{ mA}; \\ U_{GS(OFF)} &= -4 \text{ V}; \\ r_{DS} &= 40 \text{ k}\Omega; \\ R_G &= 1,5 \text{ M}\Omega; \\ R_D &= 2 \text{ k}\Omega; \\ R_L &= 150 \text{ k}\Omega; \\ U_{DD} &= 12 \text{ V}, \\ I_D &= 2 \text{ mA}. \end{aligned}$$

РЕШЕЊЕ

- a) Еквивалентно коло за побуду малим наизменичним сигналимa приказано је на слици.



С обзиром да је улазна отпорност фета веома велика, као и да је за задате вредности параметара у колу отпорност оптерећења R_L много већа од еквивалентне отпорности R_E , посматрано коло се може представити као редна веза три елемента.

Улазни део представља пасивно коло за диференцирање које делује као филтер који онемогућује да стална компонента улазног (побудног) сигнала утиче на радну тачку транзистора.

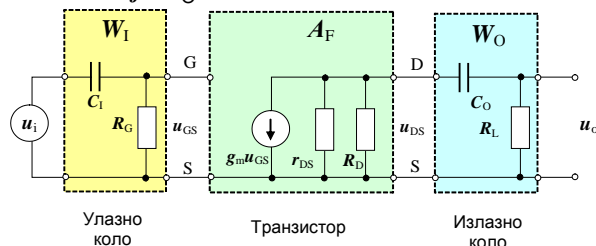
$$W_1(j\omega) = \frac{U_{GS}(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{R_G}{R_G + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{j\omega C_1 R_G}{1 + j\omega C_1 R_G}.$$

Појачање транзисторског појачавача једнако је:

$$A_F = \frac{U_{DS}}{U_{GS}} = -g_m R_E = -g_m \cdot r_{ds} \parallel R_D \approx -g_m R_D.$$

Изразни део такође представља пасивно коло за диференцирање које делује као филтер који онемогућује да се на излаз преноси стална компонента напона дрејна, која одговара мирној радној тачки транзистора:

$$W_O(j\omega) = \frac{U_O(j\omega)}{U_{DS}(j\omega)} = \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{j\omega C_O}} = \frac{j\omega C_O R_L}{1 + j\omega C_O R_L}.$$



Фреквенцијска карактеристика система у целини једнака је:

$$W(j\omega) = \frac{U_O(j\omega)}{U_I(j\omega)} = W_I(j\omega)A_F(j\omega)W_O(j\omega) = -g_m R_D \frac{j \frac{\omega}{\omega_1}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_1}} \frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}},$$

где су:

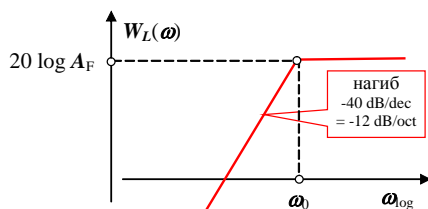
$$\omega_1(j\omega) = \frac{1}{R_G C_I} \text{ и } \omega_0(j\omega) = \frac{1}{R_L C_O}.$$

граничне учестаности улазног и излазног кола.

б) За задате вредности је $\omega_1 = \omega_0 = \omega_0$.

$$W(j\omega) = -g_m R_D \left(\frac{j \frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \right)^2.$$

Асимптотска логаритамска амплитудска фреквенцијска карактеристика је приказана на слици. Она одговара филтру другог реда, пропуснику високих учестаности. У непропусном опсегу нагиб асимптотске логаритамске амплитудске фреквенцијске карактеристике је + 40 децибела по декади.

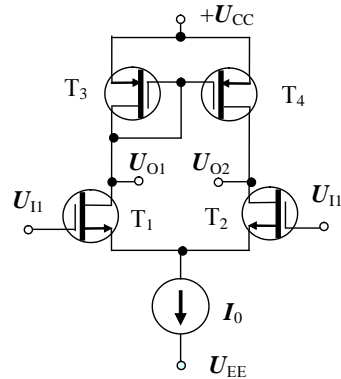


15. Нацртати принципску шему диференцијалног појачавача са комплементарним MOS-транзисторима и објаснити начин његовог рада.

РЕШЕЊЕ

N -канални транзистор Q_1 , повезан у споју са заједничким сорсом, делује као инвертујући појачавач.

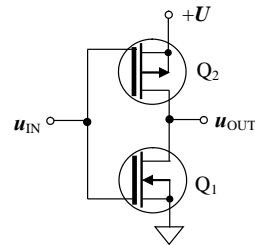
P -канални транзистори Q_2 и Q_3 образују извор струје који представља "активно оптерећење" транзистора Q_1 .



16. Нацртати логички инвертор у $CMOS$ техници и објаснити начин његовог рада.

РЕШЕЊЕ

Када на улазу кола делује сигнал високог напонског нивоа (логичка јединица) N -канални транзистор Q_1 је у проводном стању, док је P -канални транзистор Q_2 закочен. Таквим условима одговара низак напонски ниво (логичка нула) на излазу.



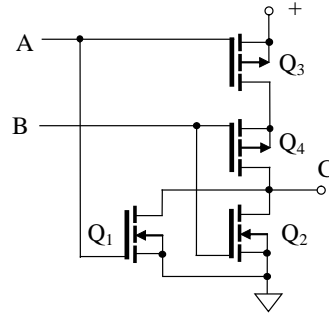
Када на улазу кола делује сигнал ниског напонског нивоа (логичка нула) N -канални транзистор Q_1 је закочен, док је P -канални транзистор Q_2 у проводном стању. Таквим условима одговара висок напонски ниво (логичка јединица) на излазу.

17. Нацртати логичко НИЛИ-коло у $CMOS$ техници и објаснити начин његовог рада.

РЕШЕЊЕ

Да би на излазу кола био низак напонски ниво (логичка нула) потребно је да води транзистор Q_1 **или** транзистор Q_2 , односно да на одговарајућем улазу, A или B , буде висок напонски ниво (логичка јединица).

A	B	C
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

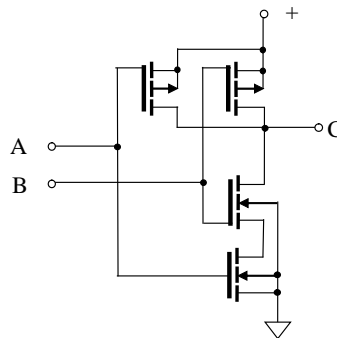


18. Нацртати логичко НИ-коло у *CMOS* техници и објаснити начин његовог рада.

РЕШЕЊЕ

Да би на излазу кола био низак напонски ниво (логичка нула) потребно је да води транзистор Q_1 **и** транзистор Q_2 , односно да на оба улаза, A и B , буде висок напонски ниво (логичка јединица).

A	B	C
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



5. СТАБИЛИЗАТОРИ ЈЕДНОСМЕРНОГ НАПОНА

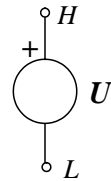
5.1. ТЕОРИЈСКА ОСНОВА

Извор напона (*voltage source*) је елемент са једном приступом који електрично коло, у којем се налази, снабдева (напаја) електричном енергијом. У ужем смислу, извор напона је активни елемент у којем се механичка, топлотна, светлосна или хемијска енергија претвара, одговарајућим процесом који се одвија у извору као електричном генератору¹, у електричну енергију, која се преноси елементима електричне мреже са којом је повезан.

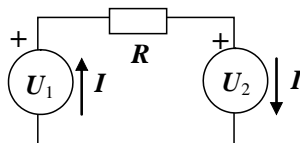
Карактеристичну величину извора напона представља разлика потенцијала између његових прикључака, *H* (*high*) и *L* (*low*):

$$U = U_{HL} = V_H - V_L.$$

Графички симбол којима се представљај извор напона у овој књизи приказан је на слици. У општем случају, напон u_{HL} може бити променљив у времену.



Када извор сталног напона напаја енергијом потрошач² са којим је повезан, струја кроз извор тече у смеру од прикључка означеног са *L* према прикључку означеном са *H*. Када у колу постоји више извора, смер струје кроз неки извор одређен је стањем кола у којем се налази³.



$$I = \frac{U_1 - U_2}{R}$$

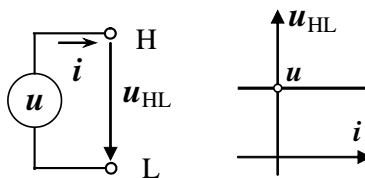
¹ Лат. *generator*, родилац, произвођач, стваралац, правилац.

² Терет, оптерећење (*load, Last, нагрузка*) којем се енергија преноси.

³ Зависно од конструкције стварног (физичког) извора, протицање струје кроз извор у смеру од прикључка *H* ка прикључку *L* може да има нежељене (штетне) последице.

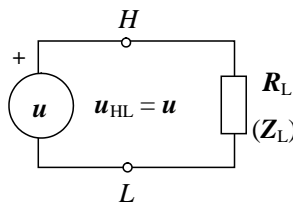
Савршени (идеални) извор напона је активни елемент код којег напон између његових прикључака не зависи од струје у грани у којој се извор налази:

$$\frac{\partial u_{HL}}{\partial i} \equiv 0.$$



Савршени извор напона је такав извор електричне енергије, код којег напон u_{HL} не зависи од вредности отпорности R_L , оптерећења којем се та енергија преноси:

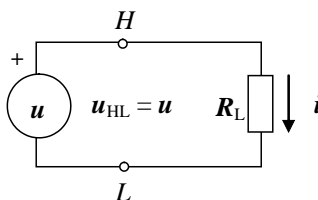
$$\frac{\partial u_{HL}}{\partial R_L} \equiv 0.$$



Савршени извор напона је такав извор електричне енергије, код којег напон u_{HL} не зависи од вредности струје i_L која протиче кроз оптерећење које тај извор напаја.

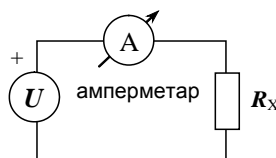
Струја i је последица деловања напона u_{HL} . Ако оптерећење представља чисту отпорност R_L важи:

$$i = \frac{u_{HL}}{R_L}.$$



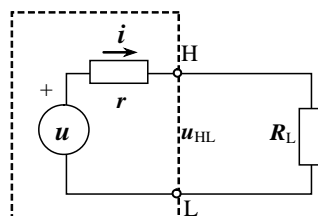
Помоћу савршеног извора познатог напона U може се одреди вредност непознате отпорности R_X , мерењем струје I_X коју извор напона даје кроз ту отпорност:

$$R_X = \frac{U}{I_X}.$$



Стварни извори напона су несавршени: напон између прикључака извора зависи од струје која кроз њега протиче.

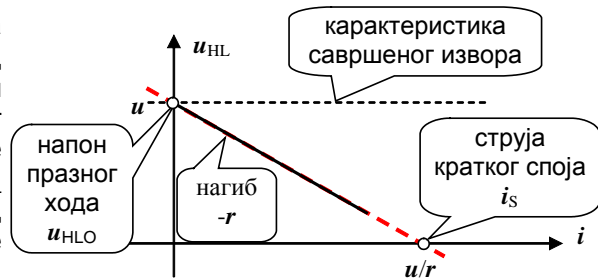
Независни извор напона (*independent voltage source*) је активни елемент који може да се представи редном везом савршеног извора напона u , независног од свих струја и напона у колу у којем се налази, и једног пасивног елемента који, у општем случају, представља импедансу.



Унутрашња отпорност (импеданса) представља основни параметар перформанси извора напона.

Вредност напона U_O на крајевима извора, зависи од односа унутрашње r и отпорности прикљученог оптерећења R_L . Уколико је струја i већа (отпорност R_L мања), одступање од “идеалне” вредности u је веће:

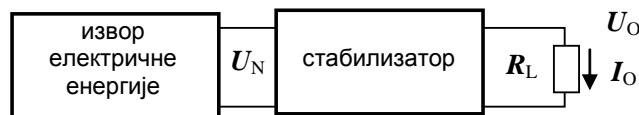
$$u_{HL} = u - ri.$$



Унутрашња отпорност извора, r , одређује нагиб статичке карактеристике извора струје:

$$r = -\frac{\partial u_{HL}}{\partial i_O}.$$

Исправан рад електронских кола подразумева да се напајају напоном чија се вредност налази у одређеним границама. Део електронског уређаја који омогућује да се други његови делови напајају сталним напоном, који не зависи од промена напона на излазу извора из којег се врши снабдевање енергијом, назива се стабилизатор⁴ напона.

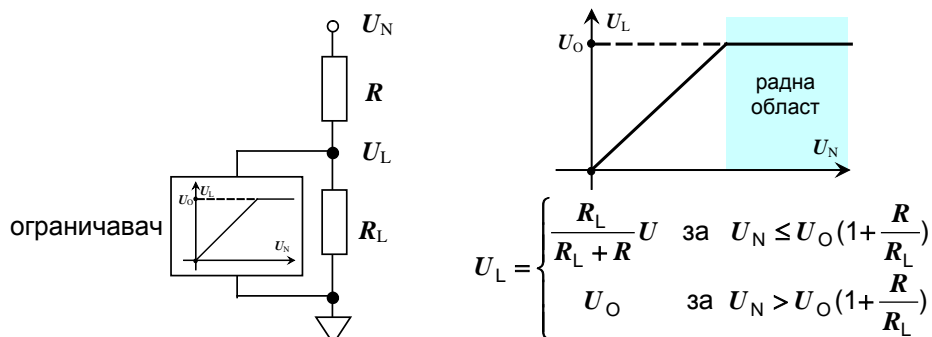


Слика 5.1. Стабилизатор напона

Стабилизација једносмерног напона, којим се напајају поједини електронски склопови, спада у најчешће постављене захтеве при реализацији електронских уређаја. За решавање овог проблема развијен је читав низ разноврсних електронских кола која остварују функцију стабилизатора, како би се омогућило налажење што погоднијег решења с обзиром на услове одређене примене.

У најједноставнијем облику, стабилизатор је ограничавач напона (*voltage limiter*) који се везује паралелно са потрошачем који се напаја енергијом из извора нестабилног напона U_N . Ограничавач “не дозвољава” да напон на крајевима потрошача U_L буде већи од одређене граничне вредности U_O (слика 5.2).

⁴ Лат. *stabilitas*, постојаност, сталност.



Слика 5.2. Стабилизација ограничавањем

Ефект стабилизације се остварује тиме што ограничавач “преузима вишак” струје, коју даје извор напона U_N , тако да излазна струја I_O на прикљученом оптерећењу R_L прави пад напона једнак U_O :

$$U_O = R_L I_O .$$

Да би ограничавач могао да делује потребно је да буде задовољен услов:

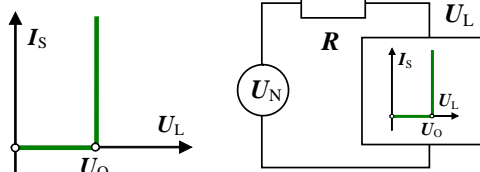
$$U_N \geq U_O \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) .$$

Отпорност R се бира да тако да излазни напон при највећем оптерећењу ($\min R_L$) буде једнак U_O када је вредност нестабилног напона једнака доњој (најнижој) вредности ($\min U_N$). Тада је струја коју “даје” извор енергије једнака струји коју потрошач “узима” (струја кроз ограничавач је једнака нули).

У елементарном облику, као ограничавач напона користи се пасивни елемент са једним приступом и изразито нелинеарном $U-I$ карактеристиком. Ограничавач напона се одликује веома великом отпорношћу, ако је напон између његових прикључака мањи од U_O , и веома малом динамичком отпорношћу, ако је тај напон већи од U_O .

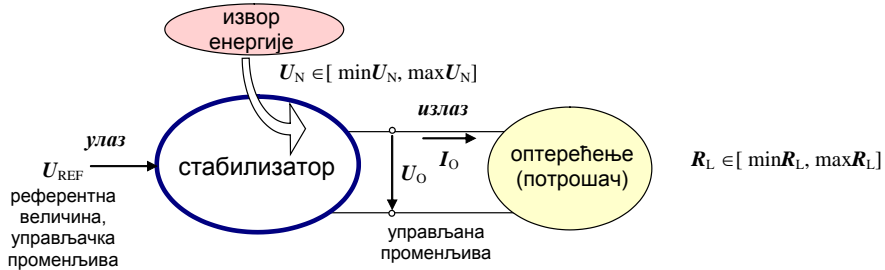
$U-I$ карактеристика савреног ограничавача напона приказана је на слици.

$$U_L = \begin{cases} U & \text{за } U_N \leq U_O \\ U_O & \text{за } U_N > U_O \end{cases}$$



У односу на друга кола, са којима је његов излаз повезан, стабилизатор делује као извор енергије од којег се захтева да напон на његовом излазу не зависи од промена отпорности (импедансе) оптерећења. Стабилизатор треба

да обезбеди да излазна величина⁵ има задату вредност, која је одређена вредношћу референтног напона U_{REF} , слика 5.3, за све вредности напона извора енергије и отпорности оптерећења које се налазе у утврђеним границама.



Слика 5.3. Принципска шема стабилизације напона

Најефикаснији начин за остваривање задатка стабилизације је примена повратне спреге. Стабилизатор заправо представља “пратећи систем” који вредност референтног напона U_{REF} , који представља управљачку променљиву⁶, пресликава на излаз, који представља управљану променљиву, независно од промена услова рада као што су: напон на излазу извора енергије (из којег се уређај напаја), струја коју оптерећење “вуче”, или температура околине.

У литератури се користи и назив регулатор⁷ напона (*voltage regulator*). Начином рада, разликују се две основне групе извора стабилног напона:

- стабилизатори код којих је регулациони елемент везан паралелно са оптерећењем: паралелни (оточни, шант) стабилизатори;
- стабилизатори код којих је регулациони елемент везан на ред са оптерећењем: редни стабилизатори.

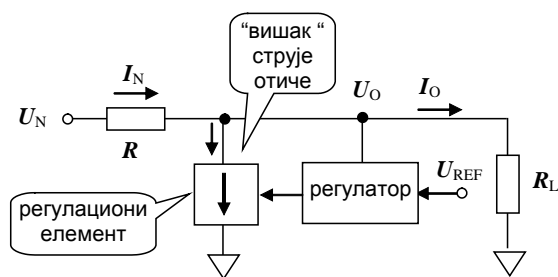
Прву групу чине кола у којима се управљање (регулација) остварује променом пада напона на редном отпорнику сталне отпорности R , тако што регулациони елемент “преузима вишак” струје коју даје извор нестабилног напона, и тако обезбеђује да излазни напон буде сразмеран референтном напону (слика 5.4). Сигнал повратне спреге се узима са излаза. Посредством регулатора остварује се негативна повратна спрега⁸ која настоји да “поништи” одступање излазног напона од задате вредности U_O .

⁵ У општем случају, излазну, стабилсану величину може да представља струја којом се потрошач напаја.

⁶ Такав стабилизатор, заправо, представља систем аутоматског управљања.

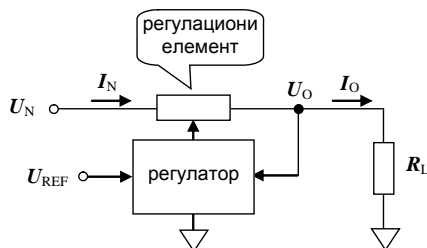
⁷ Лат. *regulator*, уредилац, удешавач.

⁸ Овакав облик деловања представља напонско-паралелну повратну спрегу. Контролисана величина је излазни напон. Повратно дејство се остварује регулационим елементом који је везан паралелно са оптерећењем.



Слика 5.4. Принципска шема извора напона са паралелном регулацијом

Другу групу чине кола у којима регулациони елемент обавља улогу отпорника кроз који се “спроводи” струја којом се електрична енергија “испоручује” потрошачу. Стабилизација излазног напона се остварује променом отпорности регулационог елемента⁹, тако да вредност излазног напона буде сразмерна вредности референтног напона.



Слика 5.5. Принципска шема редног стабилизатора напона

Да би регулациони елемент редног стабилизатора могао да обавља своју функцију потребно је да разлика потенцијала између његових крајева буде већа од неке минималне вредности. Ова вредност назива се минимални регулациони пад напона (*dropout voltage*).

Електрична снага којом стабилизатор преноси енергију потрошачу (излазна снага):

$$P_O = U_O I_O,$$

је увек мања од снаге којом се преузима енергија из извора нестабилног напона:

$$P_N = U_N I_N.$$

Разлика уложене и добијене (корисне) снаге је снага губитака којом се електрична енергија претвара у топлоту (троши) у регулационом елементу.

⁹ Односно, променом пада напона на регулационом елементу.

Квалитет рада стабилизатора, независно од начина на који се стабилизација остварује, описује се сачиниоцима који приказују утицај улазног напона U_N , односно струје оптерећења I_O на вредност излазног напона U_O .

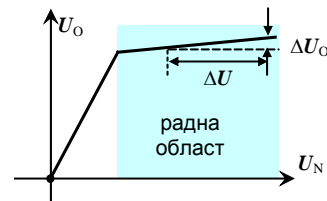
Утицај промена напона извора енергије U_N приказује се одговарајућим показатељем осетљивости:

$$S_{U_N} = \frac{\partial U_O}{\partial U_N},$$

који се исказује у V/V или, чешће, у mV/V. Геометријски параметар S_{U_N} представља нагиб карактеристике $U_O(U_N)$ у радном опсегу стабилизатора напона.

Експериментално се осетљивост S_{U_N} одређује као количник промене излазног напона ΔU_O и одговарајуће промене улазног напона, ΔU_N :

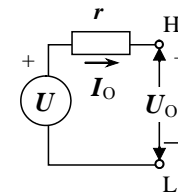
$$S_{U_N} = \frac{\Delta U_O}{\Delta U_N}.$$



Осетљивост стабилизатора на промене отпорности оптерећења (тачније, на промене интензитета струје коју оптерећење "узима") моделује се као излазна (сопствена, унутрашња) отпорност стабилизатора. Вредност излазне отпорности је бројно једнака количнику напона празног хода, U_{OO} , и струје кратког споја, I_{OS} :

$$r = \frac{U_{OO}}{I_{OS}},$$

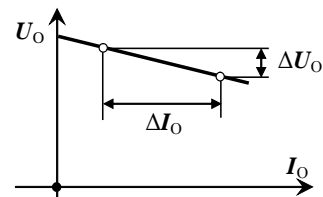
$$U_{OO} = U_{HL} \Big|_{I_O = 0}, \quad I_{OS} = I_O \Big|_{U_O = 0}.$$



Кратак спој на излазу извора напона доводи до преоптерећења (које може проузроковати оштећење) и нерегуларног рада стабилизатора. Због тога се вредност излазне отпорности у радним условима одређује као нагиб I - U карактеристике извора у његовој радној области.

Експериментално се излазна отпорност одређује као количник промене излазног напона, ΔU_O , и одговарајуће промене излазне струје, ΔI_O , настале услед промене отпорности оптерећења које извор напаја:

$$r = \left| \frac{\Delta U_O}{\Delta I_O} \right|_{U = const}.$$



У електронским колима извор напона се не користи само да би снабдео енергијом остале елементе кола, већ и да дефинише вредност напона између две тачке електричне мреже (односно струје у некој њеној грани) независно од вредности осталих величина у колу у којем се налази. Такав елемент представља **извор референтног напона**. За ову врсту извора напона, енергијска способност, која се исказује кроз највећу дозвољену снагу оптерећења, има, у начелу, мањи значај од својстава као што су тачност, стабилност и сопствени шум.

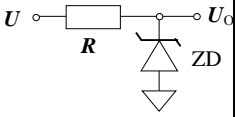
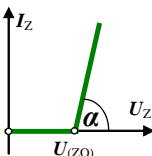
Вредност излазног напона може да представља одређену функцију времена. Такав генератор представља извор сигнала изабраног (задатог) таласног облика. У том случају значајан показатељ перформанси је сачинилац изобличења таласног облика, који треба да буде што је могуће мањи.

5.2. ПАРАЛЕЛНИ СТАБИЛИЗАТОРИ

1. На слици је приказан стабилизатор напона остварен помоћу Ценер-диоде чија се линеаризована карактеристика може представити приказаним дијаграмом.

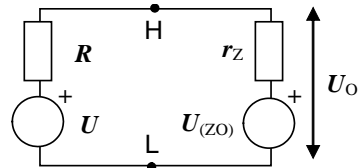
a) Одредити општи израз за излазну отпорност овог стабилизатора.

б) Одредити сачинилац осетљивости излазног напона U_O у доносу на промене улазног (нестабилног) напона U .

РЕШЕЊЕ

Под претпоставком да се Ценер-диоде налази у стању инверзног пробоја ($U > U_{(ZO)}$), неоптерећен стабилизатор се може представити еквивалентним колом приказаним на слици.



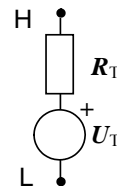
Отпорност r_Z представља динамичку отпорност која је одређена нагибом $I_Z(U_Z)$ карактеристике Ценер-диоде у области инверзног пробоја:

$$r_Z = \left. \frac{\partial U_Z}{\partial I_Z} \right|_{U_Z > U_{(ZO)}} = \text{ctg } \alpha.$$

a)

Применом Тевененове теореме посматрани стабилизатор може да се представи као несавршени извор напона U_T :

$$U_T = \frac{R}{R + r_Z} U_{(ZO)} + \frac{r_Z}{R + r_Z} U \quad (1)$$



чија је унутрашња отпорност једнака:

$$R_T = r_Z \parallel R = \frac{r_Z R}{R + r_Z}.$$

Величина R_T представља излазну отпорност регулатора напона оствареног применом Ценер-диоде:

$$r = \frac{r_Z R}{R + r_Z} \cong r_Z.$$

б) Сачинилац осетљивости излазног напона U_O у односу на промене улазног (нестабилног) напона U одређен је парцијалним изводом:

$$S_U = \frac{\partial U_O}{\partial U}.$$

На основу једначине (1), сачинилац осетљивости излазног напона U_O на промене улазног напона U , за неоптерећен стабилизатор, једнак је:

$$S_U = \frac{\partial U_T}{\partial U} = \frac{r_Z}{R + r_Z}.$$

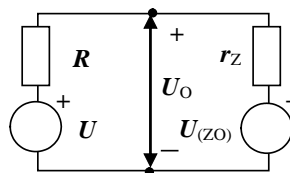
Осетљивост на промене улазног напона приближно је једнака односу отпорности r_Z и R .

$$S_U \cong \frac{r_Z}{R}, r_Z \ll R.$$

НАПОМЕНА

Осетљивост на промене улазног напона се може одредити непосредно, на основу полазне еквивалентне шеме кола стабилизатора.

При промени улазног напона U , промена излазног напона U_O резултат је промене пада напона на отпорнику r_Z , до које долази услед промене струје кроз Ценер-диоду:

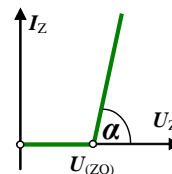
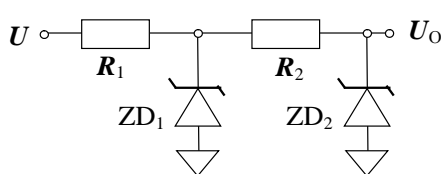


$$\Delta U_O = \Delta I \cdot r_Z = \frac{\Delta U}{R + r_Z} r_Z.$$

На основу закључка следи

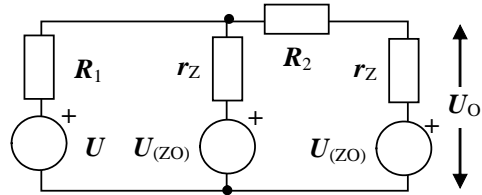
$$S_U = \frac{\Delta U_O}{\Delta U} = \frac{r_Z}{R + r_Z}.$$

2. На слици је приказан стабилизатор напона остварен помоћу две Ценер-диоде чија се карактеристика може представити приказаним дијаграмом. Одредити сачинилац осетљивости излазног напона U_O у доносу на промене улазног (нестабилног) напона U_N .



РЕШЕЊЕ

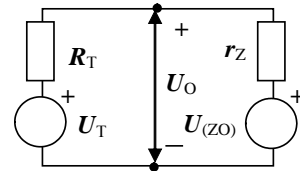
Под претпоставком да се обе Ценер-диоде налазе у стању инверзног пробоја, посматрани стабилизатор се може представити еквивалентним колом приказаним на слици.



Применом Тевененове теореме, еквивалентно коло које садржи две петље, трансформише се у коло које садржи само једну петљу, за које важи:

$$U_T = \frac{R_1}{R_1 + r_Z} U_{(ZO)} + \frac{r_Z}{R_1 + r_Z} U,$$

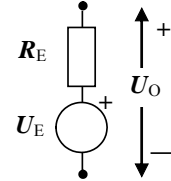
$$R_T = R_1 \parallel r_Z + R_2 = \frac{R_1 r_Z}{R_1 + r_Z} + R_2,$$



Даљом трансформацијом добија се:

$$U_E = \frac{R_T}{R_T + r_Z} U_{(ZO)} + \frac{r_Z}{R_T + r_Z} U_T,$$

$$R_E = R_T \parallel r_Z = \frac{R_T r_Z}{R_T + r_Z}$$



Ако се карактеристика стабилизатора $U_O(U)$ посматра као сложена функција $U_O\{U_E[U_T(U)]\}$, осетљивост излазног напона U_O на промене улазног напона U_N може се одредити применом формуле:

$$S_U = \frac{\partial U_O}{\partial U} = \frac{\partial U_O}{\partial U_E} \frac{\partial U_E}{\partial U_T} \frac{\partial U_T}{\partial U}.$$

За неоптерећен стабилизатор ($U_O = U_E$), важи:

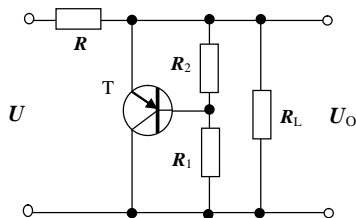
$$S_U = \frac{\partial U_E}{\partial U_T} \frac{\partial U_T}{\partial U} = \frac{r_Z}{R_T + r_Z} \frac{r_Z}{R_1 + r_Z}. \text{ Осетљивост на промене улазног напона}$$

$$\frac{\partial U_E}{\partial U_T} = \frac{r_Z}{R_T + r_Z}, \quad \frac{\partial U_T}{\partial U} = \frac{r_Z}{R_1 + r_Z}.$$

$$S_U \cong \frac{r_Z^2}{R_1 R_2} = S_{U1} S_{U2}.$$

Редном везом стабилизатора са Ценер-диодом смањује се осетљивост излазног напона на промене напона на његовом улазу.

3. Под претпоставком да се у колу, приказаном на слици, транзистор налази у проводном стању, као и да се струја базе и инверзна струја колекторског споја могу занемарити у односу на остале струје у колу, одредити општи израз који описује зависност напона U_O од вредности улазног напона U ($U \geq 0$)



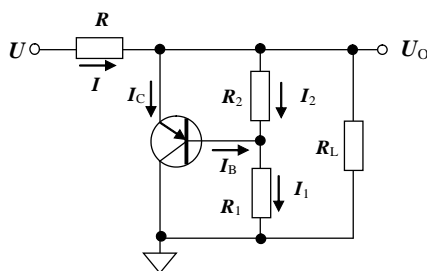
РЕШЕЊЕ

Ако је транзистор у проводном стању, за усвојене ознаке и референтне смерове напона и струја у колу, приказане на слици, важе следеће једначине:

$$U_O = R_1 I_1 + R_2 I_2,$$

$$I_1 = I_2 + I_B,$$

$$U_{EB} + R_2 I_2 = 0.$$



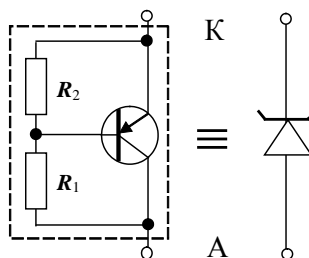
Према предпоставци, струја базе, I_B , може да се занемари у односу на струју I_2 :

$$I_2 = I_1 = \frac{U_{BE}}{R_2}.$$

$$U_O = (R_1 + R_2) I_1 = (R_1 + R_2) \frac{U_{BE}}{R_2}.$$

Излазни напон U_O не зависи од вредности улазног напона. Коло приказано на слици, делује као Ценер-диода чији се напон инверзног пробоја може подесити односом отпорности R_1 и R_2 :

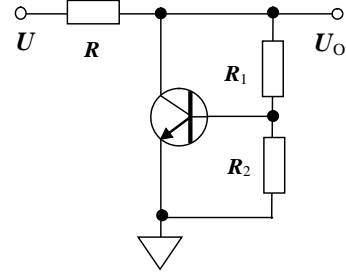
$$U_Z = U_{BE} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$



Ако се струја базе транзистора не може занемарити, вредност излазног напона U_O одређена је изразом:

$$U_O = (R_1 + R_2) \frac{U_{BE}}{R_2} + R_1 I_B.$$

4. Под претпоставком да се у колу, приказаном на слици, струја базе и инверзна струја колекторског споја транзистора могу занемарити у односу на остале струје у колу:
- одредити општи израз који описује зависност напона U_O од вредности улазног напона U ($U \geq 0$).
 - нацртати линеаризовану карактеристику преноса $U_O(U)$.

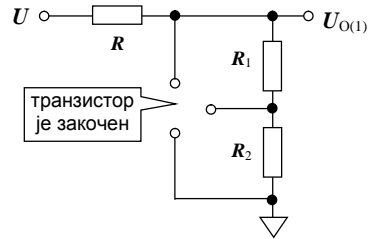


РЕШЕЊЕ

а) Могућа су два стања у посматраном 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, транзистор је у проводном стању.

□ Када је транзистор закочен, посматрано коло представља пасивни делитељ напона који образују отпорници R_1 , R_2 и R :

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



□ При довољно великим позитивним вредностима напона U , када је транзистор у проводном стању, за усвојене ознаке и референтне смерове напона и струја у колу, приказане на слици, важе једначине:

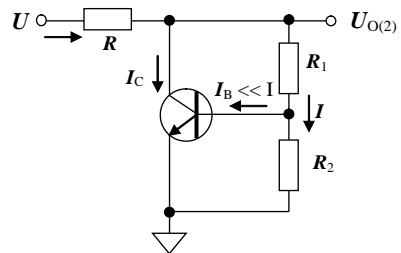
$$U_{O(2)} = (R_1 + R_2)I, \text{ и}$$

$$U_{BE} = R_2 I,$$

на основу којих следи:

$$I = \frac{U_{BE}}{R_2},$$

$$U_{O(2)} = (R_1 + R_2)I = (R_1 + R_2) \frac{U_{BE}}{R_2}.$$



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

$$U_{O(2)} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_{BE}. \quad (2)$$

Посматрано коло делује као регулатор напона који не дозвољава да вредност излазног напона буде већа од вредности $U_{O(2)}$, која се може подесити односом отпорности R_1 и R_2 .

Једначине (1) и (2) одређују два праволинијска сегмента статичке карактеристике $U_O(U)$ посматраног кола. Напон U_K , којим је одређена преломна тачка (колена) линеаризоване карактеристике¹⁰ израчунава се на основу једначине:

$U_{O(1)}(U_K) = U_{O(2)}$, одакле следи:

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

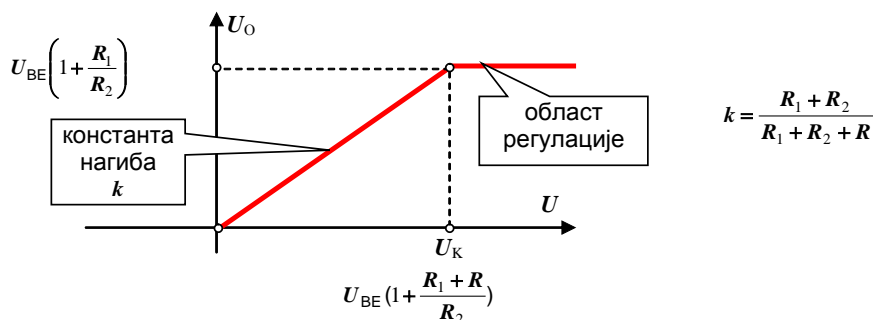
$$U_K = U_{BE} \frac{R_1 + R_2 + R}{R_2} = U_{BE} \left(1 + \frac{R_1 + R}{R_2}\right).$$

Линеаризована карактеристика преноса посматраног кола одређена је изразима:

$$U_O = \begin{cases} \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R} U & \text{за } U \leq U_K \\ U_{BE} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) & \text{за } U > U_K \end{cases}, \quad U_K = U_{BE} \left(1 + \frac{R_1 + R}{R_2}\right).$$

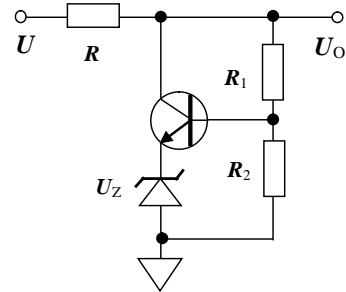
б) Графички приказ линеаризоване карактеристике преноса, $U_O(U)$ дат је на слици. Константа нагиба у почетном делу карактеристике једнака је:

$$k = \frac{U_{O1}}{U} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R}.$$



¹⁰ Напон U_K представља вредност улазног напона при којој радна тачка транзистора прелази из области закочења у активну област.

5. У колу, приказаном на слици, примењен је транзистор чија се инверзна струја колекторског споја може занемарити у односу на остале струје у колу.
- а) Одредити општи израз који описује зависност напона U_O од вредности улазног напона U ($U \geq 0$) и напона пробоја Ценер-диоде U_Z .
- б) Нацртати линеаризовану карактеристику преноса $U_O(U)$, 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.



РЕШЕЊЕ

а) Могућа су два стања у посматраном 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, транзистор је у проводном стању, а Ценер-диода се налази у стању инверзног пробоја.

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

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

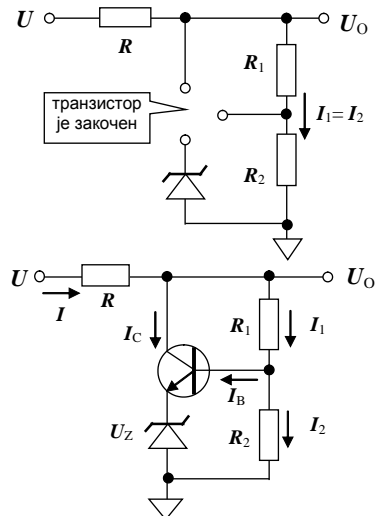
□ При довољно великим позитивним вредностима напона U , када је транзистор у проводном стању, а Ценер-диода се налази у стању инверзног пробоја, за усвојене ознаке и референтне смерове напона и струја у колу, приказане на слици, важе следеће једначине:

$$U_{O(2)} = R_1 I_1 + R_2 I_2,$$

$$U_Z + U_{BE} - R_2 I_2 = 0, \text{ и}$$

$I_1 = I_2 + I_B$, на основу којих следи:

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



$$U_{O(2)} = (R_1 + R_2)I_2 + R_1I_B = (R_1 + R_2) \frac{U_Z + U_{BE}}{R_2} + R_1I_B.$$

Вредност струје базе I_B одређена је вредношћу колекторске струје I_C потребне да буде остварен услов:

$$U_{O(2)} = U - R(I_1 + I_C)$$

Вредност улазног напона, U_K , при којој се радна тачка транзистора налази на граници области закочења и активне области, израчунава се на основу једначине:

$$U_{O(1)}(U_K) = U_{O(2)}, \text{ одакле следи:}$$

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R} U_K = (U_Z + U_{BE}) \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + R_1I_B, \text{ односно:}$$

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

Ако је појачање струје од базе до колектора довољно велико, да се струја базе може занемарити у односу на остале струје у колу, линеаризована карактеристика преноса посматраног кола одређена је изразима:

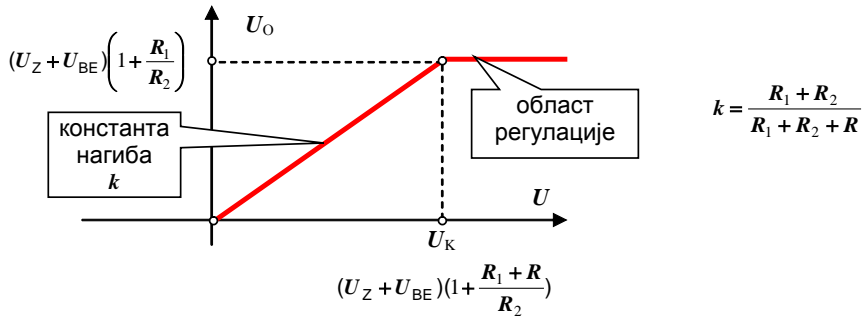
$$U_O = \begin{cases} \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R} U & \text{за } U \leq U_K \\ (U_Z + U_{BE}) \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) & \text{за } U > U_K \end{cases}$$

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

Избором Ценер-диоде са позитивним температурским коефицијентом може се постићи компензација зависности напона U_{BE} од температуре.

б) Графички приказ линеаризоване карактеристике преноса, $U_O(U)$ дат је на слици. Константа нагиба у почетном делу карактеристике једнака је:

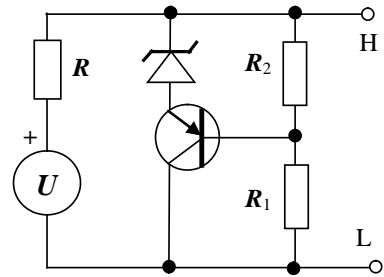
$$k = \frac{U_{O1}}{U} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R}.$$



6. У колу, приказаном на слици, примењен је силицијумски транзистор за који се може сматрати да је инверзна струја колекторског споја једнака нули, као и да је појачање струје од базе до колектора довољно велико да се струја базе занемарити у односу на остале струје у колу.

За задате вредности: $U = 20 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, ако је напон пробоја Ценер-диоде, U_Z , једнак $5,6 \text{ V}$; одредити:

- вредност излазног напона U_{HL} ;
- вредност струје кроз Ценер-диоду.



РЕШЕЊЕ

Под претпоставком да је транзистор у проводном стању, а Ценер-диода се налази у стању инверзног пробоја, за усвојене ознаке и референтне смерове напона и струја у колу, приказане на слици, важе следеће једначине:

$$U_{\text{HB}} = R_2 I_2 = U_Z + U_{\text{EB}},$$

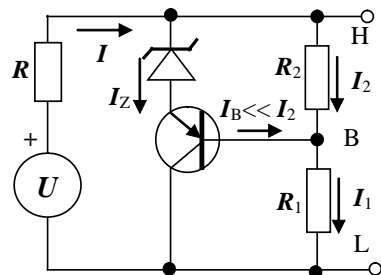
$$U_{\text{HL}} = R_1 I_1 + R_2 I_2, \text{ и}$$

$$I_2 = I_1.$$

на основу којих следи:

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

$$U_{\text{HL}} = (R_1 + R_2) I_2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) (U_Z + U_{\text{EB}}).$$



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

$$U_{EB} \cong 0,6 \text{ V}$$

За задате бројне вредности је:

$$U_{HL} = 2(5,6 + 0,6) \text{ V} = 12,4 \text{ V}$$

Транзистор је проводном стању, ако је струја кроз Ценер-диоду већа од нуле:

$$I_Z = I - I_2 > 0,$$

односно, ако је испуњен услов $I > I_2$. Полазећи од неједначине:

$$\frac{U - U_{AC}}{R} > \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2}.$$

сређивањем се добија потребан услов да посматрано коло делује као стабилизатор напона:

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

ПРОВЕРА

За задате бројне вредности је $U_K = 13,02 \text{ V}$. Полазна претпоставка да је при напону $U = 20 \text{ V}$ и задатим вредностима параметара у колу транзистор у проводном стању, била је тачна.

б) За посматрано коло и задате бројне вредности важи:

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

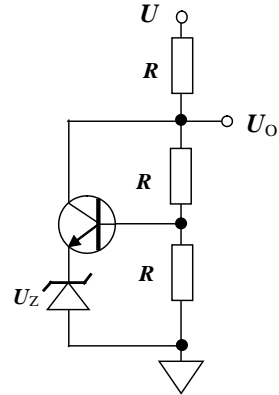
$$I_1 = I_2 = \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2} = 0,62 \text{ mA}.$$

$$I_Z = I - I_2 = I_C.$$

$$I_Z(20\text{V}) = 6,98 \text{ mA}.$$

7. У колу, приказаном на слици, примењен је транзистор, чија се инверзна струја колекторског споја може занемарити у односу на остале струје у колу.

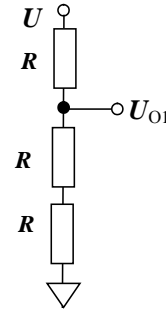
- a) Одредити општи израз који описује зависност напона U_O од вредности улазног напона U ($U \geq 0$) и напона пробоја Ценер-диоде U_Z .
- б) Под претпоставком да је појачање струје од базе до колектора примењеног транзистора довољно велико, да се струја базе може занемарити у односу на остале струје у колу, нацртати карактеристику преноса $U_O(U)$.



РЕШЕЊЕ

a) При малим вредностима улазног напона U транзистор је закочен, струја базе и струја колектора су занемарљиво мале:

$$U_{O1} = \frac{2}{3}U. \quad (1)$$



Када је транзистор у проводном стању, а Ценер-диода у стању инверзног пробоја, за усвојене ознаке и референтне смерове напона и струја у колу, приказане на слици, важе следеће једначине:

$$U_{O2} = R(I_1 + I_2),$$

$$U_Z + U_{BE} - RI_2 = 0, \text{ и}$$

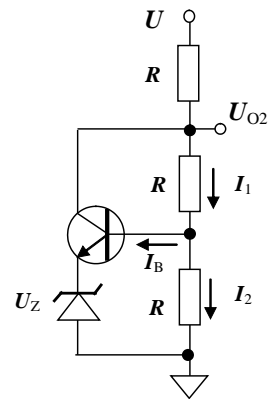
$$I_1 = I_2 + I_B,$$

на основу којих следи:

$$I_2 = \frac{U_Z + U_{BE}}{R},$$

$$U_{O2} = 2RI_2 + RI_B = 2R \frac{U_Z + U_{BE}}{R} + RI_B, \text{ односно:}$$

$$U_{O2} = 2(U_Z + U_{BE}) + RI_B. \quad (2)$$



Напон U_K , који представља граничну вредност на преласку из области којој одговара једначина (1) у област којој одговара једначина (2), одређен је условом:

$$U_{O1}(U_K) = U_{O2}, \text{ односно:}$$

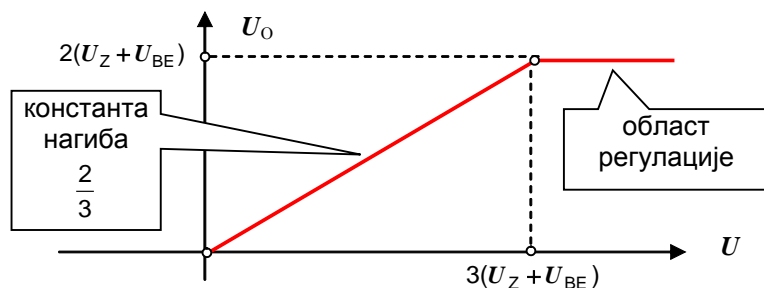
$$\frac{2}{3}U_K = 2(U_Z + U_{BE}) + RI_B.$$

$$U_O = \begin{cases} \frac{2}{3}U & \text{за } U \leq U_K \\ 2(U_Z + U_{BE}) + RI_B & \text{за } U > U_K \end{cases}, \quad U_K = 3(U_Z + U_{BE}) + \frac{3}{2}RI_B$$

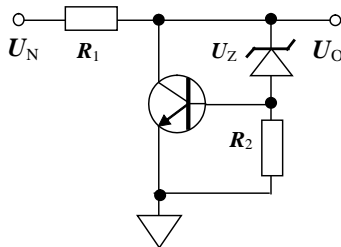
б) Када се струја базе занемари важи:

$$U_O = \begin{cases} \frac{2}{3}U & \text{за } U \leq 3(U_Z + U_{BE}) \\ 2(U_Z + U_{BE}) & \text{за } U > 3(U_Z + U_{BE}) \end{cases}$$

Графички приказ карактеристике преноса, $U_O(U)$, дат је на слици.



8. У колу, приказаном на слици, примењен је силицијумски транзистор великог појачања. Одредити (приближну) вредност излазног напона ако су познате вредности: $U_N = 15 \text{ V}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 120 \Omega$, $U_Z = 6,2 \text{ V}$

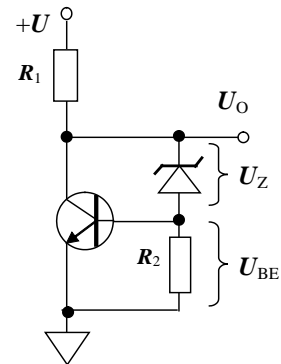


РЕШЕЊЕ

Излазни напон је једнак:

$$U_O = U_Z + U_{BE}$$

Пошто је у питању силицијумски транзистор, може се усвојити да је пад напона база-емитор једнак 0,6 V, на основу чега следи да је излазни напон U_O приближно једнак 6,8 V.



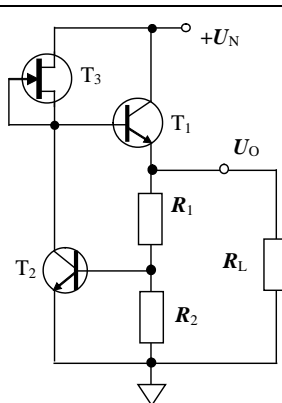
НАПОМЕНА

Приказано коло се одликује малом осетљивошћу на промене нестабилног напона напајања. Промена напона U_N одражавају се превасходно на промену струје кроз транзистор. Одговарајућа промена напона база-емитор је мала, па је струја кроз Ценер-диоду практично константна, што значи да се и напон U_Z мало мења са променама струје кроз транзистор, без обзира на њихов узрок.

Температурски коефицијент Ценер-диоде чији је напон пробоја једнак 6,2 V је позитиван а по величини приближно једнак температурском коефицијенту напона база-емитор. Захваљујући компензационом ефекту, ово коло се одликује и добром температурском стабилношћу.

5.3. РЕДНИ СТАБИЛИЗАТОРИ

9. На слици је приказано коло за стабилизацију позитивног једносмерног напона које омогућује подешавање вредности излазног напона којим се напаја потрошач R_L . Објаснити принцип рада и одредити општи израз за вредност излазног напона.



РЕШЕЊЕ

Транзистор T_1 представља регулациони елемент преко којег се потрошач R_L напаја струјом из извора нестабилног напона U_N . Струју базе транзистора T_1 обезбеђује $JFET$ T_3 који делује као извор сталне струје. Отпорници R_1 и R_2 образују делитељ напона, преко којег се излазни напон, U_O , доводи на базу транзистора T_2 . Повезивањем колектора транзистора T_2 са базом транзистора T_1 у колу је успостављена негативна повратна спрега. Уколико се, на пример, излазни напон U_O из неког разлога повећа, повећаће се напон база-емитор транзистора T_2 , а тиме и његова колекторска струја. Струја базе транзистора T_1 се смањује, због чега се смањује и његова емиторска струја. То има за последицу смањење излазног напона.

Математички модел овог система чине једначине:

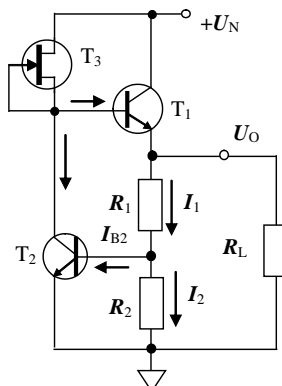
$$U_O = U_{BE2} + R_1 I_1,$$

$$I_1 = I_{B2} + I_2 \text{ и}$$

$$U_{BE2} = R_2 I_2,$$

на основу којих следи:

$$U_O = U_{BE2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + R_2 I_{B2}.$$



10. Нацртати основно коло за стабилизацију позитивног напона остварено са Ценер-диодом и једним биполарним транзистором. Објаснити принцип рада. Написати израз за вредност излазног напона под претпоставком да је унутрашња динамичка отпорност Ценер-диоде занемарљиво мала. Написати израз којим је одређен минимални регулациони пад напона (*dropout voltage* - U_{DO}).

РЕШЕЊЕ

Стабилизатор позитивног напона остварен помоћу Ценер-диоде, и биполарног *NPN* транзистора приказан је на слици. Отпорник R_L представља променљиво оптерећење које стабилизатор напаја.

Отпорник R_Z и Ценер-диода образују извор референтног напона. Транзистор делује као неинвертујући јединични појачавач (емитор-фоловер) који снабдева енергијом потрошач прикључен на његов емитор, "узимајући" струју из извора нестабилног напона U_N .

Транзистор раздваја извор референтног напона од потрошача. Промене струје I_Z , које настају услед промене оптерећења (односно услед промене струје I_O), смањене су сразмерно вредности појачања струје од базе до емитора транзистора:

$$\Delta i_Z = \Delta i_B = \frac{\Delta i_E}{1 + \beta} = \frac{\Delta i_O}{1 + \beta}.$$

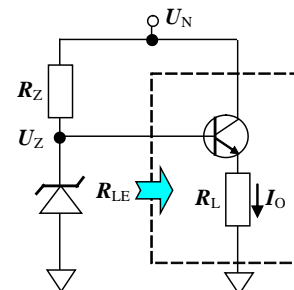
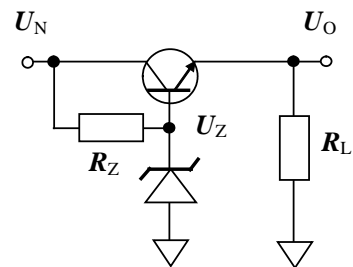
То значи да је осетљивост излазног напона U_O на промене отпорности оптерећења R_L знатно мања у поређењу са стабилизатором који је остварен само помоћу Ценер-диоде. Захваљујући транзистору, који има улогу појачавача струје, извор напона U_Z "види" оптерећење R_{LE} чија је отпорност вишеструко већа од отпорности R_L стварног оптерећења.

$$R_{LE} = (1 + \beta)R_L.$$

Промена струје кроз Ценер-диоду је много мања од промене струје коју извор даје. Самим тим, промена референтног напона U_Z је много мања него у колу без транзистора.

Напон инверзног пробоја (Ценеров напон U_Z) одређује вредност излазног напона.

$$U_O = U_Z - U_{BE}.$$



Зависност излазног напона од оптерећења основног кола стабилизатора, реализованог са пасивним резистивним елементом као ограничавачем напона, смањује се додавањем биполарног транзистора као појачавача струје.

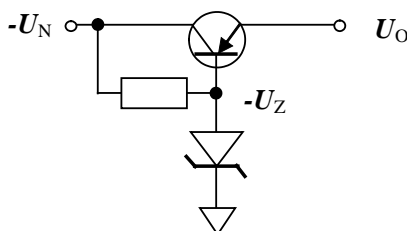
Да би транзистор могао да обавља функцију регулационог елемента напон U_{CE} мора бити већи од напона U_{BE} :

$$\min U_{DO} = \min(U_N - U_O) > U_{BE}.$$

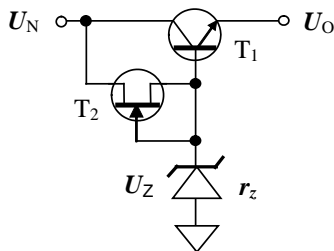
11. Нацртати коло за стабилизацију негативног једносмерног напона са Ценер-диодом и биполарним транзистором. Написати израз за вредност излазног напона, под претпоставком да је унутрашња динамичка отпорност Ценер-диоде занемарљиво мала.

РЕШЕЊЕ

$$U_O = -U_Z + U_{EB}$$



12. Одредити општи израз за излазну отпорност стабилизатора напона приказаног на слици.



РЕШЕЊЕ

Посматрано коло састоји се од извора референтног напона U_Z и транзистора у споју са заједничким колектором у улози снажног појачавача (*power amplifier*) који на свом излазу даје стаалан напон U_O :

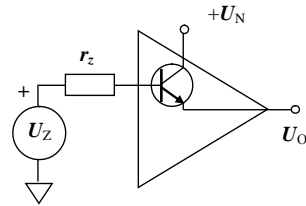
$$U_O = U_Z - U_{BE},$$

снабдевајући притом потрошач струјом из извора нестабилног напона U_N .

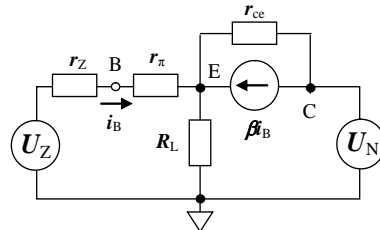
Извор референтног напона је остварен помоћу Ценер-диоде и транзистора са ефектом поља који делује као извор сталне струје. Може се сматрати да је излазна отпорност извора напона једнака је динамичкој отпорности Ценер-диоде у области инверзног пробоја, r_z .

Транзистор представља одвојни појачавач (бафер) који раздваја извор референтног напона од потрошача.

Излазна отпорност овог стабилизатора, R_O , једнака је излазној отпорности појачавача са биполарним транзистором у споју са заједничким колектором.

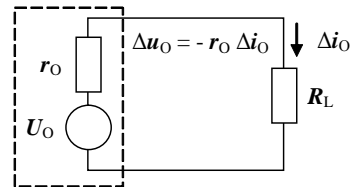


Када се инверзна струја колекторског споја занемари, еквивалентно коло посматраног стабилизатора приказано је на слици. Поступак анализе описан је у поглављу о биполарним транзисторима.



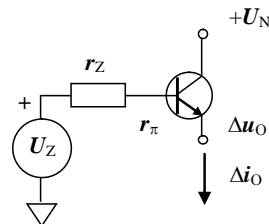
Вредност динамичке излазне отпорности, r_o , може да се одреди на основу поједностављене анализе која се засноване на следећем разматрању.

Ако се отпорност оптерећења извора напона промени тако да се излазна струја, на пример, повећа за Δi_O , напон на излазу стабилизатора чија је излазна отпорност једнака r_o промениће се за вредност једнаку $-r_o \Delta i_O$.



$$r_o = -\frac{\Delta u_O}{\Delta i_O} \quad (1)$$

У посматраном стабилизатору промена излазног напона Δu_O настаје као резултат промене струје базе. Повећање струје базе Δi_B , као резултат промене струје емитора ($\Delta i_E = \Delta i_O$) доводи до промене пада напона на динамичкој отпорности Ценер диоде, r_z , и динамичкој отпорности споја база-емитор, r_π .



$$\Delta u_O = -(r_z + r_\pi) \Delta i_B = -(r_z + r_\pi) \frac{\Delta i_E}{1 + \beta} = -(r_z + r_\pi) \frac{\Delta i_O}{1 + \beta}.$$

На основу једначине (1) следи израз за вредност излазне отпорности

$$R_O = \frac{r_Z + r_\pi}{1 + \beta},$$

где је:

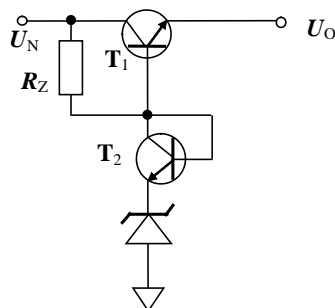
- r_Z динамичка отпорност Ценер-диоде у области инверзног пробоја (која у овом случају представља унутрашњу отпорност извора референтног напона;
- r_π отпорност споја емитор-база;
- β појачање струје од базе до колектора (h_{FE});

Излазна отпорност стабилизатора са транзистором је вишеструко мања од излазне отпорности пасивног стабилизатора, који садржи само Ценер-диоду.

13. Нацртати извор позитивног референтног напона са Ценер-диодом и биполарним транзистором, код којег је остварена компензација утицаја температуре на вредност напона база-емитор регулационог транзистора.

$$U_O = U_Z + U_{BE2} - U_{BE1}.$$

Температурске промене напона U_{BE2} компензују температурске промене напона U_{BE1} .



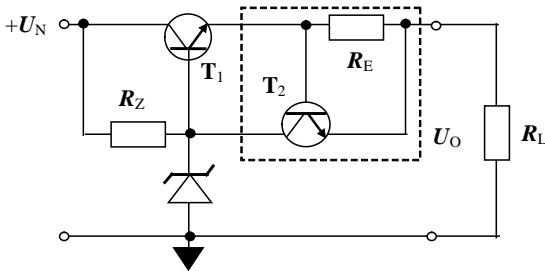
14. Нацртати принципску електричну шему кола за заштиту стабилизатора од кратког споја на излазу. Написати израз за максималну вредност излазне струје.

РЕШЕЊЕ

Принципска електрична шема кола које ограничава вредност излазне струје приказана је на слици. Транзистор T_1 има улогу регулационог елемента

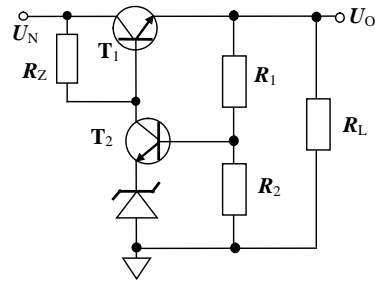
стабилизатора. Помоћу отпорника R_E мери се вредност излазне струје. Транзистор T_2 има улогу компаратора којим се детектује да је излазна струја порасла до задате граничне вредности. Принцип рада је следећи.

У одсуству преоптерећења транзистор T_2 је закочен. Ако пад напона који на отпорнику R_E ствара излазна струја достигне праг вођења, U_{BE2T} , транзистор T_2 постаје проводан. У колу се успоставља повратна спрега која онемогућује даље повећање излазне струје.



$$\max I_O \cong \frac{U_{BE2T}}{R_E}$$

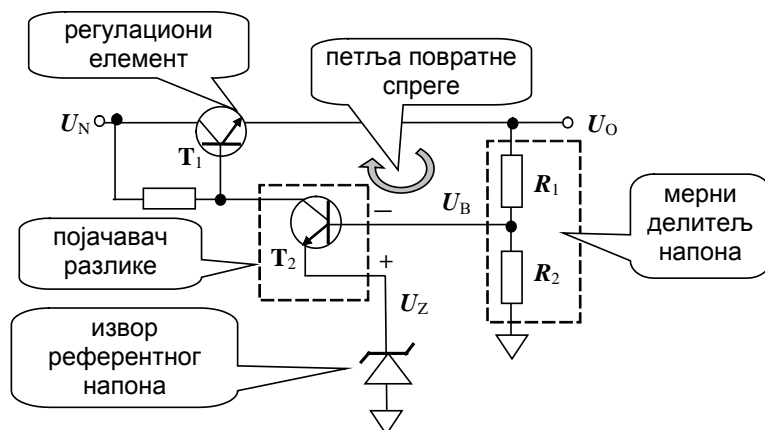
15. На слици је приказан стабилизатор позитивног једносмерног напона који омогућује подешавање вредности излазног напона. Објаснити принцип рада и одредити општи израз за вредност излазног напона.



РЕШЕЊЕ

Посматрано коло представља систем са негативном повратном спрегом. Отпорници R_1 и R_2 образују делитељ напона, преко којег се излазни напон, U_O , доводи на бази транзистора T_2 који има улогу појачавача разлике излазног напона и референтног напона који дефинише Ценер-диода. Излаз овог појачавача прикључен је на базу транзистора T_1 који има улогу регулационог елемента.

Вредност излазног напона U_O се задаје (подешава) односом отпорности R_1 и R_2 .



Математички модел овог система чине једначине:

$$U_B = U_Z + U_{BE2},$$

$$U_O = U_B + R_1 I_1,$$

$$I_1 = I_B + I_2 \text{ и}$$

$$I_2 = \frac{U_B}{R_2},$$

на основу којих следи:

$$U_O = (U_Z + U_{BE2}) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + R_2 I_{B2}. \quad (1)$$

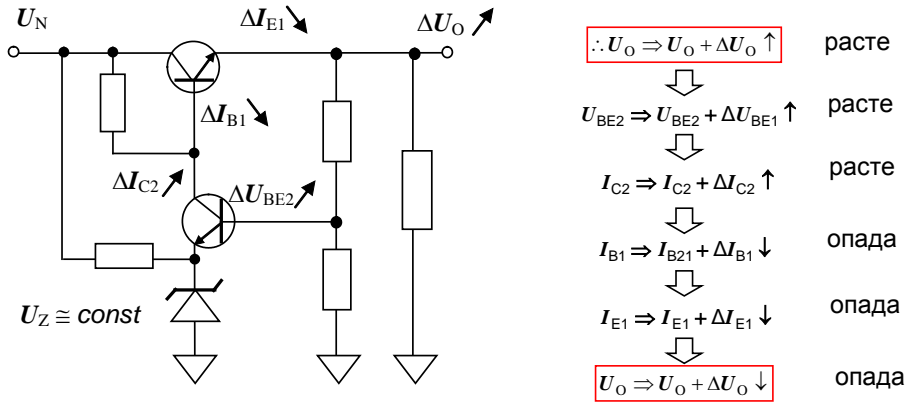
Под претпоставком да су у колу примењени транзистори чије је појачање струје од базе до колектора довољно велико да се струја базе транзистора може занемарити:

$$U_O \cong (U_Z + U_{BE2}) \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right).$$

Овакво стање у колу је стабилно, независно од вредности напона напајања U_N и/или отпорности оптерећења R_L . Уколико, због спољашњег деловања, дође до промене излазног напона у односу на вредност одређену претходним изразом, негативна повратна спрега делује тако да ту промену поништи.

Ако, на пример, због наглог повећања отпорности оптерећења R_L , излазни напон U_O у тренутку порасте, ова промена довешће до повећавања напона на бази транзистора T_2 . То доводи до повећања струје базе овог транзистора, а тиме и до повећања струје колектора I_{C2} . Због тога се смањује

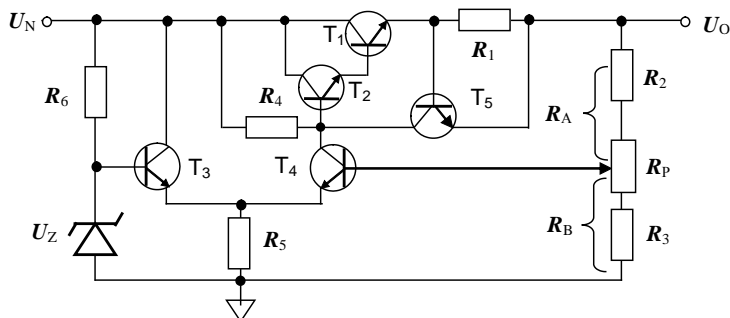
струја базе транзистора T_1 , што доводи до смањења излазне струје. Равнотежно стање овог система је стање у којем важи једначина (1).



16. Нацртати подесиви стабилизатор позитивног напона са заштитом од кратког споја на излазу. Објаснити принцип рада и одредити израз за вредност излазног напона.

РЕШЕЊЕ

Електрична шема стабилизатора је приказана на слици. У приказаном систему постоје две петље повратне спреге: главна повратна спрега обезбеђује стабилизацију излазног напона U_O . Додатна повратна спрега обезбеђује ограничавање излазне струје са циљем заштите регулационог елемента од прекомерне дисипације.



Транзистори T_1 и T_2 представљају Дарлингтонов пар који има улогу регулационог елемента у колу повратне спреге стабилизатора напона.

Транзистор T_5 омогућује заштиту од кратког споја. Негативна повратна спрега у колу које образују транзистори T_1, T_2 и T_5 ограничава пад напона који излазна струја ствара на отпорнику R_1 .

Транзистори T_4 и T_5 представљају диференцијални појачавач којим се референтна величина (напон који дефинише Ценер-диода) пореди са излазном величином (коју представља напон U_O). На улаз диференцијалног појачавача излазни напон је доведен преко делитеља који образују отпорници R_2, R_3 и потенциометар, чија је отпорност R_P . Тиме је омогућено подешавање вредности U_O .

Ако су напони база-емитор транзистора T_1 и T_2 једнаки, напон на излазу стабилизатора, U_O , одређен је изразом:

$$U_O = (U_Z + U_{BE4}) \left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right) + R_B I_{B4},$$

односно, ако се струја базе транзистора T_4 може занемарити:

$$U_O = (U_Z + U_{BE4}) \left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right).$$

Највећа вредност излазног напона, $max U_O$, једнака је:

$$max U_O = (U_Z + U_{BE4}) \left(1 + \frac{R_2 + R_P}{R_1}\right).$$

Најмања вредност излазног напона, $min U_O$, једнака је:

$$min U_O = (U_Z + U_{BE4}) \left(1 + \frac{R_2}{R_1 + R_P}\right).$$

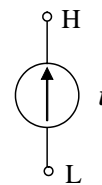
6. ИЗВОРИ СТРУЈЕ

6.1. ТЕОРИЈСКА ОСНОВА

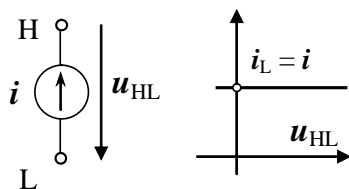
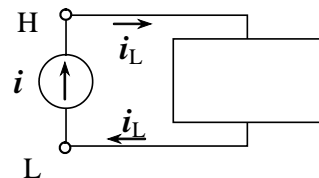
Извор (генератор) струје (*current source*) је активни елемент са једном приступом који електрично коло, у којем се налази, снабдева (напаја) електричном енергијом.

Карактеристичну величину извора струје представља брзина преношења наелектрисања кроз грану у којој се извор налази.

Графички симбол којим се представља извор струје у овој књизи приказан је на слици. Референтни смер струје је назначен стрелицом. У општем случају, струја i може бити променљива у времену.



Струја коју извор даје истиче из прикључка који је означен са H (*high*), пролази кроз спољашње коло и враћа се кроз прикључак L (*low*).

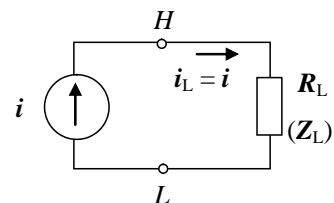


Савршени (идеални) извор струје је активни елемент код којег струја која кроз њега протиче, не зависи од напона u_{HL} између његових прикључака (односно од напона између крајева гране у којој се извор струје налази):

$$\frac{\partial i}{\partial u_{HL}} = 0.$$

Савршени извор струје је такав извор електричне енергије, код којег струја i_L коју даје не зависи од отпорности R_L оптерећења којем се та енергија преноси ($R_L < \infty$):

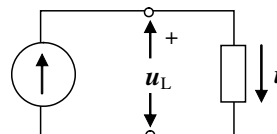
$$\frac{\partial i_L}{\partial R_L} = 0$$



Савршени извор струје је такав извор електричне енергије, код којег струја коју даје, i_L , не зависи од напона u_L између крајева оптерећења које тај извор напаја енергијом.

Напон је u_L последица деловања струје i_L који даје извор струје. Ако оптерећење представља “чисту” отпорност R_L , важи:

$$u_L = R_L i_L.$$

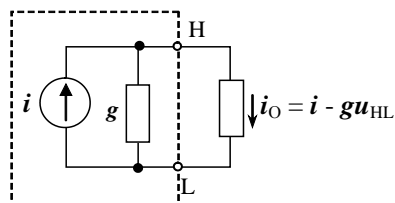


То омогућује да се непозната отпорност R_X одреди мерењем напона U_X који на тој отпорности ствара позната (стална) струја I :

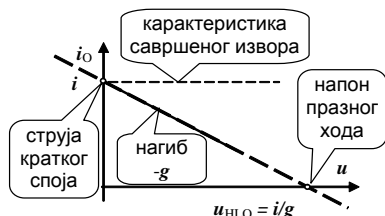
$$R_X = \frac{U_X}{I}.$$

Стварни извори струје су несавршени: струја коју извор даје зависи од напона између крајева извора.

Независни извор струје (*independent current source*) је активни елемент који може да се представи паралелном везом савреног извора струје i , независног од свих струја и напона у колу у којем се налази, и једног пасивног елемента.



Вредност струје i_L коју извор даје, зависи од вредности унутрашње (сопствене) проводности извора, g , и напона између његових крајева, u_{HL} .



Уколико је напон u_{HL} већи, (односно уколико је отпорност оптерећења већа) одступање од “идеалне” вредности i је веће.

Слика 6.2. Независни извор струје

Унутрашња проводност извора, g , одређује нагиб статичке карактеристике извора струје:

$$g = - \frac{\partial i_O}{\partial u_{HL}}.$$

Активни електронски елементи (електронске цеви и транзистори) при одређеним условима делују као извори струје управљани напонам или струјом.

Биполарни транзистор као извор струје

Када се радна тачка којом је представљено стање биполарног спојног транзистора (*BJT*), налази у активној (радној) области, посматран са стране колектора, транзистор делује као извор струје којим се управља преко прикључка за базу. Зависност струје колектора од напона поларизације емиторског споја има експоненцијалан облик:

$$i_C \cong I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}},$$

где је I_S параметар транзистора зависан од његове конструкције.

Биполарни транзистор је несавршен извор струје, јер напон колектор-емитор утиче на вредност струје колектора (Ерлијев ефекат). Ова зависност се моделује величином која представља динамичку излазну проводност транзистора у споју са заједничким емитором, када се радна тачка налази и у нормалној радној (активној) области:

$$g_{CE} = \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} = \frac{1}{r_{CE}} = h_{22e} = h_{oe}.$$

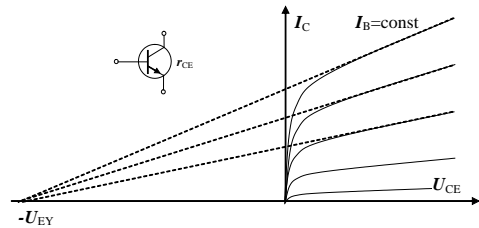
Геометријски, величина g_{CE} представља нагиб статичке карактеристике излаза који је дефинисан изразом:

$$g_{CE} = \left| \frac{i_C}{U_{EY}} \right|,$$

у којем U_{EY} означава величину која се назива Ерлијев напон.

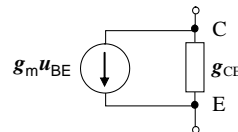
Геометријски, напон U_{EY} одговара тачки у којој екстраполисана карактеристика $I_C(U_{CE})$ сече напонску осу у U_{CE} - I_C равни.

$$I_C(I_B, U_{CE}) \cong I_C(I_B) \left(1 + \frac{U_{CE}}{U_{EY}}\right).$$



Биполарни транзистор је извор струје управљан напонем (*voltage controlled current source – VCCS*).

Ако су промене напона база-емитор мале, биполарни транзистор се може представити као транскондуктансни појачавач (*transconductance amplifier*):



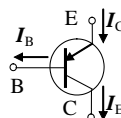
$$A_G = \frac{\partial i_C}{\partial u_{BE}} = g_m = \frac{i_C}{U_T}.$$

Ако се занемари инверзна струја засићења колекторског споја, биполарни транзистор делује као извор струје управљан струјом (*current controlled current source –CCCS*). Струја колектора је одређена струјом базе. Када је емиторски спој поларисан у директном, а колекторски у инверзном смеру, однос ових величина се моделује једначином:

$$i_C = \beta i_B + (\beta + 1)I_{CBO},$$

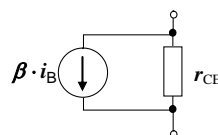
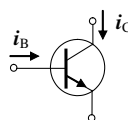
где је β појачање струје од базе до колектора;

$$\beta = \frac{\partial i_C}{\partial i_B} = h_{22e} = h_{fe}$$



а I_{CBO} инверзна струја колекторског споја при $I_E = 0$

Претходне једначине показују да се биполарни транзистор се може посматрати као линеарни појачавач струје (*current amplifier*):



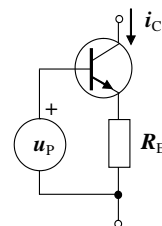
$$A_I = \beta.$$

Ако је појачање струје од базе до колектора транзистора, β , довољно велико, струја колектора је приближно једнака струји емитора:

$$i_C = i_E - i_B \cong i_E.$$

То омогућује да се вредност струје колектора одреди (зада) помоћу вредности напона поларизације базе и отпорности отпорника у колу емитора:

$$i_C \cong i_E = \frac{u_P - U_{BE}}{R_E}.$$

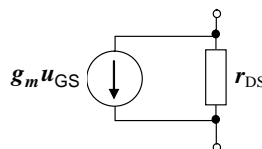
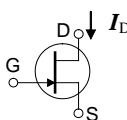


Транзистор са ефектом поља као извор струје

Транзистор са ефектом поља (*FET*), поларисан тако да се његова радна тачка налази у области засићења, делује као извор струје управљан напонам (*VCCS*). Вредност струје кроз канал, I_D , мања је од струје I_{DSS} , а веома мало се мења у зависности од разлике потенцијала на крајевима канала.

Зависност струје I_D од напона између гејта и сорса, U_{GS} , описује се једначином:

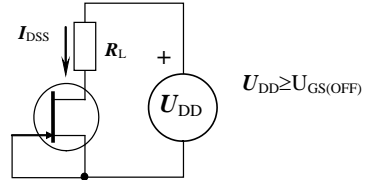
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(OFF)}} \right)^k,$$



где је:

- $U_{GS(OFF)}$ напон прекида (напон прага вођења);
- I_{DSS} струја засићења кад је напон између гејта и сорса једнак нули;
- k константа, одређена геометријом транзистора, чија је вредност између 1,7 до 2,0.

При кратком споју између гејта и сорса, када је напон U_{DS} већи од напона прекида $U_{GS(OFF)}$, струја I_D једнака је струји I_{DSS} , независно од вредности напона U_{DD} односно отпорности оптерећења R_L у контури дрејна.

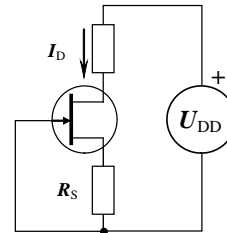


Одговарајућом поларизацијом постиже се да фет делује као извор сталне струје вредности мање од I_{DSS} . Напон U_{GS} , при којем струја засићења фета има жељену вредност једнаку I_D ($I_D \leq I_{DSS}$), израчунава се на основу једначине¹:

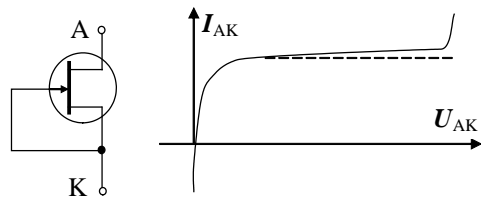
$$U_{GS} = U_{GS(OFF)} \left[1 - \left(\frac{I_D}{I_{DSS}} \right)^{\frac{1}{k}} \right].$$

На основу израчунате вредности напона U_{GS} одређује се вредност отпорника R_S , помоћу којег се остварује жељена поларизација:

$$R_S = - \frac{U_{GS}}{I_D}.$$



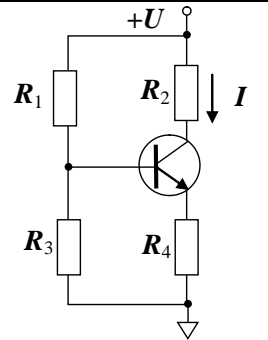
Транзистори са ефектом поља, поларисани тако да у стању засићења пропуштају струју одређене вредности, производе се као диоде за стабилизацију струје (*current regulator diode*). Статичка карактеристика ове врсте елемената приказана је на слици.



¹ -, The FET Constant Current Source, DI71-1, Siliconix, Fet Design Catalog.

6.2. ИЗВОРИ СТАЛНЕ СТРУЈЕ СА БИПОЛАРНИМ ТРАНЗИСТОРИМА

1. Под претпоставком да је појачање струје од базе до колектора транзистора, у колу приказаном на слици, довољно велико, да се струја базе транзистора може занемарити у односу на остале струје у колу, одредити општи израз за вредност струје I ако се радна тачка транзистора налази у активној области.



РЕШЕЊЕ

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

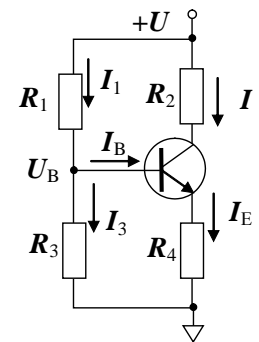
$$I = I_C = I_E - I_B \cong I_E,$$

$$I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_4}$$

$$U_B = \frac{R_3}{R_1 + R_3} U, \quad I_B \ll I_3,$$

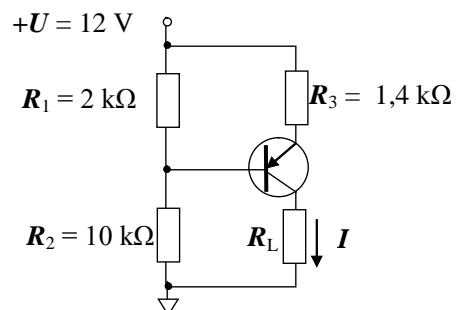
на основу којих следи:

$$I = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \frac{U - U_{BE}}{R_4} \cong \frac{R_3}{R_1 + R_3} \frac{U}{R_4}.$$



2. Коло приказано на слици пројектовано је са циљем да обезбеди сталну струју кроз потрошач са једним уземљеним крајем, R_L . За задате вредности напона и отпорности у колу одредити:

- а) вредност струје I ;
 б) опсег могућих вредности отпорности оптерећења R_L .



РЕШЕЊЕ

У складу са ознакама назначеним на слици и задатим вредностима, а под претпоставком да је појачање струје од базе до колектора довољно велико, да се струја базе транзистора може занемарити у односу на остале струје у посматраном колу, важе следеће једначине:

$$I = I_C = I_E - I_B \cong I_E,$$

$$U - R_3 I_E - U_{EB} = U_B,$$

$$U_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U, \quad I_B \ll I_3,$$

на основу којих следи:

$$I \cong \frac{U \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U_{EB}}{R_3}.$$

Под претпоставком да је употребљен силицијумски транзистор, може се усвојити да је $U_{EB} = 0,6 \text{ V}$. За задате бројне вредности добија се:

$$U_B = 10 \text{ V},$$

$$I \cong 1 \text{ mA}.$$

Отпорност R_L може бити једнака нули. Тада је напон U_{CE} једнак $10,6 \text{ V}$. Са повећењем отпорности, R_L , потенцијал колектора транзистора се повећава. Транзистор делује као извор струје све док се његова радна тачка налази у радној области. Граница између активне области и области zasiћења биполарног транзистора је одређена једначином $U_{BC} = 0$. На основу услова: $U_{BC} \geq 0$, следи:

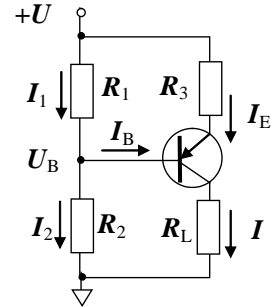
$$U_B - R_L I \geq 0,$$

одакле се добија:

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

За задате вредности је:

$$R_L \leq \frac{U_B}{I} = 10 \text{ k}\Omega.$$



3. 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:

а) одредити општи израз за вредност струје I_5 ако се радне тачке транзистора T_1 и T_2 налазе у активној области;

б) објаснити улогу транзистора T_2 .

РЕШЕЊЕ

а)

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

$$I_5 = I_{C2} \cong I_{E2},$$

$$U_{B1} = U - U_Z,$$

$$U_{B2} = U_{E1} = U_{B1} - U_{BE1},$$

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

$$I_{E2} = \frac{U - U_{E2}}{R_2},$$

на основу којих следи:

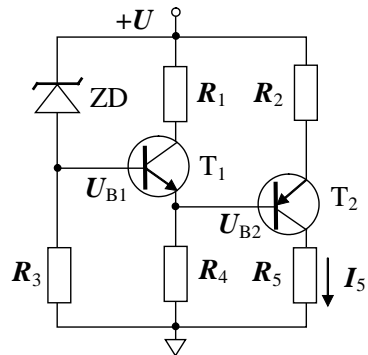
$$I_5 \cong I_{E2} = \frac{U_Z + U_{BE1} - U_{EB2}}{R_2}.$$

в)

Приказано коло представља извор сталне струје, у којем је, помоћу транзистора T_1 , смањен утицај промена напона емитор-база излазног транзистора T_2 , које настају услед промена температуре околине.

Ако се напони емитор-база транзистора T_1 и T_2 могу сматрати једнаким:

$$U_{E2} \cong U - U_Z,$$

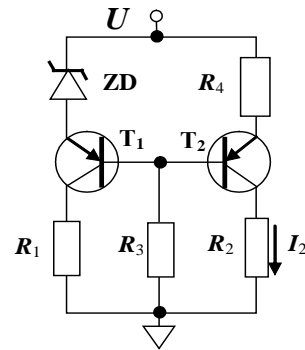


следи:

$$I_2 \cong \frac{U_Z}{R_4}.$$

4. 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 струју емитора и струју колектора:

- а) одредити општи израз којим је одређена вредност струје I_2 , кроз отпорник R_2 ;
- б) одредити потребан услов у погледу односа вредности напона U и вредности параметара елемената у посматраном колу, да струја I_2 не зависи од вредности отпорности R_2 .



РЕШЕЊЕ

а)

За посматрано коло важе следеће једначине:

$$I_2 = I_{C2} \cong I_{E2},$$

$$I_{E2} = \frac{U - U_{E2}}{R_4}, \text{ и}$$

$$U_{E2} = U - U_Z - U_{EB1} + U_{EB2},$$

на основу којих следи:

$$I_2 = \frac{U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}}{R_4}.$$

в)

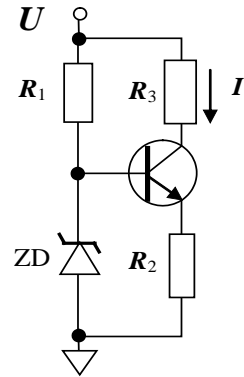
Са повећањем отпорности, R_2 , потенцијал колектора транзистора T_2 се повећава. Његова вредност, међутим, не може бити већа од потенцијала базе транзистора T_1 . На основу услова: $U_{BC} \geq 0$, следи:

$$U_{B2} - U_{C2} = U - U_Z - U_{EB1} - R_2 I_2 \geq 0,$$

одакле се добија:

$$R_2 \leq \frac{U - U_Z - U_{EB1}}{U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}} R_4.$$

5. За коло приказано на слици, под претпоставком да је појачање струје од базе до колектора довољно велико да се струја базе транзистора може занемарити у односу на остале струје у колу:
- одредити општи израз за вредност струје I ако се радна тачка транзистора налази у активној области;
 - одредити потребан услов у погледу односа вредности напона U и вредности параметара елемената у посматраном колу, да струја I не зависи од вредности отпорности R_3 .



РЕШЕЊЕ

а)

У складу са ознакама назначеним на слици, за посматрано коло важи:

$$I = I_C = I_E - I_B \cong I_E,$$

$$I_E = \frac{U_E}{R_2} = \frac{U_Z - U_{BE}}{R_2}, \text{ и}$$

$$U_E = U_Z - U_{BE},$$

одакле следи:

$$I \cong \frac{U_Z - U_{BE}}{R_2}.$$

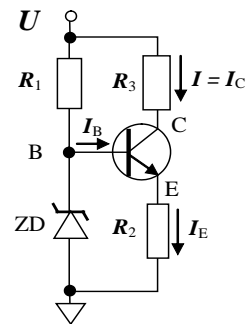
б)

Да би струја колектора била приближно једнака струји емитора, потребно је да се радна тачка транзистора анализи у активној области, односно да spoj база-колектор буде инверзно поларисан. На основу услова:

$$U_C \geq U_B,$$

следи:

$$R_3 \leq \frac{U - U_Z}{U_Z - U_{BE}} R_2.$$



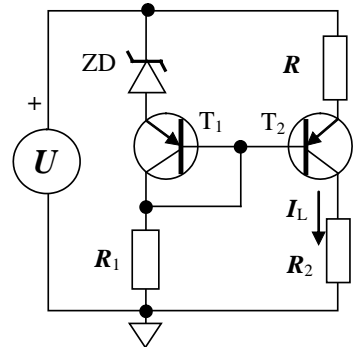
6. За коло приказано на слици, под претпоставком да је појачање струје од базе до колектора транзистора довољно велико да се струја базе може занемарити у односу на остале струје у колу, као и да је напон U знатно већи од радног напона Ценер-диоде у области пробоја U_Z :

а) одредити општи израз којим је одређена вредност струје I_L .

б) 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 V , а све отпорности у колу једнаке $5\text{ k}\Omega$;

в) објаснити функцију транзистора T_1 .

г) одредити потребан услов у погледу односа вредности U , U_Z , U_{BE} , R и R_2 да струја I_L не зависи од вредности отпорности R_2 .



РЕШЕЊЕ

Ако се радне тачке транзистора налазе у активној области, у складу са датим претпоставкама и ознакама назначеним на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

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

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

$$U_{E2} = U_B + U_{EB}, \text{ и}$$

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

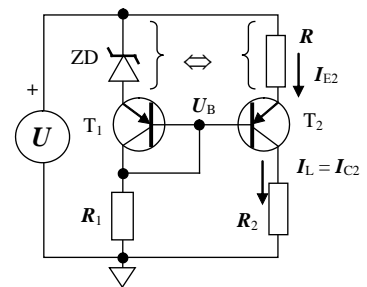
на основу којих следи:

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

б)

За задате вредности параметара добија се:

$$I_L \cong 1\text{ mA}.$$



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 радна тачка транзистора T_2 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 :

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

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_1 . На основу услова;

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

добива се:

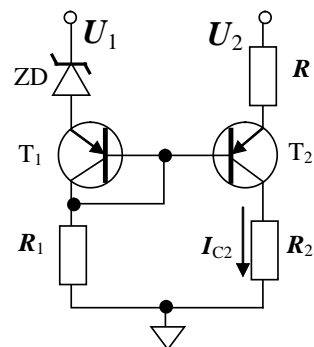
$$U_{BC2} = U_B - U_{C2} = U - U_Z - U_{EB1} - R_2 I_L \geq 0,$$

одакле следи:

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

7. 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:

- одредити општи израз којим је одређена вредност струје I_{C2} .
- одредити потребан услов у погледу односа вредности U_1 , U_2 , U_Z , U_{BE} , R и R_2 да струја I_{C2} не зависи од вредности отпорности R_2 .
- израчунати вредност струје I_{C2} када је $U_1 = U_2 = 15 \text{ V}$, ако су транзистори T_1 и T_2 силицијумски, радни напон Ценер-диоде у области пробоја, U_Z , једнак 5 V , а све отпорности у колу једнаке $1 \text{ k}\Omega$;



РЕШЕЊЕ

а)

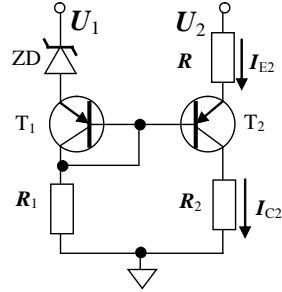
У складу са датим претпоставкама и ознакама назначеним на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

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

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

на основу којих следи:

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



У односу на отпорник R_2 , посматран као оптерећење, када се радна тачка транзистора T_2 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, а транзистори T_1 и T_2 имају једнаке напоне емитор- база, струја I_{C2} зависи само од односа напона Ценер-диоде у стању пробоја, U_Z и отпорности отпорника R :

$$I_{C2} \cong \frac{U_Z}{R}.$$

б)

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:

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

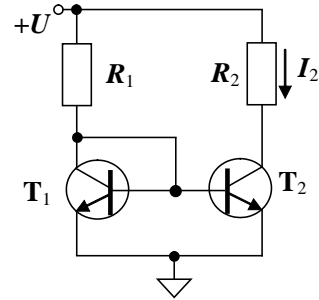
$$R_2 \leq \frac{U_1 - U_Z - U_{EB1}}{U_2 - U_1 + U_Z + U_{EB1} - U_{EB2}} R.$$

в)

За задате вредности $U_1 = U_2 = 15 \text{ V}$, $U_Z = 5 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = R = 1 \text{ k}\Omega$, и усвајајући $U_{BE1} = U_{BE2}$, добија се:

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

8. У колу приказаном на слици познате су вредности отпорности, R_1 и R_2 , напона напајања, U . Транзистори T_1 и T_2 имају познате и међусобно једнаке вредности појачања струје од базе до емитора, β , и напона директне поларизације споја база-емитор, U_{BE} . Одредити општи израз за вредност струје I_2 .



РЕШЕЊЕ

У посматраном колу транзистор T_1 је повезан као диода која одређује напон U_{BE2} између базе и емитора транзистора T_2 :

$$U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE}.$$

Уколико транзистори T_1 и T_2 имају једнака својства:

$$T_1 = T_2 \Rightarrow \begin{cases} I_{B1} = I_{B2} = I_B \\ \beta_1 = \beta_2 = \beta \end{cases},$$

и ако се повратно дејство (реакција) колектора може занемарити, важи:

$$I_{C1}(U_{BE}) = I_{C2}(U_{BE}).$$

На основу претходног разматрања следи:

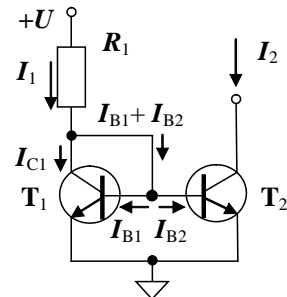
$$I_{C1} \cong \beta_1 I_{B1} = \beta I_B \Rightarrow I_B \cong \frac{I_{C1}}{\beta}.$$

Даљим сређивањем добија се:

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + 2I_B \cong \frac{\beta + 2}{\beta} I_{C1},$$

одакле следи:

$$I_2 = I_{C2} = I_{C1} \cong \frac{\beta}{\beta + 2} I_1$$



Дакле, уколико транзистори T_1 и T_2 имају једнака својства, излазна струја I_2 је приближно једнака струји I_1 кроз отпорник R_1 .

$$I_2 \cong \frac{\beta}{\beta + 2} \frac{U - U_{BE}}{R_1},$$

што значи да струја I_2 веома мало зависи од вредности појачања β .

Посматрано коло представља “понор” струје. Вредност струје I_1 пресликава се на вредност излазне струје I_2 , због чега се ово коло назива и “струјно огледало” (*current mirror*).

$$I_2 \cong \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} I_1$$

Због коначног појачања, струја I_2 одступа од вредности струје I_1 :

$$I_2 = I_1(1 + \delta),$$

где је δ релативно одступање “лика” (струја I_2) од “оригинала” (струја I_1):

$$\delta = \frac{I_2 - I_1}{I_1} = - \frac{1}{1 + \frac{\beta}{2}}$$

Ако је $\beta = 100$, излазна струја I_2 је за приближно 2% мања од струје I_1 .

9. За коло приказано на слици, под претпоставком да су познате вредности отпорности у колу, R_1 и R_2 , напона напајања, U , као и да транзистори имају познате и једнаке вредности појачања струје од базе до емитора, β , и вредности напона директне поларизације споја база-емитор, U_{BE} , одредити општи израз за вредност струје I_2 .

РЕШЕЊЕ

Транзистори T_1 и T_2 образују струјно огледало. Улога транзистора T_3 је да смањи разлику струје колектора транзистора T_2 и струје коју дефинише отпорник R_1 . У складу са ознакама на слици, за ово коло важе следеће једначине:

$$I_{B1} = I_{B2} = I_B, \quad (1)$$

$$I_{C1} \cong \beta I_{B1} = \beta I_B \quad (2)$$

$$I_{C2} \cong \beta I_{B2} = \beta I_B, \quad (3)$$

$$I_{B1} + I_{B2} = I_{E3} = (1 + \beta) I_{B3} \quad \text{и} \quad (4)$$

$$U - R_1 I_1 - U_{BE3} - U_{BE1} = 0, \quad (5)$$

Из једначина (1) до (4) следи:

$$I_{B3} = \frac{2I_B}{1 + \beta} \cong \frac{2I_{C1}}{(1 + \beta)\beta},$$

$$I_1 = I_{B3} + I_{C1} \cong \frac{2I_{C1}}{\beta(\beta + 1)} + I_{C1} = \frac{\beta^2 + \beta + 2}{\beta(\beta + 1)} I_{C1},$$

На основу претходног разматрања, може се одредити израз за вредност излазне струје I_2 :

$$I_2 = I_{C2} = I_{C1} \cong \frac{\beta(\beta + 1)}{\beta^2 + \beta + 2} I_1.$$

На основу једначине (5) за струју I_1 важи:

$$I_1 = \frac{U - 2U_{BE}}{R_1},$$

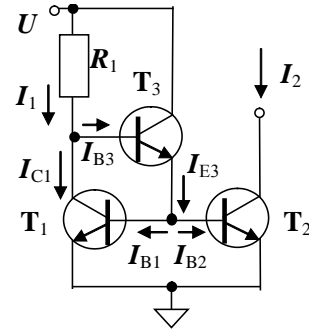
одакле следи:

$$I_{C2} \approx \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta(\beta + 1)}} \frac{U - 2U_{BE}}{R_1}.$$

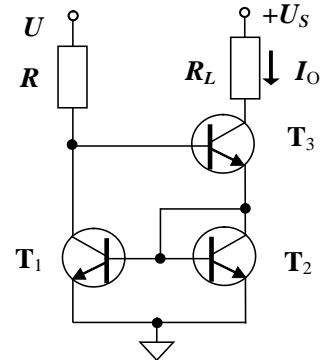
Разматрано коло представља модификовано “струјно огледало” у којем је утицај појачања β на вредност излазне струје смањен. Релативно одступање “лика” (струја I_2) од “оригинала” (струја I_1) једнако је:

$$\delta = \frac{I_2 - I_1}{I_1} = - \frac{1}{1 + \frac{\beta(\beta + 1)}{2}}.$$

Ако је $\beta = 100$, излазна струја I_2 је за само 0,02% мања од струје I_1 .



10. Коло приказано на слици назива се Вилсонов (*Wilson*) извор струје. Под претпоставком да транзистори имају познате и једнаке вредности појачања струје од базе до емитора, β , и вредности напона директне поларизације споја база-емитор, U_{BE} , као и да се инверзна струја засићења колекторског споја може занемарити, одредити општи израз за вредност струје I_O .



РЕШЕЊЕ

Транзистори T_1 и T_2 образују струјно огледало за које важи:

$$I_{C1} = \frac{\beta}{\beta+2} I_{E3}. \quad (1)$$

Ако се радна тачка транзистора T_2 налази у активној области:

$$I_O = I_{C3} = \beta I_{B3}, \quad (2)$$

$$I_{E3} = (1 + \beta) I_{B3}. \quad (3)$$

За чвор А важи:

$$I_{C1} = I_1 - I_{B3}. \quad (4)$$

одакле следи:

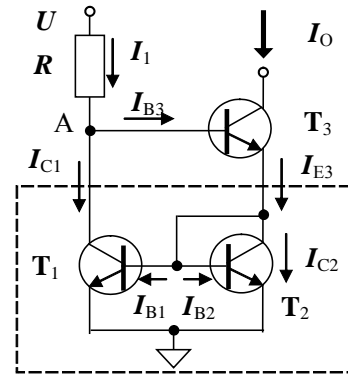
$$I_{C1} = I_1 - \frac{I_O}{\beta}, \text{ и}$$

$$I_O = \beta I_{B3} = \beta \frac{I_{E3}}{\beta+1} = \frac{\beta}{\beta+1} I_{C1} \frac{\beta+2}{\beta} = \frac{\beta+2}{\beta+1} (I_1 - \frac{I_O}{\beta}).$$

Сређивањем се добија општи израз за вредност струје I_O :

$$I_O = I_{C3} \cong \frac{\beta(\beta+2)}{\beta^2+2\beta+2} I_1.$$

$$I_1 = \frac{U - 2U_{BE}}{R}.$$



11. Нацртати спој *PNP* транзистора који представља “струјно огледало” и одредити израз за вредност излазне струје.

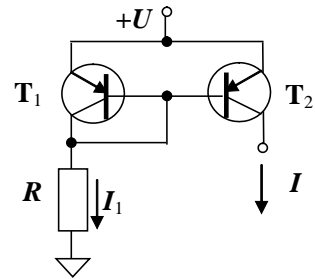
РЕШЕЊЕ

$$I_{C1} \cong \beta_1 I_{B1} = \beta I_B, \Rightarrow I_B \cong \frac{I_{C1}}{\beta}$$

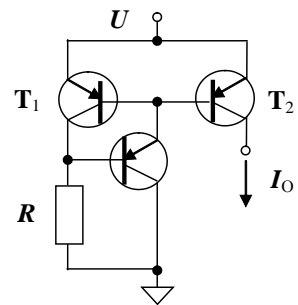
$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + 2I_B \cong \frac{\beta + 2}{\beta} I_{C1}$$

$$I = I_{C2} = I_{C1} \cong \frac{\beta}{\beta + 2} I_1$$

$$I \cong \frac{\beta}{\beta + 2} \frac{U - U_{EB}}{R}$$



12. За коло приказано на слици, под претпоставком да транзистори имају познате и једнаке вредности појачања струје од базе до емитора, β , и вредности напона директне поларизације споја база-емитор, U_{BE} , као и да се инверзна струја zasiћења колекторског споја може занемарити, одредити општи израз за вредност струје I_O .

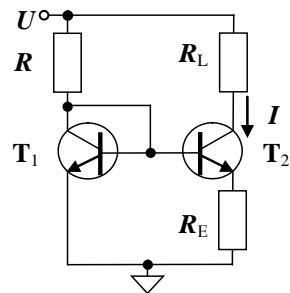


РЕШЕЊЕ

Поступак анализе је истоветан као у задатку под редним бројем 9.

$$I_O \approx \frac{\beta(\beta + 1)}{\beta(\beta + 1) + 2} \frac{U - 2U_{EB}}{R}$$

13. Коло приказано на слици назива се Видларов (*Widlar*) извор струје. Под претпоставком да су познате вредности напона напајања и отпорности у колу, као и да транзистори имају једнаке карактеристике, одредити општи израз који описује зависност вредности струје I од вредности параметара елемената у посматраном колу.



РЕШЕЊЕ

У складу са ознакама на слици, за посматрано коло важе следеће једначине:

$$I_C \cong I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}; U_T = \frac{kT}{q} = 26 \text{ mV} @ 300 \text{ K}$$

$$T_1 = T_2 \Leftrightarrow I_{S1} = I_{S2},$$

$$U_{BE1} - U_{BE2} - R_E I_{C2} = 0,$$

на основу којих следи:

$$U_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}} - U_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} - R_E I_{C2} = 0,$$

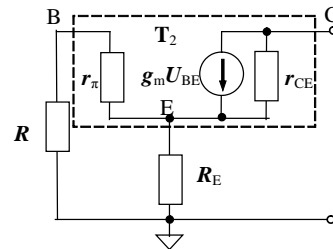
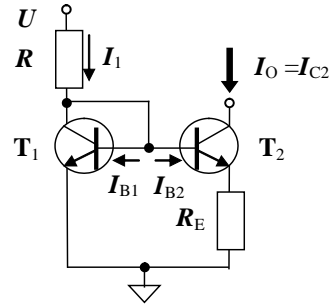
$$U_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} = R_E I_{C2},$$

$$I_O = I_{C2} \cong \frac{U_T}{R_E} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}}.$$

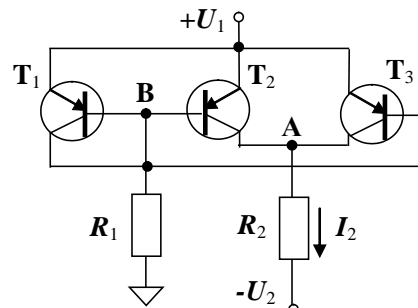
Видларов извор омогућује добијање веома малих струја без примене отпорника екстремно великих отпорности. Отпорник R_E смањује вредност напона поларизације транзистора T_2 , због чега је вредност струје I_{C2} смањена по експоненцијалном закону.

Излазна отпорност знатно је већа него у случају основног кола:

$$R_O = r_{CE} \left(1 + \frac{U_E}{U_T} \right).$$



14. Под претпоставком да су транзистори у колу, приказаном на слици, идентични, односно имају једнака својства, као и да се инверзне струје засићења колекторског споја транзистора могу занемарити, одредити општи израз којим је одређена струја I_2 , која тече кроз отпорник R_2 , у зависности од вредности појачања струје базе до колектора транзистора, β , напона U_1 и отпорности у колу.



РЕШЕЊЕ

Идентични транзистори имају једнака појачања струје од базе до колектора:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta .$$

У посматраном колу су напони емитор-база идентичних транзистора су једнаки:

$$U_{EB1} = U_{EB2} = U_{EB3} = U_{EB} ,$$

па су једнаке и њихове струје база:

$$I_{B1} = I_{B2} = I_{B3} = I_B ,$$

односно струје колектора:

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = I_C .$$

Када се инверзна струја засићења колекторског споја транзистора, I_{CBO} , занемари, важи:

$$I_C = \beta I_B .$$

Струја I_1 , кроз отпорник R_1 једнака је:

$$I_1 = \frac{U_1 - U_{EB1}}{R_1} .$$

За посматрано коло важе једначине:

$$I_2 = I_{C2} + I_{C3} = 2I_C \text{ (чвор А) и}$$

$$I_1 = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} = I_C + 3I_B \text{ (чвор В),}$$

на основу којих следи:

$$I_1 = I_C + 3 \frac{I_C}{\beta} = \frac{\beta + 3}{\beta} I_C .$$

$$I_2 = 2I_C = 2 \frac{\beta}{\beta + 3} I_1 = 2 \frac{\beta}{\beta + 3} \frac{U_1 - U_{EB}}{R_1}$$

Коло представља “струјно огледало” са удвострученим ликом.

6.3. ИЗВОРИ СТАЛНЕ СТРУЈЕ СА ТРАНЗИСТОРИМА СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

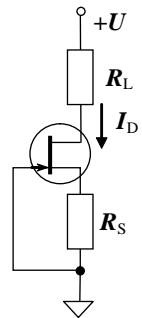
15. Нацртати подесиви извор сталне струје са N -каналним спојним транзистором са ефектом поља и објаснити начин рада.

Пројектовати извор који даје струју од $I_D = 5 \text{ mA}$ су ако параметри транзистора: $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$ и $U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}$.

РЕШЕЊЕ

Електрична шема је приказана на слици. Струја кроз отпорник R_L , који представља оптерећење, одређена је напонем U_{GS} :

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



Под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у области засићења, струја I_D је одређена једначином:

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

Вредност напона U_{GS} при којој струја кроз канал има жељену вредност $I_D \leq I_{DSS}$ одређена је формулом:

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

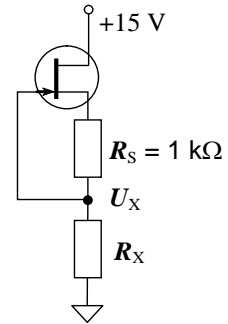
На основу ове вредности напона U_{GS} израчунава се потребна отпорност R_S :

$$R_S = -\frac{U_{GS}}{I_D}.$$

За задате вредности добија се:

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

16. Напон U_X у посматраном колу једнак је 5 V. Одредити вредност отпорности R_X ако су параметри транзистора: $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ и $U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}$.



РЕШЕЊЕ

Струја кроз отпорник R_X , који представља оптерећење са једним уземљеним крајем, одређена је напонам U_{GS} :

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

Напон U_{GD} у посматраном колу једнак је -10 V, што значи да се радна тачка транзистора налази у области засићења ($U_{GD} < U_{GS(OFF)}$). Карактеристика преноса се може представити једначином:

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

Вредност струје I_D представља решење квадратне једначине:

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

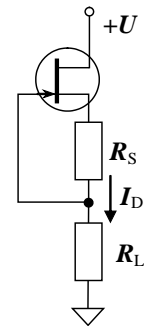
односно:

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

која се која се може приказати у облику:

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

где је:



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

У посматраном случају је $\alpha = -2$. Сређивањем се долази до једначине:

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

чија су решења $x_1 = 1$, и $x_2 = 0,25$.

Прво решење је физички немогуће јер би тада, према једначини (1) напон U_{GS} био једнак -10 V. Транзистор би у том случају био закочен, јер је вредност напона гејт-сорс мања од напона кочења $U_{GS(OFF)}$, а струја I_D је тада једнака нули.

Решењу $x_2 = 0,25$ одговара вредност струје $I_D = 2,5$ mA.

Транзистор делује као извор сталне струје. На основу Омовог закона, за вредност отпорности R_X важи образац:

$$R_X = \frac{U_X}{I_D},$$

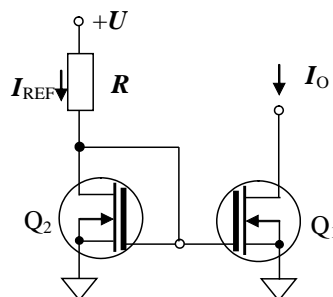
помоћу којег се израчунава тражена вредност:

$$R_X = 2 \text{ k}\Omega.$$

17. Нацртати струјно огледало са N -каналним MOS транзисторима са уграђеним каналом (D - $MOSFET$).

РЕШЕЊЕ

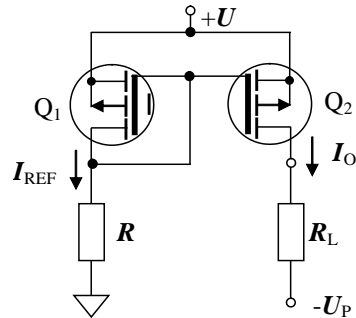
Под претпоставком да транзистори Q_1 и Q_2 , у колу приказаном на слици, имају једнаке карактеристике, струја I_O једнака је струји I_{REF} .



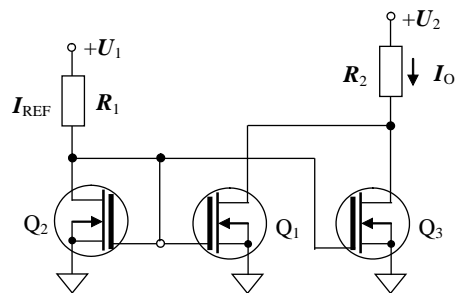
18. Нацртати струјно огледало са P -каналним MOS транзисторима са подстакнутим каналом (E - $MOSFET$).

РЕШЕЊЕ

Под претпоставком да транзистори Q_1 и Q_2 у колу приказаном на слици имају једнаке карактеристике струја I_O једнака је струји I_{REF} .



19. Под претпоставком да транзистори у колу приказаном на слици имају једнаке карактеристике, одредити зависност вредности струје I_O од вредности параметара елемената у посматраном колу.



РЕШЕЊЕ

Транзистори Q_1 , Q_2 и Q_3 представљају струјно огледало са двоструким излазом. Ако су њихове карактеристике идентичне, струја I_O је двоструко већа од струје I_{REF} .

7. ПИТАЊА ЗА ПРОВЕРУ ТЕОРИЈСКОГ ЗНАЊА

7.1. УВОД У ЕЛЕКТРОНИКУ

1. Дефиниције средње вредности променљиве електричне струје.
2. Написати израз којим је одређена средња вредност променљиве величине $x(t)$ посматране у временском интервалу од t_p до t_k .
3. Написати израз којим је одређена средња вредност периодичне величине $y(t)$ чији је период T .
4. Дефиниција специфичне електричне проводности.
5. Шта је покретљивост слободних носилаца наелектрисања, како је дефинисана и од чега зависи?
6. Шта је термички напон, како је дефинисан и колика је његова вредност на температури 300 K?
7. Шта је специфична електрична отпорност, како је дефинисана и од чега зависи?
8. Како се специфична електрична отпорност мења са температуром?
9. Шта је полупроводник? Која су основна обележја полупроводничких материјала?
10. Шта је енергијски дијаграм електрона у атому? Нацртати дијаграм енергијских нивоа усамљеног атома водоника.
11. Шта је електронволт и колика је његова вредност?
12. По чему се дијаграм енергије електрона у кристалној решетки разликује од дијаграма енергије електрона усамљеног атома?
13. По чему се разликују енергијски дијаграми проводника, полупроводника и изолатора?
14. Шта је шупљина? Како се наелектрисање преноси шупљинама?
15. Шта је сопствена концентрација чистог полупроводника и од чега зависи?

16. Шта је полупроводник са примесама? Зашто се у кристал полупроводника уносе примесе?
17. Какав је однос концентрација електрона и шупљина у полупроводнику са примесама у стању термодинамичке равнотеже?
18. Шта су већински, а шта мањински носиоци наелектрисања у полупроводнику?
19. У чему се разликују полупроводници *I*-, *N*- и *P*-типа?
20. Шта је прелазна област *PN*-споја?
21. Како се мења ширина прелазне области *PN*-споја при повећању напона инверзне поларизације?
22. Како се мења висина потенцијалне препреке (баријере) прелазне области *PN*-споја при повећању напона директне поларизације?
23. Написати израз који описује зависност густине струје од напона поларизације *PN*-споја?
24. У чему се разликују *U-I* карактеристике германијумског и силицијумског *PN*-споја?
25. Шта је пробој *PN*-споја и како настаје?
26. Шта је лавински пробој? Како се напон пробоја лавинским ефектом мења са температуром?
27. Шта је пробој тунелским ефектом? Како се напон пробоја тунелским ефектом мења са температуром?
28. Шта је капацитивност прелазне области *PN*-споја, C_T , и од чега зависи? Који је ред величине капацитивности C_T ?
29. Шта је дифузиона капацитивност *PN*-споја, C_D , и од чега зависи? Који је ред величине капацитивности C_D ?
30. Чему је једнак производ дифузионе капацитивности C_D и динамичке отпорности директно поларисаног *PN*-споја?
31. Шта је температурска осетљивост напона директно поларисаног *PN*-споја при сталној струји, у којим јединицама се изражава, и колика је њена приближна вредност?
32. Шта је инверзна струја засићења *PN*-споја и како се мења у зависности од температуре?
33. Како се динамичка отпорност *PN*-споја мења у зависности од температуре?
34. Како се динамичка отпорност *PN*-споја мења у зависности од вредности струје?

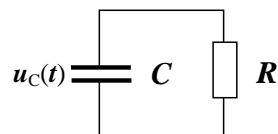
35. Нацртати и анализирати $U-I$ карактеристику PN -споја.
36. Колика је приближна вредност динамичке отпорности силицијумског PN -споја на собној температури, при струји од 1 mA?
37. Како је дефинисан сачинилац промене инверзне струје засићења PN -споја у зависности од температуре. Колика је његова приближна вредност?
38. У чему се разликују статичка и динамичка отпорност PN -споја?

7.2. ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНСКИХ УРЕЂАЈА

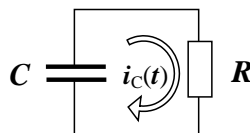
39. Шта је елемент електронског уређаја?
40. Шта је савршени (идеални) елемент?
41. Која су својства пасивних, а која активних електронских елемената?
42. Која су својства савршене диоде?
43. Која су својства савреног извора напона?
44. Која су својства савреног извора струје?
45. Дефинисати независни извор напона.
46. Нацртати статичку карактеристику независног извора напона.
47. Дефинисати независни извор струје.
48. Нацртати статичку карактеристику независног извора струје.
49. Навести основне врсте отпорника који се користе у електроници.
50. Нацртати еквивалентно коло стварног (физичког) отпорника.
51. Како је дефинисан сачинилац промене отпорности у зависности од температуре и у којим јединицама се изражава?
52. Колика је типична вредност температурског коефицијента металослојних отпорника?
53. Шта је варистор и где се примењује?
54. Навести основне врсте кондензатора који се користе у електроници.
55. Нацртати еквивалентно коло стварног (физичког) кондензатора.
56. Како је дефинисан сачинилац промене капацитивности кондензатора у зависности од температуре и у којим јединицама се изражава?

57. Шта је диелектрична апсорпција?
58. Нацртати еквивалентно коло стварног (физичког) калема.
59. Шта је савршени (идеални) филтер?
60. Написати опште изразе којима су дефинисани појачање напона, појачање струје, улазна отпорност и излазна отпорност елемента (кола) са два приступа, типа улаз-излаз.
61. Нацртати еквивалентно коло појачавача напона, посматраног као као мрежа са два приступа.
62. Шта је негативна динамичка отпорност? Који електронски елементи се одликују својством негативне динамичке отпорности?
63. Шта је реле? Нацртати графички симбол релеа са једним преклопним контактом.
64. Нацртати пасивно коло којим се приближно остварује операција интегралчења.
65. Нацртати пасивно коло којим се приближно остварује операција диференцирања.

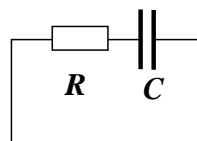
66. Почетна вредност напона на крајевима савреног кондензатора, чија је капацитивност C , једнака је U . Написати израз којим је описана његова промена када се кондензатор празни кроз отпорник чија је отпорност R позната.



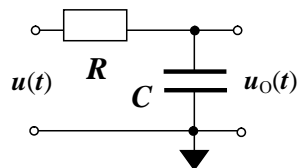
67. Почетна вредност напона на крајевима савреног кондензатора, чија је капацитивност C , једнака је U . Написати израз којим је описана промена струје кроз кондензатор који се празни кроз отпорник чија је отпорност R позната.



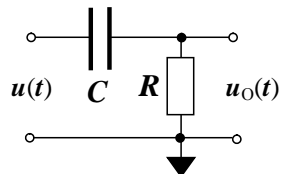
68. Кондензатор, чија је капацитивност C празни се кроз отпорник чија је отпорност R . Написати израз којим је приближно одређено трајање временског интервала τ , након којег се може сматрати да је прелазни процес пражњења завршен.



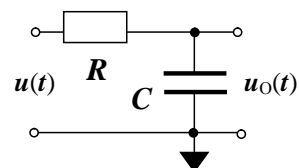
69. Мрежа са два приступа, приказана на слици, састоји се од савршених елемената. Ако је почетна вредност напона на кондензатору једнака нули, нацртати дијаграм који приказује промену излазног напона када се напон на улазу, $u(t)$, скоковито промени од 0 на U .



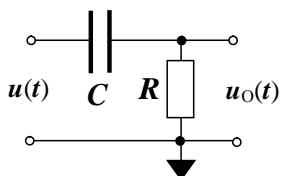
70. Мрежа са два приступа, приказана на слици, састоји се од савршених елемената. Ако је почетна вредност напона на кондензатору једнака нули, нацртати дијаграм који приказује промену излазног напона када се напон на улазу, $u(t)$, скоковито промени од 0 на U .



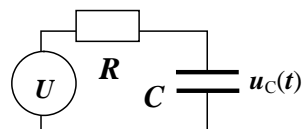
71. Мрежа са два приступа, приказана на слици, састоји се од савршених елемената. Ако је почетна вредност напона на кондензатору једнака нули, написати израз који описује промену излазног напона када се напон на улазу, $u(t)$, скоковито промени од 0 на U .



72. Мрежа са два приступа, приказана на слици, састоји се од савршених елемената. Ако је почетна вредност напона на кондензатору једнака нули, написати израз који описује промену излазног напона када се напон на улазу, $u(t)$, скоковито промени од 0 на U .



73. Напон на крајевима кондензатора у почетном тренутку $t = 0$ једнак је U_0 . Написати израз који описује промену напона $u_C(t)$ за $t \geq 0$.



74. Нацртати шему мрежног филтра на улазу изворе једносмерног напона.
75. Написати израз за израчунавање индуктивности калема код кога је дужина много већа од пречника, ако су познати дужина l , површина попречног пресека S , број навојака N и пермеабилности μ_r и μ_0 .
76. Од каквог материјала се праве језгра за високофреквентне и импулсне трансформаторе?
77. Одредити индуктивност калема сачињеног од феритног језгра, чија је карактеристика $Al = 400 \text{ nH}$, на које намотано 15 навојака.

78. Написати општи израз којим је одређена отпорност проводника дужине l , сталног попречног пресека S , сачињеног од хомогеног материјала чија је специфична електрична отпорност ρ .
79. Одредити називну отпорност и толеранцију којом она може бити остварена за отпорник који је означен обојеним прстеновима у следећем редоследу: црвена (2), љубучаста (7), жута (4), браон (1).
80. Одредити температуру отпорника чија је називна електрична отпорност $1 \text{ k}\Omega$, ако је његова температурска отпорност $\theta = 200 \text{ K/W}$, температура амбијента $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, а струја која протиче кроз отпорник једнака 10 mA .
81. Написати општи израз којим је одређена капацитивност плочастог кондензатора чија је површина S , растојање између плоча d , у којем је као изолатор примењен материјал чија је диелектрична константа ϵ .
82. Написати једначине које представљају математички h -модел линеарног елемента са два приступа.
83. Нацртати хибридно еквивалентно коло линеарног елемента са два приступа.
84. Како је дефинисан и шта представља параметар h_i у h -моделу линеарног елемента са два приступа?
85. Како је дефинисан и шта представља параметар h_f у h -моделу линеарног елемента са два приступа?
86. Како је дефинисан и шта представља параметар h_r у h -моделу линеарног елемента са два приступа?
87. Како је дефинисан и шта представља параметар h_o у h -моделу линеарног елемента са два приступа?
88. Нацртати општу шему појачавача са једним трополним појачавачким елементом.
89. Навести основне класе појачавача и описати њихова својства.
90. Нацртати општу шему појачавача са диференцијалном спрегом трополних појачавачких елемената и објаснити начин његовог рада.
91. Нацртати улазно-излазну карактеристику појачавача са диференцијалном спрегом трополних појачавачких елемената (диференцијални појачавач).

7.3. ДИОДЕ

1. Која је основна подела полупроводничких диода према намени?
2. У чему се разликују карактеристике германијумских и силицијумских диода?

3. Како је дефинисан сачинилац промене инверзне струје засићења диоде у зависности од температуре и колика је његова приближна вредност?
4. Који су основни параметри диоде?
5. Како напон диоде поларисане у проводном смеру зависи од температуре?
6. Како инверзна струја засићења диоде зависи од температуре?
7. Како динамичка отпорност диоде поларисане у проводном смеру зависи од температуре?
8. Шта је Ценер-диода и која су њена основна својства?
9. Нацртати графички симбол Ценер-диоде.
10. У којој области статичке $U-I$ карактеристике се налази радна тачка Ценер-диоде у уобичајеним условима примене?
11. Шта је Шотки-диода и која су њена основна својства?
12. Нацртати графички симбол Шотки-диоде.
13. Шта је варикап-диода и где се користи?
14. Нацртати графички симбол варикап-диоде.
15. Шта је тунел-диода и која су њена основна својства?
16. Нацртати графички симбол тунел-диоде.
17. Нацртати $U-I$ карактеристику тунел-диоде.
18. Нацртати еквивалентна кола савршене (идеалне) диоде поларисане у проводном и непроводном смеру.
19. Нацртати еквивалентно коло стварне диоде поларисане у проводном, смеру.
20. Како је дефинисан сачинилац промене напона диоде у зависности од температуре и колика је његова приближна вредност при поларизацији у пропусном смеру?
21. Нацртати $U-I$ карактеристику и назначити основне статичке параметре полупроводничке диоде.
22. Како се означава и како је дефинисана величина која се назива “напон прага” диоде (*threshold voltage*)?
23. Како се означава и како је дефинисана величина која се назива “отпорност нагиба” диоде (*slope resistance*)?
24. У чему се разликују статичка и динамичка отпорност диоде?
25. Нацртати линеаризовану $U-I$ карактеристику полупроводничке диоде.
26. Колика је приближна вредност напона прага вођења (*threshold voltage*) силицијумских сигналних диода?

27. Колика је приближна вредност напона прага вођења (*threshold voltage*) германијумских диода?
28. Нацртати еквивалентно коло Ценер-диоде у проводном стању, поларисане у директном смеру.
29. Нацртати еквивалентно коло Ценер-диоде у проводном стању поларисане у инверзном смеру.

7.4. БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

1. Која су основна својства униполарних транзистора?
2. Која су основна својства биполарних транзистора са *PN*-спојем (*bipolar junction transistor - BJT*)?
3. Написати изразе којима се описује однос струја код биполарних транзистора.
4. Графички приказати однос струја базе, емитора и колектора *PNP* транзистора.
5. Графички приказати однос струја базе, емитора и колектора *NPN* транзистора.
6. Објаснити појаву која се назива Ерлијев ефекат.
7. Написати потпун израз којим је дефинисано појачање струје од емитора до колектора биполарног транзистора.
8. Написати потпун израз којим је дефинисано појачање струје од базе до колектора биполарног транзистора.
9. Нацртати улазну статичку карактеристику *NPN* биполарног транзистора.
10. Нацртати статичку карактеристику преноса *NPN* биполарног транзистора.
11. Нацртати излазну статичку карактеристику *NPN* биполарног транзистора.
12. Написати израз који описује зависност струје базе од напона база-емитор *NPN* биполарног транзистора.
13. Написати израз који описује зависност струје колектора од напона база-емитор биполарног транзистора.
14. Нацртати I_c-U_{ce} карактеристику биполарног транзистора. Назначити области рада и написати услове којима су одређене.
15. Нацртати излазну статичку карактеристику *NPN* транзистора, назначити и објаснити границе радне области.

16. Написати једначине које представљају математички h -модел биполарног транзистора у споју са заједничким емитором.
17. Како је дефинисан и шта представља параметар h_{ie} у математичком h -моделу биполарног транзистора у споју са заједничким емитором?
18. Како је дефинисан и шта представља параметар h_{fe} у математичком h -моделу биполарног транзистора у споју са заједничким емитором?
19. Како је дефинисан и шта представља параметар h_{fb} у математичком h -моделу биполарног транзистора у споју са заједничким базом?
20. Како је дефинисан и шта представља параметар h_{oe} у математичком h -моделу биполарног транзистора у споју са заједничким емитором?
21. Нацртати дијаграм који показује зависност појачања струје биполарног транзистора од учестаности.
22. Написати израз којим се приближно описује фреквенцијска зависност параметра h_{fe} .
23. Нацртати дијаграм који показује како појачања струје од базе до емитора биполарног транзистора зависи од вредности струје колектора.
24. Објаснити појаву која се назива “термичко бежање”.
25. Нацртати хибридно еквивалентно коло транзистора за мале сигнале.
26. Нацртати појачавач са NPN транзистором у споју са заједничким колектором и написати израз за појачање напона за мале сигнале.
27. Нацртати појачавач са PNP транзистором у споју са заједничким колектором и написати израз за појачање струје за мале сигнале.
28. Нацртати појачавач са NPN транзистором у споју са заједничким емитором и написати израз за појачање струје за мале сигнале.
29. Нацртати појачавач са PNP транзистором у споју са заједничким емитором и написати израз за појачање напона за мале сигнале.
30. Нацртати појачавач са NPN транзистором у споју са заједничким колектором и написати израз за улазну отпорност.
31. Нацртати појачавач са PNP транзистором у споју са заједничким колектором и написати израз за излазну отпорност.
32. Нацртати појачавач са NPN транзистором у споју са заједничким емитором и написати израз за излазну отпорност.
33. Нацртати спој два PNP транзистора који је еквивалентан једном PNP транзистору (Дарлингтонов спој). Написати израз којим је приближно одређено појачање струје од базе до колектора еквивалентног транзистора.
34. Нацртати спој два NPN транзистора који је еквивалентан једном NPN транзистору (Дарлингтонов спој). Написати израз којим је приближно одређено појачање струје од базе до колектора еквивалентног транзистора.

35. Нацртати спој комплементарних транзистора који је еквивалентан једном *NPN* транзистору. Написати израз којим је приближно одређено појачање струје од базе до колектора еквивалентног транзистора.
36. Нацртати спој комплементарних транзистора који је еквивалентан једном *PNP* транзистору. Написати израз којим је приближно одређено појачање струје од базе до колектора еквивалентног транзистора.
37. Нацртати коло за стабилизацију позитивног једносмерног напона са Ценер-диодом и биполарним транзистором. Написати израз за вредност излазног напона.
38. Нацртати коло за стабилизацију негативног једносмерног напона са Ценер-диодом и биполарним транзистором. Написати израз за вредност излазног напона.
39. Нацртати инвертујући појачавач са комплементарним биполарним транзисторима и објаснити начин његовог рада.
40. Нацртати неинвертујући појачавач са комплементарним биполарним транзисторима и објаснити начин његовог рада.
41. Нацртати неинвертујући појачавач са једним *NPN* транзистором и написати израз за улазну отпорност.
42. Нацртати неинвертујући појачавач са једним *PNP* транзистором и написати израз за излазну отпорност.

7.5. ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

1. Дефиниција струје I_{DSS} транзистора са ефектом поља (*field effect transistor - FET*).
2. Дефиниција динамичке излазне проводности спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*).
3. Шта геометријски представља динамичка излазна проводност спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*)?
4. Нацртати излазну статичку карактеристику *N*-каналног спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*).
5. Нацртати статичку карактеристику преноса *N*-каналног спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*).
6. Нацртати еквивалентно коло транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*). Објаснити физичку природу појединих параметара.
7. Написати једначине које представљају математички модел транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*) који важи за мале сигнале.

8. Написати израз који показује како струја кроз канал спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*), I_D , зависи од напона гејт-сорс, U_{GS} , када се радна тачка транзистора налази у области засићења.
9. Како је дефинисана динамичка проводност преноса (*transconductance*) транзистора са ефектом поља?
10. Написати израз који показује како динамичка проводност преноса (*transconductance*) спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*), g_m , зависи од струје кроз канал, I_D , када се радна тачка транзистора налази у области засићења.
11. Шта геометријски представља и од чега зависи динамичка проводност преноса (*transconductance*) спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*)?
12. Нацртати графички симбол *P*-каналног спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*).
13. Скицирати пресек *N*-каналног спојног транзистора са ефектом поља (*Junction Field Effect Transistor - JFET*).
14. Нацртати графички симбол *N*-каналног *MOS*-транзистора са уграђеним каналом.
15. Нацртати графички симбол *N*-каналног *MOS*-транзистора са подстакнутим (индукованим) каналом.
16. Нацртати графички симбол *P*-каналног *MOS*-транзистора са уграђеним каналом.
17. Нацртати графички симбол *P*-каналног *MOS*-транзистора са подстакнутим (индукованим) каналом.
18. Скицирати поједностављен приказ пресека *NMOS*-транзистора са уграђеним каналом.
19. Нацртати статичку карактеристику преноса *N*-каналног *MOS*-транзистора са подстакнутим (индукованим) каналом.
20. Нацртати неинвертујући појачавач са комплементарним *MOS*-транзисторима и објаснити начин његовог рада.

7.6. ТИРИСТОРИ

1. Шта је тиристор и која су његова основна својства?
2. Набројати врсте тиристора.
3. Нацртати *U-I* карактеристику и објаснити које су области рада тиристора.
4. Нацртати унутрашњу структуру диодног тиристора.

5. Нацртати спој транзистора којим се може представити диодни тиристор.
6. Шта је диак? Нацртати $U-I$ карактеристику диака.
7. Нацртати симбол којим се графички представља диак у електричним шемама.
8. Скицирати поједностављен приказ пресека симетричног диодног тиристора.
9. Шта је триодни тиристор P -типа и како се може представити?
10. Нацртати $U-I$ карактеристику триодног тиристора.
11. Нацртати симбол којим се графички представља триодни тиристор P -типа у електричним шемама.
12. Шта је триодни тиристор N -типа и како се може представити?
13. Нацртати симбол којим се графички представља тиристор N -типа у електричним шемама.
14. Шта је триак? Нацртати симбол којим се графички представља триак у електричним шемама.
15. Навести све начине на које се тиристор може довести у проводно стање?
16. Објаснити све начине којима се тиристор може превести из проводног у непроводно стање.
17. Нацртати осцилатор са диодним тиристором и објаснити начин његовог рада.
18. Нацртати коло за контролу снаге потрошача у систему наизменичне струје.

8. ТЕСТ

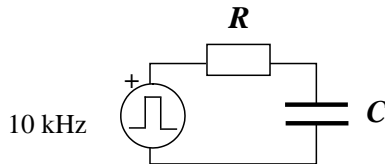
8.1. УВОД У ЕЛЕКТРОНИКУ

- Под називом “температурска отпорност” отпорника подразумева се:
 - његова способност издржавања високих радних температура,
 - његова способност издржавања великих промена температуре околине,
 - однос промене његове температуре и снаге којом се у њему електрична енергија претвара у топлоту,
 - однос релативне промене његове отпорности и снаге којом се у њему електрична енергија претвара у топлоту.
- Специфична електрична проводност, σ , је физичка величина дефинисана изразом:
 - $\vec{J} = \sigma \vec{E}$,
 - $\sigma = \frac{\vec{J}}{E}$,
 - $\sigma = R \frac{l}{S}$,
 - $\vec{J} \vec{E} = \sigma$.
- Специфична електрична отпорност, ρ , је физичка величина дефинисана изразом:
 - $\vec{J} = \rho \vec{E}$,
 - $\rho = \frac{\vec{E}}{J}$,
 - $\rho = R \frac{l}{S}$,
 - $\vec{E} = \rho \vec{J}$.
- При сталној струји, напон директно поларисаног PN -споја се, при повећању температуре:
 - повећава,
 - смањује,
 - не мења.
- Са повећањем температуре, инверзна струја засићења PN -споја се:
 - повећава,
 - не мења,
 - смањује.
- Са повећањем температуре PN -споја, напон пробоја лавинским ефектом се:
 - повећава,
 - не мења,
 - смањује.

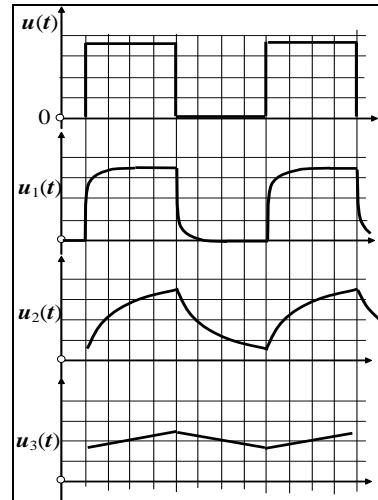
7. Са повећањем температуре PN -споја, напон пробоја тунелским ефектом се:
- а) повећава, б) не мења, в) смањује.
8. Температура апсолутне нуле, изражена у степенима Целзијусове скале, једнака је:
- а) $-317,16\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $-273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$; в) $-194,97\text{ }^{\circ}\text{C}$; г) $^{\circ}\text{C}$.
9. Најнижа, до данас, постигнута температура није испод:
- а) 1 K , б) 1 mK , в) $1\text{ }\mu\text{K}$,
г) није понуђен тачан одговор.
10. Приближна вредност максимално дозвољене густине струје у бакарним проводницима који се користе у стамбеним објектима је:
- 1) 3 A/mm^2 , б) 6 A/mm^2 , в) 12 A/mm^2 ,
г) није понуђен тачан одговор.
11. Који од наведених типова кондензатора имају најмању паразитну индуктивност?
- а) електролитски, б) керамички, в) фолијски.
12. Који од наведених типова кондензатора има највећу капацитивност по јединици запремине ?
- а) електролитски, б) керамички, в) фолијски.
13. При изради калемова намењених за рад на високим учестаностима користи се техника унакрсног мотања да би се смањила:
- а) индуктивност, б) капацитивност, в) отпорност.
14. Са повећањем учестаности, за исту називну снагу трансформатора, језгро трансформатора се:
- а) смањује, б) повећава, в) не мења.
15. У односу на струју привлачења релеа (*operating current*), струја отпуштања релеа (*release current*) је:
- 1) мања, б) једнака, в) већа.
16. Називни напон побуде релеа је 12 V . При постепеном повећању напона побуде котва бива привучена када је напон достигао вредност 10 V . При постепеном смањивању напона побуде релеа, које је било прикључено на напон од 12 V , котва ће бити отпуштена при напону од:
- а) 9 V , б) 10 V , в) 11 V .

17. Највиша дозвољена радна температура типичних полупроводничких елемената од силицијума (Si) је приближно:
- а) 100 °C, б) 200 °C, в) 300 °C.
18. Полупроводнички сензори који раде на принципу Холовог ефекта реагују на промену:
- а) светлости, б) напона, в) магнетског поља.
19. Пасивно RC -коло за диференцирање је остварено применом отпорника отпорности 10 k Ω и кондензатора капацитивности 1 nF. Почетна вредност излазног напона је једнака нули. Ако се у почетном тренутку напон на улазу кола скоковито промени од вредности 0 на вредност U , излазни напон ће достићи вредност 0,01 U у тренутку који је унутар временског интервала:
- а) од 4 μ s до 5 μ s; б) од 40 μ s до 50 μ s; в) од 0,4 ms до 0,5 ms.
20. Пасивни RC -интегратор је остварен применом отпорника отпорности 20 k Ω и кондензатора капацитивности 2 nF. Почетна вредност излазног напона је једнака нули. Ако се у почетном тренутку напон на улазу кола скоковито промени од вредности 0 на вредност U , релативна грешка одступања вредности излазног напона од коначне (стационарне) вредности ће постати мања од 1% у тренутку који је унутар временског интервала:
- а) од 100 μ s до 200 μ s; б) од 0,5 ms до 1,0 ms; в) од 5 ms до 10 ms.
21. У улазним (мрежним) филтрима уређаја који се напајају наизменичним напоном из енергетске мреже, користе се:
- а) керамички кондензатори, б) електролитски кондензатори,
в) паралелна веза електролитских и керамичких кондензатора.
22. За филтрирање (“пеглање”) једносмерног пулсирајућег напона у изворима за напајање користе се:
- а) керамички кондензатори, б) електролитски кондензатори,
в) паралелна веза електролитских и керамичких кондензатора.
23. За пренапонску заштиту електронских уређаја користе се:
- а) варистори, б) тиристори, в) термистори.
24. Са повећањем температуре, специфична електрична отпорност метала се:
- а) повећава, б) смањује,
в) мења занемарљиво мало.

25. На улазу пасивног RC -кола за интегралне делује напон $u(t)$ који представља периодични сигнал правоугаоног таласног облика, чија је учестаност једнака 10 kHz .

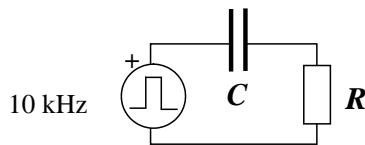


Ако је отпорност једнака $1\text{ k}\Omega$, а капацитивност једнака 10 nF , таласни облик напона између крајева кондензатора је приказан дијаграмом означеним са:

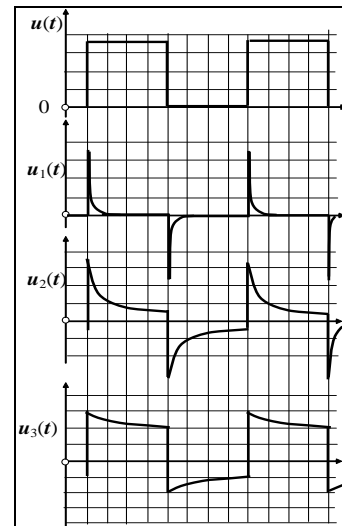


- а) $u_1(t)$, б) $u_2(t)$, в) $u_3(t)$, г) није понуђен тачан одговор.

26. На улазу пасивног RC -кола за диференцирање делује напон $u(t)$ који представља периодични сигнал правоугаоног таласног облика, чија је учестаност једнака 10 kHz .



Ако је отпорност једнака $1\text{ k}\Omega$, а капацитивност једнака 10 nF , таласни облик напона између крајева отпорника је приказан дијаграмом означеним са:



- а) $u_1(t)$, б) $u_2(t)$, в) $u_3(t)$, г) није понуђен тачан одговор.

27. При директној поларизацији PN -споја, однос статичке и динамичке отпорности је:

- а) већи од 1, б) приближно једнак 1, в) мањи од 1.

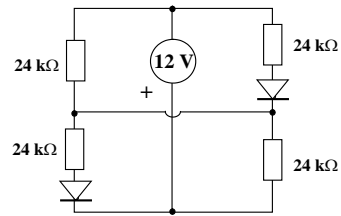
28. Са повећањем температуре, специфична електрична отпорност полупроводника се:

- а) повећава, б) смањује,
в) мења занемарљиво мало.

8.2. ДИОДЕ

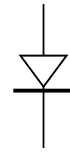
- При сталној струји, напон између крајева директно поларисане диоде се, при повећању температуре:
 - повећава,
 - смањује,
 - не мења.
- Са повећањем температуре, инверзна струја диоде се:
 - повећава,
 - не мења,
 - смањује.
- Са повећањем температуре, напон Ценер-диоде се:
 - повећава,
 - смањује,
 - повећава или смањује, зависно од вредности напона пробоја.
- Ако се температура повећа за $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, инверзна струја диоде се промени (приближно):
 - десет пута,
 - два пута,
 - занемарљиво мало.

- У колу приказаном на слици употребљене су две идентичне диоде, код којих је пад напона при директној поларизацији (у стању вођења) једнак 1 V . Струја коју даје извор напона једнака је:

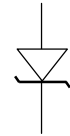


- 1 mA ;
 - $0,5\text{ mA}$;
 - $0,25\text{ mA}$;
 - није понуђен тачан одговор.
- Типична вредност пада напона на директно поларисаној сигналној силицијумској диоди, при струји од 1 mA , приближно износи:
 - $0,1\text{ V}$;
 - $0,6\text{ V}$;
 - 1 V .
 - Типична вредност пада напона на директно поларисаној сигналној Шотки-диоди, при струји од 1 mA , је приближно:
 - $0,15\text{ V}$ до $0,45\text{ V}$;
 - $0,65\text{ V}$ до 1 V ;
 - $1,15\text{ V}$ до $1,45\text{ V}$.
 - У уобичајеним условима рада, струја кроз диоду може да протиче:
 - само у смеру од аноде ка катоди,
 - само у смеру од катодe ка аноди,
 - само у једном или у оба смера, зависно од врсте диоде.
 - Као елементи чија се капацитивност може контролисати једносмерним напонем поларизације користе се:
 - тунел-диоде,
 - варикап-диоде,
 - Ценер-диоде,
 - Шотки-диоде.
 - За израду извора референтног напона користе се:
 - тунел-диоде,
 - фото-диоде,
 - Ценер-диоде,
 - Шотки-диоде.

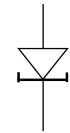
11. На слици је приказан симбол који представља:
 а) сигналну диоду,
 б) диодни тиристор,
 в) Ценер-диоду,
 г) тунел-диоду.



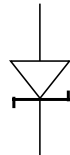
12. Симбол приказан на слици представља:
 а) сигналну диоду,
 б) диодни тиристор,
 в) Ценер-диоду,
 г) тунел-диоду.



13. На слици је приказан симбол који представља:
 а) сигналну диоду,
 б) диодни тиристор,
 в) Ценер-диоду,
 г) није понуђен тачан одговор.



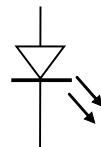
14. Симбол приказан на слици представља:
 а) сигналну диоду,
 б) Шотки-диоду,
 в) Ценер-диоду,
 г) тунел-диоду.



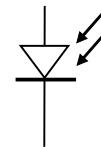
15. Симбол приказан на слици представља:
 а) тунел-диоду,
 б) Шотки-диоду,
 в) Ценер-диоду,
 г) варикап-диоду.



16. Симбол приказан на слици представља:
 а) фотоосетљиву-диоду,
 б) сигналну диоду,
 в) тунел-диоду,
 г) фотоемитујућу диоду (*LED*).



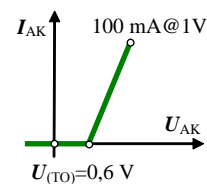
17. Симбол приказан на слици представља:
 а) фотоосетљиву-диоду,
 б) сигналну диоду,
 в) тунел-диоду,
 г) фотоемитујућу диоду (*LED*).



18. Симбол приказан на слици представља:
 а) није понуђен тачан одговор,
 б) сигналну диоду,
 в) тунел-диоду,
 г) фотоемитујућу диоду (*LED*).

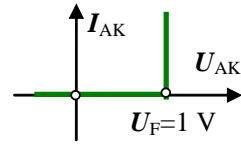
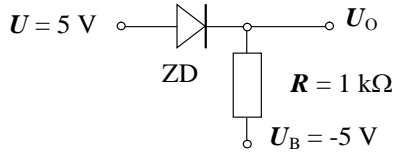


19. На слици је приказана линеаризована статичка карактеристика диоде. Динамичка отпорност ове диоде у проводном стању једнака је :
 а) 4Ω , б) 10Ω ,
 в) 40Ω , г) није понуђен тачан одговор.



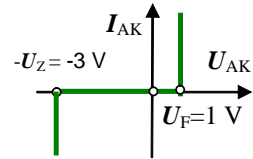
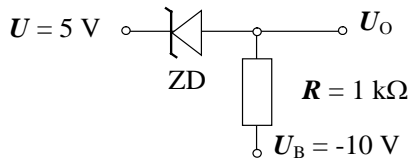
20. Ако се карактеристика диоде, у колу приказаном на слици, може представити датим дијаграмом, напон U_o једнак је :

а) -5 V , б) -4 V , в) 4 V , г) није понуђен тачан одговор.



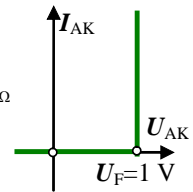
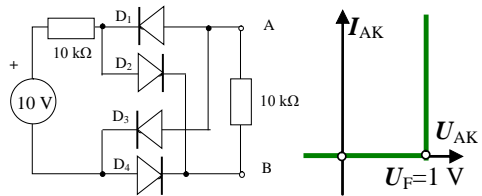
21. Ако се карактеристика Ценер-диоде, у колу приказаном на слици, може представити датим дијаграмом, напон U_o једнак је :

а) -10 V , б) -2 V , в) 2 V , г) 4 V .



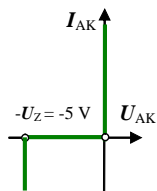
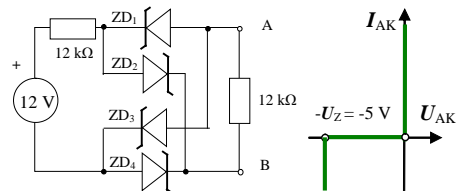
22. Напон U_{AB} на излазу кола приказаног на слици једнак је:

а) -8 V ,
б) -4 V ,
в) 4 V ,
г) 8 V .

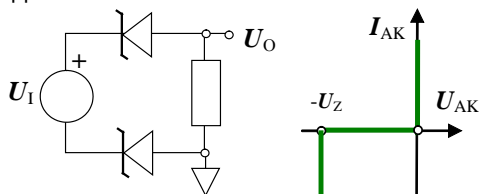


23. Напон U_{AB} на излазу кола приказаног на слици једнак је:

а) -6 V ,
б) -5 V ,
в) 5 V ,
г) 6 V .

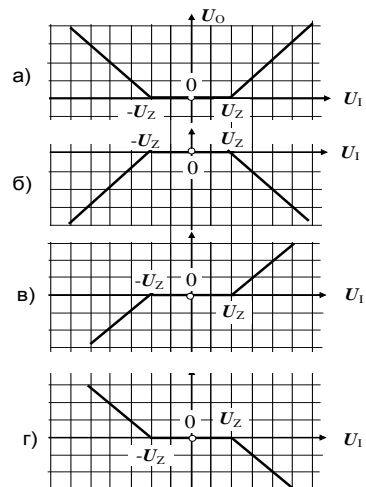


24. У колу приказаном на слици примењене су Ценер-диоде чија линеаризована карактеристика има дати облик.

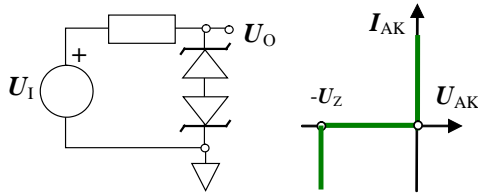


Карактеристика преноса овог кола, $U_o(U_1)$, приказана је дијаграмом означеним са:

а), б), в), г).

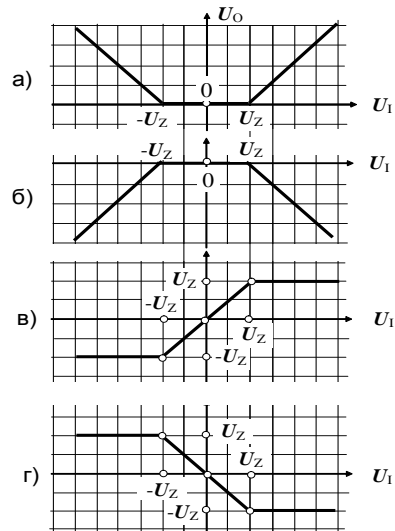


25. У колу приказаном на слици примењене су Ценер-диоде чија линеаризована карактеристика има дати облик.



Карактеристика преноса овог кола, $U_0(U_1)$, приказана је дијаграмом означеним са:

- а), б), в), г).



8.3. БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

- На слици је приказан симбол који представља:

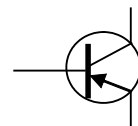
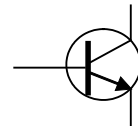
 - PNP биполарни транзистор,
 - NPN биполарни транзистор,
 - транзистор са ефектом поља,
 - није понуђен тачан одговор.
- Симбол приказан на слици представља:

 - PNP биполарни транзистор,
 - NPN биполарни транзистор,
 - транзистор са ефектом поља,
 - није понуђен тачан одговор.
- Када биполарни транзистор NPN -типа делује као трополни појачавачки елемент, физички смер струје је:

 - од базе према емитору,
 - од емитора према бази,
 - зависи од поларитета извора за напајање.
- Када биполарни транзистор PNP -типа делује као трополни појачавачки елемент, физички смер струје је:

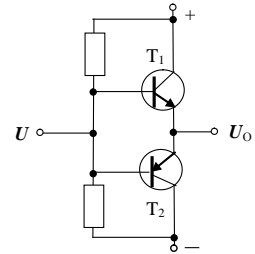
 - од базе према емитору,
 - од емитора према бази,
 - зависи од поларитета извора за напајање.
- Инверзна струја колекторског споја биполарног транзистора:

 - мења се занемарљиво мало са променама температуре споја,
 - повећава се приближно два пута, при повећању температуре за 10°C ,
 - смањује се приближно два пута, при повећању температуре за 10°C .



6. Појачање струје од базе до колектора, β , у хибридном h -моделу биполарног транзистора представљено је параметром:
 а) h_{fb} , б) h_{fe} , в) h_{ib} , г) h_{ie} .
7. Појачање струје од емитора до колектора, α , у хибридном h -моделу биполарног транзистора представљено је параметром:
 а) h_{fb} , б) h_{fe} , в) h_{ib} , г) није понуђен тачан одговор.

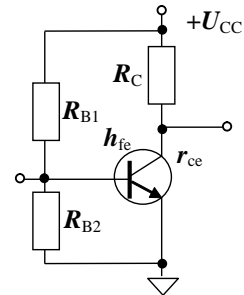
8. На слици је приказан појачавач напона са комплементарним биполарним транзисторима. Највећа (теоријска) вредност степена искоришћења овог појачавача је:



- а) 25 %,
 б) 50 %,
 в) 78,5 %,
 г) није понуђен тачан одговор.

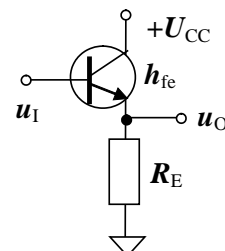
9. Скраћеница којом се означавају биполарни транзистори је:
 а) BJT , б) FET , в) UJT , г) није понуђен тачан одговор.

10. На слици је приказан појачавач напона са транзистором чији су параметри, појачање струје од базе до колектора h_{fe} , и излазна отпорност r_{ce} , познати. Излазна отпорност овог појачавача једнака је:



- а) $R_C + r_{ce}$,
 б) r_{ce} ,
 в) $R_C \parallel r_{ce}$,
 г) није понуђен тачан одговор.

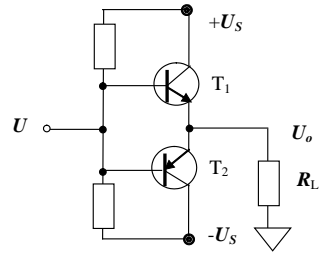
11. На слици је приказан појачавач напона са транзистором у споју са заједничким колектором. Ако је појачање струје од базе до колектора транзистора једнако h_{fe} , улазна отпорност овог појачавача једнака је:



- а) R_E ,
 б) $\frac{R_E}{1 + h_{fe}}$,
 в) $R_E(1 + h_{fe})$,
 г) није понуђен тачан одговор.

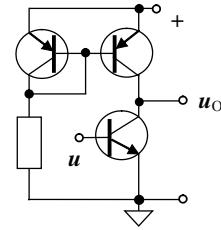
12. Коло приказано на слици представља:

- а) инвертујући појачавач са биполарним транзисторима,
- б) неинвертујући појачавач са биполарним транзисторима,
- в) извор струје управљан напонам,
- г) није понуђен тачан одговор.



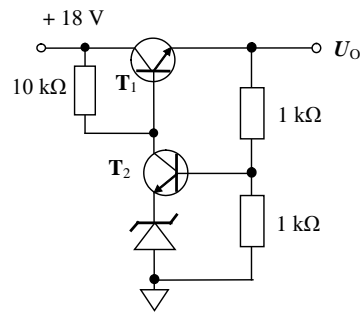
13. Коло приказано на слици представља:

- а) инвертујући појачавач са комплементарним транзисторима,
- б) неинвертујући појачавач са комплементарним транзисторима,
- в) извор струје управљан напонам,
- г) није понуђен тачан одговор.



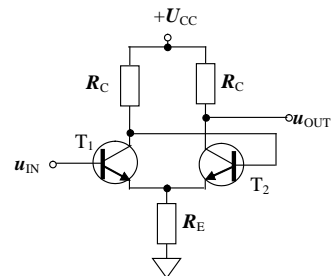
14. У колу приказаном на слици примењени су силицијумски транзистори. Појачање струје од базе до колектора транзистора T_2 довољно велико да се струја базе може занемарити. Ако је напон инверзно пробоја Ценер-диоде једнак 5 V, напон на излазу кола једнак је (приближно):

- а) 11,2 V; б) 10 V;
- в) 8,8 V; г) 5 V.



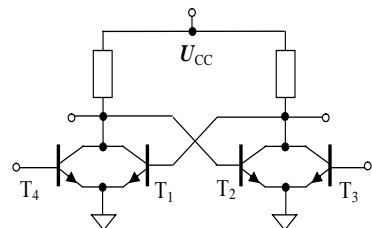
15. Коло приказано на слици представља:

- а) инвертујући појачавач,
- б) неинвертујући појачавач,
- в) диференцијални појачавач,
- г) компаратор са хистерезисом.

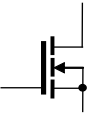
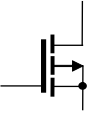
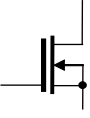
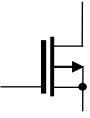


16. Коло приказано на слици представља:

- а) диференцијални појачавач,
- б) диференцијални компаратор,
- в) бистабилни елемент,
- г) није понуђен тачан одговор.

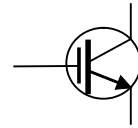


8.4. ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

1. Скраћеница којом се означавају транзистори са ефектом поља је:
 - а) *BJT*, б) *FET*, в) *UJT*, г) није понуђен тачан одговор.
2. Електрична струја кроз канал транзистора са ефектом поља се остварује усмереним кретањем:
 - а) електрона, б) електрона и шупљина истовремено,
 - в) само електрона или само шупљина, зависно од врсте транзистора.
3. Скраћеница *JFET* означава:
 - а) транзистор са ефектом поља са подстакнутим (индукованим) каналом,
 - б) транзистор са ефектом поља са изолованим гејтом,
 - в) транзистор са ефектом поља који садржи *PN*-спој,
 - г) није понуђен тачан одговор.
4. На слици је приказан *IEC*-симбол који представља:
 - а) *N*-канални *MOS*-транзистор са уграђеним каналом,
 - б) *N*-канални *MOS*-транзистор са подстакнутим (индукованим) каналом,
 - в) *N*-канални спојни транзистор са ефектом поља,
 - г) није понуђен тачан одговор.
5. На слици је приказан *IEC*-симбол који представља:
 - а) *P*-канални *MOS*-транзистор са уграђеним каналом,
 - б) *P*-канални *MOS*-транзистор са подстакнутим (индукованим) каналом,
 - в) *P*-канални спојни транзистор са ефектом поља,
 - г) није понуђен тачан одговор.
6. На слици је приказан *IEC*-симбол који представља:
 - а) *N*-канални *MOS*-транзистор са уграђеним каналом,
 - б) *N*-канални *MOS*-транзистор са подстакнутим (индукованим) каналом,
 - в) *N*-канални спојни транзистор са ефектом поља,
 - г) није понуђен тачан одговор.
7. На слици је приказан *IEC*-симбол који представља:
 - а) *P*-канални *MOS*-транзистор са уграђеним каналом,
 - б) *P*-канални *MOS*-транзистор са подстакнутим (индукованим) каналом,
 - в) *P*-канални спојни транзистор са ефектом поља,
 - г) није понуђен тачан одговор.

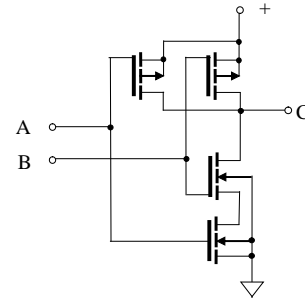
8. На слици је приказан симбол који представља:

- а) *NPN* биполарни транзистор,
- б) *N*-канални транзистор са изолованим гејтом,
- в) биполарни транзистор са изолованим гејтом,
- г) није понуђен тачан одговор.



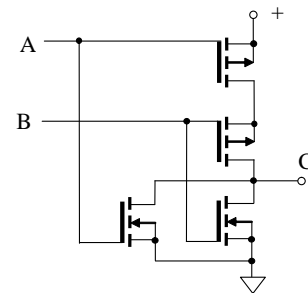
9. На слици је приказано коло са комплементарним *MOS*-транзисторима које представља:

- а) логичко И-коло, $C = A \cdot B$,
- б) логичко ИЛИ-коло, $C = A + B$,
- в) логичко НИЛИ-коло, $C = \overline{A + B}$,
- г) није понуђен тачан одговор.



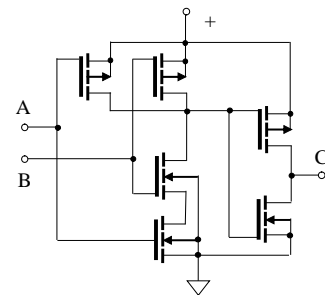
10. На слици је приказано коло са комплементарним *MOS*-транзисторима које представља:

- а) логичко И-коло, $C = A \cdot B$,
- б) логичко ИЛИ-коло, $C = A + B$,
- в) логичко НИ-коло, $C = \overline{A \cdot B}$,
- г) логичко НИЛИ-коло, $C = \overline{A + B}$.



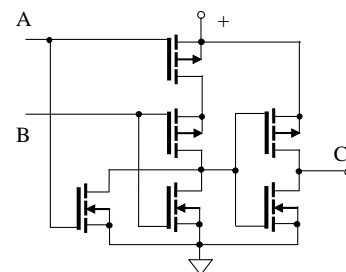
11. На слици је приказано коло са комплементарним *MOS*-транзисторима које представља:

- а) логичко И-коло, $C = A \cdot B$,
- б) логичко ИЛИ-коло, $C = A + B$,
- в) логичко НИЛИ-коло, $C = \overline{A + B}$,
- г) није понуђен тачан одговор.



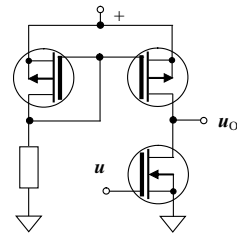
12. На слици је приказано коло са комплементарним *MOS*-транзисторима које представља:

- а) логичко И-коло, $C = A \cdot B$,
- б) логичко ИЛИ-коло, $C = A + B$,
- в) логичко НИ-коло, $C = \overline{A \cdot B}$,
- г) логичко НИЛИ-коло, $C = \overline{A + B}$.



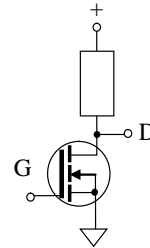
13. Коло приказано на слици представља:

- а) инвертујући појачавач са комплементарним транзисторима,
 б) неинвертујући појачавач са комплементарним транзисторима,
 в) извор струје управљан напонам,
 г) није понуђен тачан одговор.



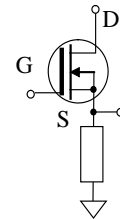
14. Коло приказано на слици представља:

- а) инвертујући појачавач са N -каналним транзистором са уграђеним каналом,
 б) неинвертујући појачавач са N -каналним транзистором са уграђеним каналом,
 в) инвертујући појачавач са N -каналним транзистором са подстакнутим каналом,
 г) није понуђен тачан одговор.



15. Коло приказано на слици представља:

- а) инвертујући појачавач са N -каналним транзистором са уграђеним каналом,
 б) неинвертујући појачавач са N -каналним транзистором са уграђеним каналом,
 в) инвертујући појачавач са N -каналним транзистором са подстакнутим каналом,
 г) није понуђен тачан одговор.



16. Када је напон између гејта и сорса једнак нули, спојни транзистор са ефектом поља ($JFET$) је:

- а) проводан, б) непроводан,
 в) зависи од типа транзистора.

17. Када је напон између гејта и сорса једнак нули, MOS -транзистор са уграђеним каналом је:

- а) проводан, б) непроводан,
 в) зависи од типа транзистора.

18. Када је напон између гејта и сорса једнак нули, MOS -транзистор са подстакним (индукованим) каналом је:

- а) проводан, б) непроводан,
 в) зависи од типа транзистора.

19. Скраћеница $IGBT$ означава:

- а) биполарни транзистор,
 б) биполарни транзистор са изолованим гејтом,
 в) транзистор са ефектом поља који садржи PN -спој,
 г) није понуђен тачан одговор.

8.5. ТИРИСТОРИ

1. Скраћеница *SCR* (*silicon controlled rectifier*) означава:
 - а) диодни тиристор,
 - б) симетрични диодни тиристор,
 - в) триодни тиристор *N*-типа,
 - г) триодни тиристор *P*-типа.

2. Скраћеница *SCS* (*silicon controlled switch*) означава:
 - а) диодни тиристор,
 - б) триодни тиристор,
 - в) тиристорски прекидач са два гејта,
 - г) није понуђен тачан одговор.

3. Триак (*triac*) је назив за:
 - а) диодни тиристор,
 - б) симетрични диодни тиристор,
 - в) триодни тиристор,
 - г) симетрични триодни тиристор.

4. Диак (*diac*) је назив за:
 - а) диодни тиристор,
 - б) симетрични диодни тиристор,
 - в) триодни тиристор,
 - г) симетрични триодни тиристор.

5. Тиристори се производе од:
 - а) германијума,
 - б) силицијума,
 - в) галијум-арсенида,
 - г) није понуђен тачан одговор.

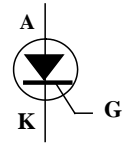
6. На слици је приказан симбол који представља:
 - а) диодни тиристор,
 - б) симетрични диодни тиристор,
 - в) триодни тиристор *N*-типа,
 - г) триодни тиристор *P*-типа.

7. На слици је приказан симбол који представља:
 - а) диодни тиристор,
 - б) симетрични диодни тиристор,
 - в) триодни тиристор *N*-типа,
 - г) триодни тиристор *P*-типа.



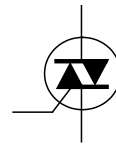
8. На слици је приказан симбол који представља:

- а) диодни тиристор,
- б) симетрични диодни тиристор,
- в) триодни тиристор N-типа,
- г) триодни тиристор P-типа.



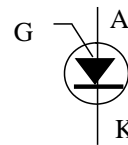
9. На слици је приказан симбол који представља:

- а) диодни тиристор,
- б) симетрични диодни тиристор,
- в) симетрични триодни тиристор,
- г) није понуђен тачан одговор.



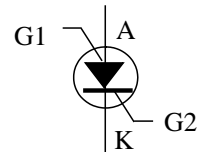
10. На слици је приказан симбол који представља:

- а) диодни тиристор,
- б) триодни тиристор P-типа,
- в) триодни тиристор N-типа,
- г) није понуђен тачан одговор.



11. На слици је приказан симбол који представља:

- а) диодни тиристор,
- б) симетрични диодни тиристор,
- в) симетрични триодни тиристор,
- г) није понуђен тачан одговор.



8.6. ОДГОВОРИ**УВОД У ЕЛЕКТРОНИКУ**

1 в)	9 г)	17 б)	25 б)
2 а)	10 б)	18 в)	26 б)
3 г)	11 б)	19 б)	27 а)
4 б)	12 а)	20 а)	28 б)
5 а)	13 б)	21 а)	
6 а)	14 а)	22 в)	
7 в)	15 а)	23 а)	
8 б)	16 а)	24 а)	

ДИОДЕ

1 б)	9 б)	17 а)	25 в)
2 а)	10 в)	18 а)	
3 в)	11 а)	19 а)	
4 б)	12 в)	20 в)	
5 в)	13 г)	21 в)	
6 б)	14 б)	22 б)	
7 а)	15 г)	23 б)	
8 в)	16 г)	24 а)	

БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

1 б)	5 б)	9 а)	13 а)
2 а)	6 б)	10 в)	14 а)
3 а)	7 а)	11 в)	15 г)
4 б)	8 в)	12 б)	16 в)

ТРАНЗИСТОРИ СА ЕФЕКТОМ ПОЉА

1 б)	6 а)	11 а)	16 а)
2 в)	7 а)	12 б)	17 а)
3 в)	8 в)	13 а)	18 б)
4 б)	9 г)	14 в)	19 б)
5 б)	10 г)	15 б)	

ТИРИСТОРИ

1 г)	4 б)	7 б)	10 в)
2 в)	5 б)	8 г)	11 г)
3 г)	6 а)	9 в)	

9.

ЕЛЕМЕНТИ АНАЛИЗЕ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛА

У овом поглављу разматрају се основни појмови који се при анализи и пројектовању електронских кола и система користе за описивање њихових својстава, као и појава које се у њима дешавају. Објашњења су заснована на међународно усаглашеним дефиницијама¹. Првенствено су коришћени речници појмова и дефиниција које је објавила Међународна електротехничка комисија² [1], [2].

Полазећи од дефиниција савршених (идеалних) елемената анализирана су њихова својства, као и својства основних кола образованих од савршених елемената.

9.1. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

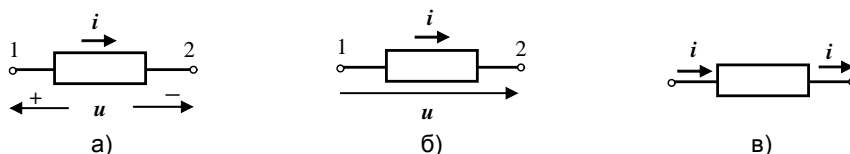
У најопштијем смислу, електрично коло (*electric circuit*) представља скуп уређаја или средина у којима могу постојати електричне струје [3]. У теорији кола под појмом коло подразумева се скуп повезаних елемената. Електрично коло је коло које се састоји само од електричних елемената. Елемент кола (*circuit element*) је његов саставни део који се не може поделити на мање делове, а да не изгуби своја карактеристична својства. Тачка електричног елемента/кола одређена за повезивање (спајање) са другим елементима/коlima представља **прикључак** (*terminal*). Елемент који има само два прикључка назива се двополни елемент³ [4].

¹ Важност усаглашене стручне терминологије у међународним контактима, при размени идеја и производа, сагледана је веома давно. Први међународни електротехнички речник, у облику листе електротехничких термина са дефиницијама, објављен је још 1913. године. Седамдесет година касније објављено је прво издање Вишејезичког електротехничког речника. Друго, проширено издање, објављено 1992. године, које обухвата 70 термилошких стандарда са око 18 000 термина, преведено је на српски језик..

² Међународна електротехничка комисија (*International Electrotechnical Commission - IEC*), основана је 1906. године са циљем остваривања међународне сарадње на питањима стандардизације у области електротехнике и електронике. *IEC* је организација која се бави стандардизацијом, а коју сачињавају Национални комитети појединих земаља чланица. Задатак ове организације, чији је први председник био лорд Келвин (*William Thomson*), је да иницира или унапређује међународну сарадњу по свим питањима која се односе на стандардизацију у области електротехнике и електронике. Одлуке које *IEC* доноси о одређеним техничким питањима у облику стандарда, техничких извештаја и упутстава, изражавају, у што је могуће већој мери, међународни консензус мишљења у тој области и имају природу препорука за међународно коришћење које поједине земље прихватају у оквирима које одређују поједини конкретни услови.

³ Елемент са два краја, двокрајни елемент, двопол (*2-terminal circuit element, elementarer Zweipol*). Пол (*Anschlusspunkt, Pol*) електричног елемента (кола) је тачка одређена за прикључивање (везу са другим елементима)

Електромагнетски процеси у електронским елементима, колима и системима описују се помоћу појмова "напон" и "струја". У најопштијем случају, елемент са два прикључка се графички представља правоугаоником. На прикључцима се посматрају две величине: електрични напон u и електрична струја i (слика 9.1.а).



Слика 9.1. Елемент са два прикључка

Напон u се дефинише као разлика потенцијала⁴ крајева елемента:

$$u = u_{11'} = V_1 - V_{1'}. \quad (9.1)$$

Прикључак на вишем потенцијалу обележава се са "+", или се назначавача оријентацијом стрелице, која је у стандардима међународне електротехничке комисије (IEC) усмерена ка тачки нижег потенцијала (од прикључка на вишем потенцијалу ка прикључку на нижем потенцијалу, слика 9.1.б).

Електрична струја i описује брзину преношења (проток) наелектрисања⁵ кроз елемент:

$$i(t) = \frac{dq}{dt}. \quad (9.2)$$

Струја на једном крају једнака је по интензитету, а супротна по смеру струји на другом крају (слика 9.1.в).

Савршени електронски елемент (*ideal element*) је апстрактна представа елемента чија је својствена (карактеристична) величина само један електрични параметар [5].

У анализи електричних кола, активни елемент је елемент чије еквивалентно коло садржи извор електричне енергије [6]. У електроници, под називом "активни елементи" подразумевају се елементи који могу да неком електричном колу, са којим су повезани, приведу енергију већу од енергије коју су преузели из кола које управља њиховим стањем. Трополни активни елементи су триода, биполарни транзистор и транзистор са ефектом поља.

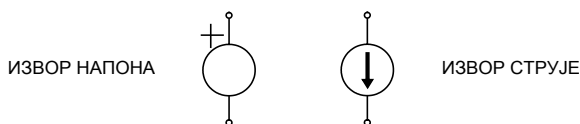
⁴ Потенцијал електричног поља је скаларна величина која одражава енергијско стање простора. Електрични потенцијал бројно је једнак електростатичкој потенцијалној енергији коју поседује јединична количина наелектрисања у датој тачки поља.

⁵ Наелектрисање је адитивна скаларна физичка величина величина, уведена аксиоматски да би се формулисала одређена међусобна дејства опажена експериментално. У литератури се користе и називи: количина електрицитета, електрични набoj (*electric charge*) електрично оптерећење (*elektrische Ladung*), електрични товар (*електрический заряд*).

Извор напона (*voltage source*) је активни елемент са два краја чију карактеристичну величину представља разлика потенцијала његових крајева. У општем случају вредност овог напона може да се мења у времену. **Савршени извор напона** је такав (активни) елемент код којег напон између приступних крајева не зависи од струје која протиче кроз грану у којој се елемент налази.

Извор струје (*current source*) је елемент код којег електрична струја представља карактеристичну величину. **Савршени извор струје** је активни елемент код којег струја, која кроз њега протиче, не зависи од напона између његових крајева.

Графички симболи, којима се у овој књизи представљају савршени извори напона и струје, приказани су на слици 9.2.



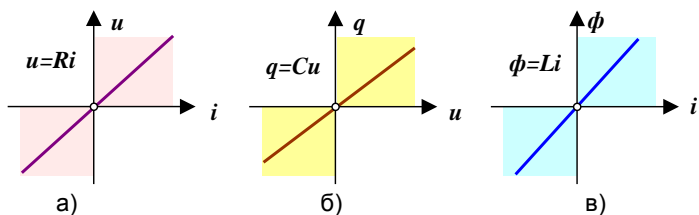
Слика 9.2. Савршени активни елементи

Пасивни елемент је елемент у којем уложена енергија може бити само позитивна или нула. Пасивно електрично коло је коло које садржи само пасивне елементе.

Пасивни елементи се могу представити помоћу три карактеристична параметра.

- **отпорност** симболизује процес неповратног претварања електричне енергије у неки други облик (механичку, топлотну, светлосну⁶).
- **индуктивност** симболизује процес нагомилавања магнетске енергије.
- **капацитивност** симболизује нагомилавање електростатичке енергије.

Графички приказ односа између две величине, којима се описује стање елемента, назива се **карактеристика елемента**⁷. На слици 9.3. приказане су статичке карактеристике савршених елемената са два краја: а) отпорника, б) кондензатора и в) калема.



Слика 9.3. Карактеристике савршених пасивних елемената

⁶ Елементи у којима се овакав процес одвија називају се потрошачи. У односу на извор енергије у посматраном колу, они представљају оптерећење (*load*). У најопштијем смислу, у потрошаче се може убрајати и предајна антена, која електромагнетску енергију, добијену од стране одговарајућег електронског уређаја, зрачењем преноси у околни простор.

⁷ Од грчке речи *character* - ознака, обележје, особина, оно чиме се нака ствар или човек нарочито одлукују, разликују од других ствари или људи. У литератури се често под називом "карактеристика елемента" подразумева и аналитички израз којим је приказан однос две величине.

Савршени отпорник (*ideal resistor*) је пасивни елемент са два краја у којем је тренутна вредност струје, која кроз њега протиче, сразмерна тренутној вредности напона између његових крајева [7]. Карактеристични параметар савреног отпорника, је електрична отпорност (*resistance*), R , која се дефинише количником тренутних вредности напона и струје:

$$R = \frac{u_R(t)}{i_R(t)}. \quad (9.3)$$

Смер струје кроз отпорник је увек од тачке која се налази на вишем потенцијалу ка тачки која се налази на нижем потенцијалу.

Савршени кондензатор (*ideal capacitor*) је пасивни елемент са два краја код којег је брзина промене напона између његових крајева сразмерна тренутној вредности струје у грани у којој се он налази [8].

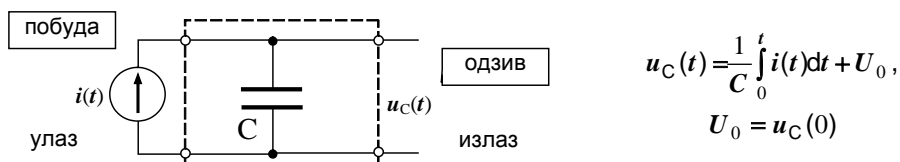


Слика 9.4. Савршени кондензатор

Карактеристични параметар савреног кондензатора је капацитивност (*capacitance*), C , која се дефинише количником струје $i_C(t)$ и извода напона $u_C(t)$:

$$C = \frac{i_C(t)}{\frac{du_C}{dt}}. \quad (9.4)$$

Ако се струја кроз кондензатор посматра као побуда (*stimulus*) а напон на његовим крајевима као одзив (*response*), савршени кондензатор представља електрични интегратор.



Слика 9.5. Савршени кондензатор као интегратор

Промена напона на крајевима кондензатора, Δu_C , настала услед промене наелектрисања његових плоча, Δq , остварене током временског интервала Δt , у току којег се може сматрати да струја i_C има сталан интензитет, одређена је изразом:

$$\Delta u = \frac{1}{C} \Delta q = \frac{i}{C} \Delta t. \quad (9.5)$$

То значи да се у стварним условима рада (при ограниченој вредности струје i_C која протиче кроз кондензатор), напон на његовим крајевима не може тренутно да промени (**теорема о непрекидности напона између крајева кондензатора**):

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta u = 0. \quad (9.6)$$

Савршени калем (*ideal inductor*) је пасивни елемент са два краја код којег је тренутна вредност напона између његових крајева сразмерна брзини промене струје у грани у којој се он налази [9].



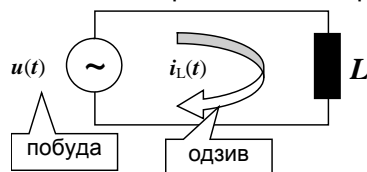
Слика 9.6. Савршени калем

$$u_L(t) = L \frac{di_L}{dt}$$

Карактеристични параметар савреног калема је индуктивност (*inductance*), L , која се дефинише количником напона $u_L(t)$ и извода струје $i_L(t)$:

$$L = \frac{u_L(t)}{\frac{di_L}{dt}}. \quad (9.7)$$

Ако се напон на крајевима калема посматра као побуда, а струја кроз калем као одзив, савршени калем представља електрични интегратор.



$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} u(t), \quad i_L(0) = I_0$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(t) dt + I_0,$$

Слика 9.7. Савршени калем као интегратор

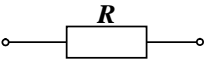
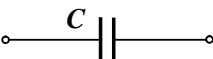
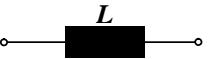
Промена струје кроз калем, Δi_L , остварена током временског интервала Δt , у току којег се може сматрати да напон u_L има сталан интензитет, одређена је изразом:

$$\Delta i_L = \frac{u}{L} \Delta t, \quad (9.8)$$

из којег следи да у стварним условима рада (при ограниченој вредности напона на калему, струја кроз калем не може да се промени тренутно (**теорема о непрекидности струје кроз калем**)):

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta i = 0. \quad (9.9)$$

У табели 9.1. су приказани графички симболи којима се у овој књизи представљају савршени пасивни елементи, одговарајуће дефиниционе једначине, као и својства ових елемената са једним приступом.

	Отпорник	Кондензатор	Калем
графички симбол			
дефиниција	$R = \frac{u(t)}{i(t)}$	$C = \frac{i(t)}{\frac{du}{dt}}$	$L = \frac{u(t)}{\frac{di}{dt}}$
напон	$u(t) = Ri(t)$	$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_0$	$u(t) = L \frac{di}{dt}$
снага/енергија	$p = Ri^2$	$w_c = \frac{1}{2} Cu^2$	$w_L = \frac{1}{2} Li^2$

Табела 9.1. Савршени пасивни елементи са два краја

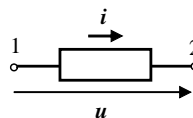
Кондензатор и калем представљају реактивне елементе, који имају способност нагомилавања електричне енергије. Веза између струје и напона на приступу савршених реактивних елемената се описује диференцијалном једначином првог реда:

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt}, \quad \text{односно} \quad u_L(t) = L \frac{di_L}{dt}.$$

У кондензатору се електрична енергија сакупља у облику електростатичке енергије. У калему се електрична енергија сакупља у облику магнетске енергије. У електронским колима ови елементи се користе за остваривање операција диференцирања и интеграције временских функција.

За усвојене референтне смерове улазна електрична снага $p(t)$ елемента са два краја одређена је формулом:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (9.10)$$



Када је снага $p(t)$ позитивна, елемент прима енергију. Када је снага $p(t)$ негативна, елемент одаје енергију.

9.2. RC-КОЛО

Анализа електричних кола, образованих од савршених активних и пасивних елемената, своди се на проблем решавања система линеарних диференцијалних једначина са константним коефицијентима. Иако су стварне (физичке) компоненте електричних кола начином свог рада у основи нелинеарне, у већини случајева нелинеарности су такве природе да је могуће поставити линеаран математички модел који са задовољавајућом тачношћу апроксимира понашање посматраног система у радном опсегу од интереса.

Једноставна RC -мрежа, образована редном везом савршеног кондензатора и савршеног отпорника, прикључена на извор напона представља основни облик динамичког система: RC -коло. Математички

модел овог кола представља линеарна диференцијална једначина првог реда. Познавање његових својстава представља полазну основу за сагледавање и разумевање сложених електронских система, сачињених од пасивних и активних електронских елемената.

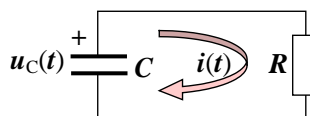
9.2.1. ПРАЖЊЕЊЕ КОНДЕНЗАТОРА

У петљи која садржи један савршени кондензатор и један савршени отпорник електрична струја може да постоји само уколико постоји разлика потенцијала између крајева кондензатора, односно уколико је у кондензатору садржана извесна енергија, акумулисана у неком претходном процесу.

За коло на слици важе једначине:

$$i(t) = -C \frac{du_C}{dt}, \text{ и}$$

$$i(t) = \frac{u_C(t)}{R}.$$



Математички модел посматраног кола је хомогена диференцијална једначина првог реда:

$$u_C + RC \frac{du_C}{dt} = 0, u_C(0) = U_0, \quad (9.11)$$

где је U_0 вредност напона $u_C(t)$ у почетном тренутку $t = 0$.

Решење ове диференцијалне једначине је експоненцијална функција⁸:

$$u_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (9.12)$$

Дакле, напон између крајева кондензатора, који се празни кроз отпорник сталне отпорности, опада по експоненцијалном закону. Почетна вредност напона одређена је енергијом, $W_C(0)$, која је била садржана у кондензатору у почетном тренутку:

$$U_0 = u_C(0) = \sqrt{\frac{2W_C(0)}{C}}.$$

Ова енергија се, током процеса пражњења, претвара у топлоту у отпорнику R и неповратно губи⁹. Процес пражњења траје докле докле год има енергије у кондензатору. Вредност којој напон $u_C(t)$ тежи, када $t \rightarrow \infty$, једнака је нули.

Струја у посматраном колу, $i(t)$, такође опада по експоненцијалном закону:

⁸ Експоненцијална функција је "природна" функција којом се могу представити различити процеси у природи. Функција 9.11 се назива "функција природног опадања".

⁹ Процес преношења наелектрисања кроз проводну средину праћено је ослобађањем топлоте. Ова појава се назива Џулов ефекат.

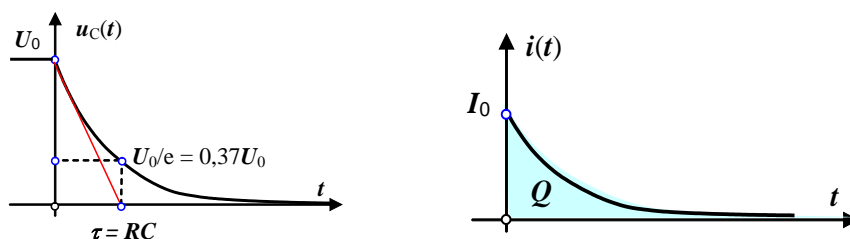
$$i(t) = \frac{u_C(t)}{R} = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (9.13)$$

Почетна вредност ове струје, I_0 , одређена је почетном вредношћу напона $u_C(0)$:

$$I_0 = i(0) = \frac{u_C(0)}{R} = \frac{U_0}{R}.$$

Таласни облици¹⁰ напона, $u_C(t)$, и струје, $i(t)$, у посматраном колу приказани су на слици 9.8. Површина испод криве $i(t)$ једнака је наелектрисању које је било ускладиштено у кондензатору тренутку $t = 0$:

$$\int_0^{\infty} i(t) dt = Q = CU_0.$$



Слика 9.8. Процес пражњења кондензатора

Величина $\tau = RC$ назива се **временска константа** кола. Нагиб функције $u_C(t)$ у почетном тренутку једнак је:

$$\left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{U_0}{RC} = -\frac{U_0}{\tau}.$$

Константа τ одређује одсечак на временској оси који прави тангента на криву $u_C(t)$, повучена у тачки која одговара почетном тренутку $t = 0$. Другим речима, када би се кондензатор празнио сталном струјом, која је једнака струји у почетном тренутку, процес пражњења би се завршио након временског интервала τ . Стварна вредност напона $u_C(t)$ у тренутку $t = \tau$ једнака је:

$$u_C(\tau) = U_0 e^{-1} = \frac{U_0}{e} = 0,368U_0.$$

Након истека временског интервала $t = 5\tau$ напон $u_C(t)$ опадне на мање од 1% почетне вредности.

9.2.2. ПУЊЕЊЕ КОНДЕНЗАТОРА

Математички модел кола које се састоји од извора напона U , отпорника R и кондензатора C , чине једначине:

¹⁰ Талас (wave) је промена физичког стања средине, која се простире у простору, као резултат неког локалног дејства. Таласни облик (waveform) је представа функције којом је дефинисан талас.

$$U = u_C(t) + u_R(t),$$

$$u_R(t) = Ri(t), \text{ и}$$

$$i(t) = C \frac{du_C}{dt},$$

на основу којих следи:

$$C \frac{du_C}{dt} = \frac{u_R(t)}{R} = \frac{u(t) - u_C(t)}{R}.$$

Сређивањем се добија се диференцијална једначина којом је одређен напон између крајева кондензатора:

$$u_C + RC \frac{du_C}{dt} = u(t). \quad (9.14)$$

Решење ове једначине за $t > 0$ зависи од облика функције $u(t)$ и вредности напона $u_C(t)$ у почетном тренутку:

$$U_0 = u_C(0).$$

Ако напон $u(t)$ за $t > 0$ има сталну вредност U , функција $u(t)$ може да се представи у облику:

$$u(t) = Uh(t),$$

где је $h(t)$ Хевисајдова одскачна функција:

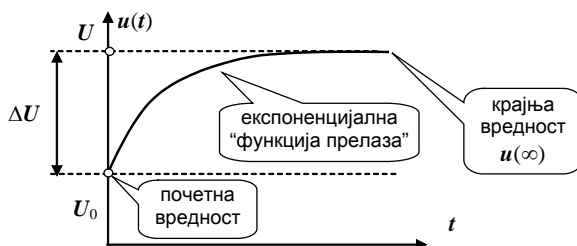
$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{за } t \geq 0 \\ 0 & \text{за } t < 0 \end{cases}.$$

Решење диференцијалне једначине:

$$u_C + RC \frac{du_C}{dt} = U, u_C(0) = U_0, \quad (9.15)$$

је експоненцијална функција времена (слика 9.9):

$$u_C(t) = U_0 + (U - U_0)(1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (9.16)$$



Слика 9.9. Процес пуњења кондензатора

Функција $u_C(t)$ може да се представи у облику:

$$u_C(t) = U_0 + \Delta U \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \quad (9.17)$$

где је ΔU опсег промене напона $u_C(t)$, од почетне вредности, U_0 , до вредности U , која представља напон извора из којег се кондензатор пуни кроз отпорник сталне отпорности R :

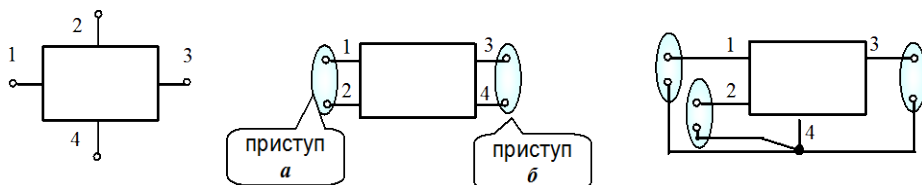
$$\Delta U = U - U_0 = u_C(\infty) - u_C(0).$$

Израз 9.11 може да се посматра као посебан облик који се добија из израза 9.16 када је напон U једнак нули.

9.3. АНАЛИЗА ЕЛЕКТРОНСКИХ КОЛА

Елементи електронских кола имају извучене крајеве намењене за спајање са другим елементима. Крајева (прикључака) има најмање два, а може их бити и више. Два извучена краја могу да представљају **приступ** (*port*) преко којег се у електричном погледу приступа елементу. Елемент не може имати везе са другим елементима осим преко својих приступа.

Елемент са више од два прикључка може да се повеже са другим елементима на више начина. Вишкрајни елементи са истим бројем прикључака могу да имају различити број приступа, зависно од функционалних карактеристика елемента. На пример, четворокрајни елемент (слика 9.10.а) може да буде елемент са два (9.10.б) или три приступа (9.10.в). Елемент са два приступа може да има три или четири краја¹¹.



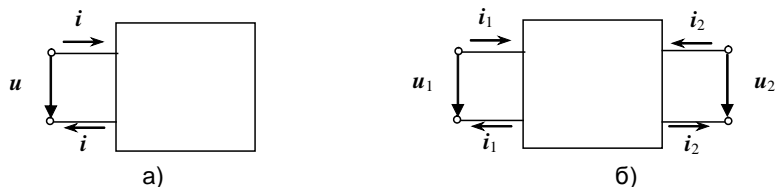
Слика 9.10. Елемент са четири краја

У анализи електричних кола, **мрежа** (*network*) је скуп повезаних елемената посматран као целина која се може представити гранама и чворовима¹² [10], [11]. **Грана** (*branche*) је део мреже, састављен од једног или више елемената, посматран као мрежа са два краја [12]. **Чвор** (*node*) је крајња тачка мреже или тачка спајања две или више грана [13]. Крај мреже је

¹¹ Групи трополних елемената са два приступа припадају електронска цев са три електроде (триода), транзистори и триодни тиристори.

¹² Понекад се под називом “електрична мрежа” подразумева скуп тако повезаних елемената да се струја у елементима не може да успостави уколико се не изврши повезивање крајева мреже. Таква веза елемената не представља електрично коло. Скуп електричних елемената повезаних тако да образују затворене путеве (петље, контуре), при чему постоје извучени крајеви преко којих се може остварити повезивање са другим елементима или мрежама, представља електричну мрежу у ширем смислу [9].

чвор мреже који допушта везивање друге мреже. Улазни крајеви мреже су везани за спољашње електрично коло или уређај који може да даје енергију или електрични сигнал. Излазни крајеви мреже су везани за спољашње коло или уређај који може да прима електричну енергију или електрични сигнал. Скуп од два краја мреже, такав да су струје у њима једнаке по интензитету, а супротних смерова, представља приступ (слика 9.11) [14].



Слика 9.11. Мрежа са једним и са два приступа

Мрежа са једним приступом је мрежа са два или више крајева од којих су од интереса само два краја који се посматрају као приступ. Мрежа са два приступа је мрежа са четири краја који образују два приступа (слика 9.10). Мрежа са више приступа је мрежа са $2n$ крајева који образују n приступа. Активна електрична мрежа садржи један или више електричних извора. **Симетрична мрежа** са два приступа је мрежа за коју измена улазних крајева са излазним крајевима не утиче на стање у спољашњим колима.

При анализи електронских кола користе се општи закони електротехнике, теореме¹³ које из њих проистичу, као и посебни поступци решавања електричних мрежа¹⁴. Електричне мреже образоване од савршених активних и пасивних елемената, описују се линеарним диференцијалним једначинама са константним коефицијентима. Такве мреже називају се линеарним.

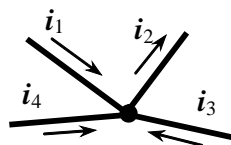
9.3.1. КИРХОФОВА ПРАВИЛА

Струје и напони у једном електронском колу међусобно су повезани Кирхофовим правилима. На основу ових једначина, и једначина које повезују величине на приступима појединих елемената, одређују се напони и струје грана посматраног кола.

Прво Кирхофово правило, засновано на закону о одржању наелектрисања (*conservation of electric charge*), односи се на струје у гранама једног чвора.

Алгебарски збир свих струја у гранама једног чвора једнак је нули.

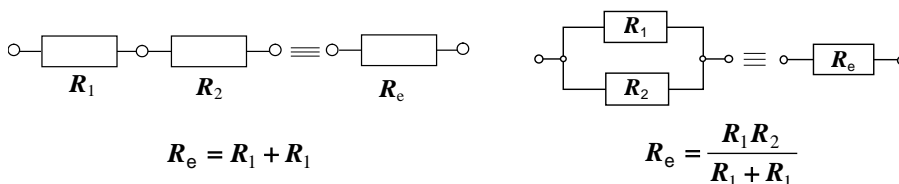
$$\sum_K i_K = 0 \quad (9.18)$$



¹³ Теорема (грч. *theōrēma*) је правило које се може доказати.

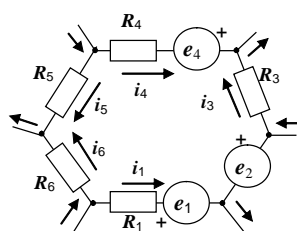
¹⁴ Одређивање стања мреже (напона, струја, снага) назива се анализа мрежа (*network analysis*) 131-02-16.

На основу првог Кирхофовог правила изведени су обрасци за еквивалентну отпорност редне и паралелне везе отпорника.



Друго Кирхофово правило, засновано на закону о одржању енергије (*conservation of energy*), односи се на затворено струјно коло у коме постоји један или више извора електромоторне силе¹⁵.

Алгебарска сума електромоторних и електроотпорних сила на сваком затвореном путу разгранатог кола једнака је нули.

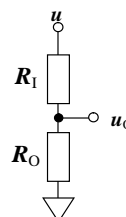


$$\sum_k e_k - \sum_j R_j i_j = 0. \tag{9.19}$$

e_k је електромоторна сила k -тог извора у посматраном колу, а $R_j i_j$ представља електроотпорну силу услед "електричног трења" на отпорнику R_j . У стручној литератури величина $R_j i_j$ се назива "пад напона" (*voltage drop*).

На основу Кирхофових правила изводи се образац за вредност напона на излазу отпорничког делитеља напона:

$$u_o = \frac{R_o}{R_1 + R_o} u.$$

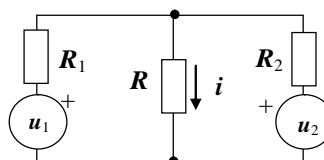


9.3.2. ТЕОРЕМА СУПЕРПОЗИЦИЈЕ

Струја у било којој грани линеарне електричне мреже једнака је алгебарском збиру струја¹⁶, од којих свака представља резултат појединачног деловања сваког од извора енергије у посматраној мрежи.

За мрежу приказану на слици важи:

$$i(u_1, u_2) = i(u_1) \Big|_{u_2 = 0} + i(u_2) \Big|_{u_1 = 0},$$



¹⁵ Назив "електромоторна сила" (*electromotive force*) означава узрок напона између крајева савршеног извора напона у представи активног елемента [1].

¹⁶ Рачунатих у односу на исти референтни смер.

где је:

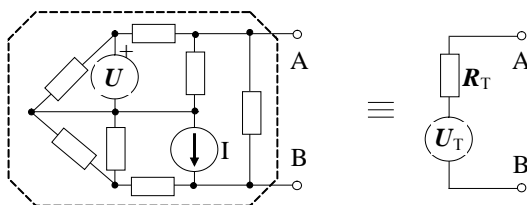
$$i(u_1) \Big|_{u_2=0} = \frac{u_1}{R_1 + R \parallel R_2} \frac{R \parallel R_2}{R} \text{ и}$$

$$i(u_2) \Big|_{u_1=0} = \frac{u_2}{R_2 + R \parallel R_1} \frac{R \parallel R_1}{R}.$$

Стање линеарне мреже може да се посматра као суперпозиција¹⁷ свих могућих “појединачних” стања. При томе се под “појединачним” стањем подразумева стање када у мрежи делује само један од извора енергије, а остали извори су искључени¹⁸.

9.3.3. ТЕВЕНЕНОВА ТЕОРЕМА

Свака активно линеарно сложено електрично коло, које се завршава са два краја, може да се представи једном еквивалентном¹⁹ граном, која је састављена од редне везе савршеног извора напона и отпорника. Електромоторна сила еквивалентног извора напона једнака је напону на отвореним крајевима посматраног кола. Еквивалентна отпорност једнака је отпорности између крајева кола када су сви извори енергије у посматраном колу искључени.



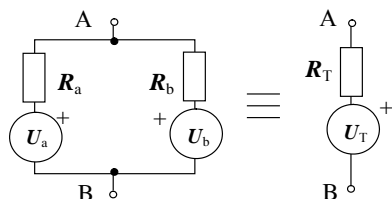
Слика 9.12. Тевененова теорема

У односу на било која своја два краја електрична мрежа се “понаша” као несавршени извор напона (еквивалентни Тевененов извор напона), чија је електромоторна сила једнака напону на тим прикључцима, када су ови отворени, а унутрашња отпорност је једнака еквивалентној отпорности мреже између тих прикључака, гледане са стране улазних прикључака када су све електромоторне силе напонских генератора и све струје струјних генератора у посматраној мрежи једнаке нули.

За мрежу приказану на слици важи:

$$U_T = \frac{U_a R_b}{R_a + R_b} + \frac{U_b R_a}{R_a + R_b},$$

$$R_T = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}.$$



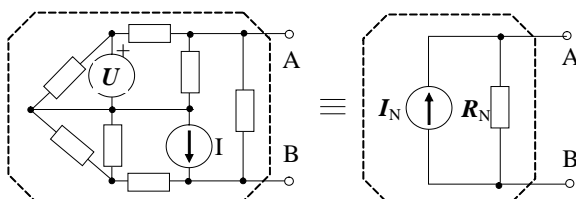
¹⁷ Од лат. *aequi-valens*, једнаковредан, једнаке вредности.

¹⁸ При анализи електричних кола, извор напона се искључује тако што се поништава дејство његове електромоторне силе, што је еквивалентно краткоспајању. Извор струје се искључује прекидањем гране у којој се налази.

¹⁹ Од лат. *superpositio*, стављање једног преко другог, продужавање

9.3.4. НОРТОНОВА ТЕОРЕМА

Свака активно линеарно сложено електрично коло, које се завршава са два краја, може да се представи једном еквивалентном граном, која је састављена од паралелне везе савршеног извора струје и отпорника. Струја еквивалентног извора струје једнака је струји кроз кратак спој између крајева посматраног кола. Еквивалентна отпорност једнака је отпорности између крајева кола када су сви извори енергије у посматраном колу искључени.



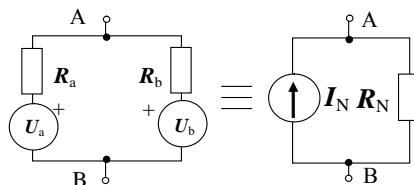
Слика 9.13. Нортонова теорема

У односу на било која своја два прикључка електрична мрежа делује као несавршени извор струје (еквивалентни Нортонов извор струје) чија је струја једнака струји кроз кратак спој између посматраних прикључака, а унутрашња (паралелна) отпорност једнака еквивалентној отпорности мреже између тих прикључака, гледане са стране улазних прикључака када су све електромоторне силе напонских генератора и све струје струјних генератора у мрежи једнаке нули.

За мрежу приказану на слици важи:

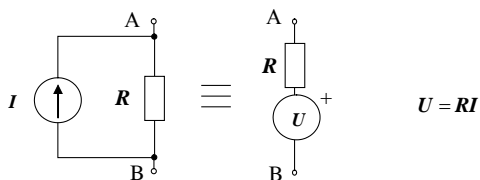
$$U_N = \frac{U_a}{R_a} + \frac{U_b}{R_b},$$

$$R_N = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}.$$



9.3.5. ТЕОРЕМА ЕКВИВАЛЕНЦИЈЕ

Независни извор напона се може представити еквивалентним независним извором струје, и обрнуто.



Слика 9.14. Еквиваленти извори

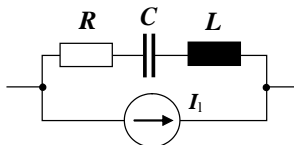
Формална (математичка) еквиваленција извора напона и извора струје, односно њихова замена при анализи, олакшава сагледавање својстава сложених електронских кола.

9.4. ЕКВИВАЛЕНТНА КОЛА

Савршени елементи описани су само једним параметром. Изрази као што су:

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt}, \text{ и } u_L(t) = L \frac{di_L}{dt},$$

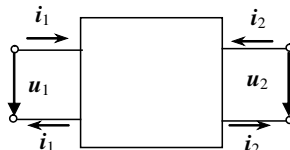
представљају математичке моделе елемената који у стварним условима не могу да се произведу. У електротехници, кондензатор у најопштијем смислу је *уређај* у којем се електрична енергија сакупља у виду електростатичке енергије, а чије је основно обележје електрична капацитивност. Модел стварног кондензатора је електрична мрежа која садржи и “паразитне” елементе као што је то приказано на слици 9.15. Таква шема представља еквивалентно коло. Калем симболизује ефекат индуктивности електрода и прикључака. Отпорност R_g потиче од Џулових губитака у прикључцима. Појава да кроз кондензатор тече струја и када је напон између његових прикључака сталан, моделује се извором струје “цурења” I_L . Овај ефекат је нарочито изражен код електролитских кондензатора.



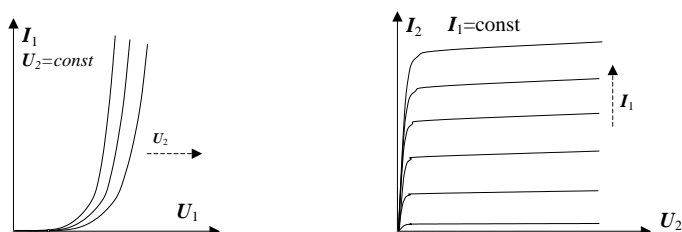
Слика 9.15. Еквивалентно коло физичког кондензатора

Елемент са два приступа описује се изразима који се, у општем случају, могу свести на две једначине:

$$\begin{aligned} F_1(u_1, i_1, u_2, i_2, t) &= 0 \\ F_2(u_1, i_1, u_2, i_2, t) &= 0 \end{aligned} \quad (9.20)$$



У графичком облику, модел елемента са два приступа представља дводимензионални приказ односа између две изабране променљиве, при чему се остале две узимају као константе или параметри. Под називом “статичка карактеристика” подразумева се графички приказ зависности између улазних и излазних струја и напона (слика 9.16).



Слика 9.16. Улазна и излазна карактеристика нелинеарног елемента са два приступа

9.4.1. R-МОДЕЛ

Један од могућих начина представљања елемента са два или више приступа је приказивање зависности напона између крајева сваког од приступа од вредности струја у свим приступима:

$$U_1 = F_1(I_1, I_2), \quad (9.21)$$

$$U_2 = F_2(I_1, I_2).$$

Одговарајући математички модел линеарног елемента са два или више приступа има облик (**R - систем једначина**):

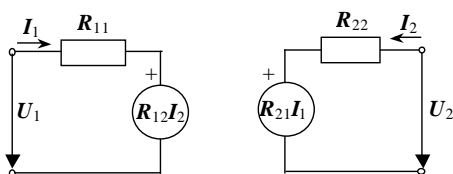
$$U_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2, \quad (9.22)$$

$$U_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2.$$

Односно у матричном облику:

$$U = R \cdot I, \quad U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix}. \quad (9.23)$$

Еквивалентно коло које одговара оваквом моделу приказано је на слици 9.17. У улазном (управљачком) колу на које се прикључује извор напона U_1 , односно струје I_1 , налази се отпорност R_{11} и струјно управљани извор напона $R_{12}I_2$. У излазном (радном) колу на које се прикључује потрошач, налази се отпорност R_{22} и струјно управљани извор напона $R_{21}I_1$.



Слика 9.17. Еквивалентно коло елемента са два приступа

Вредности појединих параметара одређују се на основу једначина 9.22 при услову да је други члан израза са десне стране знака једнакости једнак нули.

$$R_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{I_2=0}, \quad R_{12} = \left. \frac{U_1}{I_2} \right|_{I_1=0},$$

$$R_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2=0}, \quad R_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1=0}.$$

При анализи нелинеарних система користе се методе линеаризације: посматрају се мале промене напона и струје у околини изабране радне тачке²⁰. Применом Тајлорове формуле, нелинеарне карактеристике елемената се апроксимирају полиномима, чији ред представља компромис захтева у погледу тачности, ширине радног опсега и једноставности поступка анализе. Уместо вредности карактеристичних величина анализирају се односи који постоје између њихових (малих) промена. Математички модел елемента са два приступа (9.21) може се са жељеном тачношћу, у довољно малој околини мирне радне тачке²¹, представити линеарним моделом:

$$\Delta U_1 = \frac{\partial F_1}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial F_1}{\partial U_2} \Delta U_2, \quad (9.24)$$

$$\Delta U_2 = \frac{\partial F_2}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial F_2}{\partial U_2} \Delta U_2$$

у којем симбол “ Δ ” (делта) означава прираштај (промену) одговарајуће величине. Сменом:

$$\Delta U_1 \rightarrow u_1; \Delta U_2 \rightarrow u_2; \Delta I_1 \rightarrow i_1; \Delta I_2 \rightarrow i_2 \quad (9.25)$$

математички модел линеаризованог елемента са два приступа добија облик:

$$u_1 = r_{11}i_1 + r_{12}i_2, \quad (9.26)$$

$$u_2 = r_{21}i_1 + r_{22}i_2,$$

при чему су r -параметри дефинисани одговарајућим парцијалним изводима:

$$r_{11} = \left. \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \right|_{I_2 = \text{const}} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{i_2=0}. \quad (9.27)$$

$$r_{12} = \left. \frac{\partial U_1}{\partial I_2} \right|_{I_1 = \text{const}} = \left. \frac{u_1}{i_2} \right|_{i_1=0}. \quad (9.28)$$

$$r_{21} = \left. \frac{\partial U_2}{\partial I_1} \right|_{I_2 = \text{const}} = \left. \frac{u_2}{i_1} \right|_{i_2=0}. \quad (9.29)$$

²⁰ Тачка на карактеристици која представља стање елемента при одређеној сталној вредности улазних величина.

²¹ Тачка на карактеристици која представља услове када нема улазног сигнала (*quiescent point* Q).

$$r_{22} = \left. \frac{\partial U_2}{\partial I_2} \right|_{I_1 = \text{const}} = \left. \frac{u_2}{i_2} \right|_{i_1=0} . \quad (9.30)$$

У анализи електричних кола користе се различити математички модели елемената са више приступа, зависно од тога који пар величина се посматра као независно променљиве. У g -систему једначина²² :

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = g \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}; \quad g = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} . \quad (9.31)$$

величине g_{11} , g_{12} , g_{21} и g_{22} имају димензију електричне проводности. У електроници се највише примењују “хибридни” модели у којима параметри имају различите димензије (од чега и потиче њихов назив: хибридни параметри).

9.4.2. ХИБРИДНИ МОДЕЛИ

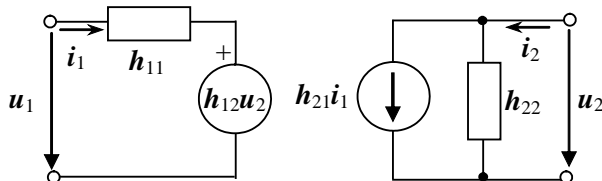
За описивање биполарних транзистора најчешће се примењује h -систем једначина који има облик:

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2 , \quad (9.32)$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2 ,$$

односно у матричном облику:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = h \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}; \quad h = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} . \quad (9.33)$$



Слика 9.18. Хибридно еквивалентно коло

Параметри оваквог модела имају различиту физичку природу: h_{12} и h_{21} су бездимензионе величине, h_{11} представља отпорност, а h_{22} проводност.

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0} ,$$

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0} ,$$

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0} .$$

²² Овакав модел се користи за описивање транзистора са ефектом поља.

Други облик хибридног модела представља ***k*-систем једначина**:

$$\begin{aligned} i_1 &= k_{11}u_1 + k_{12}i_2, \\ u_2 &= k_{21}u_1 + k_{22}i_2, \end{aligned} \quad (9.34)$$

односно у матричном облику:

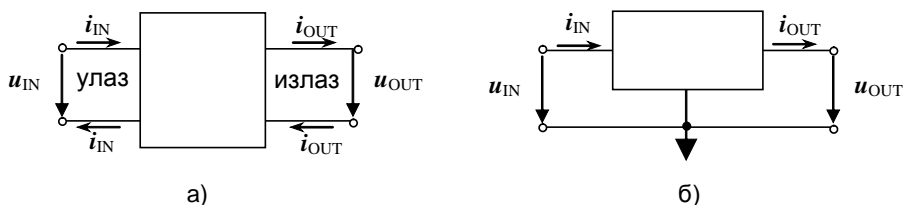
$$\begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix}; \quad k = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = h^{-1}. \quad (9.35)$$

Параметри k_{12} и k_{21} су бездимензионе величине, k_{11} представља проводност а k_{22} отпорност.

$$\begin{aligned} k_{11} &= \left. \frac{i_1}{u_1} \right|_{i_2=0}, & k_{12} &= \left. \frac{i_1}{i_2} \right|_{u_1=0}, \\ k_{21} &= \left. \frac{u_2}{u_1} \right|_{i_2=0}, & k_{22} &= \left. \frac{u_2}{i_2} \right|_{u_1=0}. \end{aligned}$$

9.5. ЕЛЕКТРОНСКА КОЛА ТИПА УЛАЗ-ИЗЛАЗ

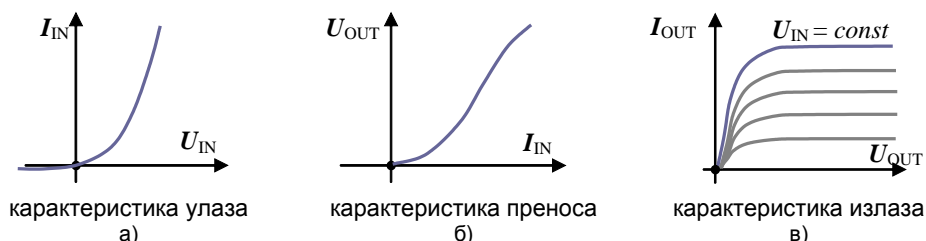
Ако се елемент са два приступа користи за пренос енергије или сигнала, на њему се разликују улазни и излазни приступ²³. Графички приказ електронског кола са два приступа типа улаз-излаз, са назначеним референтним смеровима за напоне и струје, дат је на слици 9.19.а. У највећем броју случајева улазни и излазни напон су дефинисани (или се могу дефинисати) у односу на заједничку референтну тачку (слика 9.19.б).



Слика 9.19. Коло са два приступа типа улаз-излаз

Графички приказ односа између две величине којима се описује стање електронског кола типа улаз-излаз представља његову статичку карактеристику. Притом, једна од две преостале величине може да представља параметар (слика 9.20.в).

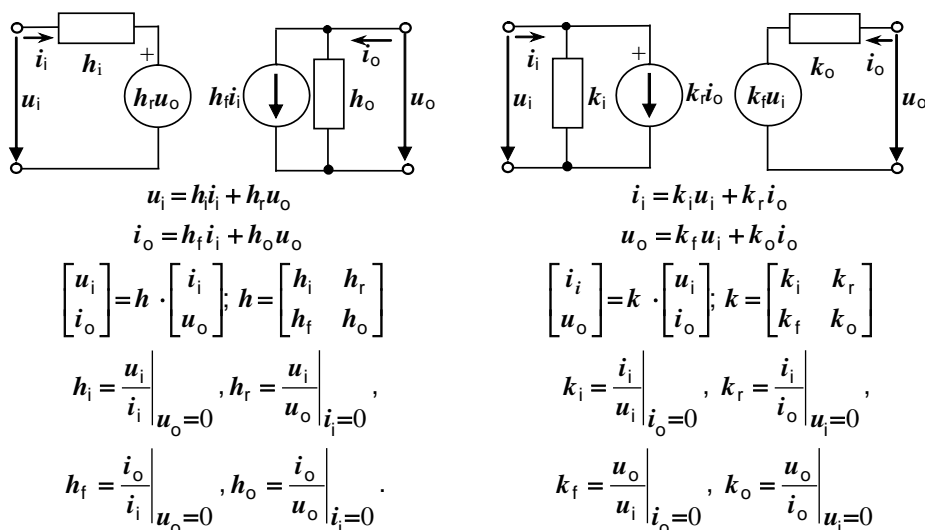
²³ Улаз (*input, Eingang, вход*), односно излаз (*output, Ausgang, выход*) елемента.



Слика 9.20. Основне карактеристике елемента са два приступа

Посебну врсту електронских кола типа улаз-излаз представљају кола која се могу сврстати у категорију линеарних система. Основно својство линеарних система је исказано принципом суперпозиције: одзив на побуду која се може представити као алгебарски збир неких сигнала једнак је алгебарском збиру одзива посматраног система на побуду појединачним сигналимa. Електронска кола чији се математички модел може представити линеарном диференцијалном једначином са константним коефицијентима су **линеарна кола**.

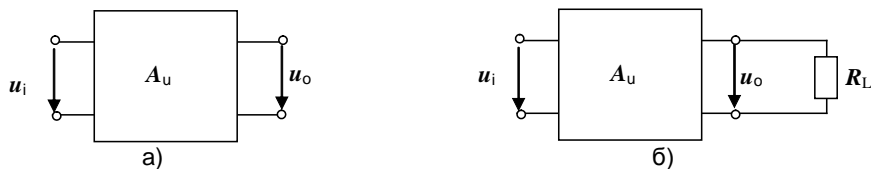
У електроници је уобичајено је да се величине које се односе на улазни приступ означавају индексом "I" или "i" (од енглеске речи *input*, улаз), а величине које се односе на излазни приступ индексом "O" или "o" (од енглеске речи *output*, излаз). Величине којима се симболизује пресликавање (пренос) улаза на излаз означавају се индексом "F" односно "f" (од енглеске речи *forward*, напред, проследити). Величине којима се симболизује повратно дејство излаза на улаз означавају се индексом "R" односно "r" (од енглеске речи *reverse*, обратан). На слици 9.21. приказани су хибридни модели елемента/кола типа улаз-излаз, у којима је примењен овакав начин означавања.



Слика 9.21. Хибридни модели електронског кола типа улаз-излаз

Електронско коло са два приступа типа улаз-излаз је **појачавач**²⁴ ако узима снагу из спољашњег извора, другачијег од извора улазног сигнала, и производи излазни сигнал који представља “слику” улаза.

Уобичајено је да се под називом “појачавач напона” подразумева активни елемент (коло) који на свом излазу даје напон u_o чија је вредност већа од вредности улазног напона u_i . Појачавач напона (*voltage amplifier*) може да се посматра као извор напона управљан напонем (*voltage controlled voltage source - VCVS*).



Слика 9.22. Појачавач напона

Количник излазног и улазног напона представља **појачање напона**:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i}. \quad (9.36)$$

Појачавач је савршен ако величина A_u представља константу која не зависи од улазног напона (побуде) и радних услова појачавача. У општем случају, појачање је позитиван или негативан реалан број, различит од нуле. Димензија величине A_u једнака је један.

Вредност излазног напона, а то значи и вредност појачања стварног појачавача, зависи од вредности излазне струје. Због тога се при спецификацији наводи вредност отпорности којом је појачавач оптерећен (слика 9.22.б):

$$A_u = \left. \frac{u_o}{u_i} \right|_{R_L}$$

На основу дефиниционих једначина k -параметара следи да параметар k_f представља појачање напона при отвореним излазним крајевима:

$$A_u = \left. \frac{u_o}{u_i} \right|_{R_L=\infty} = \left. \frac{u_o}{u_i} \right|_{i_o=0} = k_f.$$

Појачавач струје (*current amplifier*) на свом излазу даје струју која је сразмерна улазној струји. У најопштијем смислу, појачавач струје се може посматрати као извор струје управљан струјом (*current controlled current*).

²⁴ Појачавач (*amplifier, Verstärker, усилитель*), у најопштијем смислу, је активни елемент (компонента, уређај) који појачава вредност неке величине помоћу енергије узете из спољашњег извора. У анализи електричних кола, савршени појачавач се дефинише као активни елемент са два приступа чија излазна снага може да буде већа од улазне снаге, и за који је однос вредности напона или струја на излазу и улазу сталан.

source - CCCS). Количник излазне и улазне струје представља **појачање струје**:

$$A_i = \frac{i_o}{i_i}. \quad (9.37)$$

Карактеристични параметар биполарних транзистора је појачање струје при краткоспојеним излазним крајевима:

$$A_i = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{R_L=0} = \left. \frac{i_o}{i_i} \right|_{u_o=0} = h_f.$$

Транскондуктансни појачавач (*transconductance amplifier*) је активни елемент (коло) са два приступа типа улаз-излаз, код којег је излазна струја сразмерна вредности улазног напона. Константу преноса овог кола представља количник излазне струје и улазног напона:

$$A_g = \frac{i_o}{u_i}. \quad (9.38)$$

Може да се посматра као извор струје управљан напонам (*voltage controlled current source - VCCS*), односно “претварач напона у струју” (U/I претварач, *voltage-to-current converter*). Величина A_g има димензију електричне проводности. Ова “привидна” проводност се у литератури назива **проводност преноса**²⁵ и означава са G_m или g_m .

Трансрезистансни појачавач (*transresistance amplifier*) је елемент са два приступа код којег је излазни напон сразмеран вредности улазне струје. Константу преноса овог кола представља количник излазног напона и улазне струје:

$$A_r = \frac{u_o}{i_i}. \quad (9.39)$$

Може да се посматра као извор напона управљан струјом (*current controlled voltage source - CCVS*), односно “претварач струје у напон” (I/U претварач, *current-to-voltage converter*). Величина A_r има димензију електричне отпорности. Ова “привидна” отпорност се у литератури назива **отпорност преноса**²⁶ и означава са R_m или r_m .

Значајна обележја елемената типа улаз-излаз представљају улазна и излазна отпорност. Улазна отпорност је дефинисана као количник улазног напона и улазне струје.

$$R_i = \frac{u_i}{i_i}, \quad (9.40)$$

²⁵ Међусобна (*mutual*) транскондуктанса (*transconductance*).

²⁶ Трансрезистанса (*transresistance*).

Другим речима, то је отпорност којом посматрани елемент (коло) оптерећује извор сигнала. С обзиром да вредност ове величине зависи од отпорности којом је посматрани елемент оптерећен, неопходно је да буду дефинисани и услови рада при којима се одређује. На пример, улазна отпорност може бити дефинисана када су излазни крајеви елемента отворени (*open*):

$$R_{io} = \frac{u_i}{i_i} \Big|_{i_o = 0} = \frac{1}{k_i},$$

или краткоспојени (*shorted*):

$$R_{is} = \frac{u_i}{i_i} \Big|_{u_o = 0} = h_i.$$

Излазна отпорност појачавача је еквивалентна отпорност којом се појачавач моделује као активно линеарно коло које представља неасавршени извор напона или струје²⁷ (слика 9.23).



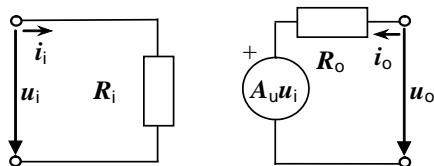
Слика 9.23. Излазна отпорност

Вредност излазне отпорности одређена је изразом:

$$R_o = \frac{u_{oo}}{i_{os}},$$

у којем u_{oo} представља излазни напон када су излазни крајеви отворени ("напон празног хода"), а i_{os} излазну струју када су излазни крајеви краткоспојени ("струја кратког споја").

На слици 9.24 приказано је еквивалентно коло које се најчешће користи као основни модел појачавача напона при анализи сложених електронских структура, када се повратно дејство излаза на улаз може занемарити. На аналоган начин представља се и еквивалентно коло појачавача струје.



$$\begin{aligned} A_u &= k_f, \\ R_i &= h_i, \\ R_o &= k_o = \frac{1}{h_o} \end{aligned}$$

Слика 9.24. Еквивалентно коло појачавача напона

²⁷ Према теорему о еквиваленцији, ове два приказа су равноправна.

9.6. ЛИТЕРАТУРА

- 1 Електрична и магнетска кола, Термини и дефиниције, ЈУС Н. А0. 131, 1990, (*Electric and magnetic circuits, Terms and definitions, IEC 131, 1978*).
- 2 *Electropedia, The World's Online Electrotechnical Vocabulary*, <http://stf.iec/iec60050>.
- 3 Ref. 1, 01-01.
- 4 Ref. 1, 01-08.
- 5 Ref. 1, 01-11.
- 6 Ref. 1, 01-34.
- 7 Ref. 1, 01-12.
- 8 Ref. 1, 01-15.
- 9 Ref. 1, 01-16.
- 10 Ref. 1, 02-02.
- 11 Б. Рељин, Теорија електричних кола, Наука, 1992, стр 3.
- 12 Ref. 1, 02-03.
- 13 Ref. 1, 02-04.
- 14 Ref. 1, 02-21.

10. ГРАФИЧКА АНАЛИЗА

Статичка карактеристика електронских елемената је, по природи процеса који се у њима одвијају, нелинеарна. Само у посебном случају, у довољно малој околини¹ изабраног почетног стања система, образованог од таквих елемената, зависност између струја и напона се може представити линеарним једначинама чији је општи алгоритам решавања добро познат. Анализа одзива електронског кола на побуду малим сигналом (*small-signal response*) заснива се поступцима развијеним у оквирима теорије линеарних динамичких система.

Линеаризовани модели, међутим, дају неодговарајуће резултате уколико је деловање улазног сигнала такво да радна тачка, којом је представљено стање електронског елемента на његовој статичкој карактеристици, доспева у подручје у којем се одступање карактеристике од праве линије не може занемарити. Анализа електронских кола при побуди сразмерно великим сигналимa (*large-signal response*)² представља сложен проблем који се може поједноставити, ако се располаже графичким приказом статичке карактеристике нелинеарног елемента.

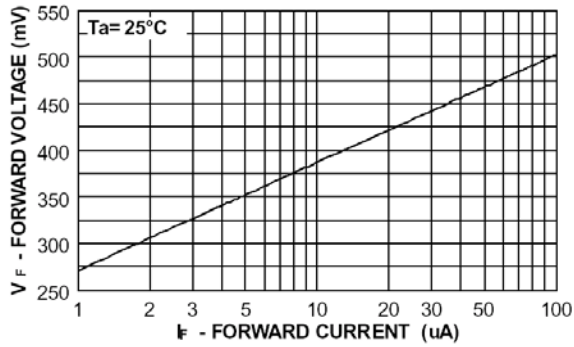
На почетку развоја електронике, графичка метода је развијена као једноставан делотворан поступак за анализу кола са електронским цевима. Развој технологије и дигитална револуција су коренито изменили приступ проблемима анализе и синтезе електронских кола. За решавање математичких проблема користе се рачунари и одговарајући програмски пакети. Независно од тога какав се алат користи, графички приказ има велику когнитивну моћ³. Иако се графичка метода решавања све мање примењује у инжењерској пракси, њено познавање доприноси бољем сагледавању својстава електронских кола и разумевању њиховог рада.

Произвођачи електронских компоненета, у спецификацијама својих производа, дају и дијаграме који представљају статичку карактеристику при одређеним условима рада. На сликама су приказане карактеристике вероватно најраспрострањеније електронске компоненте, сигналне диоде 1N4148.

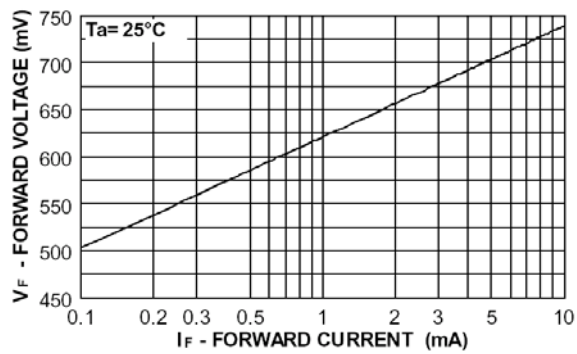
¹ Стање неког система се може геометријски представити тачком у "простору стања" чије су "димензије" величине којима се посматрани систем описује.

² Односно, у условима рада када су промене струје и напона толико велике, да долази до изражаја нелинеарност карактеристика.

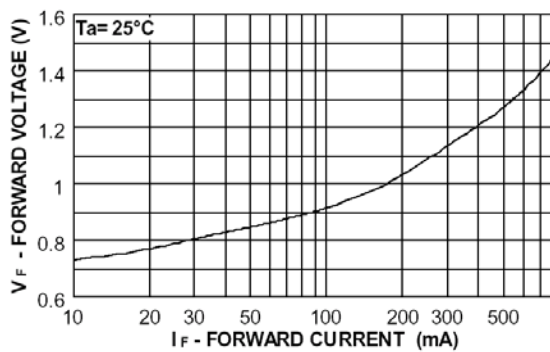
³ Понекад се каже: "Једна слика - хиљаду речи".

Опсег 1 μA до 100 μA 

Опсег 0,1 mA до 10 mA

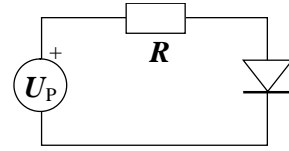


Опсег 10 mA до 800 mA

 I - U карактеристике сигналне диоде 1N4148 при директној поларизацији

10.1. АНАЛИЗА ДИОДНОГ КОЛА

Практична вредност графичког поступка анализе може се сагледати већ на примеру елементарног нелинеарног електричног кола које се састоји од извора сталног напона, отпорника и диоде. Потребно је одредити вредност струје у колу, под претпоставком да су напон поларизације U_P , отпорност R и U - I карактеристика диоде познати

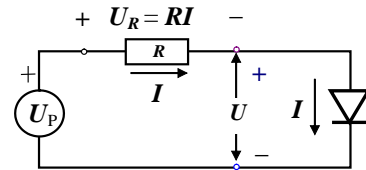


Слика 10.1. Диодно коло

У складу са ознакама на слици, за посматрано коло важи једначина:

$$U_P - RI - U = 0 \quad (1)$$

у којој U представља напон између аноде и катоде диоде ($U = U_{AK}$).



Слика 10.2. Анализа диодног кола

Стање диоде, као електронског елемента са једним приступом, једнозначно одређују две величине: вредност струје I , која кроз њу протиче, и вредност напона U , који делује између њених крајева. Зависност $I(U)$ се моделује експоненцијалном функцијом:

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \cong I_s e^{\frac{U}{U_T}}, \quad (2)$$

у којој I_s представља инверзну струју засићења:

$$I_s = \lim_{U_{AK} \rightarrow -\infty} I_{AK}(U_{AK}),$$

а U_T представља термички напон (електрични еквивалент температуре):

$$U_T = \frac{kT}{q} \cong 26 \text{ mV} @ 300 \text{ K}.$$

Аналитички, вредност напона U у посматраном колу, за $U > U_T$, представља решење једначине:

$$RI_s e^{\frac{U}{U_T}} + U = U_P. \quad (3)$$

За струју I важи:

$$I + \frac{U_T}{R} \ln \frac{I}{I_S} = \frac{U_P}{R} \quad (4)$$

Зависност одзива (струје кроз диоду I) од побуде (напона U_P) описана је трансцедентном функцијом. Решавање једначине се може извршити итеративним поступком. У том послу савремени рачунари пружају ефикасну помоћ.

Ако се величине којима је одређено стање диоде посматрају као координате у равни, стање диоде се графички приказује положајем одговарајуће тачке на $I(U)$ дијаграму. Једначина (1) дефинише праву линију у U - I равни која се назива **радна права**⁴:

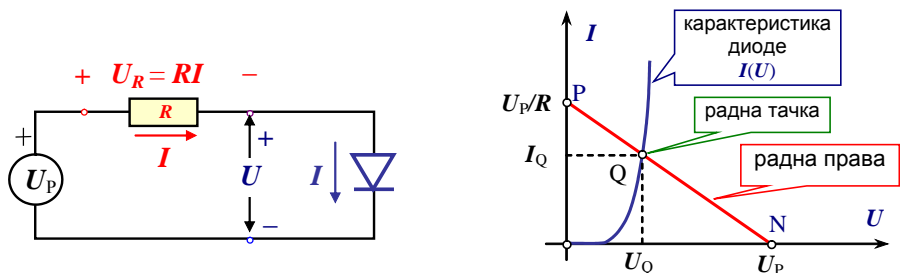
$$I = \frac{U_P - U}{R} \quad (5)$$

Нагиб радне праве је негативан. Коефицијент правца k једнак је:

$$k = \frac{\partial I}{\partial U} = -\frac{1}{R} \quad (6)$$

Радна права сече напонску осу U - I дијаграма у тачки N , која представља нулу (*zero*) функције $I(U)$. Њене су координате $I = 0$ и $U = U_P$. Тачка P у којој радна права сече осу струје представља померај (*offset*) функције $I(U)$. Ова тачка је одређена координатама $U = 0$ и $I = U_P/R$.

Радна тачка (*operating point*) $Q(U_Q, I_Q)$, којом је у U - I равни графички представљено стање диоде у посматраном колу, налази се на пресеку радне праве (5) и карактеристике диоде (2). Вредности U_Q и I_Q читавају се са дијаграма као пројекције тачке Q на осу напона и осу струје.



Слика 10.3. Графичка анализа диодног кола

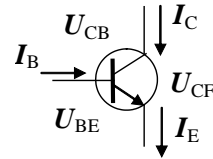
⁴ У литератури на енглеском језику ова права се назива линија оптерећења (*load line*). Отпорник R се посматра као оптерећење (*load*) у колу које садржи извор напона и нелинеарни полупроводнички елемент.

10.2. ГРАФИЧКА АНАЛИЗА КОЛА СА БИПОЛАРНИМ ТРАНЗИСТОРИМА

Биполарни транзистор, као елемент са три прикључка (емитор, колектор и база), описује се са шест електричних величина: три струје и три напона. Притом важе Кирхофова правила:

$$I_B + I_C + I_E = 0 \text{ и}$$

$$U_{BE} + U_{CB} - U_{CE} = 0.$$



Слика 10.4. Биполарни транзистор

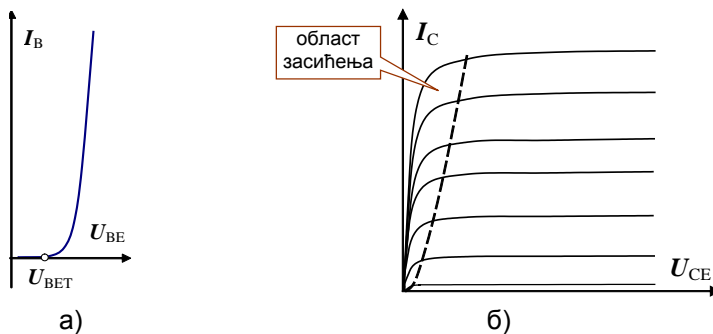
У графичком облику, биполарни транзистор се представља дводимензионалним приказима односа између две изабране променљиве, при чему се остале две посматрају као параметри који имају сталну вредност. У спецификацијама које дају произвођачи обично се наводе карактеристике транзистора за спој са заједничким емитором:

- **улазна карактеристика**, са излазним напонем U_{CE} као параметром (слика 10.5.а):

$$I_B = I_B(U_{BE}) \Big|_{U_{CE} = const}, \text{ и}$$

- **излазна карактеристика**, са улазном струјом I_B као параметром (слика 10.5.б):

$$I_C = I_C(U_{CE}) \Big|_{I_B = const}.$$



Слика 10.5 Улазна и излазна карактеристика *NPN*-транзистора у споју са заједничким емитором

Када је напон база-емитор, U_{BE} , мањи од напона прага вођења, $U_{BE(T)}$, транзистор је закочен (слика 10.5.а). Струје кроз транзистор су занемарљиво

мале. Када се транзистор налази у стању засићења (спој база-емитор је поларисан директно, а спој база-колектор инверзно), струја колектора, I_C , мања је од вредности која, према основној једначини транзистора:

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

одговара датој струји базе I_B (слика 10.5.б). Напон база-емитор транзистора у стању засићења означава се са U_{Besat} .

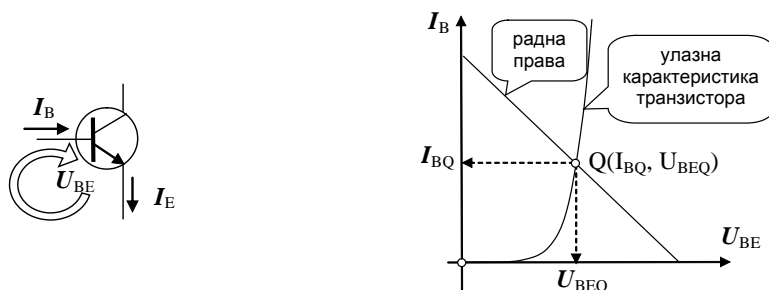
Када се биполарни транзистор примењује као појачавачки елемент, радна тачка којом је представљено његово стање налази се изван области закочења (напон U_{BE} је већи од напона прага U_{BET}) и изван области засићења. Област на $I_C(U_{CE})$ дијаграму која одговара оваквом стању назива се активна област (*forward-active region*).

Графички поступак решавања одвија се у неколико корака.

Анализа улазног кола

Применом Кирхофових правила на улазну петљу (база-емитор) одређује се једначина којом је дефинисана **радна права** у U_{BE} - I_B равни.

Радна тачка $Q(U_{BEQ}, I_{BQ})$, којом је у U_{BE} - I_B равни графички представљено стање транзистора, налази се на пресеку радне праве улазног кола и улазне карактеристике транзистора. Вредности U_{BEQ} и I_{BQ} читавају се са дијаграма као пројекције тачке Q на осу напона и осу струје.

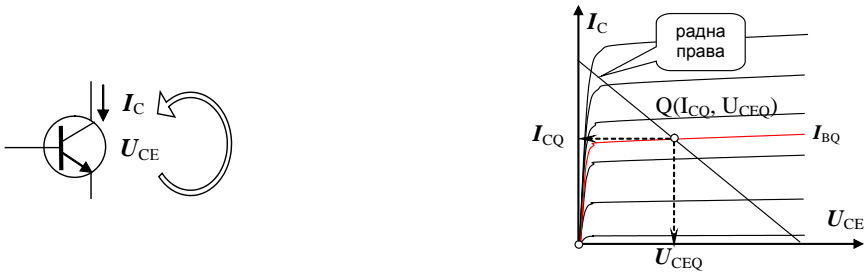


Слика 10.6 Анализа улазног кола

Анализа излазног кола

Применом Кирхофових правила на излазну петљу (колектор-емитор) одређује се радна права у U_{CE} - I_C равни.

Радна тачка $Q(U_{CEQ}, I_{CQ})$, којом је у U_{CE} - I_C равни графички представљено стање транзистора, налази се на пресеку радне праве излазног кола и излазне карактеристике транзистора. Вредности U_{CEQ} и I_{CQ} читавају се са дијаграма као пројекције тачке Q на осу напона и осу струје.



Слика 10.7 Анализа излазног кола

ПРИМЕР

За коло са биполарним транзистором у споју са заједничким емитором, приказано на слици, важе једначине:

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

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

Једначина (1) дефинише радну праву улазног кола:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B}. \quad (3)$$

Она пролази кроз тачке $N(0, U_{BB})$ и $P(U_{BB}/R_B, 0)$.

На основу једначине (3), нагиб радне праве улазног кола је негативан. Коефицијент правца k_1 једнак је:

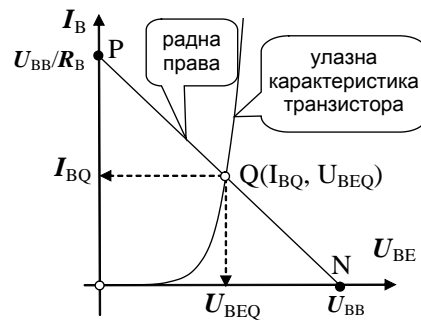
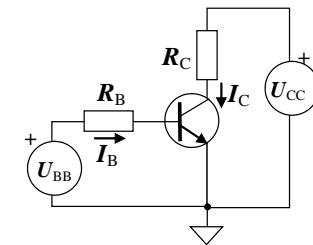
$$k_1 = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} = -\frac{1}{R_B}.$$

Помоћу радне праве се на дијаграму, који приказује статичку улазну карактеристику $I_B(U_{BE})$, одређује положај радне тачке $Q(I_{BQ}, U_{BEQ})$ којом је стање транзистора у посматраном колу приказано у U_{BE} - I_B равни.

Радна тачка $Q(I_{BQ}, U_{BEQ})$ налази се на пресеку радне праве и улазне карактеристике $I_B(U_{BE})$ транзистора. Вредности струје базе I_{BQ} и напона U_{BEQ} представљају пројекције радне тачке на осу струје односно напона.

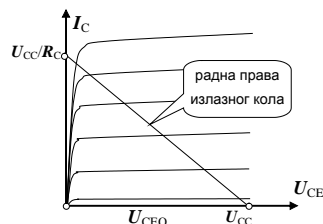
Једначина (2) дефинише радну праву излазног кола (*load line*), помоћу које се на дијаграму $I_C(U_{CE})$ графички одређују вредност струје колектора и напона колектор-емитор:

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



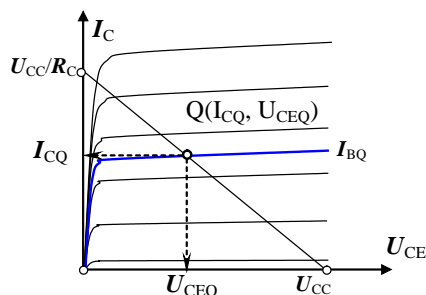
Нагиб радне праве у $U_{CE}-I_C$ равни је негативан. Коefицијент правца k_0 једнак је:

$$k_0 = \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}} = -\frac{1}{R_C}.$$



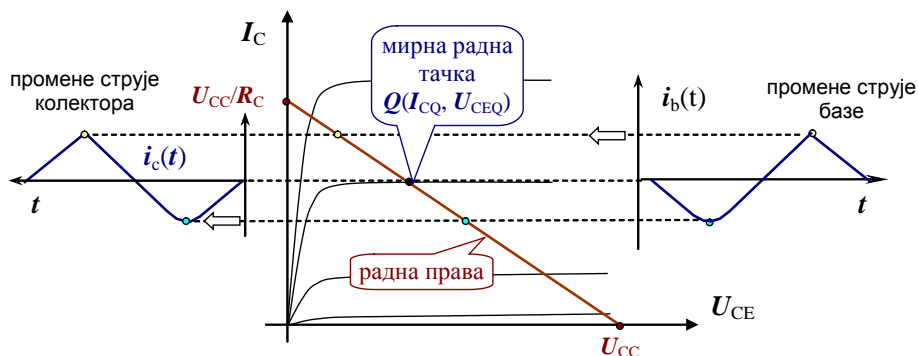
Радна права излазног кола пролази кроз тачке $(0, U_{CC})$ и $(U_{CC}/R_C, 0)$.

Радна тачка $Q(I_{CQ}, U_{CEQ})$ налази се на пресеку радне праве и криве $I_C(U_{CE})$ која одговара струји I_{BQ} . Вредности U_{CEQ} и I_{CQ} читавају се са дијаграма као пројекције тачке Q на осу напона и осу струје.



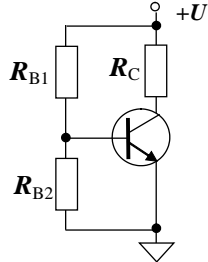
При пројектовању електронских кола са транзисторима као појачавачким елементима, мирна радна тачка транзистора се поставља на средини радне праве излазног кола како би се постигла највећа могућа амплитуда наизменичне компоненте излазног сигнала.

Повезивањем резултата анализе улазног и излазног кола може се одредити одзив кола на побуду сигналом задатог облика.



ЗАДАЦИ

1. Под претпоставком да су познате вредности напона и отпорности у колу приказаном на слици, користећи улазну и излазну карактеристику транзистора, графичким путем одредити струју колектора и напон колектор-емитор.



РЕШЕЊЕ

Применом Тевененове теореме посматрано коло се може свести на коло које је анализирано у претходно разматраном примеру:

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2},$$

$$U_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}.$$

Математички модел овог кола чине једначине:

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

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

Вредност струје базе I_{BQ} одређује се као пројекција, на осу струје, тачке Q која представља пресек радне праве улазног кола:

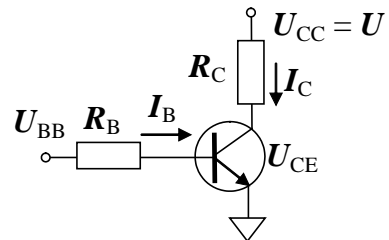
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B},$$

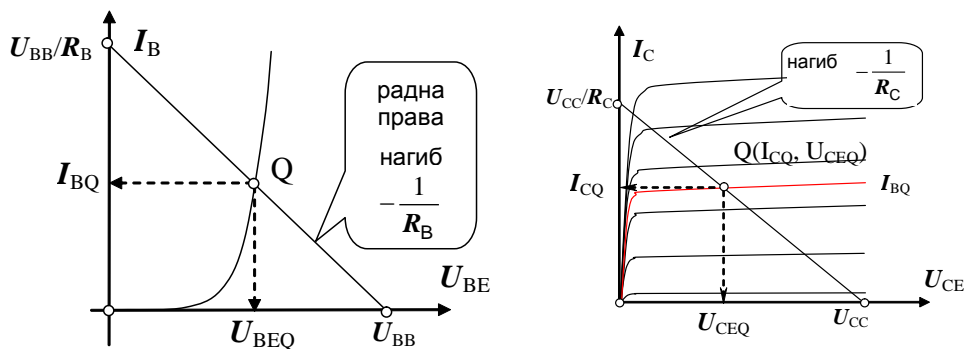
и улазне карактеристике, $I_B(U_{BE})$, транзистора.

У U_{CE} - I_C равни, радна тачка $Q(I_{CQ}, U_{CEQ})$ налази се на пресеку радне праве излазног кола:

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C},$$

и криве $I_C(U_{CE})$ која одговара струји I_{BQ} .

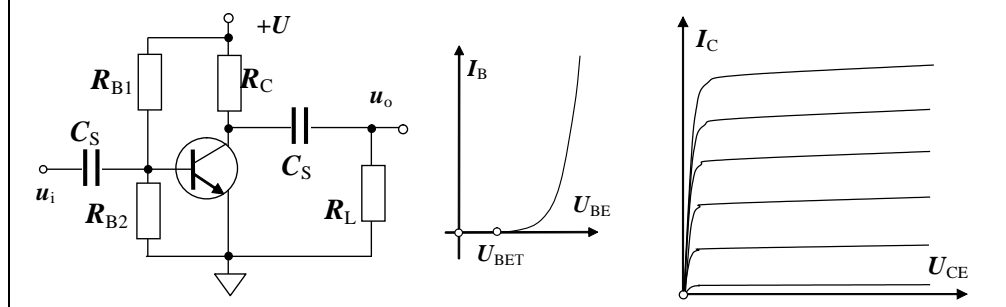




Одређивање радне тачке кола графичким путем

Вредности U_{CEQ} и I_{CQ} читавају се са $I_C(U_{CE})$ дијаграма, као пројекције тачке Q на осу напона и осу струје.

2. На слици је приказан инвертујући појачавач са биполарним транзистором чије су статичке карактеристике познате. Графичким путем анализирати одзив кола на побуду малим симетричног троугаоног таласног облика, под претпоставком да је капацитивност кондензатора за спрегу, C_S , довољно велика да се промена напона између крајева кондензатора током полупериоде улазног сигнала може занемарити.



РЕШЕЊЕ

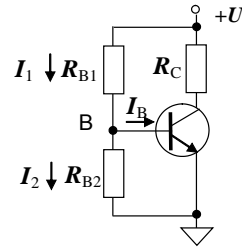
Једносмерни напон U и отпорници (R_{B1} , R_{B2} и R_C) дефинишу мирну радну тачку која представља стање у колу у одсуству побуде ($u_i = 0$).

У U_{BE} - I_B равни мирна радна тачка Q представља пресек статичке карактеристике транзистора $I_B(U_{BE})$ и радне праве улазног кола, која је дефинисана једначином која се добија применом првог Кирхофовог правила на чвор B, у одсуству улазног сигнала ($u_i = 0$):

$$I_1 = I_2 + I_B, \quad (1)$$

$$I_1 = \frac{U - U_{BE}}{R_{B1}}, \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{U_{BE}}{R_{B2}}. \quad (3)$$



Сређивањем ових једначина добија се:

$$I_B = \frac{U - U_{BE}}{R_{B1}} - \frac{U_{BE}}{R_{B2}} = \frac{U \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} - U_{BE}}{R_{B1} \parallel R_{B2}}, \quad R_{B1} \parallel R_{B2} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}. \quad (4)$$

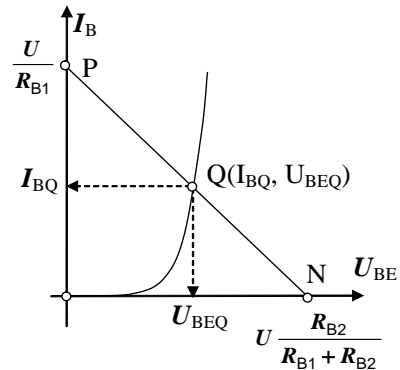
Нагиб радне праве улазног кола је негативан. Коefицијент правца k_1 једнак је:

$$k_1 = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} = -\frac{1}{R_{B1} \parallel R_{B2}}.$$

Радна права (4) пролази кроз тачке $N(0, U \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}})$ и $P(\frac{U}{R_{B1}}, 0)$.

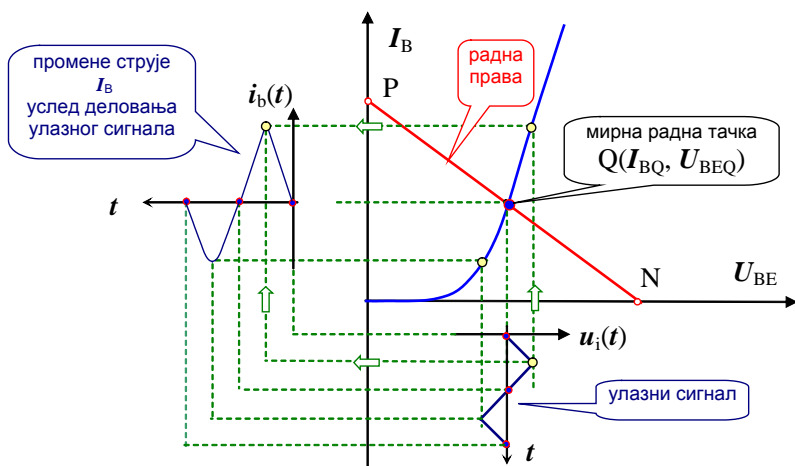
Радна тачка $Q(I_{BQ}, U_{BEQ})$ налази се на пресеку радне праве и улазне карактеристике $I_B(U_{BE})$ транзистора.

Вредности струје базе I_{BQ} и напона U_{BEQ} представљају пројекције радне тачке на осу струје односно напона.



На основу дијаграма на којем је приказана статичка улазна карактеристика транзистора $I_B(U_{BE})$ и уцртана радна права улазног кола може се, приближно, одредити таласни облик променљивог дела $i_b(t)$ улазне струје $i_B(t)$ при побуди сигналом $u_i(t)$ познатог таласног облика. У посматраном примеру улазни сигнал има симетрични троугаони облик. Таласни облик струје $i_B(t)$ приказан је на слици.

Уочава се да постоји разлика таласног облика позитивне и негативне полупериоде, као и да је “амплитуда” негативне полупериоде мања од “амплитуде” позитивне полупериоде. Струја $i_B(t)$ је изобличена слика побудног сигнала. Изобличење је утолико веће уколико је амплитуда напона $u_i(t)$ ближа вредности $U_{BEQ} - U_{BE\text{ET}}$



Графичка анализа улазног кола при побуди напоном симетричног троугаоног таласног облика

Применом другог Кирхофовог правила на излазну контуру кола добија се једначина:

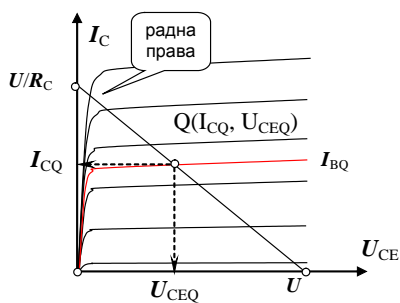
$$U - R_C I_C - U_{CE} = 0. \quad (5)$$

која представља метематички модел излазног кола у одсуству побуде.

Једначином:

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C}. \quad (6)$$

дефинисана је радна права која одговара стању у одсуству побуде. Помоћу ове праве одређује се, на основу вредности струје базе I_{BQ} , добијене у претходном кораку, положај мирне радне тачке $Q(I_{CQ}, U_{CEQ})$.



Нагиб радне праве излазног кола је негативан. Коэффициент правца k_O једнак је:

$$k_O = \frac{\partial I_C}{\partial U_{CE}} = -\frac{1}{R_C}.$$

Описаним поступком одређује се положај мирне радне тачке у U_{CE} - I_C равни. При анализи одзива кола на побуду променљивим (наизменичним) сигналом, када на улазу појачавачког елемента делује променљиви напон:

$$u_B = U_B + u_i.$$

мора се узети у обзир и утицај отпорности оптерећења R_L које је посредством кондензатора за спрегу, C_S , прикључено на колектор транзистора. Одговарајућа излазна радна права кола са оптерећењем представља “наизменичну” радну праву.

Еквивалентно коло за мале сигнале, када се утицај кондензатора за спрегу C_S може занемарити, приказано је на слици.

Применом другог Кирхофовог правила на излазну контуру кола добија се једначина:

$$u_{CE} + R_E i_C = 0. \quad (7)$$

која представља метематички модел излазног кола при побуди малим сигналимa.

Једначином:

$$i_C = -\frac{u_{CE}}{R_E}. \quad (8)$$

дефинисана је наизменична радна права која одговара стању при побуди малим сигналом.

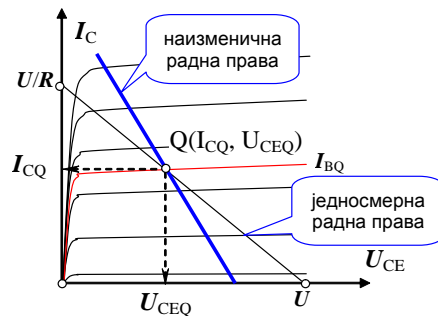
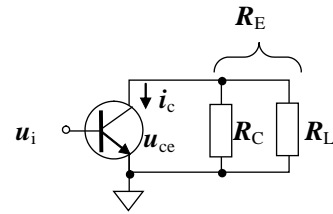
Наизменична радна права кола са оптерећењем пролази кроз мирну радну тачку $Q(I_{CQ}, U_{CEQ})$, која је дефинисана једносмерном радном правом, а има нагиб који је одређен еквивалентном отпорношћу R_E у петљи колектора:

$$R_E = R_C \parallel R_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}. \quad (9)$$

Наизменична радна права (8) има већи нагиб од једносмерне радне праве (6), јер је еквивалентна отпорност R_E мања од отпорности R_C .

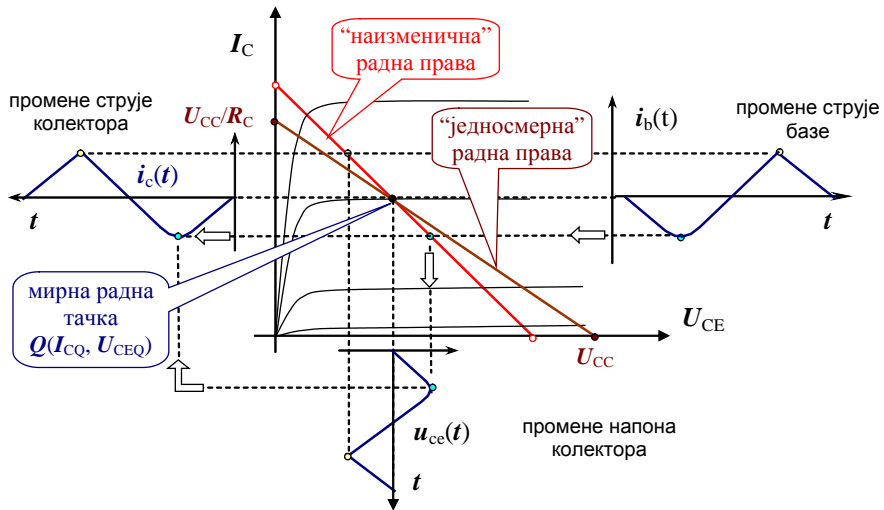
$$k_o = \frac{\partial i_C}{\partial u_{ce}} = -\frac{1}{R_E}. \quad (10)$$

Уцртавањем једносмерне радне праве излазног кола на дијаграму који приказује излазну карактеристику транзистора, $I_C(U_{CE})$, одређује се положај мирне радне тачке Q која је одређена вредношћу струје I_{BQ} . Затим се уцртава наизменична радна права, која пролази кроз тачку Q , а има нагиб k_o који је одређен отпорношћу R_E (једначина 10).



На основу и дијаграма који приказује промене струје базе $i_b(t)$, добијеног анализом улазног кола, уцртава се дијаграм промене струје колектора (у довољно малој околине мирне радне тачке, промена струје колектора сразмерна је промени струје базе која ју је изазвала). На основу тога одређује се дијаграм који приказује промене напона колектор-емитор, односно излазни сигнал $u_o(t) = u_{ce}(t)$.

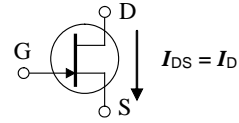
Треба уочити да повећање нагиба наизменичне радне праве као резултат има смањивање амплитуде излазног сигнала. Коначна отпорност оптерећења смањује појачање.



Одређивање одзива кола графичким путем

10.3. ГРАФИЧКА АНАЛИЗА КОЛА СА ФЕТОВИМА

У начелу, транзистор са ефектом поља, као елемент са три прикључка (сорс, дрејн и гејт), описује се са шест електричних величина: три струје и три напона. С обзиром да се струја гејта може занемарити, анализа кола са фетовима је једноставнија од анализе кола са биполарним транзисторима.



Слика 10.8. N-канални спојни транзистор са ефектом поља

$$U_{GS} + U_{DG} - U_{DS} = 0. \quad (1)$$

За описивање транзистора са ефектом поља довољне су две карактеристике:

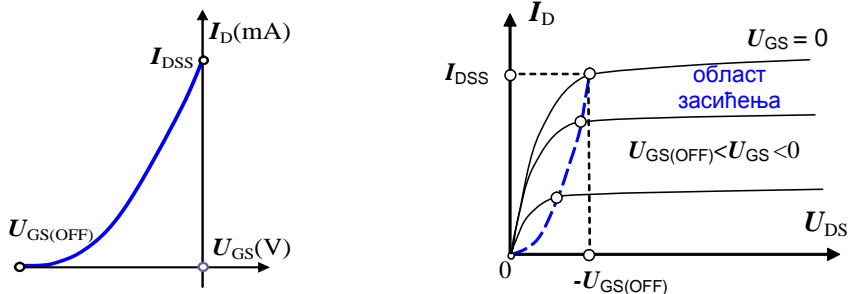
- карактеристика преноса:

$$I_D = I_D(U_{GS}), \text{ и}$$

- излазна карактеристика, са напоном U_{GS} као параметром:

$$I_D = I_D(U_{DS}) \Big|_{U_{GS} = \text{const}}$$

Њихов изглед за N-канални транзистор са PN-спојем (JFET) приказан је на слици.



Слика 10.9. Карактеристика преноса и излазна карактеристика N-каналног спојног транзистора са ефектом поља

Карактеристика преноса $I_D(U_{GS})$ је квадратна функција:

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

где је I_{DSS} **струја засићења** када је напон U_{GS} једнак нули, а $U_{GS(OFF)}$ напон прекида. Функција $I_D(U_{GS})$ пролази кроз тачке $(0, I_{DSS})$ и $(U_{GS(OFF)}, 0)$.

N-канални спојни транзистор са ефектом поља је закочен ако је напон U_{GS} мањи од напона прекида $U_{GS(OFF)}$. Транзистор се налази у стању засићења ако није закочен, PN-спој гејт-канал је инверзно поларисан, а напон U_{GD} је мањи од напона прекида $U_{GS(OFF)}$. Струја кроз канал је одређена напонем гејт-сорс (2).

Када се транзистор са ефектом поља примењује као појачавачки елемент, радна тачка којом је представљено његово стање налази се у области заћења. На основу једначина (1) и (2), граница области засићења је одређена условом

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

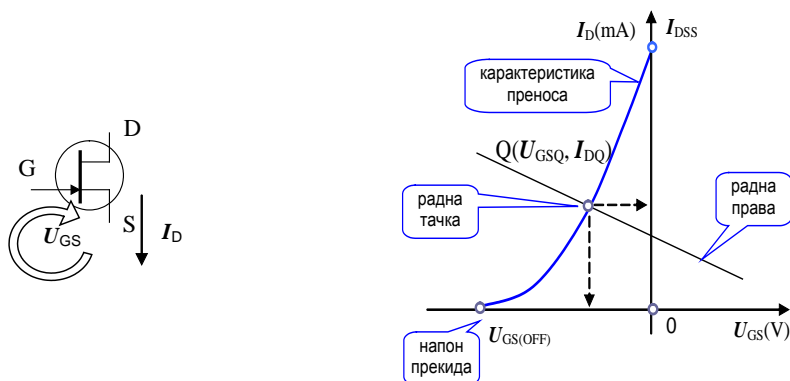
чему одговара функција:

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

која је на $I_D(U_{GS})$ дијаграму приказана испрекиданом линијом.

Графички поступак решавања одвија се у два корака.

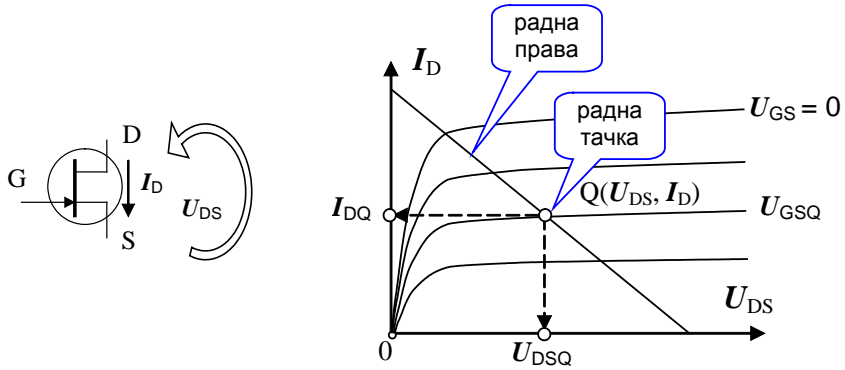
У првом кораку, применом Кирхофових правила на улазну петљу (гејт-сорс) одређује се једначина којом је дефинисана радна права у U_{GS} - I_D равни.



Слика 10.10 Анализа у U_{GS} - I_D равни

Радна тачка $Q(U_{GSQ}, I_{DQ})$, којом је у U_{GS} - I_D равни графички представљено стање транзистора, налази се на пресеку радне праве и карактеристике преноса транзистора. Вредности U_{GSQ} и I_{DQ} читавају се са дијаграма, као пројекције тачке Q на осу напона и осу струје.

У другом кораку, применом Кирхофових правила на излазну петљу (сорс-дрејн) одређује се радна права у U_{DS} - I_D равни.



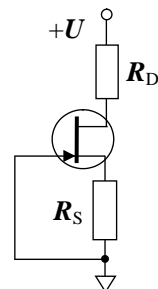
Слика 10.11 Анализа у U_{DS} - I_D равни

Радна тачка $Q(U_{DSQ}, I_{DQ})$, којом је у U_{DS} - I_D равни графички представљено стање транзистора, налази се на пресеку радне праве излазног кола и излазне карактеристике транзистора. Вредност U_{DSQ} очитава се са дијаграма, као пројекција тачке Q на осу напона.

ЗАДАЦИ

1. За коло приказано на слици:

- а) одредити вредност отпорности R_S која одговара задатим вредностима:
 $I_D = 5 \text{ mA}$, $U = 12 \text{ V}$, $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$ и $U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}$;
- б) одредити опсег могућих вредности отпорности R_D при којима се радна тачка транзистора налази у области засићења.

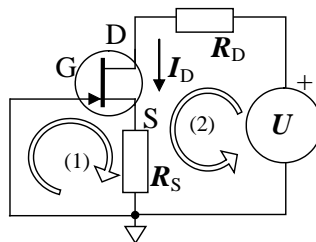


РЕШЕЊЕ

Применом другог Кирхофовог правила, добијају се следеће једначине које важе за посматрано коло:

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

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



На основу прве једначине може да се израчуна вредност отпорности R_S која одговара задатој вредности струје I_D , ако се претходно одреди одговарајућа вредност напона U_{GS} .

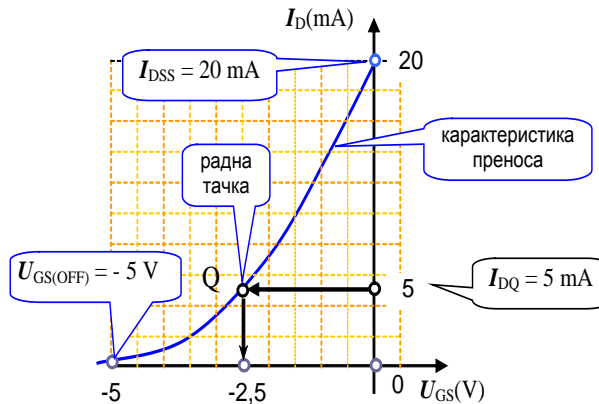
Друга једначине дефинише радну праву у I_D - U_{DS} равни (излазна карактеристика) помоћу које се може одредити највећа могућа вредност отпорности R_D при којој се радна тачка транзистора налази на граници области засићења.

- а) Под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у области засићења, задата вредност радне струје I_{DQ} једнозначно одређује вредност напона гејт-сорс U_{GSQ} , а тиме и вредност отпорности R_S .

Карактеристика преноса N -каналног транзистора са ефектом поља је квадратна функција која пролази кроз тачке $(0, 20 \text{ mA})$ и $(-5 \text{ V}, 0)$ на дијаграму $I_D(U_{GS})$.

Вредност напона U_{GSQ} добија се као пројекција тачке Q, која одговара задатој вредности струје $I_{DQ} = 5 \text{ mA}$. У разматраном случају је:

$$U_{GSQ} = -2,5 \text{ V}.$$

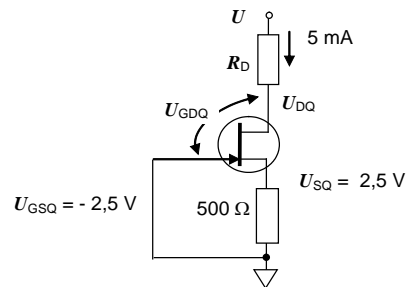
Графичко одређивање напона U_{GSQ}

Када је вредност напона U_{GSQ} позната, на основу једначине (1), израчунава се одговарајућа вредност отпорности R_S :

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

НАПОМЕНА

Да би радна тачка транзистора у посматраном колу налазила у области засићења потребно је да напон U_{GDQ} буде по интензитету једнак или већи од напона прекида $U_{GS(OFF)}$.



б) Отпорност R_D у посматраном колу може бити једнака нули. Тада је напон U_{GD} једнак $-U = -12 \text{ V}$, па је испуњен услов да радна тачка N -каналног транзистора буде у области засићењу:

$$U_{GD} \leq U_{GS(OFF)}.$$

За одређивање опсега могућих вредности отпорности R_D при којима се радна тачка транзистора налази у области засићења користи се излазна карактеристика транзистора. Једначина (2) дефинише радну праву у $U_{DS} - I_D$ равни:

$$I_D = \frac{U - U_{DS}}{R_D + R_S}. \quad (3)$$

која пролази кроз тачке N и P. Ове тачке представљају нулу односно померај функције $I_D(U_{DS})$. За тачку N важи: $I_D = 0 \Rightarrow U_{DS} = U$. У тачки P је $U_{DS} = 0$, чему, на основу једначине (3) одговара вредност струје I_{DP} једнака:

$$I_{DP} = \frac{U}{R_D + R_S}.$$

Нагиб радне праве излазног кола је негативан. Коefицијент правца радне праве у U_{DS} - I_D равни, k_O , једнак је:

$$k_O = \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} = -\frac{1}{R_D + R_S}.$$

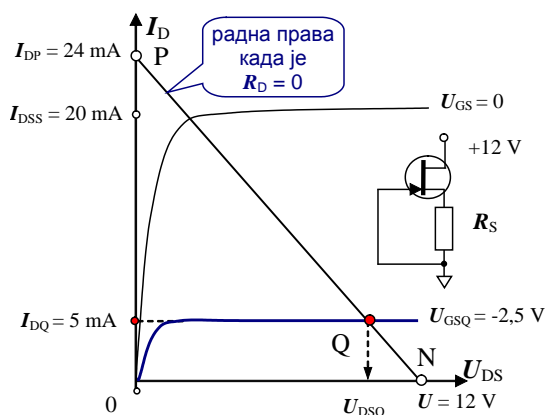
Вредност отпорности R_D мора да буде таква да радна права сече карактеристику, која одговара вредности напона U_{GSQ} , у тачки која припада области засићења.

На основу уцртане радне праве која пролази кроз тачку N(U , 0) и тачку P(I_{DP} , 0), са дијаграма се очитава вредност напона U_{DSQ} , која одговара пресеку радне праве и криве $I_D(U_{DS})$ која одговара задатој вредности струје I_{DQ} .

На слици је приказана радна права када је отпорност R_D једнака нули. У том случају је:

$$I_{DP} = I_D \Big|_{U_{DS} = 0 @ R_D = 0} = \frac{U}{R_S}.$$

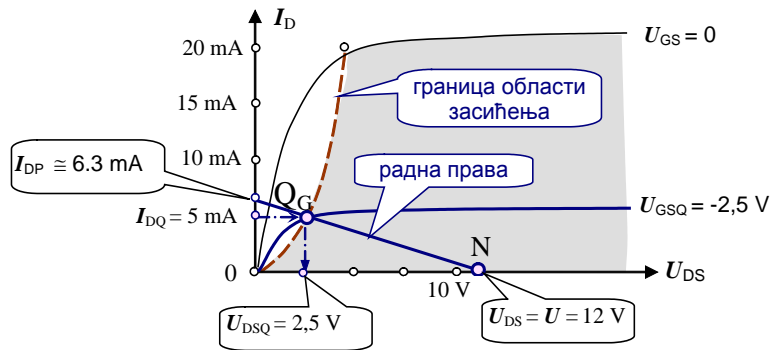
Са повећањем вредности R_D струја I_{DP} се смањује, јер се смањује нагиб радне праве која полази из тачке N(U , 0).



Гранични положај радне тачке у U_{DS} - I_D равни је тачка која представља пресек карактеристике $I_D(U_{DS})|_{U_{GS} = -2,5 \text{ V}}$ и криве која представља границу области засићења (приказане испрекиданом линијом). Ова тачка, Q_G , одговара највећој могућој вредности отпорности R_D .

У посматраном случају, са графика се очитава да је вредност напона U_{DSQ} која одговара граничној вредности отпорности R_D једнака:

$$U_{DSQ} = 2,5 \text{ V}.$$



Одређивање напона U_{DSQ} при граничној вредности отпорности R_D

На основу уцртане радне праве која пролази кроз тачку $N(U, 0)$ и тачку Q_G може да се прочита се вредност струје I_{DP} , која одговара пресеку радне праве и осе струје. За ову тачку важи:

$$I_{DP} = I_D \Big|_{U_{DS} = 0} = \frac{U}{\max R_D + R_S}.$$

Из претходне једначине следи израз који омогућује израчунавање највеће вредности отпорности R_D , при којој се радна тачка транзистора налази на граници области засићења:

$$\max R_D = \frac{U}{I_{DP}} - R_S.$$

У разматраном случају читава се $I_{DP} \approx 6,3 \text{ mA}$, одакле следи:

$$\max R_D \cong 1,4 \text{ k}\Omega.$$

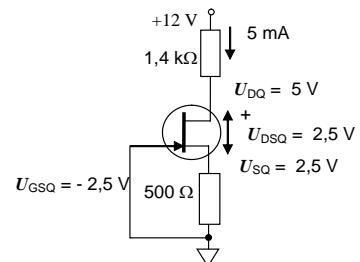
Ова вредност је складу са резултатом добијеним аналитичким решавањем у 4. одељку ове књиге.

ПРОВЕРА

Вредности струје и напона у посматраном колу, за $R_D = 1,4 \text{ k}\Omega$, назначене су на слици.

$$I_{DSS} = 20 \text{ mA}, U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V}.$$

$$U_{GD} = -5 \text{ V} = U_{GS(OFF)}$$



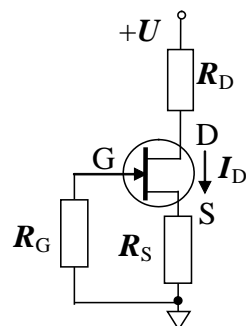
2. За коло приказано на слици, под претпоставком да је струја гејта занемарљиво мала, а да су познате вредности U_{DD} , R_S , I_{DSS} и $U_{GS(OFF)}$.

За задате вредности параметара кола:

$$U = 15V, R_G = 1 M\Omega, R_S = 1 k\Omega, I_{DSS} = 10 mA \text{ и}$$

$$U_{GS(OFF)} = -5 V;$$

- а) одредити вредност струје I_D , под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у области засићења;
- б) одредити опсег могућих вредности отпорности R_D при којима се, за задате вредности параметара кола, радна тачка транзистора налази у области засићења.



РЕШЕЊЕ

а)

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

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

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

Под претпоставком да је струја гејта I_G занемарљиво мала, може се сматрати да је напон U_G једнак нули, па је напон између гејта и сорса, U_{GS} , једнак паду напона који струја I_D ствара на отпорнику R_S ,

$$U_{GS} \cong -R_S I_D. \quad (3)$$

Једначина (3) дефинише радну праву у U_{DS} - I_D равни.

$$I_D = -\frac{U_{GS}}{R_S}. \quad (4)$$

На основу једначине (4) следи да је константа нагиба радне праве у U_{GS} - I_D равни једнака

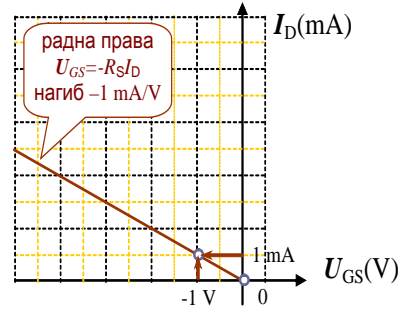
$$k_1 = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = -\frac{1}{R_S}.$$

Радна права полази из координатног почетка под углом α :

$$\alpha = \pi - \arccotg R_S \frac{I_o}{U_o},$$

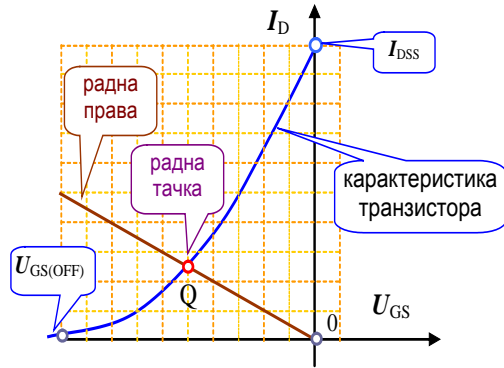
где је $R_S(\Omega)$ вредност отпорности R_S у омима, а $I_o(A)$ и $U_o(V)$ представљају вредности фактора скале $U-I$ дијаграма, у амперима односно волтима. За дијаграм у коме је струја приказана у милиамперима, а напон у волтима, је $I_o = 10^{-3} A$, $U_o = 1 V$.

Ако је отпорност R_S једнака $1 k\Omega$, радна права пролази кроз координатни почетак и тачку $(-1 V, 1 mA)$.



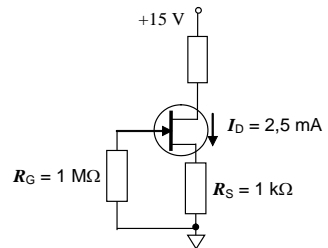
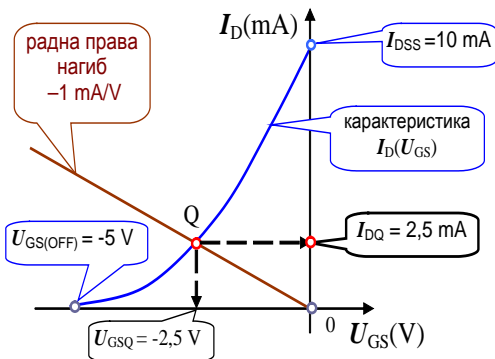
Под претпоставком да се радна тачка транзистора налази у области засићења, вредности радне струје I_{DQ} и напона гејт-сорс U_{GSQ} , могу се одредити графички помоћу статичке карактеристике преноса $I_D(U_{GS})$.

Када се радна тачка транзистора налази у области засићења, карактеристика преноса $I_D(U_{GS})$ је квадратна функција која пролази кроз тачке $(0, I_{DSS})$ и $(U_{GS(OFF)}, 0)$.



Положај радне тачке $Q(U_{GS}, I_D)$ одређен је тачком пресека карактеристике преноса транзистора и радне праве улазног кола.

У посматраном примеру, карактеристика преноса је квадратна функција која пролази кроз тачке $(0, 10 mA)$ и $(-5 V, 0)$. За задате бројне вредности ($R_S = 10^3 \Omega$) нагиб радне праве је $-1 mA/V$.



Вредности напона и струје I_D добијају се као пројекција тачке Q, која представља пресек радне праве и карактеристике $I_D(U_{GS})$, на осу напона, односно струје. За посматрано коло добија се:

$$U_{GSQ} = -2,5 \text{ V},$$

$$I_{DQ} = 2,5 \text{ mA}.$$

в) Једначина (2) дефинише радну праву у U_{DS} - I_D равни:

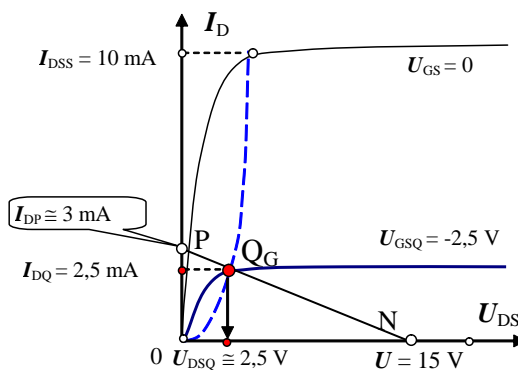
$$I_D = \frac{U - U_{DS}}{R_D + R_S}. \quad (5)$$

која полази из тачке N(U , 0), а има коефицијент правца (нагиб) који је одређен изразом:

$$k_0 = \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}} = -\frac{1}{R_D + R_S}$$

Најмања могућа вредност отпорности R_D једнака је нули. Највећа вредност отпорности R_D одређена је условом да се радна тачка налази на граници области засићености.

Радна права која полази из тачке N(U , 0) а пролази кроз тачку Q_G која представља пресек карактеристике $I_D(U_{DS})|_{U_{GS}=-2,5 \text{ V}}$ и криве која представља границу области засићења (приказане испрекиданом линијом) сече осу струје у тачки P (I_{DP} , 0). Са дијаграма се очитава да је вредност струје I_{DP} приближно једнака 3 mA.



На основу једначине (3) добија се општи израз за струју I_{DP} :

$$I_{DP} = \frac{U}{\max R_D + R_S},$$

одакле следи:

$$\max R_D = \frac{U}{I_{DP}} - R_S$$

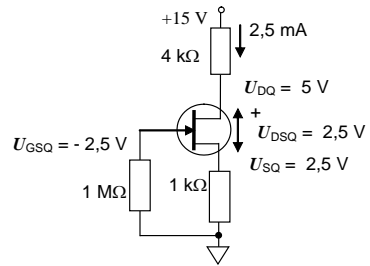
За задате бројне вредности је $\max R_D = 4 \text{ k}\Omega$.

ПРОВЕРА

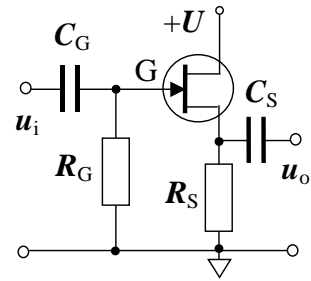
Вредности струје и напона у посматраном колу, за $R_D = 4 \text{ k}\Omega$, назначене су на слици.

$$I_{DSS} = 10 \text{ mA}, U_{GS(OFF)} = -5 \text{ V},$$

$$U_{GD} = -5 \text{ V} = U_{GS(OFF)}.$$



3. За коло приказано на слици познате су вредности: $R_G = 1 \text{ M}\Omega$, $R_S = 1200 \Omega$, $U_{GS(OFF)} = -3 \text{ V}$ и $I_{DSS} = 5 \text{ mA}$. Под претпоставком да је струја гејта занемарљиво мала, а да се радна тачка N -каналног транзистора са ефектом поља налази у области засићења, одредити вредност мирне радне струје I_{DQ} , напона U_{GSQ} и U_{DSQ} .



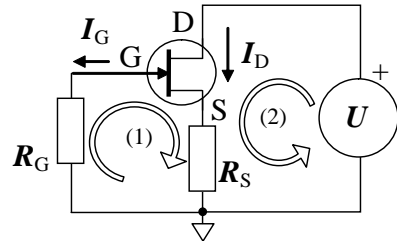
РЕШЕЊЕ

а)

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

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

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



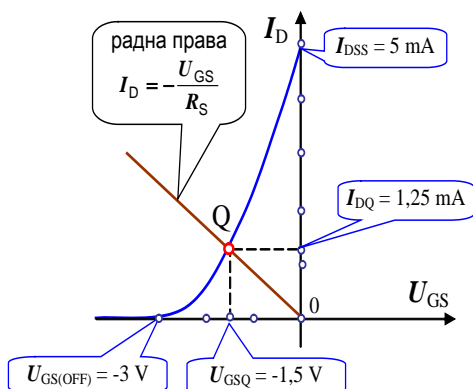
Под претпоставком да је струја гејта довољно мала да се пад напона на отпорнику R_G може занемарити, напон између гејта и сорса, U_{GSQ} , једнак је паду напона који струја I_{DQ} ствара на отпорнику R_S ,

$$U_{GSQ} \cong -R_S I_{DQ}. \quad (3)$$

Радна права у $U_{GS}-I_D$ равни пролази кроз координатни почетак и има нагиб:

$$k_1 = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = -\frac{1}{R_S}$$

Ова права сече карактеристику преноса $I_D(U_{GS})$ у тачки Q чије су координате (U_{GSQ}, I_{DQ}) :



$$U_{GSQ} = -1,5 \text{ V},$$

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

За напон U_{DSQ} важи:

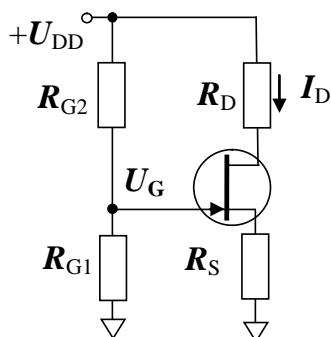
$$U_{DSQ} = U - I_{DQ}R_S = U + U_{GSQ}.$$

4. За N -канални транзистор са ефектом поља, у колу приказаном на слици, познате су декларисане границе могућих вредности карактеристичних параметара:

$$I_{DSS} \in (\min I_{DSS}, \max I_{DSS}),$$

$$U_{GS(OFF)} \in (\min U_{GS(OFF)}, \max U_{GS(OFF)}),$$

где је I_{DSS} струја засићења (струја између дрејна и сорса, при кратком споју између гејта и сорса), а $U_{GS(OFF)}$ напон прекида.



- одредити општи израз за вредност отпорности R_S тако да мирна радна струја транзистора, чија се радна тачка налази у области засићења, буде у задатом опсегу од $\min I_D$ до $\max I_D$;
- одредити потребне вредности напона U_G и отпорности R_S тако да, за декларисане вредности дате у табели, мирна радна струја транзистора у посматраном колу, I_D , буде у опсегу од 20 mA до 30 mA.

декларисане карактеристике	назив	ознака	јед.	min	max
	струја засићења	I_{DSS}	mA	50	150
напон прекида	$U_{GS(OFF)}$	V	- 4	- 10	

РЕШЕЊЕ

а) За вредности које одговарају мирној радној тачки у области засићења важе једначине:

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

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

Једносмерни напон на гејту, U_G , дефинисан је отпорничким делитељем напона, R_{G1} и R_{G2} , и напоном извора за поларизацију U_{DD} .

$$U_G = U_{DD} \frac{R_{G1}}{R_{G1} + R_{G2}}. \quad (3)$$

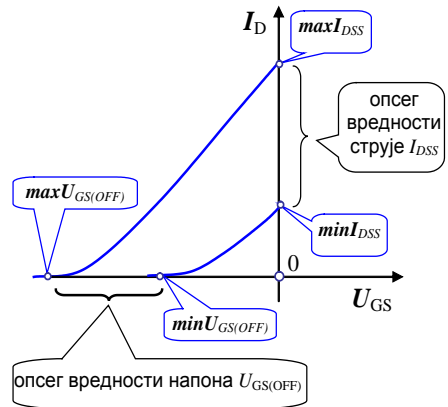
Вредност отпорности R_S треба одредити тако да се за било који транзистор, чији су параметри I_{DSS} и $U_{GS(OFF)}$ унутар декларисане производне толеранције, вредност мирне радне струје транзистора у посматраном колу налази у задатом (жељеном) опсегу (од 20 mA до 30 mA).

Максималној декларисаној вредности струје I_{DSS} , $\max I_{DSS} = 150 \text{ mA}$, одговара максимална по интензитету вредност напона прекида:

$$\max U_{GS(OFF)} = -10 \text{ V}.$$

Минималној вредности струје I_{DSS} (50 mA) одговара минимална по интензитету вредност напона прекида:

$$\min U_{GS(OFF)} = -4 \text{ V}.$$

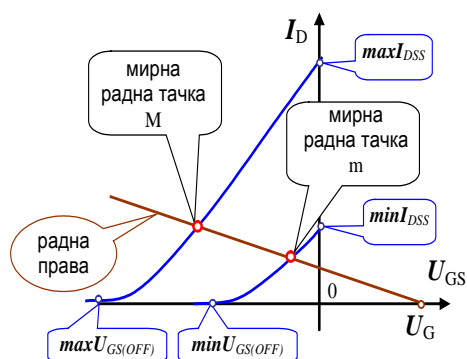


На основу једначине (1) одређује се, за декларисане параметре транзистора, $\max I_{DSS} = 150 \text{ mA}$ и $\max U_{GS(OFF)} = -10 \text{ V}$, и задату највећу вредност мирне радне струје у колу, $\max I_D$, одговарајућа (максимална по интензитету) вредност напона гејт-сорс, $\max U_{GS}$ (**мирна радна тачка M**):

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

Притом, на основу једначине 2, мора да буде испуњен услов да се радна тачка М налази на радној правој:

$$U_G = \max U_{GS} + R_S \max I_D.$$



За декларисане минималне вредности параметара транзистора, $\min I_{DSS}$ и $\min U_{GS(OFF)}$, и задату (жељену) најмању вредност мирне радне струје, $\min I_D$, одређује се одговарајућа (минимална по интензитету) вредност напона гејт-сорс, $\min U_{GS}$ (**мирна радна тачка m**):

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

Притом, на основу једначине 1, мора да буде испуњен услов:

$$U_G = \min U_{GS} + R_S \min I_D.$$

НАПОМЕНА

За N -канални транзистор са ефектом поља, напони U_{GS} и $U_{GS(OFF)}$ су негативни. Префикси "min" и "max" у ознаци указују да посматране величине одговарају минималној, односно максималној вредности струје I_{DSS} , (декларисаној од стране произвођача). Математички је:

$$\max U_{GS(OFF)} < \min U_{GS(OFF)}, \text{ односно: } \max U_{GS} < \min U_{GS}.$$

На основу претходног разматрања следи:

$$\max U_{GS} + R_S \max I_D = \min U_{GS} + R_S \min I_D, \text{ односно:}$$

$$R_S = \frac{\min U_{GS} - \max U_{GS}}{\max I_D - \min I_D}.$$

б) Из изведених израза, за задате опсеге (толеранције) вредности параметара I_{DSS} и $U_{GS(OFF)}$, и задат жељени опсег вредности мирне радне струје, I_D , одређују се вредности напона гејт-сорс $\min U_{GS}$ и $\max U_{GS}$ (које одговарају радним тачкама m и M, респективно):

$$\min U_{GS} = -4 \left(1 - \sqrt{\frac{20}{50}} \right) = -1,47 \text{ V} > \max U_{GS(\text{OFF})} = -10 \text{ V} ,$$

(транзистор није закочен), и

$$\max U_{GS} = -10 \left(1 - \sqrt{\frac{30}{50}} \right) = -5,53 \text{ V} > \min U_{GS(\text{OFF})} = -4 \text{ V} .$$

Уношењем задатих и израчунатих вредности у изведен израз за отпорност R_S добијаја се тражена вредност отпорности:

$$R_S = \frac{\min U_{GS} - \max U_{GS}}{\max I_D - \min I_D} \cong 406 \Omega .$$

Вредност напона поларизације гејта, U_G , одређује се на основу једначине 2, примењене на тачку М:

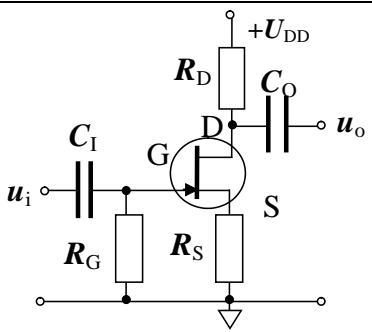
$$U_G = \max U_{GS} + R_S \max I_D = -5,53 \text{ V} + (406 \Omega)(30 \cdot 10^{-3} \text{ A}) \cong 6,65 \text{ V} .$$

ПРОВЕРА

Израчунате вредности морају да важе и када се једначина 2 примени за тачку м:

$$U_G = \min U_{GS} + R_S \min I_D = -1,47 \text{ V} + (406 \Omega)(20 \cdot 10^{-3} \text{ A}) \cong 6,65 \text{ V} .$$

5. За коло приказано на слици, одредити вредност мирне радне струје I_D ако је: $U_{DD} = 15 \text{ V}$, $R_S = 1 \text{ k}\Omega$, $I_{DSS} = 10 \text{ mA}$ и $U_{GS(\text{OFF})} = -5 \text{ V}$, $R_G = 1 \text{ k}\Omega$, $I_{GSS} = -1 \text{ nA}$.



РЕШЕЊЕ

У одсуству сигнала побуде ($u_i = 0$), стање у колу је представљено једначинама:

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

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

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

С обзиром на задате вредности параметара, пад напона који на отпорнику R_G може да се занемари. На основу једначина (1) и (2) добија се:

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

Вредност струје I_{DQ} у посматраном колу представља решење ове једначине.

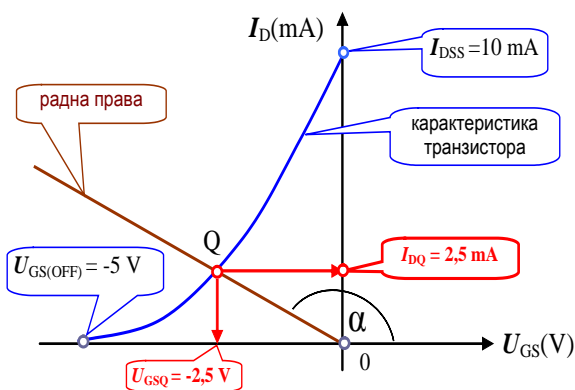
Графичком анализом у U_{GS} - I_D равни, вредност мирне радне струје добија се као пројекција на осу струје тачке која представља пресек карактеристике преноса транзистора са ефектом поља (3) и радне праве (1).

Карактеристика преноса транзистора, $I_D(U_{GS})$, је квадратна функција која пролази кроз тачке $(0, I_{DSS})$ и $(U_{GS(OFF)}, 0)$.

Радна права улазног кола полази из координатног почетка под углом α :

$$\alpha = \pi - \arctg R_S (\Omega) \frac{I_o (A)}{U_o (V)},$$

где је $R_S (\Omega)$ вредност отпорности R_S у омима, а $I_o (A)$ и $U_o (V)$ вредности фактора скале U - I дијаграма у амперима односно волтима.



За дијаграм у коме је струја приказана у милиамперима, а напон у волтима, је $I_o = 10^{-3} A$, $U_o = 1 V$. Задатој бројној вредности ($R_S = 10^3 \Omega$) одговара угао $\alpha = 135^\circ$.

Координате мирне радне тачке Q су:

$$U_{GSQ} = -2,5 V, \quad I_{DQ} = 2,5 mA.$$

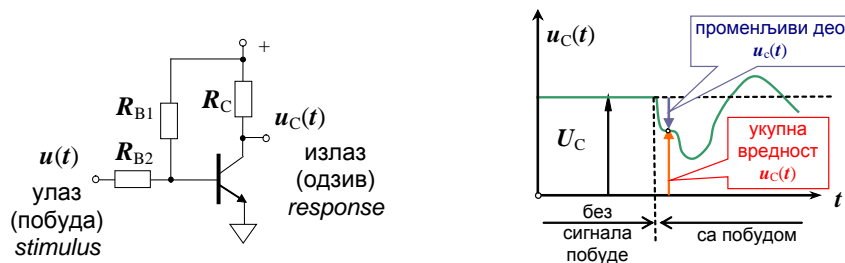
ПРИЛОГ

ОЗНАЧАВАЊЕ

Начин означавања променљивих сигнала у електронским колима стандардизује се међународним документима. У електроници се препоручују следећа основна правила:

- ✳ **велика слова се користе за означавање сталних величина, односно параметара периодичних сигнала** као што су вршна (*peak*), средња (*average*) и ефективна (*root-mean square - RMS*) вредност;
- ✳ **мала слова се користе за означавање временски променљивих величина.**

При описивању кола са транзисторима, симболи *E*, *B* и *C* у индексу означавају емитор, базу и колектор биполарног транзистора. Симболи *S*, *G* и *D* у индексу означавају сорс, гејт и дрејн транзистора са ефектом поља. На пример, у колу приказаном на слици, U_C представља стални напон колектора у одсуству побудног сигнала, $u_C(t)$ је укупна вредност променљивог напона на колектору, а $u_c(t)$ тренутна вредност наизменичне компоненте величине $u_C(t)$.



Укупна вредност напона, $u_C(t)$, једнака је алгебарском збиру вредности величина U_C и $u_c(t)$:

$$u_C(t) = U_C + u_c(t).$$

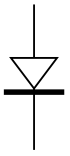
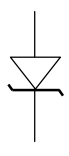
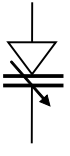

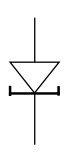
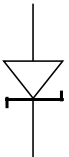
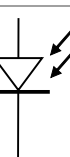
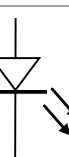
У општем случају, улазне величине електричне мреже (система) типа улаз-излаз означавају се латиничним словом “I” (*input*, улаз), односно “i” у индексу.

Излазне величине означавају се латиничним словом “O” (*output*, излаз), односно “o”, у индексу.







Величине које представљају однос величина излазног и улазног кола означавају се латиничним словом “F” (*forward*, унапред), односно “f”, у индексу.

Величине које представљају однос величина улазног и излазног кола означавају се латиничним словом “R” (*reverse*, обратан, повратни), односно “r”, у индексу.

СИМБОЛИ ДИОДА

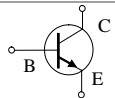
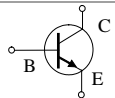
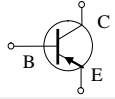
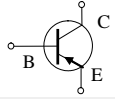




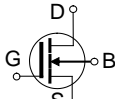
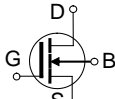
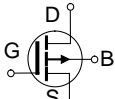
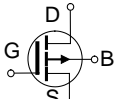
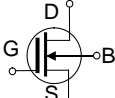
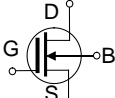
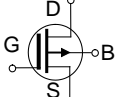
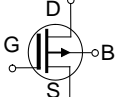
Опис	Симбол	Опис	Симбол
Сигнална диода		Ценер-диода	
Варикап диода		Симетрична Ценер-диода	
Тунел диода		Шотки-диода	
Фотоосетљива диода		Фотоемитијућа диода (LED)	

СИМБОЛИ ТИРИСТОРА

Опис	Симбол	Опис	Симбол
Диодни тиристор		Триодни тиристор P-типа (SCR)	
Симетрични диодни тиристор (диак)		Триодни тиристор N-типа (PUT)	
Тиристор са два гејта		Симетрични триодни тиристор (триак)	

СИМБОЛИ ТРАНЗИСТОРА

Графички симболи које препоручују међународне организације **IEC** и **IEEE** приказани су у табели. Кружић није обавезан.

Опис	Ознака	IEC	IEEE
<i>NPN</i> транзистор (<i>NPN bipolar junction transistor</i>)	<i>NPN BJT</i>		
<i>PNP</i> транзистор (<i>PNP bipolar junction transistor</i>)	<i>PNP BJT</i>		
<i>N</i> -канални спојни транзистор са ефектом поља (<i>N-channell junction field effect transistor</i>)	<i>N-JFET</i>		
<i>P</i> -канални спојни транзистор са ефектом поља (<i>P-channell junction field effect transistor</i>)	<i>P-JFET</i>		
<i>N</i> -канални <i>MOSFET</i> са индукованим каналом (<i>N-channell enhancement-type MOSFET</i>)	<i>N-MOSFET</i>		
<i>P</i> -канални <i>MOSFET</i> са индукованим каналом (<i>P-channell enhancement-type MOSFET</i>)	<i>P-MOSFET</i>		
<i>N</i> -канални <i>MOSFET</i> са уграђеним каналом (<i>N-channell depletion-type MOSFET</i>)	<i>N-MOSFET</i>		
<i>P</i> -канални <i>MOSFET</i> са уграђеним каналом (<i>P-channell depletion-type MOSFET</i>)	<i>P-MOSFET</i>		

Словне ознаке и називи у овој табели имају следеће значење:

Биполарни транзистори

BJT биполарни спојни транзистор (*bipolar junction transistor*), полупроводнички електронски елемент који садржи најмање два *PN*-споја, а у којем електричну струју образују слободни носиоци наелектрисања оба поларитета (електрони и шупљине).

- NPN*-транзистор биполарни транзистор у којем средишњу област представља полупроводник *P*-типа.
- PNP*-транзистор биполарни транзистор у којем средишњу област представља полупроводник *N*-типа.
- B* база (*base*), средишња област биполарног транзистора.
- E* емитор (*emitter*), област биполарног транзистора из које се, при одговарајућој поларизацији, већински слободни носиоци наелектрисања преносе (емитују) у област која представља базу.
- C* колектор (*collector*), област биполарног транзистора у којој се сакупљају слободни носиоци наелектрисања који су из емитора доспели у област која представља базу.

Транзистори са ефектом поља

- FET* транзистор са ефектом поља (*junction field effect transistor*)
- JFET* транзистор са ефектом поља израђен тако да у њему постоји *PN*-спој, спојни транзистор са ефектом поља, (*junction FET*)
- S* сорс (*source*), приључак транзистора са ефектом поља кроз који слободни носиоци наелектрисања улазе у област канала.
- G* гејт (*gate*), управљачка електрода транзистора са ефектом поља преко које се утиче на проводност канала између дрејна и сорса.
- D* дрејн (*drain*), приључак који представља други крај канала транзистора са ефектом поља.
- MOS* технологија израде транзистора са ефектом поља са изолованим гејтом, заснована на комбинацији три врсте материјала: метал – оксид - полупроводник (*metal-oxide-semiconductor*).
- MOSFET* транзистор са ефектом поља израђен у *MOS*-технологији.
- B* основа (*body*), подлога (*substrate*) на којој се израђује транзистор са ефектом поља.
- D-MOSFET* *MOS*-транзистор са ефектом поља са уграђеним каналом (*depletion MOSFET*).
- E-MOSFET* *MOS*-транзистор са ефектом поља са индукованим (подстакнутим) каналом (*enhancement MOSFET*).

ОЗНАКЕ

A	прикључак аноде	i_B	тренутна вредност укупне променљиве струје базе
A	појачање	i_b	наизменична компонента променљиве струје базе
A_I	појачање струје	I_B	стална струја базе
A_i	појачање струје за мале сигнале	i_C	тренутна вредност укупне променљиве струје колектора
A_U	појачање напона	i_c	наизменична компонента променљиве струје колектора
A_u	појачање напона за мале сигнале	I_C	стална струја колектора
B	прикључак базе	I_{CBO}	инверзна струја колекторског споја при $I_E=0$
C	прикључак колектора	I_{CEO}	инверзна струја колекторског споја при $I_B=0$
C	капацитивност	I_D	стална струја дрејна транзистора са ефектом поља
C_p	паразитна капацитивност	I_{DS}	струја кроз канал транзистора са ефектом поља, струја дрејн-сорс
D	прикључак дрејна	I_{DSS}	струја дрејна при кратком споју између гејта и сорса
E	прикључак емитора	i_E	тренутна вредност укупне променљиве струје емитора
f	учестаност	i_e	наизменична компонента променљиве струје емитора
g	електрична проводност	I_E	стална струја емитора
G	прикључак гејта	I_F	стална струја у директном (пропусном) смеру
g_i(g_{os})	излазна проводност фета	i_F	тренутна директна струја
g_{ij}	g -параметар еквивалентног кола	I_{FM}	вршна директна струја
g_m(g_{fs})	проводност преноса	I_{FRM}	вршна периодична директна (пропусна) струја
h	хибридни (h) матрични параметри четворопола	I_{FSM}	ударна (непериодична) директна струја
h_{fb}	појачање струје за мале сигнале, у споју са заједничком базом	I_G	стална струја гејта транзистора са ефектом поља
h_{FE}	појачање једносмерне струје, при заједничкој бази	I_{GSS}	одводна (инверзна) струја гејта спојног транзистора са ефектом поља при кратком споју између дрејна и сорса
h_{fe}	појачање струје за мале сигнале, у споју са заједничком базом	i_{IN}	тренутна вредност променљиве улазне струје
h_{FE}	појачање једносмерне струје, у споју са заједничким емитором	i_{in}	наизмена компонента улазне струје
h_{ib}	улазна отпорност за мале сигнале, у споју са заједничком базом	I_{IN}	стална улазна струја
h_{ie}	улазна отпорност за мале сигнале, у споју са заједничким емитором	I_O	стална излазна струја
h_{rb}	повратни сачинилац напона, у споју са заједничком базом	i_{OUT}	тренутна вредност променљиве излазне струје
h_{re}	повратни сачинилац напона, у споју са заједничким емитором	i_{out}	наизменична компонента излазне струје
i	тренутна вредност променљиве електричне струје	I_{OUT}	стална излазна струја
i₋	наизменична компонента променљиве струје	I_R	стална струја у инверзном смеру
I	стална електрична струја	i_R	тренутна инверзна струја
I_{AK}	стална струја кроз диоду, струја анода-катода	I_z	стална инверзна струја у опсегу радног напона Ценер-диоде
I_{AV}	средња вредност укупне електричне струје	K	прикључак катоде
I_M	највећа вредност укупне електричне струје	L	индуктивност
		p(t)	тренутна вредност електричне снаге
		P	активна снага

q, Q	наелектрисање	U_{CEsat}	напон засићења између колектора и емитора
q_e	наелектрисање електрона	U_{DS}	стални напон између дрејна и сорса
r	динамичка електрична отпорност	U_{EB}	стални напон између емитора и базе
R	статичка електрична отпорност	U_{EY}	Ерлијев напон
r_{DS}	излазна отпорност транзистора са ефектом поља,	U_F	директни (пропусни) стални напон диоде (PN-споја)
	отпорност између дрејна и сорса	u_F	тренутни укупни директни напон диоде (PN-споја)
$r_{DS(ON)}$	отпорност између дрејна и сорса у стању провођења	U_{FM}	највећа (вршна) вредност директног (пропусног) напона
$r_{DS(OFF)}$	отпорност између дрејна и сорса у стању непровођења	U_{GS}	стални напон између гејта и сорса
r_i	улазна отпорност за мале сигнале	$U_{GS(OFF)}$	прекидни напон између гејта и сорса MOS-транзистора са уграђеним каналом и спојног транзистора са ефектом поља
R_i	улазна отпорност	$U_{GS(TO)}$	напон прага између гејта и сорса MOS-транзистора са индукованим каналом
r_o	излазна отпорност за мале сигнале	u_{IN}	тренутна вредност укупног променљивог напона на улазу
R_o	излазна отпорност	u_{in}	наизменична компонента напона на излазу
r_T	отпорност нагиба исправљачке диоде	U_{IN}	стални напон на улазу
r_z	динамичка отпорност у опсегу радног напона Ценер-диоде	u_{OUT}	тренутна вредност укупног променљивог напона на улазу
r_{Δ}	диференцијална отпорност	U_{OUT}	наизменична компонента напона на излазу
r_{ij}	r -параметар еквивалентног кола	U_P	стални напон на излазу
S	прикључак сорса	U_R	напон тачке врха тунел-диоде
t	време	U_R	стални инверзни (непропусни) напон
T	температура	u_R	тренутни укупни инверзни напон диоде
TC	температурски коефицијент	U_{RM}	вршни инверзни напон
u	тренутна вредност променљивог напона	U_{RRM}	највећа (вршна) вредност периодичног инверзног напона
u_{\sim}	наизменична компонента напона	U_T	термички напон
U	стални напон	U_T	напон провођења у директном смеру тиристора
U_{AV}	средња вредност укупног напона	$U_{(TO)}$	напон прага исправљачке диоде
U_M	највећа вредност укупног напона	U_V	напон тачке дола тунел-диоде
u_{BE}	тренутна вредност укупног променљивог напона база-емитор	U_z	радни напон диоде референтног напона
u_{ve}	наизменична компонента напона база-емитор	V	потенцијал
U_{BE}	стални напон између базе и емитора	α	појачање струје од емитора до колектора
U_{BEsat}	напон засићења између базе и емитора	β	појачање струје од базе до колектора
$U_{(BR)}$	пробојни напон	σ	специфична проводност
U_{CB}	стални напон између колектора и базе	ρ	специфична отпорност
u_{CE}	тренутна вредност укупног променљивог напона колектор-емитор		
u_{ce}	наизменична компонента напона колектор-емитор		
U_{CE}	стални напон између колектора и емитора		

ЦИП-Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621 . 38 (075.8) (076)

БОШЊАКОВИЋ, Петар, 1945-

Основи електронике : збирка решених
задатака / Петар Бошњаковић.– Београд:
Висока школа електротехнике и рачунарства, 2010
(Београд : Ниш : Unigraf-X-Сору) . - 354 стр . :
илустр . ; 24 см

Тираж 200 .

ISBN 978 - 86 - 7982 - 058 – 7

а) Електроника - Задаци

COBISS.SR – ID 173676044