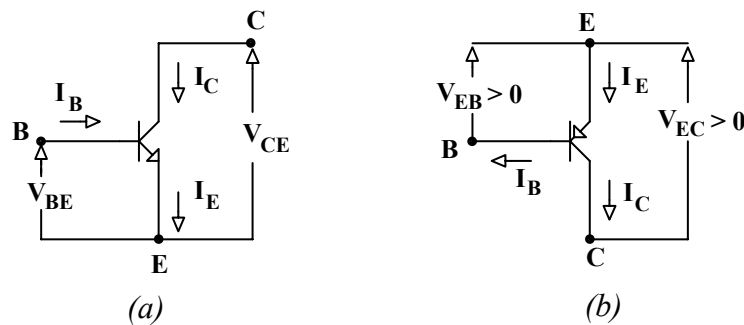


SADRŽAJ

VEŽBA BROJ 1: POLARIZACIJA BIPOLARNOG TRANZISTORA	2
VEŽBA BROJ 2: POLARIZACIJA MOSFETA	6
VEŽBA BROJ 3: POJAČAVAČ SA ZAJEDNIČKIM EMITEROM	10
VEŽBA BROJ 4: SNIMANJE KARAKTERISTIKA POLUPROVODNIČKIH ELEMENATA	15

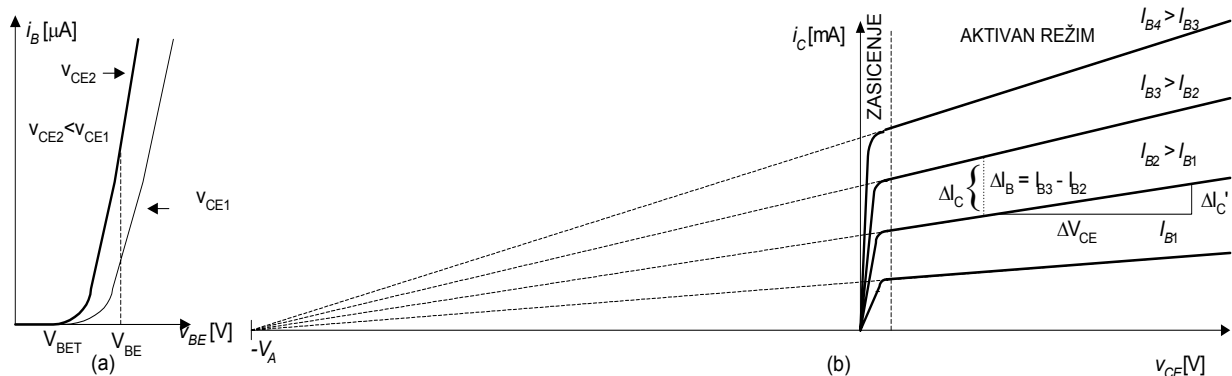
VEŽBA BROJ 1: POLARIZACIJA BIPOLARNOG TRANZISTORA

Tranzistor je poluprovodnička komponenta, koja ima tri izvoda: bazu (B), emiter (E) i kolektor (C). Na slici 1.1 su prikazane šematske oznake dva osnovna tipa tranzistora: NPN i PNP tipa.



Slika 1.1 Šematske oznake bipolarnog tranzistora: (a) NPN tipa i (b) PNP tipa, sa obeleženim tipičnim referentnim smerovima napona i struja

Između elektroda tranzistora mogu se definisati 3 napona i 3 struje. Ako se emiter usvoji kao zajednička elektroda za ulaz i izlaz, tada se tranzistor može posmatrati kao četvoropol sa dva ulazna (B i E) i dva izlazna kraja (C i E). Međusobna zavisnost napona V_{BE} i struje u kolu baze I_B (tj. u ulaznom kolu B-E), pri čemu se svi ostali parametri drže konstantnim, naziva se **ulazna statička karakteristika** (slika 1.2a). Analogno, međusobna zavisnost napona V_{CE} i struje I_C u kolu kolektora (tj. u izlaznom C-E kolu), dok se svi ostali parametri drže konstantnim, naziva se **izlazna statička karakteristika**. Ako se parametar I_B menja u određenim koracima, tada se umesto jedne dobija niz ili **familija izlaznih karakteristika**, kao što je prikazano na slici 1.2b.



Slika 1.2 Statičke karakteristike NPN tranzistora: (a) ulazna i (b) familija izlaznih karakteristika

U zavisnosti od polarizacije, tranzistori imaju tri uobičajena režima rada:

- zakočenje,
- aktivan režim i
- saturaciju.

Osnovne karakteristike pojedinih režima rada date su u tabeli 1.1.

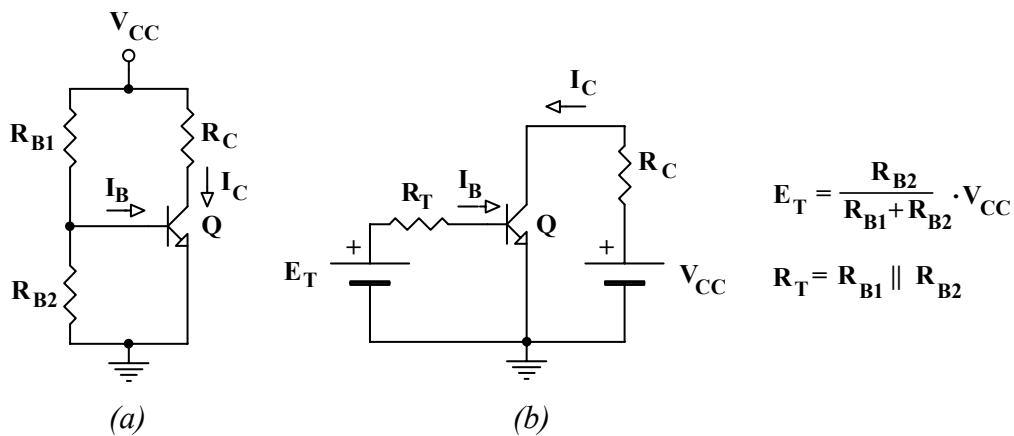
Na slici 1.3 je dato tipično kolo za polarizaciju tranzistora. Bitno je napomenuti da samo spoljašnje kolo određuje režim rada tranzistora (napajanje V_{CC} i otpornici R_C , R_{B1} i R_{B2}).

Strujno- naponska karakteristika spoljašnjeg kola se naziva **radna prava**. Analitički izraz za jednosmernu (statičku) radnu pravu se najlakše dobija primenom Tevenenove teoreme, kada se spoljašnje kolo predstavi kao ekvivalentan Tevenenov generator E_T i otpornik R_T , koji tranzistor "vidi" između:

- baze i emitera (ulazna statička radna prava);
- kolektora i emitera (izlazna statička radna prava).

Tabela 1.1 Osnovne karakteristike pojedinih režima rada NPN tranzistora

režim rada	polarizacija pn-spojeva	I_C	V_{CE}	V_{BE}	tipične vrednosti
zakočenje	BE inverzno, BC inverzno	$I_C \approx 0$	-	$V_{BE} < V_\gamma$	-
aktivan	BE direktno, BC inverzno	$I_C = h_{FE} \cdot I_B$	$V_{CE} > V_{CES}$	$V_\gamma < V_{BE} < V_{BES}$	$V_{BE} = 0,7V$
saturacija	BE direktno, BC direktno	$I_C < h_{FE} \cdot I_B$	$V_{CE} = V_{CES}$	$V_{BE} = V_{BES}$	$V_{BES} \approx 0,8V$



Slika 1.3 (a) Tipično kolo za polarizaciju bipolarnog tranzistora i (b) njegova transformacija korišćenjem Tevenenove teoreme

Na osnovu transformisane ekvivalentne šeme (slika 1.3b) dobijaju se izrazi za izlaznu statičku radnu pravu:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} ,$$

i za ulaznu statičku radnu pravu:

$$I_B = \frac{E_T - V_{BE}}{R_T} .$$

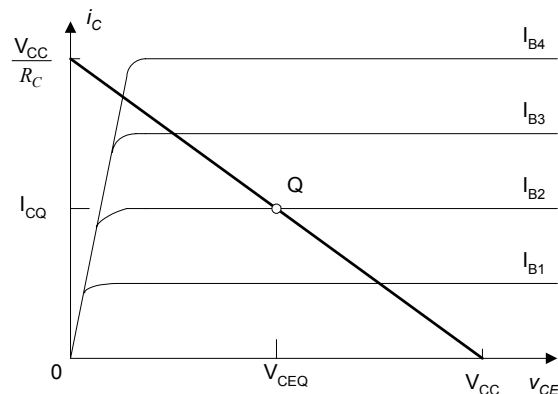
Da bi se pronašla vrednost napona i struje kroz tranzistor (**mirna radna tačka Q**) potrebno je rešiti sistem jednačina:

$$E_T = R_T \cdot I_B + V_{BE} ,$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C ,$$

$$I_C = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \approx I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} .$$

Ovaj sistem jednačina je transcendentan i ne može se analitički rešiti, pa se pribegava aproksimativnim metodama rešavanja. Naprimer, rešenje sistema je moguće odrediti grafički, traženjem preseka radne prave sa odgovarajućom izlaznom karakteristikom u polju izlaznih karakteristika, kao što je prikazano na slici 1.4.



Slika 1.4 Određivanje mirne radne tačke $Q(V_{CE}, I_C)$ grafičkom metodom

Osim na ovaj način, približno rešenje je moguće naći i ako se usvoji da je napon V_{BE} približno konstantan (na primer, za aktivan režim rada tranzistora se usvoji tipična vrednost napona V_{BE} , koja iznosi $V_{BE} = 0,7V$), čime se pojednostavljuje račun.

Izraz za baznu struju I_B može se dobiti kao razlika struja otpornika:

$$I_B = I_{RB1} - I_{RB2} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{B1}} - \frac{V_{BE}}{R_{B2}},$$

ili metodom superpozicije:

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BE}}{R_{B1} \parallel R_{B2}}.$$

NAPOMENA: Proučiti poglavlje 6.2 o polarizaciji bipolarnih tranzistora iz knjige "Elektronika, komponente i pojačavačka kola" prof. M. Živanova.

VEŽBA BROJ 1: POLARIZACIJA BIPOLARNOG TRANZISTORA

PRIBOR

1. Maketa sa otpornicima i tranzistorima	1 kom.
2. Dvokanalni osciloskop	1 kom.
3. Laboratorijski izvor napajanja od 12V	1 kom.
4. Izolovani provodnici sa utikačima	7 kom.

ZADATAK VEŽBE

1. Zakočenje tranzistora

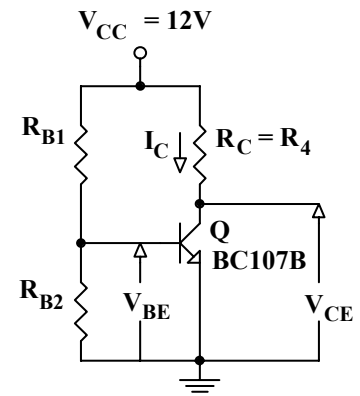
Pomoću makete sastaviti kolo sa slike 1.5, pri čemu je $R_{B1} = R_2 = 1,2M\Omega$ i $R_{B2} = R_7 = 1k\Omega$.

Nakon toga priključiti napajanje. Osciloskopom izmeriti napone V_{BE} i V_{CE} (**PAŽNJA: crna žica osciloskopa mora biti vezana za masu!**).

Izračunati struju I_C kao:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

U polju izlaznih statičkih karakteristika tranzistora nacrtati odgovarajuću statičku karakteristiku tranzistora, statičku radnu pravu i mirnu radnu tačku.



Slika 1.5 Kolo za polarizaciju bipolarnog tranzistora

2. Aktivan režim rada tranzistora

Ponoviti tačku 1. uz izmenu $R_{B2} = R_5 = 390k\Omega$. Izračunati struju I_B i odrediti h_{FE} tranzistora, pri čemu se smatra da je napon $V_{BE} = 0,7V = \text{const}$.

3. Saturacija tranzistora

Ponoviti tačku 1. uz izmenu $R_{B1} = R_1 = 36k\Omega$ i $R_{B2} = R_0 = 10k\Omega$. Izračunati struju I_B i odrediti faktor saturacije tranzistora F_S , koji se definiše kao:

$$F_S = h_{FE} \cdot \frac{I_B}{I_C}$$

Za h_{FE} uzeti vrednost izračunatu u tački 2. Smatrati da je napon $V_{BE} = 0,8V = \text{const}$.

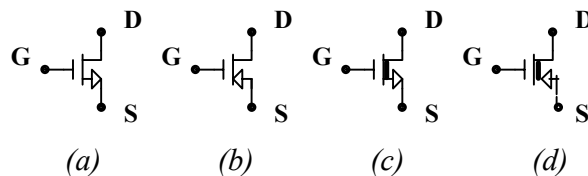
4. Ponoviti prethodne tri tačke za tranzistor BC107A.

VEŽBA BROJ 2: POLARIZACIJA MOSFETA

Mosfet je poluprovodnička komponenta, koja ima tri elektrode: gejta (G), sorsa (S) i drejna (D), kao što je prikazano na slici 2.1. To je tranzistor sa efektom polja, kod kojeg se proticanje struje između sorsa i drejna kontroliše naponom kontrolne elektrode (gejta). Prostor između sorsa i drejna kroz koji protiču slobodni nosioci naziva se **kanal**. Kanal se sastoji od poluprovodnika samo jednog tipa, pa struju kroz njega čine nosioci samo jedne vrste; ako su nosioci elektroni, mosfet je N-kanalni, a ako su šupljine P-kanalni. Provodnost kanala se menja promenom napona v_{GS} . Metalni provodnik gejta (koji je u novim konstrukcijama zamenjen polisilicijumom), oksid i poluprovodnička podloga obrazuju kondenzator.

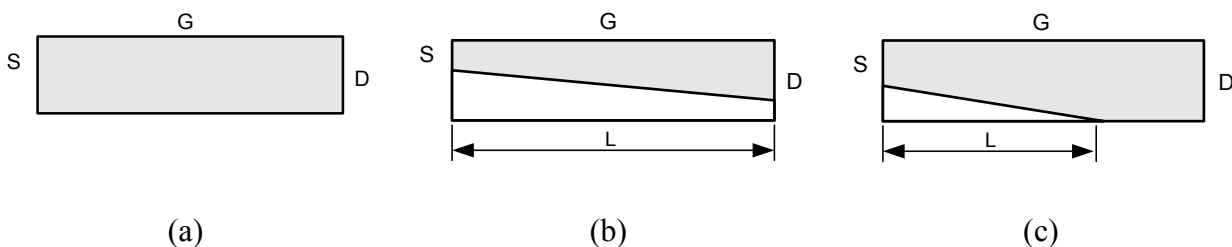
U zavisnosti od toga da li kroz kanal protiče struja pri nultom naponu gejta, mosfetovi se dele na:

- mosfetove sa ugrađenim kanalom (kod kojih struja drejna protiče i pri $v_{GS} = 0$) i
- mosfetove sa indukovanim kanalom (kod kojih i_D ne postoji pri $v_{GS} = 0$).



Slika 2.1 Oznake osnovnih tipova mosfetova: sa indukovanim kanalom (a) N-kanalni i (b) P-kanalni; sa ugrađenim kanalom (c) N-kanalni i (d) P-kanalni

Oznaka N-kanalnog mosfeta sa indukovanim kanalom data je na slici 2.1a, dok su karakteristični poprečni presezi prikazani na slici 2.2. Pri nultom naponu v_{GS} struktura mosfeta je analogna dvema diodama vezanim u opoziciju, tako da struja kroz mosfet ne teče (slika 2.2a). Povećanjem napona u kondenzatorskoj strukturi oblasti gejta formira se nekompenzovano vezano pozitivno naelektrisanje (u oksidu gejta), čime se privlače slobodni elektroni iz osnove i koncentrišu uz izolatoru (SiO_2). Priključenjem napona, $v_{DS} > 0$, uspostavlja se struja kanala i_D . Minimalni napon v_{GS} pri kome se uspostavlja struja kanala naziva se **napon praga V_T** .



Slika 2.2 Poprečni presezi N-kanalnog mosfeta sa indukovanim kanalom: (a) kada je zakočen, (b) provodi u omskoj oblasti i (c) u saturaciji

Kada provodi, mosfet može da radi u omskoj oblasti ili u zasićenju (saturaciji). Rad u omskoj oblasti nastaje ako se kanal uspostavi i ako nije nastupilo njegovo "uštinuće", kao što je prikazano na slici 2.2b (sa L je označena dužina kanala). Uslovi rada mosfeta u omskoj oblasti, kao i strujno-naponska karakteristika su dati u tabeli 2.1.

Koeficijent B, koji figuriše u strujno-naponskoj karakteristici, je dat izrazom (jednačine 5.14 ÷ 5.16, "Osnovi elektronike"):

$$B = \frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_0 \cdot \frac{W}{L} .$$

Kada napon poraste do vrednosti $v_{GD} \leq V_T$, pri $v_{GS} > V_T$, dolazi do "uštinuća" kanala (slika 2.2c) i mosfet ulazi u zasićenje. Treba napomenuti da rad mosfeta u omskoj oblasti odgovara zasićenju bipolarnog tranzistora, a zasićenje mosfeta aktivnom režimu rada bipolarnog tranzistora, kao što se vidi sa njihovih izlaznih karakteristika, slika 2.4.

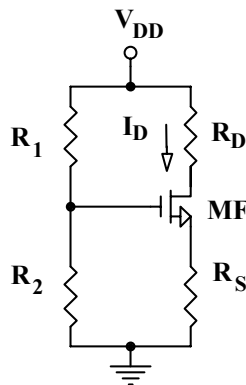
Tabela 2.1 Osnovne karakteristike pojedinih režima rada N-kanalnog mosfeta sa indukovanim kanalom

Režim rada	Uslovi	i_D	v_{DS}
zakočenje	$v_{GS} < V_T$	$i_D = 0$	-
omski režim	$v_{GS} > V_T$, $v_{GD} > V_T$	$i_D = B \cdot (2(v_{GS} - V_T)v_{DS} - v_{DS}^2)$	$v_{DS} < v_{GS} - V_T$
saturacija	$v_{GS} > V_T$, $v_{GD} \leq V_T$	$i_D = B \cdot (v_{GS} - V_T)^2$	$v_{DS} \geq v_{GS} - V_T$

Na slici 2.3 je dato kolo za polarizaciju mosfeta. Vrednost otpornika R_D treba izabrati tako da za svako (v_{DS} , i_D) mirna radna tačka ostane u oblasti zasićenja. Otpornik R_S u kolu sorsa doprinosi konstantnijem položaju mirne radne tačke pri rasipanju statičkih karakteristika mosfeta, a i poboljšava temperaturnu stabilnost mirne radne tačke zahvaljujući dejstvu negativne reakcije.

Izlazna statička radna prava za kolo prikazano na slici 2.3 je:

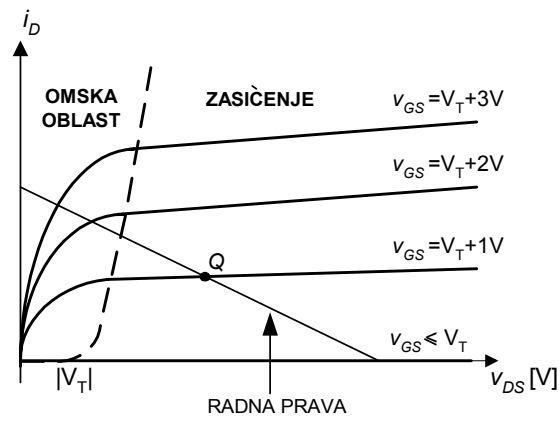
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D + R_S} .$$



Slika 2.3. Kolo za polarizaciju N-kanalnog mosfeta sa indukovanim kanalom

Statička radna prava mosfeta u polju izlaznih statičkih karakteristika mosfeta sa indukovanim kanalom prikazana je na slici 2.4 (Polarizacija mosfeta je kao na slici 2.3).

Treba napomenuti da se u jednostavnijim primenama otpornik R_S može izostaviti, kao što će biti i urađeno u okviru laboratorijskih vežbi.



Slika 2.4. Statička radna prava mosfeta sa indukovanim kanalom u polju izlaznih statičkih karakteristika

NAPOMENA: Proučiti poglavlje 5.2.4 o polarizaciji mosfetova sa indukovanim kanalom, iz knjige "Osnovi elektronike" prof. S. Tešića i prof. D. Vasiljevića.

VEŽBA BROJ 2: POLARIZACIJA MOSFETA

PRIBOR

1. Maketa sa otpornicima i mosfetovima	1 kom.
2. Dvokanalni osciloskop	1 kom.
3. Laboratorijski izvor napajanja od 12V	1 kom.
4. Izolovani provodnici sa utikačima	7 kom.

ZADATAK VEŽBE

1. Zakočenje mosfeta

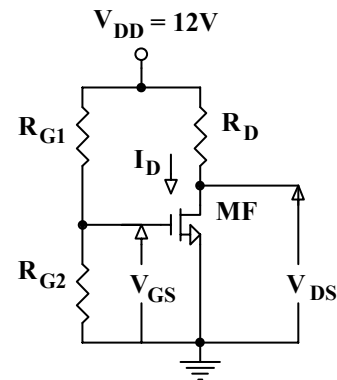
Pomoću makete sastaviti kolo sa slike 2.5, pri čemu je $R_{G1} = R_2 = 10k\Omega$ i $R_{G2} = R_7 = 1k\Omega$. **Nakon toga priključiti napajanje.**

Osciloskopom izmeriti napone V_{GS} i V_{DS}

PAŽNJA: crna žica osciloskopa mora biti vezana za masu! Izračunati struju i_D

kao:

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D}$$



Slika 2.5. Kolo za polarizaciju mosfeta

U polju izlaznih statičkih karakteristika mosfeta nacrtati odgovarajuću statičku karakteristiku mosfeta, statičku radnu pravu i mirnu radnu tačku.

2. Saturacija mosfeta

Ponoviti tačku 1. uz izmenu $R_{G1} = R_4 = 1k\Omega$ i $R_{G2} = R_5 = 1k\Omega$. Proveriti da li važi:

$$V_{SD} > V_{GS} - V_T$$

3. Omska oblast rada mosfeta

Ponoviti tačku 1. uz izmenu $R_{G1} = R_7 = 1k\Omega$ i $R_{G2} = R_6 = 4,7k\Omega$. Proveriti da li važi:

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T, \text{ ako je poznato da je } V_T < 3V.$$

4. Parametri mosfeta

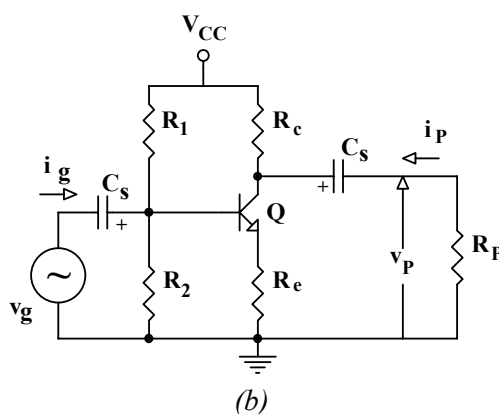
Na osnovu brojeanih vrednosti izračunati u tačkama 2. i 3. odrediti V_T i B .

VEŽBA BROJ 3: POJAČAVAČ SA ZAJEDNIČKIM EMITEROM

Tranzistor je poluprovodnička komponenta, koja ima tri izvoda: bazu (B), emiter (E) i kolektor (C). U zavisnosti od polarizacije, tranzistor ima tri uobičajena režima rada:

- zakočenje,
- aktivan režim,
- saturaciju.

Pomoću jednosmernih baterija i otpornika bipolarni tranzistor se polarise postavljanjem mirne radne tačke u željeni položaj u polju statičkih karakteristika (slika 3.1a). Time se tranzistor može dovesti u aktivni režim, u kome pokazuje pojačavačka svojstva i ima približno linearne karakteristike. Pobudni generator v_g daje korisni napon, a on se superponira na jednosmernu vrednost napona polarizacije, tako da se ostvaruje pomeranje mirne radne tačke u okolini odabranog mirnog položaja.



Slika 3.1 (a) Tranzistor polarisan za rad u aktivnom režimu,
(b) stepen sa zajedničkim emiterom

Jedan od načina za superponiranje naizmeničnog (korisnog) signala je priključenje redne veze pobudnog generatora i kondenzatora velike kapacitivnosti na mestu za pobudu (slici 3.1b). Posle dovoljno dugo vremena nakon uključivanja jednosmernog napona, kondenzator C_S se napuni na jednosmerni napon između baze i mase u mirnoj radnoj tački, u smeru prikazanom na slici 3.1b.

Uključivanjem i naizmeničnog generatora javlja se promenljiva komponenta struje kroz kondenzator. Ako je njegova vrednost C_S jako velika, napon na kondenzatoru se zanemarljivo malo menja, u odnosu na jednosmernu vrednost. Sprega preko kondenzatora ne može da prenese jednosmerne pobudne signale, pa se takva kola označavaju kao AC (*alternate current*) ili RC (*resistor-capacitor*) pojačavači.

Sve ovo važi i za način priključivanja potrošača, koje se vrši tako da se položaj mirne radne tačke ne promeni. To se, takođe, najjednostavnije postiže pomoću spreznog kondenzatora C_S , kao na slici 3.5b.

U zavisnosti od načina priključenja pobude, razlikujemo tri vrste pojačavačkih stepena:

1. **stepen sa zajedničkim emiterom**, kod koga se pobuda dovodi na bazu, a potrošač je na kolektoru;
2. **stepen sa zajedničkim kolektorom**, kod koga je pobuda na bazi, a potrošač na emiteru;
3. **stepen sa zajedničkom bazom**, kod koga je pobuda na emiteru, a izlaz na kolektoru.

Kod sinteze stepena sa zajedničkim emiterom mirna radna tačka se postavlja, pomoću kola za polarizaciju, na sredinu radne prave u zoni izlaznih statičkih karakteristika u kojoj su one linearne i ekvidistantne. Time se postiže linearnost pojačavača i najveća moguća amplituda promenljivog signala na njegovom izlazu. U postupku određivanja raspodele naizmeničnih signala struja i napona, vrši se ukidanje nezavisnih jednosmernih generatora, a sprežni kondenzatori se kratko spajaju (slika 3.2a). Tranzistor se zamenjuje njegovim ekvivalentnim modelom. Na osnovu ovako dobijenog kola (slika 3.2b) izračunava se naponsko pojačanje:

$$A_V = \frac{v_p}{v_g'} = - \frac{\beta \cdot R_p'}{R_g' + r_{\pi} + (1 + \beta) \cdot R_e}$$

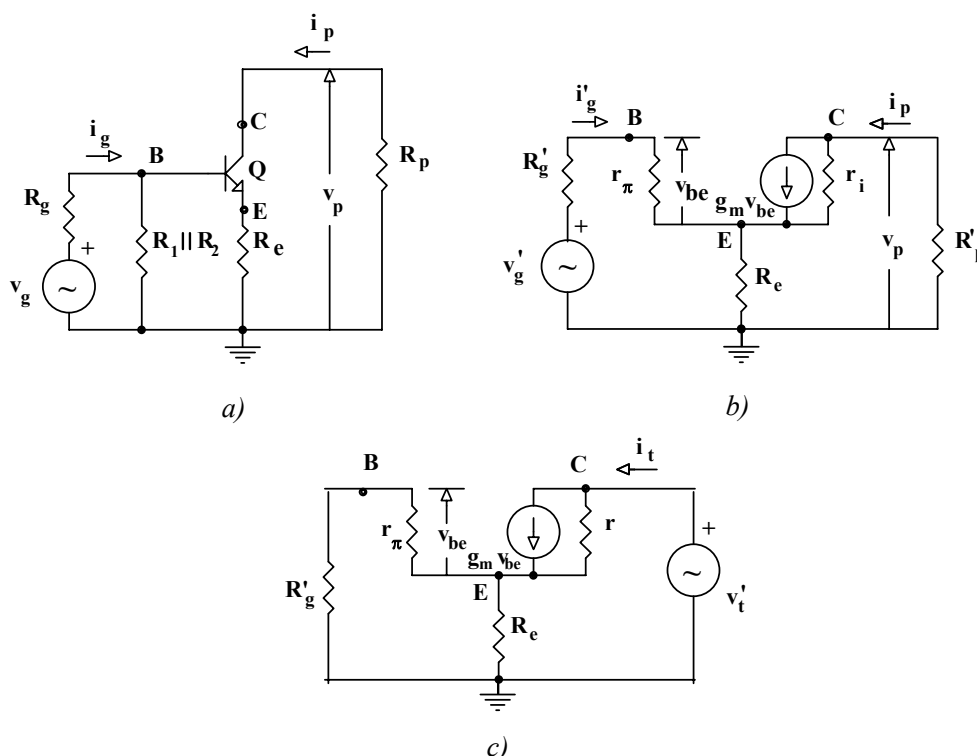
gde su

$$R_g' = R_g \parallel (R_1 \parallel R_2)$$

i

$$R_p' = R_p \parallel R_C$$

Znak minus pokazuje da stepen sa zajedničkim emiterom obrće fazu pojačavanog napona.



Slika 3.6 Analiza stepena sa zajedničkim emiterom: (a) uprošćeno kolo za naizmenični režim, (b) ekvivalentno kolo stepena i (c) kolo za određivanje izlazne otpornosti

Električno kolo pojačavača za određivanje izlazne otpornosti (slika 3.2c) se dobija kada se između kolektora i mase priključi idealni naponski test-generator v_t i odredi količnik njegovog napona i struje i_t :

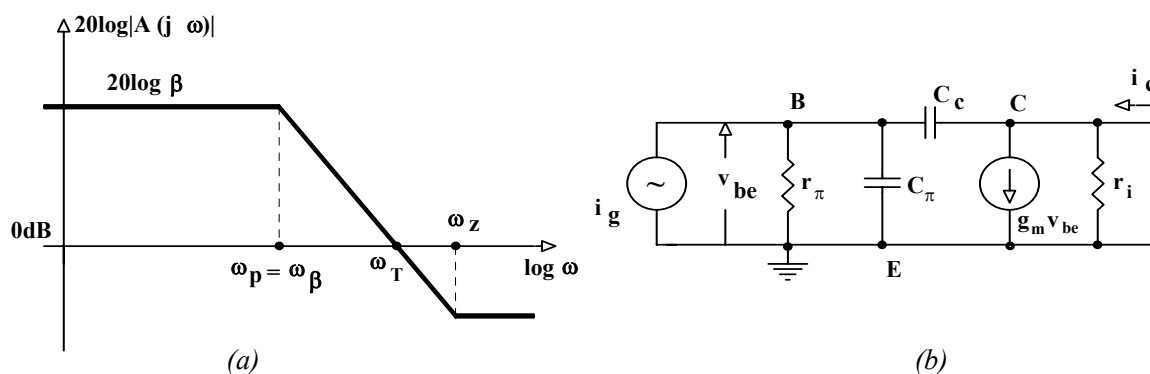
$$R_i = \frac{v_t}{i_t} = r_i + R_e \parallel (r_\pi + R_g')$$

Iz jednačina se vidi da naponsko pojačanje i izlazna otpornost zavise u znatnoj meri od otpornosti u emiteru R_e (kada je $R_e = 0$, naponsko pojačanje raste, a izlazna otpornost znatno opada). Zato se uticaj otpornosti R_e svodi na nulu njenim premošćavanjem sa sprežnim kondenzatorom C_e . (Premošćavanje je bolje nego kratko spajanje, jer se zadržava dejstvo otpornika R_e na stabilnost jednosmernih napona.)

Propusni opseg pojačavača se definiše kao interval učestanosti u kome je amplituska karakteristika konstantna, u okviru odstupanja od 3dB. Granične učestanosti se određuju na osnovu kriterijuma da na njima amplitudna karakteristika opadne $\sqrt{2}$ puta ili za 3dB, kao što je prikazano na slici 3.3a. Za analizu naizmeničnog režima rada pojačavača koristi se visokofrekventni ekvivalentni model tranzistora, prikazan na slici 3.3b.

Pojačavački stepen sa zajedničkim emiterom je niskofrekventni propusnik, sa gornjom graničnom frekvencijom datom izrazom:

$$\omega_p = \frac{1}{r_\pi (C_\pi + C_C)}$$



Slika 3.7 (a) Amplitudna karakteristika pojačavača sa zajedničkim emiterom, (b) ekvivalentno kolo za visoke učestanosti

NAPOMENA: Proučiti poglavlja 6.1.6. i 6.2.1. o polarizaciji bipolarnih tranzistora, kao i 8.2.1. o karakteristikama pojačavačkih stepena sa zajedničkim emiterom iz knjige "Elektronika - komponente i pojačavačka kola" prof. M. Živanova.

VEŽBA BROJ 3: POJAČAVAČ SA ZAJEDNIČKIM EMITEROM

PRIBOR

1. Maketa pojačavača	1 kom.
2. Dvokanalni osciloskop	1 kom.
3. Stabilisani izvor napona +12V	1 kom.
4. RC generator	1 kom.
5. Dekada otpornika	1 kom.
6. Izolovani provodnici sa utikačima	4 kom.

OPIS MAKETE

Na maketi su realizovane tri osnovne pojačavačke konfiguracije:

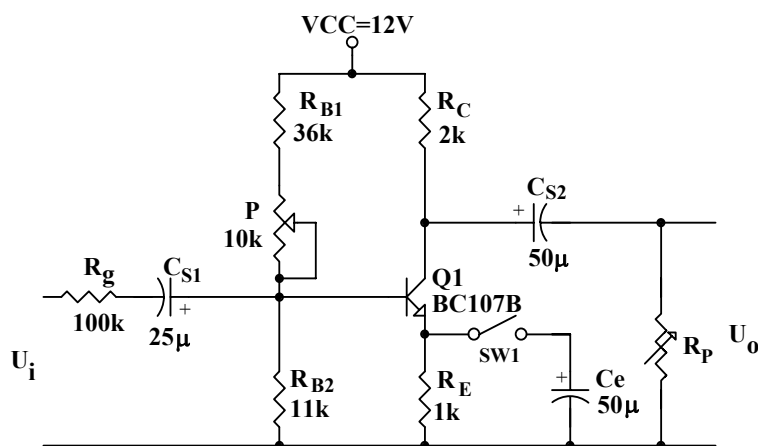
1. pojačavački stepen sa zajedničkim emiterom;
2. pojačavački stepen sa zajedničkim kolektorom;
3. pojačavački stepen sa zajedničkom bazom.

ZADATAK VEŽBE

1. Na ulaz pojačavača sa zajedničkim emiterom, prikazanog na slici 3.1, dovesti signal sa izlaza RC generatora. Na maketu priključiti i izvor napona od +12V (**obratiti pažnju na ispravan polaritet**). Jedan kanal osciloskopa vezati na ulaz pojačavača (**crna buksna od sonde se vezuje na masu**), a drugi na izlaz. Ne priključivati potrošač ($R_P \rightarrow \infty$).

2. Za pogodno izabranu amplitudu sinusoidalnog napona naizmeničnog napona frekvencije $f=1\text{kHz}$ sa izlaza RC generatora, odrediti amplitudu naizmeničnog napona na izlazu pojačavača. Potenciometrom P je potrebno podesiti položaj mirne radne tačke tako da se na izlazu dobije maksimalan neizobličen signal. Odrediti naponsko pojačanje. Obratiti pažnju na fazni stav izlaznog u odnosu na ulazni signal. Kondenzator C_e tokom izvođenja tačke 2 treba da bude odspojen.

3. Odrediti gornju graničnu frekvenciju pojačavača. Povećavati frekvenciju pobudnog signala sve dok naponsko pojačanje ne opadne za iznos koji odgovara gornjoj graničnoj učestanosti.



Slika 3.1 Stepen sa zajedničkim emiterom

4. Ponoviti tačku 2. za slučaj kada je C_e spojen.

5. Odrediti izlaznu otpornost pojačavača. Za određivanje izlazne otpornosti potrebno je na izlaz pojačavača priključiti potrošač. **Otpornost potrošača pri kojoj je izlazni napon jednak polovini vrednosti pri $R_p \rightarrow \infty$ je jednaka izlaznoj otpornosti pojačavača. Zašto?**

VEŽBA BROJ 4: SNIMANJE KARAKTERISTIKA POLUPROVODNIČKIH ELEMENATA

4.1 Dioda

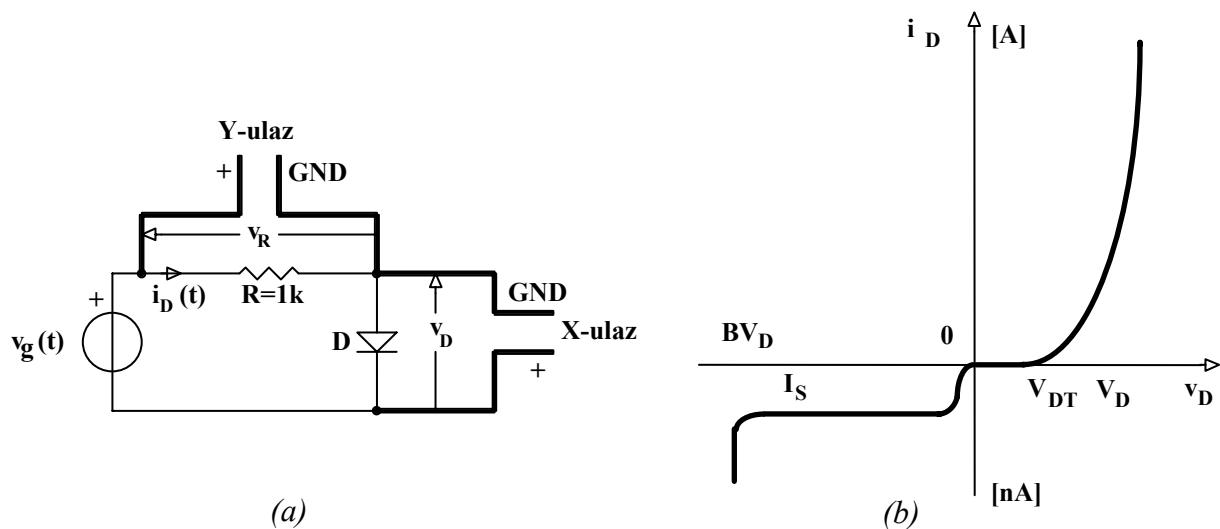
Traser je uređaj za snimanje statičkih karakteristika poluprovodničkih elemenata pomoću osciloskopa. Najjednostavniji traser za elemente sa jednim pristupom je prikazan na slici 4.1a. Da bi se snimila statička karakteristika diode U_D-I_D , na ulaz se dovodi pobudni napon $u_g(t) = U_1$, i tada važi:

$$U_1 = R \cdot i_{D1} + v_{D1} \text{ ,}$$

pri čemu je:

$$i_D = I_S \cdot (e^{v_D/V_T} - 1) \text{ .}$$

(1)



Slika 4.1 (a) Najjednostavniji traser za merenje statičke karakteristike diode i (b) statička karakteristika diode

Na taj način se dobija mirna radna tačka $Q_1(v_{D1}, i_{D1})$, kao što je prikazano na slici 4.1b. Za drugu vrednost pobudnog napona $v_g(t) = U_2$, dobija se sledeća mirna radna tačka $Q_2(v_{D2}, i_{D2})$, itd. Naš cilj je da na ekranu osciloskopa dobijemo celu statičku karakteristiku diode, a ne samo pojedinačne mirne radne tačke. Da bi to ostvarili potrebno je da traser dovodi na diodu vremenski promenljiv test-napon, najčešće sinusoidalnog oblika $u_g(t) = U \cdot \sin 2\pi f t$, jer se najlakše ostvaruje. Pri tome njegova frekvencija mora biti dovoljno visoka da ljudsko oko ne primeti kretanje radne tačke po ekranu, već samo kontinualnu liniju koja predstavlja statičku karakteristiku diode. Za pobudni signal se obično koristi frekvencija mreže napajanja od 50Hz. Amplituda ulaznog signala mora biti dovoljno velika da bi na osciloskopu bila vidljiva i radna i probojna oblast rada diode (slika 4.2).

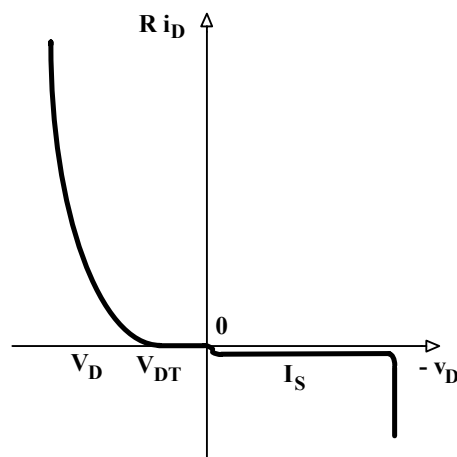
Praktično, slika na osciloskopu se dobija tako što se na Y-ulaz osciloskopa dovodi napon $u_R(t)$, koji je srazmeran struji diode, a na X-ulaz osciloskopa napon $-v_D(t)$. Zbog toga se na osciloskopu ne vidi karakteristika diode, već zavisnost (Ri_D) od $(-v_D)$. Na Y-osi je napon:

$$u_R(t) = R \cdot i_D(t),$$

gde ako se odabere praktična vrednost $R = 1k\Omega$, vrednosti snimljenog napona su 1000 puta veće od stvarnih vrednosti struje diode (na primer, ako je na ekranu osciloskopa vrednost od 1V, ona će odgovarati struji diode od 1mA).

Na X-osi je invertovani napon diode, tako da je cela karakteristika preslikana simetrično u odnosu na Y-osu, kao što se i vidi na slici 4.2.

Na osnovu dobijene karakteristike moguće je odrediti **prag provođenja** diode V_{DT} i njenu **dinamičku otpornost** r_d . Prag provođenja diode je napon pri kome ona počinje "primetno" da provodi struju.

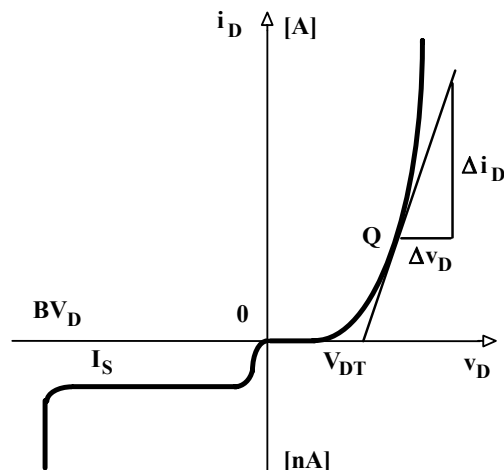


Slika 4.2. Modifikacija karakteristike diode, koja se vidi na osciloskopu.

Dinamička otpornost r_d se definiše na sledeći način:

$$r_d \equiv \left. \frac{dv_D}{di_D} \right|_Q \approx \left. \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} \right|_Q .$$

I ona se može grafički odrediti kao količnik konačnih priraštaja napona Δv_D i struje Δi_D diode u okolini mirne radne tačke Q (slika 4.3). Kao što se vidi sa karakteristike, dinamička otpornost zavisi od položaja mirne radne tačke.



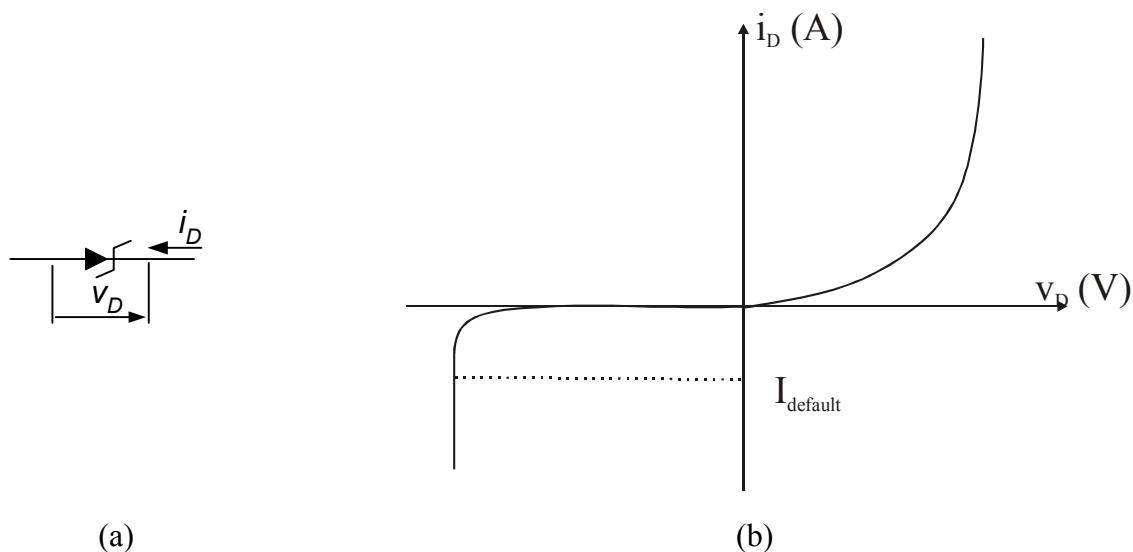
Slika 4.3 Grafičko određivanje dinamičke otpornosti

4.2 Cenerova dioda

Cenerova dioda ima mali probojni napon, koji se naziva **Cenerov napon** V_{Z0} . Radna tačka Cenerove diode se najčešće postavlja u oblast proboja definisanu opsegom struja $I_{Zm} < I_Z < I_{ZM}$ (slika 4.4b). Time se dobija približno konstantan napon na diodi pri promeni vrednosti struje. U oblasti proboja ne važi strujno-naponska karakteristika opisana jednačinom (1), pa se dioda modelira linearnom jednačinom:

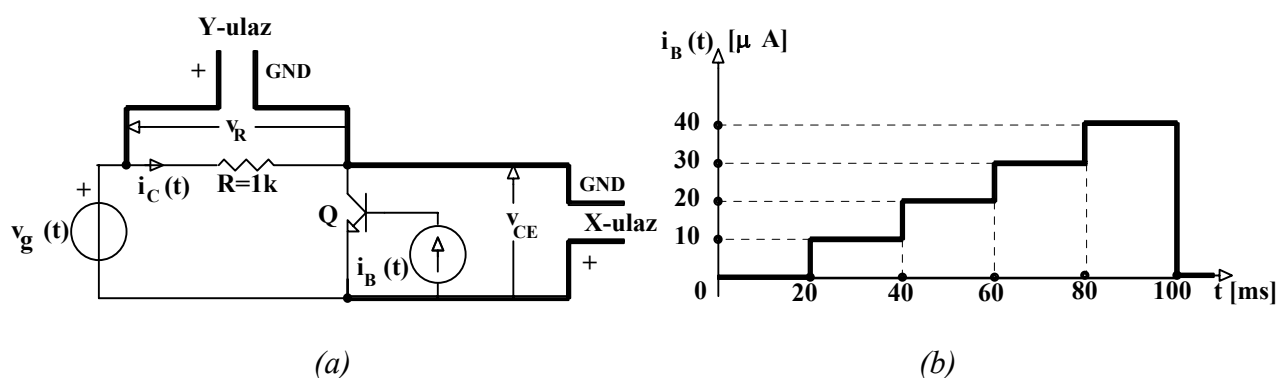
$$V_Z = V_{Z0} + r_Z(I_Z - I_{Zm}),$$

gde r_Z predstavlja **dinamičku otpornost** Cenerove diode u oblasti proboja.



Slika 4.4 Cenerova dioda: (a) statička karakteristika i (b) grafički simbol

4.3 Bipolarni tranzistor



Slika 4.5 (a) Kolo za snimanje karakteristike bipolarnog tranzistora i (b) bazna struja tranzistora

Pri snimanju karakteristike bipolarnog tranzistora koristi se kolo prikazano na slici 4.5a. Pobudni generator daje vremenski promenljiv sinusoidalni test-napon, $u_g(t) = U \cdot \sin 2\pi ft$. Za dobijanje familije izlaznih statičkih karakteristika potrebno je koristiti strujni generator koji obezbeđuje baznu struju tranzistora stepenastog oblika, kao što je prikazano na slici 4.5b. Svrha ovakvog strujnog generatora je da u prvoj periodi snimi karakteristiku za konstantnu baznu struju

$I_{B1} = 0A$, u drugoj periodi za sledeću vrednost $I_{B2} = 10\mu A$, itd. u skokovima po $10\mu A$. Jedina mana snimanja familije karakteristika je u tome što se na ekranu primećuje treperenje slike zbog isuviše male frekvencije signala (potrebno je da prođe $T_U = 5 \cdot T = 100ms$, dok mirna radna tačka ne opiše sve karakteristike). Na ekranu se i u ovom slučaju dobija slika koja je osno preslikana u odnosu na Y-osu (na X-ulaz se priključuje napon $-v_{CE}$, a na Y-ulaz napon srazmeran struji i_C , odnosno,

$$v_R = R \cdot i_C = 1000 \cdot i_C).$$

Faktor strujnog pojačanja tranzistora h_{FE} se definiše kao:

$$h_{FE} \equiv \frac{I_C}{I_B} \Big|_Q .$$

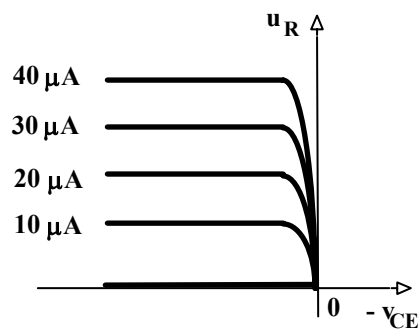
Takođe se može grafički odrediti, kao što je prikazano na slici 4.6.

Na karakteristici bipolarnog tranzistora treba obratiti pažnju na još jednu pojavu, tkz. **Erlijev (Early) efekat**. Iako na prvi pogled izgleda da su statičke izlazne karakteristike približno horizontalne i ekvidistantne, primećuje se malo povećanje struje i_C pri porastu napona v_{CE} . Uzrok tome je promena napona baza-kolektor, koji određuje širinu oblasti prostornog tovara, a time i širinu baze w .

Veći napon sužava bazu i povećava struju kolektora. Izraz za struju kolektora, bez zanemarivanja Erlijeveg efekta je:

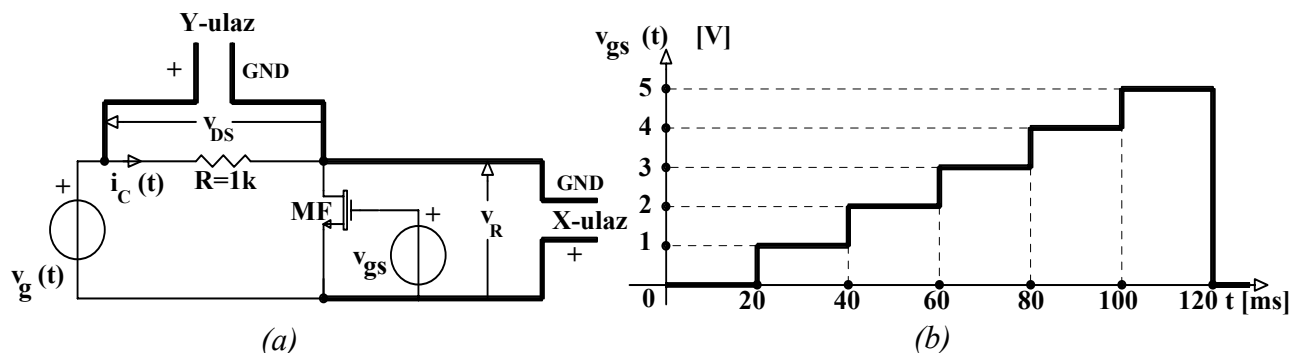
$$i_C = I_S \cdot \left(1 + \frac{v_{CB}}{V_A} \right) \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} .$$

Ovakvim traserom, zbog male maksimalne vrednosti napona za testiranje ne mogu se meriti karakteristike tranzistora u oblasti proboja.



Slika 4.6 Modifikacija karakteristike bipolarnog tranzistora, koja se vidi na ekranu osciloskopa

4.4 Mosfet sa indukovanim kanalom

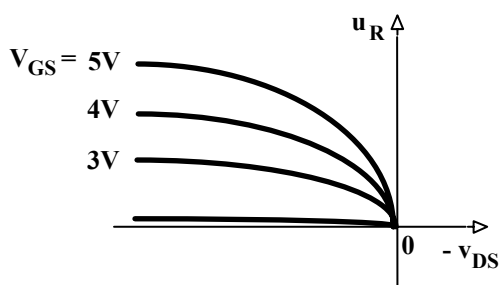


Slika 4.7 (a) Kolo za snimanje karakteristike mosfeta i (b) napon koji se dovodi na gejt

Snimanje statičke karakteristike mosfeta se vrši pomoću kola prikazanog na slici 4.7a. Da bi se dobila familija statičkih karakteristika, na gejt mosfeta se dovodi stepenasti signal, slično kao kod bipolarnog tranzistora (slika 4.7b). Bitni parametri mosfeta su **prag provođenja V_P** i **transkonduktansa g_m** , koja se izračunava kao:

$$g_m \equiv \left. \frac{di_D}{dv_{GS}} \right|_{v_{DS}=\text{const.}} \approx \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} \right|_{v_{DS}=\text{const.}}$$

Sa snimljene karakteristike se vidi da postoji manji broj karakteristika, nego što ima vrednosti pobudnog stepenastog napona. To se dešava zato što se sve karakteristike dok mosfet ne provede preklapaju, tako da prag provođenja približno odgovara onoj karakteristici koja je prva različita od nulte (ovo se odnosi na n-kanalni mosfet sa indukovanim kanalom). Odnosno, najviša karakteristika odgovara naponu $v_{GS} = 5V$, a naniže odgovaraju manjim vrednostima napona v_{GS} (4V, 3V,...), kao što se vidi sa slike 4.8.



Slika 4.8 Modifikovana statička karakteristika mosfeta, koja se vidi na ekranu osciloskopa

NAPOMENA: Proučiti poglavlja 5.1. i 5.2. o karakteristikama dioda, poglavlje 5.6. o Cenerovoj diodi, poglavlje 6.1.6. o statičkim karakteristikama bipolarnih tranzistora i poglavlje 7.4. o mosfetovima sa indukovanim kanalom iz knjige "Elektronika – komponente i pojačavačka kola" prof. M. Živanova.

VEŽBA BROJ 4: SNIMANJE KARAKTERISTIKA POLUPROVODNIČKIH ELEMENATA

PRIBOR

1. Maketa sa diodama i tranzistorima	1 kom.
2. Traser	1 kom.
3. Dvokanalni osciloskop	1 kom.
4. Izolovani provodnici sa utikačima	6 kom.

OPIS MAKETE

Traser je uređaj za snimanje statičkih karakteristika poluprovodničkih elemenata pomoću osciloskopa. Traser se priključuje na sledeći način:

- mase (GND na šemama, crna žica na sondi) na **GND** izlaze traseru;
- X kanal osciloskopa (**CH1**) preko sonde na X izlaz traseru;
- Y kanal osciloskopa (**CH2**) preko sonde na Y izlaz traseru;
- na osciloskopu postaviti vremensku bazu (time/div) na **X-Y**;
- postaviti oba ulaza osciloskopa na **GND**, podesiti koordinatni početak grafika;
- postaviti oba ulaza osciloskopa na **DC**.

Traser daje vremenski promenljiv sinusni test-napon $u(t)$ na element čije se karakteristike ispituju, a ujedno daje i struju $i(t)$ kroz njega. Na njegovom X izlazu je napon $u(t)$, a na Y izlazu napon srazmeran struji $i(t)$, tako da struji od 1mA kroz posmatrani element odgovara napon od 1V na Y izlazu traseru.

Osciloskop je podešen horizontalno, dok Y izlaz traseru pomera mlaz vertikalno. Tako se na ekranu osciloskopa dobija U-I karakteristika elementa. **NAPOMENA:** Slika je obrnuta oko jedne od osa zbog načina rada traseru!

ZADATAK VEŽBE

1. Statičke karakteristike diode

Na traseru taster tranzistor-dioda postaviti u položaj **dioda**. Priključiti diodu BA511 na traser, **obraćajući pažnju na odgovarajući raspored priključaka na maketi i traseru**. Uključiti instrumente. Odrediti nulu koordinatnog početka i najpovoljniju razmeru na ekranu, pomoću **volts/div** za **ch1** i **ch2**. Nacrtati karakteristike diode. Sa snimljenih karakteristika odrediti prag provođenja diode i dinamičku otpornost pri struji $I_D=10\text{mA}$.

Postupak ponoviti za diodu 1N5401.

2. Statičke karakteristike Cenerovih dioda

Postupkom sličnim kao pod 1. snimiti karakteristike Cenerovih dioda BZ3, BZ5.6 i BZ10. Skicirati karakteristike ovih dioda, proceniti njihove probojne napone i uporediti njihove dinamičke impedanse u probojnoj oblasti.

3. Statičke karakteristike bipolarnih tranzistora

Na traseru taster tranzistor-dioda postaviti u položaj **tranzistor**. Priključiti tranzistor BC182, **pazeći pri tome na odgovarajući raspored priključaka na maketi i na traseru**. Traser pri određivanju karakteristike tranzistora daje baznu struju počev 0 u skokovima po $10\mu\text{A}$. Snimiti karakteristiku tranzistora i sa nje proceniti statički faktor strujnog pojačanja. Uočiti Early-ev efekat.

Na sličan način snimiti karakteristike i odrediti faktor statičkog strujnog pojačanja za tranzistore BC182 i BC109.

4. Statičke karakteristike mosfeta

Spojiti izvode mosfeta 4007/1 sa odgovarajućim priključcima na traseru, **pazeći na ispravan raspored**. Snimiti karakteristike i odrediti parametre U_P i g_m . Spojiti potom i 4007/2 i snimiti njegove karakteristike. Uočiti da li ima razlika u karakteristikama i, ukoliko ih ima, objasniti njihov uzrok. Traser daje napon gejta u koracima od 1V.