

Osnovni sklopovi pojačala - s bipolarnim tranzistorom

Špehar, Valentino

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences / Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:186:365621>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences - FHSSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI
Odsjek za politehniku

Valentino Špehar

**Osnovni sklopovi pojačala s bipolarnim
tranzistorom
(završni rad)**

Rijeka, 2018. godina

SVEUČILIŠTE U RIJECI
FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI

Studijski program: sveučilišni preddiplomski studij politehnike

Valentino Špehar

JMBAG : 110009066754

**Osnovni sklopovi pojačala s bipolarnim
tranzistorom**

-završni rad-

Mentor: mr.sc. Gordan Đurović, v.pred.

Rijeka, 2018. godine

FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI

Odsjek za Politehniku

U Rijeci, 11. listopada 2017. godine

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Valentino Špehar**

Studij: **Sveučilišni preddiplomski studij politehnike**

Naslov završnog rada: **Osnovni sklopovi pojačala s bipolarnim tranzistorom / Basic amplifier circuits with bipolar transistor**

Znanstveno područje: **2. Tehničke znanosti**

Znanstveno polje: **2.03. Elektrotehnika**

Znanstvena grana: **2.03.03 Elektronika**

Kratak opis zadatka: Opisati osnovni princip rada bipolarnih tranzistora, osnovnu izvedbu i način rada. Prikazati tri osnovna sklopa pojačala s bipolarnim tranzistorima (pojačalo u spoju zajedničkog emitera, pojačalo u spoju zajedničke baze i pojačalo u spoju zajedničkog kolektora). Usporediti prednosti i nedostatke svake od navedenih izvedbi. Prikazati korištenje bipolarnih trnzistora u skopu pojačavanja ulaznog signala, objasniti shemu spoja te praktično izvesti spoj.

Zadatak uručen pristupniku: **11. listopada 2017. godine**

Ovjera prihvatanja završnog rada od strane mentora: _____

Završni rad predan: _____

Datum obrane završnog rada: _____

Članovi ispitnog povjerenstva: 1. predsjednik - _____

2. mentor - _____

3. član - _____

Konačna ocjena: _____

Mentor

mr. sc. Gordan Đurović

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradilo samostalno, isključivo znanjem stečenim na Odsjeku za politehniku Filozofskog fakulteta u Rijeci, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora mr.sc. Gordana Đurovića.

U Rijeci , 30.05.2018

SAŽETAK

U završnom radu pod naslovom **Osnovni sklopovi pojačala s bipolarnim tranzistorom** pisao sam o osnovnim karakteristikama bipolarnog tranzistora. Opisao sam strukturu tranzistora u pn i np spoju. Pokazao kako se tranzistor ponaša u aktivnom radnom području, da je izveden diskretno i da je to integrirani spoj.

U nastavku sam opisao tranzistor u spoju zajedničke baze. Što se događa sa ulaznim karakteristikama, kakvu funkciju u njima imaju napon i struje emitera, kolektora i baze. U izlaznim karakteristikama u spoju zajedničke baze prikazao sam ovisnost izlazne struje o izlaznom naponu kada ulaznu struju koristimo kao parametar. Područje normalnog aktivnog te područje zasićenja nalaze se u prvom i drugom kvadrantu dok njihova os granica predstavlja pozitivnu struju. Područje zapiranja je stopljeno s pozitivnom apscisom pošto je tu $U_{CB} > 0$ i $U_{EB} > 0$.

S pojačalom u spoju zajedničke baze struja nema vrijednost veću od 1. Struja emitera koja je ulazna struja je uvijek za iznos struje baze veća od izlazne struje, odnosno struje kolektora pri radu u normalnom aktivnom području. Ovaj spoj tranzistora osigurava značajno naponsko pojačanje. Sposobnost da pri radu u zajedničkoj bazi pojačava se naponski signal osigurava se na razlici dinamičkog otpora ulaznog i izlaznog kruga.

U ulaznim karakteristikama, kod spoja emitera struja emitera je struja uzemljene elektrode koja se ne pojavljuje ni na ulazu ni na izlazu tranzistora. Karakteristike prikazuje ovisnost ulazne bazne struje I_B o ulaznom naponu U_{BE} uz izlazni napon U_{CE} kao parametar. U normalnom aktivnom području imamo $U_{BE} > 0, U_{CE} > 0, U_{CE} > U_{BE}$. Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera stapaju se u normalnom aktivnom području u jednu krivulju neovisnu o iznosu U_{CE} kada je on veći od U_{BE} .

Bipolarni tranzistor u spoju zajedničkog emitera u normalnom aktivnom području posjeduje značajno strujno pojačanje. Koristimo relaciju za izmjenični strujni signal pod pretpostavkom da tranzistor radi u dijelu malih signala. Faktor h_{fe} većinom je većeg iznosa od 1 a općenito reda veličine 100. Trebamo voditi računa kod strujnog pojačala da on prima strujni signal s generatora na ulazu te ga pojačanog predaje potrošaču na izlazu pojačala.

Kod pojačala u spoju zajedničkog kolektora, ono u čemu se razlikuje od spoja zajedničkog emitera je to što se potrošač ovdje nalazi u krugu emitera, a kolektor je spojen direktno na kolektorsku bateriju te time uzemljen na izmjenični signal. Funkcija otpornika R_1 i R_2 ista je kao kod pojačala u spoju zajedničkog emitera i zajedničke baze.

SUMMARY

In the final paper titled Basic amplifier assemblies with bipolar transistor I wrote about the basic characteristics of a bipolar transistor. I have described the transistor structure in pn and np fusion. He showed how the transistor behaves in the active working area, that it is executed discreetly and that it is an integrated circuit.

Below I described the transistor in a joint base. What happens to the input characteristics, what function they have the voltage and current of the emitter, collector and base. In the output characteristics of the common base connection I showed the output output current dependency on the output voltage when using the input current as a parameter. The area of normal active and saturation area is located in the first and second quadrants while their bounds represent positive current. The field of zaping is aligned with a positive absent since $U_{CB} > 0$ i $U_{EB} > 0$.

The amplifier in the common ground current converter does not have a value greater than 1. The current of the emitter that is the input current is always for the amount of base current greater than the output current or collector current when operating in the normal active range. This transistor connection provides significant voltage boost. The ability to work on a common basis increases the voltage signal to ensure a different dynamic input and output circuit resistance.

In the input characteristics, in the emitter of the emitter the current of the emitter is the current of the ground electrode which does not appear either at the input or at the output of the transistor. The characteristics show the dependence of the input base I_B on the input voltage U_{BE} with the output voltage U_{CE} as a parameter. In the normal active area we have $U_{BE} > 0, U_{CE} > 0, U_{CE} > U_{BE}$. The input characteristics of the transistor in the common emitter circuit break in the normal active area into a curve independent of the U_{CE} when it is greater than U_{BE} .

The bipolar transistor in the joint of the common emitter in the normal active area possesses a significant current amplification. We use the relay for the alternating current signal assuming that the transistor works in the part of the small signal. The h_{fe} factor is mostly greater than 1 and generally of the order of 100. We need to keep an eye on the power amplifier that it receives the power signal from the generator at the input and amplifies it to the consumer at the output of the amplifier.

For amplifiers in a common collector circuit, what differs from a common emitter is that the consumer is located in the emitter circuit, and the collector is connected directly to the collector battery, thereby grounding the acoustic signal. The resistor function R_1 and R_2 is the same as the amplifier in a common emitter and common base.

SADRŽAJ

0. Uvod	8
1. Bipolarni tranzistor	
1.1 - Princip rada bipolarnog tranzistora	9
1.2 - Rad tranzistora u aktivnom području.....	10
2. Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze.....	12
2.1 - Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze	14
2.2 - Pojačalo u spoju zajedničke baze	15
3. Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera.....	21
3.1 - Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera.....	22
3.2 - Pojačalo u spoju zajedničkog emitera.....	24
3.3 - Odnosi snaga.....	30
4. Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora – emittersko slijedilo	32
5. Vježba – Bipolarni tranzistor kao pojačalo ulaznog signala.....	35
5.1 - Niskofrekventni oscilator (zujalica).....	
6. Zaključak	36
7. Popis literature.....	37
8. Popis slika.....	38

Uvod

U završnom radu pod nazivom **Osnovni sklopovi pojačala s bipolarnim tranzistorom** obraditi ću sve što znam o građi bipolarnih tranzistora, te o principu rada s bipolarnim tranzistorima. Te ću prikazati tri osnovna sklopa pojačala s bipolarnim tranzistorom i opisati njihove prednosti i nedostatke i po čemu ih razlikujemo. Na kraju rada ću prikazati vježbu u kojoj se koristi bipolarni tranzistor u spoju za pojačavanje ulaznog signala, opisati shemu i što se događa u tom spoju sa elementima koji sudjeluju.

Na početku za početi ću u prvom poglavlju pod nazivom **1.-Bipolarni tranzistori** s dva podpoglavlja. U prvom podpoglavlju pod nazivom 1.1 - Princip rada bipolarnog tranzistora ću opisati osnovne karakteristike bipolarnog npn i pnp tranzistora. Njihovu građu, princip rada, osnovne karakteristike te prednosti i nedostatke. U drugom pod poglavlju 1.2 - Rad tranzistora u aktivnom području predstaviti ću rad tranzistora u normalnom aktivnom području, kada je propusno i nepropusno polariziran u spoju baze i kolektora te baze i emitera. Te kakve se struje i naponi javljaju u radu.

U drugom poglavlju **2.-Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze** isto u dva podpoglavlja objasniti i opisati sve što se događa kada je bipolarni tranzistor spojen u spoj zajedničke baze, navesti da strujno-naponske karakteristike dobivamo preko **Ebers- Mollove** jednadžbi. Prikazati kako ulazne karakteristike u spoju zajedničke baze prikazuju ovisnost ulazne emitterske struje o ulaznom naponu između emitera i baze uz izlazni napon kao parametar. U prvom podpoglavlju 2.1 - Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze opisati ću kako izlazne karakteristike daju ovisnost izlazne struje o izlaznom naponu dok je ulazna struja parametar. U drugom podpoglavlju 2.2 - Pojačalo u spoju zajedničke baze prikazati ću kako spoj zajedničke baze može biti strujno pojačalo koje osigurava značajno naponsko pojačanje.

U trećem poglavlju ću pisati o spoju zajedničkog emitera te započeti s **Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera** u kojem ću opisati ovisnost ulazne bazne struje o ulaznom naponu gdje će izlazni napon biti parametar. Prikazati ću karakteristike za idealni tranzistor, realni tranzistor i za područje vrlo malih iznosa napona i struje. Kao i u prethodna dva poglavlja i ovdje ću imati podpoglavlja a prvo od njih će biti 3.1 - Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera. U njemu ću opisati ovisnosti izlazne struje o izlaznom naponu dok je ulazni parametar a ulazni napon eliminiramo. Prikazujem i za realni i idealni tranzistor. U drugom podpoglavlju pišem o 3.2 - Pojačalo u spoju zajedničkog emitera kako ga se može ostvariti i kakvo pojačanje ostvaraju i što donosi u odnosima struje i napona. Prikazujem statičke izlazne karakteristike te valne oblike struje i napona i analizu rada pojačala u spoju zajedničkog emitera u dinamičkim uvjetima. Te kakav će biti utjecaj otpora potrošača na strujno i naponsko pojačanje. U trećem podpoglavlju 3.3 - Odnosi snaga prikazati ću kakvi su odnosi snaga u dinamičkim uvjetima te snaga u statičkim uvjetima.

U 4 poglavlju prikazati ću **Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora – emitorsko slijedilo**. U kojem kroz razne odnosne struje i napona prikazujem ovisnost ulaznog otpora o otporu potrošača te ovisnost te ovisnost izlaznog otpora o otporu ulaznog generatora. U posljednjem poglavlju rada prikazati ću i opisati vježbu **Bipolarni tranzistor kao pojačalo ulaznog signala** u kojoj djelovanjem napona i mijenjanjem otpora dobivamo zvuk kao ulazni signal.

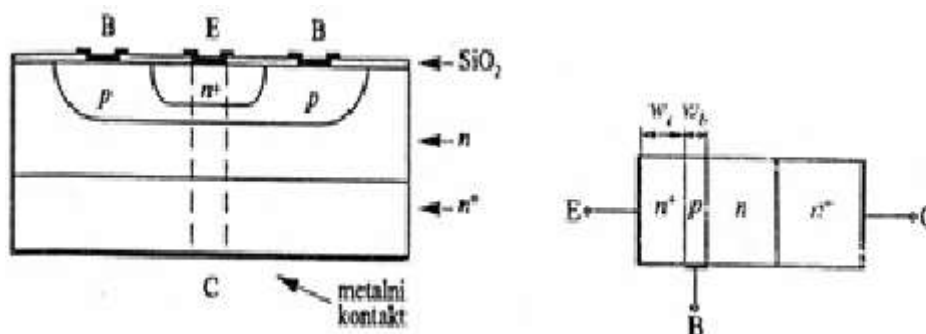
1. Bipolarni tranzistor

1.1 - Princip rada bipolarnog tranzistora

Bipolarni tranzistor je poluvodički elektronički element s tri stezaljke kojega najčešće koristimo kao aktivni četveropol pošto jedna od nogu tranzistora pripada istodobno i ulaznom i izlaznom dijelu tranzistora. Koristit ćemo ga za linearni pojačivač napona ili struje te kao nelinearni prekidački element tj. sklopku.

Glavne karakteristike su mu visoka razina izlazne snage i velika brzina rada. Kod tranzistora se javlja pn-spoj koji je propusno polariziran i dovodi do injekcije slobodnih elektrona s n-strane na p-stranu i šupljina s p-strane na n-stranu. Time povećavamo koncentraciju manjinskih nosioca na suprotnim stranama pn-spoja. Ako pn-spoj nepropusno polariziran nastaje je injekcija manjinskih nosioca kroz njegovu ravninu.

Zbog toga dolazi do male reverzne struje zasićenja. Modulacija toka struje u nepropusno polariziranom pn-spoju promjenom napona na propusnom polariziranom pn-spoju osnova je bipolarnog tranzistorskog djelovanja. Jako bitno je da su pn-spojevi koji imaju drukčije polove smješteni blizu da naboj manjinskih nosioca može preći od propusno polarizirane strane pn-spoja do nepropusne prije nego se dogodi rekombinacija s većinskim nosiocima.

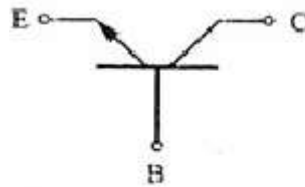


Slika 1.1 Osnovna struktura plenarnog npn-tranzistora Slika 1.2 Elementarni npn-tranzistor

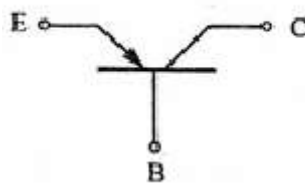
Izvedeni mogu biti diskretni i integrirani. Diskretni se pakiraju u zasebno kućište, svako kućište sadrži jedan tranzistor. Integrirani tranzistori rade se tako da veći broj tranzistora na jednoj silicijskoj pločici čini funkcionalni elektronički sklop ili sustav. Na početku su se tranzistori proizvodili od Germanija, a kasnije se proizvodnja npn-tranzistora prebacila na silicij. Tranzistor se sastoji od dobro vodljive podloge n+- monokristal silicija. Kroz odgovarajući otvor na površini n-epitaksijalnog sloja difundiraju se akceptori iz ograničenih izvora. Tako nastaje difundirano p-područje.

Prednost ionske implantacije je mogućnost plitkih pn-spojeva na sobnoj temperaturi. Na ne oksidnom sloju nalazi se metalni kontakt E (n+-difundiranog) a na području (p-difundiranog) metalni kontakt B. Tranzistor se znači sastoji od E(emitera), B (baze), C(kolektora). Kontakti su rađeni od aluminija. Elementarni tranzistor ima širinu n+- emitera w_e , a p-baze w_b . Veću širinu n+ kolektor ima od emitara i baze.

Smjer strelice kod emitera daje razliku tranzistora dali je on npn ili pnp. Kod prve vrste tranzistora (nnp) strelica izlazi iz simbola a kod druge vrste (pnp) ulazi u simbol tranzistora. Iz toga zaključujemo da kod jednog emitera struja izlazi iz tranzistora a kod drugog ulazi u tranzistor.



Slika 1.3 Električni simbol npn-tranzistora



Slika 1.4 Električni simbol pnp-tranzistora

1.1 - Rad tranzistora u aktivnom području

Kako tranzistor radi najlakše je opisati u normalnom aktivnom području koje se definira propusno polariziranim pn spojem između baze i emitera i nepropusno polariziranim pn - spojem između baze i kolektora. Nastaje spoj zajedničke baze u kojem se baza nalazi i u ulaznom i izlaznom krugu a emiter je ulazna a kolektor izlazna elektroda.

Kako je $U_{EB} < 0$, emitterski spoj je propusno polariziran a pošto je $U_{CB} > 0$ kolektorski spoj je nepropusno polariziran. Postoje tri struje emitterska koja je ulazna , kolektorska koja je izlazna i bazna koja je uzemljena. Kolektorska i bazna struja su pozitivne ($I_{EB} > 0, I_{CB} > 0$), a emitterska struja je negativna ($I_E < 0$). Emittersku struje možemo izraziti pomoću komponenti prema izrazu (1-1) :

$$-I_E = I_{nE} + I_{pE} + I_{rg}' \quad (1-1)$$

Rekombinacijska struja I_{rg} čine slobodni elektroni iz neutralnog emitera dolaze u osiromašeno područje gdje rekonbiniraju sa šupljinama koje u isto područje dolaze iz neutralne baze.

Struja kolektora u normalno aktivnom području se jednaka zbroju elektronskih komponenata koja dolaze iz baze kao rezultat injekcije elektrona kroz propusno polarizirani emitterski spoj i reverzne struje zasićenja kolektor-baza.

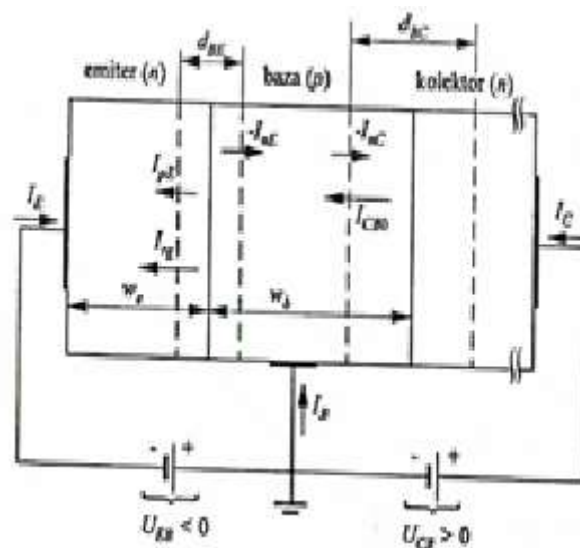
$$I_C = I_{nC} + I_{CB0} \quad (1-2)$$

Bazna struja nam daje šupljine koje prelazeći iz baze u emiter stvaraju struju I_{pE} , te šupljine koje rekonbiniraju u emitorskom osiromašenom dijelu što daje struju I_{rg} , šupljine koje nakon rekonbinacije u neutralnoj bazi daju razliku struja I_{nE} i I_{nC} i na kraju slobodne elektrone iz kojih nastaje reverzna struja zasićenja I_{CB0} .

$$I_B = I_{pE} + I_{rg} + I_{nE} - I_{nC} - I_{CB0} \quad (1-3)$$

Kada ih sve tri zbrojimo trebamo dobiti nulu.

$$I_E + I_B + I_C = 0 \quad (1-4)$$



Slika 1.5 Normalno aktivno područje rada npn-tranzistora u spoju zajedničke baze

2. Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze

Za crtanje strujno-naponskih tranzistorskih karakteristika koriste se Ebers- Mollove jednadžbe. Dokazano je da se pri radu tranzistora u režimu niske injekcije , u osiromašenim područjima oko pn-spojeva, i uz pretpostavku da vanjski izvor napona se troši samo na pn-spojeve između baze i emitera, te baze i kolektora, struje emitera i kolektora I_E i I_C kao funkcije napona U_{EB} i U_{CB} možemo objasniti jednadžbama :

$$I_E = -I_{ES} \left(\exp \frac{-U_{EB}}{U_T} - 1 \right) + \alpha_R I_{CS} \left(\exp \frac{-U_{CB}}{U_T} - 1 \right) \quad (2-1)$$

$$I_C = \alpha I_{ES} \left(\exp \frac{-U_{EB}}{U_T} - 1 \right) - I_{CS} \left(\exp \frac{-U_{CB}}{U_T} - 1 \right). \quad (2-2)$$

Ove jednadžbe vrijede bez ograničenja na homogenost emitera, baze i kolektora i bez ograničenja s obzirom na jednodimenzionalnost toka nosilaca. Koeficijenti α i α_R faktori su strujnih pojačanja tranzistora u spoju zajedničke baze u normalnom i inverznom aktivnom području. Stim da je uvijek $\alpha_R < \alpha$.

Iz toga svega Ebers—Mollove jednadžbe daju :

$$I_E = I_{ES} > 0 ; I_C = -\alpha I_{ES} < 0. \quad (2-3)$$

$$I_E = -\alpha_R I_{CS} < 0 ; I_C = I_{CS} > 0. \quad (2-4)$$

Ebers-Mollove jednadžbe zadovoljavaju uvjet recipročnosti jer su križni koeficijenti $\alpha_R I_{CS}$ i αI_{ES} jednaki pa zato dobivamo :

$$I_E = I_{ES} \frac{U_{EB}}{U_T} - \alpha_R I_{CS} \frac{U_{CB}}{U_T} \quad (2-5)$$

$$I_C = -\alpha I_{ES} \frac{U_{EB}}{U_T} + I_{CS} \frac{U_{CB}}{U_T}. \quad (2-6)$$

Iz ti jednadžbi dokazujemo da se tranzistor ponaša kao linearni četveropol gdje su naponi na pn-spojevima vrlo mali. Iz toga možemo reći da raspolaže svojstvima linearnosti i recipročnosti.

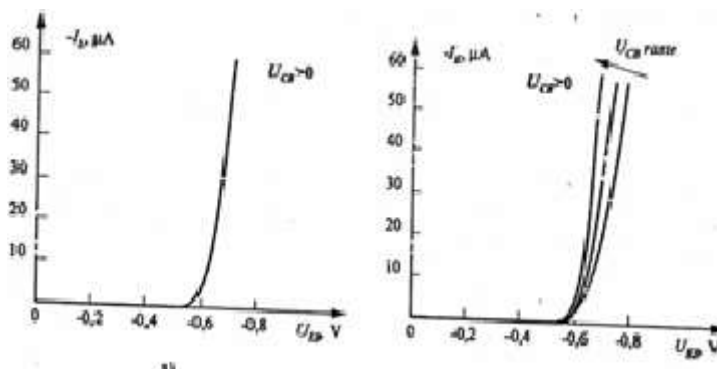
$$\alpha_R I_{CS} = \alpha I_{ES}. \quad (2-7)$$

Ulazne karakteristike npn -tranzistora u spoju zajedničke baze prikazuju ovisnost ulazne emitorske struje I_E o ulaznom naponu između emitera i baze U_{EB} uz izlazni napon U_{CB} kao parametar. Kod primjene je bitno normalno aktivno područje pa se te karakteristike obično crtaju uz $U_{EB} < 0$ i $U_{CB} > 0$, pri čemu je U_{CB} znatno veći od U_T .

$$I_E = -I_{ES} \exp \frac{U_{EB}}{U_T} + (1 - \alpha) I_{ES}, \quad (2-8)$$

$$I_E \cong -I_{ES} \exp \frac{-U_{EB}}{U_T} \quad (2-9)$$

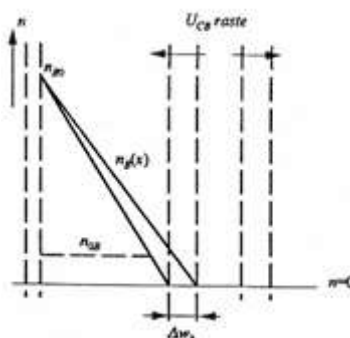
Pošto je $\alpha \cong 1$ uz $U_{CB} > 0$. Emitterska struja je negativna pošto teče iz emitera u vanjski krug. Kada je $U_{CB} > 0$ i bar nekoliko puta veći od U_T , sve ulazne karakteristike idealnog tranzistora postaju jedna. A kod realnog tranzistora vidjeti ćemo mali pomak ulaznih karakteristika ulijevo pri porastu U_{CB} . Tu pojavu objašnjava pretpostavka tranzistora s homogenom bazom.



Slika 2.1 Ulazne karakteristike u spoju zajedničke baze – za idealni i realni tranzistor

Ako U_{CB} raste, širi se kolektorsko osiromašeno područje i na stranu baze i na stranu kolektora. Ako je napon U_{EB} pri tome ostao isti, širina emitorskog osiromašenog područja ostaje konstantna. Iz toga vidimo da se granica između neutralne baze i kolektorskog osiromašenog područja pomaknuti na stranu baze pa se efektivna širina baze smanjuje za Δw_b .

Kao posljedica toga dobivamo porast gradijenta koncentracije manjinskih elektrona u bazi, a time i porast iznosa I_E pri konstantnom naponu U_{EB} , što nam pokazuje ponašanje krivulje.



Slika 2.2 Modulacija širine baze pri porastu iznosa reverznog napona između kolektora i baze

Suženje neutralne baze pri porastu napona U_{CB} koje nastaje zovemo modulacijom širine baze ili Earlyjev efekt.

2.1 - Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze

One daju ovisnost izlazne struje o izlaznom naponu kada je ulazna struja parametar. Da bi ih dobili trebamo eliminirati ulazni napon U_{EB} iz Ebers-Molovih jednadžbi.

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0} \left(1 - \exp \frac{-U_{CB}}{U_T}\right) \quad (2-11)$$

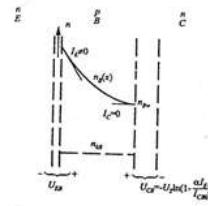
Kako je u normalnom aktivnom području $U_{CB} > 0$ i bar nekoliko puta veći U_T pa dobijemo :

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CB0} \quad (2-12)$$

a ako je na granica normalnog aktivnog područja i područja zasićenja $U_{CB} = 0$ dobijemo :

$$I_C = -\alpha I_E. \quad (2-13)$$

Te karakteristike u izlaznom krugu odgovaraju idealnom strujnom izvoru upravljanom ulaznom strujom.



Slika 2.3 Raspodjela koncentracije slobodnih manjinskih elektrona u bazi u području zasićenja kada je $I_C = 0$.

U području zasićenja napon je $U_{CB} < 0$ pa imamo eksponencijalni karakter ovisnosti kolektorske struje o U_{CB} . Ako raste napon struja I_C opada po iznosu. To dolazi kao posljedica fizikalnih činjenica koje govore da u području zasićenja i emiter i kolektor injektiraju slobodne elektrone u neutralnu bazu pa kolektor prima dio slobodnih elektrona koje je u bazu injektirao emiter istodobno injektirajući svoje slobodne elektrone u neutralnu bazu. Kada se ta dva broja elektrona izjednače struja I_C pada na nulu. Iz toga svega dobivamo napon :

$$U_{CB} = -U_T \ln \left(1 - \frac{\alpha I_E}{I_{CB0}}\right). \quad (2-14)$$

Iznosi koji se dobivaju jesu :

$$I_{CB0} = 10^{-13} \div 10^{-12} A. \quad (2-15)$$

$$\alpha \cong 1 \quad (2-16)$$

$$-I_E = 50 \mu A \quad (2-17)$$

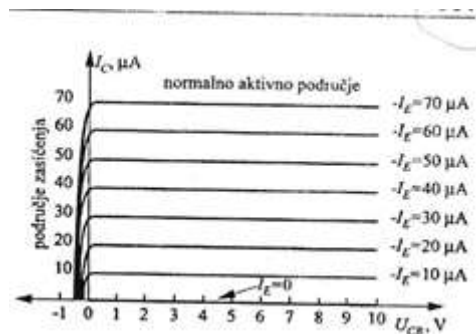
$$U_{CB} = -0,4 i - 0,5 V. \quad (2-18)$$

Kada je struja $I_C \cong 0$ rubnu koncentraciju slobodnih elektrona na kolektorskom rubu neutralne baze n_{Bw} određujemo Boltzmanovom relacijom :

$$n_{Bw} = n_{0B} \exp \frac{-U_{CB}}{U_T} = n_{0B} \left(1 - \frac{\alpha I_E}{I_{CB0}} \right). \quad (2-19)$$

Kako je $-\alpha I_E \gg I_{CB0}$, bit će i $n_{Bw} \gg n_{0B}$.

Nakon analize i relacija nacrtane su izlazne karakteristike npn-tranzistora u spoju zajedničke baze.



Slika 2.4 Izlazna karakteristika idealnog tranzistora u spoju zajedničke baze

Područje normalnog aktivnog te područje zasićenja nalaze se u prvom i drugom kvadrantu dok njihova os granica predstavlja pozitivnu struju. Područje zapiranja je stopljeno s pozitivnom apscisom pošto je tu $U_{CB} > 0$ i $U_{EB} > 0$, pa struja iznosi:

$$I_C = (1 - \alpha_R) I_{CS} \cong 0. \quad (2-20)$$

Da bi znali kako se tranzistor ponaša u inverznom aktivnom području izraziti ćemo I_E u ovisnosti o U_{EB} uz I_C kao parametar :

$$I_E = -\alpha_R I_C + I_{EB0} (1 - \exp \frac{-U_{EB}}{U_T}). \quad (2-21)$$

2.2 - Pojačalo u spoju zajedničke baze

Faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničke baze nije veći od jedinice. Struja emitera koja je ulazna struja je uvijek za iznos struje baze veća od izlazne struje, odnosno struje kolektora pri radu u normalnom aktivnom području. Faktor strujnog pojačanja dobivamo preko :

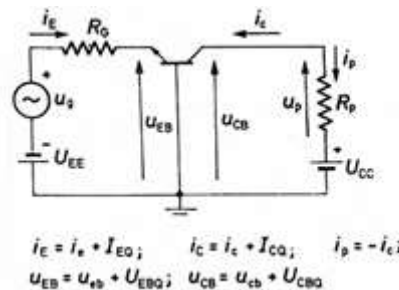
$$\alpha = - \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \Big|_{U_{CB} = konst.} = - \frac{i_C}{i_E} \Big|_{u_{CB}} = 0 \quad (2-22)$$

i on je uvijek nešto manji od jedinice.

Pošto je struja baze vrlo mala, α je kod realnih tranzistora blizak jedinici. Kako je $\alpha \cong 1$, tranzistor u ovom spoju ne može služiti kao strujno pojačalo jer izlazna struja u dinamičkim uvjetima nije veća od ulazne struje. Ovaj spoj tranzistora osigurava značajno naponsko pojačanje.

Sposobnost da pri radu u zajedničkoj bazi pojačava se naponski signal osigurava se na razlici dinamičkog otpora ulaznog i izlaznog kruga. U ulaznom krugu imamo propusno polarizirani spoj emiter-baza malog iznosa dinamičkog otpora, a u izlaznom krugu nepropusno polarizirani spoj kolektor-baza velikog iznosa dinamičkog otpora. Kako je izlazni dinamički otpor jako velik, redovito puno veći od otpora potrošača u krugu kolektora, izlazna struja u dinamičkim uvjetima ne ovisi o otporu potrošača.

Iz čega je vidljivo da je izlazna struja jednaka ulaznoj, te da postoji vrlo velika razlika ulaznog i izlaznog dinamičkog otpora, na potrošaču otpora mnogo većeg od ulaznog dinamičkog otpora tranzistora dobivamo značajan izmjenični napon, mnogo veći od ulaznog, te ovaj sklop raspolaže velikim naponskim pojačanjem.



Slika 2.5 Konfiguracija pojačala s tranzistorom u spoju zajedničke baze

Napon U_{CC} koristimo za osiguranje nepropusne polarizacije spoja kolektor-baza, a napon U_{EE} koristimo za osiguranje propusne polarizacije spoja emiter-baza. Te dobijemo strujno pojačanje koje je približno :

$$A_I = \frac{i_p}{i_e} = -\frac{i_c}{i_e} = -\frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \alpha \cong 1. \quad (2-23)$$

A naponsko je onda pojačanje približno :

$$A_V = \frac{u_p}{u_{eb}} = \frac{i_p R_P}{i_e r_e} = \alpha \frac{R_P}{r_e}, \quad (2-24)$$

gdje je r_e dinamički otpor spoja emiter-baza, koji je jednak dinamičkom otporu diode u propusnom smjeru, kada zanemarimo povratno djelovanje kolektorskog kruga tranzistora.

Pošto je $\alpha \cong 1$ imat ćemo :

$$A_V \cong \frac{R_P}{r_e}. \quad (2-25)$$

Kako je obično r_e oko 10Ω , uz otpor potrošača R_P veličine $1 \text{ k}\Omega$ dobivamo naponsko pojačanje reda 100. Kako je A_V pozitivna veličina, pojačalo u spoju zajedničke baze ne obrće fazu pojačavanog naponskog signala. Sklop koji je prikazan i opisan na prijašnjim stranicama nije pogodan za praktičnu primjenu pošto koristi dva izvora istosmjerne napona za dovođenje tranzistora u normalno aktivno stanje. Taj problem riješit ćemo tako da ćemo napajati sklop iz jednog izvora istosmjernog napona U_{CC} .

te on predstavlja negativan faktor strujnog pojačanja tranzistora u spoju zajedničke baze uz kratko spojeni izlazni krug.

Parametar h_{0b} definiramo :

$$h_{0b} = \frac{\partial i_c}{\partial U_{CB}} = \frac{i_c}{u_{cb}} \Big|_{i_e=0} \quad (2-28)$$

te predstavlja izlaznu dinamičku vodljivost uz otvoreni ulazni krug. Ona je određena nagibom izlaznih karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze i iznosi iznad 1 MΩ. Pošto je $h_{0b}R_p \ll 1$ imati ćemo :

$$A_I \cong -h_{fb} = \alpha \cong 1. \quad (2-29)$$

Ulazni otpor dobivamo iz :

$$R_{u1} = \frac{U_{eb}}{I_e} = h_{ib} + h_{rb}A_I R_p = h_{ib} - \frac{h_{rb}h_{fb}}{h_{0b} + \frac{1}{R_p}}. \quad (2-30)$$

Parametar h_{ib} definiramo :

$$h_{ib} = \frac{\partial U_{EB}}{\partial i_E} = \frac{u_{eb}}{i_e} \Big|_{u_{eb}=0} \quad (2-31)$$

te predstavlja ulazni dinamički otpor tranzistora u spoju zajedničke baze uz kratko spojeni izlazni krug. Taj parametar je jednak dinamičkom otporu propusno polarizirane pn-diode te određen relacijom kod koje struja I_{DQ} je zamijenjena strujom emitera I_{EQ} u statičkoj radnoj točki.

Parametar h_{rb} definiramo :

$$h_{rb} = \frac{\partial U_{EB}}{\partial U_{CB}} = \frac{u_{eb}}{u_{cb}} \Big|_{i_e=0} \quad (2-32)$$

te predstavlja faktor naponskog povratnog djelovanja tranzistora u spoju zajedničke baze uz otvorene ulazne stezaljke.

Pošto je redovito, radi malih iznosa parametra h_{rb} , drugi član u izrazu puno manji od h_{ib} imati ćemo :

$$R_{u1} \cong h_{ib} \cong m \frac{U_T}{I_{BQ}}, \quad (2-33)$$

pri čemu zanemarujemo reverznu struju zasićenja I_S .

Naponsko pojačanje koje dobivamo nakon svih relacija je :

$$A_V = \frac{U_p}{U_{eb}} = A_I \frac{R_p}{R_{u1}} = - \frac{h_{fb}}{h_{ib} \left(h_{0b} + \frac{1}{R_p} \right) - h_{rb}h_{fb}}. \quad (2-34)$$

Pošto je redovito $\frac{1}{R_p} \gg h_{0b}$ i $\frac{h_{ib}}{R_p} \gg h_{rb}h_{fb}$, imati ćemo :

$$A_V = -h_{fb} \frac{R_p}{h_{ib}} = \alpha \frac{R_p}{h_{ib}} \cong \frac{R_p}{h_{ib}}, \quad (2-35)$$

uz napomenu da je $h_{ib} = r_e$.

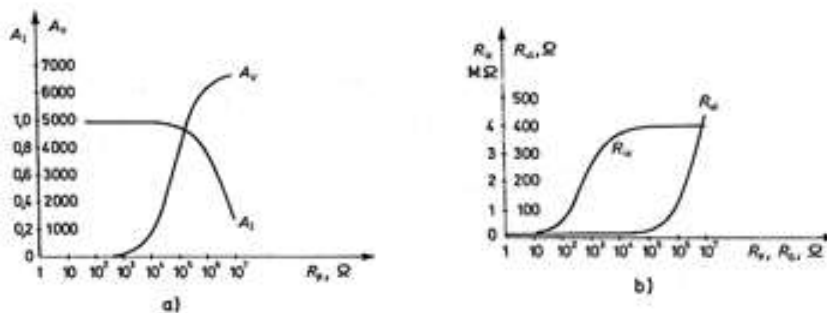
Izlazni otpor koji ćemo dobiti izrazom je :

$$R_{iz} = \frac{1}{h_{ob} - \frac{h_{rb}h_{fb}}{R_G + h_{ib}}} \quad (2-36)$$

Ta relacije vrijedi ako pretpostavimo da je $R_G \ll R_E$. Ako ne vrijedi tada otpor R_G trebamo zamijeniti paralelnom kombinacijom otpora R_G i R_E .

Ovisnost naponskog i strujnog pojačanja pojačala s tranzistorom u spoju zajedničke baze o otporu potrošača grafički sam prikazao za tranzistor sa sljedećim vrijednostima hibridnih parametara u odabranoj statičkoj radnoj točki :

$$h_{ib} = 10 \Omega, h_{fb} = -0,99, h_{rb} = 1,5 * 10^{-4}, h_{ob} = 0,25 \mu S \quad (2-37)$$



Slika 2.9 Ovisnost ulaznog otpora o Slika 2.10 Ovisnost Izlaznog otpora o otporu potrošača unutrašnjem otporu ulaznog generatora

Dinamička svojstva do kojih smo došli iz prijašnjih relacija i grafova :

1. U području niskih frekvencija strujno pojačanje je, uz realni potrošač, pozitivan broj iznosa blizu jedinice, osim kod vrlo visokih iznosa otpora potrošača. Kada ispunimo uvjet $h_{ob}R_p < 0,1$ tada imamo strujno pojačanje $A_I \cong \alpha \cong 1$, neovisno o otporu potrošača.

Ali i bez tog svojstva ovo pojačalo se ne može smatrati kao strujno, pošto je izlazna struja nešto manja od ulazne. To nas dovodi do toga da možemo primjenjivati ovaj sklop kao idealni zavisni strujni izvor kojem je izlazna struja diktirana ulaznim strujnim signalom.

2. Naponsko pojačanje je, uz realni potrošač, pozitivan broj veći od jedinice, osim kad imamo sasvim niske iznose otpora potrošača. S rastom otpora potrošača naponsko pojačanje raste i kada $R_p \rightarrow \infty$ te teži :

$$A_V = - \frac{h_{fb}}{h_{ib}h_{ob} - h_{rb}h_{fb}} \quad (2-38)$$

Porast naponskog pojačanja s porastom otpora potrošača u skladu je s svojstvom ovog sklopa da se u izlaznom krugu ponaša kao zavisni strujni izvor diktiran ulaznom strujom. Kako je, posebno kad je $h_{ob}R_p < 0,1$ izlazna struja ne ovisi o otporu potrošača možemo dobiti na potrošaču velikog otpora izmjenični napon dosta veći od ulaznog time i naponsko pojačanje dosta veće od jedinice.

3. Ulazni otpor prema relaciji ima vrijednost h_{ib} kod niskih iznosa otpora potrošača. Kada raste otpor potrošača raste i ulazni otpor težeći prema iznosu :

$$R_{u1} = h_{ib} - \frac{h_{rb}h_{fb}}{h_{ob}} = h_{ib} + \alpha \frac{h_{rb}}{h_{ob}}, \quad (2-39)$$

kada $R_p \rightarrow \infty$. Po vrijednosti ulazni otpor pojačala u spoju zajedničke baze je manji nego kod pojačala u spoju zajedničkog emitera, dok otpor pojačala u spoju zajedničkog otpora opada s otporom potrošača, ulazni otpor pojačala u spoju zajedničke baze raste s otporom potrošača.

To možemo objasniti fizikalno : Pošto pojačalo u spoju zajedničkog emitera uz realan potrošač obrće fazu naponskog signala, povratni napon $h_{re}U_{ce}$ potpomaže djelovanju napona U_{be} , djeluje s njim u fazi. Za istu ulaznu struju sklopa I_b tada je potreban manji ulazni napon U_{be} nego kad je $h_{re}U_{ce} = 0$, i onda je ulazni otpor manji.

Napon $h_{re}U_{ce}$ bit će to veći što je R_p veći, te ulazni otpor opada s porastom $R_p - a$. Kod pojačala s zajedničkom bazom nemamo obrtanje faze ulaznog naponskog signala, te se povratni napon $h_{rb}U_{cb}$ suprostavlja ulaznom naponu U_{eb} .

U tom slučaju za istu ulaznu struju sklopa I_e potreban veći ulazni napon U_{eb} nego kada je povratni napon $h_{rb}U_{cb} = 0$, i ulazni otpor je veći. Povratni napon $h_{rb}U_{cb}$ biti će veći što je R_p veći, a ulazni otpor raste s porastom $R_p - a$.

Izlazni otpor pojačala u spoju zajedničke baze veći je nego kod pojačala u spoju zajedničkog emitera te raste s porastom unutrašnjeg otpora generatora na ulaznim stezaljkama.

3. Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera

Da bi došli do ulaznih karakteristika tranzistora u spoju zajedničkog emitera moramo koristiti Ebers-Mollove jednadžbe za tranzistor u spoju zajedničkog emitera.

One su prikazane u sljedećim relacijama :

$$U_{EB} = -U_{BE} \quad (3-1)$$

$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE}. \quad (3-2)$$

$$I_E = -I_{ES} \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) + \alpha_R I_{CS} \left(\exp \frac{U_{BE} - U_{CE}}{U_T} - 1 \right), \quad (3-3)$$

$$I_C = \alpha I_{ES} \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) - I_{CS} \left(\exp \frac{U_{BE} - U_{CE}}{U_T} - 1 \right). \quad (3-4)$$

Kod spoja emitera struja emitera je struja uzemljene elektrode koja se ne pojavljuje ni na ulazu ni na izlazu tranzistora. Dok struja baze ne postoji u izrazima. Pa onda koristimo relaciju $I_B + I_C + I_E = 0$ te gornje navedene relacije za I_E i I_C kako bi Ebers-Mollove jednadžbe preveli u oblik primjeren spoju zajedničkog emitera :

$$I_B = (1 - \alpha) I_{ES} \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) + (1 - \alpha_R) I_{CS} \left(\exp \frac{U_{BE} - U_{CE}}{U_T} - 1 \right), \quad (3-5)$$

$$I_C = \alpha I_{ES} \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) - I_{CS} \left(\exp \frac{U_{BE} - U_{CE}}{U_T} - 1 \right). \quad (3-6)$$

Karakteristike prikazuje ovisnost ulazne bazne struje I_B o ulaznom naponu U_{BE} uz izlazni napon U_{CE} kao parametar. U normalnom aktivnom području imamo $U_{BE} > 0, U_{CE} > 0, U_{CE} > U_{BE}$. Ako je razlika dvaju napona $U_{CE} - U_{BE}$ bar nekoliko puta veća od U_T tada imamo relaciju :

$$I_B = (1 - \alpha) I_{ES} \left(\exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 - \frac{\beta}{\beta_R} \right). \quad (3-7)$$

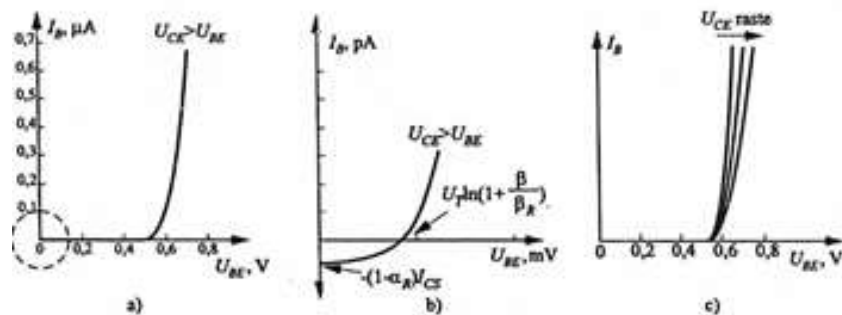
Ako je $U_{BE} = 0$ onda imamo :

$$I_B = -(1 - \alpha) I_{ES} \frac{\beta}{\beta_R} = -(1 - \alpha_R) I_{CS} < 0. \quad (3-8)$$

Da bi struja baze bila nula treba biti ispunjen uvjet :

$$U_{BE} = U_T \ln \left(1 + \frac{\beta}{\beta_R} \right). \quad (3-9)$$

Ulazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera stapaju se u normalnom aktivnom području u jednu krivulju neovisnu o iznosu U_{CE} kada je on veći od U_{BE} . Ako imamo da je $\alpha = 0,994$ i $\alpha_R = 0,6$ tada je $\beta = 165, \beta_R = 1,5$.



Slika 3.1 Ulazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera : a) za idealni tranzistor
b) za područje vrlo malih iznosa napona U_{BE} i struje I_B
c) za realni tranzistor

Iznos struje za integrirane tranzistore je reda 10^{-13} A. Te ako je napon $U_{BE} = 0$ struja I_B iznosi $-0,4 \cdot 10^{-13}$ A. Napon U_{BE} ako je struja $I_B = 0$ iznosi 120 mV na sobnoj temperaturi. Zbog malih iznosa struje i napona ulazne karakteristike se crtaju iz ishodišta.

Kod realnog tranzistora karakteristike imaju isto ponašanje kao krivulja a uz postojanje stanovitog rasipanja karakteristike pri promjeni U_{CE} . Kada U_{CE} raste pri $U_{BE} > 0$ struja baze iznosom pada. Zato jer dolazi do modulacije širine baze i Earleyovog efekta. Porast U_{CE} daje jaču reverznu polarizaciju kolektorskog pn-spoja, a s tim i veću širinu osiromašenog kolektorskog područja.

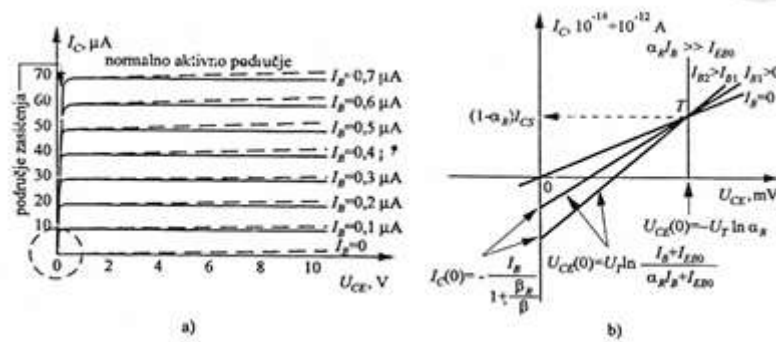
Što ima za posljedicu smanjenje efektivne širine baze, time i smanjenje rekombinaciju slobodnih elektrona u neutralnoj bazi što povećava bazni transportni faktor, odnosno smanjuje rekombinacijsku te i ukupnu struju baze.

3.1- Izlazne karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera

Ovisnost izlazne struje I_C o izlaznom naponu U_{CE} uz ulaznu struju I_B kao parametar uz eliminiranje napona U_{BE} dobivamo :

$$I_C = \beta \frac{(\alpha_R \exp \frac{U_{CE}}{U_T} - 1) I_B + I_{EB0} (\exp \frac{U_{CE}}{U_T} - 1)}{\alpha_R \exp \frac{U_{CE}}{U_T} + \beta (1 - \alpha_R)} \quad (3-10)$$

Iz toga možemo nacrtati izlazne karakteristike idealnog npn-tranzistora u spoju zajedničkog emitera, te su prikazane punom crtom.



Slika 3.2 Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera tranzistora :
a) za idealni tranzistor (puna crta), za realni tranzistor (isprekidana crta)
b) uvećano područje oko ishodišta

Kod normalnog aktivnog područja imamo da je $U_{CE} > 0$, te nekoliko puta veći od napona U_T . Na tom području izlazne karakteristike su prikazane kao horizontalni određeni iznosom ulazne struje I_B kao parametrom. S tim da je prirast izlazne struje ΔI_C jednak prirastu ulazne struje ΔI_B uvećanom β puta.

U području niskih iznosa napona $U_{CE} > 0$ tranzistor dolazi u stanje zasićenja, te tu pri konstantnom iznosu I_B iznos struje I_C opada kada se $U_{CE} > 0$ smanjuje. Pošto je tu I_C manji nego u normalnom aktivnom području imamo :

$$\left(\frac{I_C}{I_B}\right)_{U_{CE}=\text{konst.}} < \beta. \quad (3-11)$$

Ako želimo odrediti napon U_{CES} koristiti ćemo jednadžbu :

$$U_{CES} = U_T \ln \frac{(1-\alpha_R) \frac{I_C}{I_B} + 1 + \frac{I_{EB0}}{I_B}}{\alpha_R - \frac{\alpha_R}{\beta} \frac{I_C}{I_B} + \frac{I_{EB0}}{I_B}}, \quad (3-12)$$

Kada imamo da je $\alpha = 0,994$, $\alpha_R = 0,6$, $I_{EB0} = 10^{-13} A$, $I_C = 30 \mu A$, $I_B = 0,7 \mu A$, tada je $\beta = 166$, dok je $\frac{I_C}{I_B} \cong 43$ odnosno manje od β . Iz toga iznos napona $U_{CES} = 96 mV$, na sobnoj temperaturi. Pri uobičajenim iznosima realnih tranzistorskih parametara U_{CES} iznosi oko 0,2 V na sobnoj temperaturi.

$$\text{Ako je } I_C = 0, U_{CES} = U_{CE}(0) = U_T \ln \frac{I_B + I_{EB0}}{\alpha_R I_B + I_{EB0}} \cong -U_T \ln \alpha_R, \text{ jer je } \alpha_R I_B \gg I_{EB0}. \quad (3-13)$$

Kada je $I_B = 0$, prekinut je ulazni krug, $U_{CE}(0) = 0$ i pripadna karakteristika kreće iz ishodišta. Struja kolektora za $U_{CE} = 0$ iznosi :

$$I_C(0) = -\frac{I_B}{1 + \frac{\beta_R}{\beta}}. \quad (3-14)$$

U većini tranzistora $\beta \gg \beta_R$, pa gornja relacija prelazi u $I_C(0) \cong -I_B$. Kada imamo da je $\exp\left(\frac{U_{CE}}{U_T}\right) = \alpha_R^{-1}$, odnosno kada je $U_{CE} = -U_T \ln \alpha_R$, struja kolektora ne ovisi o struji baze. Iz tog slučaja struja kolektora je $I_C = (1 - \alpha_R) I_{CS}$. Te tako dolazimo do toga sa se sve izlazne karakteristike sijeku u točki T $[-U_T \ln \alpha_R, (1 - \alpha_R) I_{CS}]$.

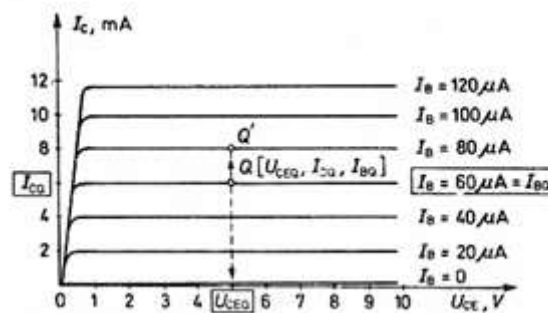
3.2 - Pojačalo u spoju zajedničkog emitera

Bipolarni tranzistor u spoju zajedničkog emitera u normalnom aktivnom području posjeduje značajno strujno pojačanje. Faktor strujnog pojačanja h_{fe} definiran je s omjerom izmjenične struje kolektora i_c i izmjenične struje baze i_b u zadanoj statičkoj radnoj točki uz iznos trenutnog totalnog napona u_{CE} između kolektora i emitera :

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{u_{CE} = konst.} \quad (3-15)$$

Koristimo relaciju za izmjenični strujni signal pod pretpostavkom da tranzistor radi u dijelu malih signala. Faktor h_{fe} većinom je većeg iznosa od 1 a općenito reda veličine 100. Trebamo voditi računa kod strujnog pojačala da on prima strujni signal s generatora na ulazu te ga pojačanog predaje potrošaču na izlazu pojačala.

Kako je kod tranzistora na ulazu u spoju zajedničkog emitera bazni krug, a na izlazu kolektorski krug, signal treba dovesti iz generatora u bazu tranzistora, dok pojačani signal treba odvesti potrošaču koji se nalazi u krugu kolektora. S tim da trebamo paziti da relacija vrijedi u određenoj statičkoj radnoj točki u normalnom aktivnom području, te da tranzistor prije nego signal dođe u krug baze treba dovesti u tu statičku radnu točku.



Slika 3.3 Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera sa statičkom radnom točkom u normalnom aktivnom području

Statička je radna točka određena u srednjem dijelu karakteristike, u normalnom aktivnom području, te je proizvoljno određena i statička radna točka Q. Ima kordinate napon između kolektora i emitera U_{CEQ} , struju kolektora I_{CQ} i struju baze I_{BQ} . Te imaju svoje iznose $U_{CEQ} = 5V, I_{CQ} = 6mA, I_{BQ} = 60 \mu A$. Kada izmjenične vrijednosti i_c i i_b zamijenimo prirastima istosmjernih veličina I_C i I_B dobijemo :

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{u_{CE}=konst.} \cong \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CEQ}} \quad (3-16)$$

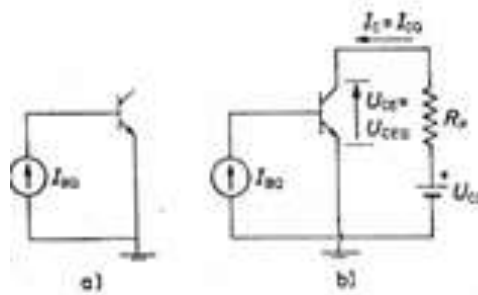
Ako pojačamo struju baze $\Delta I_B = 20 \mu A$, uz konstantan napon U_{CEQ} dobivamo novi položaj radne točke Q' , gdje struja kolektora ima vrijednost $8 mA$. To dokazuje da uz prirast struje baze od $20 \mu A$, dobivamo i prirast struje kolektora od $2 mA$, stim faktor strujnog pojačanja po gore napisanoj relaciji iznosi $h_{fe} = 100$.

Iz toga svega ako tranzistor radi u statičkoj radnoj točki Q, potrošač koji je smješten u krugu kolektora će dobivati izmjeničnu struju $i_c = h_{fe} i_b$ sto puta veću od izmjenične struje dovedene u krug baze, stim da potrošač svojim otporom ne utječe na ukupni otpor izlaznog kruga tranzistora.

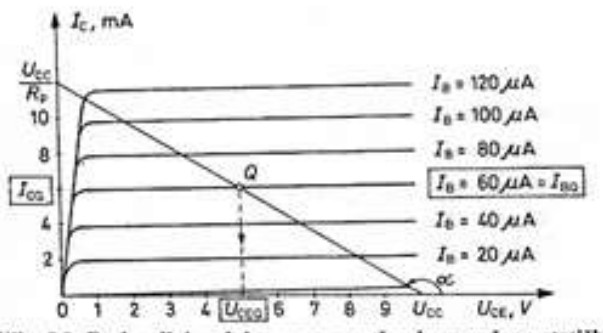
Kako bi tranzistor doveli u odgovarajuću statičku radnu točku u kojem dobivamo odgovarajuću vrijednost faktora strujnog pojačanja , trebamo osigurati napon U_{CEQ} i struje I_{BQ} i I_{CQ} . Da bi osigurali potrebnu struju baze I_{BQ} , u krug se spaja strujni generator.

Napon i struja U_{CEQ} i I_{CQ} su vrijednosti koje pripadaju izlaznom , kolektorskom krugu tranzistora. Pošto u tom krugu treba biti smješten potrošač koji dobiva pojačani strujni signal, napon i struju U_{CEQ} i I_{CQ} ćemo dobiti iz kolektorske baterije elektromotorne sile U_{CC} .

$$U_{CC} = U_{CE} + I_C R_p. \quad (3-17)$$

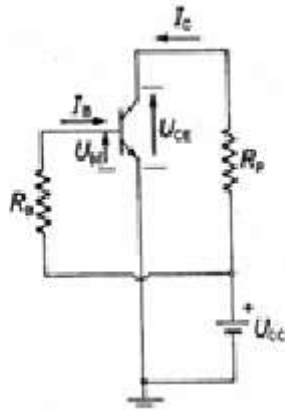


Slika 3.4 Podešavanje statičke radnje točke bipolarnog tranzistora :
 a) podešavanje kruga baze
 b) podešavanje kruga kolektora



Slika 3.5 Proizvoljni radni pravac provučen kroz radnu točku

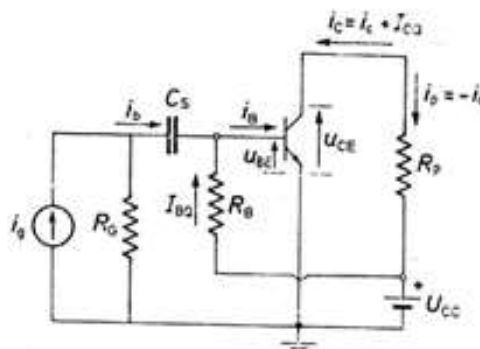
Radni pravac izlaznog kruga na apscisi je U_{CC} , na ordinati U_{CC}/R_p dok je nagib radnog pravca prema apscisi $tg\alpha = -1/R_p$. Kada smo odabranu statičku radnu točku u normalnom aktivnom području , kroz nju provlačimo radni pravac određen gornjom relacijom.



Slika 3.6 Realiziranje istosmjernog strujnog generatora u krugu baze

Svakom radnom pravcu koji smo provukli kroz zadanu radnu točku dobivamo drukčiji iznos napona i otpora U_{CC} , R_p . Na prikazanom primjeru dobivamo vrijednost napona $U_{CC} = 10 V$, a odsječak na ordinati prikazuje vrijednost struje $U_{CC}/R_p = 12 mA$, gdje dobivamo da je otpor potrošača u krugu kolektora $R_p = 833 \Omega$.

Strujni generator realiziramo na način da pošto u krugu kolektora postoji kolektorska baterija koju napaja izlazni krug, najlakše ćemo riješiti da dovedemo istosmjernu struju baze I_{BQ} iz kolektorske baterije preko otpornika R_B spojenog između baze tranzistora i pozitivne stezaljke kolektorske baterije.



Slika 3.7 Dovođenje strujnog signala na ulaz pojačala

Ako je kod tog slučaja otpor R_B veći od otpora ulaznog kruga tranzistora za istosmjernu struju, kolektorska baterija će s otporom R_B u krugu baze djelovati kao strujni izvor.

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}. \quad (3-18)$$

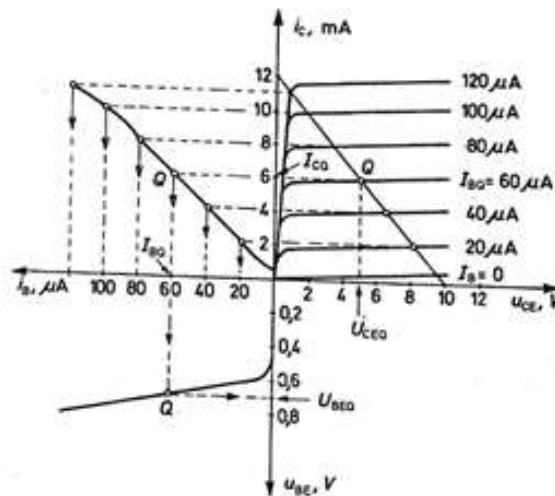
U_{BE} je napon između baze i emitera. Otpor R_B odabiremo takav da struja baze I_B bude jednaka struji I_{BQ} .

$$R_B = \frac{U_{CC} - U_{BEQ}}{I_{BQ}}. \quad (3-19)$$

U_{BEQ} je napon između emitera i baze u statičkoj radnoj točki. Taj napon je obično iznosi 0,7 V, što je dosta manji iznos od vrijednosti napona U_{CC} koja je 10 V. Tako pri radu s silicijskim tranzistorima imamo :

$$R_B = \frac{U_{CC} - 0,7}{I_{BQ}} \quad (3-20)$$

Kada želimo osigurati struju baze za statičku radnu točku gdje imamo da je napon $U_{CC} = 10 \text{ V}$ i struja $I_{BQ} = 60 \mu\text{A}$, tada je dobiveni otpor $R_B = 155 \text{ k}\Omega$. Ako želimo gornji sklop koristiti kao strujno pojačalo, trebamo na ulaz sklopa, odnosno u krug baze dovesti izmjenični strujni signal. Za to koristimo spoj strujnog generatora i_g i unutrašnjeg otpora R_G preko kondenzatora kapaciteta C_S . Taj kondenzator ima zadaću da blokira istosmjernu vezu pojačala i generatora.



Slika 3.8 Statička karakteristika tranzistora i statički radni pravac u polju izlaznih karakteristika

Za trenutne totalne vrijednosti struje baze i kolektora imati ćemo :

$$i_B = i_b + I_{BQ} \quad (3-21)$$

$$i_C = i_c + I_{CQ} \quad (3-22)$$

Kada upotrebljavamo izmjeničnu struju na način da ona ide iz pojačala u potrošač tada imamo:

$$I_p = -I_c \quad (3-23)$$

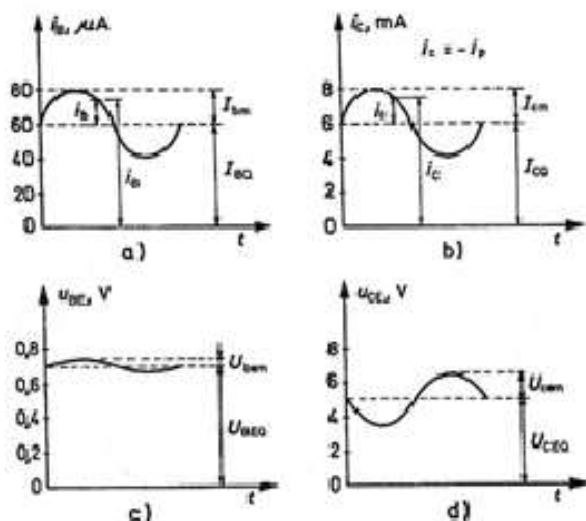
$$i_p = -i_c \quad (3-24)$$

A za napone vrijedi :

$$u_{BE} = u_{be} + U_{BEQ} \quad (3-25)$$

$$u_{CE} = u_{ce} + U_{CEQ} \quad (3-26)$$

Valne oblike struje i_c i napona u_{CE} i u_{BE} dobivamo preko grafičkog prikaza karakteristika tranzistora. U prvom kvadrantu imamo izlazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera i radni pravac. Iako je radni pravac određen statičkim uvjetima on vrijedi i u dinamičkim uvjetima, pošto nema reaktivnih komponenata u sklopu.



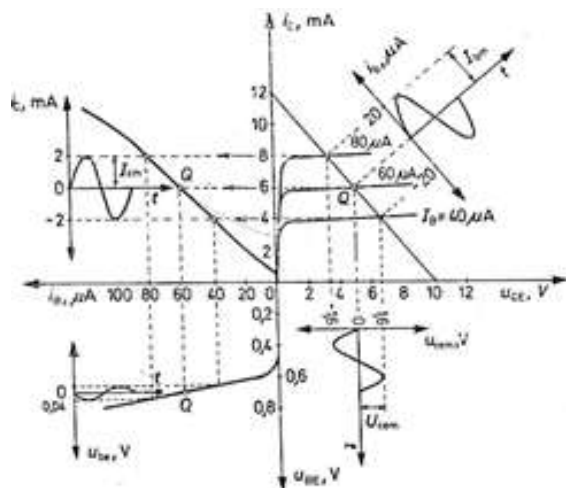
Slika 3.9 Valni oblici napona i struje

Statička radna točka Q označena je u sva tri kvadranta te kada u krug baze uđe mali izmjenični signal ona se neće promijeniti. Ako u krug dovodimo strujni izmjenični signal sinusoidnog karaktera imati ćemo :

$$i_b = I_{bm} \sin \omega t, \quad (3-27)$$

A totalna vrijednost struje baze će biti :

$$i_B = i_b + I_{BQ} = I_{bm} \sin \omega t + I_{BQ}. \quad (3-28)$$



3.10 Analiza rada pojačala u spoju zajedničkog emitera u dinamičkim uvjetima pomoću statičkih karakteristika tranzistora

Pomoću prijenosnih strujnih karakteristika dobit ćemo valni oblik izmjenične komponente struje kolektora i_c , a pomoću ulazne karakteristike valni oblik napona između kolektora i emitera u_{be} .

Izmjenična komponenta napona između emitera i kolektora u_{ce} prikazana je u četvrtom kvadrantu. Pošto je pretpostavljeno da je frekvencija priključenog strujnog kanala niska, pa ne

dolazi do izražaja kapacitivni efekti vezani uz promjenu akumuliranog naboja minoritetnih nosilaca u pojedinim područjima tranzistora, ni efekti konačnog vremena prolaska nosilaca naboja kroz emiter, bazu, kolektor i emitorsku te kolektorsku pn-barijeru dobivamo valne oblike struje i napona:

$$i_B = i_b + I_{BQ} = I_{bm} \sin \omega t + I_{BQ} = 20 \sin \omega t + 60 \mu A, \quad (3-29)$$

$$i_C = i_c + I_{CQ} = I_{cm} \sin \omega t + I_{CQ} = 2 \sin \omega t + 6 \text{ mA}, \quad (3-30)$$

$$u_{BE} = u_{be} + U_{BEQ} = U_{bem} \sin \omega t + U_{BEQ} = 0,04 \sin \omega t + 0,7 \text{ V}, \quad (3-31)$$

$$u_{CE} = u_{ce} + U_{CEQ} = -U_{cem} \sin \omega t + U_{CEQ} = -1,6 \sin \omega t + 5 \text{ V}. \quad (3-32)$$

Iz ovih prethodnih relacija zaključujemo:

1. Sklop pojačala s tranzistorom u spoju zajedničkog emitera, raspolaže strujnim pojačanjem:

$$A_I = \frac{i_p}{i_b} = -\frac{i_c}{i_b} = -\frac{I_{cm}}{I_{bm}} = -\frac{2 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} = -100. \quad (3-33)$$

Kako je A_I po predznaku negativan, a po vrijednosti veći od jedinice, sklop pojačava izmjenični strujni signal uz okretanje njegove faze. Predani pojačani strujni signal potrošaču i ulazni signal su protufazni. Ako su frekvencije velike, te izraženiji kapacitivni efekti u pojedinim područjima tranzistora i efekti konačnog vremena prolaska minornih nosilaca, fazni odnos biti će narušen. Te će iznos strujnog pojačanja biti u padu.

2. Naponsko pojačanje iznosi:

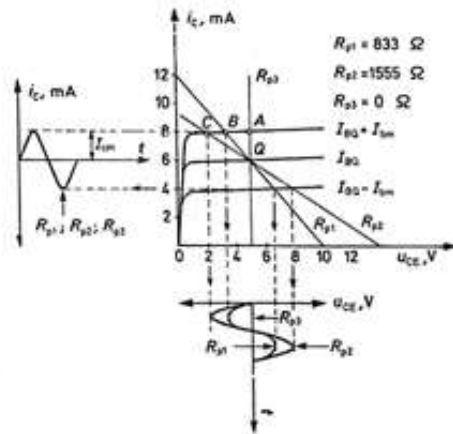
$$A_V = \frac{u_{ce}}{u_{be}} = -\frac{U_{cem}}{U_{bem}} = -\frac{1,6}{0,04} = -40. \quad (3-34)$$

Kako je A_V negativan i veći od jedinice, sklop pojačava izmjenični naponski signal uz obrtanje faze.

Kada imamo značajno pojačanje strujno i naponsko imati ćemo značajno pojačanje snage:

$$G = A_I A_V = (-100) * (-40) = 4000. \quad (3-35)$$

Ovaj opisan sklop može se koristiti i kao naponsko, strujno i pojačalo snage ali se po svojim fizikalnim svojstvima u prvom redu koristi kao strujno pojačalo. Ako uz odabranu statičku radnu točku Q varira R_p , dobivamo radne pravce različitih nagiba.



Slika 3.11 Analiza utjecaja otpora potrošača na strujno i naponsko pojačanje

Kada kroz radnu točku provučemo tri različita radna pravca za tri različita otpora potrošača $R_{p1} = 833 \Omega$, $R_{p2} = 1555 \Omega$ i $R_{p3} = 0$. Samim promjenama otpora potrošača mijenjamo nagib pravaca i točku presjeka radnog pravca s odgovarajućom izlaznom karakteristikom tranzistora. Navedeni radni pravci u točkama A, B, i C sijeku izlaznu karakteristiku kojoj odgovara struja baze $I_{BQ} + I_{bm}$.

Kako tim točkama odgovara ista struja kolektora, amplitude izmjenične struje baze i kolektora I_{bm} i I_{cm} ostat će nepromijenjene pri promjeni otpora potrošača. To znači da strujno pojačanje ne ovisi o otporu potrošača te je to osnovna karakteristika strujnog pojačanja. Promjena otpora utječe na promjenu napona u_{ce} na izlazu sklopa, uz istu amplitudu struje baze. Kako je ista struja baze tako je isti i napon baze u_{be} te tako porast otpora potrošača dovodi do porasta naponskog pojačanja.

3.3 - Odnosi snaga

Pri radu sklopa u spoju zajedničkog emitera u dinamičkim uvjetima trenutna vrijednost snage koju sklopu daje kolektorska baterija jednaka je produktu napona U_{CC} i trenutne totalne vrijednosti struje koja teče kroz kolektorsku bateriju.

$$p_{cc} = U_{CC}(i_c + I_{BQ}) = U_{CC}(i_c + I_{CQ} + I_{BQ}) = U_{CC}i_c + U_{CC}I_{CQ} + U_{CC}I_{BQ}. \quad (3-36)$$

Kako tranzistor radi u režimu malih signala, struja i_c je izmjenična struja kojoj je srednja vrijednost jednaka nuli. Tako će srednja snaga koju kolektorska baterija daje sklopu biti određena drugim članom iz gornje relacije.

$$P_{cc} = U_{CC}I_{CQ}. \quad (3-37)$$

Ono što je važno da srednja snaga koju daje kolektorska baterija ne ovisi o priključenom signalu. Trenutna vrijednost predane snage potrošaču je :

$$p_p = R_p i_c^2 = R_p (i_c + I_{CQ})^2 = R_p i_c^2 + R_p * 2i_c I_{CQ} + R_p I_{CQ}^2. \quad (3-38)$$

Kako je srednja vrijednost izmjenične struje kolektora i_c jednaka je nuli, pa je i srednja vrijednost i drugog člana iz relacije jednaka nuli. Srednja vrijednost prvog člana u relaciji je $R_p I_C^2$, gdje je I_C efektivna vrijednost izmjenične struje kolektora, i srednja snaga predana potrošaču je :

$$P_p = R_p I_{CQ}^2 + R_p I_C^2. \quad (3-39)$$

To su dvije snage koje troši potrošač, prvu u statičkim uvjetima a druga koju potrošač prima zbog djelovanja izmjeničnog signala. Kada povećamo efektivnu vrijednost izmjenične struje kolektora raste i snaga predana potrošaču.

Dispirana snaga u tranzistoru :

$$p_T = u_{CE} i_C + u_{BE} i_B. \quad (3-40)$$

Pošto je $u_{BE} \ll u_{CE}$ i $i_B \ll i_C$ dobivamo :

$$p_T = u_{CE} i_C = (U_{CC} - i_C R_p) i_C = U_{CC} i_C - R_p i_C^2 = p_{CC} - p_p. \quad (3-41)$$

Pa je srednja snaga u tranzistoru :

$$P_T = P_{CC} - P_p. \quad (3-42)$$

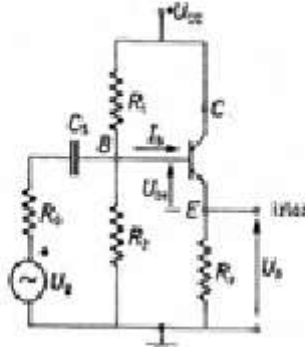
Snaga P_T potroši se sva na kolektorskom spoju tranzistora . Kod linearnog režima rada snaga koju daje kolektorska baterija je konstantna, neovisna o amplitudi priključenog signala. Pošto srednja vrijednost snage predana potrošaču raste sa kvadratom efektivne vrijednosti izmjenične struje kolektora, snaga dispirana u tranzistoru opada s porastom amplitude ulaznog signala. Što znači da je tranzistor u punom intenzitetu kada na ulazu nije prisutan signal. Ako posljednju relaciju prikažemo :

$$p_p = P_{CC} - P_T. \quad (3-43)$$

Dobivamo da u procesu pojačanja signala potrošaču se predaje snaga koju sklopu daje kolektorska baterija umanjena za snagu koju tranzistor disipira u obliku topline. Zaključujem da tranzistor je aktivna elektronička komponenta koja kontrolira protjecanje energije iz kolektorske baterije u potrošač i za tu kontrolu troši jedan dio energije koju daje kolektorska baterija. To znači da tranzistor posjeduje svojstvo pojačanja snage izmjeničnog signala, jer može kontrolirati veći iznos snage od iznosa koji mu je doveden na stezaljke.

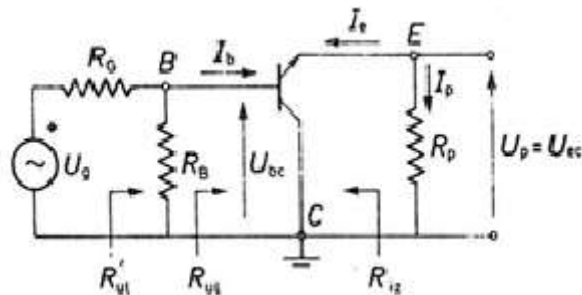
4. Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora – emittersko slijedilo

Tipično pojačalo s tranzistorom u spoju zajedničkog kolektora prikazati ću na slici.



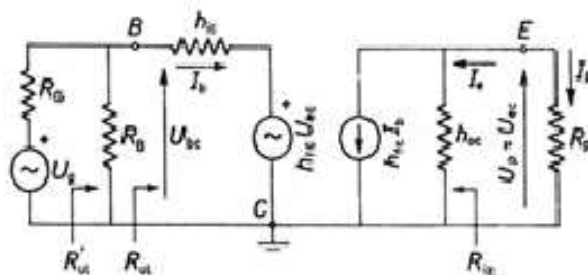
Slika 4.1 Pojačalo u tranzistorskom spoju zajedničkog kolektora

Ono u čemu se razlikuje od spoja zajedničkog emitera je to što se potrošač ovdje nalazi u krugu emitera, a kolektor je spojen direktno na kolektorsku bateriju te time uzemljen na izmjenični signal. Funkcija otpornika R_1 i R_2 ista je kao kod pojačala u spoju zajedničkog emitera i zajedničke baze. Kod dinamičkih uvjeta sklop se uz kratko spajanje blokirajućeg kondenzatora C_s na frekvenciji signala i uz kratko spajanje kolektorske baterije možemo vidjeti na slici. Otpor R_B predstavlja paralelnu kombinaciju otpora R_1 i R_2 . Ulazni izmjenični napon sklopa je napon U_{be} između baze i uzemljenog kolektora, a izlazni izmjenični napon je napon $U_p = U_{ec}$ između izlazne elektrode i emitera te uzemljenog kolektora. Ulazna izmjenična struja će biti struja baze I_b , a struja potrošača $I_p = -I_e$.



Slika 4.2 Model pojačala u spoju zajedničkog kolektora uz mali izmjenični signal

Kada tranzistor u sklopu zamijenimo s hibridnim nadomjesnim sklopom tranzistora u spoju zajedničkog kolektora, dobiva se nadomjesni sklop pojačala u spoju zajedničkog kolektora.



Slika 4.3 Nadomjesni sklop pojačala u spoju zajedničkog kolektora za mali izmjenični signal

Taj sklop je jednak sklopu zajedničkog emitera samo treba se zamijeniti s hibridnim parametrima u spoju zajedničkog kolektora. Izlazni napon U_{ce} s naponom U_{ec} i izlaznu struju I_c strujom I_e . Te tako dobijemo strujno pojačanje koje iznosi:

$$A_I = \frac{I_p}{I_b} = -\frac{I_e}{I_b} = -\frac{h_{fe}}{1+h_{oc}R_p} = \frac{1+h_{fe}}{1+h_{oe}R_p}. \quad (4-1)$$

Kada je ispunjen uvjet $h_{oe}R_p < 0,1$ imati ćemo $A_I \cong 1 + h_{fe}$.

Strujno pojačanje je pozitivno te uvijek puno veće od jedinice.

Ulazni otpor iznosi

$$R_{u1} = \frac{U_{be}}{I_b} = h_{ic} + h_{re}A_I R_p = h_{ie} + (1 - h_{re}) * \frac{1+h_{fe}}{1+h_{oe}R_p} R_p. \quad (4-2)$$

Kako je $h_{re} \ll 1$ i često $h_{oe}R_p < 0,1$ prethodnu relaciju možemo prikazati u obliku

$$R_{u1} \cong h_{ie} + (1 + h_{fe})R_p. \quad (4-3)$$

Ulazni otpor pojačala u spoju zajedničkog kolektora prema relacijama je jako visok i to zbog člana $(1 + h_{fe})R_p$. Ako nam je $h_{fe} = 99$ i $R_p = 2k\Omega$ ulazni otpor će iznositi 200 k Ω .

Naponsko pojačanje je :

$$A_V = \frac{U_p}{U_{be}} = \frac{U_{ec}}{U_{be}} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}(h_{oe} + \frac{1}{R_p}) - h_{re}h_{fe}} = \frac{1+h_{fe}}{h_{ie}(h_{oe} + \frac{1}{R_p}) + (1-h_{re})(1+h_{fe})}. \quad (4-4)$$

Kako je $h_{re} \ll 1$ imamo :

$$A_V \cong \frac{1}{1 + \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}(h_{oe} + \frac{1}{R_p})}. \quad (4-5)$$

Kako je ispunjen uvjet $h_{oe}R_p < 0,1$ imati ćemo :

$$A_V \cong \frac{1}{1 + \frac{h_{ie}}{(1+h_{fe})R_p}}. \quad (4-6)$$

Kako je otpor R_p istog reda veličine kao h_{ie} i da je $h_{fe} \gg 1$ dobivamo da pojačalo u spoju zajedničkog kolektora ima naponsko pojačanje pozitivno i neznatno manje od jedinice. Iz toga zaključujemo da emitorski napon slijedi bazni, te se zato pojačalo u spoju zajedničkog kolektora zove još i emitorsko slijedilo.

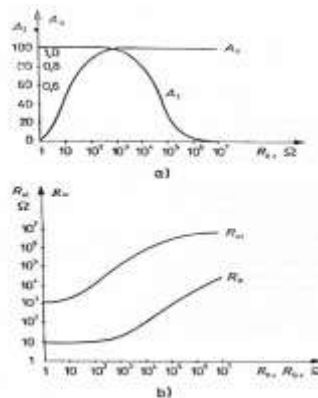
Izlazni otpor određujemo iz relacije :

$$R_{iz} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{re}h_{fe}}{R_G + h_{ie}}} = \frac{1}{h_{oe} + \frac{(1-h_{re})(1+h_{fe})}{R_G + h_{ie}}} \quad (4-7)$$

Izraz iz posljednje relacije vrijedi pod pretpostavkom da je $R_G \ll R_B$. Ako nije otpor R_G trebamo zamijeniti paralelnom kombinacijom otpora R_G i R_B . Pošto je $h_{re} \ll 1$ vrijedi :

$$R_{iz} \cong \frac{R_G + h_{ie}}{1 + h_{fe}} \quad (4-8)$$

Ovisnost naponskog i strujnog pojačanja pojačala u spoju zajedničkog kolektora o otporu potrošača prikazati ćemo grafički na slici :

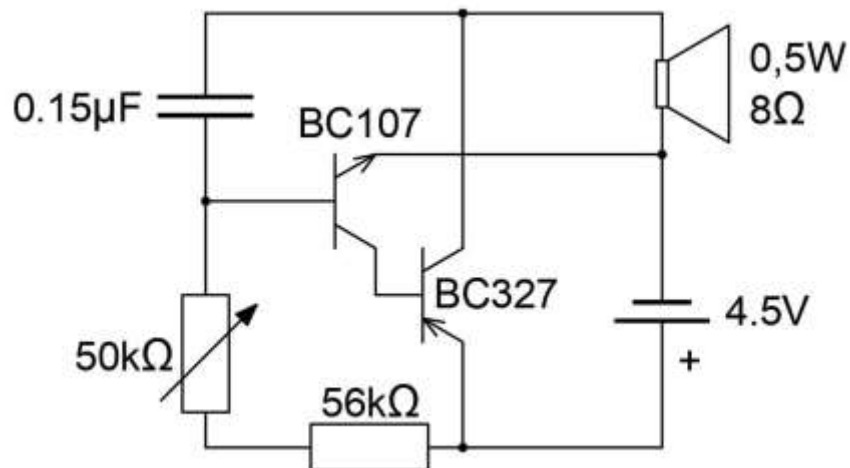


Slika 4.4 a), a ovisnost ulaznog otpora o otporu potrošača
b) ovisnost izlaznog otpora o otporu ulaznoga generatora.

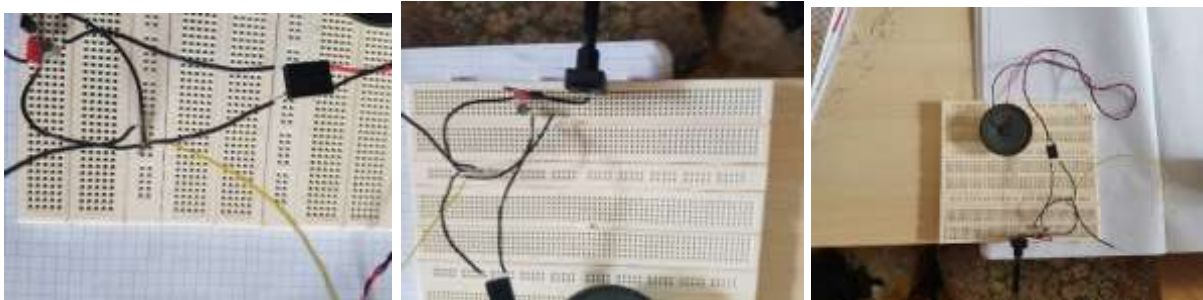
5.Vježba – Bipolarni tranzistor kao pojačalo ulaznog signala

5.1 - Niskofrekventni oscilator (zujalica)

Shema spoja :



Princip rada : Pomoću dva tranzistora u spoju pokušavamo ostvariti oscilator koji će generiti signal određene frekvencije. Frekvenciju određujemo preko radnih točaka tranzistora, koje dobivamo iznosima otpornika i kondenzatora koje imamo u krugu. Potencijetrom mijenjamo napon na bazi tranzistora BC107 te struje što dovodi do promjene frekvencije koju oscilator generira. Kao rezultat cijelog procesa dobivamo zvuk na zvučniku.



Slika 5.1 Fotografije spoja

Zaključak

U završnom radu pod naslovom **Osnovni sklopovi pojačala s bipolarnim tranzistorom** u pet poglavlja obradio sam osnovne podatke o bipolarnom tranzistoru. Glavne karakteristike ulazne i izlazne, princip rada bipolarnog tranzistora, tri osnovna spoja bipolarnog tranzistora s zajedničkom bazom, zajedničkim emiterom te zajedničkim kolektorom. Pojačala u spojevima, njihove prednosti i mane, primjenu.

Tako sam na početku rada pisao o tome kako se kod tranzistora se javlja pn-spoj koji je propusno polariziran i dovodi do injekcije slobodnih elektrona. Time povećavam koncentraciju manjinskih nosioca na suprotnim stranama pn-spoja. Nastaje mala reverzna struja zasićenja. Modulacijom toka struje i promjenom napona dobili smo osnovu bipolarnog tranzistorskog djelovanja.

U nastavku sam opisao kako ti spojevi mogu biti diskretni i integrirani. Rad tranzistora sam prikazao u normalnom aktivnom području pomoću djelovanja emitterske, kolektorske i bazne struje. U spoju zajedničke baze opisao sam kako preko Ebers- Mollove jednadžbe možemo nacrtati ulazne karakteristike spoja. Kako one vrijede bez ograničenja na homogeost emitera, baze i kolektora i bez ograničenja s obzirom na jednodimenzionalnost toka nosilaca.

Pomoću njih dokazujemo da tranzistor ima ponašanje linearnog četveropola. Kod izlaznih karakteristika u spoju zajedničke baze prikazao sam ponašanje tranzistora u inverznom aktivnom području. Kod pojačala u spoju zajedničke baze dolazimo do toga da on ne može služiti kao strujno pojačalo već osigurava značajno naponsko pojačanje koje dobivamo u razlici ulaznog i izlaznog otpora u spoju.

U spoju zajedničkog emitera kod dobivanja ulaznih karakteristika isto su bitne Ebers-Mollove jednadžbe. Pojavljuju se Earleyov efekt koji dovodi do toga da porastom napona U_{CE} daje jaču reverznu polarizaciju kolektorskog područja što ima za posljedicu da se povećava bazni transportni faktor a smanjuje rekombinacijska i ukupna struja baze. Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera dobili smo iz relacija ovisnosti izlazne struje I_C o izlaznom naponu U_{CE} uz ulaznu struju I_B kao parametar uz eliminiranje napona U_{BE} .

Kada spojimo pojačalo u spoju zajedničkog emitera dobijemo veliko strujno pojačanje. Trebamo voditi računa kod strujnog pojačala da on prima strujni signal s generatora na ulazu te ga pojačanog predaje potrošaču na izlazu pojačala. Kako bi tranzistor doveli u odgovarajuću statičku radnu točku u kojem dobivamo odgovarajuću vrijednost faktora strujnog pojačanja, trebamo osigurati napon U_{CEQ} i struje I_{BQ} i I_{CQ} .

Kod pojačala u spoju zajedničkog kolektora glavna razlika u odnosu pojačala u spoju zajedničkog emitera je što se potrošač ovdje nalazi u krugu emitera, a kolektor je spojen direktno na kolektorsku bateriju te time uzemljen na izmjenični signal. Taj sklop je jednak sklopu zajedničkog emitera samo treba se zamijeniti s hibridnim parametrima u spoju zajedničkog kolektora.

Kako je otpor R_p istog reda veličine kao h_{ie} i da je $h_{fe} \gg 1$ dobivamo da pojačalo u spoju zajedničkog kolektora ima naponsko pojačanje pozitivno i neznatno manje od jedinice. Iz toga zaključujemo da emitterski napon slijedi bazni, te se zato pojačalo u spoju zajedničkog kolektora zove još i emittersko slijedilo.

U vježbi koju sam obradio kad bipolarni tranzistor koristimo kao pojačalo ulaznog signala. Istaknuo sam kako možemo generirati frekvenciju signala koju dobivamo preko radnih točaka tranzistora. Potencijometar sam koristio za mijenjanje vrijednosti napona na bazi tranzistora i struje. Za konačan rezultat dobio sam zvuk na zvučniku.

Popis literature

1. dr.sc. Petar Biljanović – Poluvodički elektronički elementi
2. dr.sc. Petar Biljanović – Elektronički sklopovi

Popis slika

1. Slika 1.1 Osnovna struktura plenarnog npn-tranzistora
2. Slika 1.2 Elementarni npn-tranzistor
3. Slika 1.3 Električki simbol npn-tranzistora
4. Slika 1.4 Električki simbol pnp-tranzistora
5. Slika 1.5 Normalno aktivno područje rada npn-tranzistora u spoju zajedničke baze
6. Slika 2.1 Ulazne karakteristike u spoju zajedničke baze – za idealni i realni tranzistor
7. Slika 2.2 Modulacija širine baze pri porastu iznosa reverznog napona između kolektora i baze
8. Slika 2.3 Raspodjela koncentracije slobodnih manjinskih elektrona u bazi u području zasićenja kada je $I_C = 0$.
9. Slika 2.4 Izlazna karakteristika idealnog tranzistora u spoju zajedničke baze
10. Slika 2.5 Konfiguracija pojačala s tranzistorom u spoju zajedničke baze
11. Slika 2.6 Praktična izvedba pojačala signal
12. Slika 2.7 Model pojačala za mali izmjenični s tranzistorom u spoju zajedničke baze
13. Slika 2.8 Nadomjesni sklop pojačala za mali izmjenični signal
14. Slika 2.9 Ovisnost ulaznog otpora o otporu potrošača
15. Slika 2.10 Ovisnost Izlaznog otpora o unutrašnjem otporu ulaznog generatora
16. Slika 3.1 Ulazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera :
 - a) za idealni tranzistor
 - b) za područje vrlo mali iznosa napona U_{BE} i struje I_B
 - c) za realni tranzistor
17. Slika 3.2 Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera tranzistora :
 - a) za idealni tranzistor (puna crta) za realni tranzistor (isprekidana crta)
 - b) uvećano područje oko ishodišta
18. Slika 3.3 Izlazne karakteristike u spoju zajedničkog emitera sa statičkom radnom točkom u normalnom aktivnom području
19. Slika 3.4 Podešavanje statičke radne točke bipolarnog tranzistora :
 - a) podešavanje kruga baze
 - b) podešavanje kruga kolektora
20. Slika 3.5 Proizvoljni radni pravac provučen kroz radnu točku
21. Slika 3.6 Realiziranje istosmjernog strujnog generatora u krugu baze
22. Slika 3.7 Dovođenje strujnog signala na ulaz pojačala
23. Slika 3.8 Statička karakteristika tranzistora i statički radni pravac u polju izlaznih karakteristika
24. Slika 3.9 Valni oblici napona i struje
25. 3.10 Analiza rada pojačala u spoju zajedničkog emitera u dinamičkim uvjetima pomoću statičkih karakteristika tranzistora
26. Slika 3.11 Analiza utjecaja otpora potrošača na strujno i naponsko pojačanje
27. Slika 4.1 Pojačalo u tranzistorskom spoju zajedničkog kolektora
28. Slika 4.2 Model pojačala u spoju zajedničkog kolektora uz mali izmjenični signal
29. Slika 4.3 Nadomjesni sklop pojačala u spoju zajedničkog kolektora za mali izmjenični signal

30. Slika 4.4

- a) ovisnost ulaznog otpora o otporu potrošača
- b) ovisnost izlaznog otpora o otporu ulaznog generatora

31. Slika 5.1. Fotografije spoja