

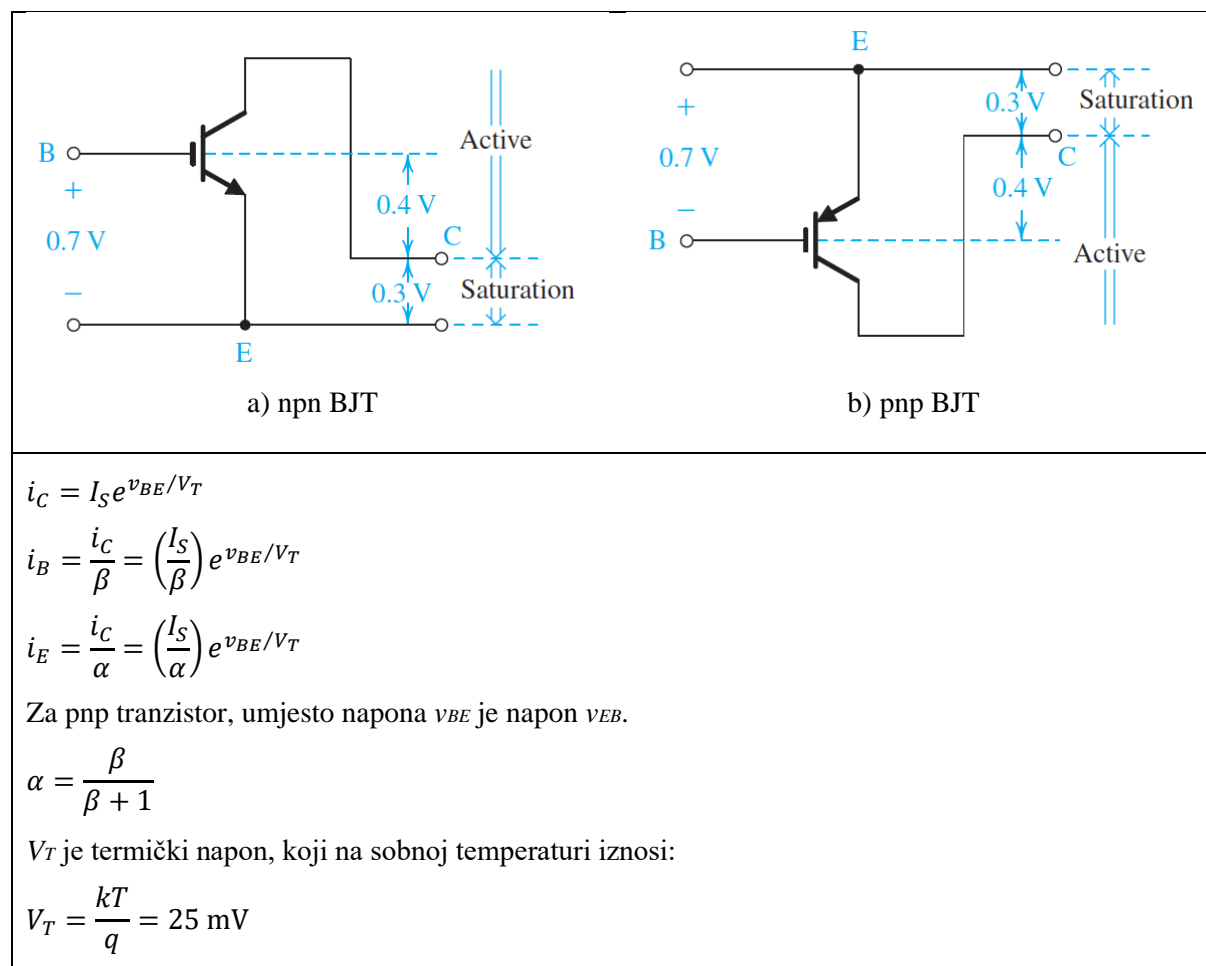
1 STRUJNO-NAPONSKE KARAKTERISTIKE BJT-A

1.1 $i_C - v_{BE}$ karakteristika BJT-a

Zanimljivo je uporediti aktivni režim rada BJT-a sa aktivnim režimom rada (zasićenje) MOSFET-a. Da bi BJT bio u aktivnom režimu, napon kolektor-emitor treba da bude minimalno oko 0.3 V. Sa druge strane, da bi MOSFET bio i aktivnom režimu (zasićenju), potrebno je da napon drejn-sors MOSFET-a bude veći od *overdrive* napona, što je za novije tehnologije u opsegu od oko 0.2 V do 0.3 V. Dakle, uočljiva je analogija. Takođe, napon inverzne polarizacije spoja kolektor-baza odgovara prekidu kanala MOSFET-a. Upravo ovaj uslov omogućava da kolektorska struja BJT-a (struja drejna MOSFET-a) bude nezavisna od napona kolektor-emitor BJT-a (napona drejn-sors MOSFET-a).

U tabeli 1.1 je data ilustracija uslova za aktivni režim rada BJT-a, kao i za režim zasićenja. Takođe je dat kratak pregled strujno-naponskih relacija BJT-a za aktivni režim rada.

Tabela 1.1 Režimi rada BJT-a

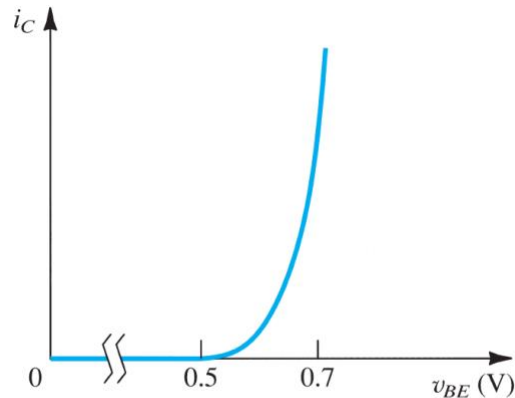


Na slici 1.1 je prikazana $i_C - v_{BE}$ karakteristika BJT-a:

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \tag{1.1}$$

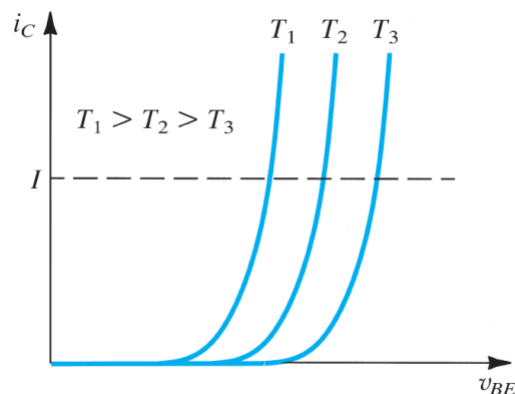
Kako konstanta $(1 / V_T)$ ima veliku vrijednost od 40 V, karakteristika „raste“ veoma brzo. Za napone v_{BE} manje od 0.5 V, struja je zanemarivo mala. U najvećem broju slučajeva, napon v_{BE} je u opsegu od oko 0.6 V do oko 0.8 V. Za „brze“ DC proračune najčešće se uzima vrijednost $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$. Interesantno je primijetiti analogiju između $i_C - v_{BE}$ karakteristike BJT-a i $i_D - v_{GS}$ karakteristike MOSFET-a. U oba

slučaja, napon treba da bude veći od određenog „praga“, kako bi tranzistor dao „primjetnu“ struju. Za MOSFET se definiše napon praga koji je tipično u opsegu od 0.4 V do 0.8 V. Za BJT postoji „očigledni napon praga“ od oko 0.5 V. Strujno-naponska karakteristika $i_D - v_{GS}$ MOSFET-a je parabolična, i samim tim manje strma od $i_C - v_{BE}$ karakteristike BJT-a. Upravo ova razlika ima direktan i značajan uticaj na vrijednost transkonduktanse, a samim tim i na pojačavačka svojstva, BJT-a i MOSFET-a.



slika 1.1 $i_C - v_{BE}$ karakteristika npn BJT-a.

Pri konstantnoj struji, sa povećanjem temperature za 1 °C, napon baza-emitor opada oko 2 mV, za Si tehnologiju. Slikom 1.2 je ilustrovan uticaj temperature na $i_C - v_{BE}$ karakteristiku npn BJT-a.



slika 1.2 Uticaj temperature na $i_C - v_{BE}$ karakteristiku npn BJT-a.

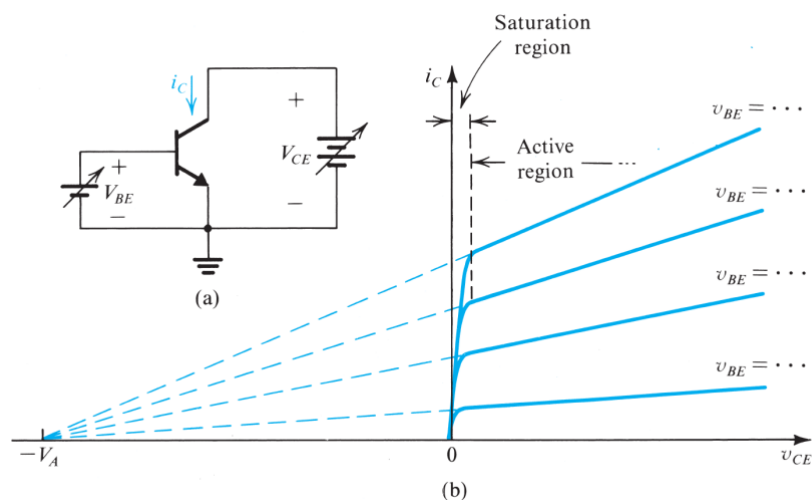
1.2 $i_C - v_{CE}$ karakteristika BJT-a

Na slici 1.3(b) prikazane su $i_C - v_{CE}$ karakteristike. Ove karakteristike se označavaju kao CE karakteristike jer su dobijene na osnovu BJT-a u CE konfiguraciji, slika 1.3(a).

Za male vrijednosti napona v_{CE} (manje od oko 0.3 V), spoj kolektor-baza postaje direktno polarisan i BJT iz aktivnog prelazi u režim zasićenja. Može se uočiti da su karakteristike u aktivnom režimu linearne, ali da imaju konačan nagib. Presjek ekstrapolirane karakteristike u aktivnom režimu, prema negativnim vrijednostima napona v_{CE} (isprekidana linija na slici), i v_{CE} ose označava se kao *Early*-jev napon V_A . Napon V_A je parametar određenog BJT-a. U pitanju je pozitivan broj najčešće u opsegu od 10 V do 100 V.

Za određenu vrijednost napona v_{BE} , povećavanjem napona v_{CE} , napon inverzne polarizacije na spoju kolektor-baza se povećava. Samim tim širina oblasti prostornog tovara na ovom spoju se povećava. Na ovaj način dolazi do smanjivanja efektivne širine baze. Kako je inverzna struja zasićenja I_S inverzno proporcionalna širini baze, doći će do povećanja struje I_S . Samim tim, dolazi i do proporcionalnog povećanja struje i_C . Upravo se u ovome sastoji *Early*-jev efekat. Iz očiglednih razloga, označava se i

kao efekat modulacije širine baze. I ovdje se može uočiti analogija sa efektom modulacije dužine kanala MOSFET-a.



slika 1.3 (a) Kolo za mjerenje $i_C - v_{CE}$ karakteristike BJT-a. (b) $i_C - v_{CE}$ karakteristike BJT-a.

Izlazna otpornost r_o BJT-a, posmatrano od kolektora, se definiše kao:

$$r_o = \left[\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \Big|_{v_{BE}=\text{const.}} \right]^{-1} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \quad (1.3)$$

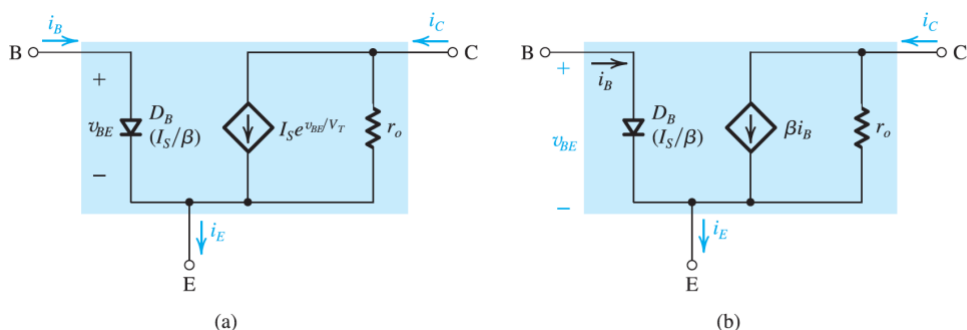
gdje su I_C i V_{CE} koordinate tačke na kojoj BJT radi za određenu $i_C - v_{CE}$ krivu, kada je $v_{BE} = V_{BE}$.

Izlazna otpornost se može zapisati i kao:

$$r_o = \frac{V_A}{I'_C} \quad (1.4)$$

gdje je I'_C vrijednost kolektorske struje bez uticaja *Early*-jevog efekta:

$$I'_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad (1.5)$$

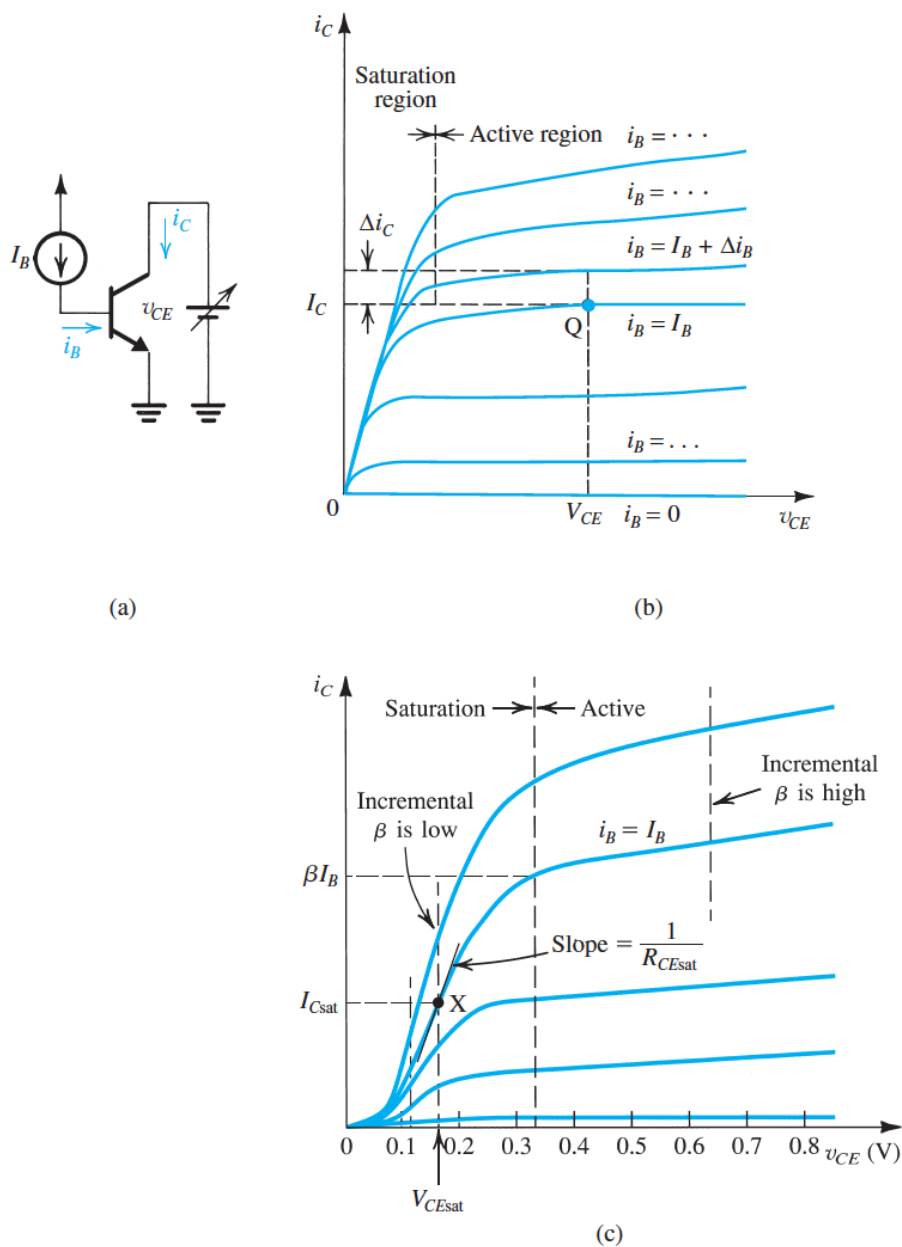


slika 1.4 Ekvivalentni model za „velike“ signale npn BJT-a u aktivnom režimu rada.

Konačna vrijednost izlazne otpornosti može imati značajan uticaj na pojačanje pojačavača u bipolarnoj tehnologiji. Ovaj uticaj je pogotovo značajan kada su u pitanju pojačavači realizovani u integrisanim tehnologijama.

Na slici 1.4 su prikazana dva modela za „velike“ signale BJT-a u aktivnom režimu rada, koji sadrže izlaznu otpornost r_o .

Na slici 1.5(a) je prikazan još jedan način određivanja $i_C - v_{CE}$ karakteristike BJT-a. U ovom slučaju se, umjesto napona v_{BE} , koristi bazna struja i_B kao parametar. Svaka od $i_C - v_{CE}$ karakteristika se mjeri za određenu konstantnu vrijednost bazne struje, slika 1.5(b). Na slici 1.5(c) je dat uvećan prikaz karakteristike u zasićenju.



slika 1.5 (a) Kolo za određivanje $i_C - v_{CE}$ karakteristike BJT-a. (b) $i_C - v_{CE}$ karakteristike BJT-a, za različite vrijednosti bazne struje. (c) Uvećan prikaz $i_C - v_{CE}$ karakteristika BJT-a u oblasti zasićenja.

CE strujno pojačanje β

U aktivnom regionu karakteristike prikazane na slici 1.5(b), označena je polarizaciona tačka Q. Polarizaciona tačka Q određena je baznom strujom I_B , kolektorskom strujom I_C i naponom kolektor-emitor V_{CE} . Odnos struja I_C i I_B predstavlja strujno pojačanje β . Međutim, postoji i drugi način za određivanje strujnog pojačanja β . Naime, potrebno je baznu struju promijeniti za Δi_B i izmjeriti promjenu kolektorske struje Δi_C , pri konstantnom naponu kolektor-emitor V_{CE} . Postupak je ilustriran slikom 1.5(b). Odnos $\Delta i_C / \Delta i_B$ se označava kao inkrementalno ili AC strujno pojačanje i malo se

razlikuje od strujnog pojačanja $\beta (I_C / I_B)$. Proizvođači bipolarnih tranzistora koriste oznaku h_{FE} za DC vrijednost strujnog pojačanja i h_{fe} za inkrementalno strujno pojačanje. (Oznaka h potiče od h-parametara za opis mreža, F se odnosi na *forward* režim, dok se E odnosi na CE spoj.)

Napon kolektor-emitor u zasićenju V_{CEsat} i saturaciona otpornost R_{CEsat}

Na osnovu uvećanog prikaza $i_C - v_{CE}$ karakteristike u oblasti zasićenja, slika 1.5(c), može se uočiti da je strujno pojačanje β manje nego u aktivnom režimu rada. Sa X je označena radna tačka u oblasti zasićenja. Tačku X definišu bazna struja I_B , kolektorska struja I_{Csat} i napon kolektor-emitor V_{CEsat} . Kolektorska struja u zasićenju I_{Csat} se definiše kao $I_{Csat} = \beta_{forced} I_B$, gdje je $\beta_{forced} < \beta$.

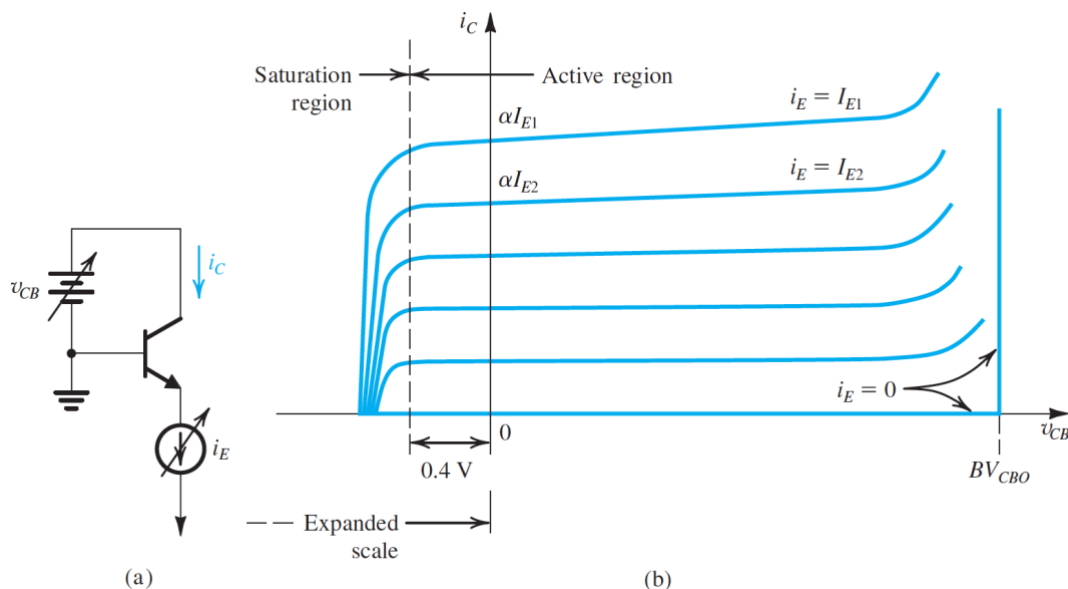
Kako je $i_C - v_{CE}$ karakteristika u zasićenju strma, otpornost kolektor-emitor u zasićenju R_{CEsat} ima manju vrijednost u odnosu na direktan aktivni režim rada:

$$R_{CEsat} = \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{i_B=I_B, i_C=I_{Csat}} \quad (1.6)$$

Tipične vrijednosti izlazne otpornosti u zasićenju R_{CEsat} su od nekoliko oma do nekoliko desetina oma. U proračunima se ova vrijednost najčešće zanemaruje.

1.3 Probij BJT-a

Maksimalan napon koji se može dovesti na terminale BJT-a je ograničen probojnim efektima spoja emitor-baza i spoja kolektor-baza koji slijede lavinski multiplikativni mehanizam. Na slici 1.6(a) je prikazan BJT u CB konfiguraciji, dok su na slici 1.6(b) prikazane $i_C - v_{CB}$ karakteristike BJT-a. Za emitorsku struju $i_E = 0$, probojni napon spoja kolektor-baza je označen sa BV_{CBO} . Za emitorsku struju $i_E > 0$, probojni napon spoja kolektor-baza je manji od BV_{CBO} . Tipična vrijednost napona BV_{CBO} za diskretne bipolarne tranzistore je veća od 50 V.

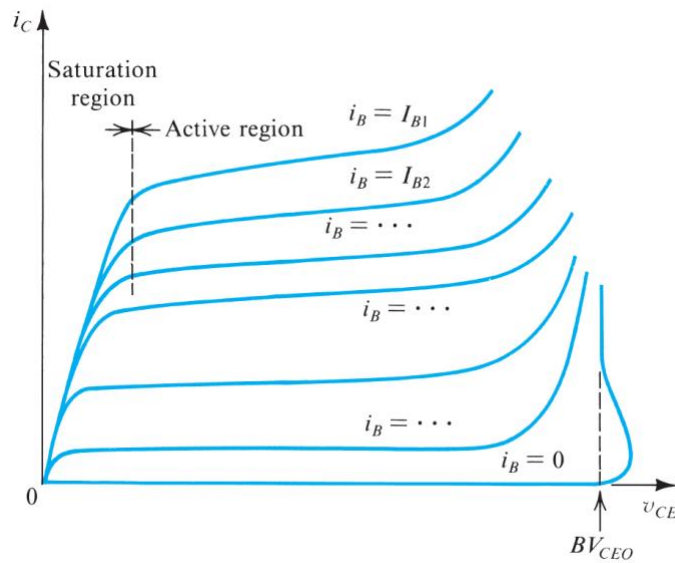


slika 1.6 BJT CB karakteristika koja sadrži i opseg probojnog napona.

Na slici 1.7 je prikazana $i_C - v_{CE}$ karakteristika BJT-a sa probojnim naponom BV_{CEO} . Vrijednost ovog napona je približno jednaka polovini probojnog napona BV_{CBO} . U specifikacijama bipolarnih tranzistora se ovaj napon nekada označava i kao *sustaining* napon LV_{CEO} .

Probojni naponi BJT-a, u CB ili CE konfiguraciji, nisu destruktivni, sve dok je disipacija snage u okviru dozvoljenih granica. Ovo, međutim, nije slučaj i sa probijem spoja emitor-baza. Pri probiju spoja emitor-baza dolazi do lavinskog efekta, pri naponu BV_{EBO} koji je mnogo manji od BV_{CBO} . Tipična vrijednost napona BV_{EBO} je između 6 V i 8 V. Ovaj probij je destruktivan, u smislu trajnog redukovanja

strujnog pojačanja β . Upotreba *Zenner* dioda, kao naponskih referenci, se upravo bazira na ovom proboju. Probojni naponi i maksimalna disipacija snage su veoma značajni parametri za dizajn pojačavača snage.

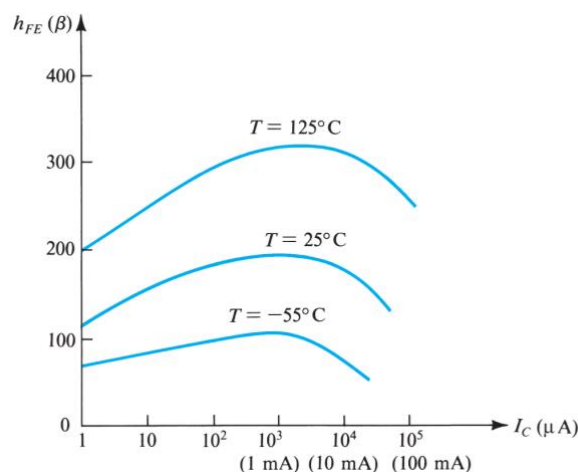


slika 1.7 BJT CE karakteristika koja sadrži i opseg probojnog napona.

1.4 Zavisnost strujnog pojačanja β i kolektorske struje BJT-a od temperature

U prethodnim analizama je podrazumijevano da je vrijednost strujnog pojačanja β konstantna. Međutim, strujno pojačanje β zavisi od vrijednosti kolektorske struje BJT-a. Zavisnost strujnog pojačanja β od kolektorske struje je prikazana na slici 1.8. Postoji opseg kolektorske struje za koji strujno pojačanje β ima najveću vrijednost i najčešće je težnja da se upravo taj dio karakteristike koristi.

Na slici 1.8 je, takođe, prikazana zavisnost strujnog pojačanja β od temperature. Činjenica da se strujno pojačanje β povećava sa temperaturom može dovesti do ozbiljnih problema, ukoliko su u pitanju velike radne snage.



slika 1.8 Zavisnost strujnog pojačanja β od kolektorske struje tipičnog npn BJT-a u integrisanoj Si tehnologiji namijenjenog za radnu struju od oko 1 mA, pri različitim temperaturama.

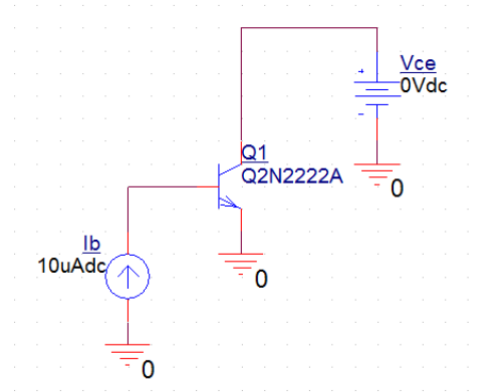
Literatura

- A. S. Sedra, K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th edition, Oxford University Press, 2015.
- B. Razavi, *Fundamentals of Microelectronics*, 2nd edition, JohnWiley & Sons, 2014

VJEŽBA

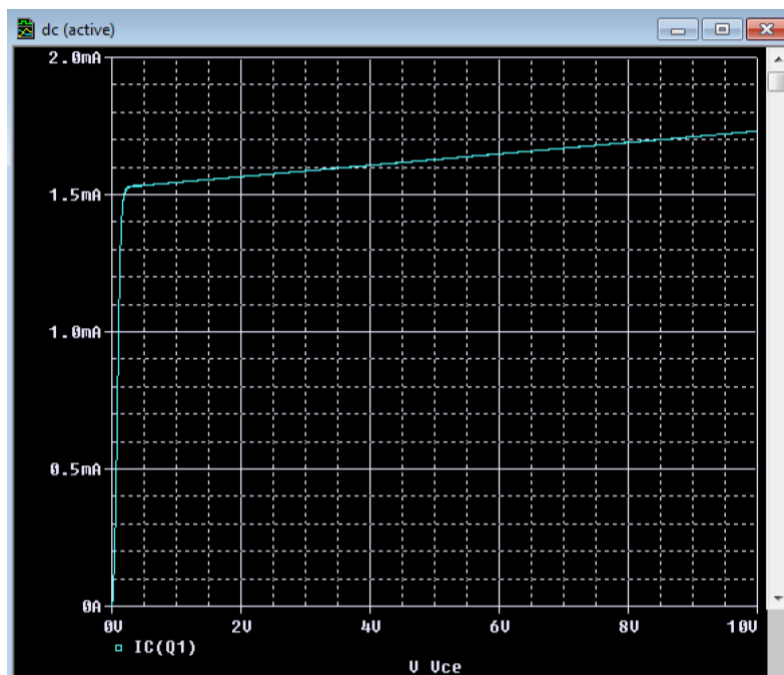
1 Strujno-naponske karakteristike BJT-a

- Izvršiti simulaciju $i_C - v_{CE}$ karakteristike BJT-a Q2N2222A, za baznu struju $i_B = I_B = 10 \mu\text{A}$ i opseg napona kolektor-emitor $0 < v_{CE} < 10 \text{ V}$, sa korakom 1 mV, slika 1.1.



slika 1.1

Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.2.



slika 1.2

- Odrediti izlaznu otpornost r_o BJT-a za napon $v_{CE} = 3 \text{ V}$ kao i *Early*-jev napon.

Nagib strujno – naponske karakteristike $i_C - v_{CE}$ u tački polarizacije je mjera izlazne otpornosti BJT-a. Ukoliko se izabere uzak region oko $v_{CE} = 3 \text{ V}$ (2.995 V do 3.005 V), izlazna otpornost bi bila:

$$r_o = 0.01 \text{ V} / [i_C(v_{CE} = 3.005 \text{ V}) - i_C(v_{CE} = 2.995 \text{ V})],$$

što iznosi približno 48.15 k Ω .

Na slici 1.3 je prikazana tangenta t_I u tački (3 V, $i_C(V_{CE} = 3 \text{ V})$), kao i postupak određivanja izlazne otpornosti. Tangenta t_I se može zapisati kao:

$$t_I(V_{CE}) = (V_{CE} - 3 \text{ V})/r_o + i_C(V_{CE} = 3 \text{ V})$$

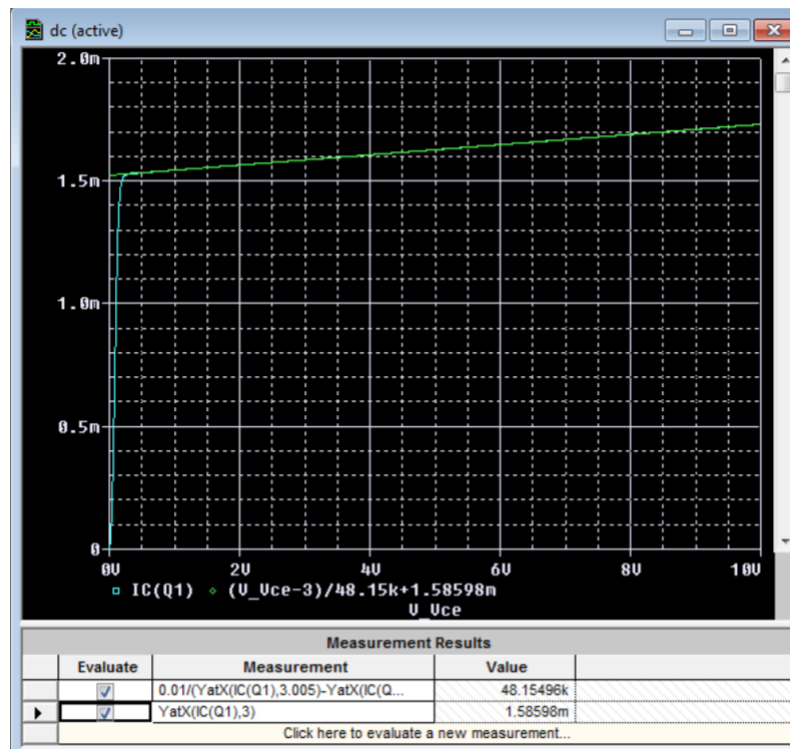
Iz presjeka tangente t_I i V_{CE} ose može se odrediti *Early*-jev napon:

$$V_A = -(3 \text{ V} - r_o i_C(V_{CE} = 3 \text{ V})) = 73.37 \text{ V}$$

Sada je izlazna otpornost r_o BJT-a:

$$r_o = V_A / I_C = 73.37 \text{ V} / 1.56 \text{ mA} = 47.03 \text{ k}\Omega,$$

što je veoma blisko prethodno dobijenom rezultatu.



slika 1.3

Kako će se promijeniti izlazna otpornost BJT-a ukoliko se bazna struja smanji dva puta?

- Izvršiti parametarsku analizu kola prikazanog na slici 1.1, pri čemu je parametar bazna struja koja ima vrijednosti: 2 μA , 4 μA , 6 μA , 8 μA i 10 μA za opseg napona kolektor-emitor $0 < V_{CE} < 10 \text{ V}$, sa korakom 1 mV.

Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.4.

- Izračunati DC strujno pojačanje h_{FE} BJT-a za napon kolektor-emitor $V_{CE} = 3 \text{ V}$ i baznu struju $I_B = 8 \mu\text{A}$.

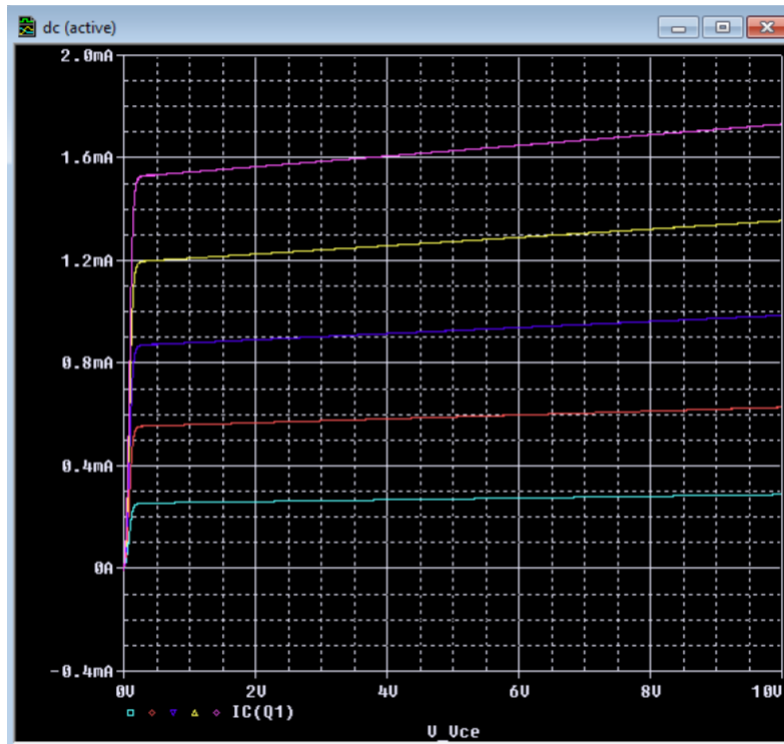
Vrijednost kolektorske struje I_C , za napon kolektor-emitor $V_{CE} = 3 \text{ V}$ i baznu struju $I_B = 8 \mu\text{A}$ je $I_C = 1.24 \text{ mA}$. Slijedi da je DC strujno pojačanje:

$$h_{FE} = 1.24 \text{ mA} / 8 \mu\text{A} = 155.$$

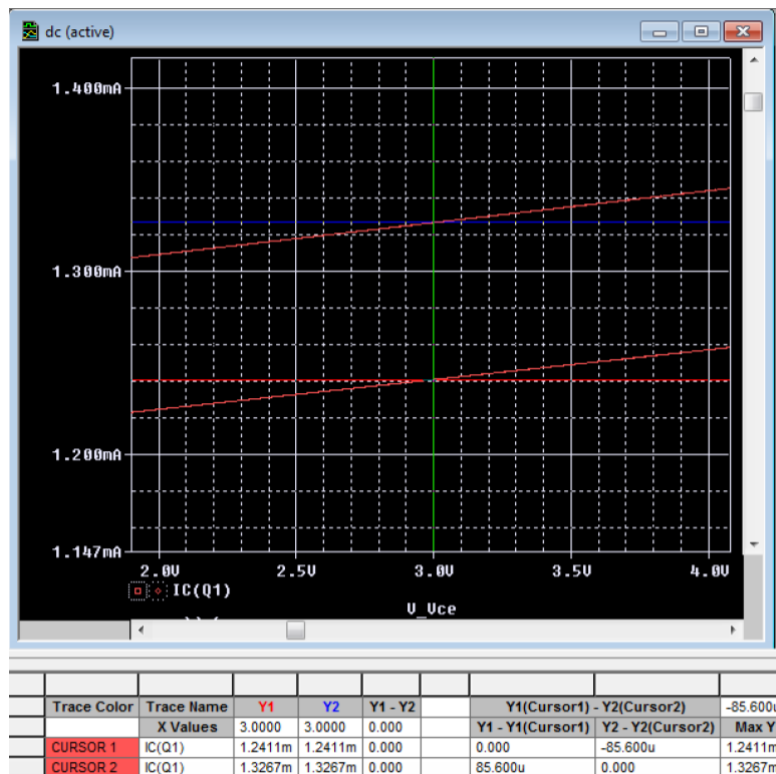
- Izračunati AC (inkrementalno) strujno pojačanje h_{fe} BJT-a za napon kolektor-emitor $V_{CE} = 3 \text{ V}$ pri promjeni bazne struje $I_B = 8 \mu\text{A}$ za $\Delta i_B = 0.5 \mu\text{A}$.

Za napon kolektor-emitor $V_{CE} = 3\text{ V}$, pri promjeni bazne struje za $\Delta i_B = 0.5\ \mu\text{A}$ kolektorska struja će se promijeniti za $\Delta i_C = 85.6\ \mu\text{A}$, slika 1.5. Slijedi da je AC strujno pojačanje:

$$h_{fe} = \Delta i_C / \Delta i_B = 85.6\ \mu\text{A} / 0.5\ \mu\text{A} = 171.$$



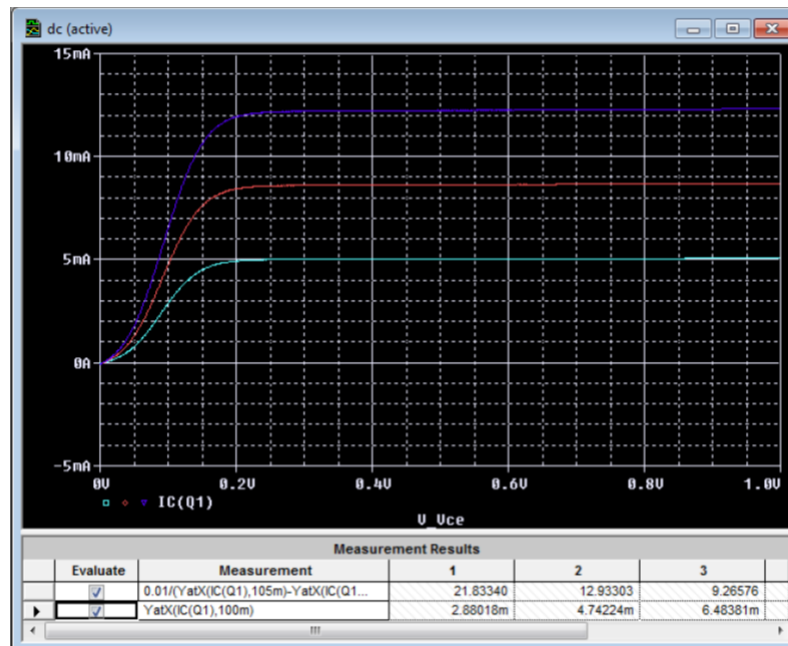
slika 1.4



slika 1.5

- Uz pomoć simulacija, izračunati DC strujno pojačanje h_{FE} i AC strujno pojačanje h_{fe} BJT-a Q2N2222A za napon kolektor-emitor $V_{CE} = 5\text{ V}$ i baznu struju $I_B = 40\text{ }\mu\text{A}$. Objasniti.
- Izvršiti simulaciju $i_C - v_{CE}$ karakteristike BJT-a Q2N2222A za opseg napona kolektor-emitor $0 < v_{CE} < 1\text{ V}$, sa korakom 1 mV , pri čemu bazna struja predstavlja parametar i ima vrijednosti: $30\text{ }\mu\text{A}$, $50\text{ }\mu\text{A}$ i $70\text{ }\mu\text{A}$. Odrediti izlaznu otpornost BJT-a u zasićenju za napon $V_{CEsat} = 0.1\text{ V}$.

Na slici 1.6 su prikazani rezultati simulacija.



slika 1.6

- Izvršiti simulaciju $i_C - v_{CE}$ karakteristike BJT-a Q2N2222A za opseg napona kolektor-emitor $0 < v_{CE} < 10\text{ V}$, sa korakom 1 mV , za baznu struju $50\text{ }\mu\text{A}$, pri čemu temperatura predstavlja parametar i ima vrijednosti: $0\text{ }^\circ\text{C}$, $27\text{ }^\circ\text{C}$ i $50\text{ }^\circ\text{C}$. Odrediti DC strujno pojačanje h_{FE} BJT-a.

Na slici 1.7 su prikazani rezultati simulacija. Očigledno je da se, sa povećanjem temperature, povećava kolektorska struja u aktivnom režimu, a samim tim i strujno pojačanje.

- Izvršiti simulaciju strujno naponske karakteristike BJT-a $i_C - v_{BE}$, za napon $V_{CE} = 3\text{ V}$ i opseg napona baza-emitor $0 < v_{BE} < 0.75\text{ V}$, sa korakom 1 mV .

Rezultati simulacije prikazani su na slici 1.8.

- Odrediti transkonduktansu g_m BJT-a za napon baza-emitor 650 mV .

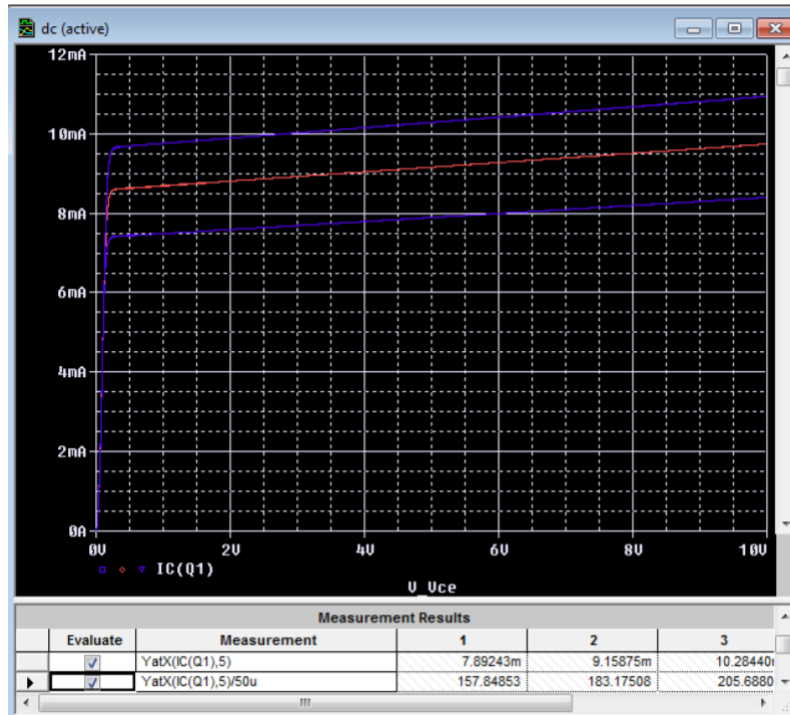
Nagib strujno – naponske karakteristike $i_C - v_{BE}$ u tački polarizacije je mjera transkonduktanse BJT-a. Ukoliko se izabere uzak region oko $v_{BE} = 650\text{ mV}$ (od 645 mV do 655 mV), transkonduktansa bi bila:

$$g_m = (i_C(v_{BE} = 655\text{ mV}) - i_C(v_{BE} = 645\text{ mV})) / 10\text{ mV},$$

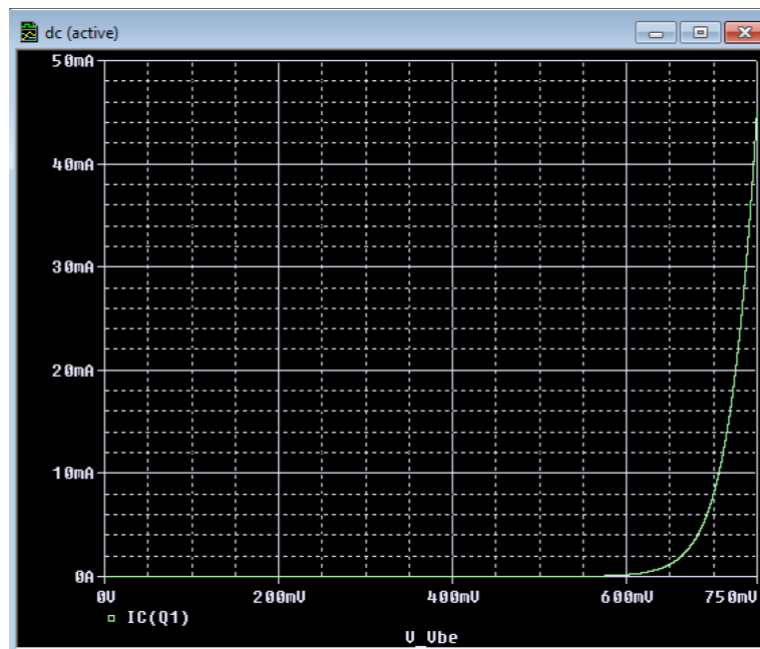
što iznosi približno 46.56 mS .

Na slici 1.9 je prikazana tangenta t_I u tački $(650\text{ mV}, i_C(v_{BE} = 650\text{ mV}))$, kao i postupak određivanja transkonduktanse. Tangenta t_I se može zapisati kao:

$$t_I(v_{BE}) = g_m \cdot (v_{BE} - 650\text{ mV}) + i_C(v_{BE} = 650\text{ mV})$$



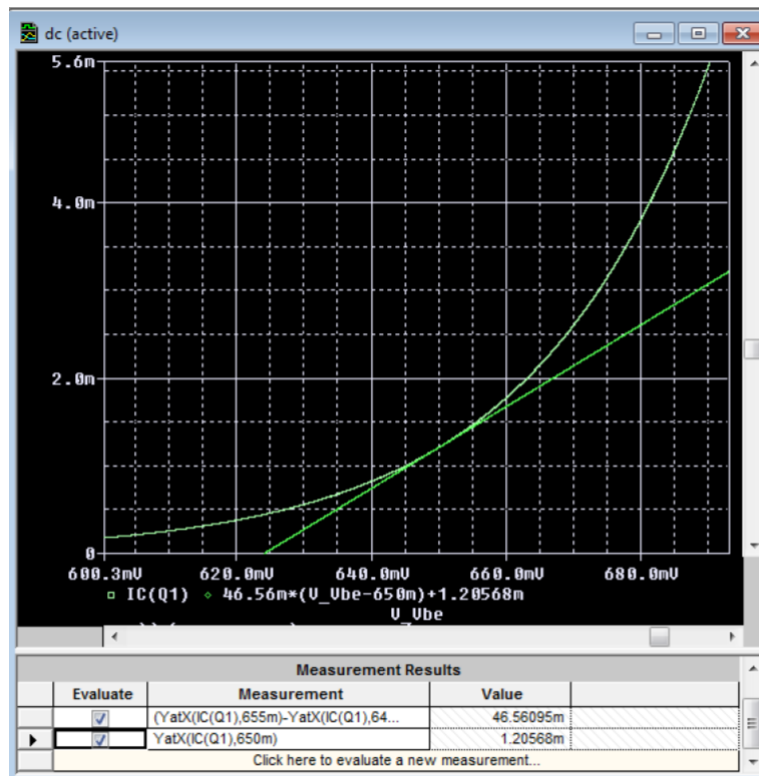
slika 1.7



slika 1.8

Uporediti vrijednost transkonduktanse MOSFET-a i BJT-a za približno iste vrijednosti struja drejna, odnosno kolektora.

- U kolo baze BJT-a vezati otpornik otpornosti 20 k Ω i uz pomoć takvog mjernog kola odrediti transkonduktansu BJT-a, za napon baza-emitor 650 mV i napon kolektor-emitor 3 V.



slika 1.9

Literatura

- A. S. Sedra, K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th edition, Oxford University Press, 2015.
 G. W. Roberts, A. S. Sedra, *Spice*, 2nd edition, Oxford University Press, 1997.