

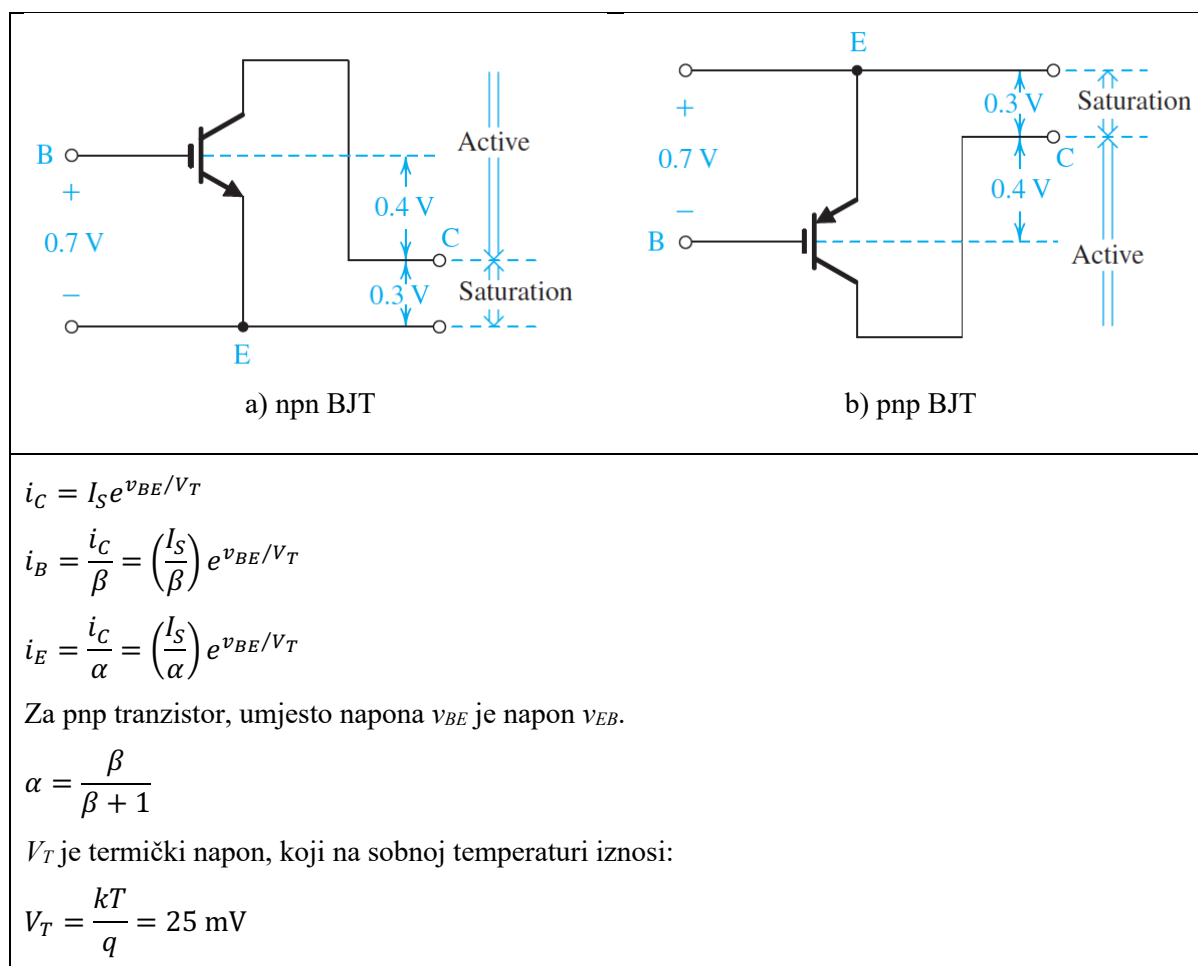
# 1 STRUJNO-NAPONSKE KARAKTERISTIKE BJT-A

## 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

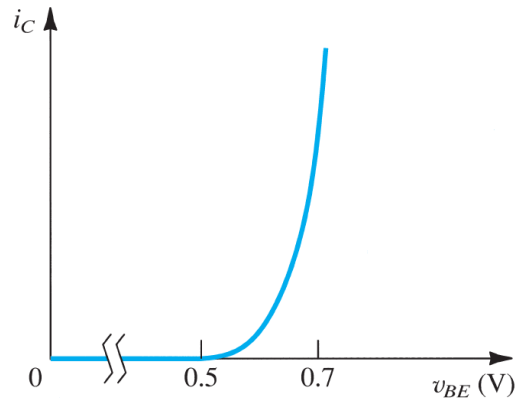


Na slici 1.1 je prikazana  $i_C - v_{BE}$  karakteristika BJT-a:

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

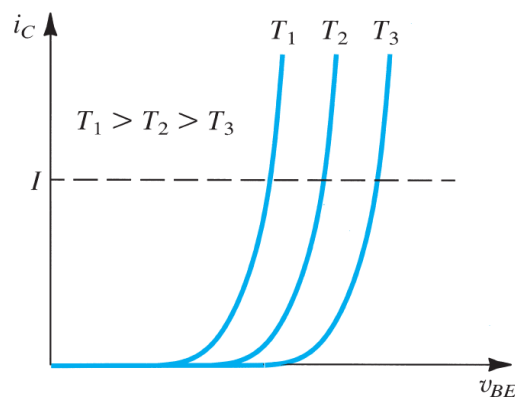
Kako konstanta ( $1 / V_T$ ) ima veliku vrijednost od  $40 \text{ V}^{-1}$ , karakteristika „raste“ veoma brzo. Za napone  $v_{BE}$  manje od 0.5 V, struja je zanemarivo mala. U najvećem broju slučajeva, napon  $v_{BE}$  je u opsegu od oko 0.6 V do oko 0.8 V. Za „brže“ DC proračune najčešće se uzima 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.

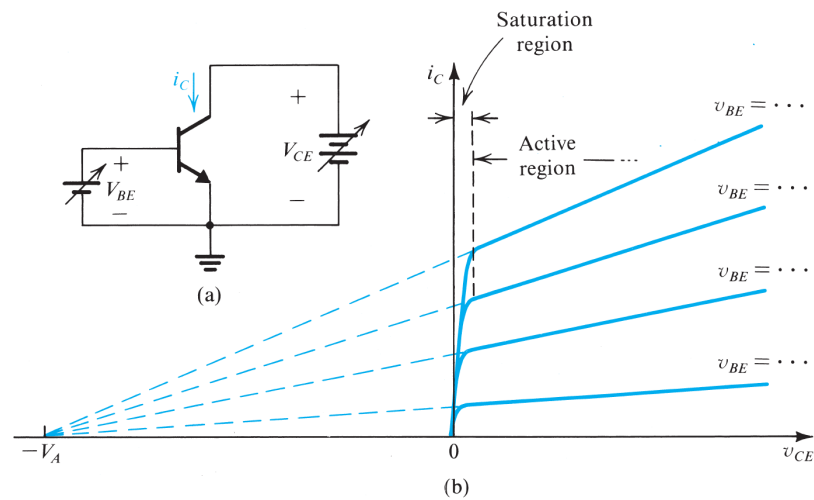
## 1.2 $i_C - v_{CE}$ karakteristika BJT-a

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:

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

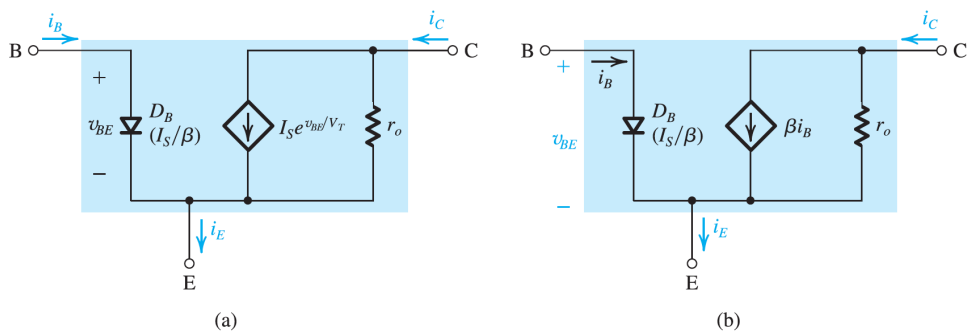
gdje su  $I_C$  i  $V_{CE}$  koordinate radne tačke BJT-a za određenu  $i_C - v_{CE}$  krivu, kada je  $v_{BE} = V_{BE}$ .

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:

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

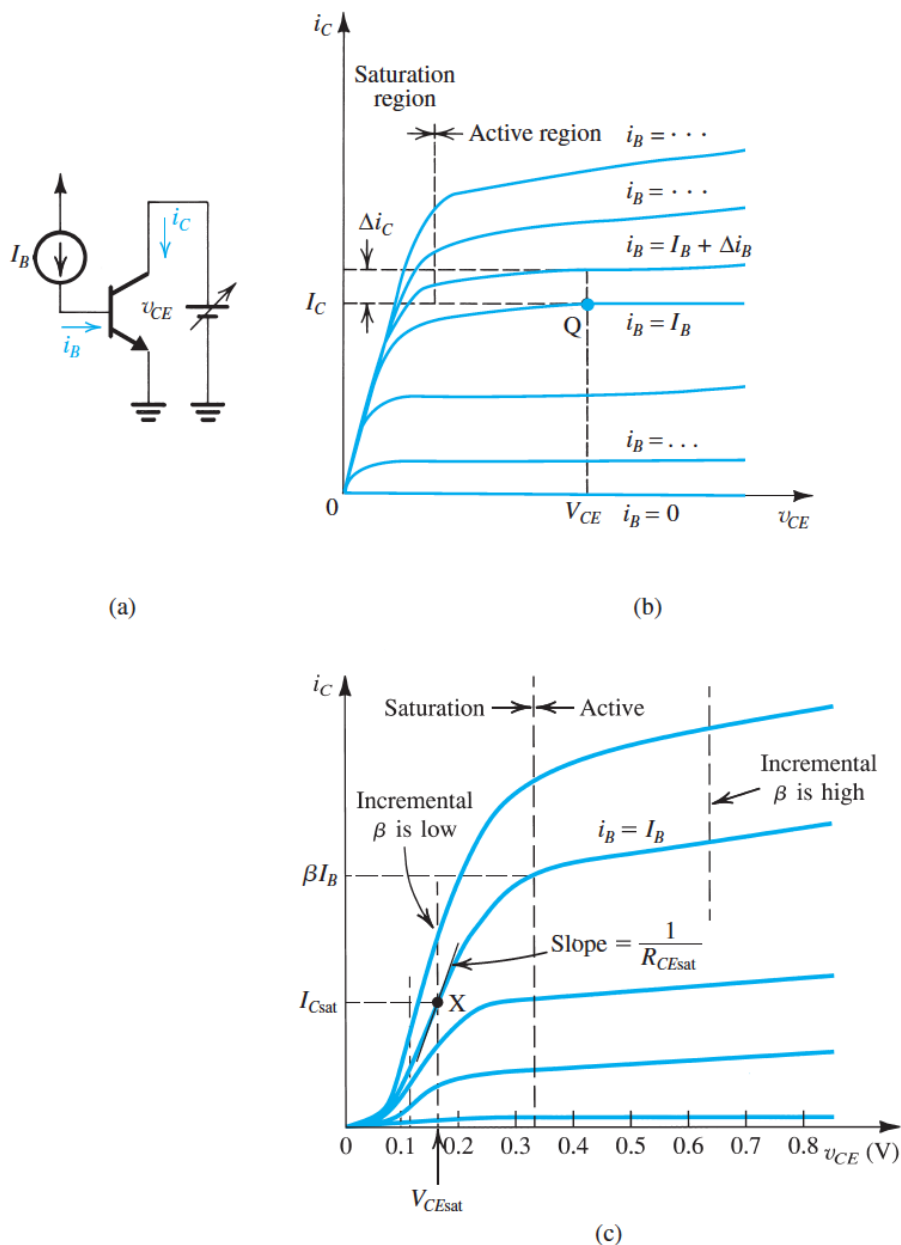


slika 1.4 Ekvivalentni model za „velike“ signale npn BJT-a u aktivnom režimu rada.

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 $\beta$

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  $\beta$ . Međutim, postoji i drugi način za određivanje strujnog pojačanja  $\beta$ . Naime, potrebno je baznu struju promijeniti za  $\Delta i_B$  i izmjeriti promjenu kolektorske struje  $\Delta i_C$ , 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  $\beta$  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  $\beta_{forced} < \beta$ .

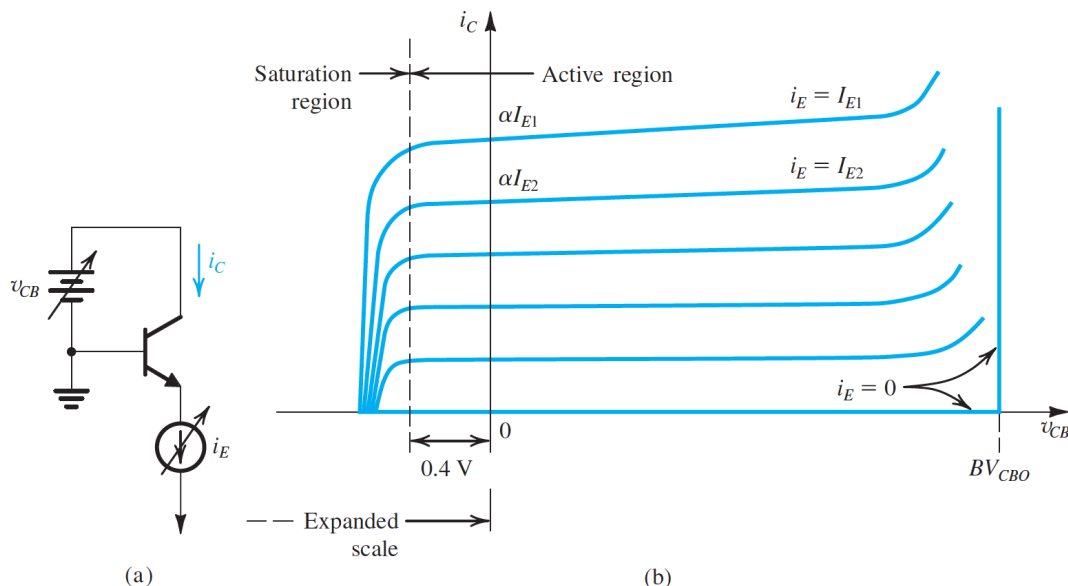
Kako je  $i_C - v_{CE}$  karakteristika u zasićenju strma, otpornost kolektor-emitor u zasićenju  $R_{CEsat}$  ima manju vrijednost u odnosu na direktan aktivni režim rada:

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

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 Proboj 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.

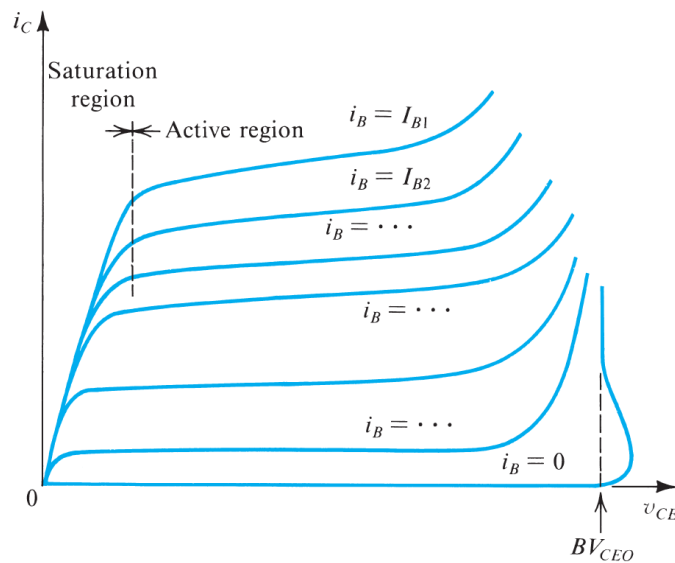


slika 1.6 BJT CB karakteristika koja sadrži i opseg probojnog napona.

Na slici 1.7 je prikazana  $i_C - v_{CE}$  karakteristika BJT-a sa probojnim naponom  $BV_{CE0}$ . Vrijednost ovog napona je približno jednaka polovini probojnog napona  $BV_{CBO}$ . U specifikacijama bipolarnih tranzistora se ovaj napon nekada označava i kao *sustaining* napon  $LV_{CE0}$ .

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 probojem spoja emitor-baza. Pri probiju spoja emitor-baza dolazi do lavinskog efekta, pri naponu  $BV_{EB0}$  koji je mnogo manji od  $BV_{CBO}$ . Tipična vrijednost napona  $BV_{EB0}$  je između 6 V i 8 V. Ovaj probij je destruktivan, u smislu trajnog redukovanja

strujnog pojačanja  $\beta$ . Upotreba *Zenner* dioda, kao naponskih referenci, se upravo bazira na ovom probouju. Probajni naponi i maksimalna disipacija snage su veoma značajni parametri za dizajn pojačavača snage.

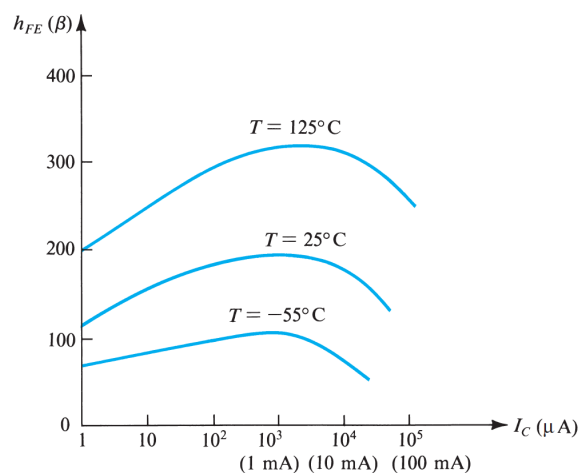


slika 1.7 BJT CE karakteristika koja sadrži i opseg probajnog napona.

#### 1.4 Zavisnost strujnog pojačanja $\beta$ i kolektorske struje BJT-a od temperature

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

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



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

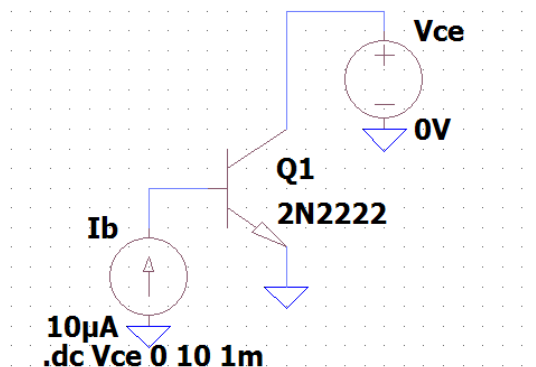
#### Literatura

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

## VJEŽBA

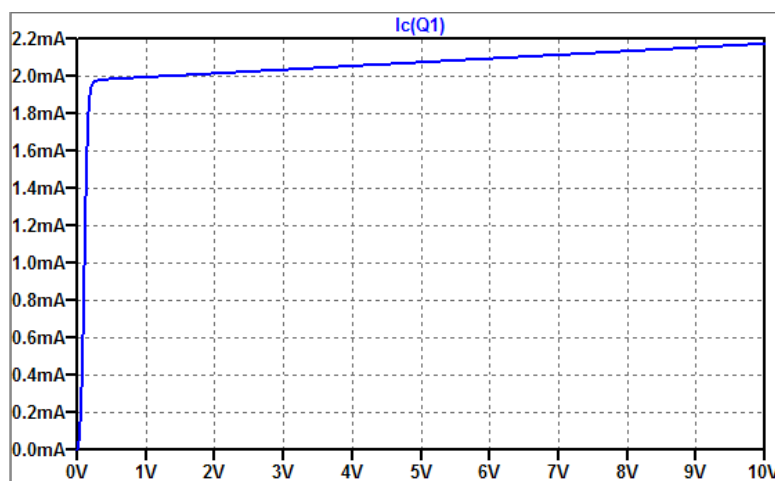
### 1 Strujno-naponske karakteristike BJT-a

- Izvršiti simulaciju  $i_C - v_{CE}$  karakteristike BJT-a 2N2222, 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 52.63 k $\Omega$ .

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:

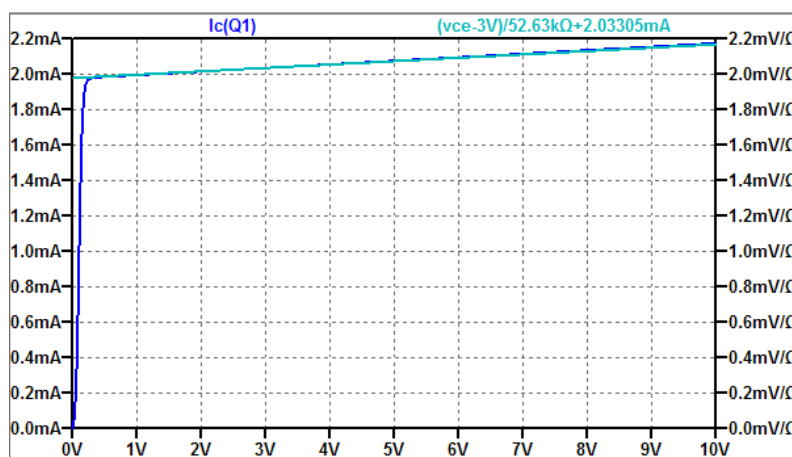
$$V_A = -(3 \text{ V} - r_o i_C(v_{CE} = 3 \text{ V})) = 104 \text{ V}$$

Sada je izlazna otpornost  $r_o$  BJT-a:

$$r_o = (V_A + V_{CE}) / I_C = (104 \text{ V} + 3 \text{ V}) / 2.033 \text{ mA} = 52.63 \text{ k}\Omega,$$

što je jednako prethodno dobijenom rezultatu.

<b>.meas DC Ic1 FIND Ic(Q1) WHEN Vce=2.995V</b>	<b>SPICE error log</b>
<b>.meas DC Ic2 FIND Ic(Q1) WHEN Vce=3V</b>	ic1: ic(q1)=0.00203296 at 2.995
<b>.meas DC Ic3 FIND Ic(Q1) WHEN Vce=3.005V</b>	ic2: ic(q1)=0.00203305 at 3
	ic3: ic(q1)=0.00203315 at 3.005



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:  $2 \mu\text{A}$ ,  $4 \mu\text{A}$ ,  $6 \mu\text{A}$ ,  $8 \mu\text{A}$  i  $10 \mu\text{A}$  za opseg napona kolektor-emitor  $0 < v_{CE} < 10 \text{ V}$ , sa korakom  $1 \text{ mV}$ .

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  $I_C = 1.63 \text{ mA}$ . Slijedi da je DC strujno pojačanje:

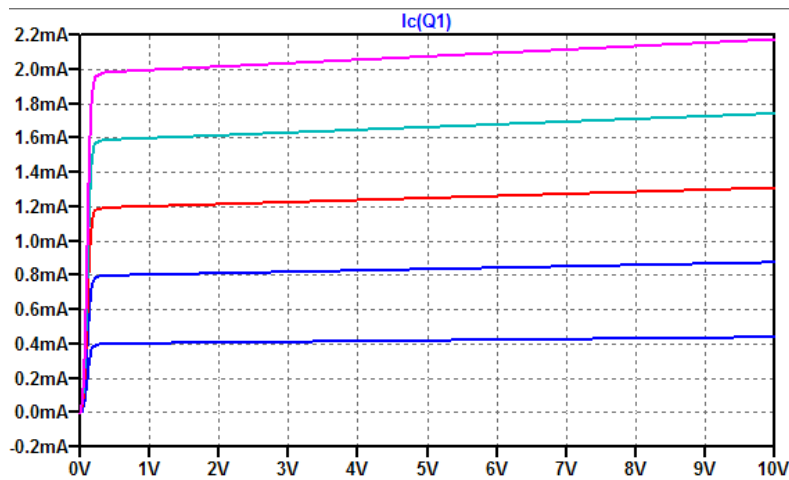
$$h_{FE} = 1.63 \text{ mA} / 8 \mu\text{A} = 203.75.$$

- 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  $\Delta i_B = 0.5 \mu\text{A}$ .

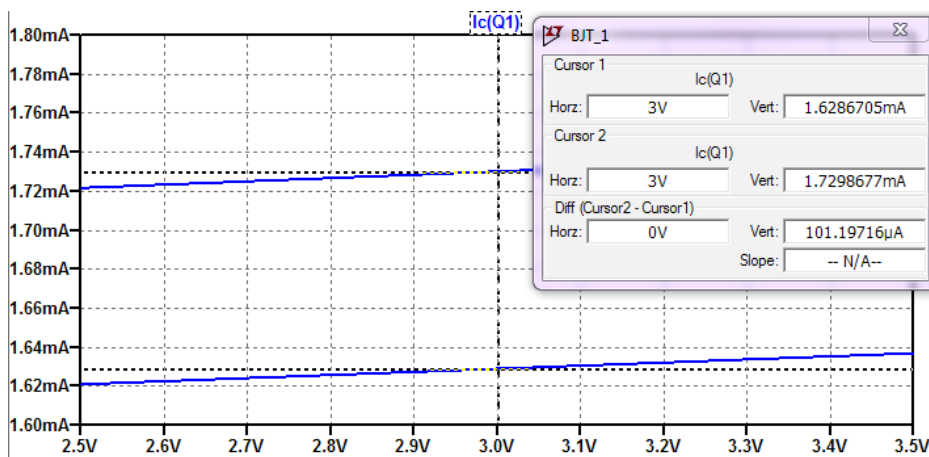
Za napon kolektor-emitor  $V_{CE} = 3 \text{ V}$ , pri promjeni bazne struje za  $\Delta i_B = 0.5 \mu\text{A}$  kolektorska struja će se promijeniti za  $\Delta i_C = 101.2 \mu\text{A}$ , slika 1.5. Slijedi da je AC strujno pojačanje:

$$h_{fe} = \Delta i_C / \Delta i_B = 101.2 \mu\text{A} / 0.5 \mu\text{A} = 202.4.$$





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  $I_B = 100 \mu\text{A}$ . Objasniti.
- Izvršiti simulaciju  $i_C - v_{CE}$  karakteristike BJT-a QN2222 za opseg napona kolektor-emitor  $0 < v_{CE} < 1 \text{ V}$ , sa korakom  $1 \text{ mV}$ , pri čemu bazna struja predstavlja parametar i ima vrijednosti:  $30 \mu\text{A}$ ,  $50 \mu\text{A}$  i  $70 \mu\text{A}$ . Odrediti izlaznu otpornost BJT-a u zasićenju za napon  $V_{CEsat} = 0.1 \text{ V}$ .

Na slici 1.6 su prikazani rezultati simulacija.

Izlazna otpornost se može izračunati kao:

$$r_o = 0.01 \text{ V} / [i_C(v_{CE} = 105 \text{ mV}) - i_C(v_{CE} = 95 \text{ mV})],$$

Slijedi da su odgovarajuće izlazne otpornosti:

$$r_o(i_B = 30 \mu\text{A}) = 18.44 \text{ k}\Omega,$$

$$r_o(i_B = 50 \mu\text{A}) = 11.43 \text{ k}\Omega,$$

$$r_o(i_B = 70 \mu\text{A}) = 8.425 \text{ k}\Omega.$$

#### SPICE error log

Measurement: ic1

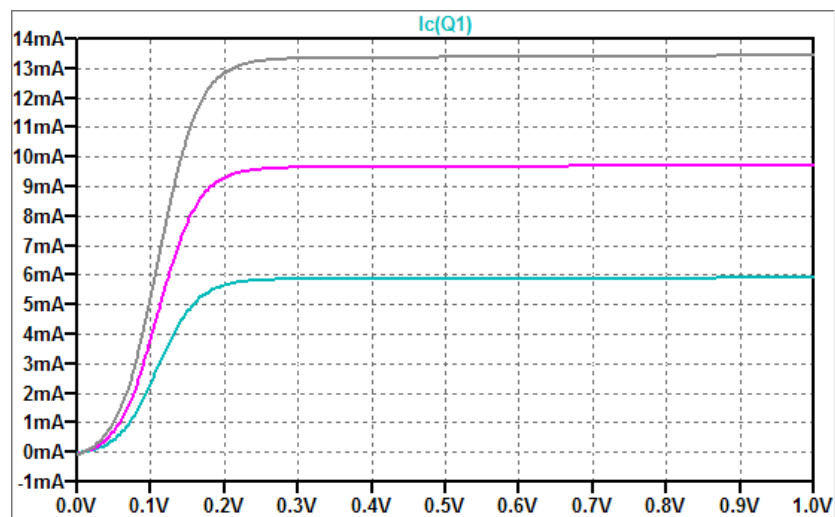
step	ic(q1)	at
1	0.00206774	0.095
2	0.00337165	0.095
3	0.00462177	0.095

Measurement: ic2

step	ic(q1)	at
1	0.00233444	0.1
2	0.00380186	0.1
3	0.00520542	0.1

Measurement: ic3

step	ic(q1)	at
1	0.00260995	0.105
2	0.00424642	0.105
3	0.00580867	0.105



slika 1.6

- Izvršiti simulaciju  $i_C - v_{CE}$  karakteristike BJT-a Q2N2222A za opseg napona kolektor-emitor  $0 < v_{CE} < 10$  V, sa korakom 1 mV, za baznu struju  $50 \mu\text{A}$ , pri čemu temperatura predstavlja parametar i ima vrijednosti:  $0^\circ\text{C}$ ,  $27^\circ\text{C}$  i  $50^\circ\text{C}$ . Odrediti DC strujno pojačanje  $h_{FE}$  BJT-a za napon kolektor-emitor 5 V.

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:

$$h_{FE}(0^\circ\text{C}) = 8.802 \text{ mA} / 50 \mu\text{A} = 176,$$

$$h_{FE}(27^\circ\text{C}) = 10.10 \text{ mA} / 50 \mu\text{A} = 202,$$

$$h_{FE}(50^\circ\text{C}) = 11.25 \text{ mA} / 50 \mu\text{A} = 225.$$

- Izvršiti simulaciju strujno naponske karakteristike BJT-a  $i_C - v_{BE}$ , za napon  $V_{CE} = 3$  V i opseg napona baza-emitor  $0 < v_{BE} < 0.75$  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  $v_{BE} = 650$  mV (od 645 mV do 655 mV), transkonduktansa bi bila:

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

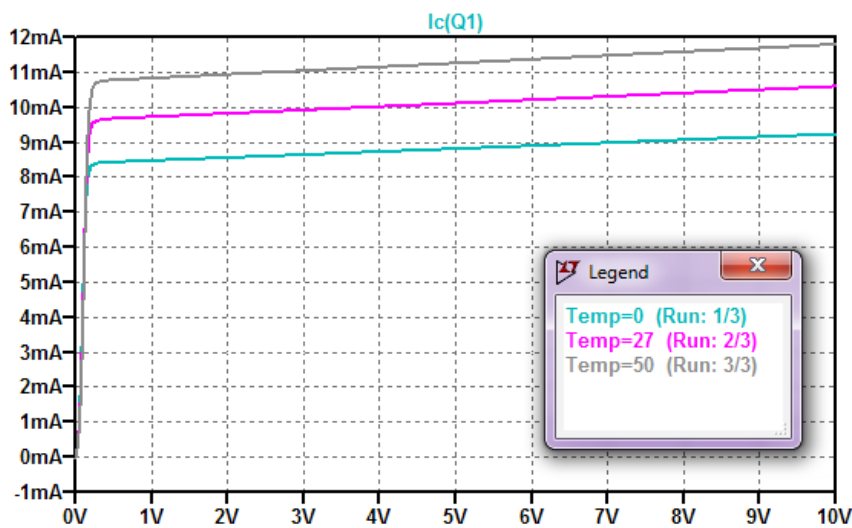
što iznosi približno 31.96 mS.

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

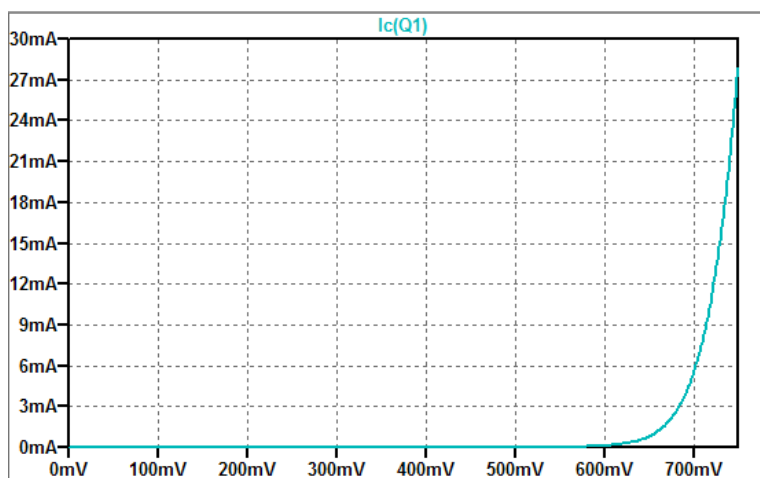
$$t_I(v_{BE}) = g_m \cdot (v_{BE} - 650 \text{ mV}) + i_C(v_{BE} = 650 \text{ mV})$$

SPICE error log

step	ic(q1)	at
1	0.00880202	5
2	0.0101018	5
3	0.0112487	5



slika 1.7

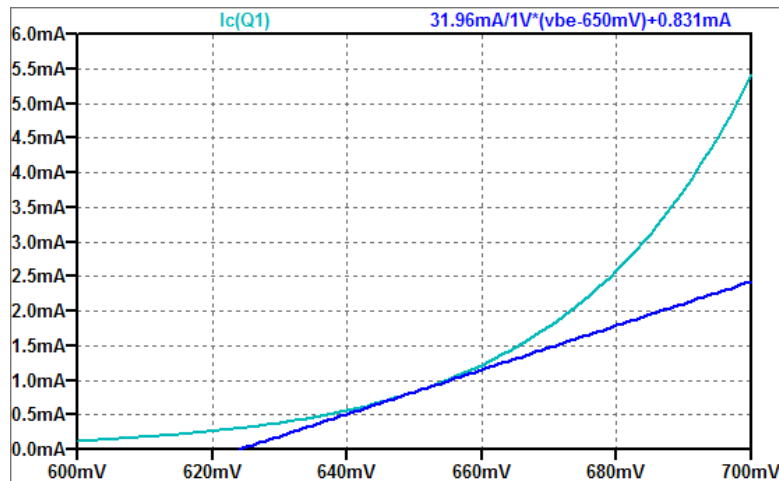


slika 1.8

```
.meas DC Ic1 FIND Ic(Q1) WHEN Vbe=645mV
.meas DC Ic2 FIND Ic(Q1) WHEN Vbe=650mV
.meas DC Ic3 FIND Ic(Q1) WHEN Vbe=655mV
```

SPICE error log

```
ic1: ic(q1)=0.000686051 at 0.645
ic2: ic(q1)=0.000830764 at 0.65
ic3: ic(q1)=0.00100561 at 0.655
```



slika 1.9

Uporediti vrijednost transkonduktanse MOSFET-a ( $k_n=13.75 \text{ mA/V}^2$ ) i BJT-a za približno jednake vrijednosti DC struja drejna, odnosno kolektora.

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

### Literatura

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