

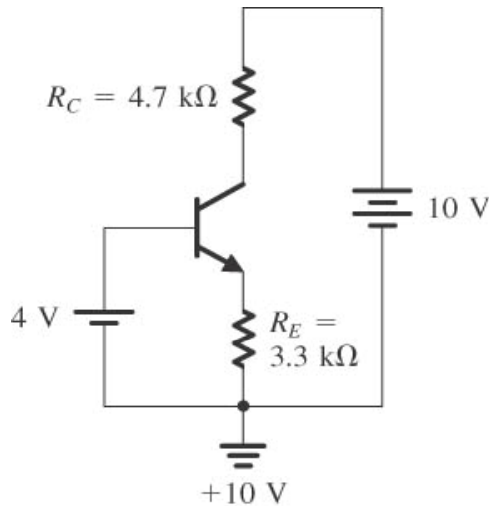
DC λειτουργία - Πόλωση του διπολικού τρανζίστορ

Παραδείγματα DC ανάλυσης

Παράδειγμα 1: Να ευρεθεί το σημείο λειτουργίας Q.

Δίνονται: $\beta=100$ και $V_{BE}=0.7V$.

Υποθέτουμε λειτουργία στην ενεργό περιοχή.



$$V_E = 4 - V_{BE} \cong 4 - 0,7 = 3,3V$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3,3}{3,3} = 1mA$$

$$I_C = \alpha I_E$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1} = \frac{100}{101} \cong 0.99$$

$$I_C = 0,99 \times 1 = 0,99mA$$

$$V_C = 10 - I_C R_C = 10 - 0,99 \times 4,7 \cong +5,3V$$

③ $0,99 \times 1 = 0,99 \text{ mA}$

④ $10 - 0,99 \times 4,7 \cong 5,3 \text{ V}$

⑤ $1,00 - 0,99 = 0,01 \text{ mA}$

① $4 - 0,7 = 3,3 \text{ V}$

② $\frac{3,3}{3,3} = 1 \text{ mA}$

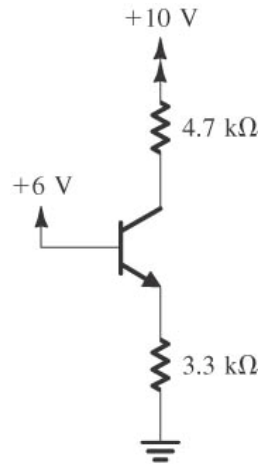
$$V_{BC} = -1.3V$$

Η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι αναστρόφα πολωμένη, επομένως το τρανζίστορ λειτουργεί πράγματι στην ενεργό περιοχή.

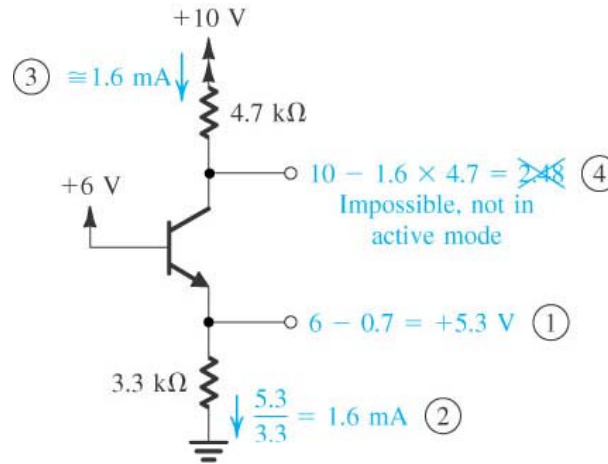
$$I_B = \frac{I_E}{\beta+1} = \frac{1}{101} \cong 0,01mA$$

Παράδειγμα 2: Να ευρεθεί το σημείο λειτουργίας Q για $V_B=6V$.

Υποθέτουμε λειτουργία στην ενεργό περιοχή ($\beta=100$ και $V_{BE}=0.7V$).



(a)



(b)

$$V_E = 6 - V_{BE} \cong 6 - 0,7 = 5,3V$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{5,3}{3,3} = 1,6mA$$

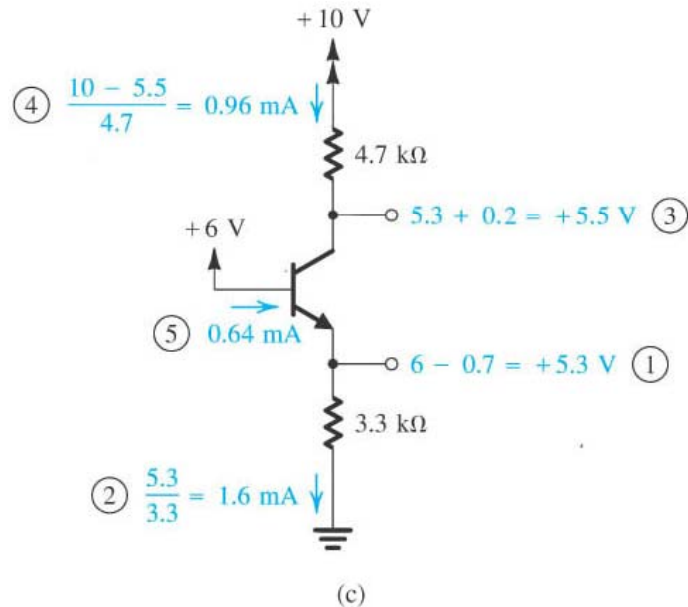
$$I_C = \alpha I_E = 0,99 \times 1,6 \cong 1,6mA$$

$$V_C = 10 - I_C R_C = 10 - 1,6 \times 4,7 \cong +2,48V$$

$$V_{BC} = 6V - 2,48V = 3,52V$$

Η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι ορθά πολωμένη, επομένως η υπόθεση ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή είναι ΛΑΘΟΣ.

Παράδειγμα 2 (συνέχεια) : Να ευρεθεί το σημείο λειτουργίας Q για $V_B=6V$.
Υποθέτουμε λειτουργία στον κόρο.



$$V_E = 6 - V_{BE} \cong 6 - 0,7 = 5,3V$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{5,3}{3,3} = 1,6mA$$

$$V_C = V_E + V_{CEsat} \cong +5,3 + 0,2 = 5,5V$$

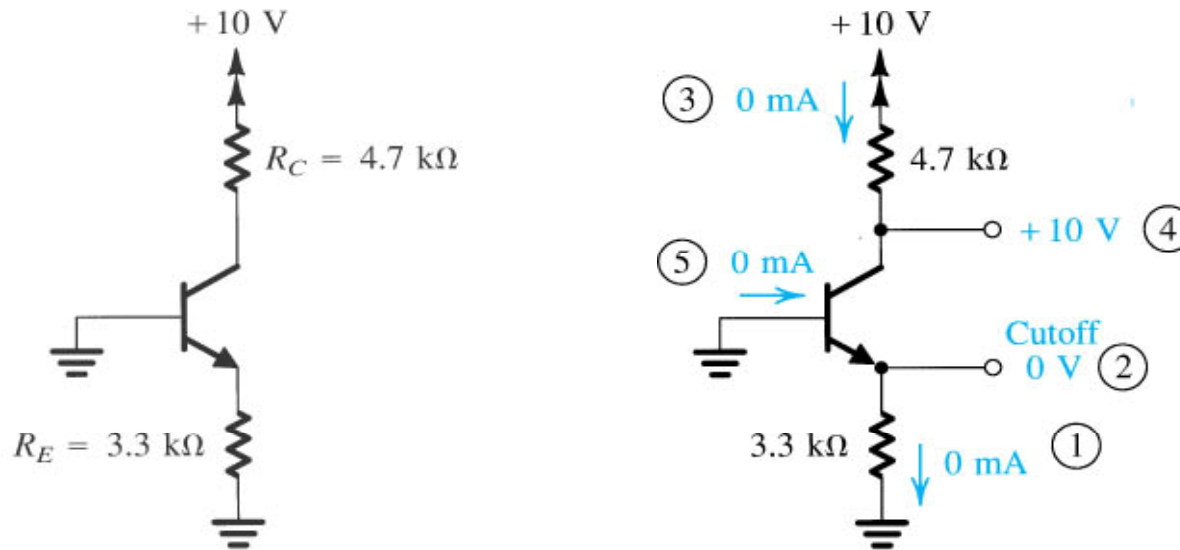
$$I_C = \frac{10 - 5,5}{4,7} = 0,96mA$$

$$I_B = I_E - I_C = 1,6 - 0,96 = 0,64mA$$

$$\beta_{forced} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{0,96}{0,64} = 1,5$$

$\beta \ll 100 \Rightarrow$ Το τρανζίστορ λειτουργεί πράγματι στον κόρο.

Παράδειγμα 3: Να ευρεθεί το σημείο λειτουργίας Q για $V_B=0V$.
Υποθέτουμε λειτουργία στην αποκοπή.



$$i_B = 0, i_E = 0, i_C = 0$$

$$V_C = V_{CC}$$

$$V_{BE} = 0V$$

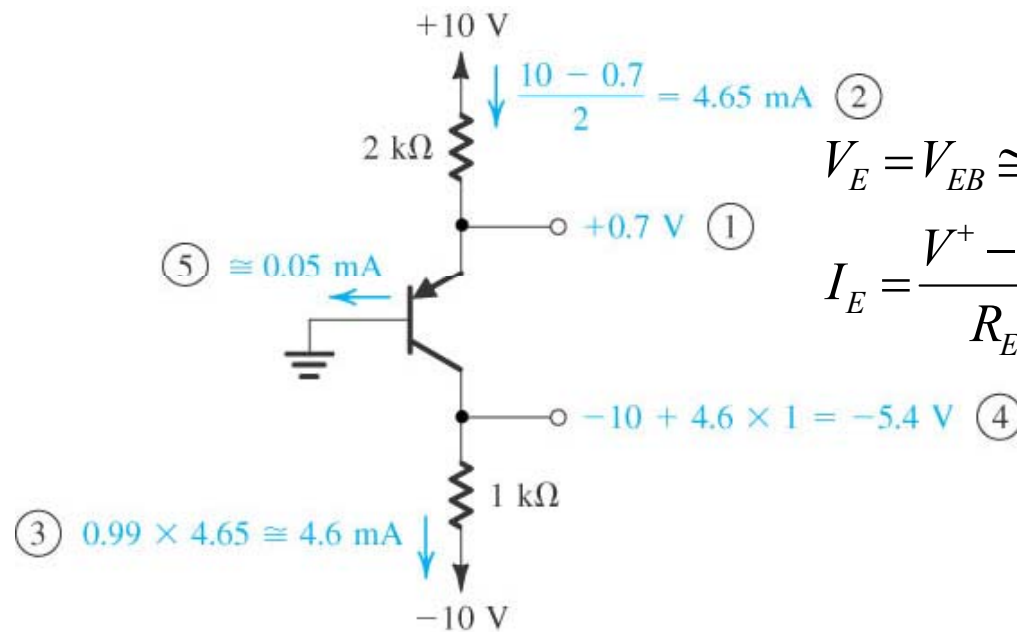
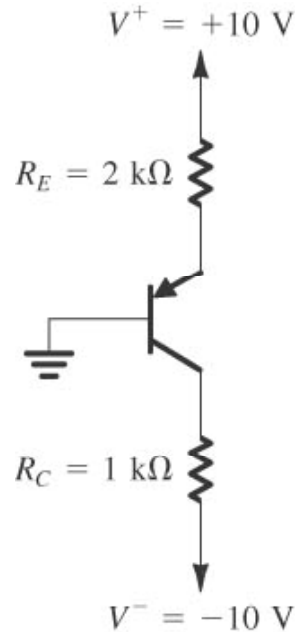
$$V_{BC} = -10V$$

Η επαφή βάσης-εκπομπού είναι ανάστροφα πολωμένη και η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη. Επομένως το τρανζίστορ είναι σε αποκοπή.

Παράδειγμα 4: Να ευρεθεί το σημείο λειτουργίας Q για το τρανζίστορ pnp.

Δίνονται: $\beta=100$ και $V_{EB}=0.7V$.

Υποθέτουμε λειτουργία στην ενεργό περιοχή.



$$V_E = V_{EB} \cong 0,7V$$

$$I_E = \frac{V^+ - V_E}{R_E} = \frac{10 - 0,7}{2} = 4,65mA$$

$$I_C = \alpha I_E \text{ και } \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = 0,99$$

$$I_C = 0,99 \times 4,65 = 4,6mA$$

$$V_C = V^- + I_C R_C = -10 + 4,6 \times 1 = -5,4V$$

$$V_{BC} = 5.4V$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = \frac{4,65}{101} \cong 0,05mA$$

Σύνοψη της μεθοδολογίας της DC ανάλυσης

1. Υποθέτουμε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή όπου $V_{BE}=V_{BE(ON)}$, $\beta \gg 1$, $I_B > 0$ και $I_C = \beta I_B$.

2. Αναλύουμε το κύκλωμα με βάση αυτή την υπόθεση.

3. Εκτιμούμε τα αποτελέσματα:

Αν η επαφή βάσης-εκπομπού είναι ορθά πολωμένη και η επαφή βάσης-συλλέκτη ανάστροφα τότε η αρχική υπόθεση είναι αληθής.

Αν όμως

- $I_B < 0$, τότε το τρανζίστορ είναι μάλλον στην αποκοπή

ή αν

- $V_{CE} < V_{CE(sat)}$, τότε είναι μάλλον στον κόρο.

4. Αν η αρχική υπόθεση αποδειχθεί λάθος, πρέπει να αναλύσουμε το κύκλωμα κάνοντας νέα υπόθεση και να επαναλάβουμε το βήμα 3.

Το διπολικό τρανζίστορ ως ενισχυτής

Προσδιορισμός της DC χαρακτηριστικής μεταφοράς του κυκλώματος.

Για $v_I \leq 0.7V$ το τρανζίστορ είναι σε αποκοπή και $v_O = 5V$.

Για $v_I > 0.7V$ το τρανζίστορ μπαίνει στην ενεργό περιοχή οπότε:

$$i_B = \frac{v_I - V_{BE}}{R_B}$$

$$v_O = V^+ - i_C R_C = V^+ - \beta i_B R_C$$

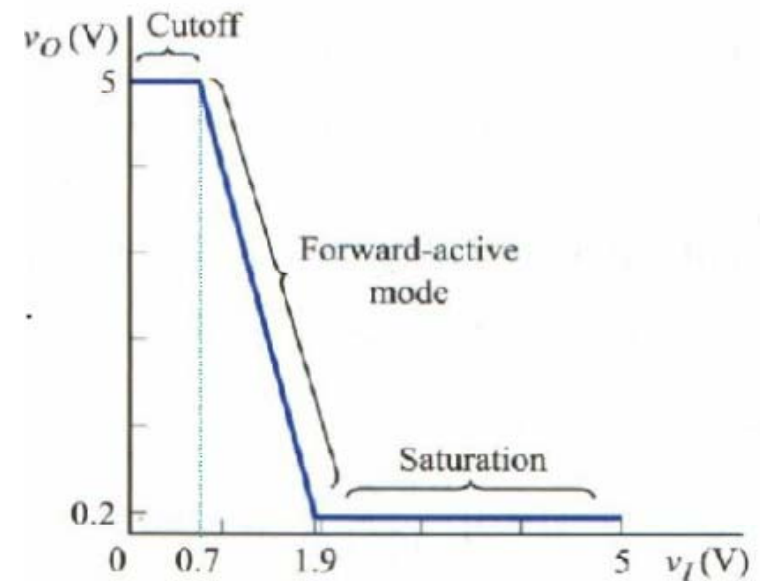
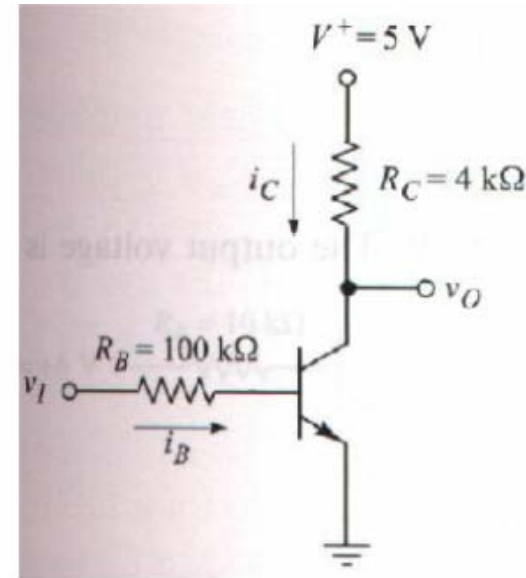
$$v_O = V^+ - \beta \frac{v_I - V_{BE}}{R_B} R_C$$

$$v_O = 5 - (100) \left[\frac{v_I - 0.7}{100k\Omega} \right] 4k\Omega$$

Αυτή η εξίσωση ισχύει για $v_I > 0.7V$ και $v_O \geq V_{CE(sat)} = 0.2V$

Η τάση εισόδου για $v_O = 0.2V$ υπολογίζεται $v_I = 1.9V$.

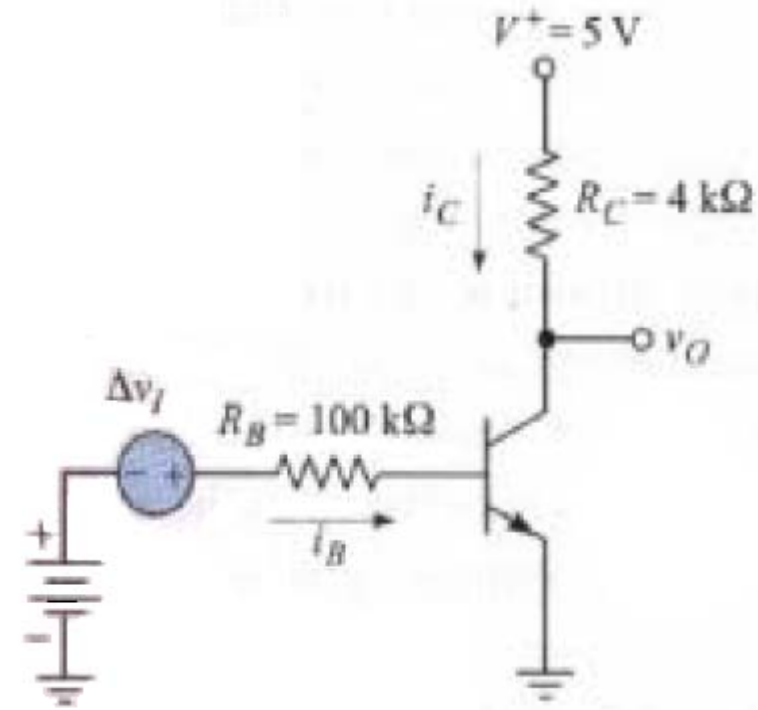
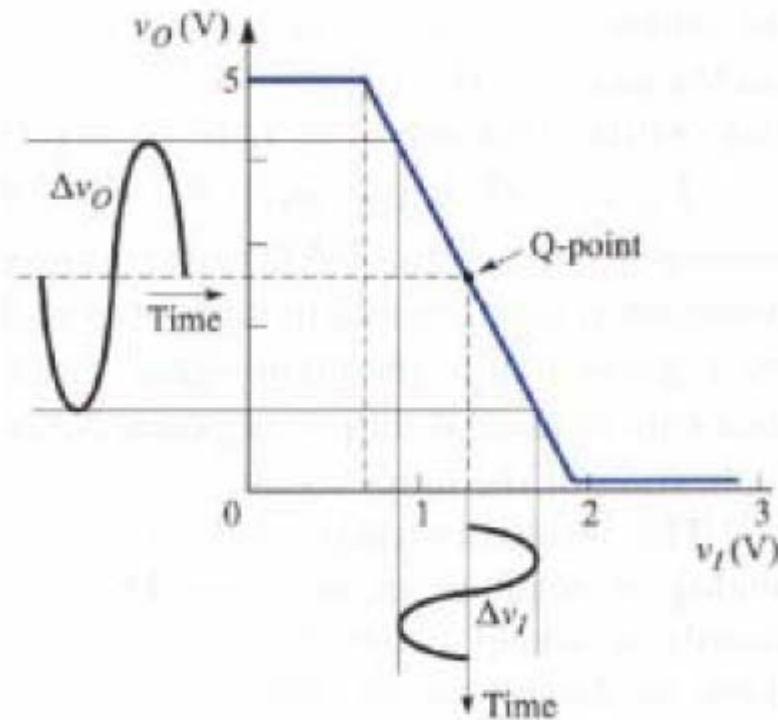
Για $v_I > 1.9V$, το τρανζίστορ μπαίνει στον κόρο.



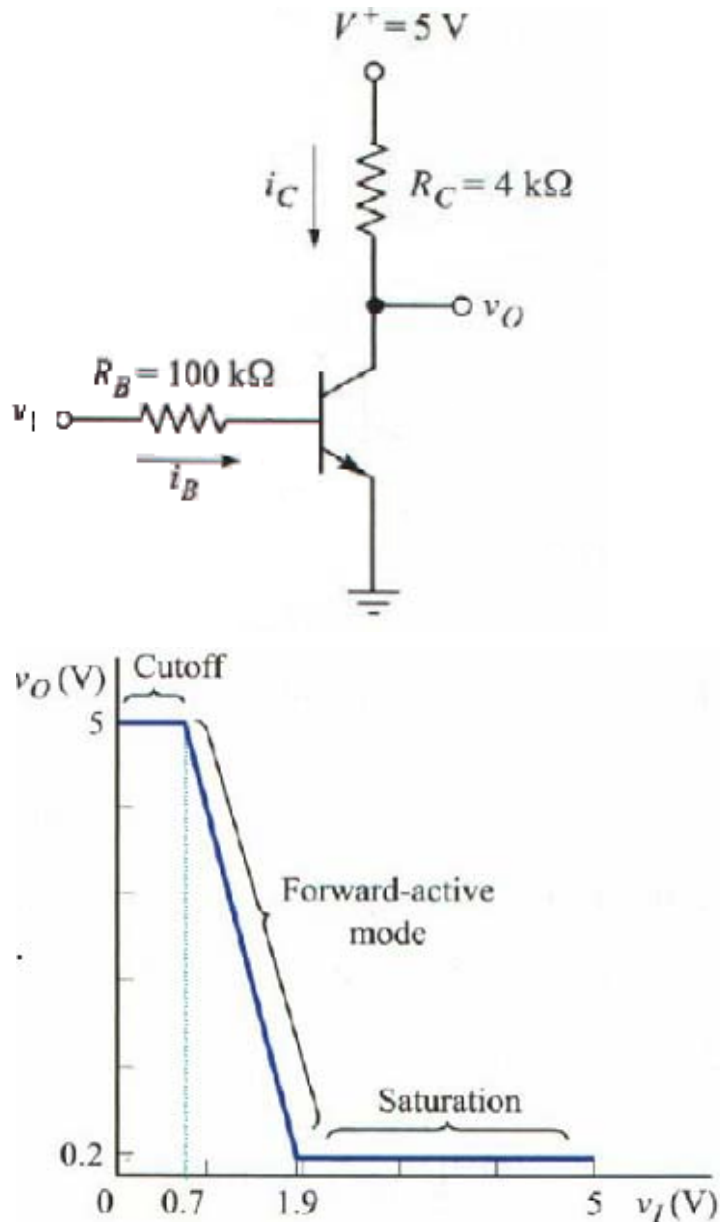
Ο ρόλος της πόλωσης στη λειτουργία του κυκλώματος.

Για να έχουμε έναν γραμμικό ενισχυτή πρέπει:

- Να τοποθετήσουμε το σημείο ηρεμίας Q κοντά στο μέσο της ενεργού περιοχής.
- Να προσδιορίσουμε τα όρια λειτουργίας του τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή.
- Να συνδέσουμε το κατάλληλο μεταβλητό σήμα στη βάση του τρανζίστορ.



Το διπολικό τρανζίστορ ως διακόπτης



Στην αποκοπή:

$$v_I = 0 \Rightarrow v_O = V_{CE\text{αποκοπή}} = V_{CC}$$

Στον κόρο:

$$v_I \gg 0.7V \Rightarrow v_O = V_{CE\text{κόρου}}$$

$$\text{και } I_{C\text{κόρου}} = \frac{V_{CC} - V_{CE\text{κόρου}}}{R_C}$$

Έχει επιλεγεί να λειτουργούν τα ψηφιακά κυκλώματα στον κόρο και στην αποκοπή διότι:

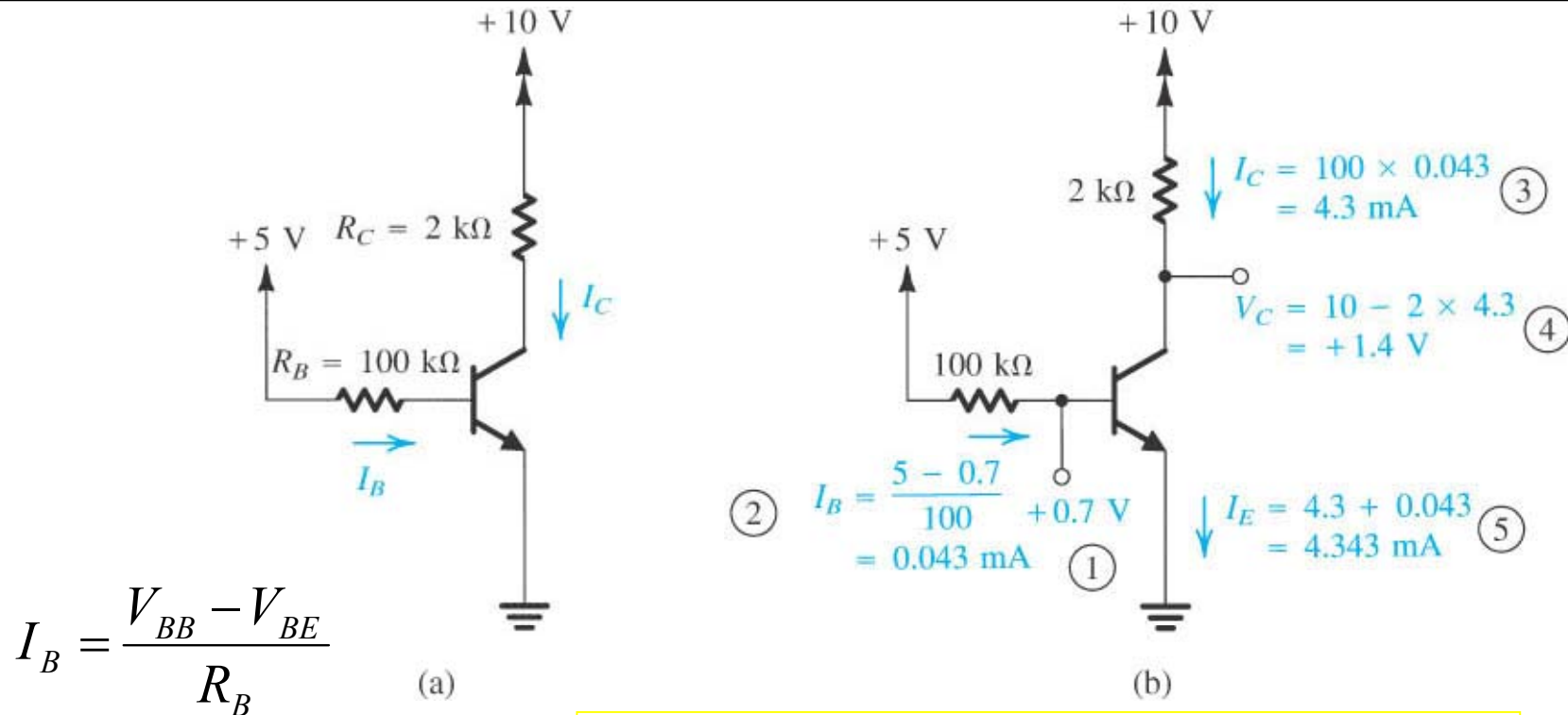
- α) Είναι δύο στάθμες ανεξάρτητες από το β .
- β) Η κατανάλωση ισχύος σ' αυτές είναι μικρότερη.

Κυκλώματα πόλωσης του διπολικού τρανζίστορ.

Το κύκλωμα πόλωσης παρέχει το DC ρεύμα εκπομπού που αντιστοιχεί στο επιθυμητό σημείο ηρεμίας Q. Το ρεύμα αυτό πρέπει να είναι: καθορισμένο, προβλέψιμο και αναίσθητο στις μεταβολές της θερμοκρασίας και στις μεταβολές του β .

Παραδείγματα κακής σχεδίασης κυκλώματος πόλωσης.

Παράδειγμα 1: Με ρύθμιση του I_B .



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

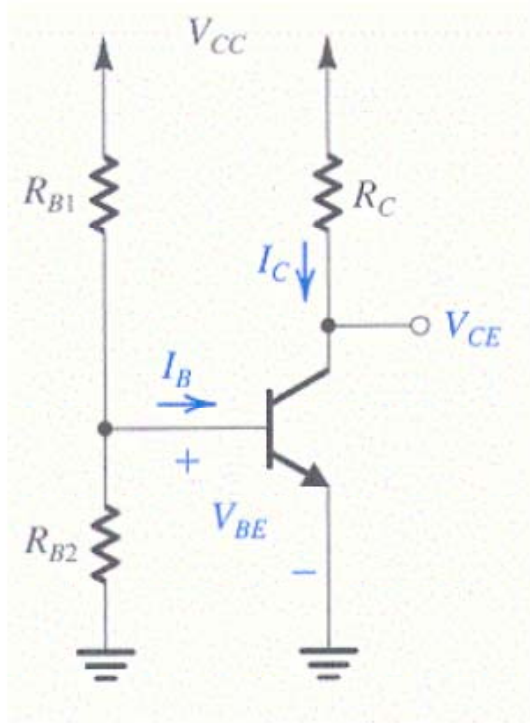
$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

Τα ρεύματα συλλέκτη και εκπομπού εξαρτώνται άμεσα από το β η τιμή του οποίου δεν ελέγχεται εύκολα.

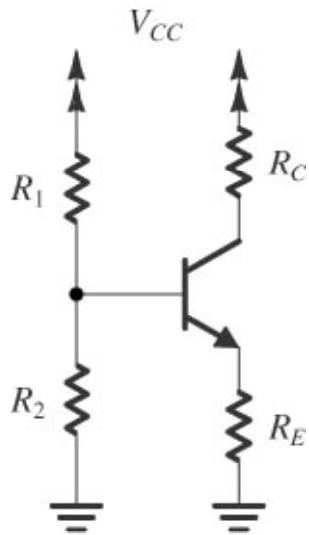
Αν το β γίνει κατά 10% μεγαλύτερο, το τρανζίστορ μπαίνει στον κόρο.

Παράδειγμα 2: Με ρύθμιση του V_{BE} .

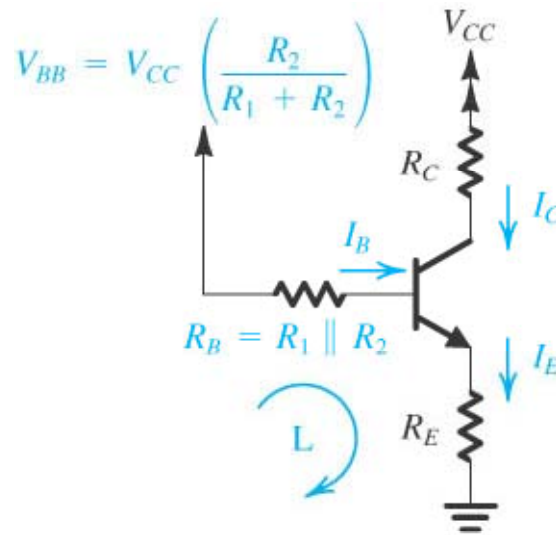


Το ρεύμα συλλέκτη είναι εκθετική συνάρτηση του V_{BE} και επομένως του V_{CC} .

1. Το κλασσικό κύκλωμα πόλωσης με τέσσερις αντιστάσεις.



(a)



(b)

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \Rightarrow$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$

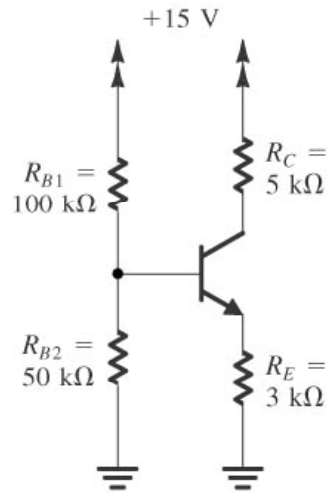
Για να κάνουμε το ρεύμα εκπομπού σταθερό, ανεξάρτητο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και από το β, επιλέγουμε:

Η σταθεροποίηση του ρεύματος πόλωσης οφείλεται στην R_E , η οποία δημιουργεί αρνητική ανάδραση.

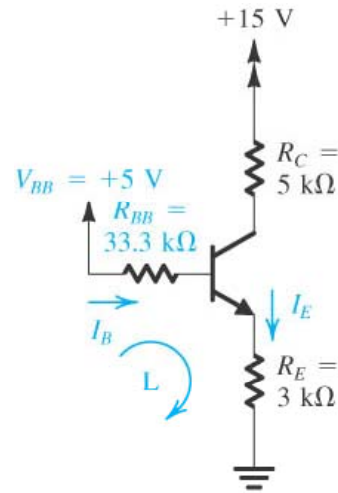
$$V_{BB} \gg V_{BE}$$

$$R_E \gg \frac{R_B}{\beta + 1}$$

Παράδειγμα: Να αναλυθεί το κύκλωμα αν $\beta=100$ και $V_{BE}=0.7V$.
Υποθέτουμε λειτουργία στην ενεργό περιοχή.



(a)



(b)

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{50}{100 + 50} 15V = 5V$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \cdot 50}{100 + 50} k\Omega = 33.3 k\Omega$$

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \Rightarrow$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}} = \frac{5 - 0.7}{3 + \frac{33.3}{101}} mA = 1.29 mA$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = \frac{1.29}{101} mA = 0.0128 mA$$

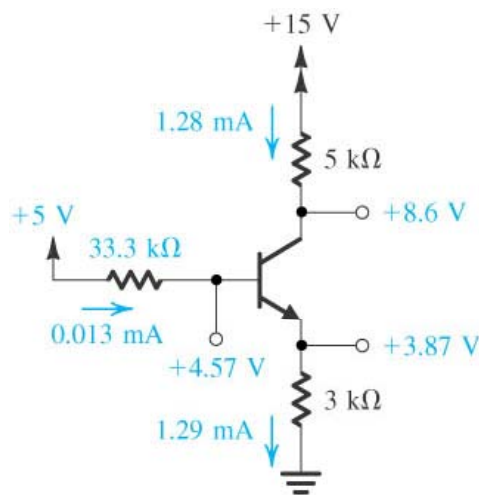
$$V_B = V_{BE} + I_E R_E = 0.7 + 1.29 \cdot 3 = 4.57V$$

$$I_C = \alpha I_E = 0.99 \cdot 1.29 = 1.28 mA$$

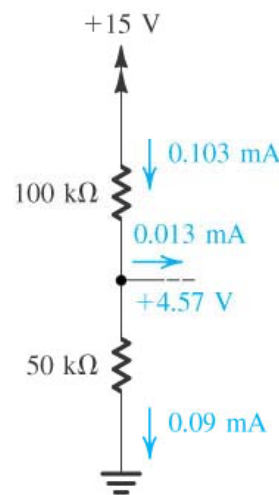
$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 15 - 1.28 \cdot 5 = 8.6V$$

$$I_1 = \frac{V_{CC} - V_B}{R_1} = \frac{15 - 4.57}{100} mA = 0.1043 mA$$

$$I_2 = \frac{V_B}{R_2} = \frac{4.57}{50} mA = 0.0914 mA$$



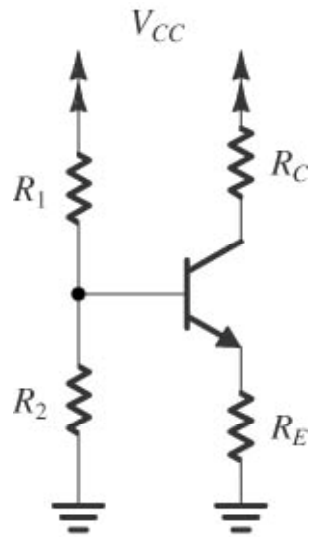
(c)



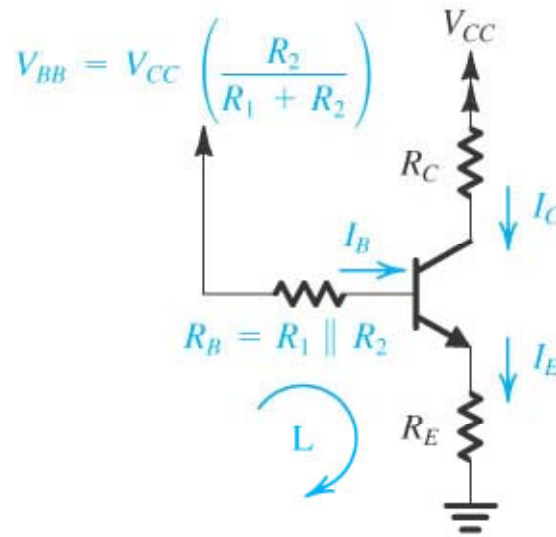
(d)

Πρόσθετοι στόχοι της σχεδίασης δικτυώματος πόλωσης: Χαμηλή κατανάλωση ισχύος και μεγάλο περιθώριο μεταβολής της τάσης εξόδου.

Παράδειγμα συμβιβασμών που ικανοποιούν αυτούς τους στόχους:



(a)



(b)

$$V_{BB} \approx V_B \approx \frac{1}{3} V_{CC}$$

$$V_{CB} \approx \frac{1}{3} V_{CC}$$

Για μεγάλο περιθώριο πριν την είσοδο στον κόρο.

$$I_C R_C \approx \frac{1}{3} V_{CC}$$

Για μεγάλο περιθώριο μεταβολής σήματος.

$$I_1 \approx I_2 \approx 0.1 I_E$$

Για μέτρια κατανάλωση.

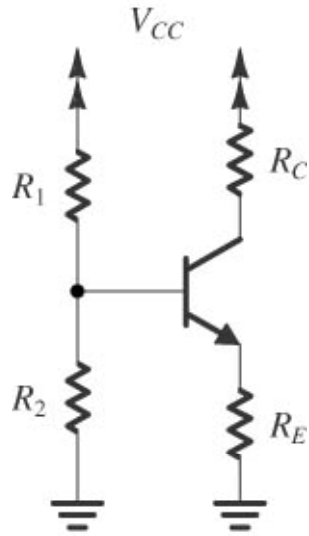
$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

$$V_{BB} \gg V_{BE}$$

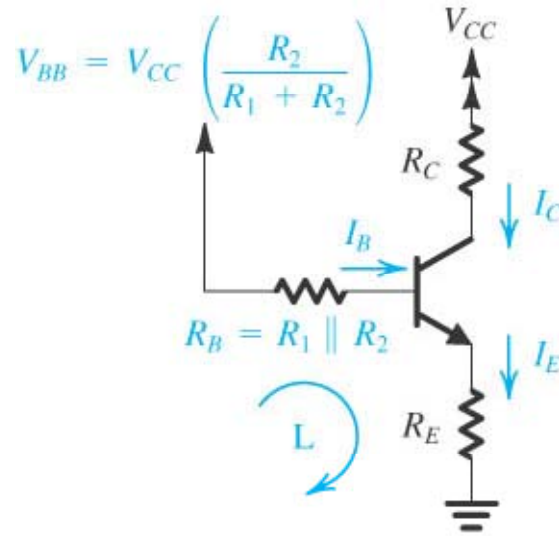
$$R_E \gg \frac{R_B}{\beta + 1}$$

Παράδειγμα: Να σχεδιαστεί το δικτύωμα πόλωσης έτσι ώστε να πάρουμε $I_E=1\text{mA}$ με τάση τροφοδοσίας $V_{CC}=12\text{V}$.

Υποθέτουμε $\beta=100$, $V_{BE}=0.7\text{V}$ και λειτουργία στην ενεργό περιοχή.



(a)



(b)

$$V_{BB} \approx V_B \approx \frac{1}{3}V_{CC} = 4\text{V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 3.3\text{V}$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} = 3.3\text{k}\Omega$$

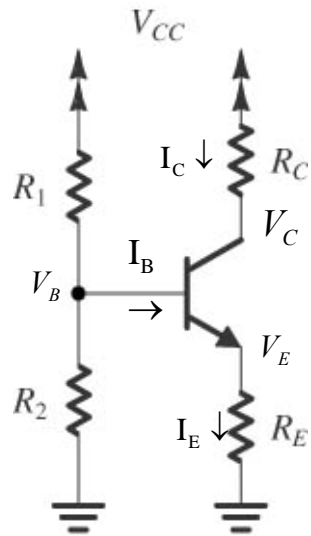
$$\left. \begin{aligned} I_1 = I_2 = 0.1I_E \Rightarrow R_1 + R_2 &= \frac{V_{CC}}{0.1I_E} = 120\text{k}\Omega \\ V_{BB} = \frac{1}{3}V_{CC} \Rightarrow V_{BB} &= \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_{CC} \approx 4\text{V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_1 = 80\text{k}\Omega, R_2 = 40\text{k}\Omega$$

$$I_C R_C = \frac{1}{3}V_{CC} \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC}/3}{I_C} = \frac{V_{CC}/3}{\alpha I_E} = \frac{4}{0.99 \cdot 1} = 4.04\text{k}\Omega \approx 4\text{k}\Omega$$

Ακριβέστερος υπολογισμός του I_E :
για μη μηδενικό I_B

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{(\beta+1)}} = \frac{3.3}{3.3 + \frac{26.66}{101}} = 0.93\text{mA}$$

Άσκηση 1: Να σχεδιαστεί το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος για $V_{CC}=9V$ ώστε να έχουμε πτώση τάσης πάνω στις R_E και R_C ίση με το $1/3$ της V_{CC} , $I_E=0.5mA$, ρεύμα στο διαιρέτη τάσης ίσο με $0.2I_E$ και $\beta=100$.



(a)

$$V_E = \frac{1}{3}V_{CC} = I_E R_E \Rightarrow R_E = \frac{V_{CC}}{3I_E} = \frac{9}{3 \cdot 0.5mA} = 6k\Omega$$

$$I_C = \alpha I_E = \frac{\beta}{1+\beta} I_E = 0.99 \cdot 0.5mA = 0.495mA, \quad I_B = 0.005mA$$

$$V_{CC} - V_C = \frac{1}{3}V_{CC} = I_C R_C \Rightarrow R_C = \frac{V_{CC}}{3I_C} = \frac{9}{3 \cdot 0.495mA} = 6,06k\Omega$$

$$V_B = V_{BE} + V_E = 0.7 + \frac{1}{3}V_{CC} = 3.7V$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - \frac{1}{3}V_{CC} = 6V$$

$$\left. \begin{array}{l} V_B = V_{BE} + V_E = 0.7 + \frac{1}{3}V_{CC} = 3.7V \\ V_C = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - \frac{1}{3}V_{CC} = 6V \end{array} \right\} \Rightarrow V_{CB} = (6 - 3.7)V \Rightarrow \text{Πολωμένο στην ενεργό περιοχή}$$

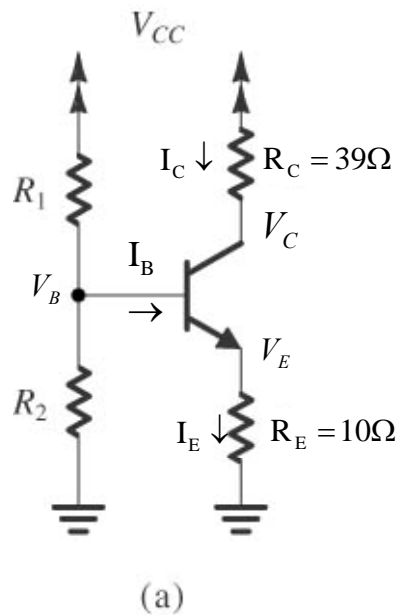
$$V_{CC} = I_1(R_1 + R_2) \Rightarrow R_1 + R_2 = \frac{V_{CC}}{0.2I_E} = 90k\Omega$$

$$V_{BB} \approx V_B = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{V_{CC}}{V_B} = \frac{9}{3.7} = 2.43$$

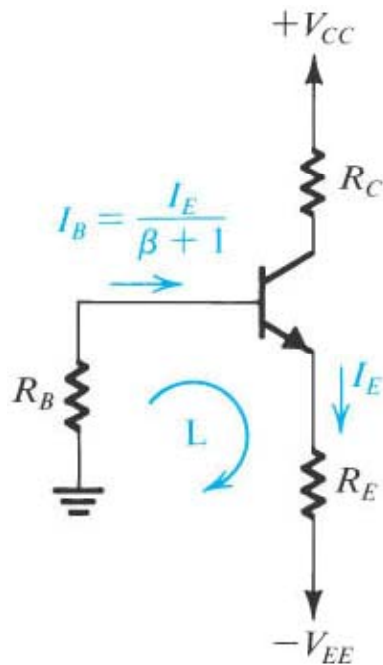
$$\Rightarrow R_2 = \frac{R_1 + R_2}{2.43} = \frac{90k\Omega}{2.43} = 37k\Omega \Rightarrow$$

$$R_1 = 90k\Omega - R_2 = 90k\Omega - 37k\Omega = 53k\Omega$$

Άσκηση 2: Αν $V_{CC}=12V$, να υπολογιστεί το σημείο ηρεμίας του κυκλώματος όταν: α) $R_1=150\Omega$ και $R_2=33\Omega$ και β) $R_1=150k\Omega$ και $R_2=33k\Omega$. Ποιο πρόβλημα παρουσιάζει το κύκλωμα σε καθεμία από τις δύο αυτές περιπτώσεις;
Δίνεται ότι στην ενεργό περιοχή έχουμε $V_{BE}=0.7V$ και $\beta=100$.



2. Πόλωση με Χρήση Δύο Τροφοδοτικών



$$-V_{EE} + I_E R_E + V_{BE} + I_B R_B = 0 \Rightarrow$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{(\beta + 1)}}$$

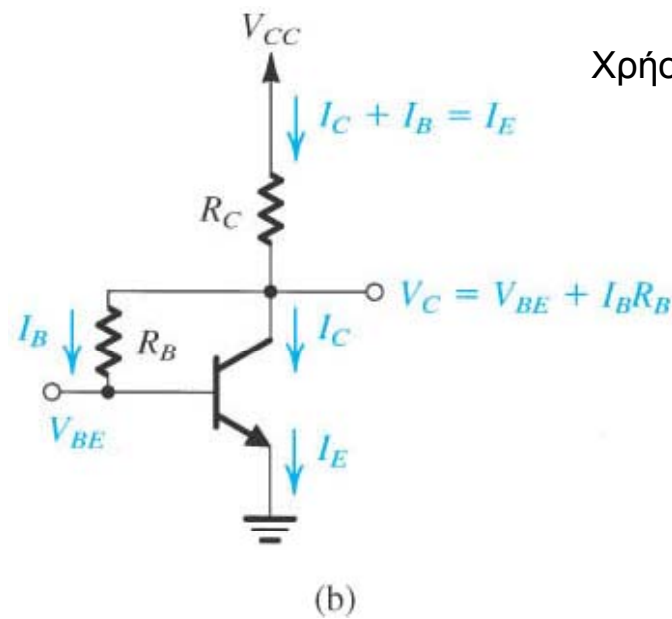
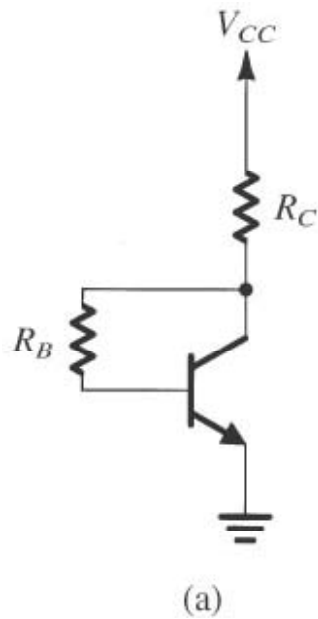
Για να κάνουμε το ρεύμα εκπομπού ανεξάρτητο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και το β , επιλέγουμε:

Η R_B μπορεί να παραλειφθεί αν το σήμα δεν εφαρμόζεται στη βάση.

$$V_{EE} \gg V_{BE}$$

$$R_E \gg \frac{R_B}{\beta + 1}$$

3. Πόλωση από τον Συλλέκτη



Χρήσιμο για κυκλώματα κοινού εκπομπού.

$$V_{CC} = I_E R_C + I_B R_B + V_{BE} = I_E R_C + \frac{I_E}{\beta + 1} R_B + V_{BE} \Rightarrow$$

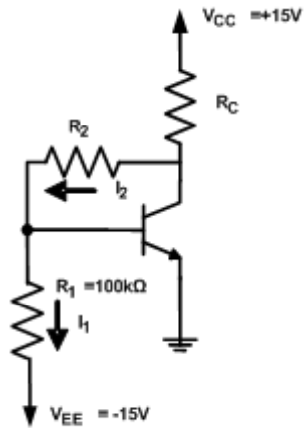
$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{(\beta + 1)}}$$

$$R_C \gg \frac{R_B}{\beta + 1}$$

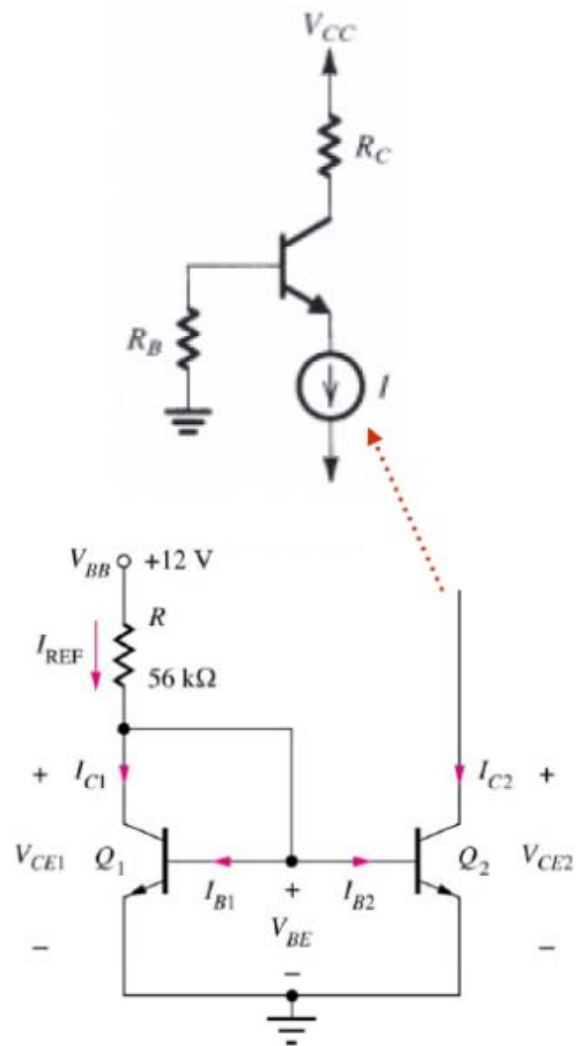
$$V_{CB} = I_B R_B = I_E \frac{R_B}{\beta + 1}$$

Η σταθερότητα πόλωσης επιτυγχάνεται με την αρνητική ανάδραση που δίνει η αντίσταση R_B .

Άσκηση: Για το κύκλωμα του σχήματος, να υπολογιστούν οι τιμές των αντιστάσεων R_2 και R_C , αν απαιτείται να έχουμε $V_{CE}=5V$ και $I_C=2mA$ στο σημείο λειτουργίας Q. Δίνονται: $V_{BE}=0,7V$ και $\beta=100$.



4. Πόλωση με πηγή ρεύματος



$$I_{C2} = I_{REF}$$

$$I_{REF} = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R}$$

Το ρεύμα πόλωσης είναι ανεξάρτητο από την R_B και από το β .