



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Ηλεκτρονική

Ενότητα 5:
DC λειτουργία – Πόλωση του διπολικού τρανζίστορ

Αγγελική Αραπογιάννη
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Περιεχόμενα ενότητας

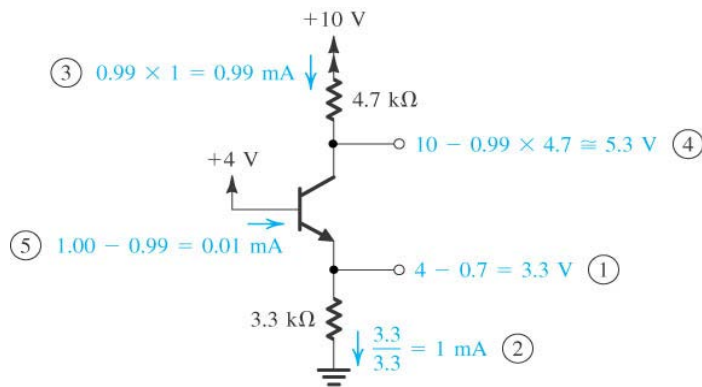
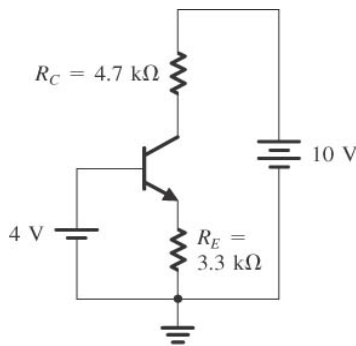
- Μεθοδολογία DC ανάλυσης των κυκλωμάτων με διπολικά τρανζίστορ και προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας - ηρεμίας
- Το διπολικό τρανζίστορ ως ενισχυτής και ως διακόπτης
- Κυκλώματα πόλωσης του διπολικού τρανζίστορ: πόλωση με τέσσερις αντιστάσεις, πόλωση με χρήση δύο τροφοδοτικών, πόλωση από τον συλλέκτη, πόλωση με πηγή ρεύματος

Παράδειγμα 1 DC ανάλυσης

Να ευρεθεί το σημείο λειτουργίας Q.

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

Υποθέτουμε λειτουργία στην ενεργό περιοχή.



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

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

$$I_C = a I_E$$

$$a = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{100}{101} \cong 0,99$$

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

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

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

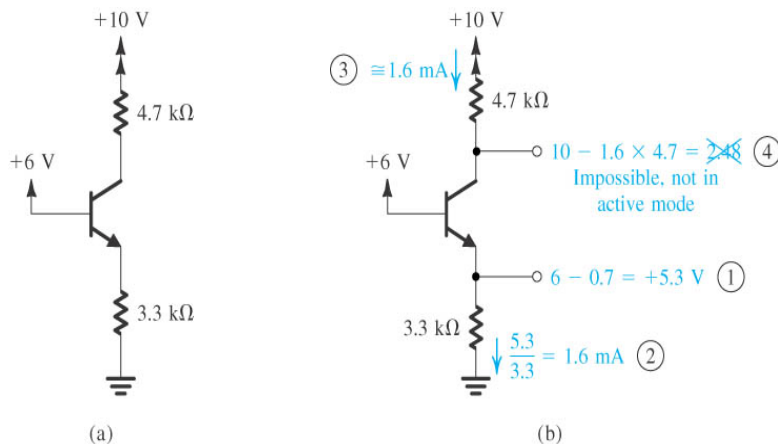
$$V_{BC} = -1,3V$$

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

Παράδειγμα 2 DC ανάλυσης (1/2)

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

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



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

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

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

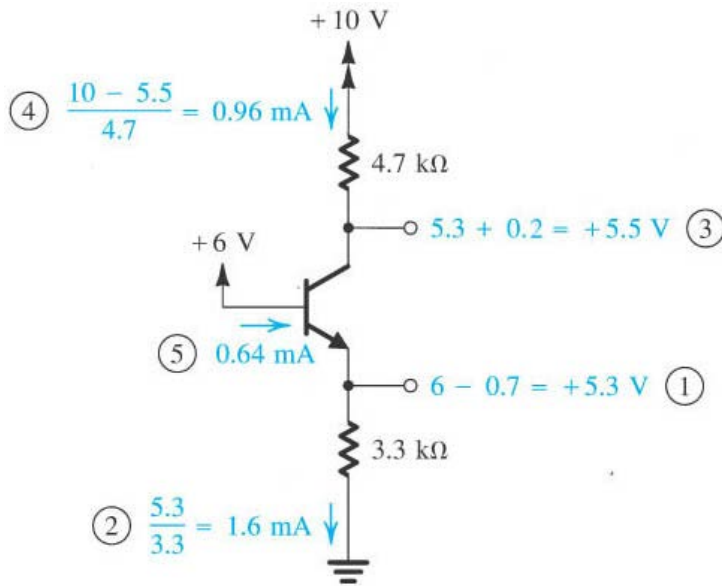
$$V_C = 10 - I_C R_C = 10 - 1,6 \times 4,7 \cong +2,48V$$

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

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

Παράδειγμα 2 DC ανάλυσης (2/2)

Να ευρεθεί το σημείο λειτουργίας Q για $V_B = 6V$. Υποθέτουμε λειτουργία στον κόρο.



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

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

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

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

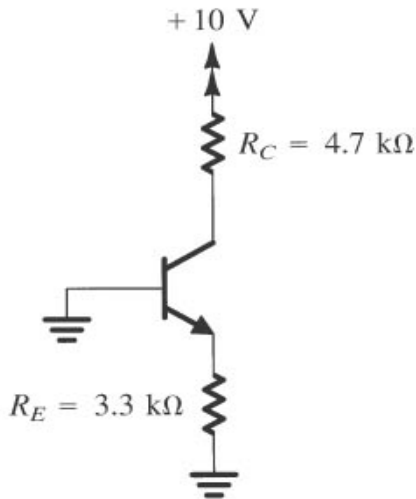
$$I_C = \frac{10 - 5,5}{4,7} = 0,96mA$$

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

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

Παράδειγμα 3 DC ανάλυσης

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

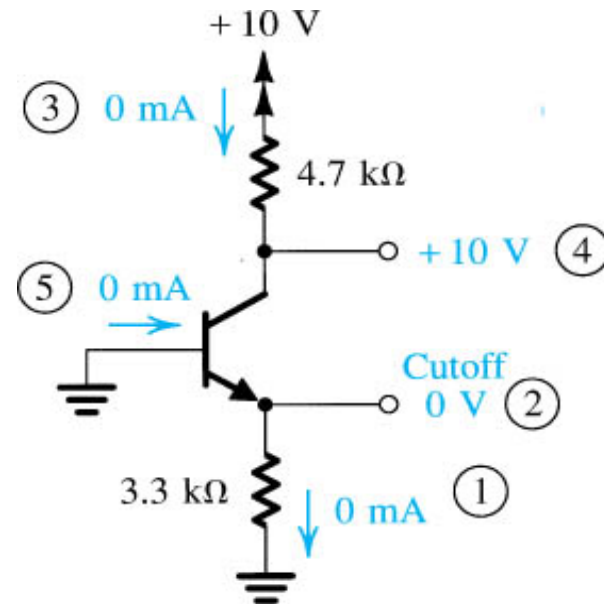


$$i_B = 0, i_E = 0, i_C = 0$$

$$V_C = V_{CC}$$

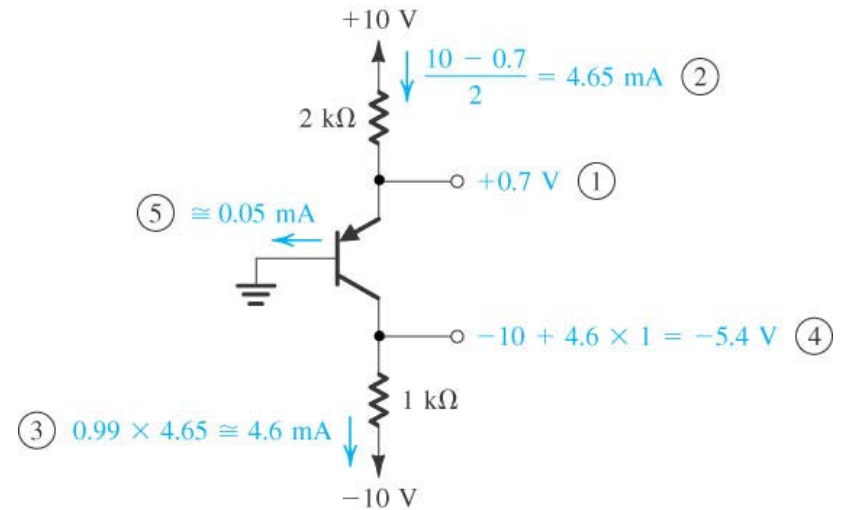
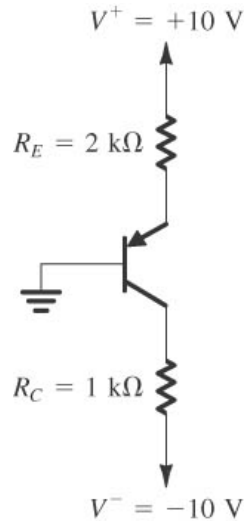
$$V_{BE} = 0V$$

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



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

Παράδειγμα 4 DC ανάλυσης



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

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

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

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

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

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

$$V_{BC} = 5.4\text{ V}$$

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.

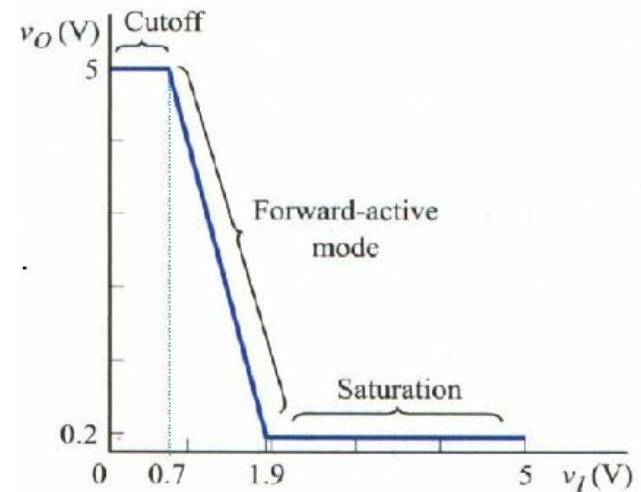
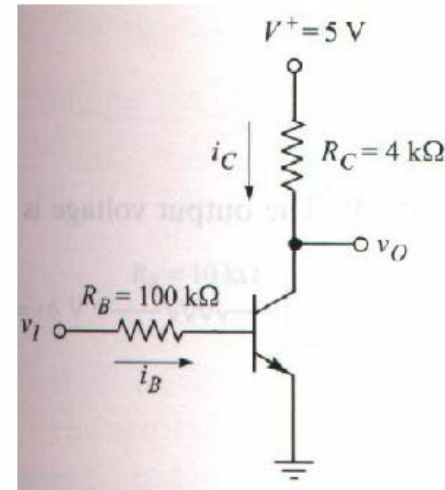
Αν όμως

- $I_B < 0$, 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 (1/2)

Προσδιορισμός της DC
χαρακτηριστικής μεταφοράς του
κυκλώματος.

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



Το διπολικό τρανζίστορ ως ενισχυτής (2/2)

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 $v_O \geq V_{CE}(sat) = 0.2V$

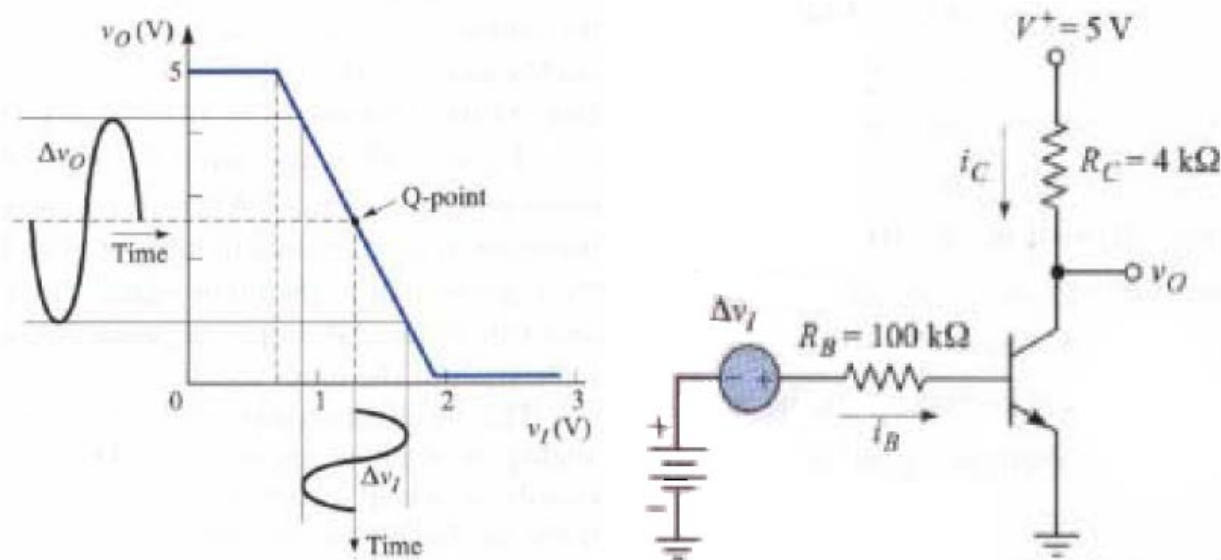
Η τάση εισόδου για $v_O = 0.2V$ υπολογίζεται $v_I = 1.9V$.

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

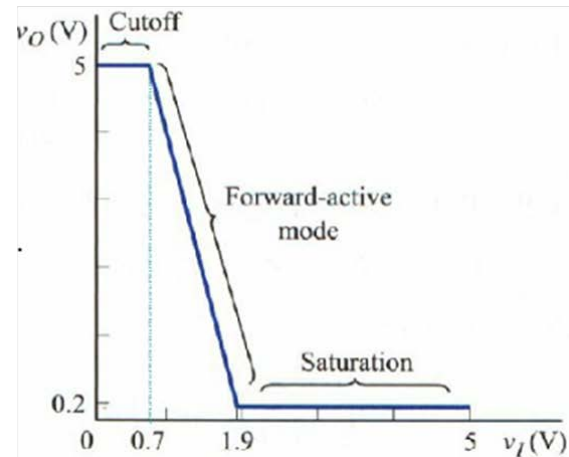
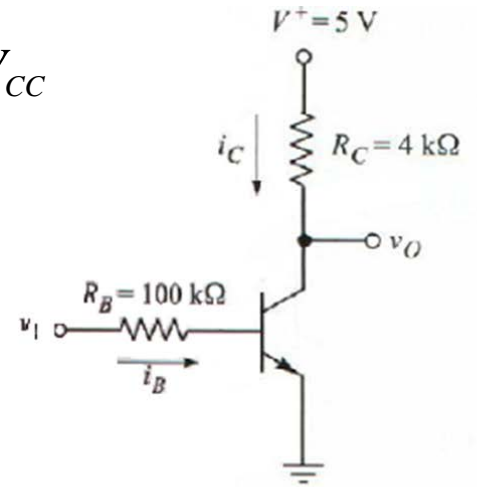
Στην αποκοπή: $v_I = 0 \Rightarrow v_O = V_{CE\text{αποκοπής}} = V_{CC}$

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.(1/3)

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 .

Κυκλώματα πόλωσης του διπολικού τρανζίστορ. (2/3)

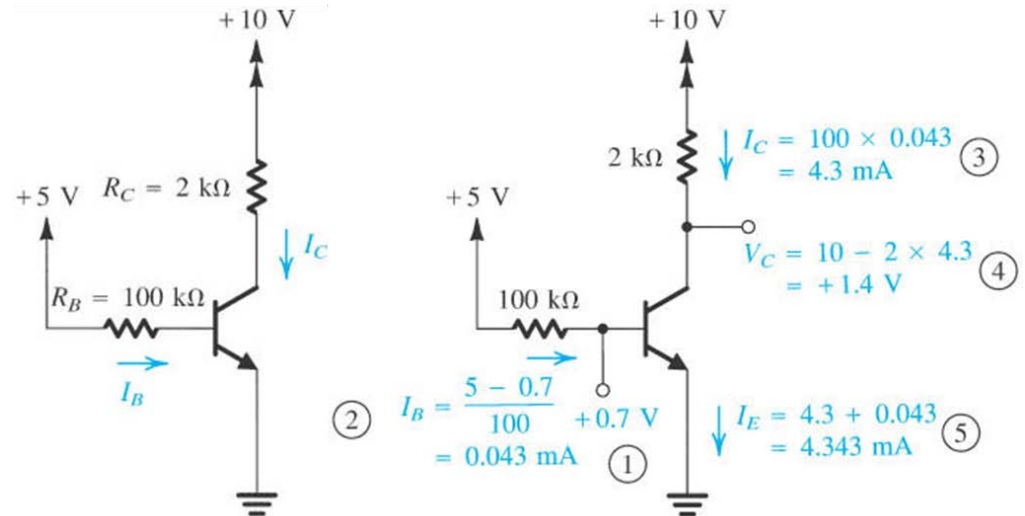
Παραδείγματα κακής σχεδίασης κυκλώματος πόλωσης.

- Παράδειγμα 1: Με ρύθμιση του I_B .

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

$$I_C = \beta I_B$$

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

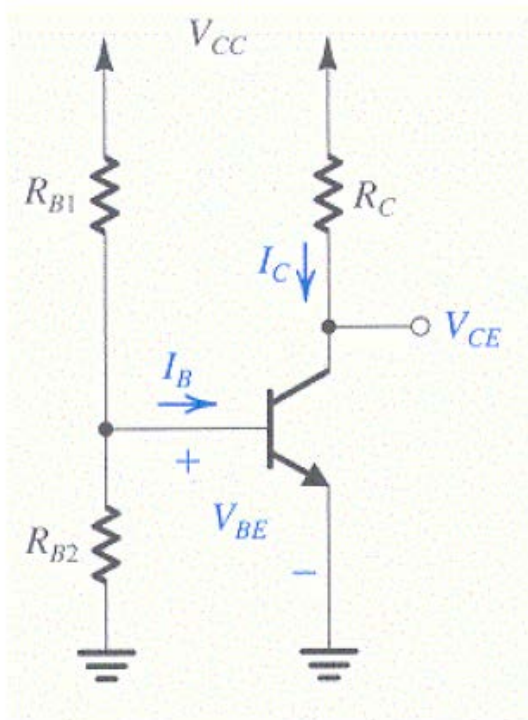


Τα ρεύματα συλλέκτη και εκπομπού εξαρτώνται άμεσα από το β η τιμή του οποίου δεν ελέγχεται εύκολα.

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

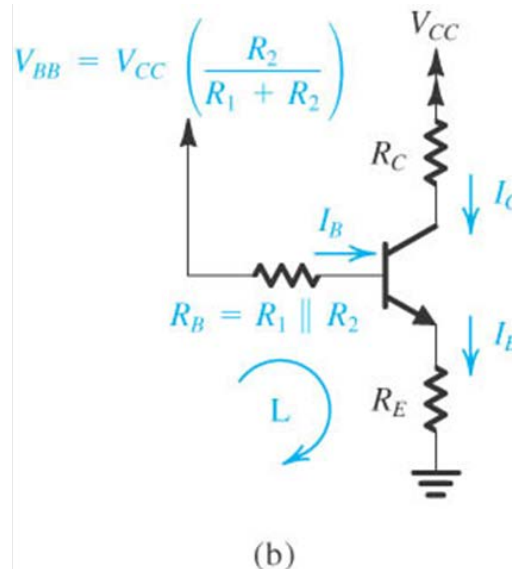
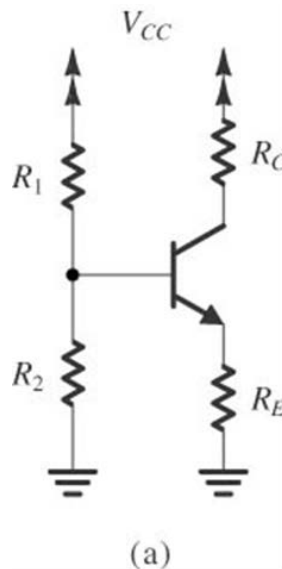
Κυκλώματα πόλωσης του διπολικού τρανζίστορ.(3/3)

Παράδειγμα 2: Με ρύθμιση του V_{BE} .



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

1. Το κλασικό κύκλωμα πόλωσης με τέσσερις αντιστάσεις. (1/2)



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

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

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

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

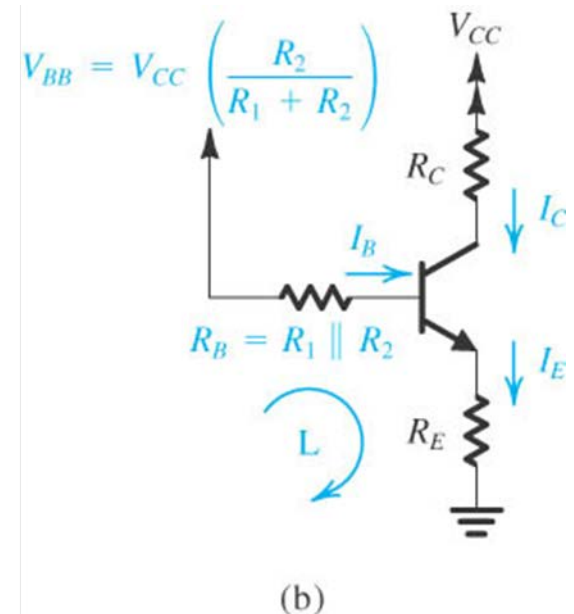
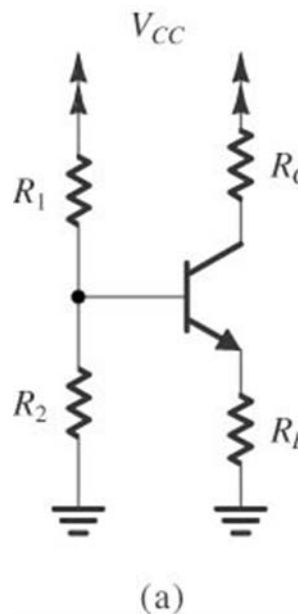
1. Το κλασικό κύκλωμα πόλωσης με τέσσερις αντιστάσεις. (2/2)

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

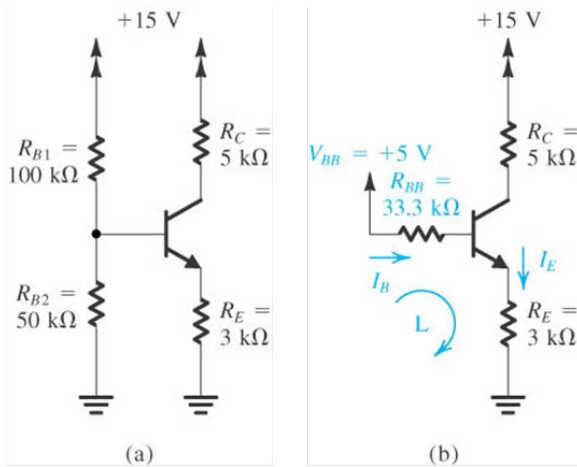
$$V_{BB} \gg V_{BE}$$

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

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

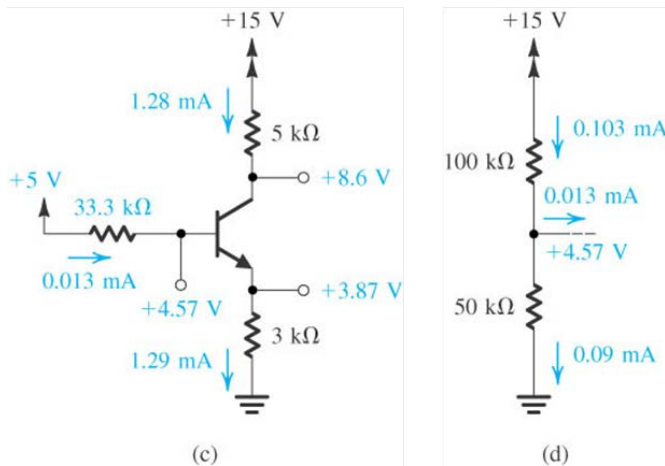


Παράδειγμα 1 (1/2)



Να αναλυθεί το κύκλωμα αν $\beta=100$ και $V_{BE}=0.7V$.

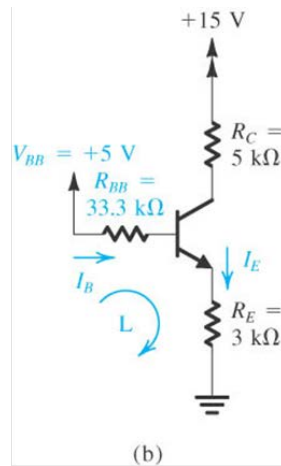
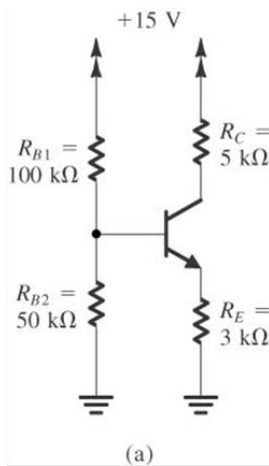
Υποθέτουμε λειτουργία στην ενεργό περιοχή.



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

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

Παράδειγμα 1 (2/2)



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

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

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

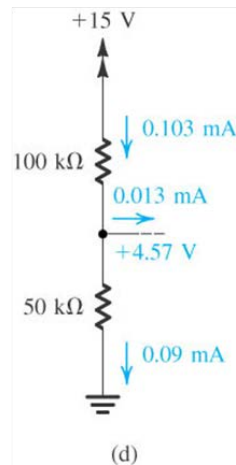
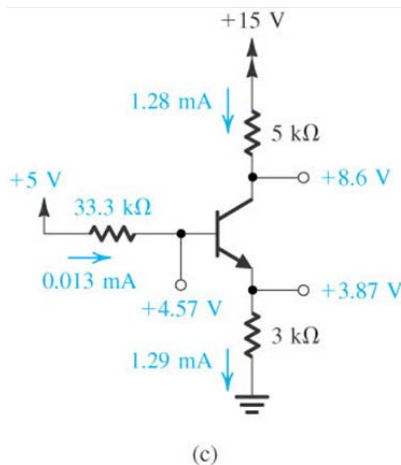
$$V_B = V_{BE} + I_E R_E = 0.7 + 1.29 \cdot 3 = 4.57 \text{ V}$$

$$I_C = \alpha I_E = 0.99 \cdot 1.29 = 1.28 \text{ mA}$$

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

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

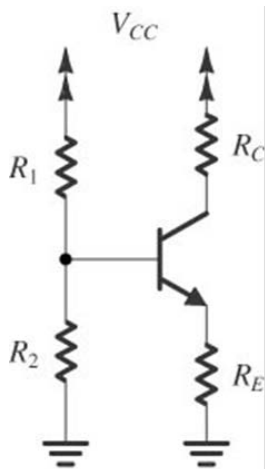
$$I_2 = \frac{V_B}{R_2} = \frac{4.57}{50} \text{ mA} = 0.0914 \text{ mA}$$



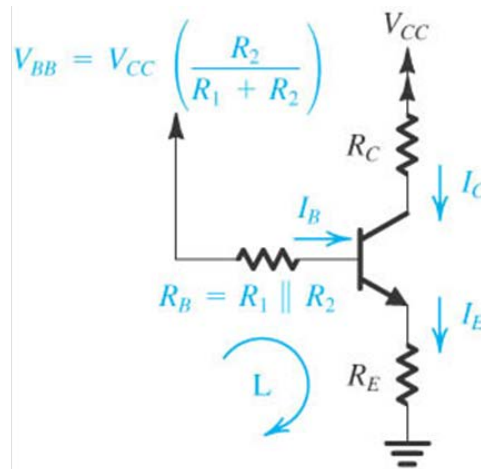
Πρόσθετοι στόχοι της σχεδίασης δικτύματος πόλωσης (1/2)

Χαμηλή κατανάλωση ισχύος και μεγάλο περιθώριο μεταβολής της τάσης εξόδου.

Πρόσθετοι στόχοι της σχεδίασης δικτυώματος πόλωσης (2/2)



(a)



(b)

Παράδειγμα συμβιβασμών που ικανοποιούν αυτούς τους στόχους

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

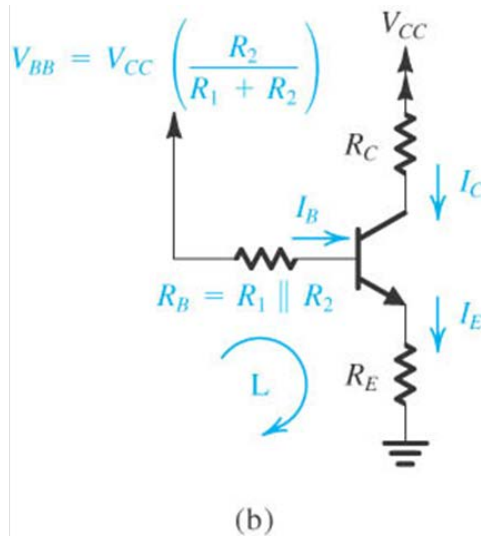
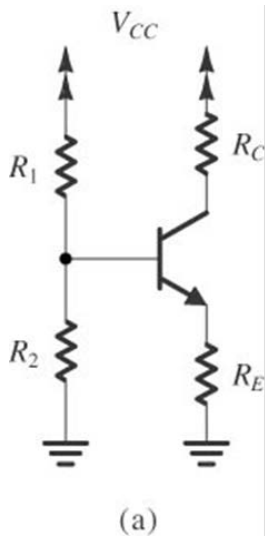
$$V_{CB} \approx \frac{1}{3} V_{CC} \quad \text{Για μεγάλο περιθώριο πριν την είσοδο στον κόρο.}$$

$$I_C R_C \approx \frac{1}{3} V_{CC} \quad \text{Για μεγάλο περιθώριο μεταβολής σήματος.}$$

$$I_1 \approx I_2 \approx 0.1 I_E \quad \text{Για μέτρια κατανάλωση.}$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{(\beta + 1)}} \quad \begin{matrix} V_{BB} \gg V_{BE} \\ R_E \gg \frac{R_B}{\beta + 1} \end{matrix}$$

Παράδειγμα 2 (1/2)



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

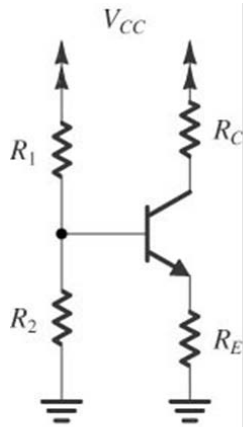
Υποθέτουμε $\beta = 100$, $V_{BE} = 0.7\text{V}$ και λειτουργία στην ενεργό περιοχή.

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

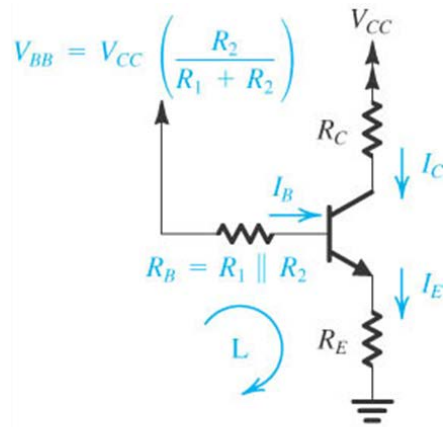
$$V_E = V_B - V_{BE} = 3.3\text{V}$$

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

Παράδειγμα 2 (2/2)



(a)



(b)

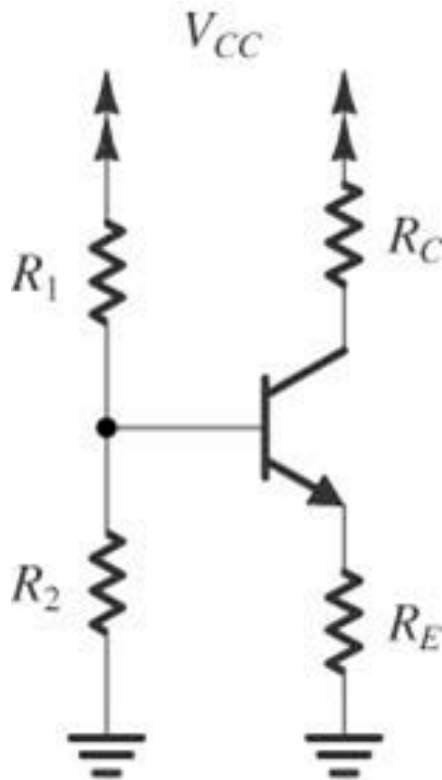
$$\left. \begin{aligned} I_1 = I_2 = 0.1I_E \Rightarrow R_1 + R_2 &= \frac{V_{CC}}{0.1I_E} = 120k\Omega \\ V_{BB} = \frac{1}{3}V_{CC} \Rightarrow V_{BB} &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \approx 4V \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_1 = 80k\Omega, R_2 = 40k\Omega$$

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

Ακριβέστερος υπολογισμός του I_E :
για μη μηδενικό I_B

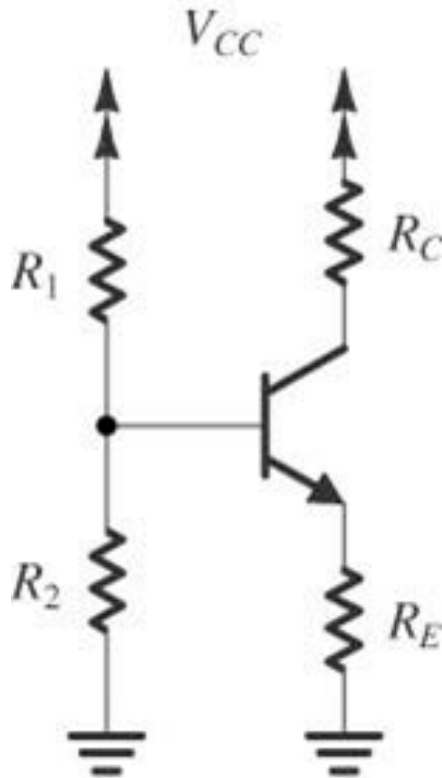
$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{(\beta + 1)}} = \frac{3.3}{3.3 + \frac{26.66}{101}} = 0.93mA$$

Άσκηση 1 (1/2)



Να σχεδιαστεί το κύκλωμα του 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 $\beta=100$.

Άσκηση 1 (2/2)



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

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

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

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

$$\left. \begin{aligned} V_{CC} &= I_1 (R_1 + R_2) \Rightarrow R_1 + R_2 = \frac{V_{CC}}{0.2I_E} = 90\text{k}\Omega \\ V_{BB} \approx V_B &= V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{V_{CC}}{V_B} = \frac{9}{3.7} = 2.43 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

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

$$R_1 = 90\text{k}\Omega - R_2 = 90\text{k}\Omega - 37\text{k}\Omega = 53\text{k}\Omega$$

2. Πόλωση με Χρήση Δύο Τροφοδοτικών

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

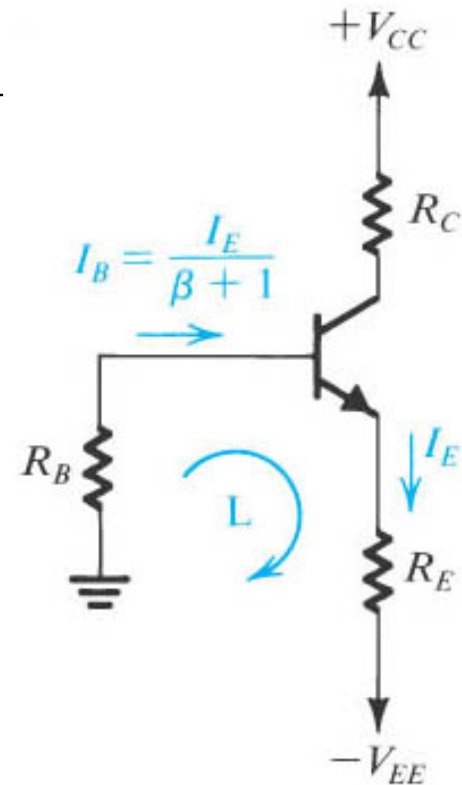
$$V_{EE} \gg V_{BE}$$

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

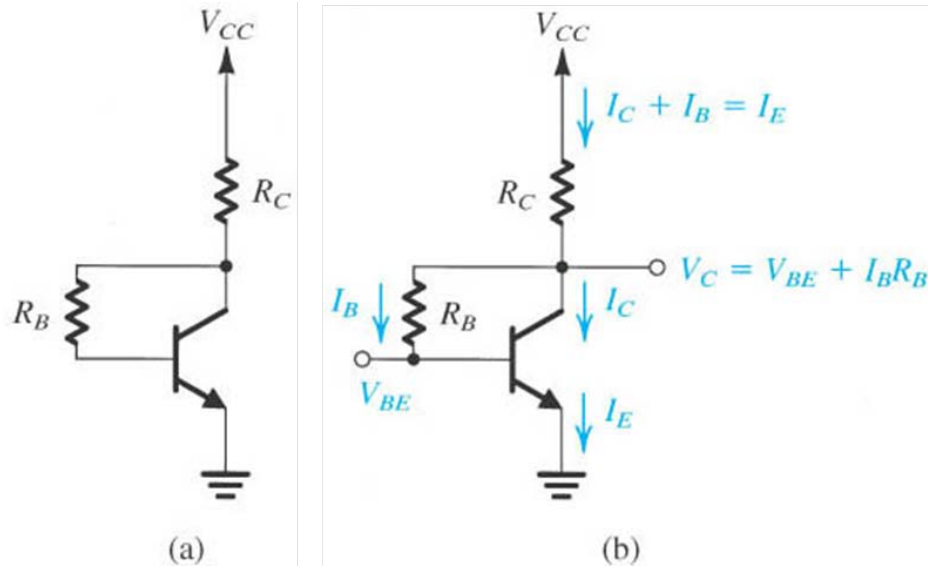
Η R_B μπορεί να παραλειφθεί αν το σήμα δεν εφαρμόζεται στη βάση.

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

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



3. Πόλωση από τον Συλλέκτη



Χρήσιμο για κυκλώματα κοινού εκπομπού.

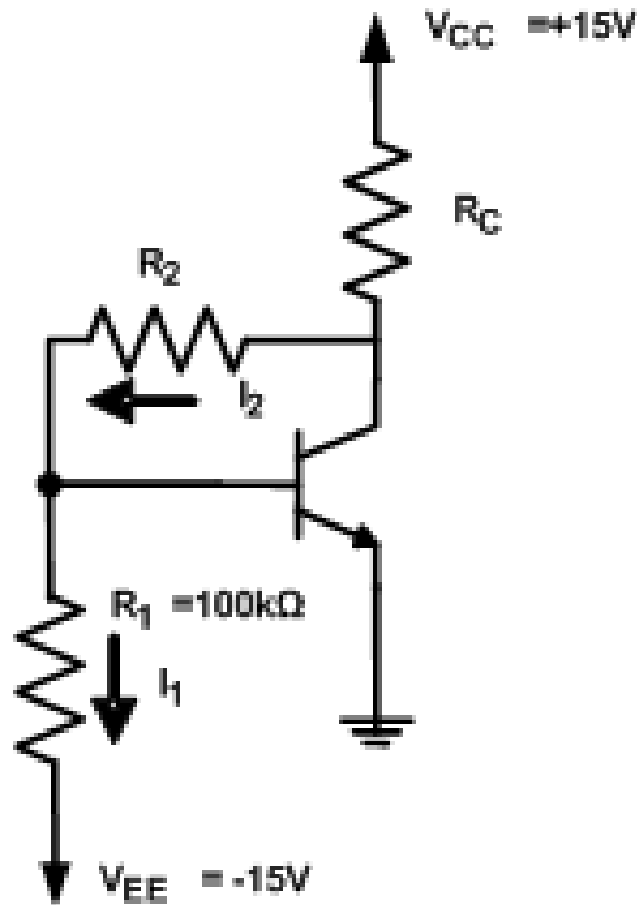
Η σταθερότητα πόλωσης επιτυγχάνεται με την αρνητική ανάδραση που δίνει η αντίσταση R_B .

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

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

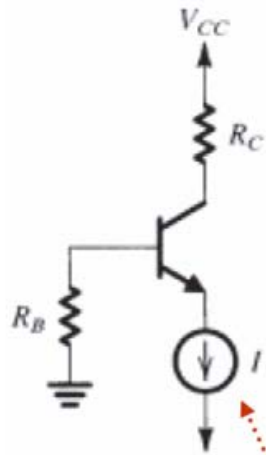
$$R_C \gg \frac{R_B}{\beta + 1}$$

Άσκηση 2



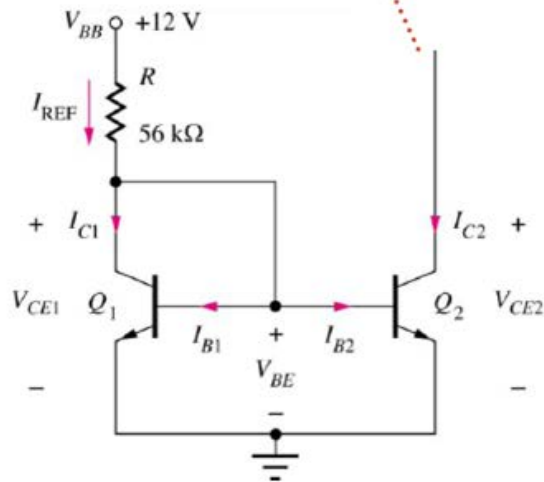
Για το κύκλωμα του σχήματος, να υπολογιστούν οι τιμές των αντιστάσεων R_2 και R_C , αν απαιτείται να έχουμε $V_{CE}=5V$ και $I_C=2mA$ στο σημείο λειτουργίας Q . Δίνονται: $V_{BE}=0,7V$ και $\beta=100$.

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 .



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

