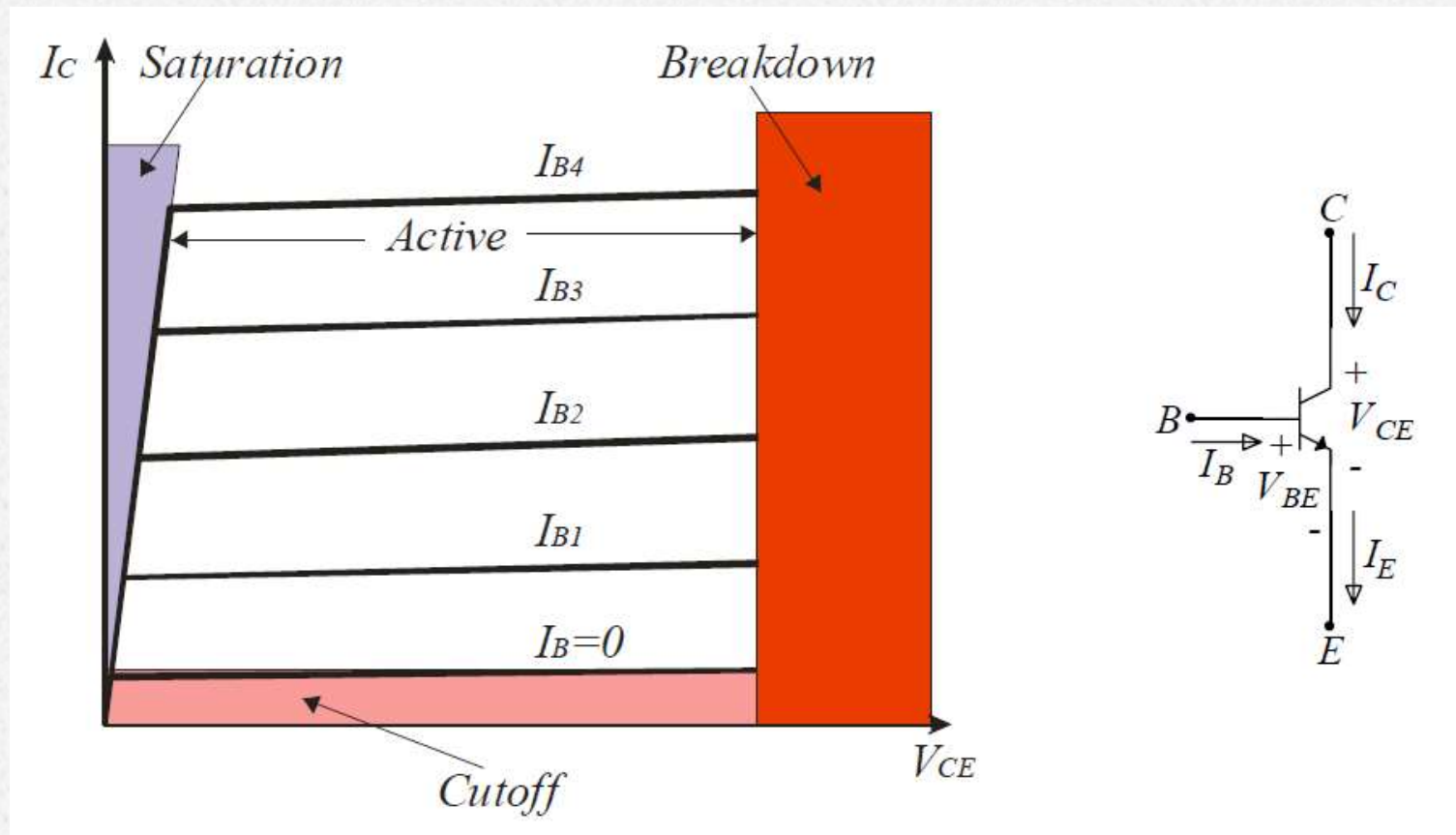


Τρανζίστορ Διπολικών Ενώσεων Bipolar Junction Transistor (BJT)

Επανάληψη

Περιοχές Λειτουργίας



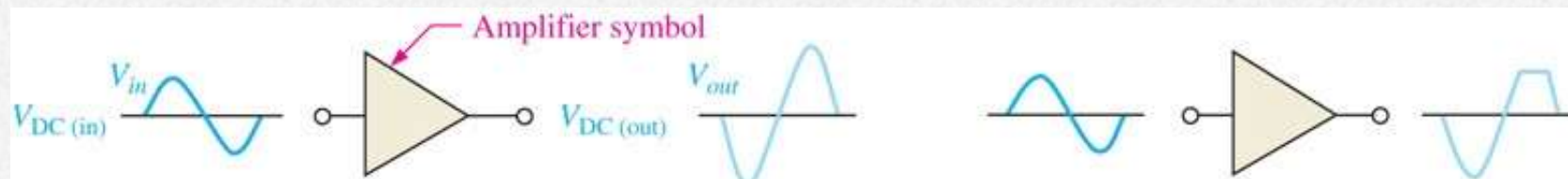
Επανάληψη

Περιοχές Λειτουργίας

Περιοχή Αποκοπής	<ul style="list-style-type: none">• BE junction is reverse-biased.• No current flow ($I_B = I_C = I_E = 0$).• $V_{CE} = V_{CC}$.
Περιοχή Κόρου	<ul style="list-style-type: none">• Both BE and BC junctions are forward-biased.• I_C reaches a maximum $I_{C(sat)}$ (independent of I_B and β).• V_{CE} reaches a minimum $V_{CE(sat)} = 0.2 < V_{BE}$.
Ενεργός Περιοχή	<ul style="list-style-type: none">• BE junction is forward-biased and BC junction is reverse-biased.• $I_C = \beta I_B$ and $I_E = (1 + \beta)I_B$ (independent of V_{CC}).• $V_{BE} = 0.7 < V_{CE} < V_{CC}$.
Περιοχή Κατάρρευσης	<ul style="list-style-type: none">• I_C or V_{CE} exceeds specifications.• Transistor is damaged.

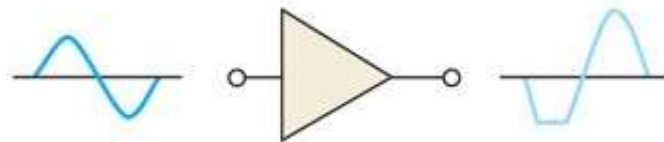
DC Σημείο Λειτουργίας

Πόλωση DC



(α) Γραμμική λειτουργία: η ενισχυμένη έξοδος έχει την ίδια μορφή με την είσοδο αλλά είναι ανεστραμμένη.

(β) Μη γραμμική λειτουργία: η έξοδος είναι ψαλιδισμένη λόγω λειτουργίας στην αποκοπή.



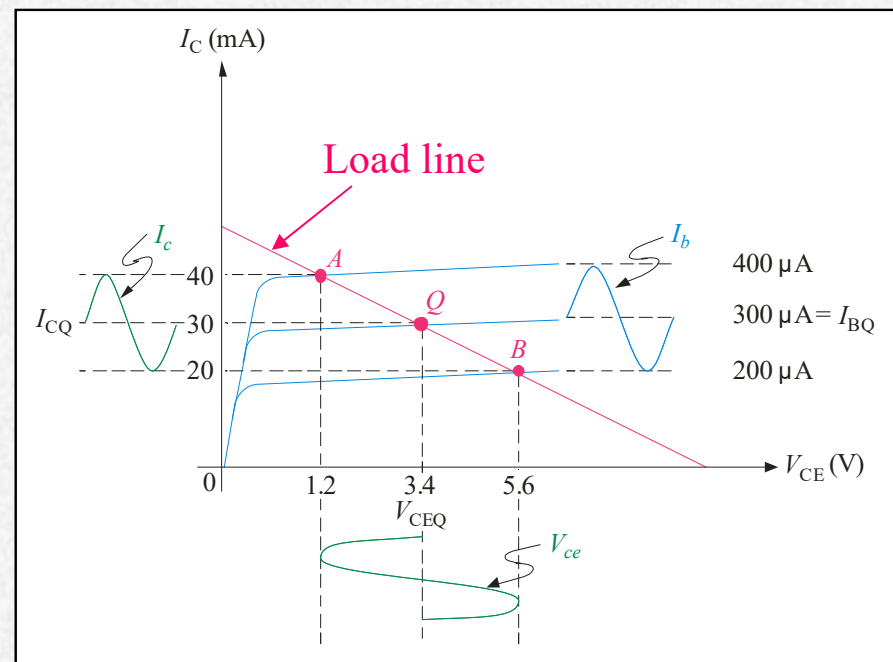
(γ) Μη γραμμική λειτουργία: η έξοδος είναι ψαλιδισμένη λόγω λειτουργίας στον κόρο.

Παραδείγματα γραμμικής και μη γραμμικής λειτουργίας αναστρέφοντος ενισχυτή.

DC Σημείο Λειτουργίας

Η πόλωση καθορίζει το σημείο λειτουργίας (ονομάζεται επίσης το σημείο ηρεμίας ή το σημείο Q) ενός ενισχυτή τρανζίστορ. Το σήμα ac κινείται πάνω και κάτω από αυτό το σημείο.

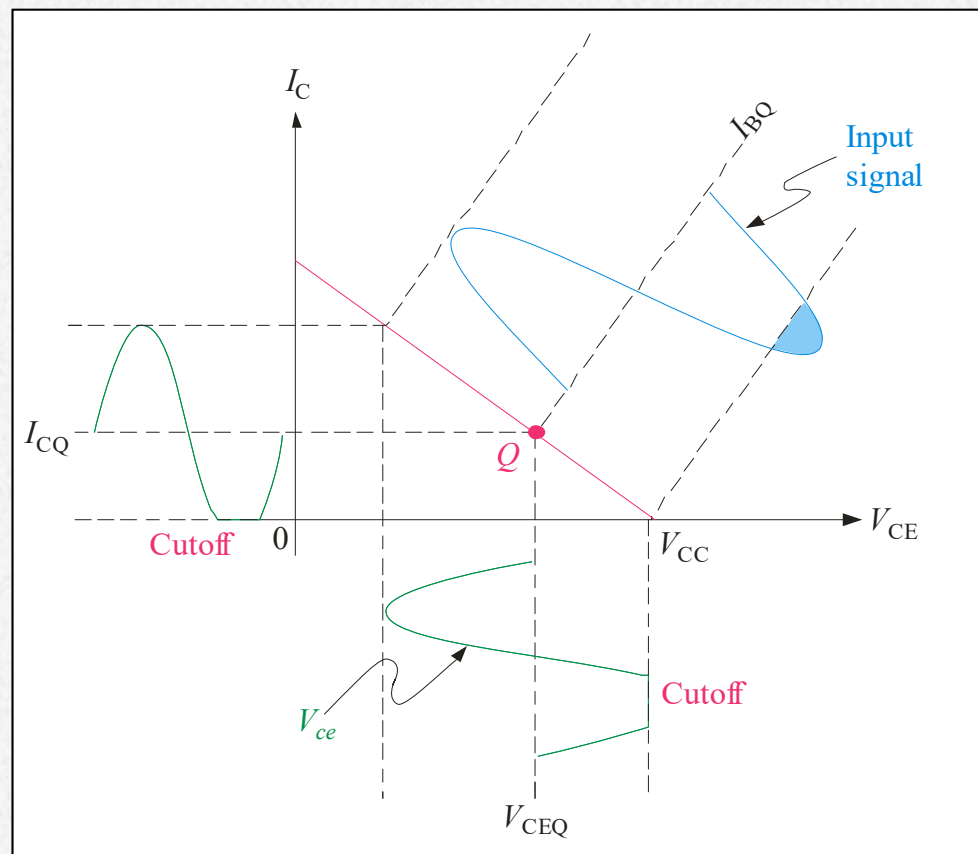
Για αυτό το παράδειγμα, το ρεύμα βάσης dc είναι 300 μA . Όταν η είσοδος προκαλεί το ρεύμα βάσης να κυμαίνεται μεταξύ 200 μA και 400 μA , το ρεύμα συλλέκτη κυμαίνεται μεταξύ 20 mA και 40 mA.



DC Σημείο Λειτουργίας

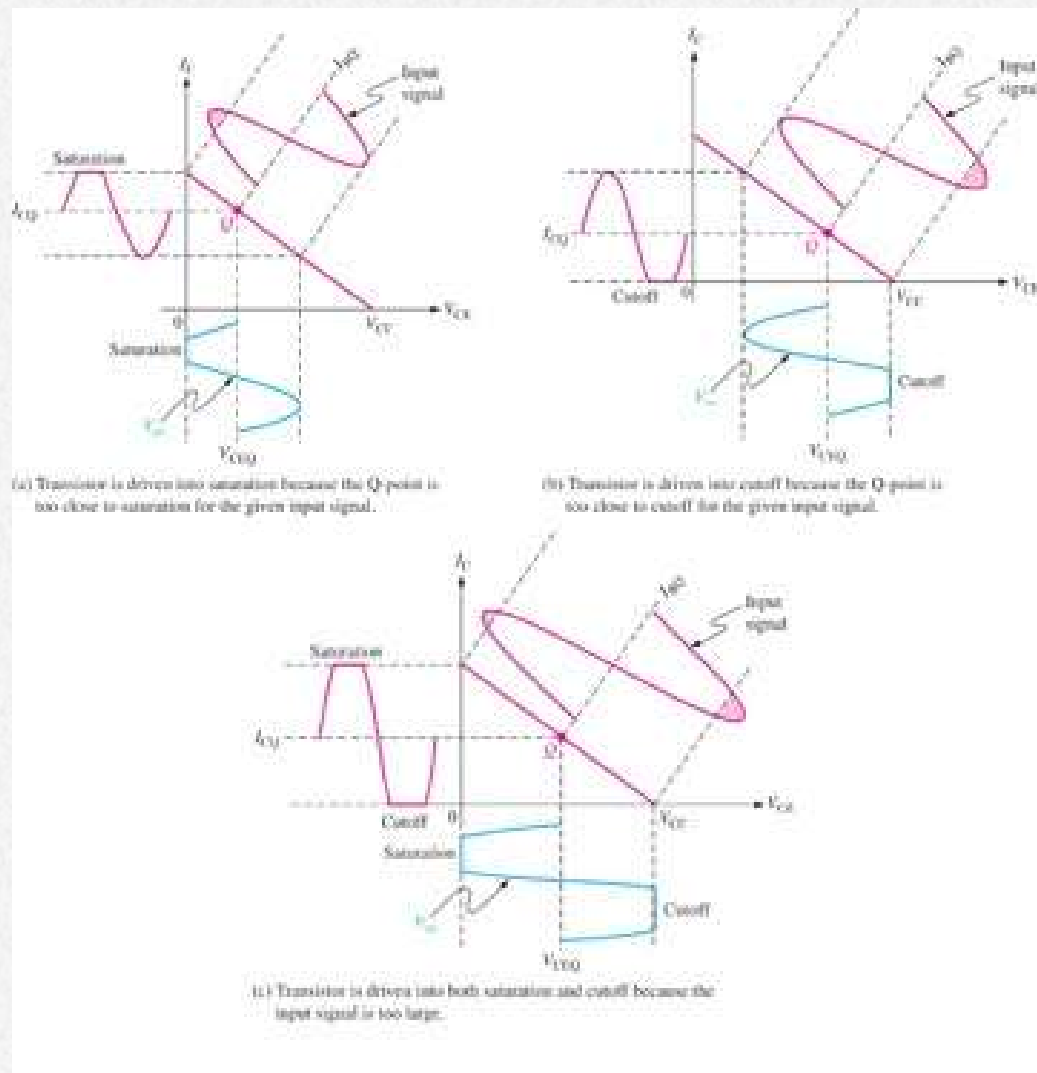
Το σήμα που μεταβάλλεται εκτός της ενεργού περιοχής θα ψαλιδιστεί.

Για παράδειγμα, η πόλωση έχει ορίσει ένα χαμηλό σημείο Q . Σαν αποτέλεσμα, το σήμα θα ψαλιδιστεί επειδή είναι πολύ κοντά στην αποκοπή.

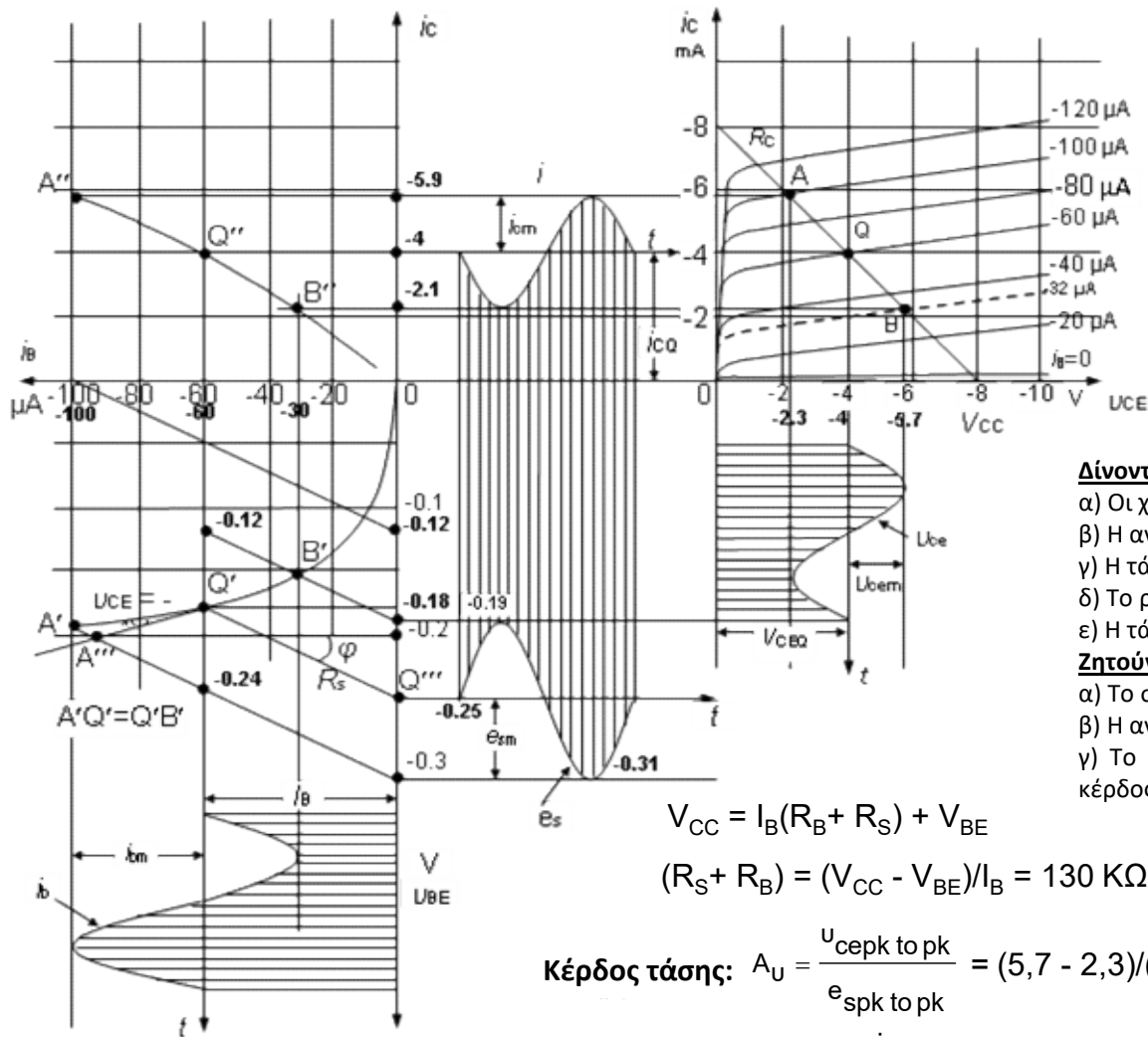


DC Σημείο Λειτουργίας

Παρομοίως, το σήμα θα ψαλιδιστεί εάν το σημείο Q είναι πολύ κοντά στον κόρο ή εάν το σημείο Q επιλέχθηκε μεν σωστά, αλλά το σήμα είναι πολύ μεγάλο.



Ανάλυση λειτουργίας ενισχυτή Κοινού Εκπομπού



Δίνονται :

- α) Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του τρανζίστορ.
- β) Η αντίσταση φορτίου $R_C = 1 \text{ K}\Omega$ και η αντίσταση $R_S = 1.2 \text{ k}\Omega$.
- γ) Η τάση της πηγής του συλλέκτη $V_{CC} = -8 \text{ V}$.
- δ) Το ρεύμα πόλωσης της βάσης $I_B = -60 \mu\text{A}$.
- ε) Η τάση εξόδου του ενισχυτή ($V_{pk \text{ to } pk} = 3,4 \text{ V}$).

Ζητούνται:

- α) Το σημείο ηρεμίας, η τάση και το ρεύμα ηρεμίας.
- β) Η αντίσταση πόλωσης της βάσης R_B .
- γ) Το κέρδος τάσης του ενισχυτή, το κέρδος ρεύματος και το κέρδος ισχύος του ενισχυτή.

$$V_{CC} = I_B(R_B + R_S) + V_{BE}$$

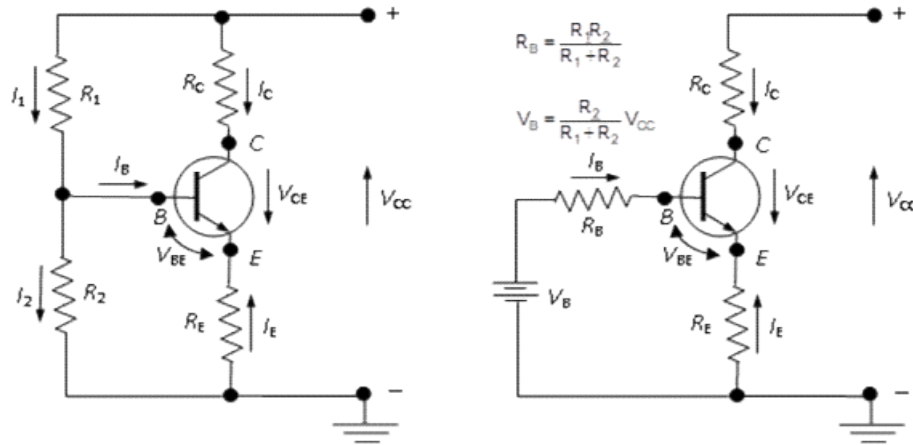
$$(R_S + R_B) = (V_{CC} - V_{BE})/I_B = 130 \text{ K}\Omega \rightarrow R_B = 128,8 \text{ K}\Omega$$

Κέρδος τάσης: $A_U = \frac{U_{cepk \text{ to } pk}}{e_{spk \text{ to } pk}} = (5,7 - 2,3)/(0,31 - 0,19) = 3,4 / 0,12 = 28,3$

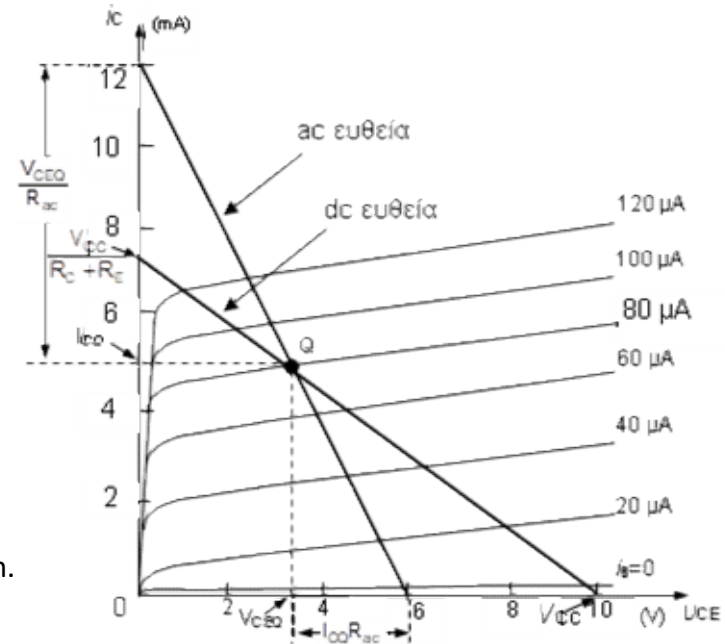
Κέρδος ρεύματος: $A_i = \frac{i_{epk \text{ to } pk}}{i_{bpk \text{ to } pk}} = (5,9 - 2,1) \cdot 1000 / (100 - 32) = 3,8 \cdot 1000 / 68 = 55,9$

Κέρδος ισχύος: $A_p = A_U \cdot A_i = 28,3 \cdot 55,9 = 1583$

Στατική και δυναμική ευθεία φορτίου



α) Κύκλωμα ενισχυτή με αντίσταση εκπομπού. β) Ισοδύναμο κατά Thevenin.



$$I_E = -(I_C + I_B) \approx -I_C$$

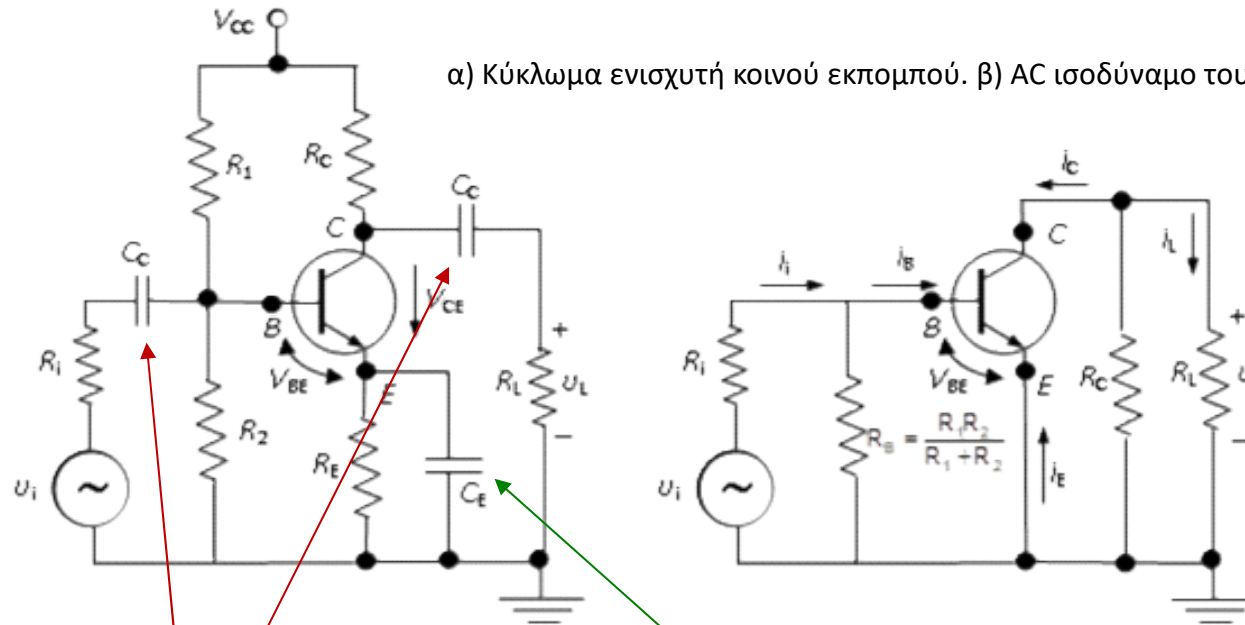
$$V_{CC} = I_{CQ}(R_C + R_E) + V_{CEQ}$$

$$I_{CQ} = -\frac{1}{(R_C + R_E)} V_{CEQ} + \frac{V_{CC}}{(R_C + R_E)}$$

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}, \quad V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

Η DC ευθεία φορτίου είναι η γραφική παράσταση του 2^{ου} κανόνα του Kirchhoff στο βρόχο εξόδου του κυκλώματος στο συνεχές.

AC ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή



α) Κύκλωμα ενισχυτή κοινού εκπομπού. β) AC ισοδύναμο του ενισχυτή.

Πυκνωτές σύζευξης

Περιορίζουν τις DC συνιστώσες μόνο στο τρανζίστορ και στο κύκλωμα πόλωσής του, έτσι ώστε οι συνιστώσες αυτές να αποκόπτονται και να μην επηρεάζουν την πηγή του σήματος εισόδου u_i και την τυχόν επόμενη βαθμίδα στην έξοδο ή την αντίσταση φορτίου R_L .

Πυκνωτής παρακάμψεως

Τοποθετείται στον εκπομπό για να μην καταναλώνεται AC ισχύς στην αντίσταση εκπομπού R_E και να μεγιστοποιείται το κέρδος στην έξοδο.

Επιλέγονται συνήθως αρκετά μεγάλοι ώστε οι εμπεδήσεις τους, ακόμα και για τη μικρότερη συχνότητα σήματος να είναι αρκετά μικρές, ώστε να μπορούν να θεωρηθούν βραχυκυκλώματα. Απαγορεύουν τη διέλευση ρεύματος DC, ενώ επιτρέπουν την ελεύθερη διέλευση ρεύματος σήματος (AC).

Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Ένας πρακτικός τρόπος για να οριστεί το σημείο Q είναι μέσω διαιρέτη τάσης της V_{CC} .

Η R_1 και η R_2 επιλέγονται για να τεθεί η V_B . Για στιβαρό (stiff) διαιρέτη τάσης, το I_B είναι μικρό σε σχέση με το I_2 . Τότε,

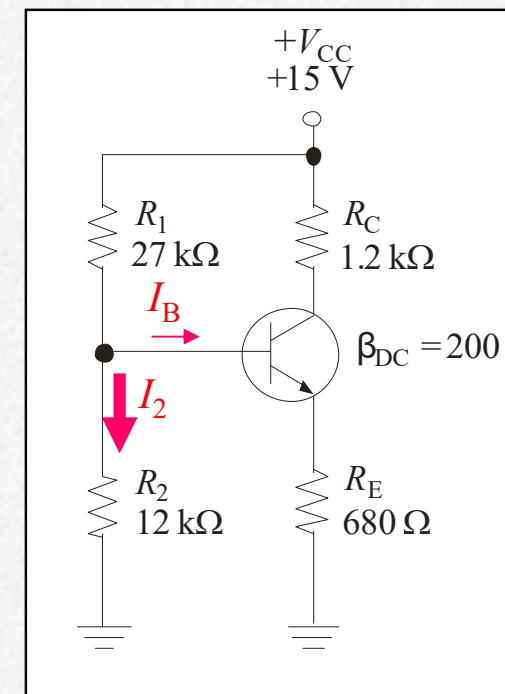
$$V_B \approx \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC}$$

Παράδειγμα:

Βρείτε την τάση στη βάση.

Λύση:

$$V_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC}$$
$$= \left(\frac{12 \text{ k}\Omega}{27 \text{ k}\Omega + 12 \text{ k}\Omega} \right) (+15 \text{ V}) = 4.62 \text{ V}$$



Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Συνέχεια:

Βρείτε την τάση εκπομπού, V_E , και το ρεύμα, I_E ?

Solution:

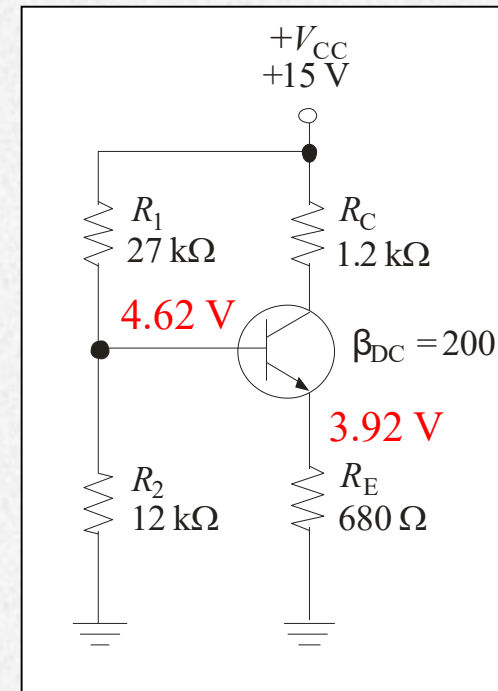
V_E διαφέρει κατά 0.7 V από την V_B :

$$V_E = 4.62 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 3.92 \text{ V}$$

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{3.92 \text{ V}}{680 \Omega} = 5.76 \text{ mA}$$

Δεν εξαρτάται από το β



Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Προσδιορίστε τα V_{CE} και I_C στο κύκλωμα τρανζίστορ με διαιρέτη τάσης στο παρακάτω κύκλωμα εάν $\beta = 100$.

The base voltage is

$$V_B \cong \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} = \left(\frac{5.6 \text{ k}\Omega}{15.6 \text{ k}\Omega} \right) 10 \text{ V} = 3.59 \text{ V}$$

So,

$$V_E = V_B - V_{BE} = 3.59 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 2.89 \text{ V}$$

and

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{2.89 \text{ V}}{560 \Omega} = 5.16 \text{ mA}$$

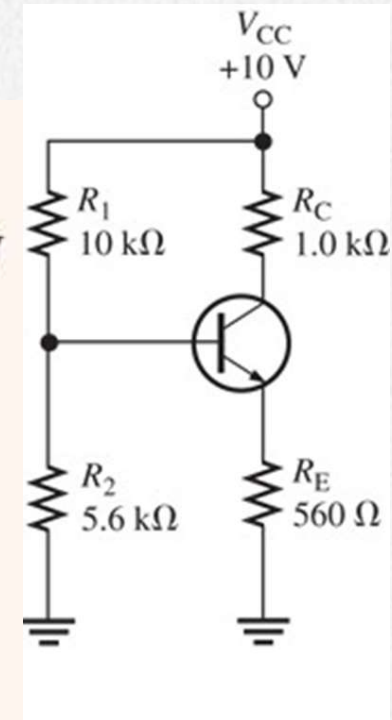
Therefore,

$$I_C \cong I_E = 5.16 \text{ mA}$$

and

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 10 \text{ V} - (5.16 \text{ mA})(1.0 \text{ k}\Omega) = 4.84 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 4.84 \text{ V} - 2.89 \text{ V} = 1.95 \text{ V}$$



Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Συνθήκη Φόρτισης Διαιρέτη Τάσης

Εάν ο διαιρέτης τάσης είναι:

$$R_{IN(BASE)} = \frac{V_B}{I_B} = \frac{V_B}{(I_E/\beta_{DC})} = \frac{\beta_{DC} V_B}{I_E}$$

Stiff:

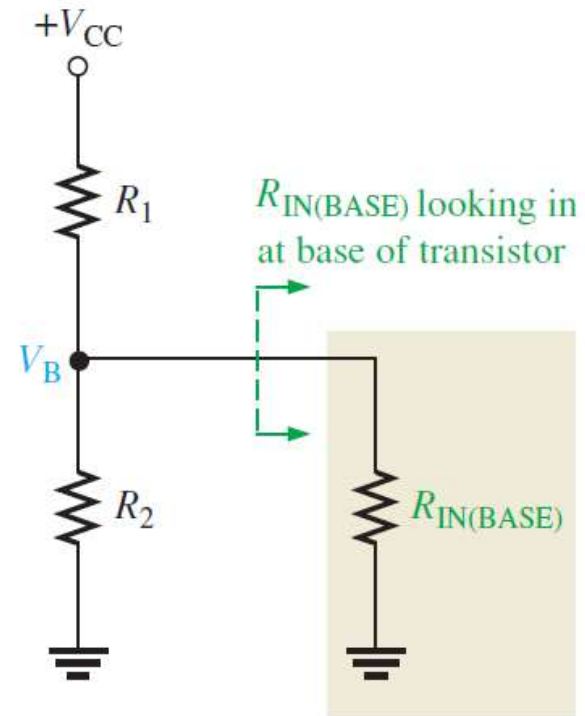
$$R_{IN(BASE)} \geq 10R_2$$

$$V_B \cong \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC}$$

Not stiff:

$$R_{IN(BASE)} < 10R_2$$

$$V_B = \left(\frac{R_2 \parallel R_{IN(BASE)}}{R_1 + R_2 \parallel R_{IN(BASE)}} \right) V_{CC}$$

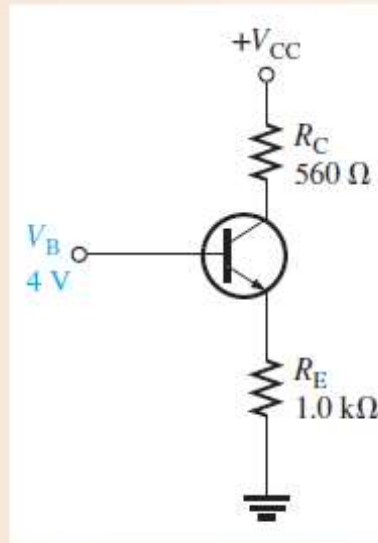


Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Συνθήκη Φόρτισης Διαιρέτη Τάσης

Προσδιορίστε την dc αντίσταση εισόδου στη βάση του τρανζίστορ του σχήματος. Υποθέστε $\beta_{DC} = 125$ και $V_B = 4V$.

► FIGURE 5-12



$$I_E = \frac{V_B - 0.7 \text{ V}}{R_E} = \frac{3.3 \text{ V}}{1.0 \text{ k}\Omega} = 3.3 \text{ mA}$$

$$R_{IN(BASE)} = \frac{\beta_{DC} V_B}{I_E} = \frac{125(4 \text{ V})}{3.3 \text{ mA}} = 152 \text{ k}\Omega$$

Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Η προσέγγιση αφόρτιστου διαιρέτη τάσης για την V_B δίνει προσεγγιστικά σωστά αποτελέσματα. Η πιο ακριβής λύση δίνεται με τη χρήση του θεωρήματος Thevenin.

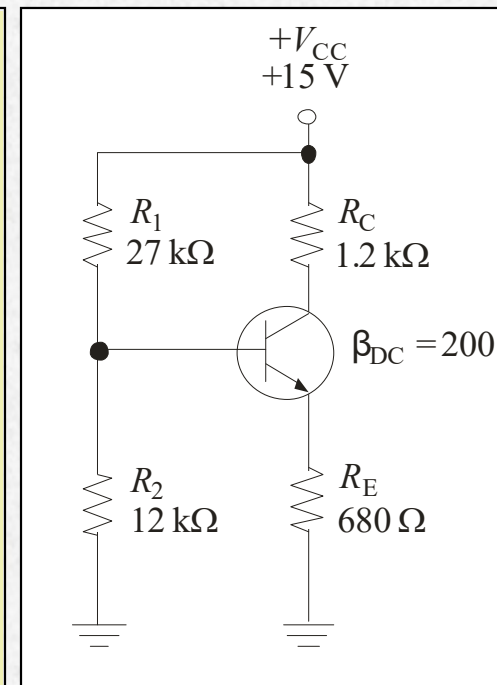
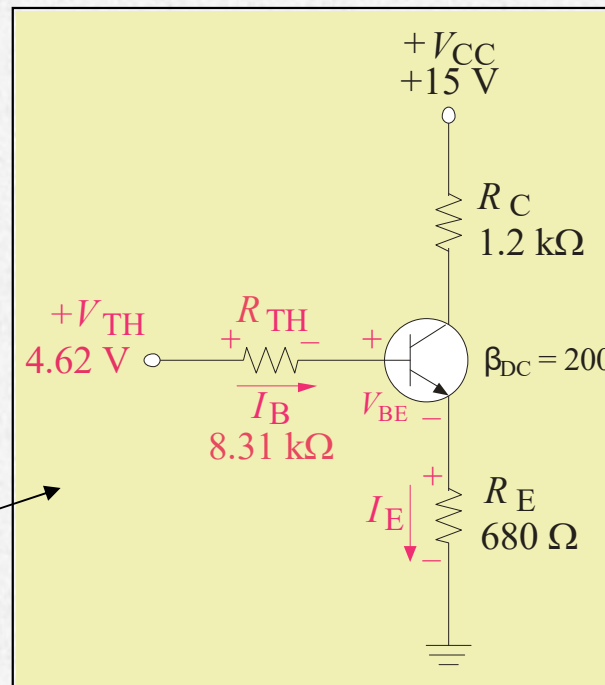
$$V_{TH} = V_{B(\text{no load})}$$

$$= 4.62 \text{ V}$$

$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2 =$$

$$= 8.31 \text{ k}\Omega$$

Ισοδύναμο κύκλωμα
Thevenin.



Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Γράφουμε την εξίσωση KVL για το βρόχο βάσης – εκπομπού και λύνουμε για το ρεύμα I_E .

$$V_{TH} = I_B R_{TH} + V_{BE} + I_E R_E$$

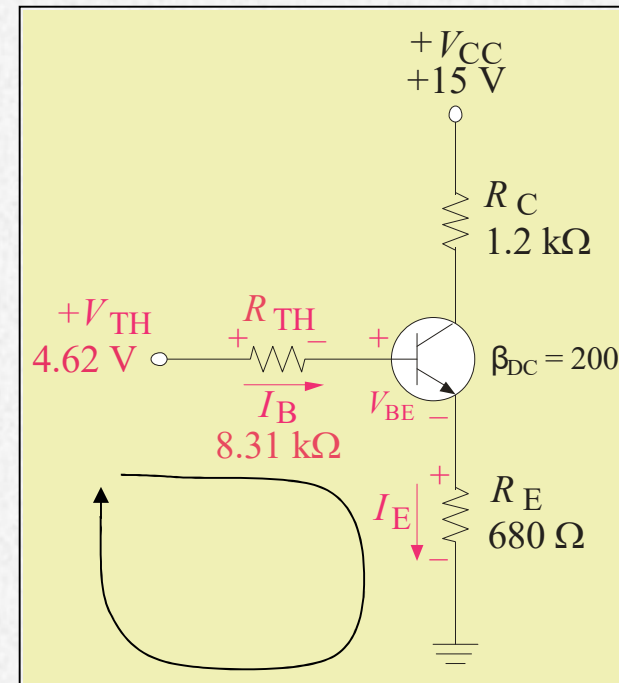
$$I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{TH}}{\beta_{DC}}}$$

Αντικαθιστούμε και επιλύουμε,

$$I_E = \frac{4.62 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{680 \Omega + \frac{8.31 \text{ k}\Omega}{200}} = 5.43 \text{ mA}$$

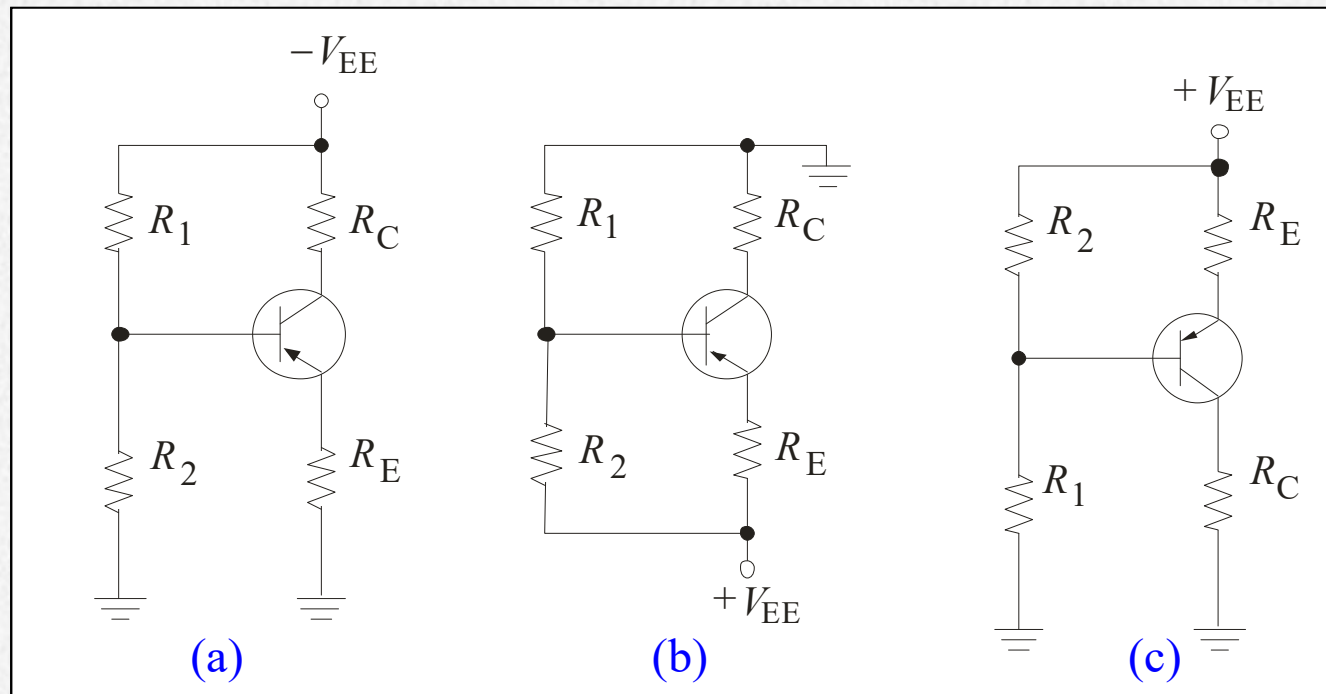
$$\text{και } V_E = I_E R_E = (5.43 \text{ mA})(0.68 \text{ k}\Omega)$$

$$= 3.69 \text{ V}$$



Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Ένα τρανζίστορ pnp μπορεί να πολωθεί είτε από θετική είτε από αρνητική τάση. Σημειώστε ότι τα (b) και (c) είναι το ίδιο κύκλωμα. Και τα δύο με θετική πηγή τροφοδοσίας.



Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Παράδειγμα:

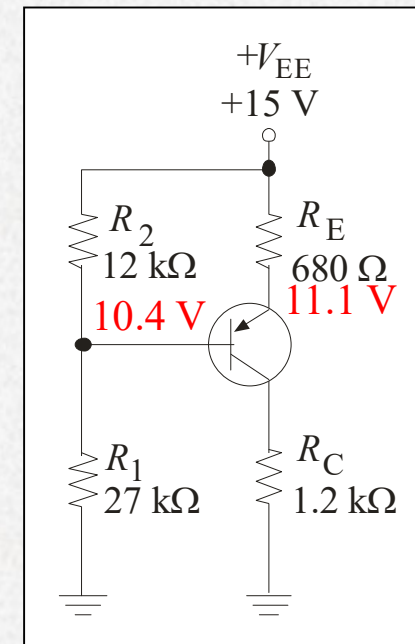
Υπολογίστε το I_E για το κύκλωμα που περιέχει το τρανζίστορ npn . Υποθέστε ότι ο διαιρέτης τάσης είναι στιβαρός (stiff).

Λύση:

$$V_B = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{EE}$$
$$= \left(\frac{27 \text{ k}\Omega}{27 \text{ k}\Omega + 12 \text{ k}\Omega} \right) (+15.0 \text{ V}) = 10.4 \text{ V}$$

$$V_E = V_B + V_{EB} = 10.4 \text{ V} + 0.7 \text{ V} = 11.1 \text{ V}$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_E}{R_E} = \frac{15.0 \text{ V} - 11.1 \text{ V}}{680 \Omega} = 5.74 \text{ mA}$$



Πόλωση με Διαιρέτη Τάσης

Βρείτε τα I_C και V_{CE} για το τρανζίστορ pnp με τιμές: $R_1=68\text{k}\Omega$, $R_2=47\text{k}\Omega$, $R_C=1.8\text{k}\Omega$, $R_E=2.2\text{k}\Omega$, $V_{CC}=-6\text{V}$, και $\beta_{DC}=75$.

Solution Apply Thevenin's theorem.

$$V_{TH} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} = \left(\frac{47\text{ k}\Omega}{68\text{ k}\Omega + 47\text{ k}\Omega} \right) (-6\text{ V}) \\ = (0.409)(-6\text{ V}) = -2.45\text{ V}$$

$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(68\text{ k}\Omega)(47\text{ k}\Omega)}{(68\text{ k}\Omega + 47\text{ k}\Omega)} = 27.8\text{ k}\Omega$$

Use Equation 5-7 to determine I_E .

$$I_E = \frac{-V_{TH} + V_{BE}}{R_E + R_{TH}/\beta_{DC}} = \frac{2.45\text{ V} - 0.7\text{ V}}{2.2\text{ k}\Omega + 371\Omega} = 0.68\text{ mA}$$

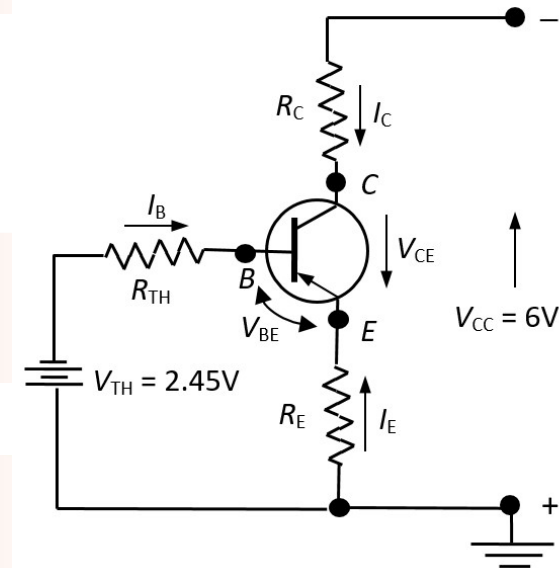
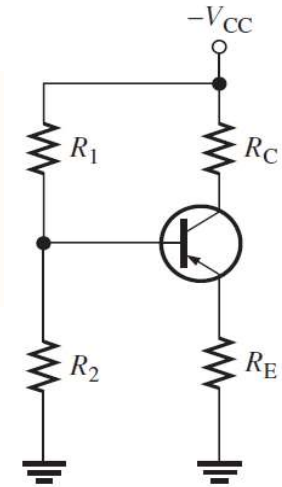
From I_E , you can determine I_C and V_{CE} as follows:

$$I_C = -I_E = -0.68\text{ mA}$$

$$V_C = -I_C R_C + V_{CC} = -6\text{ V} - (-0.68\text{ mA}) \cdot 1.8\text{ k}\Omega = -4.776\text{ V}$$

$$V_E = -I_E R_E = -0.68\text{ mA} \cdot 2.2\text{ k}\Omega = -1.496\text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = -4.776\text{ V} - (-1.496\text{ V}) = -3.28\text{ V}$$



Άλλες Μέθοδοι Πόλωσης

Πόλωση Βάσης

Η πόλωση βάσης χρησιμοποιείται στα κυκλώματα διακοπτών λόγω της απλότητάς της, αλλά δεν χρησιμοποιείται ευρέως σε γραμμικές εφαρμογές επειδή το σημείο Q εξαρτάται από το β .

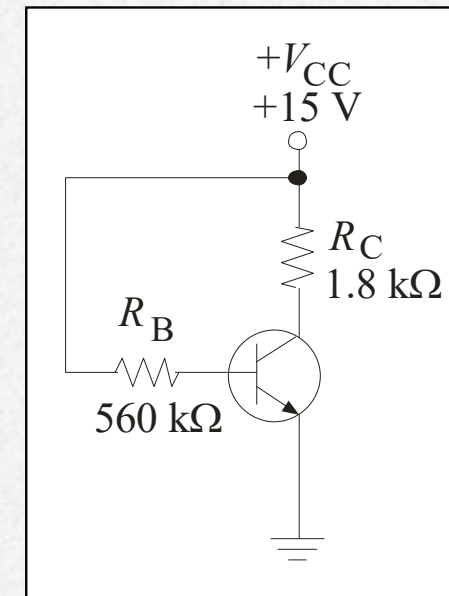
Το ρεύμα βάσης προκύπτει από την τροφοδοσία συλλέκτη μέσω μιας μεγάλης αντίστασης βάσης.

Παράδειγμα:

Βρείτε το I_B ?
$$I_C = \beta_{DC} \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right)$$

Λύση:

$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7 \text{ V}}{R_B} = \frac{15 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{560 \text{ k}\Omega} = 25.5 \mu\text{A}$$



Άλλες Μέθοδοι Πόλωσης

Πόλωση Βάσης *Συνέχεια:*

Συγκρίνετε την V_{CE} για τις περιπτώσεις $\beta = 100$ και $\beta = 300$.

Λύση:

$$\text{Για } \beta = 100: I_C = \beta I_B = (100)(25.5 \mu\text{A}) = 2.55 \text{ mA}$$

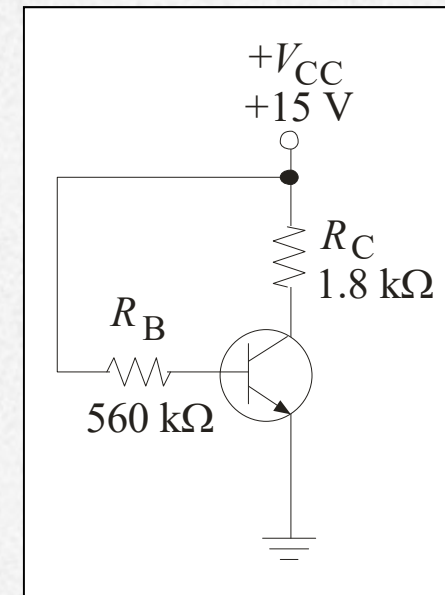
$$\begin{aligned} V_{CE} &= V_{CC} - I_C R_C \\ &= 15 \text{ V} - (2.55 \text{ mA})(1.8 \text{ k}\Omega) = 10.4 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\text{Για } \beta = 300: I_C = \beta I_B = (300)(25.5 \mu\text{A}) = 7.65 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} V_{CE} &= V_{CC} - I_C R_C \\ &= 15 \text{ V} - (7.65 \text{ mA})(1.8 \text{ k}\Omega) = 1.23 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\% \Delta I_C = 200\%$$

$$\% \Delta V_{CE} = -88.17\%$$



Βρείτε τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας Q (I_C , V_{CE}) εάν το β_{DC} αυξηθεί από την τιμή 100 στην τιμή 200.

For $\beta_{DC} = 100$,

$$I_{C(1)} = \beta_{DC} \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right) = 100 \left(\frac{12 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{330 \text{ k}\Omega} \right) = 3.42 \text{ mA}$$

$$V_{CE(1)} = V_{CC} - I_{C(1)} R_C = 12 \text{ V} - (3.42 \text{ mA})(560 \Omega) = 10.1 \text{ V}$$

For $\beta_{DC} = 200$,

$$I_{C(2)} = \beta_{DC} \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right) = 200 \left(\frac{12 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{330 \text{ k}\Omega} \right) = 6.84 \text{ mA}$$

$$V_{CE(2)} = V_{CC} - I_{C(2)} R_C = 12 \text{ V} - (6.84 \text{ mA})(560 \Omega) = 8.17 \text{ V}$$

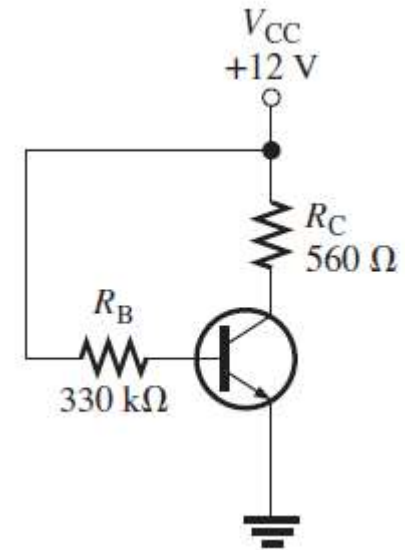
The percent change in I_C as β_{DC} changes from 100 to 200 is

$$\begin{aligned} \% \Delta I_C &= \left(\frac{I_{C(2)} - I_{C(1)}}{I_{C(1)}} \right) 100\% \\ &= \left(\frac{6.84 \text{ mA} - 3.42 \text{ mA}}{3.42 \text{ mA}} \right) 100\% = \mathbf{100\%} \text{ (an increase)} \end{aligned}$$

The percent change in V_{CE} is

$$\begin{aligned} \% \Delta V_{CE} &= \left(\frac{V_{CE(2)} - V_{CE(1)}}{V_{CE(1)}} \right) 100\% \\ &= \left(\frac{8.17 \text{ V} - 10.1 \text{ V}}{10.1 \text{ V}} \right) 100\% = \mathbf{-19.1\%} \text{ (a decrease)} \end{aligned}$$

As you can see, the Q-point is very dependent on β_{DC} in this circuit and therefore makes the base bias arrangement very unreliable. Consequently, base bias is not normally used if linear operation is required. However, it can be used in switching applications.



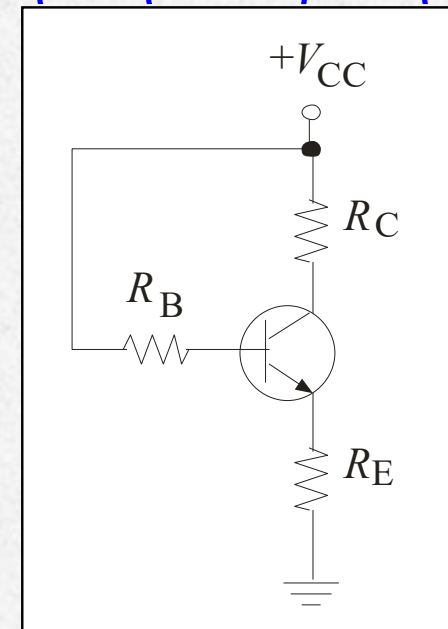
Άλλες Μέθοδοι Πόλωσης

Πόλωση με Ανάδραση-Εκπομπού

Μια αντίσταση εκπομπού αλλάζει την πόλωση βάσης σε πόλωση ανάδρασης-εκπομπού, η οποία είναι πιο προβλέψιμη. Η αντίσταση εκπομπού παρέχει την αναγκαία αρνητική ανάδραση.

Η εξίσωση για το ρεύμα εκπομπού βρίσκεται γράφοντας την KVL γύρω από το κύκλωμα βάσης. Το αποτέλεσμα είναι:

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta_{DC}}}$$



Πόλωση Ανάδρασης-Εκπομπού

Βρείτε τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας Q (I_C , V_{CE}) εάν το β_{DC} αυξηθεί από την τιμή 100 στην τιμή 200.

Θεωρήστε τιμή αντίστασης εκπομπού $R_E = 1\text{k}\Omega$.

For $\beta_{DC} = 100$,

$$I_{C(1)} = I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B/\beta_{DC}} = \frac{12\text{ V} - 0.7\text{ V}}{1\text{ k}\Omega + 330\text{ k}\Omega/100} = 2.63\text{ mA}$$

$$V_{CE(1)} = V_{CC} - I_{C(1)}(R_C + R_E) = 12\text{ V} - (2.63\text{ mA})(560\ \Omega + 1\text{ k}\Omega) = 7.90\text{ V}$$

For $\beta_{DC} = 200$,

$$I_{C(2)} = I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + R_B/\beta_{DC}} = \frac{12\text{ V} - 0.7\text{ V}}{1\text{ k}\Omega + 330\text{ k}\Omega/200} = 4.26\text{ mA}$$

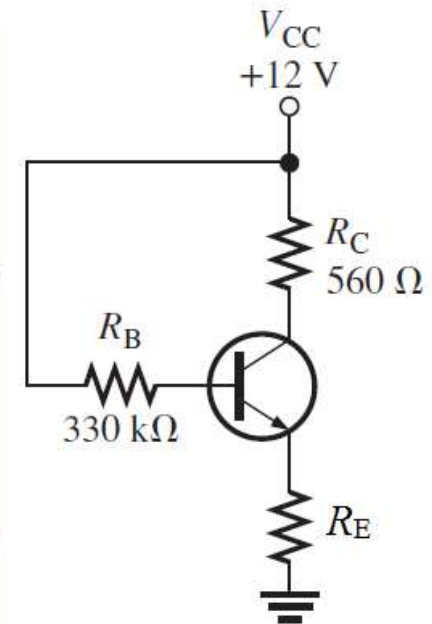
$$V_{CE(2)} = V_{CC} - I_{C(2)}(R_C + R_E) = 12\text{ V} - (4.26\text{ mA})(560\ \Omega + 1\text{ k}\Omega) = 5.35\text{ V}$$

The percent change in I_C is

$$\% \Delta I_C = \left(\frac{I_{C(2)} - I_{C(1)}}{I_{C(1)}} \right) 100\% = \left(\frac{4.26\text{ mA} - 2.63\text{ mA}}{2.63\text{ mA}} \right) 100\% = 62.0\%$$

$$\% \Delta V_{CE} = \left(\frac{V_{CE(2)} - V_{CE(1)}}{V_{CE(1)}} \right) 100\% = \left(\frac{5.35\text{ V} - 7.90\text{ V}}{7.90\text{ V}} \right) 100\% = -32.3\%$$

Although the emitter-feedback bias significantly improved the stability of the bias for a change in β_{DC} compared to base bias, it still does not provide a reliable Q-point.



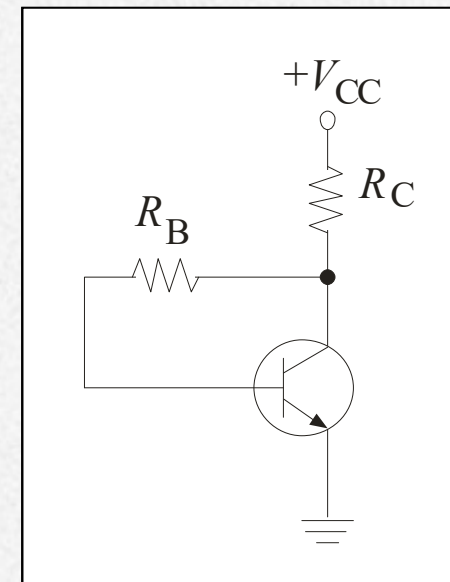
Άλλες Μέθοδοι Πόλωσης

Πόλωση Ανάδρασης-Συλλέκτη

Η πόλωση ανάδρασης-συλλέκτη χρησιμοποιεί μια άλλη μορφή αρνητικής ανάδρασης για την αύξηση της σταθερότητας. Αντί να επιστρέφει την αντίσταση βάσης στη V_{CC} , την συνδέει στο συλλέκτη.

Η εξίσωση για το ρεύμα συλλέκτη βρίσκεται γράφοντας την KVL γύρω από το κύκλωμα βάσης. Το αποτέλεσμα είναι

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{\beta_{DC}}}$$



Άλλες Μέθοδοι Πόλωσης

Πόλωση Ανάδρασης-Συλλέκτη

Παράδειγμα:

Συγκρίνετε το ρεύμα I_C όταν το $\beta = 100$ και όταν το $\beta = 300$.

Λύση:

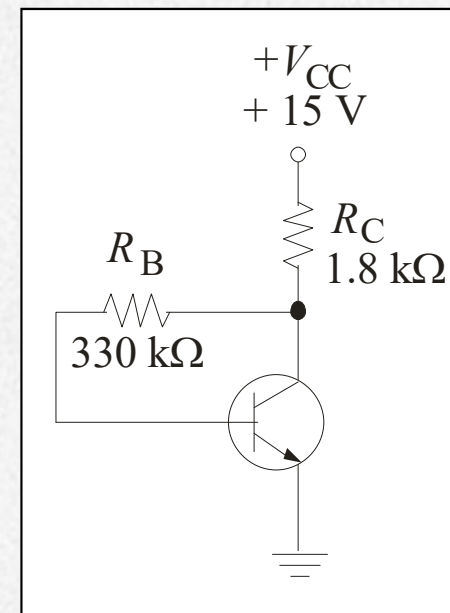
Όταν $\beta = 100$,

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{\beta_{DC}}} = \frac{15 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1.8 \text{ k}\Omega + \frac{330 \text{ k}\Omega}{100}} = 2.80 \text{ mA}$$

Όταν $\beta = 300$,

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{\beta_{DC}}} = \frac{15 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1.8 \text{ k}\Omega + \frac{330 \text{ k}\Omega}{300}} = 4.93 \text{ mA}$$

$$\% \Delta I_C = 76\%$$



Παράδειγμα πόλωσης 1

Να σχεδιαστεί το παρακάτω κύκλωμα έτσι ώστε στον εκπομπό να έχουμε ρεύμα 1 mA και στο συλλέκτη τάση +5 V. Το τρανζίστορ έχει τιμή $\beta = 100$. Ωστόσο, η τιμή του β μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 50 και 150. Η σχεδιάσή μας πρέπει να εξασφαλίζει ότι η ζητούμενη τιμή του ρεύματος εκπομπού θα λαμβάνεται για $\beta = 100$, αλλά για τις ακραίες τιμές του β δεν θα μεταβάλλεται περισσότερο από 10%. Βρείτε τις τιμές των R_B , R_E και R_C . Ποια είναι η αναμενόμενη περιοχή διακύμανσης του ρεύματος και της τάσης συλλέκτη που αντιστοιχούν στην πλήρη κλίμακα τιμών του β ;

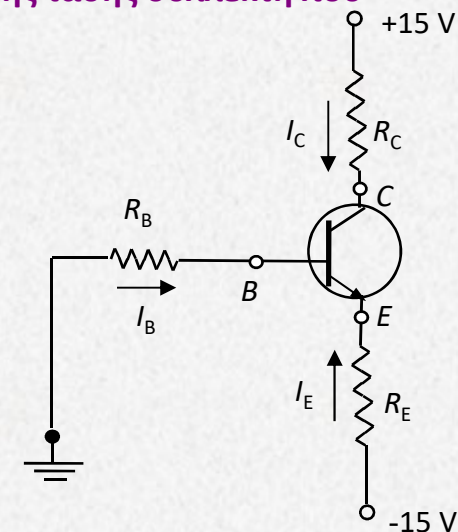
Γνωρίζουμε ότι $\beta=100$, $I_E = 1 \text{ mA}$ και $V_C = 5 \text{ V}$. Άρα έχουμε:

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1} = \frac{100}{101} = 0.99 \quad I_C = -\alpha I_E = 0.99 \text{ mA} = \beta I_B$$

$$R_C = \frac{15 - V_C}{I_C} = \frac{15 - 5}{0.99} = 10.1 \text{ k}\Omega \cong 10 \text{ k}\Omega$$

$$I_E = \frac{0.7 - 15}{R_E + \frac{R_B}{\beta+1}} \Rightarrow R_E + \frac{R_B}{\beta+1} = 14.3 \text{ k}\Omega \quad (1)$$

$$-0.9 = \frac{-14.3}{R_E + \frac{R_B}{51}} \Rightarrow R_E + \frac{R_B}{51} = 15.89 \text{ k}\Omega \quad (2)$$



Καθώς το β μεταβάλλεται από 50 έως 150, θέλουμε το I_E να μεταβάλλεται $\pm 10\%$ γύρω από το 1 mA. Η μεγαλύτερη μεταβολή στο I_E συμβαίνει όταν $\beta=50$ και όχι όταν $\beta=150$, γιατί στη μεταβολή του β από 100 σε 50 το I_B διπλασιάζεται ενώ στη μεταβολή του β από 100 σε 150 το I_B μειώνεται και έχει τα 2/3 της τιμής που έχει για $\beta=100$. Έτσι, το όριο $\pm 10\%$ τίθεται για $\beta=50$.

Να σημειωθεί ότι το I_E μεταβάλλεται κατά -10% και γίνεται 0.9 mA γιατί η ποσότητα $R_E + [(R_B/(\beta+1))]$ αυξάνεται όταν μειώνεται το β , οπότε επειδή αυτή η ποσότητα βρίσκεται στον παρονομαστή στη σχέση, η τιμή του κλάσματος άρα και του I_E μειώνεται.

Παράδειγμα πόλωσης 1

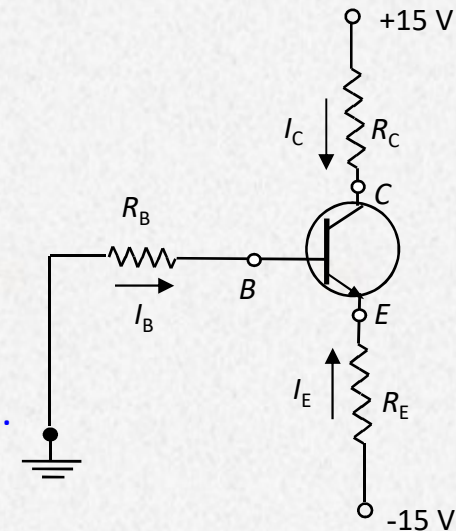
Αφαιρώντας από την (2) την (1) έχουμε:

$$(2) - (1) \Rightarrow R_B \left(\frac{1}{51} - \frac{1}{101} \right) = 1.59 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_B = 163.8 \text{ k}\Omega \cong 165 \text{ k}\Omega$$

Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στην (1) έχουμε $R_E = 12.7 \text{ k}\Omega \approx 13 \text{ k}\Omega$.
Οι ακραίες τιμές των I_C και V_C που είναι:

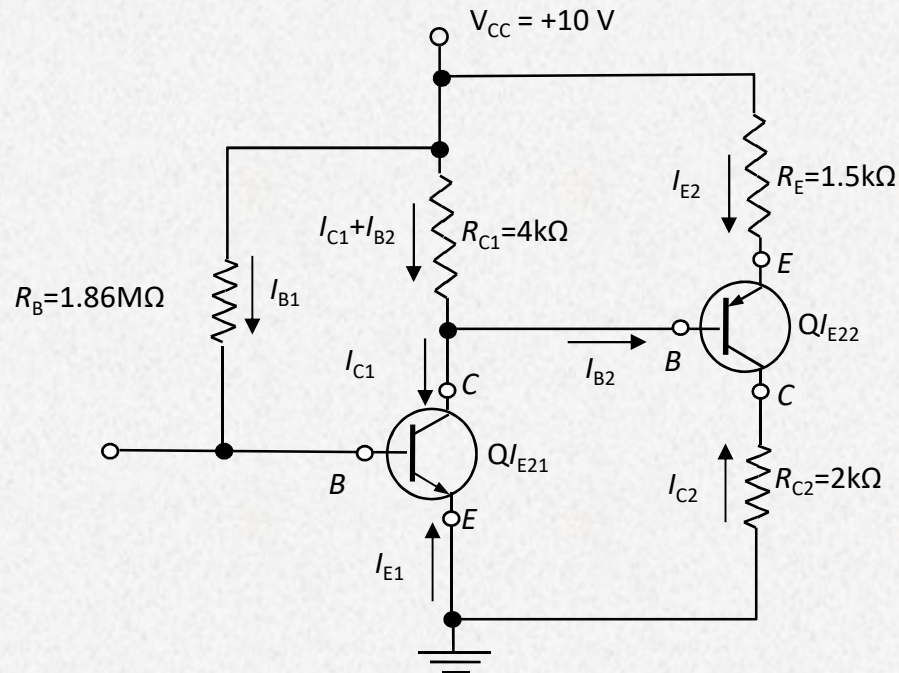
$$\text{Για } \beta=50: \alpha=50/51=0.98, \quad I_C = -\alpha \cdot I_E = (-0.98) \cdot (-0.9) \text{ mA} = 0.88 \text{ mA}, \\ V_C = 15\text{V} - 10\text{k}\Omega \cdot 0.88\text{mA} = 6.176\text{V}.$$

$$\text{Για } \beta=150: \alpha=150/151=0.993, \quad I_C = -\alpha \cdot I_E = (-0.993) \cdot (-1.1) \text{ mA} = 1.092 \text{ mA}, \\ V_C = 15\text{V} - 10\text{k}\Omega \cdot 1.092\text{mA} = 4.077\text{V}.$$



Παράδειγμα πόλωσης 2

Για τον ενισχυτή του σχήματος να προσδιορισθεί το σημείο λειτουργίας, εάν $\beta = 200$ και $|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$.
Θεωρήστε ότι $\beta \gg 1$ όπου χρειαστεί.

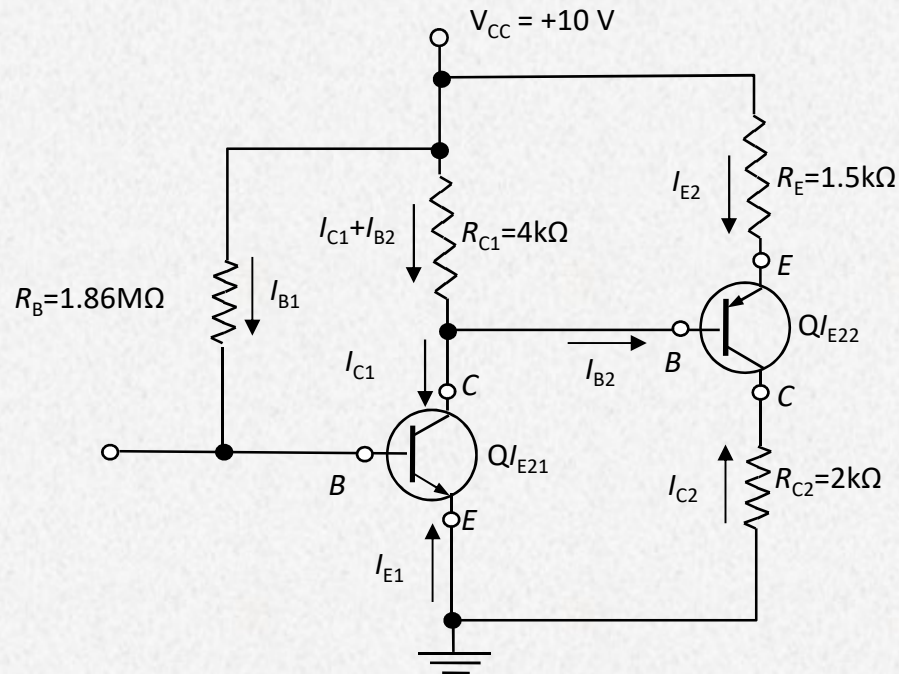


$$V_{CC} = I_{B1} R_B + V_{BE1} \Rightarrow I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_B} = \frac{10\text{V} - 0.7\text{V}}{1.86 \text{ M}\Omega} = 5\mu\text{A}$$

$$I_{C1} = \beta I_{B1} \Rightarrow I_{C1} = 200 \times 5\mu\text{A} = 1\text{mA}$$

$$V_{CC} = (I_{C1} + I_{B2}) R_{C1} + V_{CE1} \cong I_{C1} R_{C1} + V_{CE1} \Rightarrow V_{CE1} = V_{CC} - I_{C1} R_{C1} = 10 - 1 \times 4 = 6\text{V}$$

Παράδειγμα πόλωσης 2



$$\beta \gg 1 \Rightarrow \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \cong 1$$

$$V_{CC} \cong -I_{C2}R_E + V_{EB2} + V_{CE1} \Rightarrow I_{C2} = -\frac{V_{CC} - V_{EB2} - V_{CE1}}{R_E} = -\frac{10 - 0.7 - 6}{1.5} = -2.2 \text{ mA}$$

$$V_{CC} \cong -I_{C2}(R_{C2} + R_E) - V_{CE2} \Rightarrow V_{CE2} = -V_{CC} - I_{C2}(R_{C2} + R_E) = -10 - (-2.2)(2 + 1.5) = -2.3 \text{ V}$$

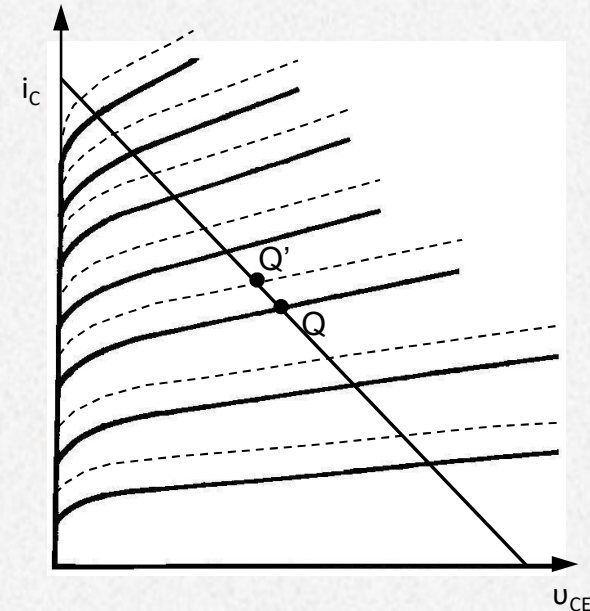
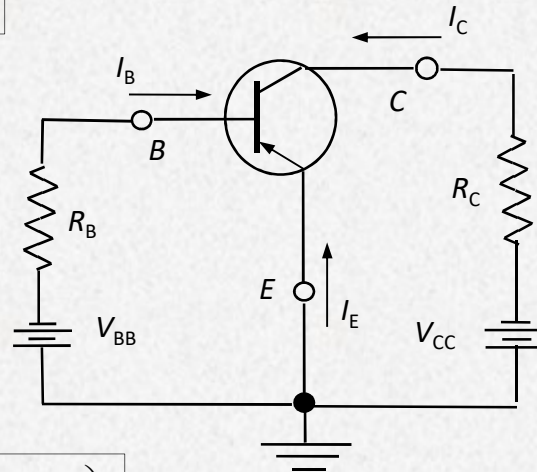
Επίδραση Θερμοκρασίας

Στο τρανζίστορ η θερμοκρασία των ενώσεων δεν επιτρέπεται να υπερβεί τους 100°C για το γερμάνιο και τους 200°C για το πυρίτιο, η δε θερμοκρασία περιβάλλοντος τους 60°C και 80°C αντίστοιχα.

$$I_C = \beta I_B + I_{CO}(\beta + 1)$$

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

$$I_C = \beta \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} + (\beta + 1) I_{CO}$$



$$I_C = I_C(\beta, V_{BE}, I_{CO}, V_{BB}, R_B)$$

Αποδεικνύεται ότι ο σημαντικότερος παράγοντας για τη μεταβολή του I_C είναι η μεταβολή του I_{CO} με τη θερμοκρασία και για το λόγο αυτό θα επικεντρωθούμε στη μελέτη της εξάρτησης από αυτήν μόνο την παράμετρο.

Αντιστάθμιση

Ορίζεται ο συντελεστής σταθερότητας S_I :

$$S_I = \frac{dI_C}{dI_{CO}} = \beta \frac{dI_B}{dI_{CO}} + (1 + \beta)$$

Αν αντικαταστήσουμε το $dI_{CO} = dI_C / S_I$

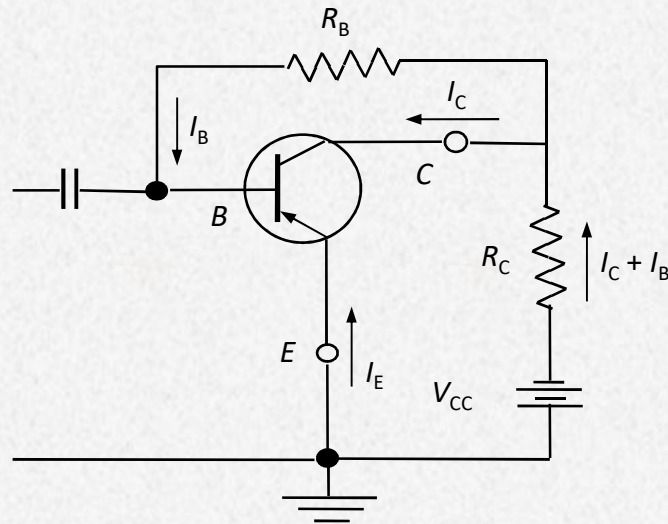
$$S_I = \frac{1 + \beta}{1 - \beta \left(\frac{dI_B}{dI_C} \right)}$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε το S_I για οποιοδήποτε κύκλωμα, αρκεί να γνωρίζουμε γι' αυτό τη συνάρτηση $I_B = f(I_C)$.

Έχουν εφαρμοστεί πολλά κυκλώματα για να επιτευχθεί αντιστάθμιση της θερμοκρασιακής εξάρτησης, δηλαδή κυκλώματα με τη σύνδεση των οποίων επιδιώκεται η μείωση του συντελεστή αυτού όσο το δυνατόν περισσότερο. Με τα κυκλώματα αυτά δημιουργείται μια εξάρτηση του ρεύματος πόλωσης βάσης I_B από το ρεύμα του συλλέκτη I_C και έτσι μια μεταβολή του τελευταίου λόγω θερμοκρασίας αντισταθμίζεται από αντίθετη μεταβολή του πρώτου.

Ο συντελεστής S_I κυμαίνεται από την μέγιστη τιμή $S_I = \beta + 1$ (χειρίστη) έως την ελάχιστη τιμή $S_I = 1$ (βέλτιστη).

Αντιστάθμιση με αντίσταση βάσης - συλλέκτη



$$V_{CC} = R_C(I_C + I_B) + R_B I_B + V_{BE}$$

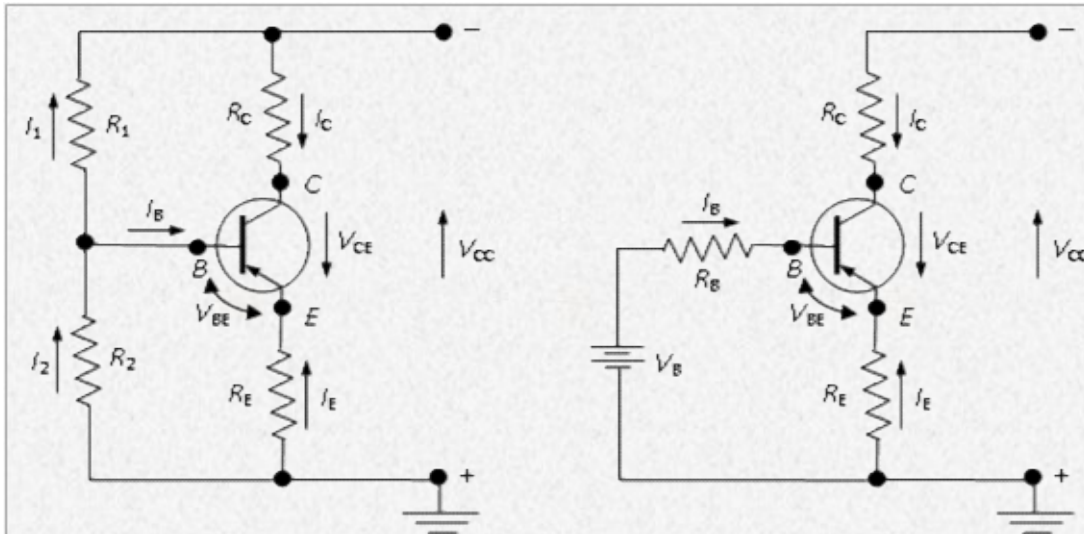
$$I_B = \frac{V_{CC} - I_C R_C - V_{BE}}{R_C + R_B}$$

$$\frac{dI_B}{dI_C} = -\frac{R_C}{R_C + R_B}$$

$$S_I = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \frac{R_C}{R_C + R_B}}$$

Στο παραπάνω κύκλωμα η δυνατότητα μείωσης του S_I είναι περιορισμένη επειδή οι τιμές R_C και R_B καθορίζονται με άλλα κριτήρια, όπως η R_C σαν αντίσταση φορτίου και η R_B σαν αντίσταση πόλωσης.

Αντιστάθμιση και αυτοπόλωση με αντίσταση εκπομπού



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

$$V_B = I_B R_B + V_{BE} - I_E R_E$$

$$-I_E = I_C + I_B$$

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE} - I_C R_E}{R_B + R_E}$$

$$\frac{dI_B}{dI_C} = -\frac{R_E}{R_B + R_E}$$

Από την τελική σχέση φαίνεται ότι είναι δυνατή οποιαδήποτε τιμή της S_I αρκεί να διαλέξουμε κατάλληλα την τιμή του λόγου R_B/R_E . Όσο μικρότερη είναι η τιμή της R_B δηλαδή των δύο αντιστάσεων R_1 και R_2 παράλληλα, τόσο η τιμή της S_I τείνει στη μονάδα και βελτιώνεται η σταθερότητα του κυκλώματος. Από την άλλη όμως μεριά η εκλογή πολύ μικρών τιμών για τις αντιστάσεις R_1 και R_2 σημαίνει μεγάλη κατανάλωση ρεύματος αφού αυτές συνδέονται κατευθείαν στην πηγή V_{CC} . Η συνηθισμένη τιμή για το συντελεστή S_I στα κυκλώματα για συνηθισμένη χρήση είναι μεταξύ 5 και 10.

$$S_I = \frac{1 + R_B/R_E}{1 + \frac{R_B/R_E}{1 + \beta}}$$

Παράδειγμα αντιστάθμισης 1

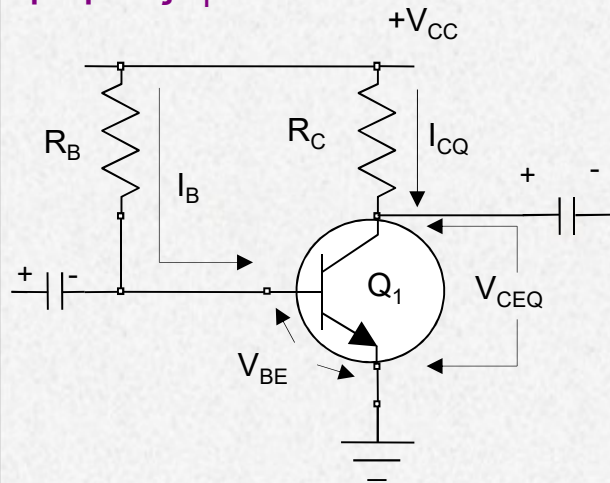
Στο κύκλωμα του σχήματος δίδονται: η τάση τροφοδοσίας $V_{CC}=24V$ και το β του transistor που είναι ίσο με 50. Το transistor είναι Ge (γερμανίου).

Ζητούνται:

α) Να υπολογιστούν οι τιμές των αντιστάσεων R_B και R_C έτσι ώστε οι συντεταγμένες του σημείου λειτουργίας να ορίζονται από τα : $I_{CQ}=10mA$ και $V_{CEQ}=8V$.

β) Να τροποποιηθεί κατάλληλα το κύκλωμα έτσι ώστε να γίνει θερμικά σταθερότερο και να υπολογιστούν για τις ίδιες συντεταγμένες του σημείου ηρεμίας ($I_{CQ}=10mA$, $V_{CEQ}=8V$) οι τιμές των νέων στοιχείων που τυχόν θα αντικατασταθούν ή θα προστεθούν στο νέο κύκλωμα.

γ) Να υπολογιστεί και για τα δύο κυκλώματα – αρχικό και τροποποιημένο – ο συντελεστής σταθερότητας ρεύματος S_I .



Κύκλωμα Εξόδου: $V_{CC} = I_{CQ}R_C + V_{CEQ}$

$$R_C = \frac{(V_{CC} - V_{CEQ})}{I_{CQ}} = \frac{(24 - 8)V}{10 \times 10^{-3}A} = 1,6 \times 10^3 \Omega = 1,6K\Omega$$

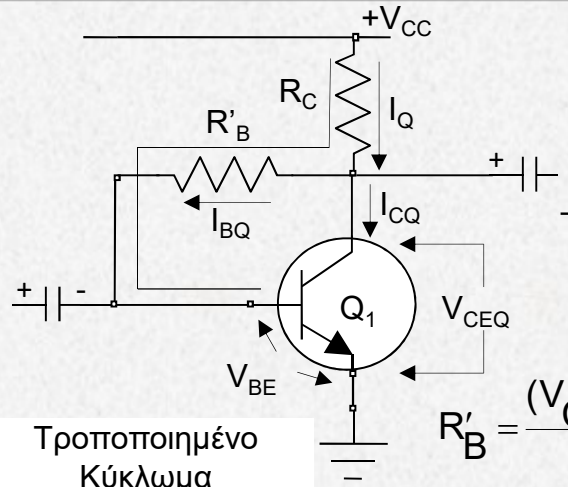
Κύκλωμα Εισόδου: $V_{CC} = I_{BQ}R_B + V_{BE}$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \Rightarrow I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{10 \times 10^{-3}A}{50} = 0,2mA$$

Λύνοντας ως προς R_B έχουμε:

$$R_B = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{I_{BQ}} = \frac{(24 - 0,2)V}{0,2 \times 10^{-3}A} = 119K\Omega$$

Παράδειγμα αντιστάθμισης 1



Κύκλωμα Εισόδου: $V_{CC} = (I_{BQ} + I_{CQ})R_C + I_{BQ}R'_B + V_{BE}$

Λύνοντας ως προς R'_B έχουμε:

$$R'_B = \frac{(V_{CC} - V_{BE}) - (I_{CQ} + I_{BQ})R_C}{I_{BQ}} = \frac{(24 - 0,2)V - [(10 + 0,2) \times 10^{-3}]A \times 1,6 \times 10^3 \Omega}{0,2 \times 10^{-3}A}$$

και $R'_B = 37,4K\Omega$

Συντελεστής Σταθερότητας ρεύματος S_1

$$I_{BQ}(R'_B + R_C) = V_{CC} - V_{BE} - I_{CQ}R_C \Rightarrow I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - I_{CQ}R_C}{R'_B + R_C} \Rightarrow \frac{dI_{BQ}}{dI_{CQ}} = -\frac{R_C}{R_C + R'_B}$$

Αρχικό κύκλωμα

$$S_0 = (1 + \beta)$$

Τροποποιημένο κύκλωμα

$$S_1 = \frac{1 + \beta}{1 - \beta \frac{dI_{BQ}}{dI_{CQ}}} = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \frac{R_C}{R_C + R'_B}}$$

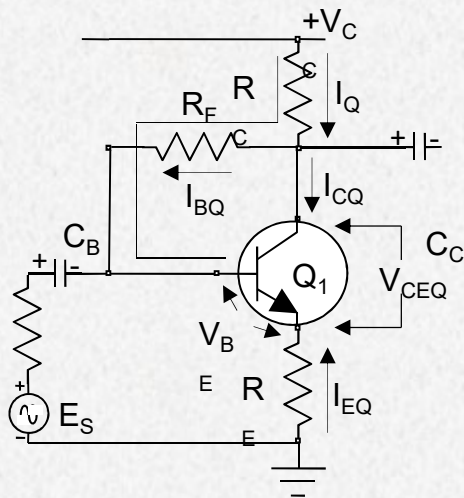
Αντικαθιστώντας τιμές στις παραπάνω σχέσεις βρίσκουμε αντίστοιχες τιμές $S_0=51$ και $S_1=16,7$.

Παράδειγμα αντιστάθμισης 2

Στο κύκλωμα του σχήματος δίδονται: η τάση τροφοδοσίας $V_{CC}=12V$ και το β του transistor που είναι ίσο με 100. Το transistor είναι Si (πυριτίου). Δίδονται επίσης οι τιμές των αντιστάσεων $R_C=10K\Omega$, $R_F=200K\Omega$ και $R_E=100\Omega$. Ζητούνται:

α) το σημείο ηρεμίας : I_{CQ} , V_{CEQ}

β) ο συντελεστής σταθερότητας ρεύματος $S=dI_C/dI_{CQ}$



Κύκλωμα Εισόδου: $V_{CC} = (I_{CQ} + I_{BQ})R_C + I_{BQ}R_F + V_{BE} - I_{EQ}R_E$

$$I_{EQ} = -(I_{CQ} + I_{BQ}) \quad I_{CQ} = \beta I_{BQ} \quad I_{EQ} = -(1 + \beta)I_{BQ}$$

$$V_{CC} - V_{BE} = (1 + \beta)I_{BQ}R_C + I_{BQ}R_F + (1 + \beta)I_{BQ}R_E \Rightarrow$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{[(1 + \beta)(R_E + R_C) + R_F]} = \frac{(12 - 0,7)V}{1220,1 \times 10^3 \Omega} = 9,26 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 100 \times 9,26 \times 10^{-6} = 0,926 mA$$

Κύκλωμα Εξόδου: $V_{CC} = (I_{CQ} + I_{BQ})R_C + V_{CEQ} - I_{EQ}R_E$

$$V_{CC} = (I_{BQ} + I_{CQ})R_C + V_{CEQ} + (I_{BQ} + I_{CQ})R_E = (I_{BQ} + \beta I_{BQ})R_C + V_{CEQ} + (I_{BQ} + \beta I_{BQ})R_E \Rightarrow$$

$$V_{CC} = (1 + \beta)(R_C + R_E)I_{BQ} + V_{CEQ}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - (1 + \beta)(R_C + R_E)I_{BQ} = 12 - 1020,1 \times 10^3 \times 9,26 \times 10^{-6} = 2,55V$$

Άρα το σημείο λειτουργίας του κυκλώματος έχει συντεταγμένες $I_{CQ}=0,926mA$ και $V_{CEQ}=2,55V$.

Παράδειγμα αντιστάθμισης 2

Συντελεστής Σταθερότητας ρεύματος S_I

$$S_I = \frac{1 + \beta}{1 - \beta \left(\frac{dI_B}{dI_C} \right)}$$

$$V_{CC} = (I_{CQ} + I_{BQ})R_C + I_{BQ}R_F + V_{BE} - I_{EQ}R_E$$

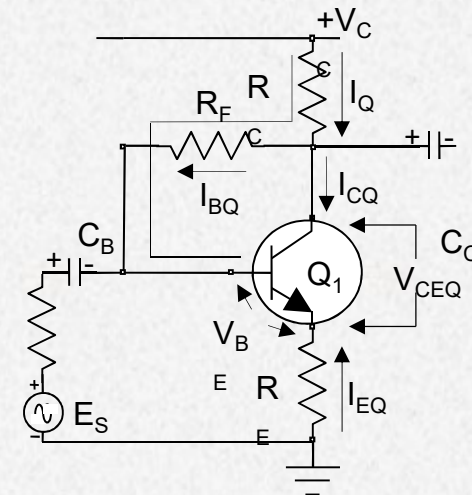
$$V_{CC} = (I_{CQ} + I_{BQ})R_C + I_{BQ}R_F + V_{BE} + (I_{CQ} + I_{BQ})R_E \Rightarrow (V_{CC} - V_{BE}) = (R_C + R_F + R_E)I_{BQ} + (R_C + R_E)I_{CQ}$$

Λύνοντας ως προς I_{BQ} :

$$I_{BQ} = \frac{(V_{CC} - V_{BE}) - (R_C + R_E)I_{CQ}}{(R_C + R_F + R_E)}$$

$$\frac{dI_B}{dI_C} = - \frac{(R_C + R_E)}{(R_C + R_F + R_E)}$$

$$S_I = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \frac{(R_C + R_E)}{(R_C + R_F + R_E)}} = \frac{101}{1 + 100 \frac{10100}{210100}} = 17,4$$

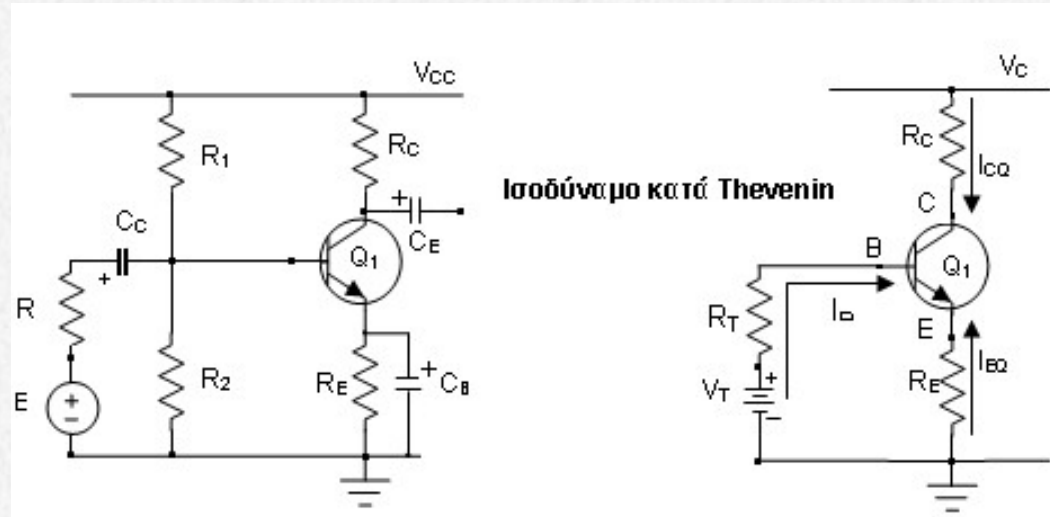


Παράδειγμα αντιστάθμισης 3

Στο κύκλωμα του σχήματος δίδονται: η τάση τροφοδοσίας $V_{CC}=15V$ και το β του transistor που είναι ίσο με 40. Το transistor είναι Si. Δίδονται επίσης οι τιμές των αντιστάσεων $R_C=1,2K\Omega$, $R_E=1K\Omega$, $R_1=30K\Omega$ και $R_2=15K\Omega$.

Ζητούνται:

- α) το σημείο ηρεμίας : I_{CQ} , V_{CEQ}
 β) ο συντελεστής σταθερότητας ρεύματος $S_I = dI_C/dI_{CQ}$.



Κύκλωμα Εισόδου:

$$I_{EQ} = -(I_{CQ} + I_{BQ}) \quad I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$I_{EQ} = -(1 + \beta) I_{BQ}$$

$$V_{Th} = I_{BQ} R_{Th} + V_{BE} - I_{EQ} R_E = I_{BQ} R_{Th} + V_{BE} + (1 + \beta) I_{BQ} R_E = V_{BE} + [R_{Th} + (1 + \beta) R_E] I_{BQ}$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{[R_{Th} + (1 + \beta) R_E]} = \frac{(5 - 0,7)V}{(10 + 41 \times 1) \times 10^3 \Omega} = \frac{4,3V}{51 \times 10^3 \Omega} = 0,0843 \times 10^{-3} A = 84,3 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 40 \times 84,3 \mu A = 3372 \times 10^{-6} A = 3,372 mA$$

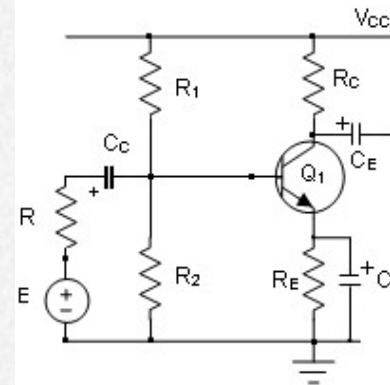
$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(30 \times 15) \times 10^6}{(30 + 15) \times 10^3} = \frac{450 \times 10^3}{45} = 10 K\Omega$$

$$V_{Th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15V \frac{15 \times 10^3 \Omega}{(30 + 15) \times 10^3 \Omega} = \frac{225}{45} V = 5V$$

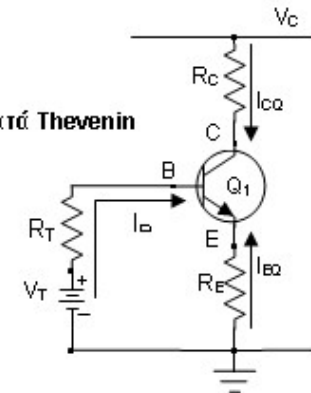
Παράδειγμα αντιστάθμισης 3

Κύκλωμα Εξόδου:

$$V_{CC} = I_{CQ} R_C + V_{CEQ} - I_{EQ} R_E$$



Ισοδύναμο κατά Thevenin



$$V_{CC} = I_{CQ} R_C + V_{CEQ} + (I_{CQ} + I_{BQ}) R_E = V_{CEQ} + [I_{CQ} (R_C + R_E) + I_{BQ} R_E]$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - [I_{CQ} (R_C + R_E) + I_{BQ} R_E] = 15V - [3,372 \times 10^{-3} A \cdot (2,2 \times 10^3) \Omega + 84,3 \times 10^{-6} A \cdot 1 \times 10^3 \Omega] = 15V - (7,4184 + 0,0843)V \Rightarrow V_{CEQ} = 7,5V$$

Συντελεστής Σταθερότητας ρεύματος S_I

$$S_I = \frac{1 + \beta}{1 - \beta \left(\frac{dI_B}{dI_C} \right)}$$

$$V_{Th} = I_{BQ} R_{Th} + V_{BE} + (I_{CQ} + I_{BQ}) R_E \Rightarrow (V_{Th} - V_{BE}) = I_{BQ} (R_{Th} + R_E) + I_{CQ} R_E$$

$$I_{BQ} = \frac{(V_{Th} - V_{BE}) - I_{CQ} R_E}{(R_{Th} + R_E)}$$

$$\frac{dI_B}{dI_C} = -\frac{R_E}{(R_{Th} + R_E)}$$

$$S_I = \frac{1 + \beta}{1 + \beta \frac{R_E}{(R_{Th} + R_E)}} = \frac{1 + 40}{1 + 40 \frac{1000}{11000}} = 8,84$$