

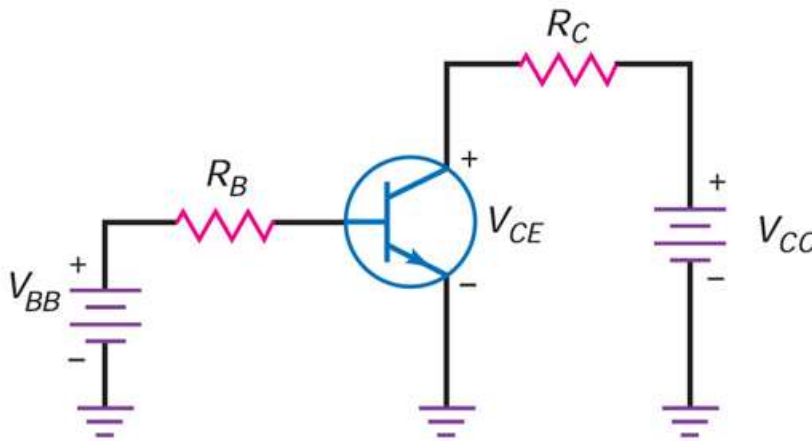


8^ο Φυλλάδιο Ασκήσεων (Διπολικό Τρανζίστορ – Γραμμές φορτίου)

Άσκηση 1 (πόλωση βάσης)

Στο παρακάτω κύκλωμα να βρεθεί το σημείο λειτουργίας Q του τρανζίστορ και να σχεδιαστεί η γραμμή φορτίου;

Δίνονται: $V_{BB} = 10V$, $V_{CC} = 20V$, $R_B = 470K\Omega$, $R_C = 2.2K\Omega$, $\beta = 100$



Λύση

Το σημείο Q θα έχει συντεταγμένες στην I_{CQ} και V_{CEQ} . Δηλαδή ψάχνουμε για το σημείο Q(I_{CQ} , V_{CEQ}). Επομένως πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα συλλέκτη του κυκλώματος και την τάση μεταξύ συλλέκτη εκπομπού, για το συγκεκριμένο κύκλωμα.

Εάν επιχειρήσω να εφαρμόσω 2^ο κΚ στον βρόχο εξόδου (κύκλωμα εξόδου) θα έχει μια εξίσωση με δύο αγνώστους (I_{CQ} , V_{CEQ}). Θα πρέπει να εκμεταλλευτώ και τα δεδομένα του βρόχου εισόδου, να βρω το ρεύμα της βάσης I_B και στην συνέχεια από το κέρδος ρεύματος β να υπολογίσω το ρεύμα συλλέκτη. Επομένως έχουμε:

Από 2^ο κΚ $V_{BB} \rightarrow R_B \rightarrow V_{BE} \rightarrow GND$ (βρόχος εισόδου)

$$V_{BB} - I_B \cdot R_B - V_{BE} = 0 \Rightarrow 10V - 470K\Omega \cdot I_B - 0.7 = 0$$

$$\Rightarrow 9.3V - 470K\Omega \cdot I_B = 0 \Rightarrow I_B = \frac{9.3V}{470K\Omega} = 0.01979mA = 19.79\mu A$$

Το ρεύμα συλλέκτη θα ισούται με το ρεύμα βάσης επί το κέρδος ρεύματος

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 0.01979mA = 1.979mA$$

Για να υπολογίσουμε το V_{CEQ} θα εφαρμόσουμε 2^ο κΚ στον βρόχο εξόδου

Από 2^ο κΚ σε $V_{CE} \rightarrow R_C \rightarrow V_{CC} \rightarrow GND$

$$V_{CEQ} - I_C \cdot R_C - V_{CC} = 0 \quad (1)$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} - 1.979mA \cdot 2.2K\Omega - 20V = 0$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = -4.35V + 20V = 15.65V$$

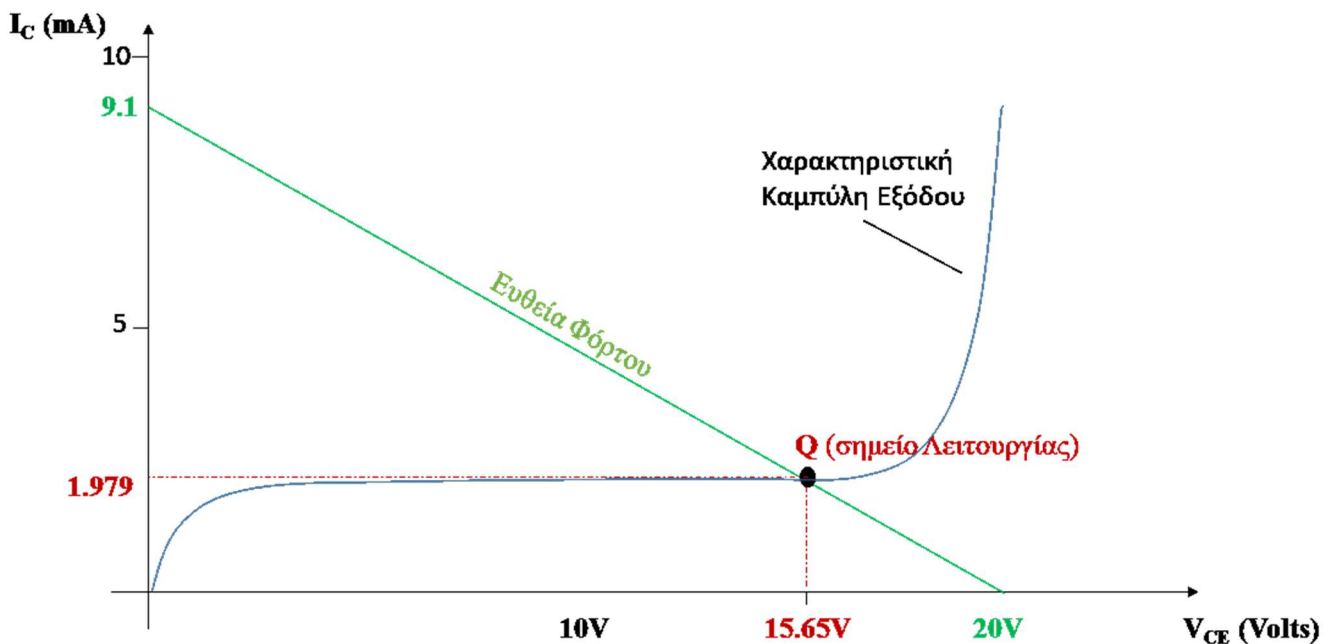
Επομένως το σημείο Q είναι το Q(1.979,15.65)

Για να σχεδιάσουμε την γραμμή φορτίου θα πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα κόρου του συλλέκτη I_{CSat} το οποίο θα λάβουμε μηδενίζοντας στην σχέση (1) το V_{CE} (είναι η τιμή του ρεύματος για την οποία η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των ρευμάτων). Επίσης θα υπολογίσουμε την τάση αποκοπής $V_{CE(cut\ off)}$ η οποία είναι η τιμή της τάσης όπου η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των τάσεων.

$$(1) \xrightarrow{I_C=0} V_{CE(cut\ off)} = V_{CC} - \cancel{I_C R_C} = 20V - 0 = 20V$$

$$(1) \xrightarrow{V_{CE}=0} V_{CC} - I_C R_C + \cancel{V_{CE}} = 0 \Rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{20V}{2.2K\Omega} = 9.1mA$$

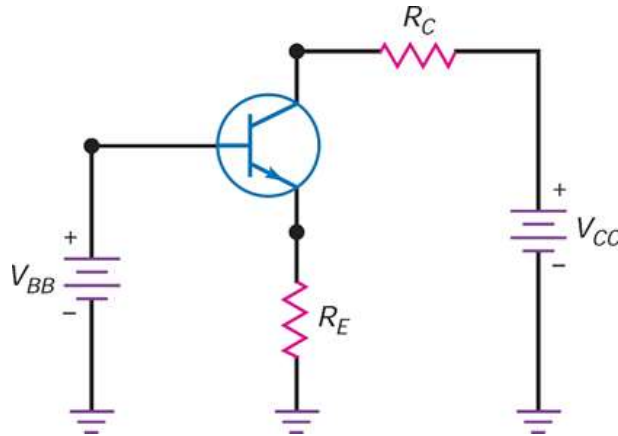
Επομένως η γραμμή φορτίου θα είναι ως εξής:



Άσκηση 2 (πόλωση Εκπομπού)

Στο παρακάτω κύκλωμα να βρεθεί το σημείο λειτουργίας Q του τρανζίστορ και να σχεδιαστεί η γραμμή φορτίου;

Δίνονται: $V_{BB}=10.7V$, $V_{CC}=24V$, $R_E=25K\Omega$, $R_C=5K\Omega$.

**Λύση**

Για να βρούμε το σημείο Q θα πρέπει να υπολογίσουμε το I_C και το V_{CE} . Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει αντίσταση στον κλάδο της βάσης και ως εκ τούτου δεν μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα της βάσης. Θα υπολογίσουμε το ρεύμα στον κλάδο του εκπομπού και θα χρησιμοποιήσουμε την προσέγγιση ότι το ρεύμα συλλέκτη είναι ίσο με του εκπομπού.

Από 2^ο κΚ σε $V_{BB} \rightarrow TR \rightarrow R_E \rightarrow GND$

$$\begin{aligned} V_{BB} - V_{BE} - I_E R_E &= 0 \\ \Rightarrow 10.7V - 0.7V - 25K\Omega \cdot I_E &= 0 \\ \Rightarrow 10V - 25K\Omega \cdot I_E &= 0 \\ \Rightarrow I_E = \frac{10V}{25K\Omega} = 0.4mA \approx I_{CQ} \end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό της V_{CEQ} θα εφαρμόσουμε 2^ο κΚ στον βρόχο εξόδου:

Από 2^ο κΚ σε $V_{CC} \rightarrow R_C \rightarrow TR \rightarrow R_E \rightarrow GND$ έχουμε

$$\begin{aligned} V_{CC} - I_C R_C - V_{CEQ} - I_E R_E &= 0 \\ I_C \approx I_E \Rightarrow V_{CC} - I_C (R_C + R_E) - V_{CEQ} &= 0 \\ \Rightarrow 24V - 0.4mA (5K\Omega + 25K\Omega) - V_{CEQ} &= 0 \\ \Rightarrow V_{CEQ} = 24V - 0.4mA \cdot 30K\Omega = 24V - 12V = 12V \end{aligned}$$

Επομένως Q(12V, 0.4mA)

Για να σχεδιάσουμε την γραμμή φορτίου θα πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα κόρου του συλλέκτη I_{CSat} το οποίο θα λάβουμε μηδενίζοντας στην σχέση (2) το V_{CE} (είναι η τιμή του ρεύματος για την οποία η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των ρευμάτων). Επίσης θα υπολογίσουμε την τάση αποκοπής $V_{CE(cut\ off)}$ η οποία είναι η τιμή της τάσης όπου η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των τάσεων.

$$(2) \stackrel{I_C=0}{\Rightarrow} V_{CC} - \cancel{I_C(R_C + R_E)} - V_{CE(cut\ off)} = 0$$

$$\Rightarrow V_{CC} - V_{CE(cut\ off)} = 0 \Rightarrow V_{CE(cut\ off)} = 24V$$

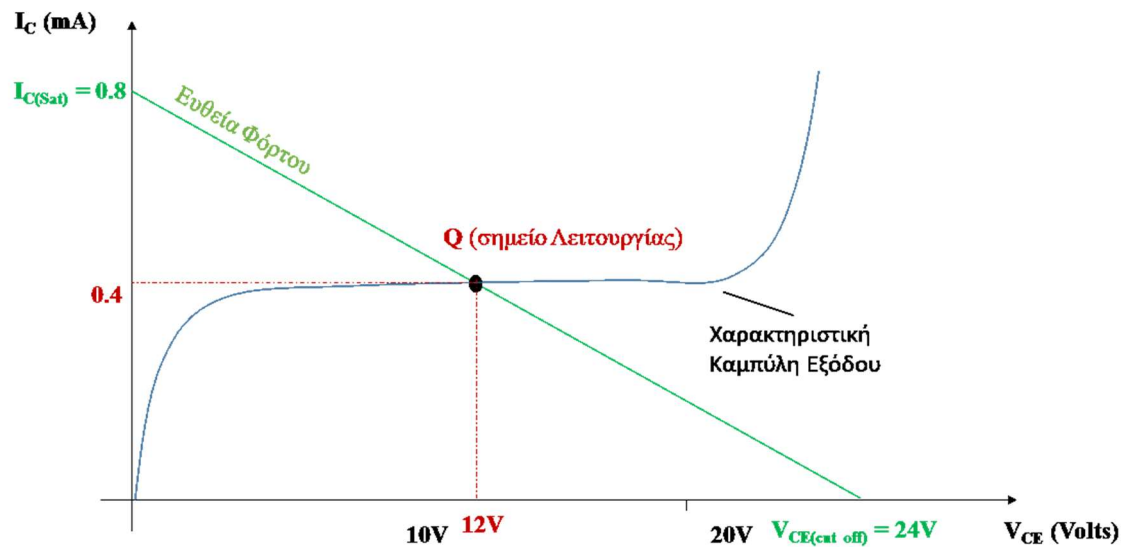
Και

$$(2) \stackrel{V_{CE}=0}{\Rightarrow} V_{CC} - I_C(R_C + R_E) - \cancel{V_{CE}} = 0$$

$$\Rightarrow V_{CC} - I_{Csat}(R_C + R_E) = 0$$

$$\Rightarrow 24V - 30K\Omega \cdot I_{Csat} = 0 \Rightarrow I_{Csat} = \frac{24V}{30K\Omega} = 0.8mA$$

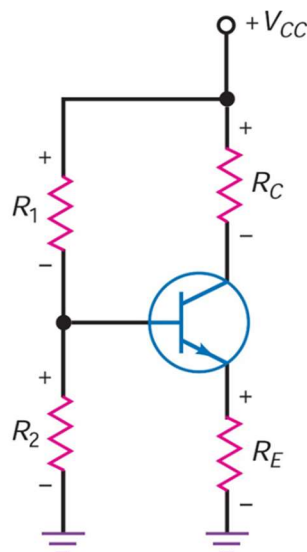
Επομένως η γραμμή φορτίου είναι:



Άσκηση 3 (πόλωση διαιρέτη τάσης)

Στο παρακάτω κύκλωμα να βρεθεί το σημείο λειτουργίας Q του τρανζίστορ και να σχεδιαστεί η γραμμή φορτίου;

Δίνονται: $V_{CC} = 20V$, $R_1 = 18K\Omega$, $R_2 = 2K\Omega$, $R_E = 1K\Omega$, $R_C = 4K\Omega$.



Λύση

Στην περίπτωση της πόλωσης με διαιρέτη τάσης εκμεταλλευόμαστε το αριστερό μέρος του κυκλώματος που είναι ένας διαιρέτης τάσης για να βρούμε το δυναμικό στον κόμβο μεταξύ της R1 και της R2. Ας ονομάσουμε το δυναμικό του σημείου αυτού V_B , μια και θα είναι ίσο και με το δυναμικό της βάσης.

Από τον διαιρέτη τάσης θα έχουμε:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{2K\Omega}{18K\Omega + 2K\Omega} \cdot 20V = \frac{2K\Omega}{20K\Omega} \cdot 20V = 2V$$

Γνωρίζοντας τώρα το δυναμικό στο σημείο αυτό μπορώ να εφαρμόσω 2^ο κΚ από αυτό το σημείο μέχρι την γείωση περνώντας από την δίοδο βάσεις-εκπομπού.

Από 2^ο κΚ στον B $\rightarrow D_{BE} \rightarrow R_E \rightarrow GND$

$$V_B - V_{BE} - I_E R_E = 0 \Rightarrow 2V - 0.7V - 1K\Omega \cdot I_E = 0$$

$$\Rightarrow I_E \approx I_{CQ} = \frac{1.3V}{1K\Omega} = 1.3mA$$

Επομένως υπολογίσαμε το ρεύμα εκπομπού. Πάντα θεωρούμε προσεγγιστικά ότι το ρεύμα συλλέκτη είναι ίσο με το ρεύμα το εκπομπού. Δηλαδή:

$$I_C \approx I_E \quad (1)$$

Από 2^ο κΚ σε $V_{CC} \rightarrow TR \rightarrow R_E \rightarrow GND$

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} - I_E R_E = 0$$

$$\stackrel{(1)}{\Rightarrow} V_{CC} - I_C (R_C + R_E) - V_{CEQ} = 0 \quad (2)$$

$$\Rightarrow 20V - I_C (4K + 1K) - V_{CEQ} = 0$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = 20V - 1.3mA \cdot 5K\Omega = 0$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = 20V - 6.5V = 13.5V$$

Το σημείο Q είναι το Q(13.5V, 1.3mA)

Για να σχεδιάσουμε την γραμμή φορτίου θα πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα κόρου του συλλέκτη I_{CSat} το οποίο θα λάβουμε μηδενίζοντας στην σχέση (2) το V_{CE} (είναι η τιμή του ρεύματος για την οποία η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των ρευμάτων). Επίσης θα υπολογίσουμε την τάση αποκοπής $V_{CE(cut\ off)}$ η οποία είναι η τιμή της τάσης όπου η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των τάσεων.

$$(2) \stackrel{I_C=0}{\Rightarrow} V_{CC} - \cancel{I_C (R_C + R_E)} - V_{CE(cut\ off)} = 0$$

$$\Rightarrow V_{CC} - V_{CE(cut\ off)} = 0 \Rightarrow V_{CE(cut\ off)} = 20V$$

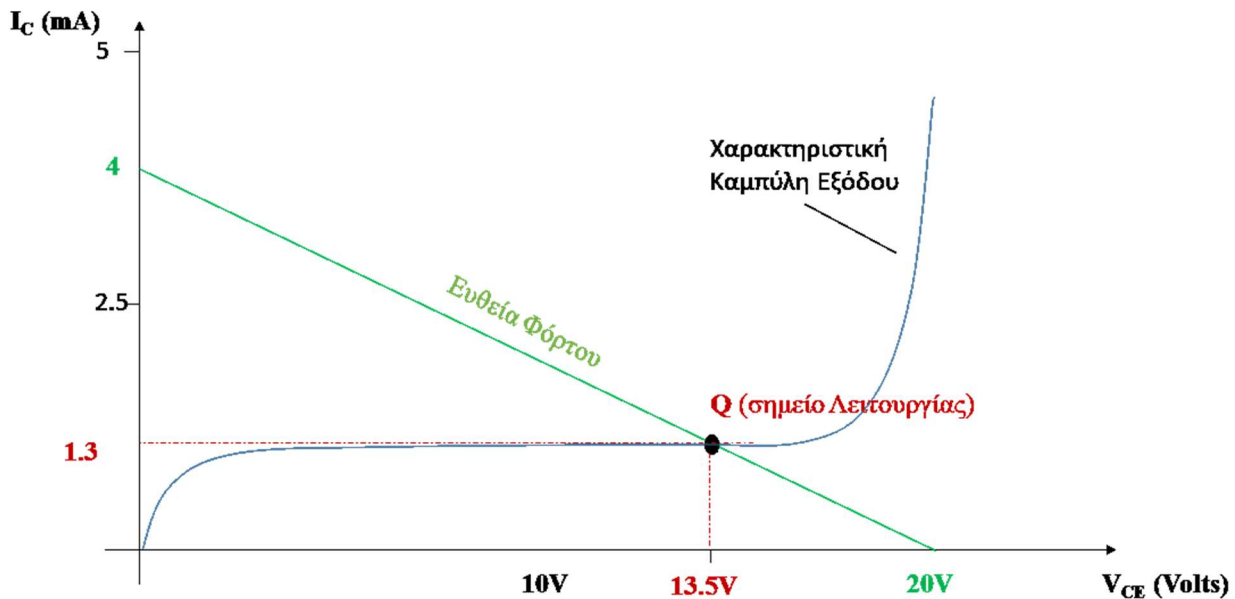
Και

$$(2) \stackrel{V_{CE}=0}{\Rightarrow} V_{CC} - I_C (R_C + R_E) - \cancel{V_{CE}} = 0$$

$$\Rightarrow V_{CC} - I_{Csat} (R_C + R_E) = 0$$

$$\Rightarrow 20V - 5K\Omega \cdot I_{Csat} = 0 \Rightarrow I_{Csat} = \frac{20V}{5K\Omega} = 4mA$$

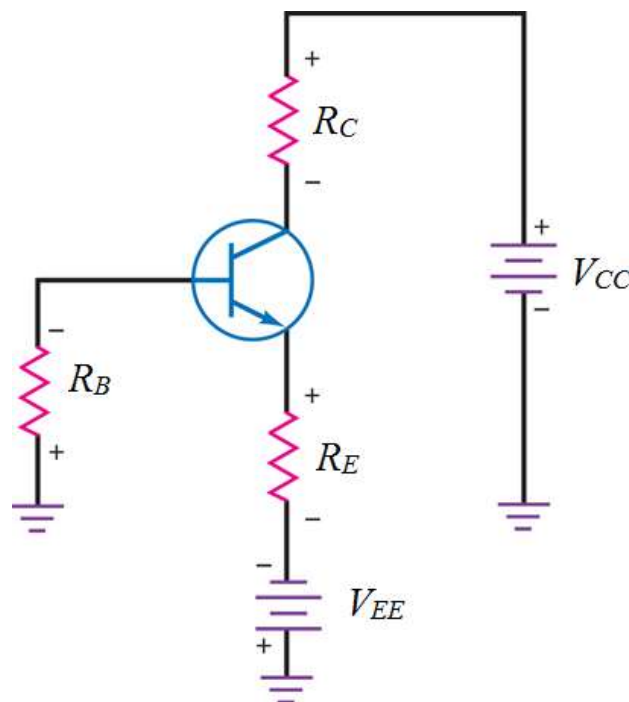
Επομένως η γραμμή φορτίου είναι:



Άσκηση 4 (Πόλωση εκπομπού διπλής τροφοδοσίας)

Στο παρακάτω κύκλωμα να βρεθεί το σημείο λειτουργίας Q του τρανζίστορ και να σχεδιαστεί η γραμμή φορτίου;

Δίνονται: $V_{EE} = 10$ V, $V_{CC} = 10$ V, $R_C = 4.7$ K Ω , $R_B = 100$ K Ω , $R_E = 10$ K Ω .



Λύση

Θυμηθείτε από την θεωρία/μεθοδολογία ότι το κύκλωμα διπλής τροφοδοσίας είναι ένα κύκλωμα χωρίς πηγή στον κλάδο της βάσης και μπορούμε να θεωρήσουμε το ρεύμα βάσης αμελητέο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω θα εφαρμόσουμε 2^ο κΚ στον βρόχο εισόδου για να υπολογίσουμε το ρεύμα εκπομπού I_E .

Από 2^ο κΚ στον $R_B \rightarrow V_{BE} \rightarrow R_E \rightarrow V_{EE} \rightarrow \text{GND}$

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

I_B αμελητέο

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

$$\Rightarrow -0.7 - 10K\Omega \cdot I_E + 10V = 0$$

$$\Rightarrow 9.3V - 10K\Omega \cdot I_E = 0$$

$$\Rightarrow I_E = \frac{9.3V}{10K\Omega} = 0.93mA \approx I_{CQ}$$

Για τον υπολογισμό του της τάσης μεταξύ συλλέκτη εκπομπού V_{CEQ} εφαρμόζω 2^ο κΚ στον βρόχο εξόδου

Από 2^ο κΚ σε $V_{CC} \rightarrow R_C \rightarrow TR \rightarrow R_E \rightarrow GND$

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CEQ} - I_E R_E + V_{EE} = 0$$

$I_C \approx I_E$

$$\Rightarrow V_{CC} - V_{CEQ} - I_C (R_C + R_E) + V_{EE} = 0 \quad (2)$$

$$\Rightarrow 10V - V_{CEQ} - 0.93mA (4.7K\Omega + 10K\Omega) + 10V = 0$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = 20V - 0.93mA (4.7K\Omega + 10K\Omega) = 20V - 13.67V = 6.33V$$

Άρα το σημείο λειτουργίας είναι το Q(6.33V, 0.93mA)

Για να σχεδιάσουμε την γραμμή φορτίου θα πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα κόρου του συλλέκτη I_{CSat} το οποίο θα λάβουμε μηδενίζοντας στην σχέση (2) το V_{CE} (είναι η τιμή του ρεύματος για την οποία η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των ρευμάτων). Επίσης θα υπολογίσουμε την τάση αποκοπής $V_{CE(cut\ off)}$ η οποία είναι η τιμή της τάσης όπου η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των τάσεων.

$$(2) \xrightarrow{I_C=0} V_{CC} - \cancel{I_C (R_C + R_E)} - V_{CE(cut\ off)} + V_{EE} = 0$$

$$\Rightarrow V_{CC} - V_{CE(cut\ off)} + V_{EE} = 0 \Rightarrow V_{CE(cut\ off)} = 20V$$

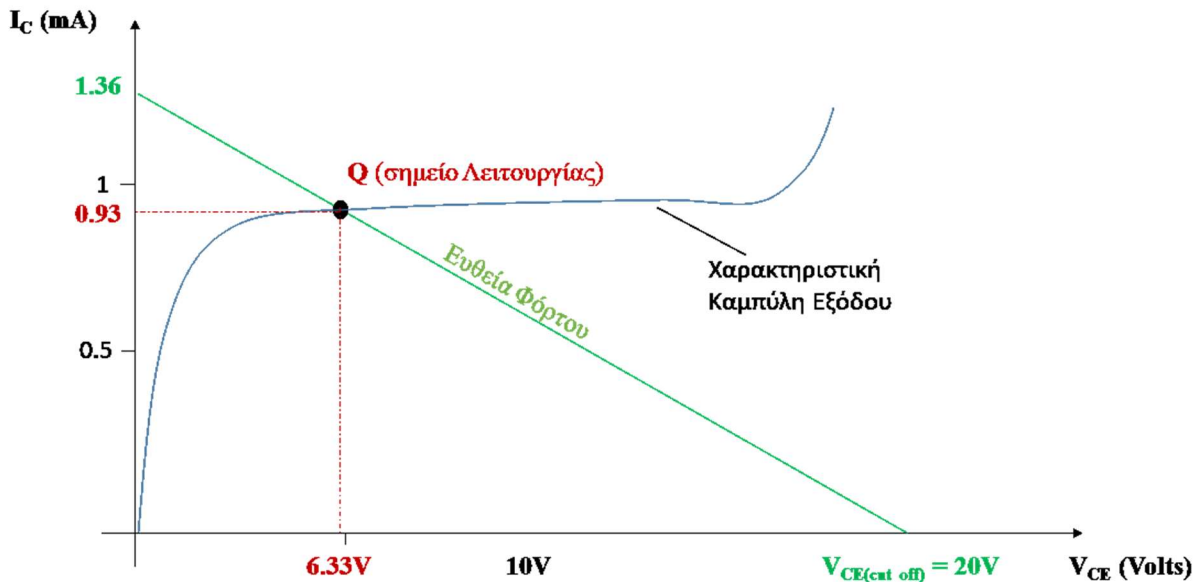
Και

$$(2) \xrightarrow{V_{CE}=0} V_{CC} - I_C (R_C + R_E) - \cancel{V_{CE}} + V_{EE} = 0$$

$$\Rightarrow V_{CC} - I_{Csat} (R_C + R_E) + V_{EE} = 0$$

$$\Rightarrow 20V - 14.7K\Omega \cdot I_{Csat} = 0 \Rightarrow I_{Csat} = \frac{20V}{14.7K\Omega} = 1.36mA$$

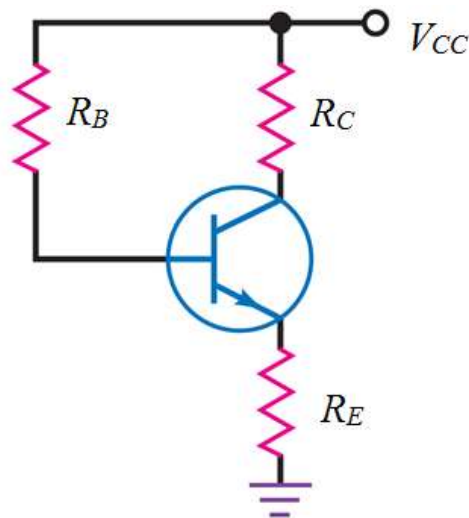
Επομένως η γραμμή φορτίου είναι:



Άσκηση 5 (Πόλωση με ανάδραση από τον εκπομπό)

Στο παρακάτω κύκλωμα να βρεθεί το σημείο λειτουργίας Q του τρανζίστορ και να σχεδιαστεί η γραμμή φορτίου;

Δίνονται: $V_{CC} = 30V$, $R_B = 1M\Omega$, $R_C = 2K\Omega$, $R_E = 500\Omega$, $\beta = 100$.



Λύση

Ως γνωστών το ρεύμα συλλέκτη I_C είναι ίσο με το κέρδος ρεύματος β επί το ρεύμα της βάσης I_B . Επομένως ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$I_E \approx I_C = \beta \cdot I_B \quad (1)$$

Στο κύκλωμα της άσκησης μπορώ να εφαρμόσω 2° κΚ από την πηγή V_{CC} έως και την γείωση του εκπομπού περνώντας από την βάση. Θεωρούμε όπως πάντα ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή και άρα μπορούμε να θέσουμε την τάση $V_{BE} = 0.7V$ και να ισχύει η τιμή του β .

Από 2° κΚ σε $V_{CC} \rightarrow R_B \rightarrow TR \rightarrow R_E \rightarrow GND$

$$\begin{aligned}
V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E &= 0 \\
\stackrel{(1)}{\Rightarrow} V_{CC} - V_{BE} - I_B R_B - \beta I_B R_E &= 0 \\
\Rightarrow V_{CC} - V_{BE} - I_B (R_B + \beta R_E) &= 0 \\
\Rightarrow 29.3V - I_B (1M\Omega + 100 \cdot 500\Omega) &= 0 \\
\Rightarrow 29.3V - 1.05M\Omega \cdot I_B &= 0 \\
\Rightarrow I_B = \frac{29.3V}{1.05M\Omega} &= 27.9\mu A
\end{aligned}$$

Ρεύμα συλλέκτη από την σχέση (1) θα είναι:

$$(1) \Rightarrow I_{CQ} = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 27.9\mu A = 2.79mA$$

Θα εφαρμόσουμε 2° κΚ στον βρόχο εξόδου για να υπολογίσουμε την τάση μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού V_{CE} .

Από 2° κΚ στον $V_{CC} \rightarrow R_C \rightarrow TR \rightarrow R_E \rightarrow GND$ θα έχουμε:

$$\begin{aligned}
V_{CC} - I_C R_C - V_{CEQ} - I_E R_E &= 0 \\
\stackrel{(1)}{\Rightarrow} 30V - V_{CEQ} - I_C (R_C + R_E) &= 0 \quad (2) \\
\Rightarrow V_{CEQ} = 30V - 2.79mA \cdot 2.5K\Omega &= 0 \\
\Rightarrow V_{CEQ} = 30V - 7V = 23V
\end{aligned}$$

Επομένως το σημείο Q είναι το Q(23V, 2.79mA)

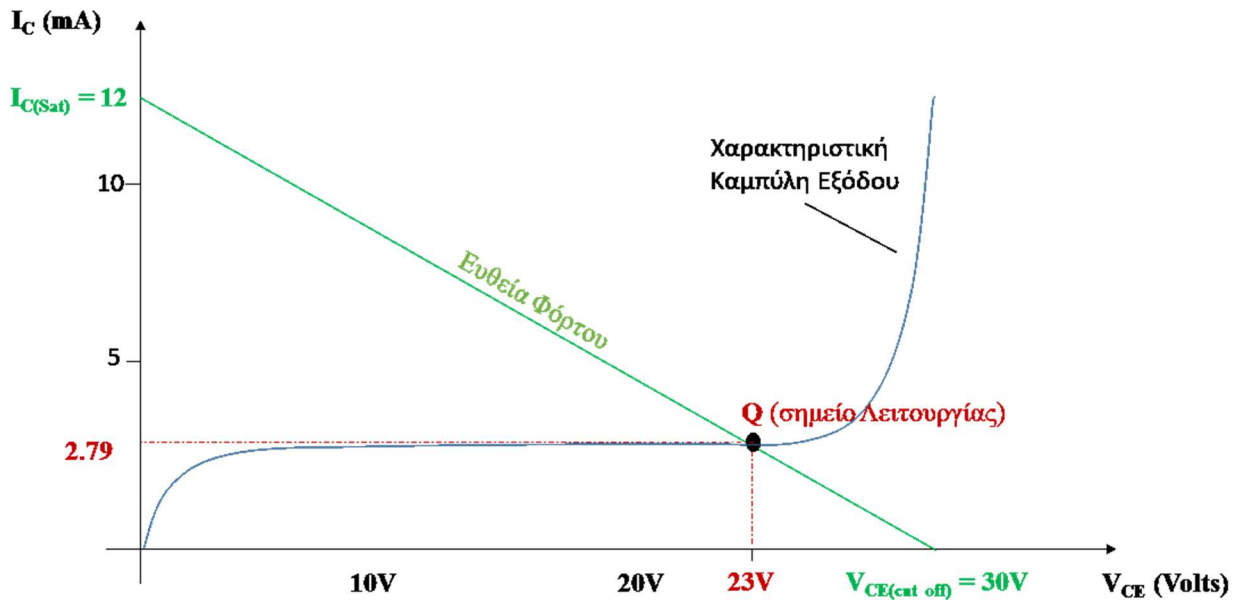
Για να σχεδιάσουμε την γραμμή φορτίου θα πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα κόρου του συλλέκτη I_{CSat} το οποίο θα λάβουμε μηδενίζοντας στην σχέση (2) το V_{CE} (είναι η τιμή του ρεύματος για την οποία η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των ρευμάτων). Επίσης θα υπολογίσουμε την τάση αποκοπής $V_{CE(cut\ off)}$ η οποία είναι η τιμή της τάσης όπου η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των τάσεων.

$$\begin{aligned}
\stackrel{I_C=0}{(2)} \Rightarrow V_{CC} - \cancel{I_C (R_C + R_E)} - V_{CE(cut\ off)} &= 0 \\
\Rightarrow V_{CC} - V_{CE(cut\ off)} = 0 \Rightarrow V_{CE(cut\ off)} &= 30V
\end{aligned}$$

Και

$$\begin{aligned}
\stackrel{V_{CE}=0}{(2)} \Rightarrow V_{CC} - I_C (R_C + R_E) - \cancel{V_{CE}} &= 0 \\
\Rightarrow V_{CC} - I_{Csat} (R_C + R_E) &= 0 \\
\Rightarrow 30V - 2.5K\Omega \cdot I_{Csat} = 0 \Rightarrow I_{Csat} &= \frac{30V}{2.5K\Omega} = 12mA
\end{aligned}$$

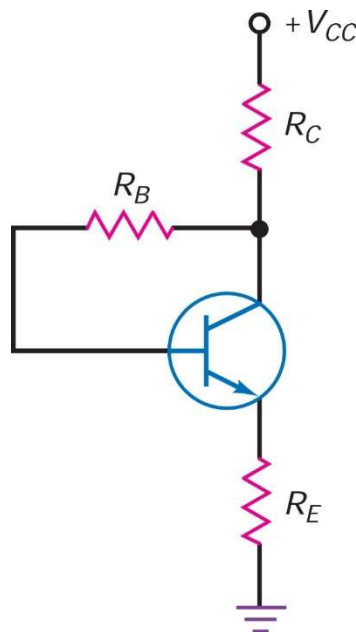
Επομένως η γραμμή φορτίου είναι:



Άσκηση 6 (Πόλωση με ανάδραση από συλλέκτη και εκπομπό)

Στο παρακάτω κύκλωμα να βρεθεί το σημείο λειτουργίας Q του τρανζίστορ και να σχεδιαστεί η γραμμή φορτίου;

Δίνονται: $V_{CC} = 30V$, $R_B = 900K\Omega$, $R_C = 10K\Omega$, $R_E = 5K\Omega$, $\beta = 200$.



Λύση

Ως γνωστών το ρεύμα συλλέκτη I_C είναι ίσο με το κέρδος ρεύματος β επί το ρεύμα της βάσης I_B . Επομένως ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$I_E \approx I_C = \beta \cdot I_B \quad (1)$$

Στο κύκλωμα της άσκησης μπορώ να εφαρμόσω 2^ο κΚ από την πηγή V_{CC} έως και την γείωση του εκπομπού περνώντας από την βάση. Θεωρούμε όπως πάντα ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή και άρα μπορούμε να θέσουμε την τάση $V_{BE} = 0.7V$ και να ισχύει η τιμή του β .

Από 2^ο κΚ σε $V_{CC} \rightarrow R_C \rightarrow R_B \rightarrow TR \rightarrow R_E \rightarrow GND$

$$\begin{aligned}
V_{CC} - I_C R_C - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E &= 0 \\
\stackrel{(1)}{\Rightarrow} V_{CC} - \beta I_B R_C - V_{BE} - I_B R_B - \beta I_B R_E &= 0 \\
\Rightarrow V_{CC} - V_{BE} - I_B (\beta R_C + R_B + \beta R_E) &= 0 \\
\Rightarrow 29.3V - I_B (200 \cdot 10K\Omega + 900K\Omega + 200 \cdot 5K\Omega) &= 0 \\
\Rightarrow 29.3V - (2M\Omega + 0.9M\Omega + 1M\Omega) I_B &= 0 \\
\Rightarrow 29.3V - 3.9M\Omega \cdot I_B &= 0 \\
\Rightarrow I_B = \frac{29.3V}{3.9M\Omega} &= 7.51\mu A
\end{aligned}$$

Ρεύμα συλλέκτη από την σχέση (1) θα είναι:

$$(1) \Rightarrow I_{CQ} = \beta \cdot I_B = 200 \cdot 7.51\mu A = 1.5mA$$

Θα εφαρμόσουμε 2° κΚ στον βρόχο εξόδου για να υπολογίσουμε την τάση μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού V_{CE} .

Από 2° κΚ στον $V_{CC} \rightarrow R_C \rightarrow TR \rightarrow R_E \rightarrow GND$ θα έχουμε:

$$\begin{aligned}
V_{CC} - I_C R_C - V_{CEQ} - I_E R_E &= 0 \\
\stackrel{(1)}{\Rightarrow} 30V - V_{CEQ} - I_C (R_C + R_E) &= 0 \quad (2) \\
\Rightarrow V_{CEQ} = 30V - 1.5mA \cdot 15K\Omega &= 0 \\
\Rightarrow V_{CEQ} = 30V - 22.5V &= 7.5V
\end{aligned}$$

Επομένως το σημείο Q είναι το Q(7.5V, 1.5mA)

Για να σχεδιάσουμε την γραμμή φορτίου θα πρέπει να υπολογίσουμε το ρεύμα κόρου του συλλέκτη I_{CSat} το οποίο θα λάβουμε μηδενίζοντας στην σχέση (2) το V_{CE} (είναι η τιμή του ρεύματος για την οποία η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των ρευμάτων). Επίσης θα υπολογίσουμε την τάση αποκοπής $V_{CE(cut\ off)}$ η οποία είναι η τιμή της τάσης όπου η γραμμή φορτίου τέμνει τον άξονα των τάσεων.

$$\begin{aligned}
(2) \stackrel{I_C=0}{\Rightarrow} V_{CC} - \cancel{I_C (R_C + R_E)} - V_{CE(cut\ off)} &= 0 \\
\Rightarrow V_{CC} - V_{CE(cut\ off)} = 0 \Rightarrow V_{CE(cut\ off)} &= 30V
\end{aligned}$$

Και

$$\begin{aligned}
(2) \stackrel{V_{ce}=0}{\Rightarrow} V_{CC} - I_C (R_C + R_E) - \cancel{V_{CE}} &= 0 \\
\Rightarrow V_{CC} - I_{Csat} (R_C + R_E) &= 0 \\
\Rightarrow 30V - 15K\Omega \cdot I_{Csat} = 0 \Rightarrow I_{Csat} &= \frac{30V}{15K\Omega} = 2mA
\end{aligned}$$

Επομένως η γραμμή φορτίου είναι:

