

Το διπολικό Τρανζίστορ ως ενισχυτής (I)

Πόλωση του Διπολικού Τρανζίστορ

Λευτέρης Καπετανάκης



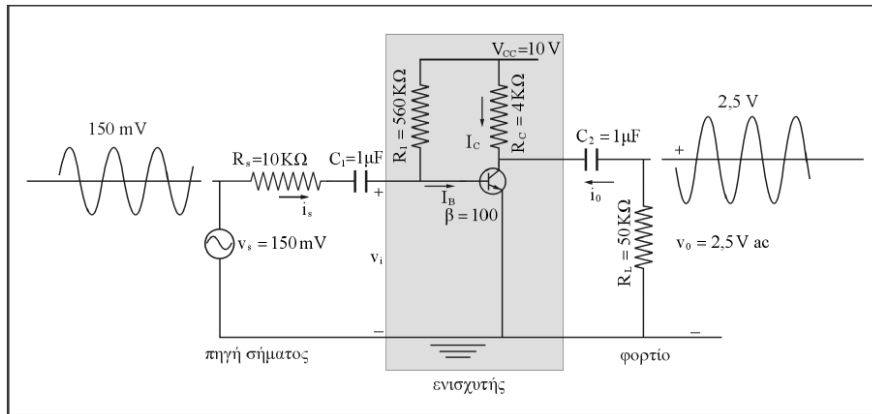
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

2012

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες είναι κτήμα διαφόρων συγγραφέων και παρέχονται στον αντίστοιχο δικτυότοπό τους.

Ο πιο απλός ενισχυτής

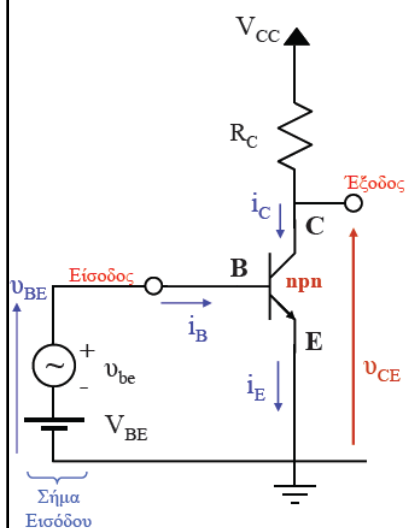


Ενισχυτής τάσης με BJT

ΤΑ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (I)



Το τρανζίστορ ως ενισχυτής πρέπει να λειτουργεί αποκλειστικά στην ενεργό περιοχή.

Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλες DC πολώσεις V_{CC} και V_{BE} έτσι ώστε η V_C να είναι μεγαλύτερη της V_B κατά τρόπο που η κυμάτωση v_{be} του σήματος εισόδου να μην βγάζει το τρανζίστορ από την ενεργό περιοχή.

$$v_{BE} = v_{be} + V_{BE}$$

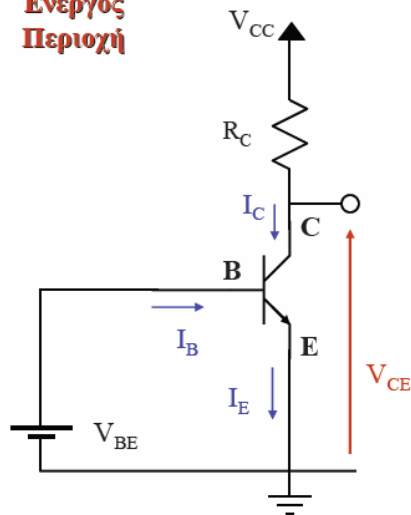
$$v_{CE} = v_{ce} + V_{CE}$$

ΤΑ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (II)

Ενεργός
Περιοχή



Συνθήκες DC Λειτουργίας

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

$$I_E = I_C / \alpha$$

$$I_B = I_C / \beta$$

$$V_{CE} \equiv V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

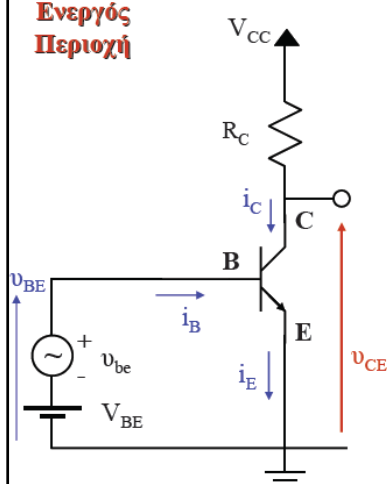
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (III)

Ενεργός
Περιοχή



Ρεύμα Συλλέκτη

$$i_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} = I_S e^{\frac{v_{be} + V_{BE}}{V_T}} = \underbrace{I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}}_{I_C} \cdot e^{\frac{v_{be}}{V_T}}$$

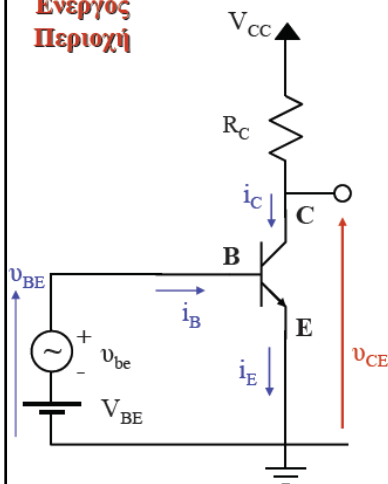
$$i_C = I_C e^{\frac{v_{be}}{V_T}} \cong I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T}\right) \quad \text{αν } v_{be} \ll V_T$$

ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (IV)

Ενεργός
Περιοχή



Η Διαγωγιμότητα g_m

$$i_c = I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T}\right) = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

$$i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be} = g_m \cdot v_{be}$$

Αρα για μικρά σήματα στην είσοδο το BJT συμπεριφέρεται ως μία γραμμική πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση.

Όπου η g_m καλείται **διαγωγιμότητα** και ορίζεται ως:

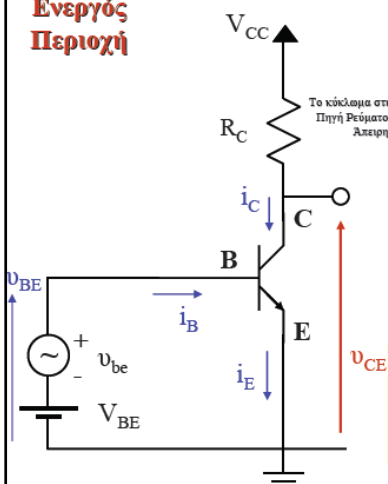
$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

ΤΑ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

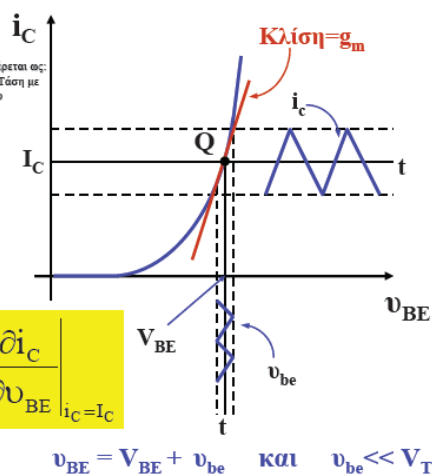
Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (V)

Ενεργός
Περιοχή



Ασθενές Σήμα – Γραμμική Λειτουργία

Το κύκλωμα στην έξοδο συμπεριφέρεται ως:
Πηγή Ρεύματος Ελεγχόμενη από Τάση με
Άπειρη Αντίσταση Εξόδου



$$g_m = \left. \frac{\partial i_c}{\partial v_{BE}} \right|_{i_C = I_C}$$

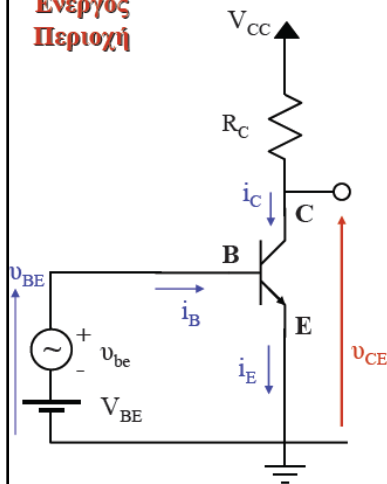
$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad \text{και} \quad v_{be} \ll V_T$$

ΤΑ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (VI)

Ενεργός
Περιοχή



Το Ρεύμα Βάσης – Αντίσταση Εισόδου

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C}{\beta} + \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

$$i_B = I_B + i_b$$

$$\text{Άρα: } i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{g_m}{\beta} v_{be} \quad \text{ή} \quad \frac{I_B}{V_T} v_{be}$$

Η αντίσταση
εισόδου είναι:

$$r_\pi \equiv \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m}$$

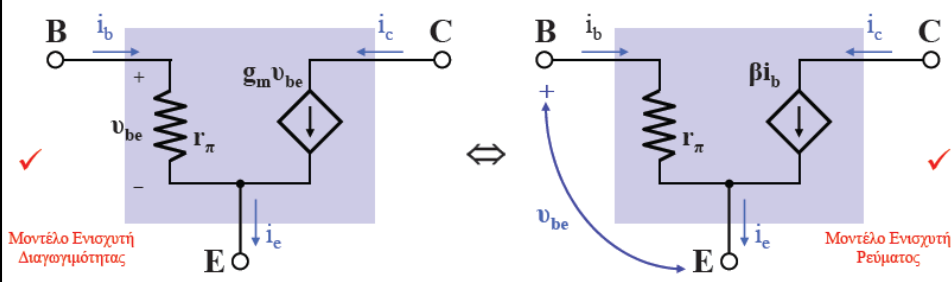
ΤΑ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (VII)

Ενεργός
Περιοχή

Το Μοντέλο Υβριδικού-π Ασθενούς Σήματος



$$i_b = \frac{g_m}{\beta} v_{be} \Leftrightarrow g_m v_{be} = \beta i_b$$

$$i_c = g_m v_{be} = \beta i_b$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

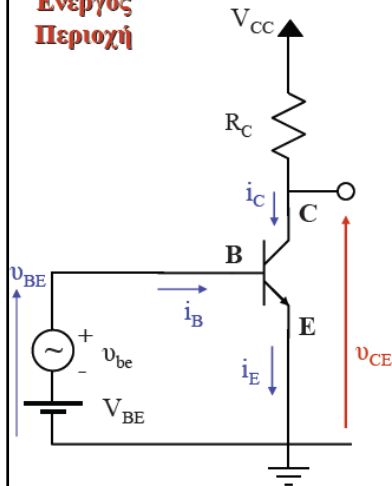
$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

ΤΑ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (VIII)

Ενεργός
Περιοχή



Το Ρεύμα Εκπομπού

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \frac{I_C}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

$$i_E = I_E + i_e$$

Άρα: $i_e = \frac{1}{\alpha} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{g_m}{\alpha} v_{be}$ ή $\frac{I_E}{V_T} v_{be}$

Αντίσταση
εκπομπού:

$$r_e \equiv \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m} \cong \frac{1}{g_m}$$

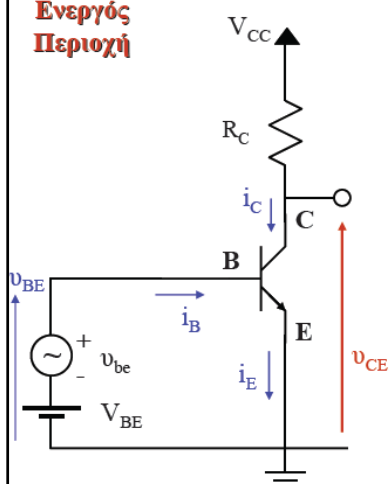
$$r_{\pi} = (\beta + 1)r_e$$

ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (IX)

Ενεργός
Περιοχή



Το Κέρδος Τάσης

$$v_c = V_{CC} - i_C R_C = V_{CC} - (I_C + i_e) R_C$$

$$= (V_{CC} - I_C R_C) - i_e R_C = V_C - i_e R_C$$

$$v_c = -i_e R_C = -g_m v_{be} R_C = -g_m R_C v_{be}$$

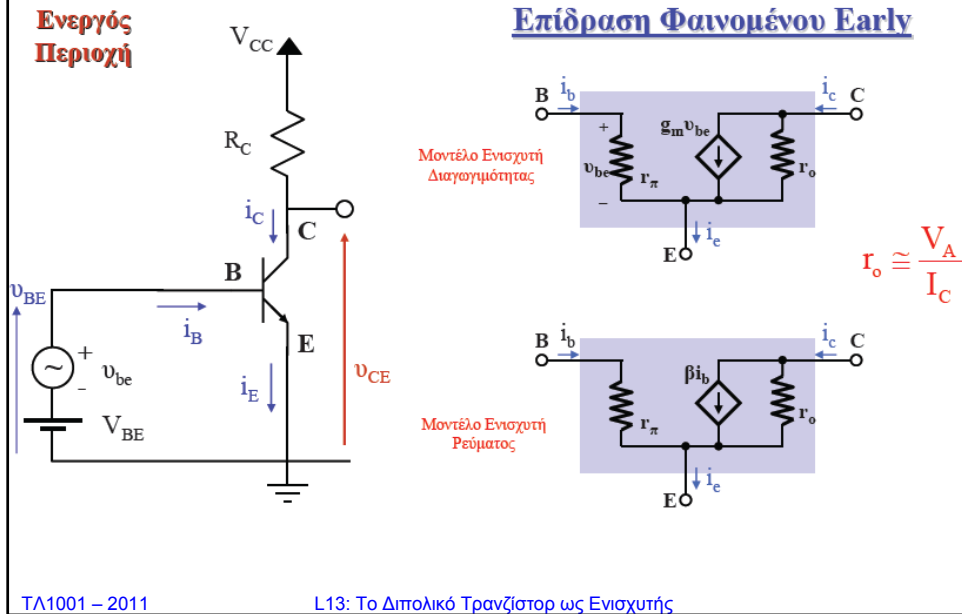
Κέρδος Τάσης = $A_{v0} = \frac{v_c}{v_{be}} = -g_m R_C$

Διαφορά φάσης 180°

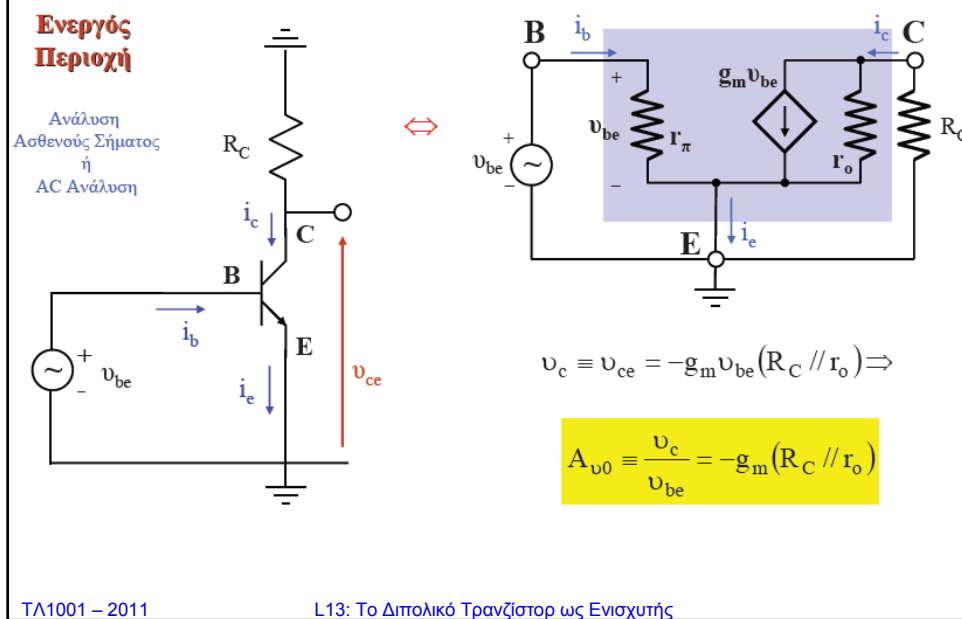
ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

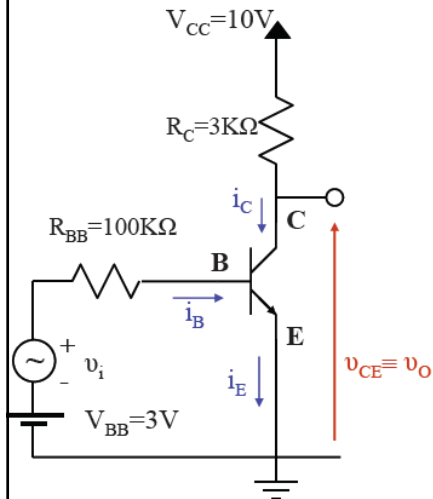
Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (X)



Το Τρανζίστορ ως Ενισχυτής (XI)



Παράδειγμα 5 (I)



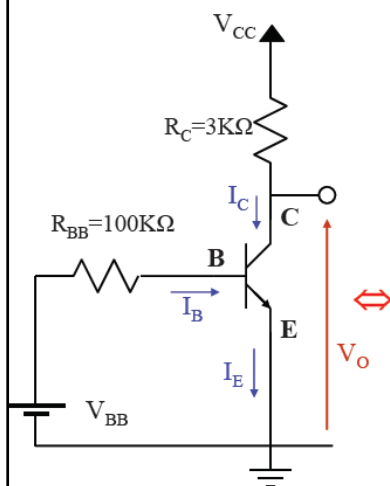
Να προσδιοριστεί το σημείο λειτουργίας (I_C , V_{CE}) και να γίνει ανάλυση του ενισχυτή ώστε να βρεθεί το κέρδος τάσης. Ισχύει $\beta=100$ και $V_T=25\text{mV}$.

(Υποθέστε ότι η v_i είναι μικρό σήμα και ότι η αντίσταση εξόδου r_o του τρανζίστορ είναι άπειρη).

ΤΛ1001 – 2011

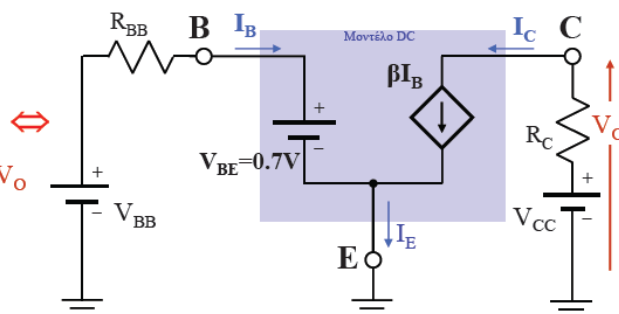
L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Παράδειγμα 5 (II)



Συνθήκες DC Λειτουργίας

Υποθέτουμε λειτουργία στην ενεργό περιοχή και χρησιμοποιούμε το DC μοντέλο κοινού εκπομπού για την εύρεση του σημείου λειτουργίας.

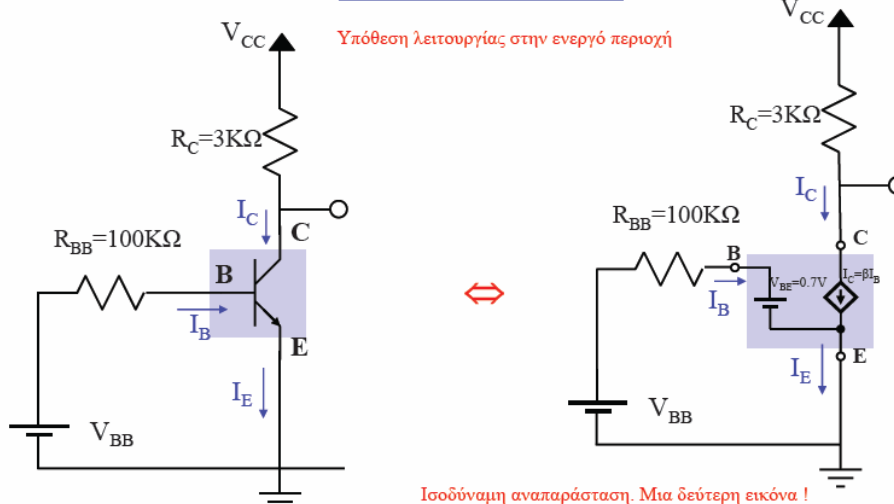


ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Παράδειγμα 5 (III)

Συνθήκες DC Λειτουργίας



ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Παράδειγμα 5 (IV)

Συνθήκες DC Λειτουργίας

KVL στο βρόχο BE:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB}} = 0.023\text{mA} \quad (1)$$

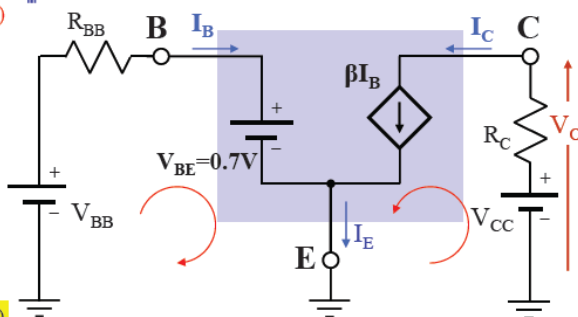
$$I_C = \beta I_B = 2.3\text{mA} \quad (2)$$

Συνεπώς, σε συνθήκες ηρεμίας (DC) το τρανζίστορ όντως λειτουργεί στην **ενεργό περιοχή** και οι λύσεις είναι αποδεκτές.

Σημείο Λειτουργίας: $(I_C, V_{CE}) = (2.3\text{mA}, 3.1\text{V})$

KVL στο βρόχο CE:

$$V_O \equiv V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 3.1\text{V} > 0.3\text{V} \quad (3)$$



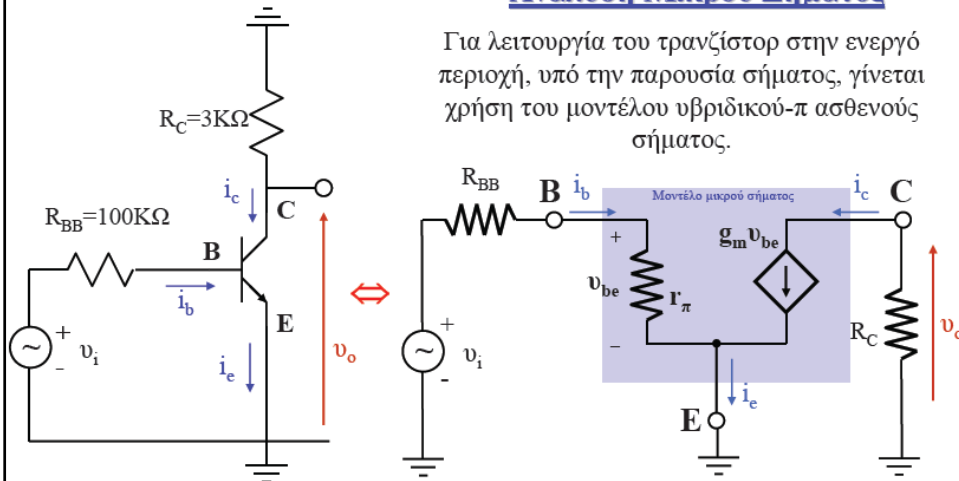
ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Παράδειγμα 5 (V)

Ανάλυση Μικρού Σήματος

Για λειτουργία του τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή, υπό την παρουσία σήματος, γίνεται χρήση του μοντέλου υβριδικού-π ασθενούς σήματος.



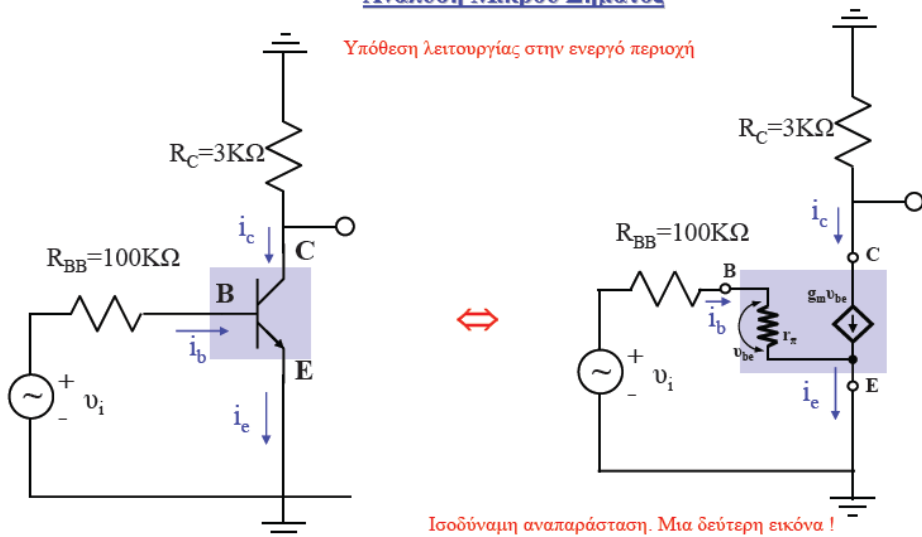
ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Παράδειγμα 5 (VI)

Ανάλυση Μικρού Σήματος

Υπόθεση λειτουργίας στην ενεργό περιοχή



Ισοδύναμη αναπαράσταση. Μια δεύτερη εικόνα !

ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Παράδειγμα 5 (VII)

KVL στο βρόχο BE

$$v_{be} = v_i \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{BB}} = 0.011 v_i \quad (4)$$

διαιρέτης τάσης

Η τάση εξόδου v_o δίδεται από τη σχέση:

$$v_o = -g_m R_C v_{be} = -3.04 v_i \quad (5)$$

νόμος Ohm στην R_C

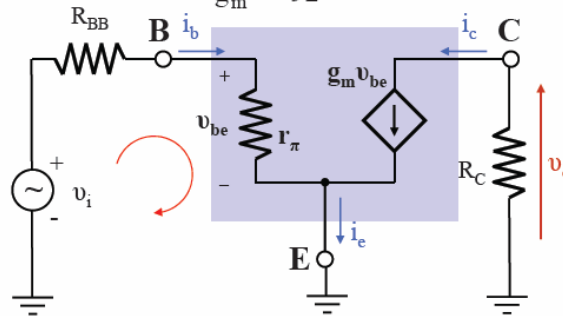
Το κέρδος τάσης θα είναι:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -3.04 \quad (6)$$

Ανάλυση Μικρού Σήματος

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2.3\text{mA}}{25\text{mV}} = 92\text{mA/V}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{92} = 1.09\text{K}\Omega$$



ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Παράδειγμα 5 (VIII)

Υποθέσαμε ότι η v_i είναι ένα μικρό σήμα. Τι όμως σημαίνει αυτό για εμάς; Η θεώρηση αυτή σημαίνει ότι για όλες τις τιμές της v_i η συνολική τάση στο συλλέκτη $v_c \equiv v_o$ θα πρέπει να είναι $>0.7\text{V}$ ώστε η επαφή CBJ να είναι ανάστροφα πολωμένη και το τρανζίστορ να λειτουργεί συνεχώς στην ενεργό περιοχή.

Συνεπώς το μέγιστο πλάτος στην έξοδο μπορεί να είναι ίσο με:

$$\hat{V}_o = V_{CC} - 0.7\text{V} = 3.1 - 0.7\text{V} = 2.4\text{V}$$

Από τη σχέση (6) προκύπτει ότι το μέγιστο πλάτος στην είσοδο είναι:

$$\hat{V}_i = \frac{\hat{V}_o}{3.04} \cong 0.79\text{V}$$

Από το νόμο Ohm στο βρόχο BE (σελ. 20):

$$\hat{I}_b = \frac{\hat{V}_i}{R_{BB} + r_\pi} \cong 0.008\text{mA}$$

Από το διαιρέτη τάσης στο βρόχο BE (σελ. 20):

$$\hat{V}_{be} = \hat{V}_i \frac{r_\pi}{R_{BB} + r_\pi} \cong 8.6\text{mV} \ll 25\text{mV}$$

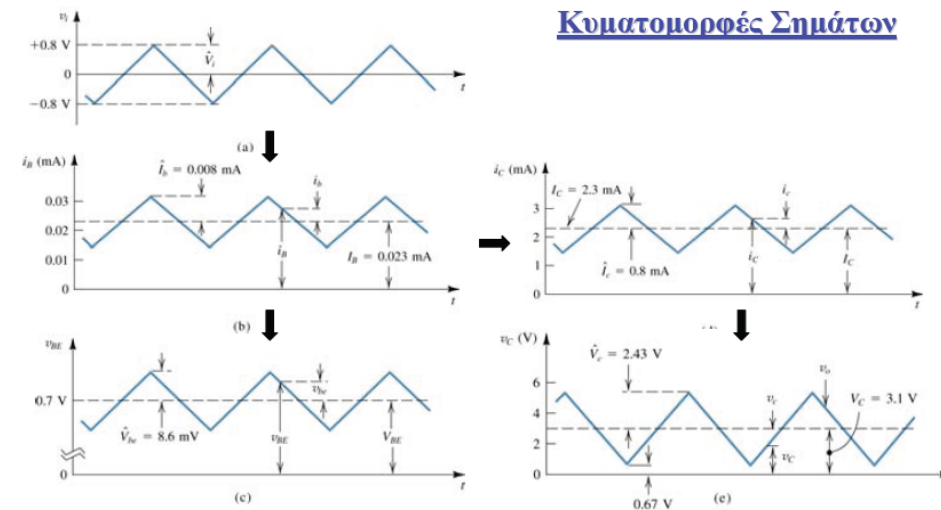
Φυσικά θα ισχύει:

$$\hat{I}_c = \beta \hat{I}_b \cong 0.8\text{mA}$$

ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

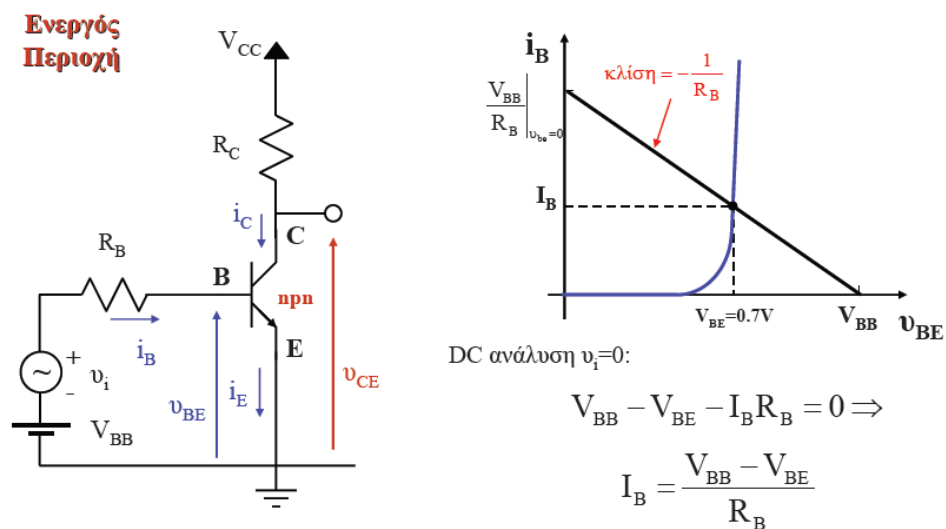
Παράδειγμα 5 (IX)



ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Γραφική Ανάλυση (I)

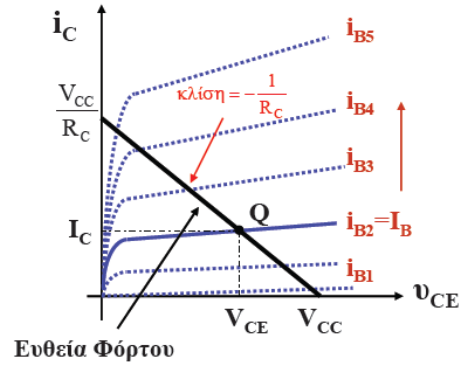
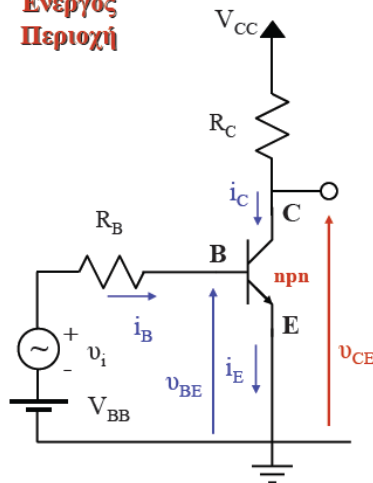


ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Γραφική Ανάλυση (II)

Ενεργός
Περιοχή



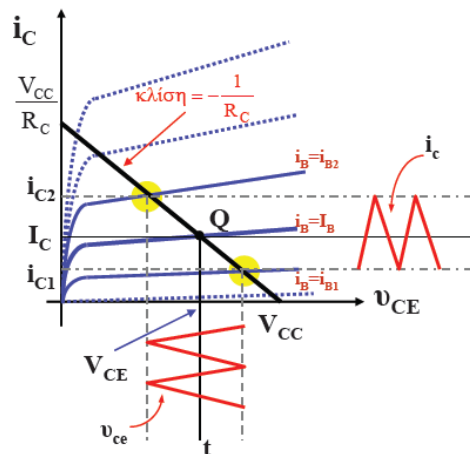
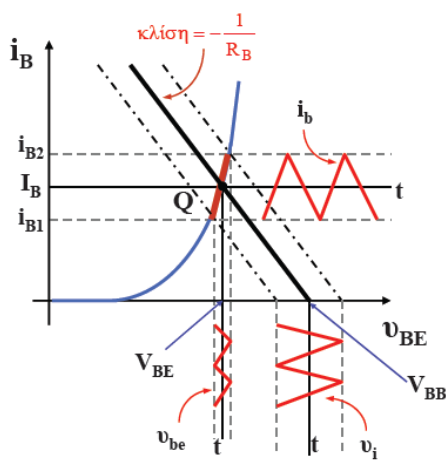
$$v_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$$

$$i_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{v_{CE}}{R_C}$$

ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

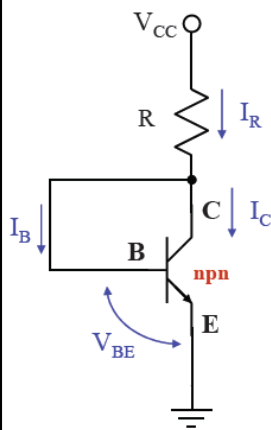
Γραφική Ανάλυση (III)



ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Το Τρανζίστορ σαν Δίοδος



Το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή καθώς $V_{BC}=0$.

Νόμος Ohm:

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \quad \text{και} \quad V_{BE} = 0.7V$$

Ισχύει:

$$I_C = \beta I_B \quad \text{και} \quad I_R = I_C + I_B \quad \text{άρα:}$$

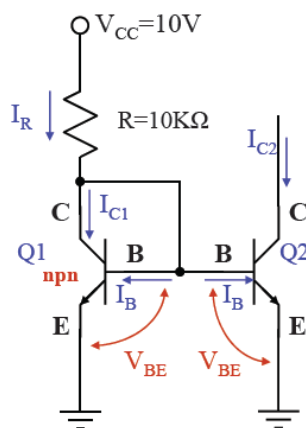
$$I_R = (\beta + 1)I_B = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)I_C \Rightarrow$$

$$I_R \cong I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής

Παράδειγμα 6



Το κύκλωμα του σχήματος παρουσιάζει μια πηγή ρεύματος (*καθρέπτης ρεύματος*).

Τα Q1 και Q2 είναι όμοια.

Να βρεθεί το I_{C2} για $\beta=100$ και $\beta=200$.

$$I_R = I_{C1} + 2I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} \quad \text{και} \quad I_{C1} = \beta I_B \quad \left. \vphantom{I_R} \right\} \Rightarrow$$

$$I_{C2} = \beta I_B = I_{C1} = \frac{\beta}{\beta + 2} \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R}$$

$$\text{Για } \beta=100: \quad I_{C2} = 0.912\text{mA}$$

$$\text{Για } \beta=200: \quad I_{C2} = 0.921\text{mA}$$

ΤΛ1001 – 2011

L13: Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Ενισχυτής