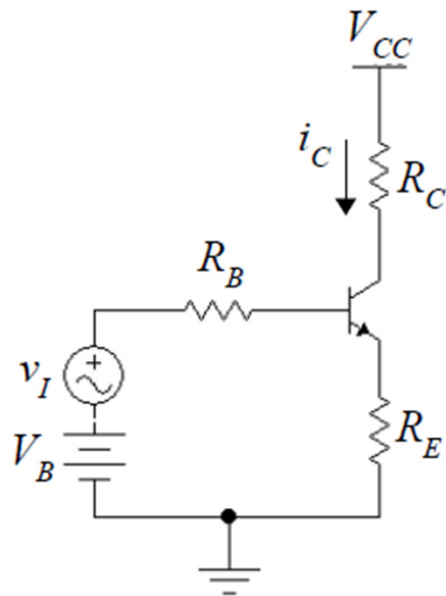


Τάξη Α

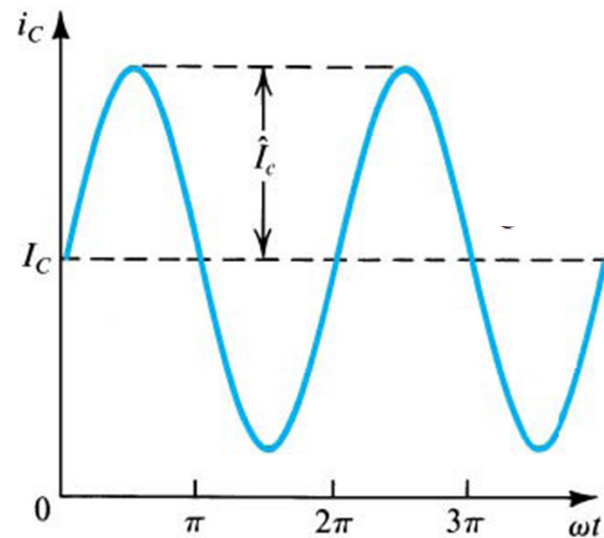


Transistor cut off ($i_C = 0$)

$$v_I + V_B < 0.7 V$$

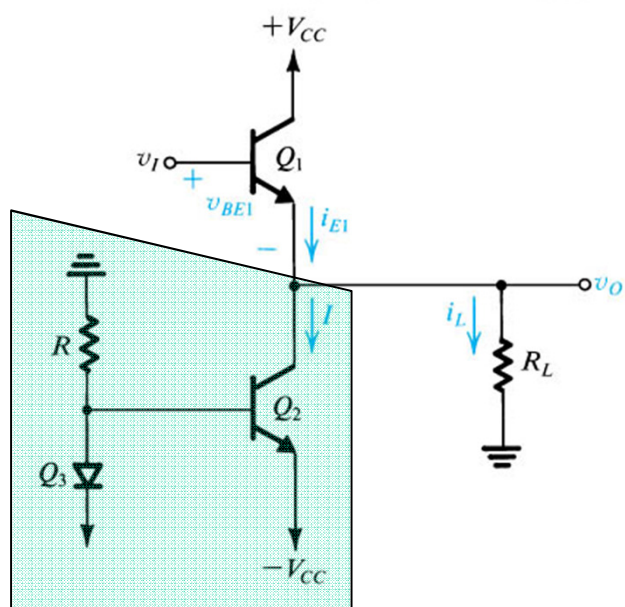
Αγει καθ' ολη τη διάρκεια της περιόδου της v_I

$$v_I + V_B \geq 0.7 V \quad \text{οπου} \quad V_B > \max(v_I) + 0.7 V$$



όταν $v_I = 0, i_C = I_C$

Ακόλουθος εκπομπού (CC) πολωμένος με σταθερό ρεύμα



- ✓ Λόγω της χαμηλής αντίστασης εξόδου, ο ακόλουθος εκπομπού αποτελεί την πιο διαδεδομένη επιλογή για την τάξη Α.
- ✓ Χρησιμοποιείται ως στάδιο εξόδου σε ΤΕ και σε ενισχυτές audio (χαμηλών συχνοτήτων)

Το Q1 είναι πολωμένο με σταθερό ρεύμα I το οποίο παρέχεται από τον καθρέπτη ρεύματος που υλοποιείται με χρήση των Q2, Q3 & R. Εφόσον το ρεύμα εκπομπού είναι το άθροισμα του ρεύματος πόλωσης και του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο, θα έχω:

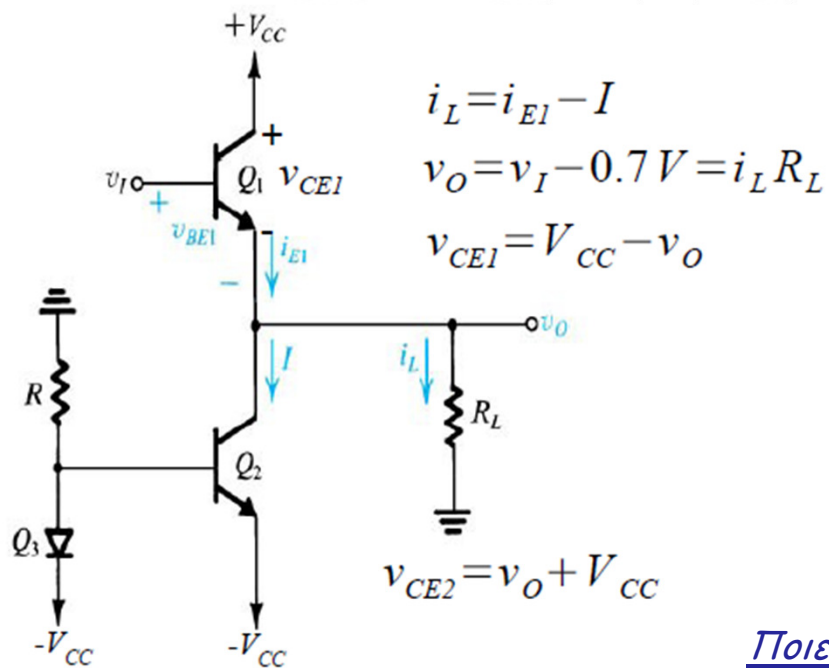
$$i_L = i_{EI} - I$$

Πρέπει δηλαδή το ρεύμα πόλωσης I να είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο αρνητικό ρεύμα φορτίου.

Αλλιώς \rightarrow Q1 σε αποκοπή \rightarrow δεν υφίσταται τάξη Α

Ανάλυση CC πολωμένου με σταθερό ρεύμα

Εξετάζουμε την περίπτωση $v_I \geq v_{BE1} = 0.7V$ (θετική ημιπερίοδος)



$$i_L = i_{E1} - I$$

$$v_O = v_I - 0.7V = i_L R_L$$

$$v_{CE1} = V_{CC} - v_O$$

$$v_{CE2} = v_O + V_{CC}$$

Αν $v_{CE1} < V_{CE1-sat}$ τότε το Q1 \rightarrow στον κόρο

Για να το αποφύγω $\rightarrow v_{CE1} > V_{CE1-sat}$

Έτσι έχουμε

$$v_{CE1} = V_{CC} - v_O > V_{CE1-sat}$$

$$-v_O > -V_{CC} + V_{CE1-sat}$$

$$v_O < V_{CC} - V_{CE1-sat} \Rightarrow v_{O-max} = V_{CC} - V_{CE1-sat}$$

Ποιες είναι οι μέγιστες τιμές όταν το Q1 δεν είναι στον κόρο

$$v_O < v_{O-max} = V_{CC} - V_{CE1-sat}$$

$$v_I \geq v_{BE1} = 0.7V$$

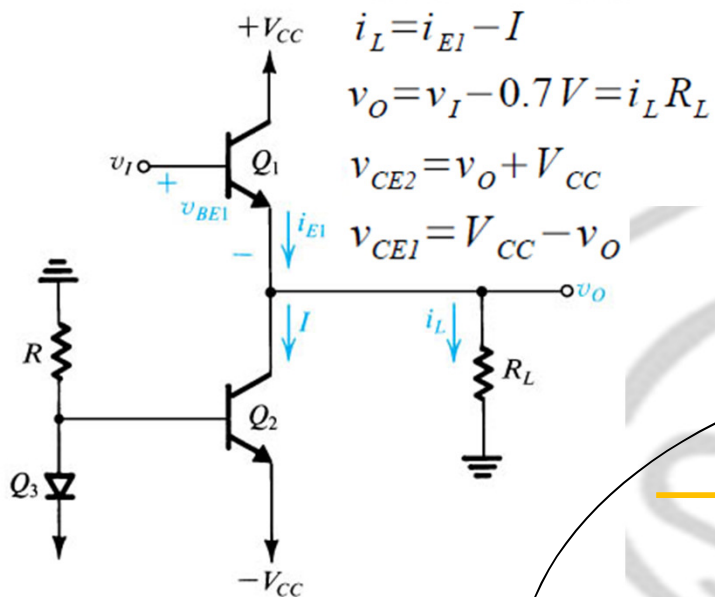
$$v_O = v_I - v_{BE1} = v_I - 0.7V$$

$$v_{CE1} = V_{CC} - v_O$$

$$\rightarrow v_I < v_{I-max} = V_{CC} - V_{CE1-sat} + 0.7V$$

Ανάλυση CC πολωμένου με σταθερό ρεύμα (II)

Εξετάζουμε την περίπτωση $v_I < 0.7 V$ (αρνητική ημιπερίοδος)



$$i_L = i_{E1} - I$$

$$v_O = v_I - 0.7 V = i_L R_L$$

$$v_{CE2} = v_O + V_{CC}$$

$$v_{CE1} = V_{CC} - v_O$$

Αν $v_{CE2} < V_{CE2-sat}$ τότε το Q2 → στον κόρο

Για να το αποφύγω → $v_{CE2} > V_{CE2-sat}$

Έτσι έχουμε

$$v_{CE2} = v_O + V_{CC} > V_{CE2-sat}$$

$$v_O > -V_{CC} + V_{CE2-sat}$$

$$v_I > -V_{CC} + V_{CE2-sat} + 0.7$$

Αν $i_{E1} = 0$ τότε το Q1 → στην αποκοπή

Για να το αποφύγω → $i_{E1} = i_L + I > 0$

Έτσι έχουμε

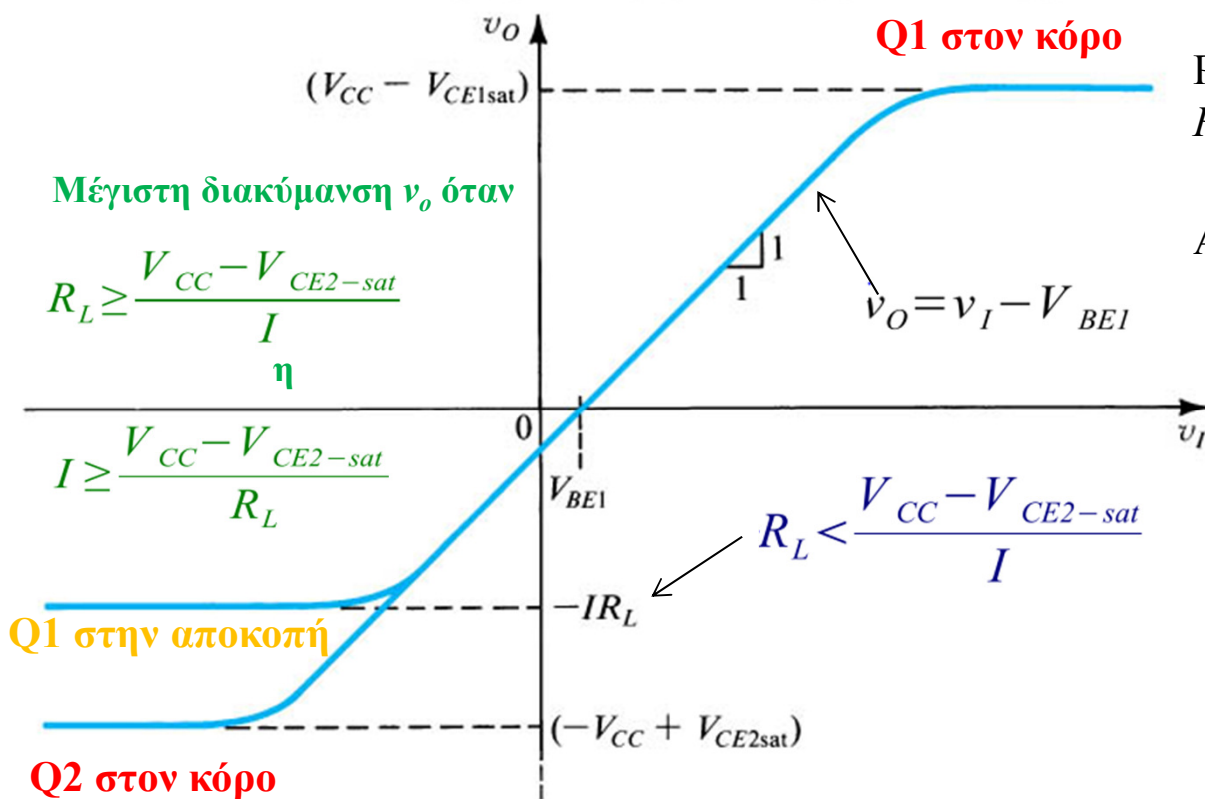
$$i_L = \frac{v_O}{R_L} > -I \quad v_O > -I R_L \quad v_I > -I R_L + 0.7 V$$

Ποιες είναι οι ελάχιστες τιμές για να είναι τα Q1 & Q2 στην ενεργό περιοχή

$$v_O > v_{O-min} = \max \{ -I R_L, -V_{CC} + V_{CE2-sat} \}$$

$$v_I > v_{I-min} = \max \{ -I R_L + 0.7 V, -V_{CC} + V_{CE2-sat} + 0.7 V \}$$

Χαρακτηριστική μεταφοράς (VTC) CC



Ρεύμα πόλωσης I και αντίσταση φορτίου R_L θέτουν τα όρια για την αρνητική v_o

Αν $-IR_L > -(V_{CC} - V_{CE2-sat})$ τότε

$$v_O > v_{O-min} = -IR_L \Rightarrow$$

$$R_L < \frac{V_{CC} - V_{CE2-sat}}{I}$$

Αν $-IR_L < -(V_{CC} - V_{CE2-sat})$ τότε

$$v_O > v_{O-min} = -V_{CC} + V_{CE2-sat} \Rightarrow$$

$$R_L > \frac{V_{CC} - V_{CE2-sat}}{I}$$

$$v_O = v_I - 0.7 \quad \text{όπου} \quad \max \left\{ -IR_L, -(V_{CC} - V_{CE2-sat}) \right\} < v_O < V_{CC} - V_{CE1-sat}$$

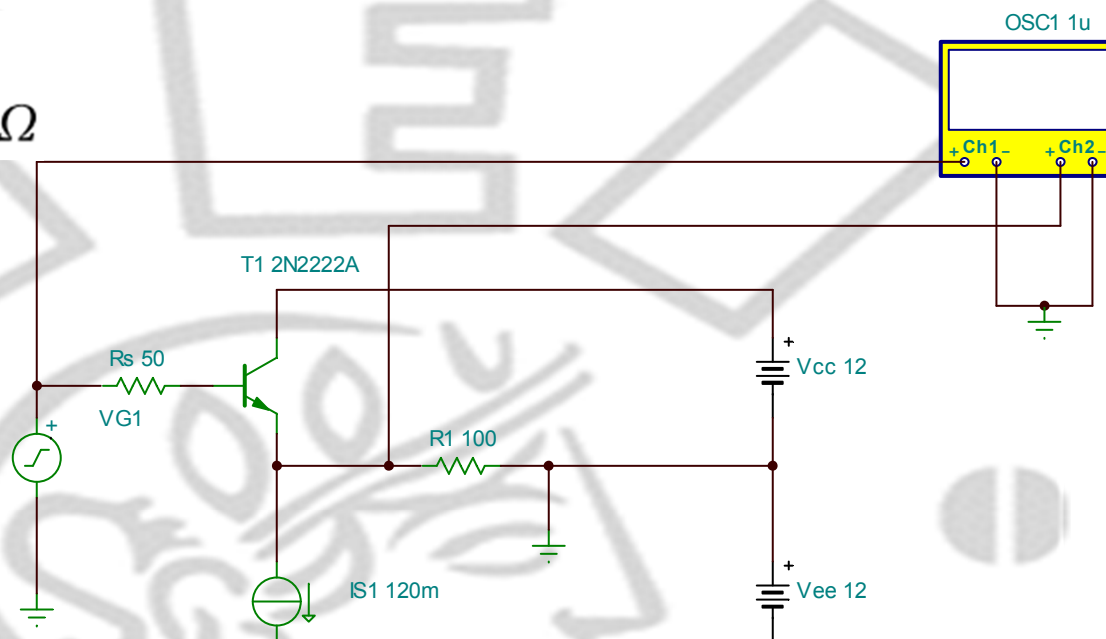
Στη θετική ημιπερίοδο το όριο της γραμμικής περιοχής βρίσκεται από τον κορεσμό του Q1

Στη αρνητική ημιπερίοδο το όριο της γραμμικής περιοχής βρίσκεται είτε από τον κορεσμό του Q2 είτε από την αποκοπή του Q1

Εξομοίωση VTC (i)

$$I = 120 \text{ mA}$$

$$IR_L = V_{CC} = 12 \text{ V} \Rightarrow R_L = 100 \Omega$$



Q1 στην ενεργό περιοχή → κανένας ψαλιδισμός

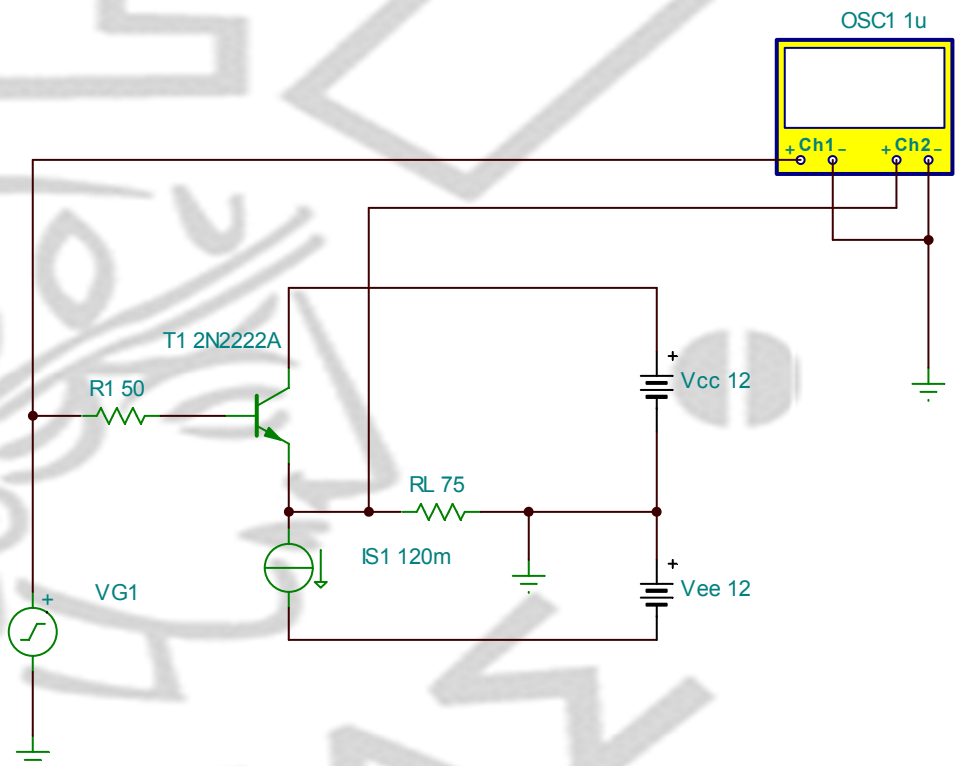
$$v_O < v_{O-max} = V_{CC} - V_{CE1-sat} = 11.8 \text{ V} \quad \text{Q1 όχι στον κόρο}$$

$$v_O > v_{O-min} = -IR_L = -12 \text{ V} \quad \text{Q1 δεν αποκόπτει}$$

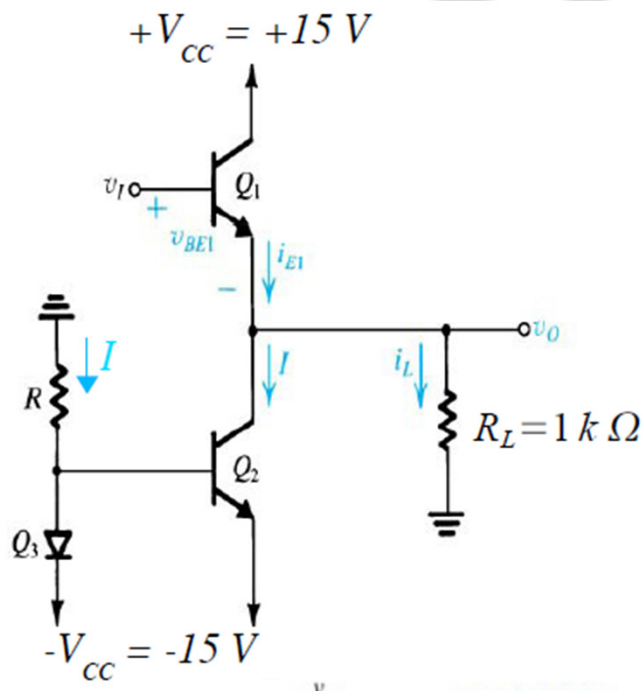
Εξομοίωση VTC (ii)

$$I = 120 \text{ mA} \quad R_L = 75 \Omega$$

$$IR_L = 9 \text{ V} < V_{CC} - V_{CE1-sat}$$



Παράδειγμα 1 (i)



Δίνεται ότι $V_{CE1-sat} = V_{CE2-sat} = 0.2\text{ V}$, $V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7\text{ V}$ και $\beta_1 = \beta_2 \rightarrow$ υψηλής τιμής. Ν.βρ την R η οποία θα δώσει επαρκές ρεύμα πόλωσης, ώστε να επιτραπεί η μέγιστη δυνατή διακύμανση του σήματος εξόδου για αντίσταση φορτίου $1\text{ k}\Omega$. Να υπολογίσετε επίσης την προκύπτουσα διακύμανση του σήματος εξόδου καθώς και την μέγιστη/ελάχιστη τιμή του ρεύματος εκπομπού

Παράδειγμα 1 (ii)

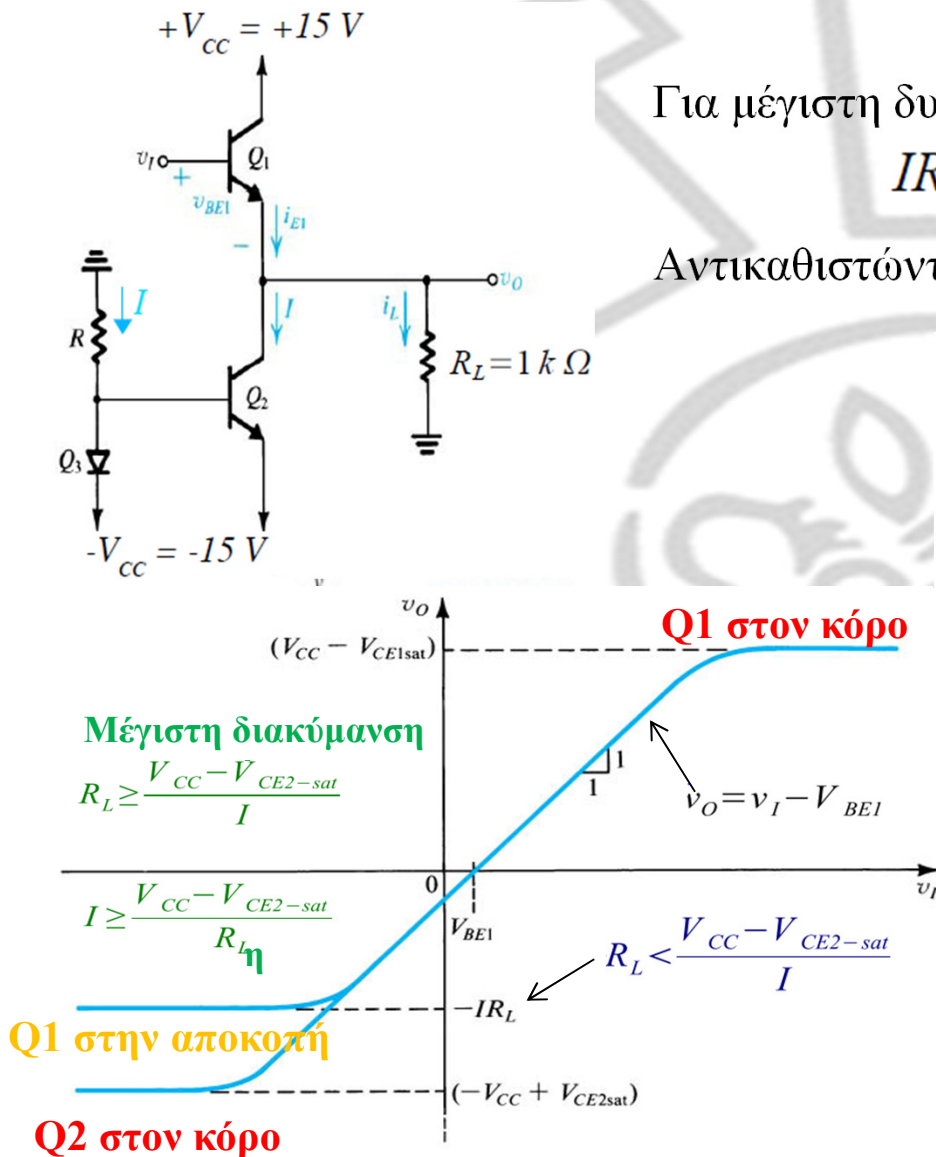
Για μέγιστη δυνατή διακύμανση του σήματος εξόδου πρέπει:

$$IR_L = V_{CC} - V_{CE2-sat} \quad \text{με} \quad R_L = 1 \text{ k}\Omega$$

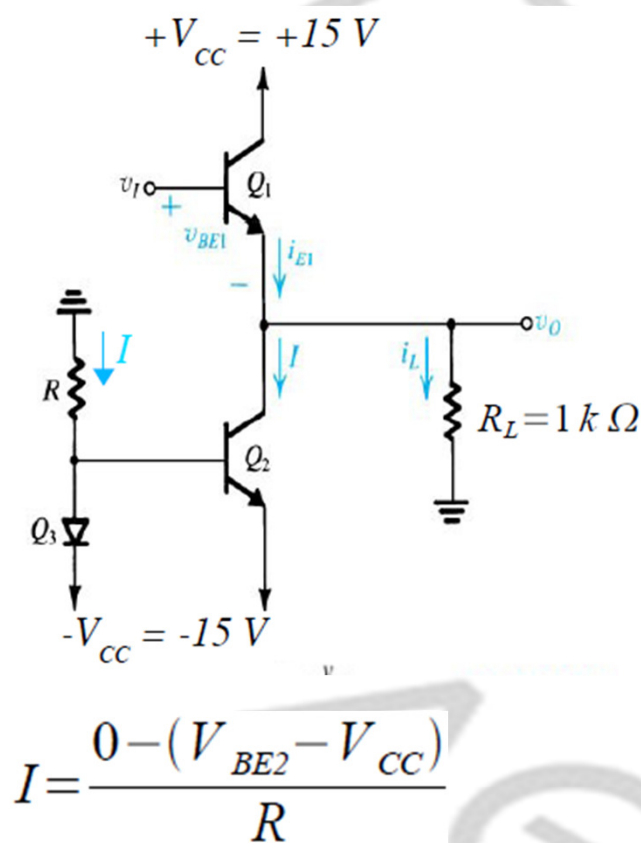
Αντικαθιστώντας, λαμβάνω

$$I = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_L} = \frac{15 \text{ V} - 0.2 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 14.8 \text{ mA}$$

$$R = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I} = \frac{15 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{14.8 \text{ mA}} = 0.97 \text{ k}\Omega$$



Παράδειγμα 1 (iii)



μέγιστη δυνατή διακύμανση του σήματος εξόδου :

$$V_{o-peak} = I R_L = 14.8 V \Rightarrow$$

$$-14.8 V < v_o < 14.8 V$$

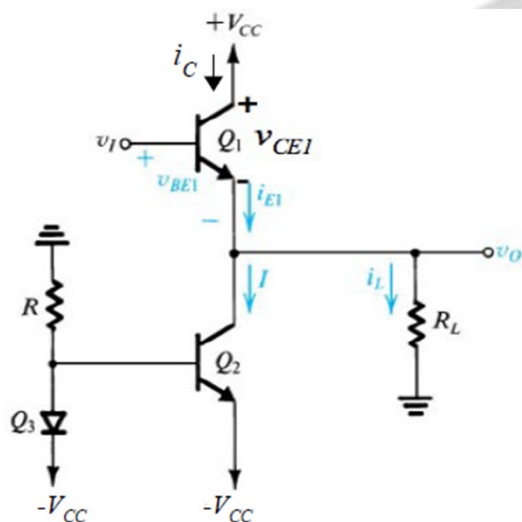
Με βάση τη διακύμανση του σήματος εξόδου θα έχω και αντίστοιχα για το ρεύμα εξόδου:

$$-14.8 V < v_o < 14.8 V \Rightarrow -I < i_L < I$$

Ενώ το ελάχιστο / μέγιστο ρεύμα εκπομπού Q1 θα είναι:

$$i_{EI} = I + i_L \Rightarrow 0 mA < i_{EI} < 2I = 29.6 mA$$

Ισολογισμός ισχύος CC



Μέση ισχύς που απορροφάται από τα τροφοδοτικά

Καθρέπτης ρεύματος : $P_{-V_{CC}} = V_{CC} I$

Ενισχυτική βαθμίδα : $P_{+V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} i_{C1} dt$ με $i_{C1} = I + \hat{I}_c \sin(\omega t)$

$$P_{+V_{CC}} = V_{CC} I \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 + \frac{\hat{I}_c}{I} \sin(\omega t)\right) dt = V_{CC} I$$

Άρα συνολική ισχύς που απορροφάται (καταναλώνεται):

$$P_D = P_{D_{av}} = P_{-V_{CC}} + P_{+V_{CC}} = 2 V_{CC} I$$

Μέση ισχύς που μεταφέρεται στο φορτίο

$$v_O = V_{o-peak} \sin(\omega t)$$

$$P_{L_{av}} = \frac{V_{o-rms}^2}{R_L} = \frac{(V_{o-peak} / \sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{V_{o-peak}^2}{2 R_L}$$

Αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας τάξης Α

Ισχύς που απορροφάται : $P_{D_{av}} = 2 V_{CC} I$

Ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο

$$P_{L_{av}} = \frac{V_{o-peak}^2}{2 R_L}$$

Παρατηρήσεις

- ✓ Το μέσο ρεύμα και η ισχύς που απορροφάται από τα τροφοδοτικά είναι ανεξάρτητα από το πλάτος του σήματος εξόδου
- ✓ Η ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο αυξάνει εκθετικά σε σχέση με την τάση εξόδου

Δείκτης αποδοτικότητας μετατροπής ενέργειας

$$\eta = \frac{P_{L_{av}}}{P_{D_{av}}} = \frac{V_{o-peak}^2 / 2 R_L}{2 V_{CC} I} = \frac{1}{4} \frac{V_{o-peak}^2}{V_{CC} I R_L} = \frac{1}{4} \frac{V_{o-peak}}{I R_L} \frac{V_{o-peak}}{V_{CC}}$$

Αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας (συν.)

$$\eta = \frac{1}{4} \frac{V_{o-peak}^2}{I R_L V_{CC}} = \frac{1}{4} \frac{V_{o-peak}}{I R_L} \frac{V_{o-peak}}{V_{CC}}$$

Εφόσον $V_{o-peak} < V_{CC}$ και $V_{o-peak} < I R_L$, η μέγιστη αποδοτικότητα επιτυγχάνεται όταν (αγνοούμε $V_{CE,sat}$)

$$V_{o-peak} = V_{CC} = I R_L$$

Και η οποία είναι

$$\eta_{max} = \frac{1}{4} \frac{V_{CC}}{V_{CC}} \frac{V_{CC}}{V_{CC}} = \frac{1}{4} \quad \text{ή } 25\%$$

Στην πράξη, η τάση εξόδου συγκρατείται σε χαμηλότερες τιμές για να αποφευχθεί ο κορεσμός των τρανζίστορ και κατά συνέπεια οι μη γραμμικές παραμορφώσεις. Έτσι, η αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται κυμαίνεται από 10% έως 20%

Εξομοίωση αποδοτικότητας μετατροπής ενέργειας

Για $V_{i-peak}=12V$

$$V_{o-peak} = V_{i-peak} - 0.7$$

$$V_{o-peak} = 12 - 0.7 = 11.3V < V_{CC} - V_{CE-sat} = I R_L$$

$$P_{L_{av}} = 692.36 mW$$

$$P_{D_{av}} = 1.33 W + 1.44 W = 2.77 W$$

$$\eta = \frac{P_{L_{av}}}{P_{D_{av}}} = \frac{0.69 W}{2.77 W} = 0.249 \approx 0.25$$

Για $V_{i-peak}=6V$

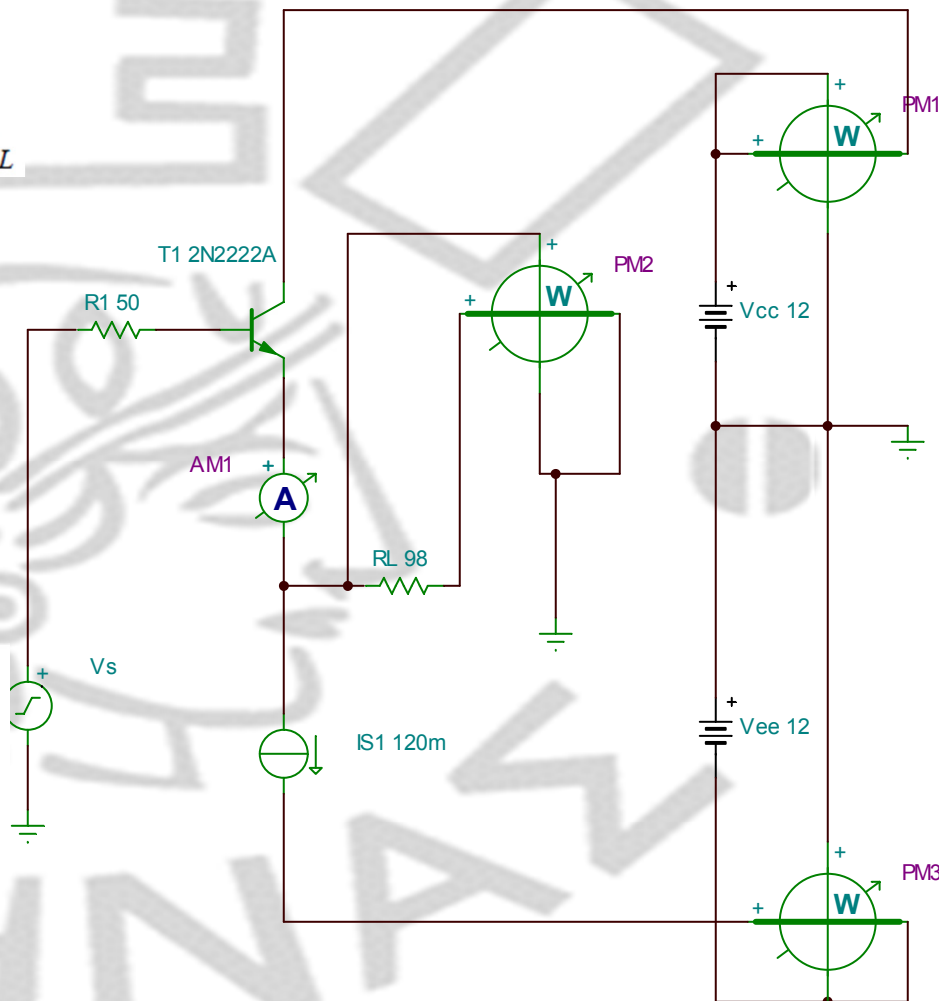
$$V_{o-peak} = V_{i-peak} - 0.7$$

$$V_{o-peak} = 6 - 0.7 = 5.3V < V_{CC} - V_{CE-sat} = I R_L$$

$$P_{L_{av}} = 182.28 mW$$

$$P_{D_{av}} = 1.33 W + 1.44 W = 2.77 W$$

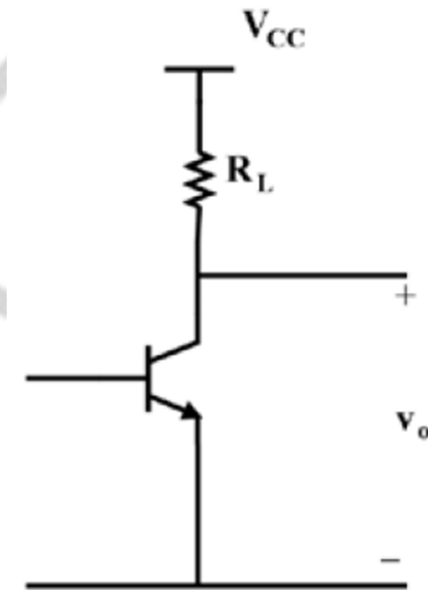
$$\eta = \frac{P_{L_{av}}}{P_{D_{av}}} = \frac{0.18 W}{2.77 W} = 0.065 < 0.25$$



CE με απευθείας σύνδεση φορτίου στο συλλέκτη

- ✓ DC γραμμή φορτίου ~ AC γραμμή φορτίου
- ✓ Για μέγιστη ισχύ, το σημείο λειτουργίας τοποθετείται μέσα στην ενεργό περιοχή των χαρακτηριστικών (όσο το δυνατόν πιο ψηλά).
- ✓ Η γραμμή φορτίου δεν πρέπει να τέμνει την υπερβολή της μέγιστης επιτρεπόμενης κατανάλωσης του τρανζίστορ (είναι ο γ.τ. των σημείων για τα οποία ισχύει:

$$P_{Dmax} = v_{CE} i_C$$
- ✓ Επίσης, η κλίση της γραμμής φορτίου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην γίνεται υπέρβαση των ορίων που θέτουν τα V_{CEmax} και I_{Cmax}



Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριταντής Γ.

δεν περιλαμβάνεται το κύκλωμα πόλωσης του τρανζίστορ (για απλούστευση στη μελέτη)

CE με απευθείας σύνδεση φορτίου στο συλλέκτη (II)

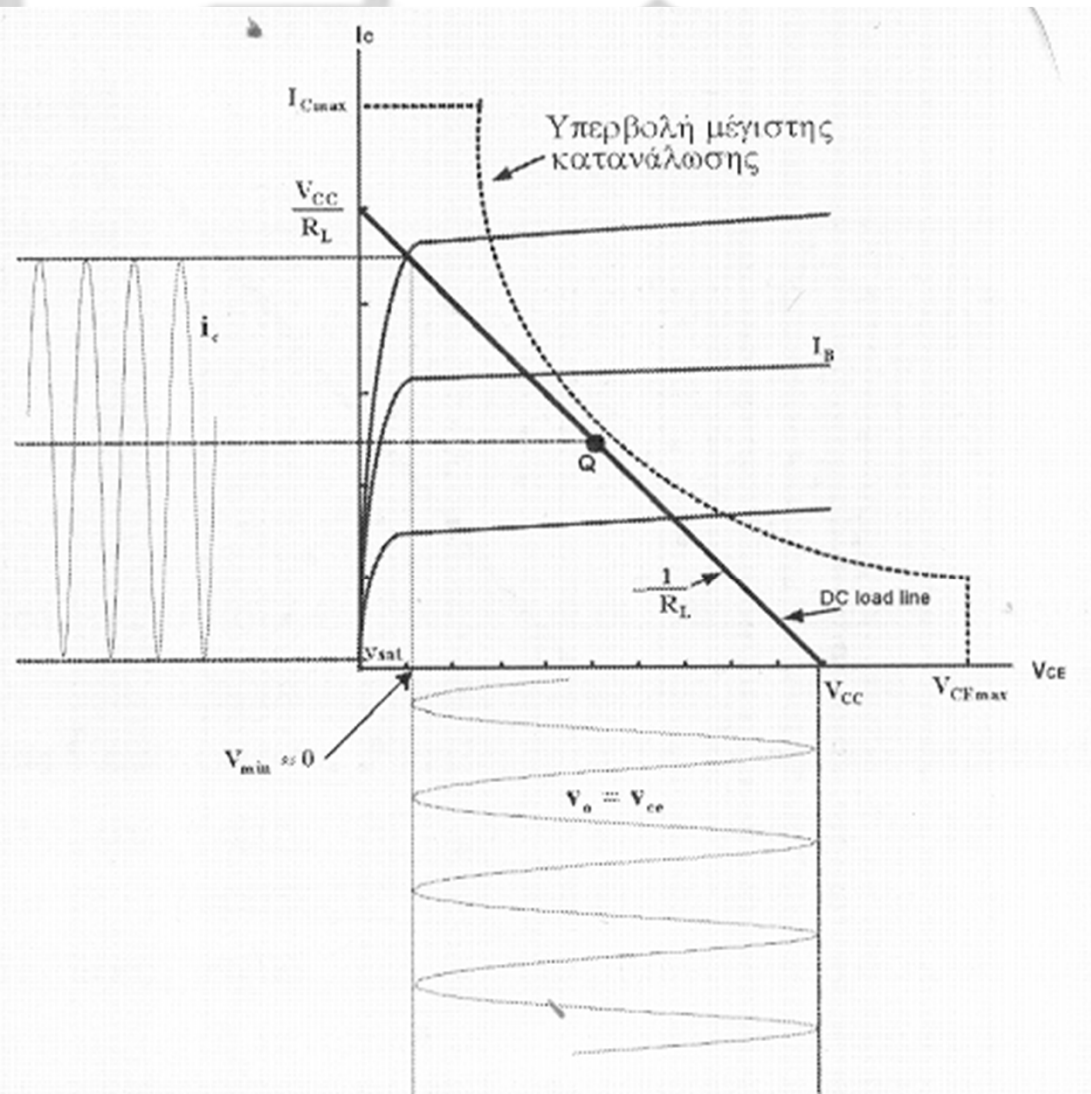
- ✓ Για να επιτύχουμε τις μέγιστες δυνατές διαδρομές τάσης και ρεύματος πρέπει να εξαντλήσουμε τα όρια τάσης και ρεύματος $\rightarrow Q$ στο μέσο ευθείας φόρτου (δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί αποκοπής & κόρου)

- ✓ Πλάτος τάσης στην έξοδο

$$v_{om} = V_{CE(Q)} \approx \frac{V_{cc}}{2}$$

- ✓ Πλάτος ρεύματος στο φορτίο

$$i_{om} = I_{C(Q)} \approx \frac{V_{cc}}{2R_L}$$



Ηλεκτρονικά II, Χαριτανής Γ.

CE με απευθείας σύνδεση φορτίου στο συλλέκτη (III)

Μέγιστη ισχύς επί ωμικού φορτίου

$$P_{ac} = v_{o(rms)} i_{o(rms)} = \frac{v_{om}}{\sqrt{2}} \frac{i_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{CC}}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{I_C}{\sqrt{2}} = \frac{V_{CC} I_C}{4}$$

Η αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας (conversion coefficient) του ενισχυτή μας δείχνει πόση από τη ισχύ συνεχούς που παρέχεται (από το τροφοδοτικό) μετατρέπεται σε ισχύς εναλλασσομένου στο φορτίο

$$n = \frac{\text{μεγιστη ισχυ εναλλασσομενου στο φορτιο}}{\text{συνολικα παρεχομενη ισχυς συνεχους}}$$

$$n = \frac{P_{ac}}{P_S} = \frac{P_{ac}}{V_{CC} I_C} 100\% = \frac{\frac{V_{CC} I_C}{4}}{V_{CC} I_C} = 25\%$$

Εδώ αναδεικνύεται το βασικό **μειονέκτημα** της τάξης A: Χαμηλή απόδοση και κατανάλωση ισχύος στο τρανζίστορ ακόμα και σε κατάσταση ηρεμίας.

Παράδειγμα 2

Διαθέτουμε πηγή τροφοδοσίας 40V και τρανζίστορ με μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές κατασκευαστή $P_{Dmax}=40\text{ W}$, $I_{cmax}=0.5\text{ A}$ και $V_{CEmax}=250\text{ V}$ και επιθυμούμε να σχεδιάσουμε ενισχυτή ισχύος σε τάξη Α με στόχο την απόδοση της μέγιστης δυνατής ισχύος σε ωμικό φορτίο 80 Ω, το οποίο συνδέεται απευθείας στο συλλέκτη του τρανζίστορ. Να διερευνηθεί και η περίπτωση μείωσης παραμόρφωσης

DC γραμμή φορτίου ~ AC γραμμή φορτίου
(θέτω μικρή R_E).

Χάραξη ευθείας φόρτου

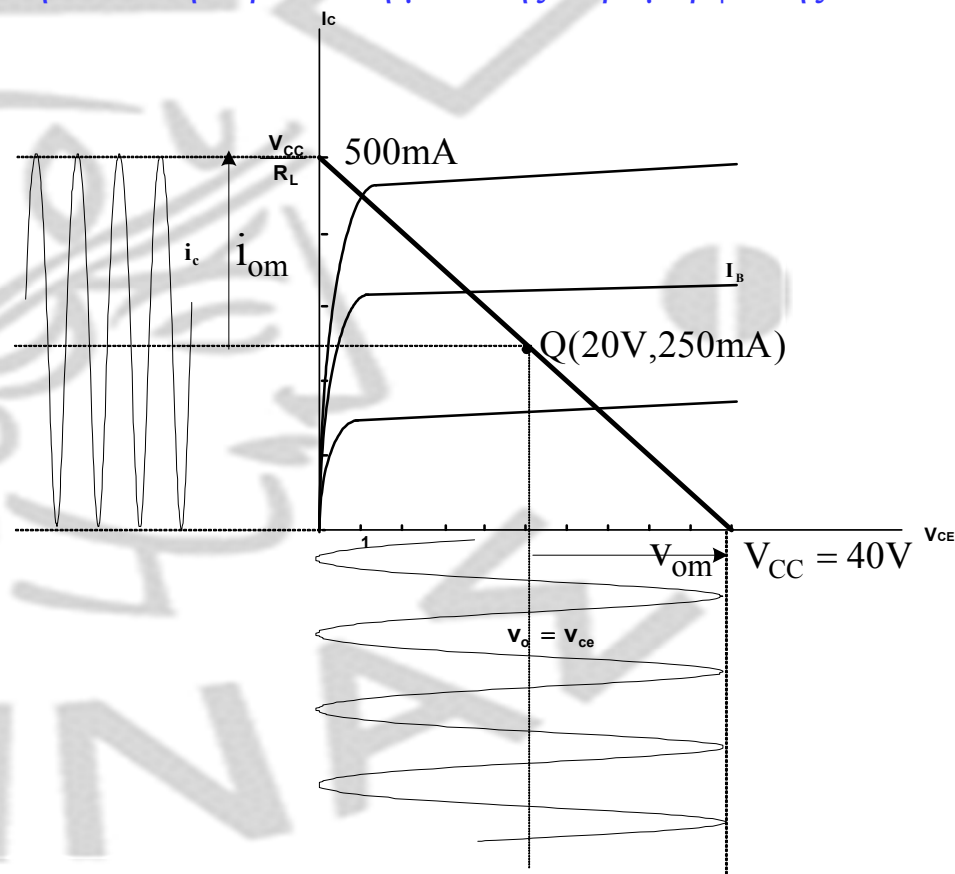
$$i_c = 0 \rightarrow v_{CE} = V_{CC} = 40V$$

$$v_{CE} = 0 \rightarrow i_c = \frac{v_{CE}}{R_L} = \frac{40V}{80\Omega} = 500mA$$

Εύρεση Q → στο μέσο της ευθείας φόρτου, αρα:

$$V_{CE(Q)} = \frac{V_{CC}}{2} = 20V$$

$$I_{C(Q)} = \frac{I_C}{2} = 250mA$$



Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

Παράδειγμα 2 (II)

✓ Πλάτος τάσης στην έξοδο

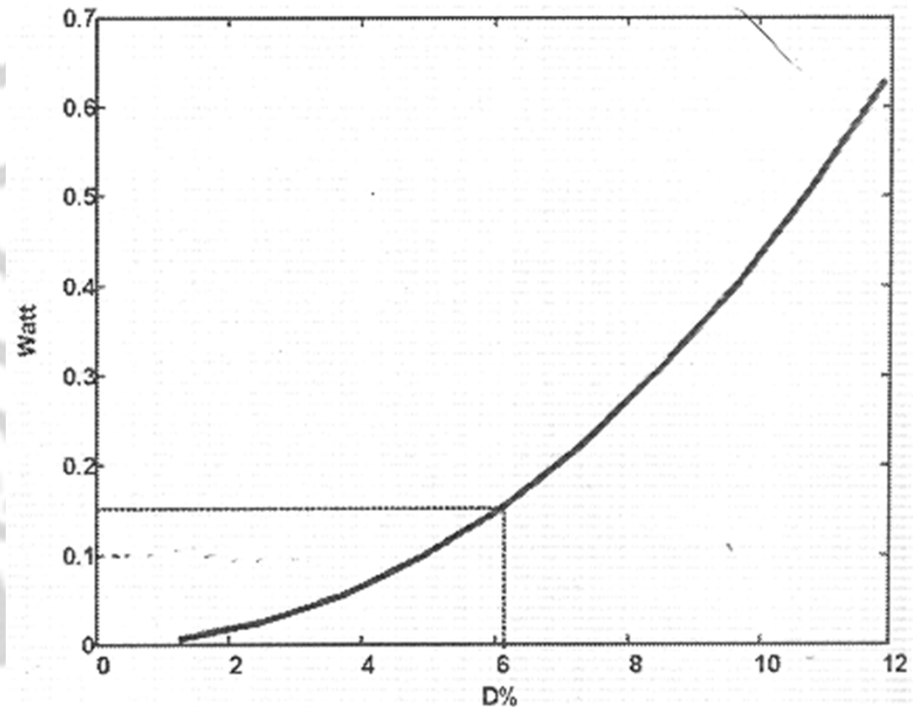
$$v_{om} \approx \frac{V_{cc}}{2} = 20V$$

✓ Πλάτος ρεύματος στο φορτίο

$$i_{om} = I_{C(Q)} \approx \frac{V_{cc}}{2R_L} = 250mA$$

✓ Μέγιστη (θεωρητικά αναμενόμενη) ισχύς στο φορτίο

$$P_{ac} = v_{o(rms)} i_{o(rms)} = \frac{1}{4} V_{CC} I_C = 2.5W$$



Ηλεκτρονικά II, Χαριτανής Γ.

- Η πρακτικά αποδιδόμενη ισχύς στο φορτίο εξαρτάται από το αποδεκτό ποσοστό της μη γραμμικής παραμόρφωσης
- Αύξηση αποδιδόμενης ισχύος → αύξηση παραμόρφωσης

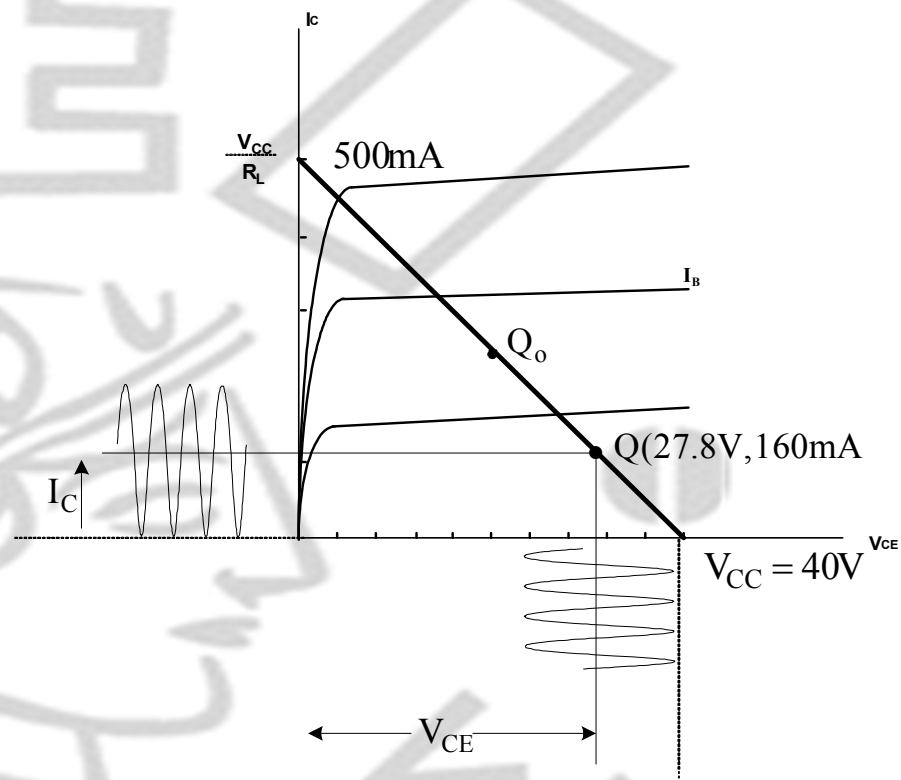
Παράδειγμα 2 (III)

- ✓ Μείωση παραμόρφωσης → μείωση ισχύος εξόδου.
- ✓ Αν θέλουμε $D < 5\%$ → $P_o \sim 100\text{mW}$.
- ✓ Τοποθέτηση Q χαμηλότερα → Γραφική επίλυση
- ✓ Τη θέση του σημείου λειτουργίας θα την προσδιορίσουμε γεωμετρικά. Με βάση τα όμοια τρίγωνα έχουμε

$$\frac{I_C}{I_{C_{\max}}} = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{V_{CC}} \Rightarrow \frac{I_C}{0.5} = \frac{40 - V_{CE}}{40} \quad (1)$$

Με αυτήν τη θέση του σημείου λειτουργίας η μέγιστη παρεχόμενη ισχύς από το κύκλωμα θα είναι,

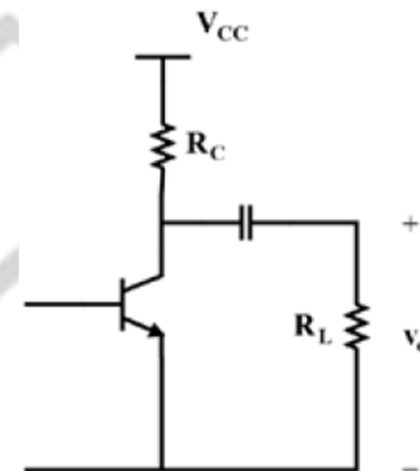
$$P_{ac} = v_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)} = \frac{40 - V_{CE}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_C}{\sqrt{2}} = 0.1\text{W} \quad (2)$$



Από την επίλυση των δυο σχέσεων προκύπτουν,
 $I_C = 0.16\text{A}$ και $V_{CE} = 27.8\text{V}$

CE με χωρητική σύνδεση του φορτίου

- ✓ Δεν είναι πάντα επιθυμητό το συνεχές ρεύμα πόλωσης του τρανζίστορ να διέρχεται από το φορτίο
- ✓ Απομόνωση συνεχούς με χρήση πυκνωτή
- ✓ Στην περίπτωση αυτή η DC γραμμή φορτίου διαφέρει από την AC γραμμή φορτίου, επειδή $R'_L = R_C // R_L < R_C$ άρα μεγαλύτερη κλίση για την AC γραμμή φορτίου
- ✓ Συνεπώς καταργείται ο συμμετρικός τρόπος λειτουργίας που είδαμε πριν με αποτέλεσμα οι διαδρομές τάσης – ρεύματος να είναι μικρότερες
- ✓ Για μέγιστη μεταφορά ισχύος πρέπει $R_L = R_C$. Με τοποθέτηση του Q στο μέσο της DC ευθείας φόρτου έχουμε :



Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

$$R_C = R_L \Rightarrow R'_L = R_C / 2 \Rightarrow$$

$$I_C R'_L = I_C R_C / 2 \Rightarrow I_C R'_L = V_{CC} / 4$$

Παράλληλια ίσων αντιστάσεων

$I_C R_C = (V_{CC}/2)$ επειδή Q στο μέσο

Άρα η AC γραμμή φορτίου τέμνει το άξονα V_{CE} στα $\frac{3}{4}V_{CC}$

$$(V_{CE(Q)} + \frac{1}{4}V_{CC} = \frac{1}{2}V_{CC} + \frac{1}{4}V_{CC} = \frac{3}{4}V_{CC})$$

CE με χωρητική σύνδεση του φορτίου (II)

Μέγιστο πλάτος τάσης εξόδου χωρίς ψαλιδισμό:

$$v_{om} \approx \frac{V_{CC}}{4}$$

Μέγιστο πλάτος ρεύματος στο φορτίο:

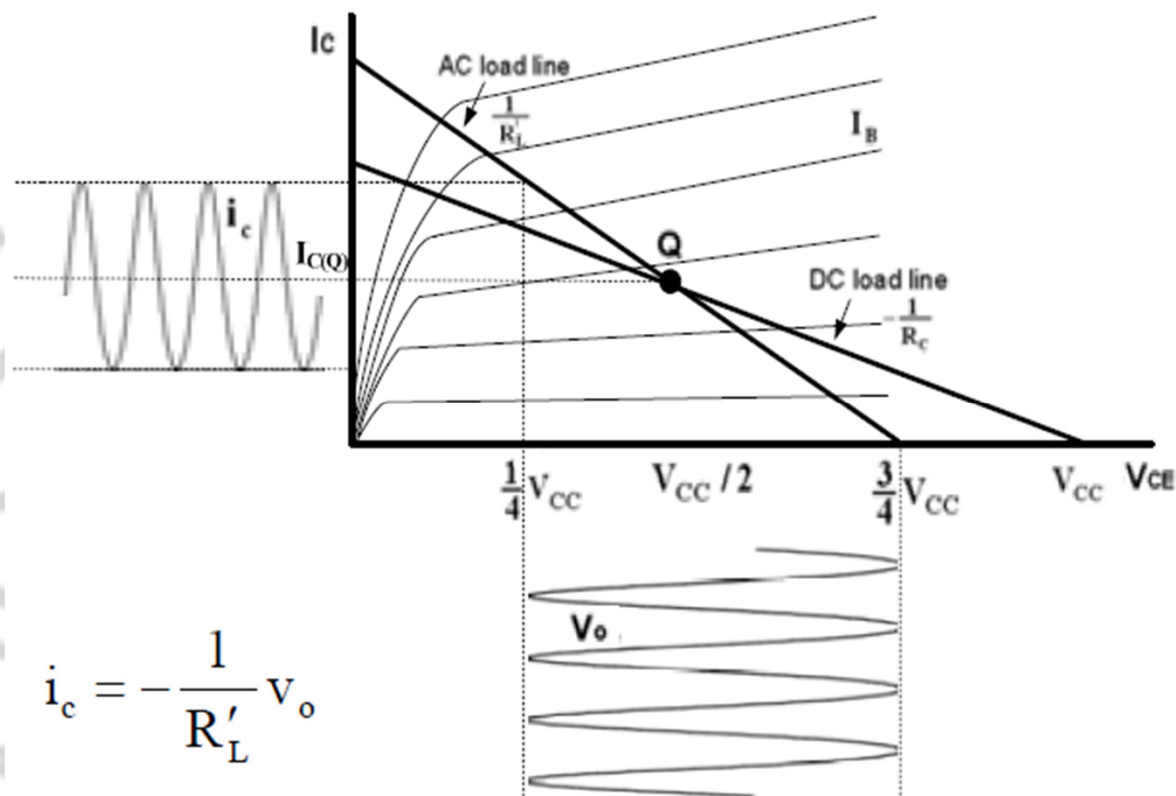
$$i_{om} = \frac{I_{C(Q)}}{2} \approx \frac{V_{CC}}{4R_L}$$

Μέγιστη (θεωρητικά αναμενόμενη) ισχύς στο φορτίο

$$P_{ac} = v_{o(rms)} i_{o(rms)} = \frac{V_{CC}}{4\sqrt{2}} \frac{I_C}{2\sqrt{2}} = \frac{V_{CC} I_C}{16}$$

Μέγιστη (θεωρητικά αναμενόμενη) απόδοση ισχύος

$$n = \frac{P_{ac}}{V_{CC} I_C} = 6.25\%$$



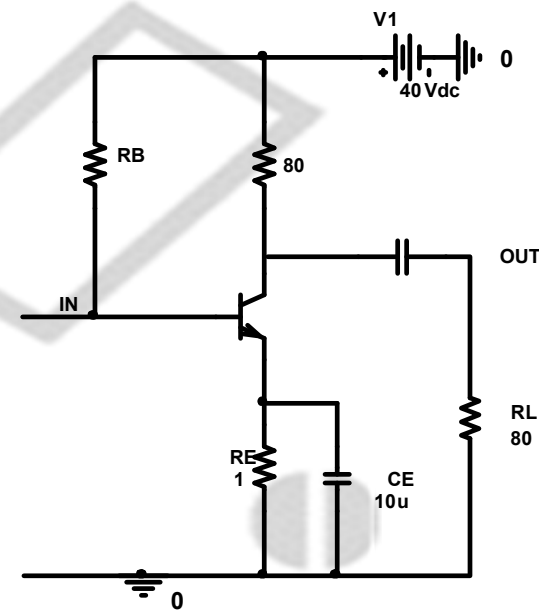
Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.

Το φορτίο απομονώθηκε αλλά η απόδοση είναι πολύ μικρή, λόγω θερμικής απώλειας στην R_C

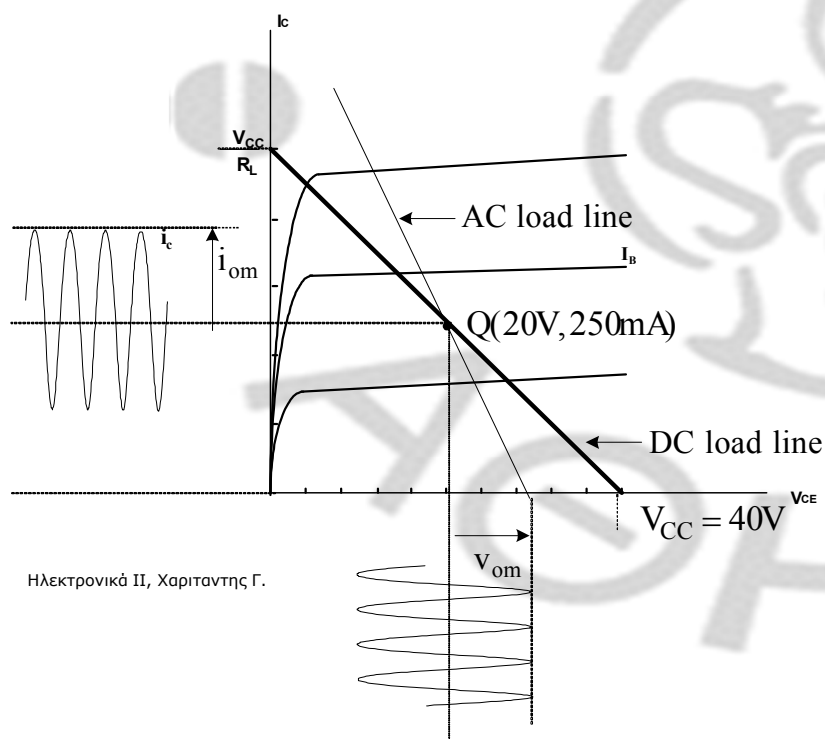
Παράδειγμα 3

Στον ενισχυτή ισχύος του σχήματος το ρεύμα συλλέκτη είναι 250 mA. Να υπολογίσετε την μέγιστη ισχύ στο φορτίο R_L . Αγνοήστε την R_E

$$P_{ac} = V_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)} = \frac{V_{CE}}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{I_C}{2\sqrt{2}} = \frac{V_{CE} I_{CE}}{8} = \frac{V_{CC} I_{CE}}{16} = 0.625 \text{ W}$$



Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.



Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριτανής Γ.