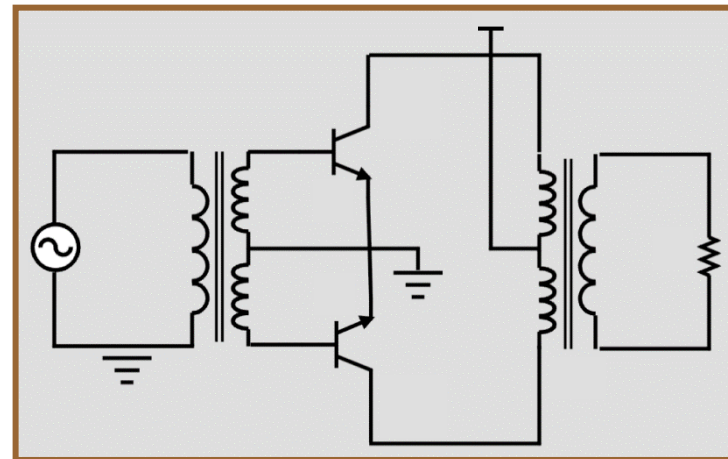
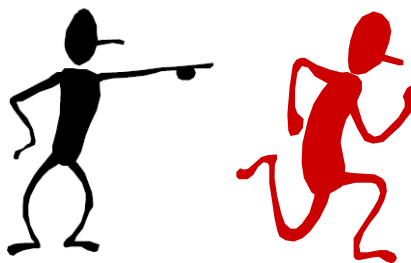


ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Λάμπρος Μπισδούνης
Καθηγητής



7^η ενότητα ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ



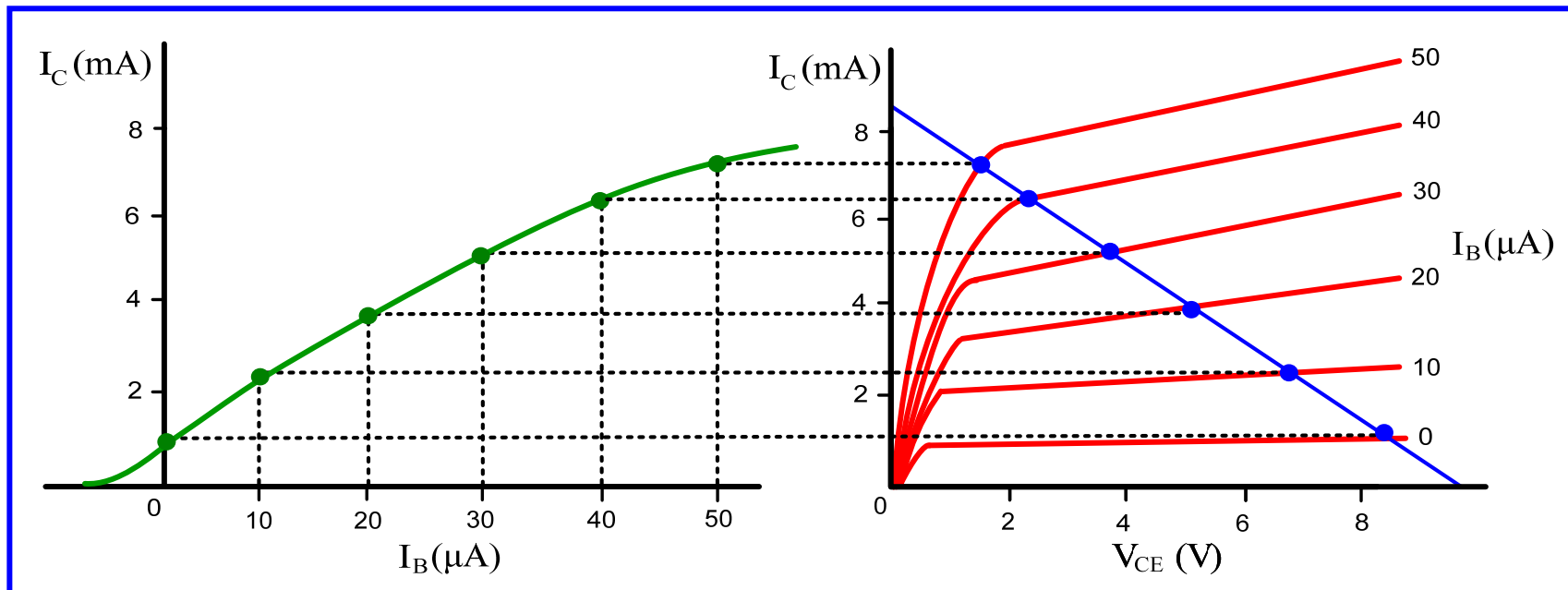
Περιεχόμενα 7ης ενότητας

- Στην έβδομη ενότητα, θα μελετήσουμε τους **ενισχυτές ισχύος** που χρησιμοποιούνται ως βαθμίδες εξόδου πριν το φορτίο και σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποδίδουν σημαντική ισχύ στο εφαρμοζόμενο φορτίο.
- Εισαγωγή στους ενισχυτές ισχύος.
- **Χαρακτηριστική μεταφοράς, γραμμική λειτουργία και παραμόρφωση σήματος εξόδου.**
- **Τάξεις λειτουργίας** (A, B, AB) ενισχυτή.
- Ενισχυτές ισχύος σε **τάξη A**:
 - ✓ Ενισχυτής ΚΕ με απευθείας σύνδεση φορτίου στο συλλέκτη.
 - ✓ Ενισχυτής ΚΣ με απευθείας σύνδεση φορτίου στον εκπομπό.
 - ✓ Ενισχυτής ΚΕ με χωρητική σύνδεση φορτίου.
 - ✓ Ενισχυτής ΚΕ με σύνδεση φορτίου μέσω μετασχηματιστή.
- Ενισχυτής ισχύος **push-pull** με **μετασχηματιστή** (σε τάξη λειτουργίας A, AB).
- Ενισχυτής ισχύος **push-pull** με **συμπληρωματικά τρανζίστορ**.
- Συμπεράσματα και ασκήσεις.

Εισαγωγή στους ενισχυτές ισχύος

- Σε ενισχυτικά συστήματα πολλών βαθμίδων, οι **ενισχυτές ισχύος** αποτελούν τις **βαθμίδες εξόδου** πριν το τελικό φορτίο και σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδουν **σημαντική ισχύ στο φορτίο**.
- Αφού η ισχύς αποτελεί το γινόμενο ρεύματος και τάσης του φορτίου, για να αποδοθεί σημαντική ισχύς στο φορτίο θα πρέπει οι **διαδρομές τάσης** και **ρεύματος** στους ενισχυτές ισχύος να είναι **μεγάλες**.
- Για **μέγιστη απόδοση ισχύος** θα πρέπει να αξιοποιούνται τόσο η **μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος** των **τρανζίστορ**, όσο και τα **όρια** της **ενεργού περιοχής** τους.
- Οι **ενισχυτές ισχύος** λειτουργούν ως **ενισχυτές μεγάλων σημάτων** και ο τρόπος **πόλωσης** των **τρανζίστορ** σε πολλούς από αυτούς είναι **διαφορετικός** από αυτόν που έχουμε έως τώρα μελετήσει σε ενισχυτές μικρών σημάτων.
- Η παραμόρφωση του σήματος εξόδου αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της ισχύος στην έξοδο, οπότε όταν αυξάνονται οι απαιτήσεις για **μείωση** της **παραμόρφωσης** στην **έξοδο**, **μειώνεται** η **μέγιστη τιμή ισχύος** του ενισχυτή.

Χαρακτηριστική μεταφοράς τρανζίστορ

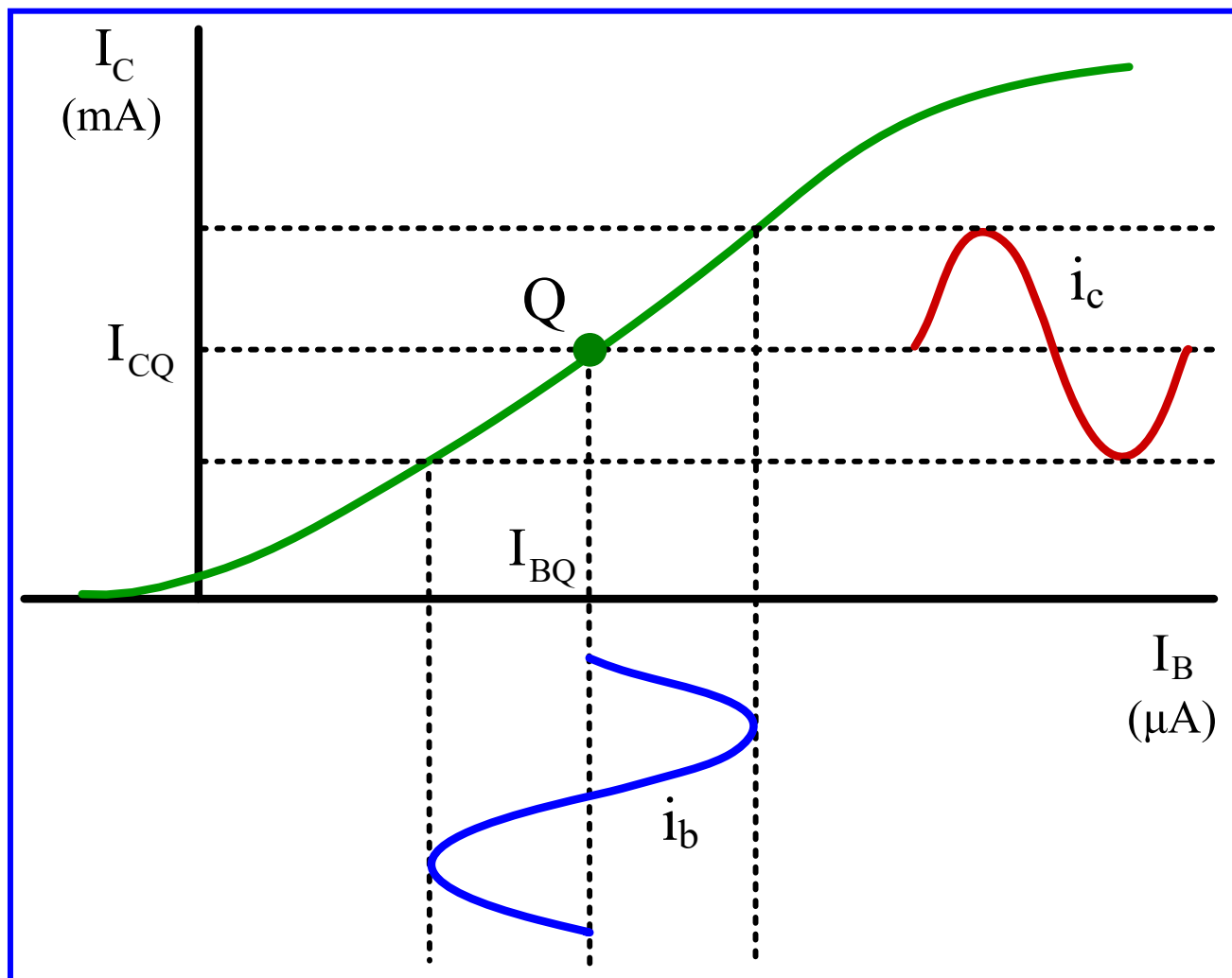


- Η **χαρακτηριστική μεταφοράς** ενός κυκλώματος περιγράφει τη σχέση μεταξύ ενός μεγέθους εισόδου με ένα μέγεθος εξόδου.
- Στο διπολικό τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού υπάρχει διέγερση ρεύματος (δηλ. ως μέγεθος εισόδου λαμβάνουμε το ρεύμα βάσης) και ως μέγεθος εξόδου λαμβάνουμε το ρεύμα συλλέκτη.
- Η χαρακτηριστική μεταφοράς προκύπτει από τις χαρακτηριστικές του τρανζίστορ και τη γραμμή φορτίου και προφανώς εξαρτάται από τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος (V_{CC} , R_C) τα οποία διαφοροποιούν τη γραμμή φορτίου.

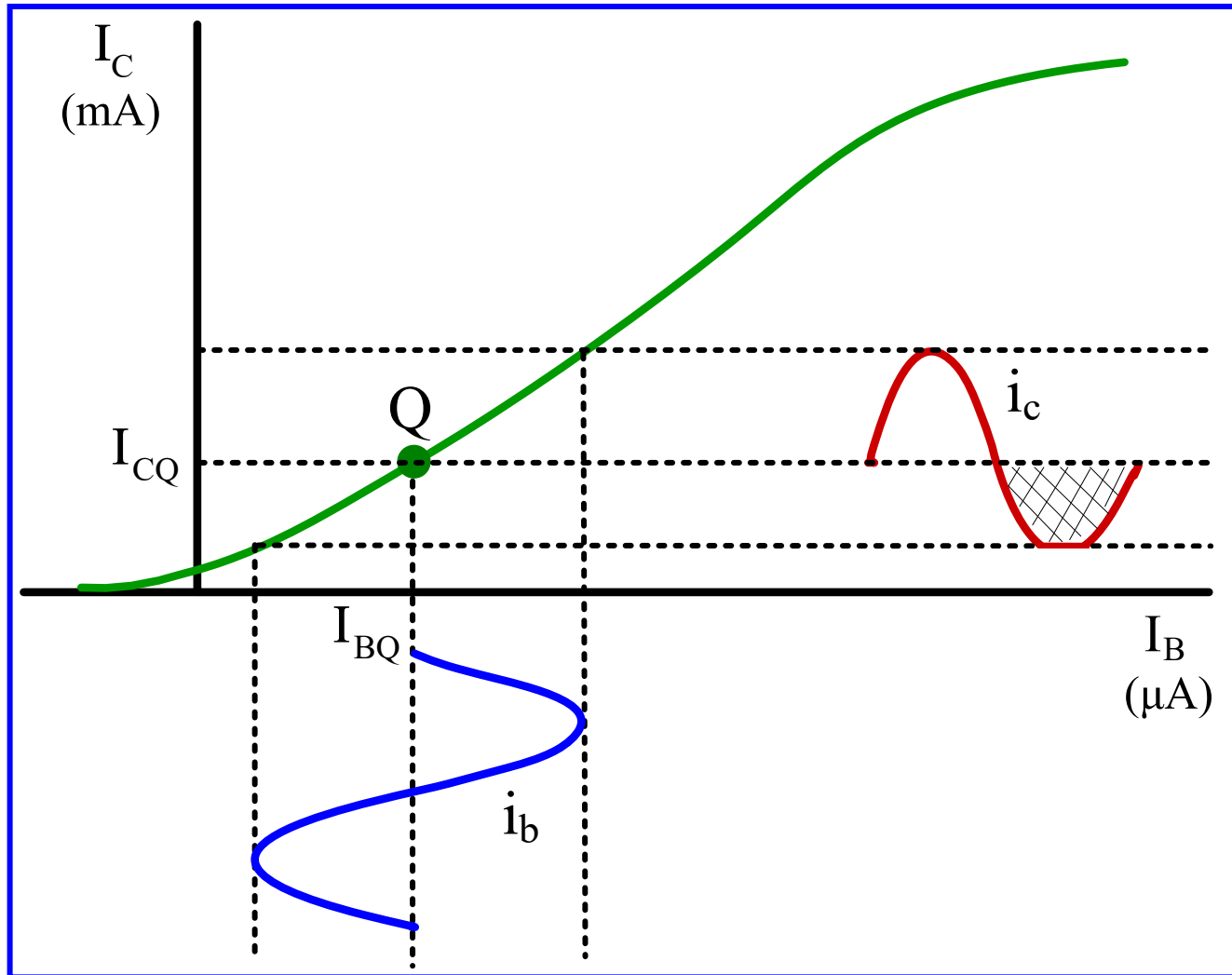
Χαρακτηριστική μεταφοράς τρανζίστορ

- Η **χαρακτηριστική μεταφοράς** του διπολικού τρανζίστορ παρουσιάζει στο μέσο της ένα σχετικά ευθύγραμμο τμήμα, ενώ στα πολύ μικρά ρεύματα βάσης (περιοχή αποκοπής) και κυρίως στα μεγάλα ρεύματα βάσης (περιοχή κόρου) παρουσιάζει καμπυλότητα.
- Εάν το **σημείο λειτουργίας** βρίσκεται μέσα στο **ευθύγραμμο τμήμα** της χαρακτηριστικής μεταφοράς, τότε η σχέση των ρευμάτων βάσης και συλλέκτη είναι γραμμική και το σήμα εξόδου θα έχει την ίδια μορφή με το σήμα εισόδου (**γραμμική λειτουργία κυκλώματος**).
- Εάν όμως το **σημείο λειτουργίας** βρίσκεται σε **καμπύλο τμήμα** της χαρακτηριστικής μεταφοράς ή εάν το εφαρμοζόμενο σήμα παρουσιάζει αρκετά μεγάλο πλάτος, τότε η σχέση των δύο ρευμάτων δεν είναι γραμμική και το **σήμα εξόδου παραμορφώνεται** (δηλ. έχει διαφορετική μορφή από το σήμα εισόδου).
- **Παραμόρφωση σήματος εξόδου** έχουμε λοιπόν όταν το τρανζίστορ εισέρχεται στην **περιοχή αποκοπής** ή όταν το τρανζίστορ εισέρχεται στην **περιοχή κόρου**.

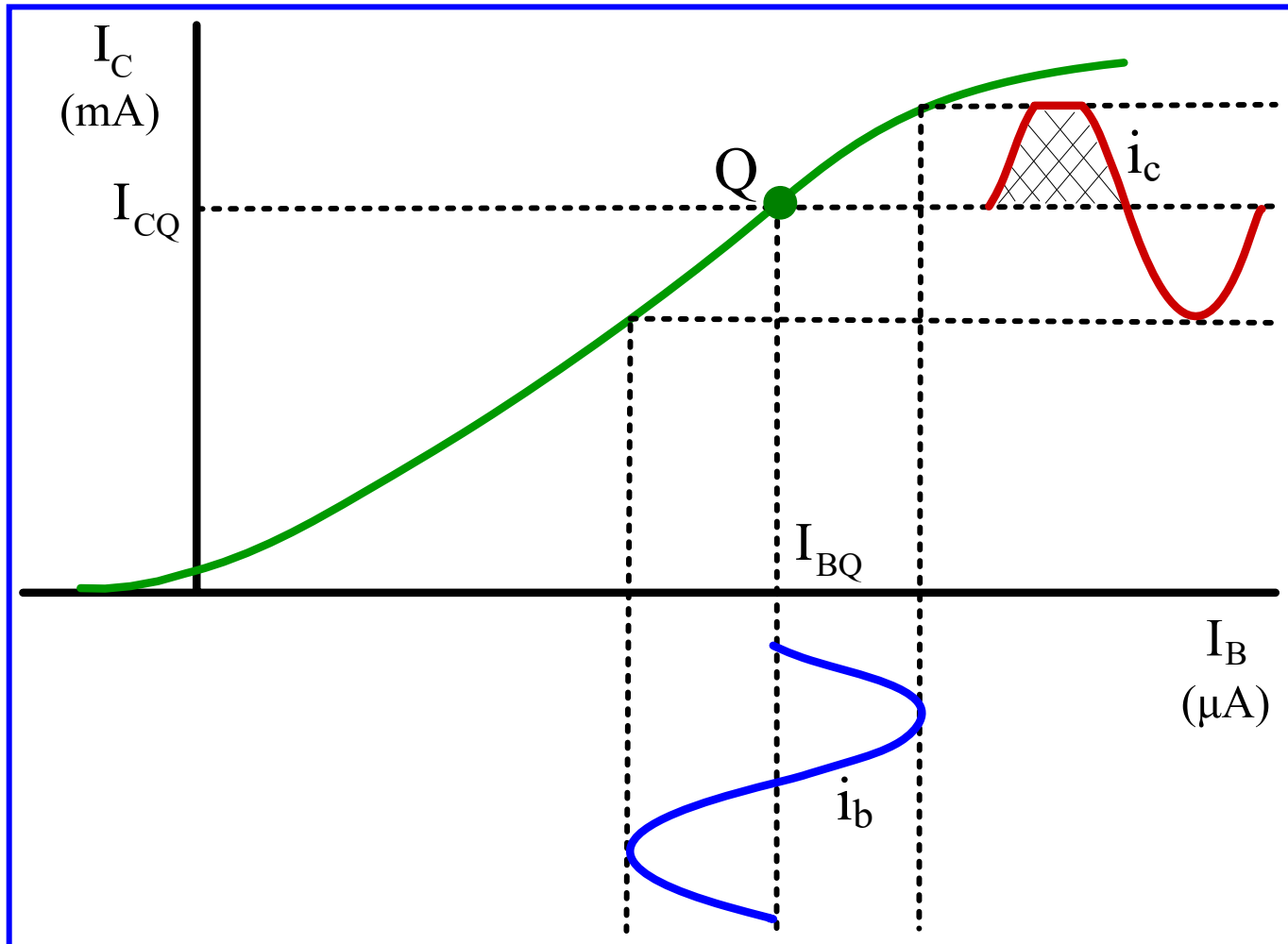
Γραμμική λειτουργία



Παραμόρφωση εξόδου



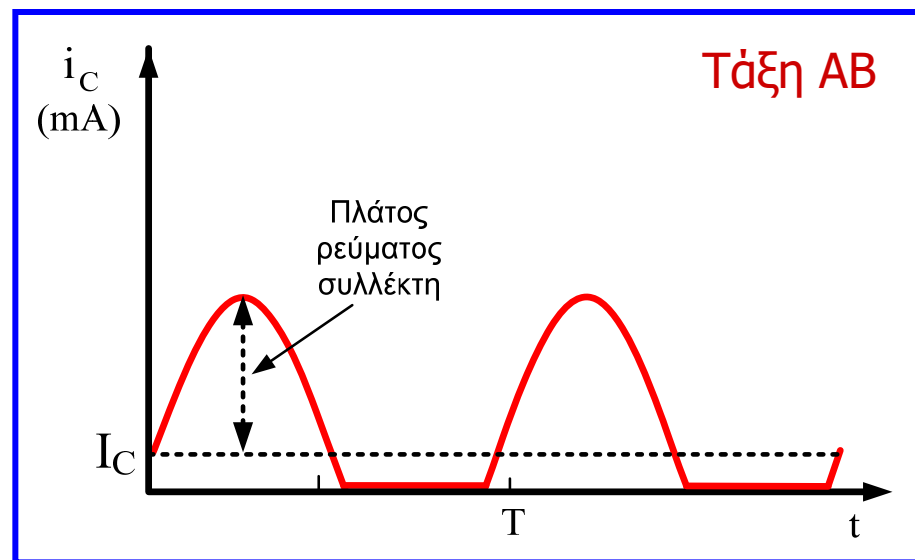
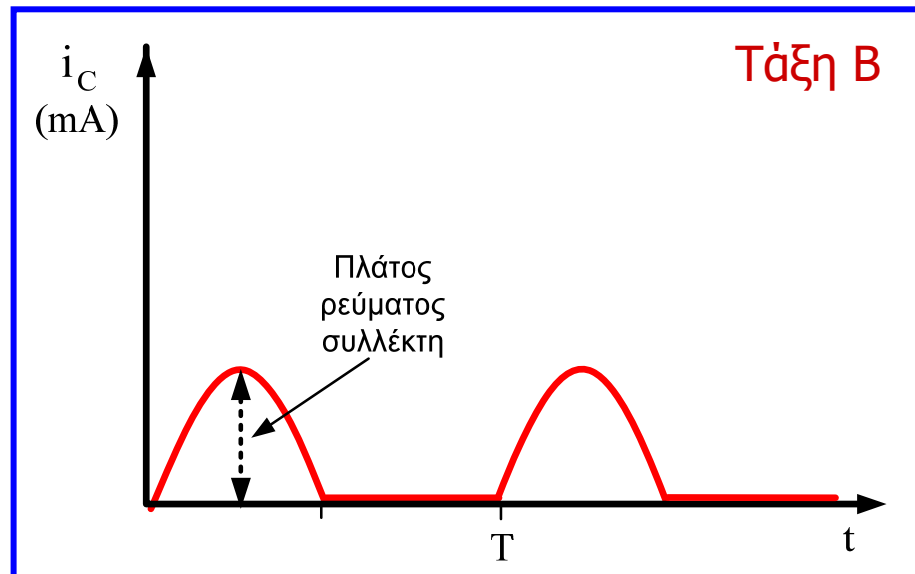
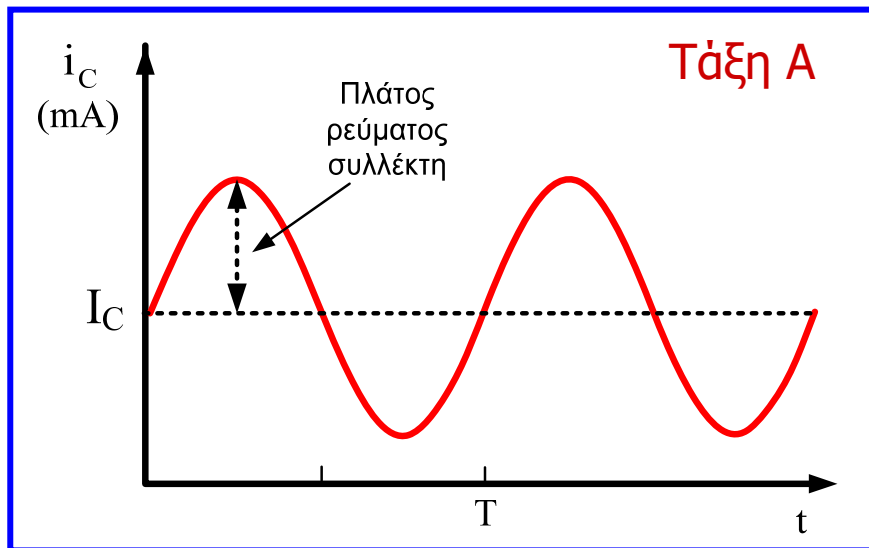
Παραμόρφωση εξόδου



Τάξεις λειτουργίας ενισχυτικής βαθμίδας

- Οι ενισχυτικές βαθμίδες κατατάσσονται ανάλογα με τη κυματομορφή του ρεύματος συλλέκτη που προκύπτει όταν εφαρμόζεται σήμα στην είσοδό τους.
- Εάν μία ημιτονική τάση εφαρμόζεται στη βάση του τρανζίστορ μίας ενισχυτικής βαθμίδας και η πόλωση του τρανζίστορ επιτρέπει αγωγή ρεύματος συλλέκτη και στις δύο ημιπεριόδους του σήματος εισόδου (δηλ. κατά τη διάρκεια όλου του κύκλου), τότε η βαθμίδα λειτουργεί σε **τάξη A**.
- Το τρανζίστορ πολώνεται με ρεύμα συλλέκτη μεγαλύτερο από το πλάτος του ρεύματος συλλέκτη που προκαλεί το σήμα εισόδου και το σημείο λειτουργίας βρίσκεται συνήθως στο ευθύγραμμο τμήμα της χαρακτηριστικής μεταφοράς του τρανζίστορ.
- Οι ενισχυτές τάξης A λειτουργούν όπως οι ενισχυτές μικρού σήματος (που ήδη έχουμε μελετήσει) όπου το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ τοποθετείται στην ενεργό περιοχή.
- Μία ενισχυτική βαθμίδα λειτουργεί σε **τάξη B** όταν το τρανζίστορ πολώνεται στην αποκοπή δηλ. το ρεύμα συλλέκτη είναι μηδενικό. Για ημιτονικό σήμα εισόδου, προκαλείται ρεύμα συλλέκτη μόνο κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου.
- Στην ενδιάμεση **τάξη AB**, το τρανζίστορ πολώνεται σε μικρό μη μηδενικό ρεύμα (κοντά στην αποκοπή και αρκετά χαμηλότερο από το πλάτος του ρεύματος συλλέκτη που προκαλεί το σήμα εισόδου), με αποτέλεσμα το τρανζίστορ να άγει για διάστημα ελαφρώς μεγαλύτερο του μισού κύκλου του σήματος εισόδου.

Τάξεις λειτουργίας ενισχυτικής βαθμίδας



Ενισχυτές ισχύος σε τάξη A

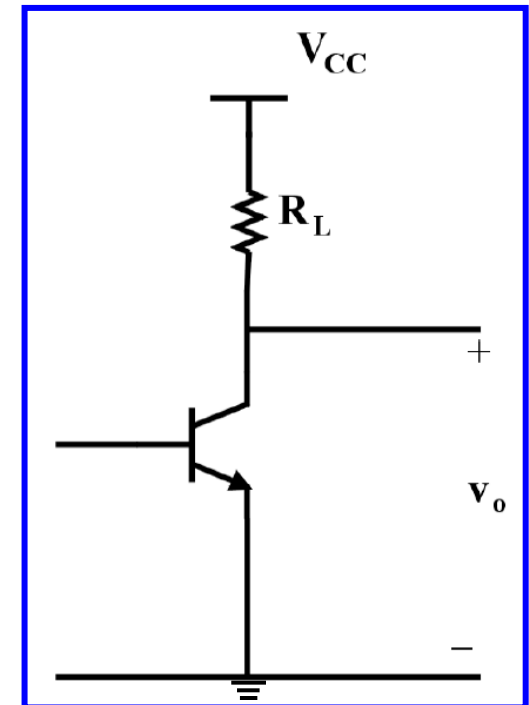
- Οι ενισχυτές ισχύος σε τάξη A, λειτουργούν όπως οι ενισχυτές μικρού σήματος, δηλαδή το σημείο λειτουργίας των τρανζίστορ βρίσκεται στην ενεργό περιοχή των χαρακτηριστικών.
- Ωστόσο, στους ενισχυτές ισχύος οι **διαδρομές τάσεων** και **ρευμάτων** θα πρέπει να είναι οι **μέγιστες δυνατές**.
- Για το λόγο αυτό, η **παραμόρφωση** του σήματος εξόδου λόγω μη γραμμικής λειτουργίας των τρανζίστορ απαιτεί ιδιαίτερη **προσοχή**.
- Όπως ήδη έχουμε μελετήσει, η εφαρμογή **αρνητικής ανατροφοδότησης** μπορεί να **μειώσει** την **παραμόρφωση** του σήματος εξόδου σε αποδεκτό επίπεδο.
- Υπάρχουν αρκετές **τοπολογίες ενισχυτών σε τάξη A**, αλλά από αυτές τέσσερις είναι οι σημαντικότερες:
 - ✓ Ενισχυτής ΚΕ με απευθείας σύνδεση φορτίου στο συλλέκτη.
 - ✓ Ενισχυτής ΚΣ με απευθείας σύνδεση φορτίου στον εκπομπό.
 - ✓ Ενισχυτής ΚΕ με χωρητική σύνδεση φορτίου.
 - ✓ Ενισχυτής ΚΕ με σύνδεση φορτίου μέσω μετασχηματιστή.

ΚΕ με απευθείας σύνδεση φορτίου στο συλλέκτη

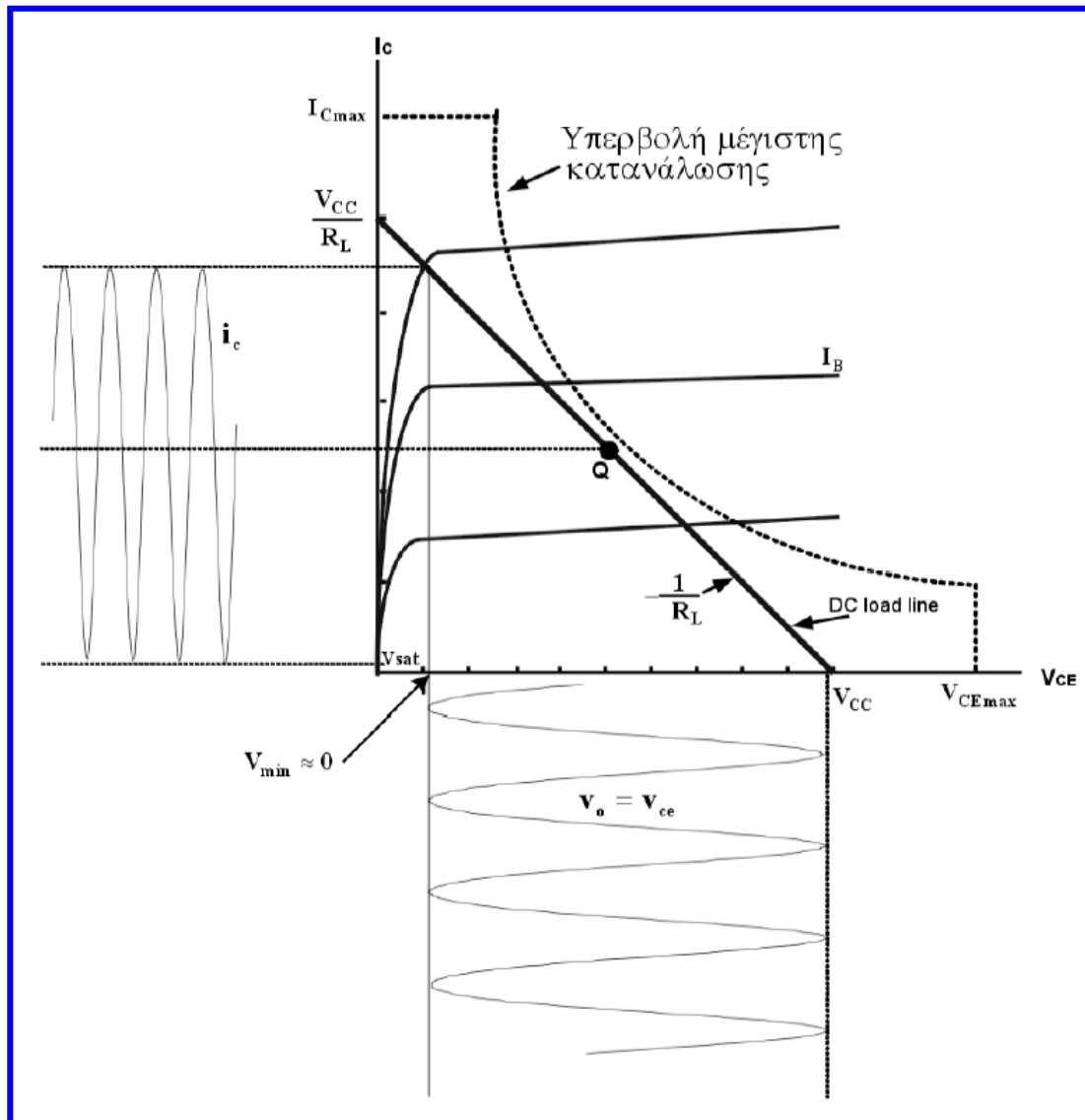
- Για τον ενισχυτή του σχήματος, η γραμμή φορτίου στο συνεχές συμπίπτει με τη γραμμή φορτίου στο εναλλασσόμενο.
- Για απλούστευση της μελέτης δεν περιλαμβάνεται το κύκλωμα πόλωσης του τρανζίστορ.
- Για μέγιστη ισχύ, το σημείο λειτουργίας τοποθετείται μέσα στην ενεργό περιοχή των χαρακτηριστικών.
- Ωστόσο, δε θα πρέπει η γραμμή φορτίου να τέμνει την **υπερβολή μέγιστης επιτρεπόμενης κατανάλωσης** του τρανζίστορ, που είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων για τα οποία ισχύει:

$$V_{CE} \cdot i_C = P_{Dmax}$$

- Επίσης, η κλίση της γραμμής φορτίου εναλλασσόμενου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μη γίνεται υπέρβαση των ορίων μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης (V_{CEmax}) και ρεύματος (I_{Cmax}) του τρανζίστορ.



ΚΕ με απευθείας σύνδεση φορτίου στο συλλέκτη



Κάτω από τις συνθήκες αυτές, εάν το **σημείο λειτουργίας** τοποθετηθεί στο **μέσο** της **γραμμής φορτίου**, τότε επιτυγχάνονται οι μέγιστες δυνατές διαδρομές τάσης και ρεύματος.

Πλάτη τάσης εξόδου και ρεύματος φορτίου:

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

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

ΚΕ με απευθείας σύνδεση φορτίου στο συλλέκτη

Μέγιστη ισχύς στο ωμικό φορτίο:

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

Απόδοση ισχύος (conversion coefficient) του ενισχυτή:

$$\eta = \frac{\text{μέγιστη ισχύς εναλλασσομένου στο φορτίο}}{\text{συνολικά παρεχόμενη ισχύς συνεχούς}}$$

$$\eta = \frac{P_{ac}}{P_T} = \frac{P_{ac}}{V_{CC} I_C} \cdot 100\% = 25\%$$

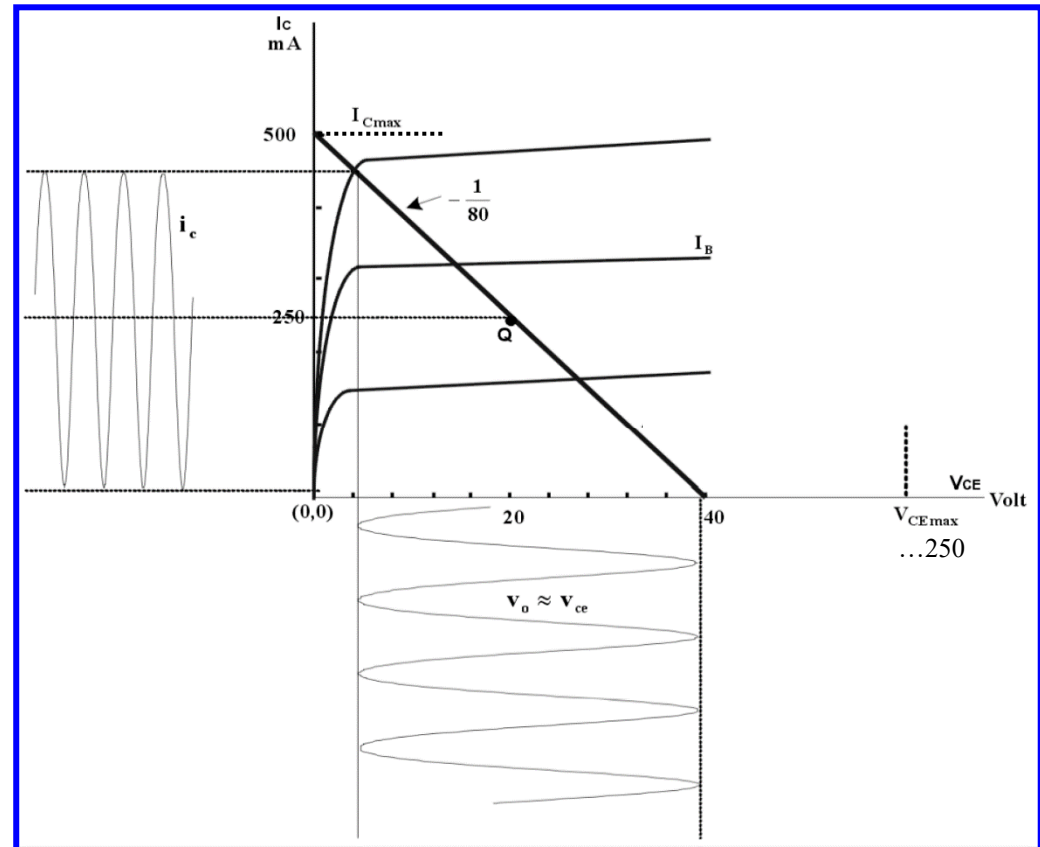
Συνεπώς, το 1/4 της παρεχόμενης ισχύος συνεχούς μετατρέπεται σε ωφέλιμη ισχύ στο φορτίο.

Βασικά μειονεκτήματα ενισχυτών τάξης A: χαμηλή απόδοση και κατανάλωση ισχύος στο τρανζίστορ $V_{CE} \cdot I_C$ ακόμη και κατά την απουσία σήματος εισόδου (δηλ. στην κατάσταση ηρεμίας)

Παράδειγμα 1^ο: ενισχυτής ισχύος ΚΕ σε τάξη Α

Διαθέτουμε πηγή τροφοδοσίας 40 V και τρανζίστορ με μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές κατασκευαστή $P_{Dmax} = 20 \text{ W}$, $I_{Cmax} = 0.5 \text{ A}$ 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 80Ω , το οποίο συνδέεται απευθείας στο συλλέκτη του τρανζίστορ.

Η γραμμή φορτίου στο συνεχές συμπίπτει με τη γραμμή φορτίου στο εναλλασσόμενο. Για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ισχύος στο φορτίο, θα πρέπει το σημείο λειτουργίας να τοποθετηθεί στο μέσο της γραμμής φορτίου, η οποία τέμνει τον άξονα ρεύματος στην τιμή $i_C = V_{CC} / R_L = 500 \text{ mA}$ και τον άξονα τάσης στην τιμή $V_{CE} = V_{CC} = 40 \text{ V}$. Οπότε, το σημείο λειτουργίας θα πρέπει να τοποθετηθεί ως **Q (20V, 250mA)**.



Παράδειγμα 1^ο: ενισχυτής ισχύος ΚΕ σε τάξη Α

Πλάτη τάσης εξόδου και ρεύματος φορτίου:

$$V_{om} \approx \frac{V_{CC}}{2} = 40 \text{ V}$$

$$i_{om} \approx I_{C(Q)} = 250 \text{ mA}$$

Μέγιστη (θεωρητικά αναμενόμενη) ισχύς στο ωμικό φορτίο:

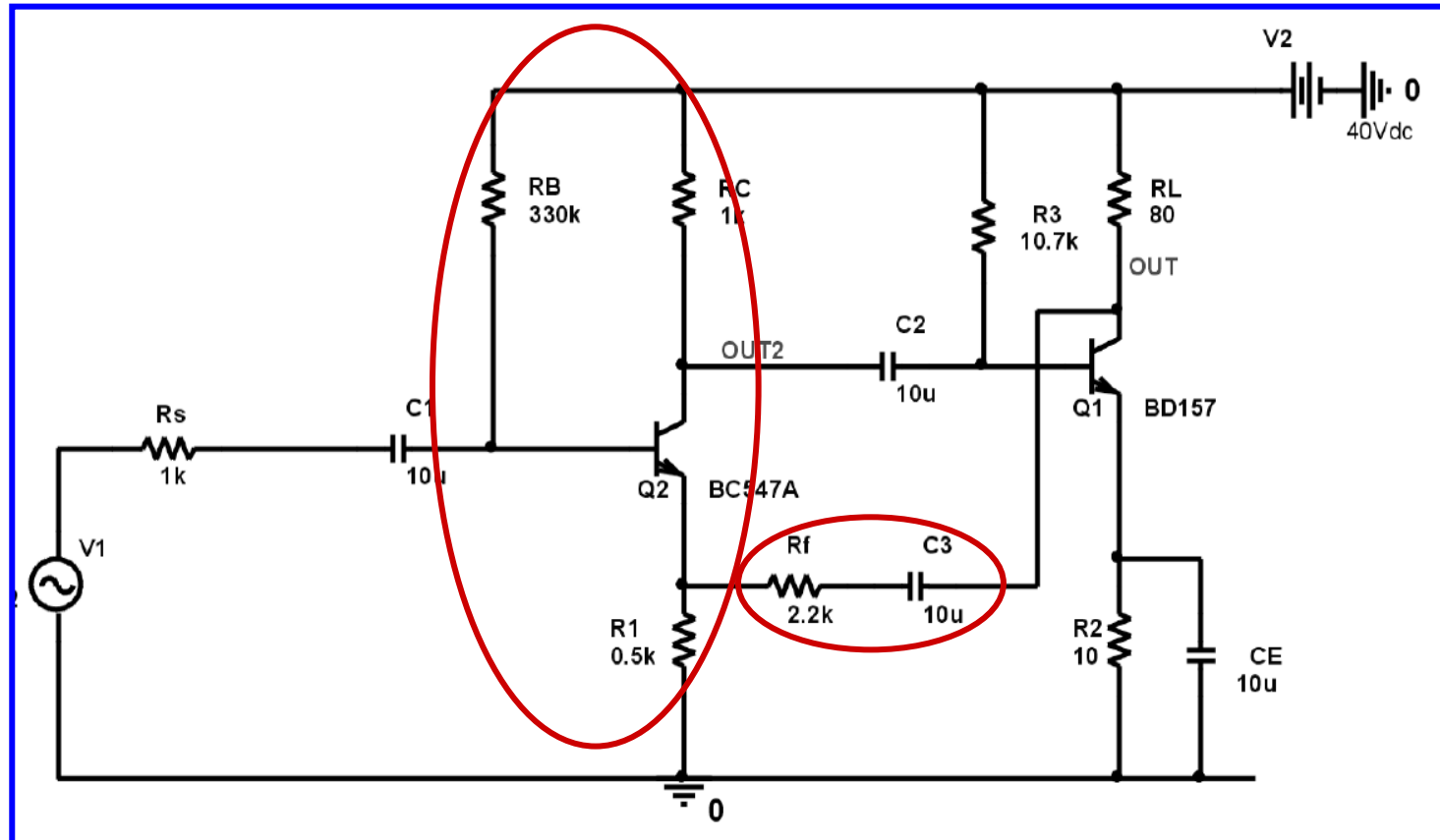
$$P_{ac} = V_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)} = \frac{1}{4} \cdot V_{CC} \cdot I_C = 2,5 \text{ W}$$

Μέγιστη απόδοση ισχύος του ενισχυτή:

$$\eta = \frac{P_{ac}}{P_T} = \frac{P_{ac}}{V_{CC} I_C} \cdot 100\% = 25\%$$

Η πρακτικά αποδιδόμενη ισχύς στο φορτίο εξαρτάται από το αποδεκτό ποσοστό της παραμόρφωσης του σήματος εξόδου, το οποίο αυξάνεται όταν αυξάνεται το μέγεθος του σήματος εισόδου.

Ενισχυτής ισχύος ΚΕ με οδηγό και ανατροφοδότηση



Η ενίσχυση ισχύος μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη οδηγού βαθμίδας και η παραμόρφωση του σήματος εξόδου μπορεί να μειωθεί με εφαρμογή αρνητικής ανατροφοδότησης τάσης σε σειρά με την είσοδο.

ΚΣ με απευθείας σύνδεση φορτίου στον εκπομπό

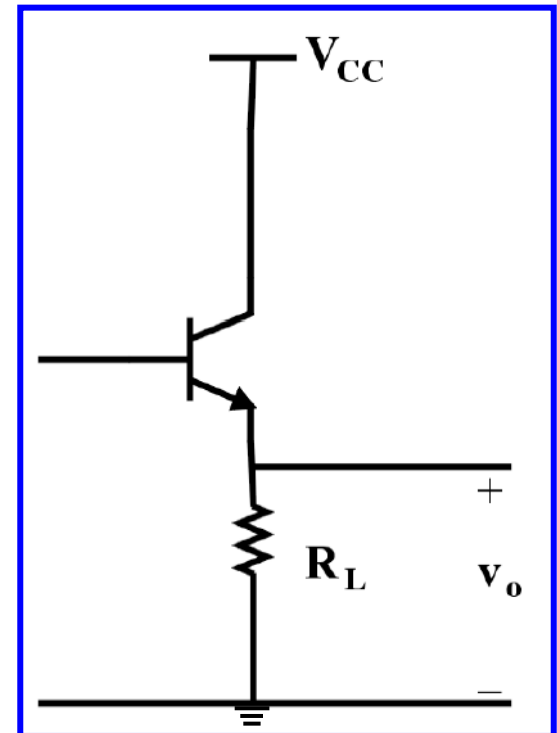
- Ο ενισχυτής αυτός λειτουργεί παρόμοια με τον προηγούμενο σε σχέση με τον οποίο παρουσιάζει αναστροφή φάσης στην έξοδο.

$$V_{CC} = V_{CE} + V_{R_L}$$

$$0 = v_{ce} + v_o$$

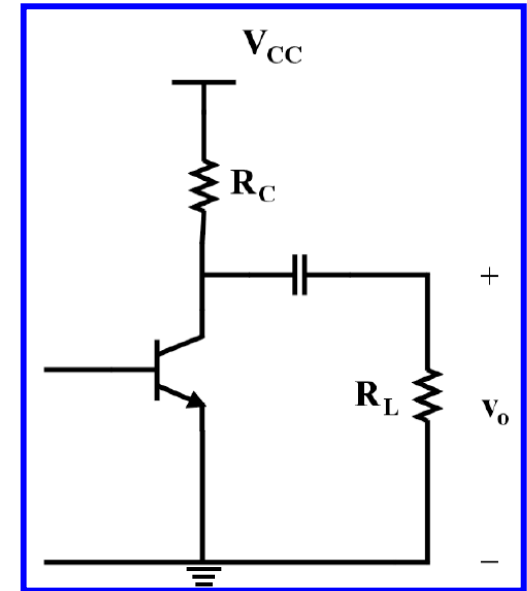
$$v_o = -v_{ce}$$

- Με όμοιο τρόπο προκύπτει ότι η μέγιστη απόδοση ισχύος είναι $\eta = 25\%$.



ΚΕ με χωρητική σύνδεση φορτίου

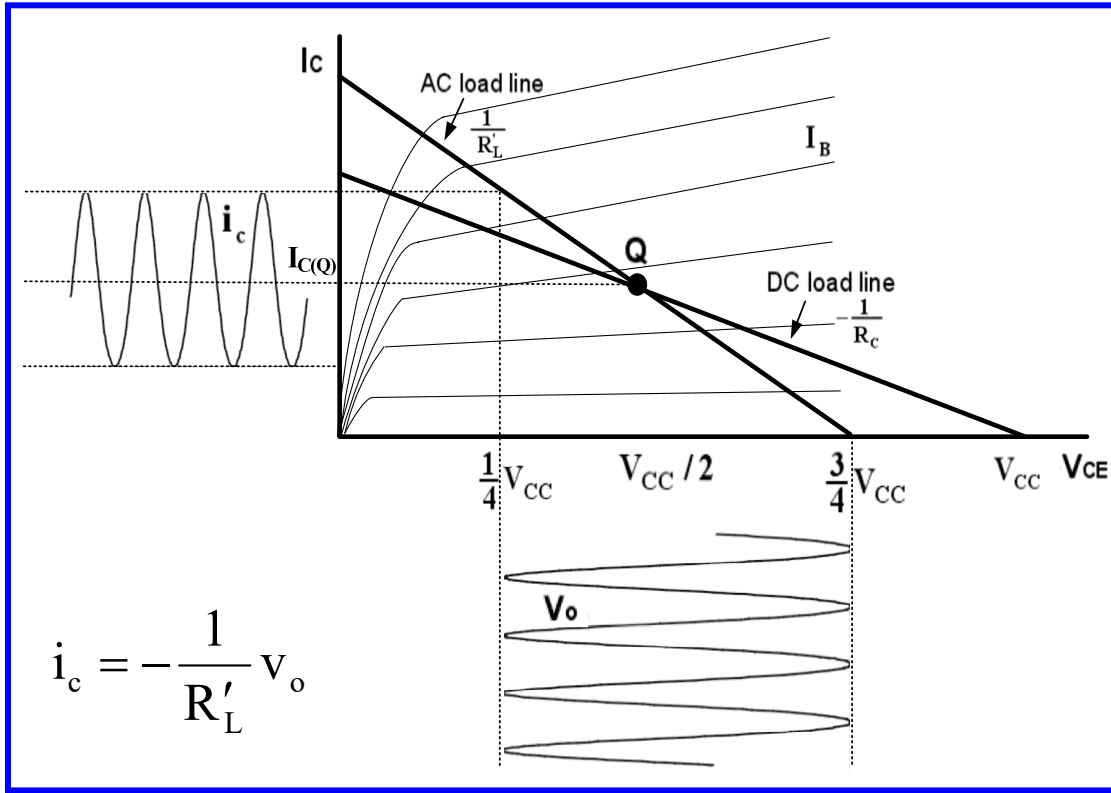
- Στην περίπτωση της απευθείας σύνδεσης φορτίου στον εκπομπό, το συνεχές ρεύμα πόλωσης του τρανζίστορ διέρχεται από το φορτίο, γεγονός που δεν είναι επιθυμητό σε μερικές εφαρμογές, όπου το **φορτίο απομονώνεται από το συνεχές μέσω ενός πυκνωτή**.
- Στην περίπτωση αυτή, η γραμμή φορτίου στο συνεχές δε συμπίπτει με τη γραμμή φορτίου στο εναλλασσόμενο αφού: $R'_L = R_C // R_L < R_C$.
- Η γραμμή φορτίου εναλλασσόμενου έχει μεγαλύτερη κλίση από τη γραμμή φορτίου συνεχούς και συνεπώς οι διαδρομές τάσης και ρεύματος στον ενισχυτή είναι μικρότερες.
- **Μέγιστη μεταφορά ισχύος στο φορτίο** επιτυγχάνεται όταν $R_C = R_L$ οπότε και η γραμμή φορτίου εναλλασσόμενου συναντά τον άξονα της τάσης στα $\frac{3}{4}$ της τάσης τροφοδοσίας (V_{CC}).



$$\begin{aligned} R_C &= R_L \Rightarrow \\ R'_L &= R_C / 2 \Rightarrow \\ I_C R'_L &= I_C R_C / 2 \Rightarrow \\ I_C R'_L &= V_{CC} / 4 \end{aligned}$$

Το σημείο λειτουργίας έχει τοποθετηθεί στο μέσο της γραμμής φορτίου dc.

ΚΕ με χωρητική σύνδεση φορτίου



Μέγιστος πλάτος τάσης εξόδου
χωρίς ψαλιδισμό:

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

Μέγιστος πλάτος ρεύματος
στο φορτίο:

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

Μέγιστη ισχύς στο φορτίο:

$$\begin{aligned}
 P_{ac} &= V_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)} = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{CC}}{4} \cdot \frac{I_C}{2} = \frac{V_{CC} I_C}{16}
 \end{aligned}$$

Απόδοση ισχύος
ενισχυτή:

$$n = \frac{P_{ac}}{V_{CC} I_C} = 6,25\%$$

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

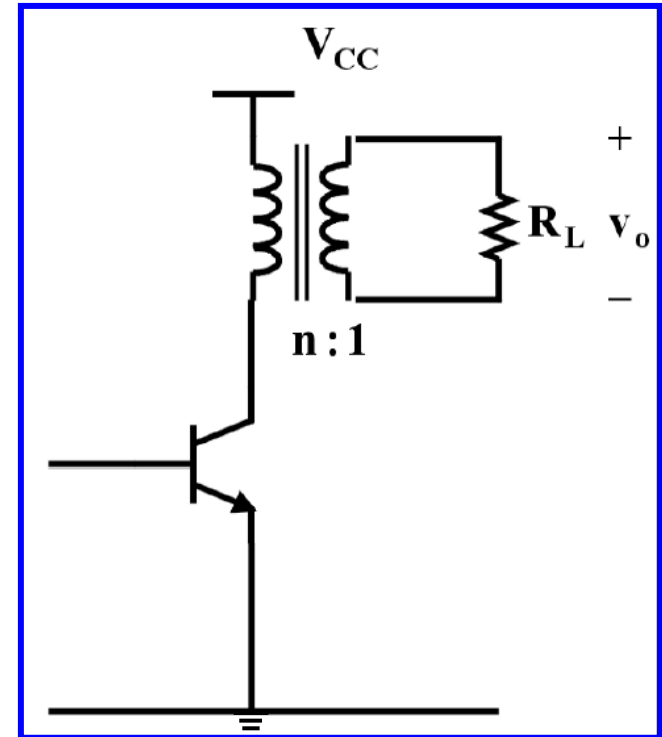
ΚΕ με σύνδεση φορτίου μέσω μετασχηματιστή

- Ένας άλλος τρόπος να απομονωθεί το φορτίο από το συνεχές (δηλ. να εμποδιστεί η συνεχής συνιστώσα ρεύματος να περάσει από το φορτίο) είναι η σύνδεσή του μέσω μετασχηματιστή.
- Στην περίπτωση αυτή, η γραμμή φορτίου στο συνεχές είναι κατακόρυφη αφού δεν υπάρχει αντίσταση στο συλλέκτη: $V_{CE} = V_{CC}$.
- Η γραμμή φορτίου στο εναλλασσόμενο διέρχεται από το σημείο λειτουργίας και έχει κλίση $-1/R'_L$.

$$R'_L = \frac{1}{n^2} R_L$$

n : λόγος μετασχηματισμού

- Για το συγκεκριμένο φορτίο, ο λόγος n μπορεί να επιλεγεί κατάλληλα ώστε το σημείο λειτουργίας να βρίσκεται στο μέσο της γραμμής φορτίου εναλλασσόμενου, επομένως ο Μ/Τ χρησιμοποιείται και για προσαρμογή του φορτίου στον ενισχυτή.



ΚΕ με σύνδεση φορτίου μέσω μετασχηματιστή

- Η μέγιστη διαδρομή της τάσης εξόδου διπλασιάζεται:

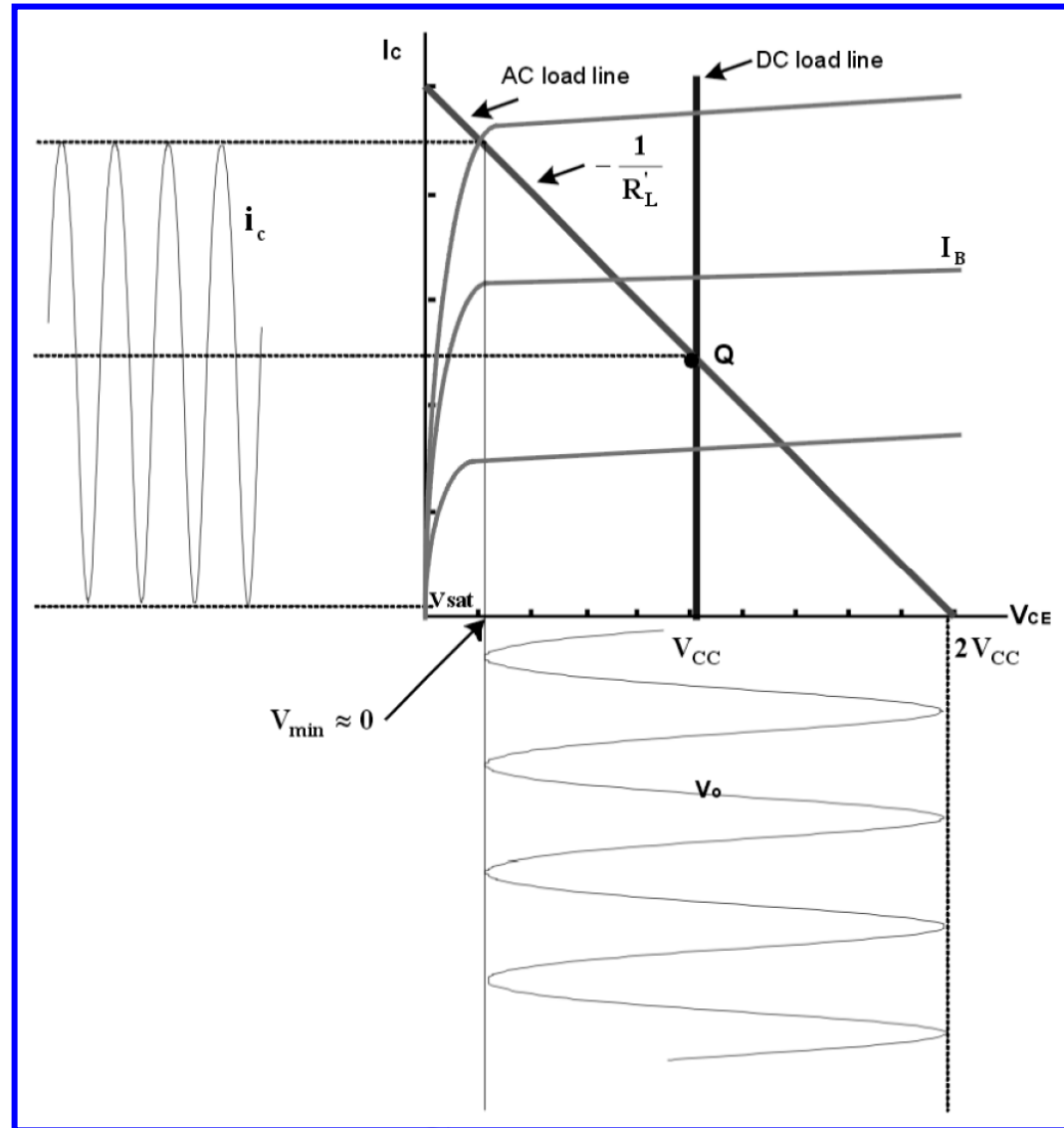
$$V_{om} \approx V_{CC}$$

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

$$P_{ac} = V_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)} = \frac{1}{2} \cdot V_{CC} \cdot I_C$$

$$\eta = \frac{P_{ac}}{V_{CC} I_C} = 50 \%$$

- Η απόδοση αυτή είναι η υψηλότερη που μπορεί να επιτευχθεί από ενισχυτές σε τάξη Α.
- Η κατανάλωση ισχύος του τρανζίστορ σε κατάσταση ηρεμίας ($P_Q = V_{CC} \cdot I_C$) δεν πρέπει να ξεπερνά την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ του κατασκευαστή.



Παράδειγμα 2^ο: ενισχυτής ισχύος σε τάξη A με M/T

Διαθέτουμε πηγή τροφοδοσίας 40 V και τρανζίστορ με μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές κατασκευαστή $P_{Dmax} = 20 \text{ W}$, $I_{Cmax} = 0.5 \text{ A}$ και $V_{CEmax} = 250 \text{ V}$ και επιθυμούμε να σχεδιάσουμε ενισχυτή ισχύος σε τάξη A με μετασχηματιστή με στόχο την απόδοση της μέγιστης δυνατής ισχύος σε ωμικό φορτίο 20 Ω.

Για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ισχύος στο φορτίο θα πρέπει η γραμμή φορτίου εναλλασσόμενου να τέμνει τον άξονα των τάσεων στην τιμή $2V_{CC} = 80 \text{ V}$. Επίσης, με βάση το δεδομένο μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα συλλέκτη η τομή της ευθείας φόρτου με τον άξονα του ρεύματος θα είναι στην τιμή 0.5 A.

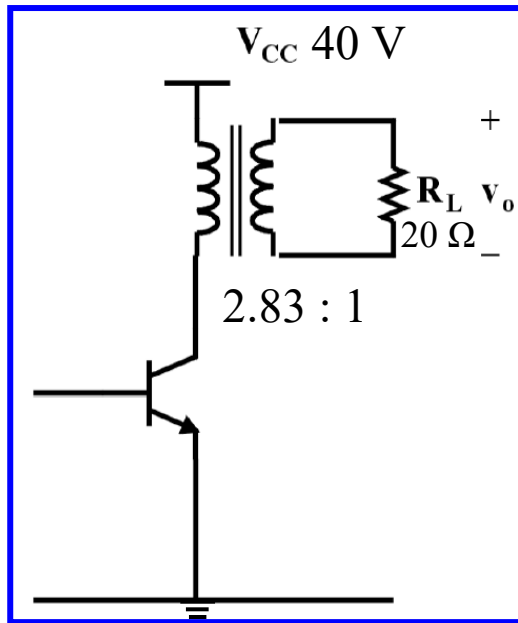
Επομένως, για μέγιστη απόδοση ισχύος θα πρέπει να προσδιορίσουμε το λόγο μετασχηματισμού ώστε το σημείο ηρεμίας να βρίσκεται στο μέσο της γραμμής φορτίου εναλλασσόμενου: **Q (40 V, 250 mA)**.

$$I_{Cmax} = \frac{2V_{CC}}{R'_L} = 500 \text{ mA} \rightarrow R'_L = 160 \Omega$$

$$R'_L = n^2 R_L \rightarrow n^2 = 8 \rightarrow n = 2.83$$

$$n^2 = \frac{L_1}{L_2} = \frac{400 \text{ mH}}{50 \text{ mH}}$$

Παράδειγμα 2^ο: ενισχυτής ισχύος σε τάξη A με Μ/Τ

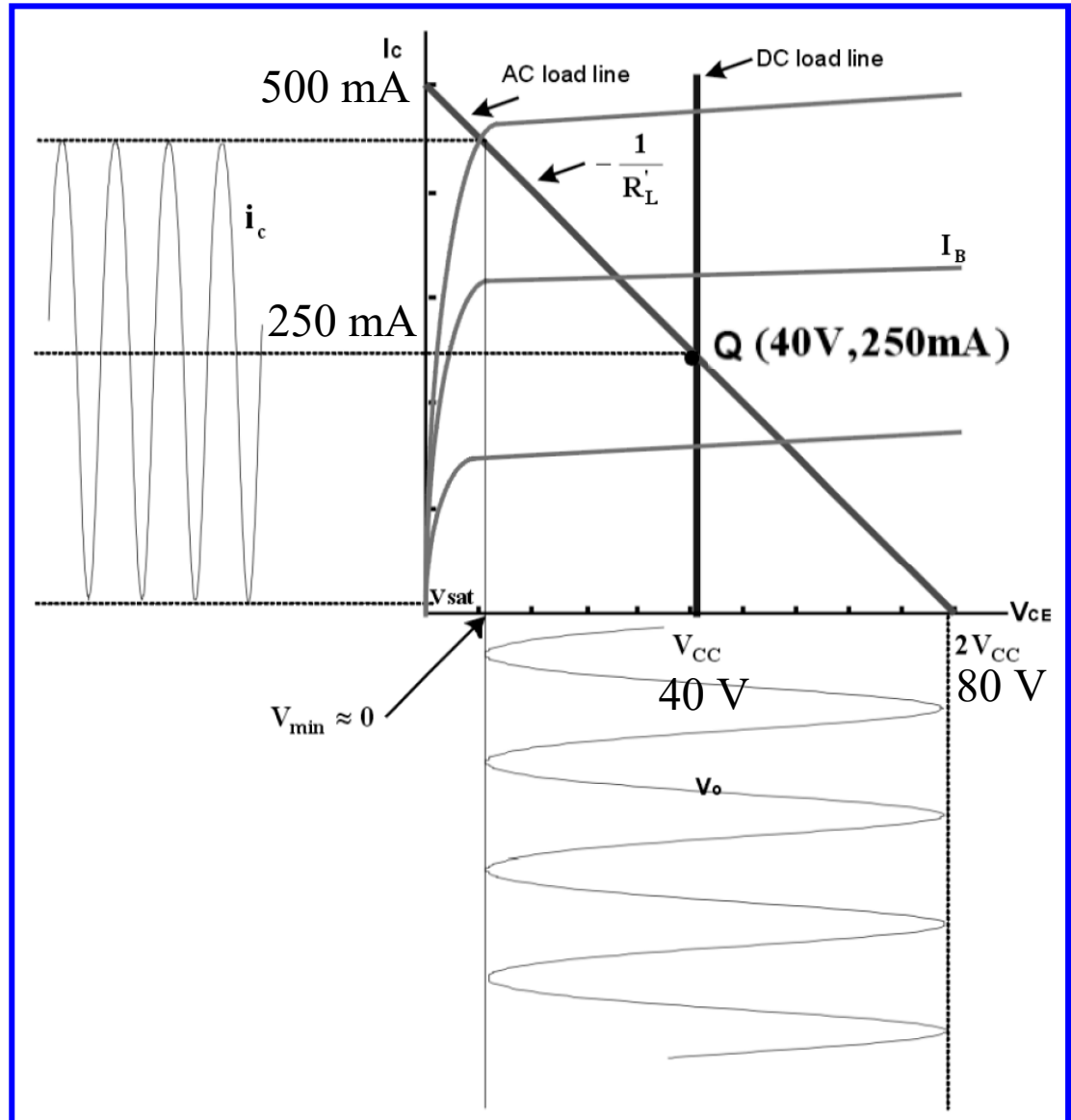


$$V_{om} \approx V_{CC} = 40 \text{ V}$$

$$i_{om} \approx I_{C(Q)} = 250 \text{ mA}$$

$$P_{ac} = V_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot V_{CC} \cdot I_C = 5 \text{ W}$$

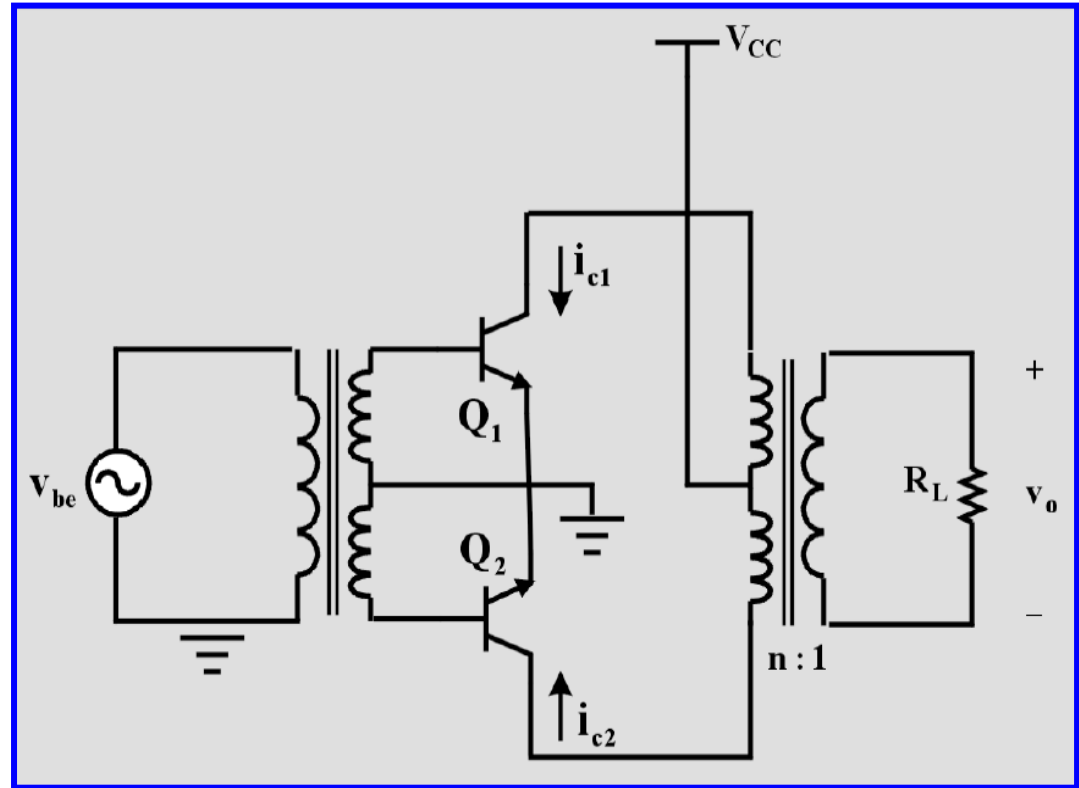


Ενισχυτής ισχύος push-pull με μετασχηματιστή

- Η απόδοση των ενισχυτών σε τάξη A είναι χαμηλή επειδή υπάρχει μία μόνιμη κατανάλωση ($I_C \cdot V_{CE}$) στο τρανζίστορ.
- Στις ενισχυτικές βαθμίδες που λειτουργούν σε **τάξη B**, το τρανζίστορ πολώνεται στην αποκοπή ($I_C = 0$) και προκαλείται ρεύμα συλλέκτη μόνο κατά τη μισή περίοδο του σήματος εισόδου
- Στους ενισχυτές αυτούς είναι εφικτό να αυξηθεί η απόδοση ισχύος και ταυτόχρονα να αποφεύγεται η κατανάλωση ισχύος στο τρανζίστορ κατά την απουσία σήματος.
- Η συνηθέστερη τοπολογία κυκλώματος που μπορεί να λειτουργήσει όταν τα τρανζίστορ που περιλαμβάνει λειτουργούν στην αποκοπή, αναφέρεται ως **ενισχυτής ισχύος push-pull**.
- Στην τοπολογία αυτή χρησιμοποιούνται **δύο διπολικά τρανζίστορ** με παρόμοιες χαρακτηριστικές (**ταιριασμένα – matched** – τρανζίστορ) τα οποία διεγείρονται από το σήμα εισόδου μέσω μετασχηματιστή.
- Η **προσαρμογή** του **φορτίου** γίνεται επίσης μέσω **μετασχηματιστή**.

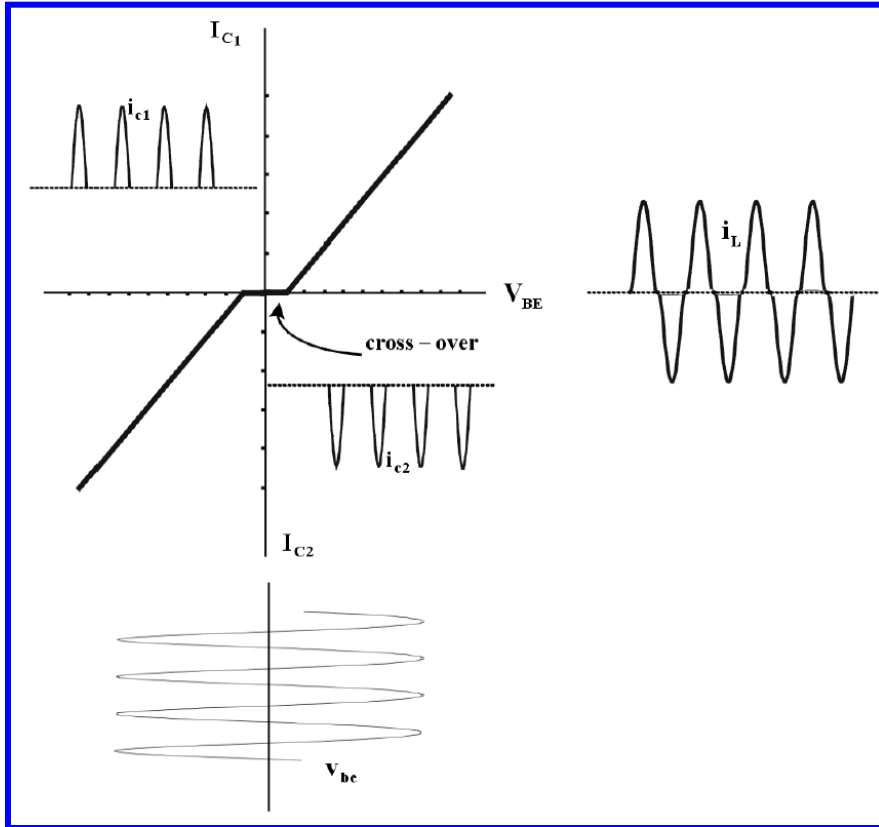
Ενισχυτής ισχύος push-pull με μετασχηματιστή

- Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου άγει το Q_1 , ενώ κατά την αρνητική ημιπερίοδο άγει το Q_2 .
- Ο Μ/Τ εισόδου προσφέρει στα δύο τρανζίστορ το σήμα διέγερσης με διαφορά φάσης 180° .
- Στην έξοδο (φορτίο) ρέει ρεύμα σε όλη τη διάρκεια της περιόδου του σήματος εισόδου.
- Ωστόσο, για να αρχίσουν να άγουν τα τρανζίστορ θα πρέπει να ξεπεραστεί η τάση V_{BE} ($\sim 0.7\text{ V}$).
- Έτσι, υπάρχει ένα μικρό χρονικό διάστημα στην αρχή κάθε ημιπεριόδου όπου δεν υπάρχει ρεύμα στο συλλέκτη, που δημιουργεί το φαινόμενο που αναφέρεται ως **παραμόρφωση cross-over**.
- Για να ξεπεραστεί το φαινόμενο αυτό τα τρανζίστορ πολώνονται σε πολύ μικρό ρεύμα I_C με αποτέλεσμα τα τρανζίστορ να λειτουργούν σε **τάξη AB**.

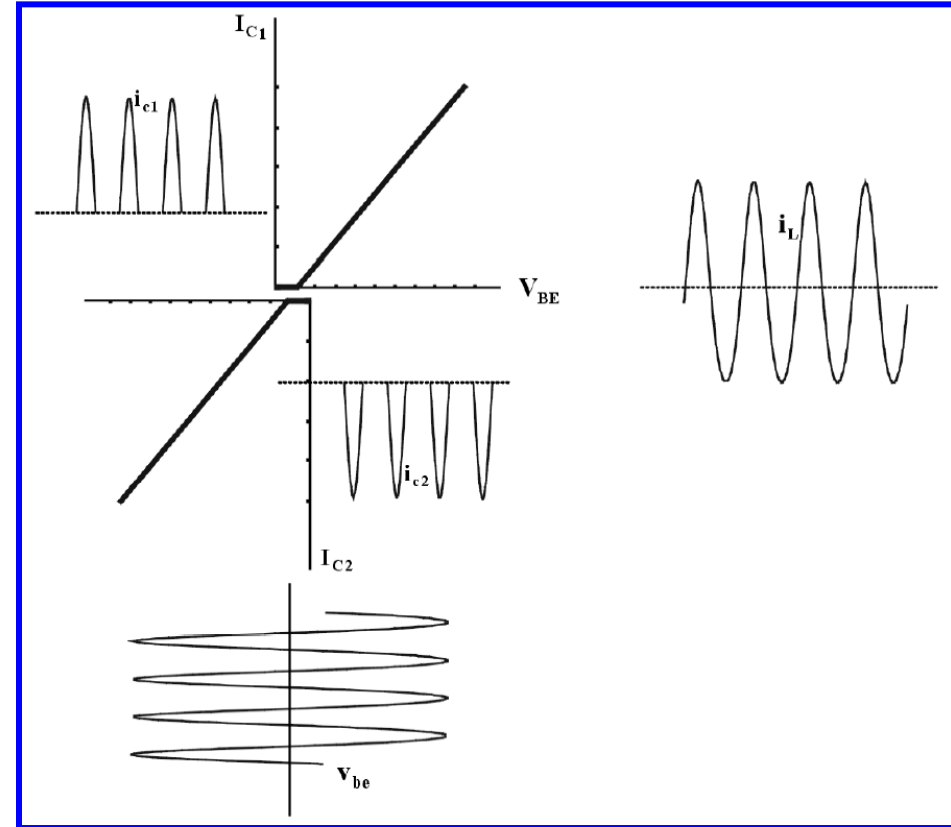


Ενισχυτής ισχύος push-pull με μετασχηματιστή

Λειτουργία σε τάξη B



Λειτουργία σε τάξη AB



Λειτουργία push-pull: το Q_1 σπρώχνει (push) ρεύμα προς το φορτίο όταν το σήμα διέγερσης είναι θετικό και το Q_2 (pull) τραβάει ρεύμα από το φορτίο όταν το σήμα διέγερσης είναι αρνητικό.

Ενισχυτής ισχύος push-pull με μετασχηματιστή

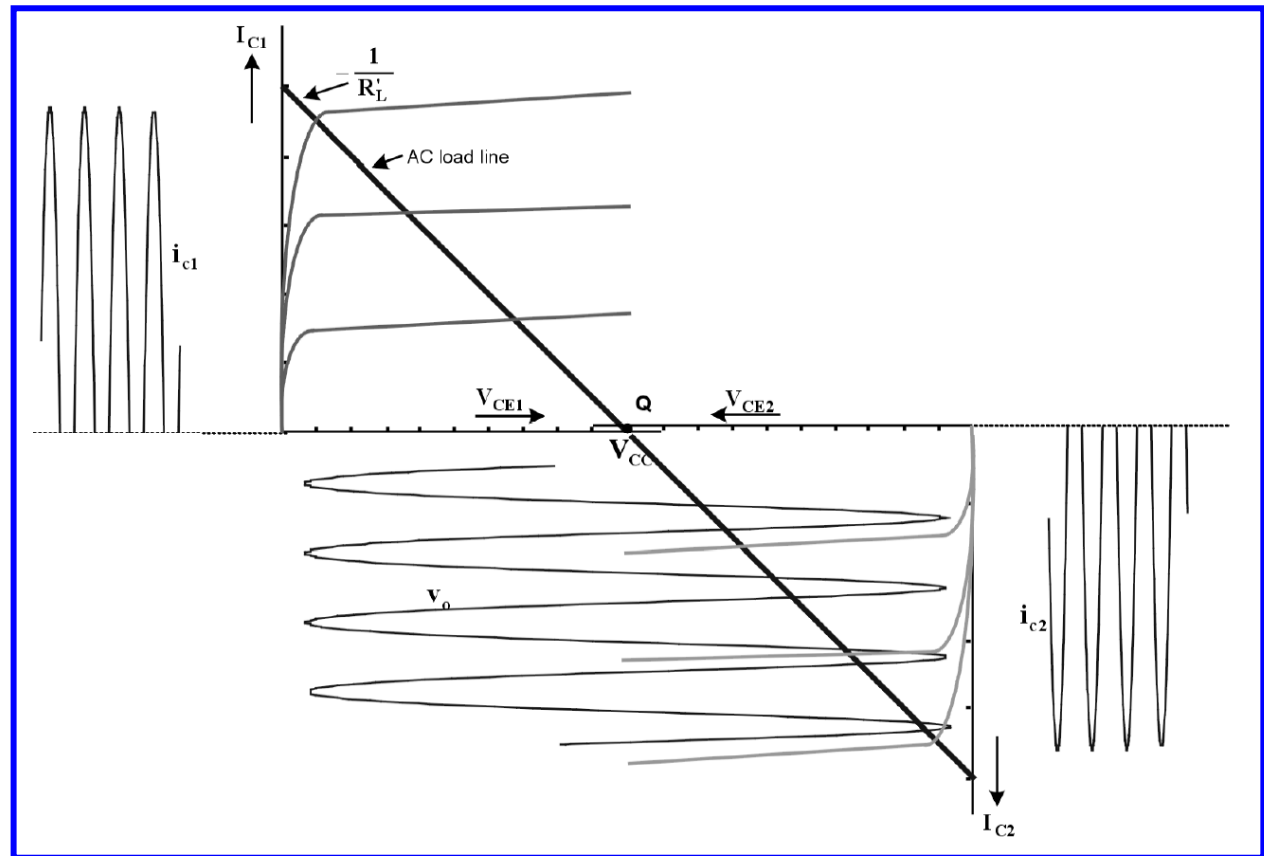
- Για να δημιουργήσουμε την κυματομορφή της τάσης εξόδου του ενισχυτή, αναστρέφουμε τις χαρακτηριστικές του Q_2 .
- Η γραμμή φορτίου εναλλασσόμενου διέρχεται από το σημείο λειτουργίας που βρίσκεται μέσα στην περιοχή αποκοπής και των δύο τρανζίστορ.

$$R'_L = \frac{1}{n^2} R_L$$

$$V_{om} \approx V_{CC}$$

$$i_{om} \approx \frac{V_{CC}}{R'_L}$$

$$P_{ac} = V_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)}$$
$$= \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}R'_L} = \frac{V_{CC}^2}{2R'_L}$$



Ενισχυτής ισχύος push-pull με μετασχηματιστή

Το διπλά ανορθωμένο ρεύμα στους συλλέκτες συνεπάγεται μία συνεχή συνιστώσα ρεύματος, η οποία προκαλεί κατανάλωση ισχύος στο κύκλωμα παρόλο που το ρεύμα ηρεμίας είναι σχεδόν μηδενικό.

$$i_{o(\text{DC})} = \frac{2i_o}{\pi} = \frac{2V_{CC}}{\pi R'_L}$$

Το ρεύμα κάθε τρανζίστορ λόγω του ότι αποτελείται μόνο από θετικά τμήματα εμπεριέχει συνεχή συνιστώσα που προσδιορίζεται από τη μέση τιμή του ρεύματος:

$$\begin{aligned} I_{DC} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i(\omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{R_L} V_o \sin \omega t d(\omega t) \Rightarrow I_{DC} = \frac{V_o}{\pi R_L} = \frac{I_o}{\pi} \end{aligned}$$

Συνολική **καταναλισκόμενη**
ισχύς στο κύκλωμα:

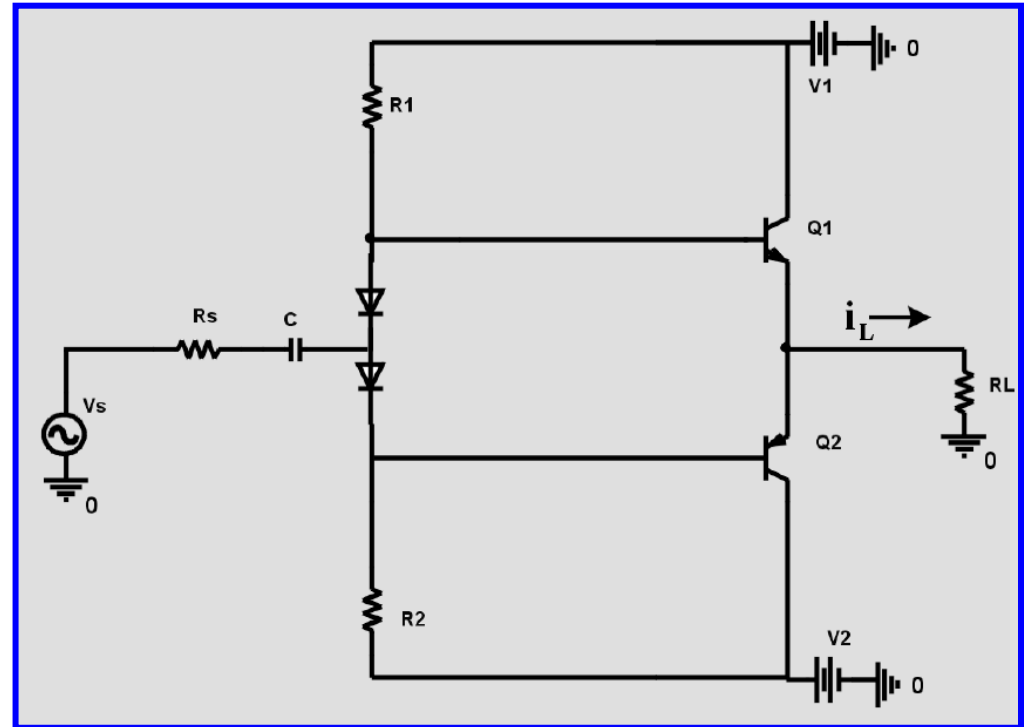
$$P_T = i_{o(\text{DC})} \cdot V_{CC} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi R'_L}$$

Μέγιστη απόδοση
ισχύος του ενισχυτή:

$$\eta = \frac{P_{ac}}{P_T} = \frac{\pi}{4} = 78,5 \%$$

Ενισχυτής push-pull με συμπληρωματικά τρανζίστορ

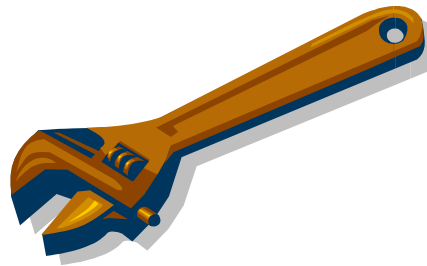
Εάν δεν χρησιμοποιήσουμε δύο όμοια τρανζίστορ, αλλά **δύο συμπληρωματικά τρανζίστορ** (n_{pn} και p_{np} με παρόμοιες χαρακτηριστικές), δεν απαιτείται Μ/Τ εισόδου, αφού το ένα τρανζίστορ θα λειτουργεί στη θετική και το άλλο στην αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου.



- Οι **δίοδοι** χρησιμοποιούνται για να εξασφαλιστεί η **κατάλληλη πόλωση** των τρανζίστορ για **λειτουργία** του κυκλώματος σε **τάξη AB** (αποφυγή cross-over).
- Εφαρμόζεται συμμετρική τροφοδοσία συνεχούς, οπότε το **φορτίο** μπορεί να συνδεθεί **απευθείας** στους εκπομπούς των τρανζίστορ.
- Η **μέγιστη απόδοσης ισχύος** του ενισχυτή παραμένει **78.5 %**.

Συμπεράσματα

- Οι ενισχυτές ισχύος είναι ενισχυτές μεγάλων σημάτων που χρησιμοποιούνται για να αποδίδουν σημαντική ισχύ στο φορτίο.
- Τα τρανζίστορ των ενισχυτών ισχύος πολώνονται με διάφορους τρόπους δημιουργώντας τις διαφορετικές τάξεις λειτουργίας των ενισχυτών ισχύος (τάξη A, τάξη B, ενδιάμεση τάξη AB).
- Η απόδοση ισχύος των ενισχυτών ισχύος μπορεί να φτάσει το 78% περίπου (για μη παραμορφωμένο σήμα εξόδου), ανάλογα με το σχεδιασμό τους.
- Η προσαρμογή του φορτίου στους ενισχυτές ισχύος μπορεί να γίνει απευθείας, μέσω πυκνωτή ή μέσω μετασχηματιστή.
- Λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς των τρανζίστορ για μεγάλα σήματα, τα σήματα στην έξοδο μπορεί να είναι αισθητά παραμορφωμένα.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η απαίτηση ισχύος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραμόρφωση.



Ασκήσεις 7^{ης} ενότητας

Άσκηση 1^η

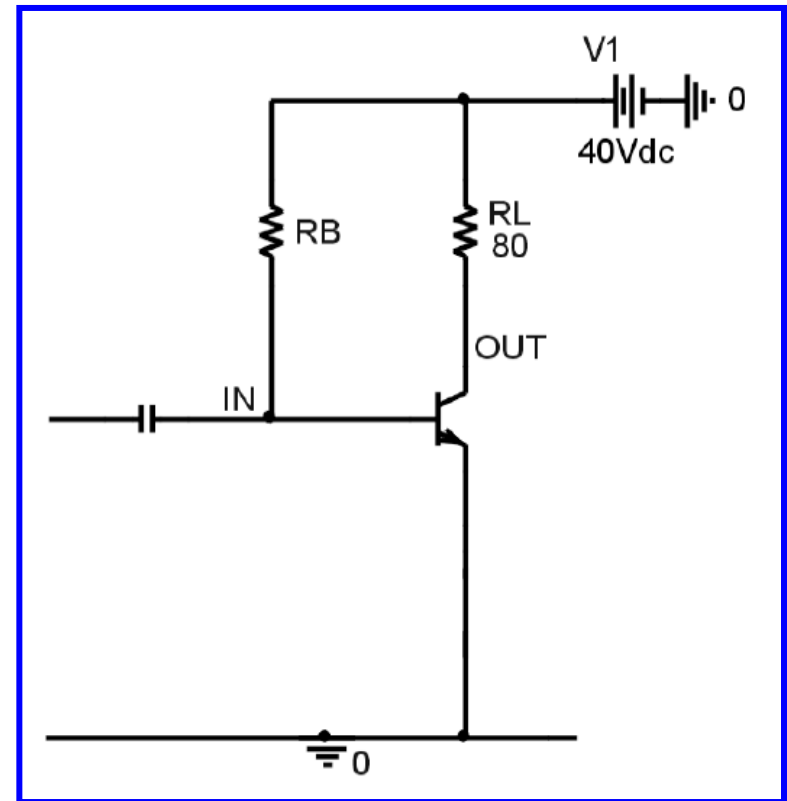
Στον ενισχυτή ισχύος του σχήματος το ρεύμα συλλέκτη είναι 250 mA. Να υπολογίσετε τη μέγιστη ισχύ που αποδίδεται στο φορτίο.

$$V_1 = I_C R_L + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = V_1 - I_C R_L$$
$$\Rightarrow V_{CE} = 20 \text{ V} = V_1 / 2$$

$$v_{om} = V_{CE} \quad i_{om} = I_C$$

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

$$P_{ac} = 2.5 \text{ W}$$



Άσκηση 2^η

Στον ενισχυτή ισχύος του σχήματος το ρεύμα συλλέκτη είναι 250 mA. Να υπολογίσετε τη μέγιστη ισχύ που αποδίδεται στο φορτίο (αγνοήστε την R_E).

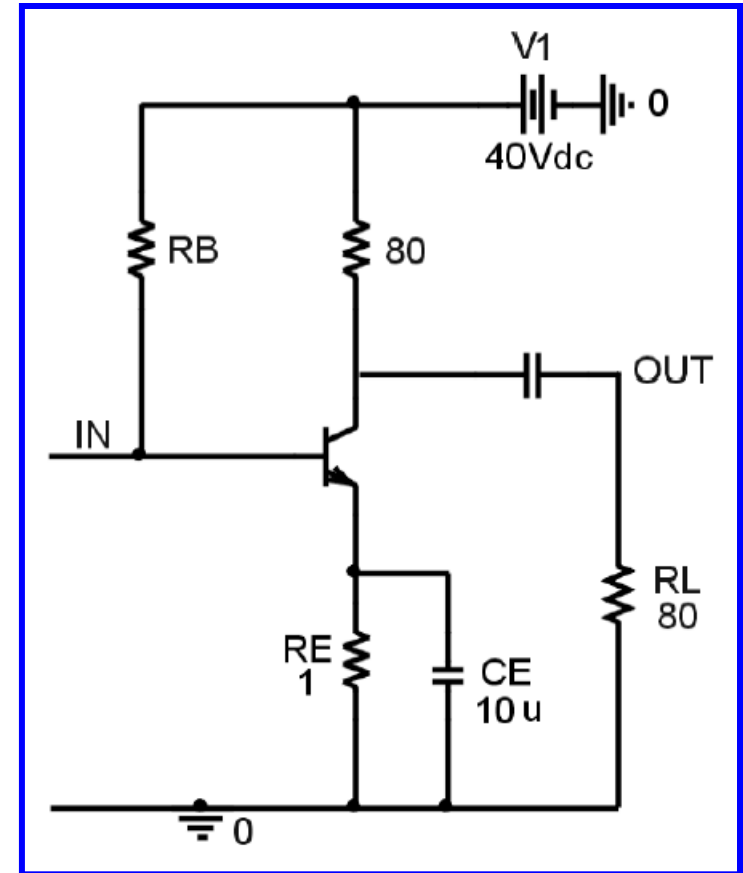
$$V_1 = I_C R_C + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = V_1 - I_C R_C$$
$$\Rightarrow V_{CE} = 20 \text{ V} = V_1 / 2$$

Πρόκειται για ενισχυτή ΚΕ με χωρητική σύνδεση φορτίου:

$$V_{om} = \frac{V_{CE}}{2} = 10 \text{ V} = \frac{V_1}{4}$$

$$i_{om} = \frac{I_C}{2} = 125 \text{ mA} = \frac{V_1}{4R_L}$$

$$P_{ac} = V_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)} \rightarrow P_{ac} = 0.625 \text{ W}$$



Άσκηση 3^η

Στον ενισχυτή ισχύος του σχήματος να προσδιορίσετε την πόλωση του τρανζίστορ εάν η μέγιστη δυνατή (επιτρεπόμενη) ισχύς στο φορτίο είναι 2.5 W.

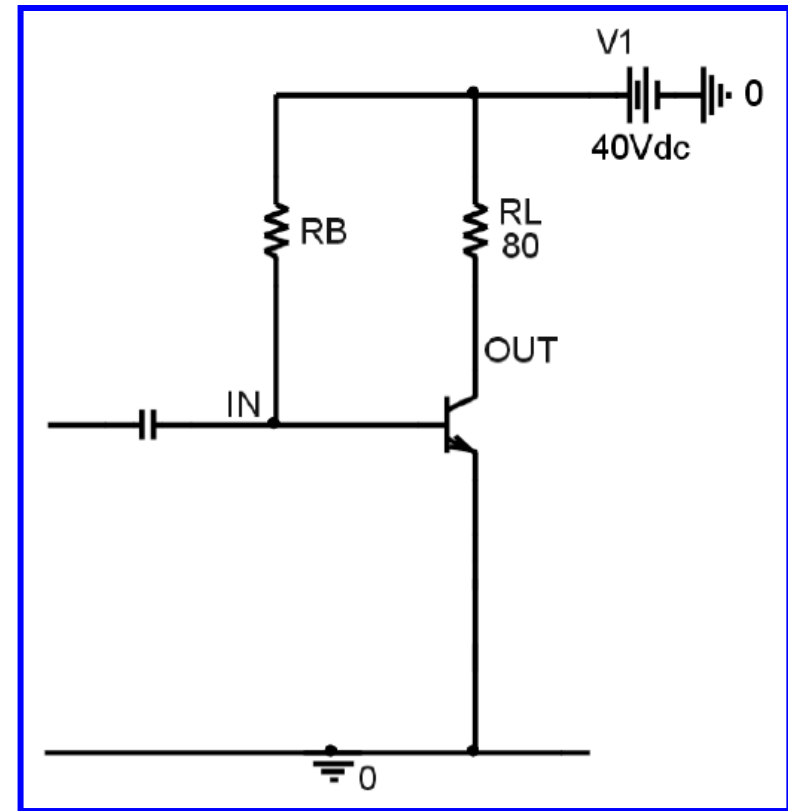
$$V_1 = I_C R_L + V_{CE} \quad (1)$$

Πρόκειται για ενισχυτή ΚΕ με απευθείας σύνδεση του φορτίου στο συλλέκτη. Η **μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς στο φορτίο επιτυγχάνεται εάν το σημείο λειτουργίας τοποθετηθεί στο μέσο της γραμμής φορτίου:**

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

Από τις (1) και (2) για $V_1 = 40 \text{ V}$ και $P_{ac} = 2.5 \text{ W}$ προκύπτει:

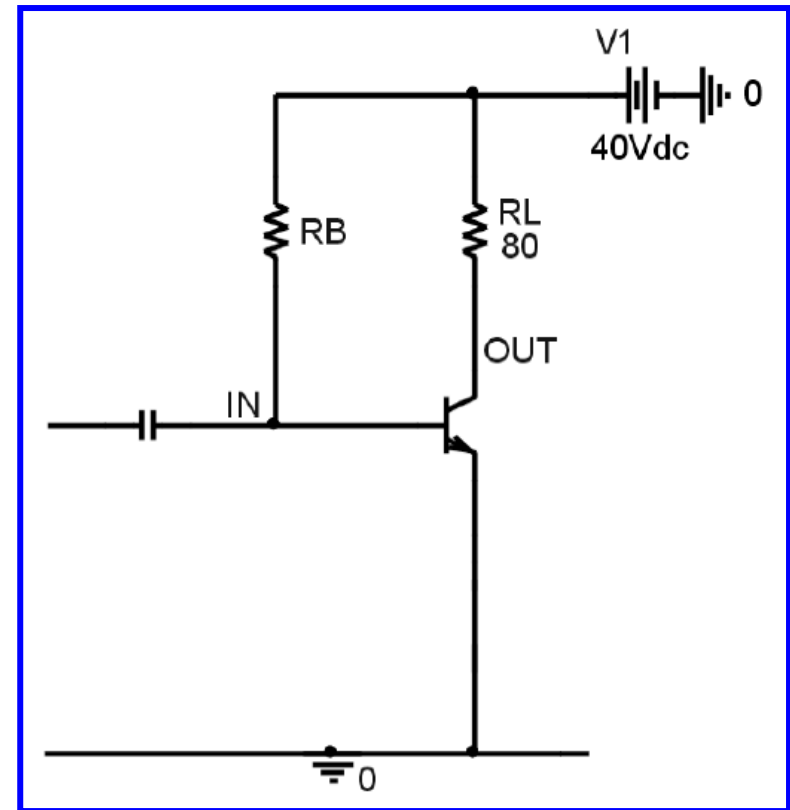
$$V_{CE} = 20 \text{ V} \quad I_C = 250 \text{ mA}$$



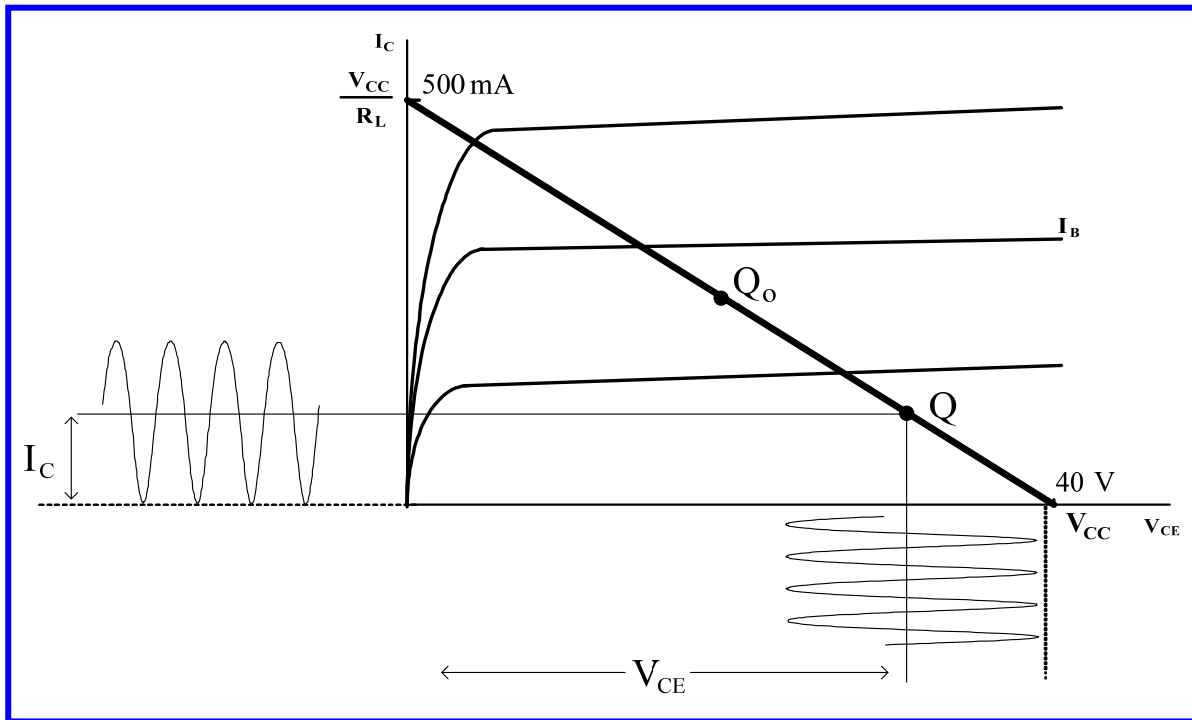
Άσκηση 4η

Στον ενισχυτή ισχύος του σχήματος να προσδιορίσετε την πόλωση του τρανζίστορ εάν αποδίδεται στο φορτίο μέγιστη ισχύς 1 W.

Όπως είδαμε στην προηγούμενη άσκηση, αλλά και στην 1^η άσκηση της ενότητας, εάν θέταμε το σημείο λειτουργίας στο μέσο της γραμμής φορτίου δηλ. Q (20V, 250mA), τότε η διαθέσιμη ισχύς του κυκλώματος θα ήταν 2.5 W. Επειδή όμως επιθυμούμε η μέγιστη ισχύς να περιορίζεται στο 1 W, θα πρέπει το σημείο λειτουργίας να τοποθετηθεί χαμηλότερα, ώστε να αποφύγουμε άσκοπη κατανάλωση ισχύος στο τρανζίστορ.



Άσκηση 4η



Η θέση του σημείου λειτουργίας υπολογίζεται με γεωμετρικό τρόπο.

$$\frac{I_C}{40 - V_{CE}} = \frac{0.5}{40} \Rightarrow 40 I_C = 20 - \frac{V_{CE}}{2} \Rightarrow I_C = 0.5 - 0.0125 V_{CE} \quad (1)$$

$$P_{ac} = v_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)} = \frac{40 - V_{CE}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_C}{\sqrt{2}} = 1 \stackrel{(1)}{\Rightarrow} (40 - V_{CE}) \cdot (0.5 - 0.0125 V_{CE}) = 2$$

$$\Rightarrow V_{CE} = 27.4 \text{ V} \text{ ή } 52.6 \text{ V} \quad (1) \Rightarrow I_C = 0.16 \text{ A}$$

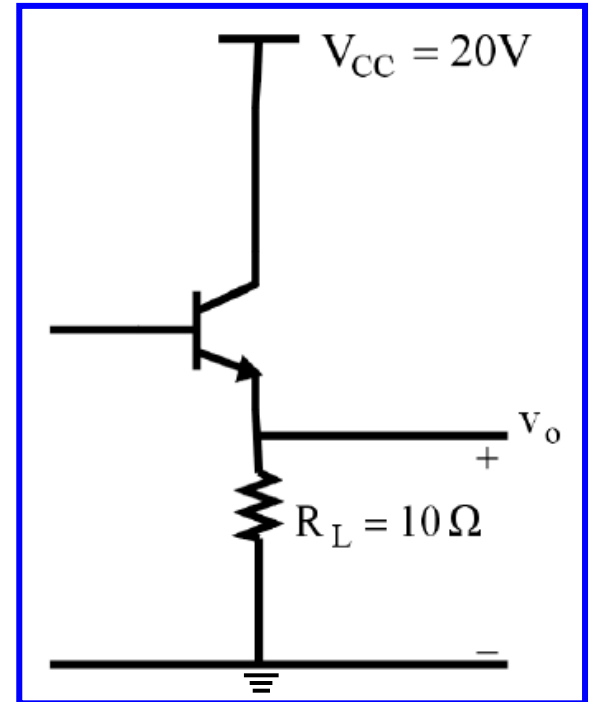
Άσκηση 5^η

Στον ενισχυτή ισχύος του σχήματος το ρεύμα συλλέκτη είναι 250 mA. Να προσδιορίσετε τη μέγιστη ισχύ στο φορτίο R_L .

$$P_{ac} = v_{o(rms)} \cdot i_{o(rms)} = \frac{v_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_o}{\sqrt{2}} = \frac{i_o \cdot R_L}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_o}{\sqrt{2}} \Rightarrow$$
$$P_{ac} = \frac{0.25 \cdot 10 \cdot 0.25}{2} = 0.312 \text{ W}$$

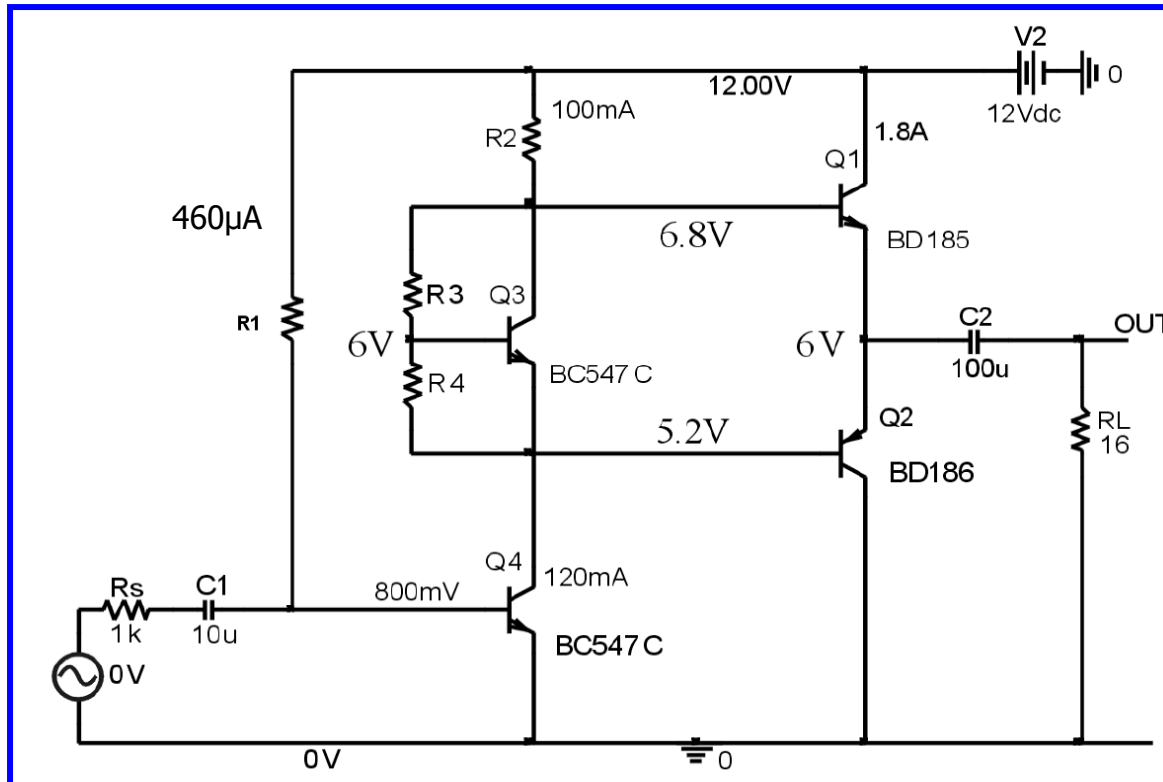
Πρόκειται για ενισχυτή ΚΕ με απευθείας σύνδεση του φορτίου στον εκπομπό, στον οποίο δεν αποδίδεται στο φορτίο η μέγιστη δυνατή ισχύς, αφού το σημείο λειτουργίας δεν είναι τοποθετημένο στο μέσο της γραμμής φορτίου:

$$V_{CC} = V_{CE} + V_{R_L} \Rightarrow V_{CC} = V_{CE} + I_C R_L$$
$$\Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L \Rightarrow V_{CE} = 17.5 \text{ V} > V_{CC}/2$$



Άσκηση 6η

Στον ενισχυτή ισχύος του σχήματος να υπολογίσετε τις τιμές των αντιστάσεων R_1 , R_2 , R_3 και R_4 , ώστε τα ρεύματα και οι τάσεις να είναι οι αναγραφόμενες.



$$R_1 = \frac{12 - 0.8}{460 \cdot 10^{-6}} \Omega = 24.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{12 - 6.8}{100 \cdot 10^{-3}} \Omega = 52 \Omega$$

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} (6.8 - 5.2) = 6 - 5.2 \Rightarrow$$

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} 1.6 = 0.8 \Rightarrow$$

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} = 0.5 \Rightarrow$$

$$R_4 = 0.5(R_3 + R_4) \Rightarrow$$

$$R_3 = R_4$$

Οι R_3 και R_4 μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή, αρκεί να είναι ίσες.



Τέλος 7^{ης} ενότητας