

# Ενισχυτές Ισχύος (Power Amplifiers)

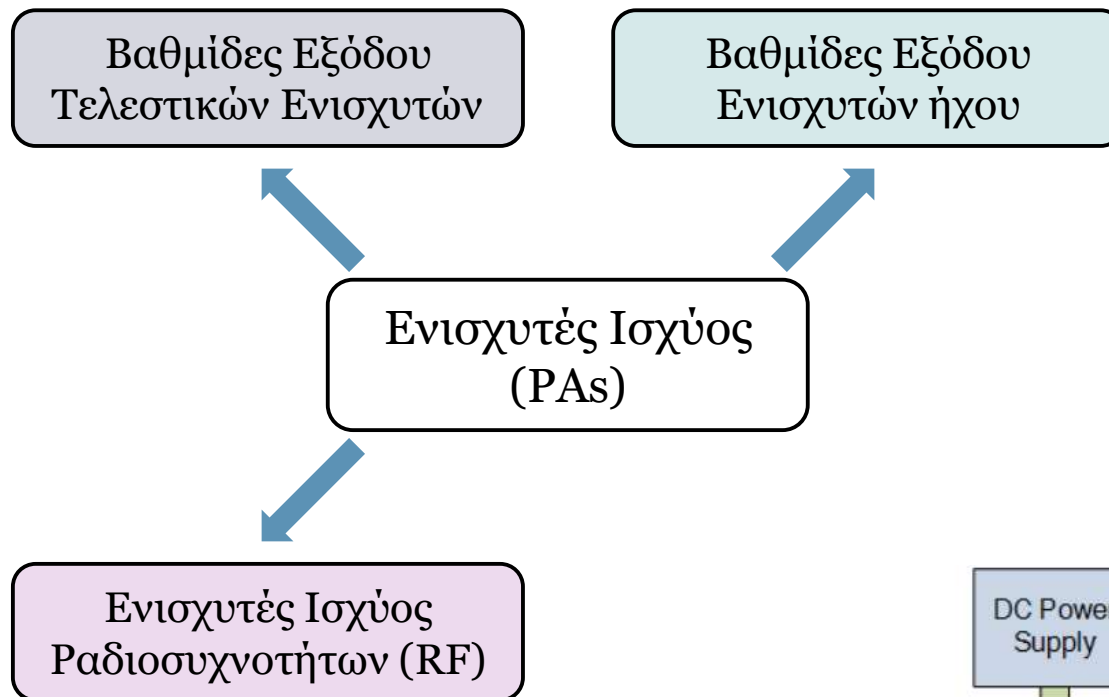
Ανασκόπηση σταδίων εξόδου και  
επίλυση ασκήσεων

Επιμέλεια: Μανουράς Βασίλης

# Περιεχόμενα

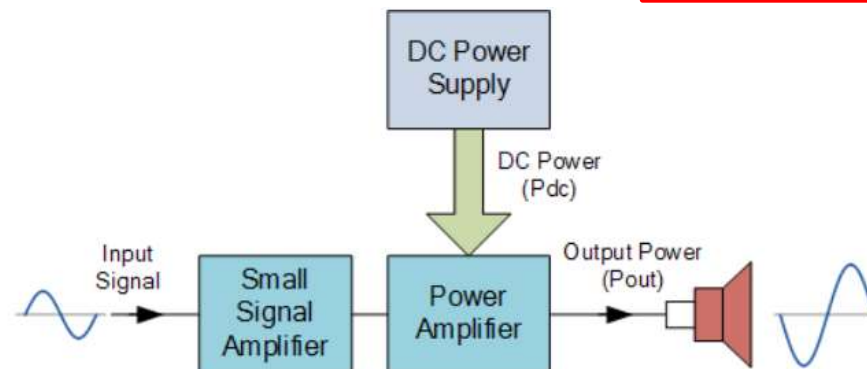
- Πεδία εφαρμογής
- Τυπολόγιο
- Βασικές αρχές
- Τάξη A (Class A)
- Τάξη B (Class B)
- Τάξη AB (Class AB)
- Επίλυση Ασκήσεων

# Πεδία Εφαρμογής



- Ενίσχυση ακουστικών σημάτων.
- Ενίσχυση σήματος για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές (Radars, Bluetooth, Ασύρματες επικοινωνίες).

Διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και απαιτήσεις ισχύος ανά εφαρμογή!



# Τυπολόγιο

## □ Πεδίο Χρόνου

- Μέση Ισχύς ημιτονοειδών σημάτων:

$$\begin{cases} v(t) = V_p \sin(\omega t) \\ i(t) = I_p \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad P_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt$$

$$P_{avg} = \frac{1}{2} V_p I_p \cos \varphi = \frac{1}{8} V_{pp} I_{pp} \cos \varphi$$

Ισχύεις:

$$dB = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad dBW = 10 \log \frac{P}{1W}$$

Τάσεις:

$$dB = 20 \log \frac{V_2}{V_1} \quad dBm = 10 \log \frac{P}{1mW}$$

## □ Πεδίο συχνότητας

- Μέση Ισχύς:

$$P_{avg} = \frac{1}{2} V I^* = \frac{V^2}{2Z_L^*} = \frac{I^2 Z_L^*}{2}$$

## □ Τριγωνομετρική σειρά Fourier

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\pi t) + b_n \sin(n\pi t)]$$

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

# Βασικές αρχές-Χαρακτηριστικά Μεγέθη

- **$P_{sat}$** : Η μέγιστη ισχύς εξόδου του ενισχυτή. Ο ενισχυτής βρίσκεται σε κορεσμό (εκτός της γραμμικής περιοχής λειτουργίας του).

- **Gain**: Η κέρδος ισχύος του ενισχυτή.

$$G(\text{dB}) = P_{out} - P_{in}$$

- **$P_{x\text{dB}}$** : Η ισχύς εξόδου του ενισχυτή όταν το κέρδος Gain είναι κατά x dB μικρότερο από το γραμμικό κέρδος. Αποτελεί ακριβέστερη ένδειξη για την περιοχή γραμμικής λειτουργίας του ενισχυτή.

- **$P_{DC}$** : Η DC ισχύς τροφοδοσίας του ενισχυτή.

$$P_{DC} = V_{supply} I_{DC}$$

- **Efficiency**: Η απόδοση του ενισχυτή.

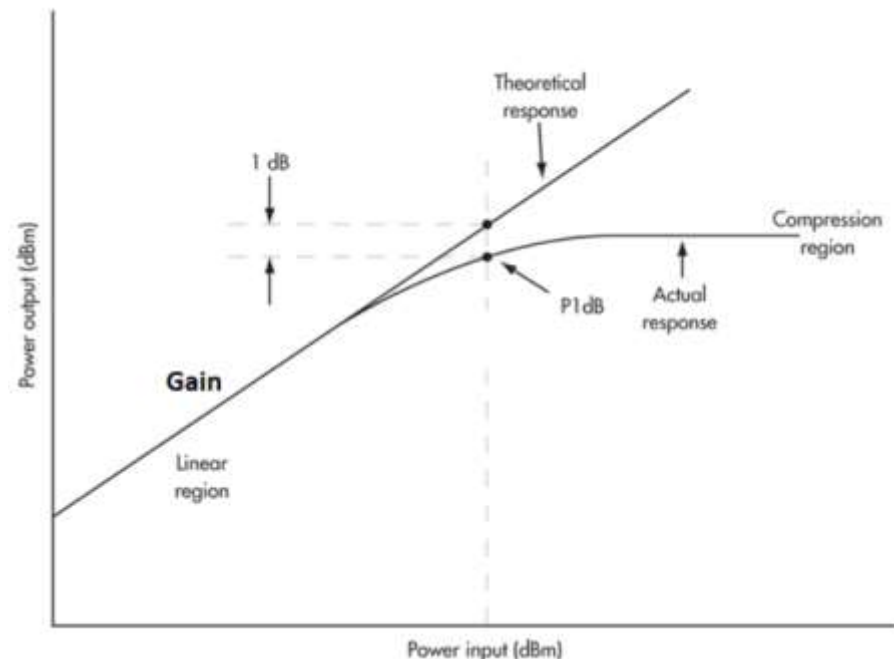
$$n = \frac{P_{out}}{P_{DC}}$$

- **PAE**: Η απόδοση του ενισχυτή με συνυπολογισμό του κέρδους.

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}}$$

- **3dB Bandwidth**: Το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του ενισχυτή.
- **THD**: Ολική αρμονική παραμόρφωση. Ένδειξη γραμμικότητας του ενισχυτή.

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100\%$$



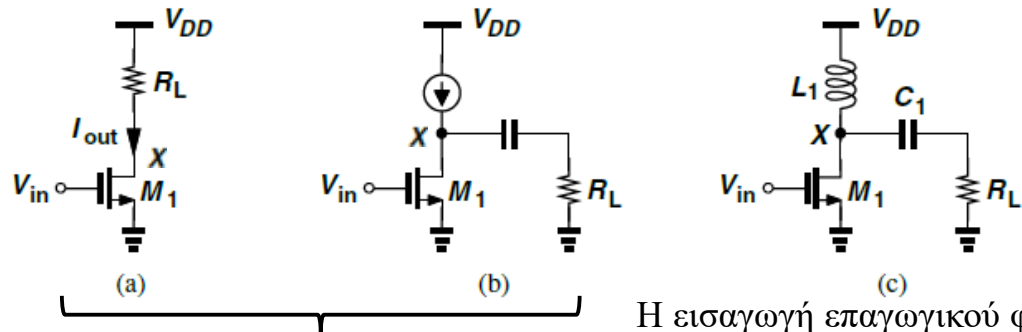
# Βασικές αρχές-Τοπολογία

- Παράδειγμα: Ζητείται η σχεδίαση ενισχυτή ισχύος, τοπολογίας κοινής πηγής, ο οποίος να αποδίδει ισχύ 1W (30 dBm) σε κεραία (φορτίο  $R_L$ ) 50  $\Omega$ .

$$P_{out} = \frac{V_p^2}{2R_L} = \frac{V_{pp}^2}{8R_L} \Leftrightarrow$$

$$V_{pp} = \sqrt{8P_{out}R_L} = \sqrt{8 \cdot 1 \cdot 50} = 20 \text{ V}$$

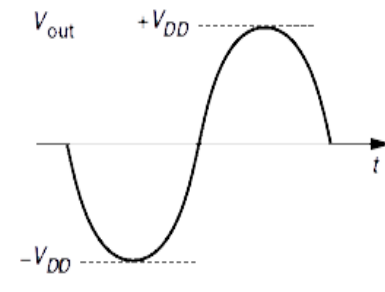
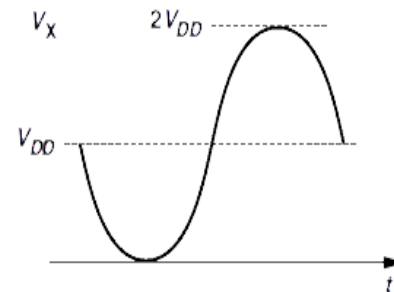
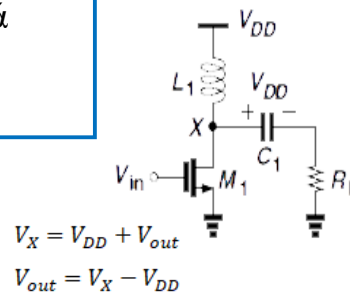
$$I_p = \sqrt{\frac{2P_{out}}{R_L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{50}} = 200 \text{ mA}$$



Απαιτούν  $V_{DD} \geq V_{pp} = 20 \text{ V}$

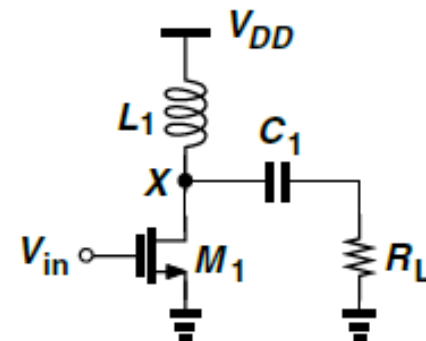
Η εισαγωγή επαγωγικού φορτίου  $L_1$  επιτρέπει στην AC τάση της υποδοχής  $V_X \geq V_{DD}$  φτάνοντας ακόμα και  $V_X = 2V_{DD}$ .

Η εισαγωγή επαγωγικού φορτίου επιτρέπει χαμηλότερη τάση τροφοδοσίας. Όμως η τάση στα άκρα του τρανζίστορ παραμένει αρκετά υψηλή. **Trade-off: Output Power-Drain Voltage Swing**

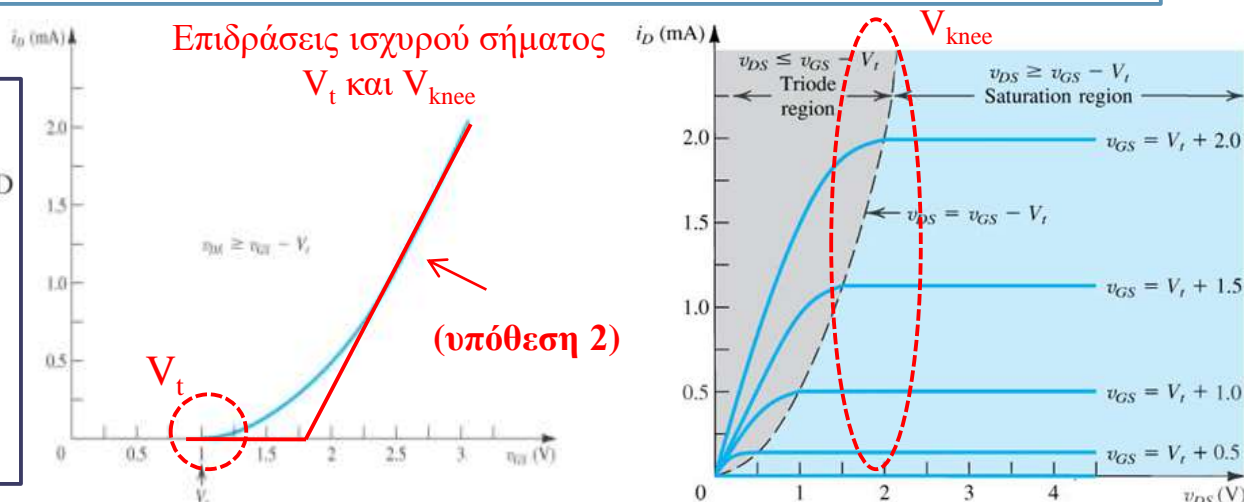
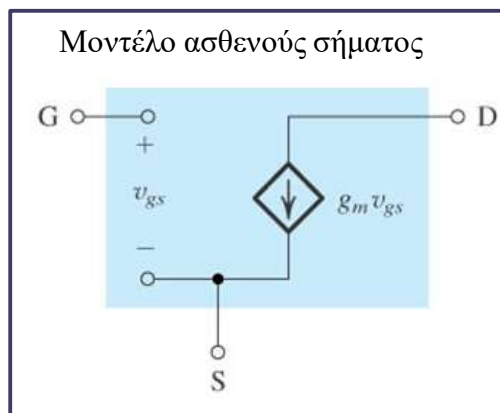


# Βασική αρχές-Τοπολογία

- **V<sub>in</sub>**: Πηγή AC σήματος με ή χωρίς DC offset.
- **V<sub>DD</sub>**: Τάση τροφοδοσίας
- **L<sub>1</sub>**: (RF Choke) Επιτρέπει τη διέλευση DC ρεύματος και αποκόπτει τις AC συνιστώσες.
- **C<sub>1</sub>**: Πυκνωτής σύζευξης (coupling capacitor): Επιτρέπει τη διέλευση ac ρεύματος και αποκόπτει την DC συνιστώσα.

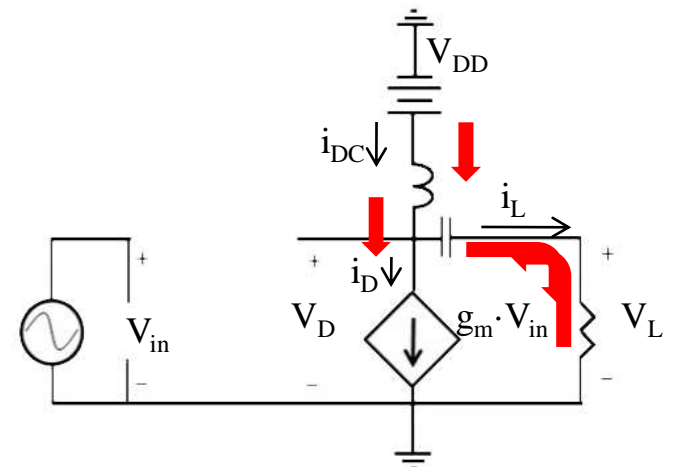
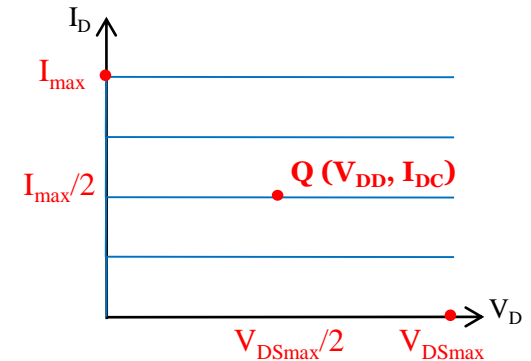
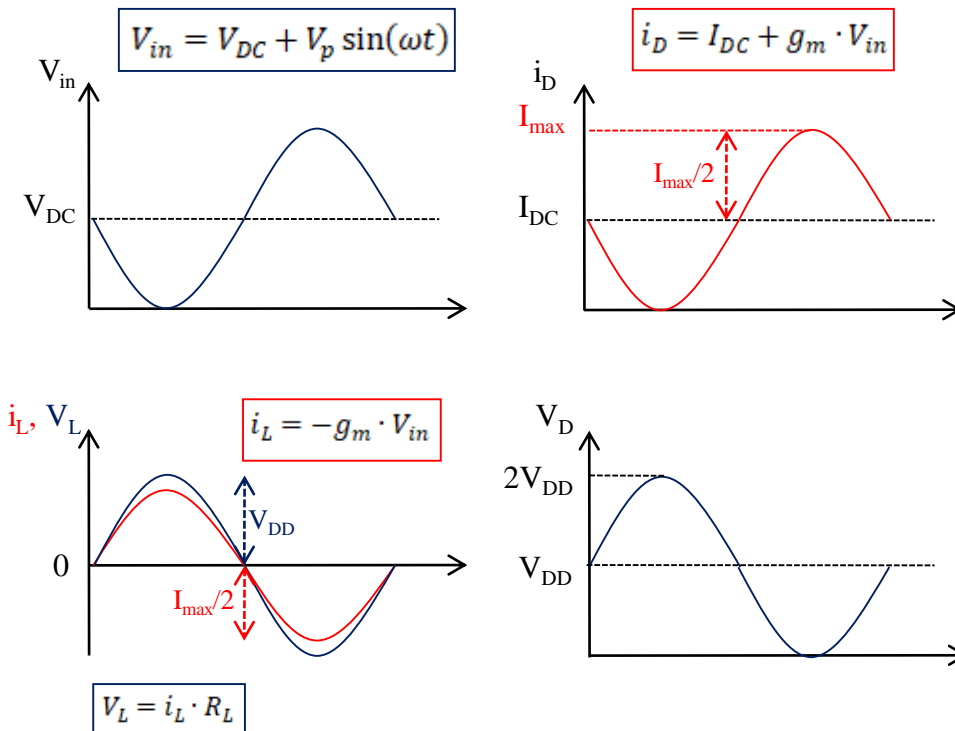


Για την αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας των ενισχυτών ισχύος απαιτείται η μοντελοποίηση του τρανζίστορ με το **μοντέλο ισχυρού σήματος** (για απλούστευση υποθέτουμε  $\lambda=0$  (**υπόθεση 1**)), το οποίο προκύπτει από το **μοντέλο ασθενούς σήματος** αν σε αυτό προστεθούν οι επιδράσεις **ισχυρού σήματος**.



# Τάξη A (Class A)

- Κάνοντας τις **υποθέσεις 1,2** και θέτοντας  $V_T = V_{knee} = 0$  για απλούστευση της ανάλυσης, πολώνουμε το τρανζίστορ σε τάση  $V_{DD} = V_{DSmax}/2$  και  $I_{DC} = I_{max}/2$ .
- Στη συνέχεια εισάγουμε **ημιτονοειδές σήμα στην είσοδο  $V_{in}$** .





# Τάξη A (Class A)

- Οι ενισχυτές ισχύος τάξης A άγουν ( $I_D > 0$ ) καθ' όλο τον κύκλο του σήματος εισόδου δηλ. **η γωνία αγωγής είναι  $360^\circ$** .

□ Μέγιστη Μέση Ισχύς εξόδου:

$$P_{out} = \frac{1}{2} V_L i_L = \frac{1}{2} V_{DD} \frac{I_{max}}{2} \Rightarrow$$

$$P_{out} = \frac{V_{DD} I_{max}}{4}$$

□ DC Ισχύς τροφοδοτικού:

$$P_{DC} = V_{supply} I_{DC} \Rightarrow$$

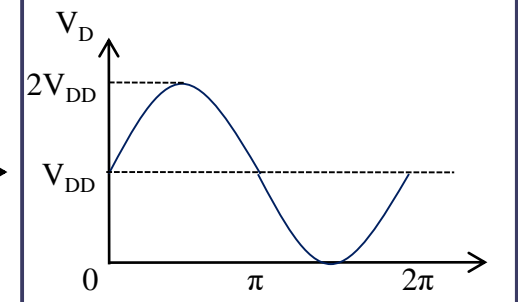
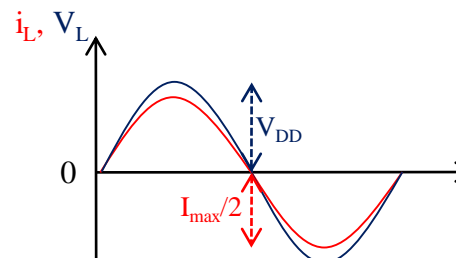
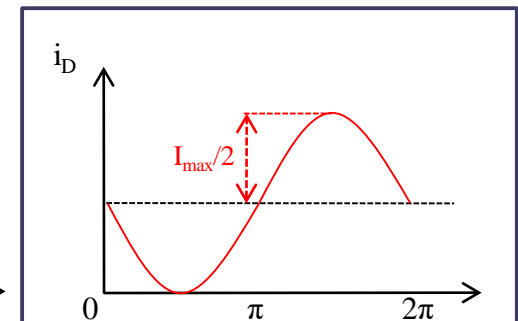
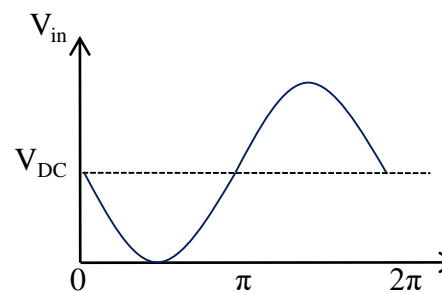
$$P_{DC} = \frac{V_{DD} I_{max}}{2}$$

□ Μέγιστη Απόδοση (Efficiency):

$$n(\%) = \frac{P_{out}}{P_{DC}} = \frac{\frac{V_{DD} I_{max}}{4}}{\frac{V_{DD} I_{max}}{2}} \cdot 100\% \Rightarrow$$

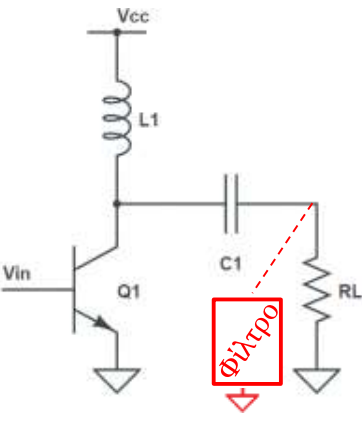
$$n(\%) = 50\%$$

Υποδοχή-Συλλέκτης

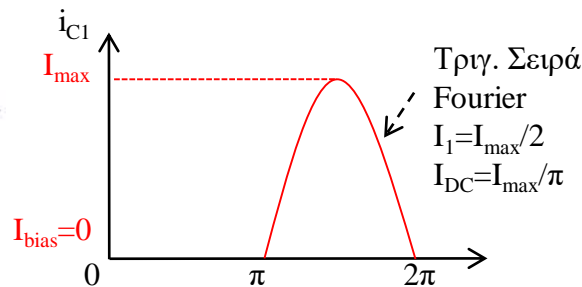


# Τάξη B (Class B)

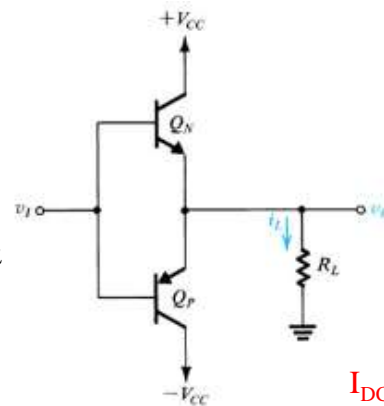
## • Class B-Inductive Based



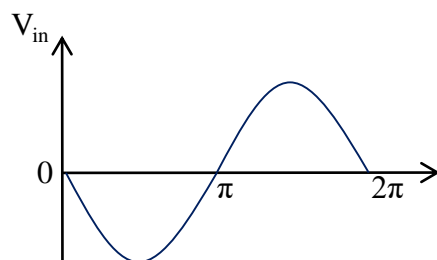
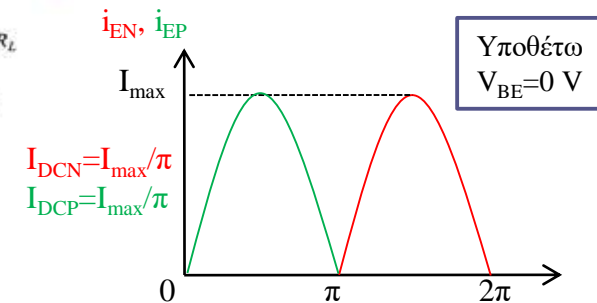
- Το  $Q_1$  άγει για το μισό κύκλο του σήματος εισόδου.
- Το φίλτρο επιτρέπει το πέρασμα μόνο της 1ης αρμονικής στο φορτίο.



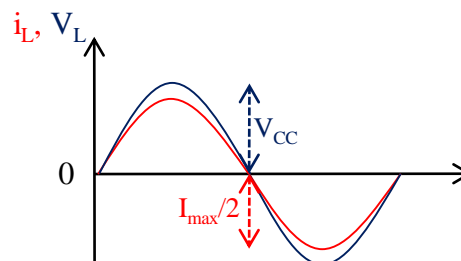
## • Class B-Push-Pull



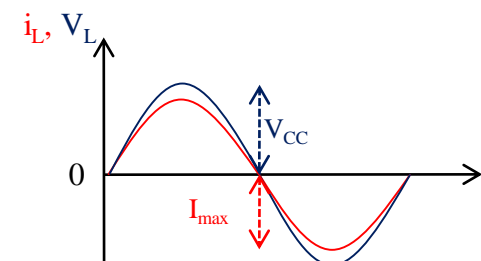
- Το  $Q_N$  άγει για το θετικό κύκλο του σήματος εισόδου.
- Το  $Q_P$  άγει για τον αρνητικό κύκλο του σήματος εισόδου.



Class B-Inductive Based



Class B-Push-Pull



# Τάξη B (Class B)

- Οι ενισχυτές ισχύος τάξης B άγουν ( $I_C > 0$ ) για τον μισό κύκλο του σήματος εισόδου δηλ. **η γωνία αγωγής είναι  $180^\circ$** . Για την Push-Pull διάταξη το  $Q_N$  άγει για τον μισό (θετικό) κύκλο του σήματος εισόδου και το  $Q_P$  για τον άλλο μισό (αρνητικό).

## Class B-Inductive Based

□ Ισχύς εξόδου:

$$P_{out} = \frac{1}{2} V_1 I_1 = \frac{V_{CC} I_{max}}{4}$$

$V_1, I_1$  η τάση και το ρεύμα της 1ης αρμονικής.

□ DC Ισχύς  
τροφοδοσίας:

$$P_{DC} = V_{CC} I_{DC} = \frac{V_{CC} I_{max}}{\pi}$$

$I_{DC}$  το dc ρεύμα, που προκύπτει  
από την Τριγ. Σειρά Fourier του μισού ημιτόνου.

□ Απόδοση :

$$n(\%) = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \cdot 100\% = \frac{\frac{V_{CC} I_{max}}{4}}{\frac{V_{CC} I_{max}}{\pi}} \cdot 100\% \Rightarrow$$

$$n(\%) = \frac{\pi}{4} \cdot 100\% = 78.5\%$$

## Class B-Push-Pull

$$P_{out} = \frac{1}{2} V_L I_L = \frac{V_{CC} I_{max}}{2}$$

$$P_{DC} = 2 \cdot V_{CC} I_{DC} = 2 \cdot \frac{V_{CC} I_{max}}{\pi}$$

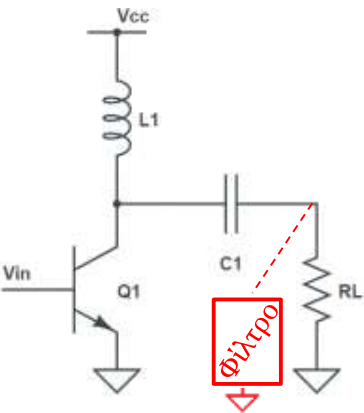
Ο συντελεστής 2 προκύπτει,  
από το γεγονός ότι υπάρχουν δύο τροφοδοσίες  $V_{CC}$ .

$$n(\%) = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \cdot 100\% = \frac{\frac{V_{CC} I_{max}}{2}}{2 \cdot \frac{V_{CC} I_{max}}{\pi}} \cdot 100\% \Rightarrow$$

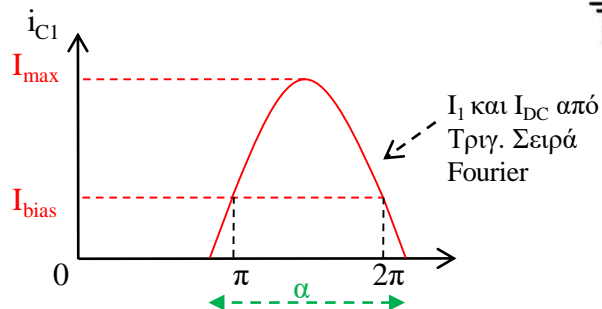
$$n(\%) = \frac{\pi}{4} \cdot 100\% = 78.5\%$$

# Τάξη AB (Class AB)

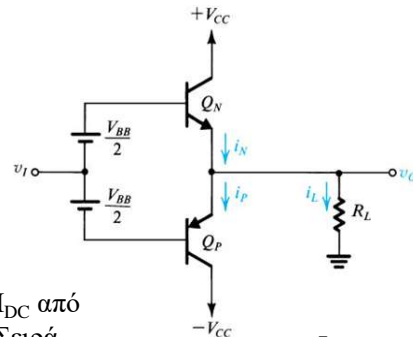
## • Class AB-Inductive Based



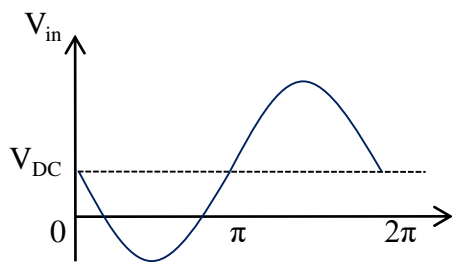
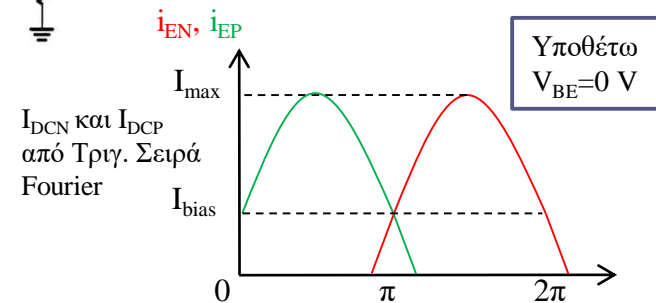
- Το  $Q_1$  άγει για γωνία  $180^\circ < \alpha < 360^\circ$  του σήματος εισόδου.
- Το φίλτρο επιτρέπει το πέρασμα μόνο της 1ης αρμονικής στο φορτίο.



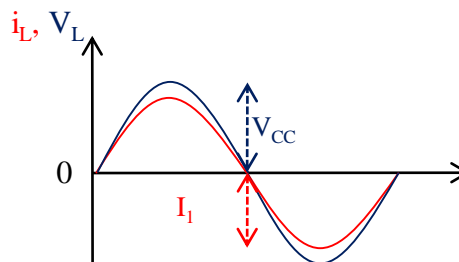
## • Class AB-Push-Pull



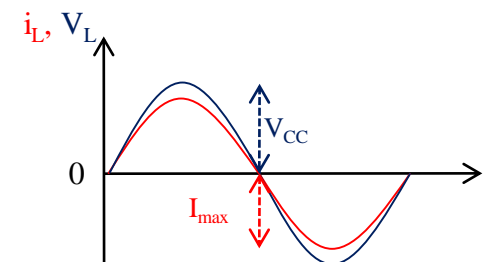
- Το  $Q_N$  άγει για το θετικό κύκλο του σήματος εισόδου.
- Το  $Q_P$  άγει για τον αρνητικό κύκλο του σήματος εισόδου.



Class AB-Inductive Based



Class AB-Push-Pull



# Τάξη AB (Class AB)

- Οι ενισχυτές ισχύος τάξης AB άγουν ( $I_D > 0$ ) για περισσότερο από τον μισό κύκλο του σήματος εισόδου δηλ. **η γωνία αγωγής είναι  $180^\circ < \alpha < 360^\circ$** . Για την Push-Pull διάταξη το  $Q_N$  άγει για τον μισό (θετικό) κύκλο του σήματος εισόδου και το  $Q_P$  για τον άλλο μισό (αρνητικό).

## Class AB-Inductive Based

□ Ισχύς εξόδου:

$$P_{out} = \frac{1}{2} V_1 I_1 = \frac{V_{CC} I_1}{2} \approx \frac{V_{CC} I_{max}}{4}$$

$$I_1 = \frac{I_{max}}{2\pi} \cdot \frac{\alpha - \sin \alpha}{1 - \cos(\alpha/2)} \approx \frac{I_{max}}{2}$$

□ DC Ισχύς

τροφοδοσίας:  $P_{DC} = V_{CC} I_{DC}$

$$I_{DC} = \frac{I_{max}}{2\pi} \cdot \frac{2\sin(\alpha/2) - \alpha \cdot \cos(\alpha/2)}{1 - \cos(\alpha/2)} \rightarrow \left( \frac{I_{max}}{\pi}, \frac{I_{max}}{2} \right)$$

□ Απόδοση :

$$n(\%) = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \cdot 100\% \Rightarrow$$

$$n(\%) = (50\%, 78.5\%)$$

## Class AB-Push-Pull

$$P_{out} = \frac{1}{2} V_L I_L = \frac{V_{CC} I_{max}}{2}$$

$$P_{DC} = 2 \cdot V_{CC} I_{DC}$$

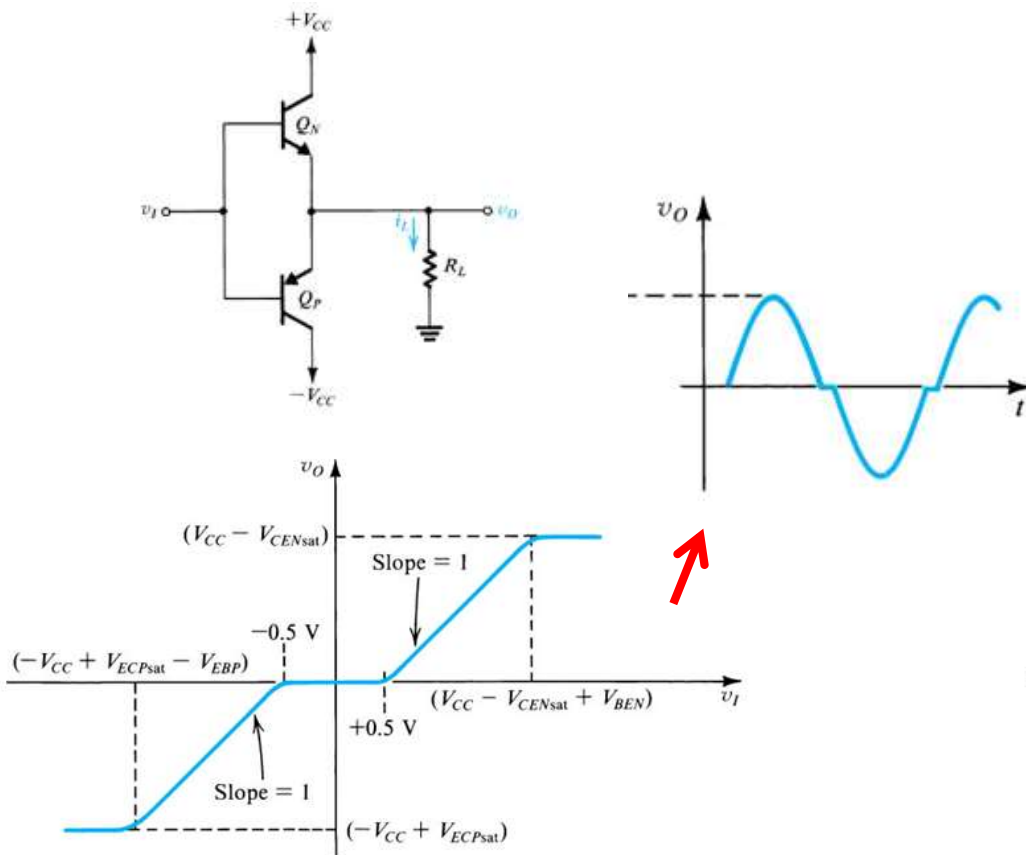
$$I_{DC} = \frac{I_{max}}{2\pi} \cdot \frac{2\sin(\alpha/2) - \alpha \cdot \cos(\alpha/2)}{1 - \cos(\alpha/2)} \rightarrow \left( \frac{I_{max}}{\pi}, \frac{I_{max}}{2} \right)$$

$$n(\%) = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \cdot 100\% \Rightarrow$$

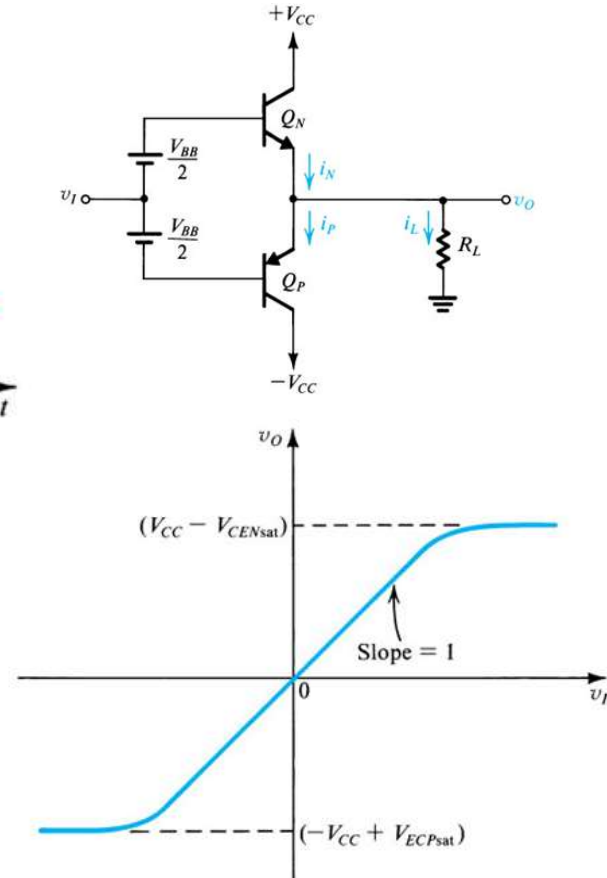
$$n(\%) = (50\%, 78.5\%)$$

# Μία Λεπτομέρεια...

- Class B-Push-Pull



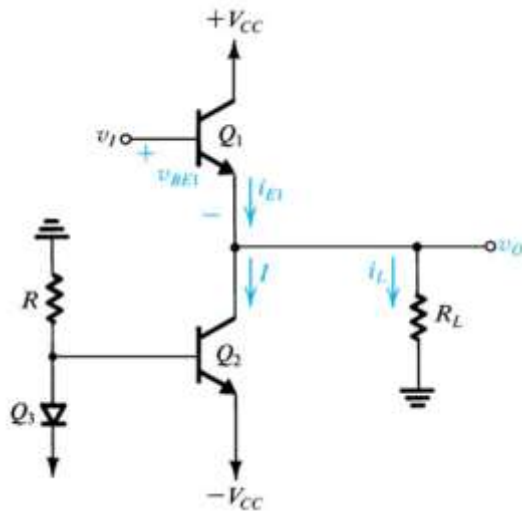
- Class AB-Push-Pull



# Επίλυση Ασκήσεων

A series of horizontal lines in teal and light blue colors, some solid and some dashed, extending across the width of the slide.

# Άσκηση 1 (Τάξη Α)



Στον παραπάνω ακόλουθο εκπομπού έχουμε:  
 $V_{CC}=15V$ ,  $V_{CEsat}=0.2V$ ,  $V_{BE}=0.7V$  **σταθερή** και  $\beta \rightarrow \infty$ .

a)  $R=$ ; Για μέγιστη διακύμανση σήματος εξόδου και  $R_L=1k\Omega$ .

b) Μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου.

c) Μέγιστη διακύμανση ρεύματος εκπομπού.

Για ημιτονοειδή τάση εισόδου:

d) Μέση ισχύς εξόδου  $P_L$ . Max;

e) Ισχύς τροφοδοσίας  $P_{DC}$ .

f) Απόδοση  $\eta(\%)$ . Max;

a) Το **ανώτατο όριο** της μέγιστης διακύμανσης  $[v_{Omin}, v_{Omax}]$  υπαγορεύεται από τον κορεσμό του  $Q_1$ .

Θα πρέπει:  $V_{CE1} \geq V_{CE1sat} \Rightarrow V_{CC} - v_O \geq V_{CE1sat}$

$$v_O \leq V_{CC} - V_{CE1sat}$$

$$v_{Omax} = 14.8V$$

Εφόσον το ρεύμα εκπομπού  $i_{E1} = I + i_L$ , το ρεύμα πόλωσης  $I$  θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο αρνητικό ρεύμα φορτίου αλλιώς το  $Q_1$  αποκόπτεται.

Το **κατώτατο όριο** της μέγιστης διακύμανσης  $[v_{Omin}, v_{Omax}]$  υπαγορεύεται είτε από την αποκοπή του  $Q_1$ :

$$i_{E1} = 0 \Rightarrow i_L = -I$$

$$v_{Omin} = -IR_L$$

είτε από τον κορεσμό του  $Q_2$ :

$$V_{CE2} \geq V_{CE2sat} \Rightarrow v_O - (-V_{CC}) \geq V_{CE2sat}$$

$$v_{Omin} = V_{CE2sat} - V_{CC}$$

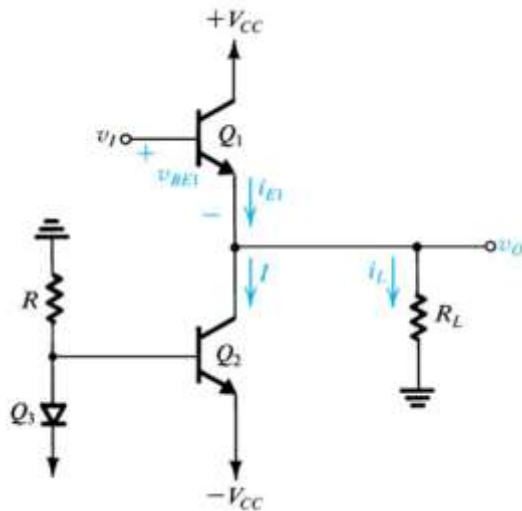
ανάλογα με τις τιμές των  $I$  και  $R_L$ .

Η μικρότερη τάση εξόδου είναι η τελευταία και επιτυγχάνεται με την προϋπόθεση ότι  $I \geq |i_L|$ :

$$I \geq \frac{|V_{CE2sat} - V_{CC}|}{R_L}$$



# Άσκηση 1 (Τάξη Α)



Στον παραπάνω ακόλουθο εκπομπού έχουμε:  
 $V_{CC}=15V$ ,  $V_{CEsat}=0.2V$ ,  $V_{BE}=0.7V$  **σταθερή** και  $\beta \rightarrow \infty$ .

- $R=$ ; Για μέγιστη διακύμανση σήματος εξόδου και  $R_L=1k\Omega$ .
  - Μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου.
  - Μέγιστη διακύμανση ρεύματος εκπομπού.
- Για ημιτονοειδή τάση εισόδου:
- Μέση ισχύς εξόδου  $P_L$ . Max;
  - Ισχύς τροφοδοσίας  $P_{DC}$ .
  - Απόδοση  $\eta(\%)$ . Max;

Επομένως για μέγιστη διακύμανση εξόδου:

$$I = \frac{|V_{CE2sat} - V_{CC}|}{R_L}$$

$$I = \frac{|0.2 - 15|}{1k} = 14.8 \text{ mA}$$

Τέλος  $I_{B2} \approx 0$  και τα  $Q_2, Q_3$  και  $R$  υλοποιούν καθρέπτη ρεύματος οπότε  $I=I_R$  και

$$R = \frac{V_{B2}}{I} = \frac{V_{BE} - (-V_{CC})}{I} = \frac{14.3}{14.8m} \Rightarrow$$

$$R = 0.97 \text{ k}\Omega$$

- b) Η μέγιστη διακύμανση εξόδου είναι:

$$[v_{Omin}, v_{Omax}] = [V_{CE2sat} - V_{CC}, V_{CC} - V_{CE1sat}] \Rightarrow$$

$$[v_{Omin}, v_{Omax}] = [-14.8V, +14.8V]$$

- c) Η μέγιστη διακύμανση ρεύματος εκπομπού είναι:

$$[i_{E1min}, i_{E1max}] = \left[ I + \frac{v_{Omin}}{R_L}, I + \frac{v_{Omax}}{R_L} \right] \Rightarrow$$

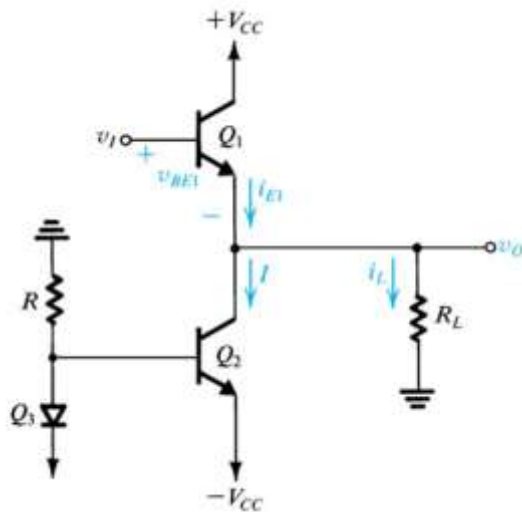
$$[i_{E1min}, i_{E1max}] = [0, 29.6 \text{ mA}]$$

- d) Για ημιτονοειδή είσοδο έχω ημιτονοειδή έξοδο (ακόλουθος εκπομπού). Η μέση ισχύς εξόδου είναι:

$$P_L = \frac{(V_p/\sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{V_p^2}{2R_L}$$

όπου  $V_p$  το πλάτος της ημιτονοειδούς τάσης εξόδου.

# Άσκηση 1 (Τάξη Α)



Στον παραπάνω ακόλουθο εκπομπού έχουμε:  
 $V_{CC}=15V$ ,  $V_{CEsat}=0.2V$ ,  $V_{BE}=0.7V$  **σταθερή** και  $\beta \rightarrow \infty$ .

- $R=$ ; Για μέγιστη διακύμανση σήματος εξόδου και  $R_L=1k\Omega$ .
- Μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου.
- Μέγιστη διακύμανση ρεύματος εκπομπού.  
 Για ημιτονοειδή τάση εισόδου:
- Μέση ισχύς εξόδου  $P_L$ . Max;
- Ισχύς τροφοδοσίας  $P_{DC}$ .
- Απόδοση  $\eta(\%)$ . Max;

- d) Η μέγιστη μέση ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο προκύπτει όταν η τάση εξόδου υφίσταται μέγιστη διακύμανση. Σε αυτή την περίπτωση το πλάτος της ημιτονοειδούς τάσης θα είναι:

$$V_p = \frac{v_{Omax} - v_{Omin}}{2} = \frac{29.6}{2} = 14.8 V$$

και η μέγιστη μέση ισχύς:

$$P_L = \frac{14.8^2}{2 \cdot 1k} = 109.5 mW = 20.4 dBm$$

- e) Εφόσον το ρεύμα στο  $Q_2$  είναι σταθερό ίσο με  $I$ , η ισχύς που αντλείται από την αρνητική τροφοδοσία είναι  $V_{CC}I$ . Το μέσο ρεύμα στο  $Q_1$  είναι ίσο με  $I$ , οπότε η ισχύς που αντλείται από την θετική τροφοδοσία είναι  $V_{CC}I$ . Η συνολική ισχύς τροφοδοσίας:

$$P_{DC} = 2 \cdot V_{CC}I = 2 \cdot 15 \cdot 14.8m \Rightarrow$$

$$P_{DC} = 444 mW = 26.47 dBm$$

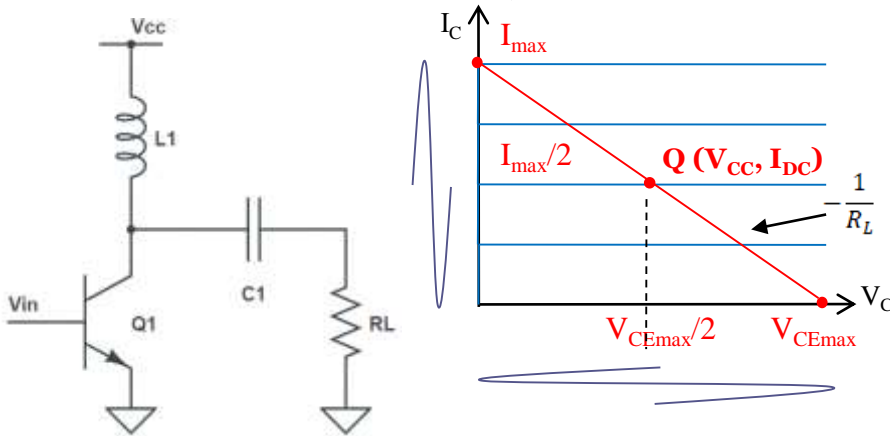
- f) Η απόδοση δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{P_L}{P_{DC}} = \frac{V_p^2}{4 \cdot V_{CC}IR_L}$$

και γίνεται μέγιστη, για μέγιστη μέση ισχύ εξόδου:

$$n = \frac{109.5 m}{444 m} \cdot 100\% = 24.6\%$$

## Άσκηση 2 (Τάξη A-Inductive Based)



Για τον παραπάνω ενισχυτή κοινής-εκπομπού ισχύουν τα ακόλουθα:  $V_{CEmax}=30V$ ,  $V_{knee} \approx 0V$ ,  $I_{max}=30mA$  και  $\beta \rightarrow \infty$ . Θεωρούμε  $L_1$  μεγάλο πηνίο που αποκόπτει τα AC σήματα και  $C_1$  τέλειος πυκνωτής σύζευξης.

- $V_{CC}=;$ ,  $I_{DC}=;$ ,  $R_L=;$ , για μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου και λειτουργία σε τάξη A. Θεωρείστε ημιτονοειδή τάση εισόδου.
- Μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου.
- Μέγιστη διακύμανση ρεύματος φορτίου  $i_L$ .
- Μέση ισχύς εξόδου  $P_L$ . Max;
- Ισχύς τροφοδοσίας  $P_{DC}$ .
- Απόδοση  $\eta(\%)$ . Max;

- Το τρανζίστορ  $Q_1$  είναι δυνατόν να παράξει ρεύμα στον συλλέκτη  $I_{max}=30mA$  με κατάλληλη είσοδο. Για λειτουργία σε κλάση A, το τρανζίστορ θέλουμε να άγει για όλο τον κύκλο της εισόδου επομένως πολώνουμε το τρανζίστορ σε ρεύμα:

$$I_{DC} = \frac{I_{max}}{2} = 15mA$$

Η μέγιστη διακύμανση της τάσης του συλλέκτη και κατ' επέκταση του φορτίου μπορεί να είναι  $V_{CEmax}=30V$ . Επομένως επιλέγουμε τάση τροφοδοσίας:

$$V_{CC} = \frac{V_{CEmax}}{2} = 15V$$

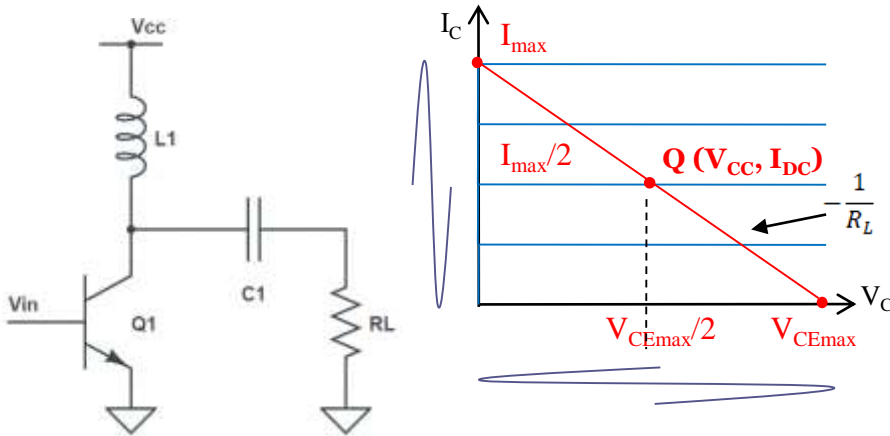
Με κατάλληλη AC τάση εισόδου, το πλάτος του AC ρεύματος στο συλλέκτη είναι  $i_p=15mA$ . Το κατάλληλο φορτίο για να παραχθεί η μέγιστη δυνατή διακύμανση τάσης στο συλλέκτη  $[0, V_{CEmax}]$  είναι:

$$R_L = \frac{V_{CEmax}/2}{I_{max}/2} = \frac{V_{CC}}{i_p} = 1k\Omega$$

- Η μέγιστη διακύμανση της τάσης εξόδου είναι:

$$[-V_{CC}, +V_{CC}] = [-15V, +15V]$$

## Άσκηση 2 (Τάξη A-Inductive Based)



Για τον παραπάνω ενισχυτή κοινής-εκπομπού ισχύουν τα ακόλουθα:  $V_{CEmax}=30V$ ,  $V_{knee} \approx 0V$ ,  $I_{max}=30mA$  και  $\beta \rightarrow \infty$ . Θεωρούμε  $L_1$  μεγάλο πηνίο που αποκόπτει τα AC σήματα και  $C1$  τέλειος πυκνωτής σύζευξης.

- $V_{CC}=;$ ,  $I_{DC}=;$ ,  $R_L=;$ , για μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου και λειτουργία σε τάξη A. Θεωρείστε ημιτονοειδή τάση εισόδου.
- Μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου.
- Μέγιστη διακύμανση ρεύματος φορτίου  $i_L$ .
- Μέση ισχύς εξόδου  $P_L$ . Max;
- Ισχύς τροφοδοσίας  $P_{DC}$ .
- Απόδοση  $\eta(\%)$ . Max;

- c) Η μέγιστη διακύμανση του ρεύματος φορτίου είναι:

$$\left[ -\frac{I_{max}}{2}, +\frac{I_{max}}{2} \right] = [-15mA, +15mA]$$

- d) Η μέγιστη μέση ισχύς εξόδου είναι:

$$P_L = \frac{V_p i_p}{2} = \frac{V_{CC} I_{max}}{4} \Rightarrow$$

$$P_L = 112.5mW = 20.5dBm$$

- e) Η dc ισχύς τροφοδοσίας είναι:

$$P_{DC} = V_{CC} I_{DC} = \frac{V_{CC} I_{max}}{2} \Rightarrow$$

$$P_{DC} = 225mW = 23.52dBm$$

- f) Η απόδοση  $\eta(\%)$  δίνεται από τον τύπο:

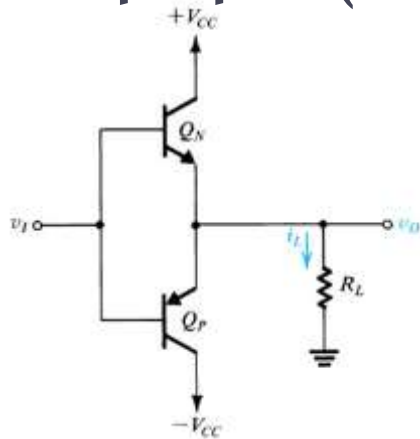
$$n = \frac{P_L}{P_{DC}} \cdot 100\%$$

και γίνεται μέγιστη για μέγιστη μέση ισχύ εξόδου:

$$n = \frac{112.5m}{225m} \cdot 100\% \Rightarrow$$

$$n = 50\%$$

## Άσκηση 3 (Τάξη B-Push-Pull)



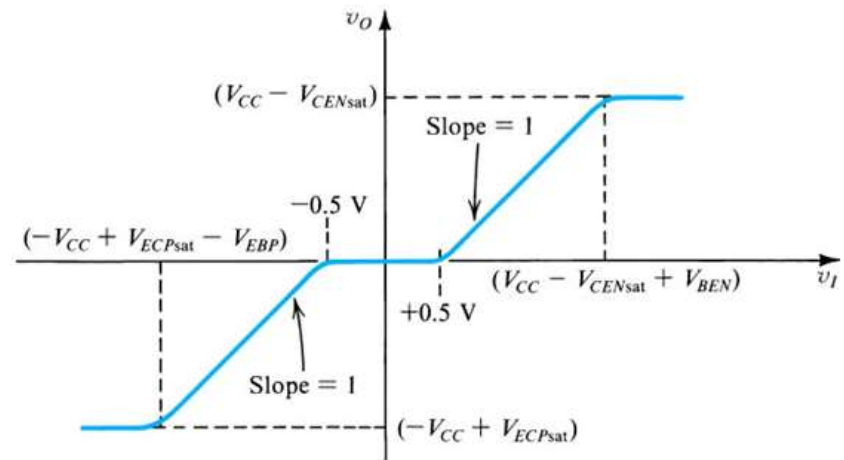
Δίνεται το στάδιο εξόδου τάξης B με συμπληρωματικά διπολικά τρανζίστορ.

- a) Σχεδιάστε ποιοτικά την χαρακτηριστική  $v_o-v_i$ , λαμβάνοντας υπόψη τις  $V_{BE}$  και  $V_{CEmax}$  και εξηγήστε τη λειτουργία του ενισχυτή.

Αγνοώντας τη δράση των  $V_{BE}$  και  $V_{CEmax}$  με  $V_{CC}=10V$ ,  $R_L=100\Omega$  και ημιτονοειδές σήμα εισόδου βρείτε:

- b) Μέγιστη μέση ισχύς εξόδου  $P_{Lmax}$ .  
 c) Σε ποια ισχύς τροφοδοσίας αντιστοιχεί η  $P_{Lmax}$ ;  
 d) Απόδοση  $\eta(\%)$  κατά την  $P_{Lmax}$ .  
 e) Για σήμα εξόδου που έχει πλάτος το μισό του μεγίστου βρείτε ισχύ εξόδου, ισχύ τροφοδοσίας και απόδοση.

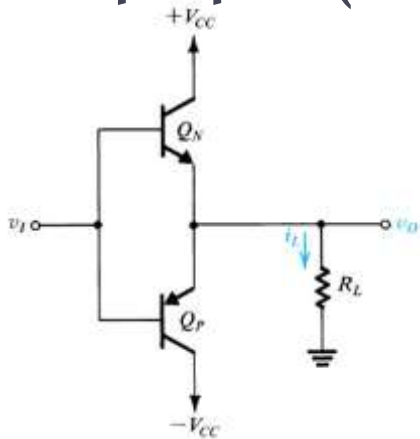
a)



- Τα τρανζίστορ  $Q_N$  και  $Q_P$  πολώνονται σε μηδενικό ρεύμα και άγουν μόνο με την παρουσία σήματος εισόδου.
  - Το  $Q_N$  ωθεί ρεύμα προς το φορτίο όταν η  $v_i$  είναι θετική και μεγαλύτερη από  $V_{BE}$ . Όταν συμβαίνει αυτό το  $Q_P$  είναι σε αποκοπή ενώ το  $Q_N$  λειτουργεί σαν ακόλουθος εκπομπού.
  - Όταν η τάση εισόδου είναι  $v_i$  είναι αρνητικότερη της  $-V_{BE}$  το  $Q_P$  ενώ το  $Q_N$  είναι σε αποκοπή.
- b) Για ημιτονοειδές σήμα εισόδου, άρα και εξόδου, η μέγιστη διακύμανση της τάσης εξόδου θα είναι:

$$[v_{Omin}, v_{Omax}] = [-V_{CC}, V_{CC}] = [-10, 10]$$

## Άσκηση 3 (Τάξη B-Push-Pull)



Δίνεται το στάδιο εξόδου τάξης B με συμπληρωματικά διπολικά τρανζίστορ.

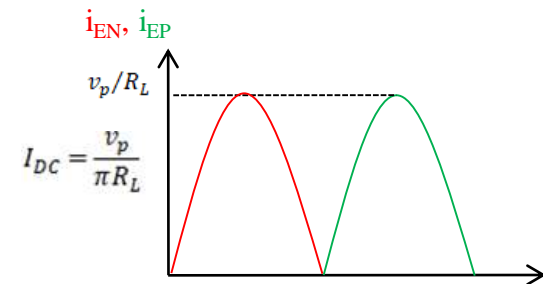
- Σχεδιάστε ποιοτικά την χαρακτηριστική  $v_o-v_i$ , λαμβάνοντας υπόψη τις  $V_{BE}$  και  $V_{CEmax}$  και εξηγήστε τη λειτουργία του ενισχυτή.
- Αγνοώντας τη δράση των  $V_{BE}$  και  $V_{CEmax}$  με  $V_{CC}=10V$ ,  $R_L=100\Omega$  και ημιτονοειδές σήμα εισόδου βρείτε:
- Μέγιστη μέση ισχύς εξόδου  $P_{Lmax}$ .
- Σε ποια ισχύς τροφοδοσίας αντιστοιχεί η  $P_{Lmax}$ ;
- Απόδοση  $\eta(\%)$  κατά την  $P_{Lmax}$ .
- Για σήμα εξόδου που έχει πλάτος το μισό του μεγίστου βρείτε ισχύ εξόδου, ισχύ τροφοδοσίας και απόδοση.

- b) Άρα η μέγιστη μέση ισχύς εξόδου:

$$P_{Lmax} = \frac{V_p^2}{2R_L} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} \Rightarrow$$

$$P_{Lmax} = 500 \text{ mW} \approx 27 \text{ dBm}$$

- c) Κατά τον θετικό κύκλο του σήματος εισόδου το  $Q_N$  θα αντλεί ρεύμα από το τροφοδοτικό  $+V_{CC}$  το οποίο θα έχει τη μορφή ημίσεως ημιτονοειδούς κύματος πλάτους  $v_p/R_L$ . Κατά τον αρνητικό κύκλο του σήματος εισόδου το  $Q_P$  θα αντλεί ρεύμα από το τροφοδοτικό  $-V_{CC}$  το οποίο θα έχει τη μορφή ημίσεως ημιτονοειδούς κύματος πλάτους  $v_p/R_L$ .



Το μέσο ρεύμα που προέρχεται από το κάθε τροφοδοτικό θα είναι:

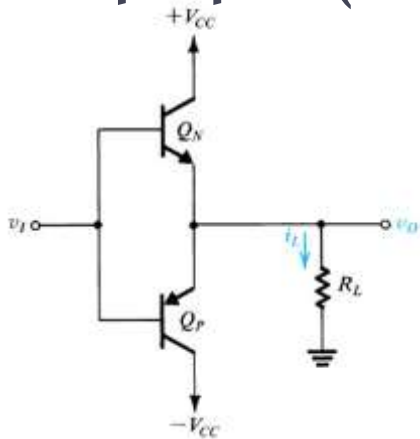
$$I_{DC} = \frac{v_p}{\pi R_L} = \frac{V_{CC}}{\pi R_L}$$

Άρα η συνολική ισχύς των τροφοδοτικών θα είναι:

$$P_{DC} = 2 \cdot V_{CC} I_{DC} = 2 \cdot \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L} \Rightarrow$$

$$P_{DC} = 637 \text{ mW} \approx 28 \text{ dBm}$$

## Άσκηση 3 (Τάξη B-Push-Pull)



Δίνεται το στάδιο εξόδου τάξης B με συμπληρωματικά διπολικά τρανζίστορ.

- Σχεδιάστε ποιοτικά την χαρακτηριστική  $v_o-v_i$ , λαμβάνοντας υπόψη τις  $V_{BE}$  και  $V_{CEmax}$  και εξηγήστε τη λειτουργία του ενισχυτή.
- Αγνοώντας τη δράση των  $V_{BE}$  και  $V_{CEmax}$  με  $V_{CC}=10V$ ,  $R_L=100\Omega$  και ημιτονοειδές σήμα εισόδου βρείτε:
- Μέγιστη μέση ισχύς εξόδου  $P_{Lmax}$ .
- Σε ποια ισχύς τροφοδοσίας αντιστοιχεί η  $P_{Lmax}$ ;
- Απόδοση  $\eta(\%)$  κατά την  $P_{Lmax}$ .
- Για σήμα εξόδου που έχει πλάτος το μισό του μεγίστου βρείτε ισχύ εξόδου, ισχύ τροφοδοσίας και απόδοση.

d) Η μέγιστη απόδοση είναι:

$$n = \frac{P_{Lmax}}{P_{DC}} \cdot 100\% = \frac{\frac{V_{CC}^2}{2R_L}}{2 \cdot \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L}} \cdot 100\% \Rightarrow$$

$$n = \frac{\pi}{4} \cdot 100\% = 78.5\%$$

e) Για πλάτος τάσης εξόδου ίσο με  $v_p = V_{CC}/2$  έχουμε:

$$P_L = \frac{v_p^2}{2R_L} = \frac{V_{CC}^2}{8R_L} \Rightarrow$$

$$P_L = 125 \text{ mW} = 20.97 \text{ dBm}$$

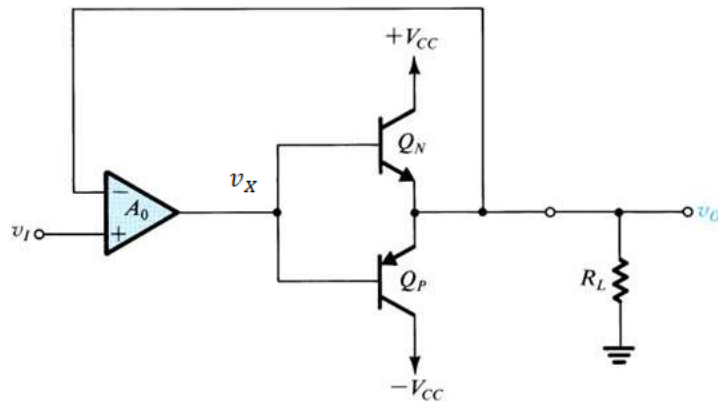
$$P_{DC} = 2V_{CC} \frac{v_p}{\pi R_L} = \frac{V_{CC}^2}{\pi R_L} \Rightarrow$$

$$P_{DC} = \frac{1}{\pi} = 318.3 \text{ mW} = 25 \text{ dBm}$$

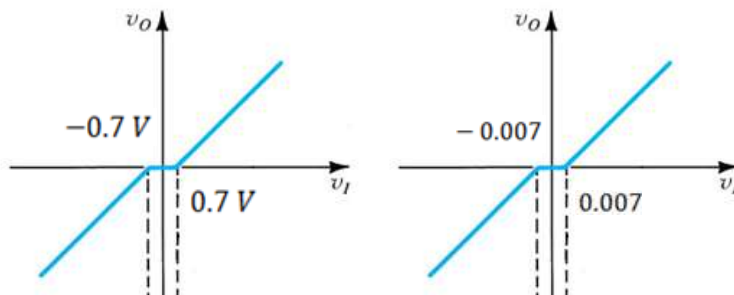
$$n = \frac{P_L}{P_{DC}} \cdot 100\% = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{\pi R_L}} \cdot 100\% \Rightarrow$$

$$n = \frac{\pi}{8} \cdot 100\% = 39.26\%$$

## Άσκηση 4 (Τάξη B-Push-Pull με ανάδραση)



Δίνεται η παραπάνω συνδεσμολογία με ανάδραση. Έστω ότι ο ενισχυτής έχει κέρδος  $A_0 = 100 \text{ V/V}$ . Υπολογίστε μία σγέση για την  $v_O$  ως προς  $v_I$  υποθέτοντας ότι  $|V_{BE}| = 0.7 \text{ V}$ . Σχεδιάστε την παραπάνω χαρακτηριστική μεταφοράς και συγκρίνετε την με τη χαρακτηριστική μεταφοράς του κυκλώματος χωρίς ανάδραση.



- Ο ενισχυτής με κέρδος  $A_0$  ενισχύει την διαφορά των εισόδων του, δηλαδή:
- Για  $-|V_{BE}| \leq v_X \leq |V_{BE}| \rightarrow -0.7 \text{ V} \leq v_X \leq 0.7 \text{ V}$  και τα δύο τρανζίστορ της push-pull διάταξης είναι σε αποκοπή, επομένως  $v_O = 0$ . Με αντικατάσταση έχουμε:

$$-0.7 \text{ V} \leq A_0 v_I \leq 0.7 \text{ V} \rightarrow$$

$$-0.007 \text{ V} \leq v_I \leq 0.007 \text{ V}$$

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η παραμόρφωση περάσματος (crossover distortion) έχει ελαττωθεί αφού η «νεκρή» περιοχή έχει μειωθεί κατά συντελεστή  $A_0$ .

- Για  $v_I \geq 0.007 \text{ V}$  η τάση εξόδου ακολουθεί την τάση εισόδου:

$$v_X = v_O + |V_{BE}| \Leftrightarrow A_0(v_I - v_O) = v_O + |V_{BE}|$$

$$v_O = \frac{A_0 v_I - |V_{BE}|}{1 + A_0} = 0.99 \cdot v_I - 0.007$$

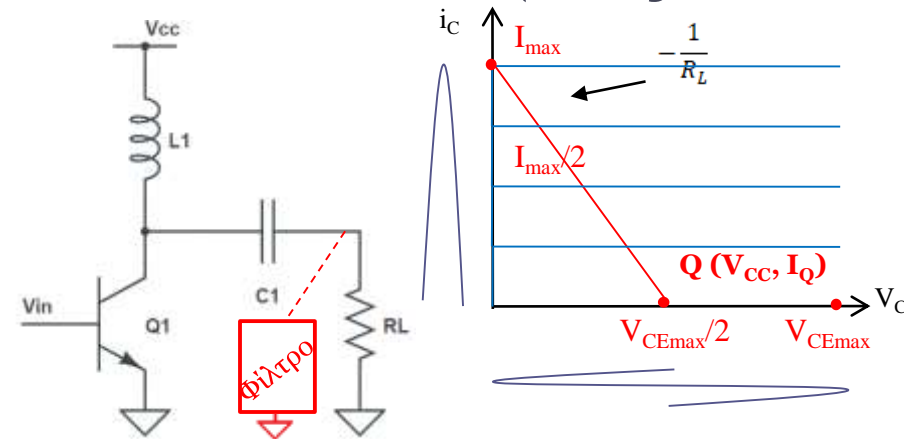
- Για  $v_I \leq -0.007 \text{ V}$  η τάση εξόδου ακολουθεί την τάση εισόδου:

$$v_X = v_O - |V_{BE}| \Leftrightarrow A_0(v_I - v_O) = v_O - |V_{BE}|$$

$$v_O = \frac{A_0 v_I + |V_{BE}|}{1 + A_0} = 0.99 \cdot v_I + 0.007$$



## Άσκηση 5 (Τάξη B-Inductive Based)



Για τον παραπάνω ενισχυτή κοινού-εκπομπού ισχύουν τα ακόλουθα:  $V_{CEmax}=30V$ ,  $V_{knee} \approx 0V$ ,  $I_{max}=30mA$  και  $\beta \rightarrow \infty$ . Θεωρούμε  $L_1$  μεγάλο πηνίο που αποκόπτει τα AC σήματα και  $C1$  τέλειος πυκνωτής σύζευξης. Επίσης θεωρείστε τέλειο **φίλτρο που κόβει όλες τις αρμονικές**, εκτός την θεμελιώδη.

- $V_{CC}=;$ ,  $I_Q=;$ ,  $R_L=;$ , για μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου και λειτουργία σε τάξη B. Θεωρείστε ημιτονοειδή τάση εισόδου.
- Μέση ισχύς εξόδου  $P_L$ . Max;
- Dc ισχύς τροφοδοσίας  $P_{DC}$ .
- Απόδοση  $\eta(\%)$ . Max;

- Για λειτουργία σε κλάση B, το τρανζίστορ θέλουμε να άγει για τον μισό κύκλο της εισόδου επομένως πολώνουμε το τρανζίστορ σε μηδενικό ρεύμα ρεύμα:

$$I_Q = 0$$

Η μέγιστη διακύμανση της τάσης του συλλέκτη και κατ' επέκταση του φορτίου μπορεί να είναι  $V_{CEmax}=30V$ . Επομένως επιλέγουμε τάση τροφοδοσίας:

$$V_{CC} = \frac{V_{CEmax}}{2} = 15V$$

Με κατάλληλη AC τάση εισόδου, το πλάτος του AC ρεύματος στο συλλέκτη είναι  $i_p=30mA$ . Η πρώτη αρμονική της κυματομορφής του ρεύματος συλλέκτη (μισό ημίτονο) έχει πλάτος:

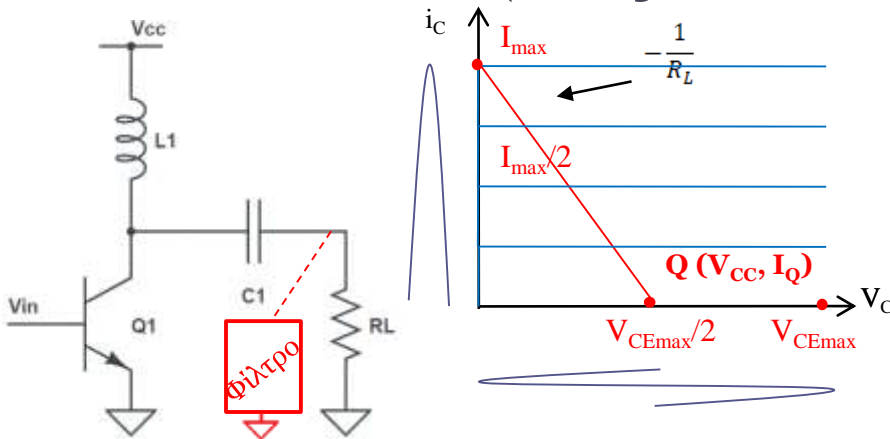
$$i_1 = \frac{i_p}{2} = \frac{I_{max}}{2} = 15mA$$

Το κατάλληλο φορτίο για να παραχθεί η μέγιστη δυνατή διακύμανση τάσης στο συλλέκτη  $[0, V_{CEmax}]$  είναι:

$$R_L = \frac{v_p}{i_1} = \frac{V_{CEmax}/2}{I_{max}/2}$$

$$R_L = 1k\Omega$$

## Άσκηση 5 (Τάξη B-Inductive Based)



Για τον παραπάνω ενισχυτή κοινού-εκπομπού ισχύουν τα ακόλουθα:  $V_{CEmax}=30V$ ,  $V_{knee} \approx 0V$ ,  $I_{max}=30mA$  και  $\beta \rightarrow \infty$ . Θεωρούμε  $L_1$  μεγάλο πηνίο που αποκόπτει τα AC σήματα και  $C1$  τέλειος πυκνωτής σύζευξης. Επίσης θεωρείστε τέλειο **φίλτρο που κόβει όλες τις αρμονικές**, εκτός την θεμελιώδη.

- $V_{CC}=;$ ,  $I_Q=;$ ,  $R_L=;$ , για μέγιστη διακύμανση τάσης εξόδου και λειτουργία σε τάξη B. Θεωρείστε ημιτονοειδή τάση εισόδου.
- Μέση ισχύς εξόδου  $P_L$ . Max;
- Dc ισχύς τροφοδοσίας  $P_{DC}$ .
- Απόδοση  $\eta(\%)$ . Max;

- b) Η μέγιστη μέση ισχύς εξόδου είναι:

$$P_L = \frac{V_p i_p}{2} = \frac{V_{CC} I_{max}}{4} \Rightarrow$$

$$P_L = 112.5 mW = 20.5 dBm$$

- c) Για τη μέση ισχύ τροφοδοσίας πρέπει να υπολογιστεί το DC ρεύμα που αντλεί το τρανζίστορ από την τροφοδοσία. Δηλαδή η μέση τιμή του μισού ημιτόνου:

$$I_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_p \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{i_p}{\pi} = \frac{I_{max}}{\pi}$$

Η μέση ισχύς τροφοδοσίας δίνεται ως:

$$P_{DC} = V_{CC} I_{DC} = \frac{V_{CC} I_{max}}{\pi} \Rightarrow$$

$$P_{DC} = 143.23 mW = 21.56 dBm$$

- d) Η απόδοση  $\eta(\%)$  δίνεται από τον τύπο:

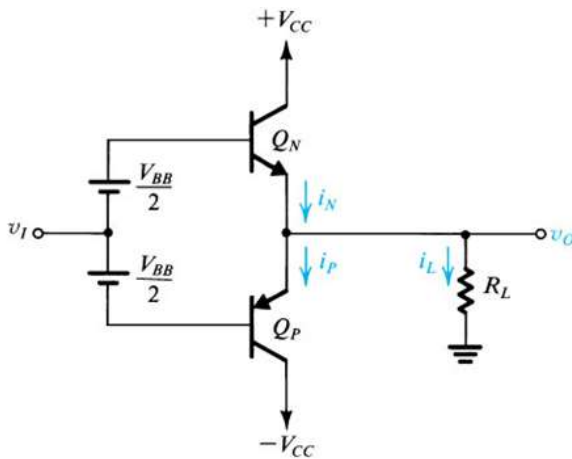
$$\eta = \frac{P_L}{P_{DC}} \cdot 100\%$$

και γίνεται μέγιστη για μέγιστη μέση ισχύ εξόδου:

$$\eta(\%) = \frac{\pi}{4} \cdot 100\% \Rightarrow$$

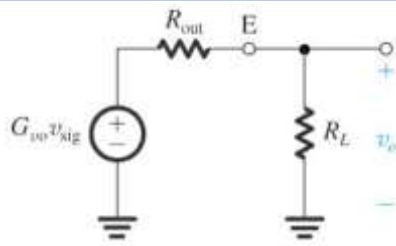
$$\eta(\%) = 78.5\%$$

## Άσκηση 6 (Τάξη AB-Push-Pull)



Δίνεται το κύκλωμα τάξης AB για το οποίο  $V_{CC}=15\text{ V}$ ,  $I_Q=2\text{ mA}$ ,  $I_S=10^{-13}\text{ A}$  και  $R_L=100\Omega$ .

- Βρείτε την τιμή της  $V_{BB}$ .
- Υπολογίστε τις τιμές των  $i_L$ ,  $i_N$ ,  $i_P$ ,  $V_{BEN}$ ,  $V_{EBP}$ ,  $V_I$ ,  $R_{out}$ , κέρδος ισχυρού και κέρδος ασθενούς σήματος για  $v_O=+1\text{ V}$ .
- Πόση είναι η συνολική κατανάλωση ισχύος σε συνθήκες ηρεμίας  $v_I=0\text{ V}$ .



- Κατά την ηρεμία  $v_I = v_O = 0$  και η τάση  $V_{BB}/2$  εμφανίζεται στην ένωση βάσης εκπομπού του κάθε τρανζίστορ. Για τα ρεύματα ισχύει:  $i_N = i_P = I_Q$ . Επομένως: 
$$I_Q = I_S e^{V_{BB}/2V_T} \Leftrightarrow V_{BB} = 2V_T \ln \frac{I_Q}{I_S} \Rightarrow$$

$$V_{BB} = 1.186\text{ V}$$

- Για  $v_O = 1\text{ V}$ : 
$$i_L = \frac{v_O}{R_L} = 10\text{ mA}$$

$$\begin{cases} i_N = i_P + I_L \rightarrow i_N^2 - i_L i_N - I_Q^2 = 0 \\ v_{BEN} + v_{EBP} = V_{BB} \end{cases}$$

$$i_N = 10.39\text{ mA} \text{ και } i_P = 0.39\text{ mA}$$

$$v_{BEN} = 0.634\text{ V} \text{ και } v_{EBP} = 0.552\text{ V}$$

$$v_I = v_O - \frac{V_{BB}}{2} + v_{BEN} = 1.041\text{ V}$$

$$\text{Κέρδος Ισχυρού σήματος } \frac{v_O}{v_I} = 0.96$$

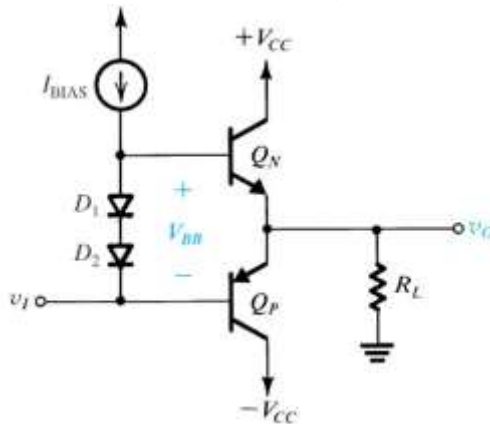
$$R_{out} = r_{eN} || r_{eP} = \frac{V_T}{i_N} || \frac{V_T}{i_P} = \frac{V_T}{i_P + i_N} = 2.32\Omega$$

$$\text{Κέρδος ασθενούς σήματος } \frac{v_o}{v_i} = 0.98$$

- Κατά την ηρεμία  $v_I = v_O = 0$  και το ρεύμα ηρεμίας είναι  $I_Q=2\text{ mA}$ . Επομένως η συνολική κατανάλωση ισχύος στην ηρεμία είναι:

$$P_D = 2V_{CC}I_Q = 60\text{ mW}$$

## Άσκηση 7 (Τάξη AB-Push-Pull)



Δίνεται το κύκλωμα τάξης AB, το οποίο χρησιμοποιεί κύκλωμα πόλωσης με δύο διόδους, οι οποίες έχουν το ίδιο εμβαδόν ένωσης με το τρανζίστορ εξόδου. Για  $V_{CC}=10\text{ V}$ ,  $I_{BIAS}=0.5\text{ mA}$ ,  $R_L=100\ \Omega$ ,  $\beta_N=50$  και  $|V_{CEsat}|=0\text{ V}$ :

- Βρείτε το ρεύμα ηρεμίας.
- Ποια είναι τα μέγιστα θετικά και αρνητικά επίπεδα σήματος εξόδου;
- Ποια τιμή της  $\beta_N$  απαιτείται αν το  $I_{BIAS}$  δεν μεταβάλλεται ώστε να επιτευχθεί μέγιστο θετικό επίπεδο σήματος εξόδου, ίσο με το αρνητικό;
- Ποια τιμή  $I_{BIAS}$  απαιτείται αν το  $\beta_N$  παραμένει σταθερό στο 50; Για την παραπάνω τιμή πόσο γίνεται το  $I_Q$ .

- a) Για το ρεύμα ηρεμίας ισχύει:  $I_Q = nI_{BIAS}$ , όπου  $n$  είναι ο λόγος του εμβαδού ένωσης εκπομπού των τρανζίστορ εξόδου προς το εμβαδόν ένωσης των διόδων πόλωσης. Για ίδιο εμβαδόν  $n=1$ . Επομένως:

$$I_Q = I_{BIAS} = 0.5\text{ mA}$$

- b) Καθώς η τάση εξόδου  $v_O$  αυξάνεται το ρεύμα βάσης αυξάνεται σε περίπου:  $i_L/(\beta_N + 1)$ . Το ρεύμα αυτό παρέχεται από την  $I_{BIAS}$ , επομένως το μέγιστο θετικό επίπεδο τάσης εξόδου υφίσταται όταν όλο το  $I_{BIAS}$  τροφοδοτείται στη βάση του  $Q_N$ :

$$v_{Omax} = (\beta_N + 1)I_{BIAS}R_L \Rightarrow$$

$$v_{Omax} = 2.55\text{ V}$$

Το μέγιστο αρνητικό επίπεδο σήματος εξόδου προσδιορίζεται από τον κορεσμό του  $Q_P$ :

$$v_{Omin} = -V_{CC} + |V_{CEsat}| \Rightarrow$$

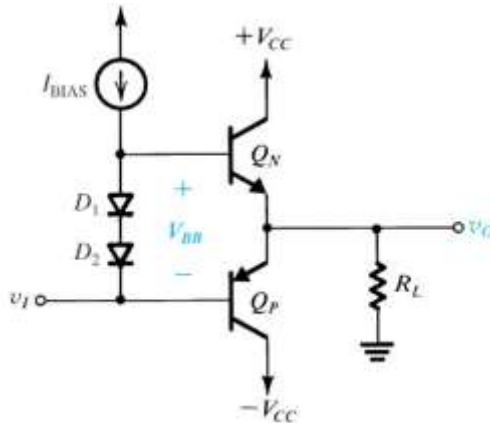
$$v_{Omin} = -10\text{ V}$$

- c) Για να έχουμε  $v_{Omax} = |v_{Omin}| = 10\text{ V}$  θα πρέπει:

$$\beta_N = \frac{v_{Omax}}{I_{BIAS}R_L} - 1 \Rightarrow$$

$$\beta_N = 199$$

## Άσκηση 7 (Τάξη AB-Push-Pull)



Δίνεται το κύκλωμα τάξης AB, το οποίο χρησιμοποιεί κύκλωμα πόλωσης με δύο διόδους, οι οποίες έχουν το ίδιο εμβαδόν ένωσης με το τρανζίστορ εξόδου. Για  $V_{CC}=10\text{ V}$ ,  $I_{BIAS}=0.5\text{ mA}$ ,  $R_L=100\ \Omega$ ,  $\beta_N=50$  και  $|V_{CEsat}|=0\text{ V}$ :

- Βρείτε το ρεύμα ηρεμίας.
- Ποια είναι τα μέγιστα θετικά και αρνητικά επίπεδα σήματος εξόδου;
- Ποια τιμή της  $\beta_N$  απαιτείται αν το  $I_{BIAS}$  δεν μεταβάλλεται ώστε να επιτευχθεί μέγιστο θετικό επίπεδο σήματος εξόδου, ίσο με το αρνητικό;
- Ποια τιμή  $I_{BIAS}$  απαιτείται αν το  $\beta_N$  παραμένει σταθερό στο 50; Για την παραπάνω τιμή πόσο γίνεται το  $I_Q$ .

- d) Για  $\beta_N=50$  και μέγιστη θετική τάση εξόδου (ίση με το αρνητικό μέγιστο):

$$I_{BIAS} = \frac{v_{Omax}}{(\beta_N + 1)R_L} \Rightarrow$$

$$I_{BIAS} = 1.96\text{ mA}$$

Για αυτό το ρεύμα πόλωσης και μέγιστη τάση εξόδου:

$$I_Q = I_{BIAS} - \frac{I_Q}{(\beta_N + 1)} \Rightarrow$$

$$I_Q = \frac{I_{BIAS}}{1 + \frac{1}{\beta + 1}} = 1.92\text{ mA}$$