

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Ο τελικός σκοπός της ενίσχυσης και των υπολοίπων λειτουργιών μιας ηλεκτρονικής συσκευής είναι το να διεγείρει σε σωστή δράση μια τελική διάταξη που αποτελεί το **φόρτο εξόδου**. Αυτός ο φόρτος εξόδου ποικίλλει, ανάλογα με το είδος της συσκευής, και μπορεί να είναι ένα ακουστικό, ένα μεγάφωνο, κάποιος καθοδικός σωλήνας, ένα όργανο μέτρησης ή ένα ηλεκτρομηχανικό στοιχείο ελέγχου.

Ο φόρτος εξόδου, για να λειτουργεί σωστά, θα πρέπει να διεγείρεται από ηλεκτρικό σήμα κατάλληλης μορφής και πλάτους και με επαρκή ηλεκτρική **ισχύ**. Η ισχύς αυτή μπορεί να είναι μικρή, όπως π.χ. στην περίπτωση των ακουστικών, –ή συνηθέστερα μεγάλη– όπως στην περίπτωση των μεγαφώνων ή των ηλεκτρομηχανικών διατάξεων ελέγχου.

Στην περίπτωση που έχουμε μεγάλη απαιτούμενη ισχύ για τη διέγερση του φόρτου εξόδου, οι ενισχυτές χαμηλού σήματος (με μικρή απόδοση ισχύος και χαμηλή παραμόρφωση) που γνωρίσαμε έως τώρα είναι ανεπαρκείς. Έτσι, στην τελική βαθμίδα διέγερσης του φόρτου εξόδου, χρειάζονται ειδικοί ενισχυτές οι οποίοι να ενισχύσουν το **επίπεδο ισχύος** του σήματος εισόδου διατηρώντας συνάμα τη μορφή του. Οι ενισχυτές αυτοί ονομάζονται **ενισχυτές ισχύος**.

Το επίπεδο ισχύος της εξόδου ενός ενισχυτή ισχύος πρέπει να είναι υψηλό *σχετικά* με το επίπεδο ισχύος εξόδου της προηγούμενης βαθμίδας, ενώ η απόλυτη τιμή της εξαγόμενης ισχύος μπορεί να είναι χαμηλή. Η ισχύς αυτή εξαρτάται από το ενεργό στοιχείο (π.χ. το τρανζίστορ) που χρησιμοποιούμε, από τη σχεδίαση του κυκλώματος και από την τάση τροφοδοσίας. Έτσι, μπορούμε εξίσου καλά να έχουμε έναν ενισχυτή ισχύος χρησιμοποιώντας ένα τρανζίστορ των 0.5 W με τροφοδοσία 9 V, όπως και ένα τρανζίστορ των 20 W με τροφοδοσία 15 V.

Κατά κύριο λόγο, η ισχύς εξόδου ενός ενισχυτή ισχύος περιορίζεται από τρεις βασικούς **παράγοντες ισχύος** που χαρακτηρίζουν το τρανζίστορ, δηλ. από τη **μέγιστη** (επιτρεπόμενη) **ισχύ απωλειών**, P_{max} , από τη **μέγιστη τάση συλλέκτη**, V_{Cmax} και από το **μέγιστο ρεύμα συλλέκτη**, I_{Cmax} . Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρώτος παράγων μπορεί να βελτιωθεί, δηλ. η επιτρεπόμενη ισχύς απωλειών να αυξηθεί, αν χρησιμοποιήσουμε στο τρανζίστορ κατάλληλη ψύκτρα ή απαγωγέα θερμότητας και ρυθμιστούν σωστά οι διαστάσεις των πτερυγίων απωλειών θερμότητας του απαγωγέα αυτού.

Λόγω του σχετικά υψηλού επιπέδου ισχύος εξόδου του, ένας ενισχυτής ισχύος πρέπει να έχει υψηλή **απόδοση ισχύος**, $\eta = P_o / P_{dc}$, όπου P_o η ισχύς εξόδου και P_{dc} η ισχύς τροφοδοσίας (dc). Αυτή η επιδίωξη αποτελεί σημαντικό στοιχείο του σχεδιασμού ενός τέτοιου ενισχυτή. Εξ' άλλου, ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που εμφανίζονται σε έναν ενισχυτή ισχύος είναι το πρόβλημα της **παραμόρφωσης** πλάτους, δηλ., όταν ένα καθαρά ημιτονικό σήμα εφαρμοστεί στην είσοδο, η έξοδος δεν είναι καθαρά ημιτονικό σήμα, αλλά αποτελείται από το εισαγόμενο σήμα ενισχυμένο, συν μια σειρά πρόσθετων συνιστωσών με συχνότητες πολλαπλάσιες της εισαγόμενης (αρμονικές συνιστώσες). Η παραμόρφωση αυτή οφείλεται στο ό,τι, λόγω της εκτεταμένης περιοχής λειτουργίας τους, οι παράμετροι των ενισχυτών ισχύος μεταβάλλονται ευρύτατα καθόλο τον κύκλο εναλλαγής του σήματος. Ως εκ τούτου, η μέθοδος επίλυσης ή σχεδιασμού με βάση τα ισοδύναμα κυκλώματα χαμηλού σήματος δεν εφαρμόζεται πλέον και χρησιμοποιείται ανάλυση κατά *Fourier* είτε γραφικές μέθοδοι.

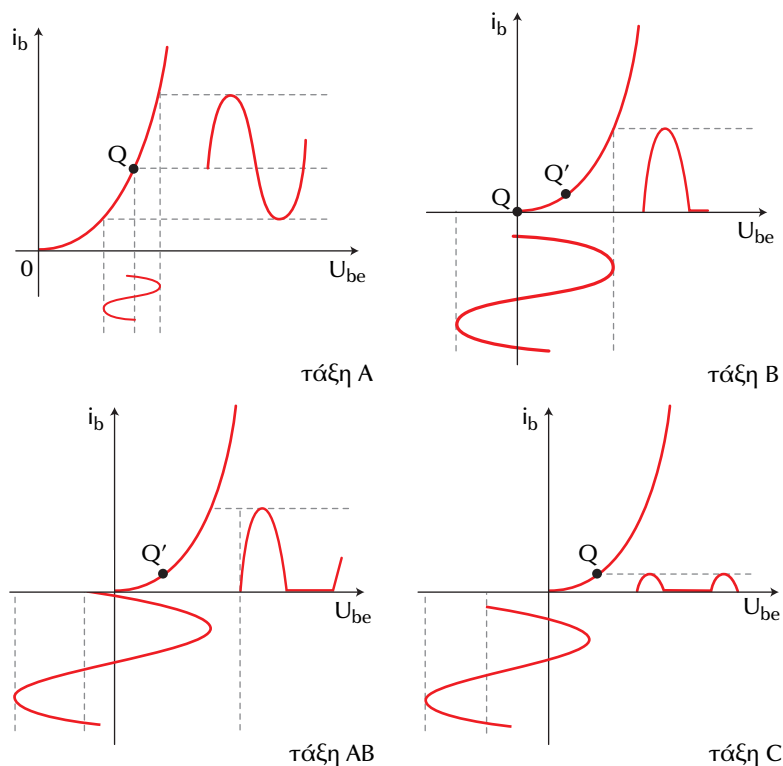
Για την απάλειψη των παραπάνω παραμορφώσεων καταφεύγουμε σε ειδικές τεχνικές, όπως η διαρρύθμιση **push-pull**, που θα δούμε παρακάτω, είτε σε εφοδιασμό του ενισχυτή με κατάλληλα συντονιζόμενα κυκλώματα (βλ. *συντονιζόμενοι ενισχυτές ισχύος* στα Ειδικά Θέματα Ηλεκτρονικών του Γ' έτους).

3.2 Ταξινόμηση των ενισχυτών ισχύος

Με στόχο τη διαφοροποίηση (αύξηση) της απόδοσης η οι ενισχυτές ισχύος λειτουργούν και ταξινομούνται σε *τρεις βασικές κατηγορίες ή τάξεις*, ανάλογα με τον τρόπο πόλωσης του τρανζίστορ. Οι τάξεις αυτές είναι η **τάξη Α**, η **τάξη Β** και η **τάξη C**. Μερικές φορές, όμως, ένας ενισχυτής σχεδιάζεται να λειτουργεί σε κάποια ενδιάμεση τάξη μεταξύ της Α και Β, η οποία ονομάζεται **τάξη AB**.

Στον ενισχυτή τάξης Α, ρεύμα κυκλοφορεί σ' όλη τη διάρκεια του κύκλου εναλλαγής (δηλ. κατά τις 360.) του σήματος εισόδου, όπως δείχνει το Σχ.3.1. Στην τάξη Α το σημείο ηρεμίας λειτουργίας Q βρίσκεται στο μέσο του γραμμικού τμήματος της χαρακτηριστικής εισόδου. Μ' αυτόν τον τρόπο το ac σήμα βάσης-εκπομπού δημιουργεί έναν πλήρη κύκλο του ρεύματος βάσης και επομένως και του ρεύματος συλλέκτη.

Στον ενισχυτή τάξης **B**, το σημείο ηρεμίας λειτουργίας Q είναι στο 0, –σε τέτοια θέση– ώστε το ρεύμα βάσης άρα και συλλέκτη να κυκλοφορεί το μισό (δηλ. στις 180°) του κύκλου εναλλαγής της τάσης εισόδου, όπως δείχνει το Σχ.3.1. Αν, όμως, πολώσουμε τον ενισχυτή στο σημείο Q' , ώστε να αποφύγουμε το ισχυρά μη-γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής εισόδου, έχουμε λειτουργία σε **τάξη AB**. Στην τάξη αυτή, το ρεύμα βάσης-συλλέκτη, κυκλοφορεί σε περισσότερο από 180° και λιγότερο από 360° του κύκλου του σήματος εισόδου.



Σχήμα 3.1. Οι διάφορες τάξεις λειτουργίας ενισχυτών (A, B, AB, C), ανάλογα με την πόλωση του τρανζίστορ

Τέλος, στον ενισχυτή τάξης C το σημείο λειτουργίας είναι σε τέτοια θέση, όπως δείχνει το Σχ.3.1, ώστε το ρεύμα βάσης άρα και του συλλέκτη να κυκλοφορεί λιγότερο από 180° του κύκλου του σήματος εισόδου.

Οι ενισχυτές τάξης A βρίσκουν εφαρμογές στους ενισχυτές τάσης χαμηλού σήματος του προηγούμενου κεφαλαίου και στους ενισχυτές

χαμηλής ισχύος, οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα μόνο ενισχυτή στη βαθμίδα εξόδου.

Στους ενισχυτές τάξης B σπάνια χρησιμοποιείται ένα μόνο τρανζίστορ ιδίως στους ενισχυτές ακουστικών συχνοτήτων, εξαιτίας της αυξημένης παραμόρφωσης που δημιουργείται. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο τρανζίστορ σε συνδεσμολογία push-pull. Με τη συνδεσμολογία αυτή, όπως θα δούμε, αφενός εξαλείφουμε την παραμόρφωση και αφετέρου αυξάνουμε τη μέγιστη ισχύ.

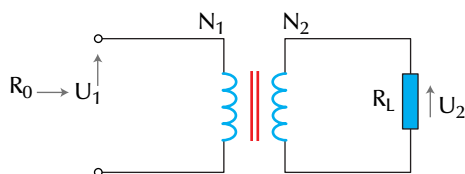
Τέλος, σημειώνουμε, ότι οι ενισχυτές σε τάξη C χρησιμοποιούνται κυρίως στη βαθμίδα εξόδου των πομπών και των δεκτών στην περιοχή των ραδιοφωνικών συχνοτήτων RF. Το φορτίο τους είναι συντονισμένο κύκλωμα για να δίνουν στην έξοδό τους ημιτονικό σήμα χωρίς παραμόρφωση (βλ. Ειδικά Θέματα Ηλεκτρονικών Γ' έτους).

3.3 Προσαρμογή μέσω μετασχηματιστή

Συχνά, ο φόρτος εξόδου που διεγείρουν οι ενισχυτές ισχύος έχει αντίσταση R_L χαμηλής τιμής. Αυτό συμβαίνει π.χ. με τα μεγάφωνα ή τις κεραίες εκπομπής, που έχουν σύνθετη αντίσταση τάξης μεγέθους από 3 Ω έως 30 Ω. Αν συνδέαμε ένα τόσο χαμηλό φορτίο απ' ευθείας στην έξοδο (συλλέκτη) του τρανζίστορ ενός ενισχυτή ισχύος, που έχει σχετικά υψηλή αντίσταση εξόδου, R_{ce} , θα είχαμε σημαντική απόκλιση από την απαίτηση προσαρμογής αντιστάσεων κι έτσι η ισχύς εξόδου του ενισχυτή, που θα μεταφερόταν στο φορτίο, δε θα ήταν αρκετά μεγάλη.

Σύμφωνα με το *θεώρημα της μέγιστης μεταφοράς ισχύος*, για να πετύχουμε **άριστη προσαρμογή**, δηλ. *μέγιστο μεταφοράς ισχύος* από την έξοδο του ενισχυτή ισχύος στο φόρτο εξόδου R_L , θα πρέπει να ισχύει η ισότητα $R_L = R_{ce}$, δηλ. *η αντίσταση φόρ-του να είναι ίση προς την αντίσταση εξόδου του τρανζίστορ*. Επειδή αυτή η ισότητα δεν ισχύει, ούτε κατά προσέγγιση, στην περίπτωση χαμηλών φόρτων, καταφεύγουμε στην παρεμβολή ενός ειδικού μετασχηματιστή (**μετασχηματιστής προσαρμογής**) μεταξύ της εξόδου του τρανζίστορ και του φόρτου εξόδου. Ο μετασχηματιστής αυτός έχει ρυθμιζόμενο ή προσδιοριζόμενο λόγο μετασχηματισμού

$$n = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.3.1)$$



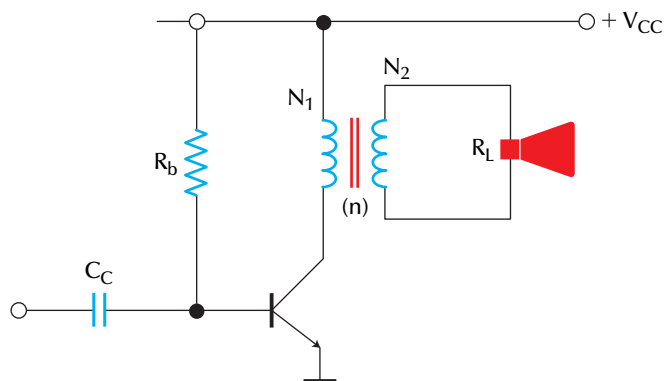
Σχήμα 3.2. Μετασχηματιστής προσαρμογής ενισχυτή ισχύος

Όπου N_1 και N_2 είναι ο αριθμός σπειρών (στροφών) του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, αντίστοιχα. Ο μετασχηματιστής προσαρμογής μεσολαβεί μεταξύ της εξόδου του τρανζίστορ και του φόρτου εξόδου (μεγαφώνου) κατά τον τρόπο που δείχνει το Σχ.3.3.

Αποδεικνύεται ότι, υπό τις παραπάνω συνθήκες, το δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή μπορεί να απαλειφθεί και να αντικατασταθεί από μια ισοδύναμη αντίσταση στο πρωτεύον (**ανακλωμένη αντίσταση**) ίση με

$$R_{\alpha} = \frac{R_L}{n^2}$$

(3.3.2)



Σχήμα 3.3. Συνδεσμολόγηση του μετασχηματιστή προσαρμογής

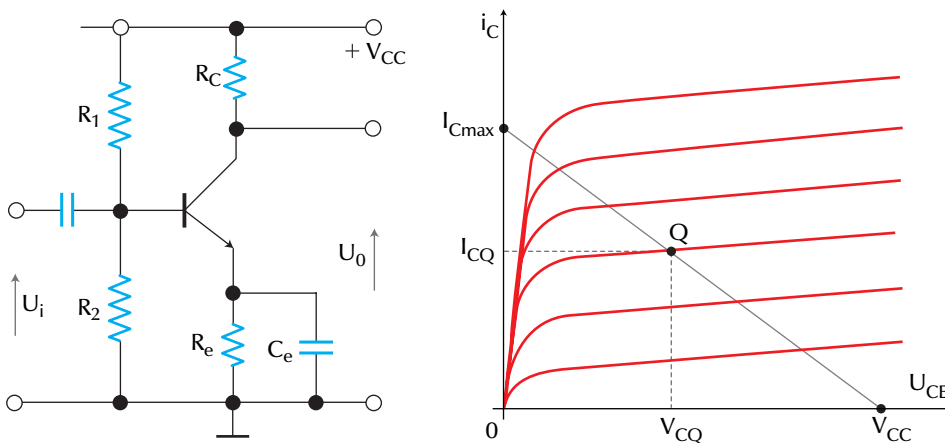
3.4 Ενισχυτής σε τάξη A

3.4.1 Ενισχυτής τάξης A με Ωμικό Φόρτο

Στην παράγραφο αυτή θα καθορίσουμε σε μέγιστες τιμές, την ισχύ εξόδου, την απόδοση ισχύος και την ισχύ απωλειών που χαρακτηρίζουν

έναν ενισχυτή ισχύος με ωμικό φόρτο και άμεση σύζευξη (δηλ. χωρίς μετασχηματιστή) όταν λειτουργεί σε τάξη Α.

Το Σχ.3.4 δείχνει έναν τυπικό ενισχυτή τάξης Α με ωμικό φόρτο και την αντίστοιχη ευθεία φόρτου σχεδιασμένη στο σμήνος εξόδου των χαρακτηριστικών του τρανζίστορ. Από το σχήμα αυτό, με δεδομένη την τάση παροχής τροφοδοσίας V_{CC} , δια-πιστώνουμε ότι η μέγιστη ac τάση από κορυφή σε κορυφή (p-p) που μπορεί να δο-θεί σε ένα ωμικό φόρτο είναι η V_{CC} . Εξάλλου για να έχουμε αυτή την τάση εξόδου ή τάση ηρεμίας πρέπει, $V_{CQ} = V_{CC}/2$. Η ελαχιστοποίηση της R_L μεγιστοποιεί την ισχύ (V_{CQ}^2 / R_L) που αποδίδεται στο φόρτο. Η ελάχιστη όμως δυνατή τιμή της R_L καθορίζεται από το ρεύμα του συλλέκτη, όπως φαίνεται στο Σχ.3.4. Η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή της R_L , που δε δίνει υπερβολικό ρεύμα συλλέκτη, αλλά μια μεγάλη επιτρεπτή τιμή του I_{max} είναι:



Σχήμα 3.3. Ενισχυτής ισχύος σε τάξη Α με ωμικό φόρτο

$$R_L = \frac{V_{CC}}{I_{Cmax}} \quad (3.4.1)$$

Αποδεικνύεται, ότι η ισχύς ac που αποδίδεται στο φόρτο, δίνεται από τη σχέση:

$$P_{ac} = \frac{V_{CC}^2}{8R_L} \quad (3.4.2)$$

ενώ η ισχύς που παρέχεται από την dc τάση τροφοδοσίας V_{cc} είναι:

$$P_{dc} = V_{cc} I_{CQ} \quad (3.4.3)$$

Η **απόδοση ισχύος** η του ενισχυτή ορίζεται από τη σχέση:

$$n_{max} = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} \quad (3.4.4)$$

Αν λάβουμε υπόψη ότι, για άριστη λειτουργία σε τάξη Α, πρέπει να έχουμε $I_{CQ} = I_{Cmax} / 2$, από τις Εξ.(3.4.2)-(3.4.4), η απόδοση του ενισχυτή ισχύος σε τάξη Α, με ωμικό φόρτο είναι:

$$n_{max} = \frac{1}{4} \quad \text{ή} \quad n_{max} = 25\% \quad (3.4.5)$$

Άρα, η άμεση σύζευξη του ωμικού φόρτου στους ενισχυτές ισχύος τάξης Α έχει σαν αποτέλεσμα να δίνουν μικρή απόδοση (25%).

Τέλος, η ισχύς απωλειών στο τρανζίστορ P_T , χωρίς σήμα στην είσοδό του, αποδεικνύεται ότι είναι διπλάσια από τη μέγιστη ισχύ που αποδίδεται στο φόρτο. Δηλ. κατά την Εξ.(3.4.2),

$$P_T = 2P_{ac} = \frac{V_{cc}^2}{4R_L} \quad (3.4.6)$$

⇒ Παράδειγμα 3-1

Να προσδιορισθούν τα στοιχεία ενός τρανζίστορ ισχύος το οποίο, όταν τροφοδοτείται με τάση 12 V και έχει φόρτο 10 Ω, να είναι κατάλληλο για ενισχυτή ισχύος τάξης Α με μέγιστη απόδοση.

Λύση

Η μέγιστη ισχύς που αποδίδεται στο φόρτο δίνεται από την Εξ.(3.4.6),

$$P_{ac} = \frac{V_{cc}^2}{8R_L} = \frac{12^2}{8 \times 10} = \frac{144}{80} = 1,8W$$

Όπως είδαμε, χωρίς σήμα το τρανζίστορ καταναλώνει ισχύ P_T διπλάσια της P_{ac} , επομένως $P_T = 3.6 W$. Εξ' άλλου, βάση της Εξ.(3.4.1), το μέγιστο ρεύμα συλλέκτη είναι:

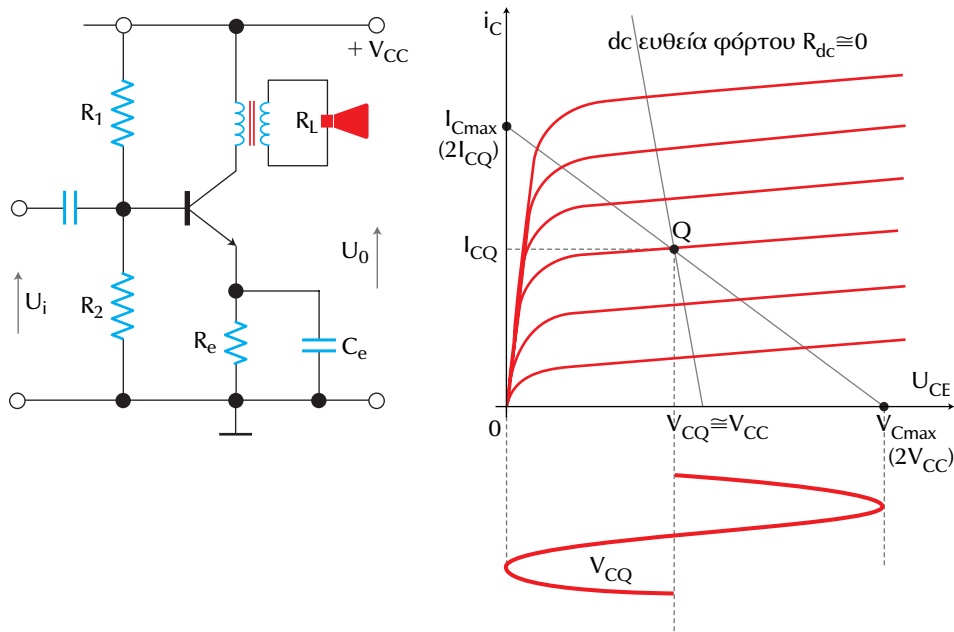
$$I_{Cmax} = \frac{V_{cc}}{R_L} = \frac{12}{10} = 1.2 A$$

Επομένως, το τρανζίστορ πρέπει να επιδέχεται ρεύμα συλλέκτη τουλάχιστον 1.2 A και να είναι ισχύος 3.6 W.

3.4.2 Ενισχυτής Τάξης A με Μετασχηματιστή

Όπως είδαμε - για λόγους προσαρμογής αντιστάσεων - χρειάζεται να είναι μερικές φορές η σύζευξη της εξόδου ενός ενισχυτή ισχύος προς το φορτίο μέσω ενός μετασχηματιστή. Λόγω αυτού, οι συνθήκες λειτουργίας τροποποιούνται όπως θα δούμε παρακάτω.

Ο ενισχυτής σε τάξη A έχει ισχύ εξόδου σχετικά χαμηλή και μεγάλο ρεύμα ηρεμίας. Κατά τη σχεδίαση ενός τέτοιου ενισχυτή βασική επιδίωξη είναι να εξασφαλίσουμε τη μέγιστη δυνατή ισχύ εξόδου. Για να έχουμε μέγιστη ισχύ εξόδου, το σημείο ηρεμίας (λειτουργίας) Q θα πρέπει να βρίσκεται πάνω στην καμπύλη υπερβολής της μέγιστης ισχύος του τρανζίστορ. Υπό αυτές τις συνθήκες μορφοποιούνται δύο ευθείες φόρτου, η dc και η ac ευθεία φόρτου. Η dc ευθεία φόρτου, που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή, είναι σχεδόν κατακόρυφη, επειδή το πηνίο έχει ωμική αντίσταση πολύ μικρή (μερικά Ohm). Άρα $V_{CQ} = V_{CC}$. Η ac ευθεία φόρτου, που αντιστοιχεί στην ανακλώμενη αντίσταση ($R_{ac} = R_L / n^2$), πρέπει να έχει τέτοια τιμή ώστε να μην υπερβούμε τη μέγιστη ισχύ απωλειών του τρανζίστορ.



Σχήμα 3.5. Ενισχυτής τάξης A με μετασχηματιστή και ευθείες φόρτου αυτού

Στα παρακάτω δεχόμαστε ότι οι χαρακτηριστικές του τρανζίστορ είναι γραμμικές και ότι η ac τάση και το ac ρεύμα, άρα και της εξόδου, μπορούν να μεταβάλλονται από το μηδέν μέχρι τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές τους. Αν υποθέσουμε ότι ο μετασχηματιστής εξόδου είναι χωρίς απώλειες, η ισχύς εξόδου είναι:

$$P = V_{C(rms)} I_{C(rms)} = \left(\frac{V_{CO}}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{I_{CO}}{\sqrt{2}} \right) = \frac{V_{CO} I_{CO}}{2} \quad (3.4.7)$$

όπου V_{CO} και I_{CO} τα πλάτη, ac διακύμανσης της τάσης και του ρεύματος συλλέκτη, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Σχ.3.5, για άριστη πόλωση σε τάξη Α (μέσο Q της ac ευθείας φόρτου), οι μέγιστες δυνατές τιμές των ac πλατών, χωρίς να έχουμε παραμόρφωση, είναι $V_{CO} = V_{CQ} \equiv V_{CC}$ και $I_{CO} = I_{CQ}$. Συνεπώς, βάσει της Εξ.(3.4.7), η μέγιστη ισχύς εξόδου (ac) του ενισχυτή είναι:

$$P_{ac} = \frac{V_{CQ}}{2} \quad (3.4.8)$$

Η αντίστοιχη ισχύς τροφοδοσίας που χορηγείται από την πηγή dc είναι:

$$P_{dc} = V_{CC} I_{CQ} \equiv V_{CQ} I_{CQ} \quad (3.4.9)$$

Η απόδοση είναι:

$$n_{max} = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} = \frac{1}{2} \text{ ή } n_{max} = 50\% \quad (3.4.10)$$

Όταν το σήμα εισόδου είναι μηδέν, η ισχύς που παρέχεται από την τροφοδοσία θα εξακολουθεί να είναι πάλι $V_{CQ} I_{CQ}$. Η ισχύς αυτή θα πρέπει τώρα να καταναλώνεται εξ' ολοκλήρου, ως ισχύς απωλειών από το τρανζίστορ. Άρα, εκφράζει την ισχύ αντοχής αυτού. Συνεπώς, για να επιτύχουμε ενίσχυση ισχύος σε τάξη Α στο επίπεδο εξόδου, π.χ. 1 W, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τρανζίστορ που να αντέχει ισχύ απωλειών 2 W.

Η ωμική αντίσταση ac φόρτου δίνεται από τη σχέση:

$$R_{\alpha} = \frac{V_{CQ}^2}{2P_{ac}} \quad (3.4.11)$$

Το τρανζίστορ που θα χρησιμοποιήσουμε θα έχει μέγιστη επιτρεπόμενη τάση συλλέκτη

$$V_{Cmax} = 2V_{CC} \quad (3.4.12)$$

Βάσει των Εξ. (3.4.1) και (3.4.2) ο πραγματικός φόρτος (π.χ. μεγάφωνο) έχει ωμική αντίσταση R_L , ο λόγος των σπειρών του μετασχηματιστή είναι:

$$n = \frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{R_L}{R}} \quad (3.4.13)$$

⇒ Παράδειγμα 3-2

Να επιλεγεί το τρανζίστορ ισχύος και ο μετασχηματιστής εξόδου για ενισχυτή ισχύος τάξης Α, αν η ισχύς ac εξόδου είναι 1 W και ο φόρτος εξόδου $R_L = 4 \Omega$ για τάση τροφοδοσίας $V_{CC} = 12 V$.

Λύση

Το τρανζίστορ πρέπει να έχει μέγιστη ισχύ απωλειών $2 \times 1 W = 2 W$.

$$R_{\alpha} = \frac{V_{CQ}^2}{2P_{ac}} = \frac{12^2}{2 \times 1} = \frac{144}{2} = 72 \Omega$$

$$V_{Cmax} = 2V_{CQ} = 2V_{CC} = 24 V$$

$$I_{Cmax} = \frac{2V_{CC}}{R_L} = \frac{24}{4} = 6 A$$

Άρα, το τρανζίστορ πρέπει να έχει μέγιστο ρεύμα 6 A και κατανάλωση ισχύος απωλειών 2 W.

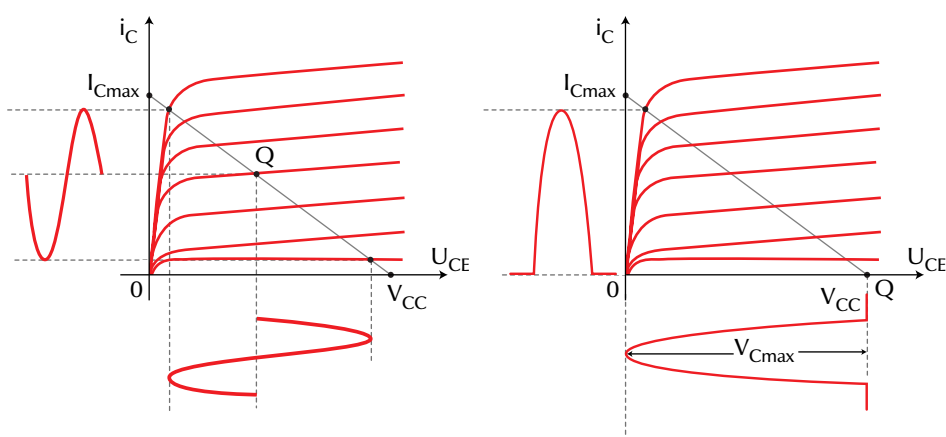
Ο λόγος σπειρών του μετασχηματιστή θα είναι, Εξ. (3.4.13)

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R}} = \sqrt{\frac{4}{72}} \cong 0.24 \text{ άρα } n = \frac{N_2}{N_1} \cong 1 : 5$$

3.5 Ενισχυτής τάξης B

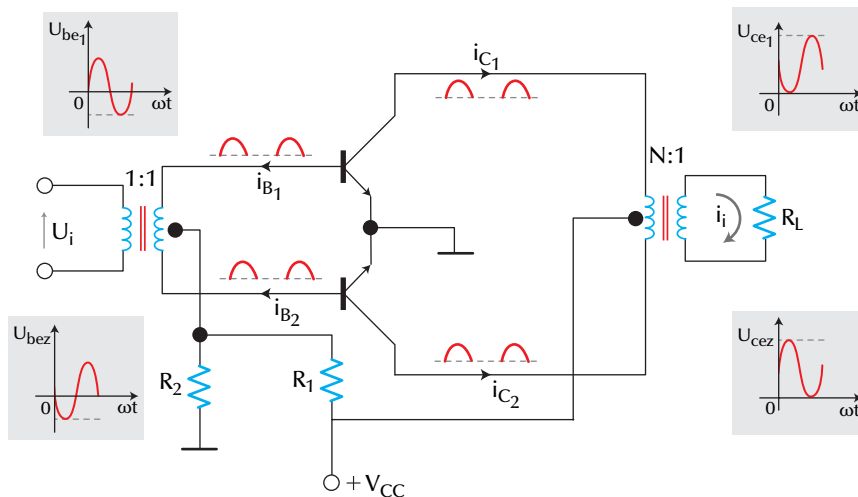
Η μικρή απόδοση των ενισχυτών τάξης A είναι σοβαρό πρόβλημα στα συστήματα που έχουν μεγάλη ισχύ. Έτσι, οι μεγάλοι πομποί εκπέμπουν ισχύ αρκετών kW και, συνεπώς, αν η απόδοση ισχύος τους είναι μικρή το κόστος λειτουργίας τους θα είναι μεγάλο. Επίσης και το αρχικό κόστος κατασκευής των πομπών αυτών θα είναι μεγάλο, εφόσον χρειάζονται πιο ακριβά και υψηλής ισχύος στοιχεία κατασκευής και εξαρτήματα.

Ένα μεγάλο μέρος της ισχύος απωλειών των ενισχυτών οφείλεται στην ισχύ απωλειών στο συλλέκτη. Συνεπώς, μπορούμε να έχουμε αξιοσημείωτη βελτίωση της απόδοσης αν ελαττωθεί αυτή η ισχύς απωλειών. Επειδή η ισχύς είναι ίση με το γινόμενο του ρεύματος επί την τάση, η ισχύς απωλειών στο συλλέκτη θα είναι ανάλογη της τάσης και του ρεύματος συλλέκτη. Επομένως, αν μπορέσουμε να περιορίσουμε τη δράση του ρεύματος συλλέκτη αναγκάζοντάς το να κυκλοφορεί μόνο κατά τη διάρκεια που η τάση συλλέκτη είναι στο χαμηλότερο της κορυφής τότε θα έχουμε σημαντικό υποβιβασμό των απωλειών. Αυτό μπορεί να γίνει πολώνοντας τον ενισχυτή σε “αποκοπή”, δηλ. κάνοντας τον ενισχυτή μη αγωγίμο για μηδενικό σήμα στην είσοδο. Για ημιτονικό σήμα εισόδου το τρανζίστορ άγει μόνο κατά το μισό του σήματος εισόδου. Κατά τη διάρκεια του άλλου μισού το τρανζίστορ είναι σε αποκοπή και δεν άγει, δηλ. λειτουργεί σε τάξη B. Το Σχ.3.6 δείχνει την κυματομορφή για λειτουργία σε τάξη B σε σύγκριση με την τάξη A.



Σχήμα 3.6. Σημεία λειτουργίας Q ενισχυτών σε τάξη A και B και κυματομορφές εξόδου για ένα κύκλο του σήματος εισόδου

Ενώ στην τάξη A το ρεύμα συλλέκτη κυκλοφορεί κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου του σήματος εισόδου, στην τάξη B το ρεύμα συλλέκτη υπάρχει και κυκλοφορεί κατά τη διάρκεια του μισού κύκλου του σήματος εισόδου. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ισχυρή παραμόρφωση του σήματος εξόδου. Για τις περισσότερες περιπτώσεις η παραμόρφωση αυτή δεν είναι αποδεκτή. Δύο τέτοιοι, όμως, ενισχυτές (τάξης B) μπορούν να συνεργασθούν ώστε να δώσουν στην έξοδο κανονική κυματομορφή χωρίς παραμόρφωση. Το Σχ.3.7 δείχνει έναν τέτοιο ενισχυτή ο οποίος ονομάζεται **ενισχυτής push-pull** σε τάξη B (με μετασχηματιστή). Η βασική απαίτηση για τον ενισχυτή αυτόν είναι τα δυο τρανζίστορ να έχουν το ίδιο ρεύμα, έτσι ώστε να ενισχύονται εξίσου τα δυο μισά κάθε κύκλου των κυματομορφών.



Σχήμα 3.7. Ενισχυτής push-pull τάξης B

3.5.1 Ενισχυτής Push-Pull

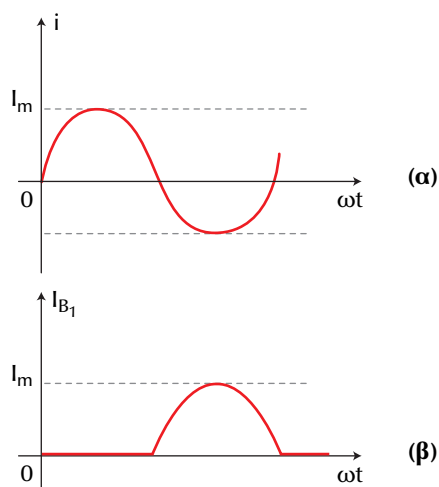
Θα γίνει τώρα μια μικρή περιγραφή της λειτουργίας του ενισχυτή push-pull, με τη βοήθεια των κυματομορφών στα διάφορα σημεία αυτού, όπως εικονίζονται στο Σχ.3.8, υποθέτοντας ιδανικά στοιχεία και ιδανικές συνθήκες. Στην είσοδο του όλου ενισχυτή υποθέτουμε ένα σήμα εισόδου εκφραζόμενο από ένα ημιτονικό ρεύμα εισόδου πλάτους I_0 ήτοι στο

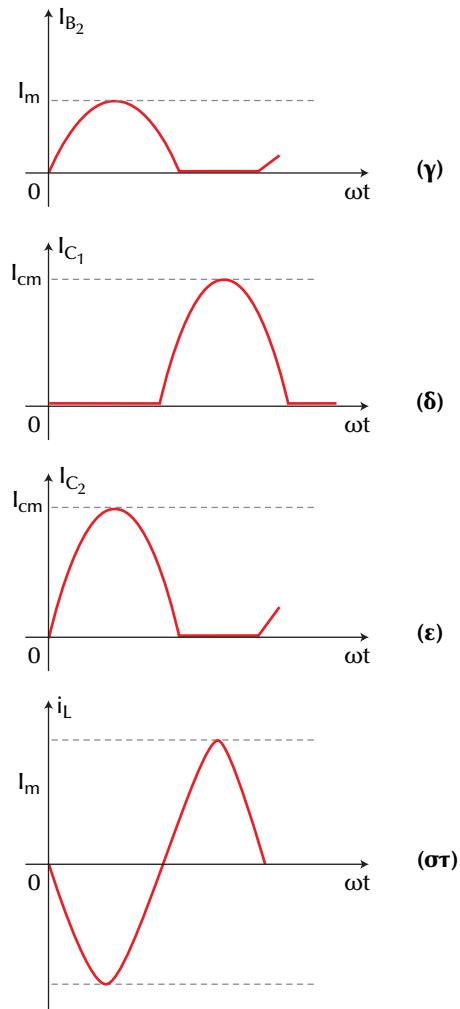
πρωτεύον του μετασχηματιστή εισόδου θα έχουμε ένα ρεύμα, όπως αυτό που δείχνει το Σχ.3.8 α, με στιγμιαία τιμή

$$i = I_m \sin \omega t \quad (3.5.1)$$

Ο μετασχηματιστής εισόδου έχει λόγο σπειρών 1:1 και μεσαία λήψη (ακριβώς στο μέσο του δευτερεύοντος). Συνεπώς, θα αποστέλλει στις βάσεις των δυο τρανζίστορ, T_1 , T_2 , δυο ρεύματα ίδιου πλάτους, I_m , αλλά ευρισκόμενα σε αντίθεση φάσης (δηλ. διαφορά φάσης 180°). Στο πρώτο μισό του κύκλου εναλλαγής του σήματος εισόδου, το τρανζίστορ T_1 πολώνεται από το σήμα αυτό σε κατάσταση αποκοπής, άρα δεν άγει, κι έτσι τόσο το ρεύμα βάσης του, i_{B1} , όσο και το ρεύμα συλλέκτη του, i_{C1} , είναι μηδενικά (Σχ.3.8 β,δ). Στο ίδιο διάστημα, το άλλο τρανζίστορ, T_2 , άγει, πολωμένο στην ενεργό περιοχή, κι έτσι τα ρεύματα βάσης και συλλέκτη του, i_{B2} και i_{C2} , θα παρακολουθούν το σήμα εισόδου, όπως δείχνουν το Σχ.3.8 γ και ε.

Όπως φαίνεται στο Σχ.3.7 τα δύο ρεύματα I_{C1} και I_{C2} (στιγμιαίες τιμές) οδηγούνται στη μεσαία λήψη του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή εξόδου διαρρέοντάς το με αντίθετες φορές, άρα θα επάγουν στο δευτερεύον τάσεις εξ' επαγωγής αντίθετης πολικότητας και συνεπώς ρεύματα φόρτου αντίθετης φοράς. Έτσι, αν η είναι ο λόγος σπειρών του μετασχηματιστή εξόδου, το συνιστάμενο ρεύμα στο φόρτο θα είναι





Σχήμα 3.8. Κυματομορφές στα διάφορα σημεία του ενισχυτή *push-pull* και αντιστοίχιση αυτών

$$i_L = n(i_{C1} - i_{C2})$$

(3.5.2)

Αυτή η σχέση επαληθεύεται και από τη γραφική αφαίρεση των κυματομορφών των Σχ.3.8 δ και ε, πράγμα που οδηγεί στην κυματομορφή του ρεύματος φόρτου του Σχ.3.8 στ.

Τα παραπάνω ισχύουν υπό ιδανικές προϋποθέσεις. Στην πράξη ωστόσο, στα ση-μεία όπου οι κυματομορφές διασταυρώνονται με τον

οριζόντιο άξονα χρόνου (0, 0', 0'', ...) εμφανίζεται ισχυρή τοπική παραμόρφωση, που ονομάζεται **παραμόρφωση διασταύρωσης** και οφείλεται στο ότι οι χαρακτηριστικές των τρανζίστορ δεν είναι γραμμικές κοντά στο μηδέν. Για να περιοριστεί αυτή η παραμόρφωση, τα τρανζίστορ του ενισχυτή push-pull δεν πολώνονται ακριβώς σε τάξη B αλλά ελαφρά δεξιότερα, δηλ σε **τάξη AB**. Επειδή όμως, αυτή η απόκλιση είναι μικρή (περί τα 0.65 V), γι' αυτό οι ενισχυτές αυτοί θεωρούνται κατά προσέγγιση πολωμένοι σε τάξη B.

Ισχύς σε τάξη B

Η ισχύς (ac) εξόδου εξακολουθεί να δίνεται από την Εξ.(3.4.6) η οποία ισχύει ανεξάρτητα από την τάξη λειτουργίας. Στην περίπτωση όμως της τάξης B, σύμφωνα με το Σχ.3.8 β, η μέγιστη δυνατή τιμή πλάτους της τάσης συλλέκτη (ac διακύμανση), θα εί-ναι $V_{co} = V_{cc}$. Άρα, κατά την Εξ.(3.4.6), η μέγιστη ισχύς εξόδου θα δίνεται από την έκφραση

$$P_{ac} = \frac{V_{cc}I_{co}}{2} \quad (3.5.3)$$

Εξ' άλλου, αποδεικνύεται ότι, σε τάξη B, η dc ισχύς που παρέχεται από την πηγή τροφοδοσίας σε κάθε συλλέκτη δίνεται από τη σχέση

$$P_{dc} = \frac{2V_{cc}I_{co}}{\pi} \quad (3.5.4)$$

Άρα, η μέγιστη απόδοση ενός ενισχυτή σε τάξη B θα είναι

$$\eta_{max} = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} = \frac{\pi}{4} = 78.5\% \quad (3.5.5)$$

Η σχέση αυτή παρέχει την απόδοση σε τάξη B είτε για κανονικό ενισχυτή ισχύος είτε για ενισχυτή ισχύος push-pull.

Τέλος, αποδεικνύεται ότι η μέγιστη τιμή της ισχύος που αποδίδεται στο φορτίο R_L δίνεται από τον τύπο

$$P_{L,max} = \frac{V_{cc}^2}{2R_L} \quad (3.5.6)$$

όπου $R_L = N^2 R_l$ η αντίσταση R_l ανηγμένη (ως ανακλώμενη αντίσταση) στο

πρωτεύον του μετασχηματιστή εξόδου (βλ. Σχ.3.5 β). Με βάση τις σχέσεις αυτές μπορεί να υπολογισθεί η αντίσταση φόρτου η απαιτούμενη για δεδομένη ισχύ $P_{L,max}$.

Είναι χρήσιμο να κλείσουμε αυτή την παράγραφο παραθέτοντας συγκεντρωτικά τα **πλεονεκτήματα της ενίσχυσης ισχύος σε τάξη B**, που είναι τα εξής:

- Κατ' αρχήν, όπως φαίνεται από σύγκριση των Εξ.(3.4.5) και (3.5.5), η λειτουργία σε τάξη B εξασφαλίζει (μέγιστη) απόδοση ισχύος μέχρι και 78.5%, άρα κατά πολύ μεγαλύτερη από τη μέγιστη απόδοση ισχύος που επιτρέπει η τάξη A με ωμικό φόρτο, η οποία δεν υπερβαίνει το 25%.
- Η κατανάλωση ισχύος ενός τρανζίστορ που χρησιμοποιείται σε τάξη B είναι σημαντικά μικρότερη από όση στην τάξη A.
- Η τάξη B καλύπτει την ενίσχυση μεγάλων ισχύων, ενώ η τάξη A είναι εφαρμόσιμη μόνο για τις χαμηλές και τις μέσες ισχύεις.

Επιπλέον, **η χρήση της τάξης B σε συνδεσμολογία push-pull** προσθέτει τα εξής πλεονεκτήματα:

- α) Επειδή τα δύο ρεύματα ηρεμίας-λειτουργίας στους συλλέκτες των τρανζίστορ κυκλοφορούν με αντίθετες διευθύνσεις ροής, αναιρούνται μεταξύ τους κι έτσι στο μετασχηματιστή εξόδου δεν κυκλοφορεί στον πυρήνα του μαγνητικό ρεύμα κόρου, άρα βελτιώνονται οι επιδόσεις του.
- β) Στο ac ρεύμα εξόδου δεν υπάρχουν συνιστώσες λόγω 2ης αρμονικής, γιατί οι συνιστώσες αυτές έχουν αντίθετες διευθύνσεις ροής και έτσι τα αντίστοιχα ρεύματα αλληλο-εξουδετερώνονται.
- γ) Τα ρεύματα ηρεμίας βάσης και συλλέκτη και στα δυο τρανζίστορ είναι μικρά.

⇒ Παράδειγμα 3-3

Ο ενισχυτής push-pull του Σχ.3.7 χρησιμοποιεί τάση τροφοδοσίας 15 V και μετασχηματιστή εξόδου με πρωτεύον 100 σπειρών και δευτερεύον 20 σπειρών. Πόση είναι η μέγιστη τιμή της ισχύος που αποδίδεται στο φόρτο, αν αυτός είναι μεγάλφωνο 8 Ω και πόσο πλάτος ac ρεύματος πρέ-

πρέπει να υπάρχει στο συλλέκτη κάθε τρανζίστορ για να λαμβάνεται η παραπάνω ισχύς ως (μέγιστη) ισχύς εξόδου.

Λύση

Ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή εξόδου είναι $n=20:100=1:5$, άρα σε 1 σπείρα δευτερεύοντος αντιστοιχούν $N=5$ σπείρες πρωτεύοντος. Άρα, με βάση την Εξ.(3.5.6) η μέγιστη ισχύς εξόδου που θα αποδίδεται στο φόρτο $R_L=8\ \Omega$ του μεγα-φώνου είναι:

$$P_{L,max} = \frac{V_{CC}^2}{2(N^2 R_L)} = \frac{15^2}{2 \times 5^2 \times 8} = \frac{225}{400} = 0.56\text{ W}$$

Το ζητούμενο πλάτος I_{CO} λαμβάνεται αν λύσουμε την Εξ.(3.5.3), οπότε έχουμε:

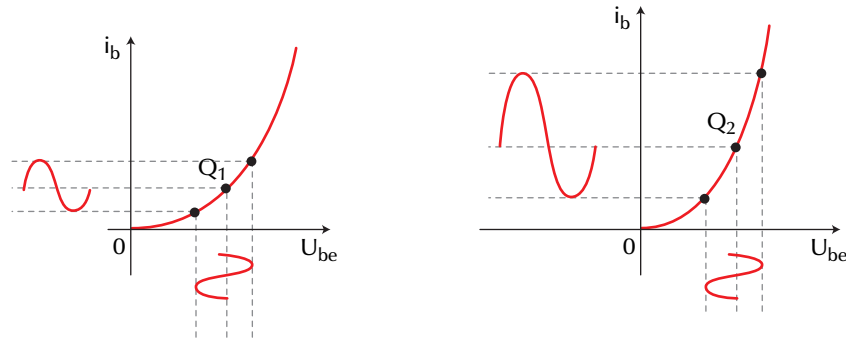
$$I_{CO} = \frac{2P_{CC}}{V_{CC}} = \frac{2 \times 0.56}{15} = \frac{1.12}{15} = 74.7\text{ mA}$$

3.6 Παραμορφώσεις

Όπως είδαμε, με το πέρασμα από την τάξη Α στη Β, οι ενισχυτές ισχύος ανεβάζουν την απόδοσή τους. Αυτό όμως, αν δεν πάρουμε τα κατάλληλα μέτρα, γίνεται με θυσία της μορφής του σήματος. Έτσι το θέμα των παραμορφώσεων αποκτά μεγάλη σημασία.

Οι παραμορφώσεις στους ενισχυτές οφείλονται στη *μη γραμμικότητα των χαρακτηριστικών εισόδου και εξόδου*. Το Σχ.3.9 δείχνει τη χαρακτηριστική εισόδου ενός τρανζίστορ σε συνδεσμολογία CE. Όπως βλέπουμε η χαρακτηριστική είναι ιδιαίτερα καμπυλόγραμμη στο κάτω μέρος της.

Όταν λοιπόν στην είσοδο εφαρμοστεί σήμα $v_{be} = V \sin \omega t$, η κυματομορφή ρεύματος που προκύπτει είναι περισσότερο συμπιεσμένη προς την αρνητική (κάτω) κορυφή, Σχ.3-9 α, παρά όταν το σημείο πόλωσης βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο (Q_2), Σχ.3.9 β. Επίσης, στο χαμηλότερο σημείο πόλωσης επειδή το σήμα είναι μικρότερο.



Σχήμα 3.9. Χαρακτηριστική εισόδου CE

Όταν ένα ημιτονικό σήμα παραμορφωθεί, αποδεικνύεται μαθηματικά, (με ανάλυση κατά *Fourier*), ότι δημιουργούνται επιπρόσθετα ημιτονικά σήματα. Οι συχνότητες των ημιτονικών αυτών σημάτων “παραμόρφωσης”, είναι ακέραια πολλαπλάσια του αρχικού σήματος. Δηλ., αν f είναι η αρχική συχνότητα, δημιουργούνται επιπλέον οι συχνότητες $2f$, $3f$, $4f$, κτλ. Η αρχική συχνότητα ονομάζεται **βασική ή θεμελιώδης συχνότητα**, ενώ οι πολλαπλάσιές της συχνότητες, ονομάζονται **αρμονικές**. Ειδικότερα, η $2f$ ονομάζεται *δεύτερη αρμονική*, η $3f$ *τρίτη αρμονική*, κ.ο.κ.

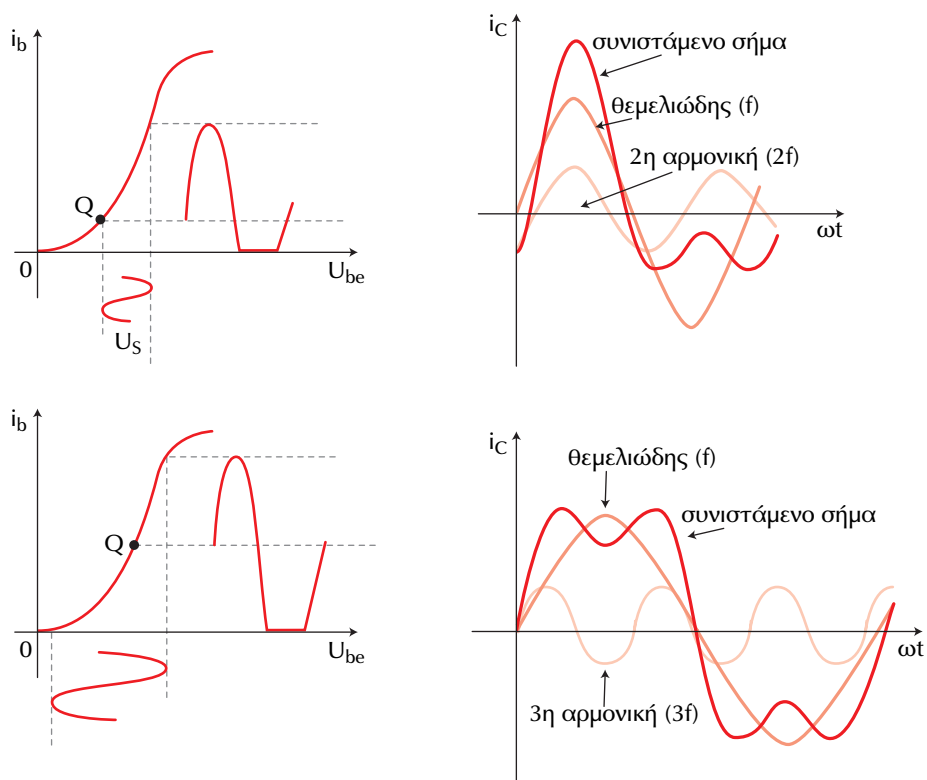
Οι διάφορες αρμονικές συνιστώσες που περιέχονται σ’ ένα σήμα μπορούν να εντοπισθούν και να μετρηθούν χρησιμοποιώντας συντονισμένα φίλτρα στενής ζώνης. Το φίλτρο συντονίζει σε μια δεδομένη αρμονική και το σήμα εξόδου του έχει την ίδια συχνότητα. Αν η ενίσχυση του φίλτρου είναι μονάδα, το πλάτος της εξόδου του αποτελεί το πλάτος της δεδομένης αρμονικής.

Υπάρχουν εμπορικές συσκευές (φασματικοί αναλυτές) που χρησιμοποιούν την τεχνική αυτή για να μετρούν την παραμόρφωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι μικρότερες σε συχνότητα αρμονικές έχουν μεγαλύτερο πλάτος, με αποτέλεσμα η μέτρηση και η ανάλυση της παραμόρφωσης να επικεντρώνεται μόνο στη 2η και 3η αρμονική.

Το Σχ.3.10 δείχνει ένα ημιτονικό σήμα v_s που εφαρμόζεται, κατά σειρά, σε δυο κυκλώματα που έχουν μη γραμμικές χαρακτηριστικές ή καμπύλες μεταφοράς. Το ρεύμα εξόδου σε κάθε περίπτωση μπορεί να σχεδιαστεί γραφικά για δεδομένη καμπύλη μεταφοράς. Στο Σχ.3.10 α το σημείο λειτουργίας Q και το πλάτος του σήματος είναι τέτοια ώστε το

σήμα να απασχολεί μόνο το κάτω τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης. Αποτέλεσμα είναι ότι το σήμα συμπιέζεται στο κάτω μέρος του. Αν όμως συμπεριλαμβάνονται και τα δύο (άνω και κάτω) καμπύλα τμήματα της χαρακτηριστικής, το σήμα συμπιέζεται και στις δυο κορυφές του.

Στο ίδιο σχήμα εικονίζονται και τα σήματα εξόδου. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει έντονα η 2η αρμονική συνιστώσα με αποτέλεσμα το σήμα εξόδου να έχει τη μορφή του συνιστάμενου σήματος που δείχνει το σχήμα. Η αντίστοιχη παραμόρφωση ονομάζεται **παραμόρφωση άρτιας αρμονικής**. Στη 2η περίπτωση στην έξοδο εμφανίζεται με μεγάλο πλάτος η 3η αρμονική με αποτέλεσμα το συνιστάμενο σήμα να έχει τη μορφή που δείχνει το σχήμα. Αυτό το σχήμα παραμόρφωσης ονομάζεται **παραμόρφωση περιττής αρμονικής**.

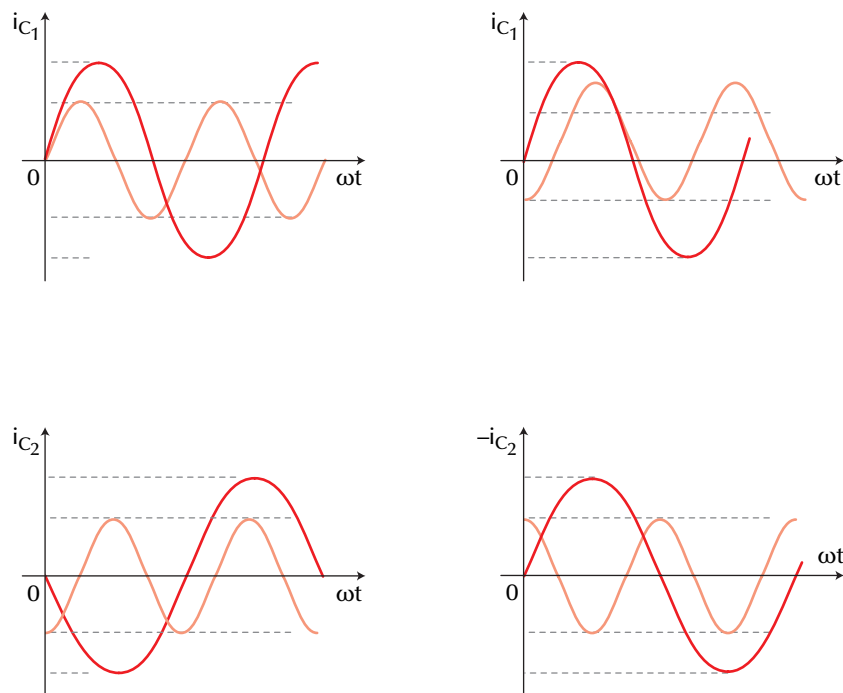


Σχήμα 3.10. Παραμόρφωση 2ης και 3ης αρμονικής

3.7 Παραμόρφωση στους ενισχυτές push-pull

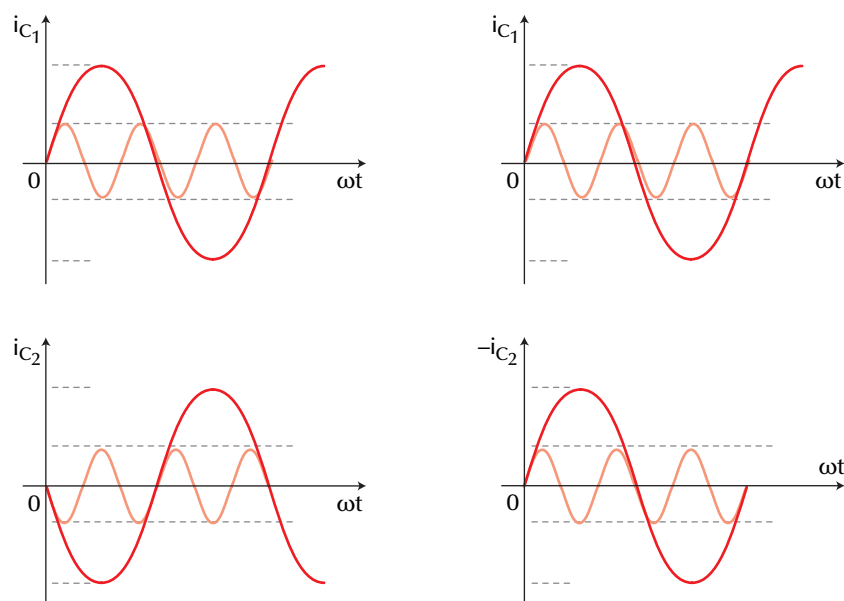
Όταν πολώνεται σε τάξη Α, ο ενισχυτής push-pull έχει το ιδίωμα ότι τείνει να εξουδετερώσει την παραμόρφωση των περιττών αρμονικών. Αυτό οφείλεται στο ότι τα δύο τρανζίστορ λειτουργούν με διαφορά φάσης 180° , ώστε όταν στο ένα τρανζίστορ το σήμα είναι στη μέγιστη θετική του τιμή στο άλλο είναι στη μέγιστη αρνητική του. Το Σχ.3.11 δείχνει μόνο τη δεύτερη αρμονική. Αφού το i_{c2} αφαιρείται από το i_{c1} , όπως είδαμε ότι συμβαίνει στην έξοδο του push-pull, οι **αρμονικές** που φαίνονται στο σχήμα αλληλο-εξουδετερώνονται, ενώ οι θεμελιώδεις συνιστώσες (που έχουν βασική συχνότητα) προστίθενται.

Η εξουδετέρωση αυτή γίνεται μόνο για τις άρτιες αρμονικές, όχι όμως και για τις περιττές αρμονικές. Το Σχ.3.12 δείχνει, γιατί δεν εξουδετερώνονται οι περιττές αρμονικές, οι οποίες είναι προσθετικές μεταξύ τους όπως και οι θεμελιώδεις συνιστώσες.



Σχήμα 3.11. Επίδραση της διαφοράς φάσης 180° στις άρτιες αρμονικές της εξόδου του push-pull

Η εξουδετέρωση των άρτιων αρμονικών αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των ενισχυτών push-pull τάξης A σε σύγκριση με τους ενισχυτές ενός τρανζίστορ. Η βελτίωση όμως αυτή επιτυγχάνεται ολοκληρωτικά, μόνο αν τα δυο τρανζίστορ του push-pull έχουν τις ίδιες χαρακτηριστικές. Αν οι χαρακτηριστικές τους δεν είναι ακριβώς ίδιες, η εξουδετέρωση δεν είναι πλήρης και απομένει κάποια παραμόρφωση στην έξοδο.



Σχήμα 3.12. Εμφάνιση της διαφοράς φάσης 0° στις περιττές αρμονικές της εξόδου του push-pull

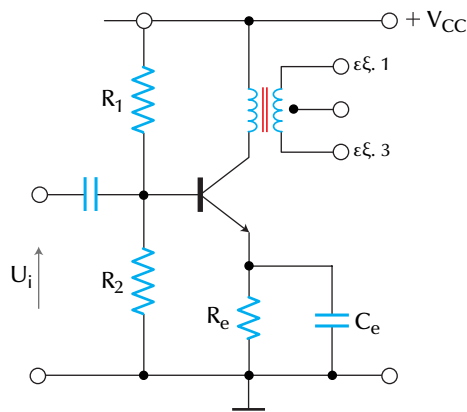
Όταν οι ενισχυτές push-pull λειτουργούν σε **τάξη B** δε θα πρέπει να λησμονούμε την ύπαρξη της **παραμόρφωσης διασταύρωσης** που αναπτύξαμε ήδη στην ενότητα 3.5.

3.8 Βαθμίδες οδήγησης

Όταν ο ενισχυτής εξόδου είναι μεγάλης ισχύος πρέπει και η βαθμίδα διέγερσης ή οδήγησής του να είναι επίσης ενισχυτρία ισχύος, ώστε να δώσει την επαρκή ισχύ διέγερσης εισόδου. Συνήθως, για βαθμίδα οδήγησης χρησιμοποιείται ενισχυτής ισχύος σε τάξη A.

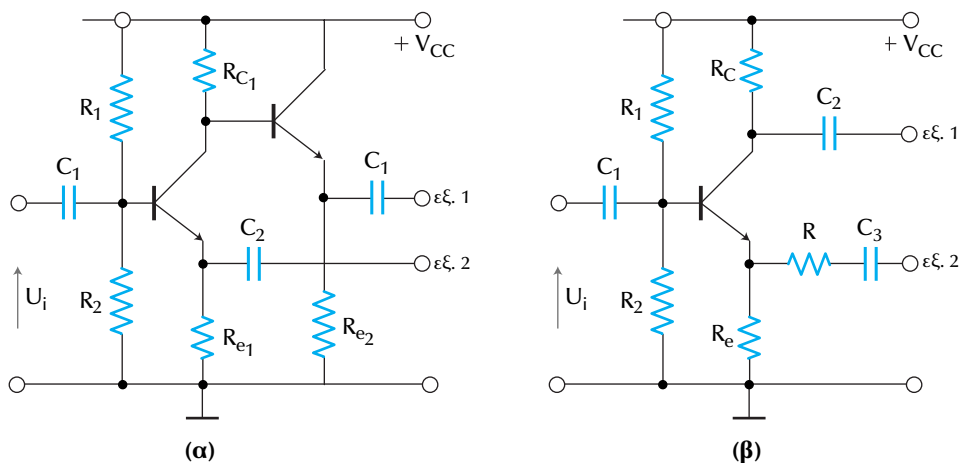
Το Σχ.3.13 δείχνει μια τέτοια οδηγό βαθμίδα. Η έξοδος της βαθμίδας έχει μετασχηματιστή με μεσαία λήψη που διεγείρει τη βαθμίδα push-pull

εξόδου. Ο μετασχηματιστής εξόδου υπολογίζεται, ώστε η αντίσταση που ανακλάται στο πρωτεύον να δίνει άριστη τιμή R_a στο συλλέκτη της βαθμίδας οδήγησης. Ο μετασχηματιστής εξόδου δίνει δυο σήματα με διαφορά φάσης 180° για τη διέγερση της βαθμίδας push-pull εξόδου.



Σχήμα 3.13. Βαθμίδα οδήγησης σε τάξη Α με σύζευξη μετασχηματιστή

Το Σχ.3.14 δείχνει δυο κυκλώματα οδήγησης που χρησιμοποιούν ένα δεύτερο τρόπο σύζευξης, δηλ. άμεση σύζευξη. Και τα δύο κυκλώματα δημιουργούν στην έξοδο δύο ίδια σήματα τα οποία έχουν διαφορά φάσης 180° από το σήμα εισόδου (αντιστροφή φάσης). Το κύκλωμα του Σχ.3.14α παρουσιάζει μικρή αντίσταση εξόδου, ενώ αυτό του Σχ.3.14 β παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση εξόδου.

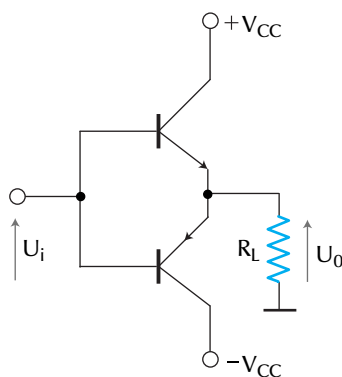


Σχήμα 3.14. Οδήγησης με αντιστροφής φάσης και άμεση σύζευξη

3.9 Ενισχυτές συμπληρωματικής συμμετρίας

Ένας ενισχυτής μπορεί να λειτουργήσει σαν ενισχυτής push-pull χωρίς μετασχηματιστές αν χρησιμοποιήσουμε δύο τρανζίστορ συμπληρωματικής συμμετρίας. **Συμπληρωματική συμμετρία** έχουμε όταν στο ζεύγος των τρανζίστορ του push-pull το ένα τρανζίστορ είναι τύπου npn, ενώ το άλλο είναι τύπου pnp. Το πλεονέκτημα της συμπληρωματικής συμμετρίας είναι, ότι στα τρανζίστορ χρειάζεται ένα μόνο σήμα εισόδου, σε αντίθεση με τα τυπικά κυκλώματα, στα οποία χρειάζονται δυο είσοδοι σημάτων που πρέπει να έχουν διαφορά φάσης 180° .

Το κύκλωμα του Σχ.3.15 δείχνει την αρχή δράσης συμπληρωματικής συμμετρίας, στα οποία το σήμα εισόδου τροφοδοτεί παράλληλα τις εισόδους των τρανζίστορ. Η θετική ημιπερίοδος του σήματος εισόδου κάνει αγωγίμο το τρανζίστορ npn και το θετικό ημίκυμα του σήματος εισόδου εμφανίζεται ενισχυμένο στο φορτίο R_L . Μεταξύ εισόδου-εξόδου δεν υπάρχει καμία διαφορά φάσης.

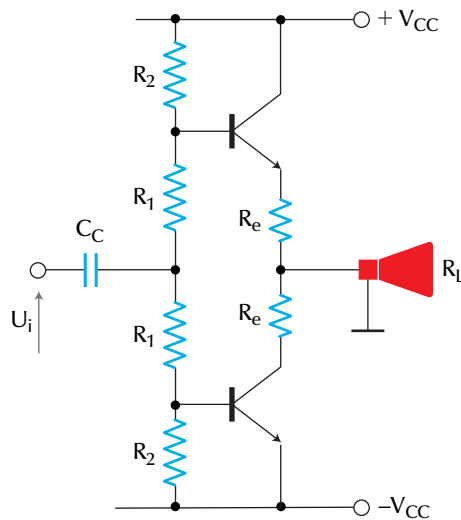


Σχήμα 3.15. Ενισχυτής push-pull συμπληρωματικής συμμετρίας (αρχή)

Όταν τώρα το σήμα εισόδου γίνεται αρνητικό, τότε γίνεται αγωγίμο το τρανζίστορ pnp και στην έξοδο εμφανίζεται ενισχυμένο το αρνητικό ημίκυμα της τάσης εισόδου. Σημειώστε ότι, όταν στην είσοδο δεν υπάρχει σήμα δεν κυκλοφορεί ρεύμα μέσα από τα τρανζίστορ και συνεπώς έχουμε ενισχυτή push-pull τάξης B.

Το Σχ.3.16 δείχνει ένα πρακτικό κύκλωμα ενισχυτή push-pull συμπληρωματικής συμμετρίας σε τάξη AB. Οι αντιστάσεις R_i πρέπει να είναι μικρές για να αποφεύγεται υποβιβασμός του σήματος εισόδου. Το φορ-

τίο R_L (μεγάφωνο) μπορεί να συνδεθεί είτε απ' ευθείας (άμεση σύζευξη) είτε να προσαρμοσθεί με μετασχηματιστή εξόδου. Οι αντιστάσεις R_1 μπορεί να αντικατασταθούν με διόδους, πολωμένες κατά την ορθή φορά, για να έχουμε καλύτερη σταθεροποίηση τάσης.



Σχήμα 3.16. Πρακτικό κύκλωμα ενισχυτή push-pull με συμπληρωματική εμπειρία

3.10 Ενισχυτές ισχύος σε ολοκληρωμένο κύκλωμα

Στο εμπόριο είναι διαθέσιμη ποικιλία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC) που λειτουργούν ως ενισχυτές ισχύος. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε, ως χαρακτη-ριστικό παράδειγμα, τον ενισχυτή ισχύος ακουστικών συχνοτήτων LM380 της National Sem. Co. και δίνουμε μια σύντομη περιγραφή των υβριδικών ενισχυτών ισχύος με μέγιστη ισχύ εξόδου 100 W.

Το LM380 είναι ένας ενισχυτής ισχύος ακουστικών συχνοτήτων που δίνει ισχύ εξόδου 2.5 W (rms) σε φόρτο $R_L=8\ \Omega$. Το IC αυτό χρειάζεται έναν ελάχιστο αριθμό εξωτερικών στοιχείων για να λειτουργήσει. Οι κύριες επιδόσεις του είναι:

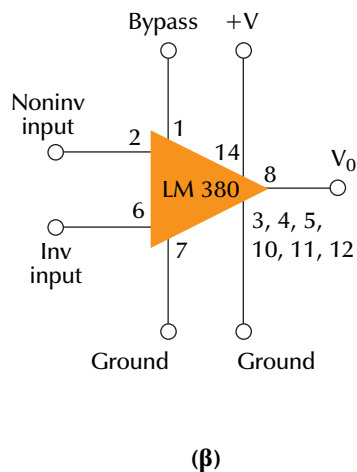
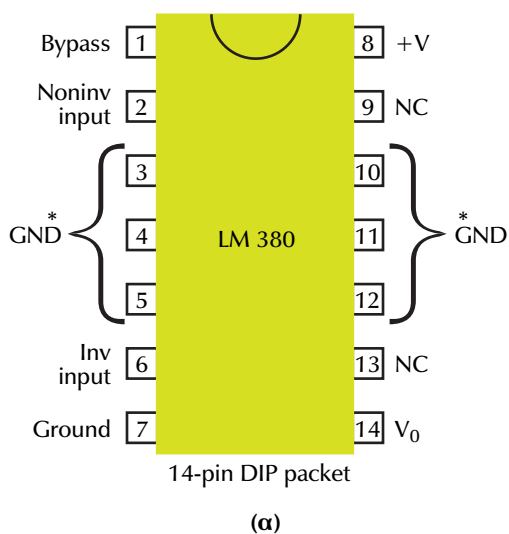
- Εσωτερική σταθερή απολαβή τάσης 50 (34 dB).
- Έξοδο αυτόματα οδηγούμενη στο μισό της τάσης τροφοδοσίας.

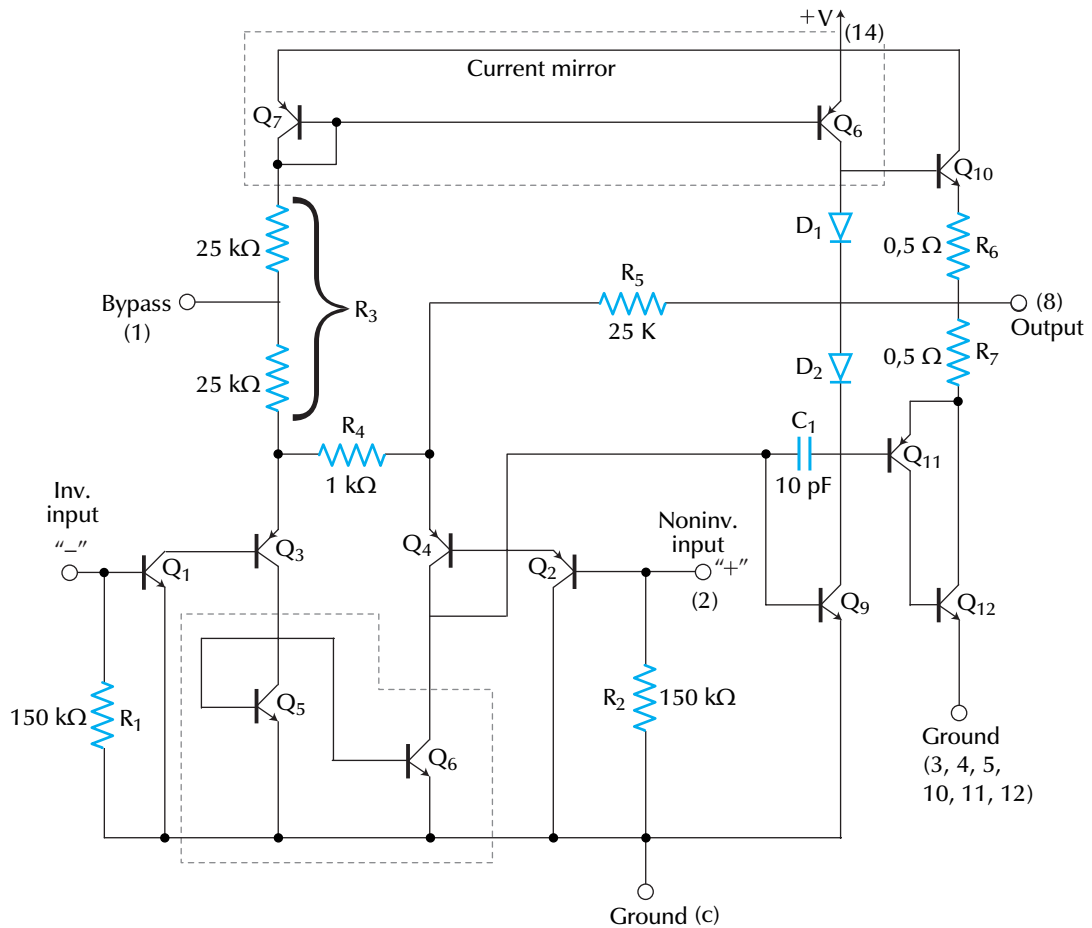
- Προστασία της εξόδου από βραχυκύκλωμα με εσωτερικό θερμικό περιορισμό.
- Βαθμίδα εισόδου που επιτρέπει στις εισόδους να γειώνονται ή να τίθενται σε ac σύζευξη.
- Εύρος ζώνης διέλευσης συχνοτήτων 100 kHz.
- Μικρή παραμόρφωση (της τάξης του 0.2%).

Το Σχ.3.17 δείχνει τους ακροδέκτες, το δομικό διάγραμμα και το σχηματικό διάγραμμα του LM380.

3.10.1 Περιγραφή του Κυκλώματος του LM380

Όπως δείχνει το σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα του LM380 αποτελείται από τέσσερις βαθμίδες: Έναν ακόλουθο εκπομπού *npn*, ένα διαφορικό ενισχυτή και ένα συμπληρωματικό ακόλουθο εκπομπού.





Σχήμα 3.17. Ενισχυτής ισχύος LM380. (Ακροδέκτες, δομικό διάγραμμα, και κυκλωματικό διάγραμμα)

Η βαθμίδα εισόδου είναι ένας ακόλουθος εκπομπού ο οποίος αποτελείται από τα τρανζίστορ Q_1 και Q_2 , και οδηγεί το διαφορικό ζεύγος Q_3 - Q_4 . Η κατάλληλη επιλογή των τρανζίστορ εισόδου Q_1 και Q_2 επιτρέπει στην είσοδο να αναφέρεται ως προς γη· έτσι το σήμα εισόδου μπορεί απ' ευθείας να συζευγνύεται είτε προς την αναστρέφουσα είσοδο (ακροδέκτης 6) είτε προς τη μη-αναστρέφουσα είσοδο (ακροδέκτης 2) του ενισχυτή.

Το κανονικό ρεύμα στο διαφορικό ζεύγος Q_3 - Q_4 δημιουργείται

από το συνδυασμό Q_7 , R_3 και $+V_{CC}$. Το κατοπτρικό ρεύμα που δημιουργείται από τα τρανζίστορ Q_7 , Q_8 και τα αντίστοιχα στοιχεία τους παράγει το ρεύμα συλλέκτη του Q_9 . Τα τρανζίστορ Q_5 και Q_6 δημιουργούν τα ρεύματα συλλέκτη του διαφορικού ζεύγους r_{hp} . Η έξοδος του διαφορικού ενισχυτή που εξετάζουμε λαμβάνεται από την ένωση των τρανζίστορ Q_4 και Q_6 και ενισχύεται σαν είσοδος της ενισχυτικής βαθμίδας τάσης του κοινού εκπομπού που ακολουθεί.

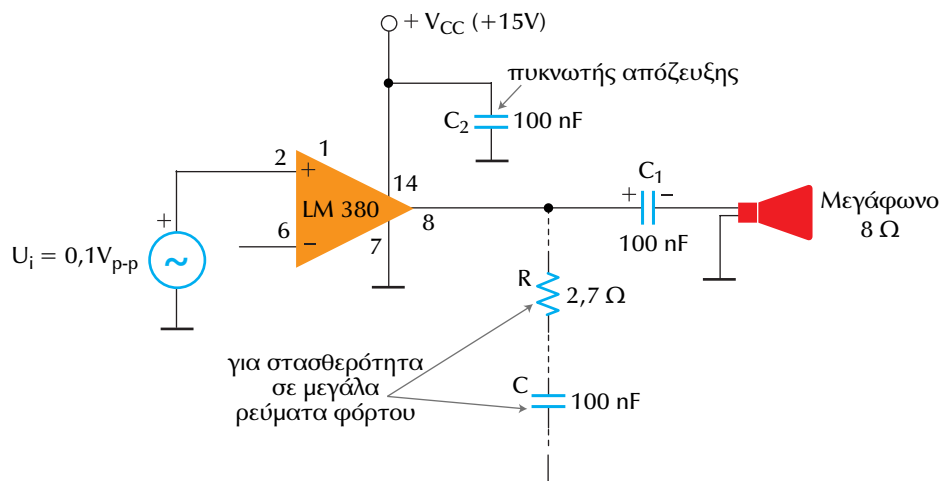
Αυτή η ενισχυτική βαθμίδα κοινού εκπομπού αποτελείται από τα τρανζίστορ Q_8 , τις διόδους D_1 και D_2 και το Q_9 ως πηγή ρεύματος φόρτου. Ο πυκνωτής C , μεταξύ της βάσης και του συλλέκτη του Q_9 , δημιουργεί εσωτερική αντιστάθμιση και βοηθάει τη διατήρηση της άνω συχνότητας αποκοπής ως 100 kHz με ισχύ εξόδου 2 W για φόρτο 8 Ω. Επειδή τα Q_7 και Q_8 σχηματίζουν ένα κάτοπτρο ρεύματος, το ρεύμα μέσω των D_1 και D_2 είναι προσεγγιστικά το ίδιο με το ρεύμα της R_1 . Επιπλέον, τα D_1 και D_2 λειτουργούν και ως διόδοι αντιστάθμισης θερμοκρασίας για τα τρανζίστορ Q_{10} και Q_{11} επειδή τα D_1 και D_2 έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τη diode βάσης-εκπομπού του Q_{11} . Επομένως, το ρεύμα μέσω του Q_{10} και του συνδυασμού των Q_{11} - Q_{12} είναι προσεγγιστικά ίσο με το ρεύμα μέσω των διόδων D_1 και D_2 .

Η βαθμίδα εξόδου του συμπληρωματικού ζεύγους του ακόλουθου εκπομπού αποτελείται από τα τρανζίστορ r_{hp} Q_{10} και Q_{12} . Στην πραγματικότητα, ο συνδυασμός του τρανζίστορ r_{hp} Q_{11} και του τρανζίστορ r_{hp} Q_{12} έχει την ικανότητα της παροχής ισχύος ενός τρανζίστορ r_{hp} αλλά και τα χαρακτηριστικά επιδόσεων ενός τρανζίστορ r_{hp} .

Λόγω της κατάλληλης διευθέτησης της βαθμίδας εξόδου, η τάση ηρεμίας στην έξοδο είναι η μισή της τάσης τροφοδοσίας ($+V_{CC}$). Επιπλέον, η αρνητική dc ανασύζευξη που εφαρμόζεται μέσω της R_5 εξισορροπεί τον ενδιάμεσο διαφορικό ενισχυτή, έτσι ώστε η dc τάση στην έξοδο να σταθεροποιείται στην τιμή $+V_{CC}/2$. Για να αποζεύξουμε τη βαθμίδα εισόδου από την τάση τροφοδοσίας $+V_{CC}$, συνδέεται ένας πυκνωτής απόζευξης της τάξης των μF μεταξύ του ακροδέκτη απόζευξης (ακροδέκτης 1) και της γης (ακροδέκτης 7). Η ολική εσωτερική ενίσχυση (απολαβή) τάσης του ενισχυτή είναι κατ' αρχή σταθερή στην τιμή 50, αλλά, στις εφαρμογές μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας θετική ανασύζευξη, όπως θα δούμε πιο κάτω.

3-10.2 Εφαρμογές του LM380

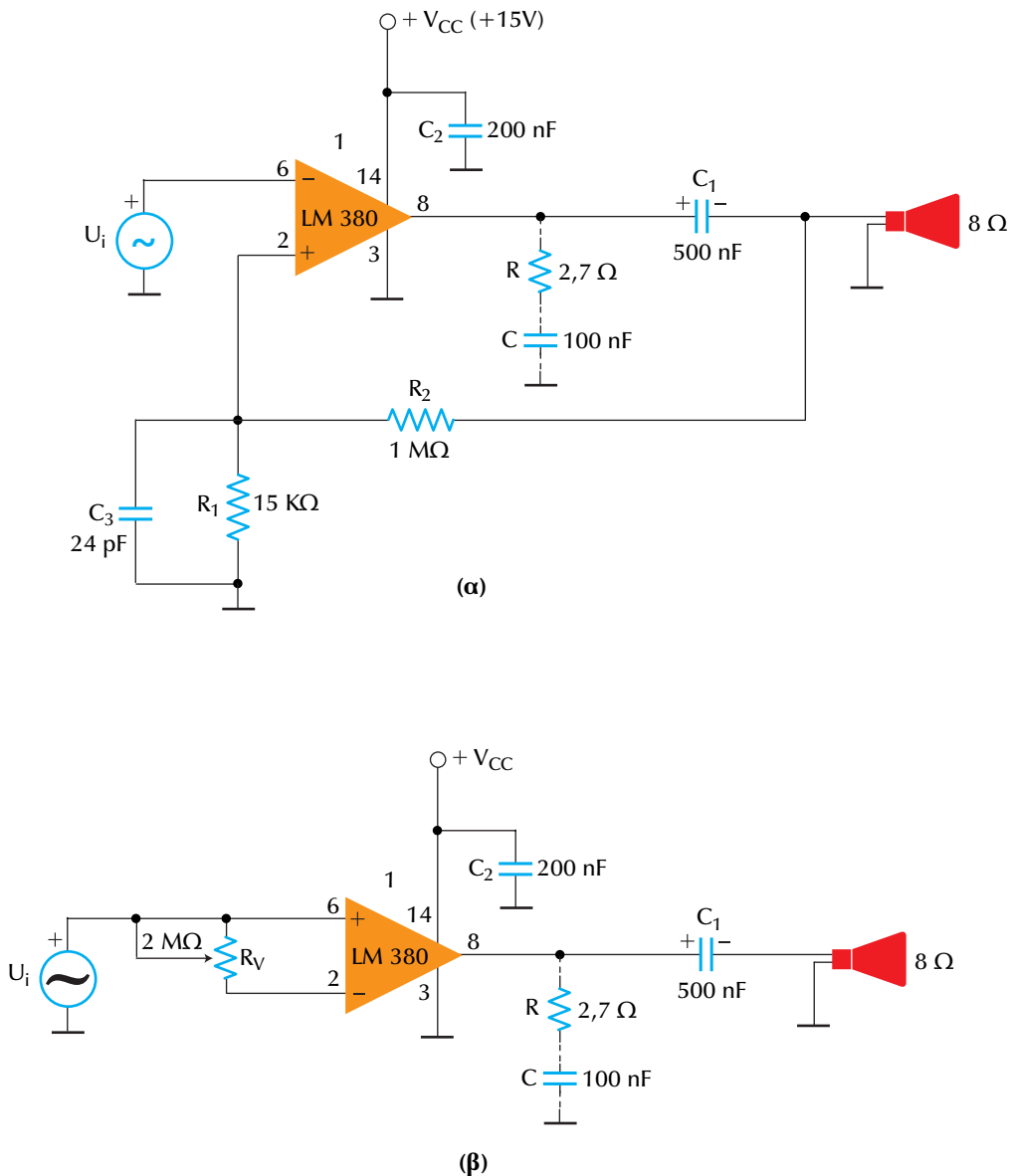
Το Σχ.3.18 δείχνει έναν απλό **ενισχυτή ισχύος ακουστικών συχνοτήτων** ως την πιο βασική εφαρμογή του LM380. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο ενισχυτής χρειάζεται λίγα εξωτερικά στοιχεία λόγω της εσωτερικής πόλωσης, αντιστάθμισης και σταθερής ενίσχυσης. Όταν ο ενισχυτής χρησιμοποιείται χωρίς αναστροφή, ο αναστρέφων ακροδέκτης μπορεί να γειωθεί, ή να συνδεθεί με τη γη μέσω μιας αντίστασης ή ενός πυκνωτή είτε να αφεθεί ανοικτός, όπως φαίνεται στο το σχήμα. Ομοίως, όταν ο ενισχυτής χρησιμοποιείται χωρίς αναστροφή, ο μη-αναστρέφων ακροδέκτης μπορεί να βραχυκυκλωθεί προς στη γη είτε να γειωθεί μέσω μιας αντίστασης ή ενός πυκνωτή. Συνήθως, αν η πηγή εισόδου έχει υψηλή εσωτερική αντίσταση συνδέουμε έναν πυκνωτή μεταξύ του αναστρέφοντα ακροδέκτη και της γης. Σε οποιαδήποτε όμως συνδεσμολογία η τάση $+V_{CC}$ πρέπει να αποσυζευχθεί συνδέοντας έναν πυκνωτή μεταξύ του ακροδέκτη $+V_{CC}$ (ακροδέκτης 14) και της γης. Επίσης, χρησιμοποιούμε ένα συνδυασμό RC στον ακροδέκτη εξόδου (ακροδέκτης 8) για να εξαλείψουμε τυχόν ταλαντώσεις 5 έως 10 MHz, ιδιαίτερα σε ευαίσθητα RF στοιχεία.



Σχήμα 3.18. Ενισχυτής ισχύος ακουστικών συχνοτήτων με το LM380

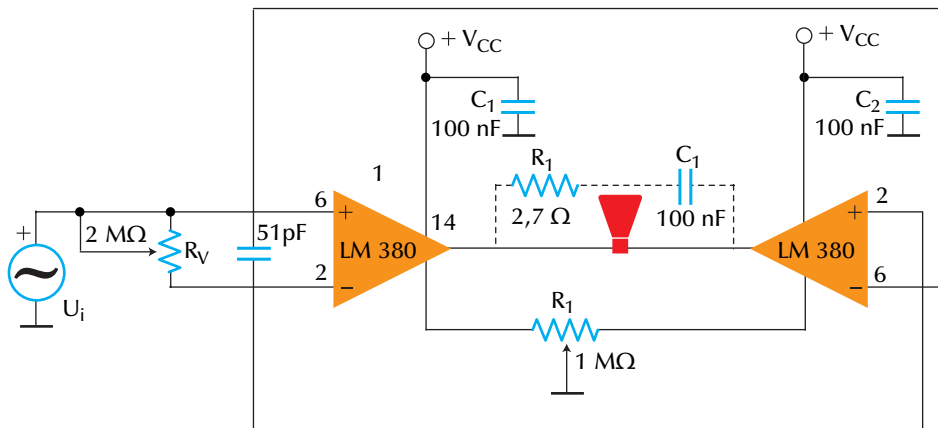
Μολονότι η ενίσχυση του LM380 είναι εσωτερικά σταθερή ($50 \text{ dB} \pm$), μπορεί να αλλάξει χρησιμοποιώντας εξωτερικά στοιχεία. Μπορούμε να

επιτύχουμε ενίσχυση μέχρι 300 χρησιμοποιώντας θετική ανασύζευξη. Π.χ. το Σχ.3.19 α δείχνει το LM380 με ενίσχυση 200 χρησιμοποιώντας θετική ανασύζευξη. Το Σχ.3.19 β δείχνει LM380 με μεταβλητή ενίσχυση μέχρι 50 με τη απλή τεχνική της χρησιμοποίησης ποτενσιομέτρου μεταξυ των ακροδεκτών εισόδου.



Σχήμα 3.19. Ενισχυτής LM380 με θετική για έλεγχο της ενίσχυσής του

Το Σχ.3.20 δείχνει μια εφαρμογή που χρειάζεται περισσότερη ισχύ απ' αυτή που δίνει μόνο ένα LM380. Εδώ, δύο LM380 χρησιμοποιούνται σε **συνδεσμολογία γέφυρας** ώστε να δώσουν μεγαλύτερη ισχύ. Μ' αυτή τη συνδεσμολογία η τάση εξόδου είναι διπλάσια από εκείνη του ενισχυτή με ένα LM380 και επομένως η ισχύς που μεταφέρεται στο φορτίο είναι τετραπλάσια. Για να έχουμε βελτίωση της συμπεριφοράς του κυκλώματος, χρησιμοποιείται ποτενσιόμετρο για να εξισορροπεί τις τάσεις στην έξοδο offset του LM380.



Σχήμα 3.18. Ενισχυτής με συνδεσμολογία γέφυρας του LM380 για αύξηση της ισχύος

3.10.3 Άλλα Ολοκληρωμένα Ισχύος - Υβριδικοί Ενισχυτές Ισχύος

Εκτός από το LM380 υπάρχουν και άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα IC ενισχυτών ισχύος, όπως το LM377 (διπλό), το LM378 (διπλό) και διάφορα άλλα με διάφορες ισχείς εξόδου. Ο διπλός ενισχυτής ισχύος LM377, ο οποίος δίνει 2 W /κανάλι, χρησιμοποιείται ως στερεοφωνικός ενισχυτής, για κασετόφωνα και καταγραφικά όργανα και για στερεοφωνικούς ενισχυτές AM-FM.

Για εφαρμογές που απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς εξόδου από αυτή που μπορούμε να πάρουμε από τα IC, χρησιμοποιούμε *υβριδικούς ενισχυτές ισχύος*, δηλ. ενισχυτές που συνδυάζουν διακριτό και ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τέτοια είναι, π.χ. οι Intersil ICH8510/8520/8530, που σχεδιάστηκαν να δίνουν 1 , 2 και 2.8 A , αντίστοιχα, για τάση εξόδου 24 V . Όλοι οι ενισχυτές αυτοί έχουν προστασία επιστροφής με εσωτερικό περιορισμό ισχύος και

προστασία βραχυκυκλώματος ως προς τη γη. Κάθε ενισχυτής έχει dc ενίσχυση 10^5 (100 dB), εσωτερική αντιστάθμιση συχνότητας και ηλεκτρικά απομονωμένο περίβλημα που επιτρέπει εύκολη απαγωγή θερμότητας. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται επίσης και για να οδηγήσουν ηλεκτρονικές λυχνίες, σωληνοειδή push-pull και κινητήρες dc και ac.

Άλλο ένα κλασσικό παράδειγμα υβριδικού ενισχυτή ισχύος είναι αυτός της Burr-Brown, ο 3573, ο οποίος δίνει 100 W κορυφής ή 40 W συνεχή ισχύ εξόδου. Όταν τροφοδοτείται με τάση τροφοδοσίας ± 28 V, δίνει ± 5 A ελάχιστο ρεύμα κορυφής στα ± 20 V (40 V p-p) στο φορτίο. Το κύκλωμα αυτό έχει εσωτερική αντιστάθμιση συχνότητας με καλά χαρακτηριστικά παραμόρφωσης και μικρό κόστος.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- 3-1.** Ένας ενισχυτής ισχύος χρησιμοποιεί μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού 10 και μεγάφωνο 4 Ω. Να βρεθεί η ανακλώμενη αντίσταση στο πρωτεύον το μετασχηματιστή.
- 3-2.** Ένας ενισχυτής ισχύος έχει αντίσταση εξόδου 2 KΩ και χρησιμοποιεί μεγάφωνο 8 Ω. Να βρεθεί ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή για άριστη προσαρμογή.
- 3-3.** Ένας ενισχυτής ισχύος έχει ανακλώμενη αντίσταση 4.8 KΩ και λόγο μετασχηματισμού 20. Να βρεθεί η αντίσταση του μεγαφώνου του.
- 3-4.** Να επιλεγεί το κατάλληλο τρανζίστορ ισχύος σε ενισχυτή χωρίς μετασχηματιστή, που τροφοδοτείται με τάση τροφοδοσίας +15 V και διεγείρει φόρτο 4 Ω, για να υπάρχει μέγιστη απόδοση.
- 3-5.** Ένας ενισχυτής push-pull τάξης B, με μετασχηματιστή έχει ισχύ ac 2 W, $R_L=4$ Ω και $V_{CC}=15$ V. Να επιλεγεί ένα κατάλληλο τρανζίστορ.