

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΜΕ ΑΝΑΣΥΖΕΥΞΗ



2.1 Εισαγωγή

Η επαναφορά (ανασύζευξη) ενός μέρους της εξόδου στην είσοδο ενός ενισχυτή του προσδίδει ειδική συμπεριφορά λειτουργίας και ξεχωριστά χαρακτηριστικά που μπορεί να είναι χρήσιμα σε αρκετές εφαρμογές. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζουμε τις βασικές αρχές των ενισχυτών με αρνητική ανασύζευξη* καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, ως προς τους ενισχυτές χωρίς ανασύζευξη.

□ **Ανασύζευξη** ονομάζεται το φαινόμενο, κατά το οποίο ένα μέρος του σήματος εξόδου αφήνεται να επιστρέφει από την έξοδο και να εφαρμοσθεί στην είσοδο του ενισχυτή.

Υπάρχουν δυο τύποι ανασύζευξης, η αρνητική και η θετική.

Αρνητική ανασύζευξη έχουμε, όταν όλο ή μέρος του σήματος εξόδου (τάσης ή ρεύματος) επιστρέφει, με κατάλληλη συνδεσμολογία, στην είσοδο του ενισχυτή κατά τρόπο, ώστε το σήμα ανασύζευξης (επιστρέφον σήμα) να αφαιρείται από το αρχικό σήμα εισόδου.

Άρα, το ολικό σήμα που εφαρμόζεται κάθε φορά στην είσοδο ενός ενισχυτή με αρνητική ανασύζευξη είναι το αρχικό σήμα εισόδου μείον το σήμα ανασύζευξης (σε στιγμιαίες τιμές).

Επειδή το αρχικό σήμα εισόδου μειώνεται με την αρνητική ανασύζευξη, ανάλογα μειώνεται και το σήμα εξόδου. Για το λόγο αυτό, οι ενισχυτές με αρνητική ανασύζευξη χαρακτηρίζονται από μικρή απολαβή (ενίσχυση), σε σχέση με τους ενισχυτές χωρίς αρνητική ανασύζευξη.

Θετική ανασύζευξη έχουμε, όταν το όλο ή μέρος του σήματος εξόδου (τάσης ή ρεύματος) επιστρέφει, με κατάλληλη συνδεσμολογία, στην είσοδο του ενισχυτή κατά τρόπο, ώστε το σήμα ανασύζευξης (επιστρέφον σήμα), να προστίθεται στο αρχικό σήμα εισόδου.

Γενικά, στους ενισχυτές η θετική ανασύζευξη είναι ανεπιθύμητη, καθώς ο ενισχυτής καθίσταται τότε ασταθής και τείνει να εργάζεται σαν ταλαντωτής.

Η θετική ανασύζευξη χρησιμοποιείται στα κυκλώματα ταλαντωτών, τα οποία εξετάζονται σε άλλο κεφάλαιο.

* Μερικά βιβλία, αντί του όρου ανασύζευξη, χρησιμοποιούν τον όρο ανατροφοδότηση ή ανάδραση.

2.2 Γενικές αρχές της ανασύζευξης

Το φαινόμενο της ανασύζευξης βρίσκει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Μια πρώτη σημαντική εφαρμογή είναι στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

Η αρνητική ανασύζευξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ενισχυτή για τους εξής λόγους:

1. Για να επιφέρει σταθεροποίηση στην απολαβή τάσης ή ρεύματος.
2. Για να επιφέρει λειτουργία σε μεγαλύτερο γραμμικό τμήμα των χαρακτηριστικών καμπυλών. Αυτό οδηγεί σε βελτίωση της παραμόρφωσης.
3. Για να διευρύνει τη ζώνη διέλευσης συχνοτήτων.
4. Για να ελαττώσει ή να αυξήσει τη σύνθετη αντίσταση εισόδου.
5. Για να ελαττώσει ή να αυξήσει τη σύνθετη αντίσταση εξόδου.
6. Για να μειώσει τον εσωτερικό θόρυβο.
7. Για να περιορίσει τη μεταβολή των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας του ενισχυτή λόγω θερμικών επιδράσεων.

Όταν μιλάμε για σταθεροποίηση της απολαβής, εννοούμε το να καταστήσουμε την απολαβή τάσης ή ρεύματος λιγότερο εξαρτώμενη από τις παραμέτρους των τρανζίστορ.

Εξάλλου επιζητούμε μεγαλύτερη γραμμικότητα στη λειτουργία των ενισχυτών, καθόσον θέλουμε να έχουμε στην έξοδο σήματα με μικρότερη παραμόρφωση.

Ακόμα σε όλους γενικά τους ενισχυτές δημιουργούνται, λόγω θερμικών φαινομένων, ηλεκτρικά σήματα διαταραχών τυχαίας συμπεριφοράς, τα οποία ονομάζονται **θόρυβοι**.

Ο θόρυβος, ιδίως σε ενισχυτές με πολύ μικρό σήμα εισόδου, δημιουργεί ενοχλητικές καταστάσεις στην εξαγωγή πληροφοριών από το σήμα εξόδου. Η εξαγωγή των πληροφοριών αυτών καθίσταται πολύ δύσκολη, όταν η τάξη μεγέθους του σήματος εξόδου δεν υπερβαίνει την τάξη μεγέθους του θορύβου. Τότε, το σήμα εξόδου καλύπτεται από τους θορύβους. Στην περίπτωση αυτή η ενίσχυση δεν έχει νόημα, αφού ενισχύοντας το σήμα, ενισχύεται εξίσου και ο θόρυβος. Για να περιορίσουμε λοιπόν τους θορύβους, χρησιμοποιούμε αρνητική ανασύζευξη.

Ανάλογα με την επενέργεια της ανασύζευξης στην απολαβή, έχουμε τους εξής δυο βασικούς τύπους ανασύζευξης.

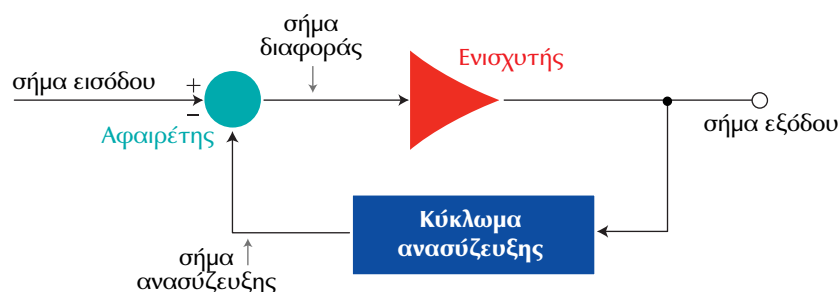
1. **Ανασύζευξη ρεύματος.**
2. **Ανασύζευξη τάσης.**

Το σπουδαιότερο κοινό χαρακτηριστικό των δυο αυτών τύπων αρνητικής ανασύζευξης είναι, ότι έχουμε μείωση στην απολαβή.

Μπορούμε επίσης να έχουμε και δυο άλλους τύπους ανασύζευξης.

Ο ένας ονομάζεται **ανασύζευξη παράλληλης διακλάδωσης** και ο άλλος **ανασύζευξη σειράς**.

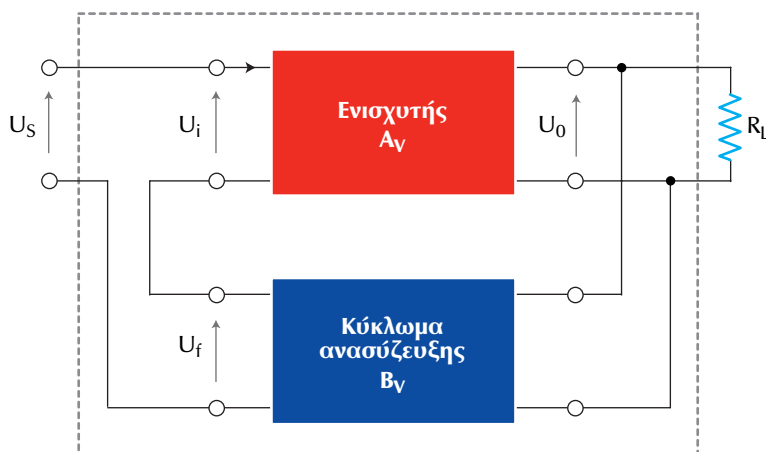
Το παρακάτω Σχ.2.1 εικονίζει το δομικό διάγραμμα ενός τυπικού ενισχυτή με ανασύζευξη. Η ανασύζευξη μπορεί να αναφέρεται σε τάση ή σε ρεύμα.



Σχήμα 2.1. Δομικό διάγραμμα ενισχυτή με ανασύζευξη

2.3 Ενισχυτής με ανασύζευξη τάσης

Αν υποθέσουμε ότι όλα τα σήματα στο διάγραμμα του Σχ.2.1 είναι σήματα τάσης, τότε το διάγραμμα αυτό παριστάνει έναν **ενισχυτή με ανασύζευξη τάσης**. Περισσότερο όμως αναλυτικά μπορούμε να παραστήσουμε έναν ενισχυτή με ανασύζευξη τάσης όπως εικονίζεται στο Σχ.2.2.



Σχήμα 2.2. Δομικό διάγραμμα ενισχυτή με αρνητική ανασύζευξη τάσης

Η αρνητική ανασύζευξη τάσης επιτυγχάνεται, όταν το μέρος του σήματος που επιστρέφει από την τάση εξόδου στην είσοδο του ενισχυτή είναι τέτοιο, δηλ. έχει τέτοια φάση, ώστε να αφαιρείται από την τάση εισόδου.

2.3.1 Απολαβή Τάσης με Ανασύζευξη

Στο Σχ.2.2 η τάση εξόδου V_o είναι η τάση που λαμβάνεται στα άκρα της αντίστασης φόρτου R_L , ή στην είσοδο του κυκλώματος (δικτυώματος) ανασύζευξης.

Ορίζουμε ως **συντελεστή ή λόγο ανασύζευξης τάσης β_v** του κυκλώματος ανασύζευξης το λόγο:

$$\beta_v = \frac{V_f}{V_o} \quad (2.3.1)$$

όπου V_f είναι η τάση του σήματος ανασύζευξης ή αλλιώς η τάση του σήματος που προέρχεται από την έξοδο και εμφανίζεται στην είσοδο του ενισχυτή.

Ορίζουμε επίσης ως **απολαβή τάσης A_v** του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη το λόγο:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.3.2)$$

όπου V_i η τάση εισόδου του ενισχυτή χωρίς (με κομμένη) την ανασύζευξη.

Όπως φαίνεται στο Σχ.2.2, στοιχειοθετούνται τρεις τάσεις εισόδου στον ενισχυτή. Εκτός δηλαδή από τις V_i και V_f έχουμε και τη συνολική τάση του σήματος εισόδου V_s (με ανασύζευξη). Οι τρεις αυτές τάσεις συνδέονται με την πιο κάτω εξίσωση:

$$V_s = V_i + V_f \quad (2.3.3)$$

Αν λύσουμε τις Εξ.(2.3.1) και (2.3.2) ως προς V_f και V_i , αντίστοιχα, και αντικαταστήσουμε στην Εξ.(2.3.3), αποδεικνύεται εύκολα ότι η **απολαβή τάσης** του ενισχυτή με ανασύζευξη (απολαβή κλειστού βρόχου) A_{vf} δίνεται από τη σχέση:

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + \beta_v A_v} \quad (2.3.4)$$

Στην περίπτωση της αρνητικής ανασύζευξης, το $\beta_v A_v = V_{ef} / V_i < 0$, δηλ. η τάση ανασύζευξης V_{ef} επιστρέφει στην είσοδο με διαφορά φάσης 180° ως προς την τάση εισόδου V_i (άρα η V_{ef} θα είναι αφαιρετική από τη V_i). Επειδή δε το $\beta_v A_v \gg 1$ η πιο πάνω σχέση γράφεται:

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + \beta_v A_v} \cong \frac{A_v}{\beta_v A_v} \cong \frac{1}{\beta_v} \quad (2.3.5)$$

Άρα, η απολαβή τάσης με ανασύζευξη αποδεικνύεται πρακτικά ανεξάρτητη από τις παραμέτρους του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη.

2.3.2 Αντίσταση Εισόδου

Η αντίσταση εισόδου ενός ενισχυτή με ανασύζευξη, R_{if} , δίνεται από το λόγο της τάσης του σήματος εισόδου (με ανασύζευξη) V_s προς το ρεύμα εισόδου I_i , δηλαδή:

$$R_{if} = \frac{V_s}{I_i} \quad (2.3.6)$$

Αντίστοιχα, η αντίσταση εισόδου ενός ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη R_i ορίζεται από το λόγο της τάσης εισόδου (χωρίς ανασύζευξη) V_i προς το ρεύμα εισόδου I_i δηλαδή:

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (2.3.7)$$

Αποδεικνύεται ότι η αντίσταση εισόδου με ανασύζευξη, δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{if} = R_i (1 + \beta_v A_v) \quad (2.3.8)$$

Η εξίσωση αυτή συνδέει την αντίσταση εισόδου με ανασύζευξη με την αντίστοιχη χωρίς ανασύζευξη.

Στην περίπτωση αρνητικής ανασύζευξης τάσης, η αντίσταση εισόδου με ανασύζευξη είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση χωρίς ανασύζευξη. Αυτό οφείλεται στο ότι, αν ικανοποιείται το πιο πάνω κριτήριο της αρνητικής ανασύζευξης, δηλ. $|\beta_v A_v| > 1$, η παρένθεση της Εξ.(2.3.8) θα είναι, σε απόλυτη τιμή, πολύ μεγαλύτερη από τη μονάδα.

2.3.3 Αντίσταση Εξόδου

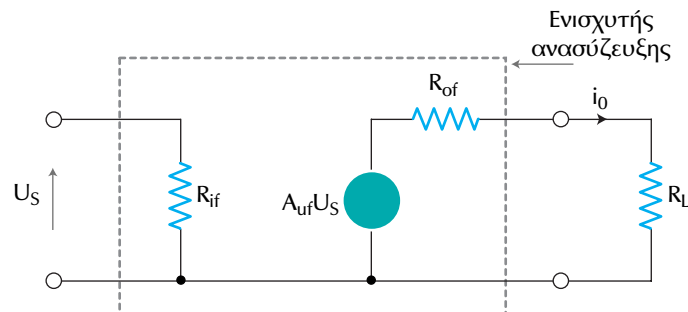
Η αντίσταση εξόδου ενός ενισχυτή με ανασύζευξη συμβολίζεται με R_o ενώ χωρίς ανασύζευξη με R_o . Αποδεικνύεται ότι οι αντιστάσεις αυτές συνδέονται με την πιο κάτω εξίσωση:

$$R_{ofi} = \frac{R_{oi}}{1 + \beta_v A_v} \quad (2.3.9)$$

Από την εξίσωση αυτή, βλέπουμε ότι, για την αρνητική ανασύζευξη τάσης, με $|\beta_v A_v| \gg 1$, η αντίσταση εξόδου με ανασύζευξη είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη αντίσταση χωρίς ανασύζευξη.

2.3.4 Ισοδύναμο Κύκλωμα

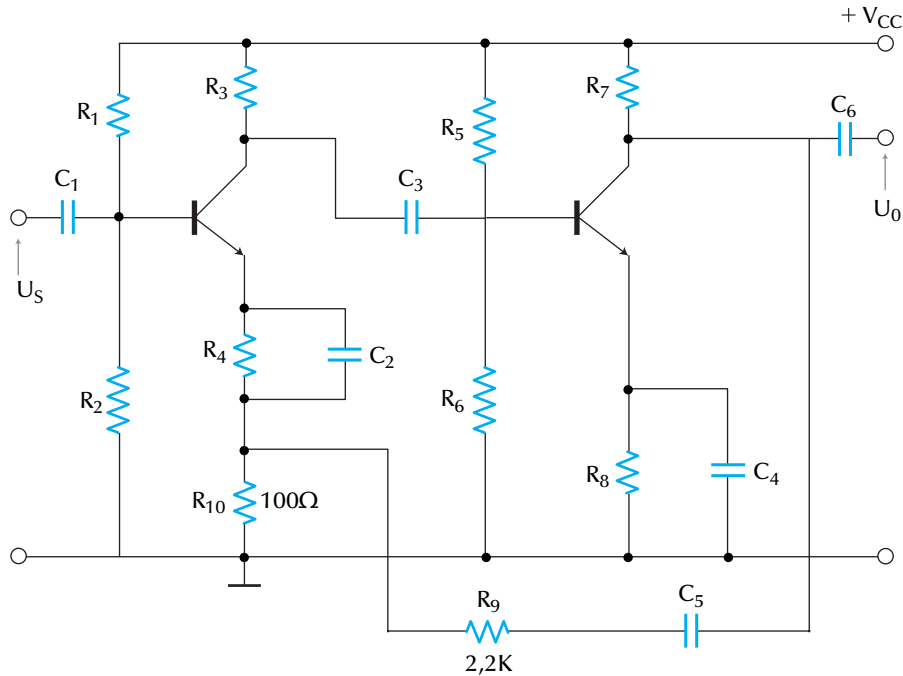
Για να σχεδιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή με ανασύζευξη τάσης, θεωρούμε και δημιουργούμε το κύκλωμα της Εξ. (2.3.8). Με βάση την εξίσωση αυτή, προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα που εικονίζεται στο Σχ.2.3.



Σχήμα 2.3. Ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή με ανασύζευξη τάσης

⇒ Παράδειγμα 2-1

Το κύκλωμα του Σχ.2.4 απεικονίζει έναν ενισχυτή με ανασύζευξη τάσης. Τα στοιχεία ή παράμετροι του κυκλώματος χωρίς ανασύζευξη είναι: $A_v = 100$, $R_i = 2 \text{ K}\Omega$ και $R_o = 5 \text{ K}\Omega$.



Σχήμα 2.4. Πρακτικός ενισχυτής με ανασύζευξη τάσης

Να βρεθούν οι παράμετροι του κυκλώματος με ανασύζευξη.

Λύση

Με βάση την Εξ.(2.3.1) και ο διαιρέτης τάσης στη γραμμή ανασύζευξης, ο συντελεστής ανασύζευξης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{V_f}{V_0} = \frac{R_{10}}{R_{10} + R_9} = \frac{100}{100 + 2200} = 0.0435$$

Επομένως,

$$1 + \beta_v A_v = 1 + 0.0435 \times 100 = 5.35$$

Συνεπώς, σύμφωνα με τις Εξ.(2.3.4) και (2.3.9), οι παράμετροι του κυκλώματος με ανασύζευξη θα είναι:

$$A_{vf} = \frac{100}{5.35} \cong 18.7$$

$$R_{if} = 2 \times 5.35 = 10.7 \text{ K}\Omega$$

$$R_{of} = \frac{5}{5.35} = 0.935 \text{ K}\Omega = 935 \Omega$$

Παρατηρούμε ότι, με $A_{vf} = 18.7$ πλησιάζουμε πολύ την προσεγγιστική τιμή που θα αναμέναμε από την Εξ.(2.3.5), η οποία μας δίνει:

$$A_{vf} \cong \frac{1}{\beta_v} = \frac{1}{0.0435} \cong 23$$

Καλή προσέγγιση της πιο πάνω σχέσης θα είχαμε εάν το $\beta_v A_v$ ήταν μεγαλύτερο από 10.

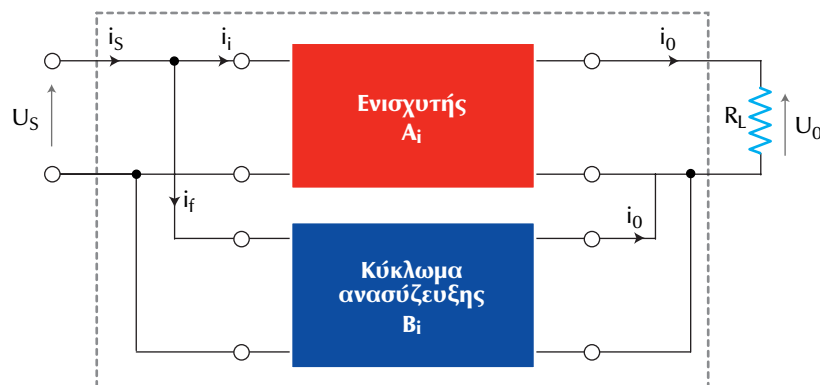
Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η αντίσταση εισόδου με ανασύζευξη R_{if} που υπολογίσαμε είναι η αντίσταση που “βλέπει” το κύκλωμα μετά τις αντιστάσεις R_1 και R_2 του Σχ.2.4. Για να υπολογισθεί η ολική αντίσταση εισόδου $R_{if(ολ)}$ με ανασύζευξη θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο παράλληλος συνδυασμός των R_1 και R_2 . Η αντίσταση εισόδου αυτή είναι εκείνη που “βλέπει” το κύκλωμα πριν από τις αντιστάσεις R_1 και R_2 .

Συνεπώς, η ολική αντίσταση εισόδου είναι ο παράλληλος συνδυασμός όλων των αντιστάσεων αυτών, δηλαδή:

$$R_{if(ολ)} = R_{if} // R_1 // R_2 \quad (2.3.10)$$

2.4 Ενισχυτές με ανασύζευξη ρεύματος

Αν θεωρήσουμε ότι στο κύκλωμα του Σχ.2.1 τα σήματα είναι ρεύματα (και όχι τάσεις) τότε το κύκλωμα αυτό παριστάνει ενισχυτή με ανασύζευξη ρεύματος, όπως δείχνει το Σχ.2.5. Για να έχουμε αρνητική ανασύζευξη ρεύματος, θα πρέπει το ρεύμα ανασύζευξης I_f που επιστρέφει από την έξοδο στην είσοδο να αφαιρείται από το ρεύμα εισόδου I_i (δηλ. να έχει διαφορά φάσης 180° ως προς αυτό). Αυτό εικονίζεται στο Σχ.2.5.



Σχήμα 2.5. Δομικό διάγραμμα ενισχυτή με ανασύζευξη ρεύματος

2.4.1 Απολαβή Ρεύματος με Ανασύζευξη

Όπως παρατηρούμε, το ρεύμα εξόδου I_o τροφοδοτεί, τόσο την αντίσταση φόρτου R_L όσο και το κύκλωμα ανασύζευξης.

Ορίζουμε ως **συντελεστή ή λόγο ανασύζευξης ρεύματος** β_i του κυκλώματος (ή δικτυώματος) ανασύζευξης το λόγο:

$$\beta_i = \frac{I_f}{I_o} \quad (2.4.1)$$

Από τη σχέση αυτή και το, Σχ.2.5, προκύπτει, ότι όταν το ρεύμα εξόδου I_o διέρχεται μέσα από το κύκλωμα ανασύζευξης, τότε το μέρος αυτού που φθάνει στην είσοδο του ενισχυτή είναι:

$$I_f = \beta_i I_o \quad (2.4.2)$$

Το ρεύμα αυτό, I_f , ονομάζεται **ρεύμα ανασύζευξης**.

Ορίζουμε ως **απολαβή ρεύματος** A_i του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη, με βραχυκυκλωμένη την έξοδο το λόγο:

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \quad (2.4.3)$$

Με ανάλογο τρόπο ορίζουμε και την απολαβή ρεύματος A_{if} του ενισχυτή με ανασύζευξη και βραχυκυκλωμένη την έξοδο:

$$A_{if} = \frac{I_o}{I_s} \quad (2.4.4)$$

Αποδεικνύεται ότι:

$$A_{if} = \frac{A_i}{1 + \beta_i A_i} \quad (2.4.5)$$

Η εξίσωση αυτή συνδέει την απολαβή ρεύματος με ανασύζευξη, με βραχυκυκλωμένη την έξοδο, με την απολαβή ρεύματος χωρίς ανασύζευξη με βραχυκυκλωμένη την έξοδο.

Επειδή στην πράξη ισχύει συνήθως $|\beta_i A_i| \gg 1$, μπορούμε να παραλείψουμε τη μονάδα στον παρονομαστή της Εξ.(2.4.5) και να έχουμε τη προσέγγιση:

$$A_{if} \cong \frac{1}{\beta_i} \quad (2.4.6)$$

Η Εξ.(2.4.6) είναι πολύ βασική, καθόσον εκφράζει το γεγονός ότι η απολαβή ρεύματος με ανασύζευξη με βραχυκυκλωμένη έξοδο μπορεί να γίνει ανεξάρτητη από τις παραμέτρους του ενισχυτή και να εξαρτάται μόνο από τα στοιχεία του κυκλώματος ανασύζευξης.

2.4.2 Αντίσταση Εισόδου

Η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή με ανασύζευξη ορίζεται από το λόγο της τάσης του σήματος εισόδου V_s προς το αντίστοιχο ρεύμα του σήματος εισόδου I_s , δηλαδή:

$$R_{if} = \frac{V_s}{I_s} \quad (2.4.7)$$

Αποδεικνύεται ότι η αντίσταση εισόδου με αρνητική ανασύζευξη δίνεται από τη σχέση:

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + \beta_i A_i} \quad (2.4.8)$$

Επειδή συνήθως $1 + \beta_i A_i \gg 1$, η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή με αρνητική ανασύζευξη είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση εισόδου του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη. Δηλαδή η αρνητική ανασύζευξη ρεύματος μπορεί να υποβιβάσει κατά πολύ την αντίσταση εισόδου του ενισχυτή.

2.4.3 Αντίσταση Εξόδου

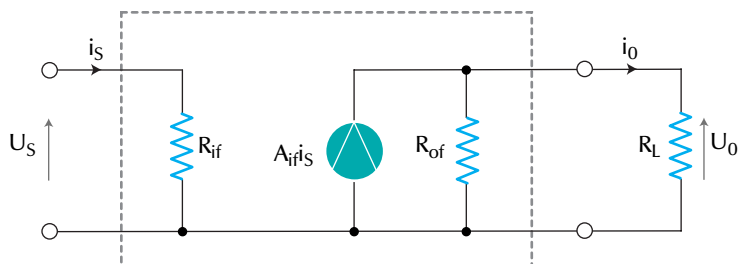
Η αντίσταση εξόδου του ενισχυτή με ανασύζευξη ορίζεται από το λόγο της τάσης εξόδου (ανοιχτής) προς το ρεύμα εξόδου (υπό βραχυκύκλωση). Αποδεικνύεται σχετικά ότι ισχύει η εξίσωση:

$$R_{of} = R_o (1 + \beta_i A_i) \quad (2.4.9)$$

Από την εξίσωση αυτή, συμπεραίνουμε ότι ο ενισχυτής με αρνητική ανασύζευξη έχει την αντίσταση εξόδου του αυξημένη κατά τον παράγοντα $(1 + \beta_i A_i)$, συγκριτικά με τον ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη.

2.4.4 Ισοδύναμο Κύκλωμα

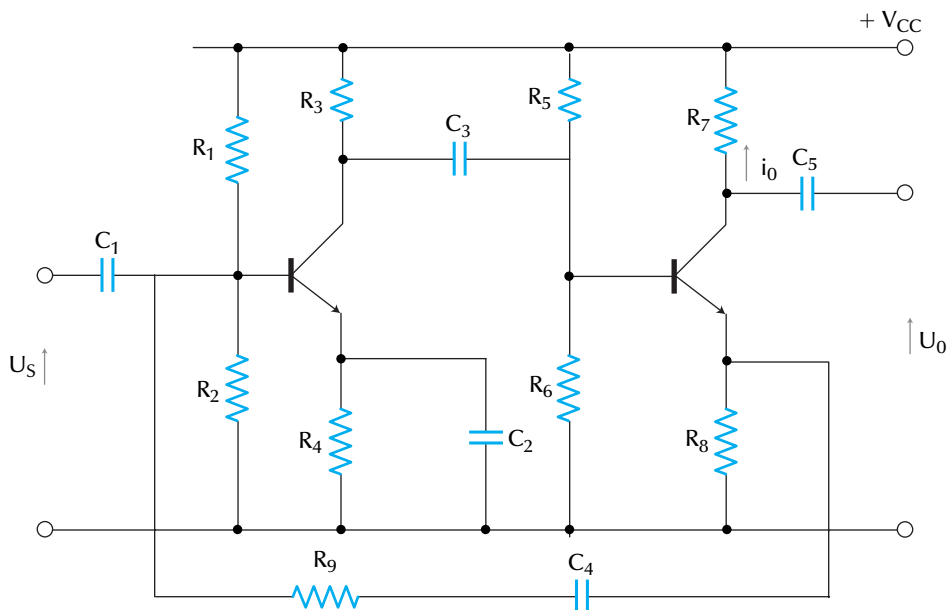
Το Σχ.2.6 δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή με ανασύζευξη ρεύματος. Όπως βλέπουμε, η έξοδος του αποτελείται από μια γεννήτρια/πηγή ρεύματος μαζί με την αντίσταση εξόδου με ανασύζευξη, ενώ η είσοδος αποτελείται από την αντίσταση εισόδου με ανασύζευξη.



Σχήμα 2.6. Ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή με ανασύζευξη ρεύματος

⇒ Παράδειγμα 2-2

Το Σχ.2.7 παριστάνει έναν πρακτικό ενισχυτή με ανασύζευξη ρεύματος. Οι παράμετροι του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη είναι: $A_i = 800$, $R_i = 1 \text{ K}\Omega$ και $R_o = 10 \text{ K}\Omega$. Το κύκλωμα ανασύζευξης έχει τα εξής στοιχεία: $R_8 = 220 \Omega$ και $R_9 = 4.7 \text{ K}\Omega$.



Σχήμα 2.7. Πρακτικός ενισχυτής με ανασύζευξη ρεύματος

Λύση

Με βάση την Εξ.(2.4.1) και το διαιρέτη ρεύματος του κυκλώματος ανασύζευξης, ο συντελεστής ανασύζευξης ρεύματος βρίσκεται από τη σχέση:

$$\beta_i \equiv \frac{R_8}{R_8 + R_9} = \frac{0.22}{0.22 + 4.7} = \frac{0.22}{4.92} = 0.045$$

Επομένως,

$$1 + \beta_i A_i = 1 + 0.045 \times 800 \approx 36.8$$

Άρα, σύμφωνα με τις Εξ.(2.4.5), (2.4.8) και (2.4.9), οι παράμετροι του ενισχυτή με ανασύζευξη θα είναι:

$$A_{if} = \frac{800}{36.8} \approx 21.8$$

$$R_{if} = \frac{1000}{36.8} \approx 27 \Omega$$

$$R_{of} \approx 10 \times 36.8 \approx 368 K\Omega$$

Παρατηρούμε ότι η προσέγγιση που έγινε στην Εξ.(2.4.6) για την απολαβή ρεύματος είναι αρκετά καλή για την παρούσα περίπτωση, γιατί εδώ το $\beta_i A_i$ είναι μεγαλύτερο από δέκα. Πράγματι, η τιμή $A_{if} = 21.8$ και η προσεγγιστική $A_{if} \approx 1 / \beta_i \approx 1 / 0.045 \approx 22.2$ διαφέρουν ελάχιστα.

Στο παράδειγμα αυτό παρατηρούμε επίσης ότι η απολαβή ρεύματος είναι ανεξάρτητη από τις παραμέτρους του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη, άρα των τρανζίστορ, και εξαρτάται μόνο από τις αντιστάσεις R_8 και R_9 , δηλαδή μόνο από το κύκλωμα ανασύζευξης.

Γενικά, όταν υπολογίζουμε τις παραμέτρους ενός ενισχυτή με ανασύζευξης, θα πρέπει να είμαστε προσεκτικοί. Έτσι, για να υπολογίσουμε τις παραμέτρους εισόδου, θα πρέπει το ρεύμα εξόδου να είναι μηδέν. Δηλαδή, το κύκλωμα στο δεύτερο εκπομπό (του δεύτερου τρανζίστορ) του Σχ.2.7 θα πρέπει να θεωρηθεί ανοικτό.

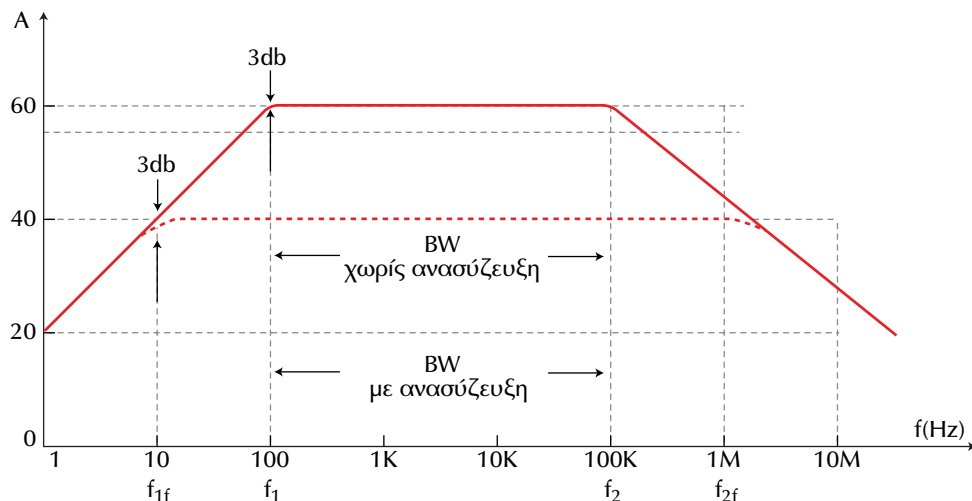
Αντίστοιχα, για να υπολογίσουμε τις παραμέτρους εξόδου, θα πρέπει το ρεύμα εισόδου να είναι μηδέν. Δηλαδή, το κύκλωμα στην πρώτη βάση (του πρώτου τρανζίστορ) πρέπει να θεωρηθεί ανοικτό. Με τον τρόπο αυτό, περιορίζεται η επίδραση του κυκλώματος ανασύζευξης. Συγχρόνως, όμως, στον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη τα στοιχεία που συνθέτουν το κύκλωμα αυτό.

2.5 Επίδραση της ανασύζευξης στην απόκριση συχνότητας

Διαπιστώσαμε μέχρι τώρα ότι η αρνητική ανασύζευξη σε έναν ενισχυτή μεταβάλλει την απολαβή (τάσης και ρεύματος), καθώς και τις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου. Εκτός αυτών, αποδεικνύεται ότι η αρνητική ανασύζευξη μεταβάλλει και την απόκριση συχνότητας του ενισχυτή.

Η μελέτη που γίνεται στη συνέχεια αναφέρεται γενικά στην απόκριση κατά συχνότητα χωρίς διάκριση. Δηλαδή, όταν πρόκειται για ενισχυτές με ανασύζευξη ρεύματος, αναφερόμαστε στην απόκριση ρεύματος. Όταν πρόκειται για ενισχυτές με ανασύζευξη τάσης, αναφερόμαστε στην απόκριση τάσης.

Για να βρούμε πως μεταβάλλεται η απόκριση κατά συχνότητα ενός ενισχυτή λόγω της αρνητικής ανασύζευξης, θεωρούμε τις δυο βασικές συχνότητες που χαρακτηρίζουν το κύκλωμα του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη. Οι δυο αυτές βασικές συχνότητες είναι αντίστοιχα η **κατώτερη συχνότητα αποκοπής** f_1 και η **ανώτερη συχνότητα αποκοπής** f_2 . Οι συχνότητες αυτές καθορίζονται από την καμπύλη απόκρισης του ενισχυτή και αντιστοιχούν σε απολαβή 3 dB μικρότερη από τη μέγιστη απολαβή (ή στο 0.707 της μέγιστης απολαβής), όπως φαίνεται στο Σχ.2.8.



Σχήμα 2.8. Επίδραση της αρνητικής ανασύζευξης στην απόκριση κατά συχνότητα

Αποδεικνύεται ότι αυτές οι συχνότητες αποκοπής, με ανασύζευξη και χωρίς ανασύζευξη, συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις:

$$f_{1f} = \frac{f_1}{1 + \beta A} \quad (2.5.1)$$

$$f_{2f} = f_2 (1 + \beta A) \quad (2.5.2)$$

Για απλούστευση στο συμβολισμό, έχουμε παραλείψει τους δείκτες i και v στις παραμέτρους β και A , όπου εξυπακούεται ότι θέτονται οι δείκτες αυτοί ανάλογα με το αν αναφερόμαστε σε ανασύζευξη ρεύματος ή τάσης.

Από τις Εξ.(2.5.1) και (2.5.2) συμπεραίνουμε ότι: **Η αρνητική ανασύζευξη επιφέρει μείωση της κατώτερης συχνότητας αποκοπής f_1 , ενώ επιφέρει αύξηση της ανώτερης συχνότητας αποκοπής f_2** , δηλαδή:

$$f_{1f} < f_1 \text{ και } f_{2f} > f_2 \text{ υπό τον όρο ότι } |\beta A| > 1$$

Ως **εύρος ζώνης διέλευσης**, BW ενός ενισχυτή ορίζεται η διαφορά των συχνοτήτων f_1 και f_2 (που αντιστοιχεί σε απολαβή 3 dB κάτω της μέγιστης απολαβής). Δηλαδή,

$$BW = f_2 - f_1 \cong f_2 \quad (2.5.3)$$

επειδή, $f_2 \gg f_1$

Όταν ο ενισχυτής έχει ανασύζευξη, το εύρος διέλευσης δίνεται από παρόμοια σχέση, δηλαδή:

$$BW_f = f_{2f} - f_{1f} \cong f_{2f} \quad (2.5.4)$$

επειδή, $f_{2f} \gg f_{1f}$

Από τις Εξ. (2.5.3) και (2.5.1), προκύπτει:

$$BW_f = BW (1 + \beta A) \quad (2.5.5)$$

Η εξίσωση αυτή συνδέει το εύρος της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων ενός ενισχυτή που λειτουργεί με ανασύζευξη, με το εύρος της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων του ίδιου ενισχυτή όταν λειτουργεί χωρίς ανασύζευξη. Από την εξίσωση αυτή παρατηρούμε ότι, **όταν ο ενισχυτής εργάζε-**

ται με αρνητική ανασύζευξη το εύρος της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων αυξάνεται κατά τον παράγοντα $(1 + \beta A_v)$. Άρα, όταν $|\beta A_v| > 1$, η αύξηση αυτή θα είναι σημαντική.

⇒ Παράδειγμα 2-3

Ένας ενισχυτής εργάζεται χωρίς ανασύζευξη και έχει απολαβή τάσης $A_v = 1000$. Για απολαβή κατά 3 dB μικρότερη της μεγίστης, οι συχνοτήτες αποκοπής είναι $f_1 = 100$ Hz και $f_2 = 100$ KHz. Ο ενισχυτής αυτός μετατρέπεται σε ενισχυτή με αρνητική ανασύζευξης με απολαβή ανασύζευξης 20 dB.

Να υπολογισθεί η απόκριση συχνότητας του ενισχυτή με ανασύζευξη.

Λύση

Η καμπύλη απόκρισης κατά συχνότητα φαίνεται στο Σχ.2.9. Από τα δεδομένα μας, για την απολαβή ανασύζευξης, έχουμε:

$$20\log(1 + \beta A_v) = 20$$

Άρα:

$$1 + \beta A_v = 10$$

Συνεπώς, η απολαβή του ενισχυτή με ανασύζευξη A_{vf} θα είναι:

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + \beta A_v} = \frac{1000}{10} = 100$$

Αν θέλουμε να μετατρέψουμε την τιμή αυτή του A_{vf} σε dB,, χρησιμοποιούμε την πιο κάτω σχέση:

$$A_{vf(dB)} = 20\log(A_{vf}) = 20\log(10^2) = 40 \text{ dB}$$

Οι δύο συχνοτήτες αποκοπής με ανασύζευξη θα είναι:

$$f_{1f} = \frac{f_1}{1 + \beta A_v} = \frac{100}{10} = 10 \text{ Hz}$$

$$f_{2f} = f_2(1 + \beta A_v) = 100 \times 10 = 1 \text{ MHz}$$

Άρα, το εύρος της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων με ανασύζευξη θα είναι:

$$BW_f \cong f_{2f} - f_{1f} = 1 \text{ MHz}$$

Παρατηρούμε ότι το εύρος διέλευσης συχνοτήτων, BW_i , με ανασύζευξη αυξήθηκε κατά 10 φορές, συγκριτικά με το εύρος BW χωρίς ανασύζευξη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τον ίδιο παράγοντα (δηλ. 10) ελαττώθηκε η απολαβή του ενισχυτή με ανασύζευξη, συγκριτικά με την απολαβή χωρίς ανασύζευξη. Η πιο πάνω ανάλυση φαίνεται στο Σχ.2.8.

2.6 Ενισχυτής με ανασύζευξη σειράς

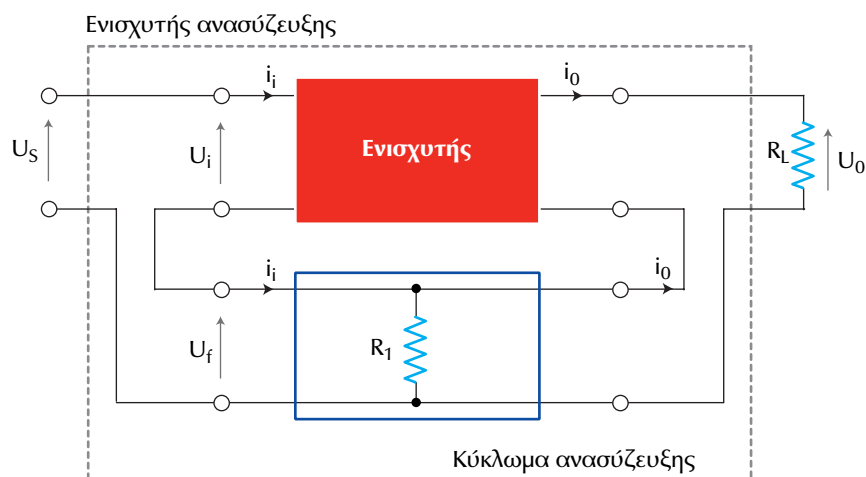
Το Σχ.2.9 απεικονίζει το δομικό διάγραμμα ενός ενισχυτή με ανασύζευξη σειράς. Ο ενισχυτής με ανασύζευξη σειράς μεταβάλλει την ενεργό διαγωγιμότητα του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$G_{mf} = \frac{G_m}{1 + \beta_m G_m} \quad (2.6.1)$$

όπου: G_{mf} και G_m είναι αντίστοιχα οι διαγωγιμότητες με ανασύζευξη σειράς και χωρίς ανασύζευξη. Υπενθυμίζουμε ότι η διαγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της αντίστασης και μετράται σε S (Ζίμενς) ή σε mS (ή mho ή mmho).

Ο συντελεστής ανασύζευξης ορίζεται από τη σχέση:

$$\beta_m = \frac{V_f}{I_0} \quad (2.6.2)$$

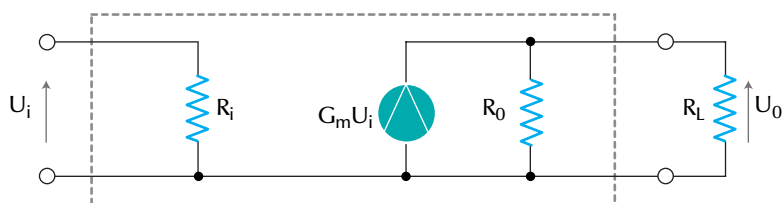


Σχήμα 2.9. Δομικό διάγραμμα ενισχυτή με ανασύζευξη σειράς

Όπου τα V_i και I_o συμβολίζουν αντίστοιχα την τάση ανασύζευξης σειράς και το ρεύμα εξόδου. Το β_m έχει διαστάσεις αντίστασης και μετρείται σε Ω .

Γενικά, στον ενισχυτή ανασύζευξης σειράς, το ρεύμα εξόδου συναθροίζεται και αφήνεται να επιστρέψει στην είσοδο του ενισχυτή αφού μετατραπεί σε τάση με τη βοήθεια της αντίστασης ανατροφοδότησης R . Για το λόγο αυτό, η συνδεσμολογία αυτή λέγεται και ενισχυτής ανασύζευξης σειράς.

Στο Σχ.2.10 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ.2.9.



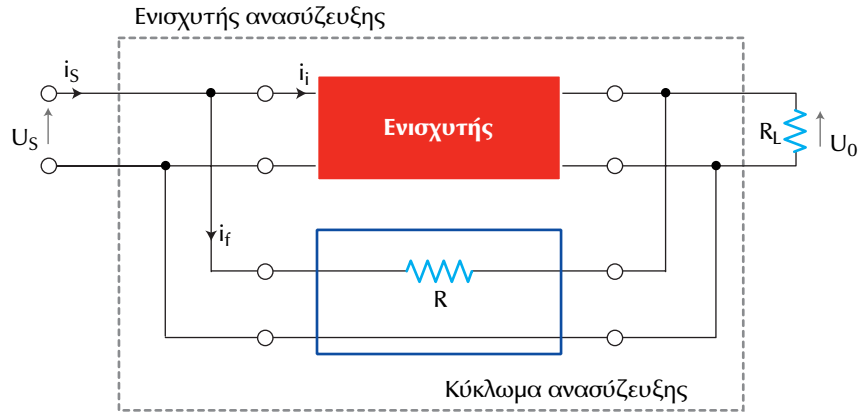
Σχήμα 2.10. Ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 2.9.

Με την ολοκλήρωση της μελέτης για τους περισσότερους τύπους ανασύζευξης ενός ενισχυτή, παραθέτουμε το συνοπτικό **Πίνακα Π2.1**. Ο πίνακας αυτός μας βοηθάει για τη σύγκριση μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων για ανασύζευξη διαφόρων τύπων.

2.7 Ενισχυτής ανασύζευξης παράλληλης διακλάδωσης

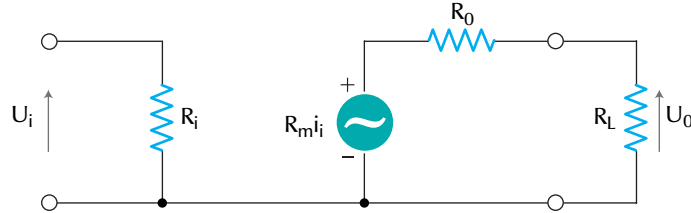
Το Σχ.2.11 απεικονίζει το δομικό διάγραμμα ενισχυτή με ανασύζευξη παράλληλης διακλάδωσης.

Η τάση εξόδου του συναθροίζεται με το κύκλωμα ανασύζευξης και επιστρέφει στην είσοδο υπό μορφή ρεύματος.



Σχήμα 2.11. Δομικό διάγραμμα ενισχυτή με αρνητική ανασύζευξη παράλληλης διακλάδωσης

Μπορούμε να σχεδιάσουμε τον ενισχυτή αυτόν με ανασύζευξη παράλληλης διακλάδωσης, με τη μορφή ενός ενισχυτή διαντίστασης, όπως φαίνεται στο Σχ.2.12.



Σχήμα 2.12. Ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή του Σχ.2.12.

Ο όρος *διαντίσταση* εκφράζει το λόγο της τάσης εξόδου V_0 προς το ρεύμα εισόδου I_i υποδηλώνει και την εσωτερική αντίσταση μέσω του ενισχυτή. Η διαντίσταση είναι ίση με το αντίστροφο της διαγωγιμότητας και μετρείται σε Ω .

Στην περίπτωση που ο ενισχυτής εργάζεται με ανασύζευξη παράλληλης διακλάδωσης, η διαντίστασή του R_{mf} , δίνεται από την πιο κάτω σχέση:

$$R_{mf} = \frac{R_m}{1 + \beta_f R_m} \quad (2.7.1)$$

όπου R_m είναι η διαντίσταση του ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη.

Ο συντελεστής ανασύζευξης παράλληλης διακλάδωσης β_r ορίζεται από τη σχέση:

$$\beta_r = \frac{I_f}{V_0} \quad (2.7.2)$$

Ο συντελεστής αυτός μετρείται σε S ή mS.

2.8 Βελτίωση της παραμόρφωσης

Η αρνητική ανασύζευξη στους ενισχυτές έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της παραμόρφωσης λόγω μη γραμμικότητας. Συγκεκριμένα, η ανασύζευξη συμβάλλει στη μείωση του πλάτους των παραμορφωτικών συνιστωσών του παραγομένου σήματος.

Αν συμβολίσουμε με D_f και D τα σχετικά πλάτη των παραμορφωτικών σημάτων με ανασύζευξη και χωρίς ανασύζευξη, τότε η σχέση που τα συνδέει είναι η εξής:

$$D_f = \frac{D}{1 + \beta A} \quad (2.8.1)$$

όπου τα β και A αναφέρονται σε ανασύζευξη τάσης. Επειδή $1 + \beta A > 1$, έπεται ότι $D_f < D$.

Άρα, με την ανασύζευξη υποβιβάζονται όλες οι συνιστώσες παραμόρφωσης.

Γενικά, σε κάθε ενισχυτή με ανασύζευξη, επειδή μέρος του σήματος εξόδου επιστρέφει στην είσοδο του ενισχυτή, το πλάτος του σήματος εξόδου είναι μικρότερο από εκείνο που θα υπήρχε χωρίς ανασύζευξη. Αυτό έχει σαν συνέπεια, οι συνιστώσες παραμόρφωσης καθώς και οι θόρυβοι που παράγονται στα κυκλώματα του ενισχυτή να υφίστανται μείωση στο πλάτος τους όταν ο ενισχυτής εργάζεται με ανασύζευξη. Αυτό άλλωστε φανερώνει και η Εξ.(2.8.1).

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΝΑΣΥΖΕΥΞΕΩΝ

Πίνακας Π2.1

Εξισώσεις ενισχυτή με διάφορους τύπους ανασύζευξης.

Τύπος Ανασύζευξης	A_{vf} (ανοικτού κυκλώματος)	A_{if} (βραχυκυκλω μένου)	R_{if}	R_{of}
Τάσης (Σχ.2.2)	$\frac{A_v}{1 + \beta_v A_v}$	A_i	$R_i (1 + \beta_v A_v)$	$\frac{R_0}{1 + \beta_v A_v}$
Ρεύματος (Σχ.2.5)	A_v	$\frac{A_i}{1 + \beta_i A_i}$	$\frac{R_i}{1 + \beta_i A_i}$	$R_0 (1 + \beta_i A_i)$
Σειράς (Σχ.2.9)	$\sim -\frac{R_i^*}{R_m}$	A_i	$R_i + R_m (1 - A_v)$	$R_0 + R_m (1 - A_i)$
Παράλληλης Διακλάδωσης A_v (Σχ.2.12)	$\sim -\frac{R_i^+}{R_m}$	$\frac{R_m}{1 - A_v} // R_i$	$R_i // \frac{A_v R_m}{A_v - 1}$	

* Για $A_v R_m \gg (R_0 + R_i)$ + Για $A_i \gg \left(1 - \frac{R_i}{R_m}\right)$

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

- 2.1** Τί είναι αρνητική και τι θετική ανασύζευξη;
- 2.2** Τι είδος ανασύζευξης χρησιμοποιούμε στους ενισχυτές; Ποιος είναι ο λόγος;
- 2.3** Ποια η επίδραση της αρνητικής ανασύζευξης στη σταθερότητα της απολαβής ενός ενισχυτή;
- 2.4** Ποια είναι η επίδραση της αρνητικής ανασύζευξης στο εύρος της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων του ενισχυτή;
- 2.5** Ποια είναι η επίδραση της αρνητικής ανασύζευξης στην παραμόρφωση λόγω μη γραμμικότητας και στο θόρυβο;
- 2.6** Σε ένα κύκλωμα αρνητικής ανασύζευξης τάσης, εξηγήστε τον τρόπο με τον οποίο η απολαβή τάσης μπορεί να σταθεροποιηθεί ως προς τις μεταβολές των παραμέτρων του τρανζίστορ.

- 2.7** Ποια η επίδραση της αρνητικής ανασύζευξης τάσης στις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου;
- 2.8** Σε ένα κύκλωμα ανασύζευξης ρεύματος, εξηγήστε τον τρόπο με τον οποίο η απολαβή ρεύματος μπορεί να σταθεροποιηθεί ως προς τις μεταβολές των παραμέτρων του τρανζίστορ.
- 2.9** Ποια είναι η επίδραση της αρνητικής ανασύζευξης ρεύματος στις αντιστάσεις εισόδου και εξόδου του ενισχυτή;
- 2.10** Ποια είναι η επίδραση της αρνητικής ανασύζευξης στην απόκριση συχνοτήτων του ενισχυτή;
- 2.11** Ποιο μέγεθος του ενισχυτή μεταβάλλει η ανασύζευξη παράλληλης διακλάδωσης;
- 2.12** Ποιο μέγεθος του ενισχυτή μεταβάλλει η ανασύζευξη σειράς;
- 2.13** Ποια είναι τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα του ενισχυτή με αρνητική ανασύζευξη, σε σύγκριση με τον ίδιο ενισχυτή χωρίς ανασύζευξη;