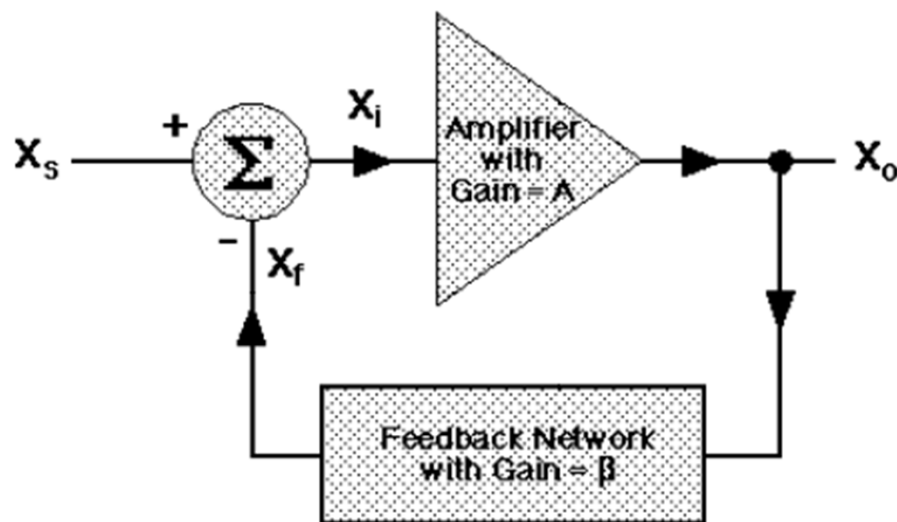


# Γενικά χαρακτηριστικά ανάδρασης

- ✓ Κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα, για το οποίο η δυναμική συμπεριφορά καθορίζεται από κάποιας μορφή σχέση μεταξύ εισόδου (διέγερση) και εξόδου (απόκριση), είναι **επιθυμητό η συμπεριφορά αυτή να είναι σταθερή και προβλέψιμη** (ανεξάρτητα μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας)
- ✓ *Γιατί να μεταβάλλεται η συμπεριφορά ενός κυκλώματος?* Πολλοί λόγοι (φθορά εξαρτημάτων, θερμοκρασιακές μεταβολές κ.λ.π)
- ✓ Οι ανωτέρω παράγοντες είναι μη προβλέψιμοι (**Πρόβλημα**).
- ✓ Πρέπει λοιπόν τα κυκλώματα να έχουν κάποια δυνατότητα αυτορρύθμισης, έτσι ώστε να παραμένουν όσο το δυνατόν εντός των προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας
- ✓ *Πως θα γίνει αυτό?* Λαμβάνοντας μέρος του σήματος εξόδου και ανατροφοδοτώντας το στην έξοδο (ώστε να αντισταθμίζει τις μεταβολές)
- ✓ Δύο τρόποι ανατροφοδότησης : θετική (π.χ. ταλαντωτές) και αρνητική (π.χ. ενισχυτές)

# Γενικά στοιχεία Ανάδρασης



$A$  απολαβή ενισχυτή ανοιχτού βρόγχου  
 $\beta$  συντελεστής ανάδρασης (ή  $f$ )  
 $x_s$  σήμα πηγής  
 $x_o$  σήμα εξόδου  
 $x_f$  σήμα ανάδρασης  
 $x_i$  σήμα εισόδου στον ενισχυτή (ή *error signal*)

$$x_f = \beta x_o$$

$$x_o = A(x_s - x_f)$$

$$x_i = x_s - x_f$$

$$x_o = A x_s - A(\beta x_o)$$

$$x_o = A x_i$$

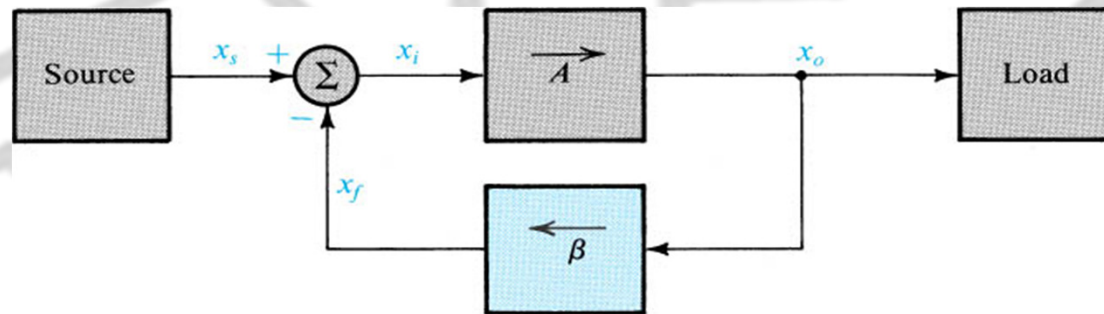
$$(1 + A\beta) x_o = A x_s$$

$$A_f \equiv \frac{x_o}{x_s} = \frac{A}{1 + \beta A}$$

$A\beta$  Κέρδος (απολαβή) βρόγχου

Για να είναι η ανάδραση αρνητική, πρέπει το  $A\beta > 0$  (το  $x_f$  να έχει το ίδιο πρόσημο  $x_s$  και να δίνει μετά την αφαίρεση μικρότερο  $x_i$ ). Στην περίπτωση αυτή το κέρδος του ενισχυτή με ανάδραση είναι μικρότερο του κέρδους χωρίς ανάδραση. Η μείωση αυτή ισούται με  $1 + A\beta$  (**ποσό ανάδρασης ή επιστρεφόμενη ποσότητα ή χαρακτηριστικό πολυώνυμο βρόγχου ανάδρασης ή παράγοντας ανάδρασης**)

## Γενικά στοιχεία Ανάδρασης (συν)



Είναι σύνηθες να ισχύει  $A\beta \gg 1$  που μας δίνει  $A_f = \frac{A}{1+A\beta} \cong \frac{1}{\beta}$  **ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ**

Σε αυτή την περίπτωση, το κέρδος του ενισχυτή καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από το δίκτυο ανάδρασης.

Στην πράξη, το δίκτυο ανάδρασης αποτελείται από παθητικά στοιχεία (άρα ακριβείς τιμές).

Συνεπώς, το συνολικό κέρδος (ή κέρδος κλειστού βρόγχου) εφόσον καθορίζεται από το κέρδος του δικτύου ανάδρασης, θα είναι εξαιρετικά σταθερό και ακριβές (ή αλλιώς, οι μεταβολές του κέρδους  $A$  του βασικού ενισχυτή, το οποίο είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, λίγη επιρροή θα έχουν στο συνολικό κέρδος)

Συνδυάζοντας τις προηγούμενες εξισώσεις, το σήμα ανάδρασης είναι  $x_f = \frac{A\beta}{1+A\beta} x_s$

Για την περίπτωση που  $A\beta \gg 1$ , έχουμε  $x_f \approx x_s$ , άρα  $x_i \approx 0$ . (δηλαδή αν εφαρμόσουμε μεγάλο ποσό αρνητικής ανάδρασης, το σήμα ανάδρασης γίνεται σχεδόν πανομοιότυπο αντίγραφο με το σήμα πηγής)

# Ιδιότητες Αρνητικής Ανάδρασης

## 1. Αποευαισθητοποίηση κέρδους.

Η τιμή του κέρδους γίνεται λιγότερο ευαίσθητη στις μεταβολές των τιμών των κυκλωματικών στοιχείων (π.χ θερμοκρασιακές αλλαγές)

## 2. Αύξηση του εύρους ζώνης του βασικού ενισχυτή

## 3. Μείωση της μη γραμμικής παραμόρφωσης.

Η έξοδος γίνεται ανάλογη της εισόδου (αρα το κέρδος γίνεται σταθερό και ανεξάρτητο από το επίπεδο του σήματος)

## 4. Μείωση του θορύβου.

Ελαχιστοποιείται (δεν εξαλείφεται) η επίδραση στην έξοδο μη επιθυμητών σημάτων που μπορεί να προέρχονται είτε από τα στοιχεία του κυκλώματος είτε/και από εξωτερικές παρεμβολές. Στην ουσία αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο

## 5. Έλεγχος αντιστάσεων εισόδου-εξόδου

## Αποευαισθητοποίηση κέρδους

- Η ανάδραση μπορεί να αποευαισθητοποιήσει την απολαβή κλειστού βρόγχου από μεταβολές της του βασικού ενισχυτή.
- Θεωρούμε  $\beta$  σταθερό. Λαμβάνοντας το διαφορικό της εξίσωσης απολαβής κλειστού βρόγχου, έχουμε

$$A_f = \frac{A}{1 + A\beta} \quad \xrightarrow{\text{Διαφορικό συναρτήσεως του A}} \quad \frac{dA_f}{dA} = \frac{1}{(1 + A\beta)^2} \quad \text{ή} \quad dA_f = \frac{dA}{(1 + A\beta)^2}$$

- Διαιρώντας κατά μέλη με  $A_f$ , έχω για την ευαισθησία κέρδους κλειστού βρόγχου

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA}{(1 + A\beta)^2} \frac{(1 + A\beta)}{A} = \frac{1}{1 + A\beta} \frac{dA}{A}$$

- Αυτό μας δείχνει ότι **το ποσοστό μεταβολής της  $A_f$  είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την ποσότητα  $(1 + A\beta)$** , γεγονός που ερμηνεύεται ότι η ανάδραση περιορίζει τη μεταβολή της ενίσχυσης
- *Π.χ για  $A = 10000V/V$  και  $\beta = 0.1V/V$ , μία αλλαγή στην απολαβή ανοιχτού βρόγχου κατά 10% ( $dA/A = 10\%$ ), επιφέρει  $dA_f/A_f = 0.01\%$*

## Επέκταση εύρους ζώνης

Έστω ενισχυτής του οποίου η απόκριση υψηλών συχνοτήτων χαρακτηρίζεται από έναν πόλο. Το κέρδος του για μεσαίες-υψηλές συχνότητες μπορεί να γραφεί ως

$$A(s) = \frac{A_M}{1 + s/\omega_H}$$

Η εφαρμογή αρνητικής ανάδρασης δίδει

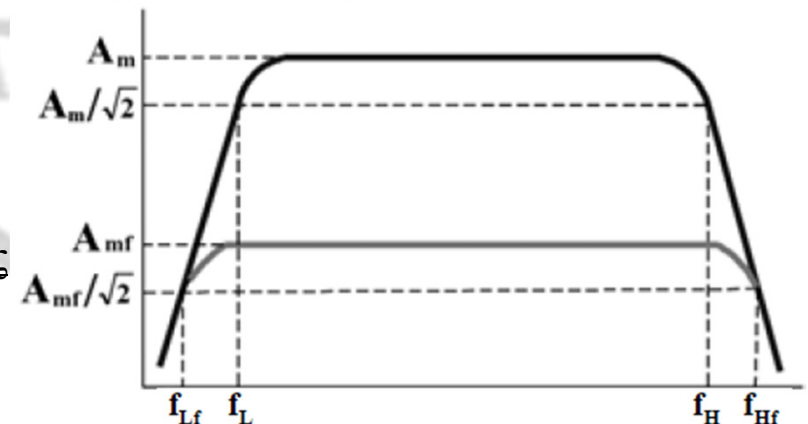
$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)\beta} = \frac{\frac{A_M}{1 + s/\omega_H}}{1 + \frac{\beta A_M}{1 + s/\omega_H}} = \frac{A_M}{1 + \beta A_M + s/\omega_H} = \frac{A_M/(1 + A_M\beta)}{1 + s/\omega_H(1 + A_M\beta)}$$

Επομένως, ο ενισχυτής με ανάδραση θα έχει κέρδος ζώνης ίσο με  $A_M/(1 + A_M\beta)$  και ανώτερη συχνότητα αποκοπής  $\omega_{Hf} = \omega_H(1 + A_M\beta)$

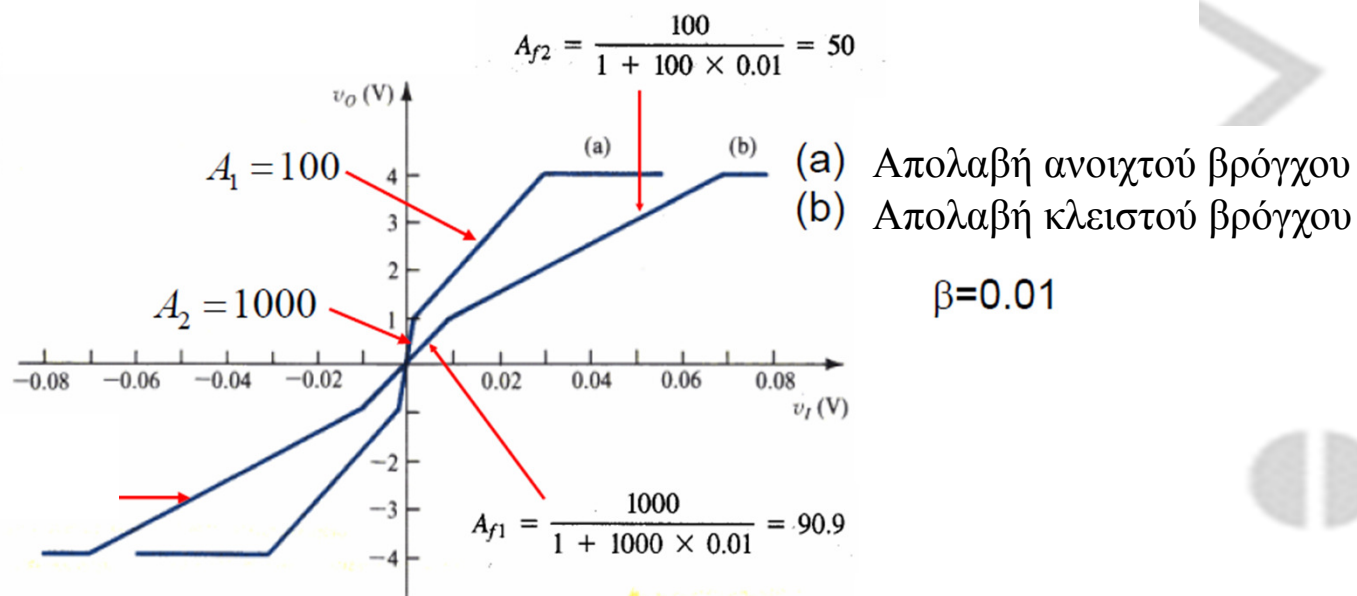
Παρόμοια αποδεικνύεται, για την κατώτερη συχνότητα

αποκοπής ότι ισχύει:  $\omega_{Lf} = \omega_L/(1 + A_M\beta)$

Άρα το εύρος ζώνης με ανάδραση αυξάνεται κατά το ίδιο παράγοντα κατά τον οποίο μειώνεται το κέρδος μέσης ζώνης διατηρώντας το γινόμενο κέρδους-ευρους ζώνης σταθερό



# Μείωση μη γραμμικής παραμόρφωσης



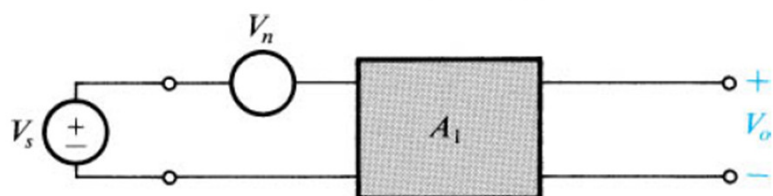
a) τμηματικά γραμμική : κέρδος  $1000 \rightarrow 100 \rightarrow 0$

b) τμηματικά γραμμική : κέρδος  $90.9 \rightarrow 50 \rightarrow 0$

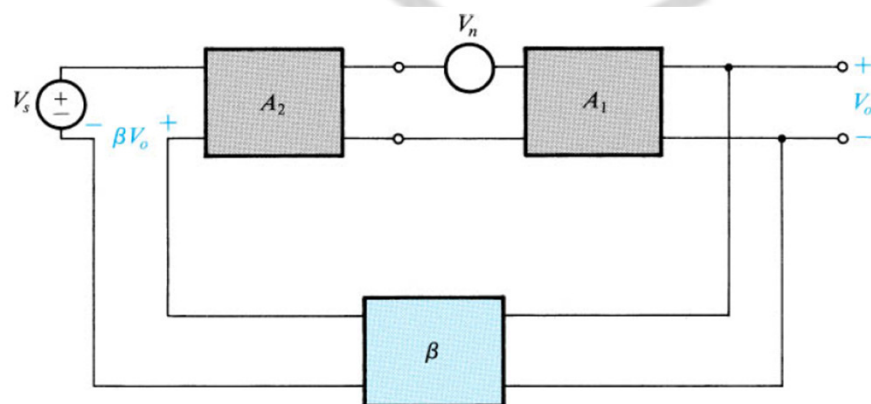
Με χρήση αρνητικής ανάδρασης η αλλαγή στην τάξη μεγέθους της κλίσης έχει μειωθεί σημαντικά.

Τι πληρώνουμε? ΜΕΙΩΣΗ στο συνολικό κέρδος  $\rightarrow$  Απαραίτητη η χρήση προενισχυτή

## Μείωση θορύβου



$$\frac{S}{N} = \frac{V_s}{V_n}$$



$$V_o = V_s \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} + V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}$$

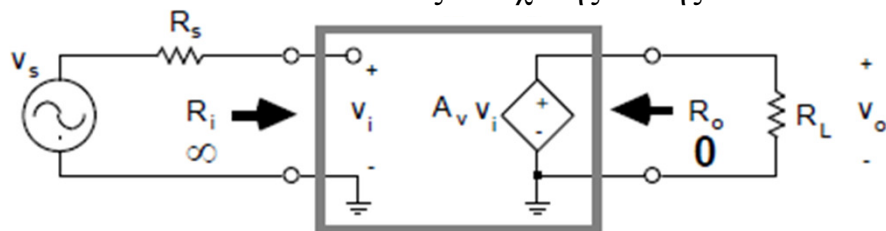
$$\left( \frac{S}{N} \right)_{feedback} = \frac{V_s \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta}}{V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}} = \frac{V_s}{V_n} A_2$$

Η βελτίωση του  $S/N$  κατά  $A_2$  φορές είναι εφικτή μόνο αν συνδέσουμε ένα (σχετικά) ελεύθερο από θόρυβο στάδιο πριν το θορυβώδες.

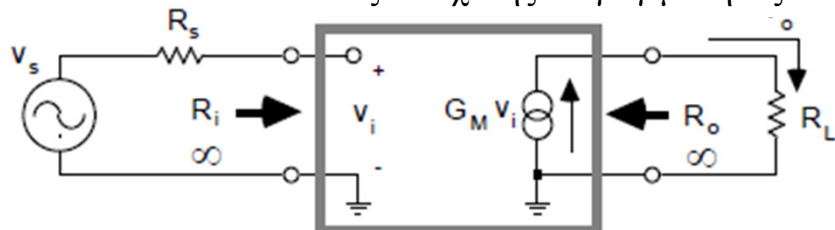
**Π.χ.** διαδοχικά στάδια σε ενισχυτές  $AF$ : Το τελικό στάδιο έχει μεγάλη απολαβή ισχύος αλλά μικρή απολαβή τάσης. Ο θόρυβος δημιουργείται κυρίως από τα μεγάλα ρεύματα που «τραβά» από το τροφοδοτικό καθώς και από το συμβιβασμό που κάνουμε (λόγω κόστους) για τέλειο φιλτράρισμα. Εισάγουμε πιο πριν, ενισχυτή ασθενούς σήματος (προενισχυτή) με μεγάλο κέρδος τάσης και εφαρμόζοντας υψηλό ποσό αρνητικής ανάδρασης επαναφέρουμε το κέρδος στην αρχική του τιμή. Αν ο προενισχυτής δεν παρουσιάζει πρόβλημα θορύβου, ο θόρυβος στην έξοδο θα μειωθεί κατά το ποσό του κέρδους τάσης του προενισχυτή

# ΥΠΕΝΘΥΜΙΣΗ : Τύποι ενισχυτών

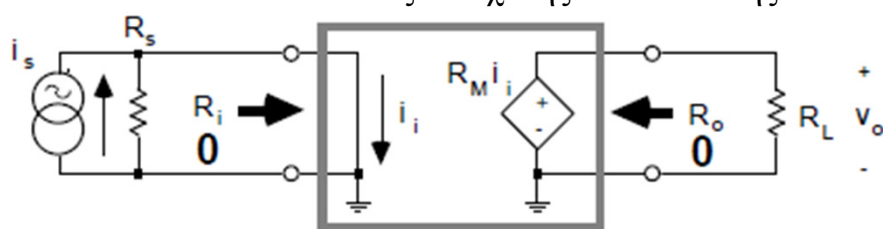
Ιδανικός ενισχυτής Τάσης



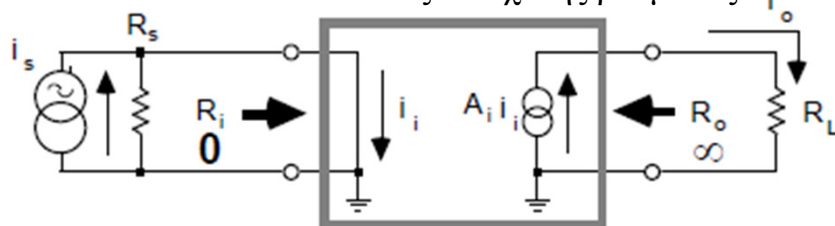
Ιδανικός ενισχυτής διαγωγιμότητας



Ιδανικός ενισχυτής διαντίστασης



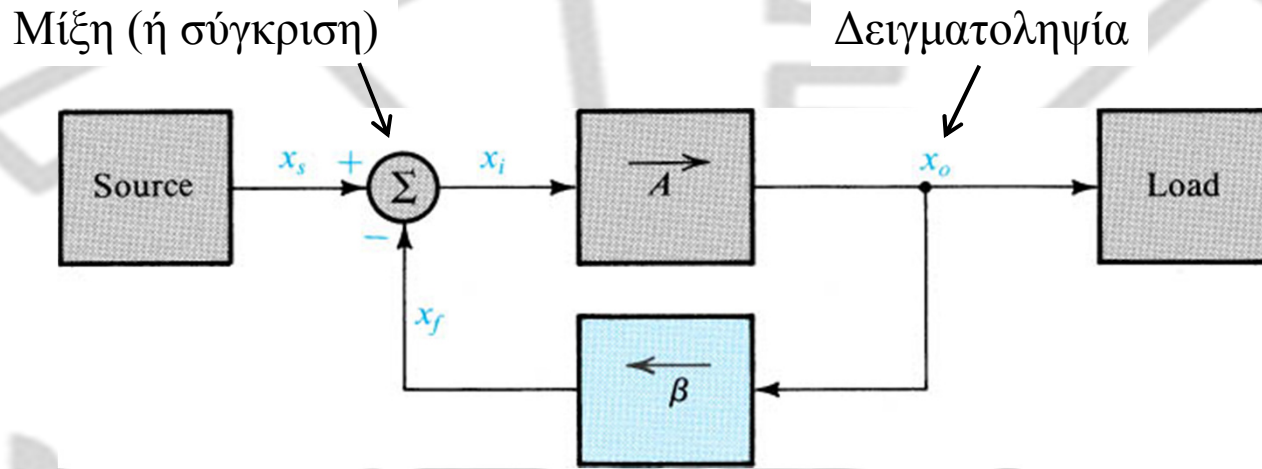
Ιδανικός ενισχυτής ρεύματος



Είσοδος	Έξοδος	Τύπος Ενισχυτή	Απολαβή
τάση	τάση	Τάσης	$A_V = v_o/v_s$
Τάση	Ρεύμα	Διαγωγιμότητας	$G_m = i_o/v_s$
Ρεύμα	τάση	Διαντίστασης	$R_m = v_o/i_s$
Ρεύμα	Ρεύμα	Ρεύματος	$A_i = i_o/i_s$

Η διάκριση αυτή είναι σημαντική γιατί ο τύπος ανάδρασης που θα χρησιμοποιηθεί με κάθε τοπολογία ενισχυτή είναι ξεχωριστός και η ανάλυση γίνεται στις «φυσικές» μονάδες ρεύματος ή τάσης για την είσοδο και την έξοδο

# Βασική διάταξη ανάδρασης

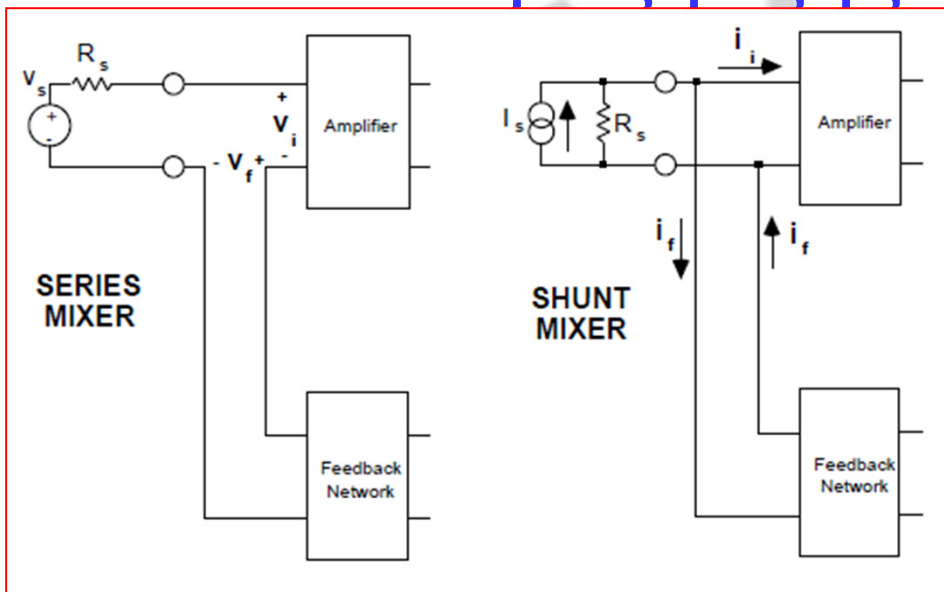


## ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ (που κάναμε ήδη)

- ✓ η πηγή, το φορτίο και το δίκτυο ανάδρασης δεν φορτώνουν τον βασικό ενισχυτή (αρα το κέρδος  $A$  είναι ανεξάρτητο από αυτά τα τρία δίκτυα)
- ✓ Η μετάδοση του σήματος από είσοδο  $\rightarrow$  έξοδο γίνεται αποκλειστικά από τον βασικό ενισχυτή
- ✓ Η μετάδοση του σήματος από έξοδο  $\rightarrow$  είσοδο γίνεται αποκλειστικά από το δίκτυο ανάδρασης

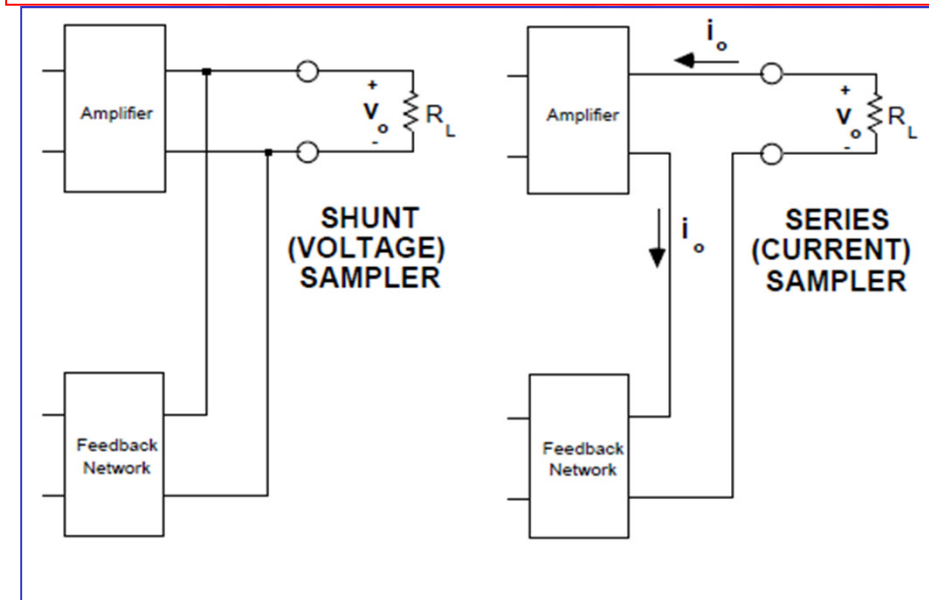
$x$ : σήμα τάσης ή σήμα ρεύματος (άρα μπορούμε να έχουμε σύγκριση τάσης ή ρεύματος και δειγματοληψία τάσης ή ρεύματος)

# Τοπολογίες μίξης - δειγματοληψίας



Ονοματίζουμε κάθε ενισχυτή με ανάδραση ανάλογα με τον τύπο μίξης και δειγματοληψίας (σε σειρά ή παράλληλα – series or shunt)

Μίξη	Δειγματοληψία	Τοπολογία
$X_s, X_f$ : τάσεις	$X_o$ : τάση	Σειρά-Παράλληλα (V-V)
$X_s, X_f$ : ρεύματα	$X_o$ : ρεύμα	Παράλληλα-Σειρά (I-I)
$X_s, X_f$ : τάσεις	$X_o$ : ρεύμα	Σειρά- Σειρά (V-I)
$X_s, X_f$ : ρεύματα	$X_o$ : τάση	Παράλληλα- Παράλληλα (I-V)

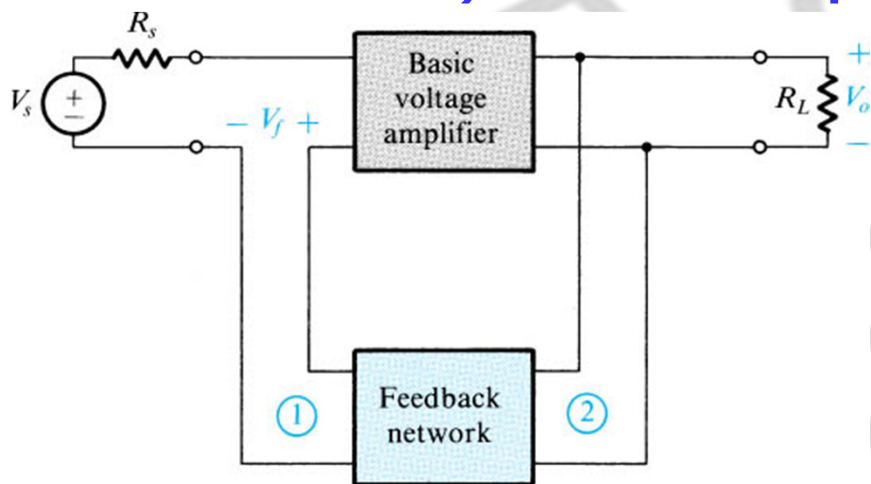


Η επίδραση της ανάδρασης στις αντιστάσεις εισόδου – εξόδου είναι συνάρτηση μίξης και δειγματοληψίας: αν βάλω κάτι σε σειρά με την είσοδο → αυξάνω αντίσταση, αν το βάλω παράλληλα → μειώνω αντίσταση (αντίστοιχα και στην έξοδο)

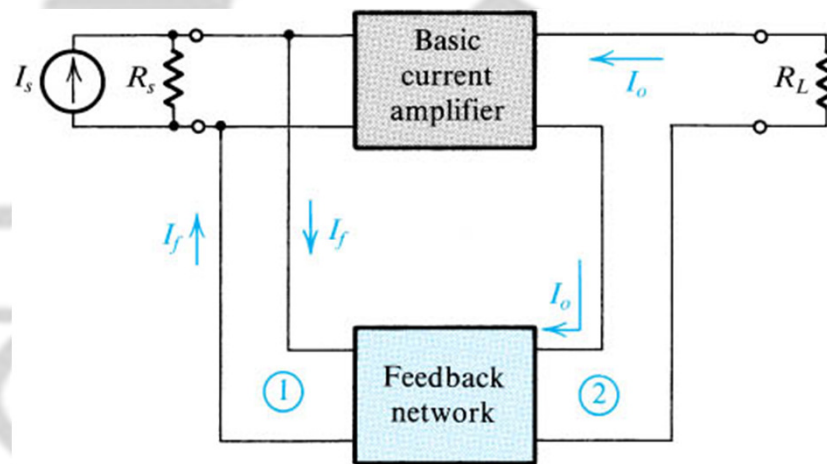
## Βασικές τοπολογίες ανάδρασης

- ✓ Το σήματα εισόδου εξόδου μπορεί να είναι τάσεις ή ρεύματα
- ✓ Το σήμα ανατροφοδότησης σε έναν ενισχυτή μπορεί να είναι προς την τάση ή το ρεύμα εξόδου και να εφαρμόζεται σε σειρά ή εν παραλλήλω με την πηγή σήματος εισόδου
- ✓ Υπάρχουν 4 περιπτώσεις (τοπολογίες) ανάδρασης ανάλογα με τον τρόπο που κάνουμε δειγματοληψία εξόδου και μίξη (σύγκριση) εισόδου : ανατροφοδότηση τάσης σε σειρά (σειράς-παράλληλα) ή παράλληλα (παράλληλα-παράλληλα) με την πηγή σήματος εισόδου και ανατροφοδότηση ρεύματος σε σειρά (σειράς-σειράς) ή παράλληλα (παράλληλα-σειράς) με την πηγή σήματος εισόδου
- ✓ Σε κάθε τοπολογία το κέρδος κλειστού βρόγχου είναι μικρότερο από το κέρδος ανοιχτού βρόγχου ενώ οι αντιστάσεις εισόδου και εξόδου αυξομειώνονται ανάλογα με την περίπτωση
- ✓ Κάθε τοπολογία εξετάζεται ως ισοδύναμο κύκλωμα χωρίς ανατροφοδότηση με πρόσθετη πηγή (ελεγχόμενη από την έξοδο) τάση ή ρεύματος στην είσοδο

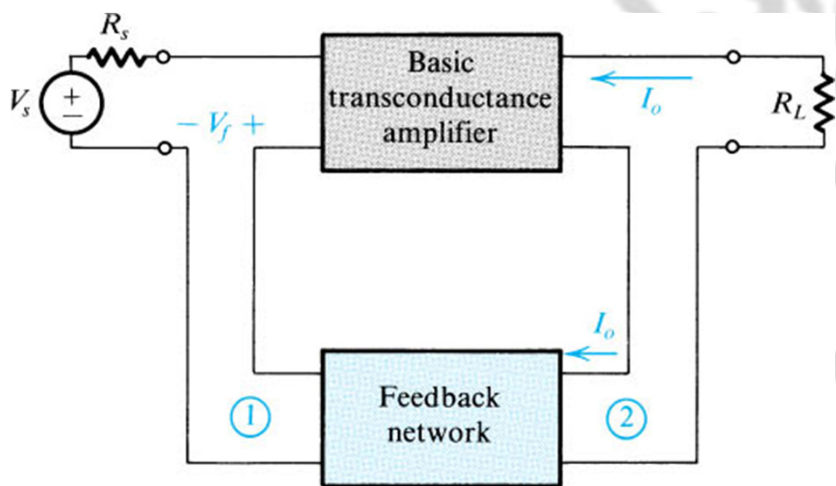
# Βασικές τοπολογίες ανάδρασης (συν)



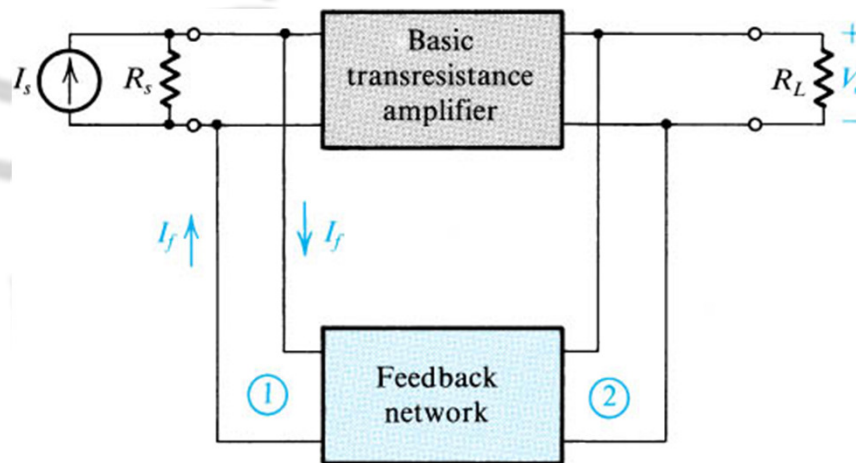
(a)



(b)



(c)



(d)

Και φυσικά...



Καλές γιορτές