# Μοντέλα Ενεργών Κυκλωμάτων

- ***Ενεργό κύκλωμα*** → Ένα δικτύωμα που περιέχει παθητικά και **ενεργά κυκλωματικά στοιχεία.**
  - **Παθητικά στοιχεία** → Μόνο καταναλώνουν ενέργεια ή αποθηκεύουν ενέργεια. Δεν απαιτούν τροφοδοσία για να λειτουργήσουν. Δεν έχουν τη δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος.
  - **Ενεργά στοιχεία** → Στοιχεία που είναι ικανά να παρέχουν ενέργεια ή να κάνουν ενίσχυση του σήματος. Κατά κάποιους πιο αυστηρούς ορισμούς ενεργά στοιχεία θεωρούνται μόνο τα δεύτερα.
- **Έτσι:** Ενεργό κύκλωμα είναι το κύκλωμα που εμπεριέχει την έννοια της **ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ** και **απαιτεί τροφοδοσία** για να λειτουργήσει.

# Μοντέλα Ενεργών Κυκλωμάτων

- ***Ο ενισχυτής*** συχνά αντιμετωπίζεται σα δομικό στοιχείο (building block→ Lego…).
- Ανάγκη μοντελοποίησης (ισοδύναμο κύκλωμα, χωρίς σχεδιαστικές λεπτομέρειες)
- Το μοντέλο ενός ενεργού δικτυώματος πρέπει να περιέχει **εξαρτημένη/ες πηγή/ές**

# Μοντέλα Ενεργών Κυκλωμάτων

- Γραμμικό κύκλωμα =
- επαλληλία (υπέρθεση) + ομογένεια, δηλ.
- $f(x+y)=f(x)+f(y)$ **+** $f(k\cdot x)=k\cdot f(x)$
- Γραμμικά κυκλώματα → **Γραμμική Άλγεβρα στη steady state**
- **Γραμμικά Ενεργά Κυκλώματα →**
  **Δίθυρα (Two-Ports)**

# Γενικευμένο Κυκλωματικό Δίθυρο

- Τα **δίθυρα** αποτελούν μια **μαθηματική μοντελοποίηση γραμμικών (εν γένει ενεργών) κυκλωμάτων** η οποία αντιμετωπίζει το όλο κύκλωμα ως **δίθυρο** (**two-port**) ή τετράπολο,
- **μια βαθμίδα (block) δηλαδή της οποίας είναι προσβάσιμα μόνο 4 σημεία**, τα οποία **ανά 2 λογίζονται σα μια θύρα**.
- Κάθε μια από τις θύρες χαρακτηρίζεται από **δυο μεταβλητές**: από ένα ρεύμα και μια τάση
  - Αυτά τα δίθυρα ονομάζονται **κυκλωματικά δίθυρα**, σε αντιδιαστολή με τα κυματικά δίθυρα που χαρακτηρίζονται από τα προσπίπτοντα και ανακλώμενα σε κάθε θύρα κύματα, τα οποία χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων (κατανεμημένα κυκλώματα) και δε θα μας απασχολήσουν

# Γενικευμένο Κυκλωματικό Δίθυρο

- Το δίθυρο καθορίζεται πλήρως εάν γνωρίζουμε και τις τέσσερεις μεταβλητές του. Συνήθως* μια μεταβλητή κάθε θύρας είναι **ανεξάρτητη**, $\alpha_j, j=1,2$ , και μια **εξαρτημένη**, $\varepsilon_j, j=1,2$ (η τιμή της *καθορίζεται από τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών*)

$$\mathbf{E}=\mathbf{X}\cdot\mathbf{A} \qquad \begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\chi_{11} & \chi_{12}\\ \chi_{21} & \chi_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\end{bmatrix}$$

$$\chi_{11}=\left.\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1}\right|_{\alpha_2=0} \quad \chi_{12}=\left.\frac{\varepsilon_1}{\alpha_2}\right|_{\alpha_1=0} \quad \chi_{21}=\left.\frac{\varepsilon_2}{\alpha_1}\right|_{\alpha_2=0} \quad \chi_{22}=\left.\frac{\varepsilon_2}{\alpha_2}\right|_{\alpha_1=0}$$

* Υπάρχουν και κάποιες (2) κυκλωματικές παράμετροι που δεν ικανοποιούν αυτή τη συνθήκη, αλλά και οι δυο μεταβλητές μιας θύρας είναι είτε εξαρτ. είτε ανεξαρτ. → χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κυκλωμάτων σε διαδοχική σύνδεση (cascade)

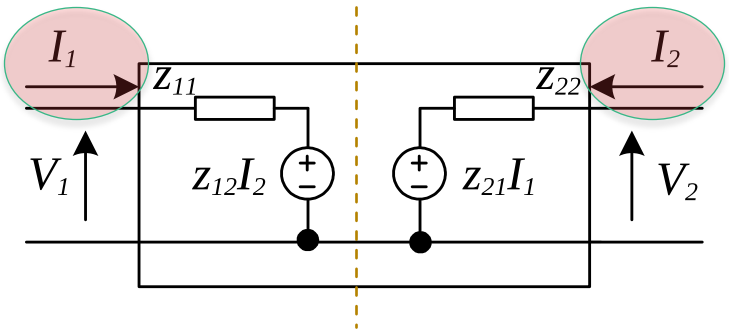
# Κυκλωματικές Διθυρικές Παράμετροι

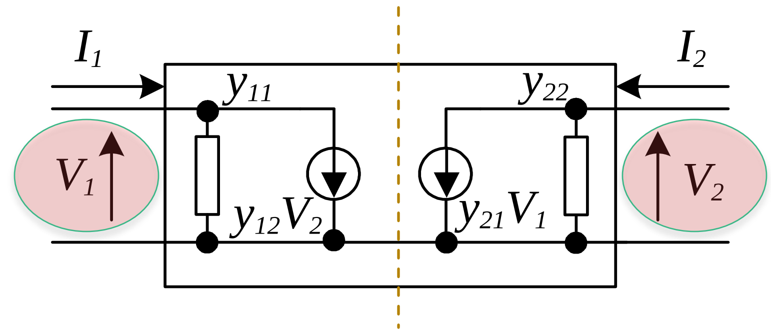
| | $z$ − παράμετροι | | $y$ − παράμετροι | | $h$ − παράμετροι | | $g$ − παράμετροι | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Μεταβλητή:** | "$\alpha_j$" | "$\varepsilon_j$" | "$\alpha_j$" | "$\varepsilon_j$" | "$\alpha_j$" | "$\varepsilon_j$" | "$\alpha_j$" | "$\varepsilon_j$" |
| $j=1$ | $I_1$ | $V_1$ | $V_1$ | $I_1$ | $I_1$ | $V_1$ | $V_1$ | $I_1$ |
| $j=2$ | $I_2$ | $V_2$ | $V_2$ | $I_2$ | $V_2$ | $I_2$ | $I_2$ | $V_2$ |

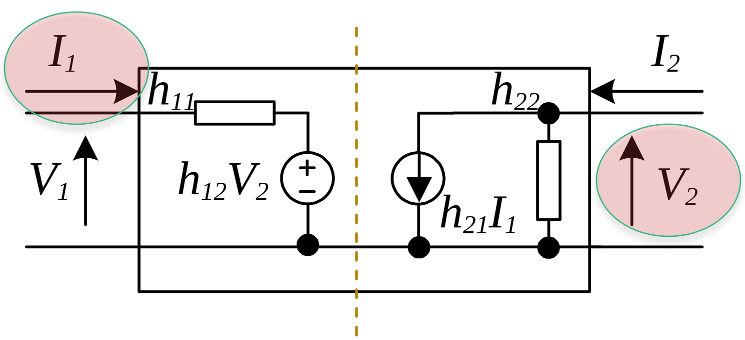
- Αντικαθιστώντας το $\chi$ στη γενικευμένη εξίσωση ορισμού με καθένα από τα $z$, $y$ , $h$ και $g$ και κάθε φορά χρησιμοποιώντας για (ανεξάρτητες μεταβλητές) και (εξαρτημένες μεταβλητές) αυτές που αντιστοιχούν σε κάθε είδος παραμέτρου, (βλ. **Πίνακα)**, παίρνουμε τα **τέσσερα αντίστοιχα διθυρικά μοντέλα**.
- Για παράδειγμα για τις $h$ παραμέτρους (που πολύ συχνά χρησιμοποιούνται για τη **μοντελοποίηση των BJTs**) ισχύει:

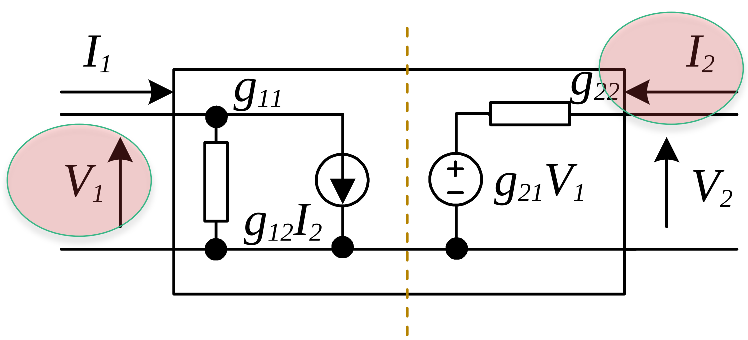
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

# Κυκλωματικές Διθυρικές Παράμετροι



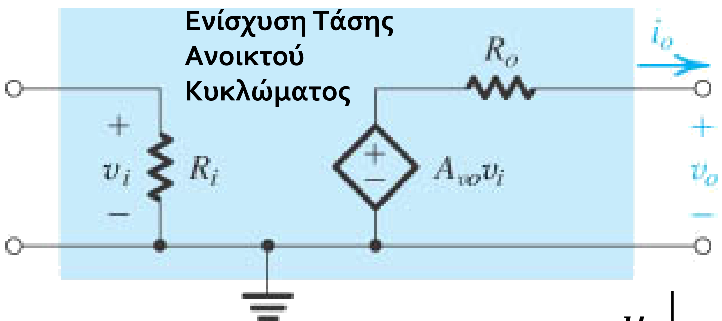



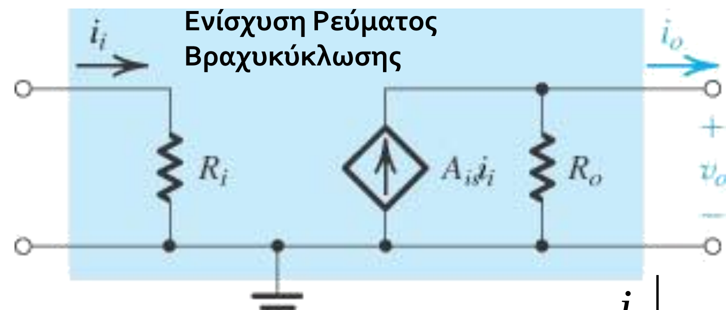

**Πρακτικά έχουμε ισοδύναμα Thevenin / Norton των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου**

# Μοντέλα Ενισχυτών

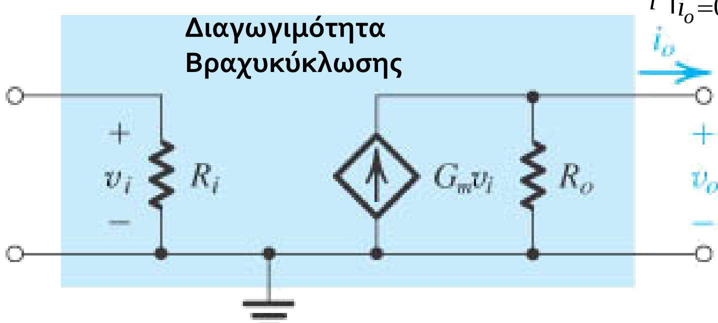
Συνήθως θεωρούμε ότι **όλοι οι ενισχυτές είναι** με καλή προσέγγιση **Μονόδρομοι (ή μονόπλευροι - unilateral-)**, δηλ. η ροή του σήματος συμβαίνει **μόνο** κατά τη **φορά Είσοδος → Έξοδο**



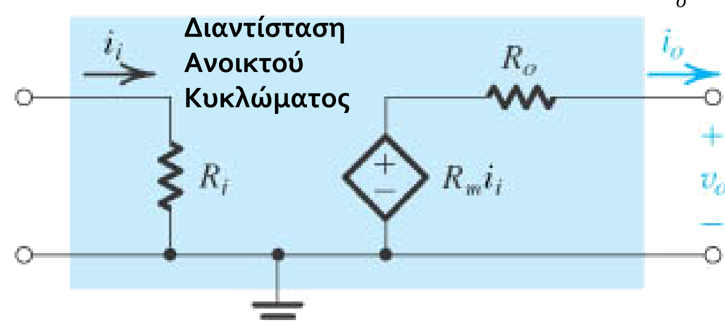

**Ενισχυτής Τάσης** $A_{uo}=\left.\dfrac{u_o}{u_i}\right|_{i_o=0}$




**Ενισχυτής Ρεύματος** $A_{is}=\left.\dfrac{i_o}{i_i}\right|_{u_o=0}$




**Ενισχυτής Διαγωγιμότητας** $G_{ms}=\left.\dfrac{i_o}{u_i}\right|_{u_o=0}$



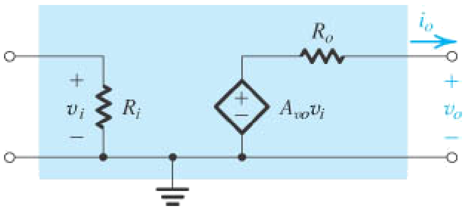

**Ενισχυτής Διαντίστασης** $R_{mo}=\left.\dfrac{u_o}{i_i}\right|_{i_o=0}$

**Table 1.1** The Four Amplifier Types

# Μοντέλα Ενισχυτών

Από τις **σχέσης επίλυσης διαιρετών τάσης και διαιρετών ρεύματος στην είσοδο και την έξοδο,** είναι φανερό ότι προκειμένου ο ενισχυτής να θεωρείται **ιδανικός** πρέπει κατά περίπτωση:

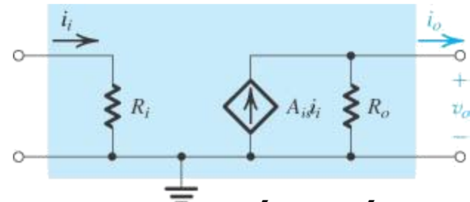
$$G = R^{-1}$$




**Ενισχυτής Τάσης**

$$R_i \to \infty(\gamma\iota\alpha\tau\acute{\iota}\,?) \qquad R_o \to 0$$

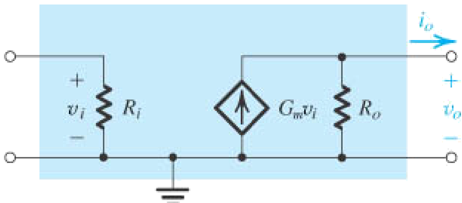
$$A_u = \frac{u_o}{u_i} \xrightarrow{R_o\to 0} A_{uo} = \left.\frac{u_o}{u_i}\right|_{i_o=0}$$




**Ενισχυτής Ρεύματος**

$$G_i \to \infty \qquad G_o \to 0$$

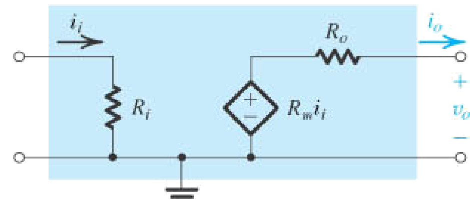
$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \xrightarrow{G_o\to 0} A_{is} = \left.\frac{i_o}{i_i}\right|_{u_o=0}$$




**Ενισχυτής Διαγωγιμότητας**

$$R_i \to \infty \qquad G_o \to 0$$

$$G_m = \frac{i_o}{u_i} \xrightarrow{G_o\to 0} G_{ms} = \left.\frac{i_o}{u_i}\right|_{u_o=0}$$




**Ενισχυτής Διαντίστασης**

$$G_i \to \infty \qquad R_o \to 0$$

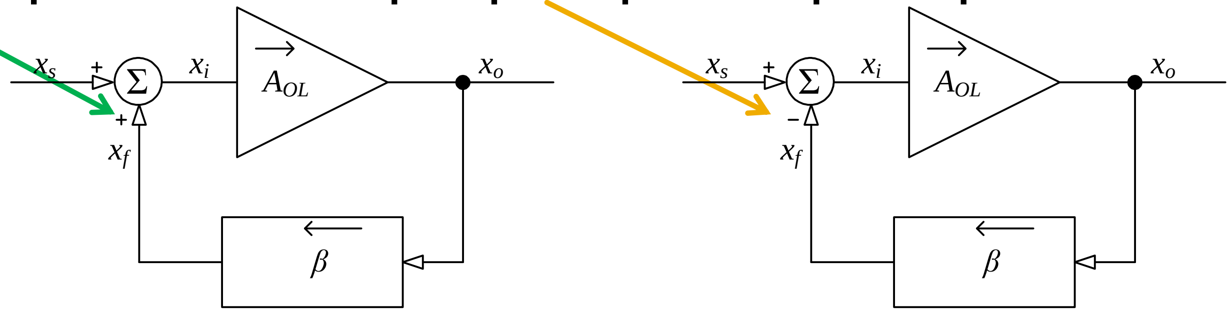
$$R_m = \frac{u_o}{i_i} \xrightarrow{R_o\to 0} R_{mo} = \left.\frac{u_o}{i_i}\right|_{i_o=0}$$

# Ανάδραση (ή Ανατροφοδότηση)

- Η **ανάδραση** (ή ανατροφοδότηση) (**feedback**) είναι ένα από τα βασικότερα αντικείμενα της ανάλυσης ενεργών κυκλωμάτων (δικτύων) (active network analysis), καθώς:
- επιτρέπει τον έλεγχο των χαρακτηριστικών ενός βασικού ενισχυτή (ενεργός βαθμίδα, που μπορεί να μην επιδέχεται παρέμβαση) από ένα πλήρως διαμορφώσιμο εξωτερικό (συνήθως παθητικό) δικτύωμα, το **δίκτυο ανατροφοδότησης** (**feedback network**).

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

- Διάγραμμα βαθμίδων (block διάγραμμα), του **ιδανικού μοντέλου ανάλυσης της ανάδρασης** για θετική αλλά και αρνητική ανάδραση.




- Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε τρείς δομικές μονάδες:
  - Το **βασικό ενισχυτή**, χαρακτηριζόμενο από **ενίσχυση ανοικτού βρόχου** (open-loop gain), ή ενίσχυση «προς τα εμπρός» $A_{OL}$
  - Το **δίκτυο ανάδρασης**, χαρακτηριζόμενο από το **συντελεστή ανάδρασης** (feedback factor), ή συντελεστή ανάστροφης μετάδοσης (reverse transmission factor), $\beta$ .
  - Ένα **ιδανικό αθροιστή**.

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

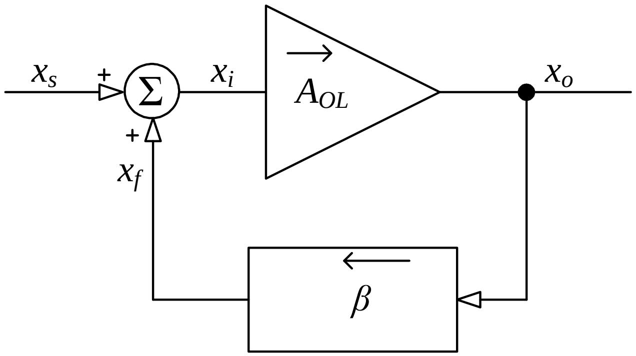
- Η χρήση αυτού του ιδανικού μοντέλου ισχύει μόνο υπό τις εξής προϋποθέσεις:
  - Τόσο ο βασικός ενισχυτής όσο και το δίκτυο ανάδρασης είναι βαθμίδες **μονόπλευρης διάδοσης** (**unilateral transmission**), δηλ. το σήμα εισόδου δεν μπορεί να μεταδοθεί διαμέσου της διαδρομής ανάδρασης και, ομοίως, το σήμα εξόδου δεν μπορεί να μεταδοθεί προς τα πίσω μέσω του ενισχυτή.
  - Η **ιδανική δειγματοληψία του σήματος εξόδου** (δεν φαίνεται σαν χωριστή βαθμίδα στα πιο πάνω διαγράμματα, αλλά σαν σημείο ένωσης) και η **ιδανική άθροιση** υποθέτουν ότι **δεν υπάρχει καμία επίδραση φορτίου (loading effect) λόγω της ανάδρασης στην είσοδο ή την έξοδο**.

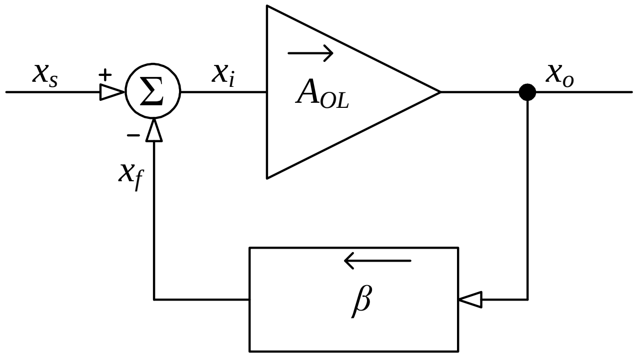
# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

- Το ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στην πράξη, αν και **οδηγεί σε προσεγγιστικά μόνο αποτελέσματα** λόγω του μη-ιδανικού χαρακτήρα των πρακτικών κυκλωμάτων.
- Παρ' όλα αυτά, ο **ιδιαίτερα διαισθητικός χαρακτήρας** αυτής της ανάλυσης την καθιστά **πολύ δημοφιλή**.

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

- Αρχικά υποθέτουμε ότι και η $A_{OL}$ και ο $\beta$ είναι θετικοί ή τουλάχιστον ομόσημοι. Βασικό στοιχείο της ανάλυσης ανάδρασης με βάση το ιδανικό μοντέλο είναι το γινόμενο , $A_{OL}\beta$ γνωστό και ως **κέρδος βρόχου** ή ενίσχυση βρόχου (**loop gain**),
- το οποίο στα πιο κάτω μοντέλα θεωρούμε ότι είναι $A_{OL}\beta > 0$



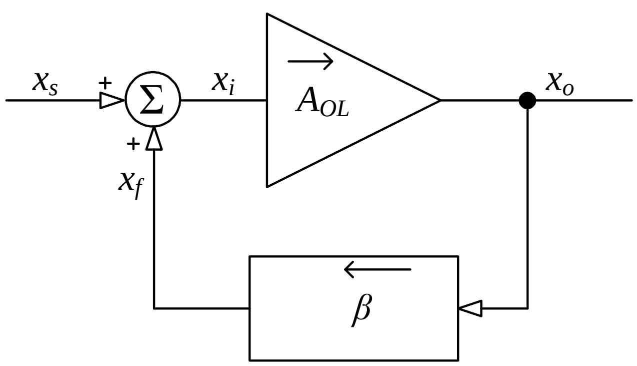
# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

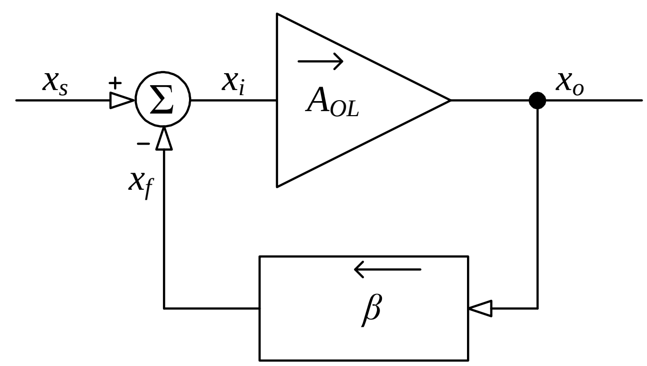
- Πράγματι, από τον ορισμό και τις προϋποθέσεις ισχύος του μοντέλου έχουμε ότι για το βασικό ενισχυτή ισχύει:

$$x_o = A_{OL} x_i$$

- για το δίκτυο ανάδρασης ισχύει: $x_f = \beta x_o$
- ενώ για τον ιδανικό αθροιστή, στις περιπτώσεις της θετικής και αρνητικής ανάδρασης, ισχύουν:

$$x_i = x_s + x_f \qquad\qquad x_i = x_s - x_f$$



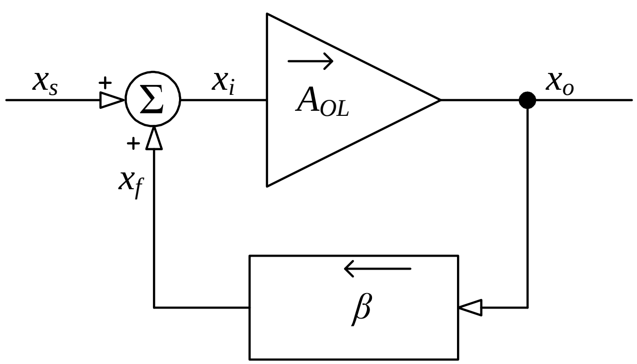
# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

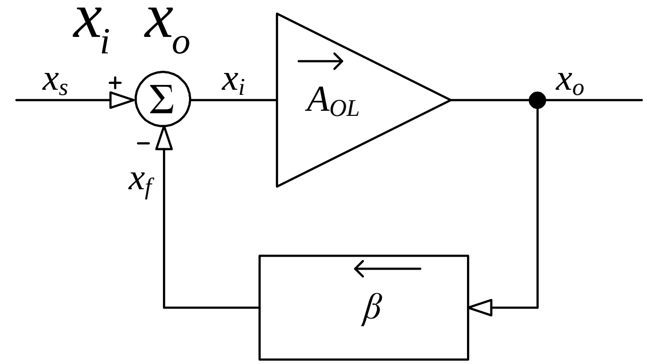
- Έτσι τελικά στις περιπτώσεις της θετικής και αρνητικής ανάδρασης, ισχύουν:

$$A_{CL}=\frac{x_o}{x_s}=\frac{x_o}{x_i-x_f}=\frac{x_o/x_i}{x_i/x_i-x_f/x_i}=\frac{A_{OL}}{1-\dfrac{x_o}{x_i}\dfrac{x_f}{x_o}}\Rightarrow \boxed{A_{CL}=\frac{A_{OL}}{1-A_{OL}\,\beta}}$$

$$A_{CL}=\frac{x_o}{x_s}=\frac{x_o}{x_i+x_f}=\frac{x_o/x_i}{x_i/x_i+x_f/x_i}=\frac{A_{OL}}{1+\dfrac{x_o}{x_i}\dfrac{x_f}{x_o}}\Rightarrow \boxed{A_{CL}=\frac{A_{OL}}{1+A_{OL}\,\beta}}$$

Ενίσχυση κλειστού βρόχου (closed-loop gain)

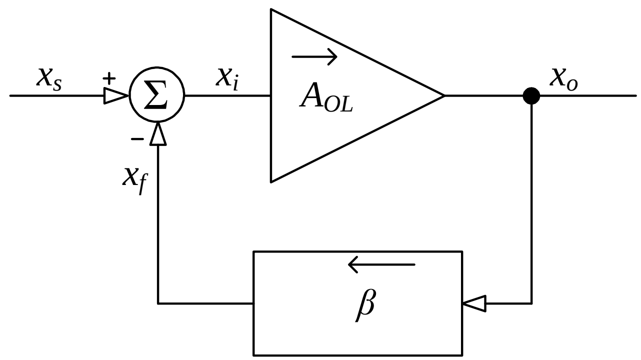


# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

**ποσό** (αρνητικής) **ανάδρασης (amount of feedback)**

- **Αρνητική ανάδραση** (στα πλαίσια Ηλεκτρονικών ΙΙ)

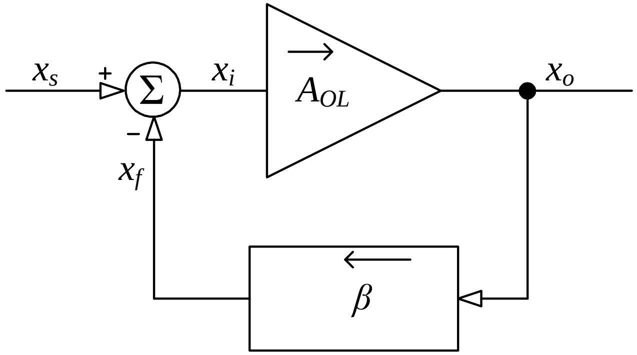



- Για πολλή μεγάλη ενίσχυση βασικού ενισχυτή
- (π.χ. OpAmp)

$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + A_{OL}\beta} = \frac{1}{1/A_{OL} + \beta} \xrightarrow{A_{OL}\to\infty} \boxed{A_{CL} \cong \frac{1}{\beta}}$$

- η ενίσχυση κλειστού βρόχου εξαρτάται αποκλειστικά από το συντελεστή ανάδρασης και μάλιστα είναι αντίστροφή του

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης




- **Αρνητική ανάδραση**
  - Το σήμα $x_i$ που προκύπτει από την αφαίρεση του σήματος ανάδρασης $x_f$ από το σήμα εισόδου $x_s$, συχνά αναφέρεται σαν **σήμα σφάλματος** (**error signal**).
  - Το σήμα σφάλματος σημαίνει πρακτικά ότι **η είσοδος του βασικού ενισχυτή ελαττώνεται κατά τον παράγοντα του ποσού αρνητικής ανάδρασης** $x_i = x_s / (1 + A_{OL}\beta)$ .
  - Έτσι, αν εφαρμόσουμε **μεγάλο ποσό αρνητικής ανάδρασης** σε ένα βασικό ενισχυτή, πρακτικά σημαίνει ότι **μειώνουμε πολύ την πραγματική είσοδό του**.

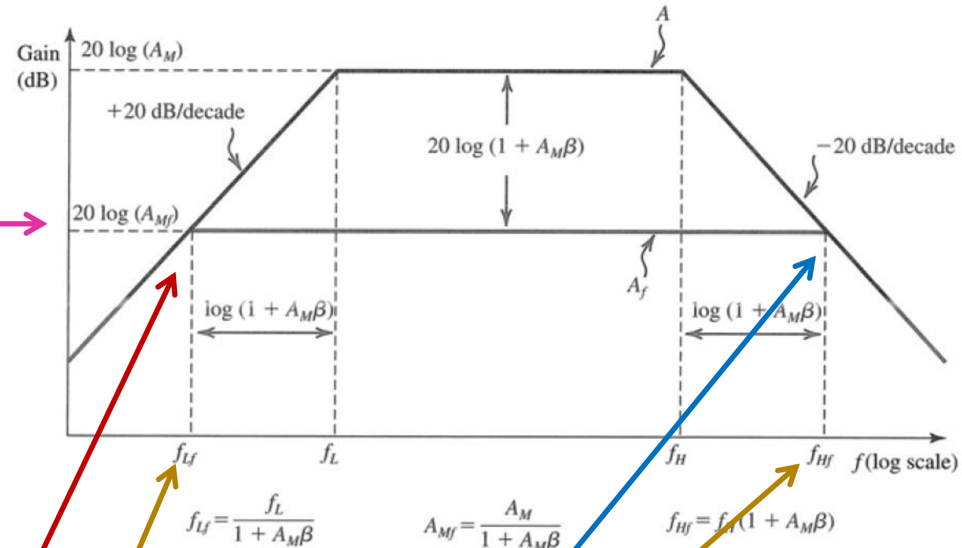
# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

- Η ποσότητα $(1+A_{OL}\beta)$ ονομάζεται **ποσό** (αρνητικής) **ανάδρασης** (**amount of feedback**) και αποτελεί χαρακτηριστική ποσότητα για τους ενισχυτές με ανάδραση, → καθορίζει την ποσοτική αλλαγή των χαρακτηριστικών του βασικού ενισχυτή τους:
  - **Μειώνει την ενίσχυση του βασικού ενισχυτή κατά τον παράγοντα**
  - $(1+A_{OL}\beta)$ → $A_{CL}=\dfrac{A_{OL}}{1+A_{OL}\beta}$
  - **Μειώνει την ευαισθησία της ενίσχυσης** (το ποσοστό μεταβολής της ενίσχυσης λόγω της πεπερασμένης ακρίβειας των στοιχείων του κυκλώματος) **κατά τον παράγοντα :** $(1+A_{OL}\beta)$ → $\dfrac{dA_{CL}}{A_{CL}}=\dfrac{1}{1+A_{OL}\beta}\dfrac{dA_{OL}}{A_{OL}}$
  - **Αυξάνει (αμφίπλευρα) το εύρος ζώνης κατά τον παράγοντα** $(1+A_M\beta)$ **,** όπου $A_M$ είναι η ενίσχυση μεσαίων συχνοτήτων (medium frequencies) ή αλλιώς ενίσχυση της ζώνης διέλευσης (pass-band).

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

- **Μείωση ενίσχυσης**
- Αν ορίσουμε ως $A_{Mf}$ την ενίσχυση της ζώνης διέλευσης **με ανάδραση**, τότε φανερά αυτή είναι .

$$\boxed{A_{Mf} = \frac{A_M}{(1+A_M\beta)}}$$




$$A_{CL}(s) = \frac{A_M}{(1+A_M\beta)} \cdot \frac{s}{s+\omega_L/(1+A_M\beta)} \cdot \frac{1}{1+s/\omega_H(1+A_M\beta)}$$

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

- **Ανάδραση & Ευστάθεια**
  - Γενικά η συνάρτηση μεταφοράς ενός ενισχυτή εξαρτάται από τη συχνότητα, δηλαδή:

$$\left.\begin{aligned} A_{OL} &\rightarrow A_{OL}(s) \\ \beta &\rightarrow \beta(s) \end{aligned}\right\} \Rightarrow A_{CL}(s) = \frac{A_{OL}(s)}{1 + A_{OL}(s)\beta(s)}$$

  - Πολύ συχνά βέβαια το δικτύωμα ανάδρασης είναι καθαρά ωμικό οπότε ο συντελεστής ανάδρασης δεν εξαρτάται από τη συχνότητα, $\beta \neq \beta(s)$ αλλά αυτό δε συμβαίνει πάντα

  - Για φυσικές συχνότητες $s = j\omega$ έχουμε

$$A_{CL}(j\omega) = \frac{A_{OL}(j\omega)}{1 + A_{OL}(j\omega)\beta(j\omega)}$$

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

- **Ανάδραση & Ευστάθεια**
  - Συγκεκριμένα το κέρδος βρόχου $A_{OL}\beta$ γίνεται διαδοχικά:

$$L(j\omega) = A_{OL}(j\omega)\beta(j\omega) = \left|A_{OL}(j\omega)\beta(j\omega)\right| e^{j\phi(\omega)}$$

  - Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται το κέρδος βρόχου με τη συχνότητα καθορίζει αν ο ενισχυτής θα είναι ευσταθής ή όχι.
  - Ένα πολύ γνωστό «κριτήριο ευστάθειας» είναι το **κριτήριο Barkhausen**, το οποίο αποτελεί αναγκαία συνθήκη ταλάντωσης.
  - Σύμφωνα με αυτό το κύκλωμα με ανάδραση θα ταλαντώνει μόνο για τις συχνότητες που ισχύουν:
  - (α) $\left|A_{OL}(j\omega)\beta(j\omega)\right| = 1$ και
  - (β) $\phi(\omega) = n \cdot \pi, \quad n = 1,3,5,\ldots$

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

- **Ανάδραση & Ευστάθεια**
  - Τότε ο παρονομαστής της σχέσης $A_{CL}(j\omega)=\dfrac{A_{OL}(j\omega)}{1+A_{OL}(j\omega)\beta(j\omega)}$
  - μηδενίζεται, διότι το κέρδος βρόχου γίνεται

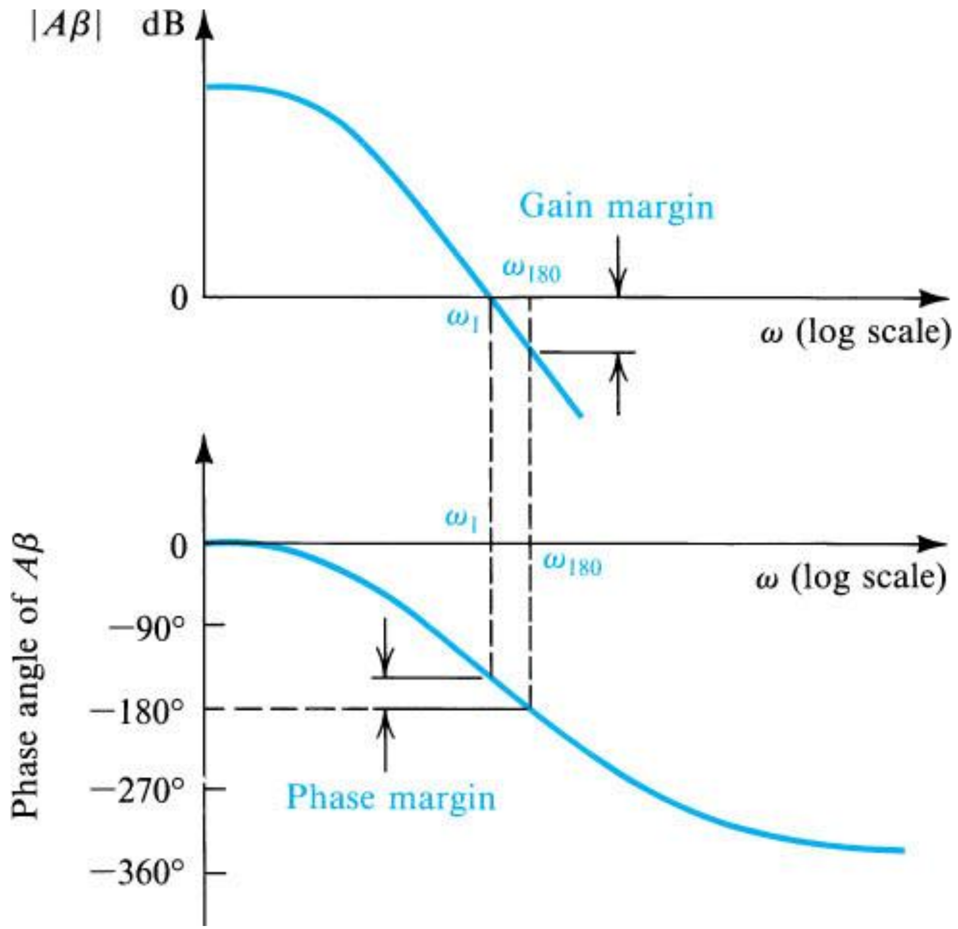
$$A_{OL}(j\omega)\beta(j\omega)\Big|_{\phi(\omega)=n\cdot\pi,n=1,3,5\ldots}=-1$$

  - οπότε το κέρδος κλειστού βρόχου απειρίζεται, που σημαίνει ταλάντωση.
  - Το κριτήριο αυτό έχει δεχθεί ισχυρή κριτική γιατί πρακτικά δεν αποτελεί «κριτήριο ευστάθειας», μας δίνει απλά δυο συνθήκες που για εκείνες τις συχνότητες που ικανοποιούνται (αν ικανοποιούνται) θα δώσουν ταλάντωση.

# Περιθώρια Κέρδους & Φάσης

- Η μελέτη της μεταβολής του κέρδους βρόχου $A_{OL}(j\omega)\beta(j\omega)$ συναρτήσει της συχνότητας μπορεί να γίνει και με τα διαγράμματα Bode.
- Η διαφορά του κέρδους βρόχου στη συχνότητα $\omega_{180^o}$ από τη μονάδα (ή τα 0dB) ορίζεται ως **περιθώριο κέρδους**
- Το περιθώριο κέρδους καθορίζει το ποσό κατά το οποίο μπορεί να αυξηθεί το κέρδος βρόχου και ο ενισχυτής να συνεχίσει να είναι ευσταθής. Συνήθως επιδιώκουμε μεγάλο περιθώριο κέρδους.
- Αντίστοιχα η διαφορά της φάσης όταν $\left|A_{OL}(j\omega)\beta(j\omega)\right| = 1$ (ή 0dB) από τις 180° ορίζεται ως **περιθώριο φάσης**
- Το περιθώριο φάσης καθορίζει το πόσο μπορεί να καθυστερήσει η φάση και ο ενισχυτής να παραμείνει ευσταθής. Αντίστοιχα αναζητούμε μεγάλο περιθώριο φάσης

# Περιθώρια Κέρδους & Φάσης




Bode plot για το κέρδος βρόχου $A\beta$ αναδεικνύοντας του ορισμούς του περιθωρίου κέρδους και φάσης.

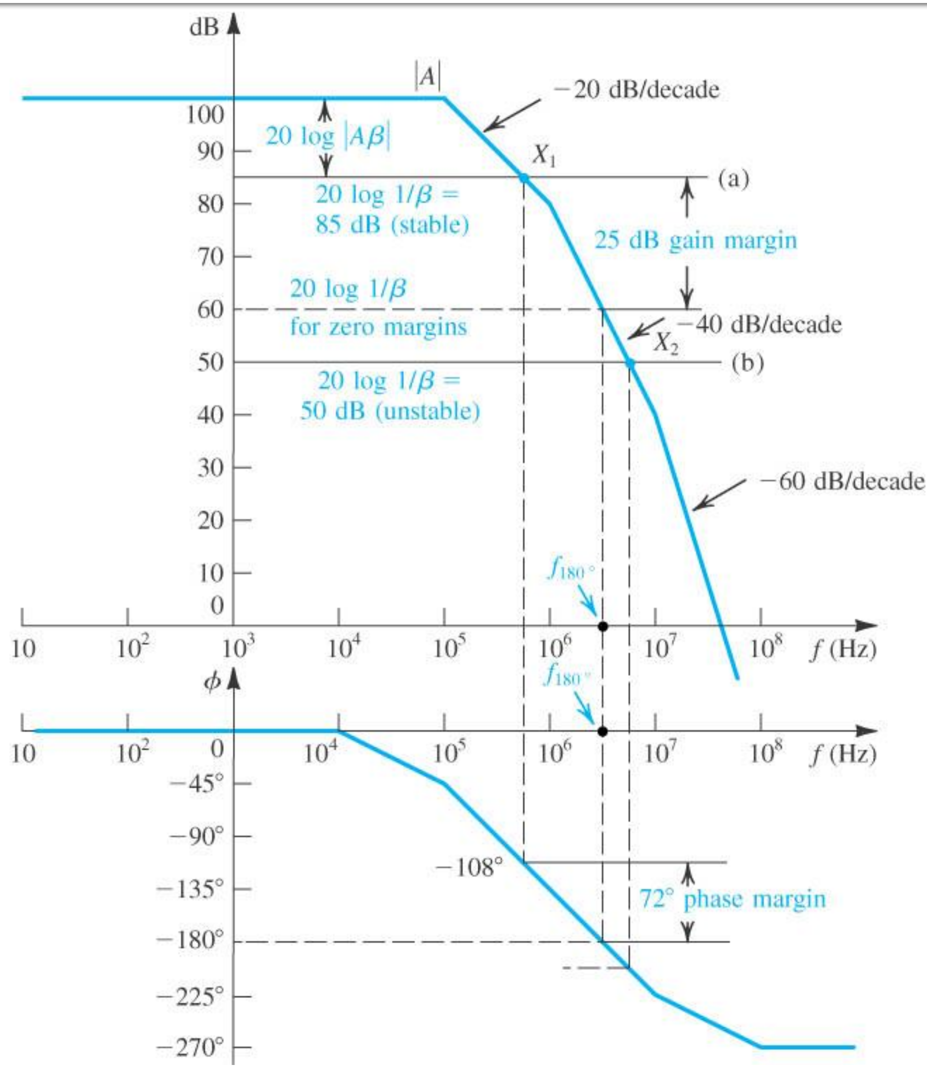
# Περιθώρια Κέρδους & Φάσης

- Μια εύκολη μέθοδος ελέγχου της ευστάθειας κατά τη σχεδίαση ενός ενισχυτή με ανάδραση (με την υπόθεση ότι το δίκτυο ανάδρασης είναι πλήρως ωμικό) είναι η εξής:
  - 1. σχεδιάζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς **ανοικτού βρόχου**
  - 2. σχεδιάζουμε μια οριζόντια γραμμή που ορίζει το αντίστροφο του συντελεστή ανάδρασης $1/\beta$
  - Η διαφορά ανάμεσα στις 2 καμπύλες θα είναι το **κέρδος βρόχου:**

$$20\log\left|A_{OL}(j\omega)\right| - 20\log(1/\beta) = 20\log\left|A_{OL}(j\omega)\beta\right|$$

- Έτσι εκτιμούμε την ευστάθεια από τη διαφορά μεταξύ των δυο διαγραμμάτων
- Αν θέλουμε να μελετήσουμε τι γίνεται για άλλο συντελεστή ανάδρασης, σχεδιάζουμε άλλη οριζόντια γραμμή κ.ο.κ.

# Περιθώρια Κέρδους & Φάσης




<u>Παράδειγμα με τρείς πόλους:</u>

- Μέγιστη καθυστέρηση φάσης -270° (3*90° )
- Η αστάθεια εμφανίζεται πάντα σε τμήμα της καμπύλης που έχει κλίση -40dB/dec
- Αν η τομή των δυο καμπυλών είναι στο τμήμα με κλίση -20dB/dec τότε περιθώριο φάσης >45°
- Γενικεύοντας: «στο σημείο τομής των καμπυλών

$$20\log\left|A_{OL}(j\omega)\right|$$

$$20\log\left(1/\beta(j\omega)\right)$$

η διαφορά των κλίσεων θα πρέπει να είναι <20dB/dec»