

Συστήματα Ελέγχου - Ανάδραση



Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου

Ονομάζεται ένα σύνολο φυσικών ή τεχνητών στοιχείων τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να καθοδηγούν, ελέγχουν ή ρυθμίζουν τον εαυτό τους ή άλλα συστήματα ώστε να λειτουργούν με ένα προκαθορισμένο τρόπο

Δομή Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου

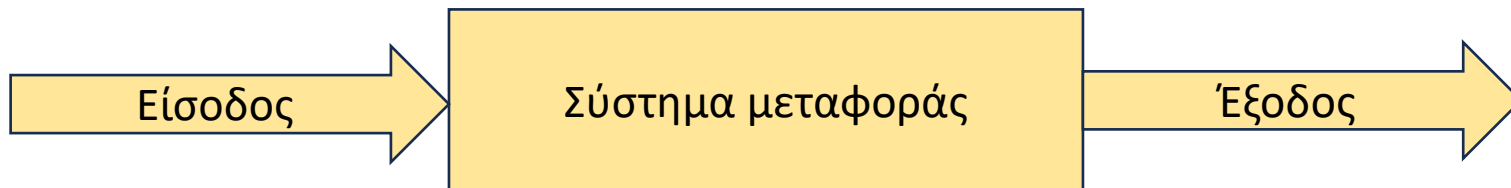
1. Είσοδος

Είναι μια διέγερση, εντολή ή αιτία η οποία εφαρμόζεται στο σύστημα από εξωτερική πηγή ώστε να επιτελέσει το ζητούμενο έργο

2. Έξοδος

Το πραγματικό αποτέλεσμα ή απόκριση η οποία προκύπτει από την εφαρμογή της εισόδου στο σύστημα

3. Σύστημα Μεταφοράς



Είδη Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου

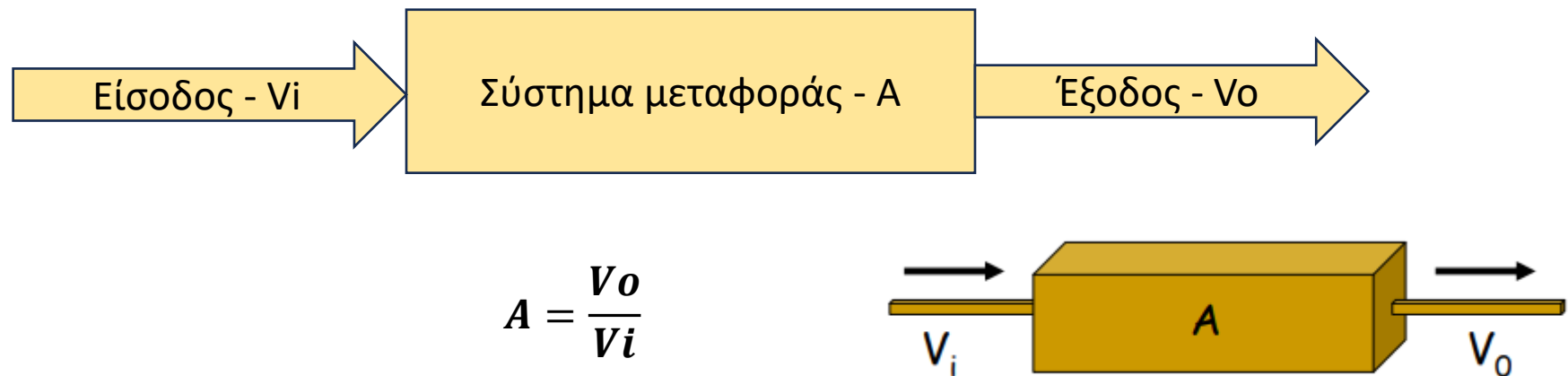
Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την ύπαρξη ανατροφοδότησης (feedback):

1. Συστήματα ανοιχτού βρόχου
2. Συστήματα κλειστού βρόχου

Συστήματα Ανοιχτού Βρόχου

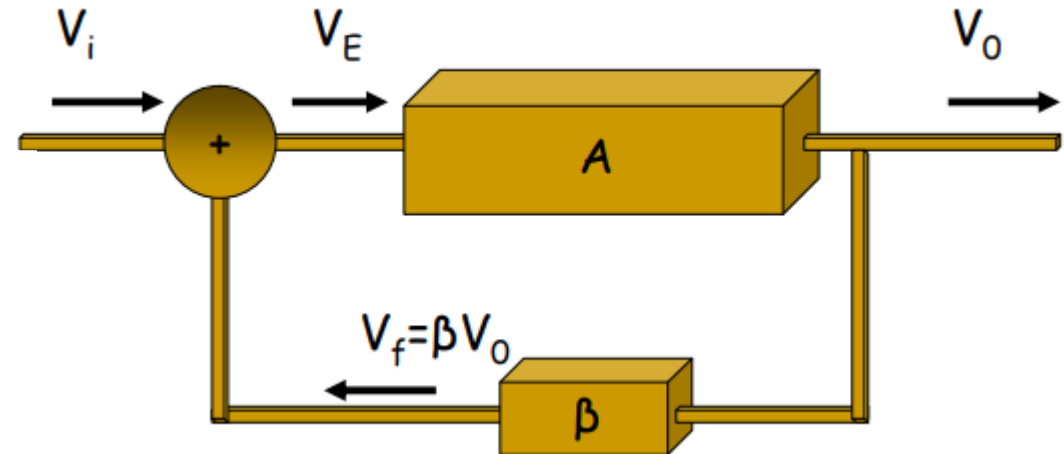
Σύστημα στο οποίο η είσοδος δεν είναι συνάρτηση της εξόδου καθώς δεν υπάρχει ανατροφοδότηση

- Συστήματα απλούστερα σε σχέση με τα κλειστά
- Η ακρίβεια εξαρτάται από τη ρύθμιση διαφόρων στοιχείων
- Δεν παρουσιάζουν προβλήματα αστάθειας



Συστήματα Κλειστού Βρόχου - Ανάδραση

Σύστημα στο οποίο η είσοδος είναι συνάρτηση της εξόδου. Το σύστημα κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί τη μέτρηση του σήματος εξόδου και την ανατροφοδοτεί για να συγκριθεί με το σήμα εισόδου (σήμα αναφοράς)



$$A = \frac{V_o}{V_E}$$

$$V_E = V_i + \beta V_o$$

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_E - \beta V_o} = \frac{\frac{V_o}{V_E}}{1 - \beta \frac{V_o}{V_E}} = \frac{A}{1 - \beta A}$$

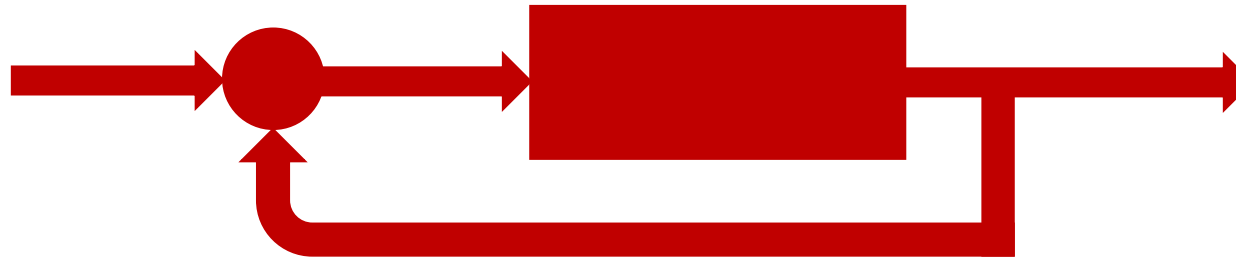
βA : Κέρδος Βρόχου
 $1 + \beta A$: Ποσό ανάδρασης

Η **ανάδραση** είναι μια διαδικασία κατά την οποία ένα σύστημα επηρεάζει την συμπεριφορά του με βάση την έξοδό του. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την επιστροφή ενός μέρους της εξόδου στην είσοδο του συστήματος, προκειμένου να ρυθμιστεί η λειτουργία του.

Είδος Ανάδρασης

- **Αρνητική Ανάδραση:** Αν το σήμα επανέρχεται στην είσοδο με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται το σήμα εισόδου. Αυξάνει την έξοδο του συστήματος, οδηγώντας συχνά σε ταλάντωση ή εκρηκτική συμπεριφορά. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως οι ενισχυτές ταλαντώσεων.
- **Θετική ανάδραση:** Αν το σήμα επανέρχεται στην είσοδο έτσι ώστε να αυξάνονται οι μεταβολές εξόδου. Μειώνει την έξοδο του συστήματος, προσφέροντας σταθερότητα και μειώνοντας την παραμόρφωση. Είναι κρίσιμη για την διατήρηση της σταθερότητας σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως σε ενισχυτές και συστήματα αυτόματου ελέγχου.

Ανάδραση ή ανατροφοδότηση είναι η διαδικασία κατά την οποία λαμβάνουμε σήμα από την έξοδο ενός συστήματος και το προσθέτουμε ή το αφαιρούμε από το σήμα εισόδου



Είδη Ανάδρασης

Θετική Ανάδραση:

- **Ορισμός:** Αυξάνει την έξοδο του κυκλώματος, οδηγώντας συχνά σε αύξηση της εξόδου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.
- **Χρήση:** Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται ενίσχυση ή αύξηση της ισχύος, όπως στους ταλαντωτές (oscillators) και στα κυκλώματα ενίσχυσης ταλάντωσης.
- **Παράδειγμα:** Στους ενισχυτές ταλαντώσεων, η έξοδος ενισχύει την είσοδο, οδηγώντας σε ένα συνεχώς αυξανόμενο σήμα.

Αρνητική Ανάδραση:

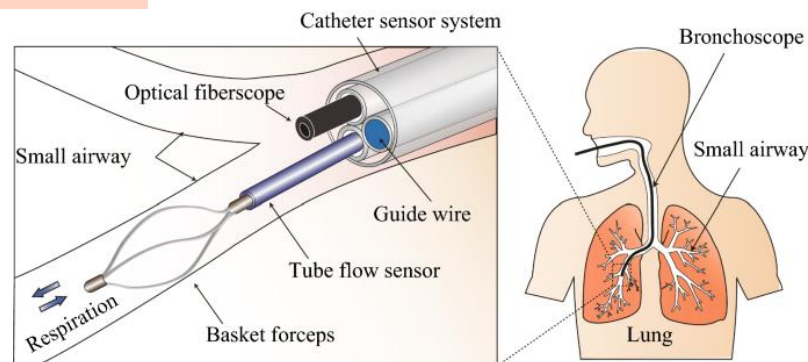
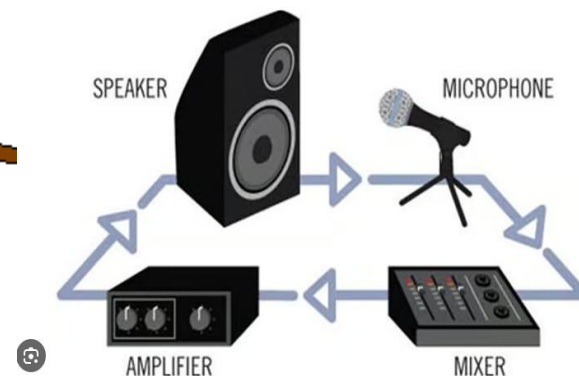
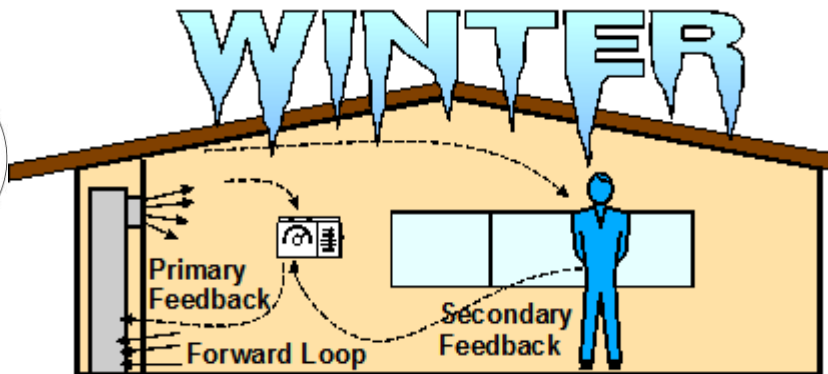
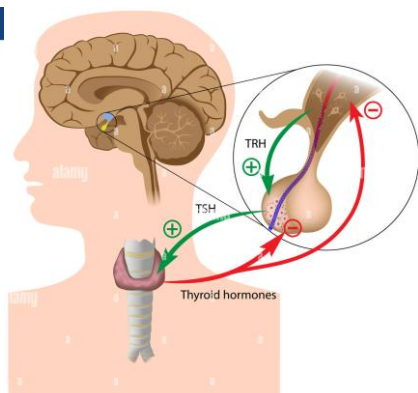
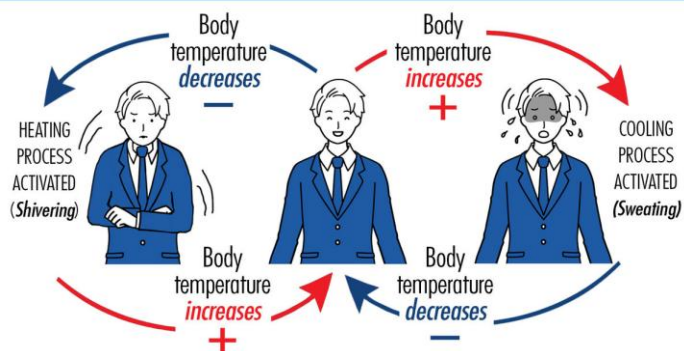
- **Ορισμός:** Μειώνει την έξοδο του κυκλώματος, προσφέροντας σταθερότητα και ελέγχοντας την απόκριση του κυκλώματος.
- **Χρήση:** Είναι κρίσιμη για τη ρύθμιση της παραμόρφωσης, τη βελτίωση της σταθερότητας και την αύξηση του εύρους ζώνης.
- **Παράδειγμα:** Στους διαφορικούς ενισχυτές, η αρνητική ανάδραση μειώνει την παραμόρφωση του σήματος και βελτιώνει τη σταθερότητα, διατηρώντας την έξοδο του κυκλώματος σταθερή παρά τις μεταβολές στην είσοδο.

Εφαρμογές Ανάδρασης

Η ανάδραση είναι θεμελιώδης σε διάφορους τομείς, όπως:

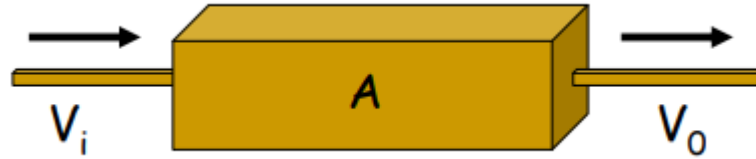
- **Ηλεκτρονικά Κυκλώματα:** Χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της απόδοσης και της σταθερότητας.
- **Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου:** Χρησιμοποιείται για τη διατήρηση σταθερών συνθηκών (π.χ. θερμοκρασία, πίεση).
- **Βιολογία:** Οι διαδικασίες ανάδρασης είναι κρίσιμες για τη ρύθμιση των βιολογικών συστημάτων.

EXAMPLE OF A NEGATIVE FEEDBACK LOOP

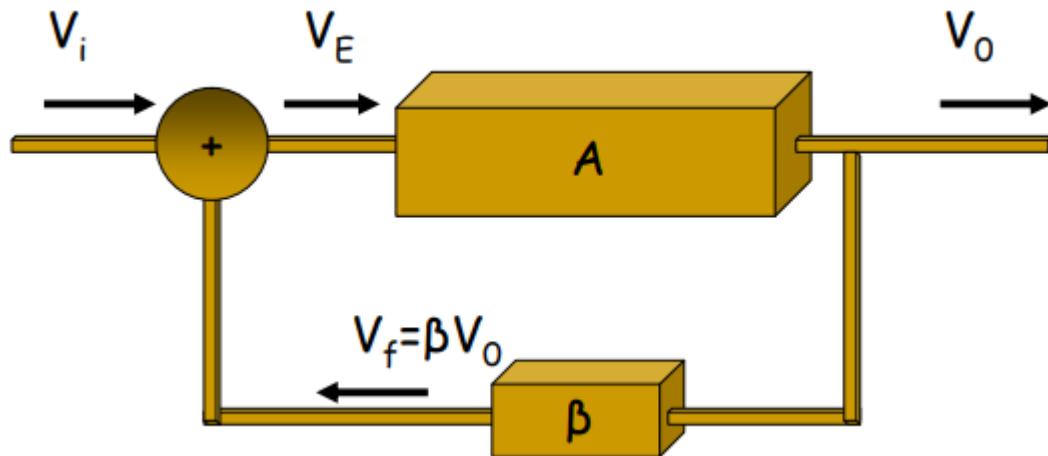


Δομή Ενισχυτή με Αρνητική Ανάδραση

Κέρδος Ανοιχτού Βρόχου



$$A = \frac{V_o}{V_i}$$



$$A = \frac{V_o}{V_E}$$

$$V_E = V_i + \beta V_o \quad \text{Θετική Ανάδραση} \quad V_E > V_i$$

$$V_E = V_i - \beta V_o \quad \text{Αρνητική Ανάδραση} \quad V_E < V_i$$

A : Κέρδος Ανοιχτού Βρόχου

$A\beta$: Κέρδος Βρόχου

$1+A\beta$: Ποσό ανάδρασης

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_o}{V_E + \beta V_o} = \frac{A}{1 + \beta A}$$

Λόγοι Χρήσης Αρνητικής Ανάδρασης

- Απευαισθητοποίηση Κέρδους
- Μείωση της μη γραμμικής παραμόρφωσης
- Μείωση της επίδρασης του θορύβου
- Έλεγχος της σύνθετης αντίστασης εισόδου και εξόδου
- Αύξηση του εύρους ζώνης ενός ενισχυτή

Επίδραση Αρνητικής Ανάδρασης στο Εύρος Ζώνης

Απόκριση υψηλών συχνοτήτων ενισχυτή

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

Όπου A_M είναι το κέρδος μεσαίων συχνοτήτων και ω_H η άνω συχνότητα 3dB.

Εφαρμόζουμε αρνητική ανάδραση με ένα συντελεστή β ανεξάρτητο της συχνότητας:

$$A_f(s) = \frac{A(s)}{1 - \beta A(s)}$$

Επίδραση Αρνητικής Ανάδρασης στο Εύρος Ζώνης

$$\left. \begin{aligned} A(s) &= \frac{A_M}{1 - s/\omega_H} \\ A_f(s) &= \frac{A(s)}{1 - \beta A(s)} \end{aligned} \right\} A_f(s) = \frac{A_M/(1 + A_M\beta)}{1 - s/\omega_H(1 + A_M\beta)}$$

Άρα ο ενισχυτής με ανάδραση θα έχει κέρδος μέσης ζώνης ίσο με $A_M/(1+A_M\beta)$ και άνω συχνότητα 3dB:

$$\omega_{Hf} = \omega_H(1 + A_M\beta)$$

Παρατηρούμε ότι η άνω συχνότητα 3dB αυξάνεται κατά ένα συντελεστή ίσο με το ποσό ανάδρασης

Απευαισθητοποίηση του κέρδους

$$A_f = \frac{A}{1 - \beta A}$$

Θεωρούμε ότι το β έχει σταθερή τιμή και διαφορίζουμε και την παραπάνω εξίσωση

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

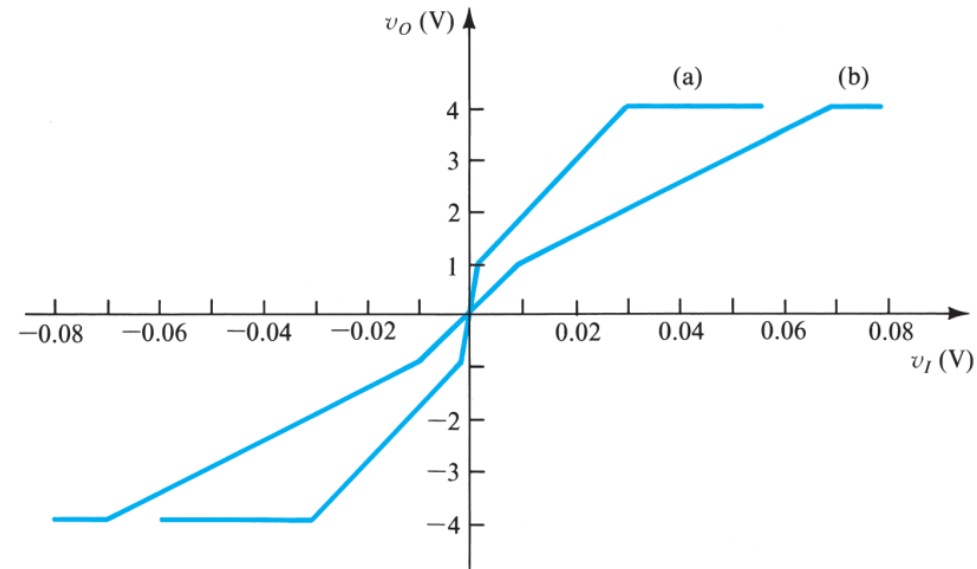
Διαιρώντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

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

Το ποσοστό μεταβολής του A_f είναι μικρότερο από το ποσοστό μεταβολής του A κατά ένα συντελεστή ίσο με το ποσό της ανάδρασης.

$1 + \beta A$: Συντελεστής απευαισθητοποίησης

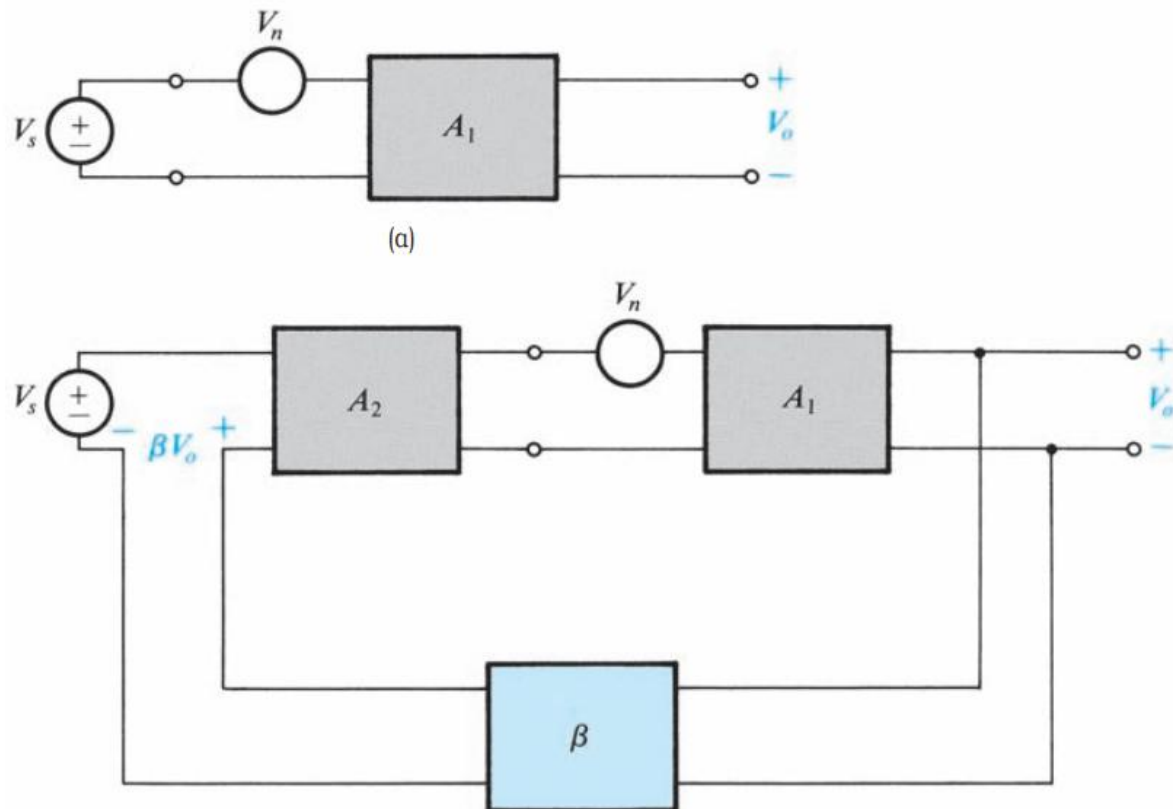
Μείωση της γραμμικής παραμόρφωσης



(a) : Χαρακτηριστική ενός ενισχυτή

(b) : Χαρακτηριστική με εφαρμογή ανάδρασης

Μείωση της επίδρασης του θορύβου



Λόγος σήματος προς θόρυβο SNR

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

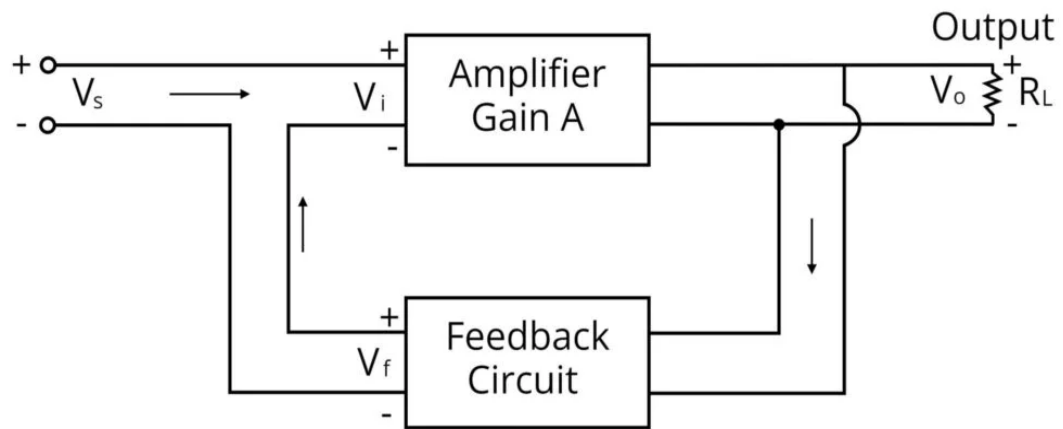
$$V_0 = V_s \frac{A_1 A_2}{1 + A_1 A_2 \beta} + V_n \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 \beta}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{V_s}{V_N} A_2$$

Βασικές Τοπολογίες Ανάδρασης

- Τάσης σειράς – Voltage Series Feedback
- Ρεύματος παράλληλα – Current Shunt Feedback
- Ρεύματος σειράς – Current Series Feedback
- Τάσης παράλληλα – Voltage Shunt Feedback

Τοπολογία Τάσης Σειράς – Voltage Series Feedback



Ένα μέρος της **τάσης εξόδου** δειγματοληπτείται στην είσοδο
Το σήμα της ανάδρασης συνδέεται **σε σειρά** με το σήμα εισόδου

$$V_i = V_s - \beta V_o$$

Κέρδος Κλειστού Βρόχου

$$A_{OL} = \frac{V_o}{V_i}$$

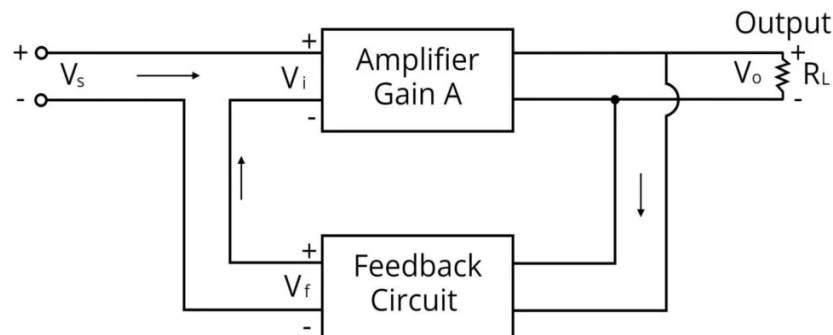
$$A_{CL} = \frac{V_o}{V_s}$$

$$V_o = A_{OL}(V_i - \beta V_o)$$

$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$$

$$V_i = V_s - \beta V_o$$

Τοπολογία Τάσης Σειράς – Voltage Series Feedback



Αντίσταση Εισόδου

$$R_{in,F} = R_{in}(1 + \beta A_{OL})$$

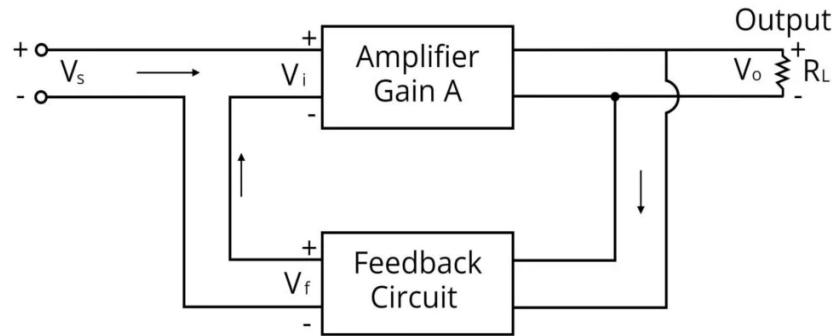
Η αύξηση της αντίστασης εισόδου συμβαίνει καθώς η ανάδραση μειώνει το ρεύμα εισόδου με αποτέλεσμα το σήμα εισόδου να επιδρά ασθενέστερα στο σύστημα

Αντίσταση Εξόδου

$$R_{O,F} = \frac{R_o}{(1 + \beta A_{OL})}$$

Η μείωση της αντίστασης εξόδου βελτιώνει την ικανότητα του συστήματος να οδηγεί φορτία

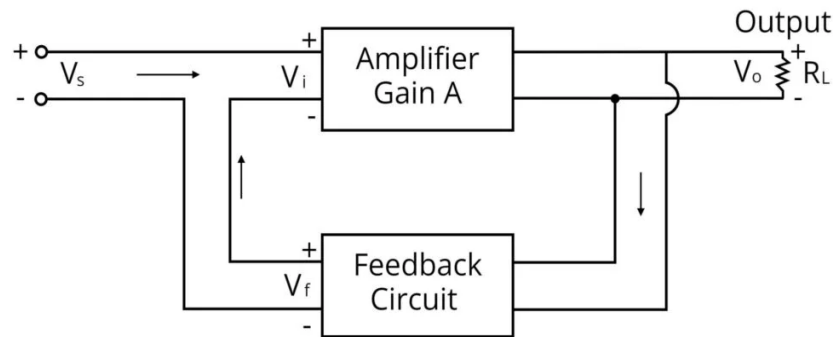
Τοπολογία Τάσης Σειράς – Voltage Series Feedback



Πλεονεκτήματα τοπολογίας Τάσης Σειράς

- Σταθερότητα: Μειώνει της διακυμάνσεις κέρδους που προκαλούνται από διάφορους παράγοντες όπως η θερμοκρασία
- Αύξηση αντίστασης εισόδου – Μείωση αντίστασης εξόδου
- Αύξηση εύρους ζώνης
- Βελτίωση γραμμικότητας

Τοπολογία Τάσης Σειράς – Voltage Series Feedback



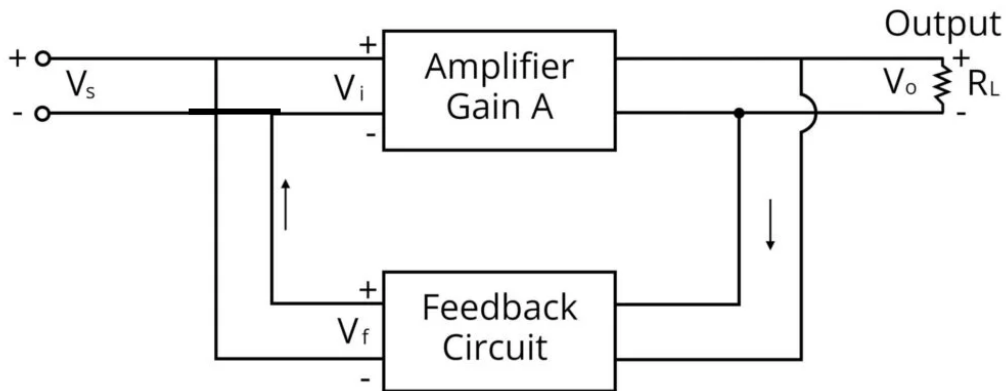
Παράδειγμα : Έστω ένας ενισχυτής με κέρδος ανοιχτού βρόχου $A=100$, αντίσταση εισόδου $10k\Omega$, αντίσταση εξόδου $1k\Omega$ και συντελεστή $\beta=0.01$

$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}} = \frac{100}{1 + 100 * 0.01} = 50$$

$$R_{in,F} = R_{in}(1 + \beta A_{OL}) = 20k\Omega$$

$$R_{O,F} = \frac{R_o}{(1 + \beta A_{OL})} = 500\Omega$$

Τοπολογία Τάσης Παράλληλα – Voltage Shunt Feedback



Ένα μέρος της **τάσης** εξόδου δειγματοληπτείται στην είσοδο
Το σήμα της ανάδρασης συνδέεται **παράλληλα** με το σήμα εισόδου

$$V_i = V_s - \beta V_o$$

Κέρδος Κλειστού Βρόχου

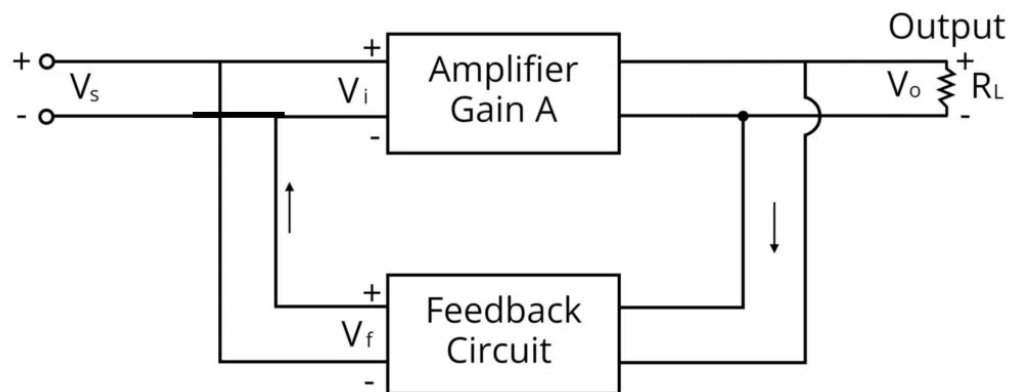
$$A_{OL} = \frac{V_o}{I_i}$$

$$A_{CL} = \frac{V_o}{I_s}$$

$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$$

$$V_i = V_s - \beta V_o$$

Τοπολογία Τάσης Παράλληλα – Voltage Shunt Feedback



Αντίσταση Εισόδου

$$R_{in,F} = \frac{R_{in}}{(1 + \beta A_{OL})}$$

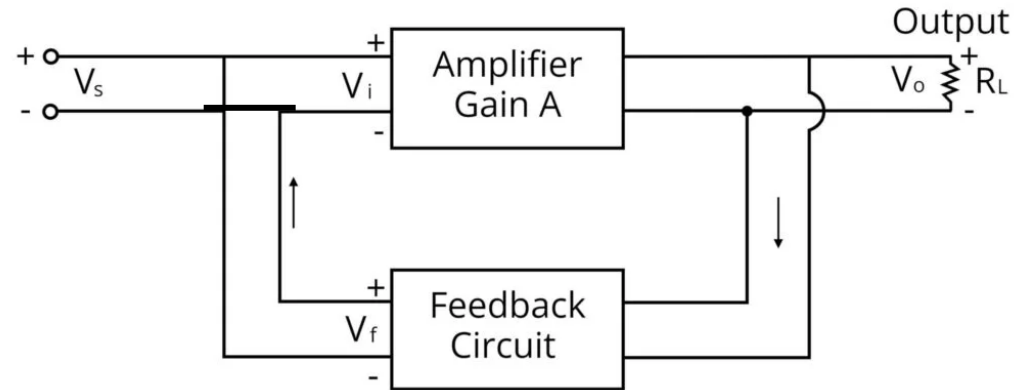
Η μείωση της αντίστασης εισόδου αυξάνει το ρεύμα εισόδου με αποτέλεσμα το σήμα εισόδου να επιδρά περισσότερο στο σύστημα

Αντίσταση Εξόδου

$$R_{o,F} = \frac{R_o}{(1 + \beta A_{OL})}$$

Η μείωση της αντίστασης εξόδου βελτιώνει την ικανότητα του συστήματος να οδηγεί φορτία

Τοπολογία Τάσης Παράλληλα – Voltage Shunt Feedback



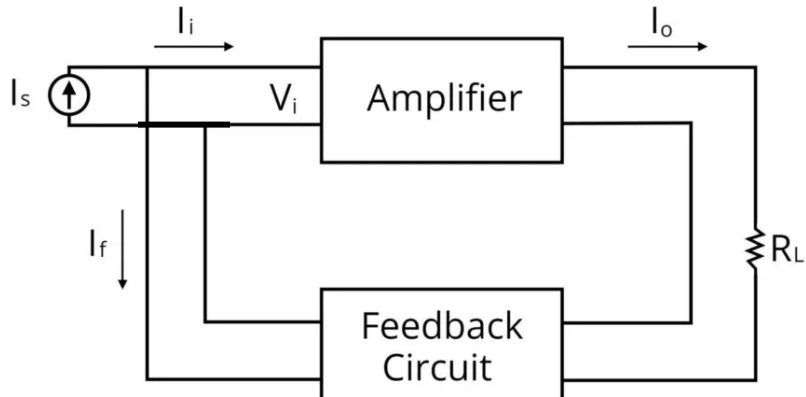
Παράδειγμα : Έστω ένας ενισχυτής με κέρδος ανοιχτού βρόχου $A=100$, αντίσταση εισόδου $1\text{k}\Omega$, αντίσταση εξόδου $1\text{k}\Omega$ και συντελεστή $\beta=0.02$

$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}} = \frac{100}{1 + 100 * 0.02} = 33.3$$

$$R_{in,F} = \frac{R_{in}}{(1 + \beta A_{OL})} = 333\Omega$$

$$R_{O,F} = \frac{R_o}{(1 + \beta A_{OL})} = 333\Omega$$

Τοπολογία Ρεύματος Παράλληλα – Current Shunt Feedback



Ένα μέρος του **ρεύματος εξόδου** δειγματοληπτείται στην είσοδο

Το σήμα της ανάδρασης συνδέεται **παράλληλα** με το σήμα εισόδου

$$I_i = I_s - \beta I_o$$

Κέρδος Κλειστού Βρόχου

$$A_{OL} = \frac{I_o}{I_i}$$

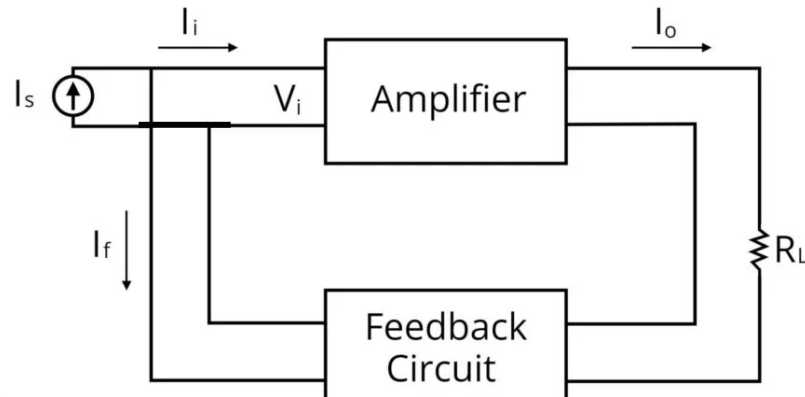
$$A_{CL} = \frac{I_o}{I_s}$$

$$I_o = A_{OL}(I_i - \beta I_o)$$

$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$$

$$I_i = I_s - \beta I_o$$

Τοπολογία Ρεύματος Παράλληλα – Current Shunt Feedback



Αντίσταση Εισόδου

$$R_{in,F} = \frac{R_{in}}{(1 + \beta A_{OL})}$$

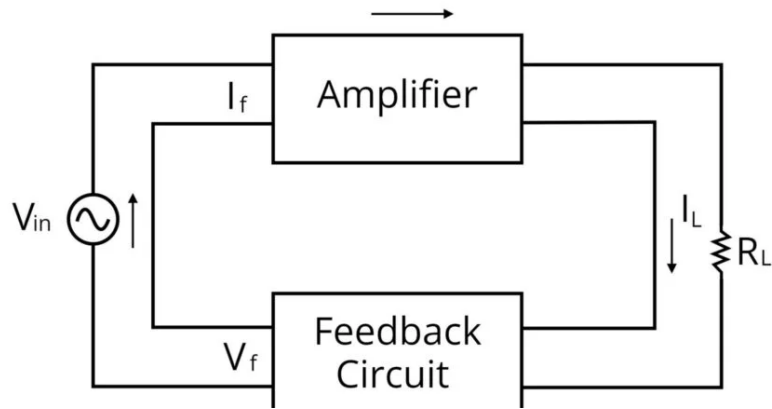
Η μείωση της αντίστασης εισόδου αυξάνει το ρεύμα εισόδου με αποτέλεσμα το σήμα εισόδου να επιδρά περισσότερο στο σύστημα

Αντίσταση Εξόδου

$$R_{o,F} = R_o(1 + \beta A_{OL})$$

Η αύξηση της αντίστασης εξόδου είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου είναι σημαντικός ο έλεγχος του ρεύματος εξόδου

Τοπολογία Ρεύματος σε Σειρά – Current Series Feedback



Ένα μέρος του **ρεύματος εξόδου** δειγματοληπτείται στην είσοδο

Το σήμα της ανάδρασης συνδέεται **σε σειρά** με το σήμα εισόδου

$$I_i = I_s - \beta I_o$$

Κέρδος Κλειστού Βρόχου

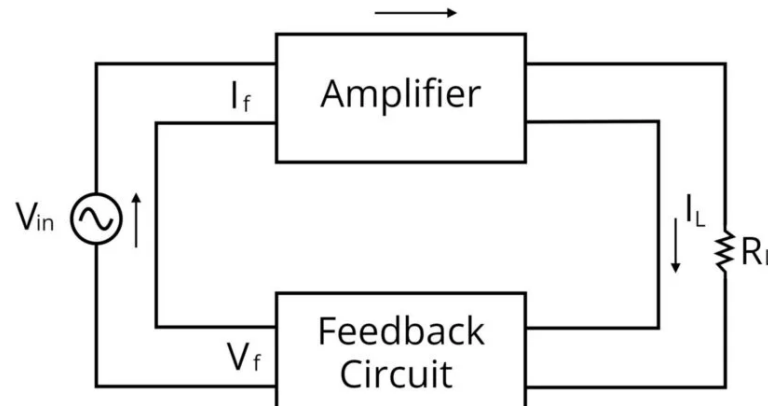
$$A_{OL} = \frac{I_o}{V_i}$$

$$A_{CL} = \frac{I_o}{V_s}$$

$$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$$

$$I_i = I_s - \beta I_o$$

Τοπολογία Ρεύματος σε Σειρά – Current Series Feedback



Αντίσταση Εισόδου

$$R_{in,F} = R_i(1 + \beta A_{OL})$$

Αντίσταση Εξόδου

$$R_{o,F} = R_o(1 + \beta A_{OL})$$

Σύνοψη των Χαρακτηριστικών όλων των Τοπολογιών

	Κέρδος Κλειστού Βρόχου	Αντίσταση Εισόδου	Αντίσταση Εξόδου
Τάσης σε Σειρά	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$	$R_{in,F} = R_{in}(1 + \beta A_{OL})$	$R_{o,F} = \frac{R_o}{(1 + \beta A_{OL})}$
Τάσης Παράλληλα	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$	$R_{in,F} = \frac{R_{in}}{(1 + \beta A_{OL})}$	$R_{o,F} = \frac{R_o}{(1 + \beta A_{OL})}$
Ρεύματος Παράλληλα	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$	$R_{in,F} = \frac{R_{in}}{(1 + \beta A_{OL})}$	$R_{o,F} = R_o(1 + \beta A_{OL})$
Ρεύματος σε Σειρά	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}}$	$R_{in,F} = R_i(1 + \beta A_{OL})$	$R_{o,F} = R_o(1 + \beta A_{OL})$

Παραδείγματα

Σε μια εφαρμογή απαιτείται να ενισχύσουμε ένα σήμα μέσης συχνότητας κατά 100 φορές. Για τεχνικούς λόγους, όπως η σταθερότητα ενίσχυσης και μείωση παραμόρφωσης, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε για την εφαρμογή αυτή ενισχυτή με ανατροφοδότηση στον οποίο η ενίσχυση του βρόχου ανατροφοδότησης είναι ίση με 9. Να προσδιοριστεί η ενίσχυση ανοιχτού βρόχου που απαιτείται, το ποσοστό του σήματος εξόδου που αφαιρείται από την είσοδο και τη μείωση της ενίσχυσης του ενισχυτή λόγω ανάδρασης σε dB

$$A_f = \frac{A}{1 + \beta A} \Rightarrow A = A_f (1 + \beta A) \Rightarrow A = 100(1 + 9) \Rightarrow A = 1000$$

$$\beta \cdot A = 9 \Rightarrow \beta = \frac{9}{1000} = 0.009 \Rightarrow 0.9\%$$

$$A_f \text{ σε dB} = 20 \log A_f = 20 \log 100 = 20 \cdot 2 = 40$$

$$A \text{ σε dB} = 20 \log A = 20 \log 1000 = 20 \cdot 3 = 60$$

$$A - A_f = 60 - 40 = 20 \text{ dB}$$

Παραδείγματα

Η τάση εξόδου ενός αισθητήρα θερμοκρασίας είναι 0-300mV. Ο αισθητήρας συνδέεται με ενισχυτική βαθμίδα το κέρδος ανοιχτού βρόχου της οποίας είναι $A=1000$ και η τροφοδοσία της $V_{CC}=12V$. Να υπολογίσετε τον συντελεστή β ώστε το σύστημα αισθητήρα-ενισχυτή να βρίσκεται συνεχώς στην γραμμική περιοχή.



Χωρίς ανάδραση: $V_{out} = AV_{in} = 300V$

Γραμμική περιοχή: $V_{out,max} = V_{CC} = 12V$ άρα $V_{in,max} = 12mV$

$A_f = ?$ ώστε $V_{in,max} = 0.3V$ $V_{out,max} = 12V$ $A_f = \frac{V_{out,max}}{V_{in,max}} = 40$

$$A_f = \frac{A}{1 + \beta A} \rightarrow 40 = \frac{1000}{1 + 1000\beta} \rightarrow \beta = 0,024$$

