

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

- Η ανάλυση πρακτικών κυκλωμάτων ανάδρασης στο πλαίσιο του ιδανικού μοντέλου ανάδρασης γίνεται εύκολα με τη βοήθεια διθύρων που μοντελοποιούν το βασικό ενισχυτή και το δίκτυο ανατροφοδότησης.
- Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται οι κυκλωματικές διθυρικές παράμετροι ανάδρασης (two-port feedback parameters) στις οποίες έχουμε ήδη αναφερθεί.

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

- Το δίθυρο καθορίζεται πλήρως εάν γνωρίζουμε και τις τέσσερις μεταβλητές του. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, την περίπτωση διθύρων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση κυκλωμάτων ανάδρασης **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)

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

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

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

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

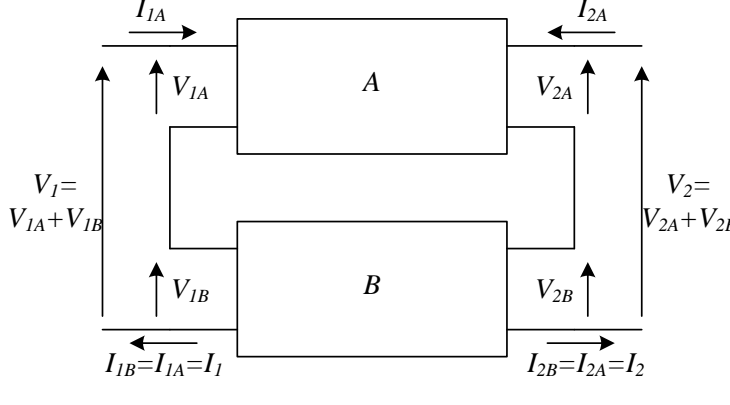
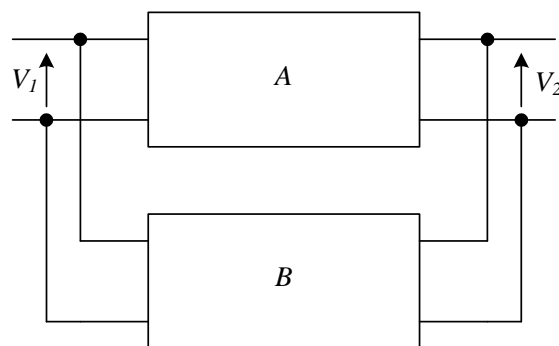
# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

- Οι τέσσερις βασικές τοπολογίες ενισχυτών απλού βρόχου μπορούν να οριστούν με τη βοήθεια διασυνδεδεμένων διθύρων, έτσι ώστε:
- **η μεταβλητή ελέγχου** (αυτή που δειγματοληπτείται από την έξοδο του βασικού ενισχυτή) να **αντιστοιχεί στην κοινή ανεξάρτητη μεταβλητή** των εξόδων τους, ενώ
- η επηρεαζόμενη μεταβλητή της εισόδου του βασικού ενισχυτή να αντιστοιχεί στην εξαρτημένη μεταβλητή του
- Έτσι, αν από το αντίστοιχο συνολικό μέγεθος της εισόδου αφαιρεθεί η αντίστοιχη εξαρτημένη μεταβλητή του δικτυώματος ανάδρασης, να προκύπτει η επηρεαζόμενη μεταβλητή της εισόδου του βασικού ενισχυτή.

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

- Έτσι αν θεωρήσουμε ότι ο βασικός ενισχυτής μοντελοποιείται από ένα δίθυρο που συμβολίζεται με  $A$  και το δικτύωμα ανάδρασης από ένα δίθυρο που συμβολίζεται με  $B$ , οι 4 βασικές τοπολογίες ενισχυτών απλού βρόχου δίνονται στον πιο κάτω **Πίνακα**, όπου δίνονται και οι διθυρικές παράμετροι με τις οποίες αναλύεται η κάθε μια.

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

Διασύνδεση	Σχηματική Διάταξη	Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Εξαρτημένες Μεταβλητές
<p><b>Series-Series (S-S)</b>                      ή voltage-mixing                      current-sampling ή series-series                      ( <math>Z</math> - παράμετροι, δηλ.  <math>\mathcal{X}</math> - παράμετροι)</p>		$I_{1A} = I_{1B} = I_1$ $I_{2A} = I_{2B} = I_2$	$V_1 = V_{1A} + V_{1B}$ $V_2 = V_{2A} + V_{2B}$
<p><b>Parallel-Parallel (P-P)</b>                      ή shunt - shunt                      ή current-mixing                      voltage-sampling                      ( <math>Y</math> - παράμετροι, δηλ.  <math>\mathcal{X}</math> - παράμετροι)</p>		$V_1 = V_{1A} = V_{1B}$ $V_2 = V_{2A} = V_{2B}$	$I_1 = I_{1A} + I_{1B}$ $I_2 = I_{2A} + I_{2B}$

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

Διασύνδεση	Σχηματική Διάταξη	Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Εξαρτημένες Μεταβλητές
<b>Series-Parallel (S-P)</b> ή series – shunt ή voltage-mixing voltage-sampling ( $h$ – παράμετροι, δηλ. $\chi$ - παράμετροι)		$I_{1A} = I_{1B} = I_1$  $V_2 = V_{2A} = V_{2B}$	$V_1 = V_{1A} + V_{1B}$  $I_2 = I_{2A} + I_{2B}$
<b>Parallel-Series (P-S)</b> ή shunt – series ή current-mixing current-sampling ( $g$ – παράμετροι, δηλ. $\chi$ - παράμετροι)		$V_1 = V_{1A} = V_{1B}$  $I_{2A} = I_{2B} = I_2$	$I_1 = I_{1A} + I_{1B}$  $V_2 = V_{2A} + V_{2B}$

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης - Δίθυρα

- Θυμίζουμε ότι για τη χρήση του ιδανικού μοντέλου πρέπει:
  - 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.
  - Σε επίπεδο διθύρων, αυτό σημαίνει ότι τόσο το δίθυρο «*A*» (βασικός ενισχυτής, όσο και το δίθυρο «*B*» (δικτύωμα ανάδρασης) έχουν μόνο μια εξαρτημένη πηγή με κατεύθυνση την κατεύθυνση διάδοσης του κάθε διθύρου: δίθυρο «*A*» = προς τα εμπρός και δίθυρο «*B*» = προς τα πίσω. Αυτό προϋποθέτει ότι ισχύουν, σε γενικευμένο συμβολισμό:
    - $\chi_{21,A} \gg \chi_{21,B}$  και  $\chi_{12,B} \gg \chi_{12,A}$

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης - Δίθυρα

- Επίσης ότι:
  - 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.**
  - Σε επίπεδο διθύρων, αυτό σημαίνει ότι **το δίθυρο « B » δεν έχει καθόλου παθητικά στοιχεία.** Αυτό σημαίνει ότι τα παθητικά στοιχεία του « B » μετακινούνται και προστίθενται σε αυτά του « A », οπότε στο « A » πλέον έχουμε, σε γενικευμένο συμβολισμό, στην είσοδο  $\chi_{11,A} + \chi_{11,B}$  και αντίστοιχα στην έξοδο  $\chi_{22,A} + \chi_{22,B}$ .

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης - Δίθυρα

- Στον **Πίνακα** που ακολουθεί φαίνεται μια σύνοψη της επίδρασης της αρνητικής ανάδρασης στα χαρακτηριστικά του βασικού ενισχυτή, ανάλογα με την τοπολογία ανάδρασης, σύμφωνα με το ιδανικό μοντέλο ανάλυσης της ανάδρασης, όπως αυτά είναι δυνατό να υπολογιστούν με τη βοήθεια απλοποιημένων διθύρων που ικανοποιούν τις πιο πάνω προϋποθέσεις (τα οποία επίσης φαίνονται ανά περίπτωση). Παρατηρήστε ότι για την ανάλυση βασιζόμαστε :
  - Στην **ανεξάρτητη μεταβλητή της εξόδου** που είναι **κοινή** σε βασικό ενισχυτή και δικτύωμα ανάδρασης και γι' αυτό είναι δυνατό να **δειγματοληπτείται** από το δικτύωμα ανάδρασης.
  - Στην **εξαρτημένη μεταβλητή της εισόδου** του βασικού ενισχυτή, που προκύπτει ως το αντίστοιχο **συνολικό μέγεθος (είσοδος) μειωμένο κατά την εξαρτημένη μεταβλητή του δικτυώματος ανάδρασης**, εξασφαλίζοντας έτσι την αρνητική ανάδραση (εφόσον φυσικά η παράμετρος  $\chi_{12,B}$  είναι τέτοιου προσήμου ώστε  $A_{OL}\beta > 0$  ).

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

Διασύνδεση Είδος Ενισχυτή	Σχηματική Διάταξη	Παράμετροι Ιδανικού Μοντέλου	Επιδόσεις Κλειστού Βρόχου
<p><b>Series-Series (S-S)</b> ή voltage-mixing current-sampling ή series-series (z — παράμετροι) <b>Ενισχυτής Διαγωγιμότητας</b></p>		$A_{OL} = A_G = \frac{I_2}{V_1}$ $\beta = z_{12B}$	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + A_{OL}\beta}$ $Z_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta)Z_{i,OL}$ $Y_{o,CL} = Y_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta)$
<p><b>Parallel – Parallel (P-P)</b> ή shunt – shunt ή current-mixing voltage-sampling (y — παράμετροι) <b>Ενισχυτής Διαντίστασης</b></p>		$A_{OL} = A_R = \frac{V_2}{I_1}$ $\beta = y_{12B}$	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + A_{OL}\beta}$ $Y_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta)Y_{i,OL}$ $Z_{o,CL} = Z_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta)$

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

Διασύνδεση Είδος Ενισχυτή	Σχηματική Διάταξη	Παράμετροι Ιδανικού Μοντέλου	Επιδόσεις Κλειστού Βρόχου
<p><b>Series-Parallel (S-P)</b> ή series – shunt ή voltage-mixing voltage-sampling ( <math>h</math> – παράμετροι) <b>Ενισχυτής Τάσης</b></p>		$A_{OL} = A_V = \frac{V_2}{V_1}$ $\beta = h_{12B}$	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + A_{OL}\beta}$ $Z_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta)Z_{i,OL}$ $Z_{o,CL} = Z_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta)$
<p><b>Parallel-Series (P-S)</b> ή shunt – series ή current-mixing current-sampling ( <math>g</math> – παράμετροι) <b>Ενισχυτής Ρεύματος</b></p>		$A_{OL} = A_I = \frac{I_2}{I_1}$ $\beta = g_{12B}$	$A_{CL} = \frac{A_{OL}}{1 + A_{OL}\beta}$ $Y_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta)Y_{i,OL}$ $Y_{o,CL} = Y_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta)$

# Ιδανικό μοντέλο ανάλυσης ανάδρασης

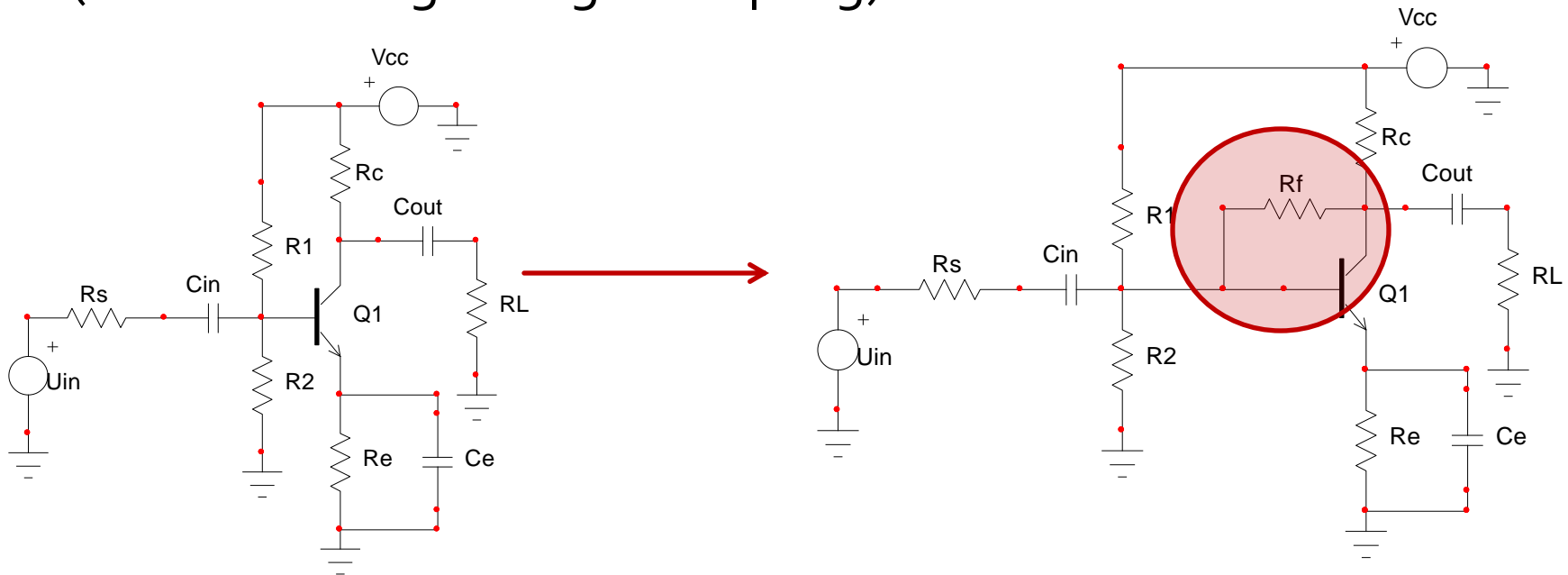
- Από τον Πίνακα είναι φανερό ότι πάντοτε συμβαίνουν:
  - Η ενίσχυση κλειστού βρόχου **μειώνεται** σε σχέση με την ενίσχυση ανοιχτού βρόχου διαιρεμένη **κατά το ποσό ανάδρασης**  $(1 + A_{OL}\beta)$  .
  - Το **ισοδύναμο παθητικό στοιχείο εισόδου** (εμπέδηση εισόδου,  $Z_{i,CL}$  , εφόσον σήμα εισόδου θεωρείται η τάση, και αντίστοιχα αποδεκτικότητα εισόδου ,  $Y_{i,CL}$  , εφόσον σήμα εισόδου θεωρείται το ρεύμα) **αυξάνεται** σε σχέση με αυτό του ανοιχτού βρόχου **πολλαπλασιασμένο κατά το ποσό ανάδρασης**  $(1 + A_{OL}\beta)$  .
  - Το **ισοδύναμο παθητικό στοιχείο εξόδου** (εμπέδηση εξόδου,  $Z_{o,CL}$  , εφόσον σήμα εξόδου θεωρείται η τάση, και αντίστοιχα αποδεκτικότητα εξόδου ,  $Y_{o,CL}$  , εφόσον σήμα εξόδου θεωρείται το ρεύμα) **μειώνεται** σε σχέση με αυτό του ανοιχτού βρόχου **διαιρεμένο κατά το ποσό ανάδρασης**  $(1 + A_{OL}\beta)$  .

# Ανάλυση Ανάδρασης με τη βοήθεια Διθύρων

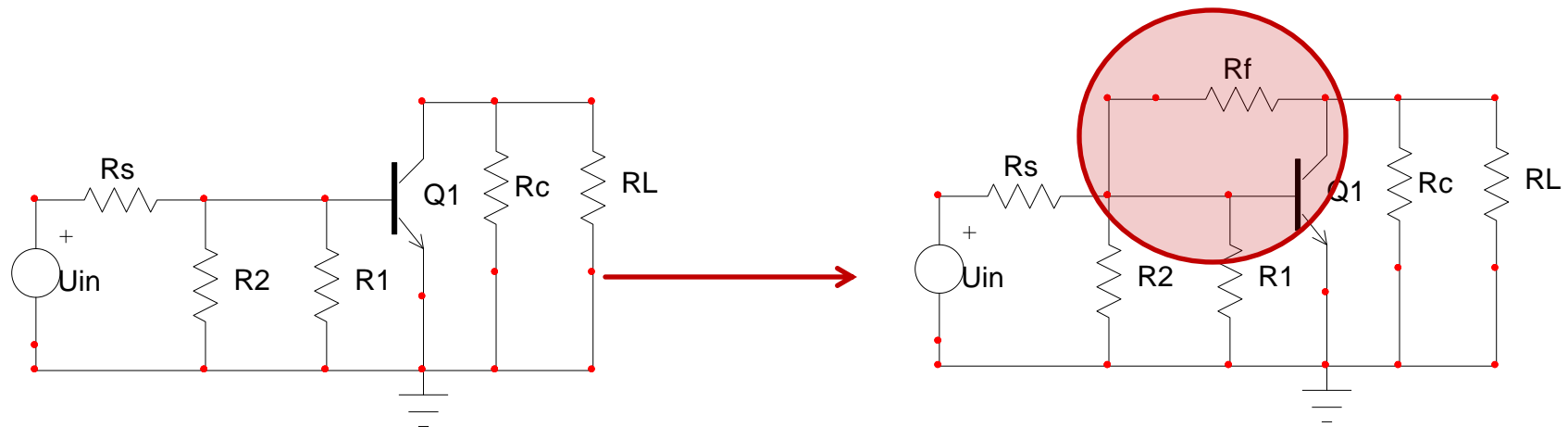
- Σημείωση:
- Το αν το ισοδύναμο παθητικό στοιχείο εισόδου ή εξόδου είναι εμπέδηση (αντίσταση) ή αποδεκτικότητα (αγωγιμότητα) καθορίζεται από το είδος του ενισχυτή, δηλαδή από το τι είναι το σήμα εισόδου (τάση ή ρεύμα) και τι το σήμα εξόδου (τάση ή ρεύμα). Για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις ενισχυτών ανάδρασης απλού βρόχου ισχύουν διαφορετικοί συνδυασμοί σήματος εισόδου-σήματος εξόδου (βλ. προηγούμενο **Πίνακα**)
- Σήμα εισόδου είναι η **επηρεαζόμενη μεταβλητή της εισόδου του βασικού ενισχυτή** και αντιστοιχεί στην **εξαρτημένη μεταβλητή του βασικού ενισχυτή**
- Σήμα εξόδου είναι η **κοινή ανεξάρτητη μεταβλητή των εξόδων τους**

# Ανάδραση Παράλληλα-Παράλληλα

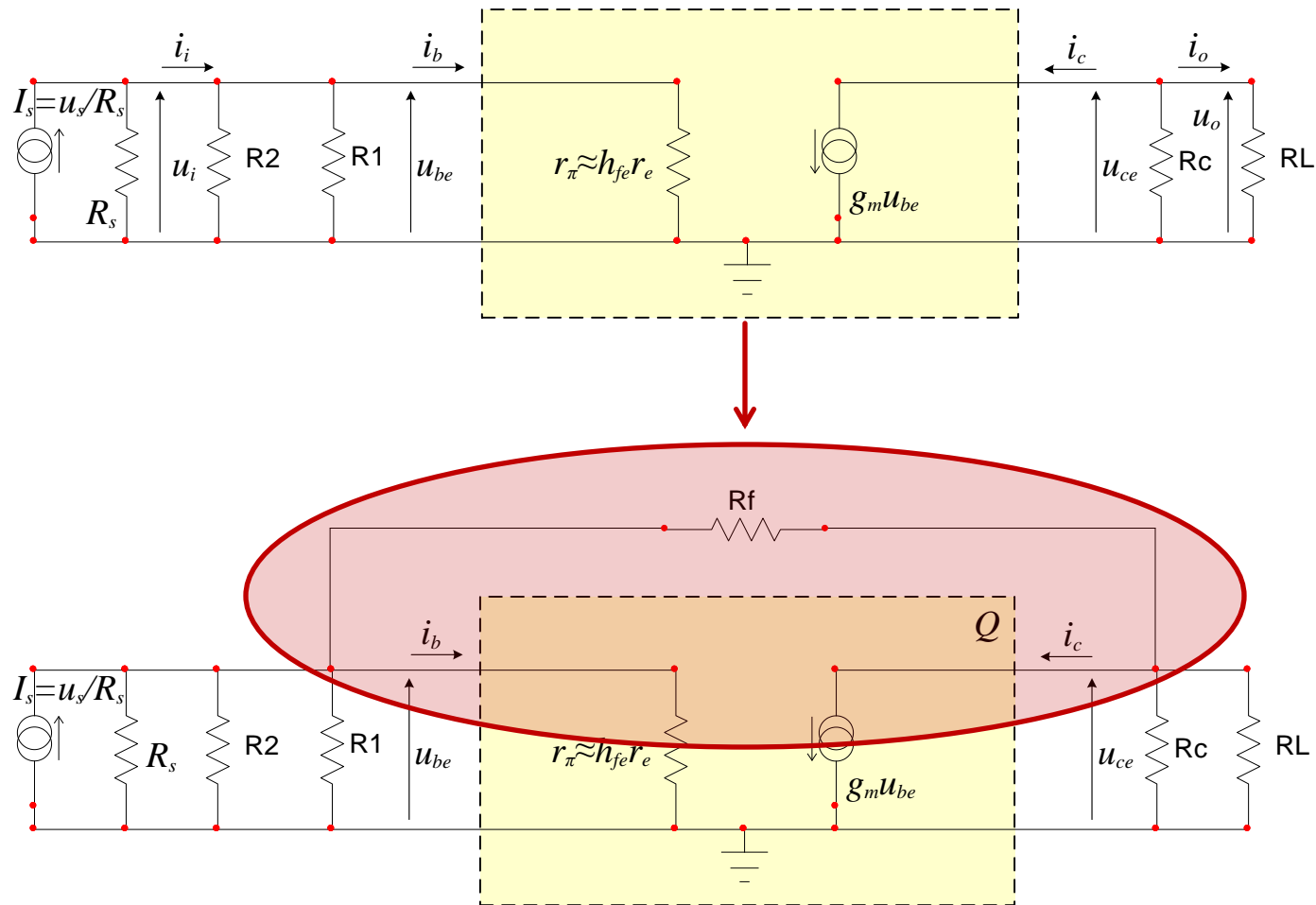
- Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT, ανάδραση παράλληλα-παράλληλα (PP) ή δειγματοληψίας τάσης – μίξης ρεύματος (current-mixing voltage-sampling)



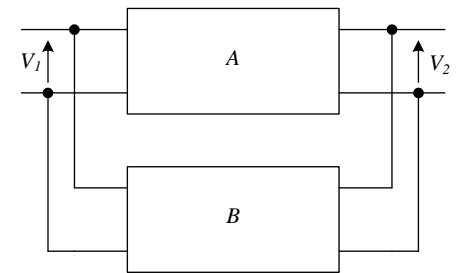
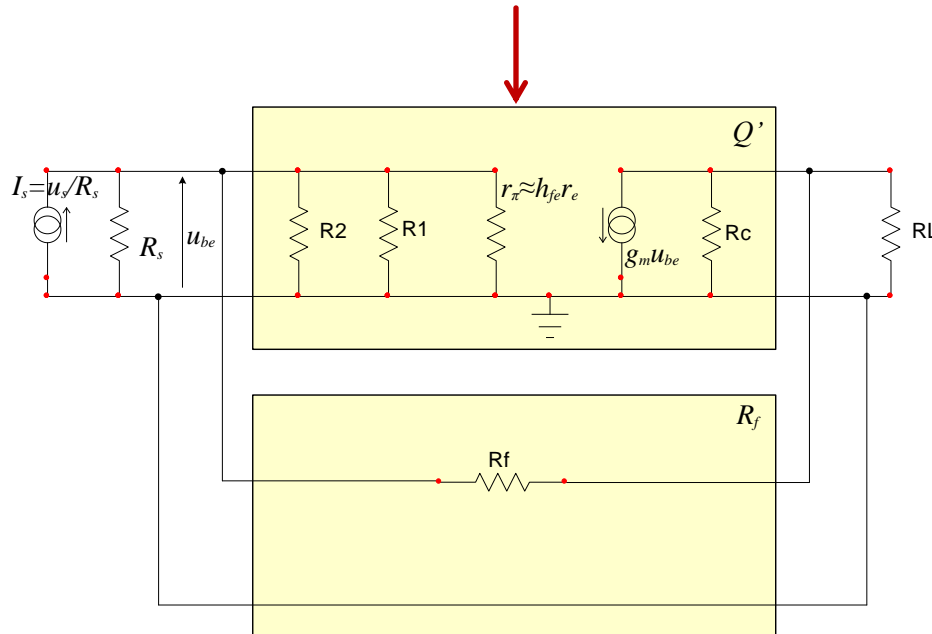
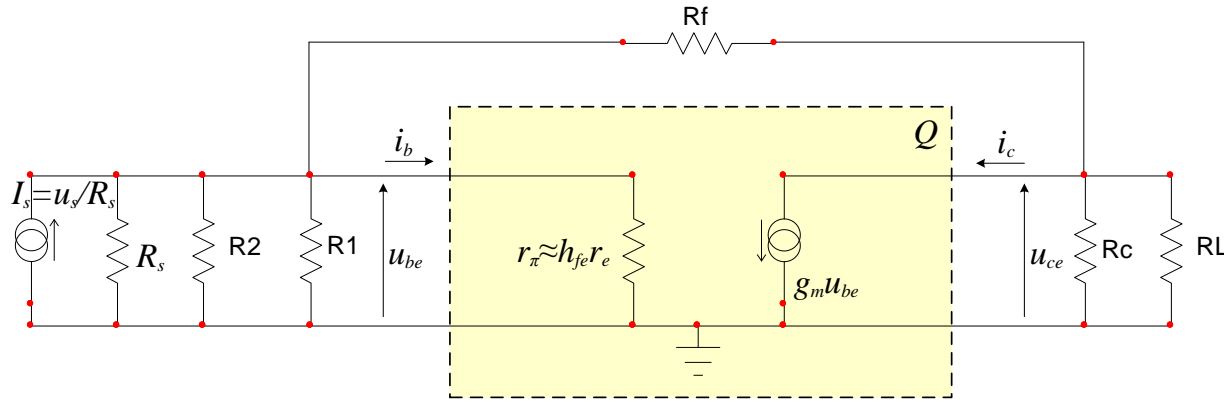
# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



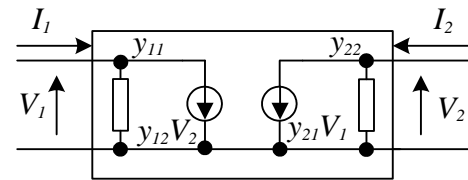
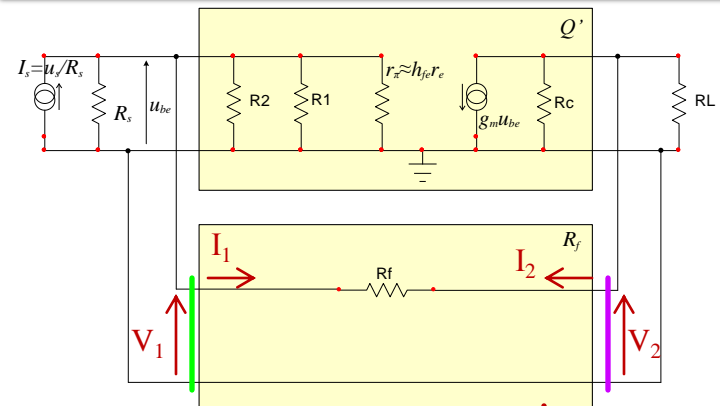
# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



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

$$y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0}$$

$$y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0}$$

$$y_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0}$$

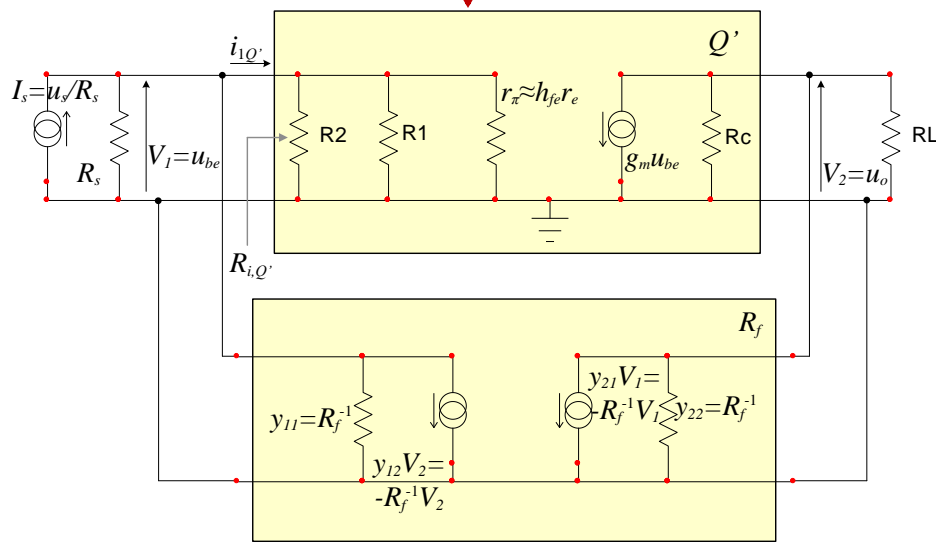
$$y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0}$$

$$V_1 = V_{1A} = V_{1B}$$

$$V_2 = V_{2A} = V_{2B}$$

$$I_1 = I_{1A} + I_{1B}$$

$$I_2 = I_{2A} + I_{2B}$$



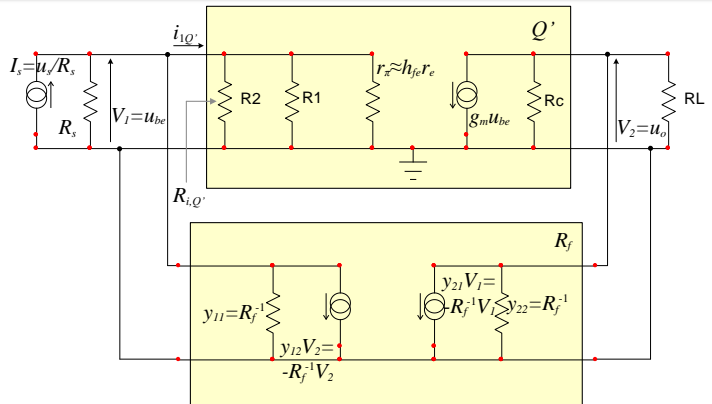
$$\mathbf{Y}_Q \cong \begin{bmatrix} r_\pi & 0 \\ g_m & 0 \end{bmatrix}$$

$$y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0} = \frac{1}{R_f}$$

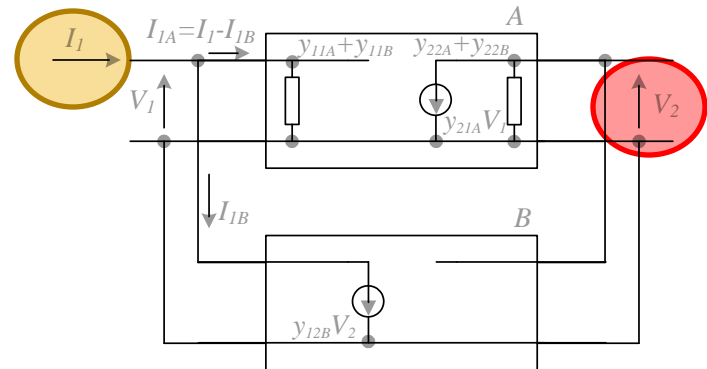
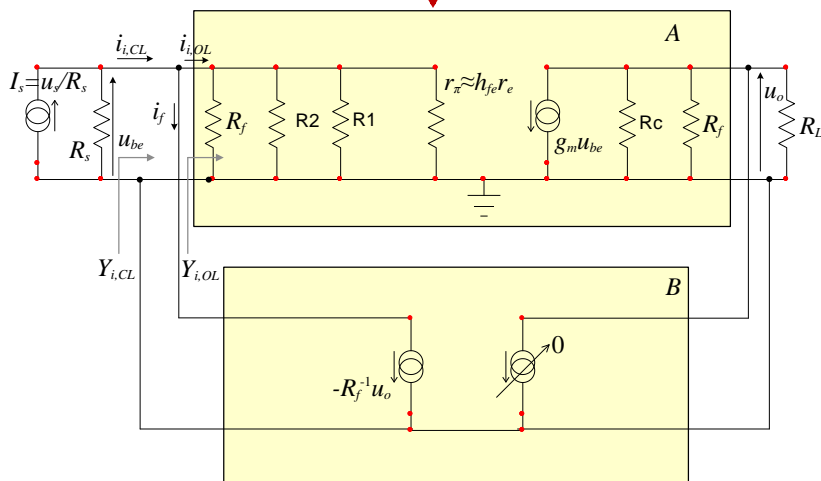
$$y_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0} = -\frac{I_1}{V_1} = -\frac{1}{R_f}$$

$$\mathbf{Y}_{R_f} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{R_f} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

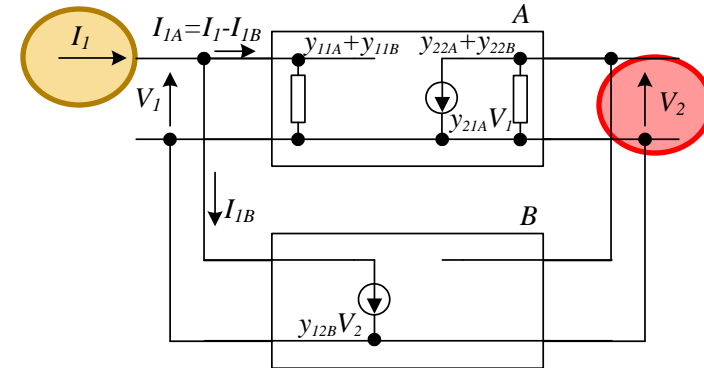
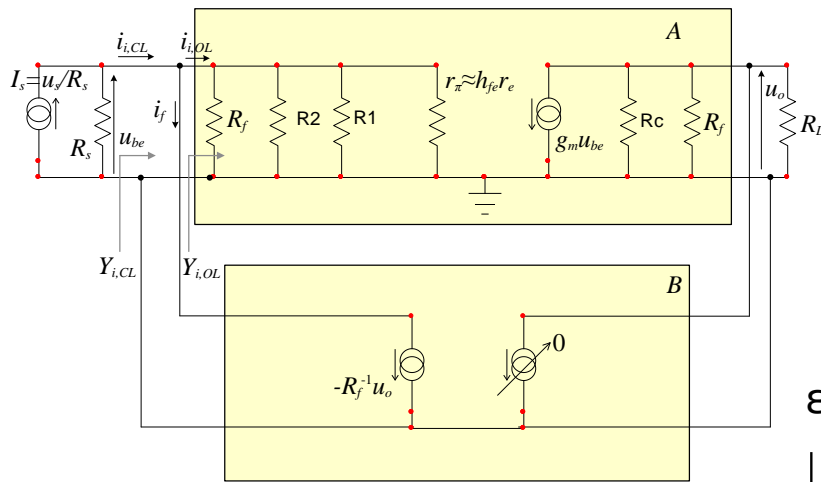
# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



Ανάδειξη του βασικού ενισχυτή και του δικτύωματος ανάδρασης μετά από απλοποιήσεις και χειρισμό του κυκλώματος ώστε να είναι **συμβατό με το ιδανικό μοντέλο ανάλυσης της ανάδρασης.**



# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



«τόσο ο βασικός ενισχυτής όσο και το δίκτυο ανάδρασης πρέπει να 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.»

ελέγχουμε την ισχύ της ανισότητας

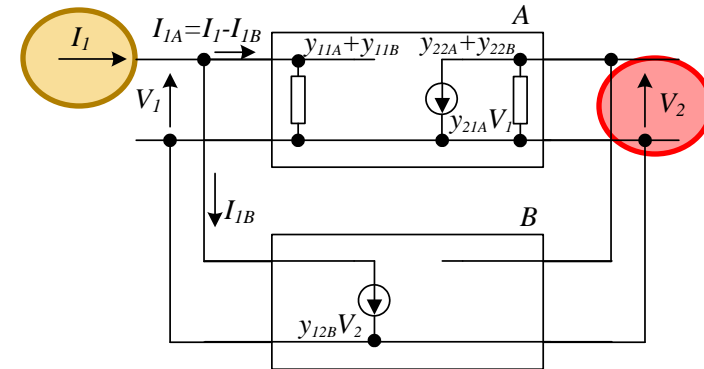
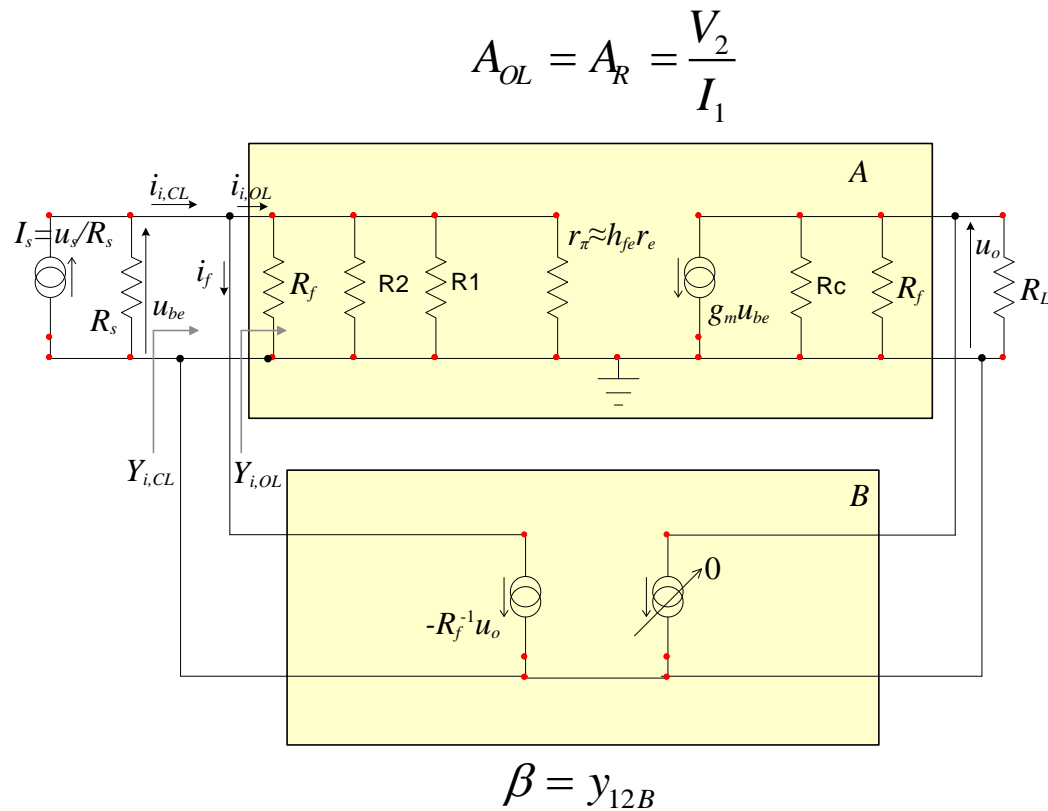
$$|y_{21,Q'}| \gg |y_{21,R_f}| \quad \text{δηλ. ότι } g_m \gg G_f$$

Πράγματι, η ανισότητα γενικά ισχύει με καλή ακρίβεια, μιας και π.χ. για ρεύμα ηρεμίας συλλέκτη  $I_C = 10\text{mA}$  από την

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \cong \frac{I_C}{25\text{mV}} \quad (@ 300\text{K})$$

έχουμε  $g_m \cong 0.4\Omega^{-1}$ , ενώ για αντίσταση ανάδρασης  $R_f = 10\text{k}\Omega$ , έχουμε  $G_f = R_f^{-1} = 0.1\text{m}\Omega^{-1}$

# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



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

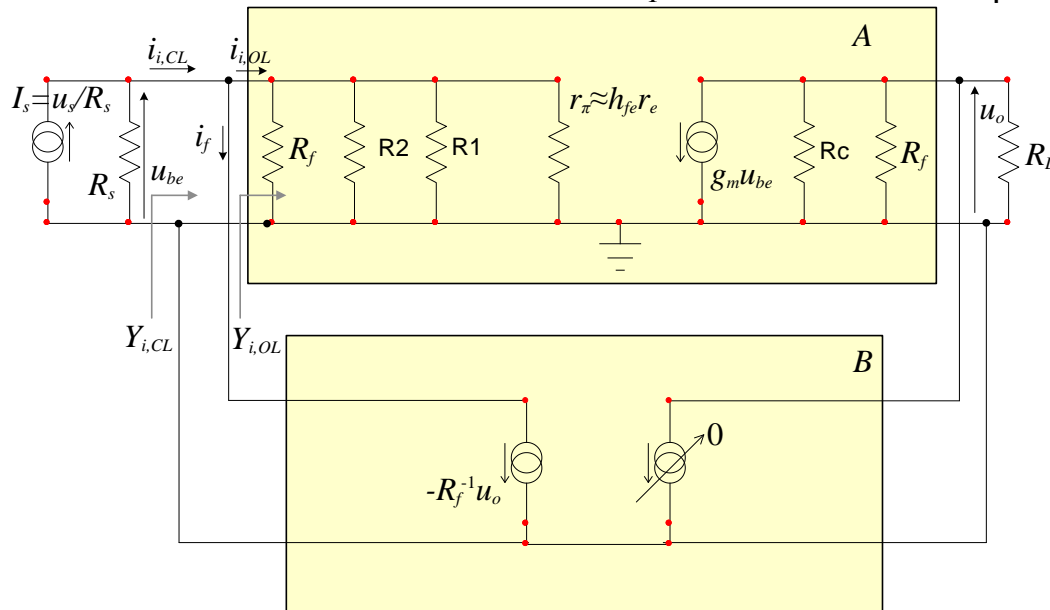
$$Y_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta)Y_{i,OL}$$

$$Z_{o,CL} = Z_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta)$$

# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)

$$A_{OL} = A_R = \frac{V_2}{I_1}$$

για ανοικτό βρόχο κάνοντας αναλυτικά πράξεις βλέπουμε ότι έχουμε



$$Y_{i,OL} = \frac{i_{i,OL}}{u_i} = \left[ R_f // R_1 // R_2 // \left( \frac{h_{fe}}{g_m} \right) \right]^{-1}$$

$$Z_{o,OL} = \frac{u_o}{i_o} \Bigg|_{\substack{R_L \rightarrow \infty \\ i_s = 0, G_s \neq 0}} = R_C // R_f$$

$$r_e \cong g_m^{-1}$$

$$\beta = y_{12B}$$

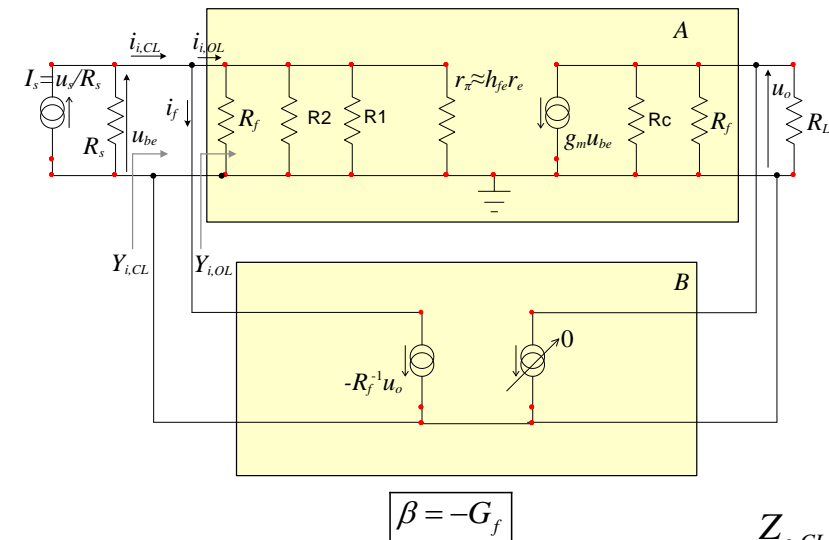
$$\beta = -G_f$$

$$A_{OL} = A_R = \frac{u_o}{i_{i,OL}} = -g_m \left( R_C // R_f // R_L \right) \left[ R_f // R_1 // R_2 // \left( \frac{h_{fe}}{g_m} \right) \right]$$

$$(1 + A_{OL}\beta) = 1 + g_m \left( R_C // R_f // R_L \right) \left[ R_f // R_1 // R_2 // \left( \frac{h_{fe}}{g_m} \right) \right] / R_f$$

# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)

$$A_{OL} = A_R = \frac{u_o}{i_{i,OL}} = -g_m (R_C // R_f // R_L) \left[ R_f // R_1 // R_2 // (h_{fe} / g_m) \right]$$



$$Y_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta)Y_{i,OL} \Rightarrow$$

$$Y_{i,CL} = \left[ R_f // R_1 // R_2 // (h_{fe} / g_m) \right]^{-1} + g_m (R_C // R_f // R_L) / R_f$$

για κλειστό βρόχο κάνοντας αναλυτικά πράξεις βλέπουμε ότι για την αποδεκτικότητα εισόδου π.χ. έχουμε διαδοχικά

$$Y_{i,CL} = \frac{i_{i,CL}}{u_i} = \frac{i_{i,OL} + i_f}{u_i} = \frac{i_{i,OL}}{u_i} + \frac{\beta u_o}{u_i} \Rightarrow$$

$$Y_{i,CL} = \frac{i_{i,OL}}{u_i} + \beta \frac{A_R i_{i,OL}}{u_i} = (1 + \beta A_{OL}) Y_{i,OL}$$

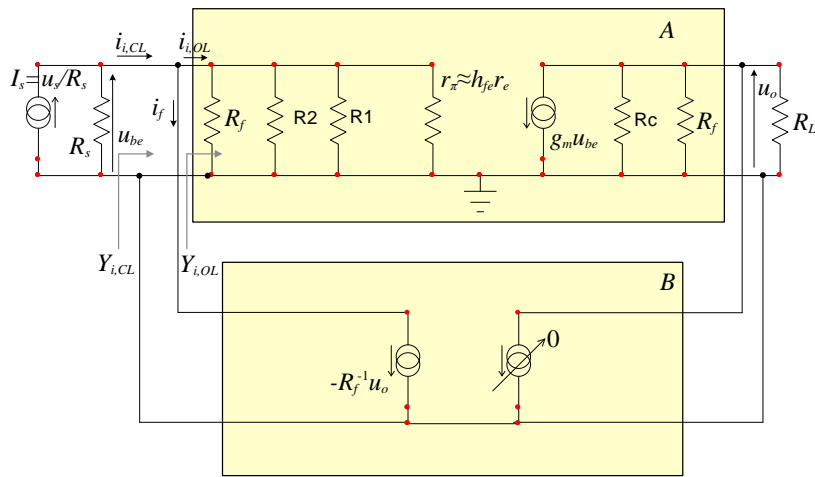
$$Z_{o,CL} = Z_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta) \Rightarrow$$

$$Z_{o,CL} = (R_C // R_f) / \left\{ 1 + g_m (R_C // R_f // R_L) \left[ R_f // R_1 // R_2 // (h_{fe} / g_m) \right] / R_f \right\}$$

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

$$A_{CL} = \frac{-g_m (R_C // R_f // R_L) \left[ R_f // R_1 // R_2 // (h_{fe} / g_m) \right]}{1 + g_m (R_C // R_f // R_L) \left[ R_f // R_1 // R_2 // (h_{fe} / g_m) \right] / R_f}$$

# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



Από το συνολικό κύκλωμα του ενισχυτή ανάδρασης σε κλειστό βρόχο

$$A_{V,CL} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o}{u_{be}} = \frac{-g_m u_{be} (R_C // R_L // R_f)}{u_{be}} \Rightarrow \boxed{A_{V,CL} = -g_m (R_C // R_L // R_f)}$$

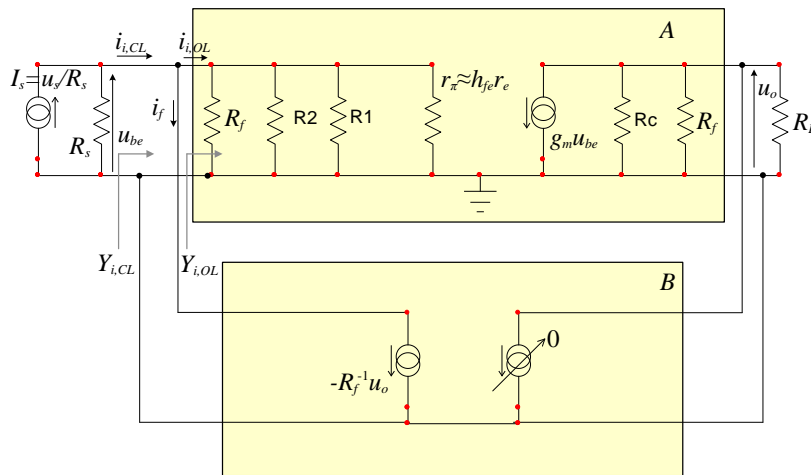
Ενώ χωρίς την ανάδραση είχαμε υπολογίσει:  $A_V = \frac{u_o}{u_i} = -h_{fe} \frac{R_C // R_L}{r_\pi} = -g_m (R_C // R_L)$

Παρότι όπως αποδείχθηκε το κύκλωμα που αναλύθηκε είναι ένας **ενισχυτής διαντίστασης**, συνήθως στην πράξη το σήμα που παρέχεται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι σήμα τάσης, οπότε μας ενδιαφέρει πως επιδρά η ανάδραση και στην **ενίσχυση τάσης**.

Μιας και δε μας ενδιαφέρει πια να εφαρμόσουμε το ιδανικό μοντέλο ανάλυσης της ανάδρασης, αφού έτσι κι αλλιώς **δεν περιμένουμε να ισχύει για την επίδραση της ανάδρασης στην ενίσχυση τάσης ο,τι ισχύει για την επίδρασή της στην διαντίσταση**, θα συγκρίνουμε απ' ευθείας την ενίσχυση τάσης του κυκλώματος ανοικτού βρόχου με αυτήν του κλειστού βρόχου.

Παρατηρούμε ότι **η ενίσχυση τάσης του ενισχυτή μειώνεται επίσης λόγω της εφαρμογής της ανάδρασης.**

# Ενισχυτής Διαντίστασης με BJT (Ανάδραση P-P)



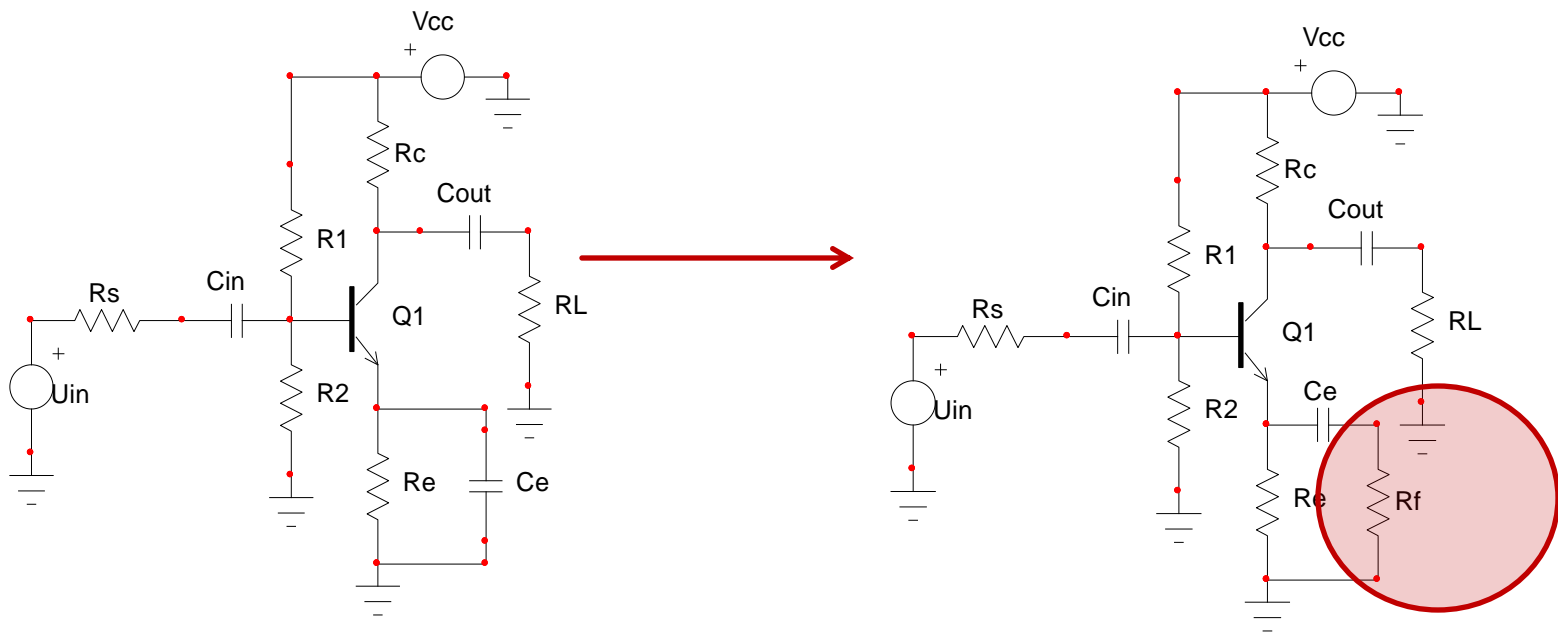
Αν το γεγονός αυτό συνδυαστεί και με την μείωση της εμπέδησης εισόδου (μιας και η αποδεκτικότητα εισόδου αυξάνεται όπως είδαμε πιο πάνω), τότε για σταθερή ηλεκτρεγερτική δύναμη και αντίσταση εξόδου της πηγής τάσης, τότε πέραν από τη μειωμένη ενίσχυση του ενισχυτή καθαυτού θα έχουμε και μικρότερο ποσό της ηλεκτρεγερτικής δύναμης να εισέρχεται στον ενισχυτή λόγω της επιδείνωσης του διαιρέτη τάσης που διαμορφώνεται από τη σε σειρά σύνδεση των εμπεδήσεων  $R_s$  και  $Z_{i,CL}$ , σε σχέση με αυτόν που δημιουργούσαν οι  $R_s$  και  $Z_{i,OL}$

Συνεπώς, η συνολική έξοδος τάσης του ενισχυτή θα εμφανίζεται ακόμη πιο μειωμένη μετά την εφαρμογή της ανάδρασης, κατά τον παράγοντα

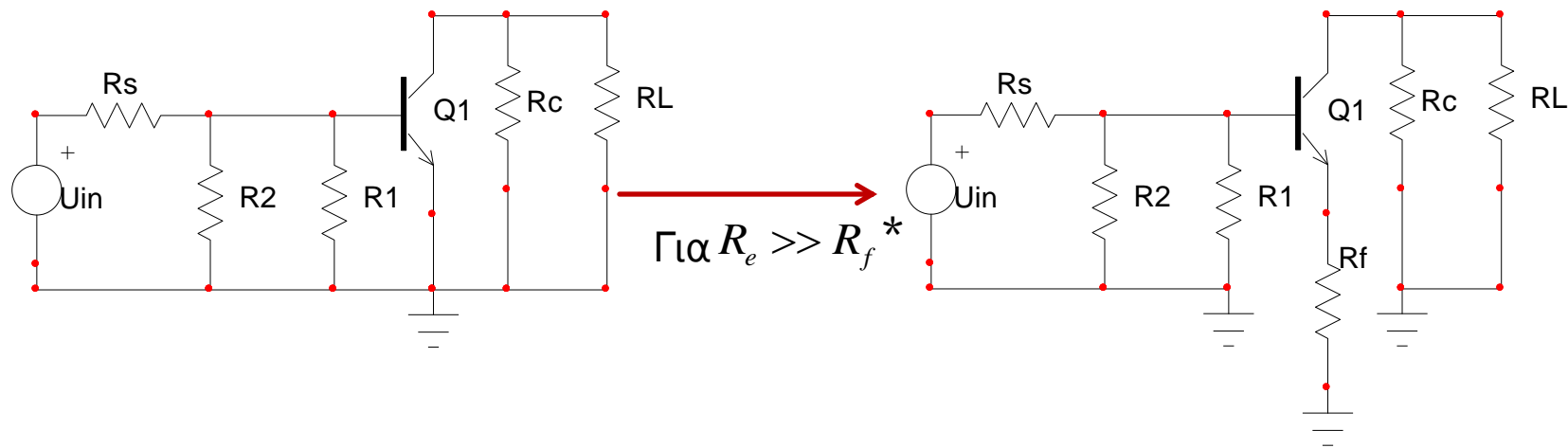
$$\frac{(1 + A_{OL}\beta)R_s + Z_{i,OL}}{R_s + Z_{i,OL}}$$

# Ανάδραση Σειράς-Σειράς

- Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT, ανάδραση σειράς-σειράς (SS) ή δειγματοληψίας ρεύματος – μίξης τάσης (voltage-mixing current-sampling) – Εκφυλισμός Εκπομπού

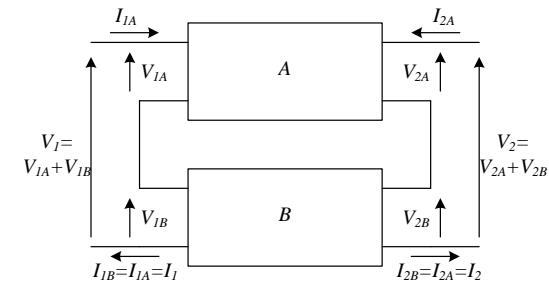
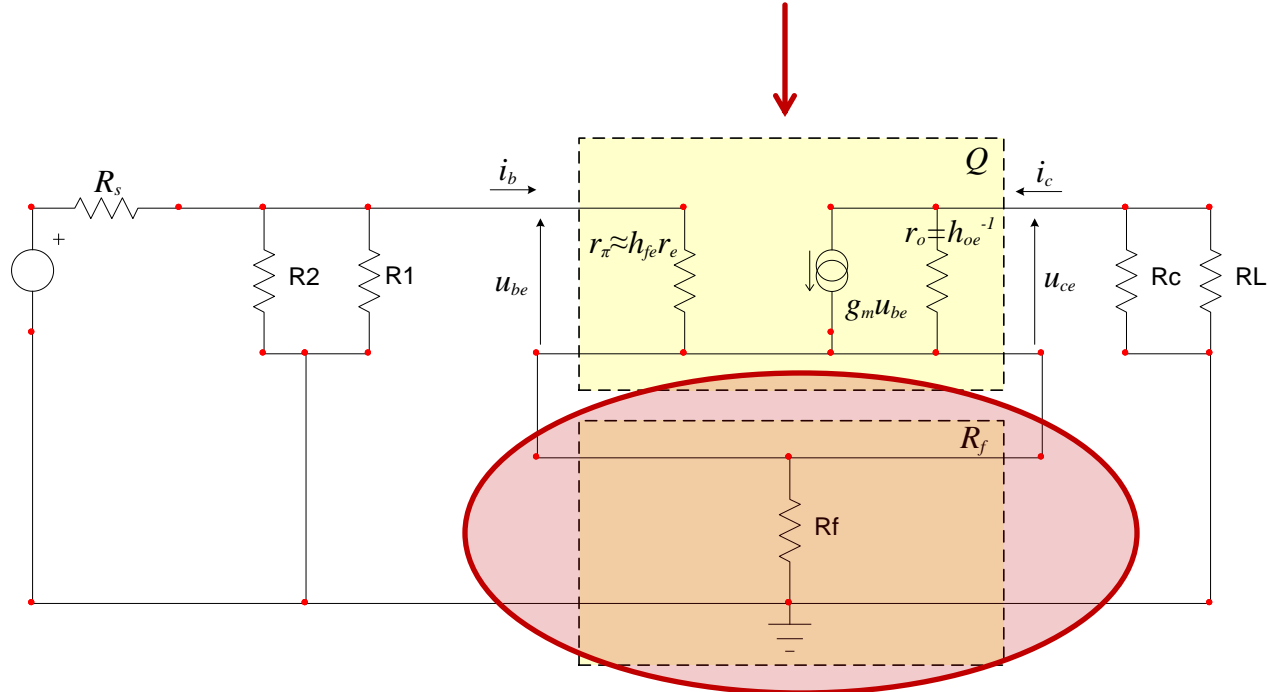
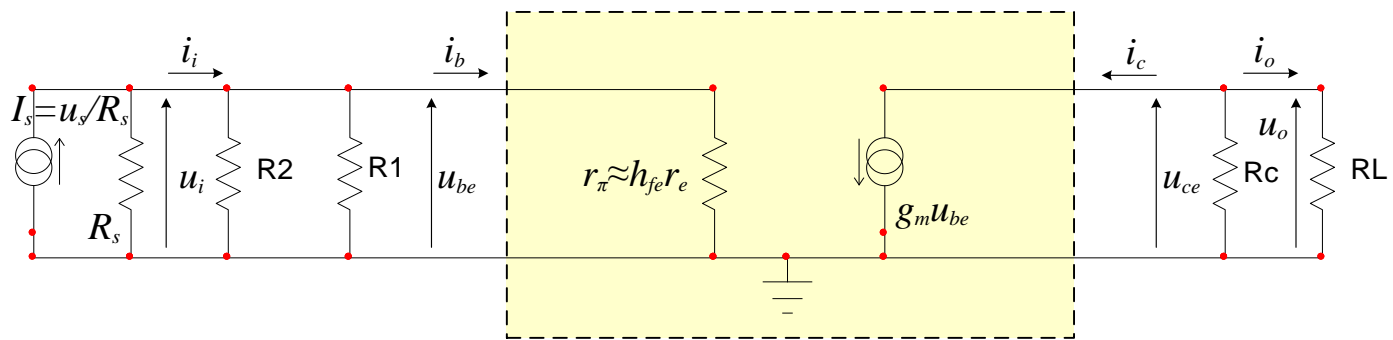


# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)

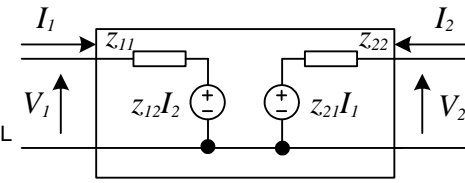
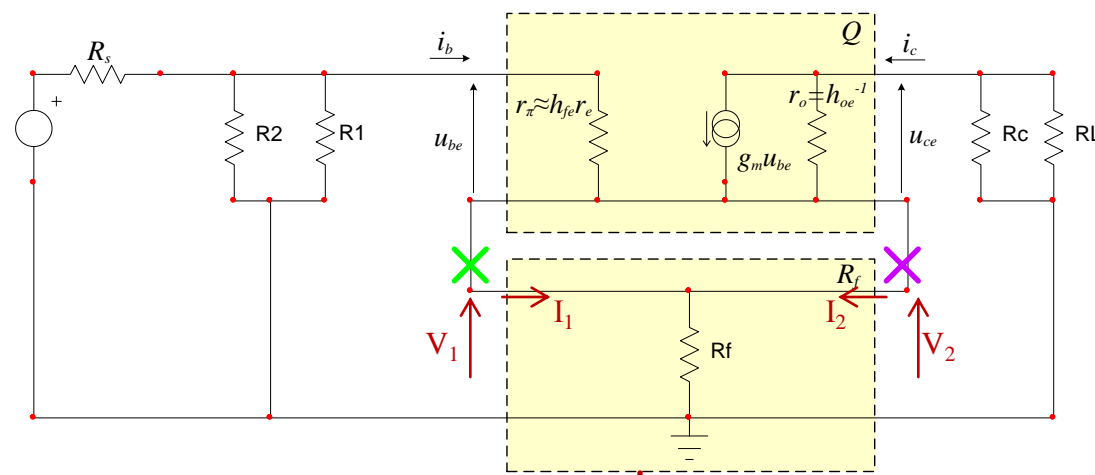


\*Αλλιώς στο AC ισοδύναμο, όπου η  $R_f$  θα πρέπει να μπει η  $R_e // R_f$

# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)



# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)



$$z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

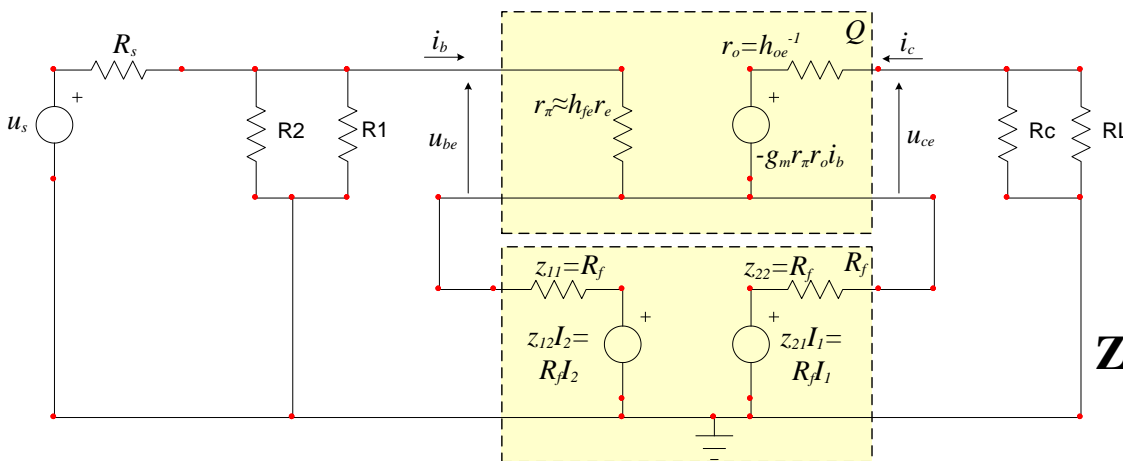
$$z_{21} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

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

$$\mathbf{Z}_{R_f} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} = R_F \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0} = R_f$$

$$z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0} = R_f$$

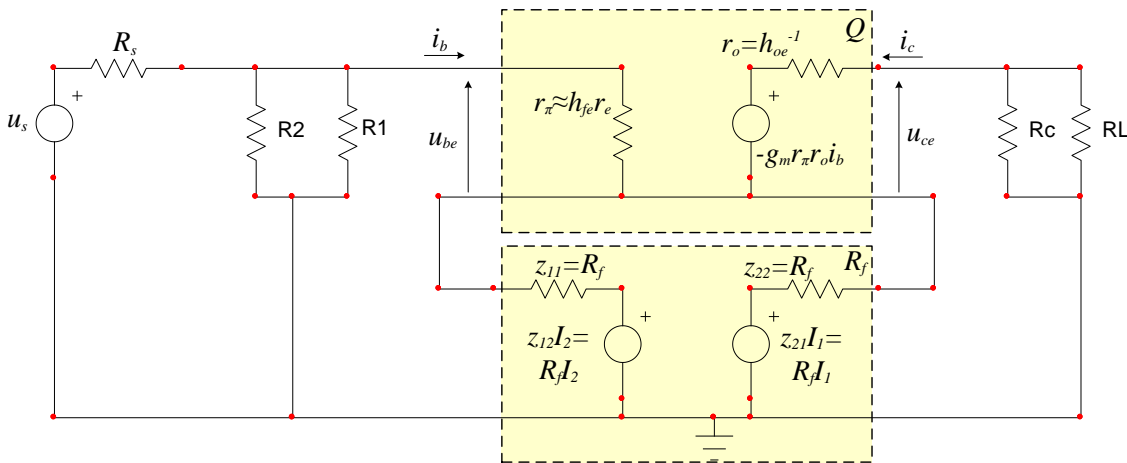


$$\mathbf{Z}_Q = \begin{bmatrix} z_{11,Q} & z_{12,Q} \\ z_{21,Q} & z_{22,Q} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta_Y} \begin{bmatrix} y_{22} & -y_{12} \\ -y_{21} & y_{11} \end{bmatrix}$$

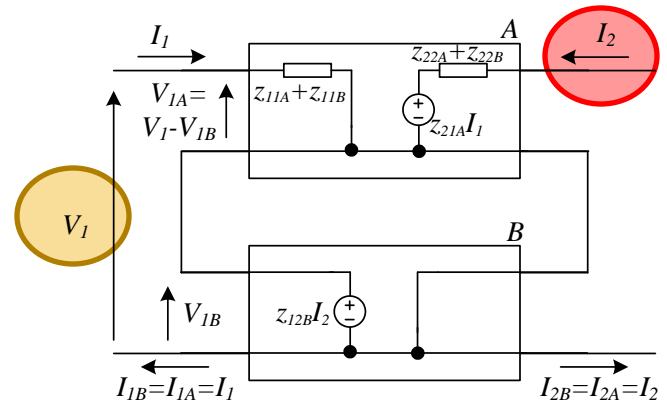
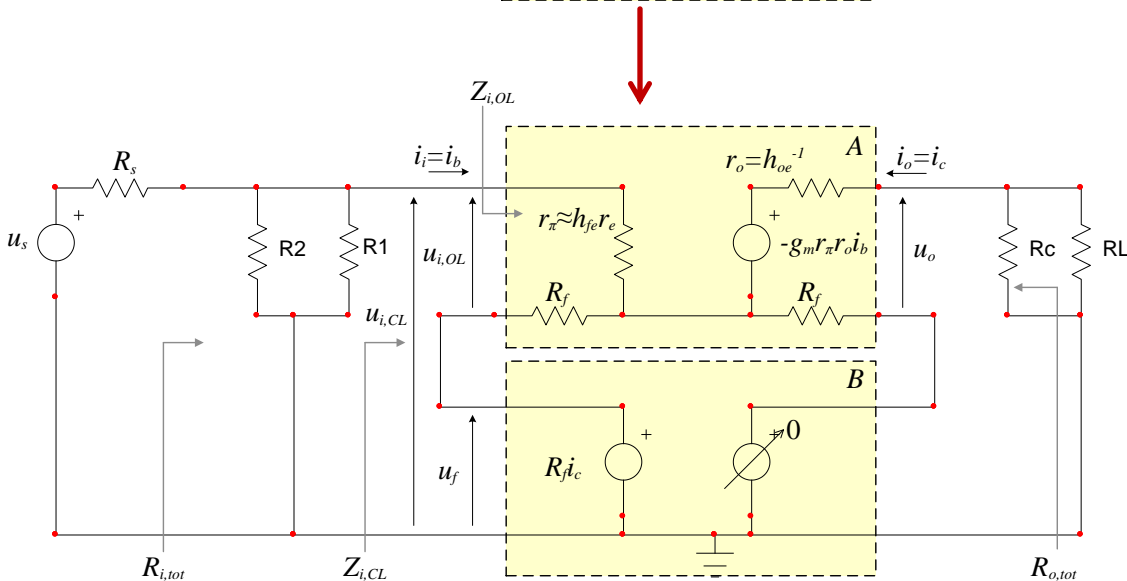
$$\Delta_Y = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}$$

$$\mathbf{Z}_Q = \begin{bmatrix} y_{11}^{-1} & 0 \\ -y_{21}/y_{11}y_{22} & y_{22}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_\pi & 0 \\ -g_m r_\pi r_o & r_o \end{bmatrix}$$

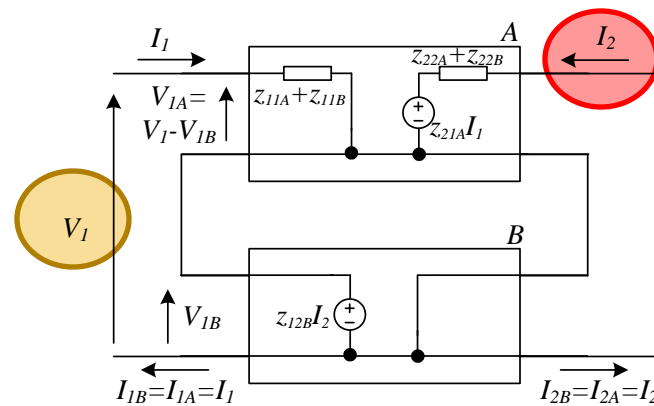
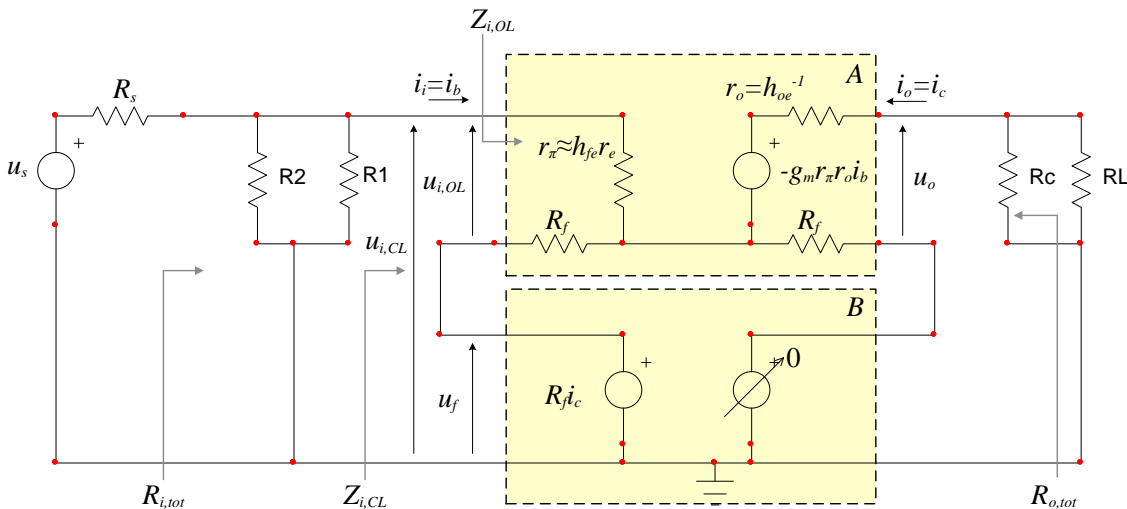
# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)



Ανάδειξη του βασικού ενισχυτή και του δικτύωματος ανάδρασης μετά από απλοποιήσεις και χειρισμό του κυκλώματος ώστε να είναι **συμβατό με το ιδανικό μοντέλο ανάλυσης της ανάδρασης.**



# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)



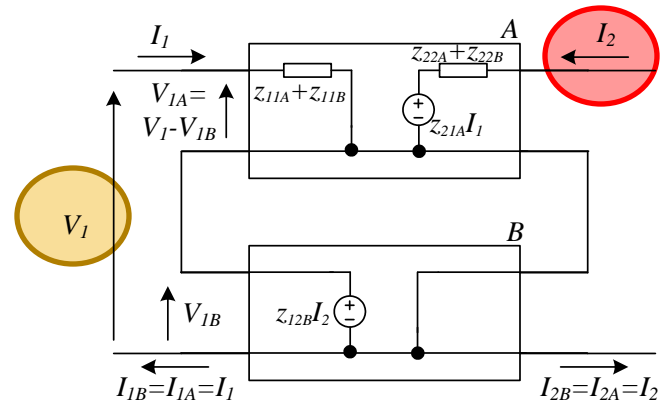
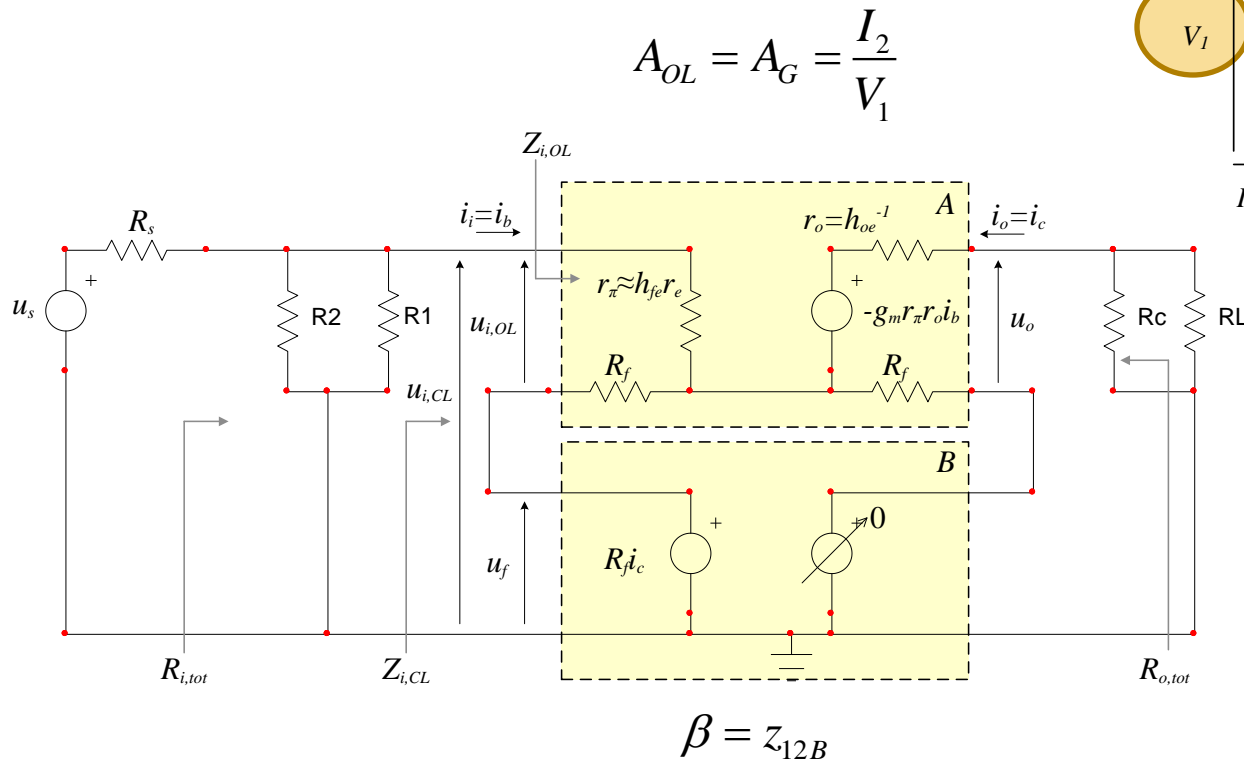
«τόσο ο βασικός ενισχυτής όσο και το δίκτυο ανάδρασης πρέπει να είναι βαθμίδες μονόπλευρης διάδοσης (unilateral transmission), δηλ. το σήμα εισόδου δεν μπορεί να μεταδοθεί διαμέσου της διαδρομής ανάδρασης και, ομοίως, το σήμα εξόδου δεν μπορεί να μεταδοθεί προς τα πίσω μέσω του ενισχυτή.»

ελέγχουμε την ισχύ της ανισότητας

$$|z_{21,Q'}| \gg |z_{21,R_f}| \quad \text{δηλ. ότι} \quad g_m r_\pi r_o \gg R_f$$

Πράγματι, η ανισότητα γενικά ισχύει με καλή ακρίβεια, για συνήθη BJT και συνήθεις τιμές αντίστασης ανάδρασης

# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)



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

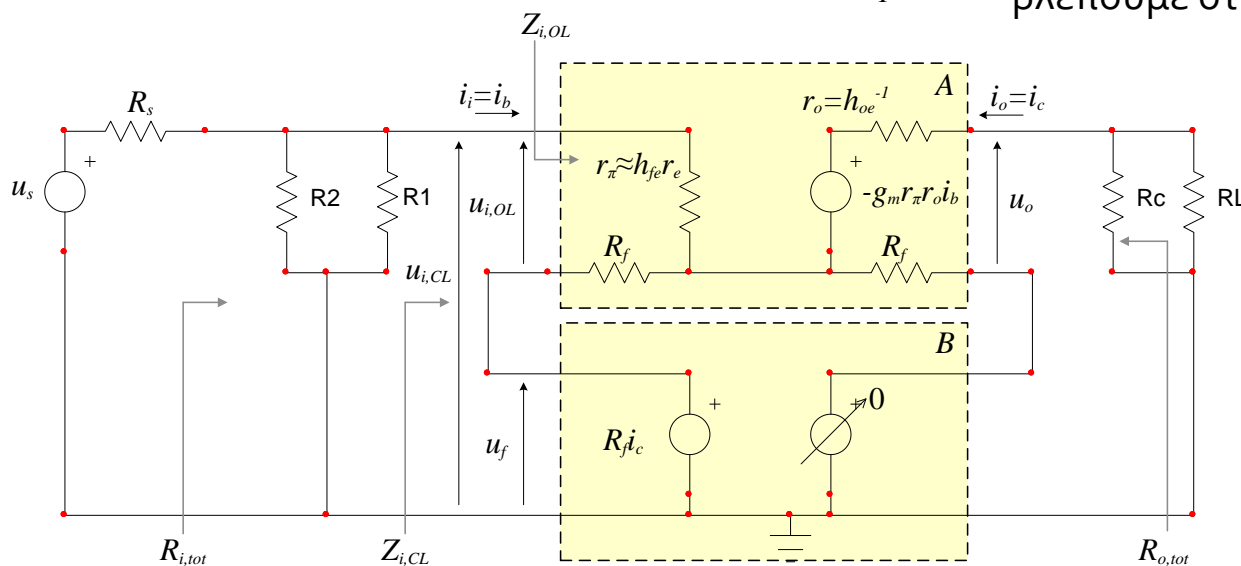
$$Z_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta)Z_{i,OL}$$

$$Y_{o,CL} = Y_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta)$$

# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)

$$A_{OL} = A_G = \frac{I_2}{V_1}$$

για ανοικτό βρόχο κάνοντας αναλυτικά πράξεις βλέπουμε ότι έχουμε



$$Z_{i,OL} = \frac{u_{i,OL}}{i_i} = r_\pi + R_f$$

$$Y_{o,OL} = \left. \frac{i_o}{u_o} \right|_{R_L \rightarrow \infty, u_s=0, R_s \neq 0} = (r_o + R_f)^{-1}$$

$$\beta = z_{12B}$$

$$\beta = R_f$$

$$A_{OL} = A_G = \frac{i_o}{u_{i,OL}} = \frac{i_c}{i_b (r_\pi + R_f)} \Rightarrow A_{OL} = \frac{g_m r_\pi}{(r_\pi + R_f)}$$

$$(1 + A_{OL} \beta) = 1 + \left[ \frac{g_m r_\pi R_f}{(r_\pi + R_f)} \right]$$

# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)

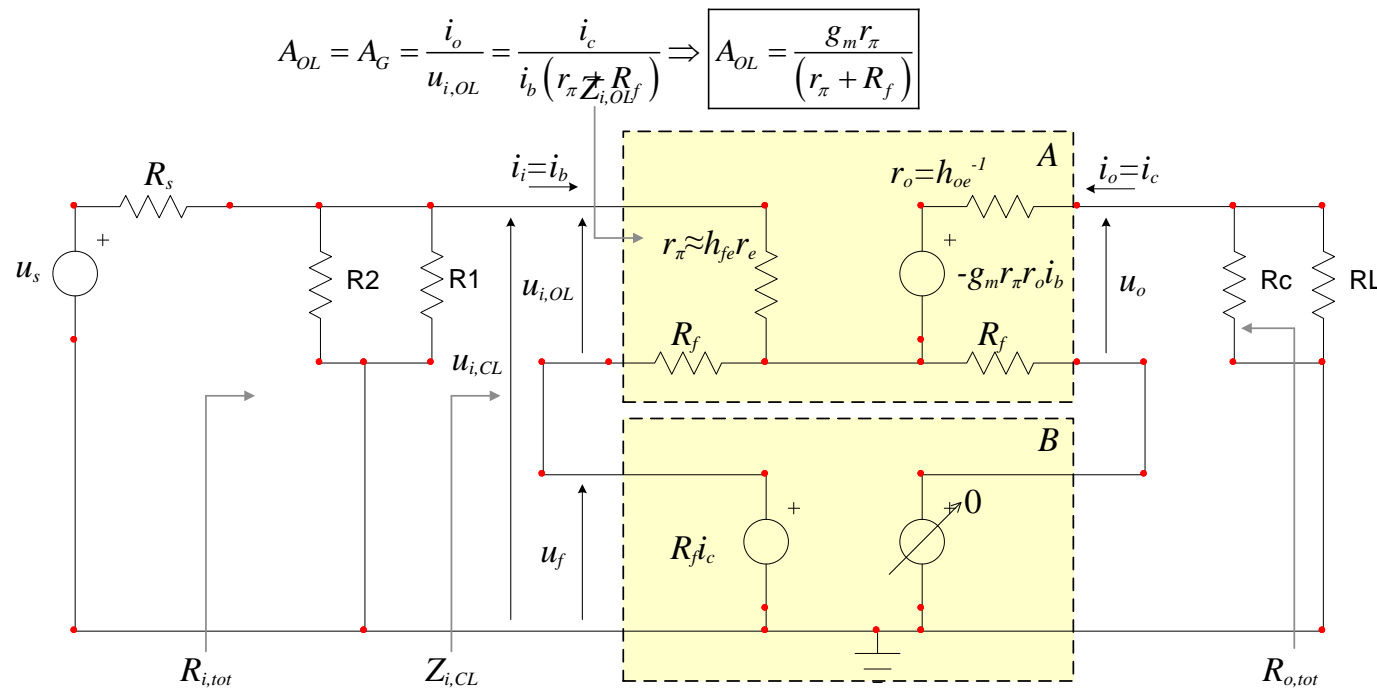
$$A_{OL} = A_G = \frac{i_o}{u_{i,OL}} = \frac{i_c}{i_b (r_\pi \parallel Z_{i,OLf})} \Rightarrow A_{OL} = \frac{g_m r_\pi}{(r_\pi + R_f)}$$

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

$$A_{CL} = \frac{g_m r_\pi}{r_\pi + R_f + g_m r_\pi R_f}$$

$$Z_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta)Z_{i,OL} \Rightarrow$$

$$Z_{i,CL} = r_\pi + R_f + g_m r_\pi R_f$$



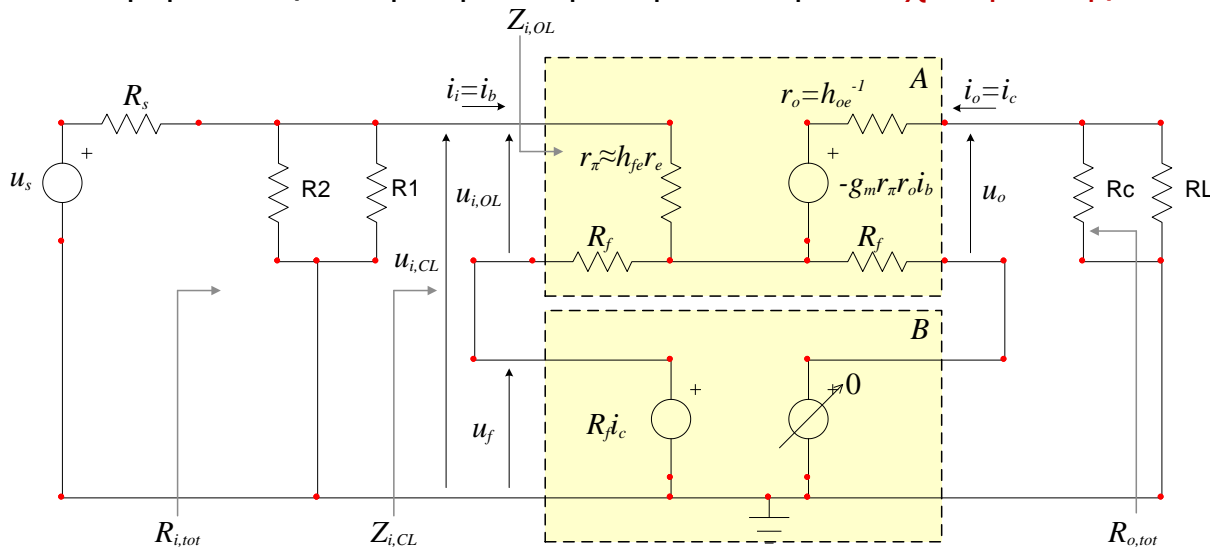
$$\beta = R_f$$

$$Y_{o,CL} = Y_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta) \Rightarrow$$

$$Y_{o,CL} = (r_o + R_f)^{-1} \left\{ 1 + \left[ \frac{g_m r_\pi R_f}{(r_\pi + R_f)} \right] \right\}^{-1}$$

# Ενισχυτής Διαγωγιμότητας με BJT (Ανάδραση S-S)

Παρότι όπως αποδείχθηκε το κύκλωμα που αναλύθηκε είναι ένας **ενισχυτής διαγωγιμότητας**, συνήθως στην πράξη το σήμα που παρέχεται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι σήμα τάσης, οπότε μας ενδιαφέρει πως επιδρά η ανάδραση και στην **ενίσχυση τάσης**.



Δεν ενδιαφέρει πια να εφαρμόσουμε το ιδανικό μοντέλο ανάλυσης της ανάδρασης → έτσι κι αλλιώς **δεν περιμένουμε να ισχύει για την επίδραση της ανάδρασης στην ενίσχυση τάσης** ο,τι ισχύει για την επίδρασή της στην διαντίσταση, → συγκρίνουμε απ' ευθείας την ενίσχυση τάσης ανοικτού βρόχου με αυτήν του κλειστού βρόχου.

Από το **συνολικό κύκλωμα** του ενισχυτή ανάδρασης σε **κλειστό βρόχο**

$$R_{i,tot} = Z_{i,CL} // R_1 // R_2 \quad R_{o,tot} = (Y_{o,CL} + G_C)^{-1}$$

$$A_{V,CL} = \frac{u_o}{u_{i,CL}} = \frac{-g_m r_\pi i_b (R_C // R_L)}{Z_{i,CL} i_b} \Rightarrow$$

$$A_{V,CL} = -g_m (R_C // R_L) \frac{r_\pi}{r_\pi + R_f + g_m r_\pi R_f}$$

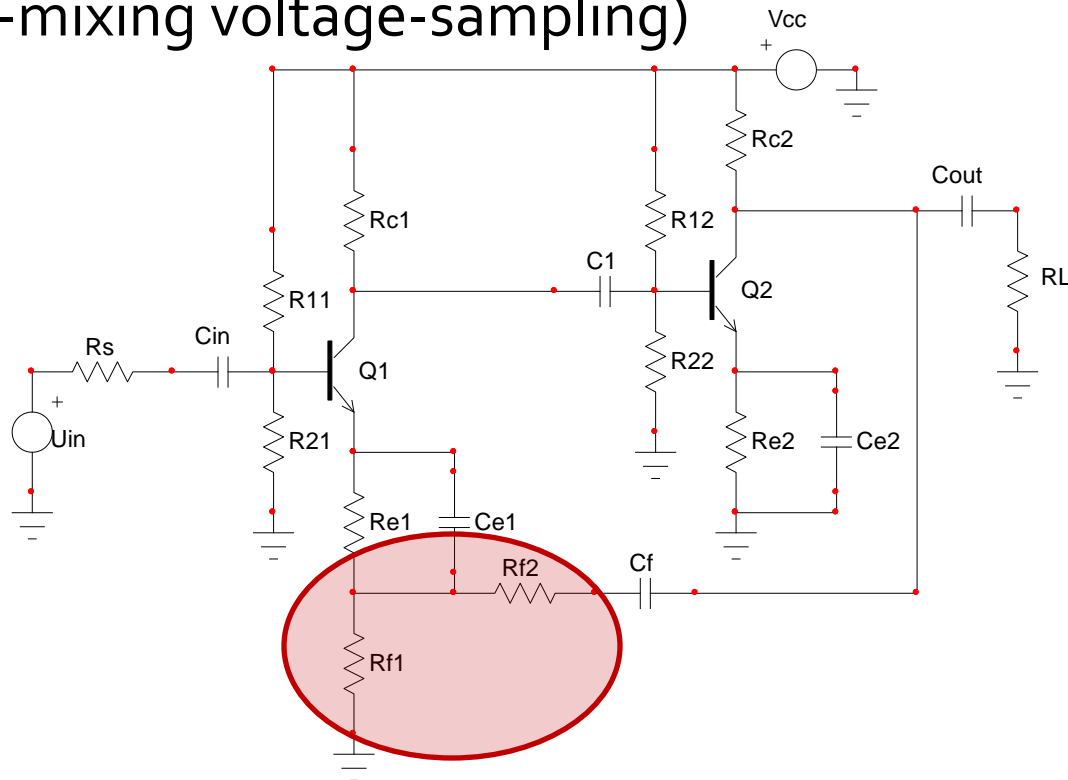
Παρατηρούμε ότι η **ενίσχυση τάσης του ενισχυτή μειώνεται επίσης λόγω της εφαρμογής της ανάδρασης**.

Ενώ χωρίς την ανάδραση είχαμε υπολογίσει:

$$A_V = -g_m (R_C // R_L)$$

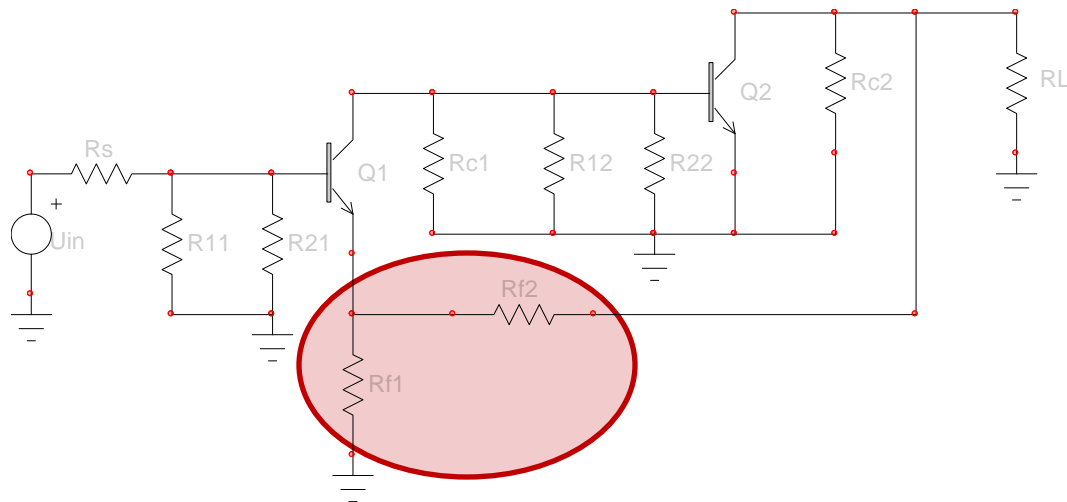
# Ανάδραση Σειράς-Παράλληλα

- Ενισχυτής Τάσης με 2 βαθμίδες BJT, ανάδραση σειράς-παράλληλα (SP) ή δειγματοληψίας τάσης – μίξης τάσης (voltage-mixing voltage-sampling)



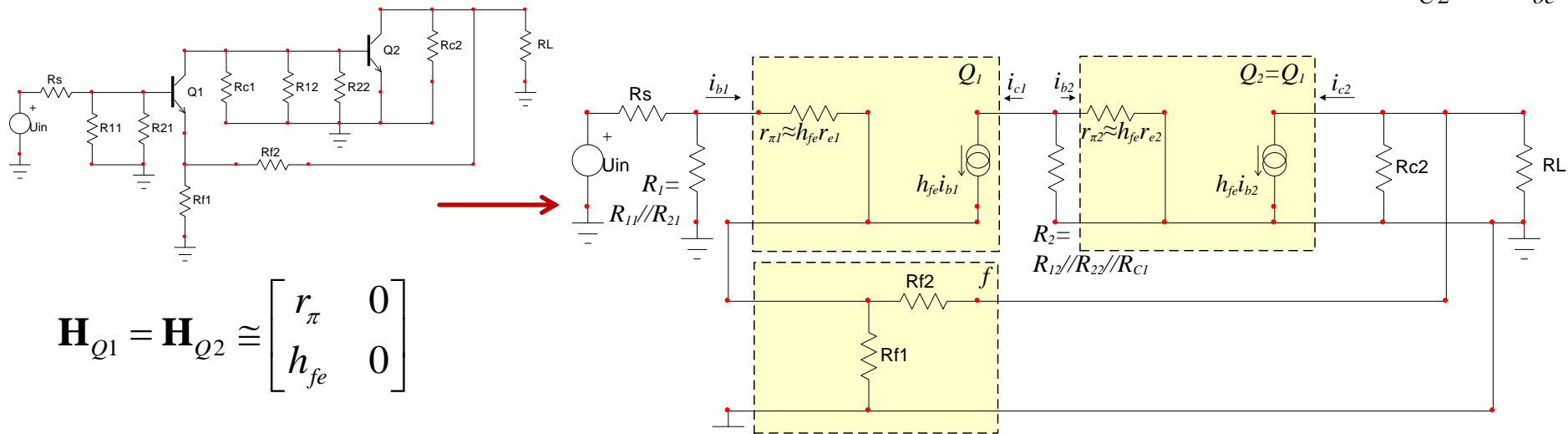
# Ενισχυτής Τάσης με 2BJT (Ανάδραση S-P)

- AC ισόδύναμο, για την εξαγωγή του θεωρούμε διαδοχικά ότι στην περιοχή διέλευσης οι πυκνωτές (σύζευξης και διαρροής) του κυκλώματος μπορούν όλοι να θεωρηθούν βραχυκυκλώματα



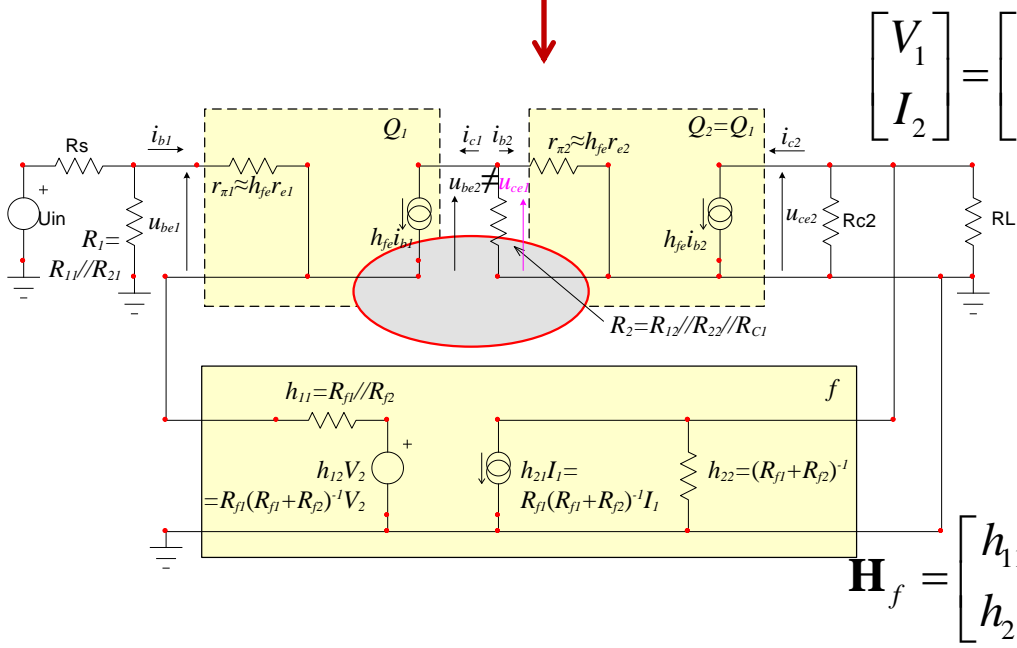
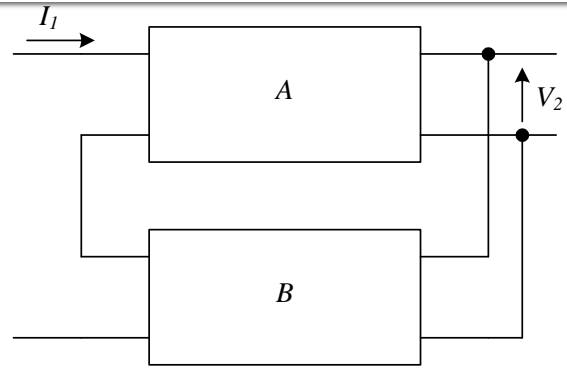
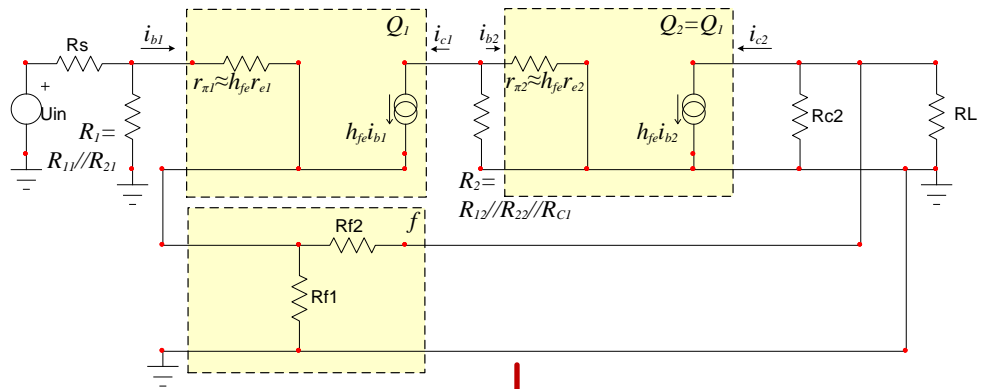
# Ενισχυτής Τάσης με 2BJT (Ανάδραση S-P)

- Το μοντέλο μικρού σήματος του κυκλώματος όπου για την απλοποίηση του κυκλώματος έχει γίνει και αντικατάσταση διασυνδεδεμένων αντιστάσεων με τις ισοδύναμές τους  $R_1 = R_{11} // R_{21}$   $R_2 = R_{C1} // R_{12} // R_{22}$
- Επίσης, θεωρούμε γνωστές τις παραμέτρους των BJT και, τα οποία για απλότητα στις πράξεις θεωρούμε ίδιων χαρακτηριστικών. Για τα BJTs κάνουμε τις εξής δυο προσεγγίσεις
  - (α) ότι η διάδοση του σήματος γίνεται μονόδρομα προς τα εμπρός ( $h_{12} = h_{re} \rightarrow 0$ ) και
  - (β) ότι η αγωγιμότητα εξόδου είναι αμελητέα ( $h_{22} = h_{oe} \rightarrow 0$ ). Υποθέτοντας ότι  $R_{C2} \ll h_{oe}^{-1}$

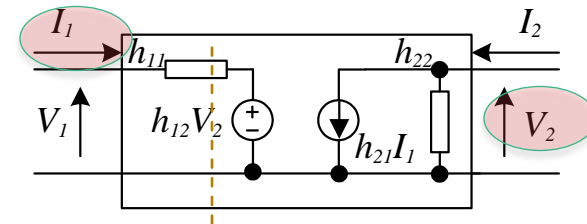


$$\mathbf{H}_{Q1} = \mathbf{H}_{Q2} \cong \begin{bmatrix} r_{\pi} & 0 \\ h_{fe} & 0 \end{bmatrix}$$

# Ενισχυτής Τάσης με 2BJT (Ανάδραση S-P)



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

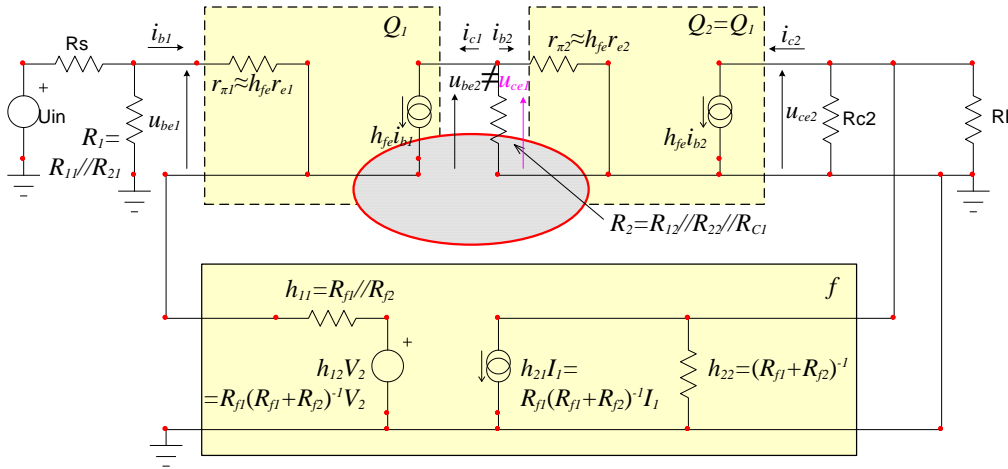


$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{\alpha_2=0} \quad h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{\alpha_1=0}$$

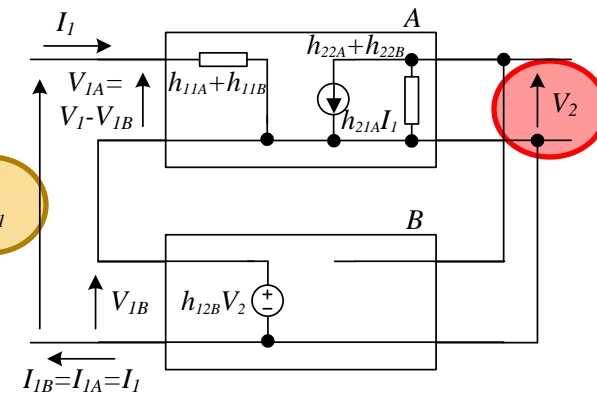
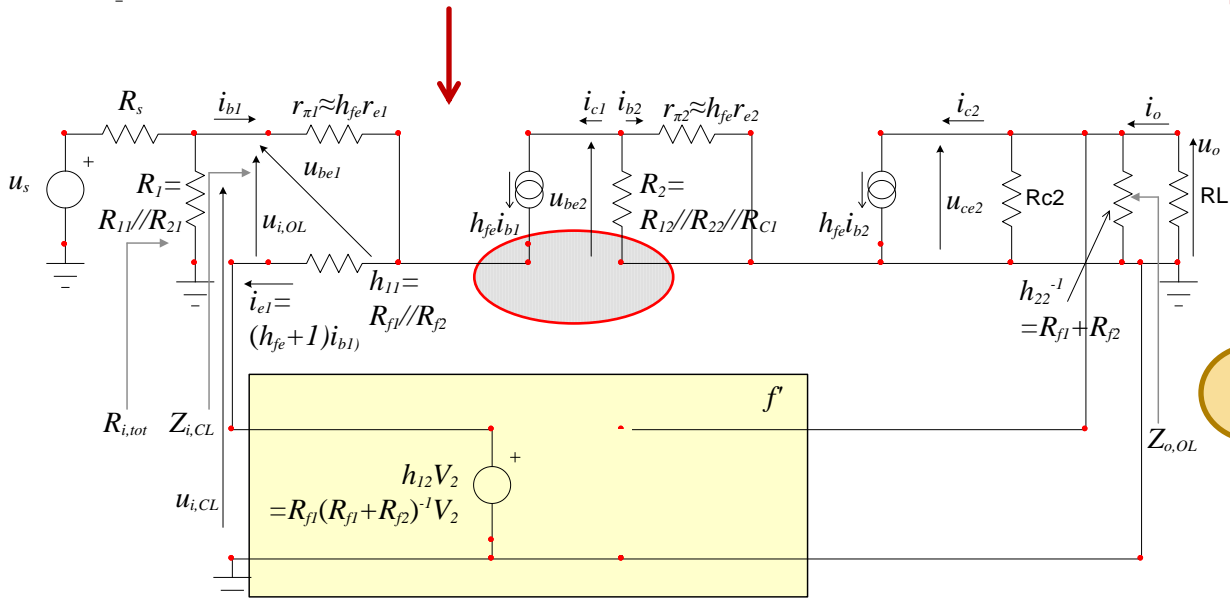
$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{\alpha_2=0} \quad h_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{\alpha_1=0}$$

$$\mathbf{H}_f = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{f1} // R_{f2} & R_{f1} / (R_{f1} + R_{f2}) \\ R_{f1} / (R_{f1} + R_{f2}) & (R_{f1} + R_{f2})^{-1} \end{bmatrix}$$

# Ενισχυτής Τάσης με 2BJT (Ανάδραση S-P)



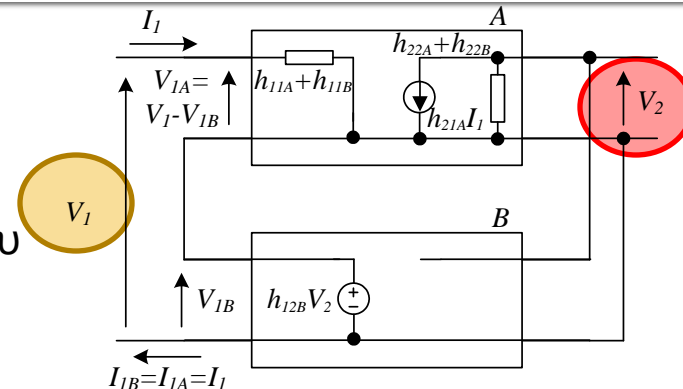
Ανάδειξη του βασικού ενισχυτή και του δικτύωματος ανάδρασης μετά από απλοποιήσεις και χειρισμό του κυκλώματος ώστε να είναι **συμβατό με το ιδανικό μοντέλο ανάλυσης της ανάδρασης.**



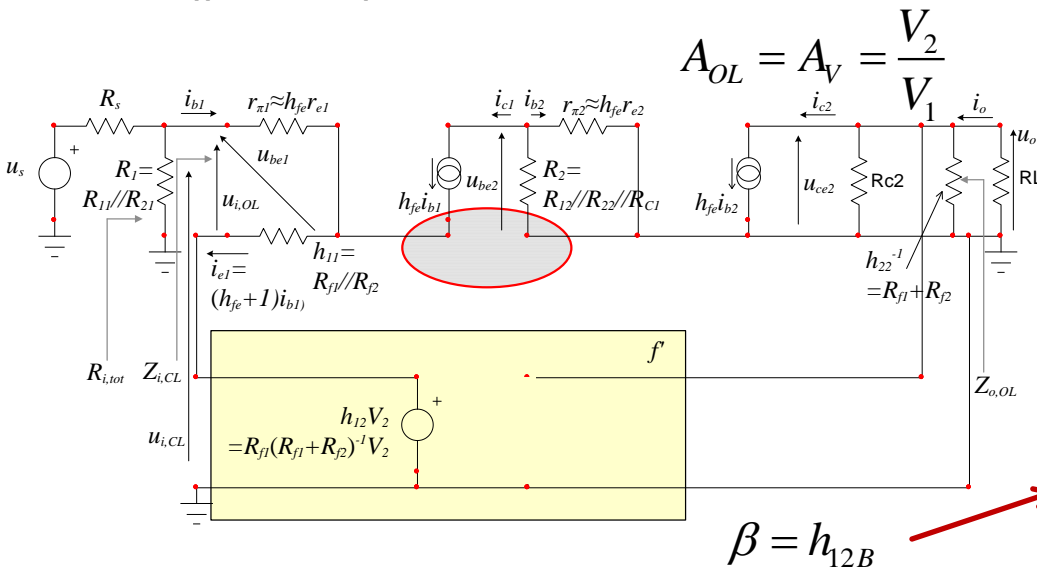
# Ενισχυτής Τάσης με 2BJT (Ανάδραση S-P)

Ο βασικός ενισχυτής μπορεί να αναπαρασταθεί (ως συνήθως) από ένα ισοδύναμο δίθυρο, αλλά εδώ δε συμφέρει\*.

Ακόμη και χωρίς να αντικατασταθεί από το ισοδύναμό του δίθυρο, ο βασικός ενισχυτής επίσης ικανοποιεί τις απαιτήσεις του ιδανικού μοντέλου ανάλυσης της ανάδρασης διότι δεν παρουσιάζει διαδρομή μετάδοσης του σήματος προς τα πίσω.



\*Δυστυχώς όμως, μιας και στο σημείο που επισημαίνεται με την κόκκινη έλλειψη εντοπίζεται ένα είδος σύνδεσης που δεν μπορεί να αντιστοιχιστεί σε κάποιου είδους διθυρική διασύνδεση, δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η θεωρία διθύρων για την αντικατάστασή του από ένα (συνολικό) δίθυρο, οπότε για να αντικατασταθεί από ένα δίθυρο θα έπρεπε να γίνει εξαγωγή των διθυρικών του παραμέτρων αναλυτικά από την αρχή.



$$A_{OL} = A_V = \frac{V_2}{V_1}$$

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

$$Z_{i,CL} = \frac{(1 + A_{OL}\beta)Z_{i,OL}}{1 + A_{OL}\beta}$$

$$Z_{o,CL} = \frac{Z_{o,OL}}{(1 + A_{OL}\beta)}$$

$$\beta = \frac{R_{f1}}{(R_{f1} + R_{f2})}$$

$$\beta = h_{12B}$$

# Ενισχυτής Τάσης με 2BJT (Ανάδραση S-P)

Από το συνολικό κύκλωμα του ενισχυτή ανάδρασης σε κλειστό βρόχο

- Από το συνολικό κύκλωμα του ενισχυτή ανάδρασης σε ανοικτό βρόχο:

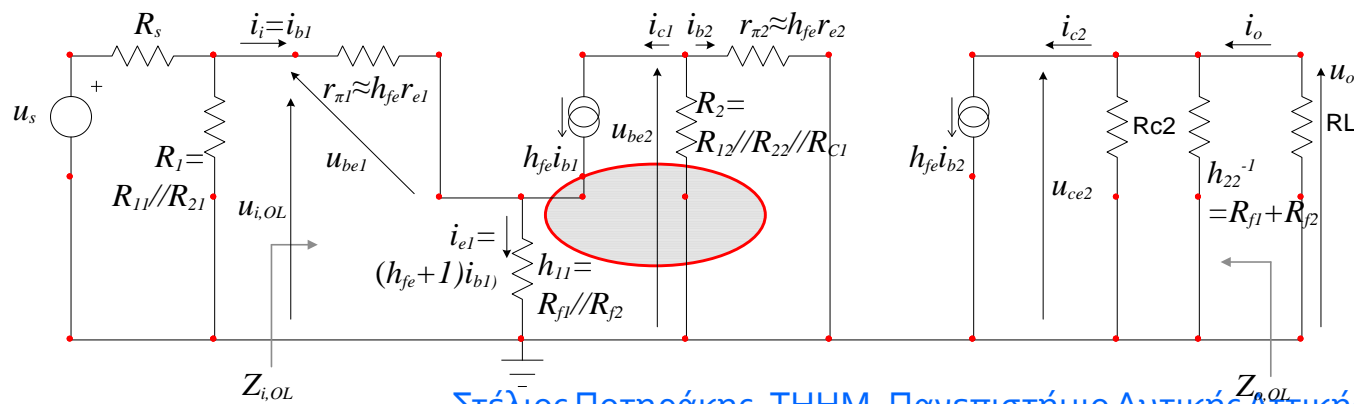
$$u_o = -h_{fe} i_{b2} \left[ R_{C2} // (R_{f1} + R_{f2}) // R_L \right] \quad u_{i,OL} = i_{b1} \left[ r_{\pi1} + (h_{fe} + 1) (R_{f1} // R_{f2}) \right]$$

$$i_{b2} = -i_{c1} \frac{G_{r_{\pi2}}}{G_2 + G_{r_{\pi2}}} = -i_{b1} \frac{h_{fe} R_2}{R_2 + r_{\pi2}}$$

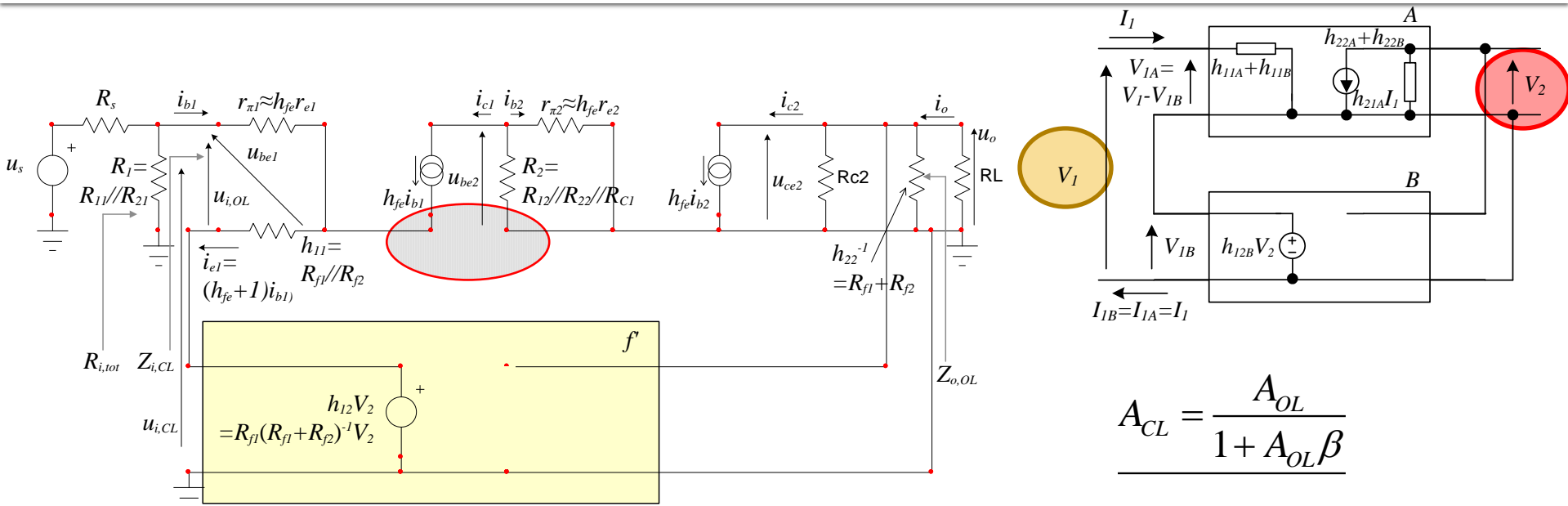
$$Z_{i,OL} = \frac{u_{i,OL}}{i_i} = r_{\pi1} + (h_{fe} + 1) (R_{f1} // R_{f2})$$

$$A_{OL} = A_V = \frac{u_o}{u_{i,OL}} = \frac{h_{fe}^2 R_2 \left[ R_{C2} // (R_{f1} + R_{f2}) // R_L \right]}{(R_2 + r_{\pi2}) \left[ r_{\pi1} + (h_{fe} + 1) (R_{f1} // R_{f2}) \right]}$$

$$Z_{o,OL} = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{\substack{R_L \rightarrow \infty \\ i_s = 0, G_s \neq 0}} = R_{C2} // (R_{f1} + R_{f2})$$

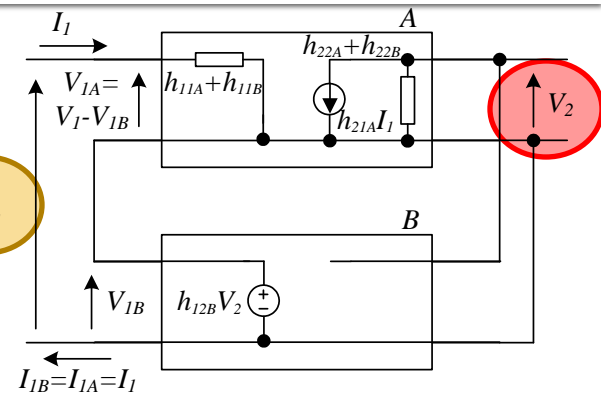


# Ενισχυτής Τάσης με 2BJT (Ανάδραση S-P)



$$\beta = \frac{R_{f1}}{R_{f1} + R_{f2}}$$

$$(1 + A_{OL}\beta) = 1 + \left[ \frac{R_{f1}}{R_{f1} + R_{f2}} \right] \frac{h_{fe}^2 R_2 \left[ R_{C2} // (R_{f1} + R_{f2}) // R_L \right]}{(R_2 + r_{\pi 2}) \left[ r_{\pi 1} + (h_{fe} + 1) (R_{f1} // R_{f2}) \right]}$$



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

$$Z_{i,CL} = (1 + A_{OL}\beta) Z_{i,OL}$$

$$Z_{o,CL} = Z_{o,OL} / (1 + A_{OL}\beta)$$