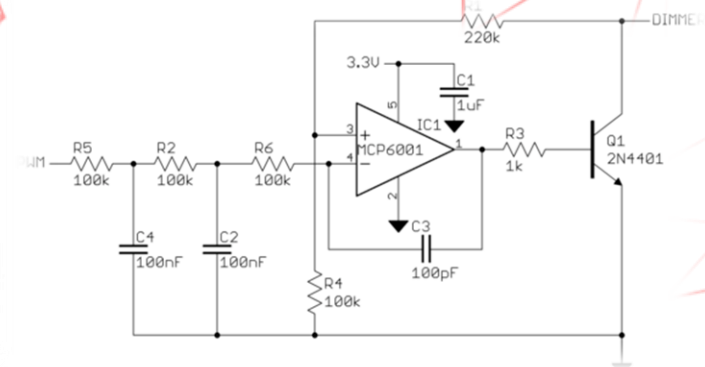
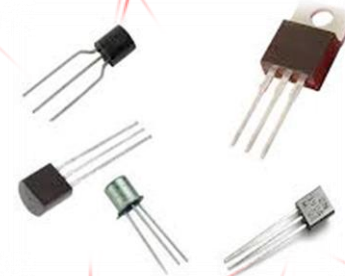
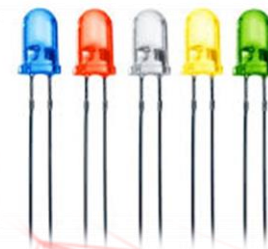
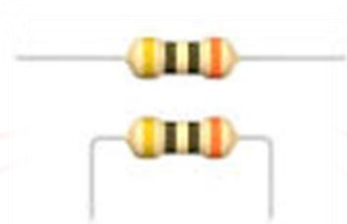
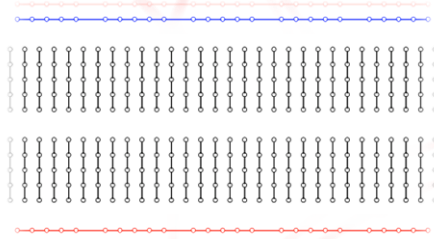


# Ηλεκτρονική

➔ Νικόλαος Γιαννακέας



# Περιεχόμενα του μαθήματος

- Εισαγωγή Ορισμός
- Υλοποίηση Ενισχυτών από κυκλώματα πόλωσης
- DC Ανάλυση Κυκλωμάτων
- Μεγέθη Ενισχυτών
- AC Ανάλυση Κυκλωμάτων
- Γενικευμένη Μεθοδολογία

# Ευθεία Φορτίου Τρανζίστορ

## Ενισχυτές μικρού σήματος

- Είναι κυκλώματα τα οποία **εκμεταλλεύονται την ικανότητα** των διπολικών τρανζίστορ να **ενισχύουν**
- Για να επιτευχθεί ενίσχυση πρέπει το τρανζίστορ να είναι πολωμένο και να **λειτουργεί στην ενεργό περιοχή**
- Επομένως τα κυκλώματα ενισχυτών βασίζονται στα κυκλώματα πόλωσης τρανζίστορ που έχουμε αναλύσει

# Υλοποίηση Ενισχυτών

## Βασικά βήματα υλοποίησης

- Στο κύκλωμα εισόδου συνδέουμε το **σήμα εισόδου** με πυκνωτή σύζευξης (κόβει τις συνεχείς συνιστώσες)
- Στο κύκλωμα εξόδου συνδέουμε **αντίσταση φόρτου  $R_L$**  μετά από πυκνωτή σύζευξης
- Συμπεριλαμβάνουμε είτε **αντίσταση εισόδου  $R_g$**  για να αλλάξουμε το σήμα εισόδου, είτε **πυκνωτή παράκαμψης** παράλληλα στην αντίσταση εκπομπού (αν υπάρχει) για να μεγιστοποιήσω την ενίσχυση

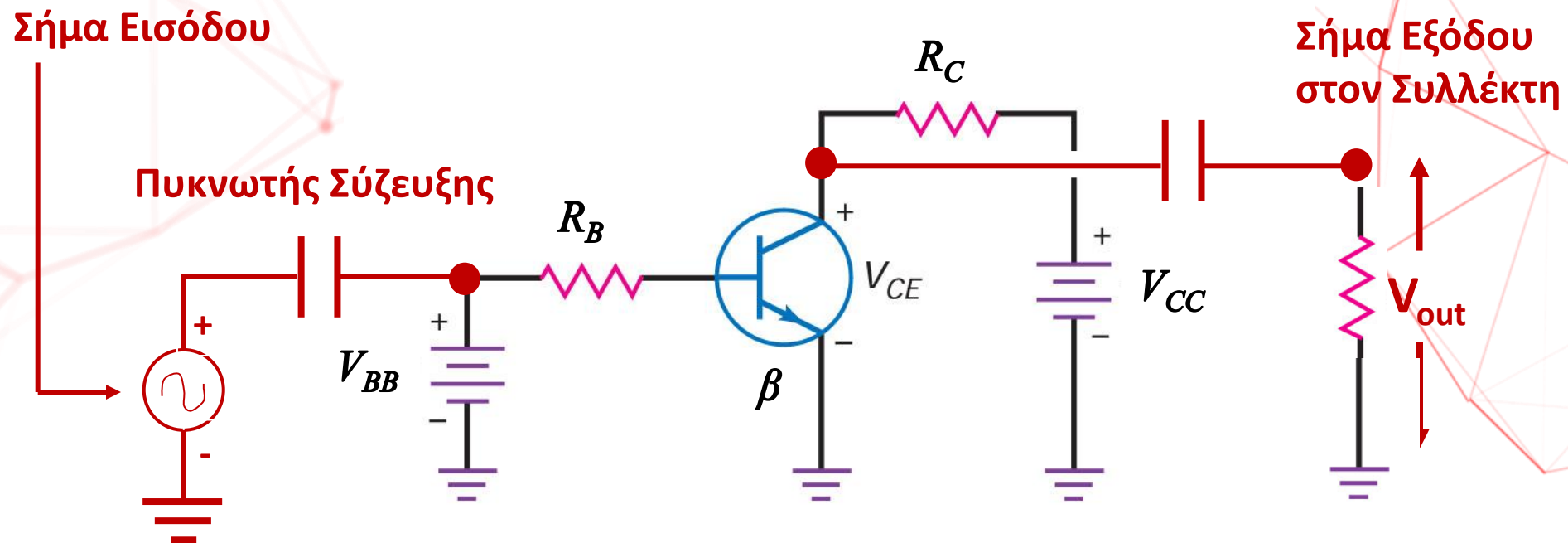
# Υλοποίηση Ενισχυτών

## Διάφορες Παραλλαγές Υλοποίησης

- Η υλοποίηση πολλών παραλλαγών ενισχυτών βασίζονται κυρίως στις **διαφορετικές προσεγγίσεις πόλωσης** του τρανζίστορ (π.χ. τα 6 διαφορετικά κυκλώματα που μάθαμε)
- Διαφοροποιήσεις προκύπτουν επίσης από το σημείο στο οποίο **εισάγεται** το σήμα είσοδο και από το σημείο από το οποίο **εξάγεται** (π.χ. βάση-συλλέκτη, βάση-εκπομπό, εκπομπό-συλλέκτη)
- Άλλες τροποποιήσεις όπως η αντίσταση εισόδου και ο πυκνωτής παράκαμψης στον εκπομπό

# Κυκλώματα Πόλωσης Τρανζίστορ

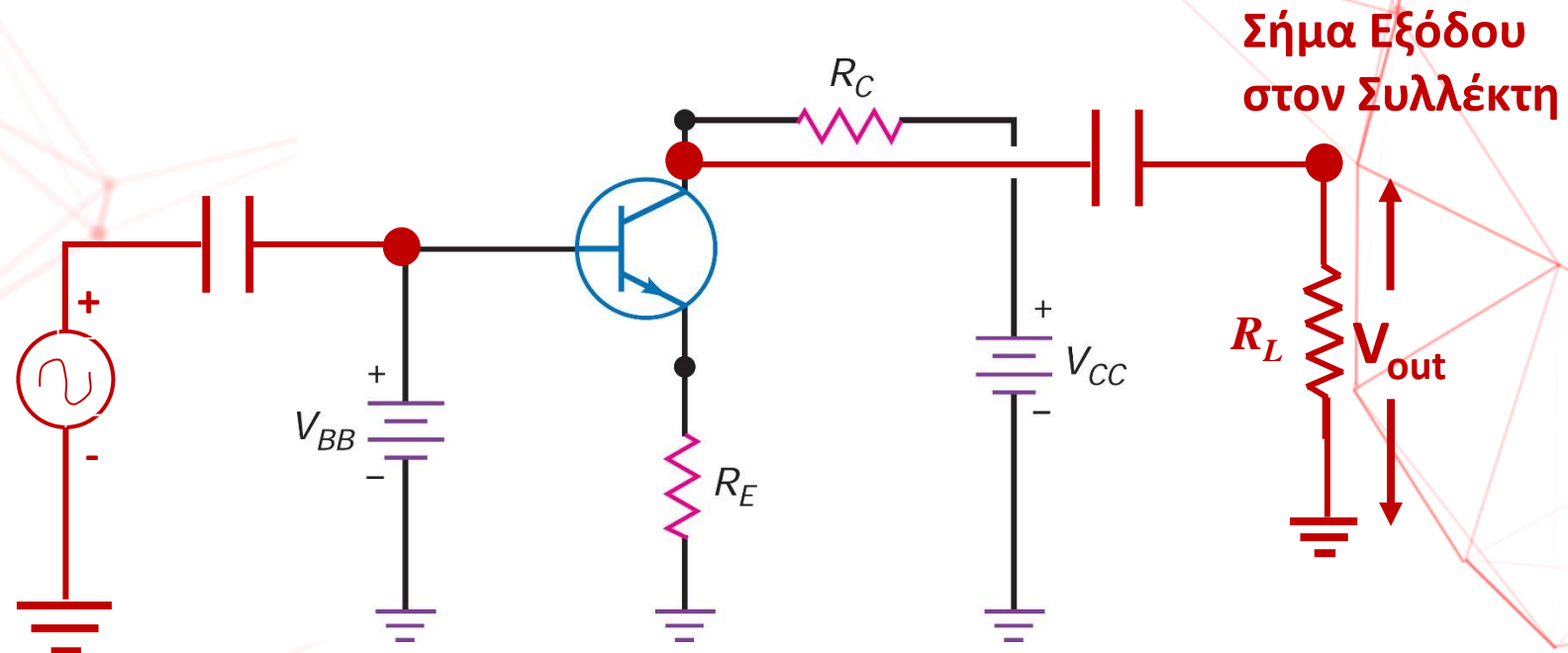
## 1. Ενισχυτής βασισμένος σε κύκλωμα πόλωσης Βάσης





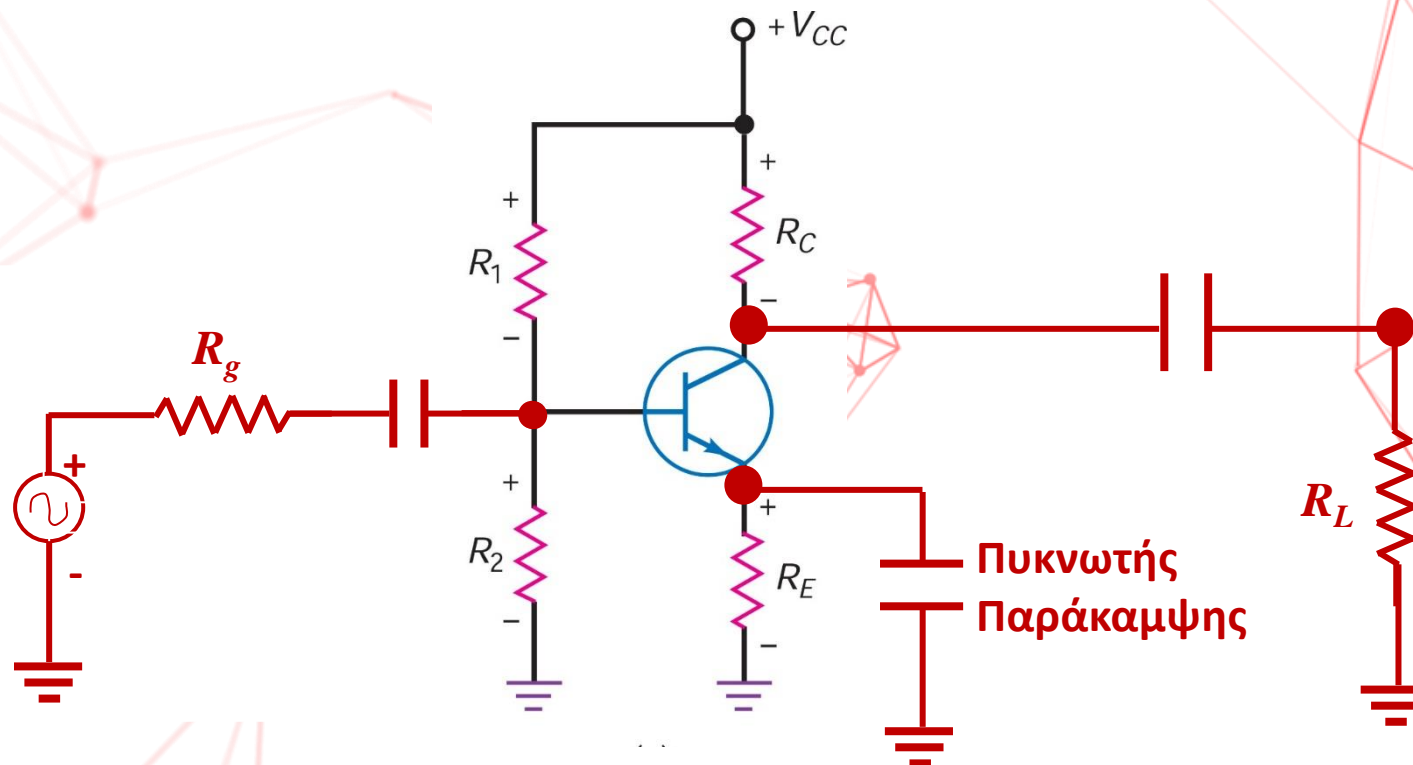
# Κυκλώματα Πόλωσης Τρανζίστορ

## 2. Ενισχυτής βασισμένος σε κύκλωμα πόλωσης Εκπομπού



# Κυκλώματα Πόλωσης Τρανζίστορ

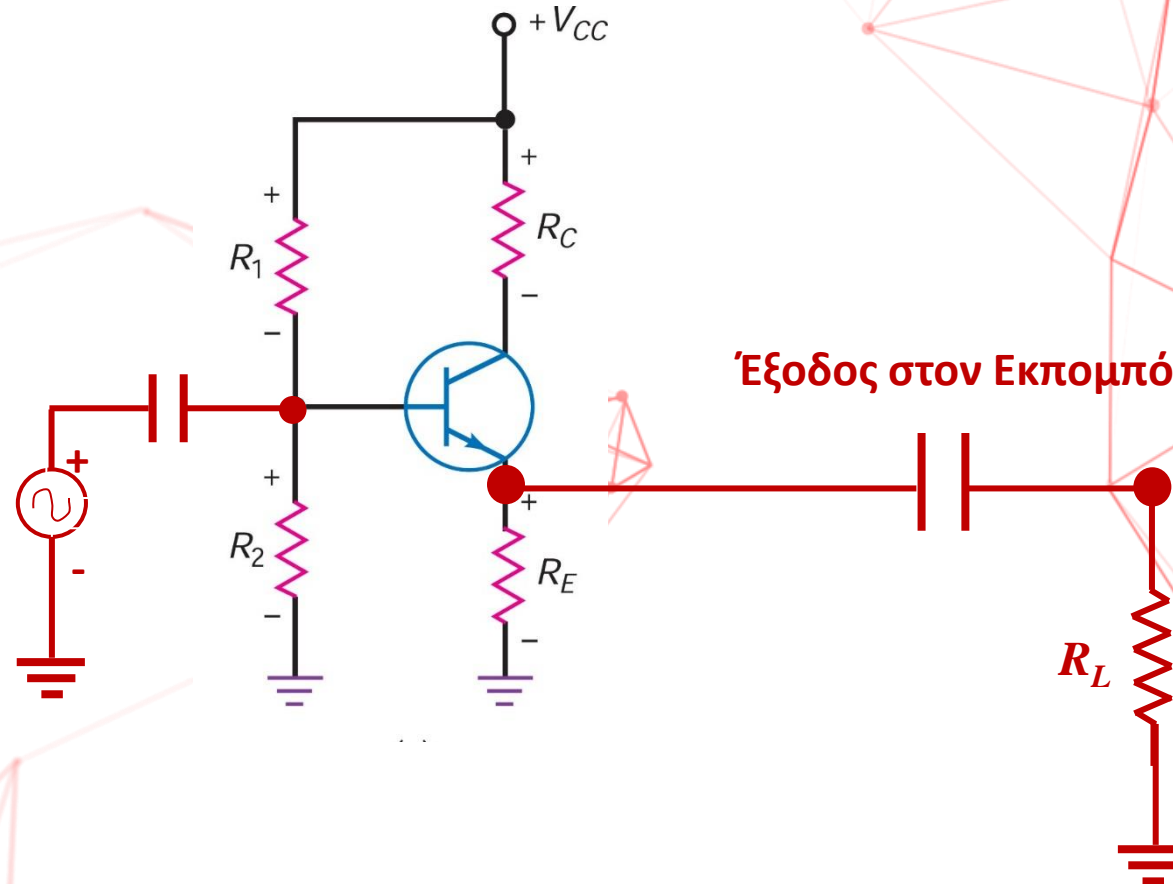
## 3. Ενισχυτής βασισμένος σε κύκλωμα πόλωσης διαιρέτη τάσης





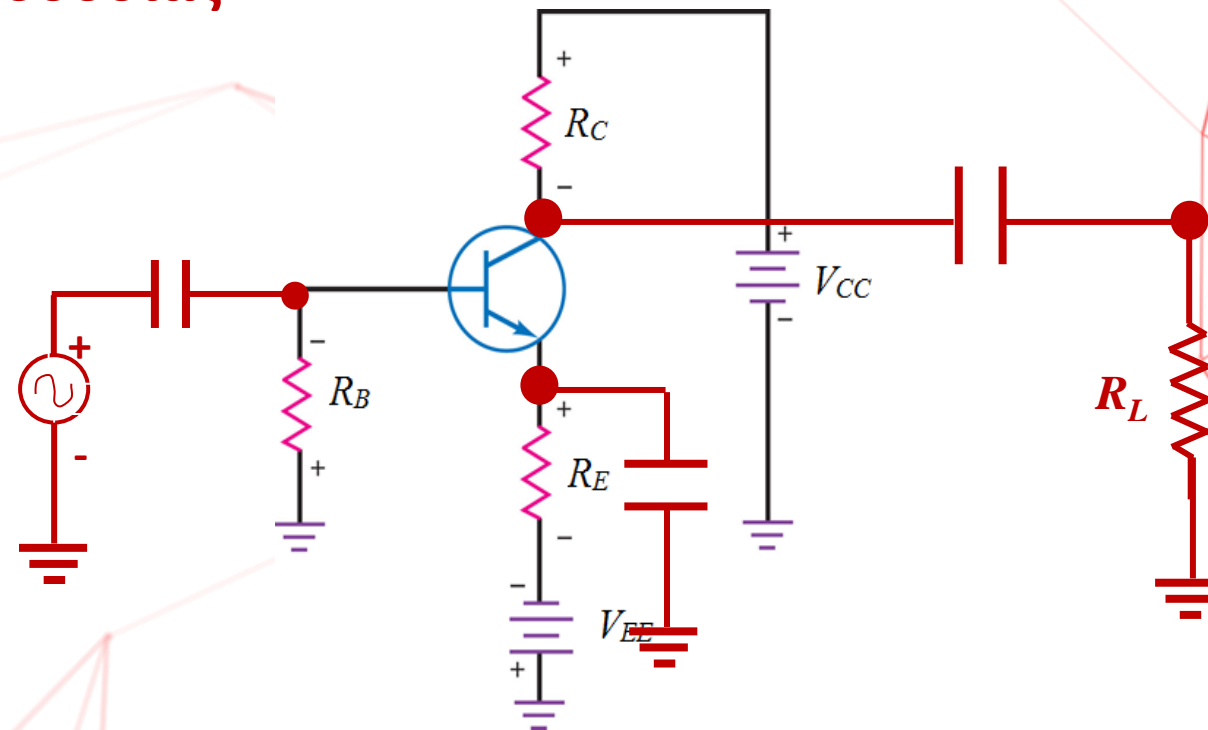
# Κυκλώματα Πόλωσης Τρανζίστορ

## 3. Ενισχυτής βασισμένος σε κύκλωμα πόλωσης διαιρέτη τάσης



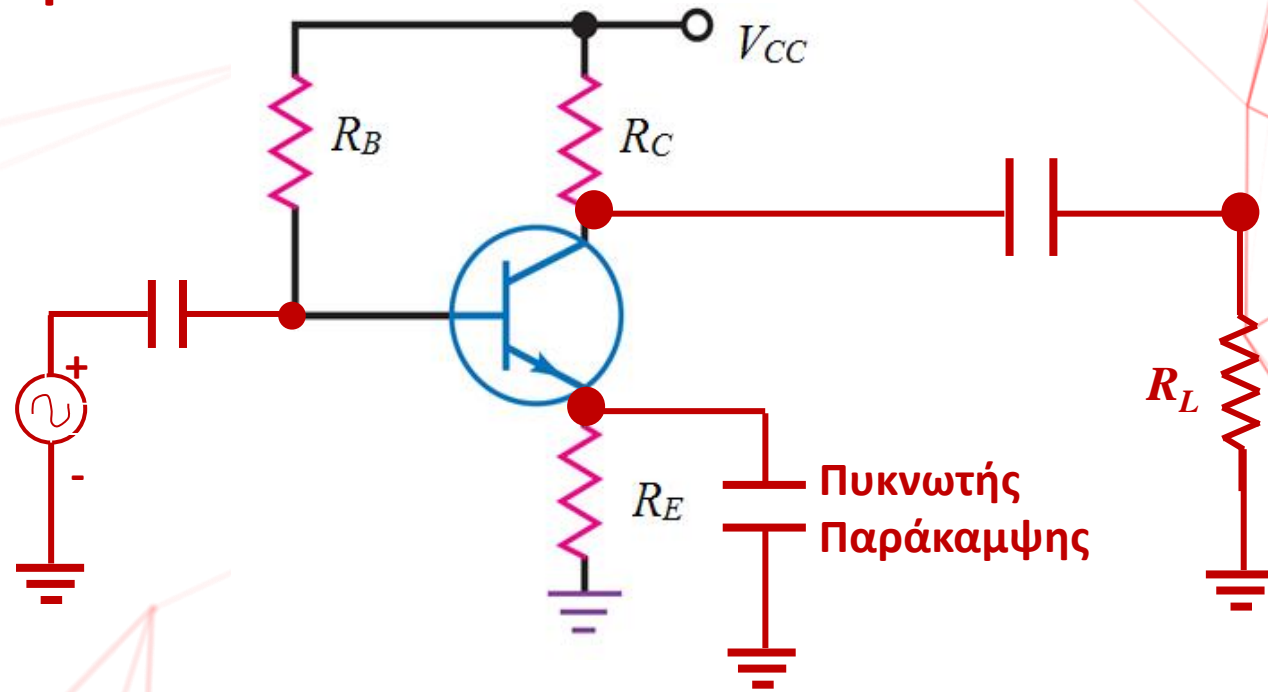
# Κυκλώματα Πόλωσης Τρανζίστορ

## 4. Ενισχυτής βασισμένος σε κύκλωμα πόλωσης Εκπομπού διπλής τροφοδοσίας



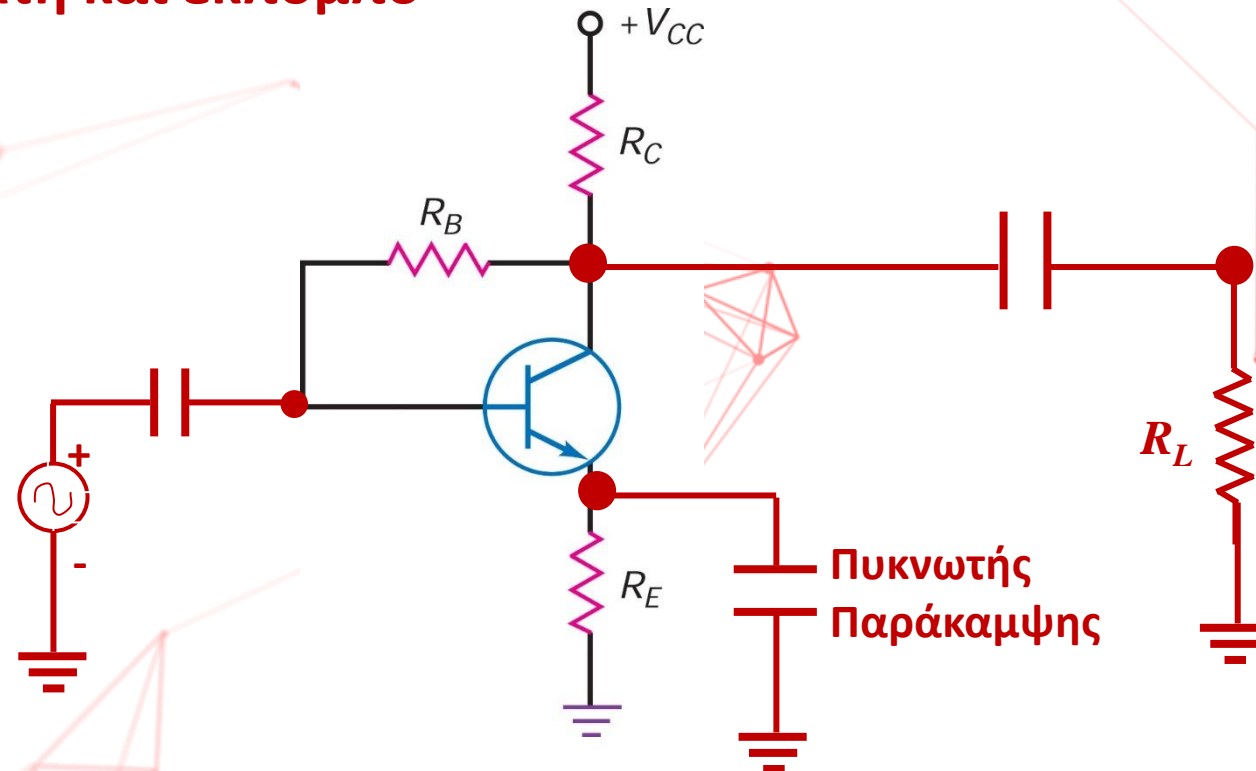
# Κυκλώματα Πόλωσης Τρανζίστορ

5. Ενισχυτής βασισμένος σε κύκλωμα πόλωσης με ανάδραση από τον εκπομπό



# Κυκλώματα Πόλωσης Τρανζίστορ

6. Ενισχυτής βασισμένος σε κύκλωμα πόλωση με ανάδραση από συλλέκτη και εκπομπό



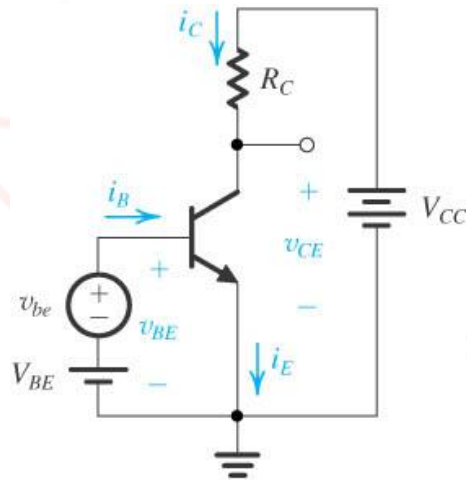
# Μεγέθη Ενισχυτών

## Συμβολισμοί

- Συνηθίζεται τα μεγέθη (εντάσεις ρεύματος και τάσεις) να συμβολίζονται με
- **πεζά γράμματα** για τις εναλλασσόμενες συνιστώσες
- **κεφαλαία γράμματα** για τις συνεχείς συνιστώσες

Συνεχή	Εναλλασσόμενα
$I_E, I_C, I_B$	$i_E, i_C, i_B$
$V_{BE}, V_{CE}, V_{BC}$	$v_{BE}, v_{CE}, v_{BC}$

# Μεγέθη Ενισχυτών



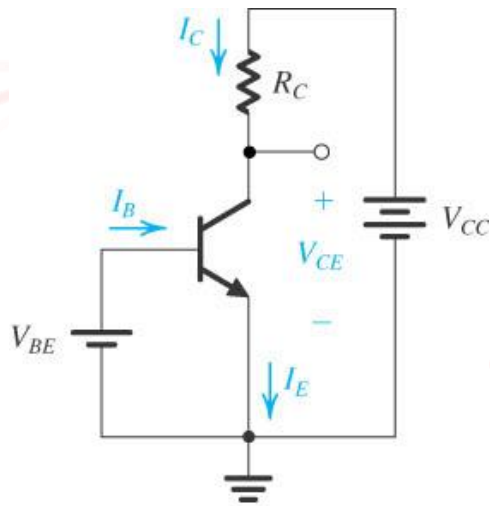
Επαλληλία της DC πόλωσης με το AC σήμα:

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$$

Το ρεύμα συλλέκτη γράφεται:

$$\begin{aligned} i_C &= I_S e^{(V_{BE} + v_{be})/V_T} \\ &= I_S e^{V_{BE}/V_T} e^{v_{be}/V_T} = I_C e^{v_{be}/V_T} \end{aligned}$$

$V_T$ : Πειραματική τιμή ίση με 25mV



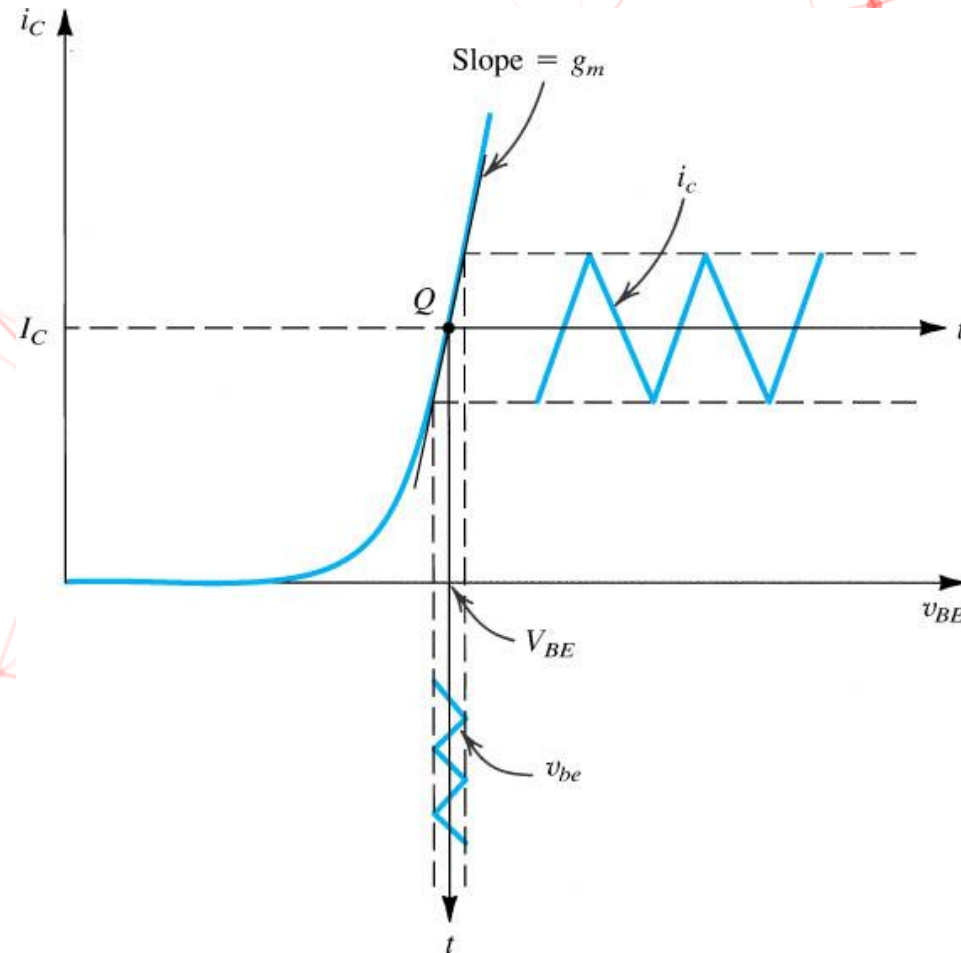


# Μεγέθη Ενισχυτών

Ορίζουμε: 
$$g_m \equiv \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$$

Το  $g_m$  ονομάζεται **διαγωγιμότητα μικρού σήματος**. Για σταθερό  $g_m$  απαιτείται σταθερό  $I_C$ .

Αναπαριστά την κλίση της χαρακτηριστικής  $i_C$ - $v_{BE}$  στο σημείο ηρεμίας Q.



# Μεγέθη Ενισχυτών

Το ολικό ρεύμα Βάσης:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \underbrace{\frac{I_C}{\beta}}_{\text{DC}} + \underbrace{\frac{1}{\beta} \frac{i_C}{V_T} v_{be}}_{\text{AC}}$$

Η συνιστώσα μικρού σήματος του ρεύματος Βάσης:

$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{i_C}{V_T} v_{be} = \frac{g_m}{\beta} v_{be}$$

$$\text{Ορίζουμε: } r'_\pi \equiv \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m} \quad \text{ή} \quad r'_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

Το  $r'_\pi$  είναι η **αντίσταση εισόδου** μικρού σήματος μεταξύ βάσης και εκπομπού όταν κοιτάζουμε από την Βάση.

## Μεγέθη Ενισχυτών

Το ολικό ρεύμα εκπομπού:  $i_E = \frac{i_C}{a} = \underbrace{\frac{I_C}{a}}_{\text{DC}} + \underbrace{\frac{1}{a} \frac{I_C}{V_T} v_{be}}_{\text{AC}}$

Η συνιστώσα μικρού σήματος του ρεύματος Εκπομπού:  $i_e = \frac{1}{a} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{I_E}{V_T} v_{be}$

Ορίζουμε:  $r_e' \equiv \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{a}{g_m} \quad \text{ή} \quad r_e' = \frac{V_T}{I_E}$

Το  $r_e'$  είναι η **αντίσταση εισόδου** μικρού σήματος μεταξύ βάσης και εκπομπού όταν κοιτάζουμε από τον Εκπομπό.

Εύκολα μπορούμε να βρούμε ότι:  $r_{\pi}' = \left(\frac{i_e}{i_b}\right) r_e' = (\beta + 1)r_e$

# DC Ανάλυση

## DC Ανάλυση κυκλωμάτων (Ορισμός)

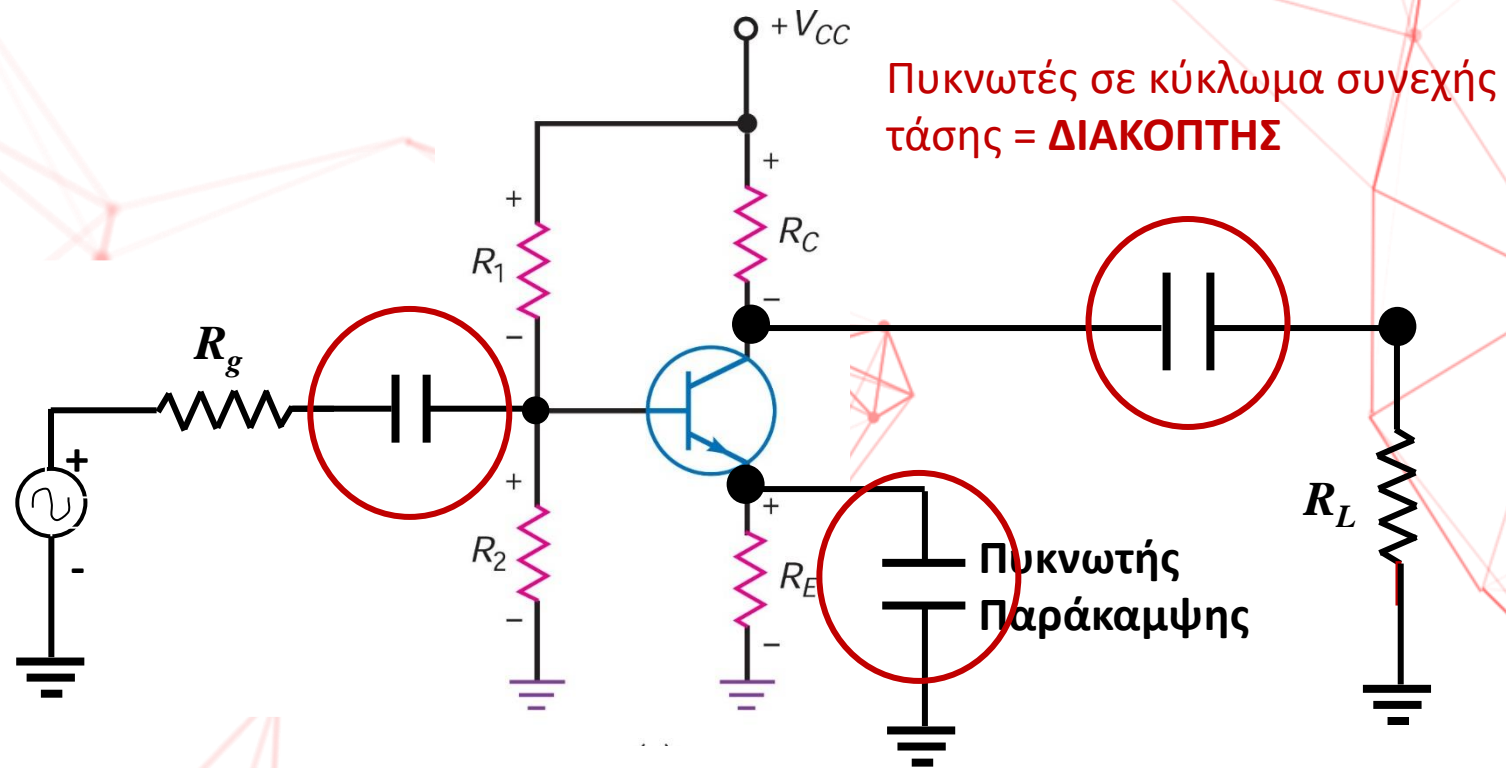
- Είναι η ανάλυση του κυκλώματος για τις **συνεχής συνιστώσες** τάσεων και εντάσεων στο κύκλωμα (...μέχρι τώρα μόνο συνεχής συνιστώσες έχουμε δει)
- Υπολογισμός συνεχών ρευμάτων και δυναμικών ( $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$ ,  $V_C$ ,  $V_B$ ,  $V_E$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CE}$ ,  $\beta$ , κ.ο.κ)
- Εντοπισμός **σημείου λειτουργίας Q** και σχεδίαση **γραμμής φορτίου**
- Η DC ανάλυση των κυκλωμάτων **είναι απαραίτητη** και σε κυκλώματα στα οποία υπάρχουν εναλλασσόμενες συνιστώσες εντάσεων και τάσεων, και γίνεται **αφαιρώντας όλα τα στοιχεία** που συνεισφέρουν εναλλασσόμενα μεγέθη (βλ. ενισχυτές μικρών σημάτων)

# DC Ανάλυση

## DC Ανάλυση κυκλωμάτων για τους ενισχυτές

- Η DC ανάλυση είναι απαραίτητη για την επίλυση των ενισχυτών
- Η DC ανάλυση των ενισχυτών λαμβάνει χώρα στο **DC** ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή
- Σκοπός είναι εύρεση του ρεύματος εκπομπού ώστε με σκοπό να μπορεί να βρεθεί η εσωτερική αντίσταση  $r'_e$

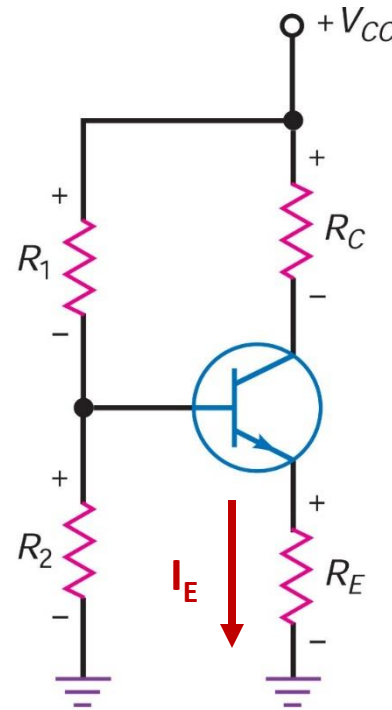
# DC Ανάλυση





# DC Ανάλυση

Υπολογίζω το ρεύμα εκπομπού από την επίλυση του DC ισοδύναμου



**DC Ισοδύναμο κύκλωμα:**

Αφαιρούνται όλοι οι κλάδοι με πυκνωτές

Πηγία = Βραχυκυκλώματα

## DC Ανάλυση

➤ Η DC ανάλυση μας βοηθά να υπολογίσουμε τα παρακάτω μεγέθη

$$\frac{v_{be}}{i_e} = r'_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{25mV}{I_E}$$

$$\frac{i_c}{v_{be}} = g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$\frac{v_{be}}{i_b} = r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

# AC Ανάλυση

## AC Ανάλυση κυκλωμάτων για τους ενισχυτές

- Η AC ανάλυση στοχεύει στον υπολογισμό της ενίσχυσης του ενισχυτή και τις τάσης εξόδου  $V_{out}$
- Η AC ανάλυση των ενισχυτών λαμβάνει χώρα στο **AC ισοδύναμο κύκλωμα** του ενισχυτή
- Τα ισοδύναμα AC κυκλώματα δημιουργούνται σύμφωνα με δυο διαφορετικά πρότυπα (Πρότυπο T, Πρότυπο Π)

## AC Ανάλυση

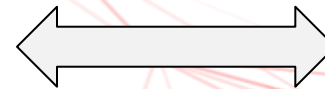
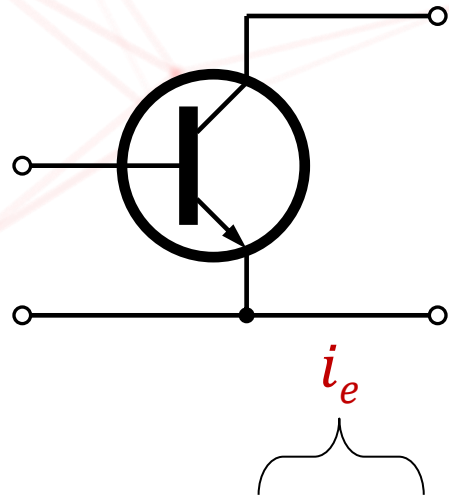
### AC Ανάλυση κυκλωμάτων για τους ενισχυτές

- Τα ισοδύναμα AC κυκλώματα δημιουργούνται και αυτά αφαιρώντας από κύκλωμα στοιχεία τα οποία **δεν παίζουν κανένα ρόλο** στα εναλλασσόμενα μεγέθη
- Οι τροφοδοσίες συνεχούς τάσης **γίνονται γειώσεις**
- Οι αντιστάσεις μετέχουν κανονικά στο AC ισοδύναμο εκτός αν υπάρχει παράλληλα **πυκνωτής παράκαμψης**
- Οι πυκνωτές γίνονται κλειστοί διακόπτες (βραχυκύκλωμα)

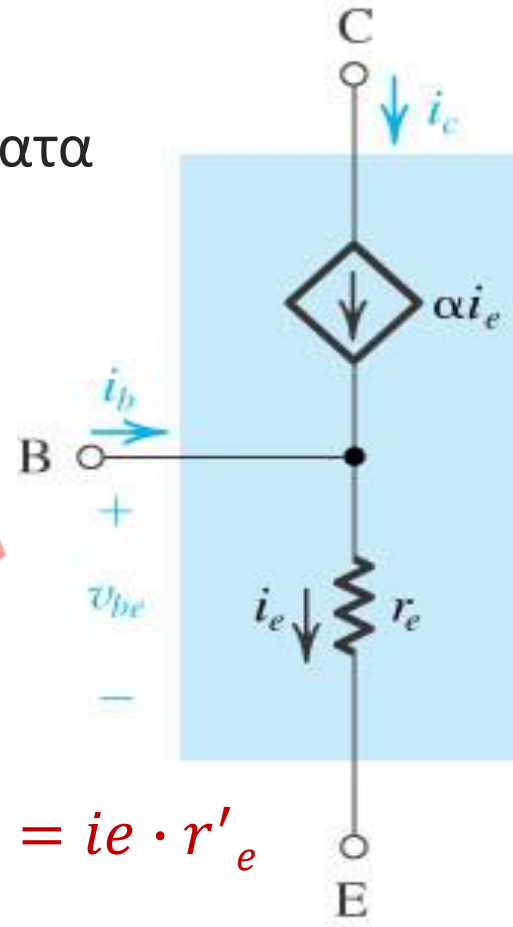
# AC Ανάλυση

## Πρότυπο T

- Χρησιμοποιείται περισσότερο για κυκλώματα κοινής βάσης



AC Ισοδύναμο  
του Τρανζίστορ



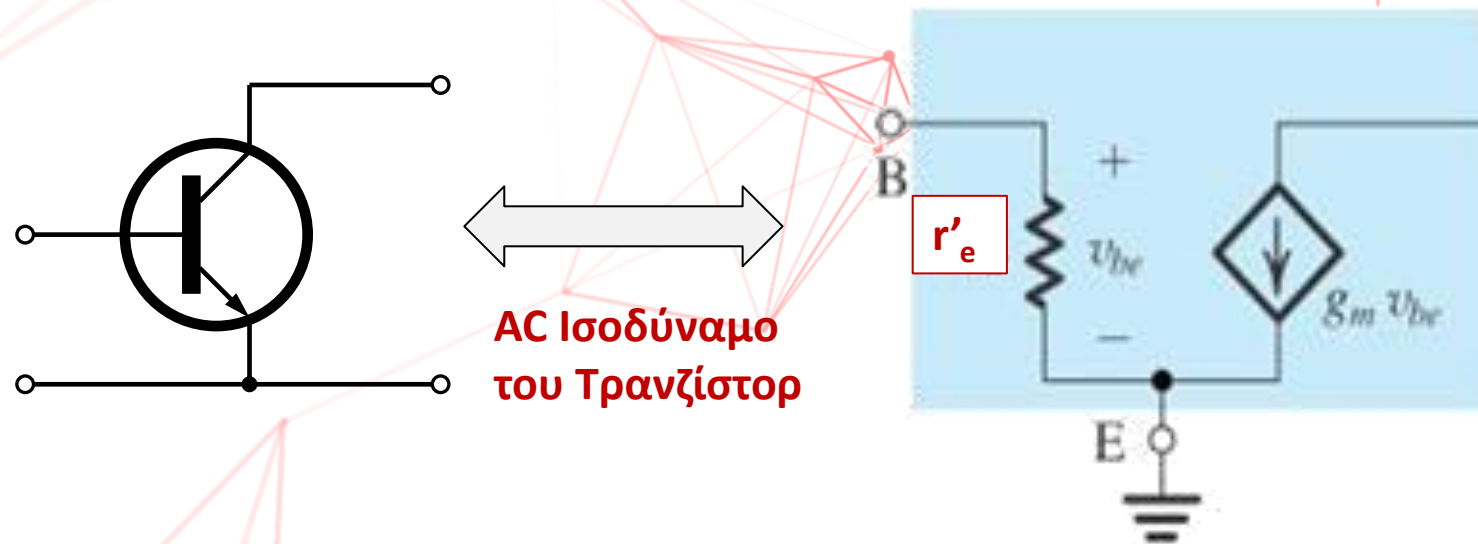
Βάση:  $v_{re'} = i_b \cdot \beta \cdot r'_e$

Εκπομπό:  $v_{re'} = i_e \cdot r'_e$

# AC Ανάλυση

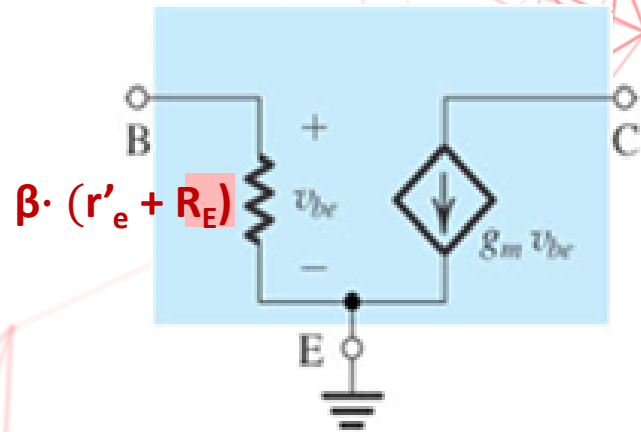
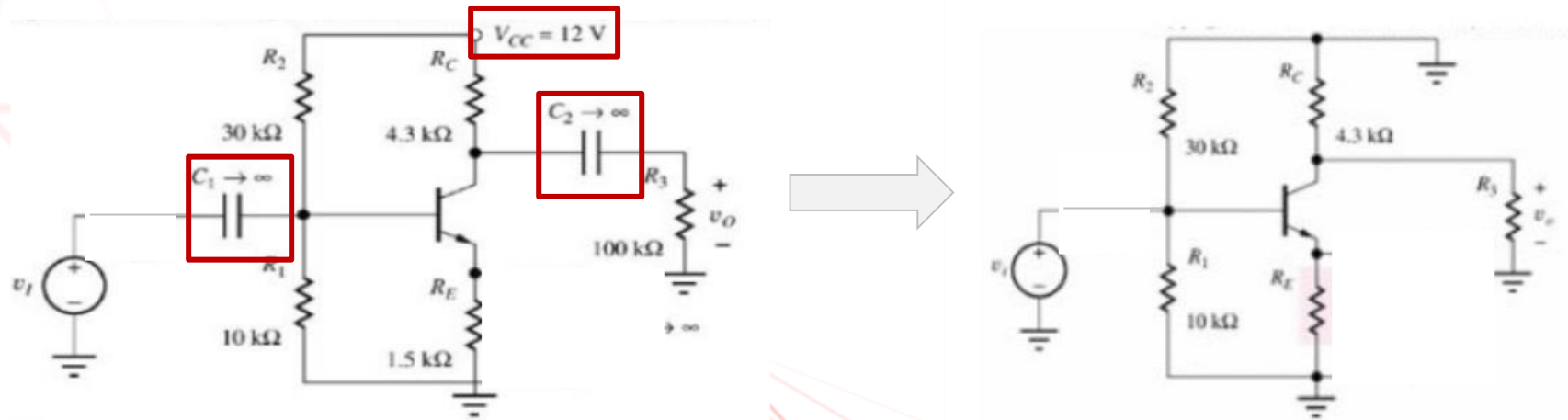
## Πρότυπο Π

- Σχεδιάζεται μόνο η είσοδος και η έξοδος (εδώ βάση-Συλλέκτη)
- Ότι αντίσταση υπάρχει στον εκπομπό μπαίνει στην βάση πολλαπλασιασμένη με  $\beta$



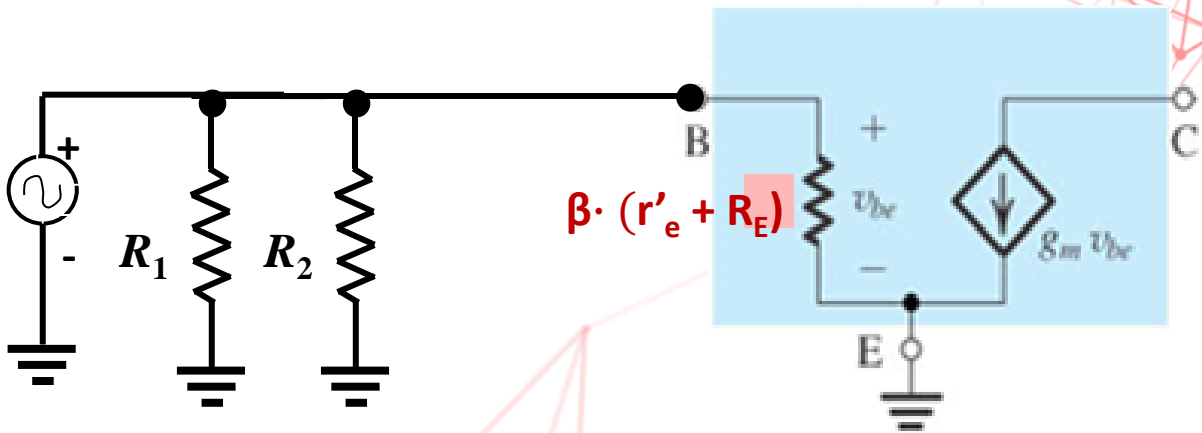
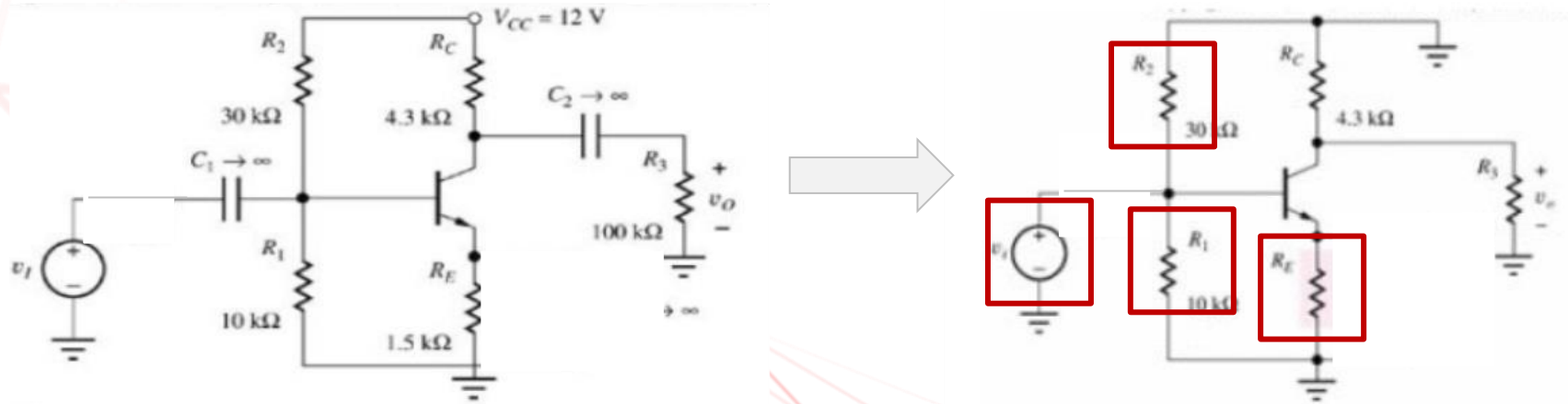


# AC Ανάλυση



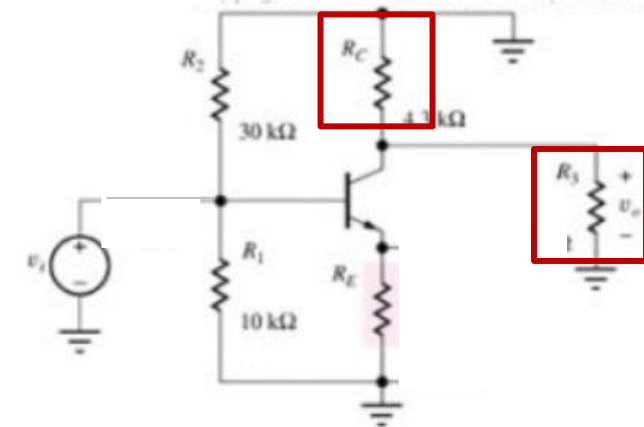
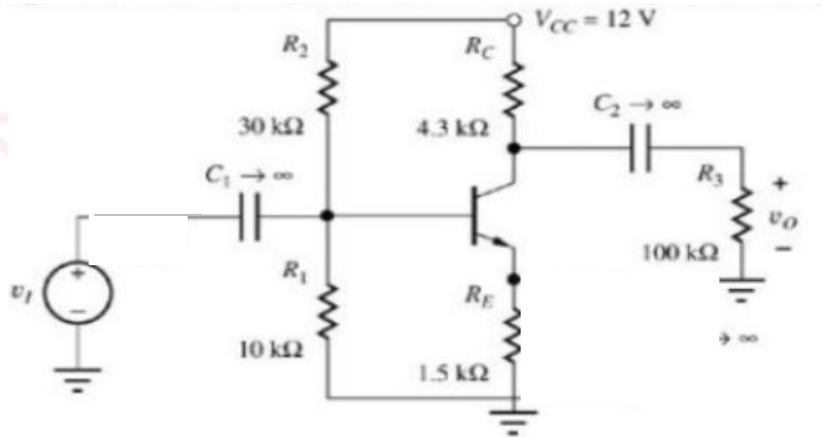
Αφαιρώ τα στοιχεία που δεν παίζουν ρόλο στο AC κύκλωμα σύμφωνα με τους κανόνες

# AC Ανάλυση

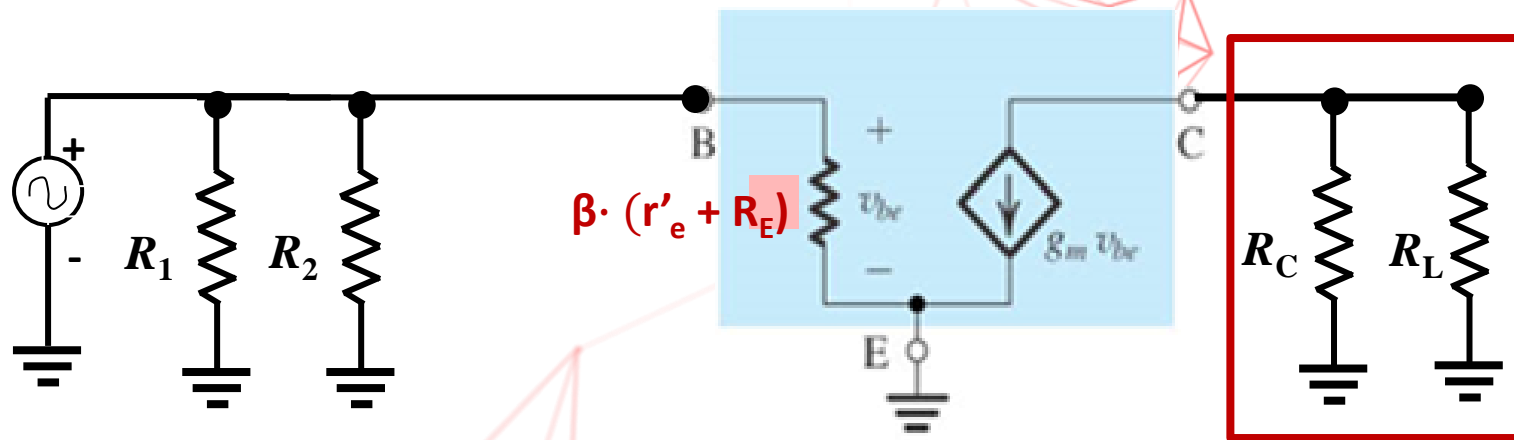


Εντοπίζω τα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα με την βάση και τα προσθέτω στο πρότυπο Π. (επίσης στο τέλος προσθέτω και τα στοιχεία που συνδέονται με τον εκπομπο – πολλαπλασιασμένα με  $\beta$ )

# AC Ανάλυση



Το ίδιο κάνω για την έξοδο (Συλλέκτης)

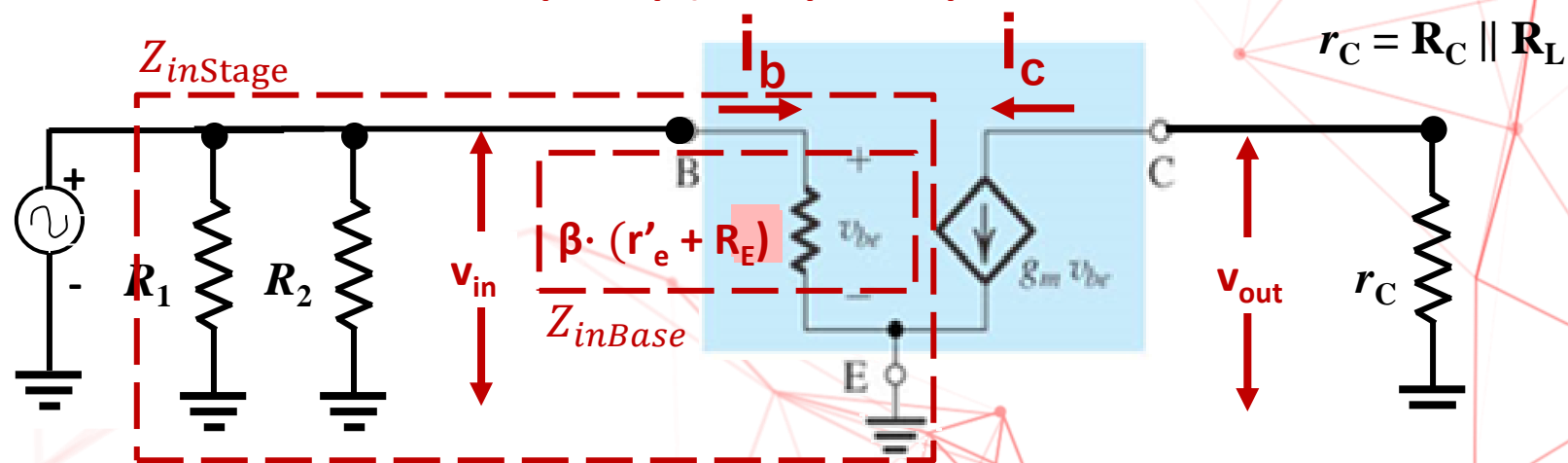


Είναι η  
αντίσταση  
εξόδου  $r_c$

$$r_c = R_C || R_L$$

# AC Ανάλυση

AC Ισοδύναμο σύμφωνα με το Πρότυπο Π



Σύνθετες αντιστάσεις

Εισόδου βάσης  $Z_{inBase} = \beta \cdot (r'_e + RE)$

Εισόδου Βαθμίδας  $Z_{inStage} = R_1 || R_2 || \beta \cdot (r'_e + RE)$

Τάσεις Εισόδου-Εξόδου

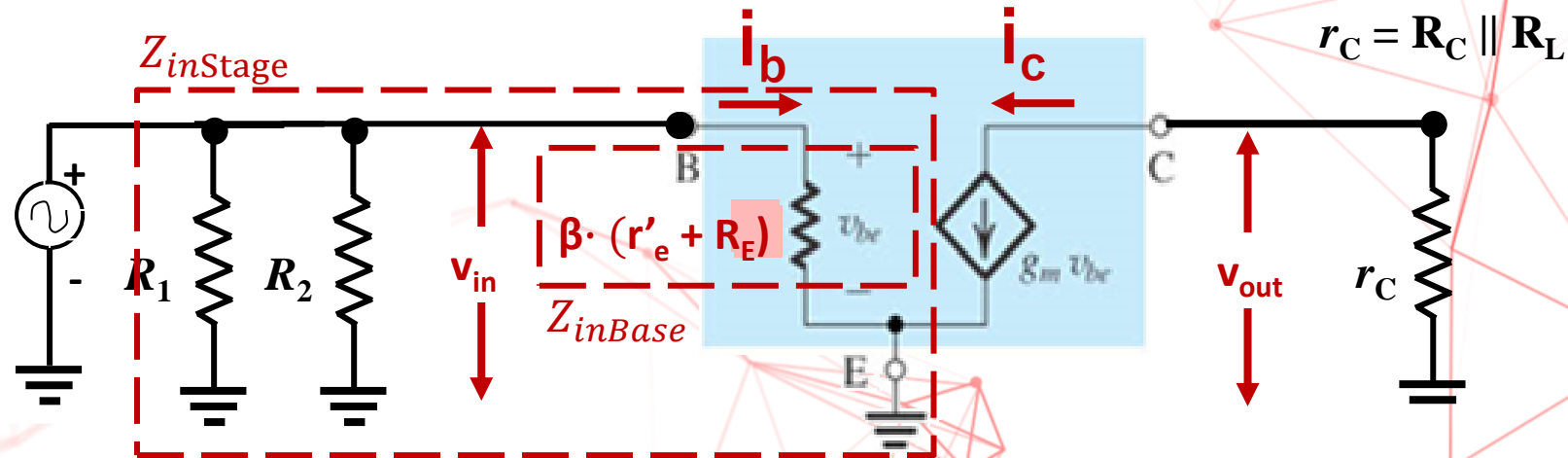
$$v_{in} = i_b \cdot \beta \cdot (r'_e + RE)$$

$$v_{out} = i_c \cdot r_c$$

**ΠΡΟΣΟΧΗ!!** Δεν μαθαίνουμε τους τύπους απέξω διότι αλλάζουν ανάλογα με το κύκλωμα

# AC Ανάλυση

AC Ισοδύναμο σύμφωνα με το Πρότυπο Π



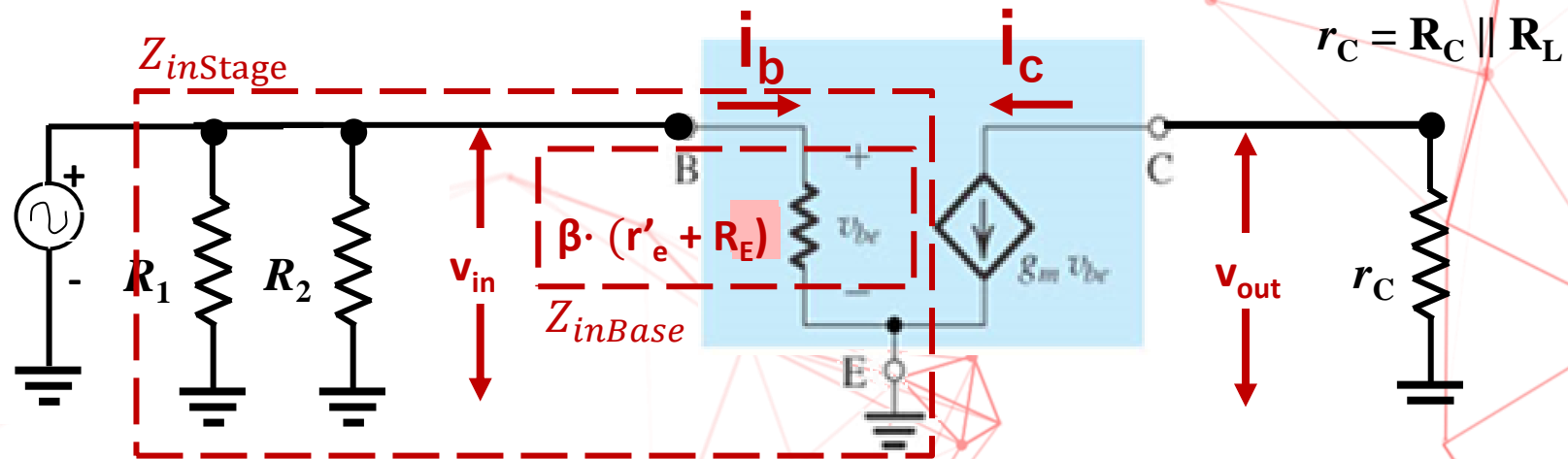
Απολαβή-Ενίσχυση Τάσης

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{i_c \cdot r_c}{i_b \cdot \beta \cdot (r'_e + R_E)} = \frac{r_c}{(r'_e + R_E)}$$

Τελικά η ενίσχυση είναι ο λόγος της αντίστασης συλλέκτη διά τις αντιστάσεις του εκπομπού

# AC Ανάλυση

AC Ισοδύναμο σύμφωνα με το Πρότυπο Π



Αν μας ζητείται το  $V_{out}$  χρησιμοποιώ τον τύπο:

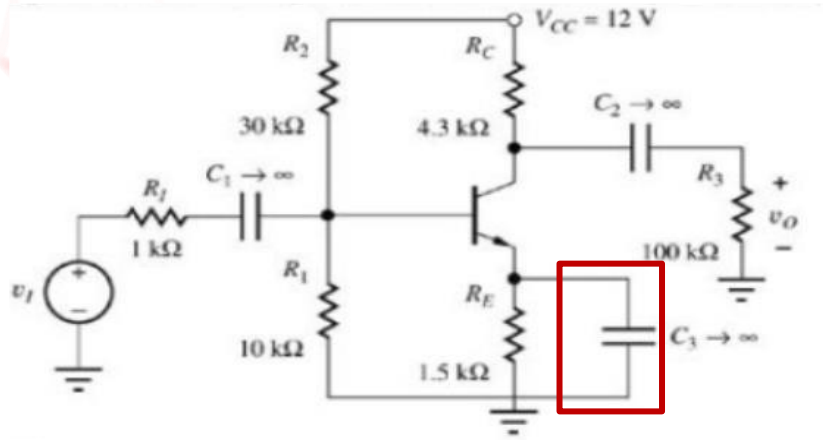
$$v_{out} = A_v \cdot v_{in}$$

Το υπολογίσαμε πριν

Μας το δίνει η εκφώνηση

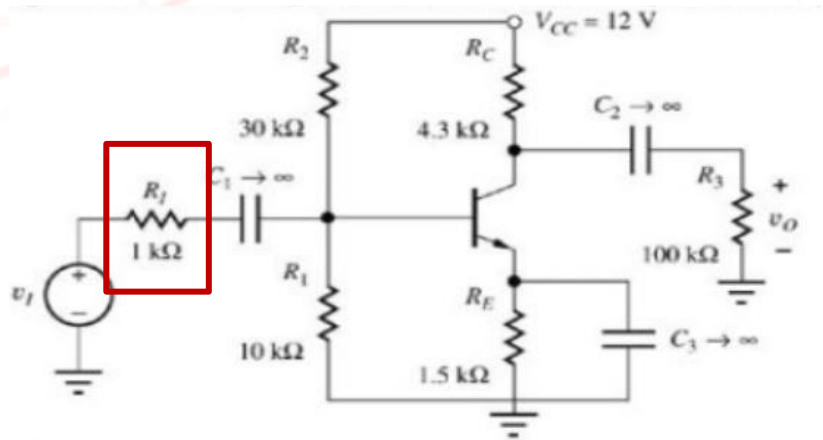


# AC Ανάλυση



## Πυκνωτής παράκαμψης

- Τοποθετείται παράλληλα σε μια αντίσταση
- Βραχυκυκλώνει (παρακάμπει) την αντίσταση στο AC ισοδύναμο κύκλωμα

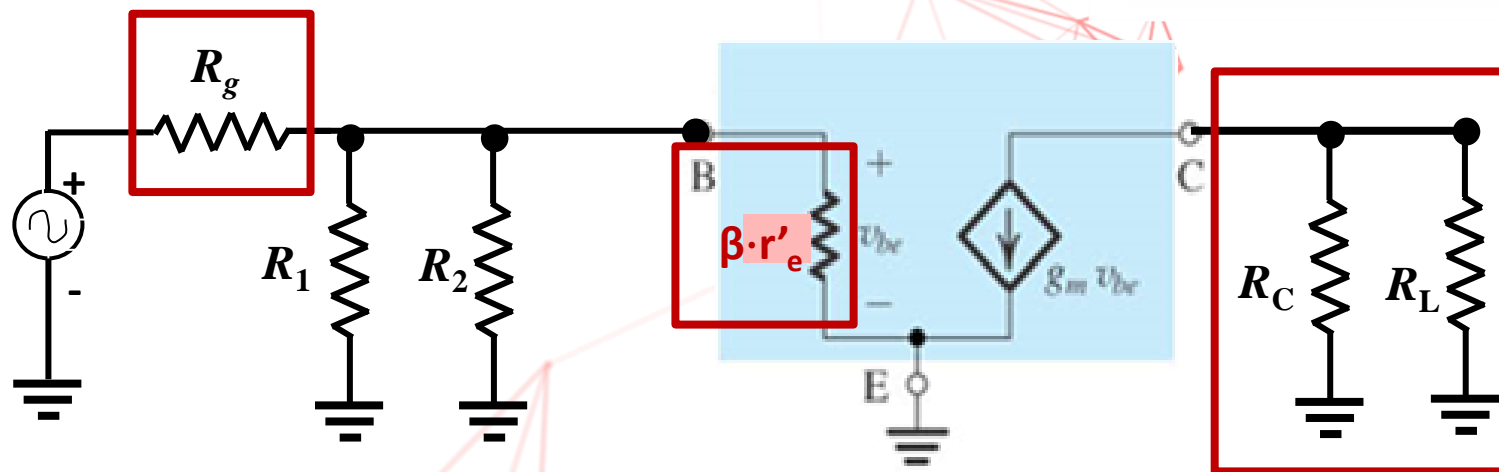
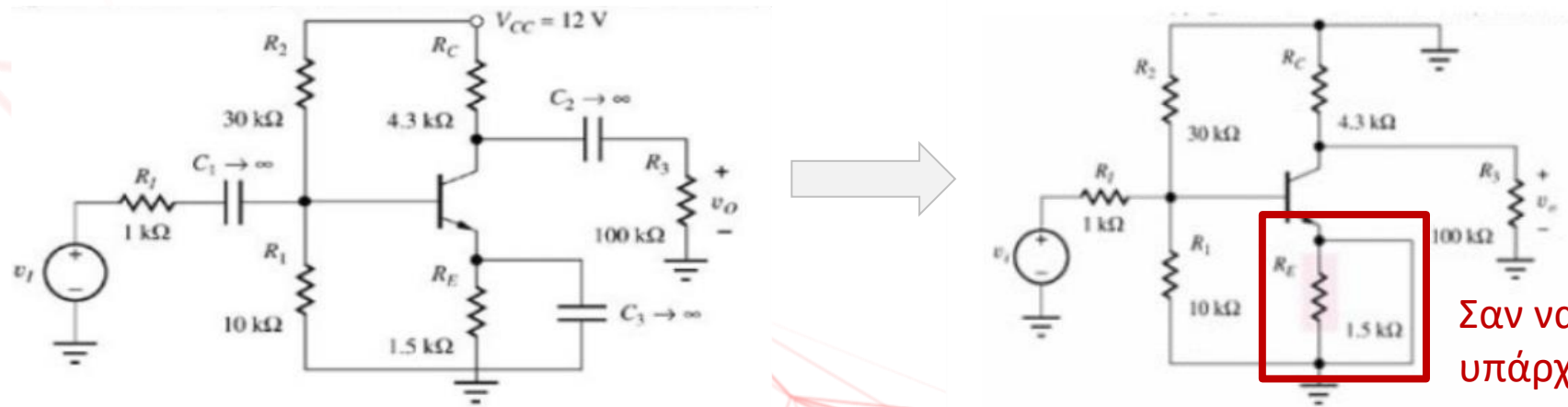


## Αντίσταση $R_g$

- Τοποθετείται πριν τον πυκνωτή σύζευξης της εισόδου
- Λειτουργεί σαν διαιρέτης τάσης στον υπολογισμό του  $Z_{inStage}$

# AC Ανάλυση

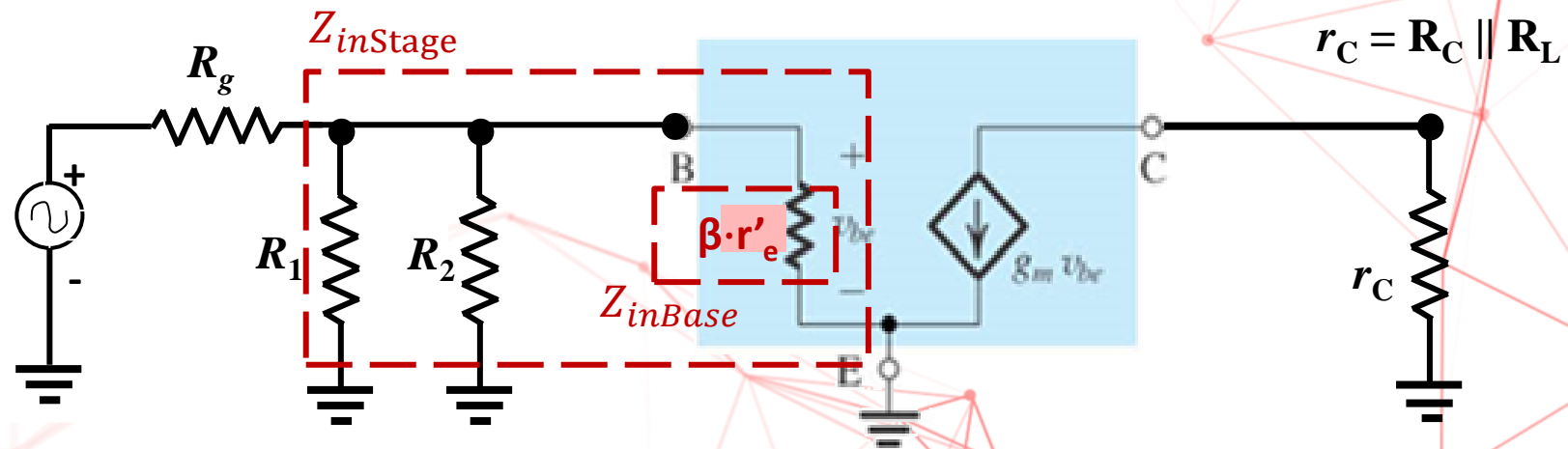
Με πυκνωτή παράκαμψης και  $R_g$



Είναι η αντίσταση εξόδου  $r_c$

$$r_c = R_C || R_L$$

# AC Ανάλυση



Σύνθετες αντιστάσεις

Εισόδου βάσης  $Z_{inBase} = \beta \cdot r'_e$

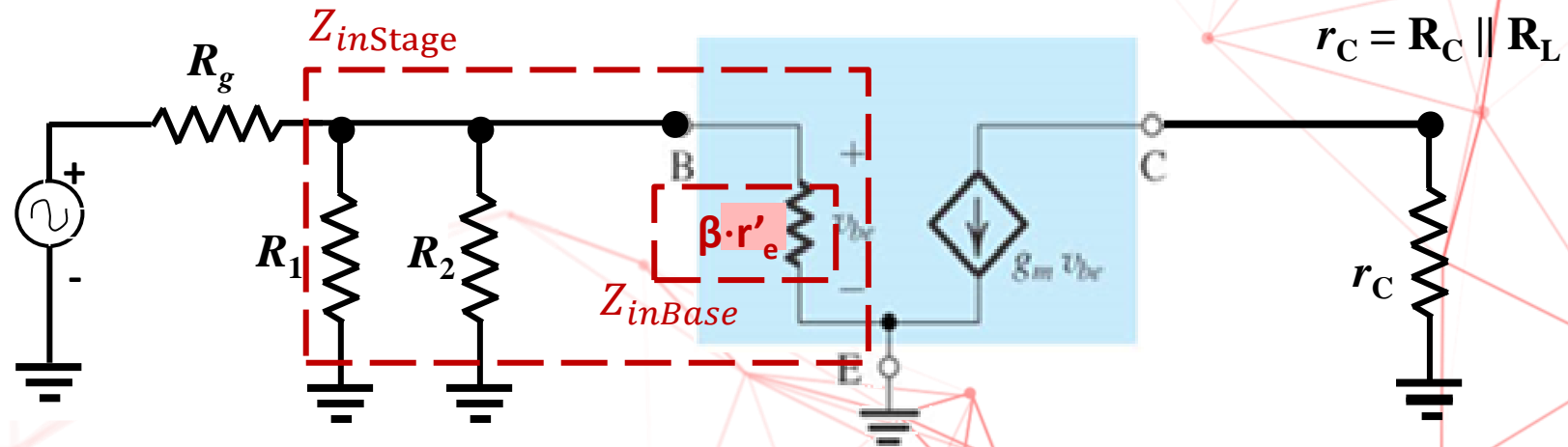
Εισόδου Βαθμίδας  $Z_{inStage} = R_1 || R_2 || \beta \cdot r'_e$

Τάσεις Εισόδου-Εξόδου

$$v_{in} = i_b \cdot \beta \cdot r'_e$$

$$v_{out} = i_c \cdot r_c$$

# AC Ανάλυση



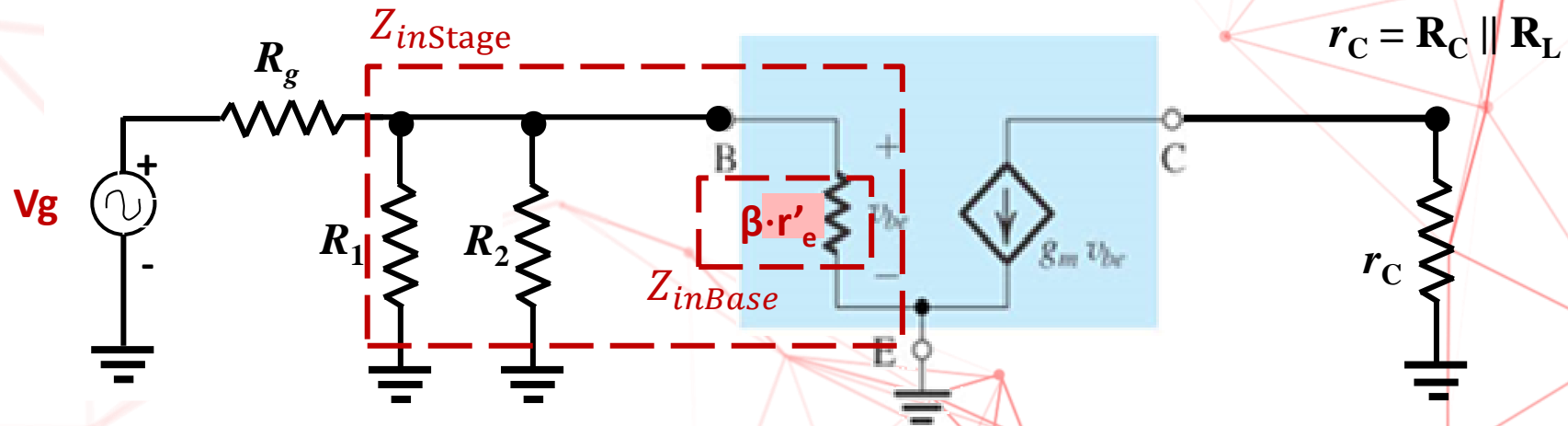
## Απολαβή-Ενίσχυση Τάσης

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{i_c \cdot r_c}{i_b \cdot \beta \cdot r'_e} = \frac{r_c}{r'_e}$$

Στον παρονομαστή τώρα δεν υπάρχει η  $R_E$ . Λόγω του πυκνωτή παράκαμψης. Έτσι έχω μεγαλύτερη ενίσχυση

Τελικά η ενίσχυση είναι ο λόγος της αντίστασης συλλέκτη διά την αντίσταση του εκπομπού

# AC Ανάλυση



Αν μας ζητείται το  $V_{out}$  χρησιμοποιώ τον τύπο:

$$v_{out} = A_v \cdot v_{in}$$

Το υπολογίσαμε πριν

Πρέπει τώρα να το υπολογίσω λόγω της ύπαρξης της  $R_g$

Διαιρέτης τάσης

$$v_{in} = \frac{Z_{inStage}}{R_g + Z_{inStage}} \cdot V_g$$

# Γενικευμένη Μεθοδολογία

Να βρεθεί στο κύκλωμα του δοθέντος ενισχυτή η ενίσχυση και η τάση εξόδου  $V_{out}$

## A. DC Ανάλυση

- Σχεδιάζω το DC ισοδύναμο κύκλωμα (λογικά θα είναι ένα εκ των κυκλωμάτων πόλωσης)
- Οι πυκνωτές = ανοιχτοί διακόπτες
- Αναλύω το κύκλωμα με σκοπό να υπολογίσω το ρεύμα εκπομπού (Για παράδειγμα 2<sup>ος</sup> κΚ στον βρόχο εισόδου)
- Συμβουλευόμαι και την μεθοδολογία για την DC ανάλυση του αντίστοιχου κυκλώματος πόλωσης

# Γενικευμένη Μεθοδολογία

Να βρεθεί στο κύκλωμα του δοθέντος ενισχυτή η ενίσχυση και η τάση εξόδου  $V_{out}$

## B. AC Ανάλυση

- Υπολογίζω την  $r'_e = 25mV/I_E$
- Γειώνω όλες τις πηγές συνεχούς τάσης και βραχυκυκλώνω όλους τους πυκνωτές
- Σχεδιάζω το **πρότυπο Π** και τοποθετώ όλες τις αντιστάσεις που υπάρχουν στην είσοδο και την έξοδο. Στο τέλος της βάσης βάζω και τις αντιστάσεις που υπάρχουν στον εκπομπό πολλαπλασιασμένες με  $\beta$ . (**Προσοχή!** στους πυκνωτές παράκαμψης)
- Βρίσκω από το σχήμα τις τάσεις  $v_{in}$  και  $v_{out}$  (από  $Z_{inBase}$  και  $R_c$ )
- Υπολογίζω ενίσχυση διαιρώντας αυτές
- Υπολογίζω το  $v_{out}$  από το  $v_{in}$  που μας δίνει η άσκηση. Αν υπάρχει αντίσταση  $R_g$  κάνω διαιρέτη τάσης με την  $Z_{inStage}$