

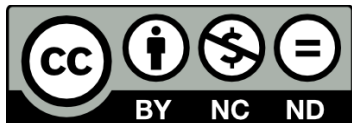


# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

## Ενότητα 8: Ενισχυτές με διπολικά τρανζίστορ

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Σχεδιασμός ενοτήτων:

- 1. Ημιαγωγική δίοδος
- 2. Ένωση pn
- 3. Τρανζίστορ FET
- 4. Πόλωση των FET - Ισοδύναμα κυκλώματα
- 5. Ενισχυτές με FET
- 6. Διπολικό τρανζίστορ (BJT)
- 7. Πόλωση των BJT - Ισοδύναμα κυκλώματα
- 8. **Ενισχυτές με διπολικά τρανζίστορ**
- 9. Ενισχυτές με ενεργό φορτίο
- 10. Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



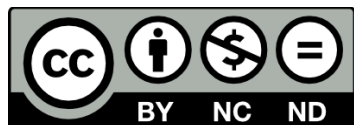


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ  
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



# ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΜΕ ΔΙΠΟΛΙΚΑ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

1. Εισαγωγή – βέλτιστη επιλογή σημείου λειτουργίας (διαφ. 7- 9)
2. Ενισχυτής κοινού εκπομπού (διαφ. 10- 19)
3. Ενισχυτής κοινής βάσης (διαφ. 20- 22)
4. Ενισχυτής κοινού συλλέκτη (διαφ. 23- 26)

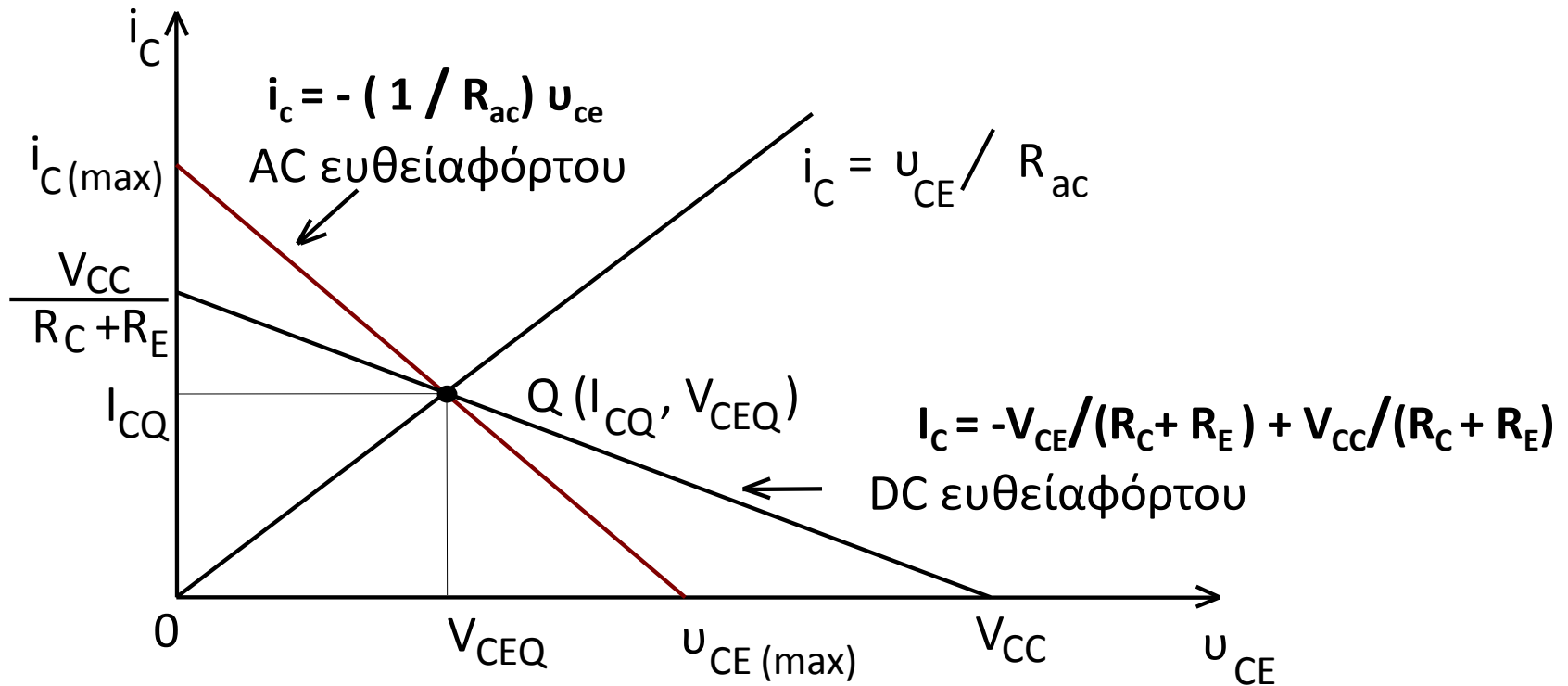


# Τύποι ενισχυτικών βαθμίδων

- Ενισχυτής κοινού εκπομπού.
- Ενισχυτής κοινής βάσης.
- Ενισχυτής κοινού συλλέκτη.



# Ευθεία φορτίου ac και βέλτιστη επιλογή σημείου ηρεμίας στον ενισχυτή κοινού εκπομπού (1/2)





# Ευθεία φορτίου ac και βέλτιστη επιλογή σημείου ηρεμίας στον ενισχυτή κοινού εκπομπού (2/2)

$$V_{CC} = V_{CEQ} + I_{CQ} R_{dc} = V_{CEQ} (1 + R_{dc} / R_{ac})$$

$I_{CQ} = V_{CEQ} / R_{ac}$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{(1 + R_{dc} / R_{ac})}$$

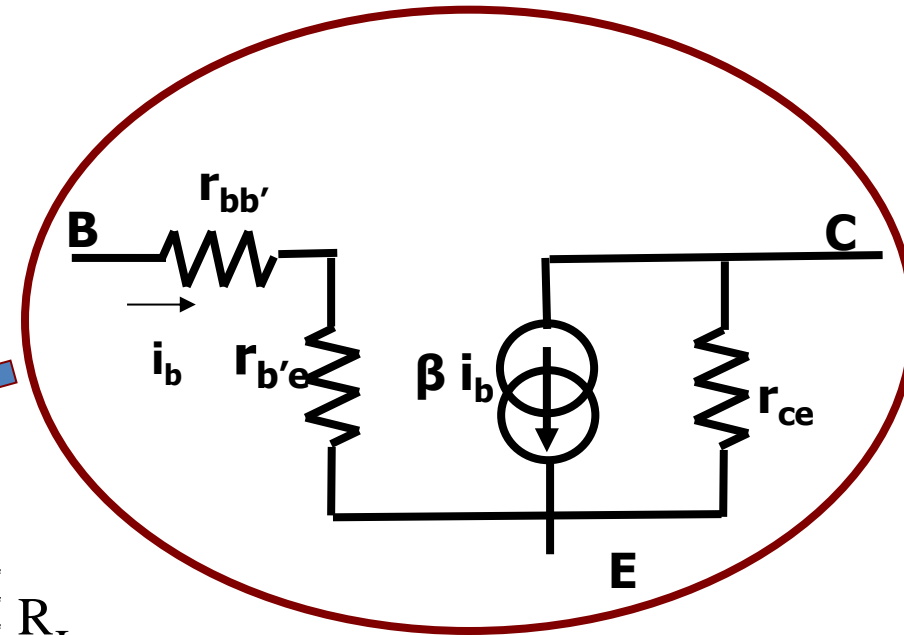
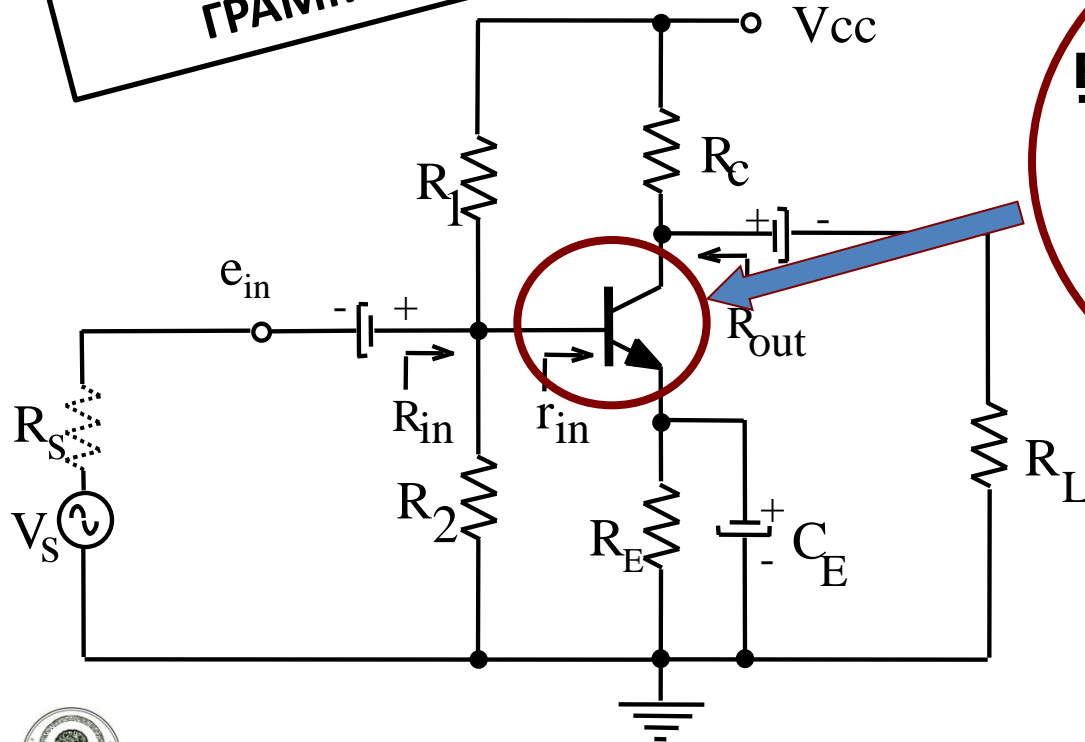
**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ Q**

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{(R_{ac} + R_{dc})}$$



# Ανάλυση ενισχυτή κοινού εκπομπού με το υβριδικό-π ισοδύναμο (1/5)

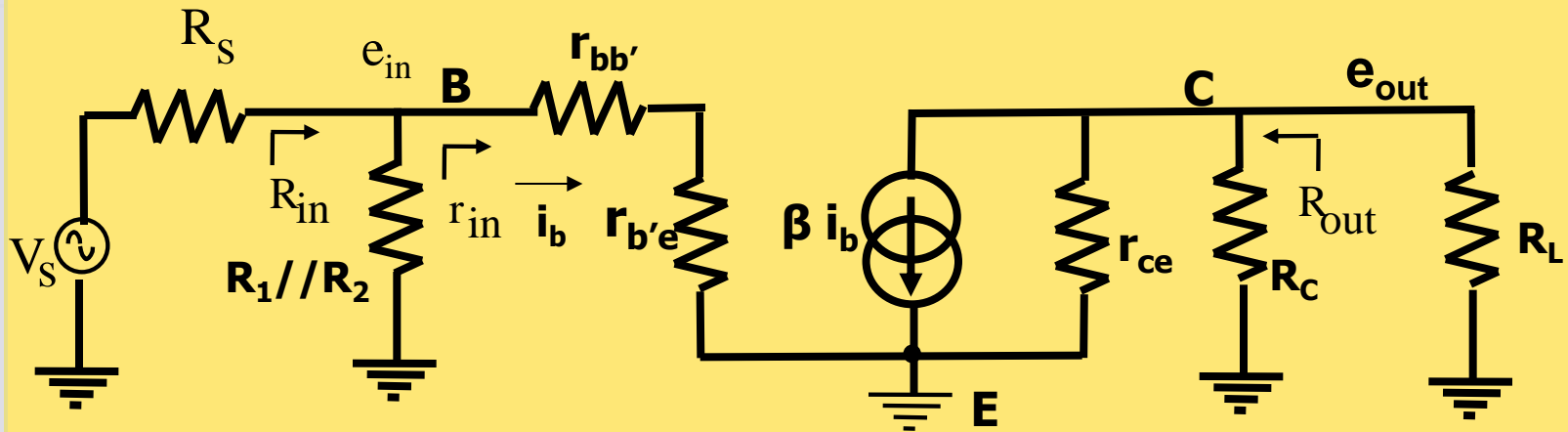
ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ



$$r_{b'e} = (\beta + 1) r_d = (\beta + 1) nV_T / |I_E|$$



# Ανάλυση ενισχυτή κοινού εκπομπού με το υβριδικό-π ισοδύναμο (2/5)



$$R_{in} = R_1 // R_2 // r_{in}$$

$$r_{in} = r_{bb'} + r_{b'e}$$

$$= r_{bb'} + (\beta + 1) r_d$$

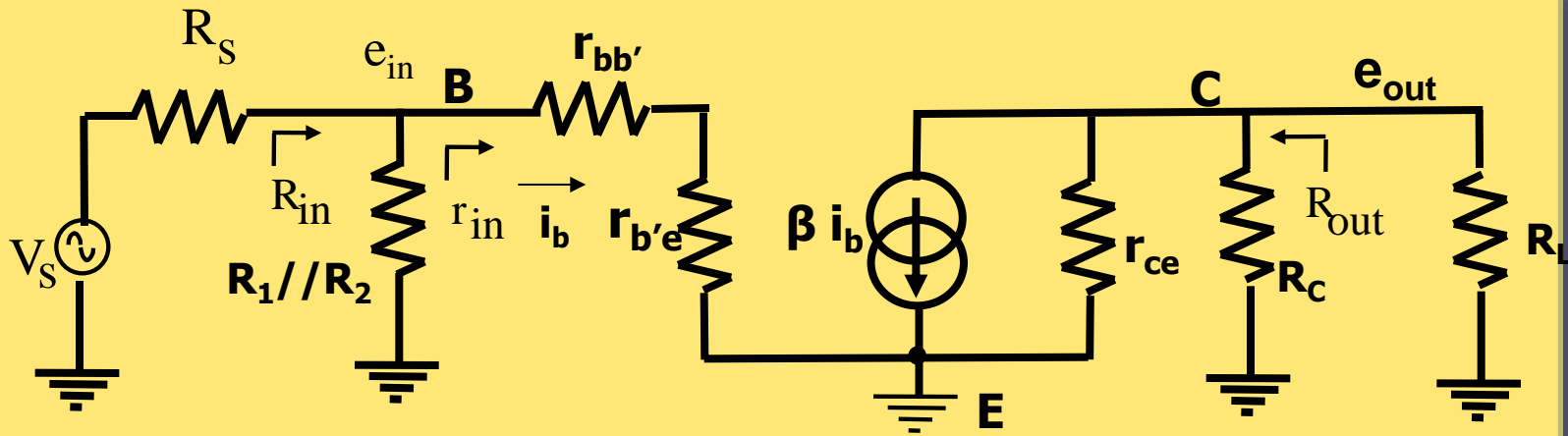
$$R_{out} = R_C // r_{CE} \approx R_C$$

$$A_u = e_{out} / v_s$$

$$e_{out} = -\beta i_b (R_C // R_L), \quad i_b = e_{in} / r_{in}, \quad e_{in} = V_S R_{in} / (R_{in} + R_S)$$



# Ανάλυση ενισχυτή κοινού εκπομπού με το υβριδικό-π ισοδύναμο (3/5)

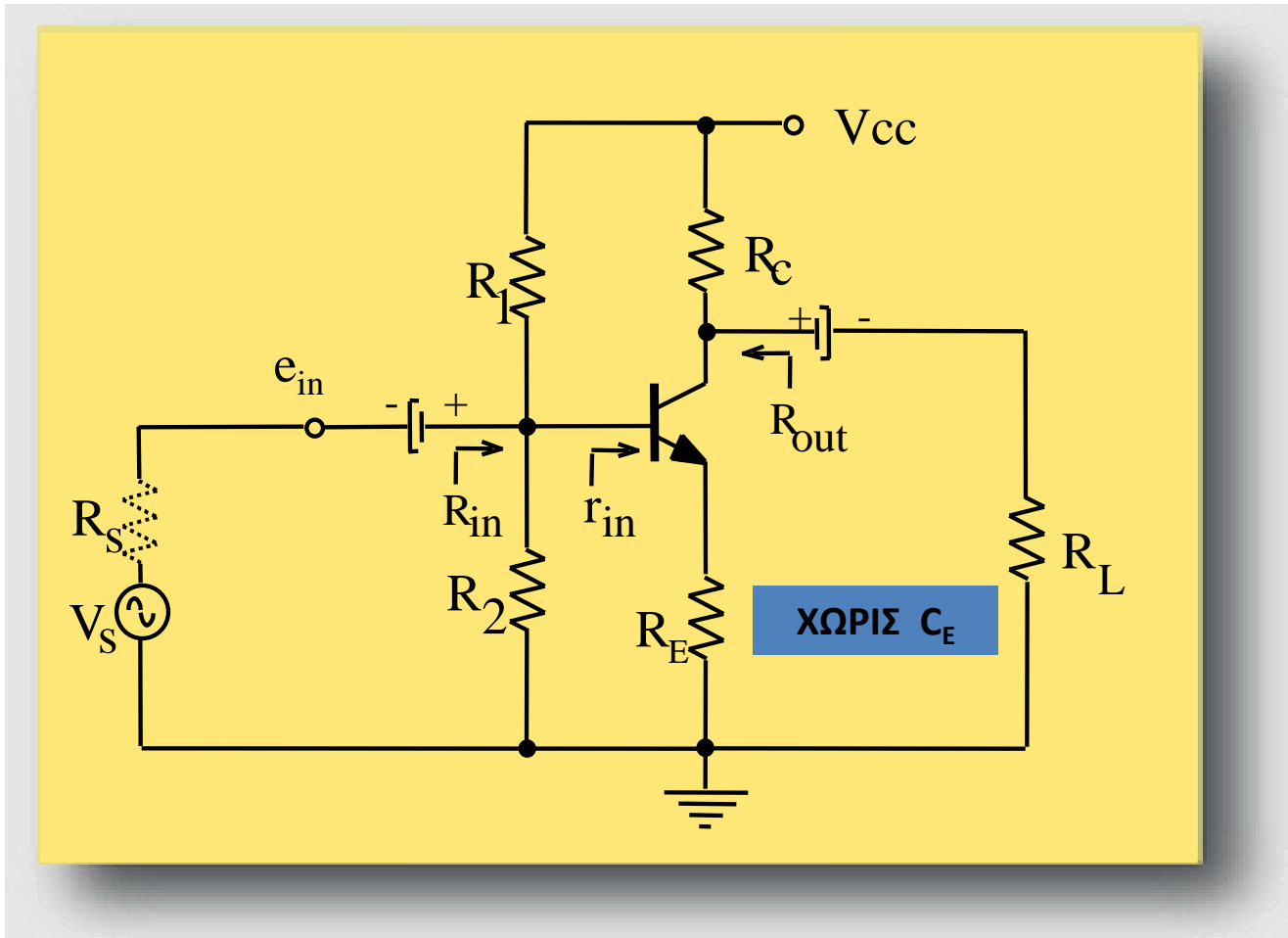


$$A_u = e_{out} / v_s = - \frac{\beta R_C}{r_{in}} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \frac{R_L}{R_L + R_C}$$

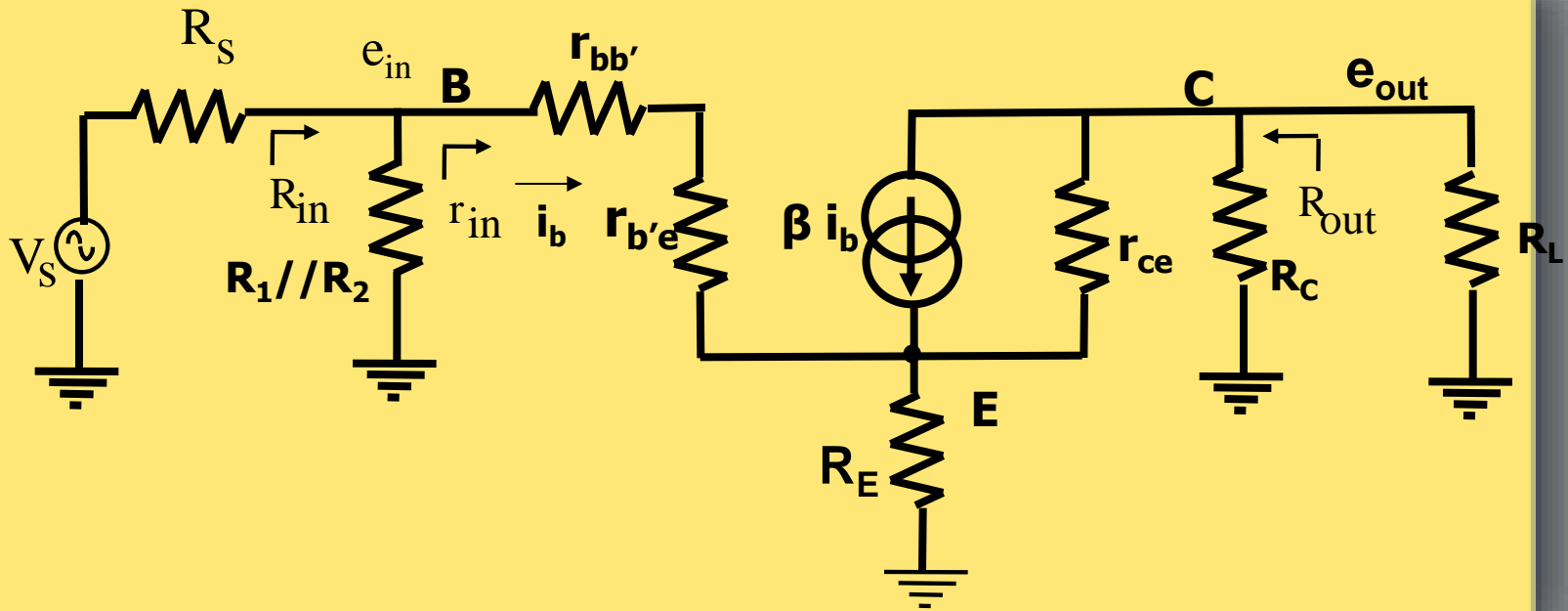
A



# Ανάλυση ενισχυτή κοινού εκπομπού με το υβριδικό-π ισοδύναμο (4/5)



# Ανάλυση ενισχυτή κοινού εκπομπού με το υβριδικό-π ισοδύναμο (5/5)



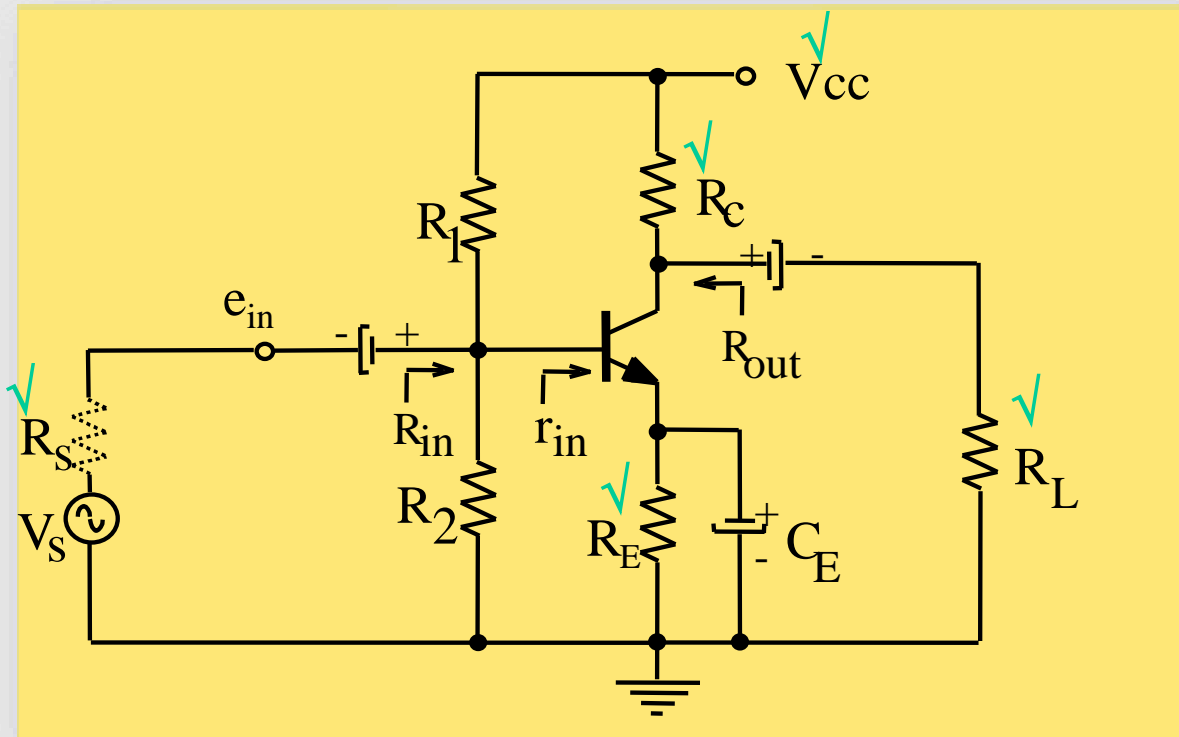
$$e_{in} = i_b (r_{bb'} + r_{b'e}) + (\beta + 1) i_b R_E \Rightarrow r_{in} = e_{in} / i_b = r_{bb'} + (\beta + 1) (r_d + R_E)$$

$$A = - \frac{\beta R_C}{r_{in}} \approx - \frac{R_C}{R_E}$$



# Σχεδίαση ενισχυτή κοινού εκπομπού (1/3)

Επιλογή σημείου Q στο μέσο της dc ευθείας φόρτου:



$$V_{CEQ} = (V_{CC} + V_{CE(sat)}) / 2$$

$$\approx V_{CC} / 2$$

$$V_{CQ} = V_{CEQ} + I_{EQ} R_E$$

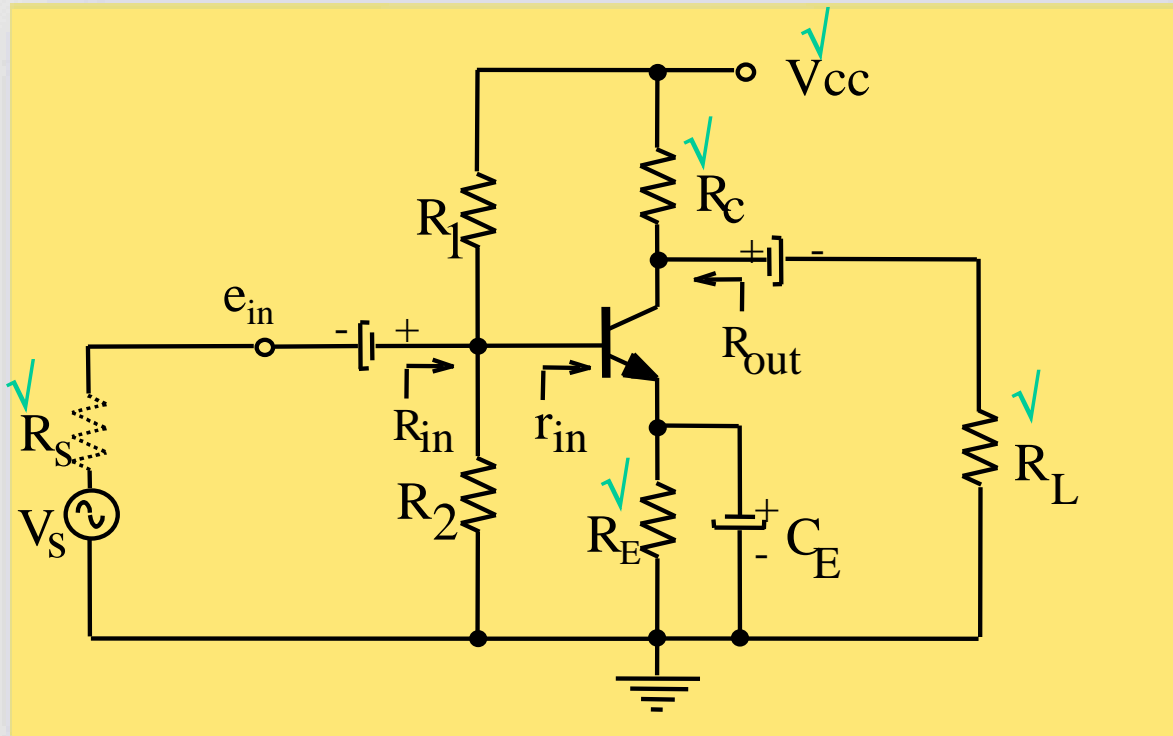
$$\approx V_{CC} / 2 + (V_{CC} - V_{CQ}) R_E / R_C$$

$$V_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2} \left( 1 + \frac{R_E}{R_C + R_E} \right)$$



# Σχεδίαση ενισχυτή κοινού εκπομπού (2/3)

Επιλογή σημείου Q στο μέσο της  
ac ευθείας φόρτου:  
(μέγιστη διακύμανση)



$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{(1 + R_{dc} / R_{ac})}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{(R_{ac} + R_{dc})}$$

$$V_{CQ} = V_{CEQ} + I_{EQ} R_E \approx I_{CQ} R_E$$

$$V_{CQ} = V_{CC} \frac{R_{ac} + R_E}{R_{ac} + R_{dc}}$$



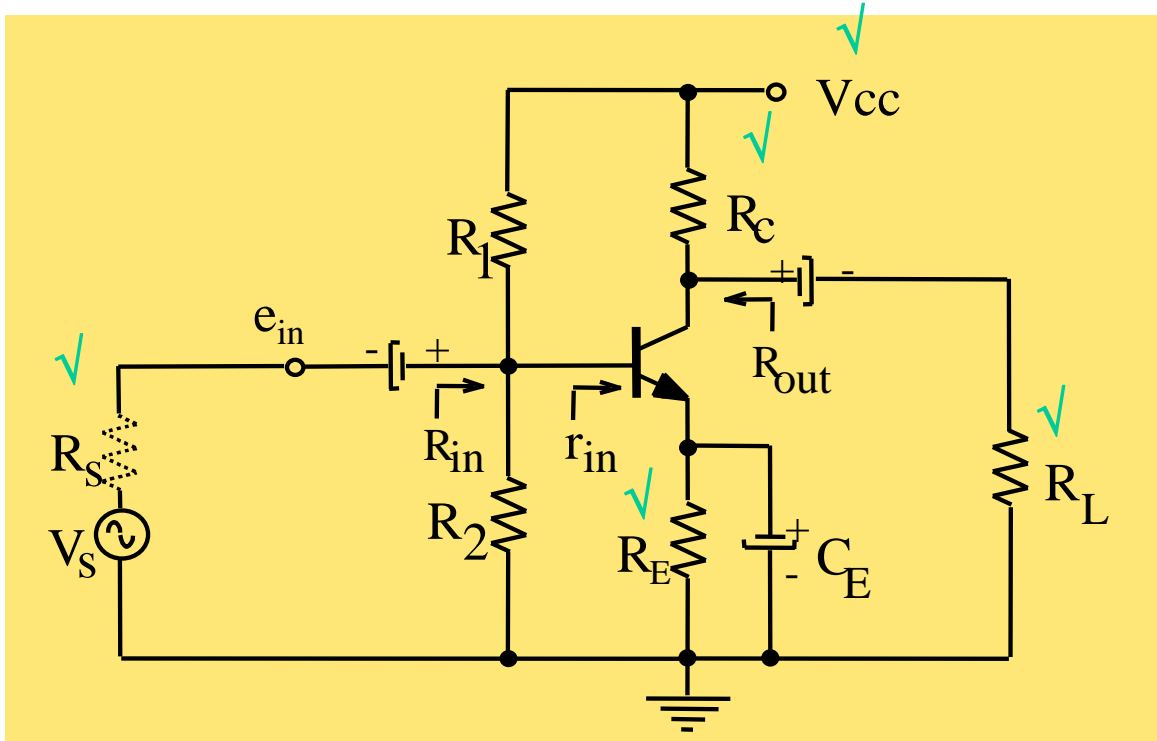


# Σχεδίαση ενισχυτή κοινού εκπομπού (3/3)

$$V_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2} \left( 1 + \frac{R_E}{R_C + R_E} \right)$$

ή

$$V_{CQ} = V_{CC} \frac{R_{ac} + R_E}{R_{ac} + R_{dc}}$$



$$I_{CQ} = (V_{CC} - V_{CQ}) / R_C$$

$$I_{BQ} = (I_{CQ} - (\beta + 1) I_{CO}) / \beta$$

$$V_{BQ} = V_{BE} + (I_{CQ} + I_{BQ}) R_E$$

$$10 R_E \leq R_2 \leq 20 R_E$$

$$I_2 = V_{BQ} / R_2$$

$$R_1 = (V_{CC} - V_{BQ}) / (I_B + I_2)$$



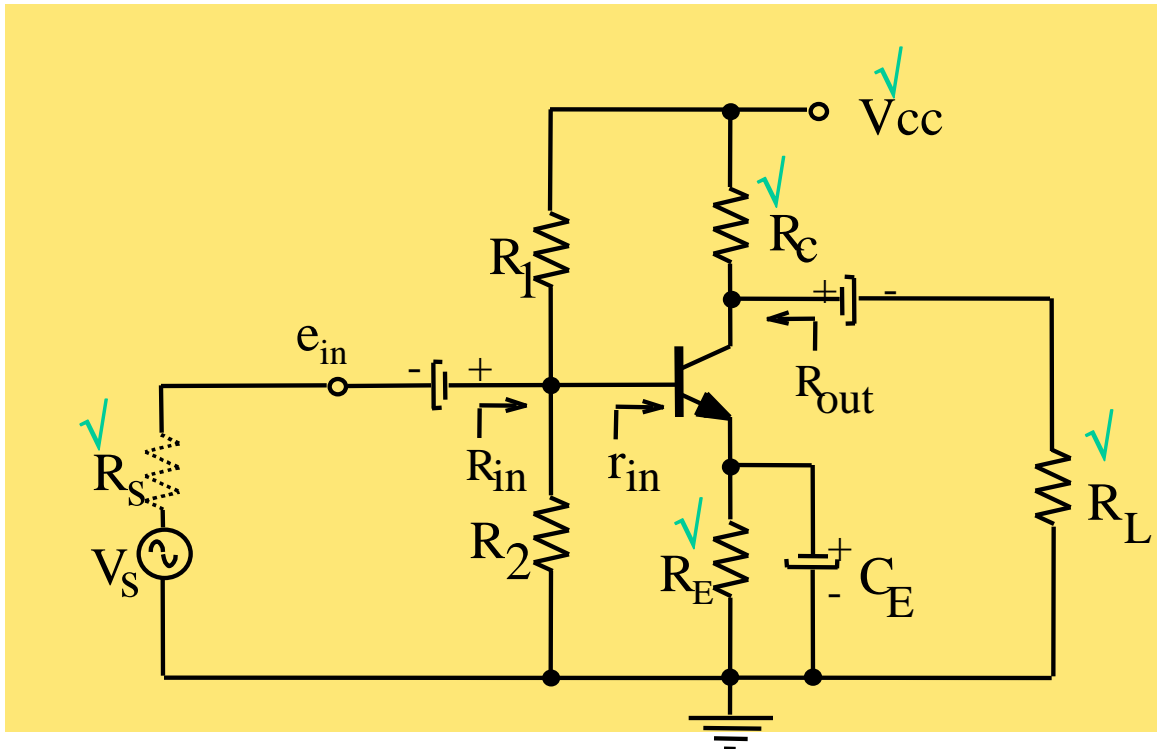
# Σχεδίαση ενισχυτή και ρύθμιση κέρδους (1/2)

Με πυκνωτή  $C_E$ :

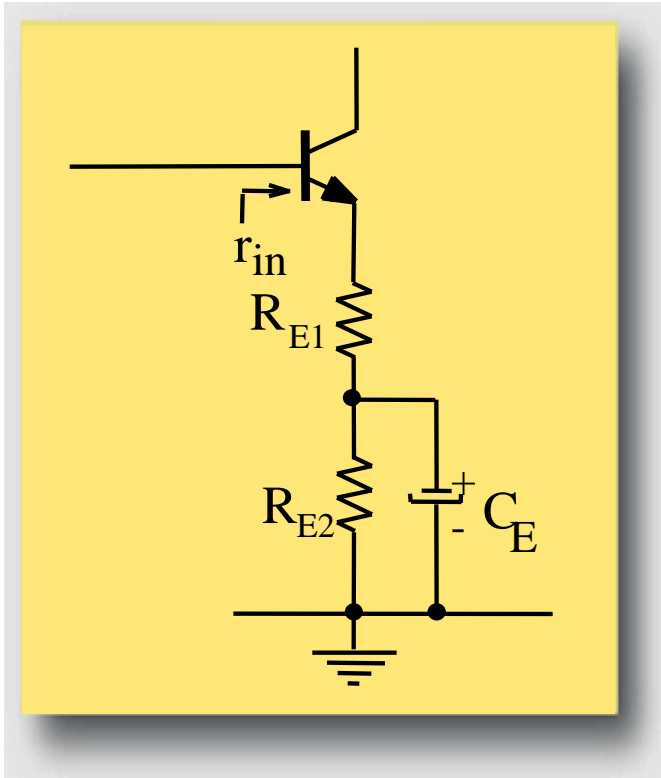
$$r_{in} = r_{bb'} + (\beta + 1) r_d$$

Χωρίς πυκνωτή  $C_E$ :

$$r_{in} = r_{bb'} + (\beta + 1) (r_d + R_E)$$



# Σχεδίαση ενισχυτή και ρύθμιση κέρδους (2/2)



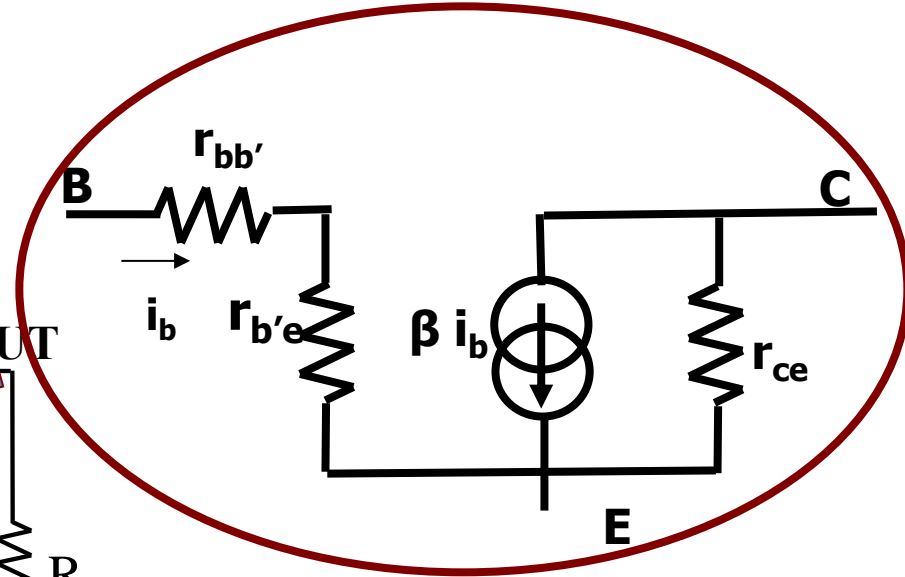
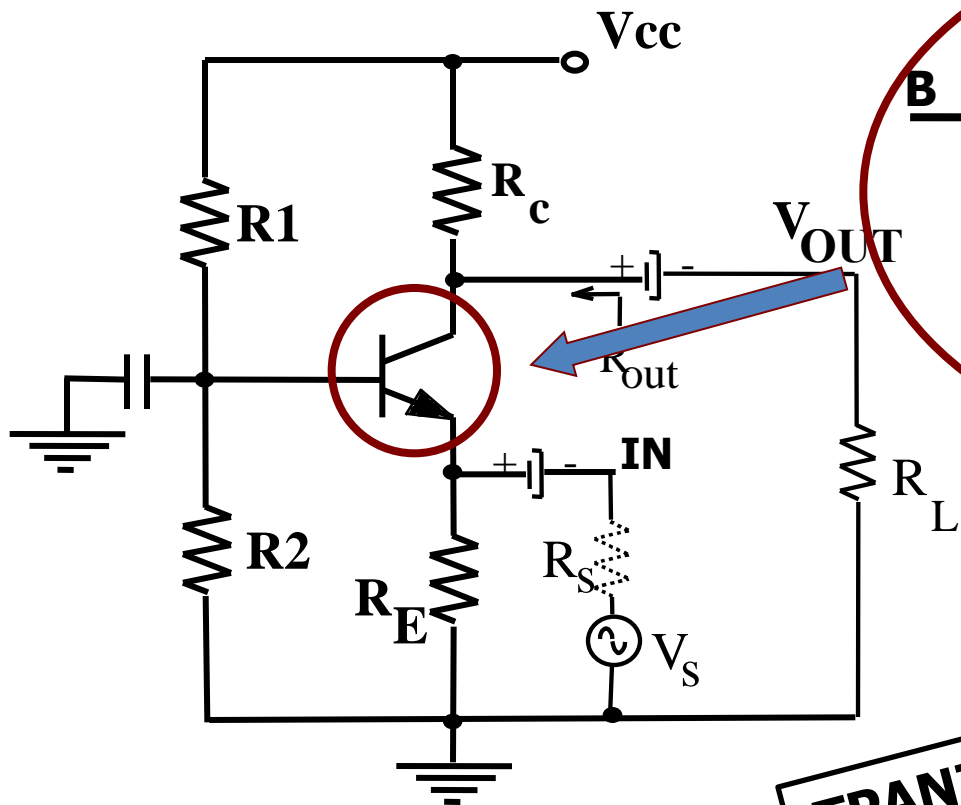
$$r_{in} = r_{bb'} + (\beta + 1)(r_d + R_{E1})$$

$$R_{in} = R_1 // R_2 // r_{in}$$

$$A_u = e_{out} / v_s = - \frac{\beta R_C}{r_{in}} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \frac{R_L}{R_L + R_C}$$

**ΜΕΣΟ dc Ε.Φ. 'Η ΜΕΣΟ ac Ε.Φ. ;;;;**

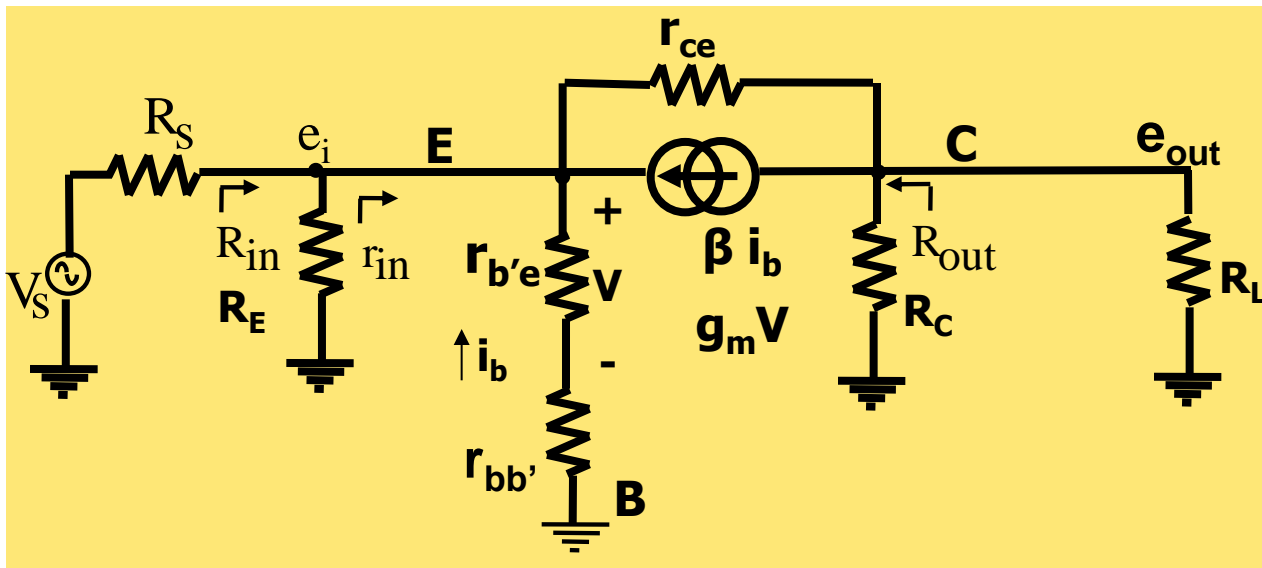
# Ανάλυση ενισχυτή κοινής βάσης με το υβριδικό-π ισοδύναμο (1/3)



**ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**



# Ανάλυση ενισχυτή κοινής βάσης με το υβριδικό-π ισοδύναμο (2/3)



$$R_{in} = R_E // r_{in}$$

$$r_{in} = (r_{bb'} + r_{b'e}) // (1/g_m)$$

$$R_{out} = R_C$$

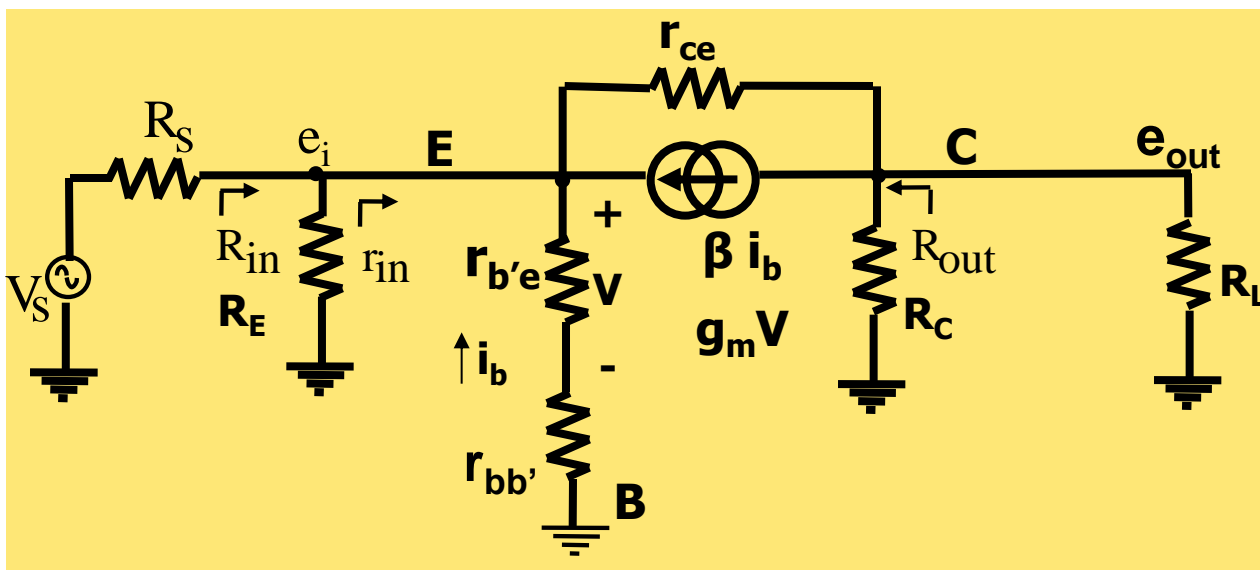
$$= (r_{bb'} + (\beta+1) r_d) // (1/g_m)$$

$$A_u = e_{out} / v_s$$

$$e_{out} = -\beta i_b (R_C // R_L), \quad i_b = -e_i / (r_{bb'} + r_{b'e}), \quad e_i = V_S R_{in} / (R_{in} + R_S)$$



# Ανάλυση ενισχυτή κοινής βάσης με το υβριδικό-π ισοδύναμο (3/3)

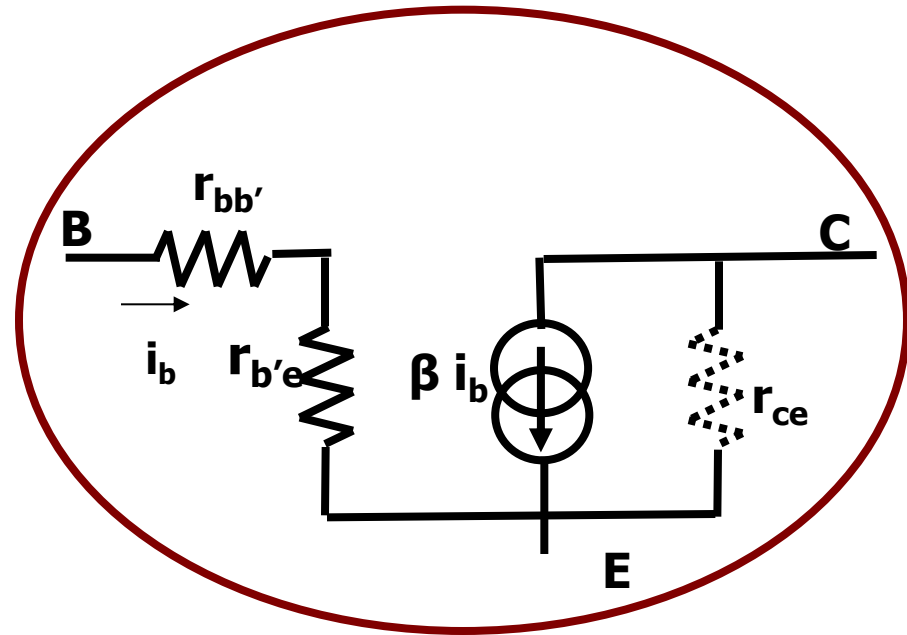
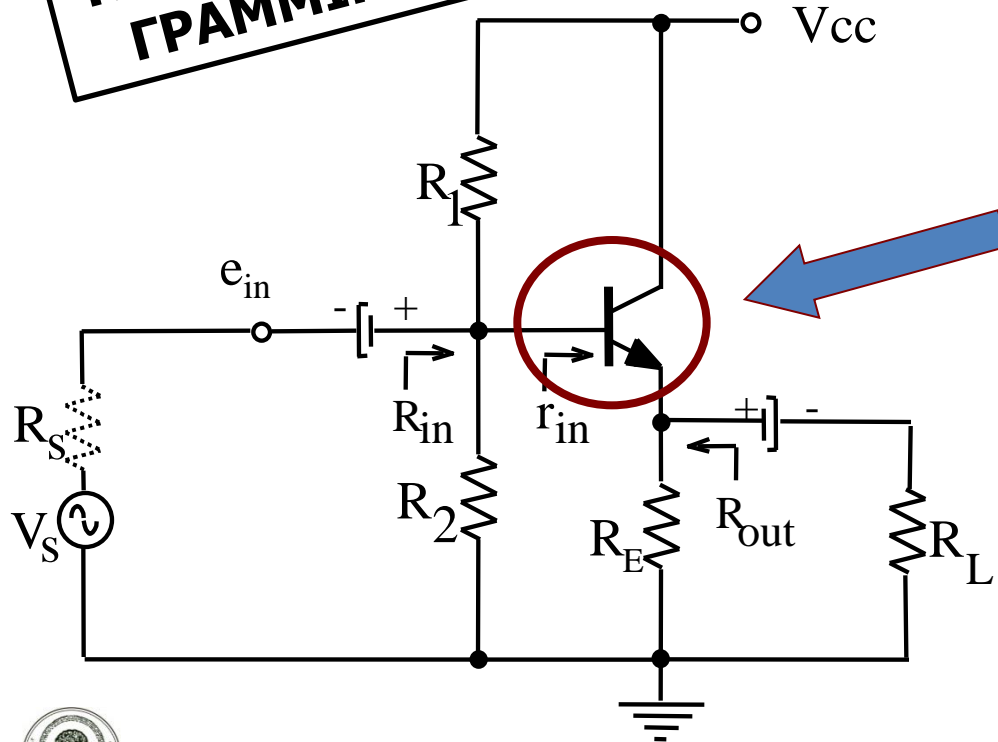


$$A_U = e_{out} / v_s = \underbrace{\frac{\beta R_C}{(r_{bb'} + r_{b'e})}}_A (= g_m R_C) \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} \frac{R_L}{R_L + R_C}$$



# Ανάλυση ενισχυτή κοινού συλλέκτη με το υβριδικό-π ισοδύναμο (1/3)

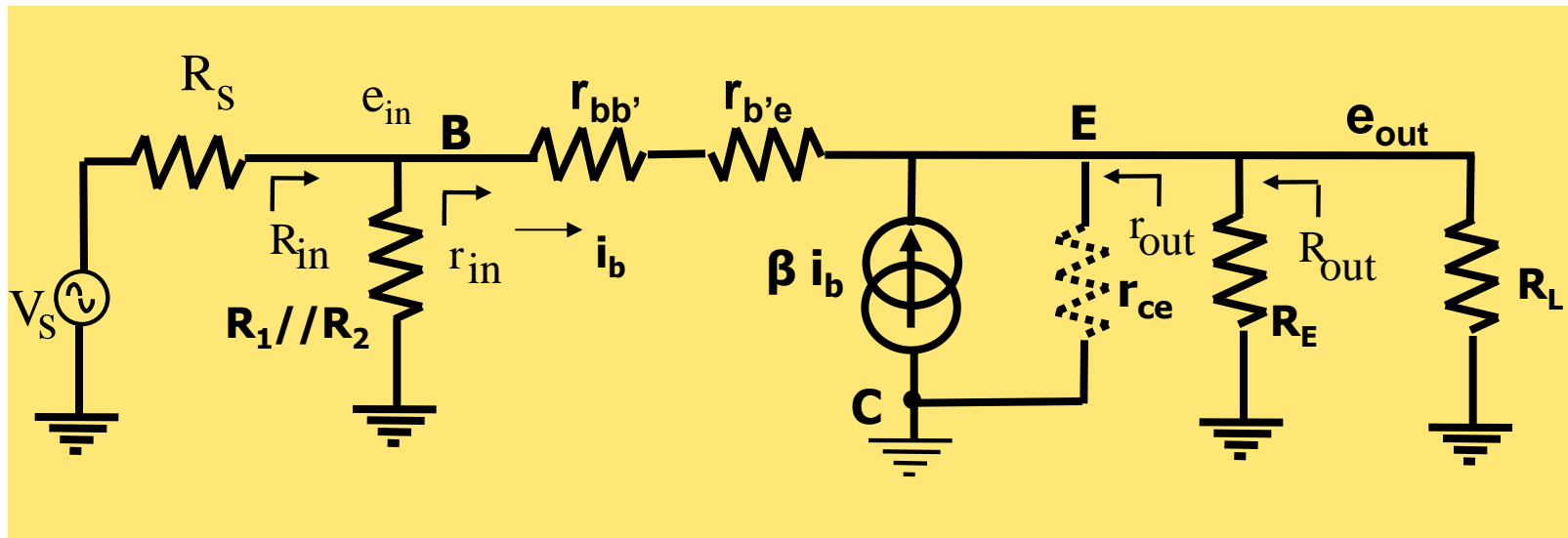
**ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**



$$r_{b'e} = (\beta + 1) r_d = (\beta + 1) nV_T / |I_E|$$



# Ανάλυση ενισχυτή κοινού συλλέκτη με το υβριδικό-π ισοδύναμο (2/3)



$$R_{in} = R_1 // R_2 // r_{in}$$

$$R_{out} = R_E // r_{OUT}$$

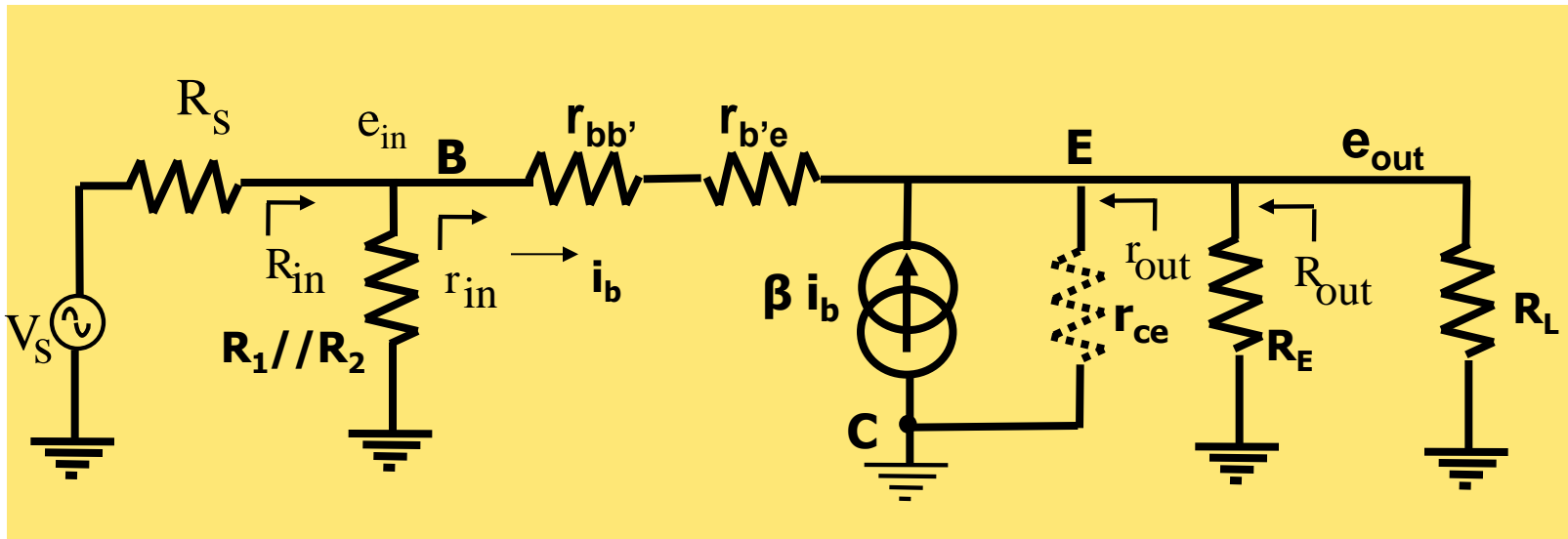
$$\begin{aligned} r_{in} &= r_{bb'} + r_{b'e} + e_{out} / i_b \\ &= r_{bb'} + (\beta+1) r_d + (\beta+1) (R_E // R_L) \\ &= r_{bb'} + (\beta+1) (r_d + R_E // R_L) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{out} &= \frac{(r_{bb'} + (\beta+1) r_d + R_1 // R_2 // R_S) i_b}{(\beta+1) i_b} \\ &= r_d + \frac{r_{bb'} + R_1 // R_2 // R_S}{(\beta+1)} \end{aligned}$$





# Ανάλυση ενισχυτή κοινού συλλέκτη με το υβριδικό-π ισοδύναμο (3/3)



$$A_u = e_{out} / v_s$$

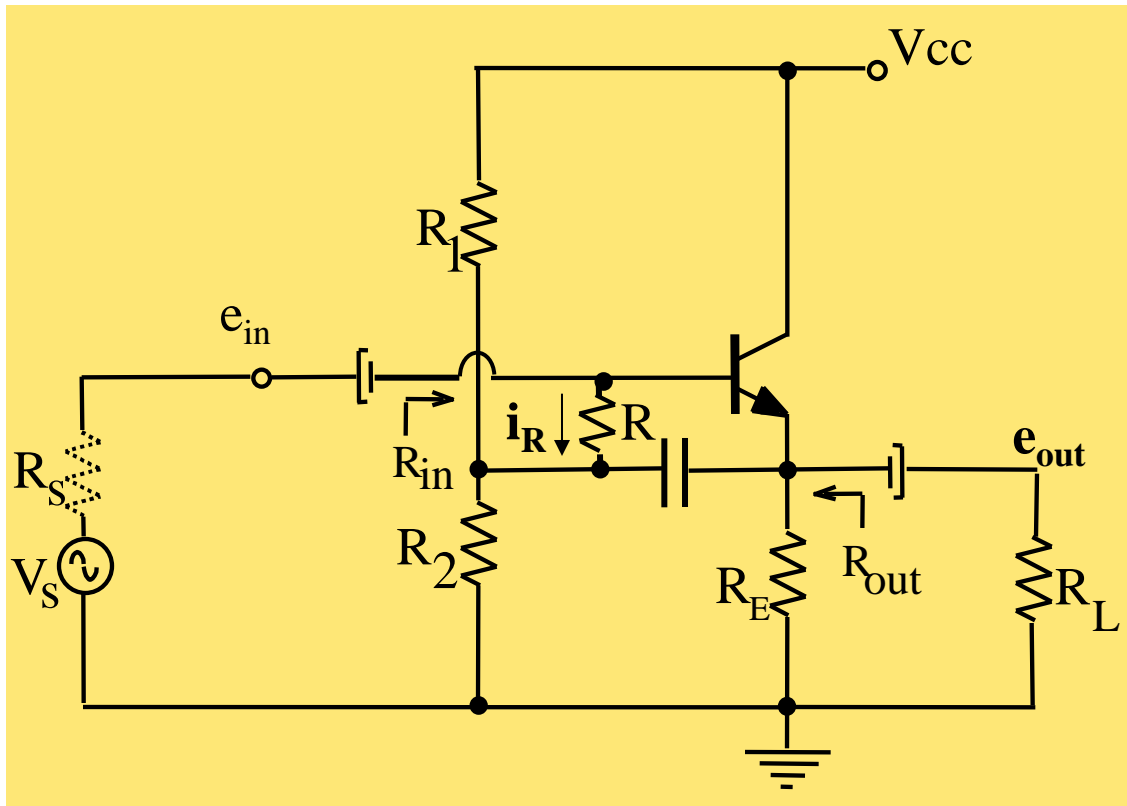
$$e_{out} = (\beta+1)i_b (R_E // R_L), \quad i_b = e_{in} / r_{in}, \quad e_{in} = V_S R_{in} / (R_{in} + R_S)$$

$$A_u = \frac{(\beta+1)(R_E // R_L)}{r_{bb'} + (\beta+1)(r_d + R_E // R_L)} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S}$$

$$A \approx 1 \quad (A < 1)$$



# Ενισχυτής κοινού συλλέκτη με υψηλή αντίσταση εισόδου (κυκλωμα bootstrap)



$$i_R = (e_{in} - e_{out}) / R$$

$$= (e_{in} - A_v e_{in}) / R$$

$$= (1 - A_v) e_{in} / R$$

$$R' = R / (1 - A_v)$$

$$R_{in} = R' // r_{in}$$

$$R_{in} = r_{bb'} + (\beta + 1) (r_d + R_E // R_L) // R / (1 - A_v)$$

# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι, Ενισχυτές με διπολικά τρανζίστορ». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015 Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: [http://opencourses.auth.gr/eclass\\_courses](http://opencourses.auth.gr/eclass_courses).



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

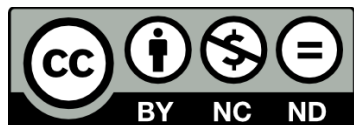
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ