



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

4ο Εξάμηνο

2020-2021

Μάθημα 08-04-2021

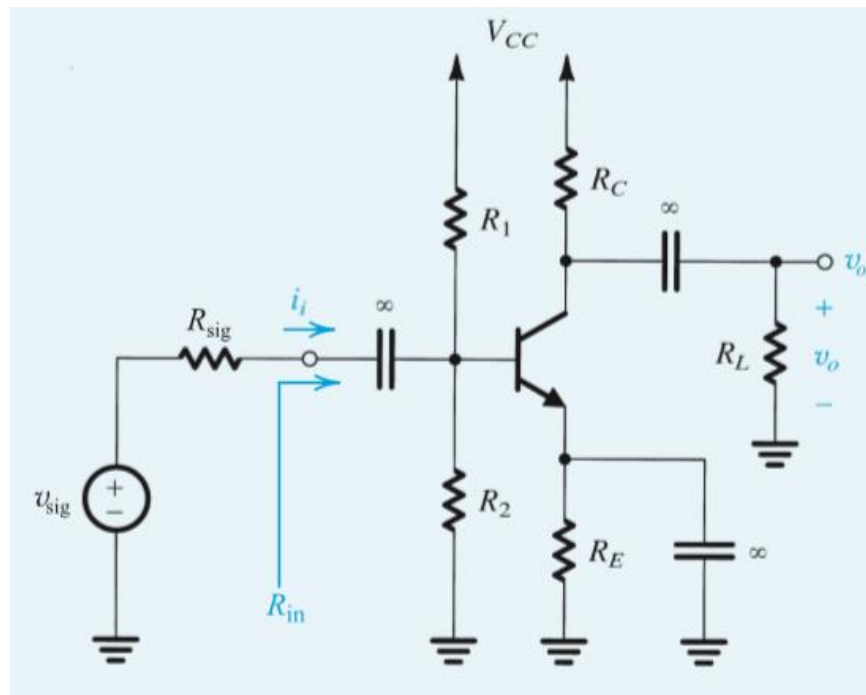
N. Βουδούκης

Άσκηση [A8: 1/2]

Ενισχυτής CE με πυκνωτή bypass παράλληλα στην R_E και χωρίς Early
(DC και AC ανάλυση)

Για το παρακάτω κύκλωμα θεωρείστε ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στην ορθή ενεργό περιοχή και οι τιμές των παραμέτρων και των εξαρτημάτων δίνονται παρακάτω. Επίσης θεωρήστε όλους τους πυκνωτές άπειρους.

$V_T = 25 \text{ mV}$	$\beta = 100$	$V_A = \infty$ (όχι Early)	$ V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ (DC)
$V_{CC} = 15 \text{ V}$		$R_{sig} = 1 \text{ k}\Omega$	$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$
$R_2 = 50 \text{ k}\Omega$	$R_E = 3 \text{ k}\Omega$	$R_C = 5 \text{ k}\Omega$	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$



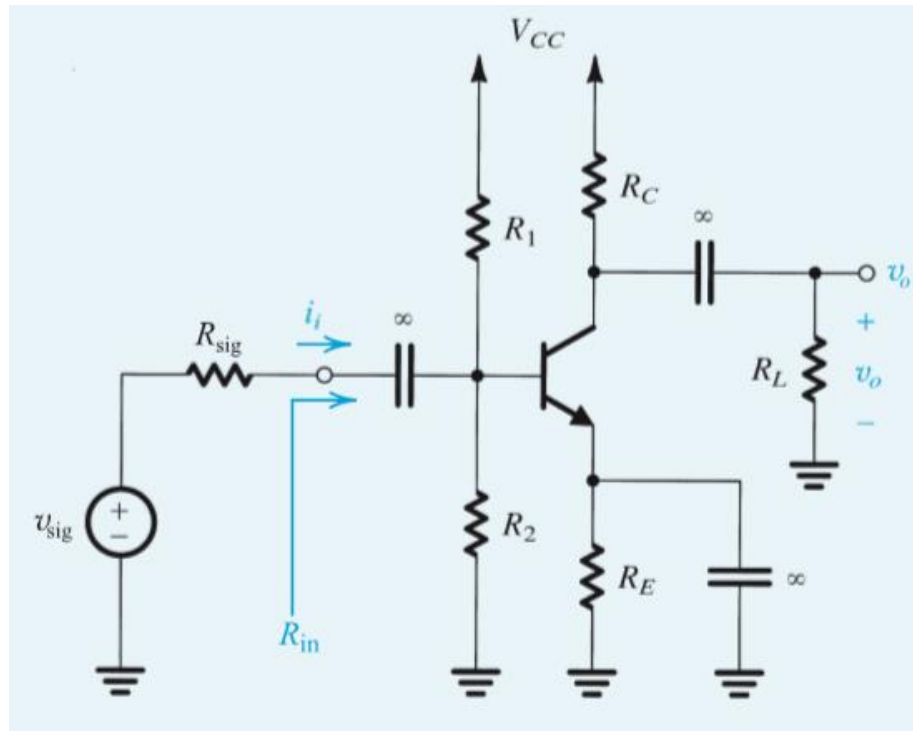
Άσκηση 8 [A8: 1/2]

A. DC Ανάλυση

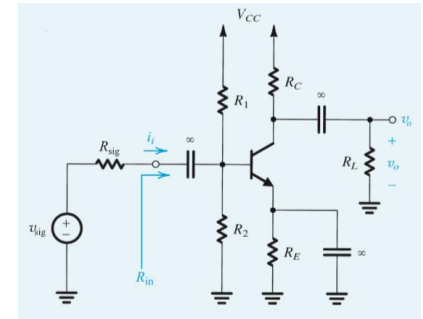
Υπολογίστε τα I_B , V_C , V_E , V_B , I_E , I_C , g_m , r_π , r_e με βάση τα δεδομένα.

B. AC Ανάλυση (Μικρού σήματος, Χαμηλών συχνοτήτων)

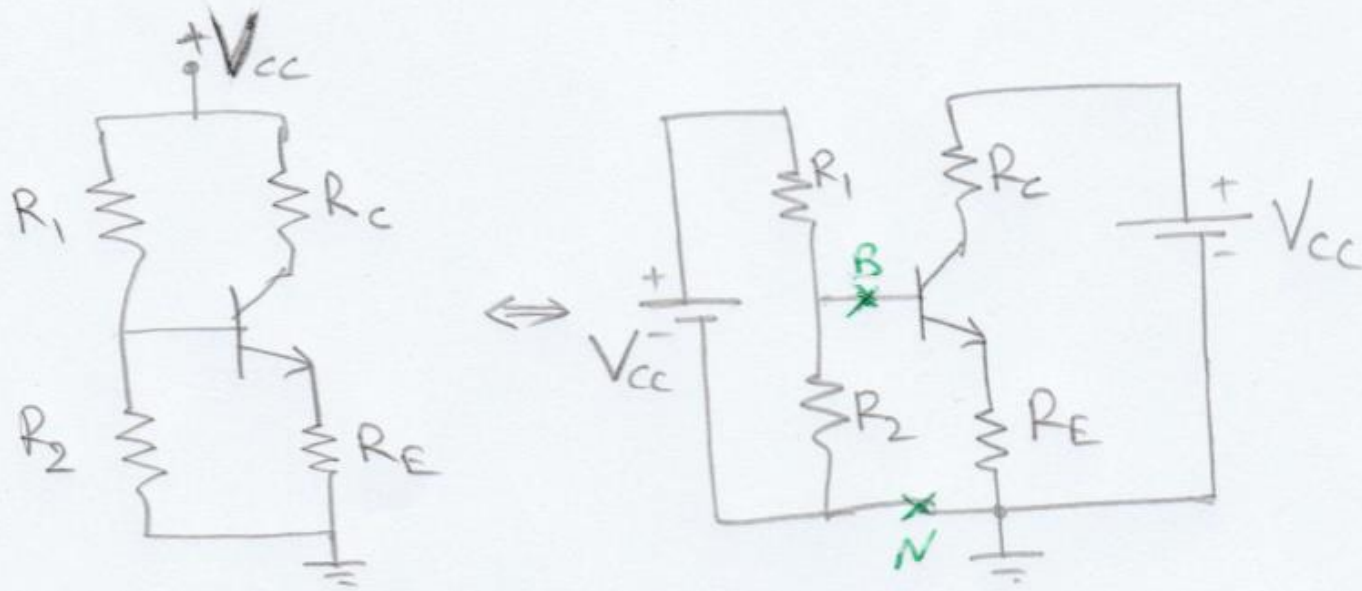
Να υπολογιστούν η αντίσταση εισόδου R_{in} η αντίσταση εξόδου R_{out} και το κέρδος τάσης $A_v = \frac{v_o}{v_{sig}}$.



Λύση [A8: 1/2]

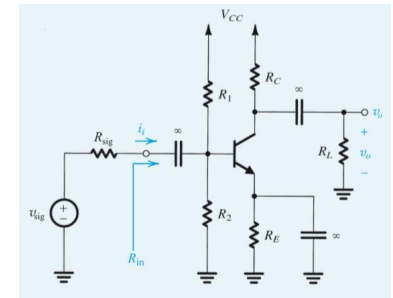
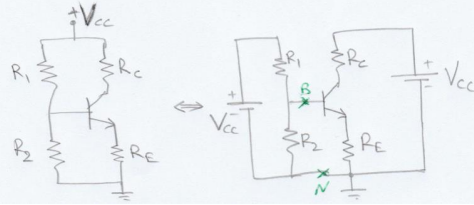


Το DC ισοδύναμο κύκλωμα είναι



Λύση [A8: 1/2]

Το DC ισοδύναμο κύκλωμα είναι



Εφαρμόζουμε θεώρημα Thevenin για το τμήμα του κυκλώματος αριστερά των σημείων B, N.



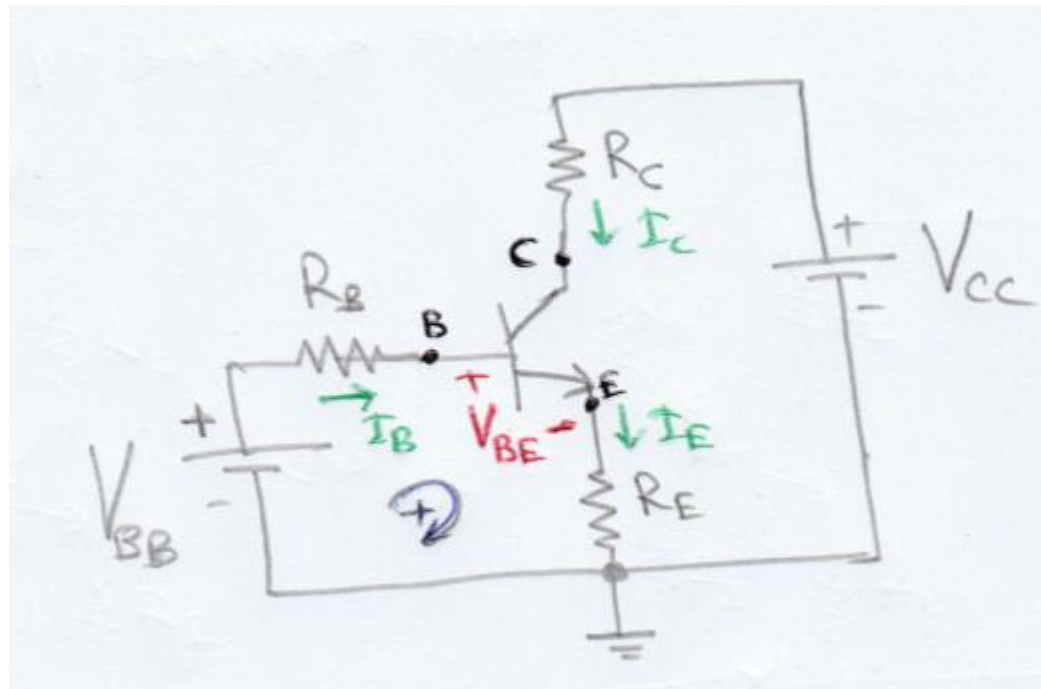
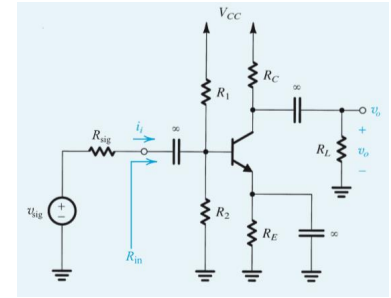
$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc} \Rightarrow V_{Th} = \frac{50}{100 + 50} 15V = \frac{1}{3} 15V \Rightarrow V_{Th} = 5V$$

$$R_{Th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_{Th} = \frac{100 \cdot 50}{100 + 50} = \frac{5000}{150} \Rightarrow R_{Th} \approx 33,3 k\Omega$$

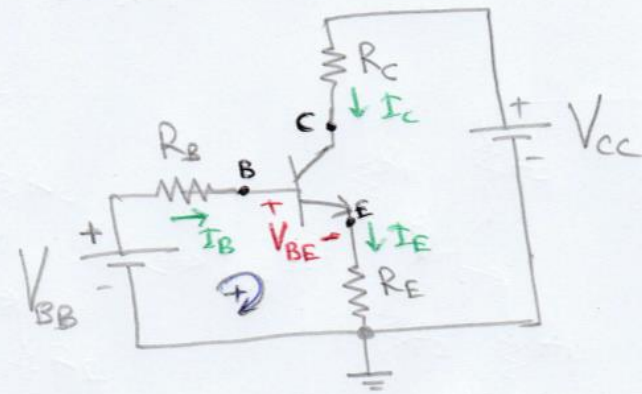
Λύση [A8: 1/2]

Ας αναζητούμε τη V_{TH} ως V_{BB} και την R_{TH} ως R_B
γιατί συνδέονται στη βάση B του τρανζίστορ.
(πολώνεται έτσι η βάση του τρανζίστορ).

Το αρχικό DC ισοδύναμο κύκλωμα δίνεται:



Λύση [A8: 1/2]



NTK (KVL) στον δρόμο εισόδου Βάσης-Εκπομπής (2) :

$$\left. \begin{aligned} V_{BB} &= I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \\ I_E &= (\beta + 1) I_B \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1) I_B R_E$$

$$\Rightarrow V_{BB} - V_{BE} = [R_B + (\beta + 1) R_E] I_B$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

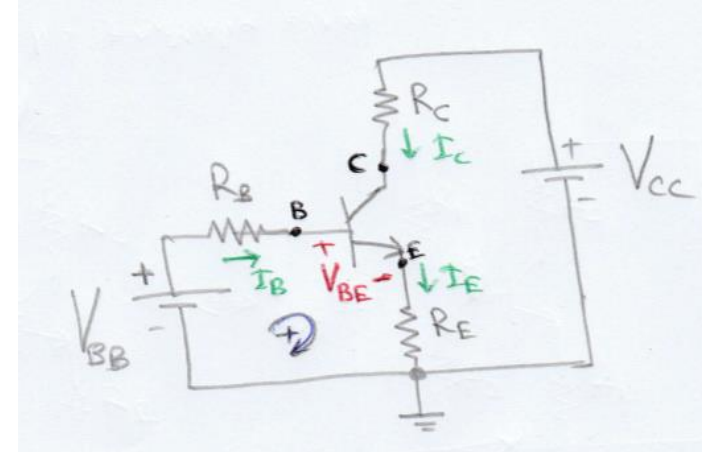
$$\Rightarrow I_B = \frac{5 - 0,7}{33,3 + 101 \cdot 3} = \frac{4,3}{336,3} \text{ mA} \Rightarrow I_B = 0,0128 \text{ mA}$$
$$\Rightarrow I_B = 12,8 \mu\text{A}.$$

Λύση [A8: 1/2]

Οπότε:

$$I_C = \beta \cdot I_B \Rightarrow I_C = 100 \cdot 0,0128 \text{ mA} \Rightarrow I_C = 1,28 \text{ mA}$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B \Rightarrow I_E = 101 \cdot 0,0128 \text{ mA} \Rightarrow I_E \approx 1,29 \text{ mA}$$



Είναι:

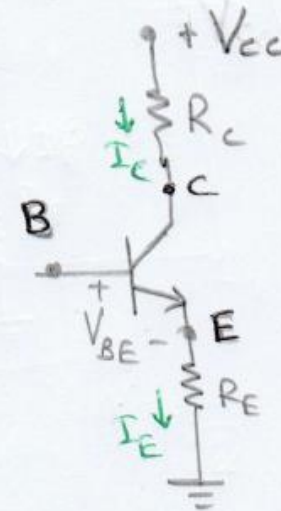
$$V_E = I_E \cdot R_E \Rightarrow V_E = 1,29 \cdot 3 \text{ V} \Rightarrow V_E \approx 3,87 \text{ V}$$

$$V_B = V_{BE} + V_E \Rightarrow V_B = (0,7 + 3,87) \text{ V} \Rightarrow V_B \approx 4,57 \text{ V}$$

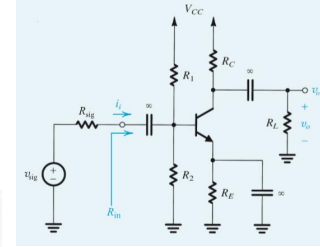
$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \Rightarrow$$

$$V_C = 15 - 1,28 \cdot 5 = (15 - 6,4) \text{ V} \Rightarrow$$

$$V_C = 8,6 \text{ V}$$



Λύση [A8: 1/2]



Θα υπολογίσουμε τις παραμέτρους g_m , r_n , r_e του ισοδύναμου AC κυκλώματος φίλτρου (απιδενούς) βύρας χαμηλών συχνοτήτων

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \Rightarrow g_m = \frac{1,28}{0,025} \frac{\text{mA}}{\text{V}} \Rightarrow g_m = 51,2 \text{ mA/V}$$

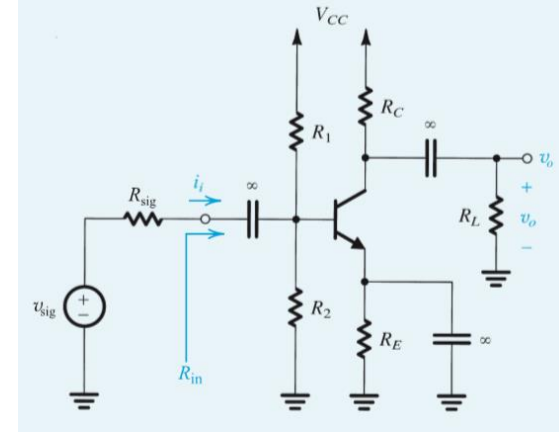
$$r_n = \frac{\beta}{g_m} \Rightarrow r_n = \frac{100}{51,2} \text{ k}\Omega \Rightarrow r_n \approx 1,953 \text{ k}\Omega$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} \Rightarrow r_e = \frac{25}{1,29} \Omega \Rightarrow r_e \approx 19,4 \Omega$$

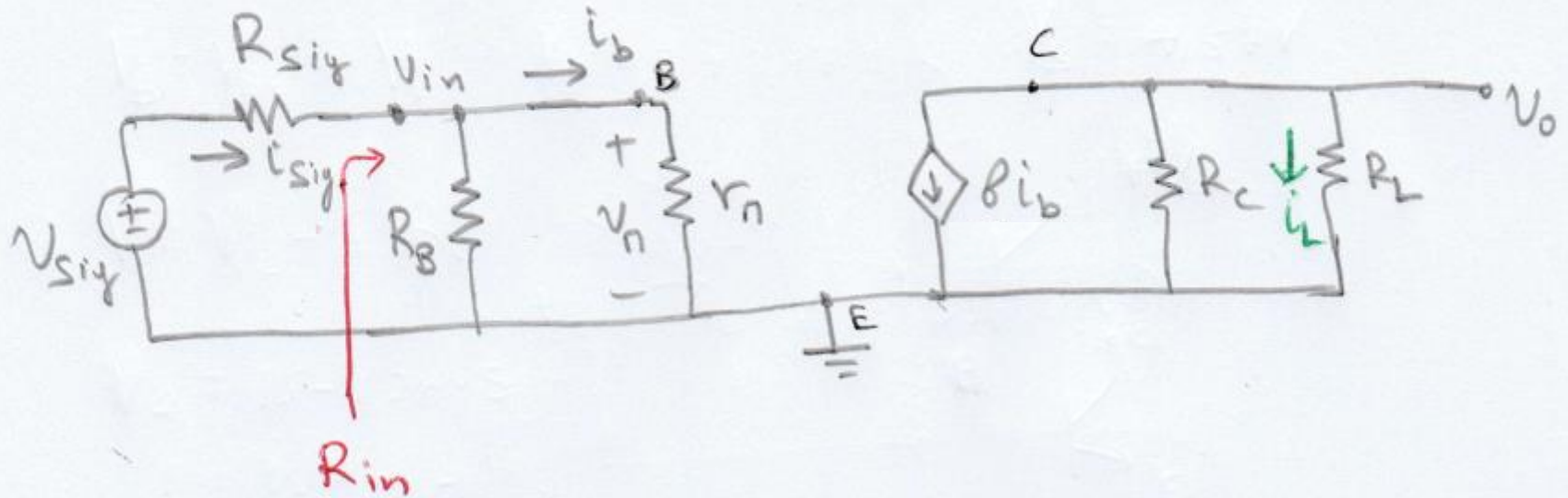
$$\text{Είναι } r_n = (\beta + 1) \cdot r_e$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{100}{101} \approx 0,99$$

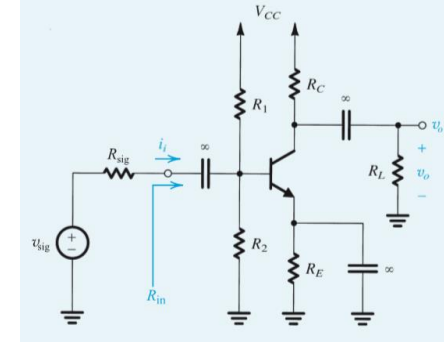
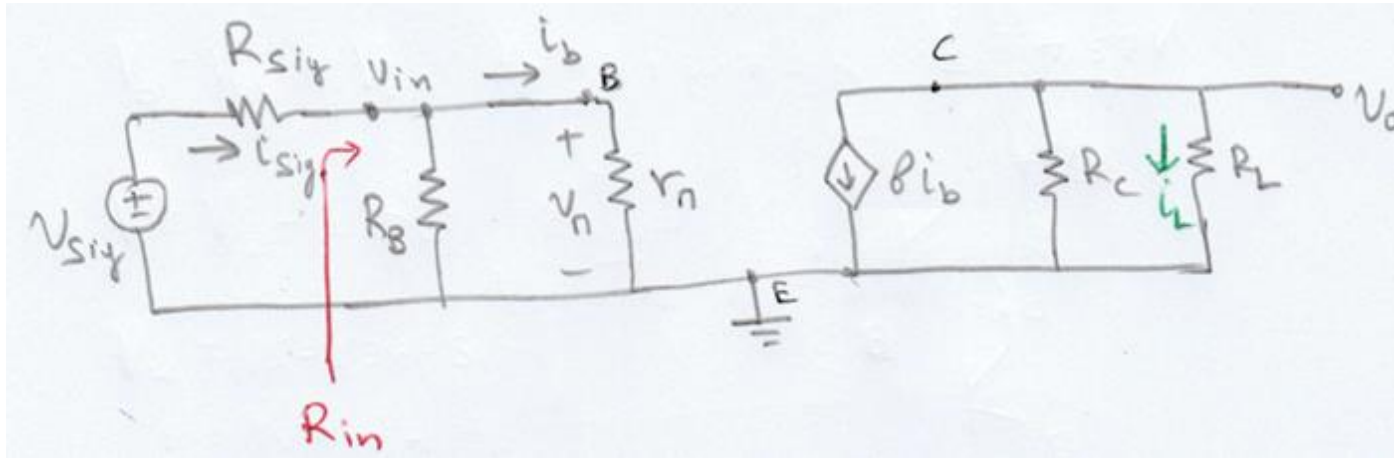
Λύση [A8: 1/2]



Το ισοδύναμο κύκλωμα AC αόρενου σήματος είναι:



Λύση [A8: 1/2]



Είναι:

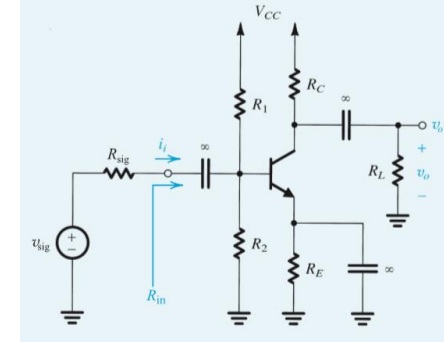
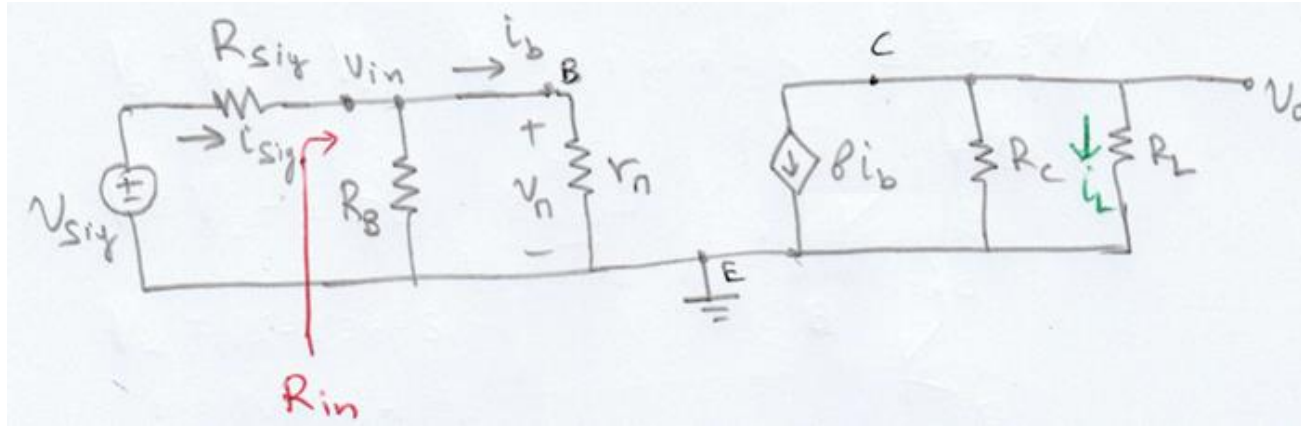
$$R_{in} \equiv \frac{v_{in}}{i_{sig}}$$

$$v_{in} = v_n = (R_B // r_n) i_{sig}$$

$$\Rightarrow R_{in} = 33,3 // 1,953 \Rightarrow R_{in} = \frac{65,03}{35,25} \Rightarrow R_{in} = 1,84 \text{ k}\Omega$$

$R_{in} = R_B // r_n$

Λύση [A8: 1/2]



Για το κέρδος τάσης v_o/v_{sig} έχουμε:

$$v_o = i_L R_L$$

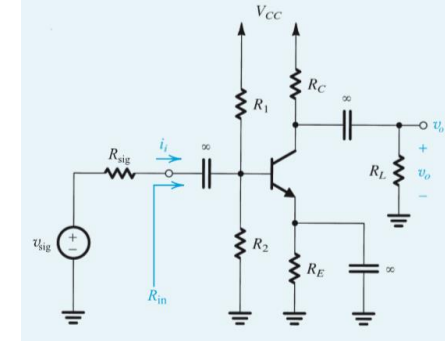
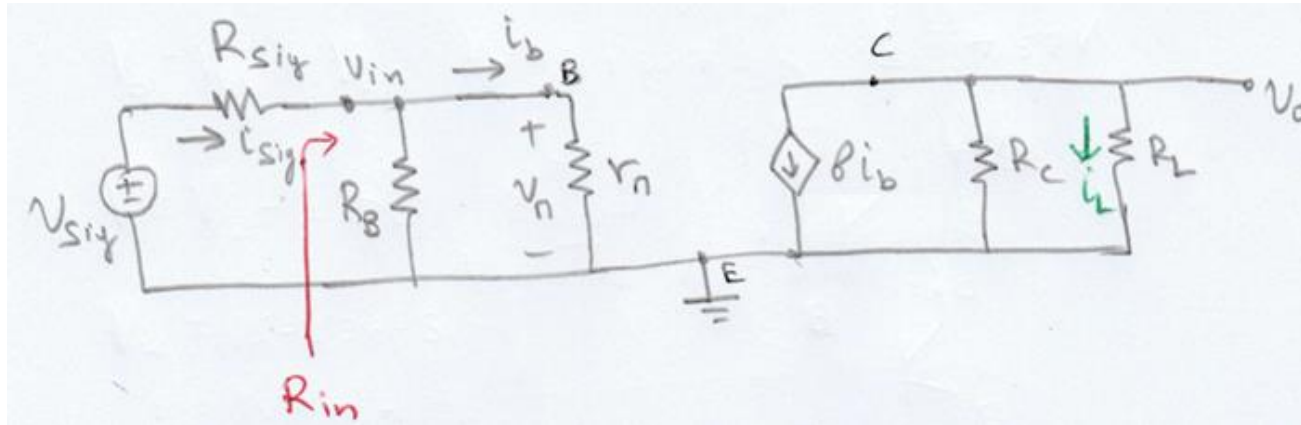
$$i_L = -\beta i_b \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

$$i_b = \frac{v_\pi}{r_\pi}$$

$$v_\pi = \frac{R_B \parallel r_\pi}{R_{sig} + R_B \parallel r_\pi} v_{sig}$$

$$\Rightarrow v_o = -\beta \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \frac{1}{r_\pi} \frac{R_B \parallel r_\pi}{R_{sig} + R_B \parallel r_\pi} v_{sig}$$

Λύση [A8: 1/2]



$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_\pi$$

$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = - \frac{\beta}{r_\pi} (R_C \parallel R_L) \cdot \frac{R_B \parallel r_\pi}{R_{sig} + R_B \parallel r_\pi}$$

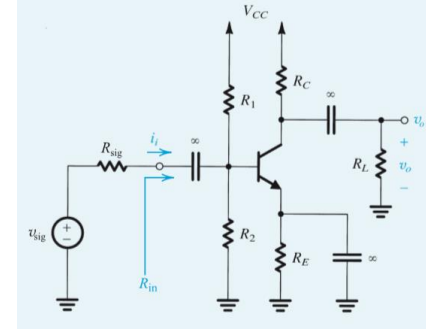
$$\Rightarrow A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = - \frac{\beta}{r_\pi} (R_C \parallel R_L) \cdot \frac{R_{in}}{R_{sig} + R_{in}}$$

Λύση [A8: 1/2]

Αν παίρνουμε το $g_m v_n$ αντί του βίβ θα ριθισαθεί

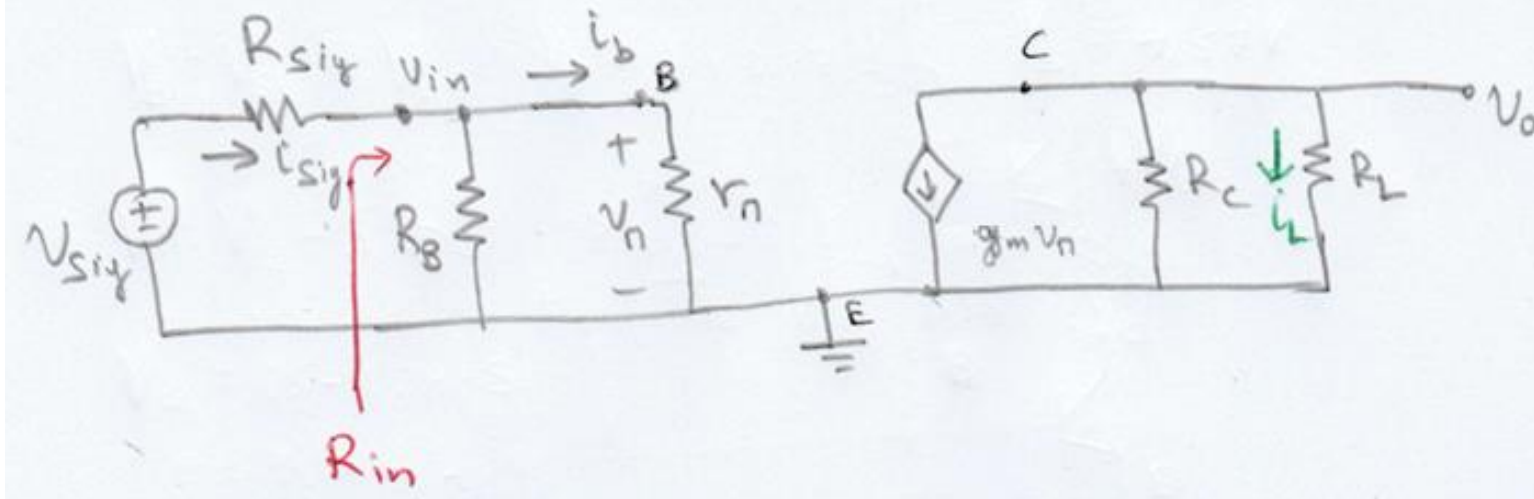
$$A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = -g_m (R_c \parallel R_L) \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}}$$

Πράγματι ισχύει $\frac{\partial}{\partial v_n} = g_m$

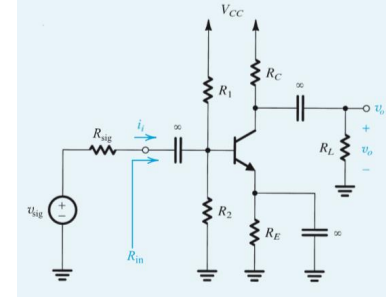
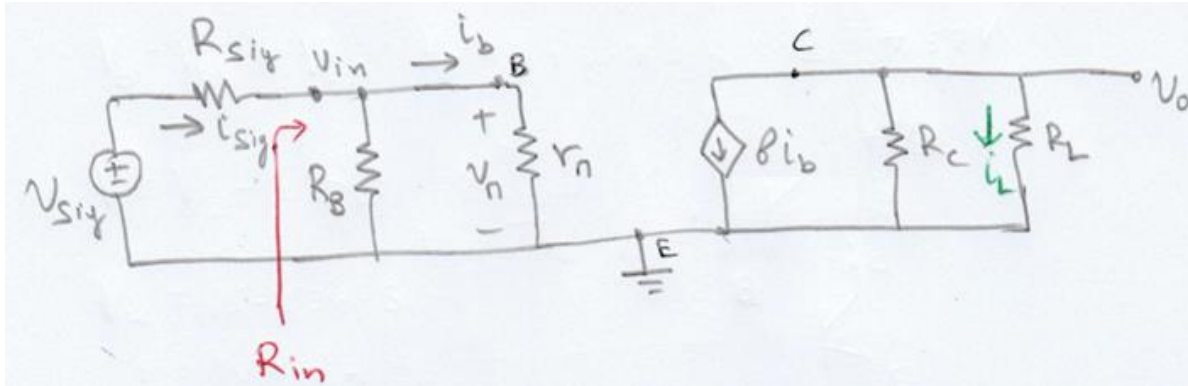


$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{\pi}$$



Λύση [A8: 1/2]



Αν προσομοιάσουμε το κύκλωμα πείρατος $A_I = \frac{i_L}{i_{sig}}$ θα είχαμε:

$$\left. \begin{aligned} i_L &= \frac{R_C}{R_C + R_L} (-\beta i_b) \\ i_b &= \frac{R_B}{R_B + r_{\pi}} i_{sig} \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_L = -\beta \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_B}{R_B + r_{\pi}} i_{sig}$$

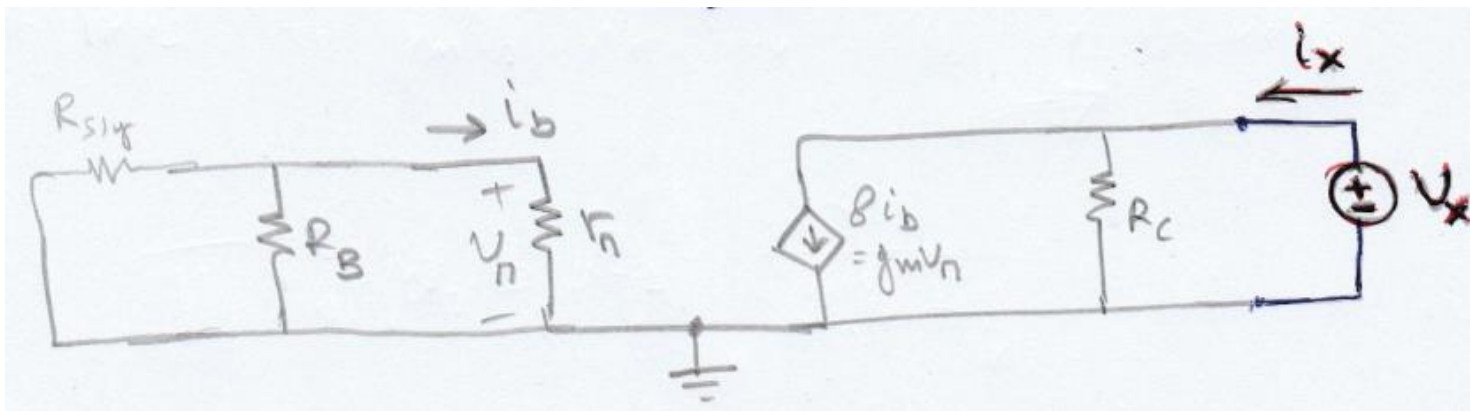
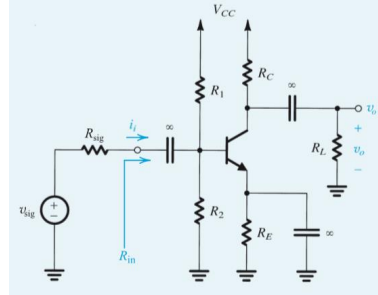
$$\Rightarrow A_I = \frac{i_L}{i_{sig}} = -\beta \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_B}{R_B + r_{\pi}}$$

$$\Rightarrow A_I = -100 \cdot \frac{5}{5+10} \cdot \frac{3,33}{3,33+1,95} = -100 \cdot 0,33 \cdot 0,63 \Rightarrow A_I = -20,8 \text{ A/A}$$

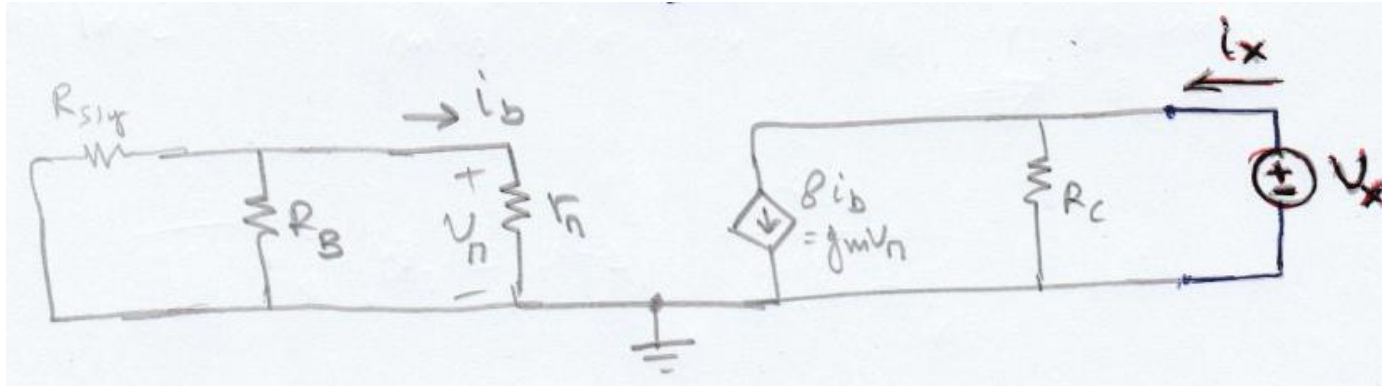
Λύση [A8: 1/2]

Για τον υπολογισμό της αντίστασης εξόδου R_{out} μηδενίζουμε την πηγή τάσης ($V_{sig}=0$)
 ανοιχτοκυκλώνουμε το φορτίο ($R_L \rightarrow \infty$)
 και θέτουμε στην έξοδο δοκιμαστική πηγή τάσης V_x
 η οποία δίνει ρεύμα i_x .

$$R_{out} \equiv \frac{V_x}{i_x} \bigg|_{\substack{V_{sig}=0 \\ R_L \rightarrow \infty}}$$

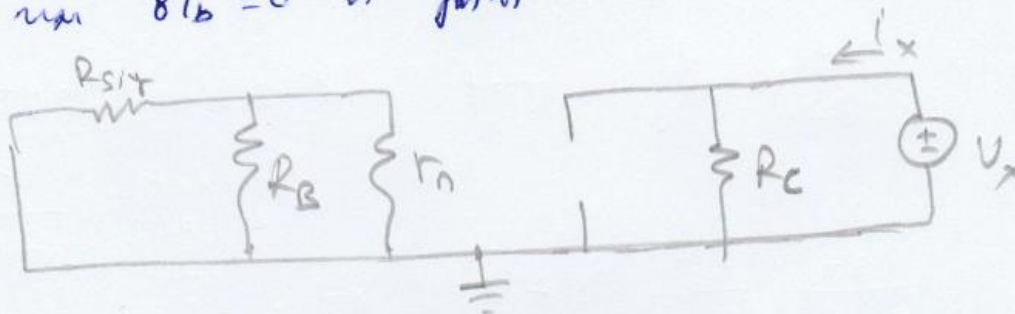


Λύση [A7: 1/2]



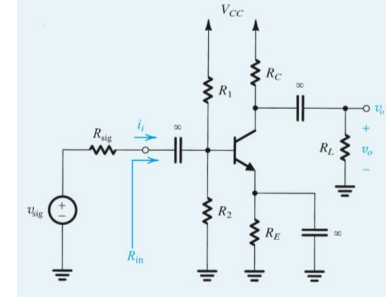
$$v_{sig} = 0 \Rightarrow i_b = 0, v_{\pi} = 0$$

$$\text{Αρα και } \beta i_b = 0 \text{ ή } g_m v_{\pi} = 0$$



$$\text{Οπότε } v_x = i_x \cdot R_C \Rightarrow \frac{v_x}{i_x} = R_C$$

$$\text{Διότι } R_{out} = R_C \rightarrow R_{out} = 5 \text{ k}\Omega$$



Λύση [A8: 3/6]

«Με μια ματιά»

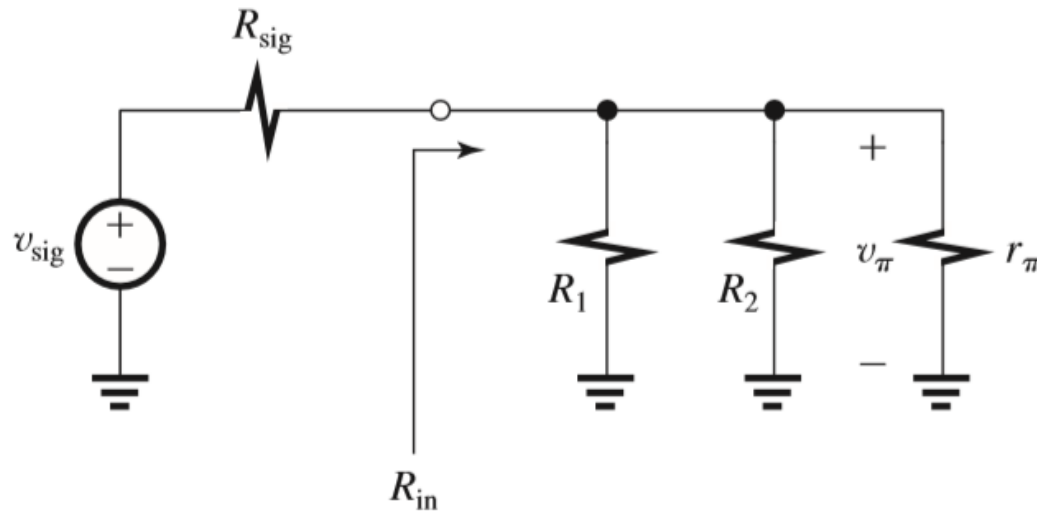
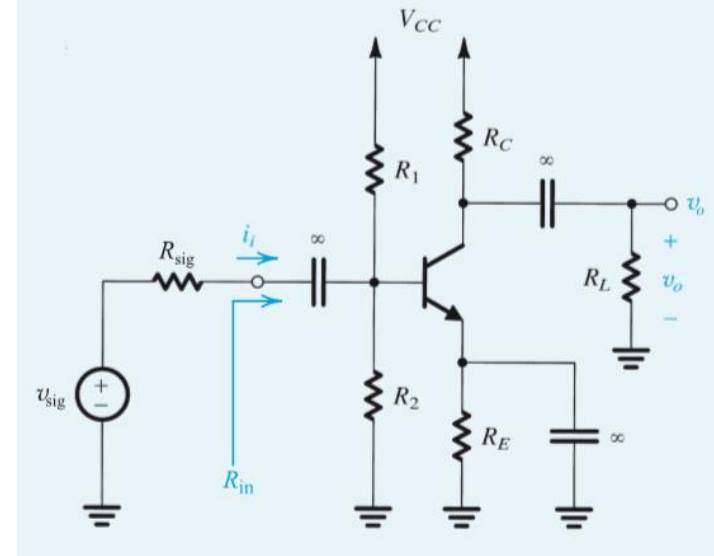
$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}$$

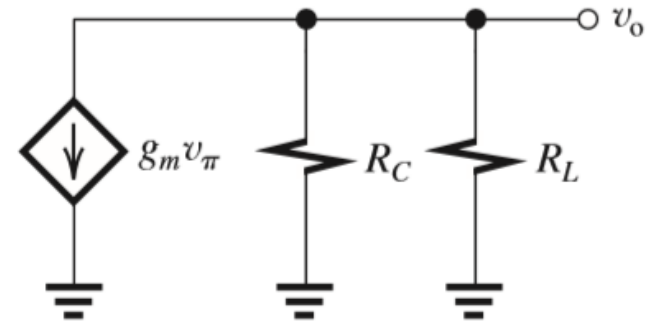
$$V_B = I_E R_E + V_{BE}$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$



$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{\pi}$$

$$\frac{v_{\pi}}{v_{sig}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}}$$



$$\frac{v_o}{v_{\pi}} = -g_m(R_C \parallel R_L)$$

Λύση [A8: 3/6]

«Αν υπήρχε και φαινόμενο Early (r_o)»

