

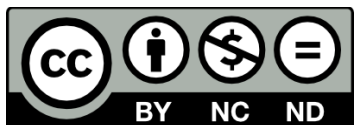


ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙ

Ενότητα 3: Ενισχυτές στις χαμηλές συχνότητες

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών



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. Διαφορικός ενισχυτής (MOS)
- 2. Διαφορικός ενισχυτής (BJT)
- **3. Ενισχυτές στις χαμηλές συχνότητες**
- 4. Ενισχυτές στις υψηλές συχνότητες
- 5. Πολυβάθμιοι ενισχυτές
- 6. Ανάδραση
- 7. Τελεστικός ενισχυτής
- 8. Ταλαντωτές – Γεννήτριες σήματος





ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΣΤΙΣ ΧΑΜΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



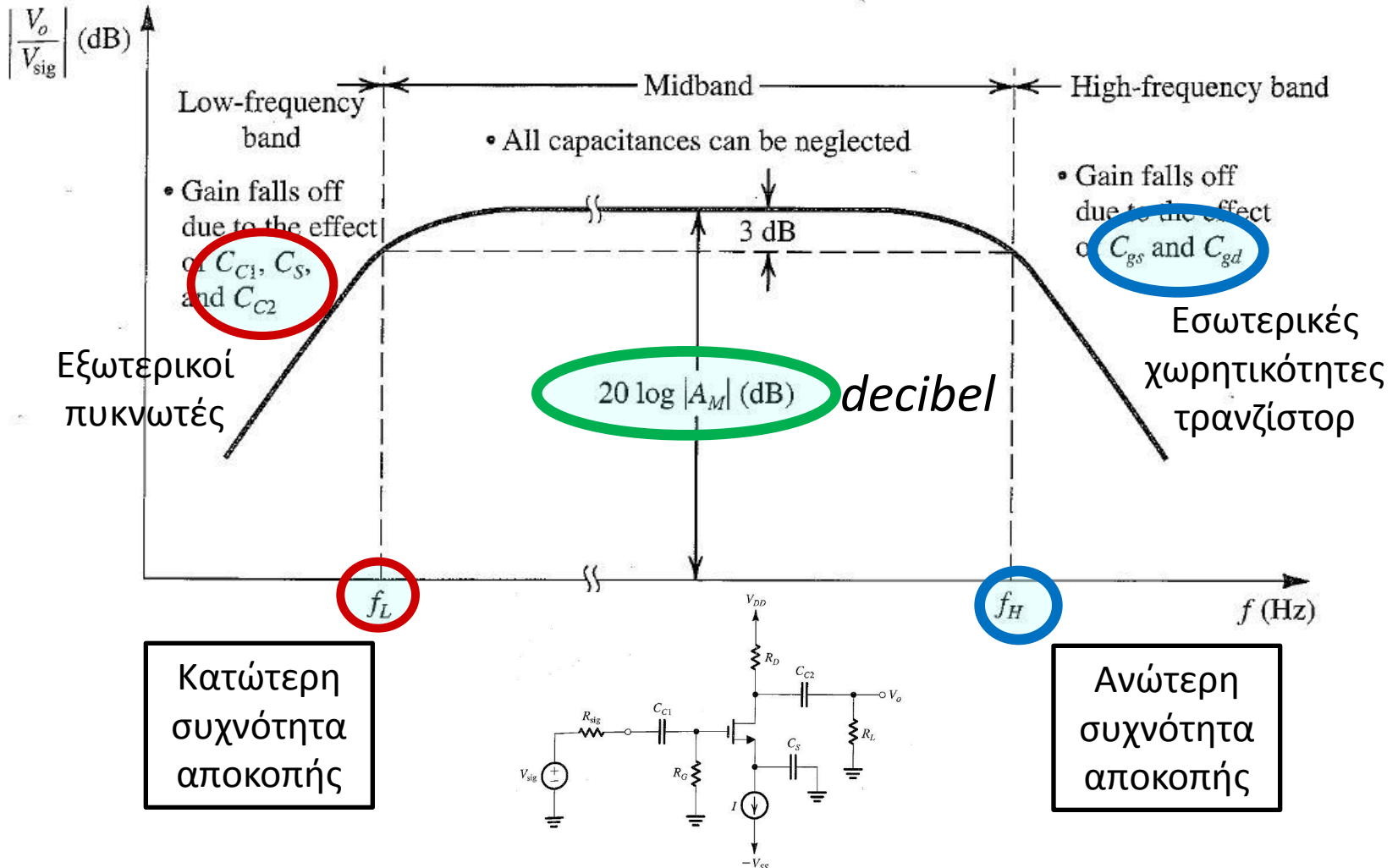
ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

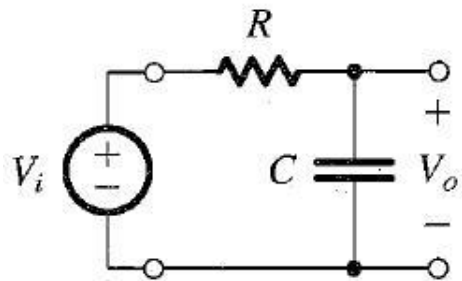
1. Απόκριση συχνότητας- γενικά χαρακτηριστικά – παράδειγμα (διαφ. 7- 13)
2. Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής σε χαμηλές συχνότητες (διαφ. 14- 15)
3. Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού σε χαμηλές συχνότητες (διαφ. 16- 20)



Απόκριση συχνότητας ενισχυτών



Δικτυώματα μονής σταθεράς χρόνου (βαθυπερατό)



Low-Pass (LP)

$$\frac{K}{1 + (s/\omega_0)}$$

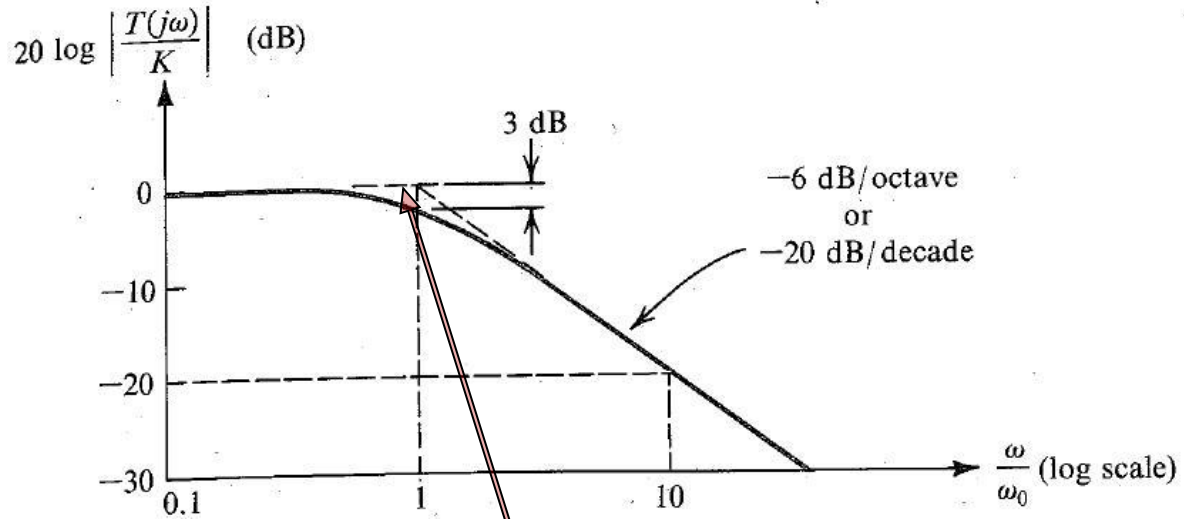
$$\frac{K}{1 + j(\omega/\omega_0)}$$

$$\frac{|K|}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}}$$

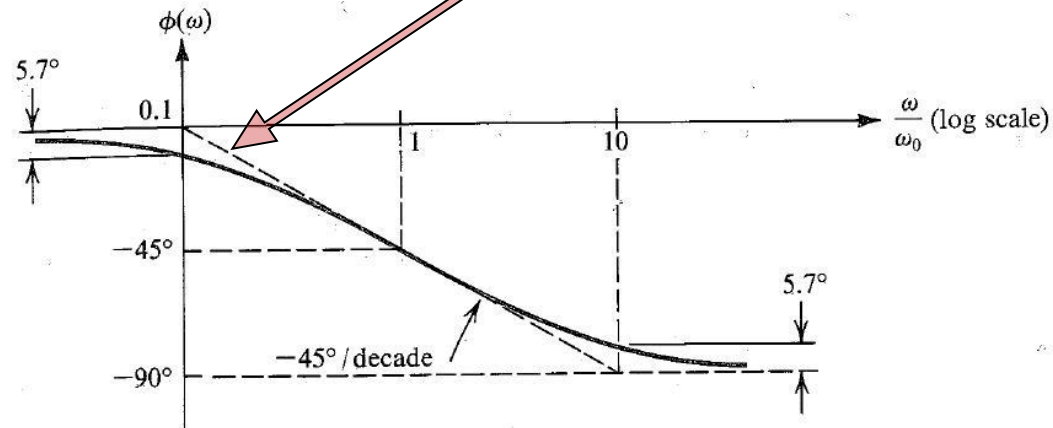
$$-\tan^{-1}(\omega/\omega_0)$$

$$\omega_0 = 1/\tau; \tau \equiv \text{time constant}$$

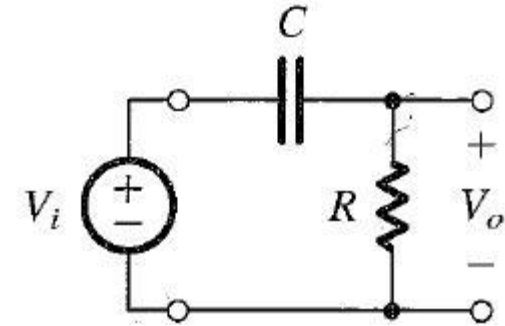
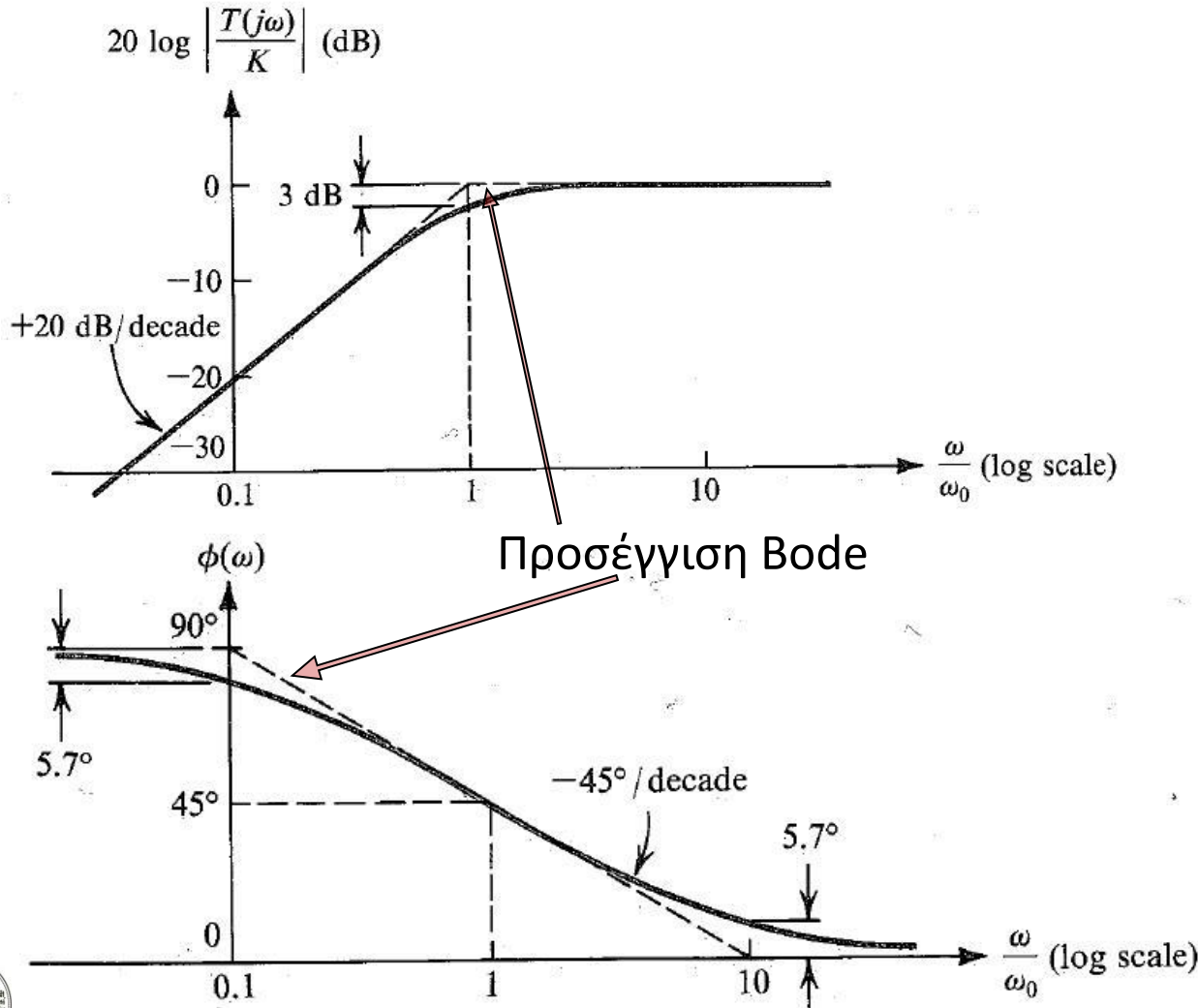
$$\tau = CR \text{ or } L/R$$



Προσέγγιση Bode



Δικτυώματα μονής σταθεράς χρόνου (υψιπερατό)



High-Pass (HP)

$$\frac{Ks}{s + \omega_0}$$

$$\frac{K}{1 - j(\omega_0/\omega)}$$

$$\frac{|K|}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}}$$

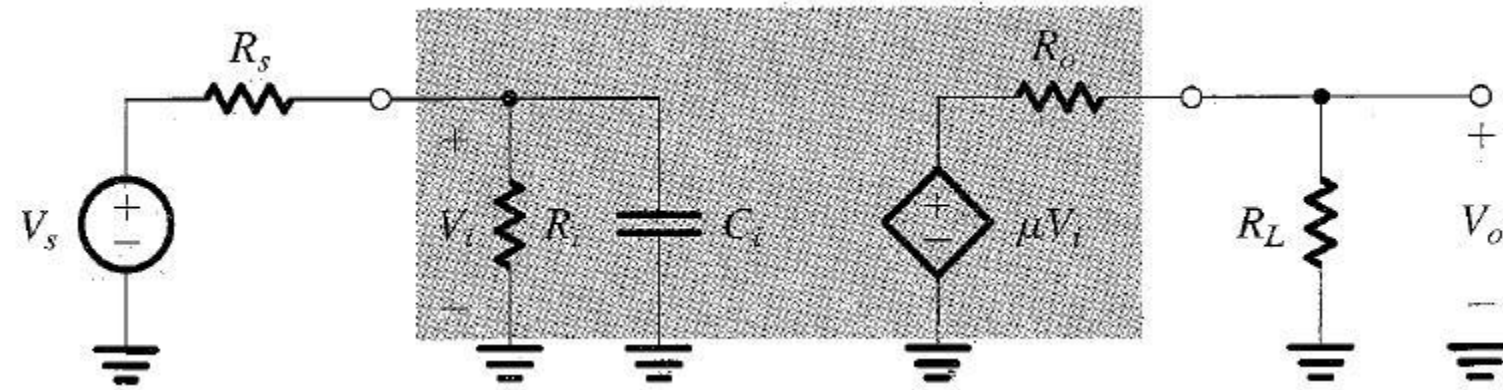
$$\tan^{-1}(\omega_0/\omega)$$

$$\omega_0 = 1/\tau; \tau \equiv \text{time constant}$$

$$\tau = CR \text{ or } L/R$$



Παράδειγμα απόκρισης βαθυπερατού δικτυώματος (1/2)



$$V_o / V_s = ?$$

$$K = ?$$

$$\omega_o = ?$$

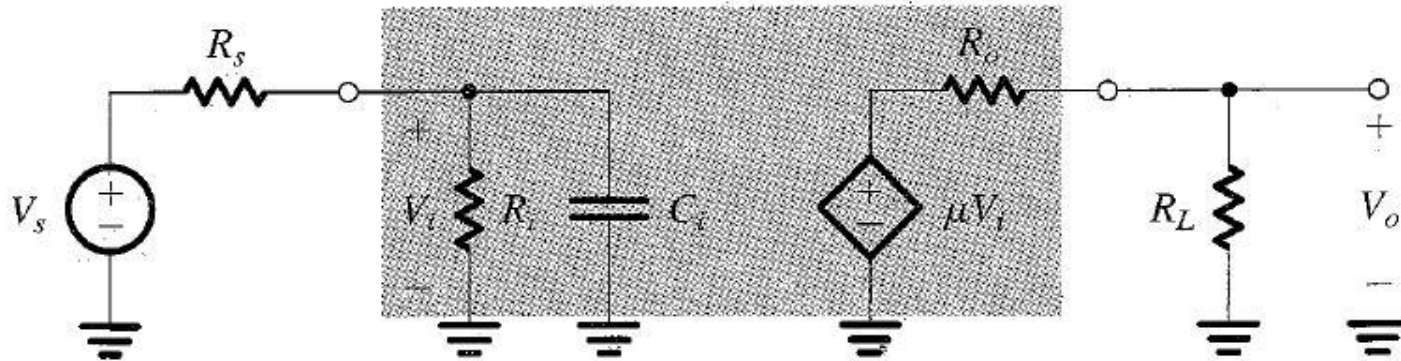
$$V_i = V_s \frac{Z_i}{Z_i + R_s} = V_s \frac{1}{1 + R_s Y_i}$$

$$= V_s \frac{1}{1 + R_s [(1/R_i) + sC_i]}$$

$$\frac{V_i}{V_s} = \frac{1}{1 + (R_s/R_i) + sC_i R_s} = \frac{1}{1 + (R_s/R_i)} \frac{1}{1 + sC_i [(R_s R_i)/(R_s + R_i)]}$$



Παράδειγμα απόκρισης βαθυπερατού δικτυώματος (2/2)



$$V_o / V_s = ?$$

$$K = ?$$

$$\omega_o = ?$$

$$V_o = \mu V_i \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \mu \frac{1}{1 + (R_s/R_i)} \frac{1}{1 + (R_o/R_L)} \frac{1}{1 + sC_i[(R_s R_i)/(R_s + R_i)]}$$

$$\tau = C_i \frac{R_s R_i}{R_s + R_i}$$

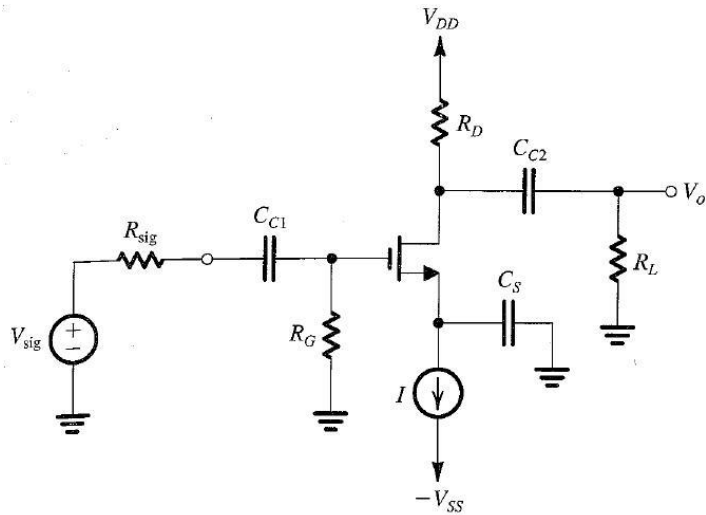
$$= C_i (R_s // R_i)$$

$$K \equiv \frac{V_o}{V_s}(s=0) = \mu \frac{1}{1 + (R_s/R_i)} \frac{1}{1 + (R_o/R_L)}$$

$$\omega_o = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{C_i (R_s // R_i)}$$

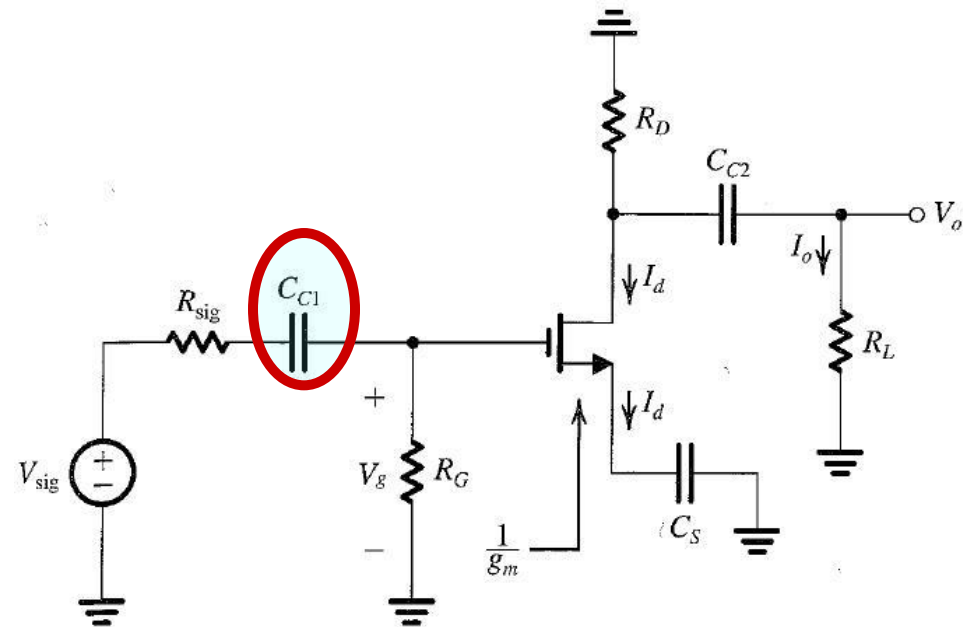


Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής στις χαμηλές συχνότητες (1/3)



$$A_M \equiv \frac{V_o}{V_{sig}} = -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} g_m (r_o \parallel R_D \parallel R_L)$$

$$\omega_{P1} = \omega_0 = \frac{1}{C_{C1}(R_G + R_{sig})}$$

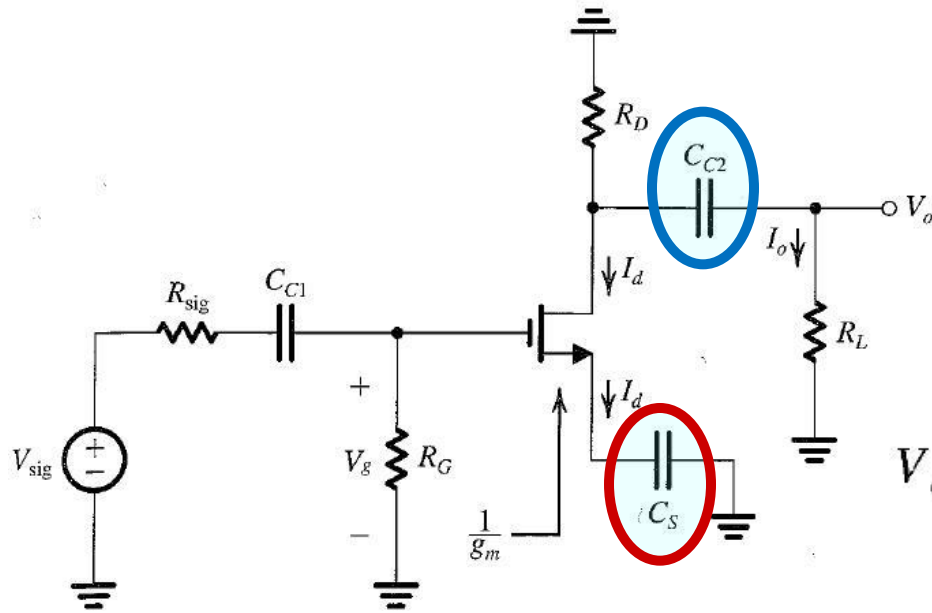


$$V_g = V_{sig} \frac{R_G}{R_G + \frac{1}{sC_{C1}} + R_{sig}}$$

$$V_g = V_{sig} \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \frac{s}{s + \frac{1}{C_{C1}(R_G + R_{sig})}}$$



Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής στις χαμηλές συχνότητες (2/3)



$$I_o = -I_d \frac{R_D}{R_D + \frac{1}{sC_{C2}} + R_L}$$

$$V_o = I_o R_L = -I_d \frac{R_D R_L}{R_D + R_L} \frac{s}{s + \frac{1}{C_{C2}(R_D + R_L)}}$$

$$I_d = \frac{V_g}{\frac{1}{g_m} + \frac{1}{sC_S}}$$

$$I_d = g_m V_g \frac{s}{s + \frac{g_m}{C_S}}$$

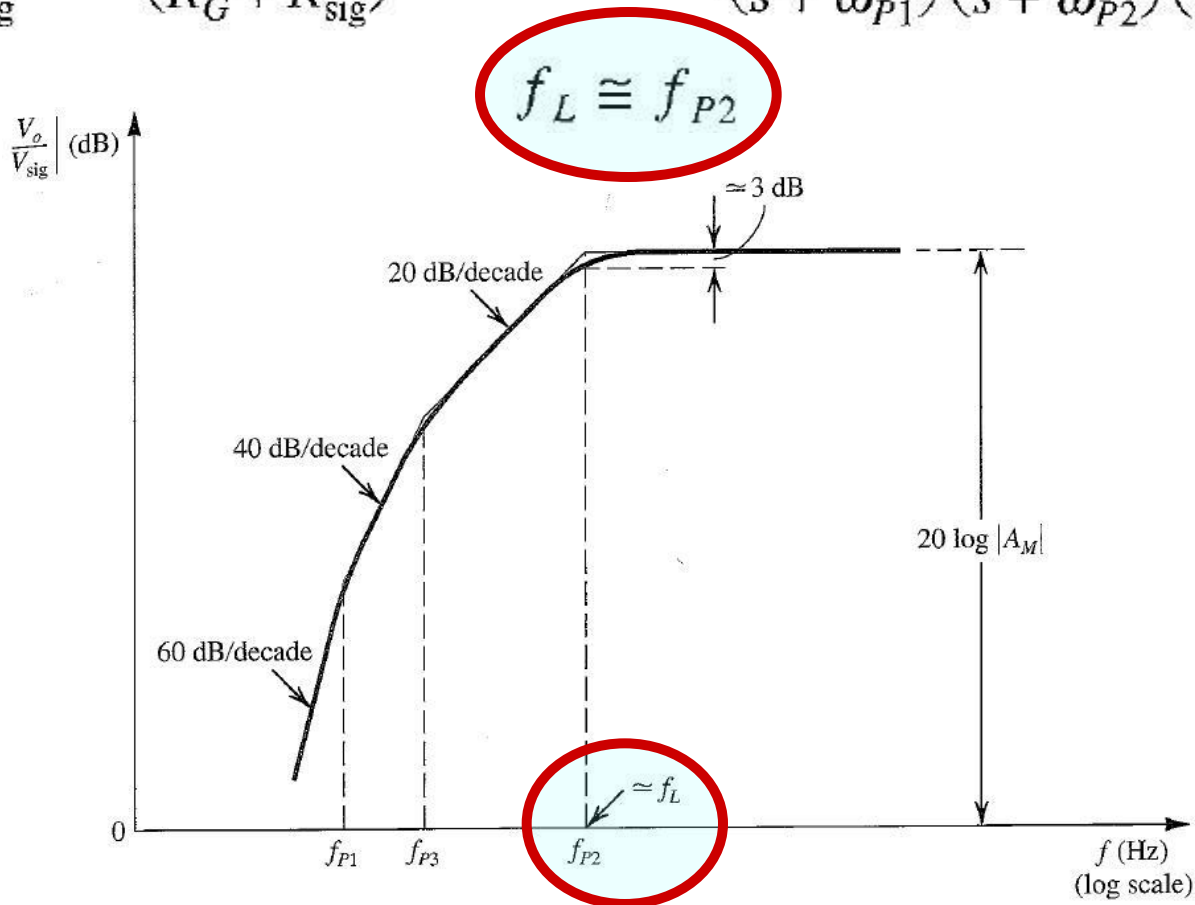
$$\omega_{P2} = \frac{g_m}{C_S}$$

$$\omega_{P3} = \frac{1}{C_{C2}(R_D + R_L)}$$



Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής στις χαμηλές συχνότητες (3/3)

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = -\left(\frac{R_G}{R_G + R_{sig}}\right) [g_m (R_D \parallel R_L)] \left(\frac{s}{s + \omega_{P1}}\right) \left(\frac{s}{s + \omega_{P2}}\right) \left(\frac{s}{s + \omega_{P3}}\right)$$



Παράδειγμα σχεδίασης ενισχυτή κοινής πηγής για επιθυμητή απόκριση στις χαμηλές συχνότητες

Ο ενισχυτής έχει: $R_G = 4.7 \text{ M}\Omega$, $R_D = R_L = 15 \text{ k}\Omega$, $R_{sig} = 100 \text{ k}\Omega$, $g_m = 1 \text{ mA/V}$.
Ζητείται συχνότητα αποκοπής $f_L = 100 \text{ Hz}$, ενώ οι άλλες συχνότητες να είναι μια δεκάδα χαμηλότερα.

Βήμα 1°: $f_L \cong f_{P2}$

$$f_{P2} = \frac{1}{2\pi(C_S/g_m)} = f_L \longrightarrow C_S = \frac{g_m}{2\pi f_L} = \frac{1 \times 10^{-3}}{2\pi \times 100} = 1.6 \mu\text{F}$$

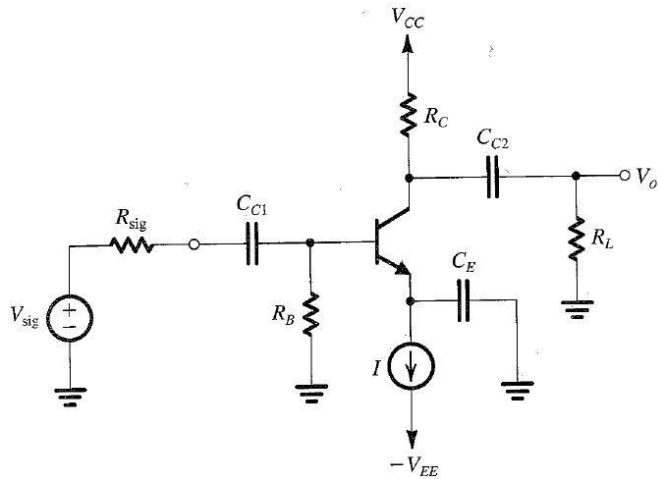
Βήμα 2°: $f_{P1} = f_{P3} = 10 \text{ Hz}$

$$\omega_{P1} = \omega_{P1} = \frac{1}{C_{C1}(R_G + R_{sig})} \longrightarrow 10 = \frac{1}{2\pi C_{C1}(0.1 + 4.7) \times 10^6} \quad C_{C1} = 3.3 \text{ nF}$$

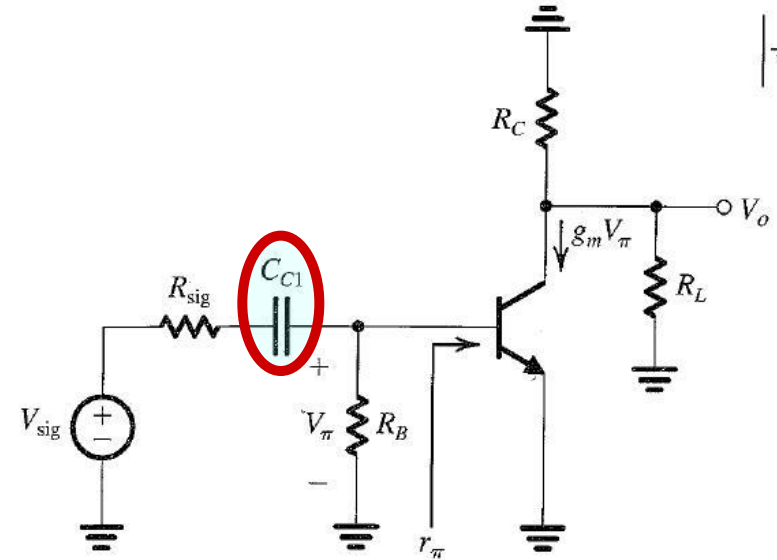
$$\omega_{P3} = \frac{1}{C_{C2}(R_D + R_L)} \longrightarrow 10 = \frac{1}{2\pi C_{C2}(15 + 15) \times 10^3} \quad C_{C2} = 0.53 \mu\text{F}$$



Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (1/4)



$$A_M = \frac{V_o}{V_{sig}} = -\frac{(R_B \parallel r_\pi)}{(R_B \parallel r_\pi) + R_{sig}} g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$



$$V_\pi = V_{sig} \frac{R_B \parallel r_\pi}{(R_B \parallel r_\pi) + R_{sig} + \frac{1}{sC_{C1}}} \quad V_o = -g_m V_\pi (R_C \parallel R_L)$$

$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_{C1} [(R_B \parallel r_\pi) + R_{sig}]}$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = -\frac{(R_B \parallel r_\pi)}{(R_B \parallel r_\pi) + R_{sig}} g_m (R_C \parallel R_L) \left[\frac{s}{s + \frac{1}{C_{C1} [(R_B \parallel r_\pi) + R_{sig}]}} \right]$$

$$f_{P1} = \omega_{P1} / 2\pi$$



Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (2/4)

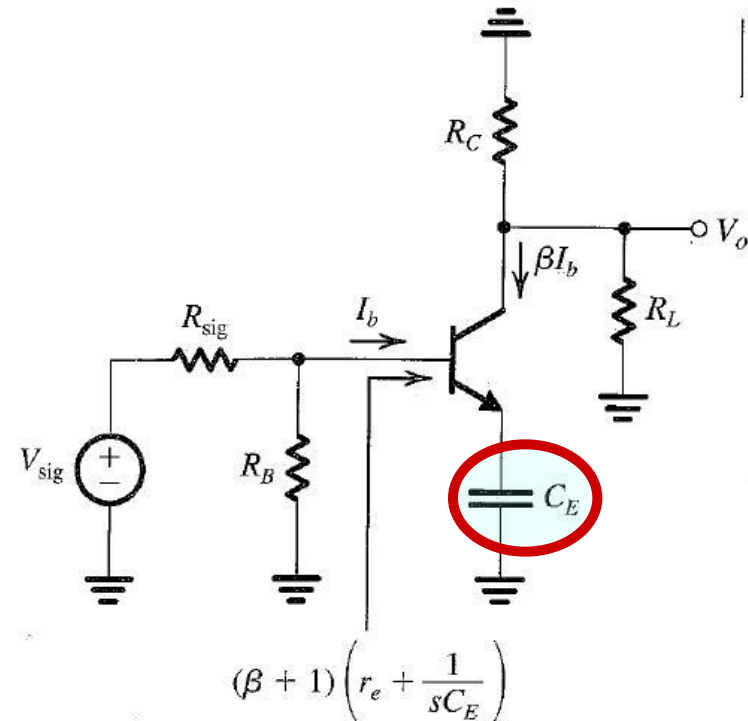
$$I_b = V_{sig} \frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{1}{(R_B \parallel R_{sig}) + (\beta + 1) \left(r_e + \frac{1}{sC_E} \right)}$$

$$V_o = -\beta I_b (R_C \parallel R_L)$$

$$= -\frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{\beta (R_C \parallel R_L)}{(R_B \parallel R_{sig}) + (\beta + 1) \left(r_e + \frac{1}{sC_E} \right)} V_{sig}$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = -\frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{\beta (R_C \parallel R_L)}{(R_B \parallel R_{sig}) + (\beta + 1) r_e} \frac{s}{s + \left[1/C_E \left(r_e + \frac{R_B \parallel R_{sig}}{\beta + 1} \right) \right]}$$

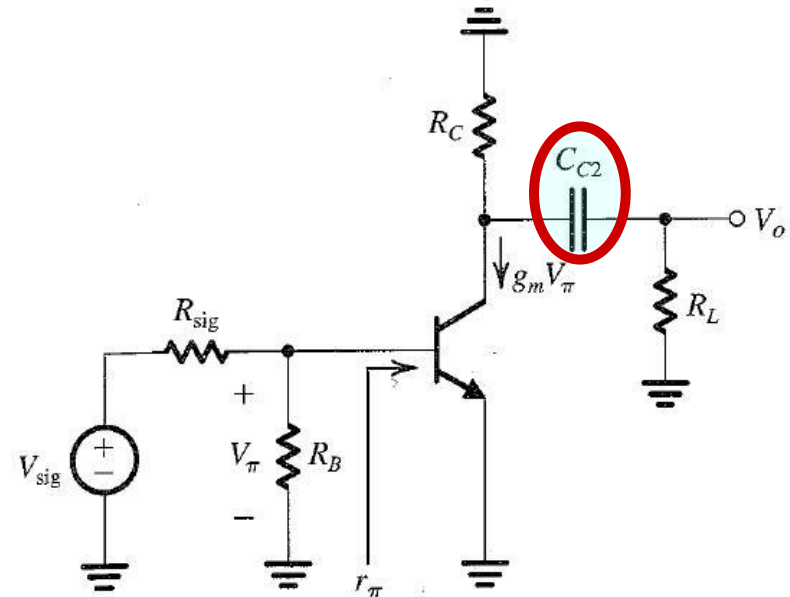
$$\omega_{P2} = \frac{1}{C_E \left[r_e + \frac{R_B \parallel R_{sig}}{\beta + 1} \right]}$$



Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (3/4)

$$V_{\pi} = V_{\text{sig}} \frac{R_B \parallel r_{\pi}}{(R_B \parallel r_{\pi}) + R_{\text{sig}}}$$

$$V_o = -g_m V_{\pi} \frac{R_C}{R_C + \frac{1}{sC_{C2}} + R_L} R_L$$

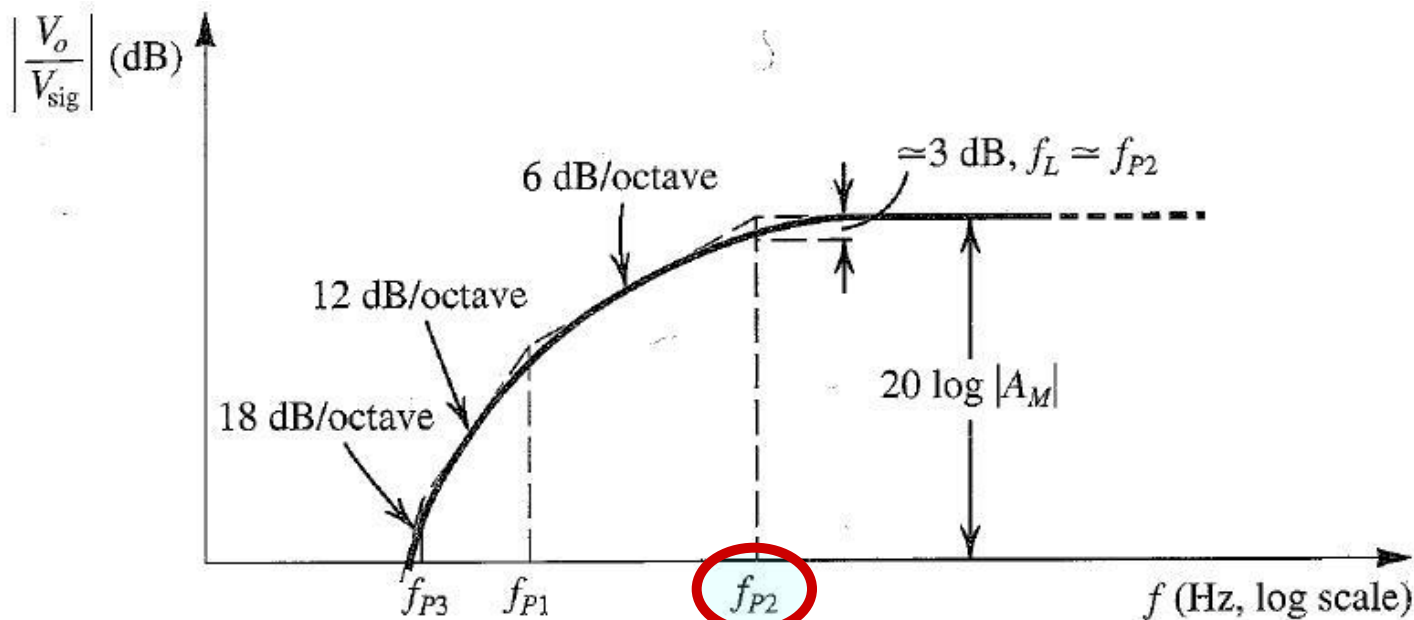


$$\frac{V_o}{V_{\text{sig}}} = - \frac{R_B \parallel r_{\pi}}{(R_B \parallel r_{\pi}) + R_{\text{sig}}} g_m (R_C \parallel R_L) \left[\frac{s}{s + \frac{1}{C_{C2}(R_C + R_L)}} \right]$$

$$\omega_{P3} = \frac{1}{C_{C2}(R_C + R_L)}$$



Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού στις χαμηλές συχνότητες (4/4)



Προσέγγιση όταν ΔΕΝ αλληλεπιδρούν:

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = -A_M \left(\frac{s}{s + \omega_{P1}} \right) \left(\frac{s}{s + \omega_{P2}} \right) \left(\frac{s}{s + \omega_{P3}} \right)$$

Προσέγγιση όταν αλληλεπιδρούν:

$$f_L \cong \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{C_{C1}R_{C1}} + \frac{1}{C_E R_E} + \frac{1}{C_{C2}R_{C2}} \right]$$

$$f_L = f_{P1} + f_{P2} + f_{P3}$$



Παράδειγμα σχεδίασης ενισχυτή κοινού εκπομπού για επιθυμητή απόκριση στις χαμηλές συχνότητες

Ο ενισχυτής έχει: $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_C = 8 \text{ k}\Omega$, $R_L = 5 \text{ k}\Omega$, $R_{sig} = 5 \text{ k}\Omega$, $\beta_o = 100$, $g_m = 40 \text{ mA/V}$, $r_\pi = 2.5 \text{ k}\Omega$. Θεωρώντας ότι οι πυκνωτές αλληλεπιδρούν, ζητείται συχνότητα αποκοπής $f_L = 100 \text{ Hz}$.

$$f_L = f_{P1} + f_{P2} + f_{P3} \quad \text{Επιλογή : } f_{P2} = 0.8 f_L, \quad f_{P1} = 0.1 f_L, \quad f_{P3} = 0.1 f_L.$$

$$R_{C1} = (R_B \parallel r_\pi) + R_{sig} = (100 \parallel 2.5) + 5 = 7.44 \text{ k}\Omega$$
$$\frac{1}{C_{C1} \times 7.44 \times 10^3} = 0.1 \times 2\pi \times 100$$
$$C_{C1} = 2.1 \mu\text{F}$$

$$R_E = r_e + \frac{R_B \parallel R_{sig}}{\beta + 1} = 0.025 + \frac{100 \parallel 5}{101} = 0.072 \text{ k}\Omega = 72 \Omega$$
$$\frac{1}{C_E \times 72} = 0.8 \times 2\pi \times 100$$
$$C_E = 27.6 \mu\text{F}$$

$$R_{C2} = R_C + R_L = 8 + 5 = 13 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{1}{C_{C2} \times 13 \times 10^3} = 0.1 \times 2\pi \times 100$$
$$C_{C2} = 1.2 \mu\text{F}$$



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ II, Ενισχυτές στις χαμηλές συχνότητες». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: 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, χειμερινό εξάμηνο 2014-2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

