

4^η ενότητα
ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ



Περιεχόμενα 4^{ης} ενότητας

- Στην τέταρτη ενότητα θα μελετήσουμε την **απόκριση συχνότητας** των **ενισχυτών** σε **ευρεία περιοχή συχνοτήτων**, όπου θα ληφθεί υπόψη η επίδραση των **πυκνωτών** των ενισχυτών και των **παρασιτικών χωρητικοτήτων των τρανζίστορ**.
- Ημιτονική ανάλυση κυκλώματος και συνάρτηση μεταφοράς.
- Αποκρίσεις συχνότητας και χρόνου κυκλωμάτων RC πρώτης τάξης: **βαθυπερατό** και **υψηπερατό κύκλωμα**.
- **Μέθοδος σταθερών χρόνου** και προσέγγιση επικρατούντος πόλου.
- **Απόκριση συχνότητας ενισχυτών**.
- **Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού**.
- Διεύρυνση ανώτερης συχνότητας λειτουργίας ενισχυτή.
- Απόκριση χρόνου ενισχυτή.
- **Απόκριση συχνότητας ενισχυτών κοινής βάσης και κοινού συλλέκτη**.
- **Απόκριση συχνότητας ενισχυτών με MOSFET** (κοινής πηγής, κοινής πύλης, κοινής υποδοχής).
- Συμπεράσματα και ασκήσεις.

Ημιτονική ανάλυση και συνάρτηση μεταφοράς

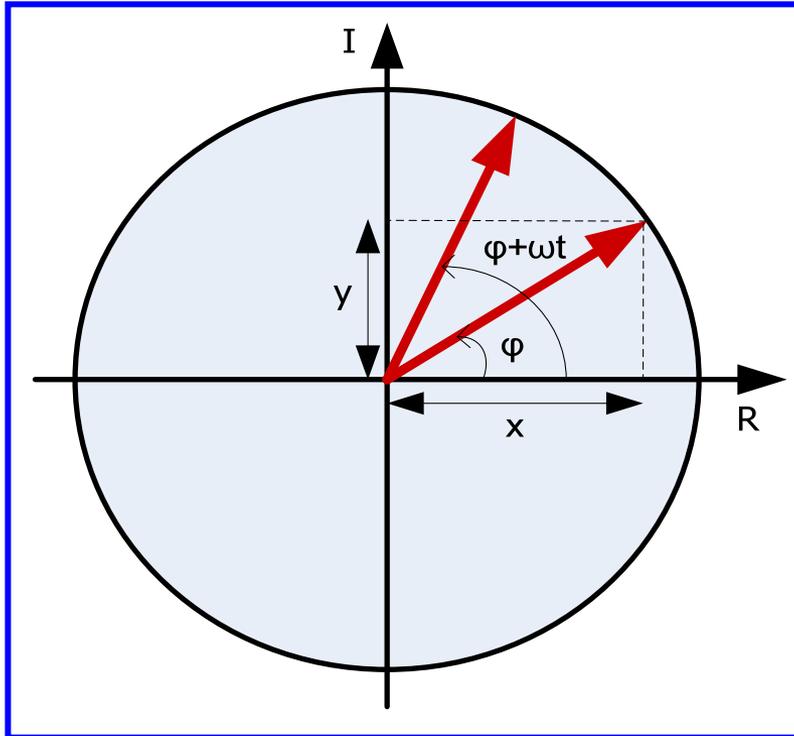
- **Ημιτονική ανάλυση ενισχυτή:** πως μεταβάλλεται το πλάτος και η φάση του σήματος εξόδου για διάφορες τιμές της συχνότητας του ημιτονικού σήματος εισόδου.
- Κατά την ημιτονική ανάλυση προσδιορίζεται το μέτρο και η φάση (δηλ. ο **φάσοντας $V_o \angle \phi^\circ$**) του σήματος εξόδου.
- Εάν σήμα εισόδου $x(t)$ και σήμα εξόδου $y(t)$, τότε στο χώρο των συχνοτήτων ισχύει η σχέση:
 - ✓ $Y(j\omega) = H(j\omega) \cdot X(j\omega)$
 - ✓ $H(j\omega)$: **συνάρτηση μεταφοράς** του κυκλώματος
 - ✓ $Y(j\omega), X(j\omega)$: φάσορες σημάτων εξόδου και εισόδου.
- Στο χώρο της μιγαδικής συχνότητας s (χώρος Laplace με **$s=j\omega$**):
 - ✓ $Y(s) = H(s) \cdot X(s)$
- Επομένως, το μέτρο και η φάση του σήματος εξόδου εξαρτώνται από τη συνάρτηση μεταφοράς από την οποία λαμβάνουμε και τη σχετική πληροφορία.

Ημιτονική ανάλυση

- Για να αναλύσουμε λοιπόν ένα κύκλωμα με ημιτονική διέγερση μετασχηματίζουμε τα στοιχεία του κυκλώματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας (φάσορες για τάσεις και ρεύματα και σύνθετες αντιστάσεις ή μιγαδικές εμπεδήσεις για πυκνωτές).
- Σύνθετη αντίσταση πυκνωτή: $Z_C = 1 / j\omega C = -j / \omega C = 1 / s C$.
- Φάσορες ρευμάτων και τάσεων.
- Μετά από το μετασχηματισμό των στοιχείων στο πεδίο της συχνότητας μπορούμε να αναλύσουμε το κύκλωμα με τις γνωστές μεθόδους (κανόνες Kirchhoff κλπ.), δηλαδή με τον ίδιο τρόπο που αντιμετωπίζουμε ένα γραμμικό κύκλωμα.
- Στο τέλος της ανάλυσης εάν επιθυμούμε να εξάγουμε τις κυματομορφές τάσης ή ρεύματος στο πεδίο του χρόνου, μετασχηματίζουμε τους αντίστοιχους φάσορες στις κυματομορφές τάσης ή ρεύματος που αντιπροσωπεύουν.

Φάσορες σημάτων (ρευμάτων ή τάσεων)

- Οι ημιτονικές συναρτήσεις (σήματα) μίας συχνότητας (f , $\omega = 2\pi f$) μπορούν να αντιστοιχιστούν με περιστρεφόμενα μιγαδικά διανύσματα (φάσορες) που συμβολίζονται με κεφαλαία γράμματα.



$$i(t) = I_o \sin(\omega t + \varphi)$$
$$I = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi} = I_{\text{rms}} \angle \varphi = I_{\text{rms}} \cos \varphi + j I_{\text{rms}} \sin \varphi$$
$$I = x + jy$$
$$I_{\text{rms}} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right)$$
$$\varphi \text{ (σε } ^\circ \text{)} = \frac{180 \cdot \varphi \text{ (σε rad)}}{\pi}$$

- Ο μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας (Laplace) μας δίνει τη δυνατότητα να αναλύσουμε ένα κύκλωμα με γραμμικές εξισώσεις, αποφεύγοντας τις διαφορίσεις και ολοκληρώσεις που προκύπτουν στο πεδίο του χρόνου.

Συνάρτηση μεταφοράς

- Η συνάρτηση μεταφοράς ενός κυκλώματος (γενικότερα συστήματος) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$H(s) = A_m \frac{(s - z_1) \cdot (s - z_2) \cdots (s - z_m)}{(s - p_1) \cdot (s - p_2) \cdots (s - p_n)}$$

- z_1, z_2, \dots, z_m είναι οι ρίζες του πολυωνύμου του αριθμητή και αναφέρονται ως **μηδενικά** της συνάρτησης μεταφοράς και p_1, p_2, \dots, p_n είναι οι ρίζες του πολυωνύμου του παρονομαστή και αναφέρονται ως **πόλοι** της συνάρτησης μεταφοράς ή **φυσικές συχνότητες** του συστήματος.
- Αντικαθιστώντας στη συνάρτηση μεταφοράς το s με $j\omega$:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \cdot e^{j\angle H(j\omega)}$$

Μέτρο της $H(j\omega)$

$$\angle H(j\omega) = \sum_{i=1}^m \left(\tan^{-1} \frac{\omega}{-z_i} \right) - \sum_{i=1}^n \left(\tan^{-1} \frac{\omega}{-p_i} \right)$$

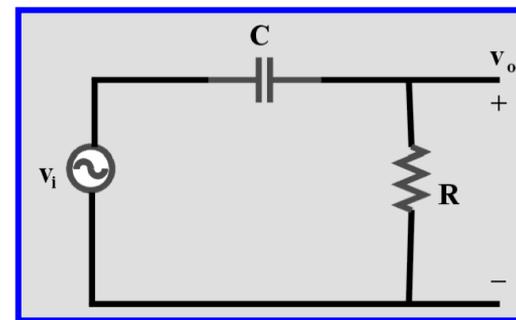
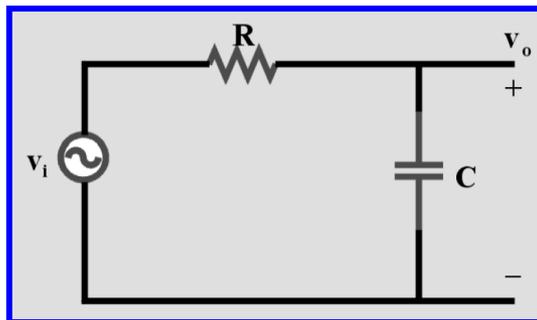
Φάση της $H(j\omega)$

$$|H(j\omega)| = |A_m| \cdot \frac{|(j\omega - z_1)| \cdot |(j\omega - z_2)| \cdots |(j\omega - z_m)|}{|(j\omega - p_1)| \cdot |(j\omega - p_2)| \cdots |(j\omega - p_n)|} = |A_m| \cdot \frac{\sqrt{\omega^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{\omega^2 + z_2^2} \cdots \sqrt{\omega^2 + z_m^2}}{\sqrt{\omega^2 + p_1^2} \cdot \sqrt{\omega^2 + p_2^2} \cdots \sqrt{\omega^2 + p_n^2}}$$

Κυκλώματα RC πρώτης τάξης

- Για την περιγραφή της απόκρισης συχνότητας χρησιμοποιείται κυρίως η **απόκριση του μέτρου** της.
- Για τη μελέτη απόκρισης συχνότητας σύνθετων συναρτήσεων μεταφοράς (δηλ. σύνθετων κυκλωμάτων) χρησιμοποιούνται οι αποκρίσεις απλών κυκλωμάτων.
- Στους ενισχυτές συνυπάρχουν περισσότεροι του ενός πυκνωτές και η απόκριση συχνότητας μπορεί να προσεγγιστεί θεωρώντας τη δράση καθενός από τους πυκνωτές χωριστά και λαμβάνοντας στο τέλος τη συνδυασμένη δράση όλων των πυκνωτών.
- Χρήσιμα κυκλώματα RC πρώτης τάξης για την ανάλυση των ενισχυτών:
 - ✓ **Κύκλωμα ολοκλήρωσης (βαθυπερατό κύκλωμα)**
 - ✓ **Κύκλωμα διαφορίσης (υψηπερατό κύκλωμα).**

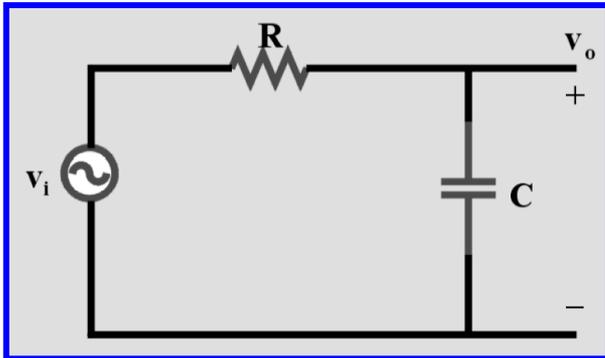
ΒΑΘΥΠΕΡΑΤΟ
ΚΥΚΛΩΜΑ



ΥΨΗΠΕΡΑΤΟ
ΚΥΚΛΩΜΑ

Συνάρτηση μεταφοράς κυκλωμάτων RC πρώτης τάξης

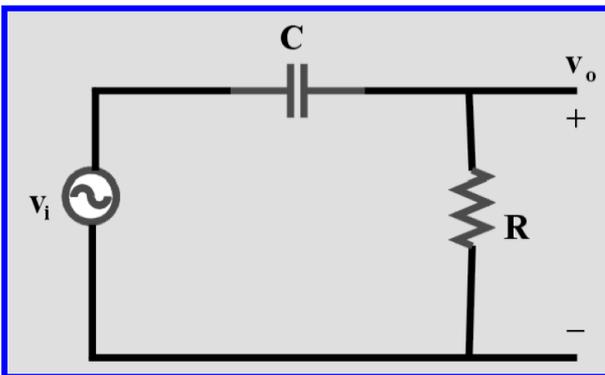
ΒΑΘΥΠΕΡΑΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ



$$V_o = \frac{Z_C}{Z_C + R} V_i \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{1/j\omega C}{1/j\omega C + R} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$
$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s}, \quad s = j\omega, \quad \tau = RC$$

τ : σταθερά χρόνου

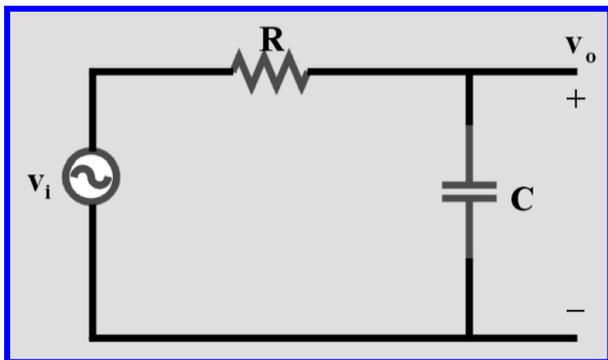
ΥΨΗΠΕΡΑΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ



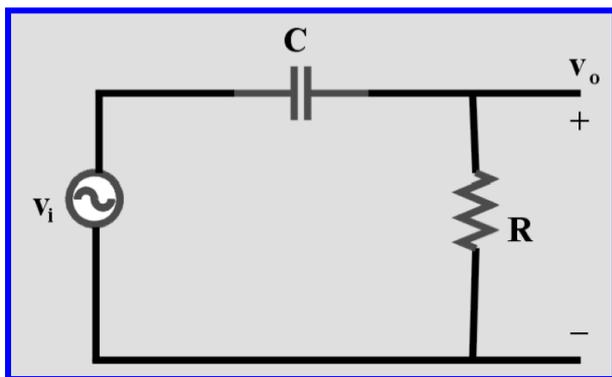
$$V_o = \frac{R}{Z_C + R} V_i \Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{1/j\omega C + R} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$
$$H(s) = \frac{\tau s}{1 + \tau s}, \quad s = j\omega, \quad \tau = RC$$

Απόκριση χρόνου κυκλωμάτων RC πρώτης τάξης

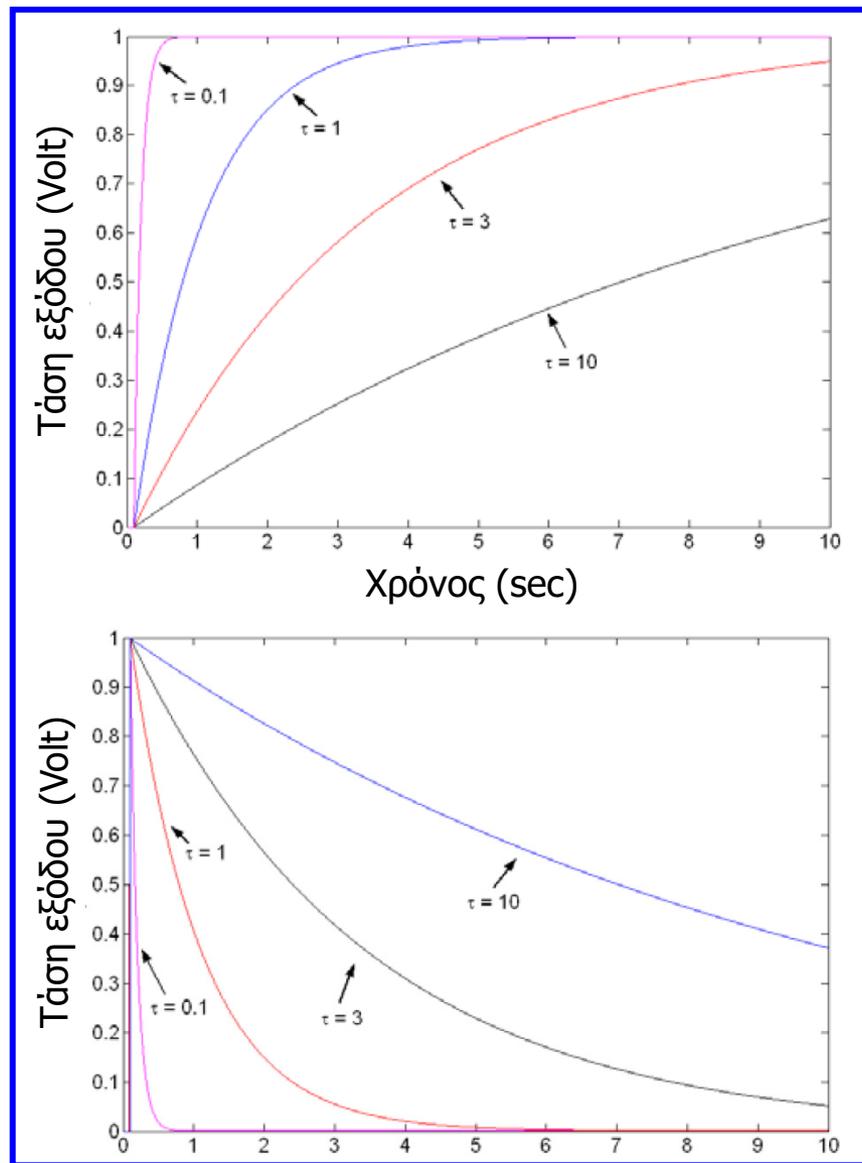
Είσοδος: μοναδιαία βηματική συνάρτηση



$$v_o(t) = 1 - e^{-t/\tau}$$

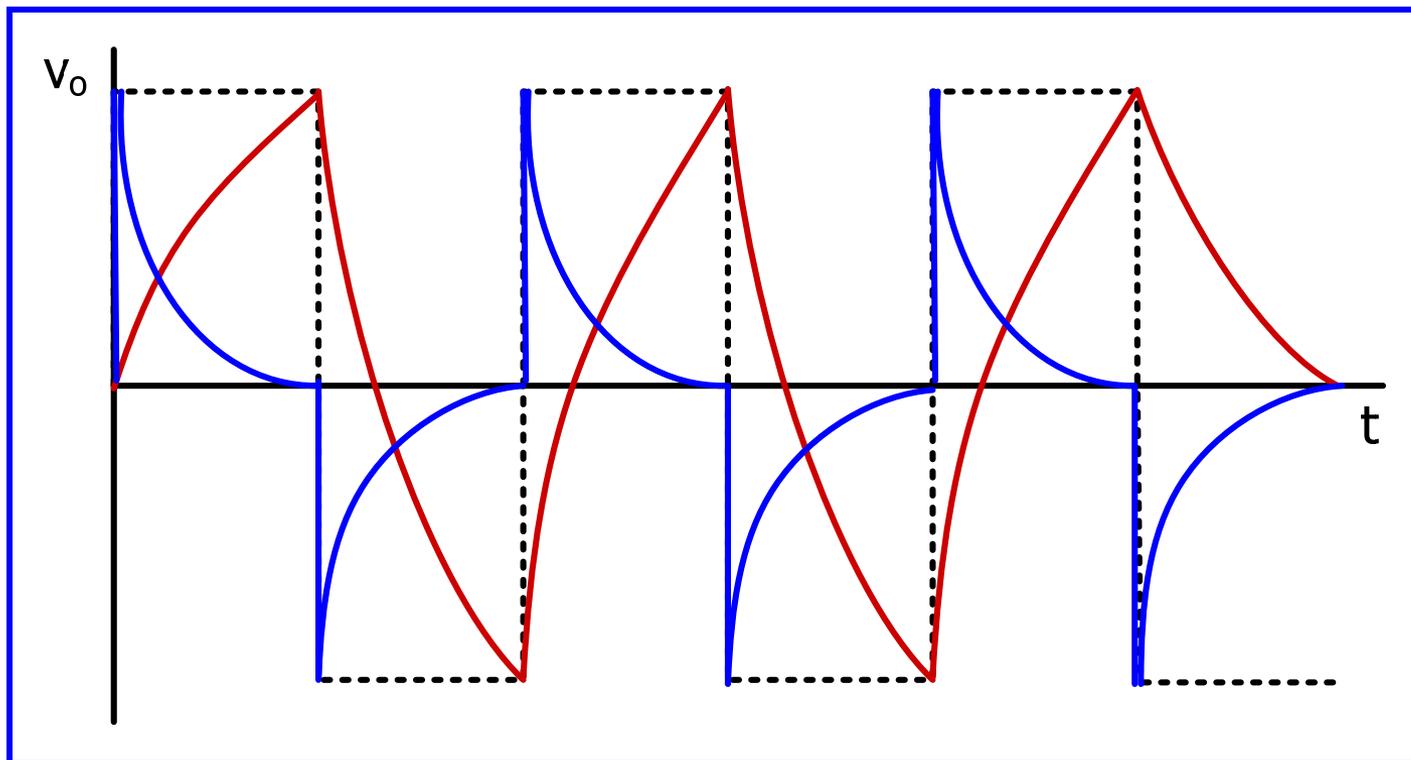


$$v_o(t) = e^{-t/\tau}$$

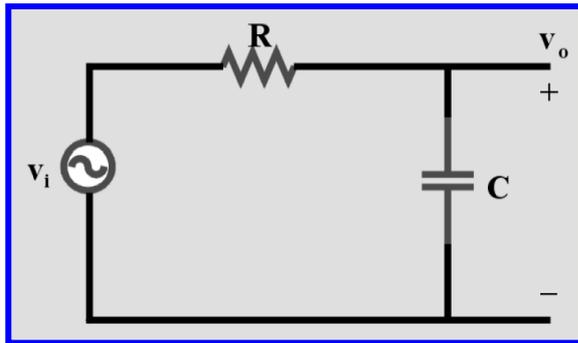


Απόκριση χρόνου κυκλωμάτων RC πρώτης τάξης

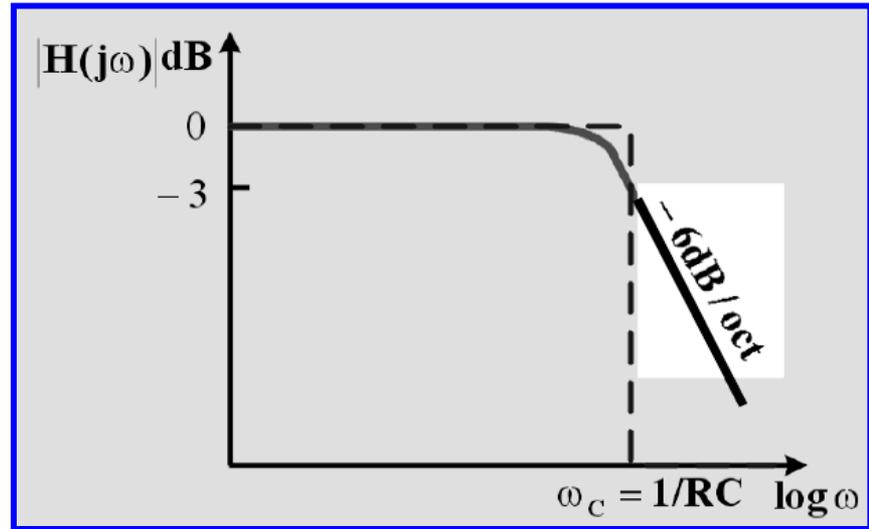
- Τετραγωνικός παλμός τάσης εισόδου
- Απόκριση χρόνου κυκλώματος ολοκλήρωσης (βαθυπερατού)
- Απόκριση χρόνου κυκλώματος διαφορίσης (υψηλεπερατού)



Απόκριση συχνότητας βαθυπερατού κυκλώματος



$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s}$$



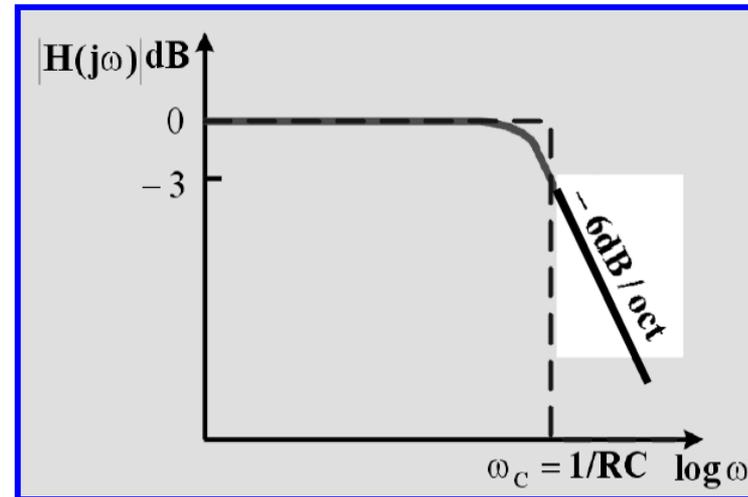
- Οι κυματομορφές σημάτων εξόδου παραμένουν αναλλοίωτες όταν η συχνότητα σήματος εισόδου βρίσκεται μέσα στη ζώνη διέλευσης ($\omega < \omega_c$). Εκτός της ζώνης διέλευσης, οι παλμοί σημάτων εξόδου υφίστανται ολοκλήρωση.
- Η απόκριση συχνότητας μέτρου δίνεται γραφικά με **διάγραμμα**, στο οποίο η απόκριση μέτρου υπολογίζεται σε dB εάν πολλαπλασιάσουμε το δεκαδικό λογάριθμο του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς με το 20 ($20\log|H(j\omega)|$) και η συχνότητα εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα ($\log\omega$).
- Η κλίση $|6 \text{ dB/oct}|$ σημαίνει μεταβολή του $|H(s)|$ κατά 6 dB όταν η συχνότητα διπλασιάζεται και είναι ισοδύναμη με την κλίση $|20 \text{ dB/dec}|$ που σημαίνει μεταβολή του $|H(s)|$ κατά 20 dB όταν η συχνότητα δεκαπλασιάζεται.

Απόκριση συχνότητας βαθυπερατού κυκλώματος

$$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\tau\omega} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς έχει έναν **πραγματικό πόλο** $s_p = -1/\tau$ στον οποίο αντιστοιχεί η **ιδιοσυχνότητα** ή **συχνότητα αποκοπής** $\omega_c = 1/\tau$ του κυκλώματος



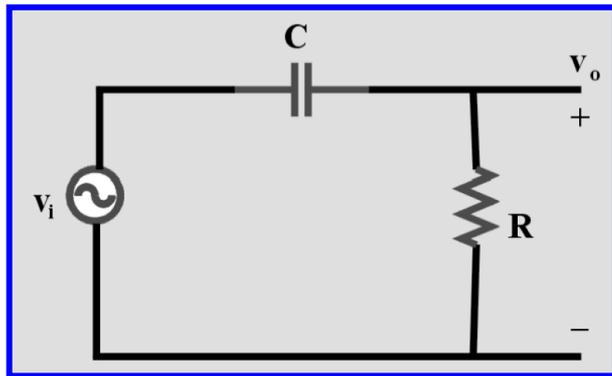
$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \Rightarrow$$

$$|H(j\omega)|_{\omega=0} = 1 \Rightarrow 0 \text{ dB}$$

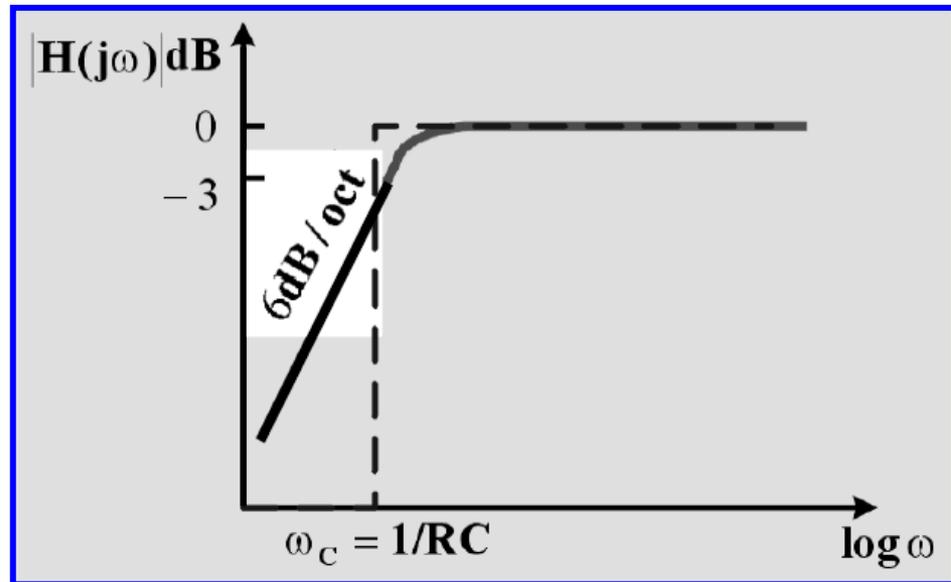
$$|H(j\omega)|_{\omega=\omega_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow -3 \text{ dB}$$

$$|H(j\omega)|_{\omega=2\omega_c} \approx \frac{1}{2} \Rightarrow -6 \text{ dB}$$

Απόκριση συχνότητας υπερπαρατού κυκλώματος



$$H(s) = \frac{\tau s}{1 + \tau s}$$



- Οι κυματομορφές σημάτων εξόδου παραμένουν αναλλοίωτες όταν η συχνότητα σήματος εισόδου βρίσκεται μέσα στη ζώνη διέλευσης ($\omega > \omega_c$).
- Εκτός της ζώνης διέλευσης, οι παλμοί σημάτων εξόδου υφίστανται διαφορίση.

Απόκριση συχνότητας υπερπαρατού κυκλώματος

$$H(s) = \frac{\tau s}{1 + \tau s}$$

$$H(j\omega) = \frac{j\tau\omega}{1 + j\tau\omega} = \frac{j\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}{1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}$$

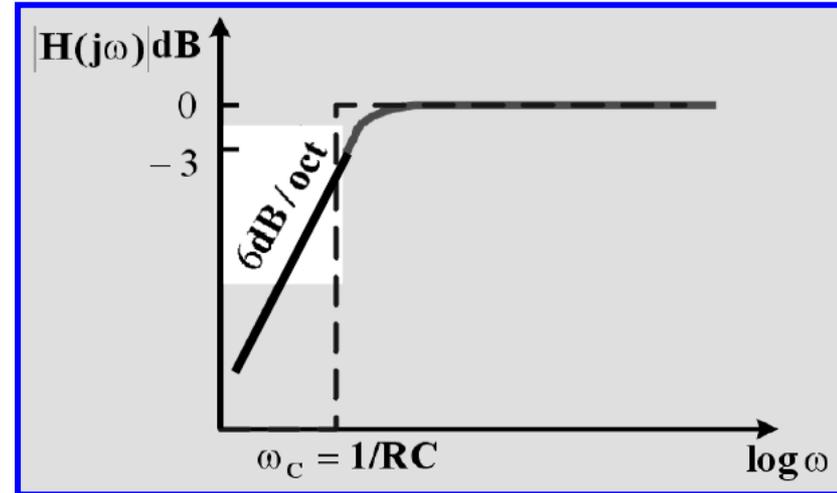
Η συνάρτηση μεταφοράς έχει έναν **πραγματικό πόλο** $s_p = -1/\tau$, στον οποίο αντιστοιχεί η **ιδιοσυχνότητα** ή **συχνότητα αποκοπής** $\omega_c = 1/\tau$ του κυκλώματος, καθώς κι έναν πραγματικό μηδενικό $s_z = 0$

$$|H(j\omega)| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \Rightarrow$$

$$|H(j\omega)|_{\omega \gg \omega_c} = 1 \Rightarrow 0 \text{ dB}$$

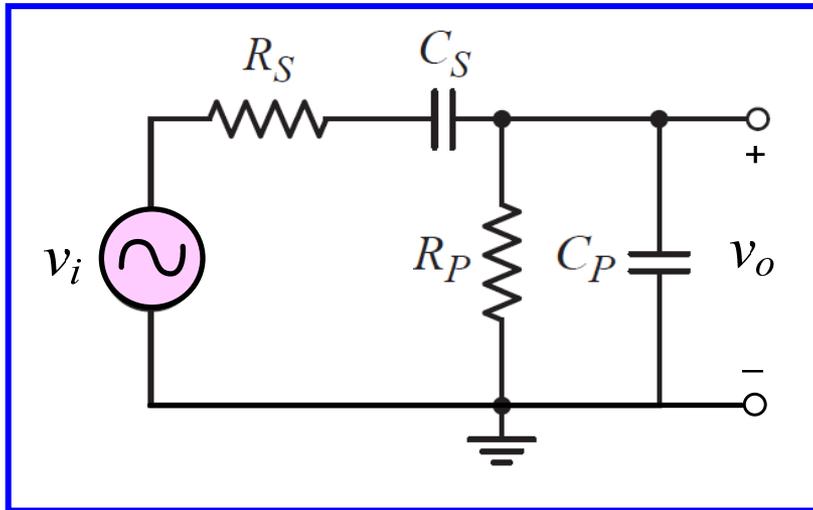
$$|H(j\omega)|_{\omega = \omega_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow -3 \text{ dB}$$

$$|H(j\omega)|_{\omega = \omega_c/2} \approx \frac{1}{2} \Rightarrow -6 \text{ dB}$$



Μέθοδος των σταθερών χρόνου

- Τα κυκλώματα RC πρώτης τάξης (βαθυπερατό και υψηπερατό) περιλαμβάνουν μία αντίσταση και έναν πυκνωτή, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μια σταθερά χρόνου ($\tau = RC$), από την οποία υπολογίζονται εύκολα οι συχνότητες αποκοπής των κυκλωμάτων.
- Εάν συνδυάζουμε τα δύο κυκλώματα πρώτης τάξης προκύπτει κύκλωμα με δύο αντιστάσεις και δύο πυκνωτές (C_S : πυκνωτής σύζευξης ή πυκνωτής σε σειρά με την πηγή εισόδου και C_P : πυκνωτής φορτίου ή πυκνωτής στον οποίο εφαρμόζεται η τάση εξόδου). Η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος είναι σύνθετη και δύσχρηστη.



$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_P \parallel \frac{1}{sC_P}}{R_P \parallel \frac{1}{sC_P} + \left(R_S + \frac{1}{sC_S} \right)}$$

$$R_P \parallel \frac{1}{sC_P} = \frac{R_P \cdot \frac{1}{sC_P}}{R_P + \frac{1}{sC_P}} = \frac{R_P}{1 + sR_P C_P}$$

Μέθοδος των σταθερών χρόνου

$$H(s) = \frac{R_P}{R_P + \left(R_S + \frac{1}{sC_S} \right) (1 + sR_P C_P)} = \frac{R_P}{R_P + R_S + \frac{R_P C_P}{C_S} + \frac{1}{sC_S} + sR_S R_P C_P}$$

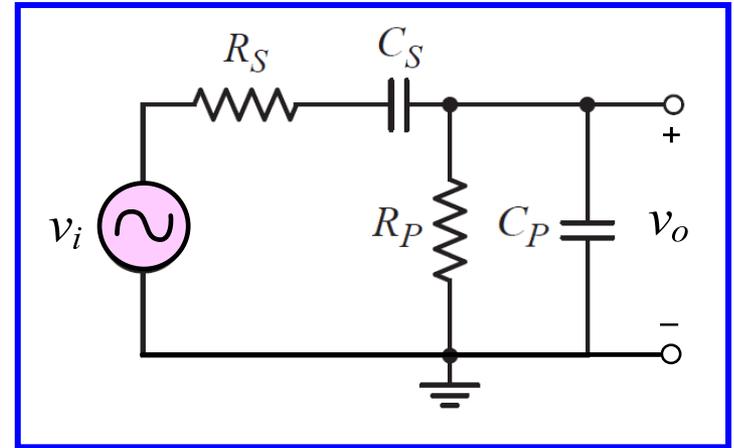
$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \left(\frac{R_P}{R_S + R_P} \right) \times \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{R_P}{R_S + R_P} \right) \left(\frac{C_P}{C_S} \right) + \frac{1}{s\tau_S} + s\tau_P \right]}$$

$$\tau_S = (R_S + R_P)C_S, \quad \tau_P = (R_S \parallel R_P)C_P$$

- Όταν οι δύο αντιστάσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και $C_P \ll C_S$, τότε οι συχνότητες αποκοπής που οφείλονται στην παρουσία των δύο πυκνωτών θα διαφέρουν κατά τάξεις μεγέθους και αυτή είναι μια κατάσταση που συναντάται συχνά στα πραγματικά κυκλώματα.
- Ο πυκνωτής C_S επηρεάζει την απόκριση του κυκλώματος στις χαμηλές συχνότητες, ενώ ο πυκνωτής C_P επηρεάζει την απόκριση του κυκλώματος στις υψηλές συχνότητες.

Μέθοδος των σταθερών χρόνου

- Όταν λοιπόν ένα κύκλωμα περιλαμβάνει πυκνωτή σύζευξης και πυκνωτή φορτίου και τα μεγέθη των δύο πυκνωτών διαφέρουν κατά πολύ, **μπορούμε να αναλύσουμε την επίδραση κάθε πυκνωτή ανεξάρτητα**.
- Στις **χαμηλές συχνότητες** μπορούμε να θεωρήσουμε τον **πυκνωτή φορτίου ως ανοικτό κύκλωμα** και για να υπολογίσουμε την ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος βραχυκυκλώνουμε την πηγή τάσης.
- Έτσι, η ισοδύναμη αντίσταση που συνδέεται σε σειρά με τον πυκνωτή σύζευξης (C_S) είναι $R_S + R_P$ και η **σταθερά χρόνου που σχετίζεται με τον πυκνωτή C_S** είναι η $\tau_S = (R_S + R_P)C_S$.
- Λόγω του ότι ο πυκνωτής φορτίου θεωρήθηκε ανοικτό κύκλωμα, η σταθερά χρόνου τ_S αναφέρεται ως **σταθερά χρόνου ανοικτού κυκλώματος**.
- Στις **υψηλές συχνότητες** θεωρούμε τον **πυκνωτή σύζευξης (C_S) ως βραχυκύκλωμα**, με αποτέλεσμα η αντίσταση που συνδέεται στον πυκνωτή φορτίου C_P να είναι $R_S \parallel R_P$ και η σταθερά χρόνου που σχετίζεται με τον πυκνωτή C_P να είναι η $\tau_P = (R_S \parallel R_P)C_P$.
- Λόγω του ότι ο πυκνωτής σύζευξης θεωρήθηκε βραχυκύκλωμα, η σταθερά χρόνου τ_P αναφέρεται ως **σταθερά χρόνου βραχυκυκλώματος**.



Μέθοδος των σταθερών χρόνου

- Χρησιμοποιώντας τις σταθερές χρόνου ανοικτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος, μπορούμε να υπολογίσουμε με αρκετή ακρίβεια τις συχνότητες αποκοπής του κυκλώματος.
- Η **κατώτερη συχνότητα αποκοπής** (δηλαδή, η συχνότητα όπου το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς είναι 3 dB μικρότερο από την μέγιστη τιμή του) καθορίζεται από την **σταθερά χρόνου ανοικτού κυκλώματος**:

$$f_L = \frac{1}{2\pi\tau_S}$$

- Η **ανώτερη συχνότητα αποκοπής** καθορίζεται από την **σταθερά χρόνου βραχυκυκλώματος**:

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_P}$$

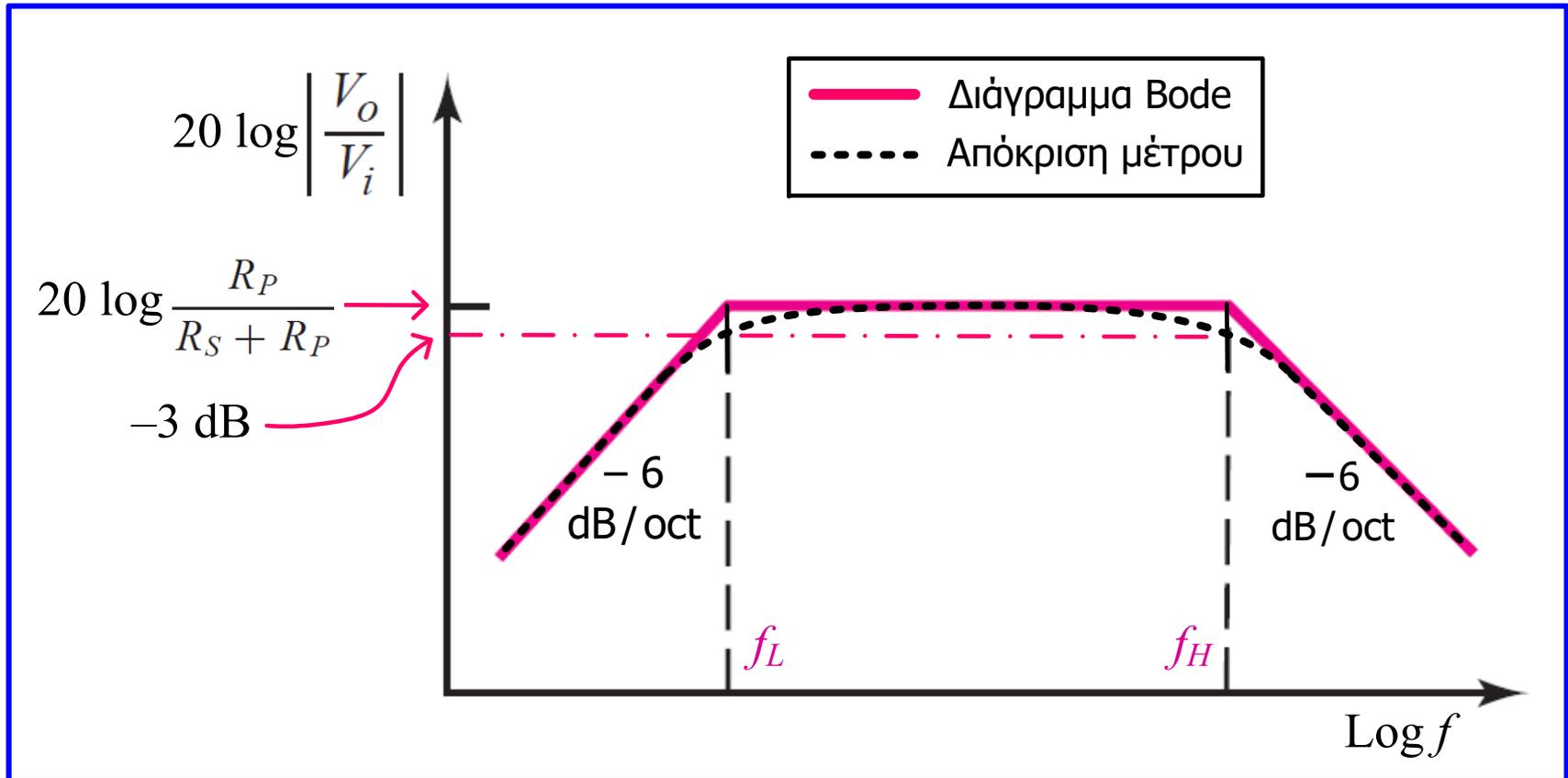
- Η **μέγιστη τιμή του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς**, προκύπτει όταν ο πυκνωτής C_S λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα και ο πυκνωτής C_P ανοικτό κύκλωμα και έχει ως εξής:

$$|H(s)|_{max} = v_o / v_i = [R_P / (R_S + R_P)] v_i / v_i \Rightarrow |H(s)|_{max} = \frac{R_P}{R_S + R_P}$$

Μέθοδος των σταθερών χρόνου

- Η απόκριση συχνότητας μέτρου δίνεται γραφικά με **διάγραμμα**, στο οποίο η απόκριση μέτρου υπολογίζεται σε dB εάν πολλαπλασιάσουμε το δεκαδικό λογάριθμο του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς με το 20 ($20\log|H(s)|$) και η συχνότητα εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα (**logf**).
- Συχνά, για λόγους απλότητας και ταχύτητας, για την γραφική παράσταση του μέτρου της απόκρισης συχνότητας χρησιμοποιείται το **διάγραμμα Bode**, που προσεγγίζει την απόκριση συχνότητας μέτρου με ασύμπτωτες ευθείες που τέμνονται στην συχνότητα αποκοπής.
- Για την **σχεδίαση ενός διαγράμματος Bode** ακολουθούνται οι εξής **βασικοί κανόνες**:
 - ✓ Όταν η συχνότητα φθάνει σε τιμή που αντιστοιχεί σε **πόλο** της συνάρτησης μεταφοράς, το $|H(s)|$ μειώνεται με κλίση **6 dB/oct** ή **20 dB/dec**.
 - ✓ Όταν η συχνότητα φθάνει σε τιμή που αντιστοιχεί σε **μηδενικό** της συνάρτησης μεταφοράς, το $|H(s)|$ αυξάνεται με κλίση **6 dB/oct** ή **20 dB/dec**.
 - ✓ **Εξαιρέση**: Όταν στην $H(s)$ συμμετέχει **μηδενικό (πόλος) $s = 0$** , δηλαδή στον αριθμητή (παρονομαστή) της συνάρτησης μεταφοράς υπάρχει ο όρος s , το διάγραμμα του $|H(s)|$ είναι ευθεία που διέρχεται από το σημείο $\log\omega = 0$ ($\omega = 1$ rad/s) με κλίση **6 dB/oct** ή **20 dB/dec** (-6 dB/oct ή -20 dB/dec).
 - ✓ Η κλίση **6 dB / oct** σημαίνει μεταβολή του $|H(s)|$ κατά **6 dB** όταν η συχνότητα διπλασιάζεται και είναι ισοδύναμη με την κλίση **20 dB / dec** που σημαίνει μεταβολή του $|H(s)|$ κατά **20 dB** όταν η συχνότητα δεκαπλασιάζεται.

Μέθοδος των σταθερών χρόνου



Παράδειγμα υπολογισμού των συχνοτήτων αποκοπής με την μέθοδο των σταθερών χρόνου και σχεδίασης διαγράμματος είναι διαθέσιμο στην **άσκηση 3**.

Προσέγγιση επικρατούντος πόλου

- Όταν σε ένα κύκλωμα συμμετέχουν **πολλαπλοί πυκνωτές σύζευξης**, τότε ένας από αυτούς εισάγει τον πόλο της συνάρτησης μεταφοράς, ο οποίος προκαλεί την μείωση κατά 3 dB του μέτρου της απόκρισης συχνότητας από την μέγιστη τιμή του στις χαμηλές συχνότητες.
- Ο πόλος αυτός αναφέρεται ως **επικρατών πόλος (dominant pole)** και σχετίζεται με την σταθερά χρόνου από την οποία υπολογίζεται η **κατώτερη συχνότητα αποκοπής**.
- Το ίδιο συμβαίνει και στις υψηλές συχνότητες, όταν στο κύκλωμα συμμετέχουν **πολλαπλές χωρητικότητες στις οποίες εφαρμόζεται η τάση εξόδου του κυκλώματος**.
- Όπως και στην περίπτωση των πολλαπλών πυκνωτών σύζευξης, έτσι και στις υψηλές συχνότητες ένας από τους πόλους (**επικρατών πόλος**) είναι εκείνος που σχετίζεται με την σταθερά χρόνου από την οποία υπολογίζεται η **ανώτερη συχνότητα αποκοπής** του κυκλώματος.
- Στις **χαμηλές συχνότητες**, ο **επικρατών πόλος** είναι εκείνος που σχετίζεται με την **μικρότερη σταθερά χρόνου**, από την οποία υπολογίζεται η **μεγαλύτερη συχνότητα αποκοπής**.
- Αντιθέτως, στις **υψηλές συχνότητες**, ο **επικρατών πόλος** είναι εκείνος που σχετίζεται με την **μεγαλύτερη σταθερά χρόνου**, από την οποία υπολογίζεται η **μικρότερη συχνότητα αποκοπής**.

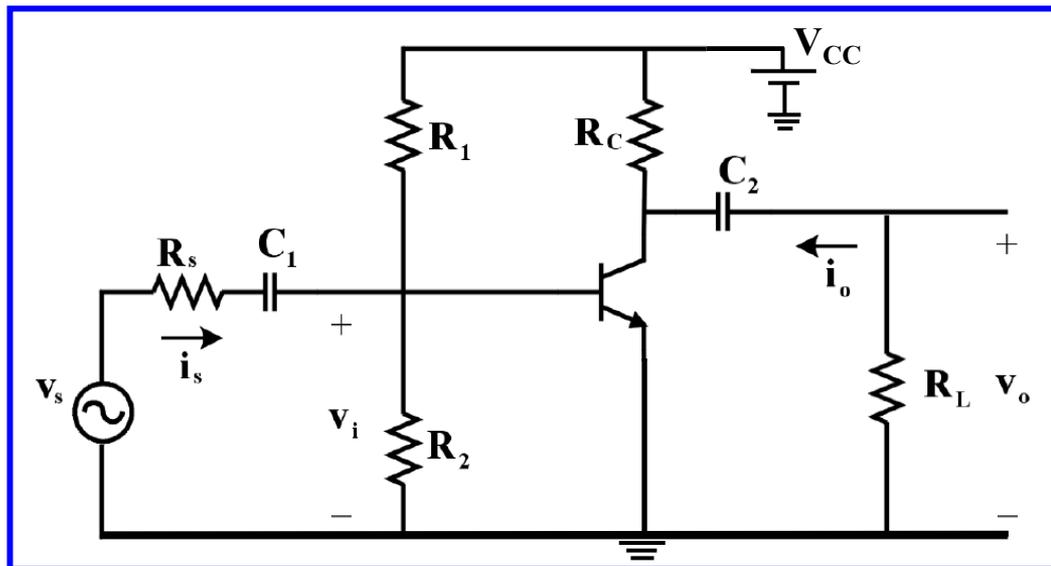
Απόκριση συχνότητας ενισχυτών

- Παρατηρώντας τις αποκρίσεις που παράχθηκαν συμπεραίνουμε ότι μπορούμε να χαράξουμε τις αποκρίσεις συχνότητας κυκλωμάτων πρώτης τάξης όταν γνωρίζουμε:
 - ✓ τη συμπεριφορά τους (βαθυπερατή ή υψηπερατή) και
 - ✓ τη σταθερά χρόνου που σχηματίζουν τα στοιχεία του κυκλώματος.
- Έγινε φανερό ότι οι σταθερές χρόνου καθορίζουν την απόκριση συχνότητας (αλλά και την απόκριση χρόνου) των κυκλωμάτων.
- Στις συναρτήσεις μεταφοράς τάσεων οι συντελεστές της μιγαδικής συχνότητας s συνίστανται από σταθερές χρόνου.
- Για να αναλύσουμε και να σχεδιάσουμε την απόκριση συχνότητας μέτρου μιας συνάρτησης μεταφοράς, δεν είναι απαραίτητο να εξαγάγουμε την ακριβή συνάρτηση μεταφοράς και να συμπεριλάβουμε σε αυτή την επίδραση των πυκνωτών.
- Για να αναλύσουμε και να σχεδιάσουμε την απόκριση συχνότητας της συνάρτησης μεταφοράς (ενίσχυσης) ενός ενισχυτή, εξετάζουμε την επίδραση των χωρητικότητων (πυκνωτές ή παρασιτικές χωρητικότητες των τρανζίστορ) ανεξάρτητα και διαπιστώνουμε εάν αυτές προσδίδουν στον ενισχυτή βαθυπερατή ή υψηπερατή συμπεριφορά.
- Κατόπιν υπολογίζουμε τις σταθερές χρόνου που αντιστοιχούν σε κάθε χωρητικότητα και προσδιορίζουμε τις συχνότητες αποκοπής.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτών

- Η **μέγιστη ενίσχυση (σταθερή)** παρουσιάζεται στην **περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων**, όπου οι πυκνωτές (σύζευξης και παράκαμψης) αντικαθίστανται με βραχυκυκλώματα και οι παρασιτικές χωρητικότητες των τρανζίστορ (στις οποίες εφαρμόζεται η τάση εισόδου ή η τάση εξόδου του ενισχυτή) αντικαθίστανται από ανοικτά κυκλώματα.
- Η συμπεριφορά των ενισχυτών είναι **ζωνοδιαβατή**, αφού:
 - ✓ στην **περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων** η ενίσχυση είναι μέγιστη και σταθερή,
 - ✓ στις **χαμηλές συχνότητες** η ενίσχυση μειώνεται, λόγω της επίδρασης των πυκνωτών (σύζευξης και παράκαμψης) και
 - ✓ στις **υψηλές συχνότητες** η ενίσχυση επίσης μειώνεται, λόγω της επίδρασης των παρασιτικών χωρητικοτήτων των τρανζίστορ.
- Από την ανάλυση της επίδρασης των πυκνωτών, υπολογίζουμε την **κατώτερη συχνότητα αποκοπής (f_L)**, ενώ από την ανάλυση της επίδρασης των παρασιτικών χωρητικοτήτων των τρανζίστορ υπολογίζουμε την **ανώτερη συχνότητα αποκοπής (f_H)**.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

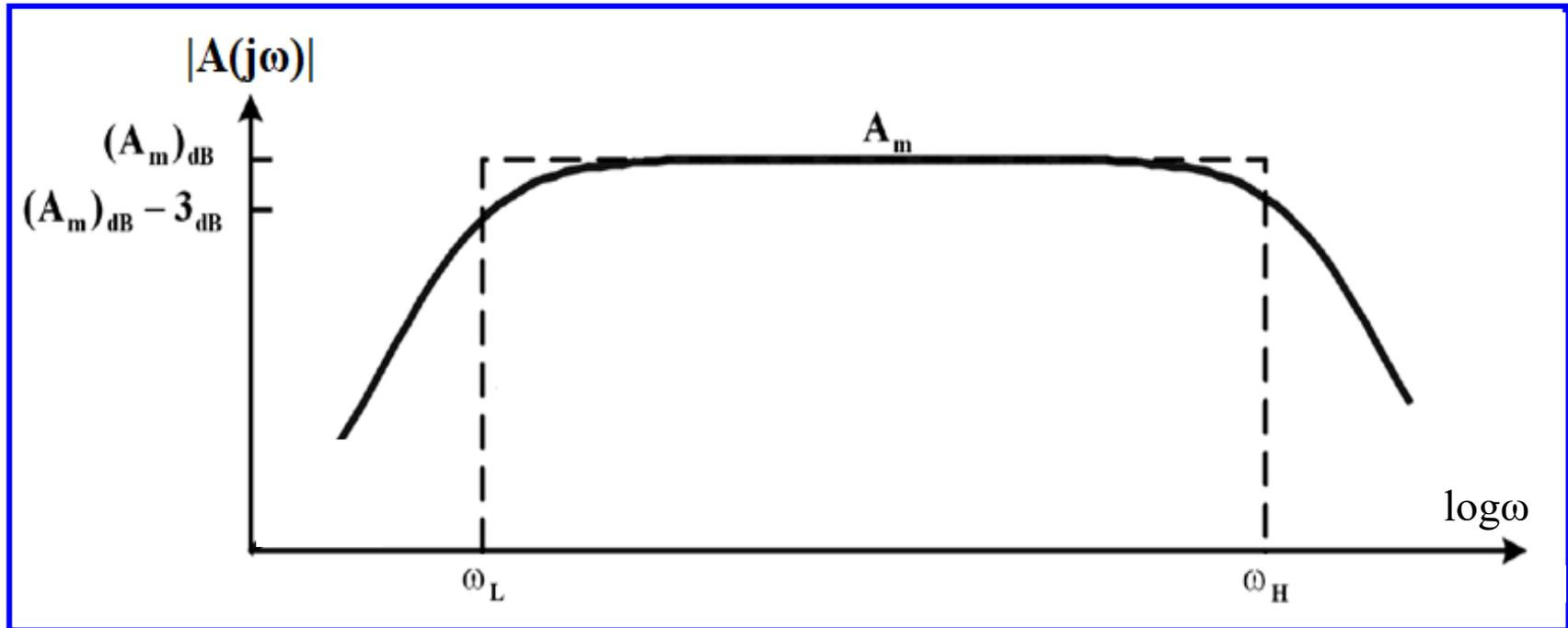


Ενίσχυση τάσης στην **περιοχή μεσαίων συχνοτήτων**:

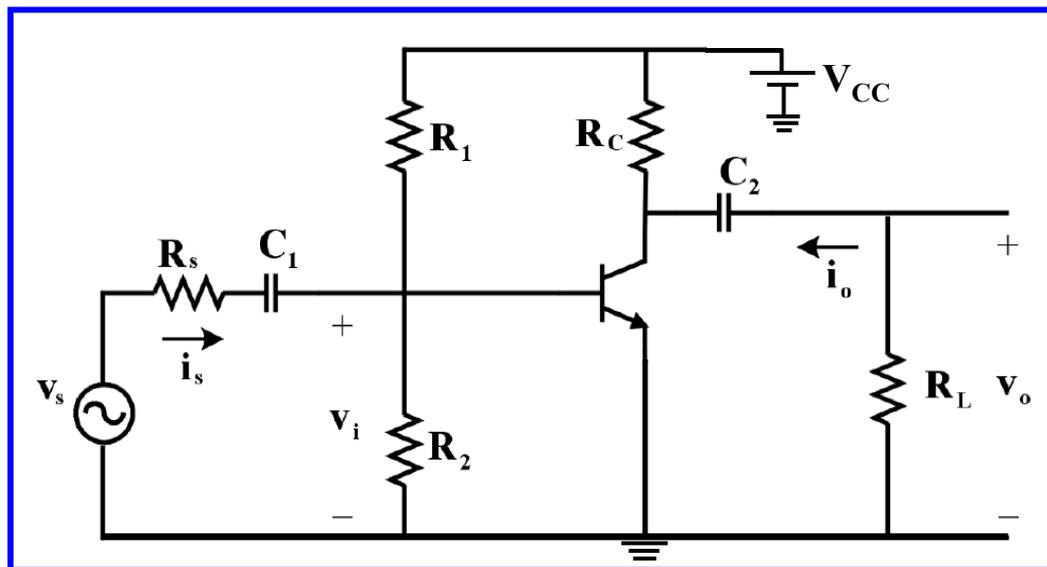
$$A_m = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{h_{fe} R'_L}{h_{ie}} \cdot \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

- Η πραγματική **απόκριση συχνότητας μέτρου** του ενισχυτή δεν είναι σταθερή, αλλά **ζωνοδιαβατή** με **ζώνη διέλευσης** $\omega_L < \omega < \omega_H$, που αποτελεί και την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων του ενισχυτή αυτού.
- Η ζώνη αυτή αναφέρεται και ως **εύρος ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων (bandwidth, $BW = \omega_H - \omega_L$)**.
- Στην περιοχή διέλευσης, το μέτρο ενίσχυσης παραμένει σταθερό και η διαφορά φάσης (εισόδου-εξόδου) παραμένει σταθερή στις 180° .

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού



- Στην **περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων**, ο ενισχυτής εμφανίζει **υψηπερατή συμπεριφορά** λόγω της επίδρασης των πυκνωτών σύζευξης (C_1 και C_2).
- Αντίθετα, στην **περιοχή των υψηλών συχνοτήτων**, ο ενισχυτής εμφανίζει **βαθυπερατή συμπεριφορά** λόγω της επίδρασης των παρασιτικών χωρητικότητων του τρανζίστορ.
- Η συμπεριφορά του ενισχυτή στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων προσδιορίζεται από τις σταθερές χρόνου που σχηματίζουν οι πυκνωτές σύζευξης τις αντιστάσεις του ενισχυτή, ενώ η συμπεριφορά του ενισχυτή στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων προσδιορίζεται από τις σταθερές χρόνου που σχηματίζουν οι παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ με τις αντιστάσεις του ενισχυτή.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

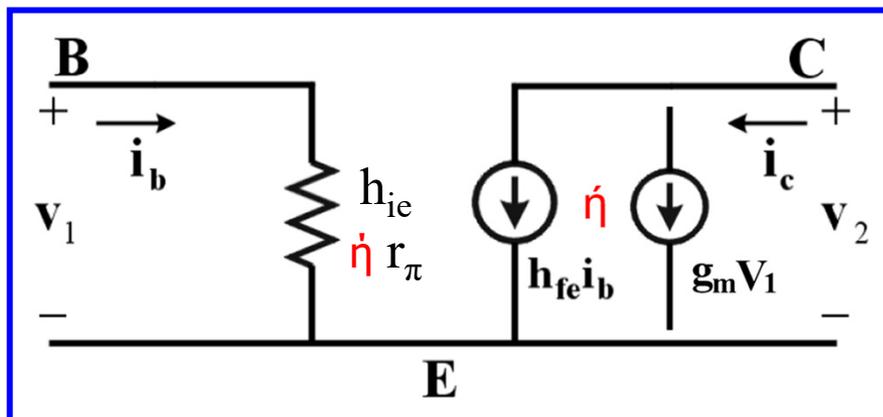
- Η απόκριση συχνότητας του ενισχυτή είναι στην ουσία η συνάρτηση της ενίσχυσης ως προς τη συχνότητα ($A(s)$).

$$A(s) = A_m \cdot A_L(s) \cdot A_H(s)$$

- Οι συναρτήσεις $A_L(s)$ και $A_H(s)$ εκφράζουν την εξάρτηση της ενίσχυσης από τη συχνότητα στην περιοχή των χαμηλών και των υψηλών συχνοτήτων, αντίστοιχα.
- Στη **ζώνη διέλευσης** $\omega_L < \omega < \omega_H$ (**περιοχή μεσαίων συχνοτήτων**) όπου $A(s) = A_m$, η ενίσχυση προσδιορίστηκε στην 2^η ενότητα με ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος του ενισχυτή, θεωρώντας ότι οι πυκνωτές σύζευξης λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα και τις παρασιτικές χωρητικότητες του διπολικού τρανζίστορ ως ανοικτά κυκλώματα.
- Στην **περιοχή χαμηλών συχνοτήτων** όπου $A(s) = A_m \cdot A_L(s)$, η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή για τις χαμηλές και τις μεσαίες συχνότητες, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση των πυκνωτών σύζευξης.
- Στην **περιοχή υψηλών συχνοτήτων** όπου $A(s) = A_m \cdot A_H(s)$, η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του τροποποιημένου κατά Miller ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή που λαμβάνει υπόψη τις παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ, θεωρώντας ως βραχυκυκλώματα τους πυκνωτές σύζευξης.

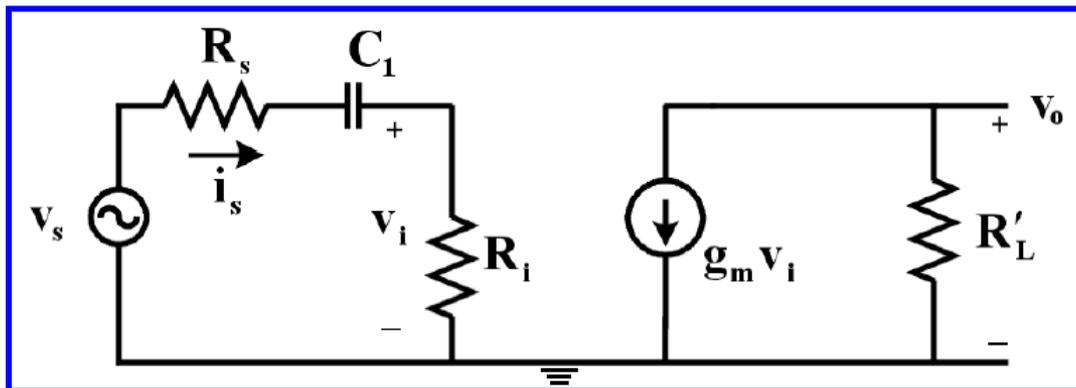
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

- Μελετάμε πρώτα τον ενισχυτή στην **περιοχή των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων**.
- Στους ενισχυτές όπου συνυπάρχουν περισσότεροι του ενός πυκνωτές, η απόκριση συχνότητας μπορεί να προσεγγιστεί θεωρώντας την **επίδραση καθενός από τους πυκνωτές ανεξάρτητα** και λαμβάνοντας **στο τέλος τη συνδυασμένη επίδραση όλων των πυκνωτών**.
- Θεωρώντας ότι επιδρά στο κύκλωμα μόνο ο πυκνωτής C_1 , ενώ ο C_2 λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα, σχεδιάζουμε το ισοδύναμο μοντέλο του ενισχυτή, με βάση το παρακάτω **ισοδύναμο κύκλωμα h** ή το **ισοδύναμο κύκλωμα π** του τρανζίστορ για χαμηλές και μεσαίες συχνότητες.



$$h_{ie} = r_{\pi}$$
$$h_{fe} = g_m \cdot r_{\pi}$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού



$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$R_i = R_B \parallel r_\pi$$

$$R'_L = R_C \parallel R_L$$

$$V_o = -g_m \cdot R'_L \cdot V_i = \frac{-g_m \cdot R'_L \cdot R_i}{R_i + R_s} V_s$$

$$A_m = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{g_m \cdot R'_L \cdot R_i}{R_i + R_s}$$

Ενίσχυση στις μεσαίες συχνότητες

- **Περιοχή χαμηλών συχνοτήτων:** Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος προσδιορίζεται από το κύκλωμα εισόδου, το οποίο λειτουργεί ως υπερπαραπέρατο κύκλωμα, οπότε:

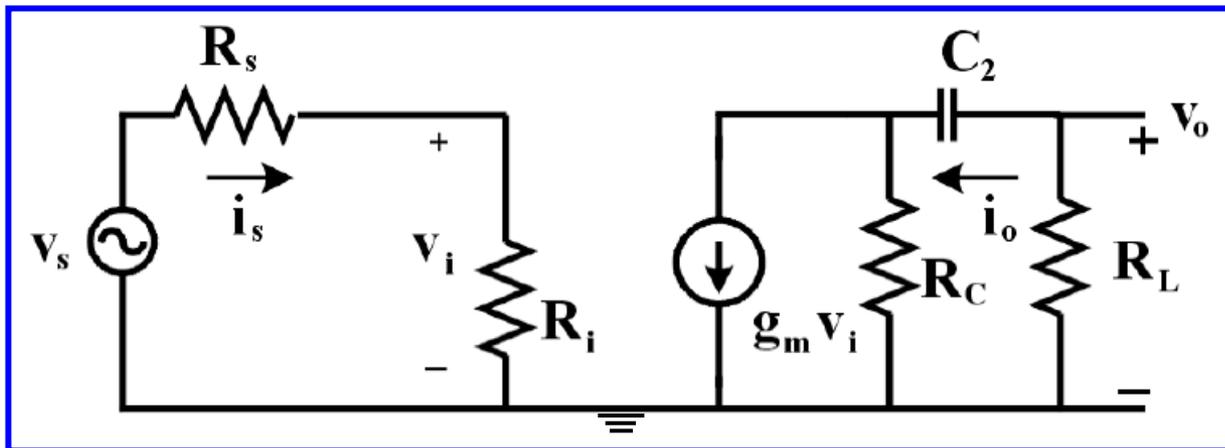
$$A_1(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = A_m \frac{\tau_1 s}{\tau_1 s + 1}$$

$$\tau_1 = (R_s + R_i) C_1$$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης που συμμετέχει στη σταθερά χρόνου, βραχυκυκλώνουμε την πηγή σήματος του κυκλώματος.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

- Θεωρούμε στη συνέχεια ότι επιδρά στο κύκλωμα μόνο ο πυκνωτής C_2 , ενώ ο C_1 λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα.



- Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος προσδιορίζεται από το κύκλωμα εξόδου, το οποίο επίσης λειτουργεί ως υψηπερατό κύκλωμα, οπότε:

$$A_2(s) = A_m \cdot \frac{\tau_2 s}{\tau_2 s + 1}$$

$$\tau_2 = (R_C + R_L)C_2$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

- Επομένως, στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων όπου η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους πυκνωτές σύζευξης, ισχύει:

$$A_L(s) = A_m \frac{\tau_1 s \cdot \tau_2 s}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s + 1)}$$

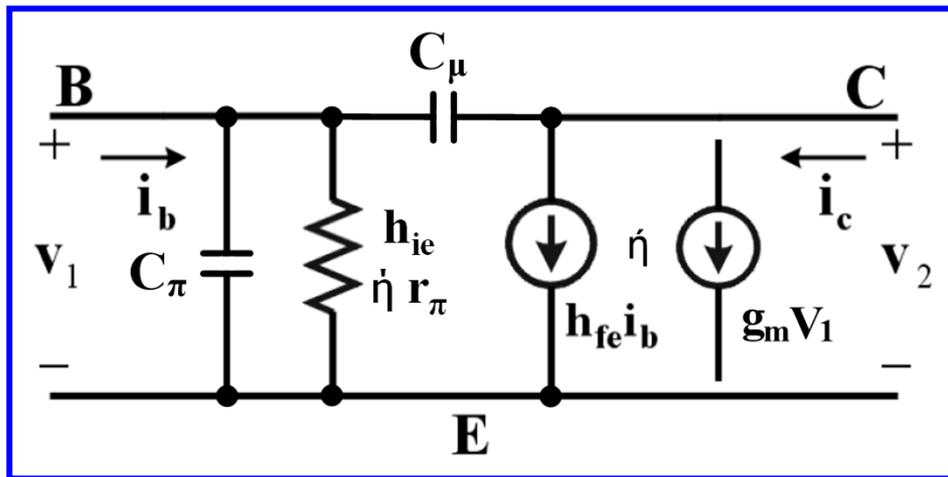
- Από τους δύο πόλους της παραπάνω ενίσχυσης (απόκρισης) αυτός με την μικρότερη σταθερά χρόνου αντιστοιχεί και στη μεγαλύτερη συχνότητα ($\omega = 1/\tau$) και συνεπώς ακολουθώντας την προσέγγιση επικρατούντος πόλου, η ενίσχυση στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$A_L(s) = A_m \frac{\tau_2 s}{\tau_2 s + 1}$$

Θεωρήσαμε ότι για τον ενισχυτή που εξετάζουμε ισχύει: $\tau_2 < \tau_1 \Rightarrow \omega_2 > \omega_1$, δηλαδή ότι ο πόλος που επικρατεί είναι εκείνος που αντιστοιχεί στη σταθερά τ_2 .

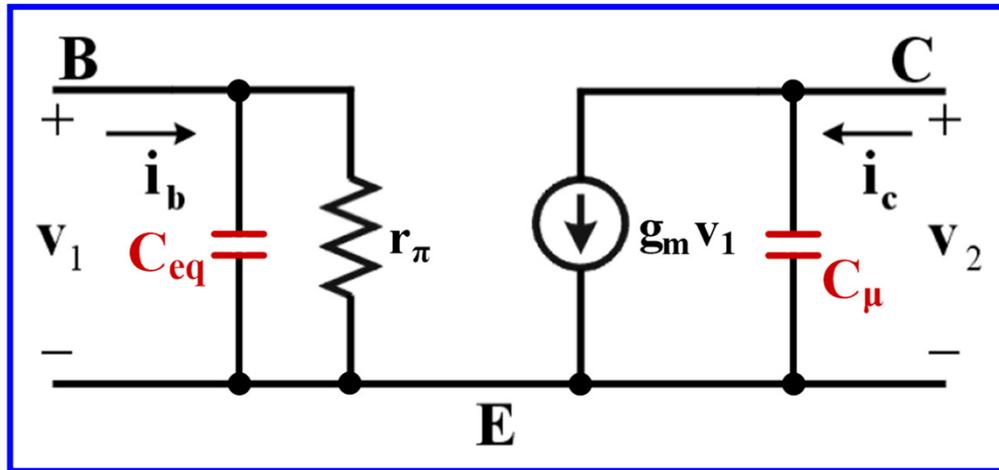
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

- Στις **χαμηλές και μεσαίες συχνότητες**, η επίδραση των παρασιτικών χωρητικοτήτων του τρανζίστορ δεν λαμβάνονται υπόψη, αφού θεωρούνται ανοικτά κυκλώματα μιας και είναι 5-6 τάξεις μεγέθους μικρότερες από τους πυκνωτές σύζευξης.
- Στις υψηλές συχνότητες χρησιμοποιούμε το **ισοδύναμο π μοντέλο του τρανζίστορ με χωρητικά παρασιτικά στοιχεία** (C_π είναι η χωρητικότητα της επαφής βάσης-εκπομπού και C_μ είναι η χωρητικότητα της επαφής βάσης-συλλέκτη).



- Για να διευκολυνθούμε στην ανάλυση του κυκλώματος, χρησιμοποιούμε το **θεώρημα τάσεων του Miller**, σύμφωνα με το οποίο η χωρητικότητα C_μ χωρίζεται σε δύο χωρητικότητες συνδεδεμένες παράλληλα στην είσοδο και στην έξοδο. Η **χωρητικότητα εισόδου** είναι $C_\mu(1 - k)$ και η **χωρητικότητα εξόδου** είναι $C_\mu(1 - 1/k)$, με $k = V_2 / V_1$.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

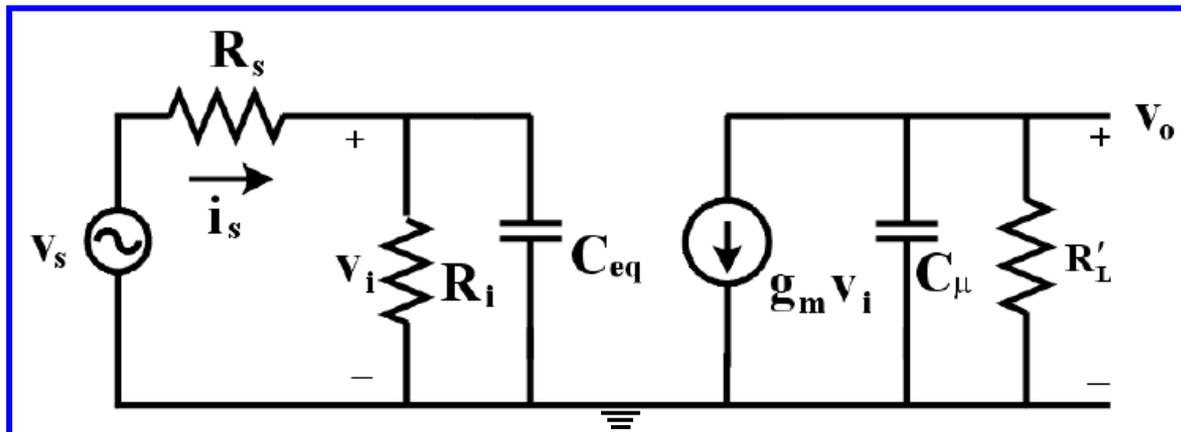


$$v_2 = -g_m R'_L v_1 \Rightarrow k = -g_m R'_L$$
$$C_{eq} = C_\pi + C_\mu (1 - k) = C_\pi + C_\mu (1 + R'_L g_m)$$
$$C_\mu (1 - 1/k) \approx C_\mu$$

R'_L : ισοδύναμη αντίσταση φορτίου που συνδέεται μεταξύ συλλέκτη και γείωσης

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

- Έτσι, στην **περιοχή υψηλών συχνοτήτων** το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή περιλαμβάνει δύο παρασιτικές χωρητικότητες στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η τάση εισόδου και η τάση εξόδου του ενισχυτή, αντίστοιχα.



- Παρατηρούμε ότι το κύκλωμα εισόδου και το κύκλωμα εξόδου έχουν **βαθυπερατή συμπεριφορά**, οπότε:

$$A_4(s) = A_m \cdot \frac{1}{\tau_i s + 1}$$

$$A_5(s) = A_m \frac{1}{\tau_o s + 1}$$

$$\tau_i = (R_i \parallel R_s) C_{eq}$$

$$\tau_o = R'_L C_\mu$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

- Επομένως, στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων όπου η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή λαμβάνοντας υπόψη τις παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ και θεωρώντας ως βραχυκυκλώματα τους πυκνωτές σύζευξης, ισχύει:

$$A_H(s) = A_m \frac{1}{(\tau_i s + 1) \cdot (\tau_o s + 1)}$$

- Συνήθως, η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από τη σταθερά χρόνου του κυκλώματος εξόδου, οπότε το κύκλωμα εισόδου στο οποίο αντιστοιχεί ο πόλος της απόκρισης με τη μικρότερη συχνότητα, είναι αυτό που καθορίζει την απόκριση του ενισχυτή κοινού εκπομπού στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων.
- Επομένως, η ενίσχυση στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$A_H(s) = A_m \frac{1}{\tau_i s + 1}$$

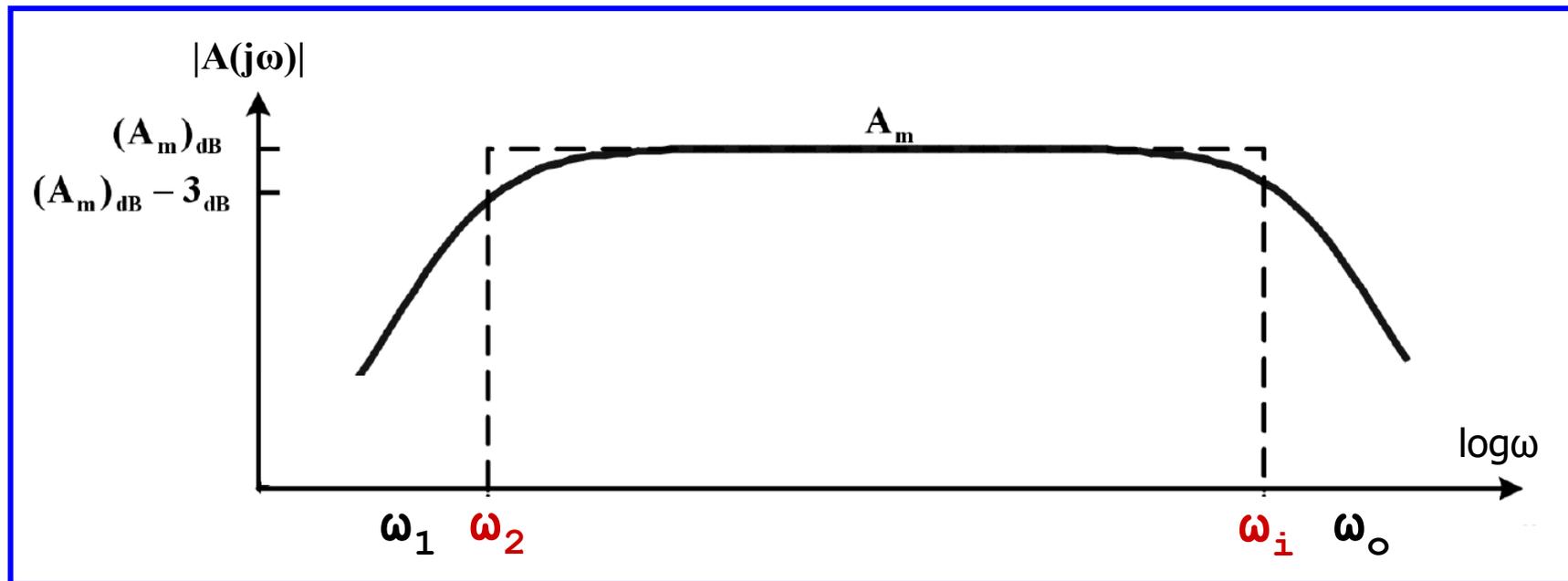
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού

- Η **συνδυασμένη απόκριση του ενισχυτή** λόγω της επίδρασης όλων των χωρητικοτήτων δίνεται ως εξής:

$$A(s) = A_m \cdot A_L(s) \cdot A_H(s) = A_m \frac{\tau_1 s \cdot \tau_2 s}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s + 1) \cdot (\tau_i s + 1) \cdot (\tau_o s + 1)}$$
$$\Rightarrow A(s) = A_m \frac{\tau_2 s}{(\tau_2 s + 1) \cdot (\tau_i s + 1)}$$

- Συμπεραίνουμε ότι:
 - ✓ Η **κατώτερη συχνότητα αποκοπής** (ω_L) καθορίζεται από τις σταθερές χρόνου, στις οποίες συμμετέχουν οι πυκνωτές σύζευξης και ειδικότερα αυτός που δημιουργεί τη μικρότερη σταθερά χρόνου.
 - ✓ Η **ανώτερη συχνότητα αποκοπής** (ω_H) καθορίζεται από τις σταθερές χρόνου, στις οποίες συμμετέχουν οι παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ και ειδικότερα από τη σταθερά χρόνου που σχηματίζεται στο κύκλωμα εισόδου του ενισχυτή.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού



Κατώτερη
συχνότητα
αποκοπής

$$\omega_L = \omega_2 = \frac{1}{\tau_2} \Rightarrow f_L = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_2}$$

Ανώτερη
συχνότητα
αποκοπής

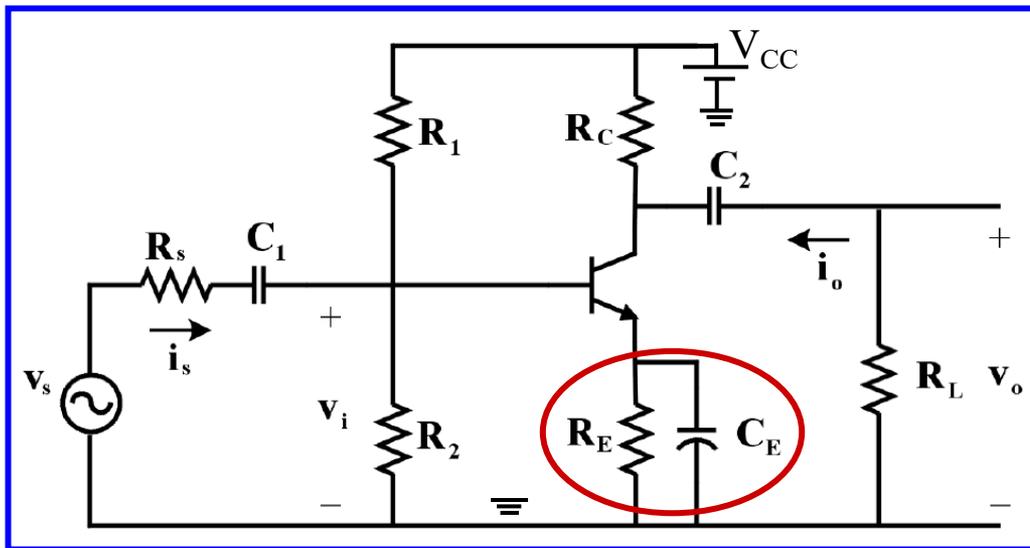
$$\omega_H = \omega_i = \frac{1}{\tau_i} \Rightarrow f_H = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_i}$$

$$A(s) = \frac{A_m \cdot \tau_2 s}{(\tau_2 s + 1) \cdot (\tau_i s + 1)} = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$

$$BW = f_H - f_L$$

Εύρος ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού εκπομπού



Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα υπολογισμού της απόκρισης συχνότητας μέτρου του ενισχυτή κοινού εκπομπού με βάση την μέθοδο των σταθερών χρόνου και την σταδιακή ανάλυση κατά περιοχές συχνοτήτων, αποτελούν οι ασκήσεις 8 και 9 της ενότητας.

- Για την **απλούστευση** του υπολογισμού της απόκρισης συχνότητας μέτρου του ενισχυτή κοινού εκπομπού σε όλο το εύρος των συχνοτήτων, **θεωρήσαμε** ότι δεν υφίσταται αντίσταση εκπομπού (R_E) και **πυκνωτής παράκαμψης** C_E και λάβαμε υπόψη μόνο την επίδραση των **πυκνωτών σύζευξης** C_1 και C_2 .
- Ωστόσο, εάν δεν γίνει η θεώρηση αυτή, η **επίδραση του** C_E είναι συχνά αυτή που **καθορίζει** την απόκριση συχνότητας στις χαμηλές συχνότητες, δηλαδή καθορίζει την **κατώτερη συχνότητα αποκοπής (άσκηση 9)**, η οποία είναι μεγαλύτερη από εκείνες που προκύπτουν λόγω της επίδρασης των πυκνωτών σύζευξης C_1 και C_2 .

Διεύρυνση ανώτερης συχνότητας λειτουργίας

- Στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων για τον ενισχυτή κοινού εκπομπού ισχύει:

$$A_H(s) = A_m \frac{1}{(\tau_i s + 1)(\tau_o s + 1)}$$

$$\begin{aligned}\tau_i &= (R_i \parallel R_s) C_{eq} \\ \tau_o &= R_C C_m\end{aligned}$$

- Συνήθως, η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου είναι μεγαλύτερη, οπότε η είσοδος είναι αυτή που καθορίζει την απόκριση του ενισχυτή στις υψηλές συχνότητες.
- Στις υψηλές συχνότητες, ο ενισχυτής παρουσιάζει δύο πόλους, από τους οποίους επικρατεί αυτός που αντιστοιχεί στο κύκλωμα εισόδου και καθορίζει την ανώτερη συχνότητα αποκοπής ή λειτουργίας.
- Μπορούμε **να αντισταθμίσουμε τον επικρατών πόλο** εάν εισάγουμε ένα μηδενικό στην απόκριση συχνότητας συνδέοντας έναν πυκνωτή C_s , παράλληλα με την R_s , τέτοιον ώστε:

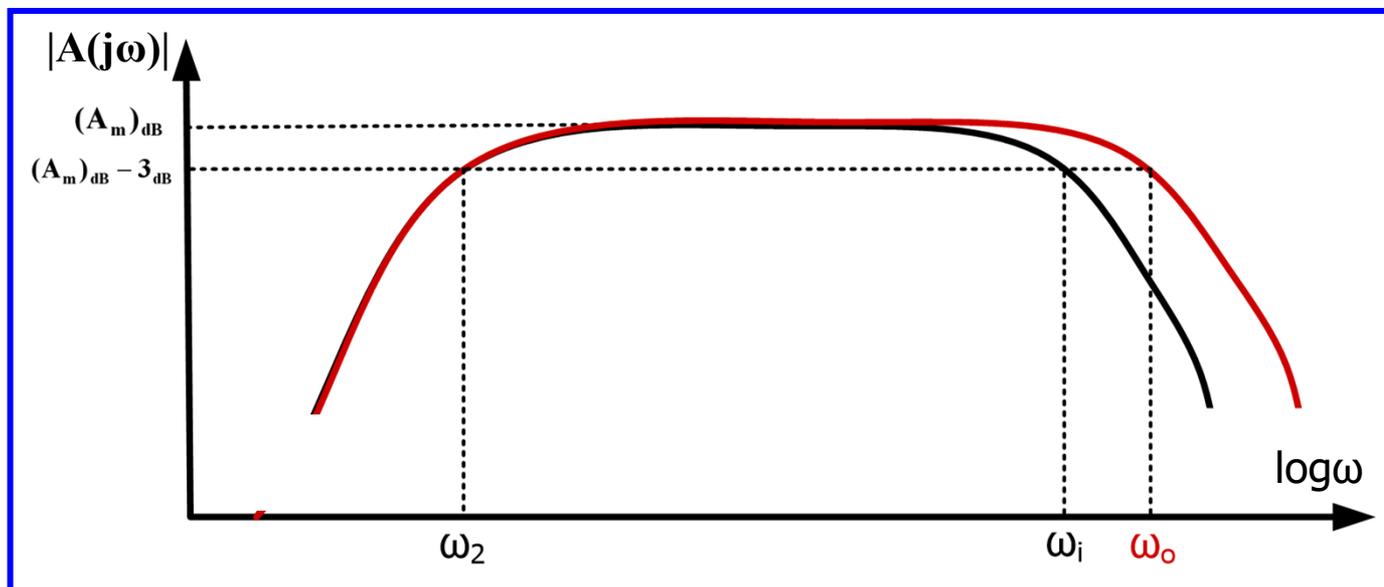
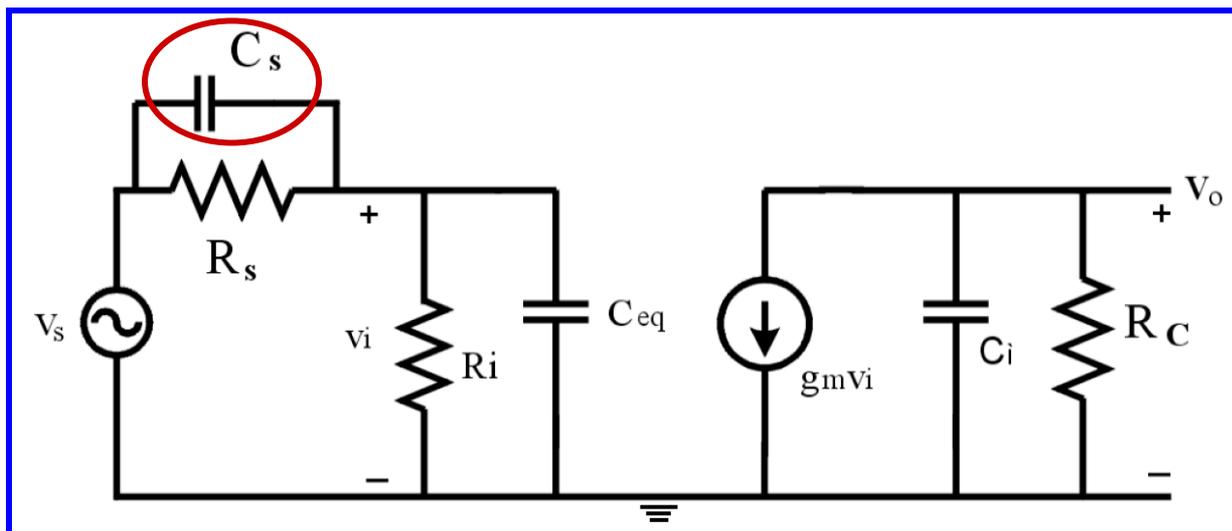
$$R_s C_s = R_i C_{eq}$$

με αποτέλεσμα την απλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς στις υψηλές συχνότητες και κατά συνέπεια την διεύρυνση της ανώτερης συχνότητας λειτουργίας σε τιμή που καθορίζεται πλέον από το κύκλωμα εξόδου.

$$A_H(s) = A_m \frac{1}{(\tau_o s + 1)}$$

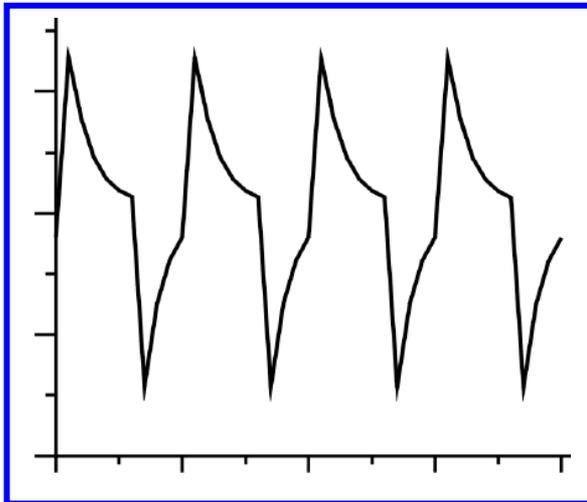
$$\omega_L = \omega_o$$

Διεύρυνση ανώτερης συχνότητας λειτουργίας

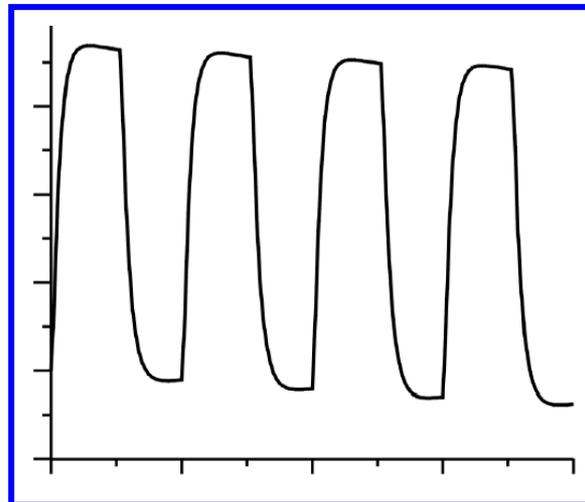


Απόκριση χρόνου ενισχυτή

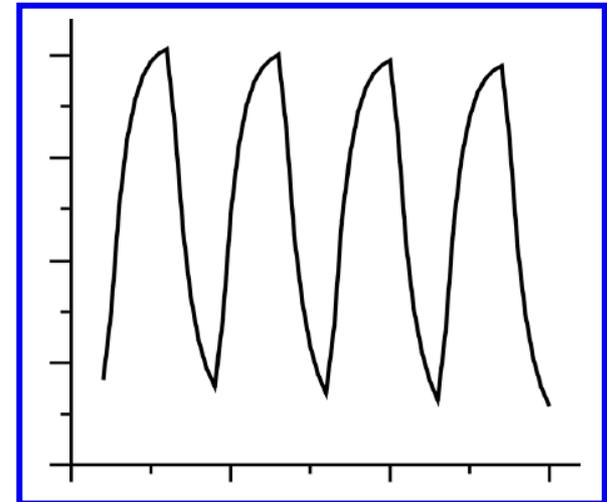
- Στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων η συμπεριφορά ενός ενισχυτή είναι υπερερατή, ενώ στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων η συμπεριφορά είναι βαθυερατή.
- Τις συμπεριφορές αυτές μπορούμε να τις διακρίνουμε και στην χρονική απόκριση ενός ενισχυτή με διέγερση (είσοδο) τετραγωνικού παλμού.



$f < f_L$: συμπεριφορά
διαφοριστή



$f_L < f < f_H$: γραμμική
συμπεριφορά



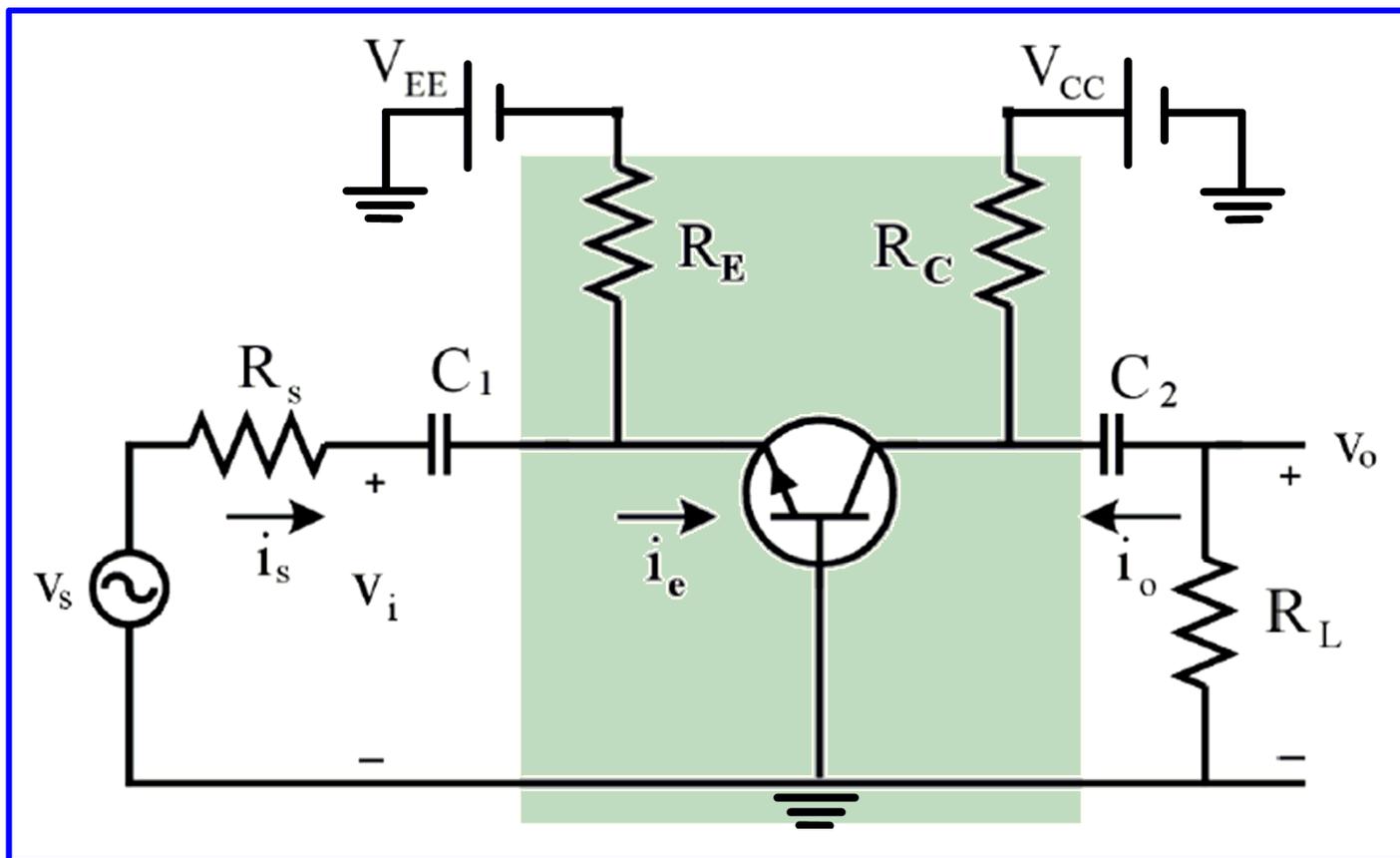
$f > f_H$: συμπεριφορά
ολοκληρωτή

Απόκριση χρόνου ενισχυτή

- Είναι φανερό ότι η μορφή του παλμού εξόδου του ενισχυτή όταν αυτός διεγείρεται με τετραγωνικό παλμό, υποδηλώνει τη συμπεριφορά του ενισχυτή.
- Για παράδειγμα όταν η συχνότητα του τετραγωνικού παλμού εισόδου επιλεγεί μέσα στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, τότε ο παλμός εξόδου τείνει να είναι τετραγωνικός, αφού στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων η ενίσχυση παραμένει σταθερή και η φάση γραμμική.
- Στην περίπτωση όπου η συχνότητα του παλμού εισόδου υπερβεί την ανώτερη συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή, η κυματομορφή εξόδου γίνεται τριγωνική (συμπεριφορά ολοκληρωτή).
- Επομένως, παρατηρώντας τριγωνική κυματομορφή εξόδου σε έναν ενισχυτή μπορούμε να επέμβουμε διορθωτικά στο κύκλωμά του και να διευρύνουμε την ανώτερη συχνότητα λειτουργίας ώστε να αποκαταστήσουμε τον παλμό σε τετραγωνικό.
- Μια τέτοια διορθωτική επέμβαση μπορεί να είναι η παράλληλη σύνδεση ενός πυκνωτή στην αντίσταση R_s του ενισχυτή.

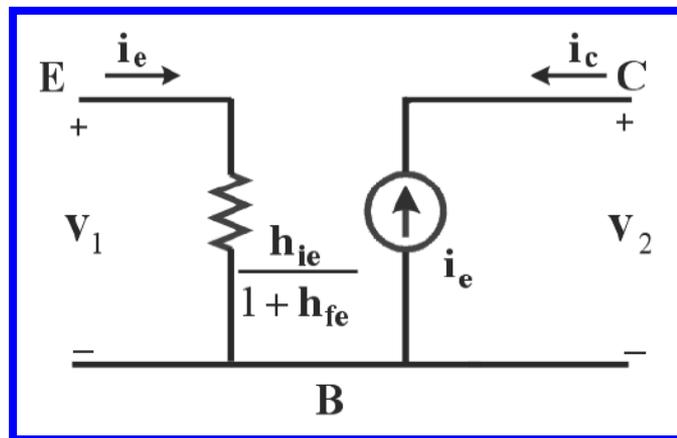
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής βάσης

Η μελέτη της απόκρισης συχνότητας του ενισχυτή κοινής βάσης γίνεται με την ίδια μέθοδο που ακολουθήθηκε για τον ενισχυτή κοινού εκπομπού (μέθοδος σταθερών χρόνου και προσέγγιση επικρατούντος πόλου).



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής βάσης

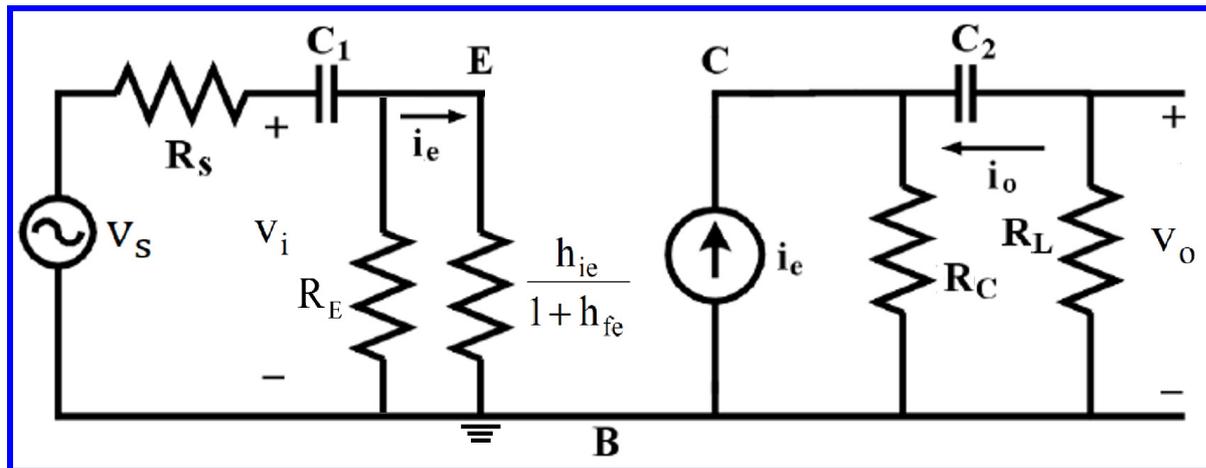
- Μελετάμε πρώτα τον ενισχυτή στην **περιοχή των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων**.
- Κι εδώ συνυπάρχουν δύο πυκνωτές σύζευξης, οπότε η απόκριση συχνότητας προσεγγίζεται θεωρώντας την επίδραση καθενός από τους δύο πυκνωτές ανεξάρτητα και λαμβάνοντας στο τέλος τη συνδυασμένη δράση και των δύο πυκνωτών.
- Θεωρώντας αρχικά ότι επιδρά στο κύκλωμα μόνο ο πυκνωτής C_1 (ενώ ο πυκνωτής C_2 λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα) και στη συνέχεια ότι επιδρά μόνο ο πυκνωτής C_2 (ενώ ο πυκνωτής C_1 λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα), σχεδιάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή (για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης), με βάση το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ για τις χαμηλές και τις μεσαίες συχνότητες.



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής βάσης

Ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή για την **περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων**

$$R'_L = R_C \parallel R_L$$



Ενίσχυση στις μεσαίες συχνότητες
(πυκνωτές C_1 και C_2 : βραχυκυκλώματα):

$$v_o = i_e R'_L = \frac{v_i}{\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}} R'_L$$

$$R_i = R_E \parallel \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} = R_E \parallel \frac{r_\pi}{1 + g_m r_\pi}$$

$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s$$

$$v_o = \frac{(1 + h_{fe}) \cdot R_i \cdot R'_L}{h_{ie} \cdot (R_i + R_s)} \cdot v_s \Rightarrow A_m = \frac{v_o}{v_s} = \frac{(1 + h_{fe}) \cdot R_i \cdot R'_L}{h_{ie} \cdot (R_i + R_s)}$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής βάσης

- Παρατηρούμε ότι το κύκλωμα εισόδου και το κύκλωμα εξόδου του ενισχυτή έχουν υπερερατή συμπεριφορά.
- Για το κύκλωμα εισόδου, προσδιορίζεται η συχνότητα αποκοπής ως εξής:

$$\omega_1 = \frac{1}{\tau_1}$$

$$\tau_1 = (R_s + R_i) C_1$$

- Για το κύκλωμα εξόδου, προσδιορίζεται η συχνότητα αποκοπής ως εξής:

$$\omega_2 = \frac{1}{\tau_2}$$

$$\tau_2 = (R_C + R_L) C_2$$

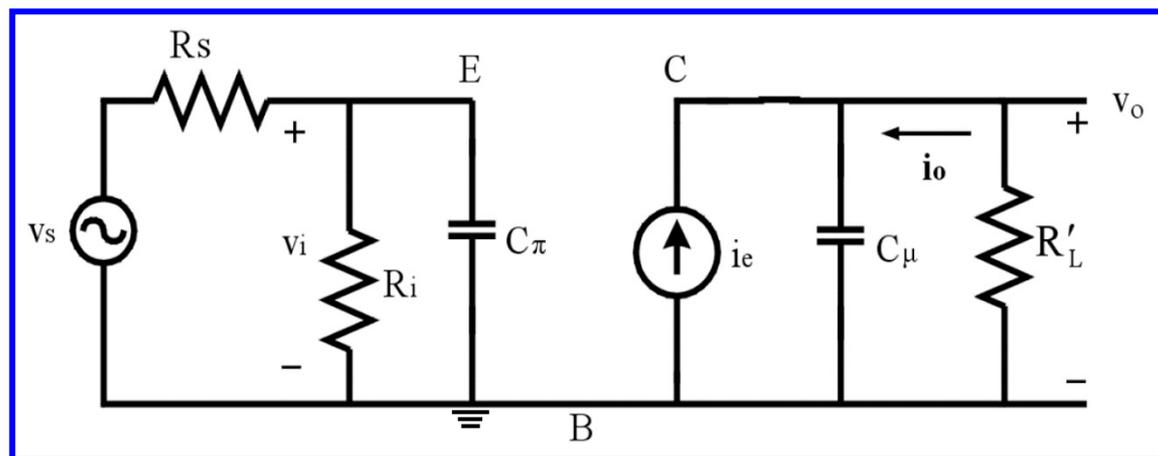
- Συνήθως, στους ενισχυτές κοινής βάσης οι πυκνωτές σύζευξης έχουν παρόμοια τιμή και

$$R_s + R_i \ll R_C + R_L \Rightarrow \omega_1 \gg \omega_2$$

- Επομένως, το κύκλωμα εισόδου (που περιλαμβάνει τον πυκνωτή C_1) είναι αυτό που καθορίζει την κατώτερη συχνότητα αποκοπής ($\omega_1 = \omega_L$).

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής βάσης

- Ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή για την **περιοχή των υψηλών συχνοτήτων**, όπου λαμβάνονται υπόψη οι παρασιτικές χωρητικότητες του τρανζίστορ:



C_{π} είναι η χωρητικότητα της επαφής βάσης-εκπομπού και C_{μ} είναι η χωρητικότητα της επαφής βάσης-συλλέκτη.

Συνεπώς, στους ενισχυτές ΚΒ δεν χρειάζεται η εφαρμογή του θεωρήματος Miller.

- Παρατηρούμε ότι τα κυκλώματα εισόδου και εξόδου παρουσιάζουν βαθυπερατή συμπεριφορά.

$$\omega_i = \frac{1}{\tau_i}$$

$$\omega_o = \frac{1}{\tau_o}$$

$$\tau_i = (R_i \parallel R_s) C_{\pi}$$

$$\tau_o = R'_L C_{\mu}$$

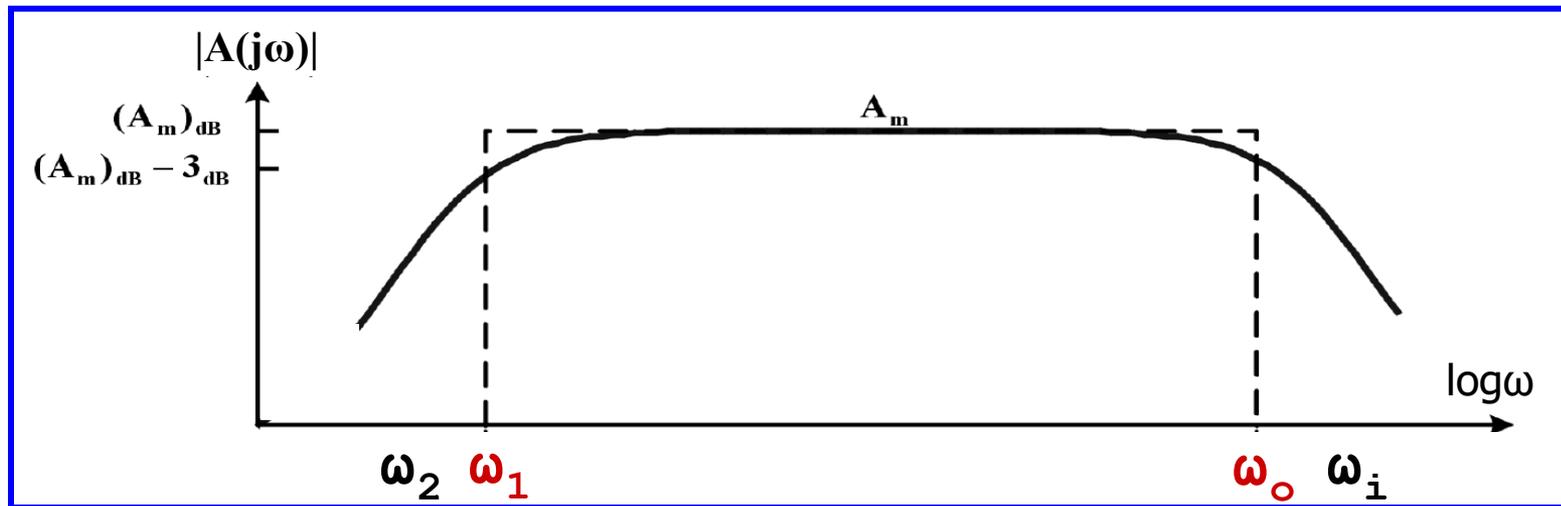
Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του κυκλώματος εξόδου.

Συνεπώς, σε ενισχυτές ΚΒ το κύκλωμα εξόδου καθορίζει την ανώτερη συχνότητα αποκοπής ($\omega_L = \omega_o$)

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής βάσης

- Με βάση τα προηγούμενα, η ενίσχυση του κυκλώματος προσεγγίζεται ως εξής:

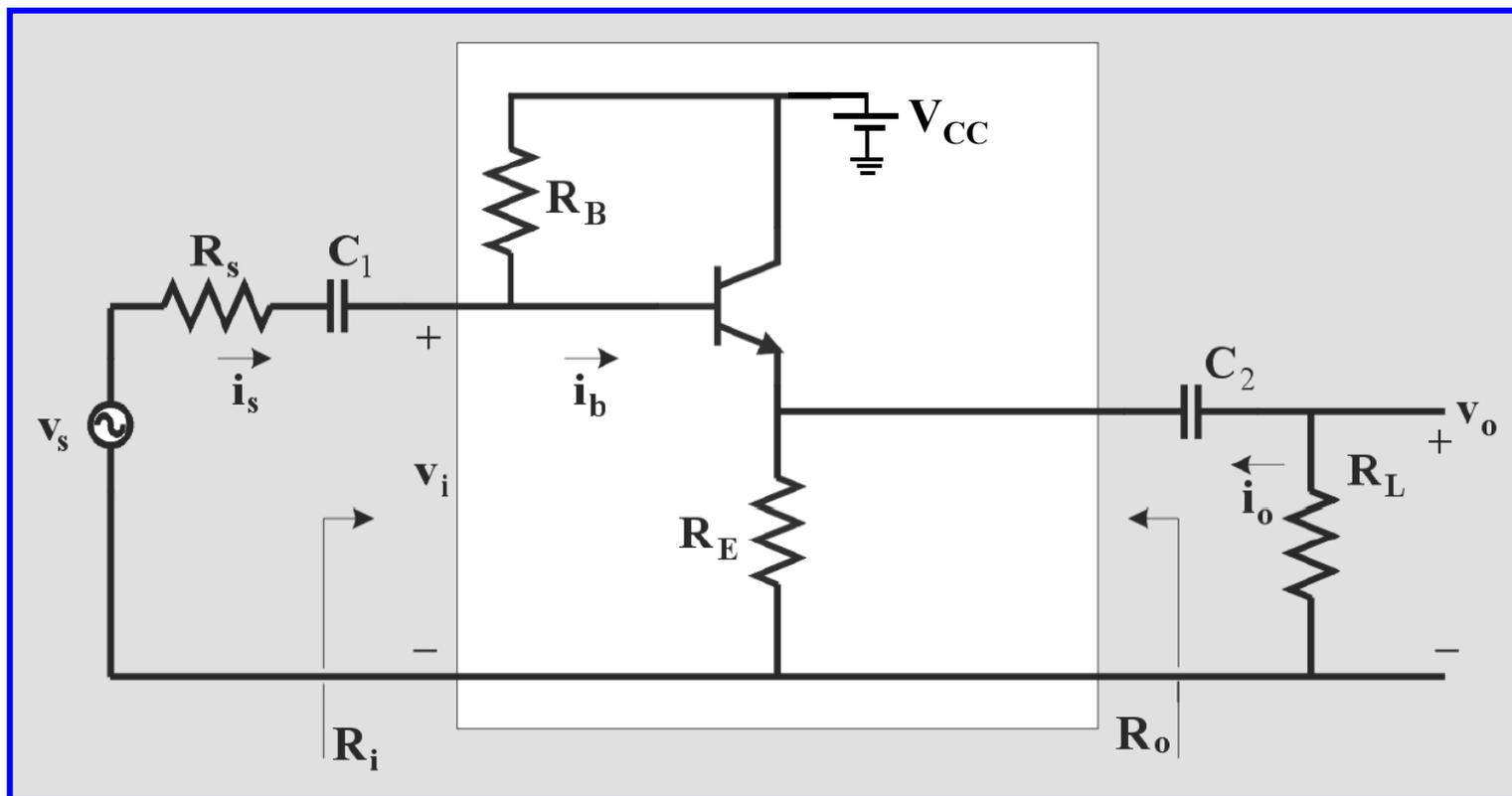
$$A(s) = \frac{A_m \cdot \tau_1 s}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_0 s + 1)} = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$



- Λαμβάνοντας υπόψη ότι συνήθως η ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος εξόδου του ενισχυτή κοινής βάσης είναι μικρότερη από την ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος εισόδου του ενισχυτή κοινού εκπομπού, προκύπτει ότι ο **ενισχυτής κοινής βάσης** έχει στις **υψηλές συχνότητες καλύτερη συμπεριφορά** (μεγαλύτερη ανώτερη συχνότητα αποκοπής) από τον **ενισχυτή κοινού εκπομπού**.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού συλλέκτη

Η μελέτη της απόκρισης συχνότητας του ενισχυτή κοινού συλλέκτη γίνεται με την ίδια μέθοδο που ακολουθήθηκε για τους δύο προηγούμενους ενισχυτές.



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού συλλέκτη

Μετά την ανάλυση του ενισχυτή κοινού συλλέκτη για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων που διενεργήθηκε στην ενότητα 2, προέκυψαν οι σχέσεις προσδιορισμού της ενίσχυσης τάσης, της αντίστασης εισόδου και της αντίστασης εξόδου του ενισχυτή.

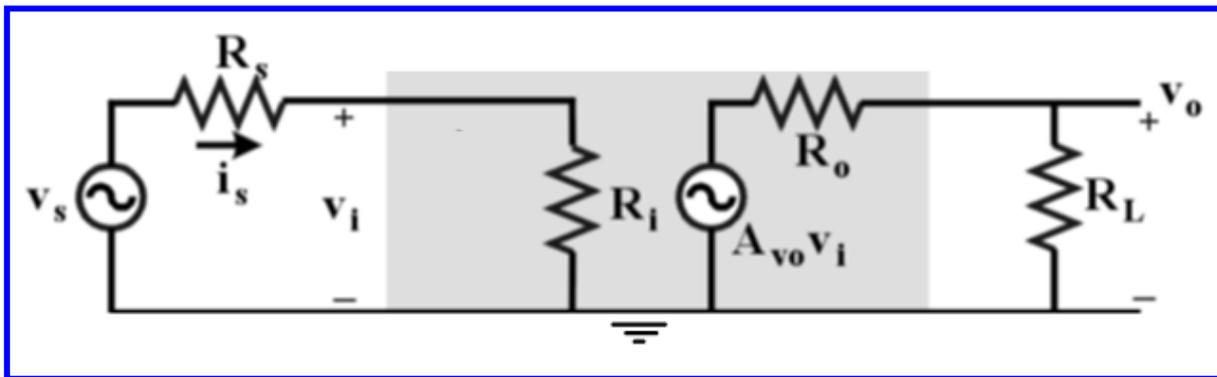
$$A_{vi} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L}$$

Η τιμή της A_{vi} προσεγγίζει το 1

$$R_i = \frac{[h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L]R_B}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L + R_B}$$

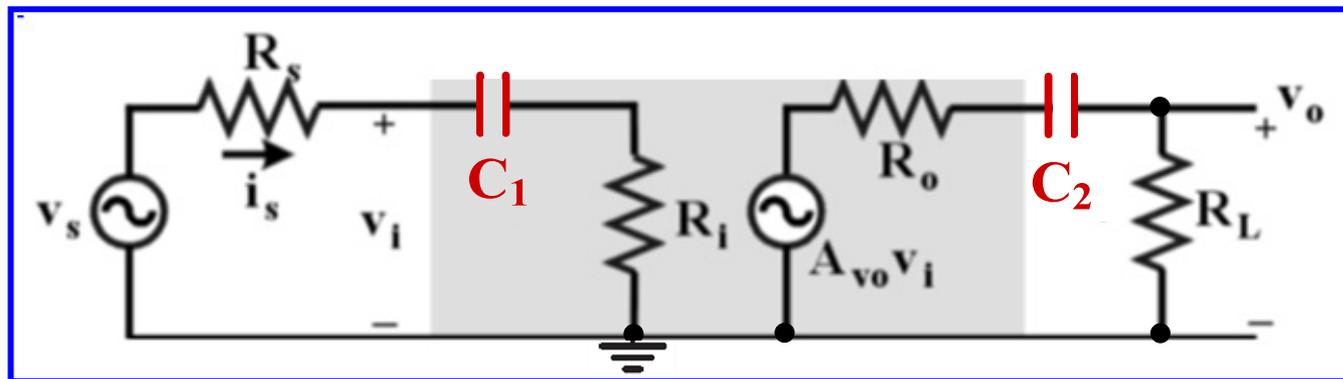
$$A_m = \frac{v_o}{v_s} = \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L} \frac{R_i}{R_i + R_s} < 1$$

$$R_o = \frac{R_E \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}}{R_E + \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}}$$



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού συλλέκτη

Χαμηλές
συχνότητες



- Τα κυκλώματα εισόδου και εξόδου έχουν **υψηλερατή συμπεριφορά**.
- Συχνότητα αποκοπής κυκλώματος εισόδου:

$$\omega_1 = \frac{1}{\tau_1}$$

$$\tau_1 = (R_s + R_i)C_1$$

- Συχνότητα αποκοπής κυκλώματος εξόδου:

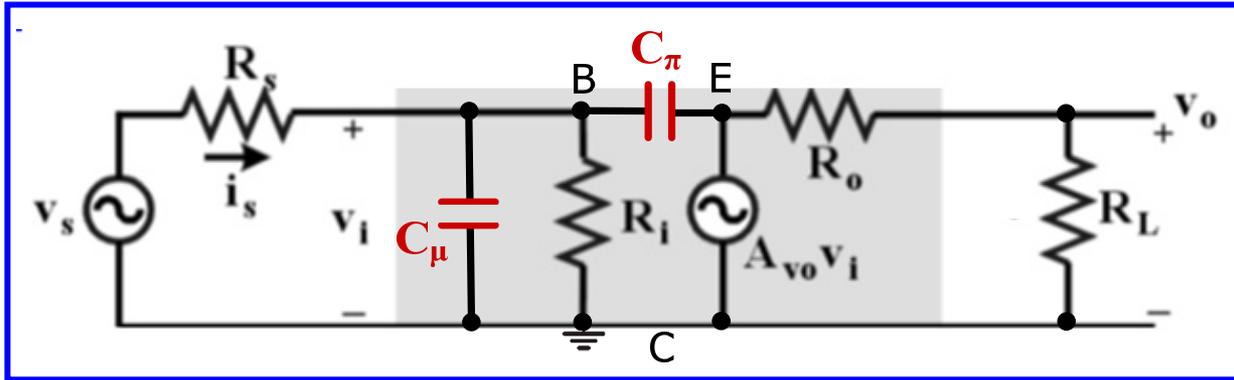
$$\omega_2 = \frac{1}{\tau_2}$$

$$\tau_2 = (R_o + R_L)C_2$$

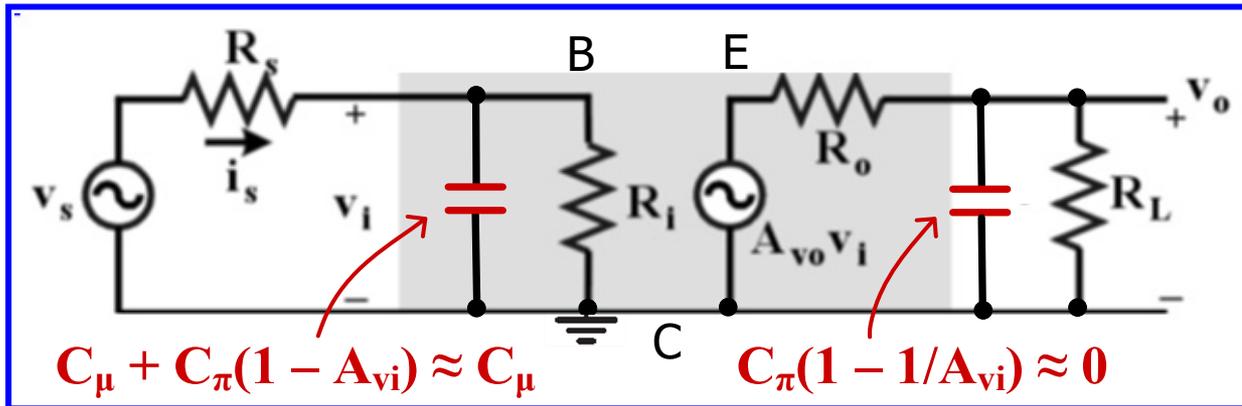
- Στους ενισχυτές κοινού συλλέκτη οι πυκνωτές σύζευξης έχουν παρόμοια τιμή και η αντίσταση εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση εξόδου ($\tau_1 > \tau_2$). Επομένως, η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εξόδου καθορίζει την κατώτερη συχνότητα αποκοπής ($\omega_L = \omega_2$).

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού συλλέκτη

- Στις **υψηλές συχνότητες** προσθέτουμε στο ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή τις χωρητικότητες της **επαφής βάσης-εκπομπού (C_π)** και της **επαφής βάσης-συλλέκτη (C_μ)**.



- Χρησιμοποιούμε το **θεώρημα τάσεων του Miller**, οπότε η χωρητικότητα C_π χωρίζεται σε 2 χωρητικότητες συνδεδεμένες παράλληλα στην είσοδο και στην έξοδο: την **χωρητικότητα εισόδου $C_\pi \cdot (1 - k)$** και την **χωρητικότητα εξόδου $C_\pi \cdot (1 - 1/k)$** , με $k = V_2 / V_1 = A_{vi}$.



$$A_{vi} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L}$$

$$(1 + h_{fe}) \cdot R'_L \gg h_{ie} \\ \Rightarrow A_{vi} \approx 1$$

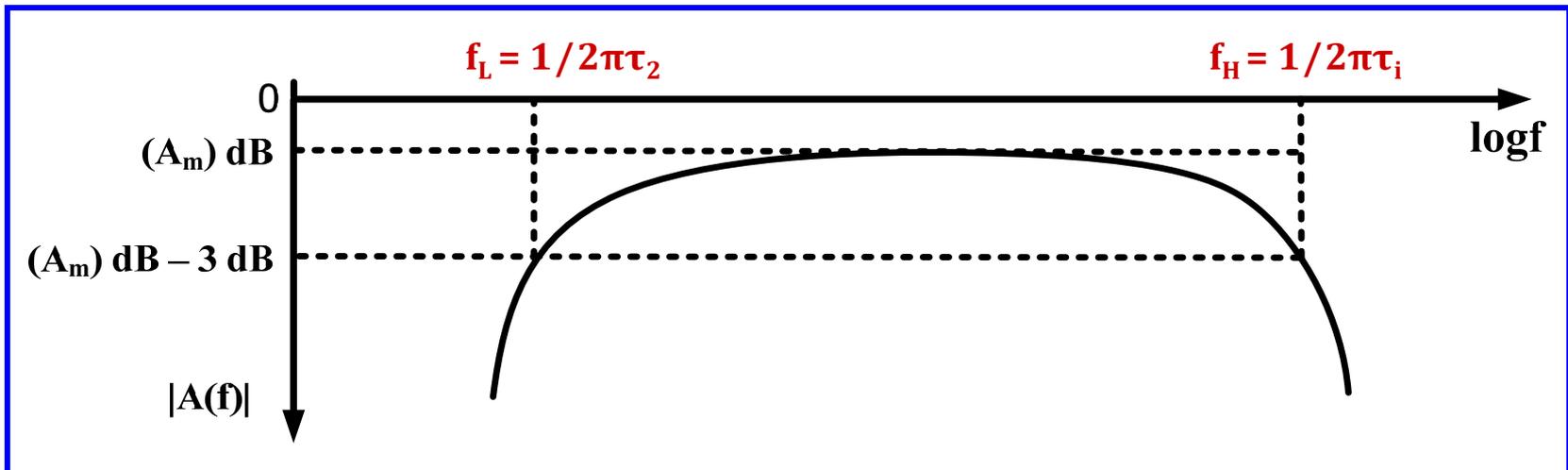
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινού συλλέκτη

- Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου, το οποίο παρουσιάζει **βαθυπερατή συμπεριφορά**, είναι αυτή που αντιστοιχεί στην ανώτερη συχνότητα αποκοπής:

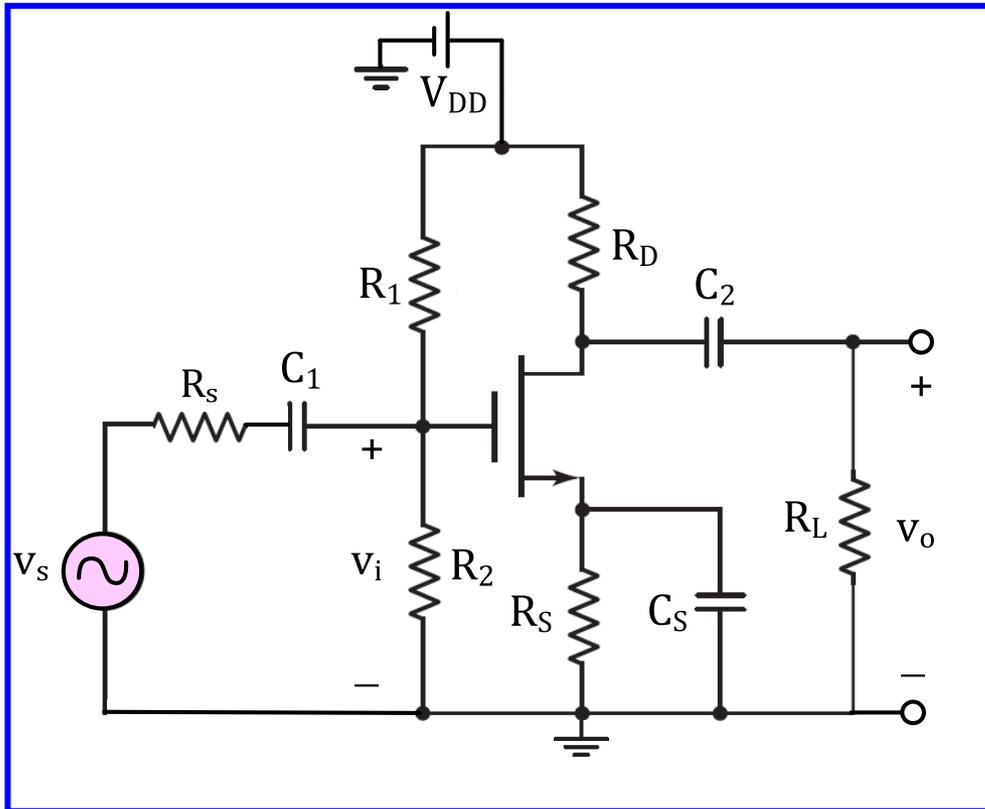
$$\tau_H = \tau_i = (R_i || R_s) C_{\mu}$$
$$\omega_H = \frac{1}{\tau_H} = \frac{1}{(R_i || R_s) C_{\mu}}$$

- Με βάση τα προηγούμενα, η ενίσχυση του κυκλώματος προσεγγίζεται ως εξής:

$$A(s) = \frac{A_m \cdot \tau_2 s}{(\tau_2 s + 1) \cdot (\tau_i s + 1)} = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$



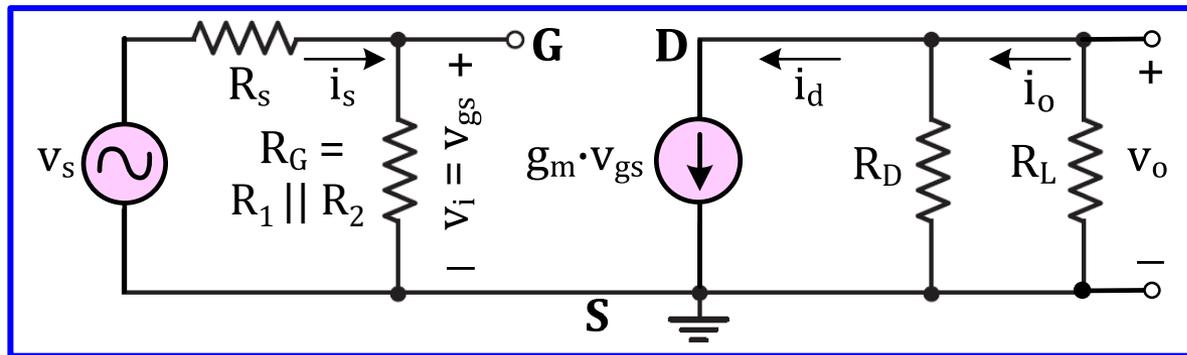
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής



- Στις **χαμηλές συχνότητες**, ο ενισχυτής έχει **υψηλερατή συμπεριφορά** λόγω της επίδρασης των πυκνωτών σύζευξης (C_1, C_2) και του πυκνωτή παράκαμψης (C_S).
- Στις **υψηλές συχνότητες**, ο ενισχυτής έχει **βαθυερατή συμπεριφορά** λόγω της επίδρασης των παρασιτικών χωρητικότητων του MOSFET.
- Η συμπεριφορά του ενισχυτή στις **χαμηλές συχνότητες** καθορίζεται από τις **σταθερές χρόνου** που σχηματίζουν οι **πυκνωτές σύζευξης και παράκαμψης** με τις αντιστάσεις του ενισχυτή, ενώ η συμπεριφορά του ενισχυτή στις **υψηλές συχνότητες** καθορίζεται από τις **σταθερές χρόνου** που σχηματίζουν οι **παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET** με τις αντιστάσεις του ενισχυτή.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

- Στην **περιοχή μεσαίων συχνοτήτων** η ενίσχυση προσδιορίστηκε στην 3^η ενότητα με ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος του ενισχυτή, θεωρώντας ότι οι πυκνωτές σύζευξης και παράκαμψης λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα και οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET ως ανοικτά κυκλώματα.



- Ενίσχυση τάσης στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων:**

$$v_o = -g_m v_{gs} R'_L \Rightarrow v_o = -g_m R'_L \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s \Rightarrow$$

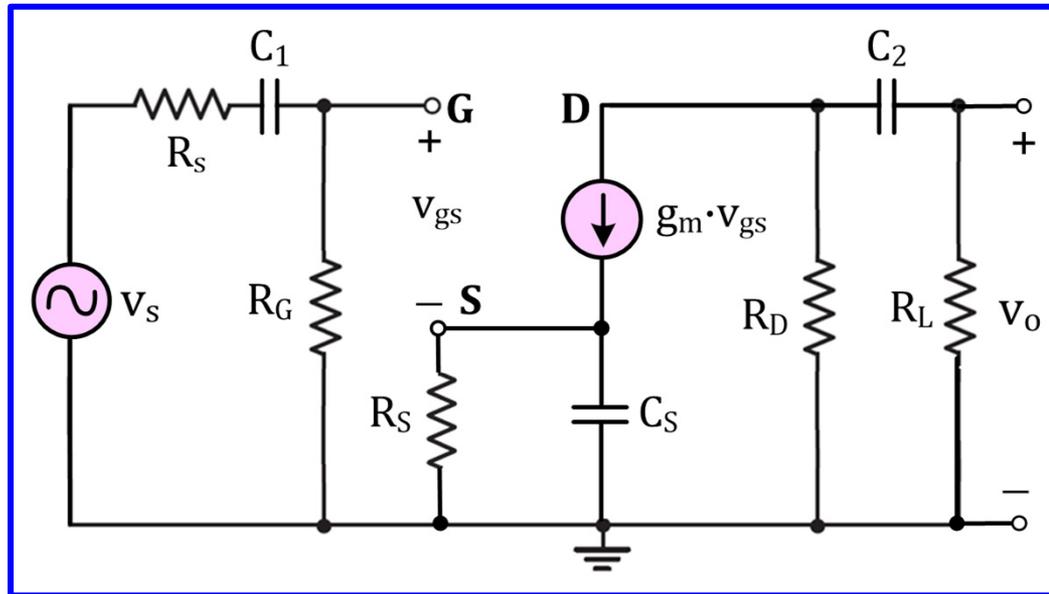
$$A_m = v_o / v_s = -g_m R'_L \frac{R_G}{R_s + R_G}$$

$$R_G = R_1 || R_2$$

$$R'_L = R_D || R_L$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

- Στην **περιοχή χαμηλών συχνοτήτων** η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή για τις χαμηλές και τις μεσαίες συχνότητες, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση των πυκνωτών σύζευξης και παράκαμψης.



- Θεωρούμε ότι **κάθε πυκνωτής επιδρά στο κύκλωμα ανεξάρτητα** και υπολογίζουμε την **σταθερά χρόνου που σχηματίζει κάθε πυκνωτής με τις αντιστάσεις** του κυκλώματος. Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης που συμμετέχει σε κάθε σταθερά χρόνου, βραχυκυκλώνουμε την πηγή σήματος του ενισχυτή.
- Τα κυκλώματα που σχηματίζουν οι πυκνωτές του ενισχυτή με τις αντιστάσεις έχουν **υψηλερατή συμπεριφορά**.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

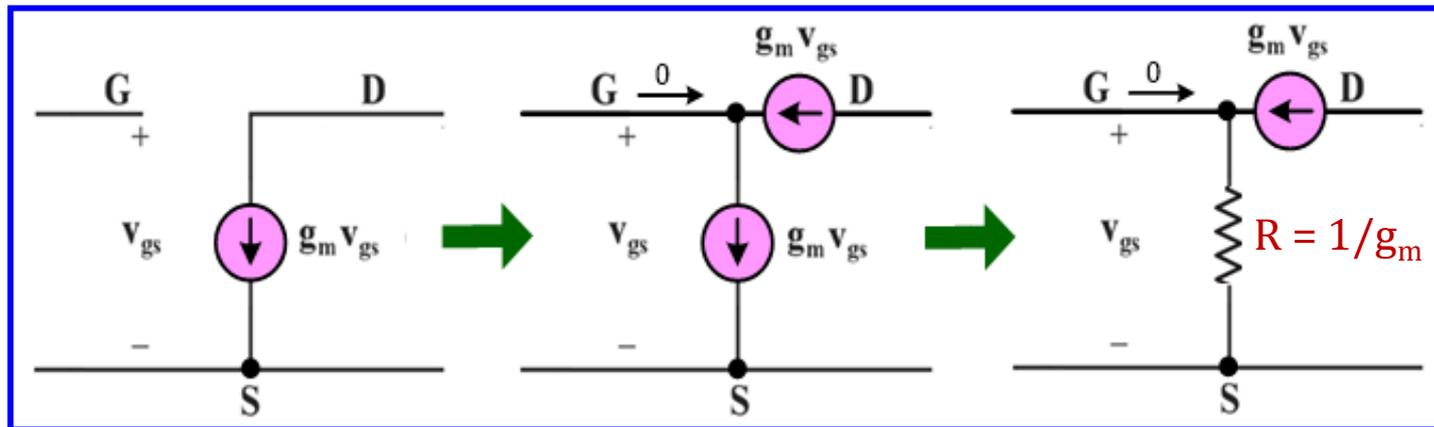
- Αρχικά, θεωρούμε ότι στην ενίσχυση επιδρά **μόνο ο πυκνωτής C_1** και υπολογίζουμε την αντίστοιχη σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου του ενισχυτή:

$$\tau_1 = (R_s + R_G)C_1$$

- Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εξόδου του ενισχυτή, σχετίζεται με τον **πυκνωτή C_2** :

$$\tau_2 = (R_D + R_L)C_2$$

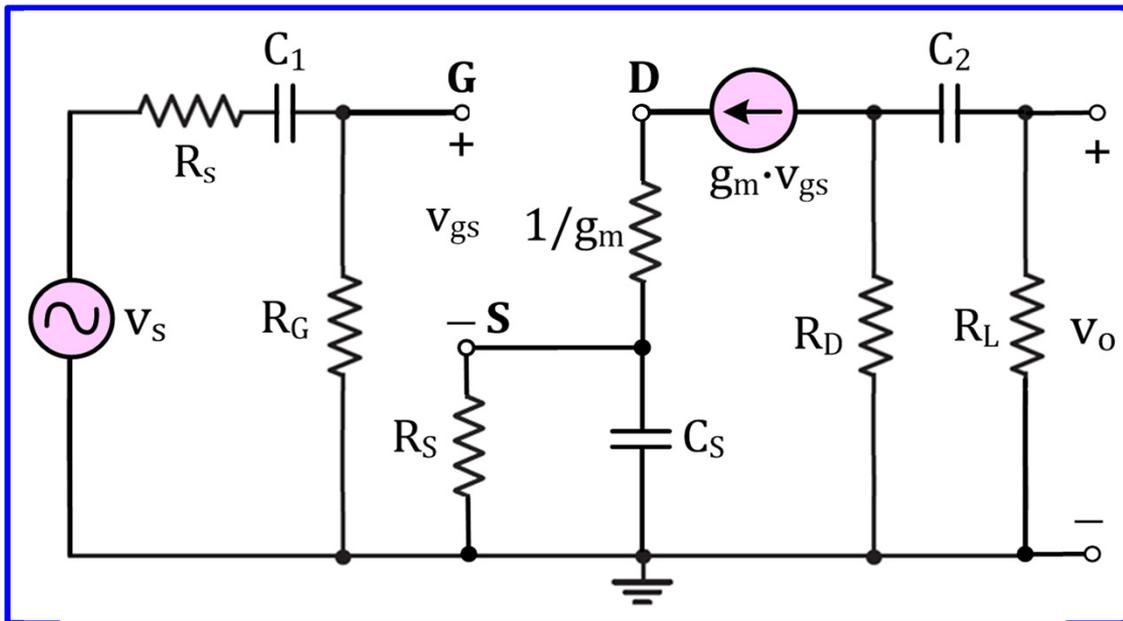
- Η σταθερά χρόνου (τ_s) του κυκλώματος πηγής, σχετίζεται με τον **πυκνωτή παράκαμψης C_s** .
- Ο υπολογισμός της σταθεράς χρόνου τ_s βασίζεται σε ένα **τροποποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μικρού σήματος του MOSFET**, που αναφέρεται ως **ισοδύναμο κύκλωμα T**.



$$\begin{aligned} R &= v / i \\ &= v_{gs} / g_m v_{gs} \\ &= 1 / g_m \end{aligned}$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

- Για την εξαγωγή του τροποποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος του MOSFET, αρχικά προσθέσαμε μια όμοια πηγή ρεύματος σε σειρά με την ήδη υπάρχουσα, η οποία δεν προκαλεί μεταβολή στο ρεύμα υποδοχής.
- Στη συνέχεια «γεφυρώσαμε» το ανοικτό κύκλωμα στην πύλη, χωρίς να προκαλείται μεταβολή στη λειτουργία του κυκλώματος, αφού το ρεύμα πύλης είναι μηδενικό.
- Αντικαταστήσαμε την πηγή ρεύματος που συνδέεται στην πηγή με μια **αντίσταση $1/g_m$** , η οποία διαρρέεται από ρεύμα όμοιο με εκείνο της πηγής ρεύματος.



Η ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος πηγής υπολογίζεται με βραχυκυκλωμένη πηγή σήματος ($v_s = 0 \Rightarrow g_m v_{gs} = 0$). Επομένως, οι αντιστάσεις R_s και $(1/g_m)$ συνδέονται παράλληλα αφού έχουν την ίδια τάση στα άκρα τους.

$$\tau_s = (R_s || 1/g_m) C_s$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

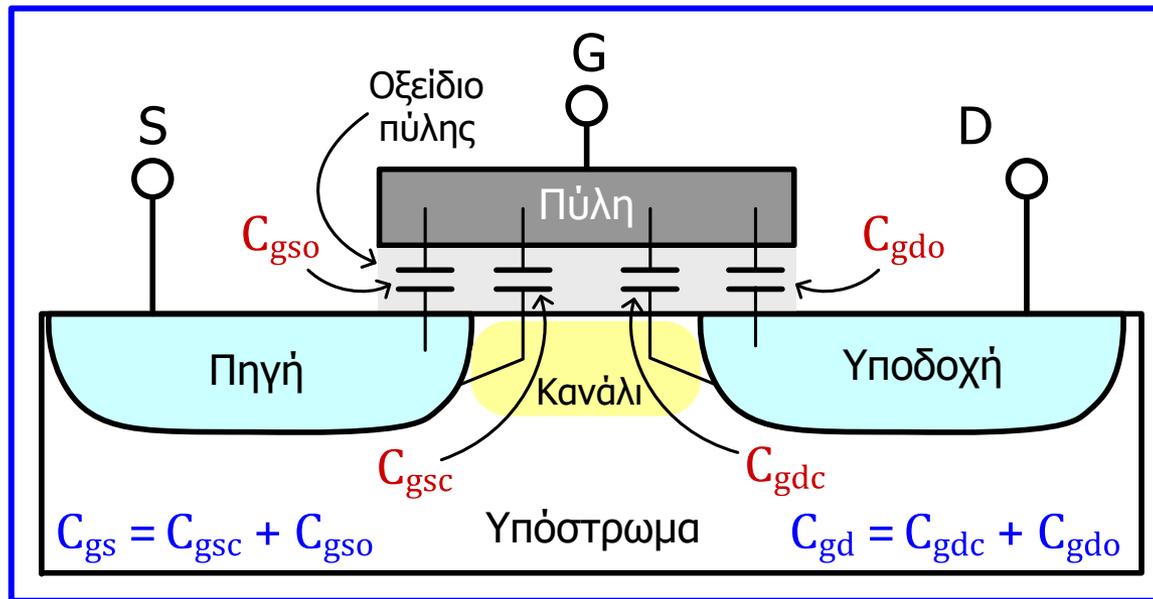
- Η **ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος πηγής ($R_s || 1/g_m$)** είναι συνήθως μικρότερη από τις **ισοδύναμες αντιστάσεις των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου**, οι οποίες σχετίζονται με τις σταθερές χρόνου τ_1 και τ_2 .
- Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τιμές των πυκνωτών σύζευξης και παράκαμψης είναι συνήθως παρόμοιες, συμπεραίνουμε ότι **ο επικρατών πόλος** (δηλαδή, ο πόλος της απόκρισης συχνότητας που καθορίζει την κατώτερη συχνότητα αποκοπής) είναι αυτός που **αντιστοιχεί στην σταθερά χρόνου τ_s** .

$$\omega_L = \frac{1}{\tau_s} \Rightarrow f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_s}$$

- Στις **χαμηλές και μεσαίες συχνότητες**, η επίδραση των παρασιτικών χωρητικοτήτων του MOSFET δεν λαμβάνονται υπόψη, αφού θεωρούνται ανοικτά κυκλώματα μιας και είναι 9-10 τάξεις μεγέθους μικρότερες από τους πυκνωτές σύζευξης και παράκαμψης.
- Στην **περιοχή των υψηλών συχνοτήτων** η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του **ισοδύναμου κυκλώματος του ενισχυτή που λαμβάνει υπόψη τις παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET**, θεωρώντας ως βραχυκυκλώματα τους πυκνωτές σύζευξης και παράκαμψης.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

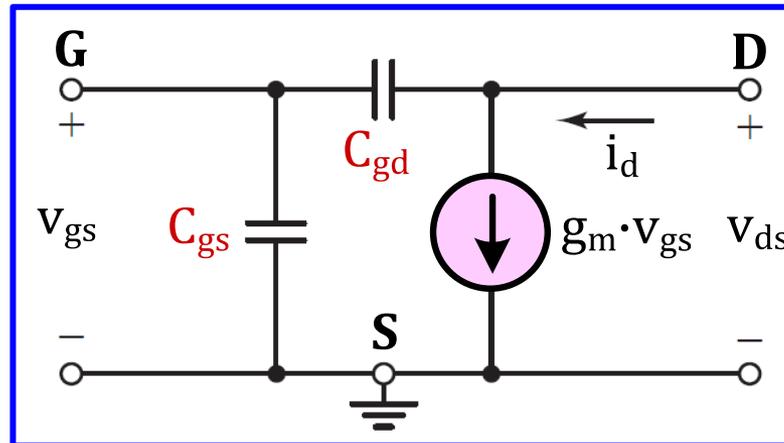
- Οι πιο σημαντικές παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET είναι εκείνες που δημιουργούνται **μεταξύ της πύλης και του καναλιού** κοντά στις περιοχές πηγής και υποδοχής (C_{gsc} και C_{gdc}), καθώς και οι χωρητικότητες που δημιουργούνται **μεταξύ της πύλης και των περιοχών πηγής και υποδοχής** (C_{gso} και C_{gdo}), λόγω του ότι το οξείδιο της πύλης **επικαλύπτει** τις περιοχές πηγής και υποδοχής.



- Επειδή στην **περιοχή κόρου** το κανάλι εξαντλείται (στενεύει) κοντά στην περιοχή υποδοχής, η χωρητικότητα C_{gdc} δεν υφίσταται, συνεπώς όταν το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή κόρου, η χωρητικότητα C_{gs} συνίσταται από τις χωρητικότητες C_{gsc} και C_{gso} , ενώ η C_{gd} ισούται με την χωρητικότητα επικάλυψης (C_{gdo}).

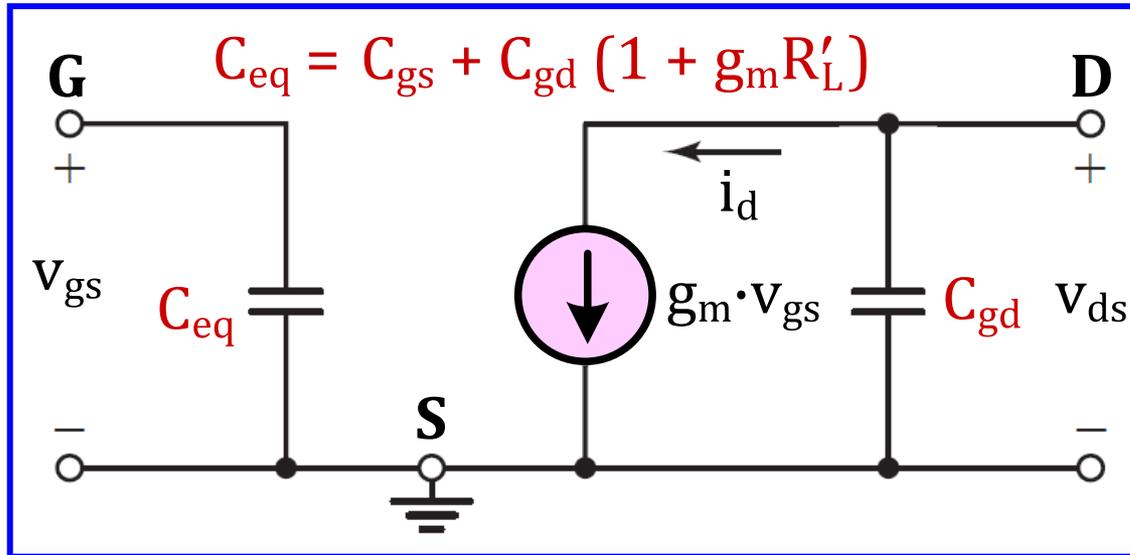
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

- Έτσι, στην περιοχή κόρου ενώ η χωρητικότητα C_{gs} είναι **μερικές δεκάδες fF** ($1 \text{ fF} = 10^{-15} \text{ F}$), η χωρητικότητα C_{gd} μπορεί να είναι **μικρότερη του fF** και να φτάνει **έως μερικά fF**.
- Οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET επιδρούν στην ενίσχυση και για να λάβουμε υπόψη την επίδρασή τους, χρησιμοποιούμε το **ισοδύναμο π μοντέλο του MOSFET με τα χωρητικά παρασιτικά στοιχεία C_{gs} (μεταξύ πύλης και πηγής) και C_{gd} (μεταξύ πύλης και υποδοχής)**.



- Για να διευκολυνθούμε στην ανάλυση του κυκλώματος, χρησιμοποιούμε το **θεώρημα τάσεων του Miller**, σύμφωνα με το οποίο η χωρητικότητα C_{gd} χωρίζεται σε δύο χωρητικότητες συνδεδεμένες παράλληλα στην είσοδο και στην έξοδο. Η **χωρητικότητα εισόδου** είναι $C_{gd}(1 - k)$ και η **χωρητικότητα εξόδου** είναι $C_{gd}(1 - 1/k)$, με $k = v_{ds} / v_{gs}$.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

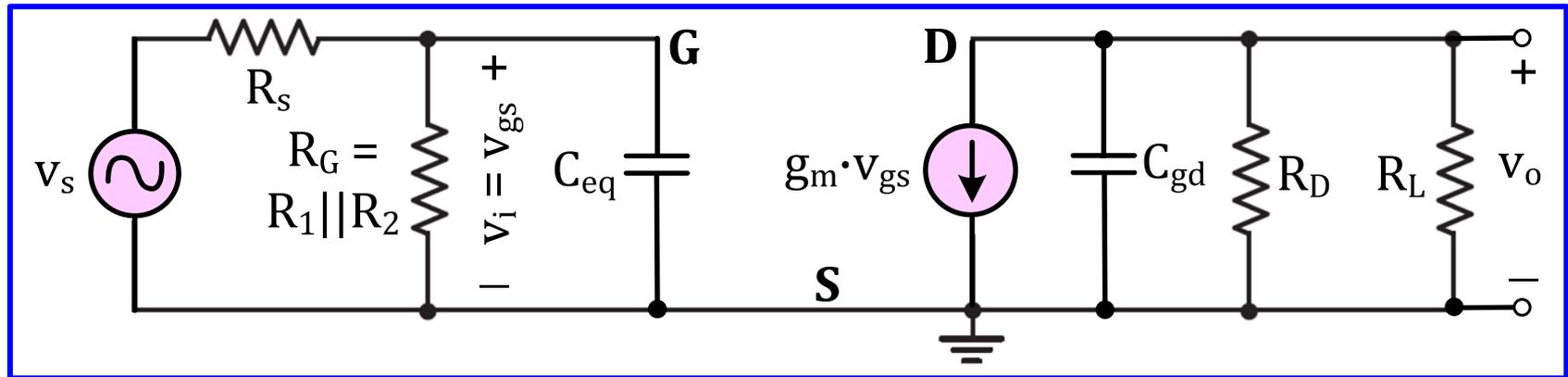


$$v_{ds} = -g_m R'_L v_{gs} \Rightarrow k = -g_m R'_L$$
$$C_{eq} = C_{gs} + C_{gd} (1 - k) = C_{gs} + C_{gd} (1 + g_m R'_L)$$
$$C_{gd} (1 - 1/k) \approx C_{gd}$$

R'_L : ισοδύναμη αντίσταση φορτίου που συνδέεται μεταξύ υποδοχής και γείωσης

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

- Στην **περιοχή υψηλών συχνοτήτων** το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή περιλαμβάνει δύο παρασιτικές χωρητικότητες στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η τάση εισόδου και η τάση εξόδου του ενισχυτή, αντίστοιχα. Οι πυκνωτές σύζευξης και παράκαμψης θεωρούνται ως βραχυκυκλώματα.



- Το **κύκλωμα εισόδου** και το **κύκλωμα εξόδου** του ενισχυτή έχουν **βαθυπερατή συμπεριφορά** και το καθένα έχει την δική του σταθερά χρόνου:

$$\tau_i = (R_s || R_G) C_{eq}$$
$$\tau_o = (R_D || R_L) C_{gd} = R'_L C_{gd}$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

- Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από τη σταθερά χρόνου του κυκλώματος εξόδου, οπότε το κύκλωμα εισόδου, στο οποίο αντιστοιχεί ο πόλος της απόκρισης με τη μικρότερη συχνότητα, είναι αυτό που καθορίζει την ανώτερη συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή.

$$\omega_H = \frac{1}{\tau_i} \Rightarrow f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_i}$$

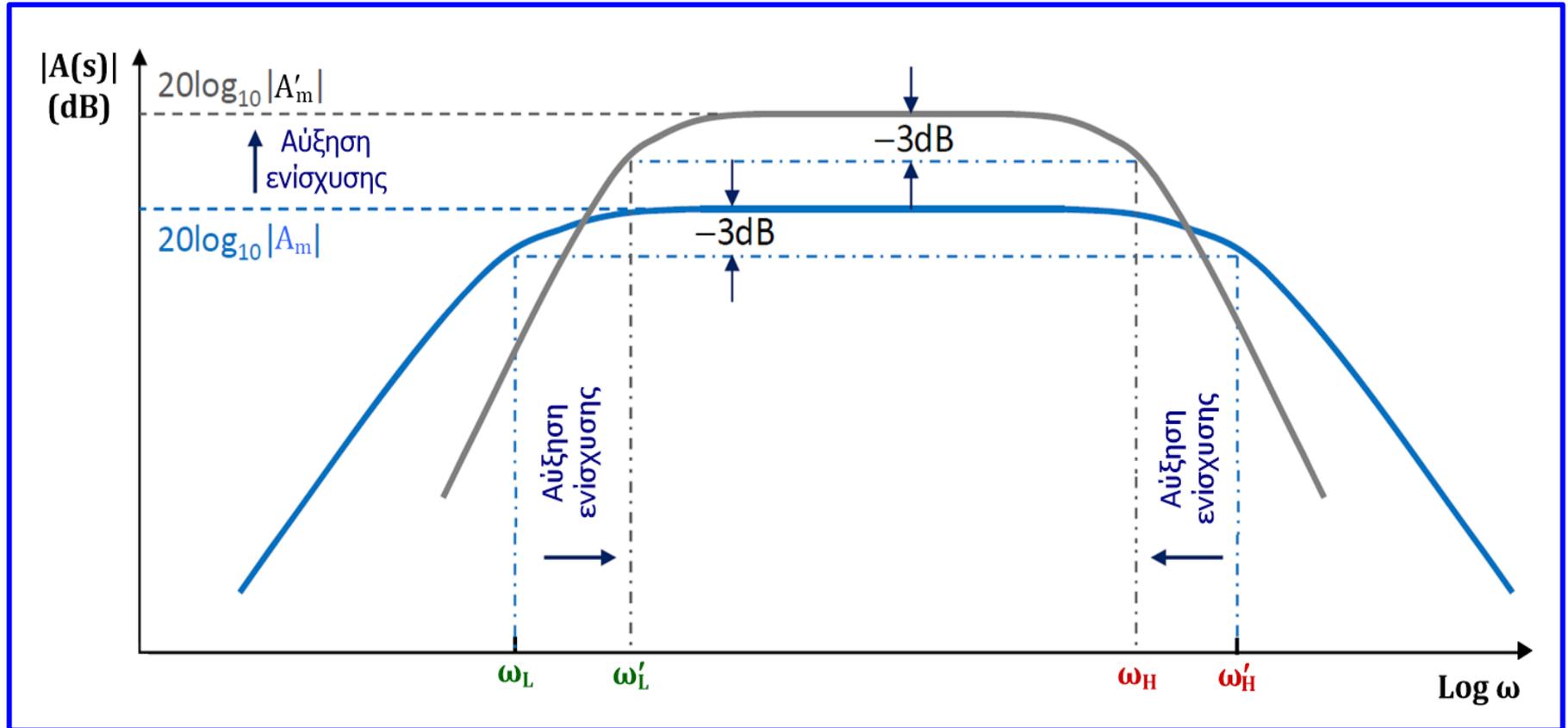
- Συμπεραίνουμε ότι:
 - ✓ Η κατώτερη συχνότητα αποκοπής (ω_L) καθορίζεται από την σταθερά χρόνου στην οποία συμμετέχει ο πυκνωτής παράκαμψης, αφού είναι αυτός που δημιουργεί τη μικρότερη σταθερά χρόνου.
 - ✓ Η ανώτερη συχνότητα αποκοπής (ω_H) καθορίζεται από την σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου του ενισχυτή, αφού από αυτό προκύπτει η μεγαλύτερη σταθερά χρόνου.
 - ✓ Όπως και οι προηγούμενοι ενισχυτές, ο ενισχυτής κοινής πηγής έχει ζωνοδιαβατή συμπεριφορά με εύρος ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων $BW = f_H - f_L$.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής

Ενίσχυση τάσης στις μεσαίες συχνότητες	$A_m = -g_m R'_L \frac{R_G}{R_s + R_G}$
Κατώτερη συχνότητα αποκοπής	$\omega_L = \frac{1}{\tau_s} = \frac{1}{(R_s 1/g_m) C_s} = \frac{1}{R_s + g_m} C_s$
Ανώτερη συχνότητα αποκοπής	$\omega_H = \frac{1}{\tau_i} = \frac{1}{(R_s R_G) C_{eq}} = \frac{1}{C_{gs} + C_{gd} \left(1 + g_m R'_L\right)} \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_G}\right)$

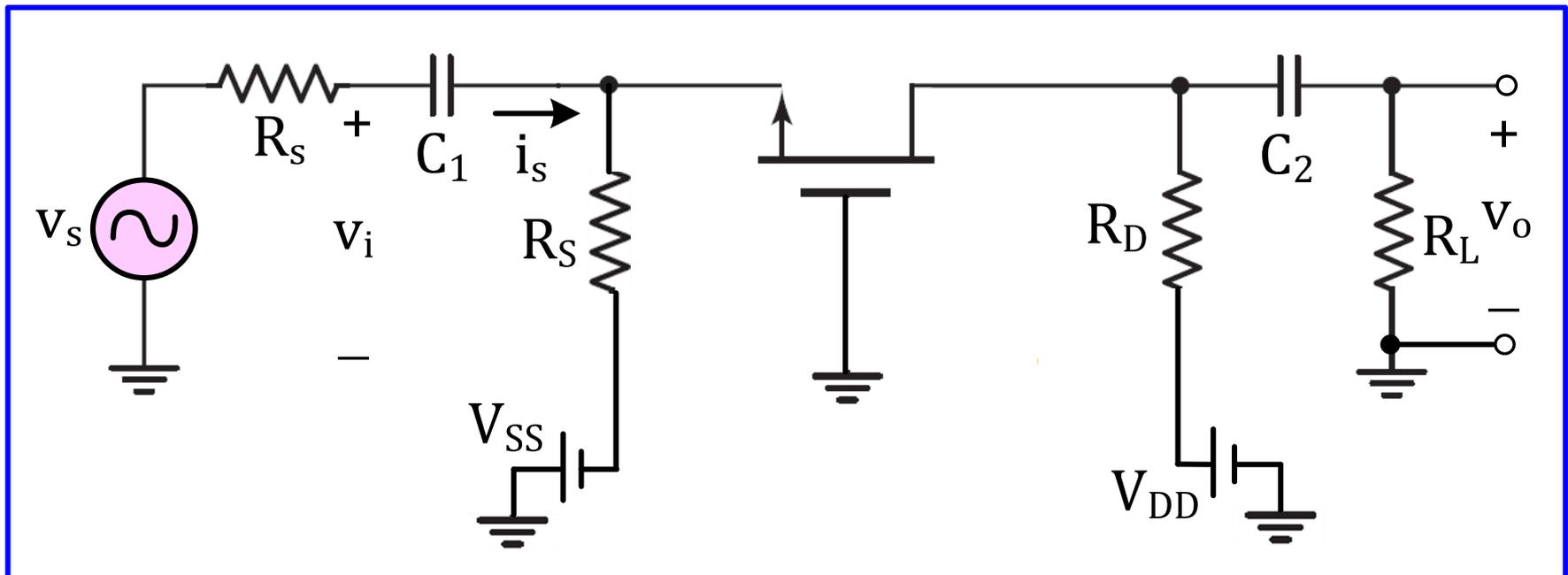
- Η ενίσχυση αυξάνεται όταν αυξηθεί ο παράγοντας $g_m R'_L$.
- Η f_L αυξάνεται όταν αυξηθεί η διαγωγιμότητα g_m .
- Η f_H μειώνεται όταν αυξηθεί ο παράγοντας $g_m R'_L$.
- Το $BW = f_H - f_L$ μειώνεται όταν αυξάνεται η f_L και μειώνεται η f_H .
- Επομένως, η αύξηση της ενίσχυσης στις μεσαίες συχνότητες έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εύρους ζώνης ενισχυμένων συχνοτήτων (BW) και αντιστρόφως, η αύξηση του BW μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ενίσχυσης.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πηγής



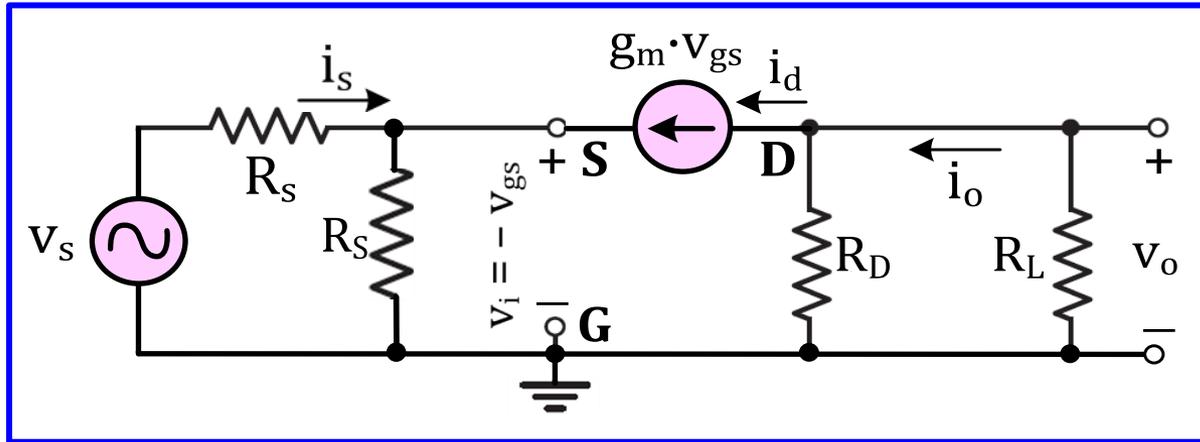
Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πύλης

Η μελέτη της απόκρισης συχνότητας του ενισχυτή κοινής πύλης γίνεται με την ίδια μέθοδο που ακολουθήθηκε για τον ενισχυτή κοινής πηγής (μέθοδος σταθερών χρόνου και προσέγγιση επικρατούντος πόλου).



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πύλης

- Στην **περιοχή μεσαίων συχνοτήτων** η ενίσχυση προσδιορίζεται από το ισοδύναμο κύκλωμα μικρού σήματος του ενισχυτή, θεωρώντας ότι οι πυκνωτές σύζευξης λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα και οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET ως ανοικτά κυκλώματα.



- **Ενίσχυση τάσης στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων:**

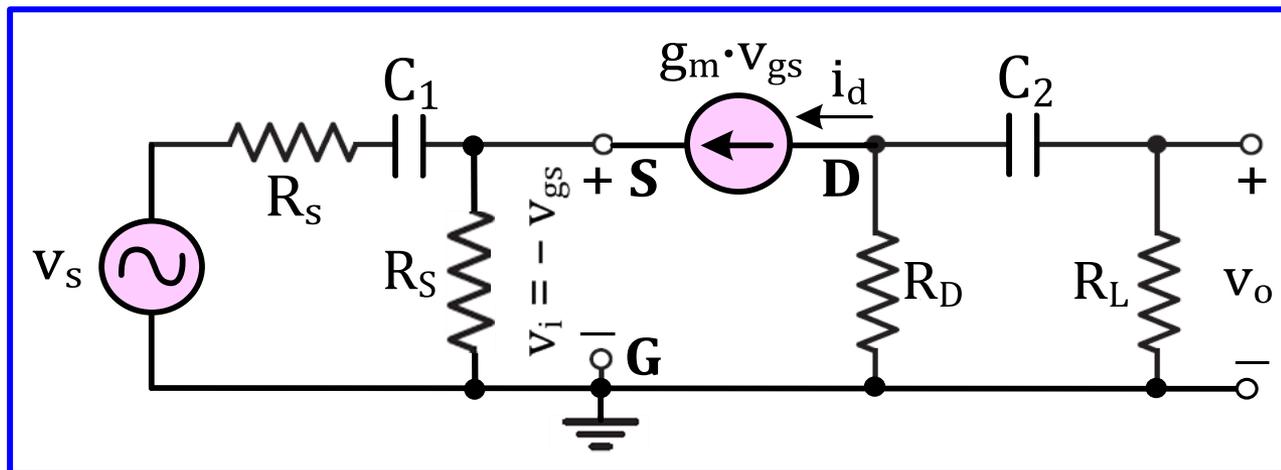
$$v_i = [R_i / (R_i + R_s)]v_s \Rightarrow v_{gs} = - [R_i / (R_i + R_s)]v_s$$

$$v_o = - g_m v_{gs} R'_L = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_s)]v_s$$

$$A_m = v_o / v_s = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_s)]$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πύλης

- Στην **περιοχή χαμηλών συχνοτήτων** η ενίσχυση προσδιορίζεται με ανάλυση του ισοδύναμου μοντέλου του ενισχυτή για τις χαμηλές και τις μεσαίες συχνότητες, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση των πυκνωτών σύζευξης.
- Θεωρούμε ότι **κάθε πυκνωτής επιδρά στο κύκλωμα ανεξάρτητα και υπολογίζουμε την σταθερά χρόνου που σχηματίζει κάθε πυκνωτής με τις αντιστάσεις του κυκλώματος.**
- Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης που συμμετέχει σε κάθε σταθερά χρόνου, βραχυκυκλώνουμε την πηγή σήματος του ενισχυτή.
- Τα κυκλώματα που σχηματίζουν οι πυκνωτές του ενισχυτή με τις αντιστάσεις έχουν **υψηλερατή συμπεριφορά.**



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πύλης

$$v_{gs} = - (i_s + i_d)R_S = - (i_s + g_m v_{gs})R_S \Rightarrow v_{gs} = - i_s R_S / (1 + g_m R_S)$$
$$R_i = v_i / i_s = - v_{gs} / i_s \Rightarrow R_i = R_S / (1 + g_m R_S)$$

- Αρχικά, θεωρούμε ότι στην ενίσχυση επιδρά **μόνο ο πυκνωτής C_1** και υπολογίζουμε την αντίστοιχη σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου του ενισχυτή:

$$\tau_1 = (R_S + R_i)C_1 = R_S C_1 + [R_S / (1 + g_m R_S)]C_1$$

- Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εξόδου του ενισχυτή, σχετίζεται με τον **πυκνωτή C_2** :

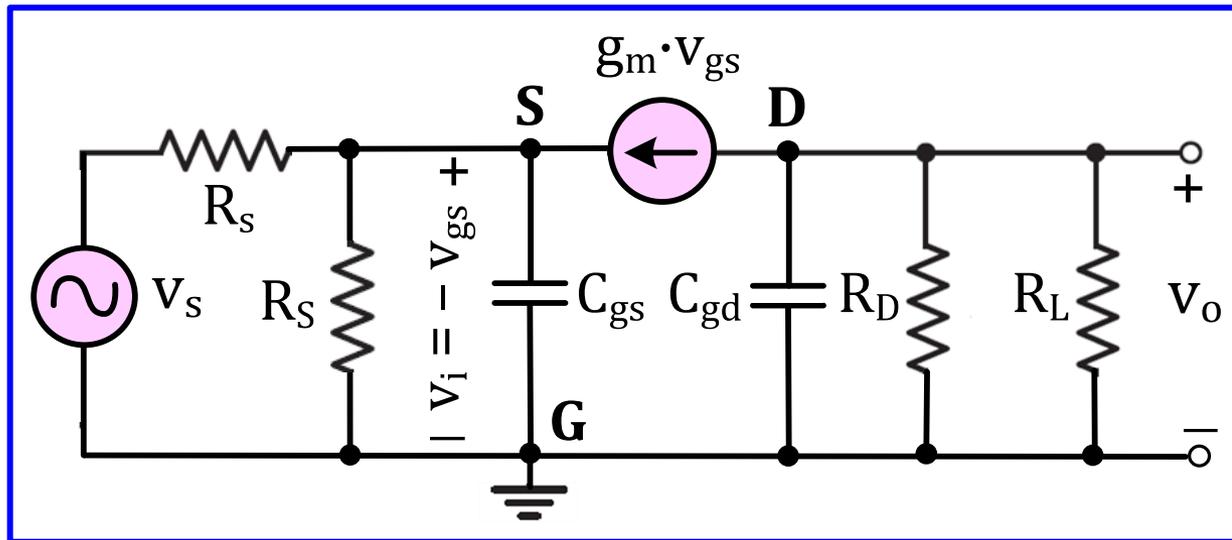
$$\tau_2 = (R_D + R_L)C_2$$

- Στους ενισχυτές κοινής πύλης η **ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος εισόδου είναι συνήθως αρκετά μικρότερη από την ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος εξόδου.**
- Επομένως, το **κύκλωμα RC στην είσοδο** (που περιλαμβάνει τον πυκνωτή C_1) είναι αυτό που καθορίζει την κατώτερη συχνότητα αποκοπής ($\omega_1 = \omega_L$).

$$\omega_L = \omega_1 = \frac{1}{\tau_1} \Rightarrow f_L = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_1}$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πύλης

- Στις **υψηλές συχνότητες**, ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή περιλαμβάνει **δύο παρασιτικές χωρητικότητες** (C_{gs} , C_{gd}). Στα άκρα τους εφαρμόζεται η τάση εισόδου και η τάση εξόδου του ενισχυτή, αντίστοιχα, δηλαδή **δεν υφίσταται χωρητικότητα μεταξύ εισόδου και εξόδου, φαινόμενο Miller**. Οι πυκνωτές σύζευξης θεωρούνται βραχυκυκλώματα.



$$\tau_i = (R_s || R_i) C_{gs}$$

$$\tau_o = (R_D || R_L) C_{gd}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_o} \Rightarrow$$

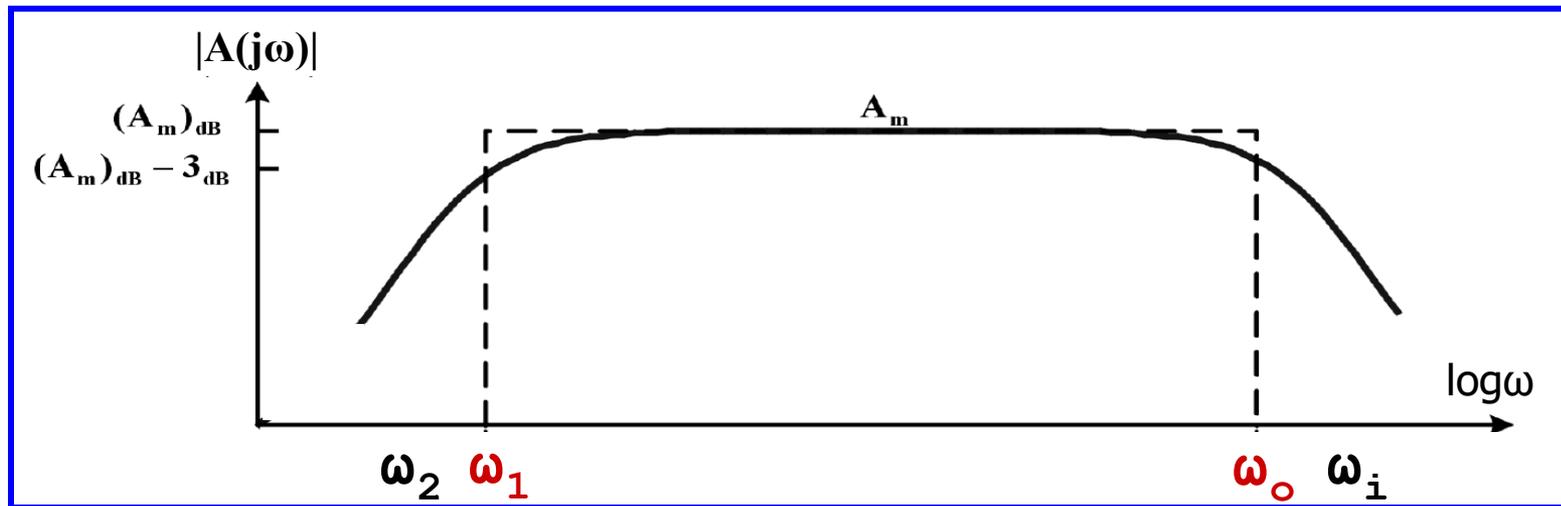
$$f_H = \frac{1}{2\pi(R_D || R_L) C_{gd}}$$

- Το **κύκλωμα εισόδου** και το **κύκλωμα εξόδου** του ενισχυτή έχουν **βαθυπερατή συμπεριφορά**.
- Αν και η χωρητικότητα C_{gs} (μερικές δεκάδες fF) είναι μεγαλύτερη από την C_{gd} (έως μερικά fF), η **σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου είναι συνήθως μικρότερη από τη σταθερά χρόνου του κυκλώματος εξόδου**, λόγω του ότι δεν υφίσταται φαινόμενο Miller και η ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος εισόδου είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη της εξόδου. Έτσι, το **κύκλωμα RC της εξόδου καθορίζει την ανώτερη συχνότητα αποκοπής**.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής πύλης

- Με βάση τα προηγούμενα, η ενίσχυση του κυκλώματος προσεγγίζεται ως εξής:

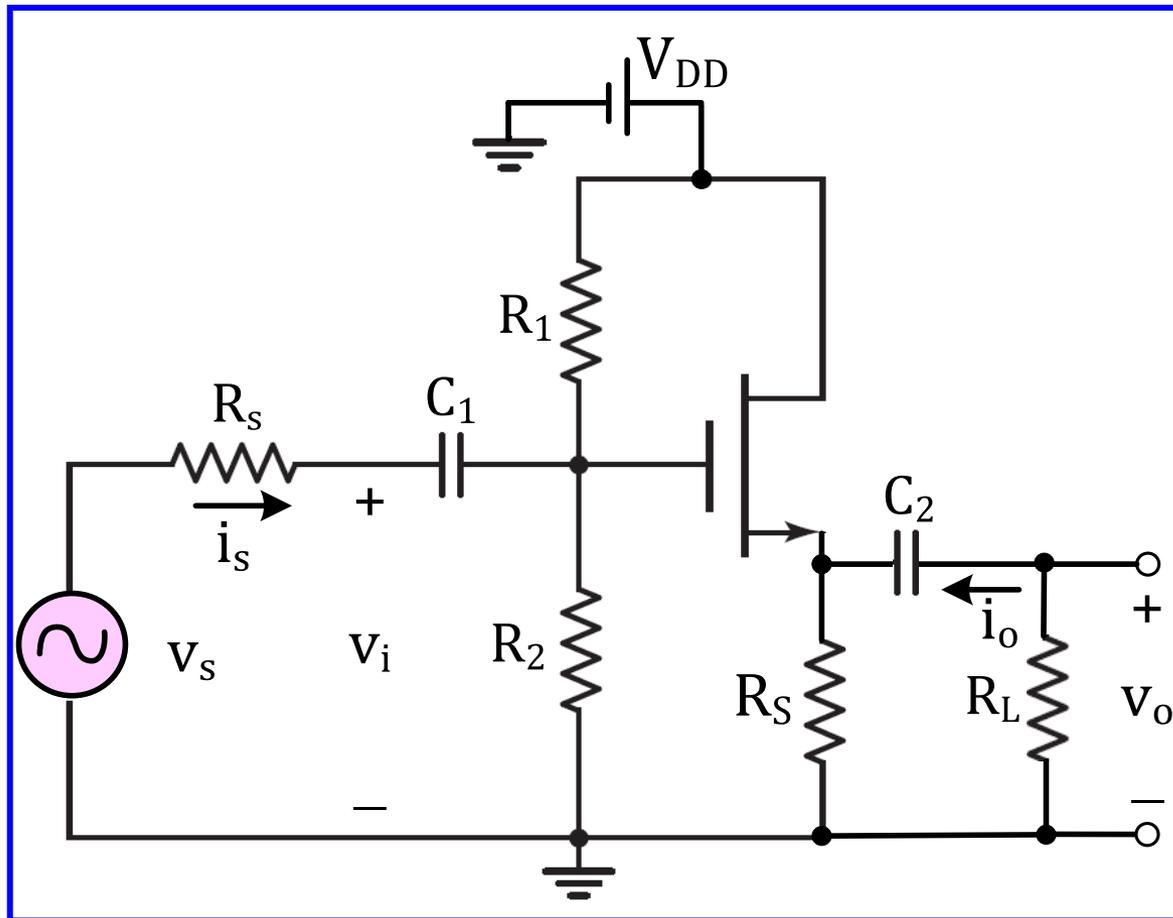
$$A(s) = \frac{A_m \cdot \tau_1 s}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_0 s + 1)} = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$



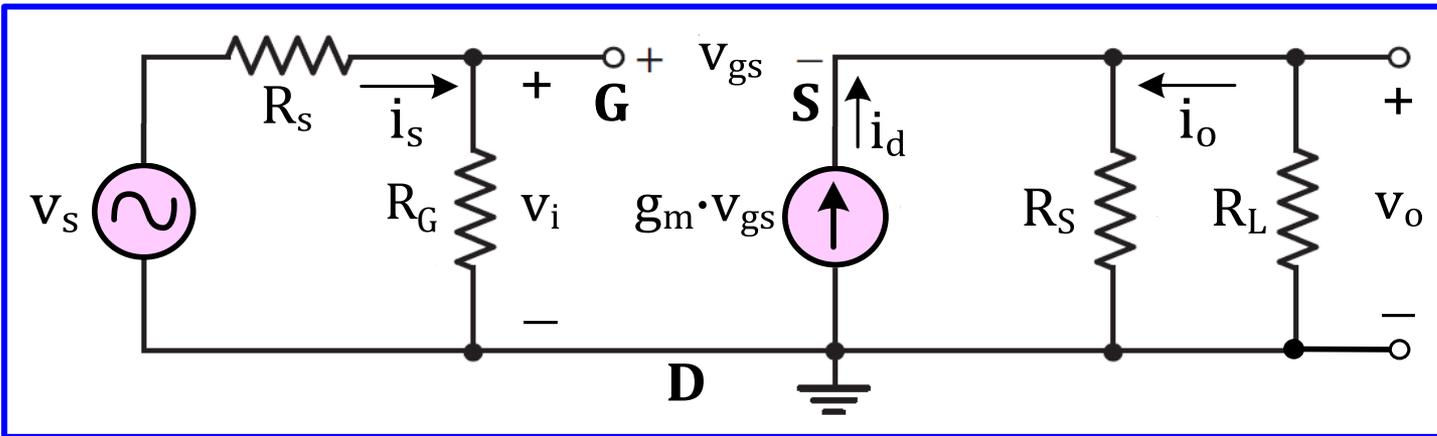
- Λαμβάνοντας υπόψη ότι συνήθως η ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος εξόδου του ενισχυτή κοινής πύλης είναι μικρότερη από την ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος εισόδου του ενισχυτή κοινής πηγής, προκύπτει ότι ο **ενισχυτής κοινής πύλης** έχει στις **υψηλές συχνότητες καλύτερη συμπεριφορά** (μεγαλύτερη ανώτερη συχνότητα αποκοπής) από τον ενισχυτή κοινής πηγής.

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής υποδοχής

Για την μελέτη της απόκρισης συχνότητας του ενισχυτή κοινής υποδοχής, αφού προσδιορίσουμε την ενίσχυση τάσης στις μεσαίες συχνότητες, ακολουθούμε την μέθοδο των σταθερών χρόνου και την προσέγγιση επικρατούντος πόλου.



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής υποδοχής



$$R_G = R_1 \parallel R_2 = R_i$$

$$R'_L = R_S \parallel R_L$$

Προσδιορισμός ενίσχυσης στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων (οι πυκνωτές σύζευξης θεωρούνται βραχυκυκλώματα και οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET ανοικτά κυκλώματα)

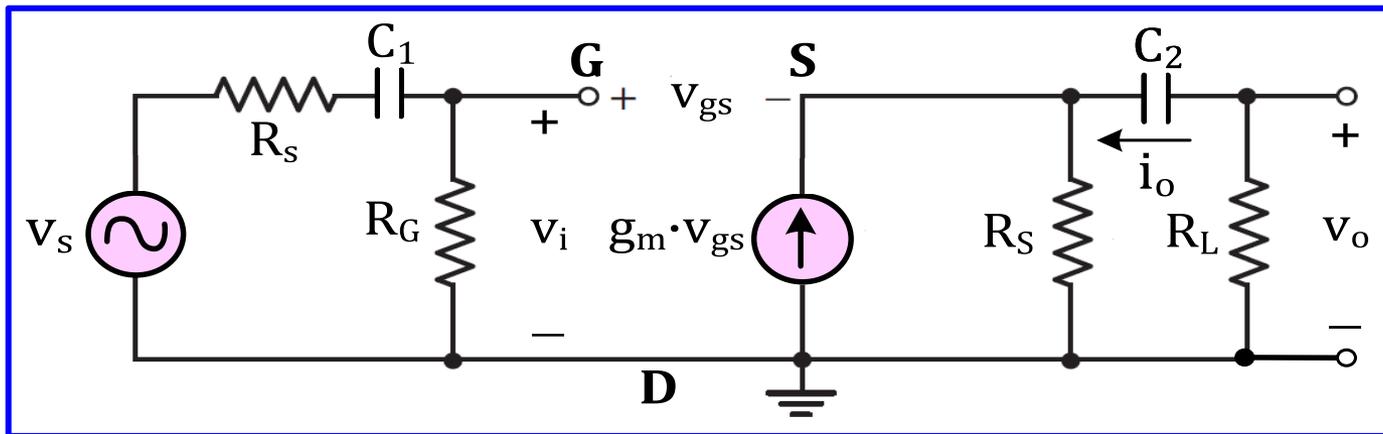
$$v_i = v_{gs} + v_o \Rightarrow v_{gs} = v_i - v_o$$

$$v_o = g_m v_{gs} R'_L = g_m (v_i - v_o) R'_L \Rightarrow$$

$$v_o = g_m R'_L v_i / (1 + g_m R'_L)$$

$$v_i = \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s, \quad A_m = v_o / v_s = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_G}{R_s + R_G}$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής υποδοχής



$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{v_o}{i_{R_s} - g_m v_{gs}} = \frac{v_o}{\frac{v_o}{R_s} - g_m (v_i - v_o)} \Rightarrow$$

$(v_i = 0, R_L = \infty)$

$$R_o = \frac{v_o}{\frac{v_o}{R_s} + g_m v_o} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m} \Rightarrow R_o = R_s \parallel \frac{1}{g_m}$$

Σταθερές χρόνου στις χαμηλές συχνότητες:

$$\tau_1 = (R_s + R_G)C_1$$

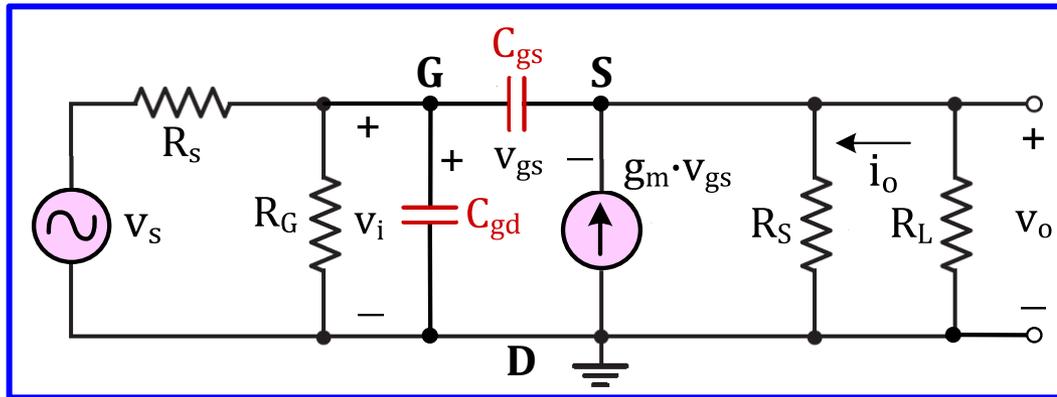
$$\tau_2 = (R_o + R_L)C_2$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi\tau_2} = \frac{1}{2\pi(R_o + R_L)C_{gd}}$$

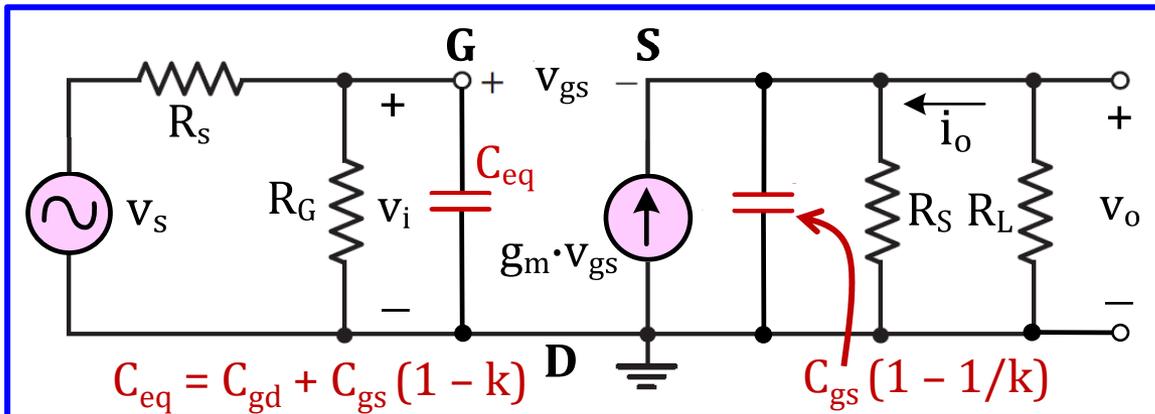
Στους ενισχυτές κοινής υποδοχής οι πυκνωτές σύζευξης έχουν παρόμοια τιμή και η αντίσταση εισόδου είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση εξόδου ($\tau_1 > \tau_2$). Επομένως, η **σταθερά χρόνου του κυκλώματος εξόδου** καθορίζει την **κατώτερη συχνότητα αποκοπής** ($\omega_L = 1/\tau_2$).

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής υποδοχής

- Στις **υψηλές συχνότητες** προσθέτουμε στο ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή τις χωρητικότητες C_{gs} (μεταξύ πύλης και πηγής) και C_{gd} (μεταξύ πύλης και υποδοχής).



- Χρησιμοποιούμε το **θεώρημα τάσεων του Miller**, οπότε η χωρητικότητα C_{gs} χωρίζεται σε 2 χωρητικότητες συνδεδεμένες παράλληλα στην είσοδο και στην έξοδο: την **χωρητικότητα εισόδου** $C_{gs} \cdot (1 - k)$ και την **χωρητικότητα εξόδου** $C_{gs} \cdot (1 - 1/k)$, με $k = v_o / v_i$.



Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής υποδοχής

$$v_o = g_m R'_L v_i / (1 + g_m R'_L)$$
$$A_{v_i} = k = v_o / v_i = g_m R'_L / (1 + g_m R'_L)$$
$$g_m R'_L \gg 1 \Rightarrow A_{v_i} = k = 1$$

- Με δεδομένο λοιπόν ότι η τάση εξόδου του ενισχυτή κοινή υποδοχής ακολουθεί την τάση της πηγής (ακόλουθος πηγής) για τις παρασιτικές χωρητικότητες του κυκλώματος μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ακόλουθη προσέγγιση:

$$C_{eq} = C_{gd} + C_{gs} (1 - k) \approx C_{gd}$$
$$C_{gs} (1 - 1/k) \approx 0$$

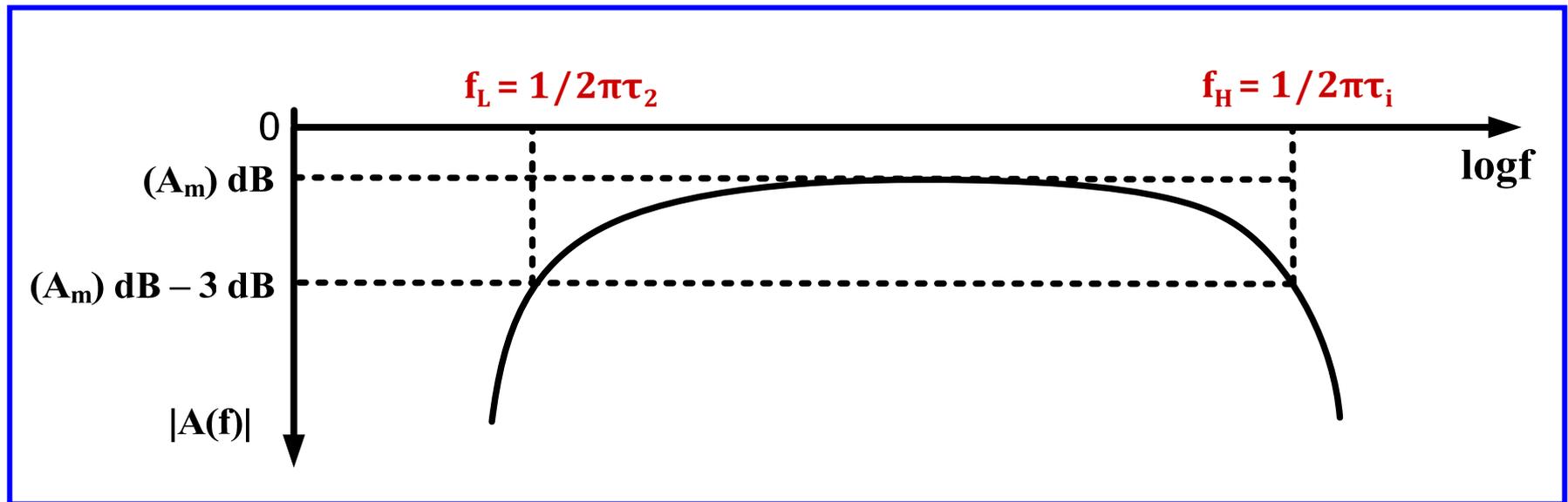
- Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου που παρουσιάζει βαθυπερατή συμπεριφορά, αντιστοιχεί στην ανώτερη συχνότητα αποκοπής:

$$\tau_i = (R_s || R_G) C_{gd}$$
$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_i} = \frac{1}{2\pi(R_s || R_G) C_{gd}}$$

Απόκριση συχνότητας ενισχυτή κοινής υποδοχής

Με βάση τα προηγούμενα, η ενίσχυση του κυκλώματος προσεγγίζεται ως εξής:

$$A(s) = \frac{A_m \cdot \tau_2 s}{(\tau_2 s + 1) \cdot (\tau_1 s + 1)} = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$



Συμπεράσματα

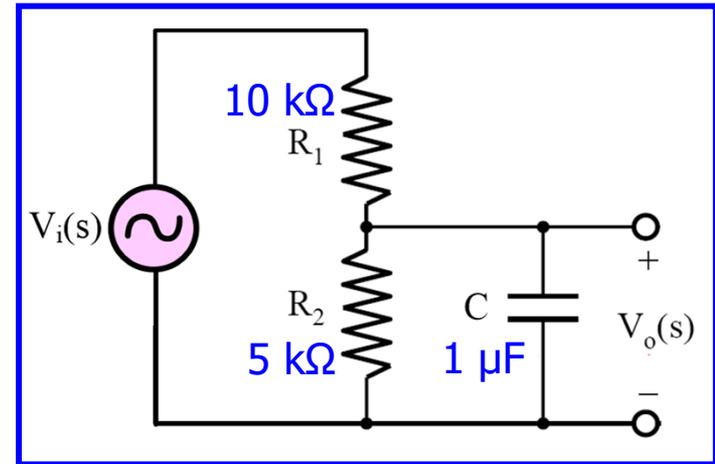
- Η περιγραφή των ενισχυτών σε όλη την περιοχή συχνοτήτων επιτυγχάνεται μέσω της συνάρτησης μεταφοράς τους και τον προσδιορισμό της απόκρισης συχνότητάς.
- Η ανάλυση των ενισχυτών σε όλη την περιοχή συχνοτήτων μπορεί να γίνει σταδιακά, προσεγγίζοντας τη συνάρτηση μεταφοράς τους με συναρτήσεις πρώτου βαθμού ή γινόμενα συναρτήσεων πρώτου βαθμού.
- Η ανάλυση αυτή δεν παρέχει υψηλή ακρίβεια, αλλά εξασφαλίζει κατανόηση του ρόλου των στοιχείων του ενισχυτή κατά τη λειτουργία του σε όλη την περιοχή συχνοτήτων.
- Στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, οι ενισχυτές εμφανίζουν υπερπερατή συμπεριφορά λόγω της παρουσίας των πυκνωτών σύζευξης και παράκαμψης.
- Στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων οι ενισχυτές εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά (σταθερή ενίσχυση).
- Τέλος, στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, οι ενισχυτές εμφανίζουν βαθυπερατή συμπεριφορά λόγω της παρουσίας των παρασιτικών χωρητικοτήτων των τρανζίστορ.
- Η συμπεριφορά των ενισχυτών στις χαμηλές και στις υψηλές συχνότητες προσδιορίζεται από τις σταθερές χρόνου που σχηματίζουν οι εξωτερικοί και παρασιτικοί πυκνωτές με τις αντιστάσεις του ενισχυτή (μέθοδος σταθερών χρόνων και προσέγγιση επικρατούντος πόλου).
- Η πληροφορία για τη συμπεριφορά ενός ενισχυτή μπορεί να ληφθεί τόσο από την απόκριση συχνότητας, όσο και από την απόκριση χρόνου.



Ασκήσεις 4^{ης} ενότητας

Άσκηση 1^η

Θα προσδιορίσουμε την συνάρτηση μεταφοράς (απόκριση συχνότητας μέτρου) και την συχνότητα αποκοπής του κυκλώματος του διπλανού σχήματος και θα σχεδιάσουμε το διάγραμμα του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς ως προς την συχνότητα f .



$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_2 \parallel Z_C}{R_1 + (R_2 \parallel Z_C)} = \frac{\frac{R_2 / sC}{R_2 + 1/sC}}{R_1 + \frac{R_2 / sC}{R_2 + 1/sC}} = \frac{R_2 / sC}{R_1(R_2 + 1/sC) + R_2 / sC} =$$

$$= \frac{\frac{R_2}{sC}}{R_1 R_2 + \frac{R_1 + R_2}{sC}} = \frac{\frac{R_2}{(R_1 + R_2)sC}}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{1}{sC}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{\frac{1}{sC}}{(R_1 \parallel R_2) + \frac{1}{sC}} \Rightarrow$$

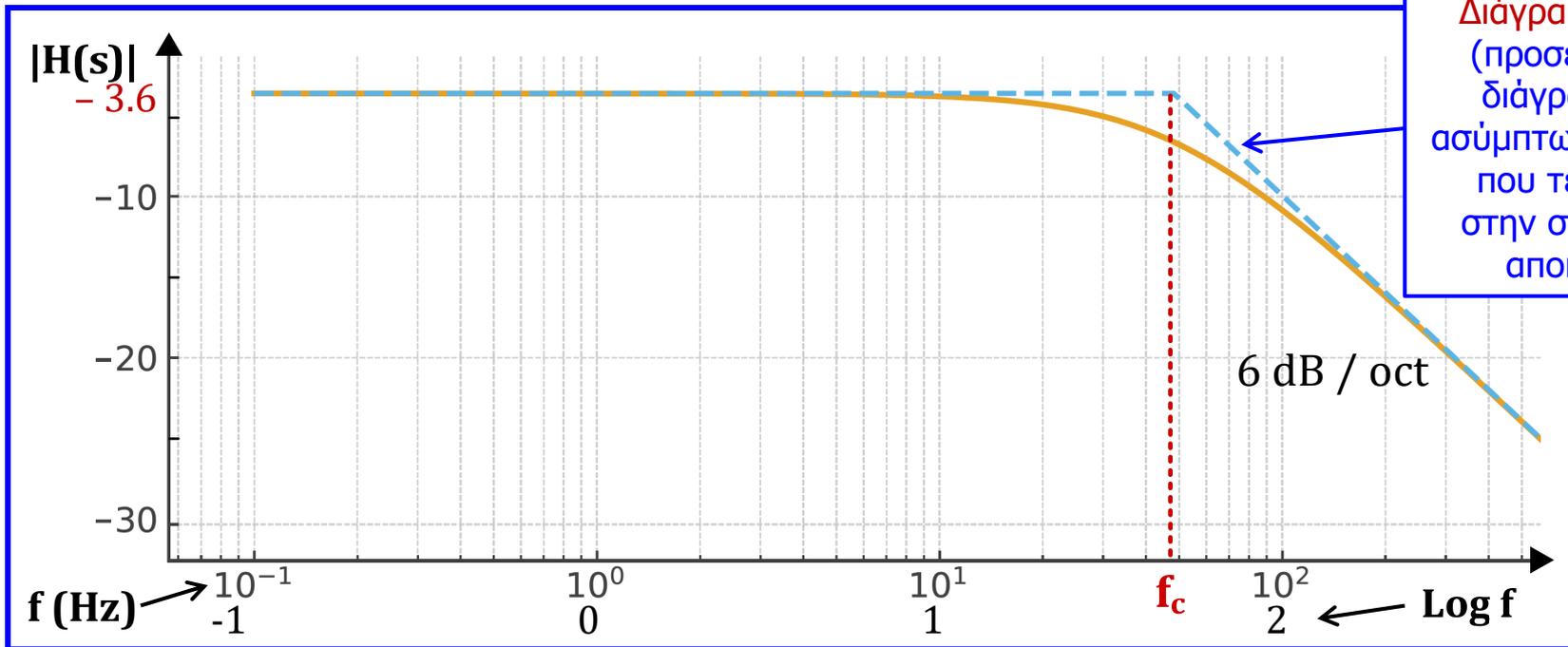
Άσκηση 1^η

$$H(s) = \frac{R_2}{1 + (R_1 \parallel R_2)Cs} \Rightarrow H(s) = \frac{0.66}{1 + 3.3 \cdot 10^{-3}s}$$

Βαθυπερατό κύκλωμα

$$\tau = (R_1 \parallel R_2)C = 3,3 \text{ ms}$$

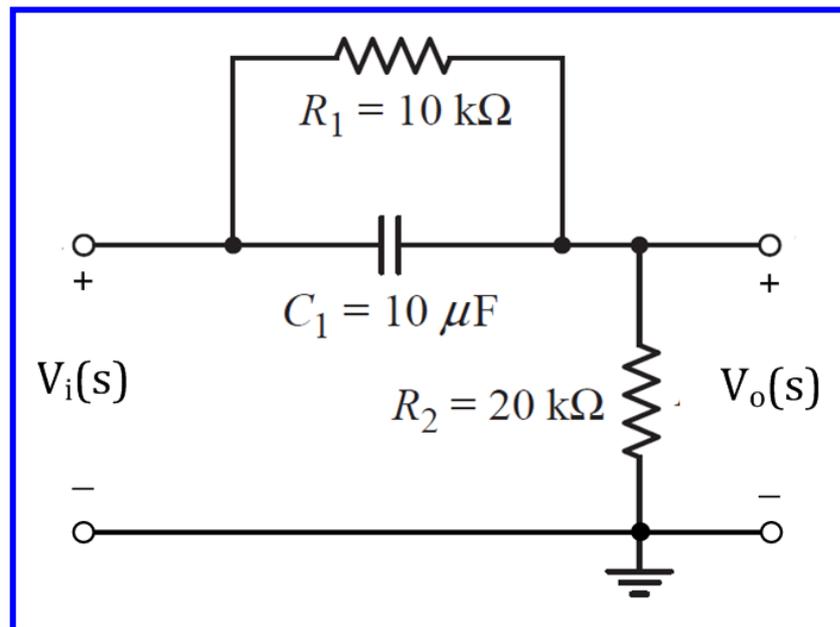
$$f_c = 1/2\pi\tau = 48,25 \text{ Hz}$$



$$s = 0 \Rightarrow |H(s)| = 0,66 \Rightarrow 20 \log 0,66 = -3,6 \text{ dB}$$
$$\log 48.25 = 1,68$$

Άσκηση 2^η

Για το κύκλωμα του διπλανού σχήματος, θα προσδιορίσουμε την συνάρτηση μεταφοράς στο συνεχές, την συνάρτηση μεταφοράς για την περιοχή των πολύ υψηλών συχνοτήτων και την συνάρτηση μεταφοράς $H(s) = V_o(s)/V_i(s)$ σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Επίσης, θα σχεδιάσουμε το διάγραμμα Bode της απόκρισης συχνότητας μέτρου.



Ο πυκνωτής στο συνεχές λειτουργεί ως ανοικτό κύκλωμα

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{20}{20 + 10} = 0.667$$

Στις πολύ υψηλές συχνότητες:
 $\omega \rightarrow \infty \Rightarrow j\omega \rightarrow \infty \Rightarrow$
 $Z_C = (1/j\omega C_1) \rightarrow 0$

$$\frac{V_o}{V_i} = 1$$

Ο πυκνωτής λειτουργεί ως βραχυκύκλωμα

Άσκηση 2^η

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_2}{R_2 + R_1 \parallel \frac{1}{sC_1}} = \frac{R_2}{R_2 + \frac{R_1}{1 + sR_1C_1}}$$
$$= \frac{R_2(1 + sR_1C_1)}{R_1 + R_2 + sR_1R_2C_1} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot \frac{(1 + sR_1C_1)}{[1 + s(R_1 \parallel R_2)C_1]}$$

$$H(s) = \frac{0.667 (1 + 0.1 s)}{1 + 0.0667 s}$$

$$s = 0 \Rightarrow |H(s)| = 0,667$$

Το γινόμενο των 3 όρων 0.667, $(1 + 0.1 \cdot s)$ και $(1 + 0.0667 \cdot s)$ μετά τη λογαρίθμηση (μετατροπή σε dB) γίνεται άθροισμα. Έτσι μπορούμε να σχεδιάσουμε το διάγραμμα για κάθε όρο ξεχωριστά και κατόπιν να προσθέσουμε τα επιμέρους διαγράμματα.

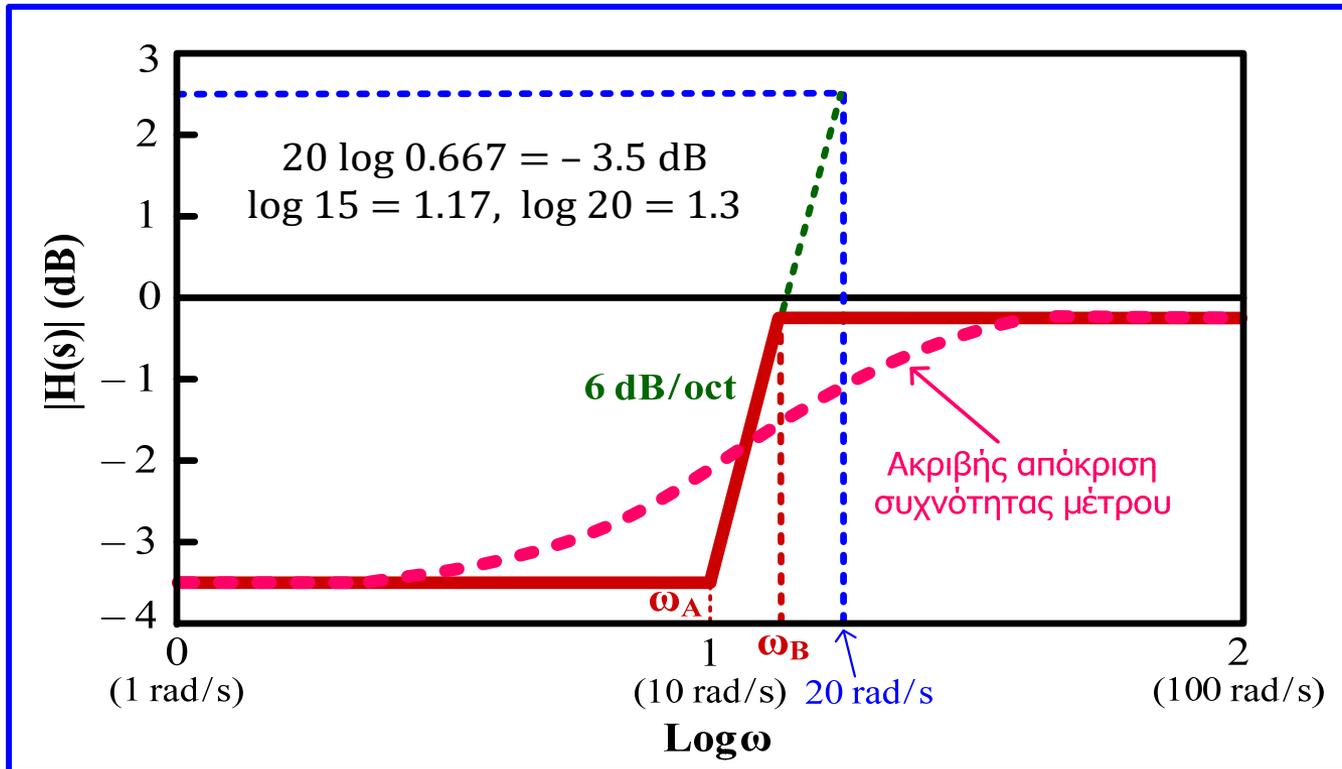
Η συνάρτηση παρουσιάζει ένα μηδενικό που αντιστοιχεί στην συχνότητα ω_A και έναν πόλο που αντιστοιχεί στην συχνότητα ω_B :

$$\tau_A = R_1 C_1 = 100 \text{ ms} \Rightarrow \omega_A = 1/\tau_A = 10 \text{ rad/s}$$
$$\tau_B = (R_1 \parallel R_2) C_1 = 66.7 \text{ ms} \Rightarrow \omega_B = 1/\tau_B = 15 \text{ rad/s}$$

Άσκηση 2^η

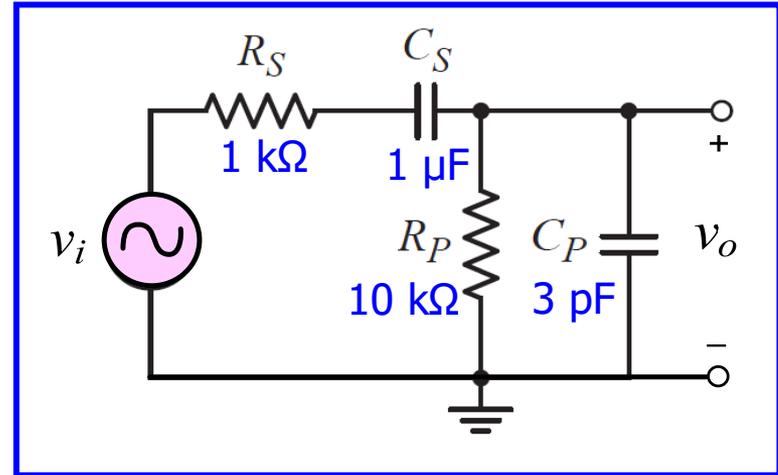
Όταν η συχνότητα φθάνει στην τιμή ω_A που αντιστοιχεί στο μηδενικό της συνάρτησης μεταφοράς, το $|H(s)|$ αυξάνεται με κλίση 6 dB/oct. Όταν η συχνότητα φθάνει στην τιμή ω_B που αντιστοιχεί στον πόλο της συνάρτησης μεταφοράς, το $|H(s)|$ σταθεροποιείται, λόγω των αντίθετων επιδράσεων του μηδενικού και του πόλου.

Η κλίση 6 dB/oct σημαίνει μεταβολή του $|H(s)|$ κατά 6 dB όταν η συχνότητα διπλασιάζεται.



Άσκηση 3^η

Για το κύκλωμα του διπλανού σχήματος, θα υπολογίσουμε τις συχνότητες αποκοπής, με χρήση της μεθόδου των σταθερών χρόνου. Επίσης, να σχεδιαστεί η απόκριση συχνότητας μέτρου του κυκλώματος.



Αφού η τιμή του πυκνωτή φορτίου (C_P) είναι μικρότερη από εκείνη του πυκνωτή σύζευξης (C_S) κατά περίπου 6 τάξεις μεγέθους, μπορούμε να αναλύσουμε την επίδραση κάθε πυκνωτή στην απόκριση συχνότητας, ανεξάρτητα.

Η σταθερά χρόνου ανοικτού κυκλώματος είναι:

$$\tau_S = (R_S + R_P)C_S = (10^3 + 10 \times 10^3)(10^{-6}) = 1.1 \times 10^{-2} \text{ s}$$

και η σταθερά χρόνου βραχυκυκλώματος είναι:

$$\tau_P = (R_S \parallel R_P)C_P = [10^3 \parallel (10 \times 10^3)](3 \times 10^{-12}) = 2.73 \times 10^{-9} \text{ s}$$

Άσκηση 3^η

Η κατώτερη συχνότητα αποκοπής είναι:

$$f_L = \frac{1}{2\pi\tau_S} = \frac{1}{2\pi(1.1 \times 10^{-2})} = 14.5 \text{ Hz}$$

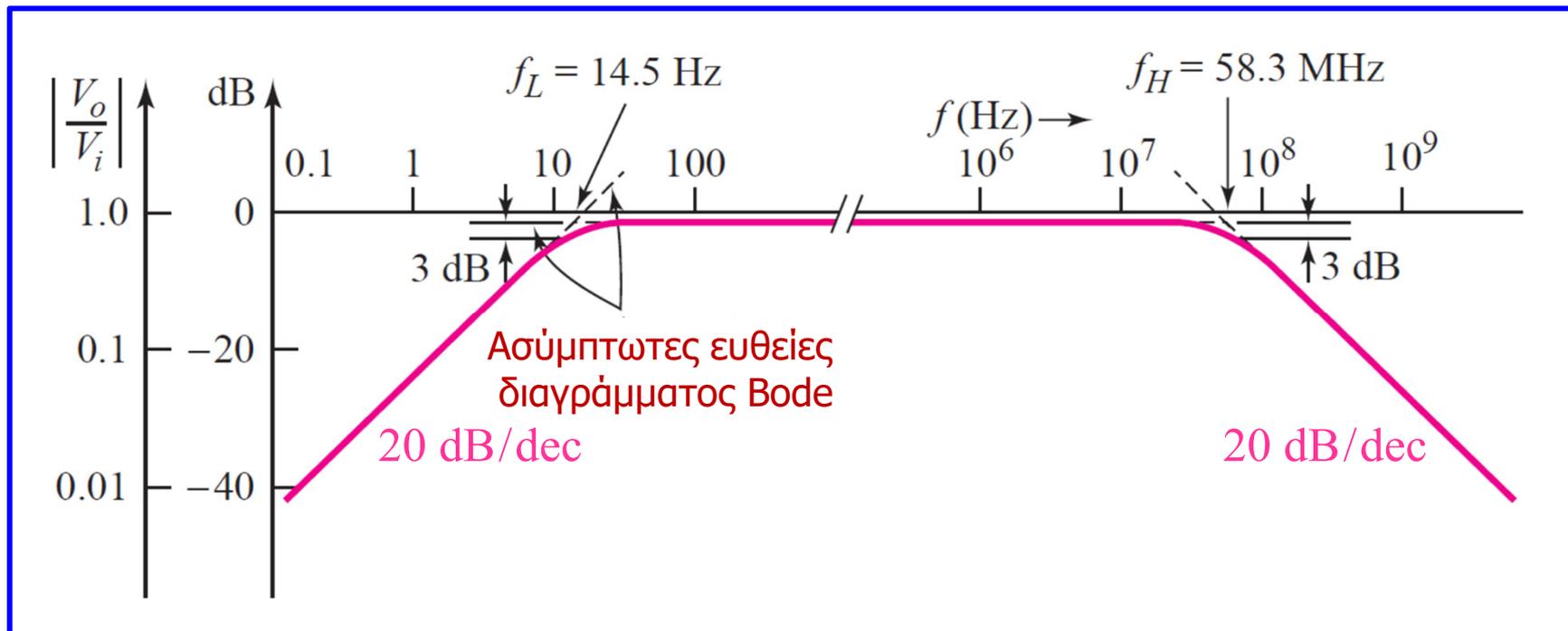
και η ανώτερη συχνότητα αποκοπής είναι:

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_P} = \frac{1}{2\pi(2.73 \times 10^{-9})} = 58.3 \text{ MHz}$$

Το μέγιστο μέτρο της απόκρισης συχνότητας είναι:

$$\frac{R_P}{R_S + R_P} = \frac{10}{1 + 10} = 0.909 \Rightarrow 20 \log 0,909 = -0,83 \text{ dB}$$

Άσκηση 3^η



$$\log 14,5 = 1,16$$
$$\log(58,3 \cdot 10^6) = 7,76$$

Άσκηση 4^η

Εφαρμόζοντας τους κανόνες που αναφέρθηκαν στην σελίδα 19, θα σχεδιάσουμε τα διαγράμματα Bode για το μέτρο της απόκρισης συχνότητας των παρακάτω συναρτήσεων μεταφοράς.

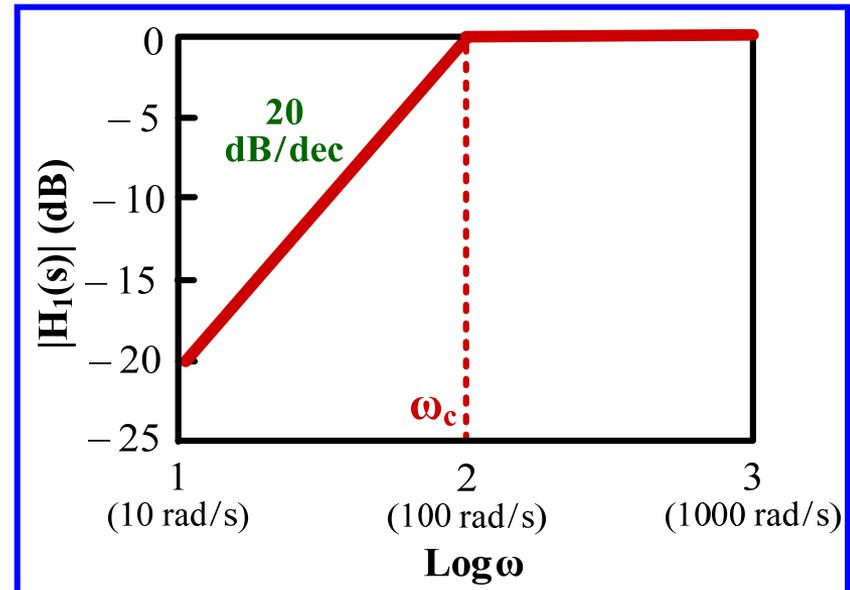
$$H_1(s) = \frac{s}{s + 100} \quad H_2(s) = \frac{5}{(s/2000) + 1} \quad H_3(s) = \frac{200 \cdot (s + 10)}{(s + 1000)}$$

Η $H_1(s)$ παρουσιάζει ένα μηδενικό ($s = 0$) και έναν πόλο που αντιστοιχεί στην συχνότητα αποκοπής ω_c . Πρόκειται για συνάρτηση μεταφοράς που αντιστοιχεί σε υπερερατό κύκλωμα.

$$H_1(s) = \frac{s}{s + 100} = \frac{0.01 \cdot s}{1 + 0.01 \cdot s}$$

$$s = 0 \Rightarrow |H_1(s)| = 1 \Rightarrow 20 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

$$\tau = 0.01 \text{ s} \Rightarrow \omega_c = 100 \text{ rad/s} \Rightarrow \log \omega_c = 2$$



Άσκηση 4^η

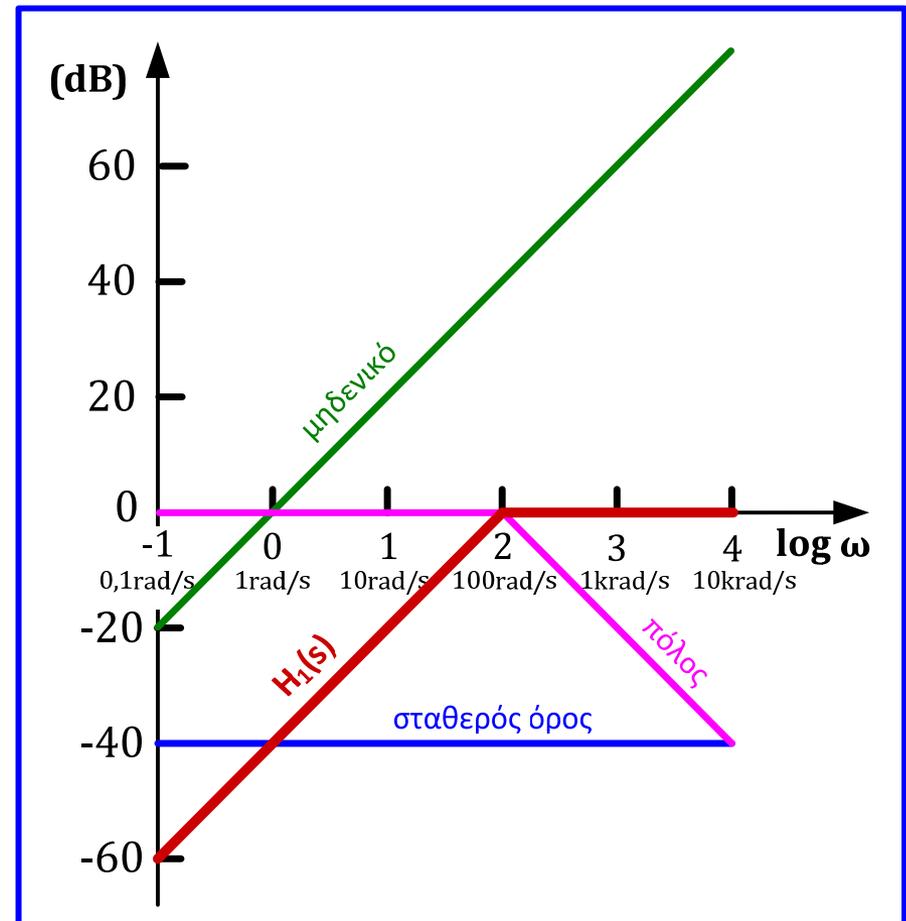
Παρότι η $H_1(s)$ αντιστοιχεί σε υπερβατικό κύκλωμα με γνωστή απόκριση μέτρου, μπορούμε να εφαρμόσουμε και τους κανόνες χάραξης διαγραμμάτων Bode.

$$H_1(s) = \frac{0.01 \cdot s}{1 + 0.01 \cdot s}$$

Διαπιστώνουμε ότι η συνάρτηση έχει:

- ✓ Σταθερό όρο 0,01, $20\log 0,01 = -40$ dB
- ✓ Μηδενικό $s = 0$, το οποίο αντιστοιχεί σε ευθεία που διέρχεται από το σημείο $\log \omega = 0$ ($\omega = 1$ rad/s) με κλίση 20 dB / dec.
- ✓ Πόλο $s = -1 / \tau = -1 / 0,01$ στην συχνότητα $\omega = 1 / \tau = 100$ rad / s που σημαίνει ότι όταν η συχνότητα φθάνει στην τιμή 100 rad / s, το μέτρο της απόκρισης συχνότητας μειώνεται με κλίση 20 dB / dec.

Σχεδιάζουμε το διάγραμμα για κάθε όρο ξεχωριστά και κατόπιν αθροίζουμε (λογάριθμος γινομένου = άθροισμα λογαρίθμων) τα επιμέρους διαγράμματα.

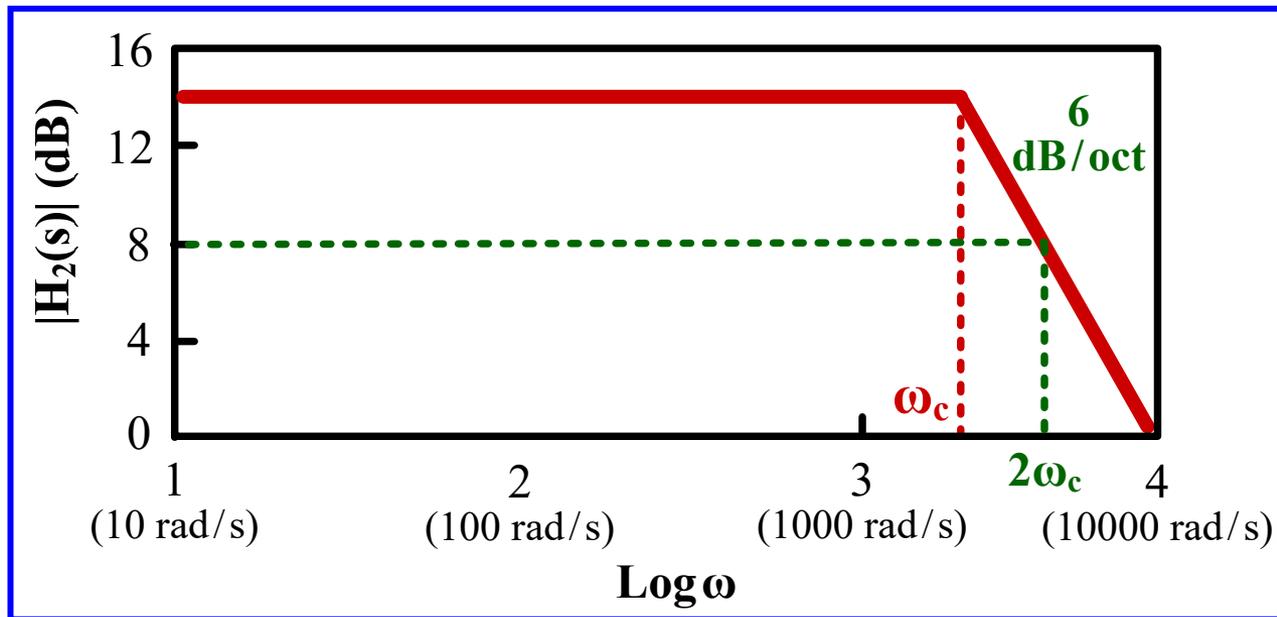


Άσκηση 4^η

Η $H_2(s)$ παρουσιάζει **έναν πόλο που αντιστοιχεί στην συχνότητα αποκοπής ω_c** και έχει έναν **σταθερό όρο**. Πρόκειται για συνάρτηση μεταφοράς που αντιστοιχεί σε **βαθυπερατό κύκλωμα**.

$$H_2(s) = \frac{5}{(s/2000) + 1} = \frac{5}{1 + 0.002 \cdot s} \quad s = 0 \Rightarrow |H_2(s)| = 5 \Rightarrow 20 \log 5 = 14 \text{ dB}$$

$$\tau = 0.002 \text{ s} \Rightarrow \omega_c = 2000 \text{ rad/s} \Rightarrow \log \omega_c = \log 2000 = 3.3$$



Άσκηση 4^η

Η $H_3(s)$ παρουσιάζει ένα μηδενικό που αντιστοιχεί στην συχνότητα ω_1 και έναν πόλο που αντιστοιχεί στην συχνότητα ω_2 .

Όταν η συχνότητα φθάνει στην τιμή ω_1 που αντιστοιχεί στο μηδενικό της συνάρτησης μεταφοράς, το $|H_3(s)|$ αυξάνεται με κλίση 20 dB/dec.

Όταν η συχνότητα φθάνει στην τιμή ω_2 που αντιστοιχεί στον πόλο της συνάρτησης μεταφοράς, το $|H_3(s)|$ σταθεροποιείται, λόγω των αντίθετων επιδράσεων του μηδενικού και του πόλου.

Η κλίση 20 dB/dec σημαίνει μεταβολή του $|H_3(s)|$ κατά 20 dB όταν η συχνότητα δεκαπλασιάζεται.

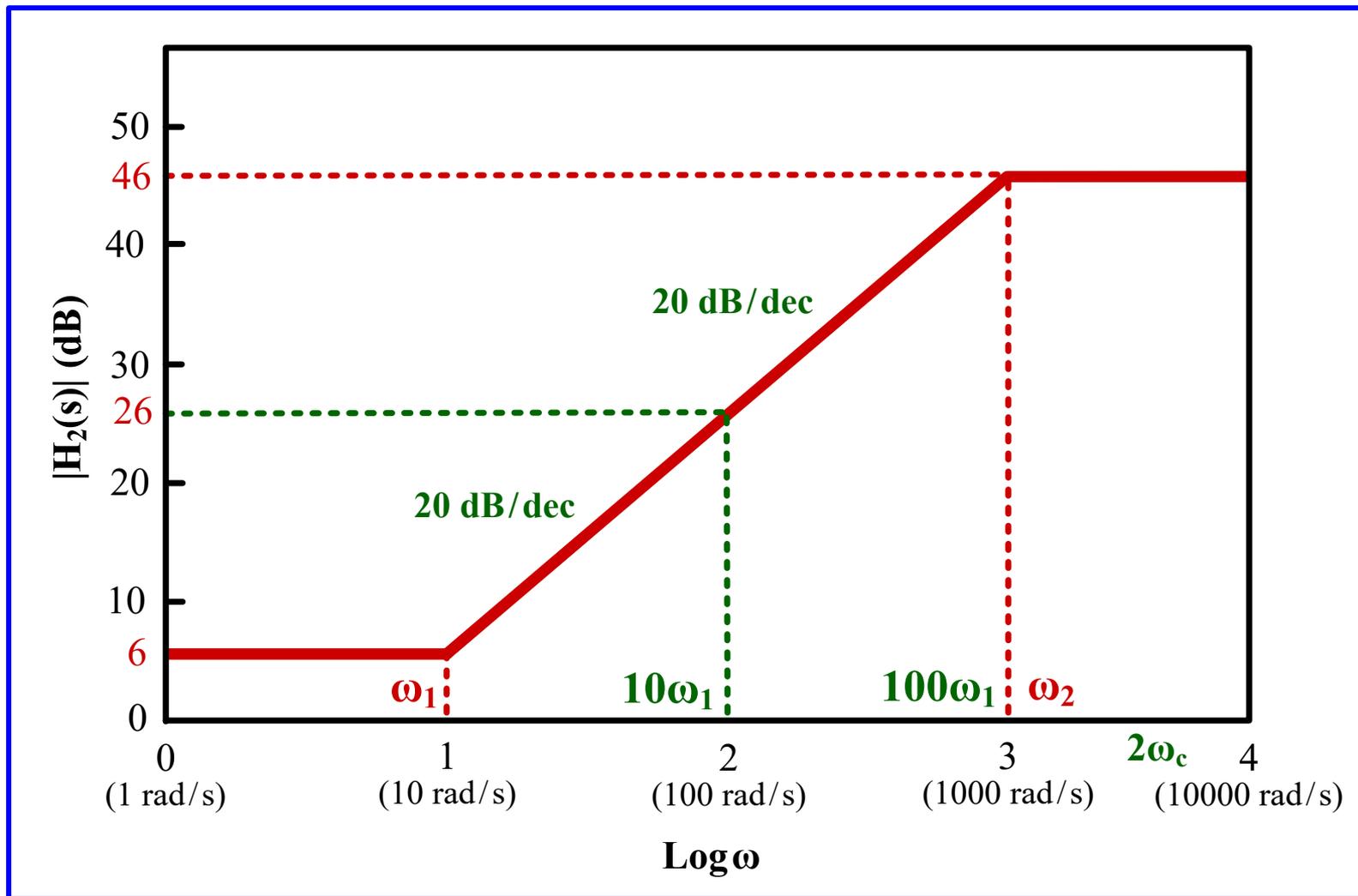
$$H_3(s) = \frac{200 \cdot (s + 10)}{(s + 1000)} = \frac{0.2 \cdot (s + 10)}{1 + 0.001 \cdot s} = \frac{0.2 \cdot s + 2}{1 + 0.001 \cdot s} = \frac{2 \cdot (1 + 0.1 \cdot s)}{1 + 0.001 \cdot s}$$

$$s = 0 \Rightarrow |H_3(s)| = 2 \Rightarrow 20 \log 2 = 6 \text{ dB}$$

$$\tau_1 = 0.1 \text{ s} \Rightarrow \omega_1 = 10 \text{ rad/s} \Rightarrow \log \omega_1 = \log 10 = 1$$

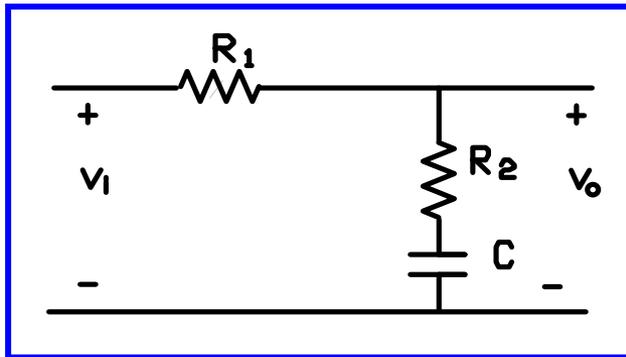
$$\tau_2 = 0.001 \text{ s} \Rightarrow \omega_2 = 1000 \text{ rad/s} \Rightarrow \log \omega_2 = \log 1000 = 3$$

Άσκηση 4^η



Άσκηση 5^η

Η συνάρτηση μεταφοράς του παρακάτω κυκλώματος παρουσιάζει ένα μηδενικό που ισούται με -10 και έναν πόλο που ισούται με -1 . Θα προσδιορίσουμε την συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος, υπολογίζοντας κατάλληλη πολλαπλασιαστική σταθερά k , έτσι ώστε η ενίσχυση του κυκλώματος στο συνεχές να είναι 0 dB. Κατόπιν, με δεδομένο ότι $R_2 = 1$ MΩ, θα υπολογίσουμε τις τιμές των R_1 και C .



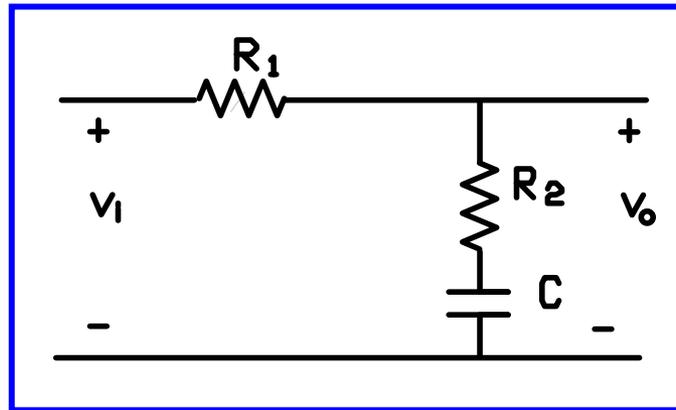
$$H(s) = k \cdot \frac{(s - z_1)}{(s - p_1)} = k \cdot \frac{s + 10}{s + 1}$$

Στο συνεχές ισχύει $s=0$, επομένως $H(s) = k \cdot 10$.

Επίσης, δίνεται ενίσχυση στο συνεχές ίση με 0 dB δηλ. $|H(j\omega)|=1$ (για $\omega = 0$).
Από τα παραπάνω προκύπτει: $k \cdot 10 = 1 \Rightarrow k = 0,1$ (πολλαπλασιαστική σταθερά).

$$H(s) = \frac{0.1 \cdot s + 1}{s + 1}$$

Άσκηση 5^η



$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{Z_C + R_2}{(Z_C + R_2) + R_1} = \frac{R_2Cs + 1}{(R_1 + R_2)Cs + 1}$$

$$H(s) = \frac{0.1 \cdot s + 1}{s + 1}$$

$$R_2C = 0.1 \Rightarrow C = 0.1 \mu\text{F}$$

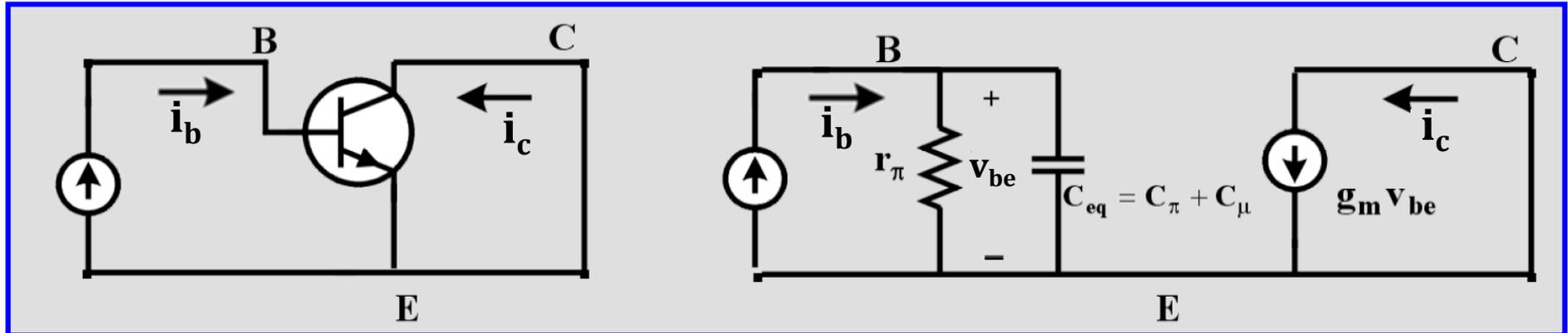
$$R_2 = 1 \text{ M}\Omega$$

$$(R_1 + R_2)C = 1 \Rightarrow R_1 = 9 \text{ M}\Omega$$

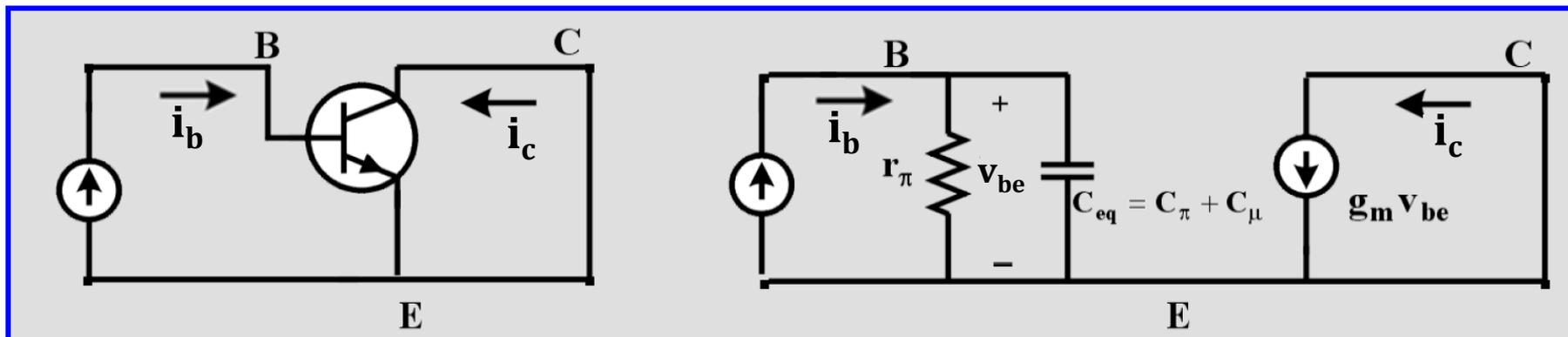
Άσκηση 6^η

Οι κατασκευαστές διπολικών τρανζίστορ παρέχουν την **συχνότητα f_T** , στην οποία το τρανζίστορ παρουσιάζει **μοναδιαία ενίσχυση ρεύματος**, όταν ο συλλέκτης του είναι βραχυκυκλωμένος. Η συχνότητα αυτή μας δίνει μια προσέγγιση για το εύρος συχνοτήτων στο οποίο το τρανζίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτής.

Για ένα διπολικό τρανζίστορ με βραχυκυκλωμένο συλλέκτη και $g_m = 40 \text{ mS}$, $r_\pi = 1 \text{ k}\Omega$, $C_\pi = 35 \text{ pF}$, $C_\mu = 5 \text{ pF}$, θα προσδιορίσουμε τη μεταβολή της ενίσχυσης ρεύματος $\beta = i_c / i_b$ συναρτήσει της συχνότητας και θα σχεδιάσουμε την αντίστοιχη καμπύλη. Επίσης, θα υπολογίσουμε την συχνότητα f_β , στην οποία η μέγιστη ενίσχυση ρεύματος β_o μειώνεται σε τιμή $\beta_o / \sqrt{2}$ (-3 dB), καθώς και την συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης (f_T).



Άσκηση 6^η



Βαθυπερατή
συμπεριφορά

$$i_c = g_m \cdot v_{be}$$

$$i_b = i_{r_\pi} + i_{C_{eq}} = \frac{v_{be}}{r_\pi} + \frac{v_{be}}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{eq}}}$$

$$\beta(j\omega) = \frac{i_c}{i_b} = \frac{g_m \cdot v_{be}}{\frac{v_{be}}{r_\pi} + \frac{v_{be}}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{eq}}}} = \frac{g_m}{\frac{1}{r_\pi} + j \cdot \omega \cdot C_{eq}} = \frac{g_m \cdot r_\pi}{1 + j \cdot \omega \cdot r_\pi \cdot C_{eq}}$$

$$|\beta(f)| = \frac{\beta_o}{\sqrt{1 + [2 \cdot \pi \cdot f \cdot r_\pi \cdot C_{eq}]^2}}, \quad \beta_o = g_m \cdot r_\pi = 40 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 40$$

Άσκηση 6^η

$$|\beta(f)| = \frac{\beta_o}{\sqrt{2}} \Rightarrow \frac{\beta_o}{\sqrt{1 + [2 \cdot \pi \cdot f_\beta \cdot r_\pi \cdot C_{eq}]^2}} = \frac{\beta_o}{\sqrt{2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2 = 1 + [2 \cdot \pi \cdot f_\beta \cdot r_\pi \cdot C_{eq}]^2 \Rightarrow [2 \cdot \pi \cdot f_\beta \cdot r_\pi \cdot C_{eq}]^2 = 1 \Rightarrow$$

$$f_\beta = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_\pi \cdot C_{eq}} \Rightarrow f_\beta = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-12}} \text{ Hz} \Rightarrow f_\beta \approx 4 \text{ MHz}$$

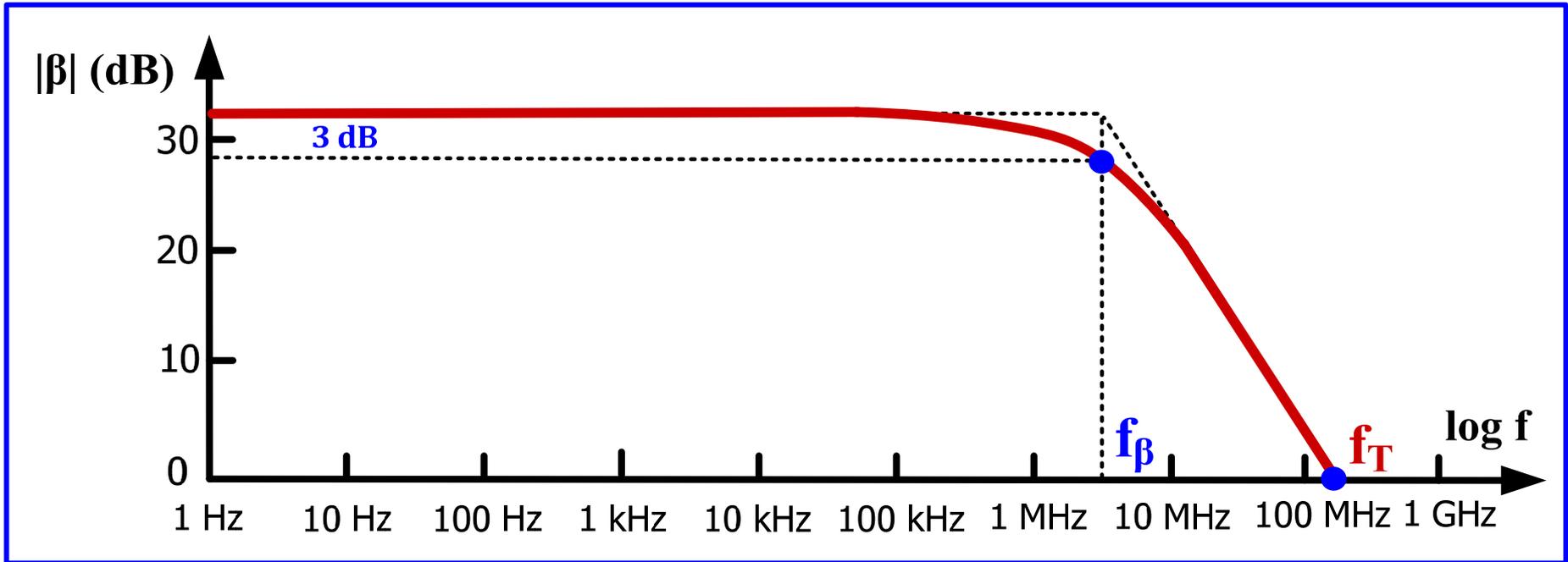
$$\beta(f) = \beta_o / [1 + j (f / f_\beta)]$$

$$|\beta(f)| = 1 \Rightarrow \frac{\beta_o}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot r_\pi \cdot C_{eq}} \approx 1 \Rightarrow f_T = \frac{\beta_o}{2 \cdot \pi \cdot r_\pi \cdot C_{eq}} \Rightarrow$$

$$f_T = \frac{40}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 40 \cdot 10^{-12}} \text{ Hz} \Rightarrow f_T = 159,2 \text{ MHz}$$

Για τον υπολογισμό της συχνότητας f_T αγνοούμε την μονάδα του παρανομαστή $1 + j (f / f_\beta)$ της $\beta(f)$, αφού στις υψηλές συχνότητες ($f \gg f_\beta$), ο φανταστικός όρος του παρανομαστή είναι πολύ μεγαλύτερος του 1.

Άσκηση 6^η



$$20 \cdot \log \beta_0 = 20 \cdot \log 40 = 32 \text{ dB}$$

$$\log f_\beta = \log 4 \text{ MHz} = 6,6$$

$$\log f_T = \log 159,2 \text{ MHz} = 8,2$$

Άσκηση 7η

Η απόκριση ενός ενισχυτή περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$A = -\frac{100}{\left(1 + j\frac{f}{10^6}\right) \cdot \left(1 - j\frac{10^3}{f}\right)}$$

Θα προσδιορίσουμε τις συχνότητες για τις οποίες το μέτρο της ενίσχυσης είναι 10 dB κάτω από τη μέγιστη τιμή της ενίσχυσης.

Από τη θεωρία προέκυψε ότι η απόκριση ενός ενισχυτή δίνεται ως εξής:

$$A(s) = \frac{A_m \cdot \tau_L s}{(\tau_H s + 1) \cdot (\tau_L s + 1)} = \frac{A_m}{\left(1 + j\frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j\frac{f_L}{f}\right)}$$

$A_m = -100$
 $f_L = 1 \text{ kHz}$
 $f_H = 1 \text{ MHz}$

Επομένως, στην **περιοχή χαμηλών συχνοτήτων**, η απόκριση του ενισχυτή περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$A = -\frac{100}{1 - j\frac{10^3}{f}} \Rightarrow |A| = \frac{100}{\sqrt{1 + \frac{10^6}{f^2}}}$$

Άσκηση 7^η

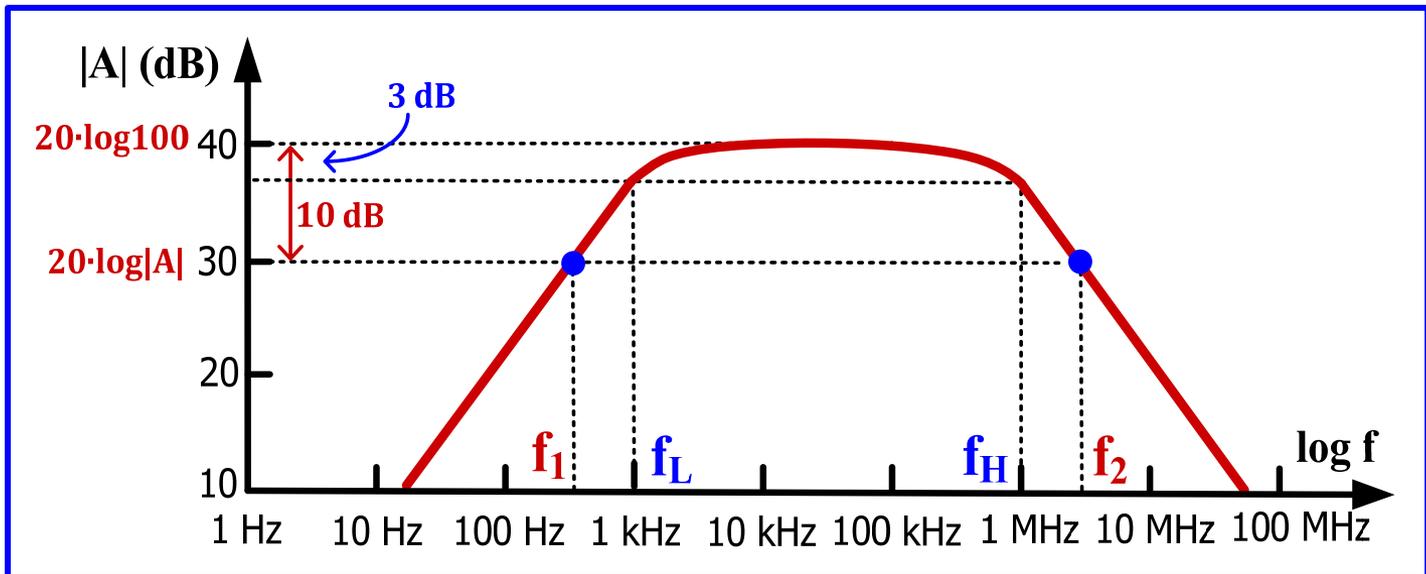
$$\begin{aligned}20 \log |A| &= 20 \log 100 - 20 \log \sqrt{1 + \frac{10^6}{f^2}} \Rightarrow 20 \log \sqrt{1 + \frac{10^6}{f^2}} = 20 \log 100 - 20 \log |A| \\ \Rightarrow 20 \log \sqrt{1 + \frac{10^6}{f^2}} &= 10 \Rightarrow 10 \log \left(1 + \frac{10^6}{f^2} \right) = 10 \Rightarrow \log \left(1 + \frac{10^6}{f^2} \right) = 1 \Rightarrow \\ \Rightarrow 1 + \frac{10^6}{f^2} &= 10^1 \Rightarrow \frac{10^6}{f^2} = 9 \Rightarrow f = \sqrt{\frac{10^6}{9}} \Rightarrow f = \frac{1000}{3} \text{ Hz} \Rightarrow \boxed{f = f_1 = 333.3 \text{ Hz}}\end{aligned}$$

Με ανάλογο τρόπο, για την **περιοχή των υψηλών συχνοτήτων**, όπου η απόκριση του ενισχυτή προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση, υπολογίζεται ότι η **συχνότητα f_2** για την οποία η ενίσχυση είναι 10 dB κάτω από τη μέγιστη τιμή της.

$$A = -\frac{100}{1 + j\frac{f}{10^6}} \Rightarrow |A| = \frac{100}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{10^{12}}}}$$

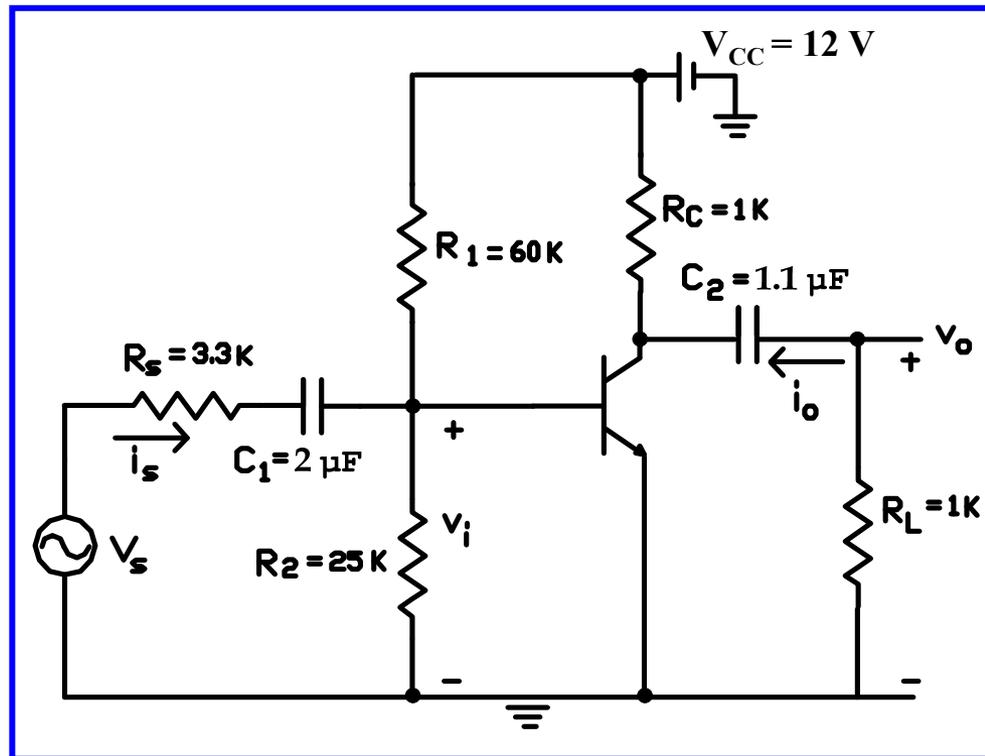
Άσκηση 7η

$$20 \log |A| = 20 \log 100 - 20 \log \sqrt{1 + \frac{f^2}{10^{12}}} \Rightarrow 20 \log \sqrt{1 + \frac{f^2}{10^{12}}} = 20 \log 100 - 20 \log |A|$$
$$\Rightarrow 20 \log \sqrt{1 + \frac{f^2}{10^{12}}} = 10 \Rightarrow 10 \log \left(1 + \frac{f^2}{10^{12}} \right) = 10 \Rightarrow \log \left(1 + \frac{f^2}{10^{12}} \right) = 1 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow 1 + \frac{f^2}{10^{12}} = 10^1 \Rightarrow \frac{f^2}{10^{12}} = 9 \Rightarrow f = \sqrt{9 \cdot 10^{12}} \Rightarrow f = 3 \cdot 10^6 \text{ Hz} \Rightarrow \boxed{f = f_2 = 3 \text{ MHz}}$$

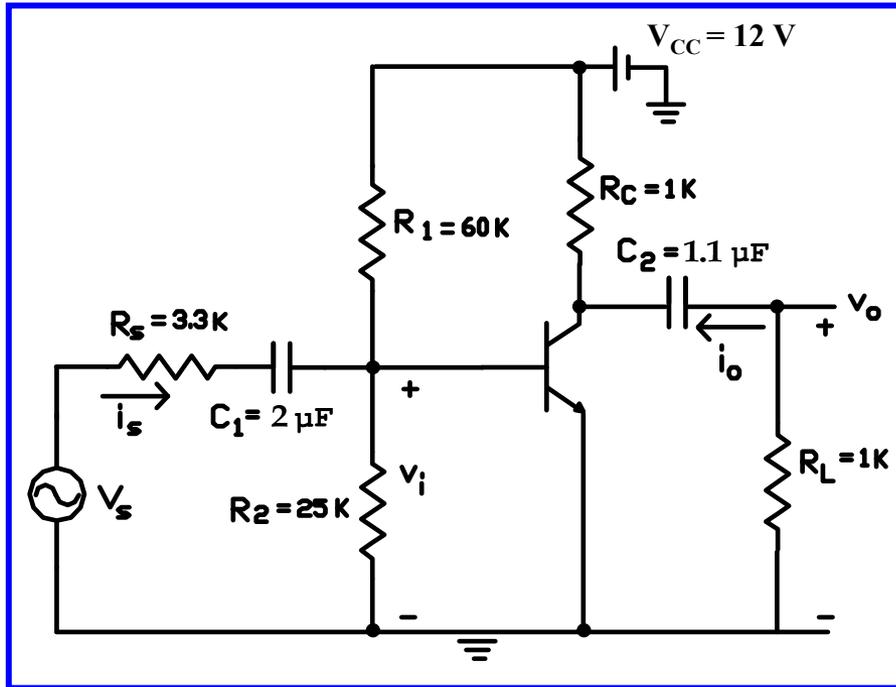


Άσκηση 8^η

Ακολουθώντας την τεχνική σταδιακής ανάλυσης κατά περιοχές συχνοτήτων, για τον ενισχυτή **κοινού εκπομπού** του σχήματος, θα προσδιορίσουμε την συνάρτηση που περιγράφει την ενίσχυση τάσης A_{vS} σε σχέση με την συχνότητα. Επίσης, θα σχεδιάσουμε την απόκριση συχνότητας μέτρου του ενισχυτή (διάγραμμα μέτρου ενίσχυσης σε dB συναρτήσει του $\log f$). Το τρανζίστορ του ενισχυτή λειτουργεί στην ενεργό περιοχή. Δίνονται: $r_{\pi} = 1,25 \text{ k}\Omega$, $C_{\pi} = 35 \text{ pF}$, $C_{\mu} = 3 \text{ pF}$, $g_m = 200 \text{ mS}$.



Άσκηση 8^η



$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 17,64 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = R_B \parallel r_\pi = 1,17 \text{ k}\Omega$$

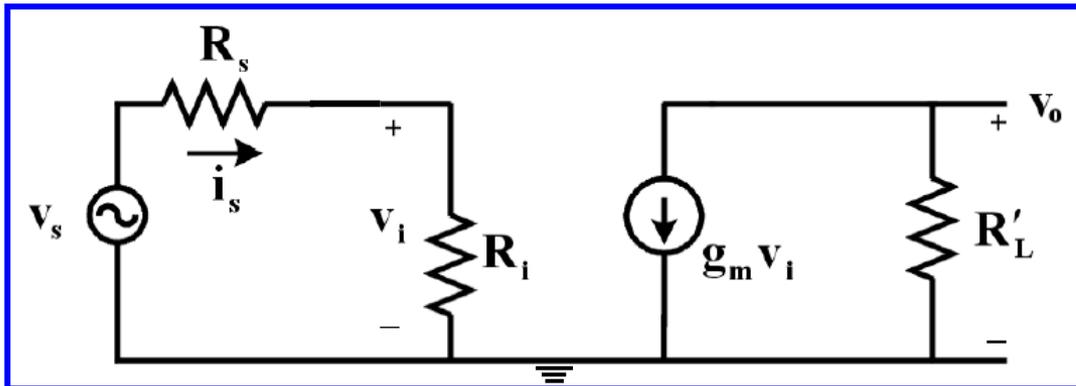
$$R'_L = R_C \parallel R_L = 0,5 \text{ k}\Omega$$

ΣΤΙΣ μεσαίες συχνότητες:

$$v_o = -g_m \cdot R'_L \cdot v_i = \frac{-g_m \cdot R'_L \cdot R_i}{R_i + R_s} v_s$$

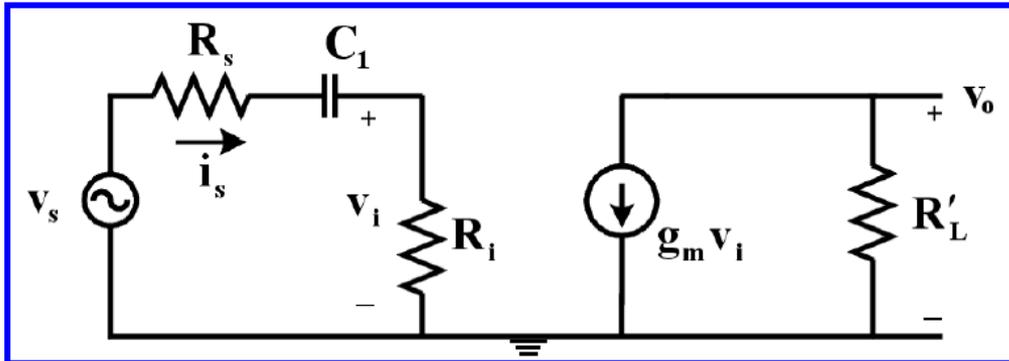
$$A_m = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{g_m \cdot R'_L \cdot R_i}{R_i + R_s}$$

$$A_m = -26.17$$

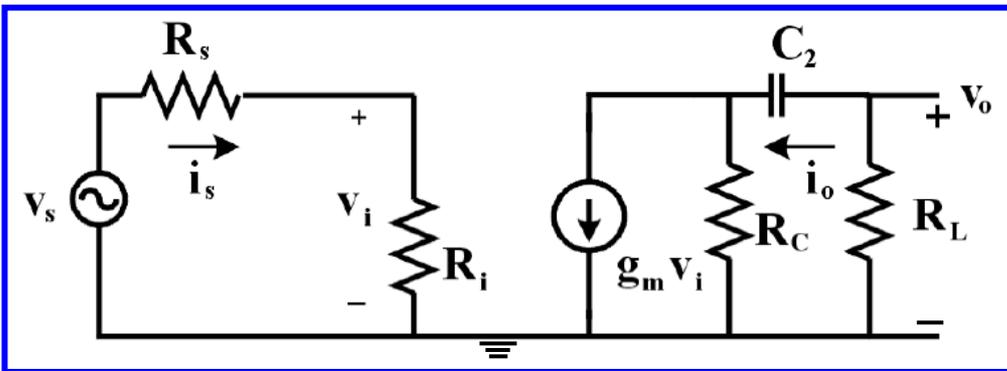


Άσκηση 8^η

ΣΤΙΣ χαμηλές συχνότητες:



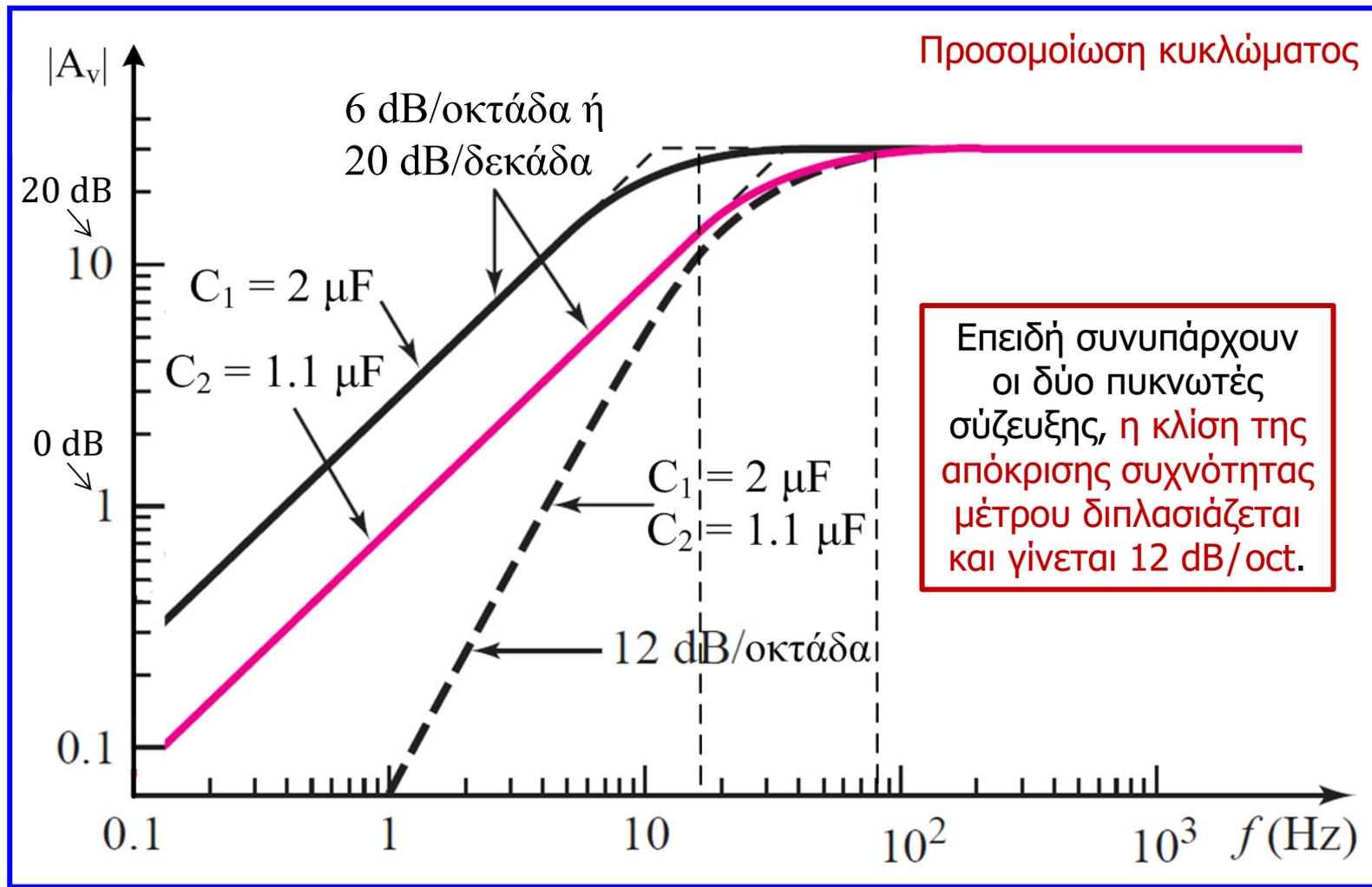
$$\tau_1 = (R_s + R_i)C_1 \Rightarrow \tau_1 = 8.9 \text{ ms}$$
$$\Rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1} = 18 \text{ Hz}$$



$$\tau_2 = (R_C + R_L)C_2 \Rightarrow \tau_2 = 2.1 \text{ ms}$$
$$\Rightarrow f_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2} = 76 \text{ Hz}$$

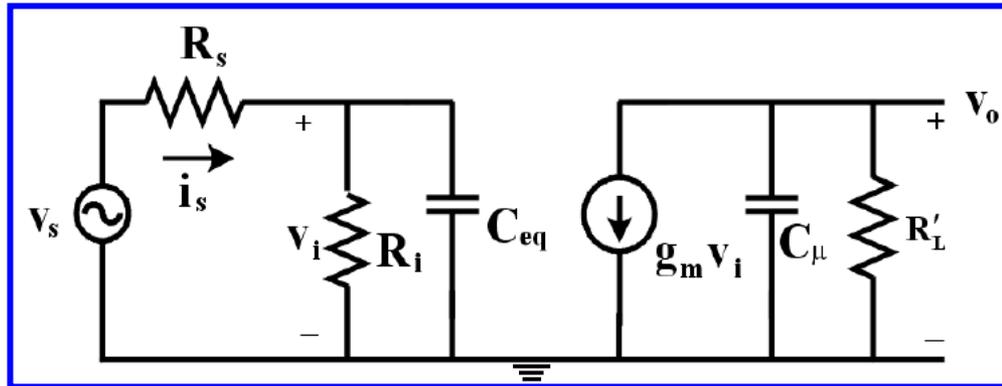
Επειδή, $f_2 > f_1$ η κυρίαρχη συχνότητα στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων (που αντιστοιχεί στον επικρατούντα πόλο) είναι η f_2 . Άρα η κατώτερη συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή είναι: $f_L = f_2 = 76 \text{ Hz}$.

Άσκηση 8^η



Άσκηση 8^η

ΣΤΙΣ **υψηλές συχνότητες**:



$$C_{eq} = C_{\pi} + (1 + g_m R'_L) \cdot C_{\mu} = 338 \text{ pF}$$

$$\tau_i = (R_i \parallel R_s) C_{eq} = 292 \text{ ns}, \quad \tau_o = R'_L C_{\mu} = 1.5 \text{ ns}$$

Αφού $\tau_i > \tau_o$ η κυρίαρχη (δηλαδή, η μικρότερη) συχνότητα στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων είναι αυτή που αντιστοιχεί στο κύκλωμα εισόδου:

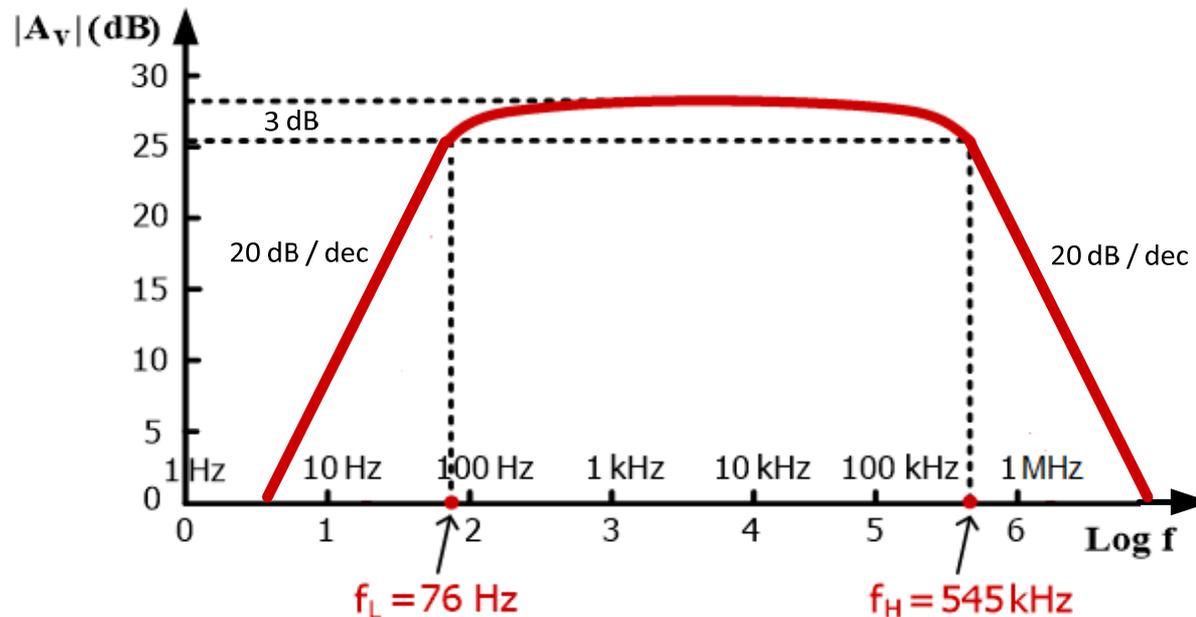
$$\tau_H = \tau_i = (R_i \parallel R_s) C_{eq} \Rightarrow f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = 545 \text{ kHz}$$

Άσκηση 8^η

Η **συνάρτηση μεταφοράς** του ενισχυτή προσεγγίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$A_v(s) = \frac{A_m \cdot \tau_L s}{(\tau_H s + 1) \cdot (\tau_L s + 1)} = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$

$$\begin{aligned}\tau_L &= \tau_2 = 2.1 \text{ ms} \\ \tau_H &= \tau_i = 292 \text{ ns} \\ f_L &= f_2 = 76 \text{ Hz} \\ f_H &= f_i = 545 \cdot 10^3 \text{ Hz}\end{aligned}$$



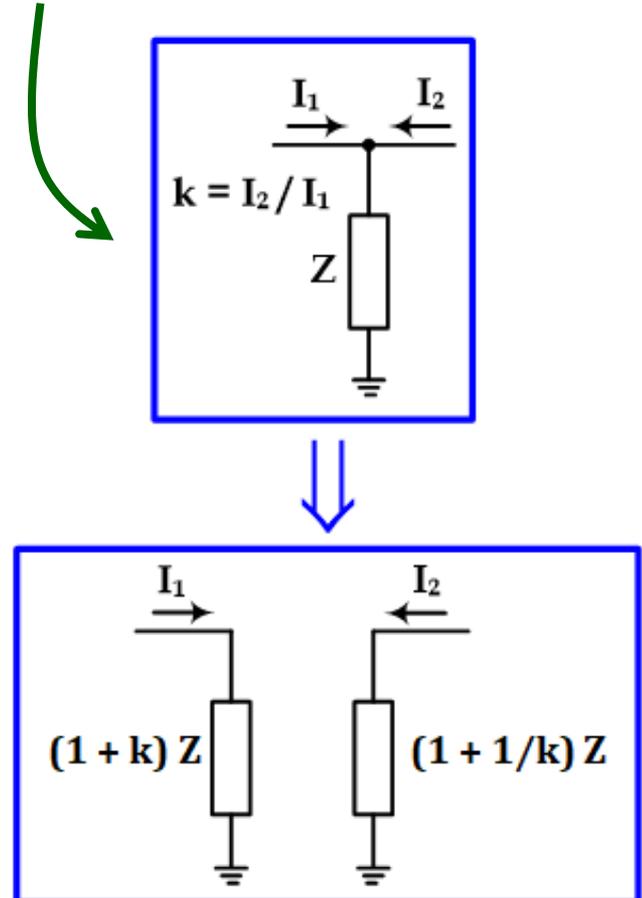
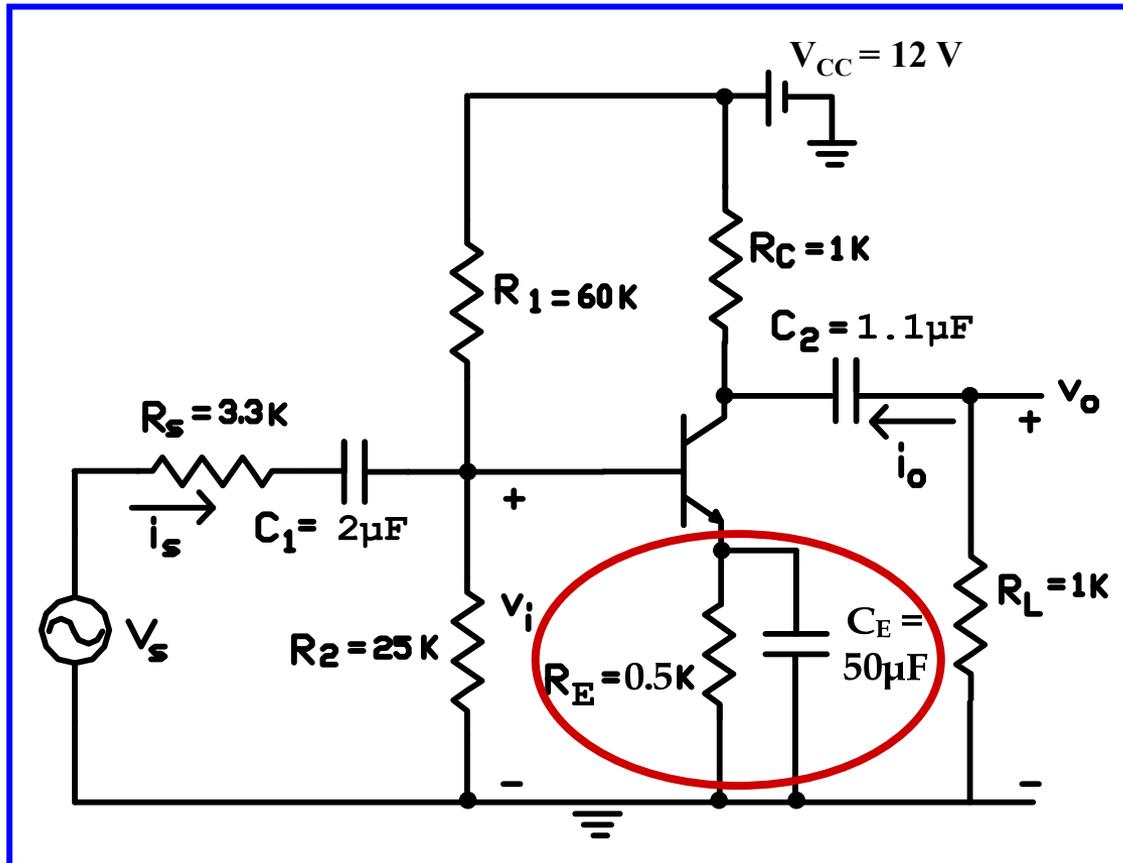
$$\begin{aligned}|A_m| &= 26.17 \Rightarrow \\ 20 \cdot \log 26.17 &= 28.35 \text{ dB}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\log 76 &= 1.88 \\ \log 545 \cdot 10^3 &= 5.74\end{aligned}$$

Λόγω της προσέγγισης των δύο επικρατούντων πόλων, στην απόκριση συχνότητας μέτρου τίθεται κλίση 20 dB/dec, ενώ είναι μεγαλύτερη

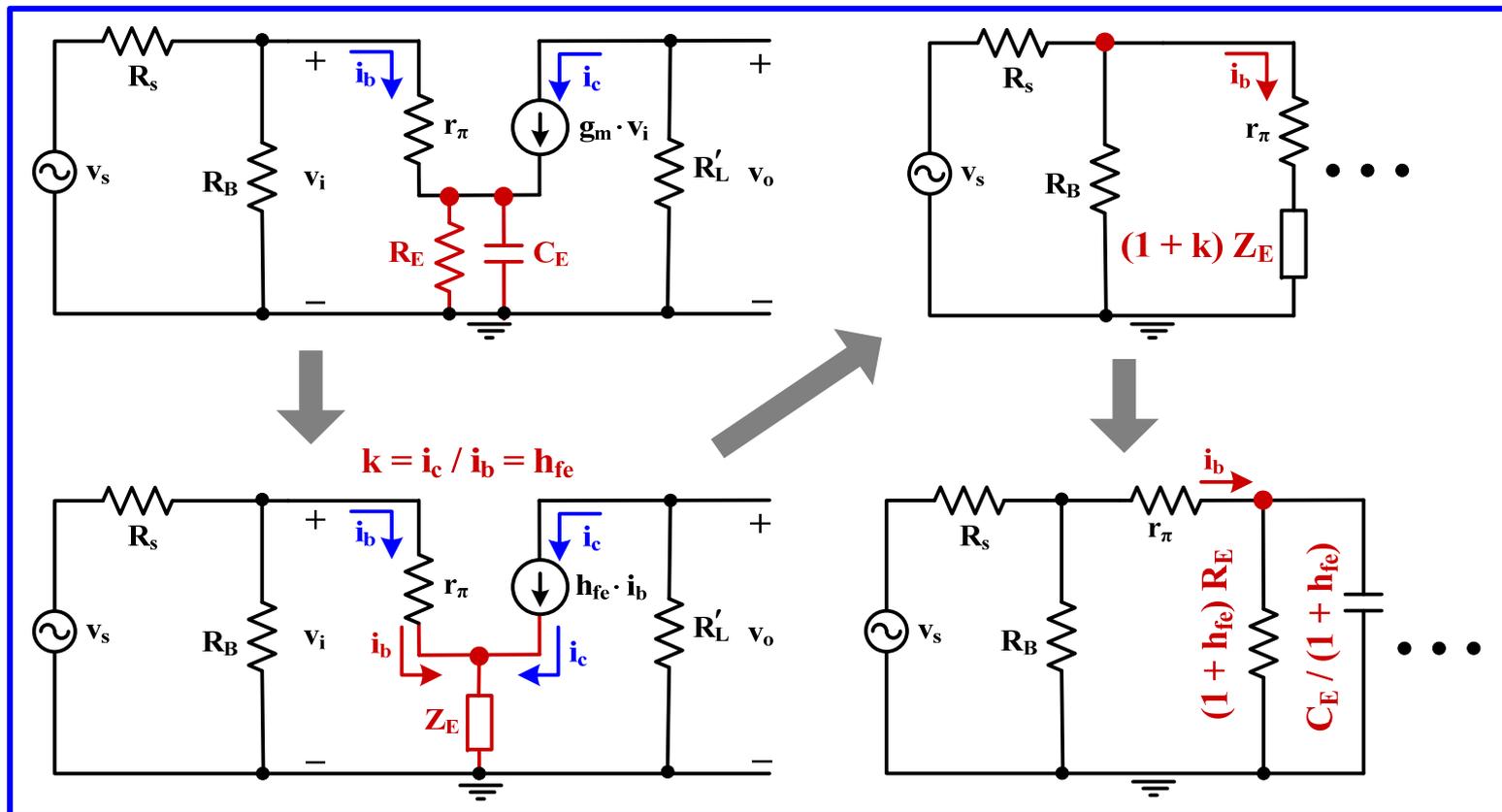
Άσκηση 9^η

Θα επαναλάβουμε τον προσδιορισμό της κατώτερης συχνότητας αποκοπής και τη σχεδίαση της απόκρισης συχνότητας μέτρου του ενισχυτή της προηγούμενης άσκησης, λαμβάνοντας υπόψη ότι υφίσταται **αντίσταση εκπομπού (R_E)** και **πυκνωτής παράκαμψης C_E** .
Θα χρησιμοποιήσουμε το **θεώρημα ρευμάτων του Miller**.



Άσκηση 9^η

Θεωρώντας ότι επιδρά στο κύκλωμα μόνο ο πυκνωτής C_E , ενώ οι πυκνωτές C_1 και C_2 λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα, σχεδιάζουμε το ισοδύναμο μοντέλο του ενισχυτή (χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ για χαμηλές & μεσαίες συχνότητες) και εφαρμόζουμε το **θεώρημα ρευμάτων του Miller** στον κλάδο του κυκλώματος που περιλαμβάνει την αντίσταση εκπομπού (R_E) και τον πυκνωτή παράκαμψης (C_E).



Άσκηση 9^η

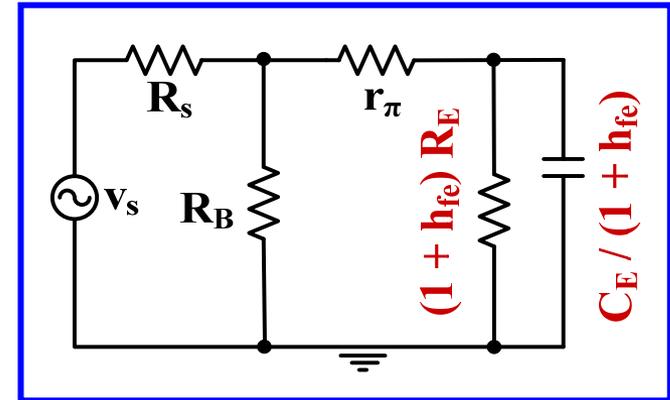
Για τον υπολογισμό της αντίστασης (R_{eq}) που συμμετέχει στη σταθερά χρόνου, βραχυκυκλώνουμε την πηγή σήματος του κυκλώματος ($h_{fe} = g_m \cdot r_\pi = 250$)

$$R_{eq} = [(R_s \parallel R_B) + r_\pi] \parallel (1 + h_{fe}) \cdot R_E \Rightarrow$$

$$R_{eq} = [(3.3 \parallel 17.64) + 1.25] \parallel (1 + 250) \cdot 0.5 \text{ k}\Omega \Rightarrow$$

$$R_{eq} = \left[\left(\frac{3.3 \cdot 17.64}{3.3 + 17.64} \right) + 1.25 \right] \parallel 125.5 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_{eq} = (2.78 + 1.25) \parallel 125.5 \text{ k}\Omega \Rightarrow$$

$$R_{eq} = (4.03 \parallel 125.5) \text{ k}\Omega \Rightarrow R_{eq} = \left(\frac{4.03 \cdot 125.5}{4.03 + 125.5} \right) \text{ k}\Omega \Rightarrow R_{eq} = 3.9 \text{ k}\Omega$$



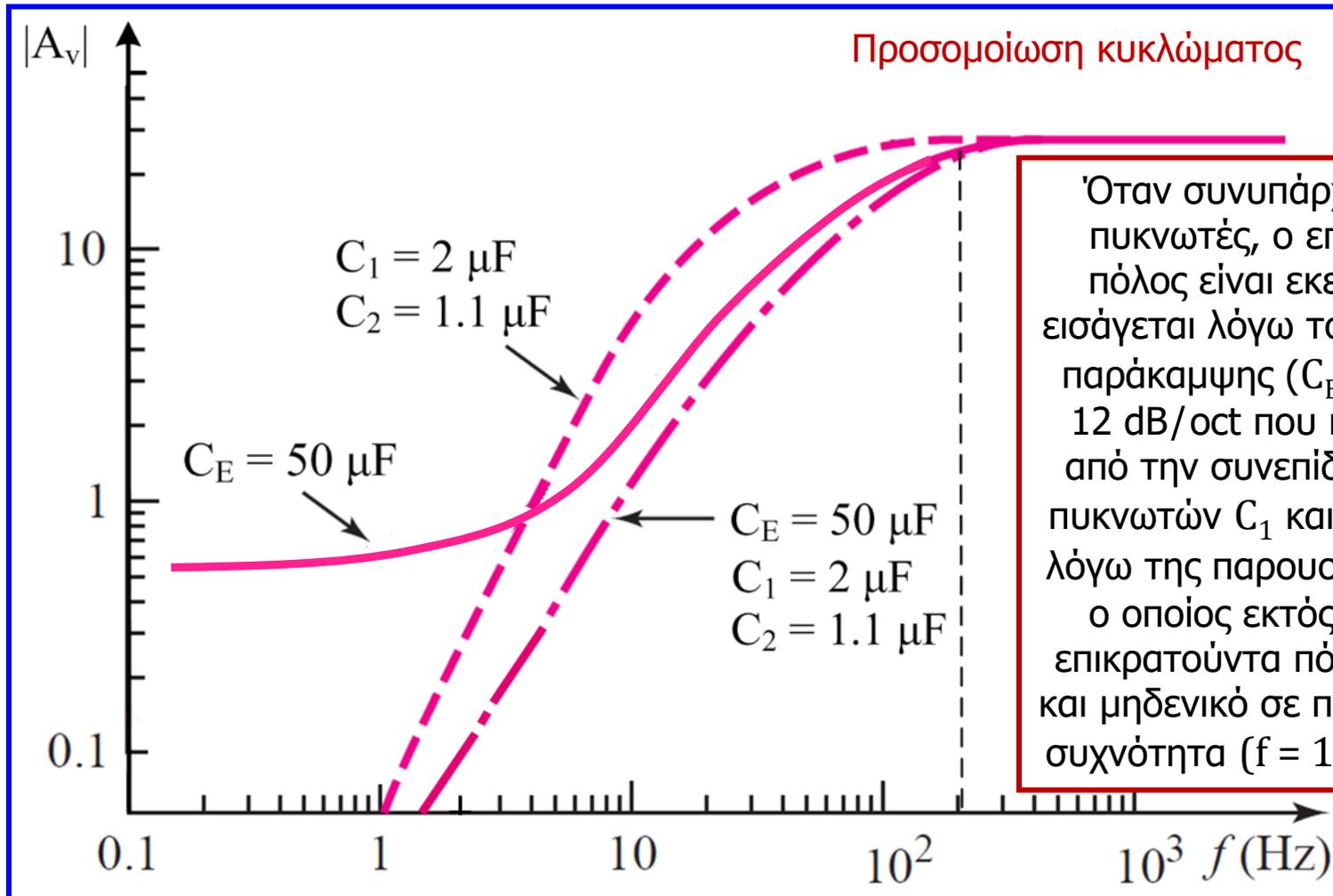
$$\tau_E = R_{eq} \cdot \frac{C_E}{1 + h_{fe}} \Rightarrow \tau_E = \frac{3.9 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{251} \text{ s} = 0.77 \text{ ms}$$

$$f_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_E} = 207 \text{ Hz}$$

Η συχνότητα αποκοπής λόγω της παρουσίας του C_E στο βρόχο εξόδου του ενισχυτή είναι αισθητά μικρότερη της f_E .

Επειδή, $f_E > f_2 > f_1$ η κυρίαρχη συχνότητα στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων (που αντιστοιχεί στον επικρατούντα πόλο) είναι η f_E . Άρα η κατώτερη συχνότητα αποκοπής είναι: $f_L = f_E = 207 \text{ Hz}$.

Άσκηση 9^η



Όταν συνυπάρχουν οι 3 πυκνωτές, ο επικρατών πόλος είναι εκείνος που εισάγεται λόγω του πυκνωτή παράκαμψης (C_E). Η κλίση 12 dB/oct που προκύπτει από την συνεπίδραση των πυκνωτών C_1 και C_2 αλλάζει λόγω της παρουσίας του C_E , ο οποίος εκτός από τον επικρατούντα πόλο, εισάγει και μηδενικό σε πολύ χαμηλή συχνότητα ($f = 1/2\pi R_E C_E$).

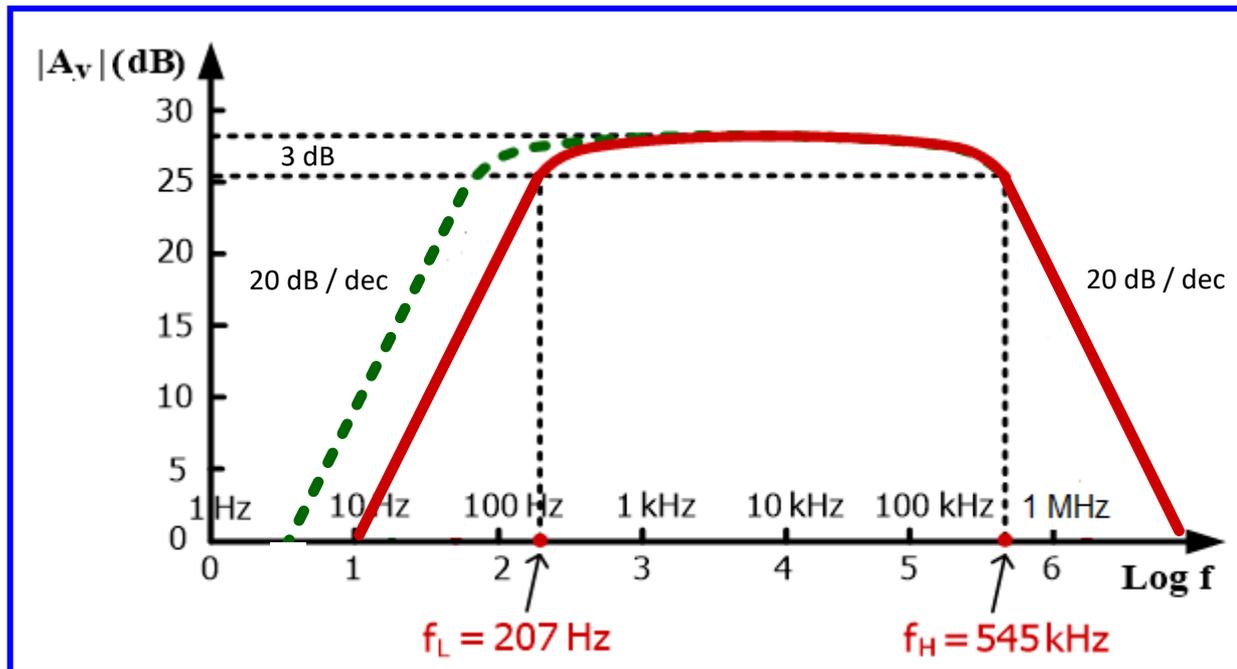
Άσκηση 9^η

Η **συνάρτηση μεταφοράς** (ενίσχυση) του ενισχυτή προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$A_v = \frac{A_m}{\left(1 + j \frac{f}{f_H}\right) \cdot \left(1 - j \frac{f_L}{f}\right)}$$

$$f_L = f_E = 207 \text{ Hz}$$

$$f_H = f_i = 545 \text{ kHz}$$

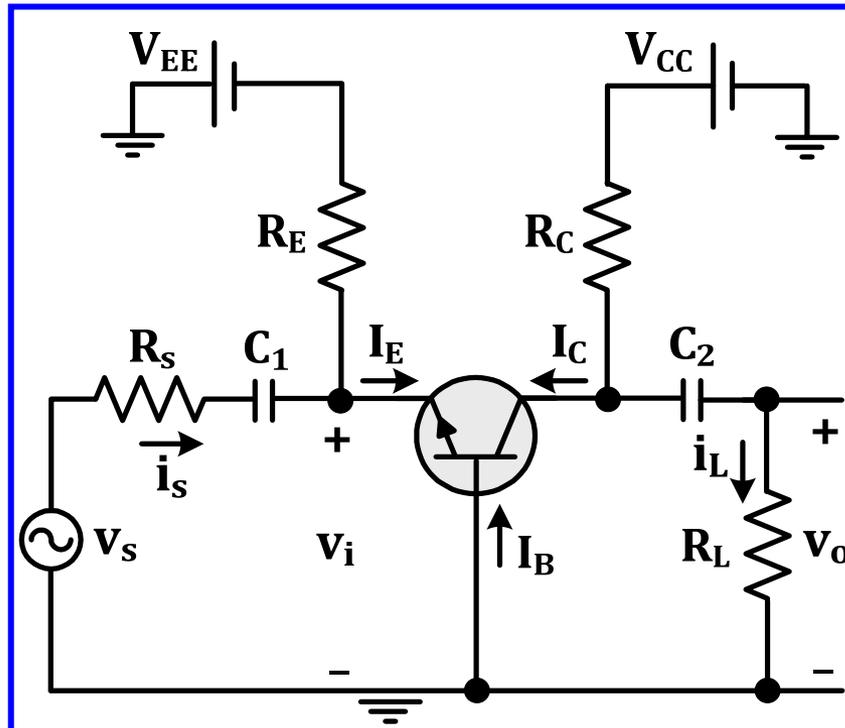


$$|A_m| = 26.17 \Rightarrow 20 \cdot \log 26.17 = 28.35 \text{ dB}$$

$$\log 76 = 0.85$$
$$\log 545 \cdot 10^3 = 5.74$$

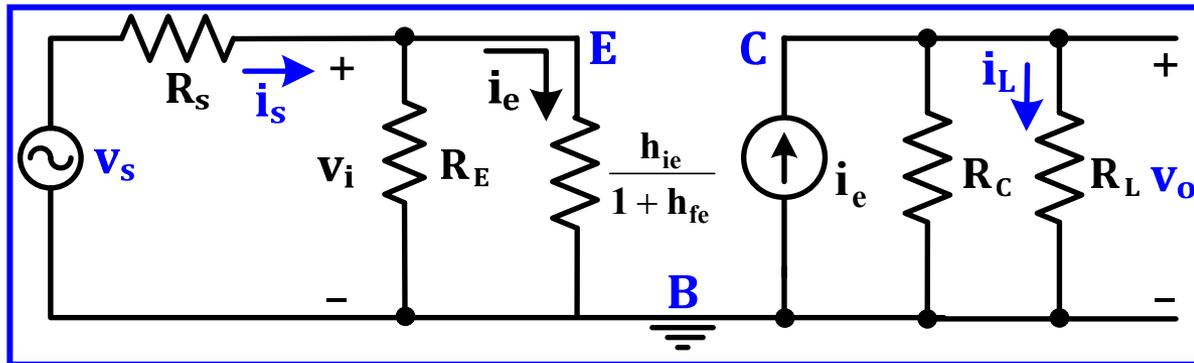
Άσκηση 10^η

Για τον παρακάτω ενισχυτή **κοινής βάσης**, δίνονται: $R_s = 5 \Omega$, $R_E = 2 \text{ k}\Omega$, $R_C = R_L = 0,5 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 5 \mu\text{F}$, $C_2 = 2 \mu\text{F}$. Για το τρανζίστορ δίνονται: $h_{ie} = 10 \text{ k}\Omega$, $h_{fe} = 200$, χωρητικότητα επαφής βάσης-εκπομπού $C_{\pi} = 50 \text{ pF}$, χωρητικότητα επαφής βάσης-συλλέκτη $C_{\mu} = 10 \text{ pF}$. Θα υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης $A_v = v_o / v_s$ στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, την κατώτερη συχνότητα αποκοπής (f_L) και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής (f_H) του ενισχυτή. Κατόπιν, θα σχεδιάσουμε την απόκριση συχνότητας μέτρου της ενίσχυσης τάσης.



Άσκηση 10^η

Ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο, για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων:



$$R'_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} = 0.25 \text{ k}\Omega$$

$$v_o = i_e \cdot R'_L = 0.25 \cdot 10^3 \cdot i_e$$

$$i_e = \frac{v_i}{\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}} = \frac{v_i}{\frac{10 \cdot 10^3}{1 + 200}} = 20.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_i$$

$$v_o = 0.25 \cdot 10^3 \cdot i_e \Rightarrow v_o = 0.25 \cdot 10^3 \cdot 20.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_i \Rightarrow v_o = 5.025 \cdot v_i$$

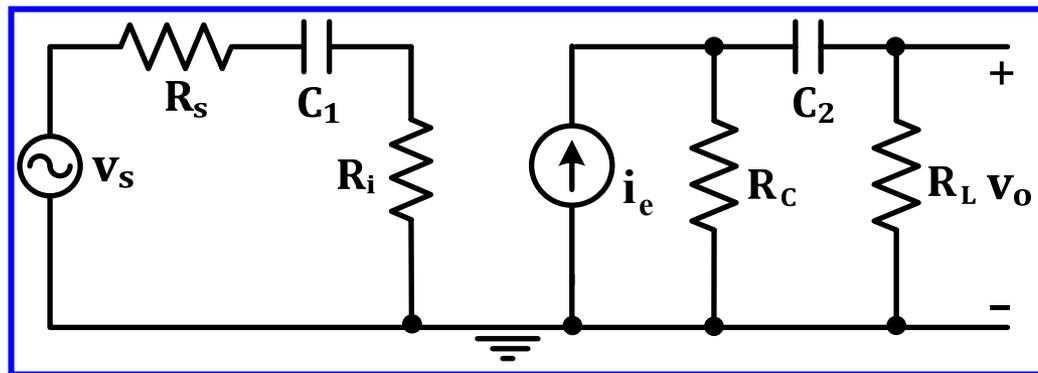
$$R_i = \frac{R_E \cdot \left(\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \right)}{R_E + \left(\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \right)} = \frac{2 \cdot \frac{10}{1 + 200}}{2 + \frac{10}{1 + 200}} \text{ k}\Omega = 0.0485 \text{ k}\Omega = 48.5 \Omega$$

Άσκηση 10^η

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} \cdot v_s \Rightarrow v_i = \frac{48.5}{48.5 + 5} \cdot v_s \Rightarrow v_i = 0.91 \cdot v_s$$

$$v_o = 5.025 \cdot v_i \Rightarrow v_o = 5.025 \cdot 0.91 \cdot v_s \Rightarrow v_o = 4.57 \cdot v_s \Rightarrow \frac{v_o}{v_s} = 4.57 \Rightarrow \mathbf{A_m = 4.57}$$

Στην **περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων**, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση κάθε πυκνωτή σύζευξης ανεξάρτητα, υπολογίζουμε τις σταθερές χρόνου των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου, τα οποία παρουσιάζουν υπερερατή συμπεριφορά. Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης που συμμετέχει σε κάθε σταθερά χρόνου, βραχυκυκλώνουμε την πηγή σήματος.



$$\tau_1 = (R_s + R_i) \cdot C_1 \Rightarrow \tau_1 = (5 + 48.5) \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ s} \Rightarrow \tau_1 = 267.5 \mu\text{s}$$

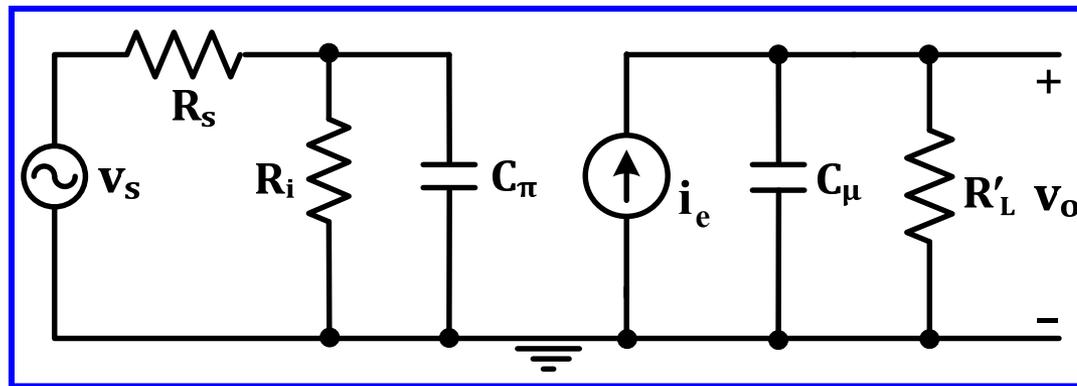
$$\tau_2 = (R_c + R_L) \cdot C_2 \Rightarrow \tau_2 = (500 + 500) \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \Rightarrow \tau_2 = 2000 \mu\text{s}$$

Άσκηση 10^η

Η σταθερά χρόνου που αντιστοιχεί στην κατώτερη συχνότητα αποκοπής είναι η μικρότερη (τ_1)

$$f_L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_1} \Rightarrow f_L = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 267.5 \cdot 10^{-6}} \text{ Hz} \Rightarrow \mathbf{f_L = 595.3 \text{ Hz}}$$

Στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων, οι σταθερές χρόνου των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου (που έχουν βαθυπερατή συμπεριφορά) υπολογίζονται, αφού λάβουμε υπόψη τις παρασιτικές χωρητικότητές του τρανζίστορ και θεωρήσουμε βραχυκυκλώματα τους πυκνωτές σύζευξης.

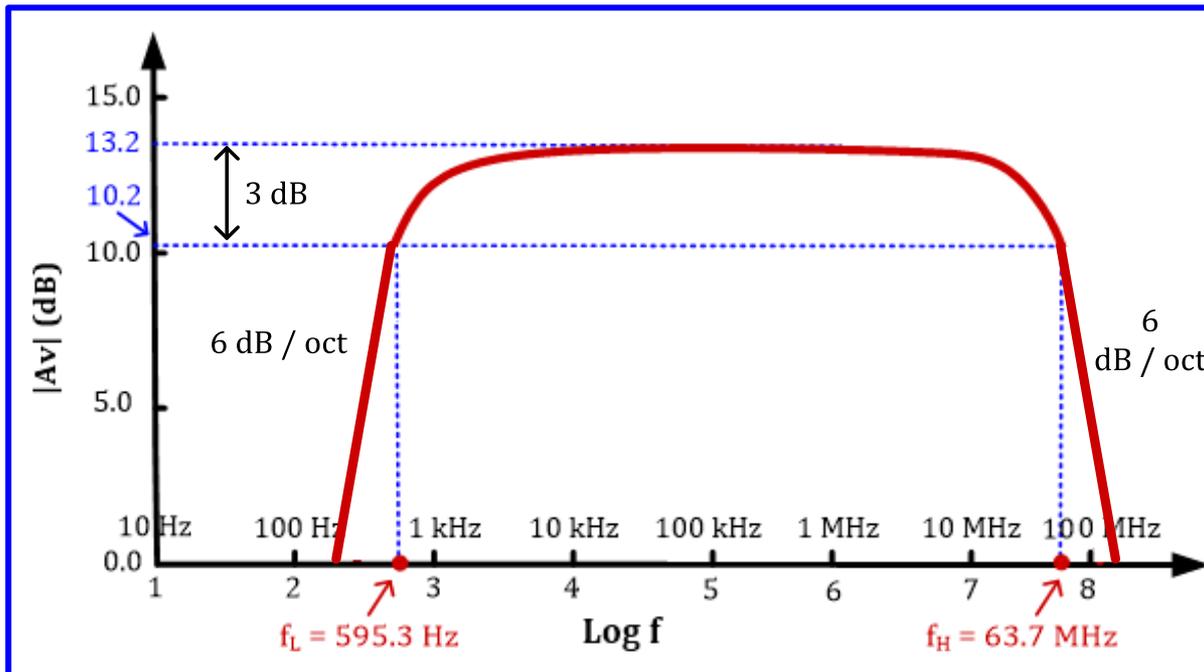


$$\tau_i = \frac{R_s \cdot R_i}{R_s + R_i} \cdot C_{\pi} \Rightarrow \tau_i = \frac{R_s \cdot R_i}{R_s + R_i} \cdot C_{\pi} = \left(\frac{5 \cdot 48.5}{5 + 48.5} \cdot 50 \cdot 10^{-12} \right) \text{ s} = 0.226 \text{ ns}$$
$$\tau_o = R'_L \cdot C_{\mu} = (0.25 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-12}) \text{ s} = 2.5 \text{ ns}$$

Άσκηση 10^η

Η σταθερά χρόνου που αντιστοιχεί στην ανώτερη συχνότητα αποκοπής είναι η μεγαλύτερη (τ_0)

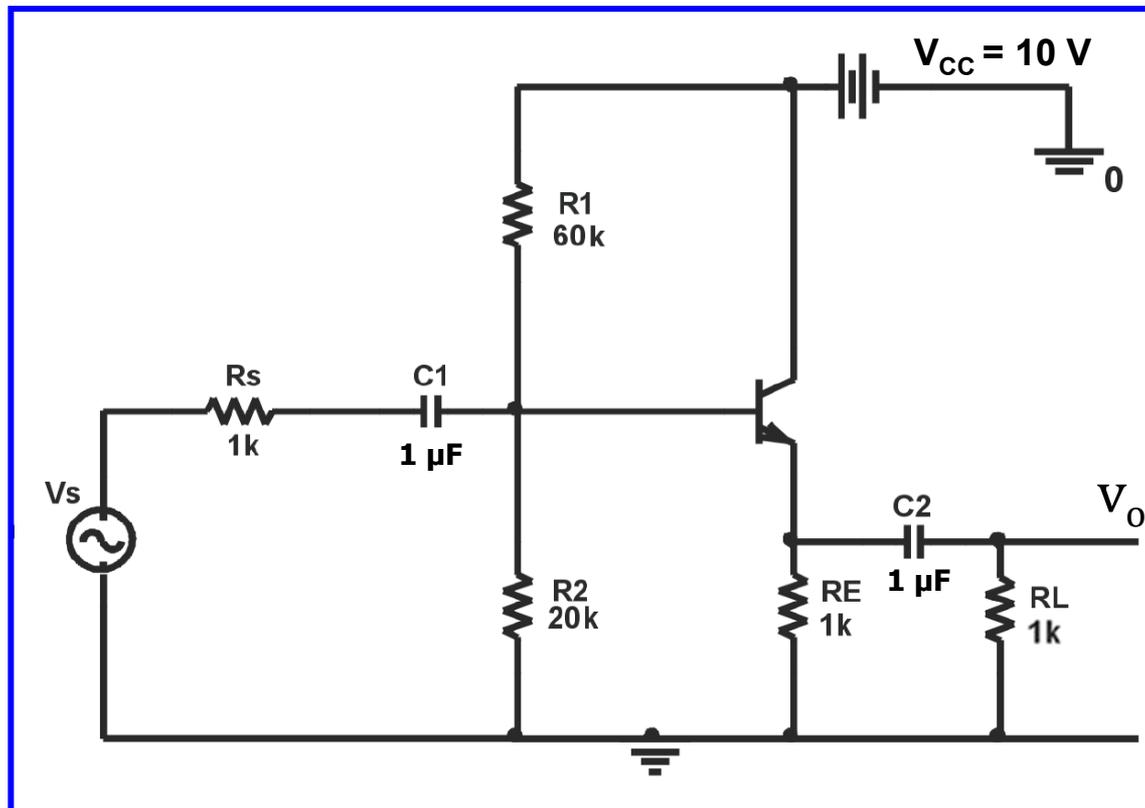
$$f_H = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_0} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 2.5 \cdot 10^{-9}} \text{ Hz} \Rightarrow f_H = 63.7 \text{ MHz}$$



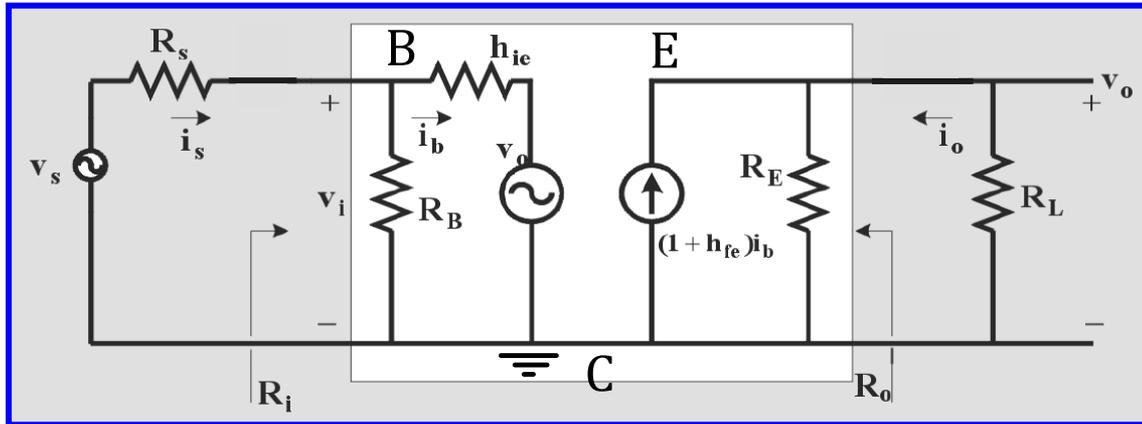
$$20 \cdot \text{Log}(4.57) = 13.2 \text{ dB}$$
$$\text{Log}(f_L) = \text{Log}(595.3) = 2.77$$
$$\text{Log}(f_H) = \text{Log}(63.7 \cdot 10^6) = 7.8$$

Άσκηση 11^η

Για το διπολικό τρανζίστορ του ενισχυτή **κοινού συλλέκτη** του παρακάτω σχήματος, δίνονται $h_{fe} = 350$, $h_{ie} = 2 \text{ k}\Omega$, χωρητικότητα επαφής βάσης-εκπομπού $C_{\pi} = 40 \text{ pF}$, χωρητικότητα επαφής βάσης-συλλέκτη $C_{\mu} = 5 \text{ pf}$. Θα υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης $A_m = v_o / v_s$ για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, την κατώτερη συχνότητα αποκοπής (f_L) και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής (f_H) του ενισχυτή. Κατόπιν θα σχεδιάσουμε την απόκριση συχνότητας μέτρου της ενίσχυσης τάσης.



Άσκηση 11^η



$$R_B = R_1 || R_2 = 15 \text{ k}\Omega$$

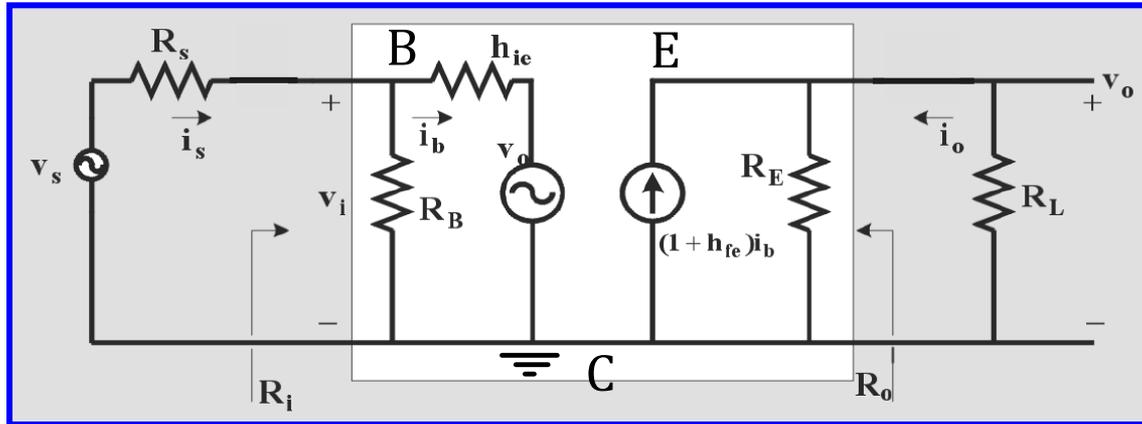
$$R'_L = R_E || R_L = 0,5 \text{ k}\Omega$$

Η ενίσχυση τάσης και η αντίσταση εισόδου του ενισχυτή για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, έχουν υπολογιστεί στο Παράδειγμα 6 της ενότητας 2.

$$R_i = \frac{[h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L]R_B}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L + R_B} = 13,83 \text{ k}\Omega$$

$$A_m = \frac{v_o}{v_s} = \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L} \frac{R_i}{R_i + R_s} = 0,922$$

Άσκηση 11^η

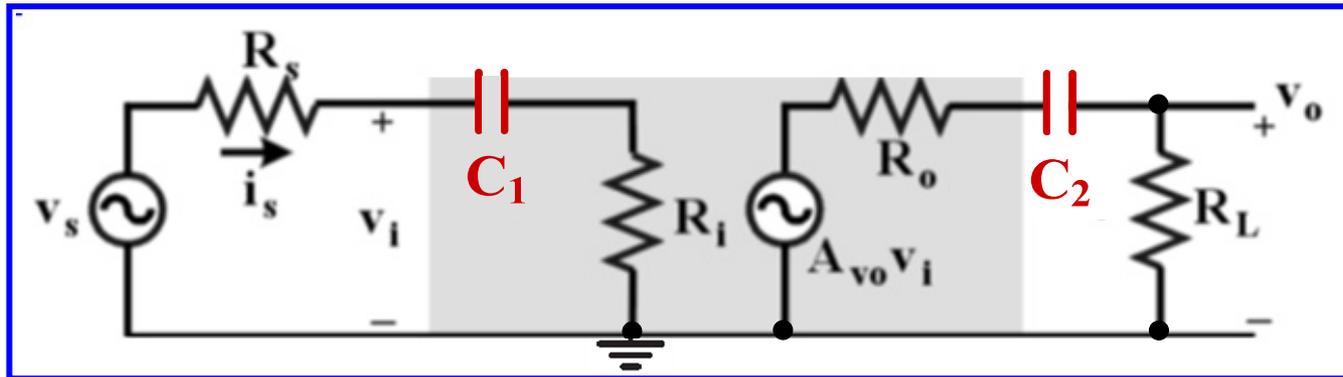


$$R_o = \frac{v_o}{i_o} \Big|_{v_i=0, R_L=\infty} = \frac{v_o}{i_{R_E} - (1 + h_{fe})i_b} = \frac{v_o}{\frac{v_o}{R_E} - (1 + h_{fe})\frac{(-v_o)}{h_{ie}}}$$

$$R_o = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{1 + h_{fe}}{h_{ie}}} = \frac{R_E \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}}{R_E + \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}} = 5.67 \Omega$$

Άσκηση 11^η

Μετά τον υπολογισμό των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου του ενισχυτή, σχεδιάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμά του, το οποίο αντιστοιχεί σε μια **ελεγχόμενη πηγή τάσης με αντιστάσεις εισόδου και εξόδου** αυτές που υπολογίσαμε. Στο ίδιο κύκλωμα προσθέτουμε τους δύο **πυκνωτές σύζευξης**, οι οποίοι επιδρούν στην ενίσχυση όταν ο ενισχυτής λειτουργεί στις **χαμηλές συχνότητες**.



Λαμβάνοντας υπόψη την **επίδραση κάθε πυκνωτή σύζευξης ανεξάρτητα**, υπολογίζουμε τις **σταθερές χρόνου** των κυκλωμάτων εισόδου και εξόδου, τα οποία παρουσιάζουν **υψηλερατή συμπεριφορά**.

$$\tau_1 = (R_s + R_i)C_1 \Rightarrow \tau_1 = 14.83 \text{ ms}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1} = 10.74 \text{ Hz}$$

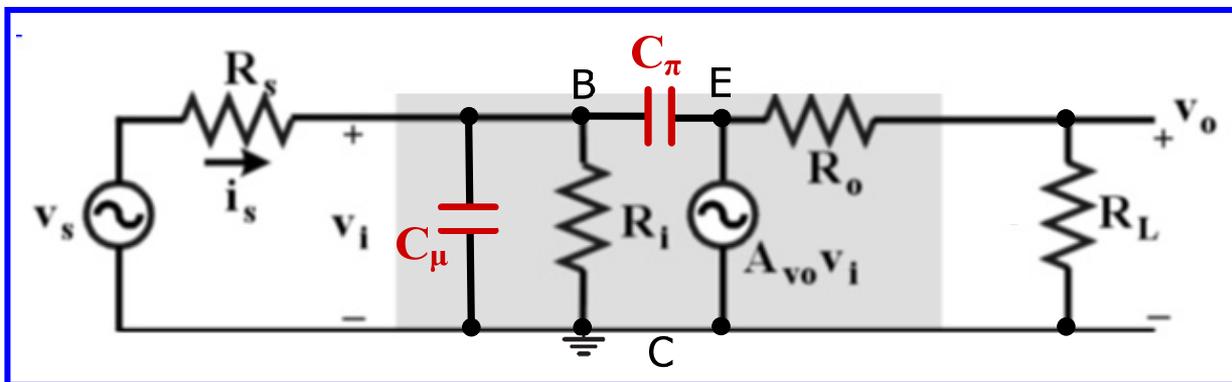
$$\tau_2 = (R_o + R_L)C_2 \Rightarrow \tau_2 = 1.006 \text{ ms}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2} = 158.3 \text{ Hz}$$

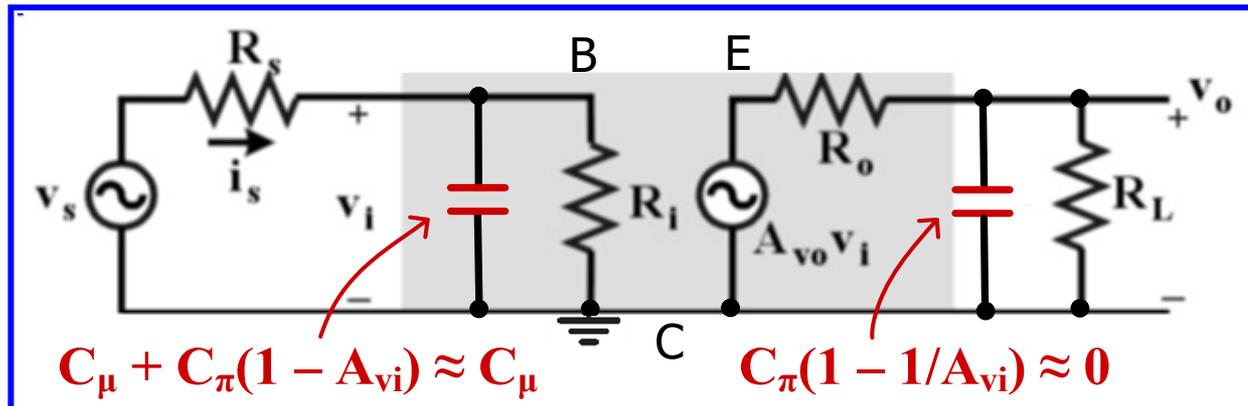
Η **κατώτερη συχνότητα αποκοπής** του ενισχυτή είναι η **μεγαλύτερη**: $f_L = 158,3 \text{ Hz}$

Άσκηση 11^η

Στις **υψηλές συχνότητες** προσθέτουμε στο ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή τις χωρητικότητες της **επαφής βάσης-εκπομπού (C_π)** και της **επαφής βάσης-συλλέκτη (C_μ)** του τρανζίστορ και θεωρούμε ως βραχυκυκλώματα τους πυκνωτές σύζευξης.



Χρησιμοποιούμε το **θεώρημα τάσεων του Miller**, οπότε η χωρητικότητα C_π χωρίζεται σε δύο χωρητικότητες συνδεδεμένες παράλληλα στην είσοδο και στην έξοδο, αντίστοιχα:



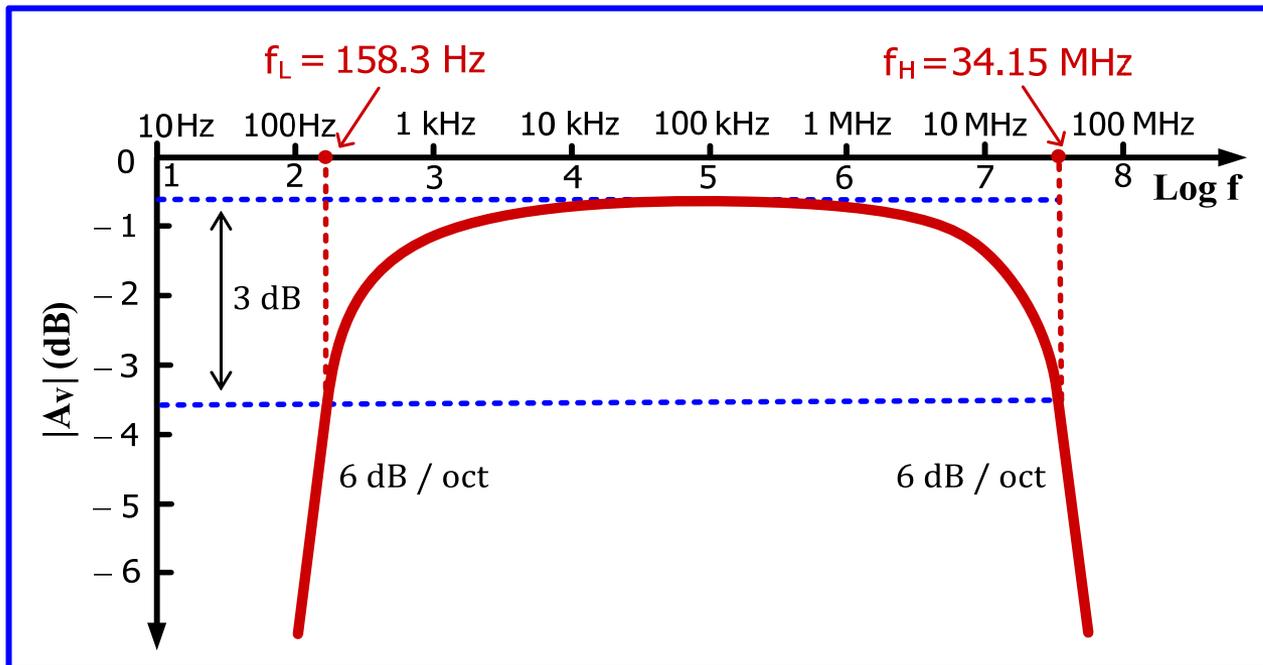
$$\begin{aligned}
 A_{vi} &= \frac{v_o}{v_i} \\
 &= \frac{(1 + h_{fe})R'_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe})R'_L} \\
 &= 0.989 \approx 1
 \end{aligned}$$

Άσκηση 11^η

Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου, το οποίο παρουσιάζει βαθυπερατή συμπεριφορά, είναι αυτή που αντιστοιχεί στην ανώτερη συχνότητα αποκοπής:

$$\tau_H = \tau_i = (R_i || R_s) C_\mu = \frac{R_i R_s}{R_i + R_s} C_\mu = 4,662 \text{ ns}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = 34,15 \text{ MHz}$$



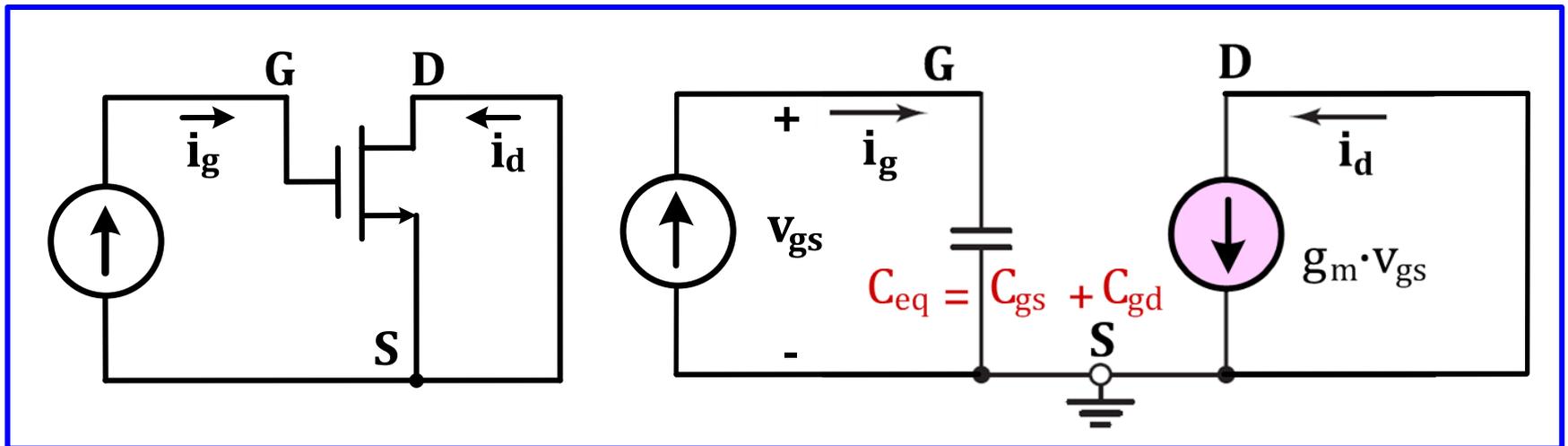
$$|A_m| = 0.922 \Rightarrow 20 \cdot \log 0.922 = -0.7 \text{ dB}$$

$$\log 158.3 = 2.2$$
$$\log 34,15 \cdot 10^6 = 7,53$$

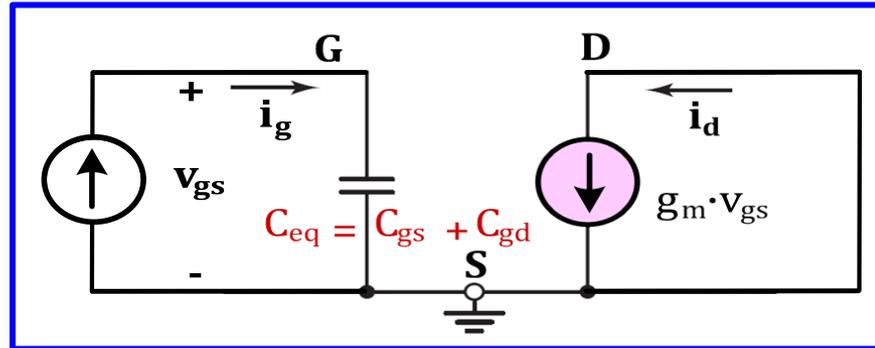
Άσκηση 12^η

Οι κατασκευαστές MOSFET παρέχουν την συχνότητα (f_T) στην οποία ένα MOSFET παρουσιάζει μοναδιαία ενίσχυση ρεύματος, όταν η υποδοχή του είναι βραχυκυκλωμένη. Η συχνότητα αυτή μας δίνει μια προσέγγιση για το εύρος συχνοτήτων στο οποίο το MOSFET μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτής.

Για ένα MOSFET με βραχυκυκλωμένη υποδοχή θα προσδιορίσουμε την **συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης (f_T)** σε σχέση με τα στοιχεία του MOSFET.



Άσκηση 12^η



$$i_d = g_m \cdot v_{gs}$$

$$i_g = \frac{v_{gs}}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{eq}}} = v_{gs} \cdot j \cdot \omega \cdot C_{eq}$$

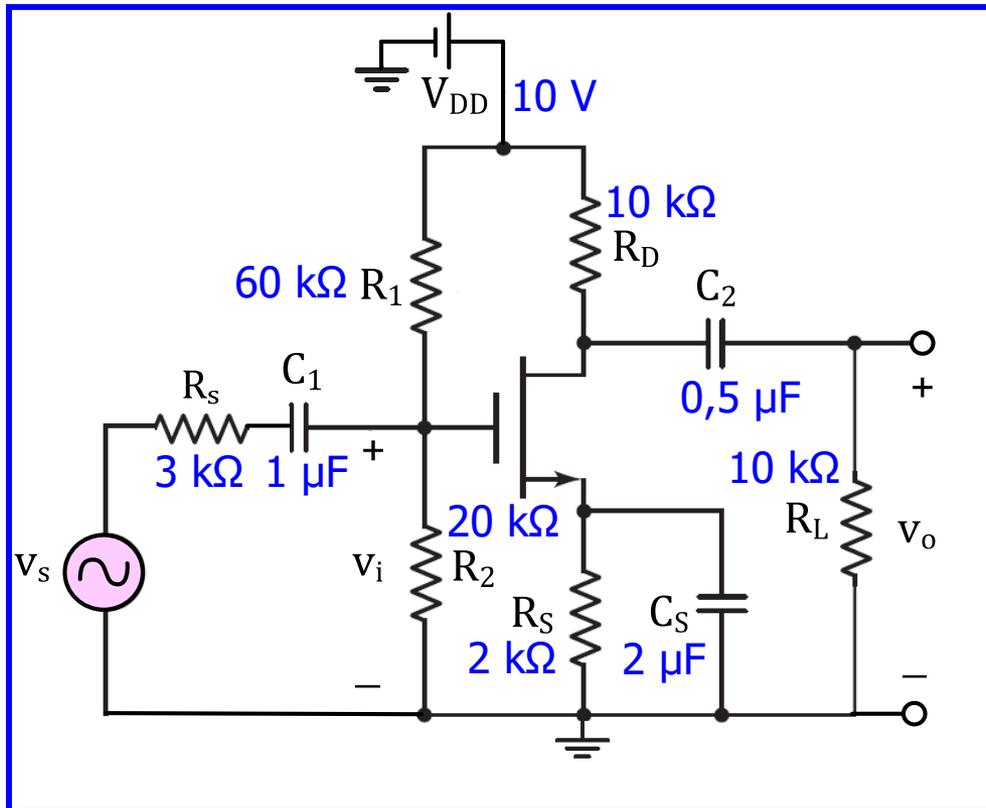
$$\beta(j\omega) = \frac{i_d}{i_g} = \frac{g_m \cdot v_{gs}}{v_{gs} \cdot j \cdot \omega \cdot C_{eq}} = \frac{g_m}{j \cdot \omega \cdot C_{eq}}$$

$$|\beta(f)| = \frac{g_m}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{eq}}$$

$$|\beta(f)| = 1 \Rightarrow \frac{g_m}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot C_{eq}} = 1 \Rightarrow f_T = \frac{g_m}{2 \cdot \pi \cdot C_{eq}}$$

Άσκηση 13^η

Για το MOSFET του ενισχυτή κοινής πηγής του παρακάτω σχήματος, δίνονται:
 $\beta = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_T = 0,3 \text{ V}$, $V_S = 1 \text{ V}$, $C_{gs} = 50 \text{ fF}$, $C_{gd} = 10 \text{ fF}$. Θα υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης $A_m = v_o / v_s$ για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, την κατώτερη συχνότητα αποκοπής (f_L) και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής (f_H) του ενισχυτή. Κατόπιν θα σχεδιάσουμε την απόκριση συχνότητας μέτρου της ενίσχυσης τάσης.



$$V_G = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = 2.5 \text{ V}$$

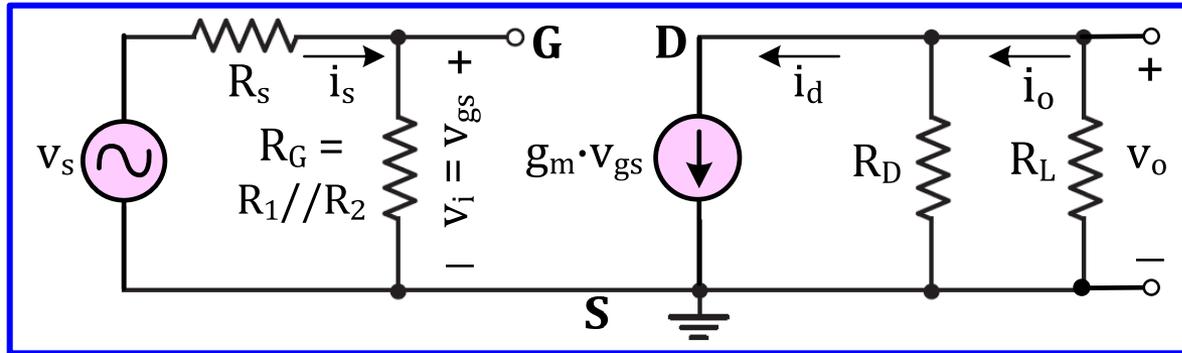
$$V_{GS} = V_G - V_S = 1.5 \text{ V}$$

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = 0.5 \text{ mA}$$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D} \Rightarrow g_m = 1 \text{ mS}$$

Άσκηση 13^η

Ενίσχυση τάσης στην περιοχή μεσαίων συχνοτήτων (οι πυκνωτές σύζευξης και παράκαμψης θεωρούνται βραχυκυκλώματα και οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET θεωρούνται ανοικτά κυκλώματα)



$$R'_L = R_D \parallel R_L = 5 \text{ k}\Omega$$

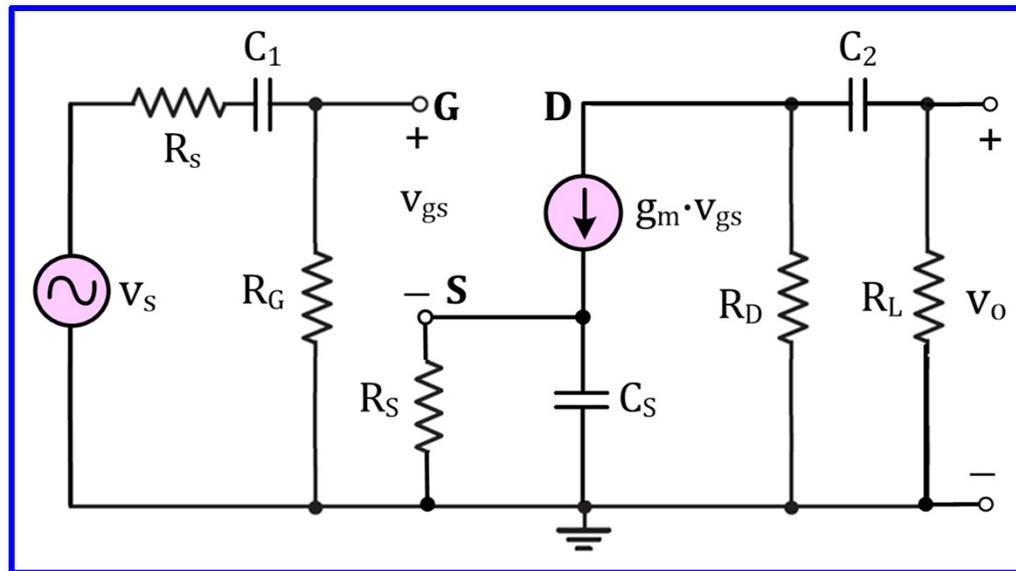
$$R_G = R_1 \parallel R_2 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$v_o = -g_m v_{gs} R'_L \Rightarrow v_o = -g_m R'_L \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s \Rightarrow$$

$$A_m = v_o / v_s = -g_m R'_L \frac{R_G}{R_s + R_G} = -4,165$$

Άσκηση 13^η

Περιοχή χαμηλών συχνοτήτων: υπολογίζονται οι σταθερές χρόνου στα υπερπερατά κυκλώματα RC που σχηματίζει κάθε πυκνωτής του ενισχυτή (υφίστανται 2 πυκνωτές σύζευξης και ένας πυκνωτής παράκαμψης). Η επίδραση κάθε πυκνωτή εξετάζεται ανεξάρτητα και στην συνέχεια ακολουθείται η προσέγγιση του επικρατούντος πόλου. Οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET θεωρούνται ανοικτά κυκλώματα.

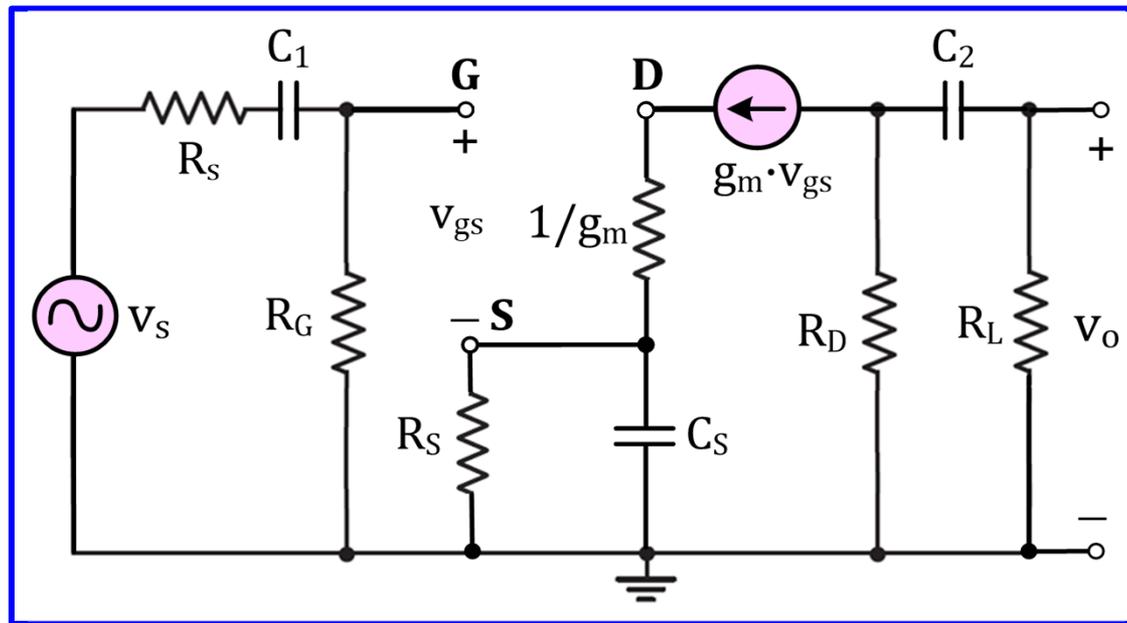


$$\tau_1 = (R_s + R_G)C_1 = 18 \text{ ms} \Rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi\tau_1} = 8.8 \text{ Hz}$$

$$\tau_2 = (R_D + R_L)C_2 = 10 \text{ ms} \Rightarrow f_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2} = 16 \text{ Hz}$$

Άσκηση 13^η

Υπολογισμός της σταθεράς χρόνου του κυκλώματος πηγής με χρήση του τροποποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος μικρού σήματος του MOSFET (ισοδύναμο κύκλωμα T).

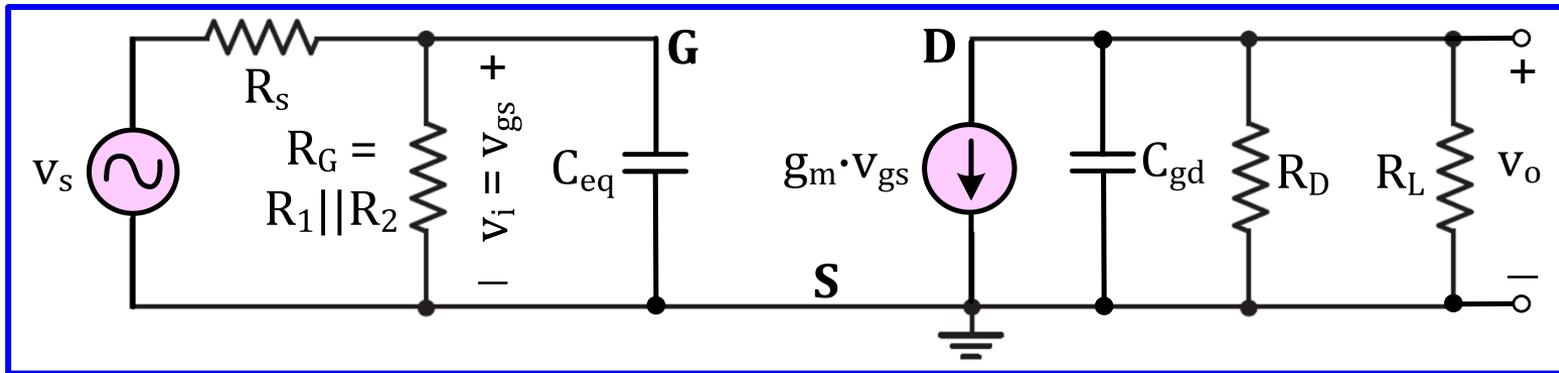


$$\tau_s = (R_s || 1/g_m) C_s = 1.334 \text{ ms} \Rightarrow f_s = \frac{1}{2\pi\tau_s} = 119 \text{ Hz} \Rightarrow f_L = f_s = 119 \text{ Hz}$$

Ο **επικρατών πόλος** (δηλαδή, ο πόλος της απόκρισης συχνότητας που καθορίζει την κατώτερη συχνότητα αποκοπής) είναι αυτός που **αντιστοιχεί στην σταθερά χρόνου τ_s** .

Άσκηση 13^η

Στις υψηλές συχνότητες οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET επιδρούν στην ενίσχυση και για να λάβουμε υπόψη την επίδρασή τους, χρησιμοποιούμε το **ισοδύναμο π μοντέλο του MOSFET** με τις παρασιτικές χωρητικότητές του και επανασχεδιάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή στο εναλλασσόμενο. Τα κυκλώματα RC σε είσοδο και έξοδο του ενισχυτή έχουν βαθυπερατή συμπεριφορά. Οι πυκνωτές σύζευξης και παράκαμψης θεωρούνται ως βραχυκυκλώματα.



$$C_{eq} = C_{gs} + C_{gd} (1 + g_m R'_L) = 110 \text{ fF}$$

$$\tau_i = (R_G || R_s) C_{eq} = 0.275 \text{ ns} \Rightarrow f_i = \frac{1}{2\pi\tau_i} = 579.04 \text{ MHz} \Rightarrow f_L = f_i = 579.04 \text{ MHz}$$

Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εξόδου είναι πολύ μικρότερη από την σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου που υπολογίσαμε. Συνεπώς, το **κύκλωμα εισόδου** είναι αυτό που **καθορίζει την ανώτερη συχνότητα αποκοπής του ενισχυτή.**

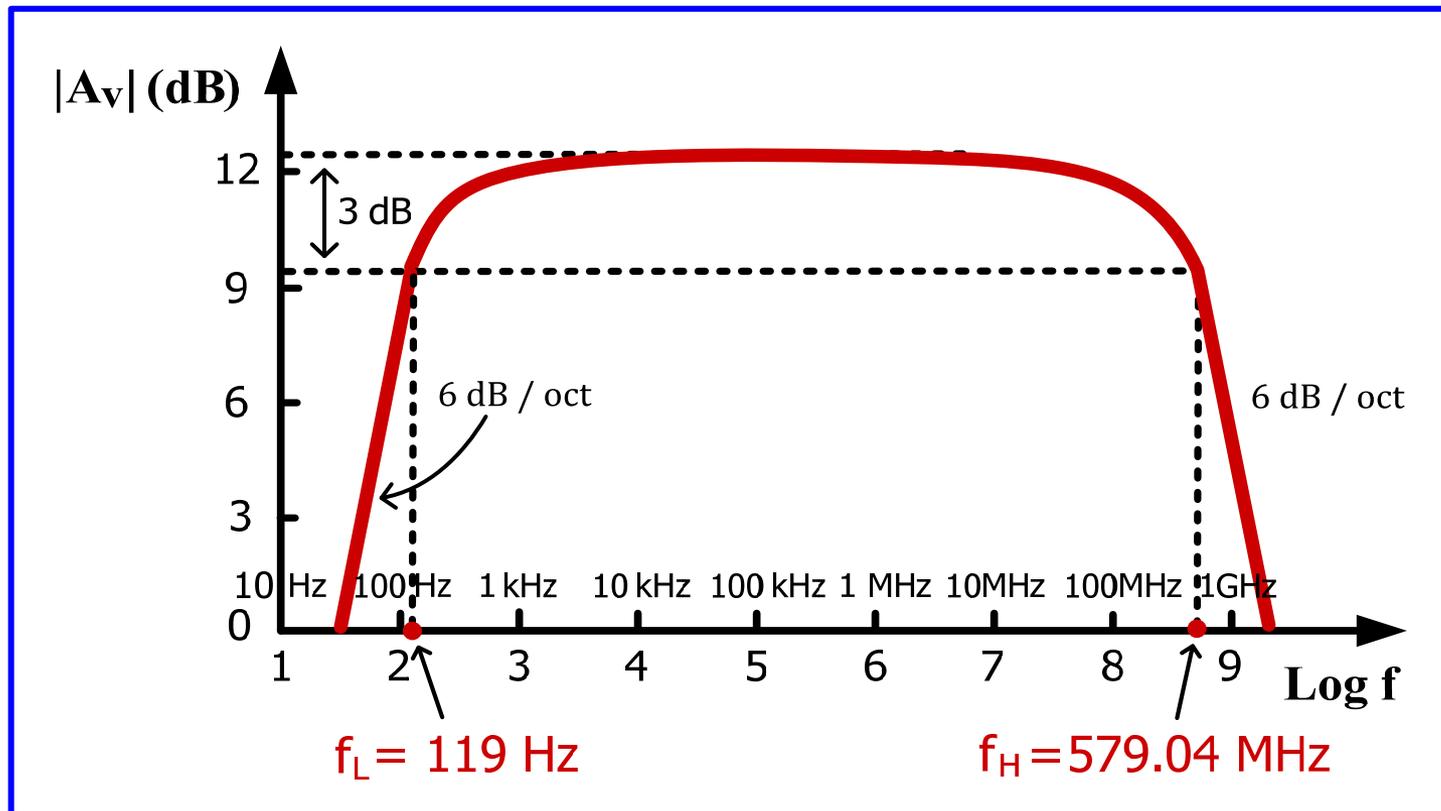
Άσκηση 13^η

Σχεδίαση της απόκρισης συχνότητας μέτρου της ενίσχυσης τάσης του ενισχυτή:

$$|A_m| = 4,165 \Rightarrow 20 \cdot \log 4,165 = 12,4 \text{ dB}$$

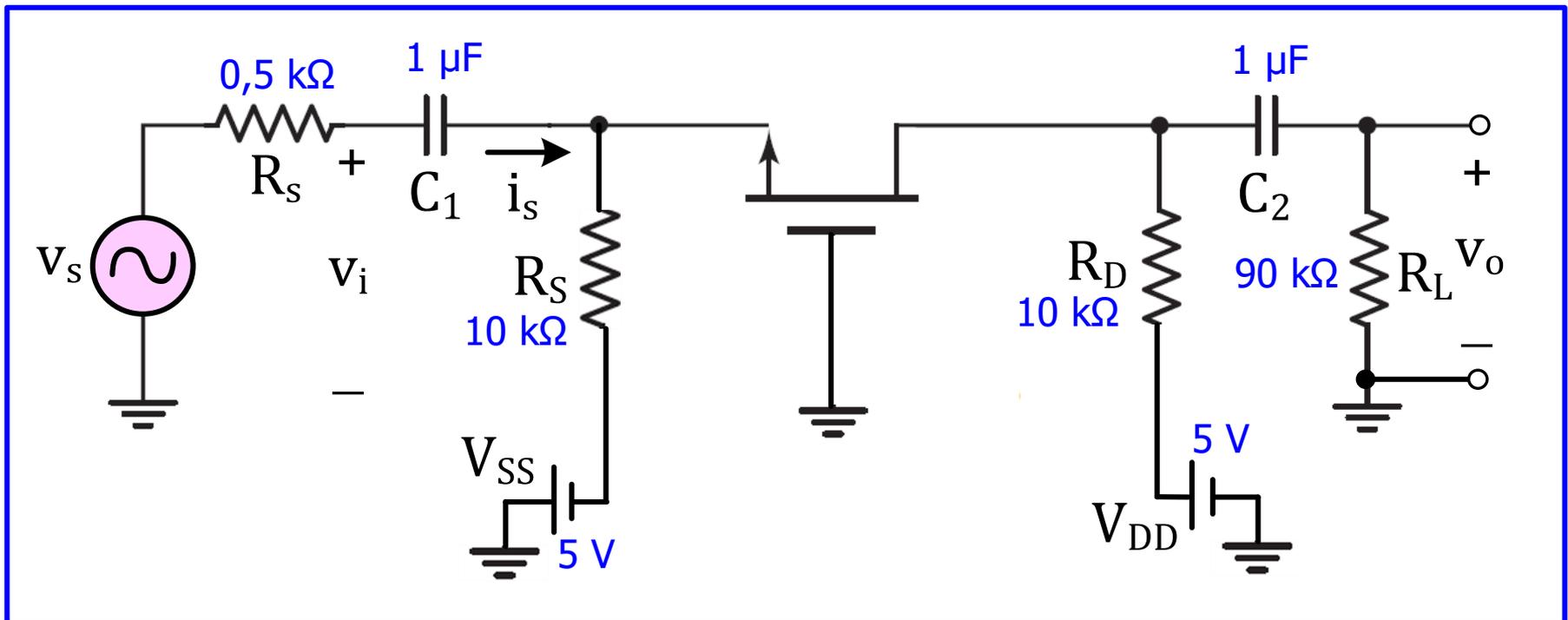
$$\log 119 = 2,07$$

$$\log 579,04 \cdot 10^6 = 8,76$$



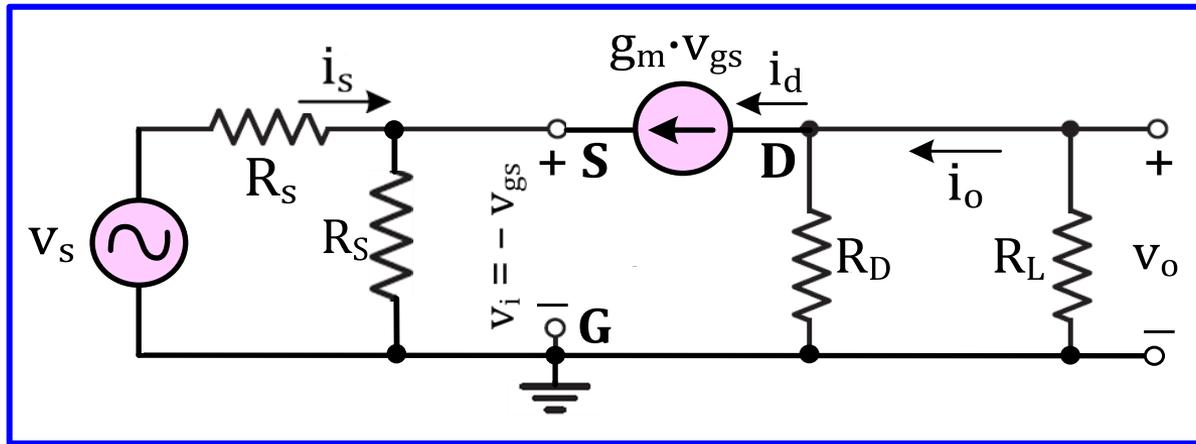
Άσκηση 14^η

Για το MOSFET του ενισχυτή κοινής πύλης του παρακάτω σχήματος, δίνονται $g_m = 1 \text{ mS}$, $C_{gs} = 50 \text{ fF}$, $C_{gd} = 10 \text{ fF}$. Θα υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης $A_m = v_o / v_s$ για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, την κατώτερη συχνότητα αποκοπής (f_L) και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής (f_H).



Άσκηση 14^η

Στην **περιοχή μεσαίων συχνοτήτων** θεωρούμε ότι οι πυκνωτές σύζευξης λειτουργούν ως βραχυκυκλώματα και οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET ως ανοικτά κυκλώματα.



$$R'_L = R_D \parallel R_L = 9 \text{ k}\Omega$$

Ενίσχυση τάσης στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων:

$$v_{gs} = - (i_s + i_d)R_S = - (i_s + g_m v_{gs})R_S \Rightarrow v_{gs} = - i_s R_S / (1 + g_m R_S)$$

$$R_i = v_i / i_s = - v_{gs} / i_s \Rightarrow R_i = R_S / (1 + g_m R_S) = 0,909 \text{ k}\Omega$$

$$v_i = [R_i / (R_i + R_S)]v_s \Rightarrow v_{gs} = - [R_i / (R_i + R_S)]v_s$$

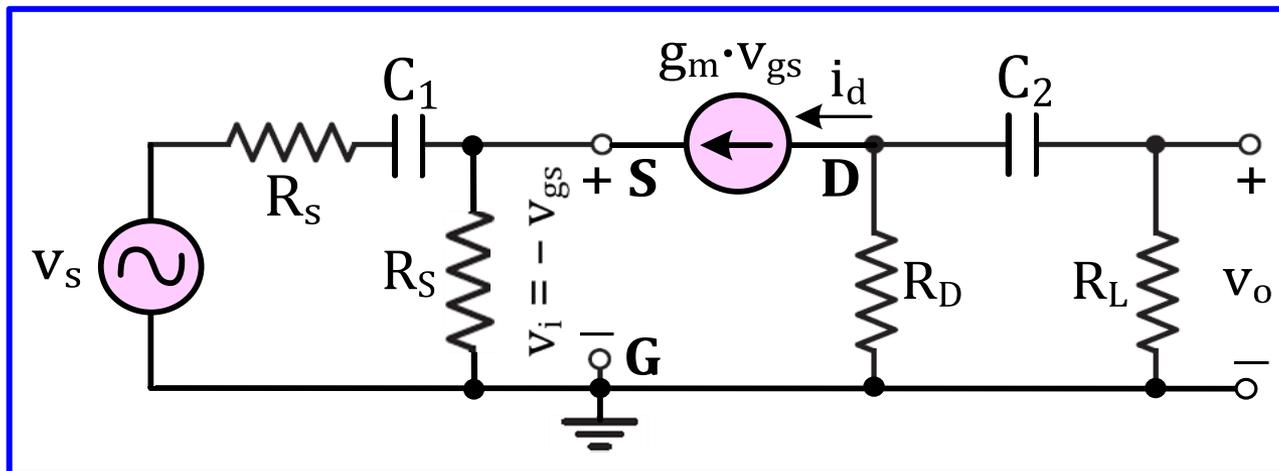
$$v_o = - g_m v_{gs} R'_L = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_S)]v_s$$

$$A_m = v_o / v_s = g_m R'_L [R_i / (R_i + R_S)] \Rightarrow A_m = 5,8$$

Άσκηση 14^η

Στην **περιοχή χαμηλών συχνοτήτων** λαμβάνουμε υπόψη μόνο την επίδραση των πυκνωτών σύζευξης, θεωρώντας ότι **κάθε πυκνωτής επιδρά στο κύκλωμα ανεξάρτητα** και υπολογίζουμε την **σταθερά χρόνου που σχηματίζει κάθε πυκνωτής με τις αντιστάσεις του κυκλώματος**.

Τα κυκλώματα που σχηματίζουν οι πυκνωτές του ενισχυτή με τις αντιστάσεις έχουν **υψηλερατή συμπεριφορά**.



$$\tau_1 = (R_s + R_i)C_1 = 1,409 \text{ ms}$$

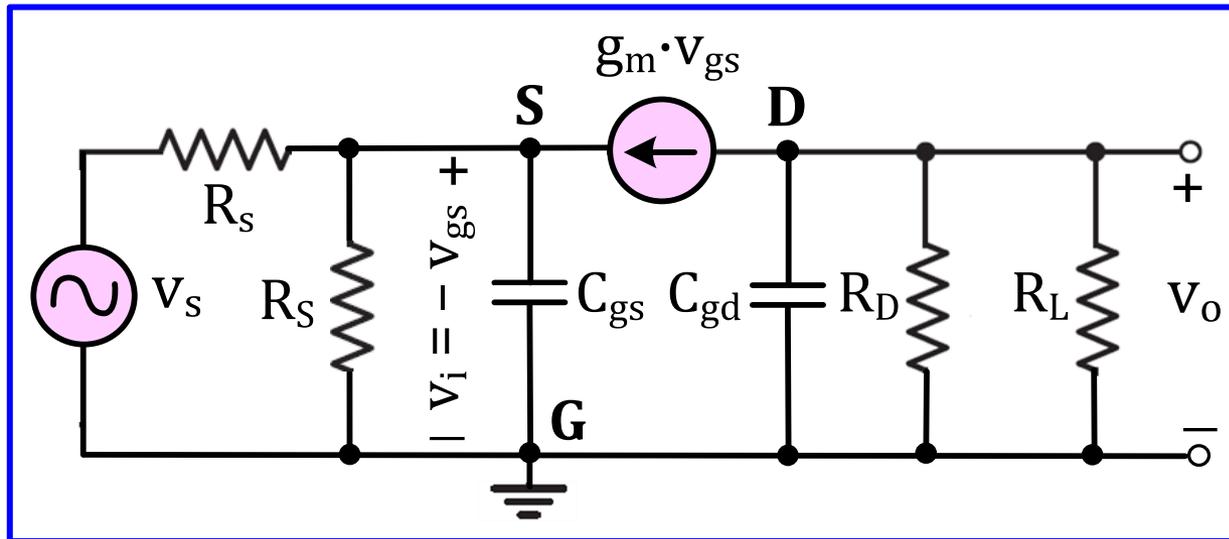
$$\tau_2 = (R_D + R_L)C_2 = 100 \text{ ms}$$

$$f_L = 1 / 2\pi\tau_1 \Rightarrow f_L = 113 \text{ Hz}$$

Άσκηση 14^η

Στις **υψηλές συχνότητες**, ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή περιλαμβάνει **δύο παρασιτικές χωρητικότητες** (C_{gs} , C_{gd}) και οι πυκνωτές σύζευξης θεωρούνται βραχυκυκλώματα.

Το κύκλωμα εισόδου και το κύκλωμα εξόδου του ενισχυτή έχουν **βαθυπερατή συμπεριφορά**.



$$\tau_i = (R_s || R_i) C_{gs} = 0,01613 \text{ ns}$$

$$\tau_o = (R_D || R_L) C_{gd} = 0,09 \text{ ns}$$

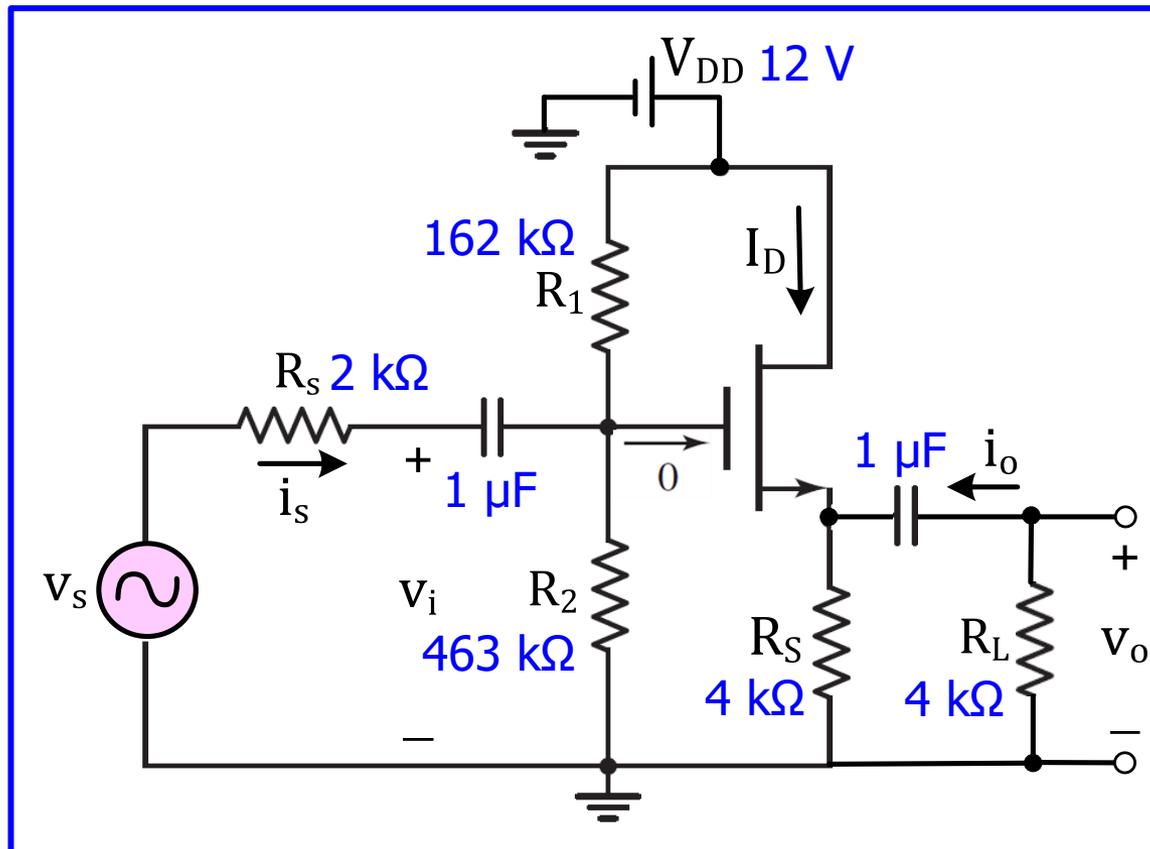
$$f_H = 1 / 2\pi\tau_o \Rightarrow f_H = 1,77 \text{ GHz}$$

Εκτιμούμε λοιπόν ότι στις συχνότητες $f_L = 113 \text{ Hz}$ και $f_H = 1,77 \text{ GHz}$ το μέτρο της ενίσχυσης τάσης θα είναι:

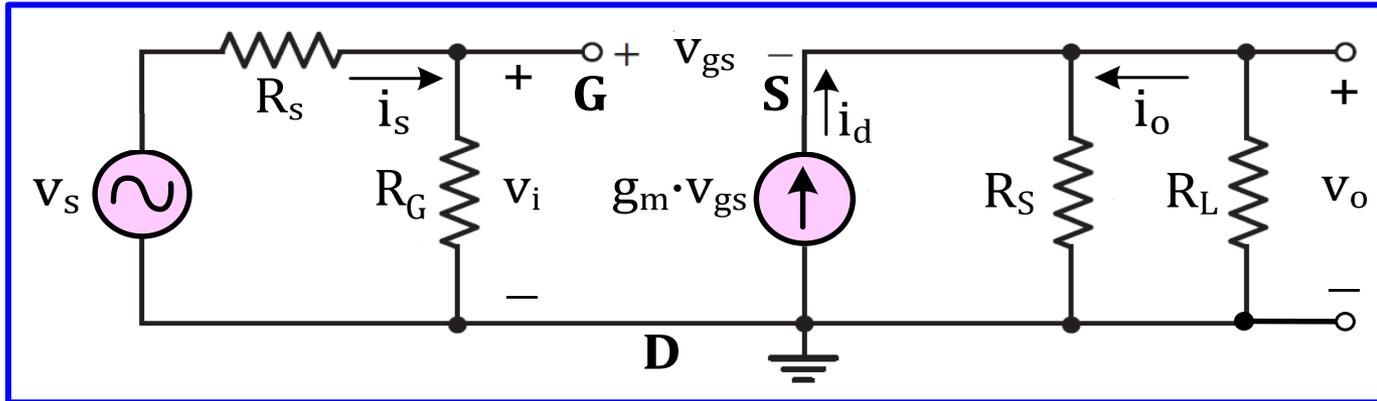
$$A_m - 3 \text{ dB} = (20 \log 8.57) \text{ dB} - 3 \text{ dB} \\ = 18,66 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 15,66 \text{ dB}$$

Άσκηση 15^η

Για το MOSFET του ενισχυτή κοινής υποδοχής του παρακάτω σχήματος, δίνονται $g_m = 11 \text{ mS}$, $C_{gs} = 50 \text{ fF}$, $C_{gd} = 10 \text{ fF}$. Θα υπολογίσουμε την ενίσχυση τάσης $A_m = v_o / v_s$ για την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, την κατώτερη συχνότητα αποκοπής (f_L) και την ανώτερη συχνότητα αποκοπής (f_H) του ενισχυτή.



Άσκηση 15^η



$$R_G = R_1 \parallel R_2 = 120 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = R_S \parallel R_L = 2 \text{ k}\Omega$$

Προσδιορισμός ενίσχυσης στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων (οι πυκνωτές σύζευξης θεωρούνται βραχυκυκλώματα και οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET ανοικτά κυκλώματα)

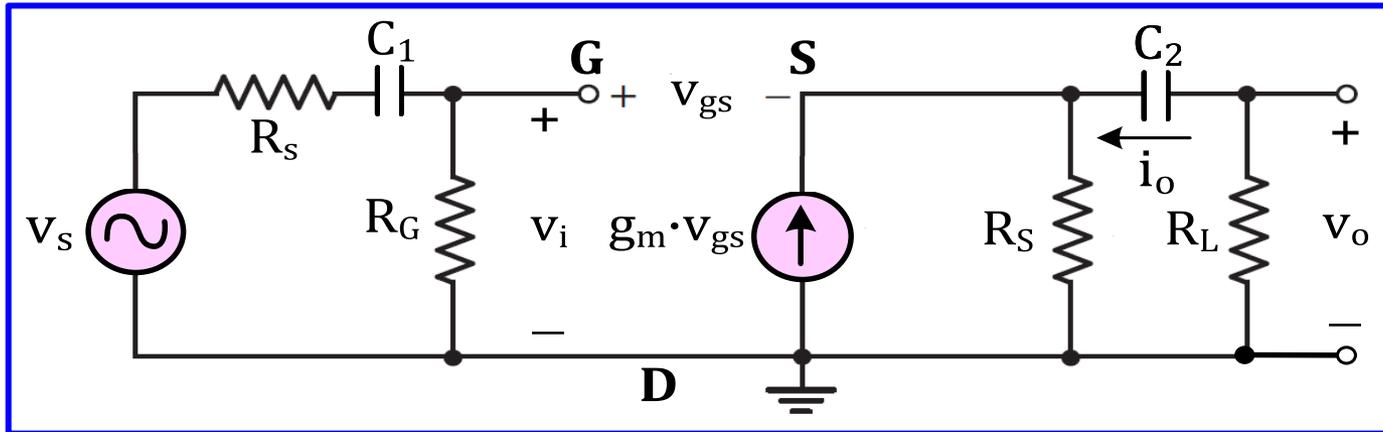
$$v_i = v_{gs} + v_o \Rightarrow v_{gs} = v_i - v_o$$

$$v_o = g_m v_{gs} R'_L = g_m (v_i - v_o) R'_L \Rightarrow$$

$$v_o = g_m R'_L v_i / (1 + g_m R'_L)$$

$$v_i = \frac{R_G}{R_s + R_G} v_s, \quad A_m = v_o / v_s = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L} \frac{R_G}{R_s + R_G} \Rightarrow A_m = 0,941$$

Άσκηση 15^η



$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{v_o}{i_{R_s} - g_m v_{gs}} = \frac{v_o}{\frac{v_o}{R_s} - g_m (v_i - v_o)} \Rightarrow$$

$(v_i = 0, R_L = \infty)$

$$R_o = \frac{v_o}{\frac{v_o}{R_s} + g_m v_o} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + g_m} \Rightarrow R_o = R_s \parallel \frac{1}{g_m} = 89 \Omega$$

Σταθερές χρόνου στις χαμηλές συχνότητες:

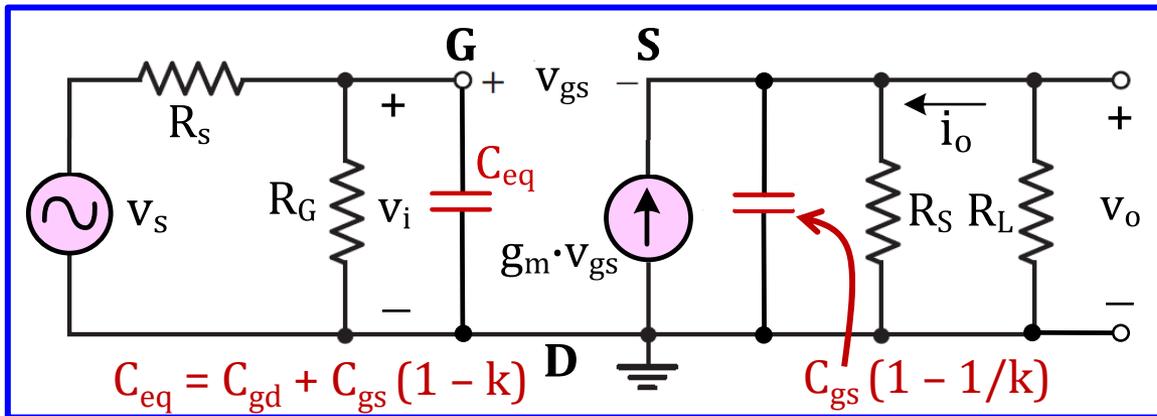
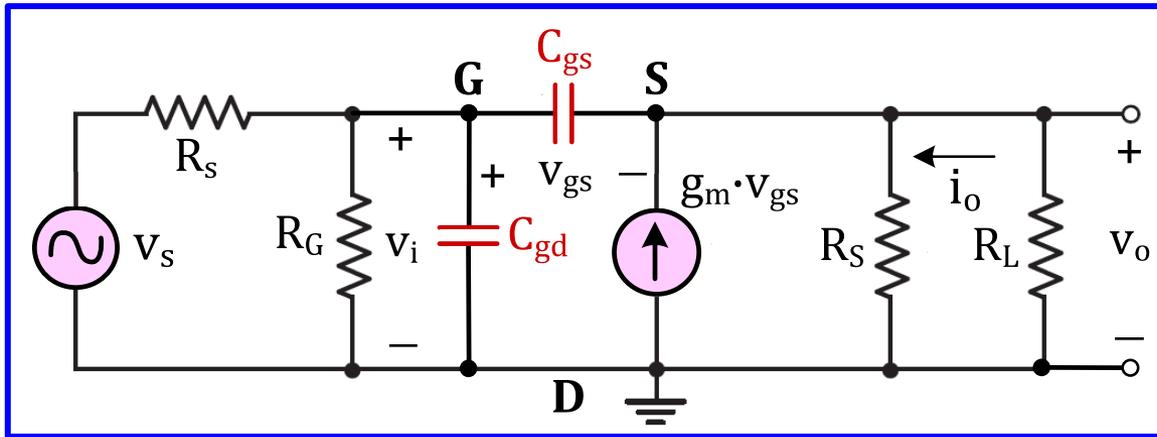
$$\tau_1 = (R_s + R_G)C_1 = 122 \text{ ms}$$

$$\tau_2 = (R_o + R_L)C_2 = 4,09 \text{ ms}$$

Κατώτερη συχνότητα αποκοπής: $f_L = 1 / (2\pi\tau_2) \Rightarrow f_L = 39 \text{ Hz}$

Άσκηση 15^η

Στις **υψηλές συχνότητες** επιδρούν στην ενίσχυση οι παρασιτικές χωρητικότητες του MOSFET



Άσκηση 15^η

$$v_o = g_m R'_L v_i / (1 + g_m R'_L)$$
$$A_{vi} = k = v_o / v_i = g_m R'_L / (1 + g_m R'_L) = 0,957$$

$$k = A_{vi} \approx 1$$

$$C_{eq} = C_{gd} + C_{gs} (1 - k) \approx C_{gd}$$
$$C_{gs} (1 - 1/k) \approx 0$$

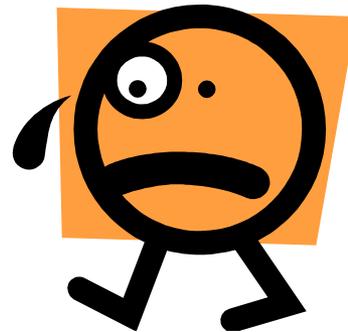
Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος εισόδου που παρουσιάζει βαθυπερατή συμπεριφορά, αντιστοιχεί στην **ανώτερη συχνότητα αποκοπής**:

$$\tau_i = (R_s || R_G) C_{gd} = 0.0197 \text{ ns}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_i} \Rightarrow f_H = 8.094 \text{ GHz}$$

Εκτιμούμε λοιπόν ότι στις συχνότητες $f_L = 39 \text{ Hz}$ και $f_H = 8,064 \text{ GHz}$ το μέτρο της ενίσχυσης τάσης θα είναι:

$$A_m - 3 \text{ dB} = (20 \log 0.941) \text{ dB} - 3 \text{ dB}$$
$$= -0,53 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = -3,53 \text{ dB}$$



Τέλος 4^{ης} ενότητας