



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ II

Ασκήσεις

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών

Α.Π.Θ.

Άδειες Χρήσης

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



Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα. Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.



Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Περιεχόμενα

Άδειες Χρήσης.....	2
Χρηματοδότηση	2
Ενότητες 1,2: Διαφορικός ενισχυτής με MOS και BJT	4
Ενότητα 3η: Ασκήσεις μονοπολικών τρανζίστορ (MOS)	7
Ενότητα 4η: Ασκήσεις διπολικών τρανζίστορ	8
Ενότητα 5η: Πολυβάθμιοι ενισχυτές.....	9
Ενότητα 6η: Ανάδραση	10
Ενότητα 7η: Τελεστικός ενισχυτής	12
Ενότητα 8η: Ταλαντωτές – Γεννήτριες σήματος	14

Ενότητες 1,2: Διαφορικός ενισχυτής με MOS και BJT

- Εκφώνηση άσκησης 1:
- Σε διαφορικό ενισχυτή με διπολικά τρανζίστορ και ωμικό φορτίο χρησιμοποιούμε πηγή ρεύματος πόλωσης 6 mA. Τα δύο τρανζίστορ έχουν $\alpha=1$ και δεν είναι ταιριασμένα: το ένα έχει μιάμιση φορά μεγαλύτερη επιφάνεια ένωσης εκπομπού από το άλλο. α) Για διαφορικό σήμα εισόδου μηδέν volt ποιες είναι οι τιμές των ρευμάτων συλλέκτη. β) Πόση διαφορική είσοδος απαιτείται για ισοστάθμιση των ρευμάτων συλλέκτη;

– Οδηγίες επίλυσης:

α) Το ρεύμα πόλωσης θα μοιραστεί στα δύο τρανζίστορ ανάλογα με την επιφάνεια ένωσης εκπομπού του καθενός. Επομένως χωρίς είσοδο θα είναι $I_{E1}=1.5 I_{E2}$.

$$I_{E1} + I_{E2} = 2.5 I_{E2} = 6 \text{ mA} \Rightarrow I_{E2} = 2.4 \text{ mA} \text{ και } I_{E1} = 3.6 \text{ mA}.$$

Για $\alpha=1$ θα είναι $I_{C1} = 3.6 \text{ mA}$, $I_{C2} = 2.4 \text{ mA}$

β) Για την ισοστάθμιση των ρευμάτων συλλέκτη έστω ότι χρειάζεται μια διαφορική τάση $V_d = V_{B2}-V_{B1}$.

Τα ρεύματα i_{E1} και i_{E2} είναι:

$$i_{E1} = I_{S1} \cdot e^{(V_{B1}-V_E)/V_T}$$

$$i_{E2} = I_{S2} \cdot e^{(V_{B2}-V_E)/V_T}$$

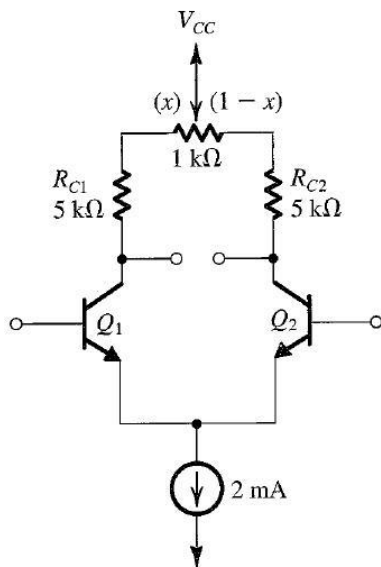
$$\text{όπου } I_{S1} / I_{S2} = 1.5$$

Για να είναι τα δύο ρεύματα ίσα θα πρέπει να ισχύει:

$$i_{E1} / i_{E2} = 1 \Rightarrow 1 = 1.5 e^{(V_{B1}-V_{B2})/V_T} \Rightarrow$$

$$V_d = V_{B2}-V_{B1} = V_T \ln 1.5 = 10.14 \text{ mV}.$$

- Εκφώνηση άσκησης 2:
- Μια τεχνική εξουδετέρωσης της εκτροπής υλοποιείται με το κύκλωμα του σχήματος. Να βρεθεί το κλάσμα x του ποτενσιομέτρου που συνδέεται σε σειρά με την R_{C1} για την εξουδετέρωση της τάσης εκτροπής που εμφανίζεται στην έξοδο όταν: α) η R_{C1} είναι 5% μεγαλύτερη από την ονομαστική της τιμή και η R_{C2} 5% μικρότερη. β) το τρανζίστορ Q1 έχει επιφάνεια 10% μεγαλύτερη από το Q2.



– Οδηγίες επίλυσης:

α) Οι τιμές των αντιστάσεων θα είναι:

$$R_{C1} = 5 \cdot 1.05 = 5.25 \text{ k}\Omega.$$

$$R_{C2} = 5 \cdot 0.95 = 4.75 \text{ k}\Omega.$$

Για αντιστάθμιση της εκτροπής θα πρέπει:

$$R_{C1} + \chi (1 \text{ k}\Omega) = R_{C2} + (1-\chi) (1 \text{ k}\Omega) \Rightarrow 5.25 + \chi = 4.75 + 1 - \chi \Rightarrow \chi = 0.25$$

β) Η διαφορά 10% μεταξύ των επιφανειών θα εμφανιστεί πρακτικά ως διαφορά μεταξύ των ρευμάτων συλλέκτη. Ετσι, θεωρώντας ότι η διαφορά είναι $\pm 5\%$ (μοιράζεται εξίσου στα δυο εξαρτήματα), τα ρεύματα θα είναι:

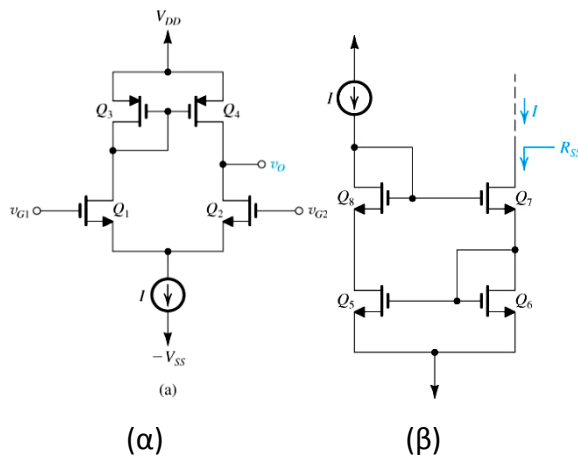
$$I_{C1} = (I/2) \cdot 1.05 = 1.05 \text{ mA}$$

$$I_{C2} = (I/2) \cdot 0.95 = 0.95 \text{ mA}$$

Για αντιστάθμιση της εκτροπής θα πρέπει οι πτώσεις τάσης στους δύο κλάδους συλλέκτη να είναι ίσες:

$$1.05 (\chi + 5) = 0.95 ((1-\chi) + 5) \Rightarrow \chi = 0.225$$

- Εκφώνηση άσκησης 3:
- Στον διαφορικό ενισχυτή του σχήματος (α) στην θέση της πηγής I χρησιμοποιούμε α) απλό καθρέπτη ρεύματος, οπότε $R_{ss} = r_o$, β) καθρέπτη Wilson όπως στο σχ. β, οπότε $R_{ss} = g_{m7} r_{o7} r_{o8}$. Αν όλα τα τρανζίστορ έχουν την ίδια τιμή για τα V_A και $k'W/L$, να δείξετε ότι στην περίπτωση (α) θα είναι $CMRR = 2(V_A/V_{ov})^2$ ενώ για την (β) θα είναι $CMRR = 2\sqrt{2} (V_A/V_{ov})^3$. V_{ov} είναι η τάση υπεροδήγησης που αντιστοιχεί σε ρεύμα $I_D = I/2$. Για τιμές $k'W/L = 10 \text{ mA/V}^2$, $I = 1 \text{ mA}$ και $|V_A| = 20 \text{ V}$ να υπολογιστεί ο λόγος απόρριψης κοινού σήματος $CMRR$ για τις δύο περιπτώσεις.



— Οδηγίες επίλυσης:

Για τον υπολογισμό του λόγου απόρριψης κοινού σήματος CMRR ισχύει η σχέση $CMRR = (g_m r_o)(g_m R_{SS})$, για την αντίσταση εξόδου $r_o = V_A/I_D$ και για τη διαγωγιμότητα $g_m = 2I_D/V_{OV}$.

α) Για τον απλό καθρέπτη ρεύματος η αντίσταση εξόδου του R_{SS} δίνεται από τον τύπο $r_o = V_A/I_D$ αλλά για ρεύμα I_D διπλάσιο από ότι στα τρανζίστορ του διαφορικού. Επομένως

$$CMRR = [g_m r_o] [g_m R_{SS}] = [(2I_D/V_{OV})(V_A/I_D)] [(2I_D/V_{OV})(V_A/2I_D)] = (2V_A/V_{OV})(V_A/V_{OV}) = 2(V_A/V_{OV})^2.$$

β) Για τον τροποποιημένο καθρέπτη Wilson όπως στο σχ. β η αντίσταση εξόδου του R_{SS} δίνεται από τον τύπο $R_{SS} = g_{m7} r_{o7} r_{o8}$. Εδώ και πάλι πρέπει να υπολογιστούν οι r_o για ρεύμα I_D διπλάσιο από ότι στα τρανζίστορ του διαφορικού, αλλά επιπλέον πρέπει να υπολογιστεί και το g_{m7} για διαφορετικό V_{OV5} που να αντιστοιχεί σε ρεύμα I_D διπλάσιο από ότι στα τρανζίστορ του διαφορικού.

Ετσι θα είναι:

$$V_{OV5} = \sqrt{4I_D/k} = \sqrt{2}(\sqrt{2I_D/k}) = \sqrt{2}V_{OV}$$

Αντικαθιστώντας στο τύπο:

$$CMRR = [g_m r_o] [g_m R_{SS}] = [(2I_D/V_{OV})(V_A/I_D)] [(2I_D/V_{OV})(4I_D/(\sqrt{2}V_{OV}))(V_A/2I_D)(V_A/2I_D)] = (4/\sqrt{2})(V_A/V_{OV})^3 = (2\sqrt{2})(V_A/V_{OV})^3$$

Με τις αριθμητικές τιμές που δίνονται είναι $V_{OV} = \sqrt{2I_D/k} = \sqrt{1\text{ mA}/10\text{ mA/V}^2} = 0.316\text{ V}$.

Ετσι για τον απλό καθρέπτη είναι:

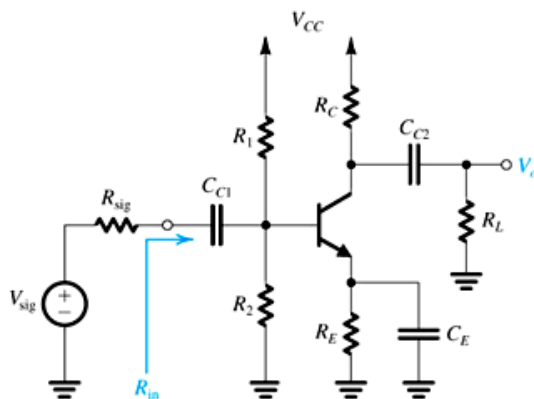
$$CMRR = 2(V_A/V_{OV})^2 = 2(10/0.316)^2 = 2000 \text{ ή } 66\text{dB}$$

ενώ για τον τροποποιημένο καθρέπτη Wilson είναι:

$$CMRR = (2\sqrt{2})(V_A/V_{OV})^3 = (2\sqrt{2})(10/0.316)^3 = 89636 \text{ ή } 99\text{dB}.$$

Ενότητα 3η: Ασκήσεις μονοπολικών τρανζίστορ (MOS)

- Εκφώνηση άσκησης 1:
- Στον ενισχυτή του σχήματος είναι $R_{sig} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_B = R_1 // R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $r_x = 100 \Omega$, $r_\pi = 1 \text{ k}\Omega$, $\beta = 100$, $R_E = 1 \text{ k}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$. Ποια πρέπει να είναι η τιμή του λόγου C_E / C_{C1} ώστε να εξισωθεί η συμβολή αυτών των δύο πυκνωτών στον καθορισμό της χαμηλής συχνότητας αποκοπής f_L ; (Στον υπολογισμό να ληφθεί υπόψη και η r_x).



— Οδηγίες επίλυσης:

Η ισοδύναμη αντίσταση R_{C1} που συμμετέχει με τον πυκνωτή C_{C1} στον υπολογισμό του αντίστοιχου πόλου είναι:

$$R_{C1} = R_{sig} + [R_B // (r_x + r_\pi)] = 10 + [10 // (0.1 + 1)] = 10.99 \text{ k}\Omega$$

Η ισοδύναμη αντίσταση R'_E που συμμετέχει με τον πυκνωτή C_E στον υπολογισμό του αντίστοιχου πόλου είναι:

$$R'_E = R_E // [(r_x + r_\pi + (R_B // R_{sig})) / (\beta + 1)] = 1 // [(0.1 + 1 + (10 // 10)) / (100 + 1)] = 57 \Omega.$$

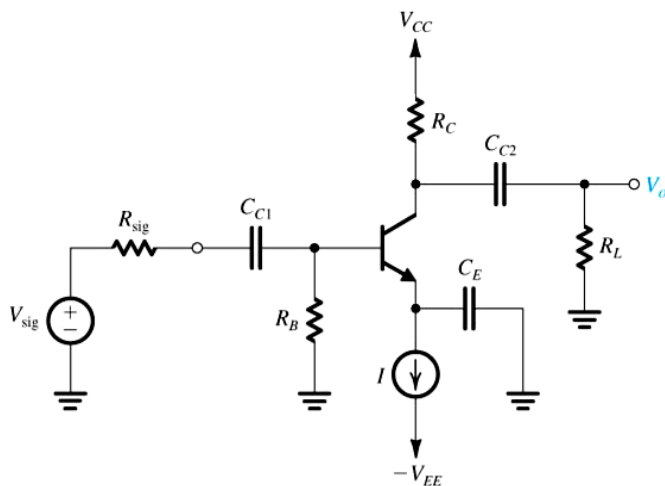
Για να εξισωθεί η συμβολή των δύο πυκνωτών στον καθορισμό της χαμηλής συχνότητας αποκοπής f_L θα πρέπει να ισχύει: $C_E R'_E = C_{C1} R_{C1}$

οπότε θα πρέπει να είναι:

$$C_E / C_{C1} = R_{C1} / R'_E = 10.99 / 0.057 = 192.8$$

Ενότητα 4η: Ασκήσεις διπολικών τρανζίστορ

- Εκφώνηση άσκησης 1:
- Στον ενισχυτή του σχήματος είναι $R_{sig} = 5 \text{ k}\Omega$, $R_B = 100 \text{ k}\Omega$, $R_C = 8 \text{ k}\Omega$, $R_L = 5 \text{ k}\Omega$, $V_A = 100 \text{ V}$, $C_\mu = 1 \text{ pF}$, $\beta = 100$, $r_x = 50 \Omega$, $f_T = 800 \text{ MHz}$. Για $I = 1 \text{ mA}$ το κέρδος στις μέσες συχνότητες A_M είναι -39 και η συχνότητα αποκοπής f_H με προσέγγιση χωρητικότητας Miller είναι 754 kHz. Για την μελέτη επίδρασης του ρεύματος πολωσης έστω ότι το I γίνεται $I = 2 \text{ mA}$ και αλλάζουν μόνο οι $R_B = 50 \text{ k}\Omega$ και $R_C = 4 \text{ k}\Omega$. Να βρεθούν οι νέες τιμές των A_M και f_H και να συγκριθούν α) το γινόμενο κέρδους-εύρους ζώνης και β) η κατανάλωση ισχύος για τις δύο περιπτώσεις.



— Οδηγίες επίλυσης:

Για $I = 2 \text{ mA}$ η διαγωγιμότητα g_m θα είναι:

$g_m = I_C / V_T = 2 / 0.025 = 80 \text{ mA/V}$, οπότε

$r_\pi = \beta / g_m = 100 / 80 = 1.25 \text{ k}\Omega$

$r_o = V_A / I_C = 100 / 2 = 50 \text{ k}\Omega$

$C_\pi + C_\mu = g_m / \omega_T = 80 \cdot 10^{-3} / (2\pi \cdot 800 \times 10^6) = 15.9 \text{ pF} \Rightarrow C_\pi = 15.9 - C_\mu = 14.9 \text{ pF}$.

Το κέρδος A_M είναι:

$$A_M = - \frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{r_\pi}{r_\pi + r_x + (R_B \parallel R_{sig})} g_m R'_L$$

όπου:

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

Αντικαθιστώντας τις τιμές προκύπτει $R'_L = 50 / 4 / 5 = 2.1 \text{ k}\Omega$ και

$$A_M = -(50 \cdot 1.25 \cdot 80 \cdot 2.1) / [(50+5)(1.25 + 0.05 + (50/5))] = -32.66 \text{ V/V}.$$

Για τον υπολογισμό της συχνότητας f_H υπολογίζονται οι τιμές των C_{in} και R'_{sig} από τους σχετικούς τύπους:

$$C_{in} = 14.9 + 1 (1 + 168) = 183.9 \text{ pF} \text{ (όπου } 168 = g_m R'_L)$$

$$R'_{sig} = 1.25 / [50 + (50/5)] = 0.983 \text{ k}\Omega.$$

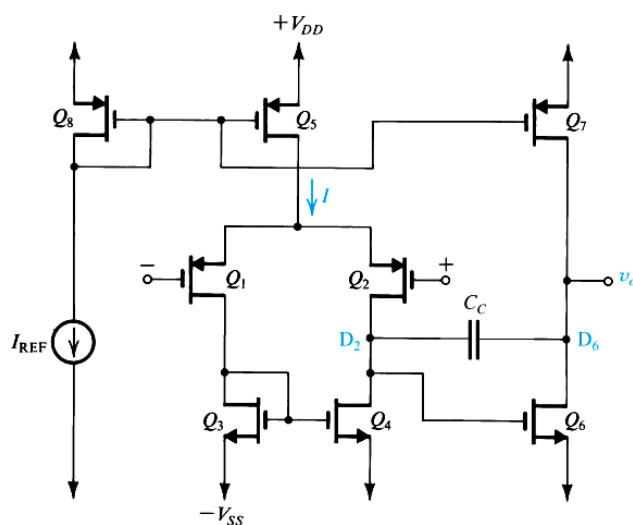
$$\text{Η συχνότητα } f_H \text{ είναι: } f_H = 1 / (2\pi \cdot 183.9 \cdot 10^{-12} \cdot 983) = 880 \text{ kHz}.$$

α) Το γινόμενο κέρδους-εύρους ζώνης ήταν αρχικά $39 \times 754 = 29.4 \times 10^6$ και μετά την αλλαγή είναι $32.66 \times 880 = 28.7 \times 10^6$ δηλαδή παρέμεινε σχεδόν σταθερό. Με την αλλαγή επιτεύχθηκε μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας σε βάρος του κέρδους.

β) Με δεδομένο ότι η τάση τροφοδοσίας είναι η ίδια, ο διπλασιασμός του ρεύματος πόλωσης συνεπάγεται και διπλασιασμό της καταναλισκόμενης ισχύος ($P = I \cdot V_{supply}$).

Ενότητα 5η: Πολυβάθμιοι ενισχυτές

- Εκφώνηση άσκησης 1:
- Για τον ενισχυτή του σχήματος τα τρανζίστορ έχουν $L = 0.8 \text{ }\mu\text{m}$ και $V'_{An} = 25 \text{ V/}\mu\text{m}$, $|V'_{Ap}| = 20 \text{ V/}\mu\text{m}$. Αν για όλα τα τρανζίστορ η τάση υπεरोδήγησης είναι $V_{OV} = 0.25 \text{ V}$, και το δεύτερο στάδιο πολώνεται στα 0.4 mA , να υπολογιστούν τα κέρδη A_1 , A_2 , το dc κέρδος τάσης ανοικτού βρόχου A_o και η αντίσταση εξόδου R_o του ενισχυτή. Πόση θα είναι η αντίσταση εξόδου ενός ενισχυτή τάσης μοναδιαίου κέρδους που χρησιμοποιεί αυτόν τον τελεστικό; (Υπενθυμίζεται ότι ισχύει $(W/L)_6 / (W/L)_4 = 2 (W/L)_7 / (W/L)_5$)



— Οδηγίες επίλυσης:

Υπολογίζεται αρχικά η τάση Early των τρανζίστορ.

$$V_{An} = V'_{An} L = 25 \cdot 0.8 = 20V$$

$$|V_{Ap}| = |V'_{Ap}| L = 20 \cdot 0.8 = 16V$$

Το κέρδος της πρώτης βαθμίδας είναι $A_1 = g_{m1}(r_{o2}/r_{o4})$, ενώ της δεύτερης $A_2 = g_{m6}(r_{o6}/r_{o7})$.

Το ρεύμα των Q6, Q7 είναι 0.4 mA, οπότε

$$r_{o6} = 20 / 0.4 = 50 \text{ k}\Omega,$$

$$r_{o7} = 16 / 0.4 = 40 \text{ k}\Omega \text{ και}$$

$$g_{m6} = 2 \cdot 0.4 / 0.25 = 3.2 \text{ mA/V}.$$

Για την αποφυγή συστηματικού σφάλματος απόκλισης της εξόδου στο συνεχές (dc) πρέπει να ισχύει η δοθείσα σχέση. Από αυτήν φαίνεται ότι όταν τα W/L των Q5, Q7 είναι ίσα, το W/L του Q6 πρέπει να είναι διπλάσιο από το W/L του Q4. Επομένως, το ρεύμα των Q2, Q4 (και των Q1, Q3) είναι το μισό του ρεύματος της δεύτερης βαθμίδας, δηλ. 0.2 mA, οπότε:

$$r_{o4} = 20 / 0.2 = 100 \text{ k}\Omega,$$

$$r_{o2} = 16 / 0.2 = 80 \text{ k}\Omega \text{ και}$$

$$g_{m1} = 2 \cdot 0.2 / 0.25 = 1.6 \text{ mA/V}.$$

Επομένως το συνολικό κέρδος είναι:

$$A_0 = A_1 A_2 = 1.6 (80/100) 3.2 (50/40) = 5056.8 \text{ V/V}.$$

Σε ενισχυτή μοναδιαίου κέρδους ισχύει

$$A_f = A_0 / (1 + A_0 \beta) = 5056.8 / (1 + 5056.8 \beta) = 1 \Rightarrow (1 + A_0 \beta) = 5056.8$$

Επομένως η αντίσταση εξόδου R_{of} θα είναι:

$$R_{of} = R_o / (1 + A_0 \beta) = (r_{o6}/r_{o7}) / (1 + A_0 \beta) = (50/40) / 5056.8 = 4.4 \text{ }\Omega.$$

Ενότητα 6η: Ανάδραση

- Εκφώνηση άσκησης 1:
- Να σχεδιαστεί ενισχυτής με ανάδραση που να έχει κέρδος κλειστού βρόχου 100 V/V και να έχει σχετική «αναισθησία» σε μεταβολές κέρδους του βασικού ενισχυτή. Συγκεκριμένα για μείωση του κέρδους A του βασικού ενισχυτή στο ένα δέκατο της αρχικής τιμής, το κέρδος κλειστού βρόχου να γίνεται 99. Ποιο είναι το απαιτούμενο κέρδος βρόχου; Ποια η απαιτούμενη ονομαστική τιμή για το A; Τι τιμή πρέπει να χρησιμοποιηθεί για το β; Αν το A γίνει δεκαπλάσιο ή άπειρο, πόσο γίνεται το κέρδος κλειστού βρόχου;

— Οδηγίες επίλυσης:

Το κέρδος κλειστού βρόχου είναι $A_f = A / (1 + A\beta)$ και για την μεταβολή του ισχύει:

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{(1 + A\beta)} \frac{dA}{A}$$

Αρα, θα πρέπει : $0.01 = 1/(1+A\beta) \cdot 0.9 \Rightarrow 1+A\beta = 90 \Rightarrow A\beta = 89$ (κέρδος βρόχου).

Επομένως

$$A_f = A / (1 + A\beta) \Rightarrow 100 = A / (1 + 89) \Rightarrow$$

$$A = 9000 \text{ και } \beta = 89/9000 = 9.9 \cdot 10^{-3}.$$

Για 10πλάσιο κέρδος A και ίδια τιμή β , το κέρδος κλειστού βρόχου είναι

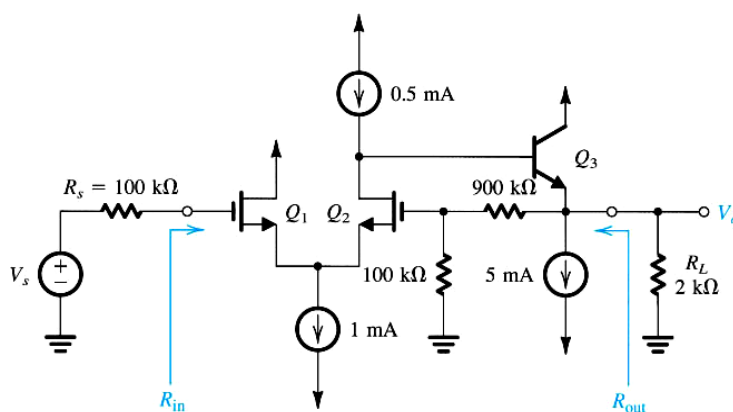
$$A_f = 90000 / (1 + 90000 \cdot 89/9000) = 101.01$$

Για 100πλάσιο κέρδος A και ίδια τιμή β , το κέρδος κλειστού βρόχου είναι

$$A_f = 900000 / (1 + 900000 \cdot 89/9000) = 101.11$$

Για $A \rightarrow \infty$ προκύπτει ότι το $A_f \rightarrow (1/\beta) = 9000/89 = 101.12$

- Εκφώνηση άσκησης 2:
- Στον ενισχυτή του σχήματος είναι $|V_t| = 1 \text{ V}$, $k'W/L = 1 \text{ mA/V}^2$, $h_{fe} = 100$, $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ και η τάση Early V_A είναι 100 V για όλα τα τρανζίστορ (και εκείνα των πηγών ρεύματος πόλωσης). Η πηγή σήματος δεν έχει συνεχή συνιστώσα. Να υπολογιστούν οι dc τάσεις στην έξοδο και στην βάση του Q_3 καθώς και οι τιμές των A , β , A_f , R_{in} , R_{out} .



— Οδηγίες επίλυσης:

Εφόσον $V_{G1} = 0 = V_{G2}$ θα είναι και $V_{E3} = V_o = 0 \text{ V}$ και $V_{B3} = 0.7 \text{ V}$

Οι διαγωγιμότητες g_{m1} και g_{m2} είναι:

$$g_{m1} = g_{m2} = \sqrt{2kI_D} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 0.5} = 1 \text{ mA/V}.$$

Η αντίσταση εξόδου των τρανζίστορ Q_1 , Q_2 είναι $r_o = V_A / I = 100/0.5 = 200 \text{ k}\Omega$. Ιδια τιμή θεωρούμε ότι έχει και η αντίσταση εξόδου της πηγής ρεύματος πόλωσης των 0.5 mA .

Η αντίσταση $r_{e3} (\equiv r_{d3})$ του Q_3 είναι $r_{e3} = V_T / I = 25/5 = 5 \Omega$.

Η αντίσταση εξόδου του Q3 είναι $r_{o3} = V_A / I = 100/5 = 20 \text{ k}\Omega$. Ιδια τιμή θεωρούμε ότι έχει και η αντίσταση εξόδου της πηγής ρεύματος πόλωσης των 5 mA.

Το κύκλωμα είναι ενισχυτής με ανάδραση σειράς-παράλληλα (τάσης σειράς), οπότε για το ισοδύναμο μπορεί να θεωρηθεί ότι το δικτύωμα ανάδρασης ($100\text{k}\Omega$, $900\text{k}\Omega$) διακόπτεται και η αντίσταση των $900\text{ k}\Omega$ εμφανίζεται παράλληλα με την $100\text{ k}\Omega$ στην πύλη του Q2 και σε σειρά με την $100\text{ k}\Omega$ στον εκπομπό του Q3. Έτσι, η αντίσταση εξόδου R_o θα είναι:

$$R_o = 1 \text{ M}\Omega // 2 \text{ k}\Omega // (20/2) \text{ k}\Omega // [r_{e3} + 100 \text{ k}\Omega / (h_{fe} + 1)] = 1.6667 \text{ k}\Omega // [0.005 + 0.990 \text{ k}\Omega] = 624 \Omega$$

Η αντίσταση εισόδου R_i θεωρείται άπειρη (πύλη MOS).

Το κέρδος A του ενισχυτή (χωρίς ανάδραση) είναι: $A = A_1 A_2$, όπου το κέρδος A_1 είναι του διαφορικού με αντίσταση στον κόμβο της εκροής $R = (200/2) // [(h_{fe} + 1)(r_{e3} + 1.6667 \text{ k}\Omega)] = 63 \text{ k}\Omega$ και το A_2 είναι το κέρδος της βαθμίδας κοινού συλλέκτη. Άρα:

$$A = (\frac{1}{2})g_{m1} R [1.6667 / (r_{e3} + 1.6667 \text{ k}\Omega)] = 0.5 \cdot 1 \cdot 63 \cdot 0.997 = 31.4 \text{ V/V}.$$

Ο συντελεστής ανάδρασης β είναι $\beta = 100 / (100 + 900) = 0.1$, οπότε το κέρδος κλειστού βρόχου είναι:

$$A_f = A / (1 + A\beta) = 31.4 / (1 + 31.4 \cdot 0.1) = 7.58 \text{ V/V.}$$

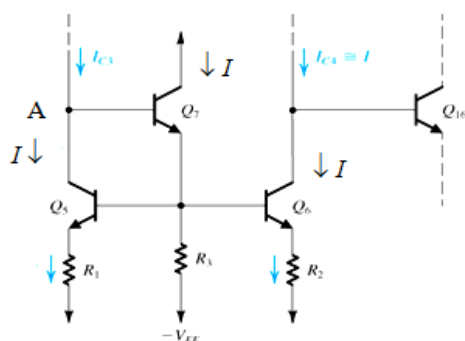
Η αντίσταση εξόδου με την ανάδραση R_{of} είναι

$R_{of} = R_o / (1 + A\beta) = 624 / 4.14 = 150.7 \, \Omega$, οπότε αφού ισχύει $R_{of} = R_{out} // R_L$, προκύπτει ότι $R_{out} = 163 \, \Omega$.

Η αντίσταση R_{if} θεωρείται επίσης άπειρη, όπως και η R_{in} .

Ενότητα 7η: Τελεστικός ενισχυτής

- Εκφώνηση άσκησης 1:
- Να υπολογιστεί η αντίσταση R3 στο κύκλωμα του σχήματος (στάδιο εισόδου του 741) έτσι ώστε όταν τα ρεύματα βάσης δεν αγνοούνται, τα ρεύματα συλλέκτη των Q5, Q6, Q7 να γίνονται ίσα. Να βρεθούν οι τιμές αυτών των ρευμάτων. Θεωρήστε ότι $I_{C3} = 9.4 \mu A$, $\beta = 200$, $I_S = 10^{-14} A$, $R_1 = R_2 = 1 k\Omega$ και ότι η V_{EE} είναι μηδέν.



— Οδηγίες επίλυσης:

Για τα τρανζίστορ το a είναι: $a = \beta/(\beta+1) = 0.995$

Για τα ρεύματα στον κόμβο A θα είναι: $I + I/\beta = 9.4 \mu\text{A} \Rightarrow I = 9.353 \mu\text{A}$.

Για τα ρεύματα στον κόμβο των βάσεων των Q5, Q6 θα είναι: $I_{R3} = I/a - 2I/\beta = 9.307 \mu\text{A}$.

Η τάση στον κόμβο αυτόν είναι:

$$V_{B5} = I_{R3} \cdot R_3 = R_1 \cdot I/a + V_{BE5}$$

Η τάση V_{BE5} υπολογίζεται ως: $V_{BE5} = V_T \ln(I/I_s) = 25 \ln(9.353 \cdot 10^{-6}/10^{-14}) = 516.4 \text{ mV}$.

Αρα $V_{B5} = R_1 \cdot I/a + V_{BE5} = 525.8 \text{ mV}$, οπότε υπολογίζεται και η τιμή της R_3 :

$$R_3 = V_{B5} / I_{R3} = 525.8 / 9.307 = 56.5 \text{ k}\Omega.$$

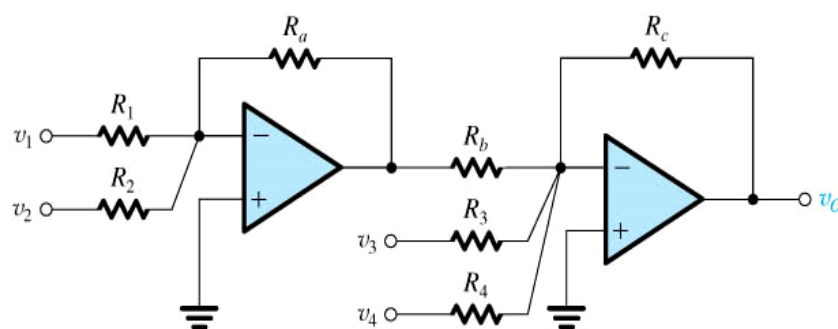
- Εκφώνηση άσκησης 2:
- Χρησιμοποιώντας δύο ιδανικούς τελεστικούς ενισχυτές και αντιστάσεις να υλοποιηθεί η παρακάτω συνάρτηση εξόδου u_o :

$$u_o = 2u_1 + u_2 - 4u_3 - 3u_4$$

— Οδηγίες επίλυσης:

Για το παρακάτω κύκλωμα με διπλό αθροιστή με βάρη ώστε να έχουμε άθροιση σημάτων με αντίθετα πρόσημα, ισχύει ως γνωστόν η σχέση:

$$v_o = v_1 \left(\frac{R_a}{R_1} \right) \left(\frac{R_c}{R_b} \right) + v_2 \left(\frac{R_a}{R_2} \right) \left(\frac{R_c}{R_b} \right) - v_3 \left(\frac{R_c}{R_3} \right) - v_4 \left(\frac{R_c}{R_4} \right)$$



Παρατηρώντας την ζητούμενη συνάρτηση εξόδου u_o προκύπτει ότι θα πρέπει:

$$(R_a/R_1)(R_c/R_b) = 2$$

$$(R_a/R_2)(R_c/R_b) = 1$$

$$(R_c/R_3) = 4$$

$$(R_c/R_4) = 3$$

Οι τρεις από τις επτά αντιστάσεις μπορούν να επιλεγούν αυθαίρετα.

Εστω ότι επιλέγεται $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$.

Αρα, $R_c = 3 R_4 = 30 \text{ k}\Omega$, $R_3 = R_c/4 = 7.5 \text{ k}\Omega$.

Εστω επίσης ότι επιλέγεται $R_b = 30 \text{ k}\Omega$ και $R_a = 10 \text{ k}\Omega$.

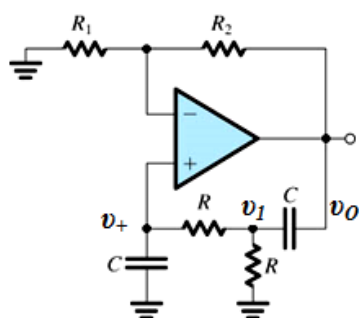
Θα πρέπει :

$$(R_a/R_1)(R_c/R_b) = (10/R_1)(30/30) = 2 \Rightarrow R_1 = 5 \text{ k}\Omega.$$

$$(R_a/R_2)(R_c/R_b) = (10/R_2)(30/30) = 1 \Rightarrow R_2 = 10 \text{ k}\Omega.$$

Ενότητα 8η: Ταλαντωτές – Γεννήτριες σήματος

- Εκφώνηση άσκησης 1:
- Για το κύκλωμα του σχήματος να βρεθεί το κέρδος βρόχου $L(j\omega)$ ή $L(s)$, η συχνότητα ταλαντώσεων (συχνότητα για μηδενική φάση βρόχου) και η συνθήκη κέρδους (λόγος R_2/R_1) για την έναρξη ταλαντώσεων.



— Οδηγίες επίλυσης:

Το κέρδος τάσης του ενισχυτή θεωρώντας την θετική είσοδο ως είσοδο του κυκλώματος, θα είναι $A = 1 + (R_2/R_1)$.

Ο συντελεστής ανάδρασης $\beta(s) = v_+/v_o$ θα υπολογιστεί από το δίκτυο θετικής ανάδρασης των R και C . Στο κύκλωμα αυτό θεωρούμε σαν είσοδο την v_o και σαν έξοδο την v_+ .

Το ρεύμα εισόδου του τελεστικού θεωρείται μηδέν, οπότε

$$(v_1 - v_+)/R = sCv_+ \Rightarrow v_1 = v_+ (1 + sCR)$$

Από το άθροισμα ρευμάτων στον κόμβο v_1 προκύπτει:

$$v_1/R + sC(v_1 - v_o) + sCv_+ = 0 \Rightarrow$$

$$v_+ (1 + sCR) + sCR v_+ (1 + sCR) - v_o sCR + v_+ sCR = 0 \Rightarrow$$

$$v_+ (1 + sCR + sCR + s^2 C^2 R^2 + sCR) = v_o sCR \Rightarrow$$

$$\beta(s) = v_+/v_o = sCR / (1 + 3sCR + s^2 C^2 R^2) = 1 / (3 + sCR + 1/sCR) \Rightarrow$$

$$\beta(j\omega) = 1 / [3 + j(\omega CR - 1/\omega CR)]$$

Για τον μηδενισμό της φάσης πρέπει $\omega CR = 1 / \omega CR \Rightarrow \omega_o = 1 / CR$.

Για την συχνότητα ω_o θα είναι $|\beta(\omega_o)| = 1/3$. Για την ύπαρξη ταλαντώσεων θα πρέπει:

$A\beta = 1$ και πρακτικά θα πρέπει $A\beta \geq 1 \Rightarrow [1 + (R_2/R_1)] (1/3) \geq 1 \Rightarrow R_2/R_1 \geq 2$

Η γενική συνάρτηση του κέρδους βρόχου είναι:

$$L(s) = A \beta(s) = [1 + (R_2/R_1)] / (3 + sCR + 1/sCR) \quad \text{ή}$$

$$L(j\omega) = A \beta(j\omega) = [1 + (R_2/R_1)] / [3 + j(\omega CR - 1/\omega CR)]$$