Βασικά Κυκλώματα Ενισχυτών με Τρανζίστορ
(Άσκηση 3)

ΑΡ. ΟΜΑΔΑΣ/ΘΕΣΗΣ: ---

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ: 01/12/2014

1. Αντικείμενο και σκοπός

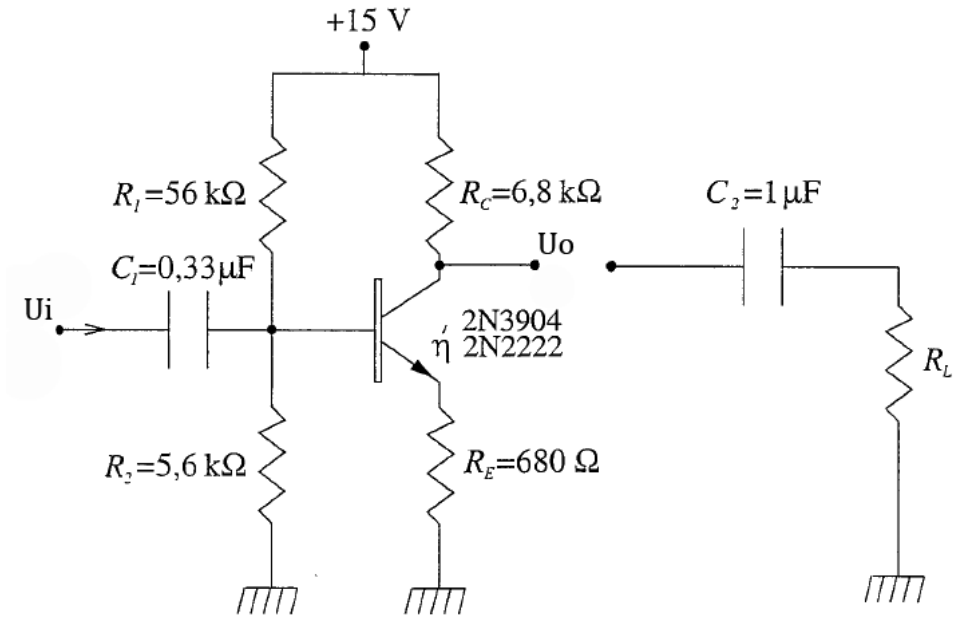
Το τρανζίστορ είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο τριών ακροδεκτών, το οποίο είναι υπεύθυνο για δύο από τις κυριότερες λειτουργίες ηλεκτρονικών κυκλωμάτων: Τη λειτουργία του κυκλώματος ως ενισχυτή και ως διακόπτη.

Για τη χρήση του ως γραμμικός ενισχυτής, το τρανζίστορ έχει το ρόλο να διαμορφώσει είτε το ρεύμα είτε τη τάση του ρεύματος μίας επιπλέον πηγής DC. Αντίστοιχα το τρανζίστορ σε μη γραμμική λειτουργία αποκτάει τη συμπεριφορά ενός διακόπτη, όπου μια μικρή ποσότητα ρεύματος ή τάσης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών του, υπό την έννοια της αγωγής ή μη αγωγής ρεύματος.

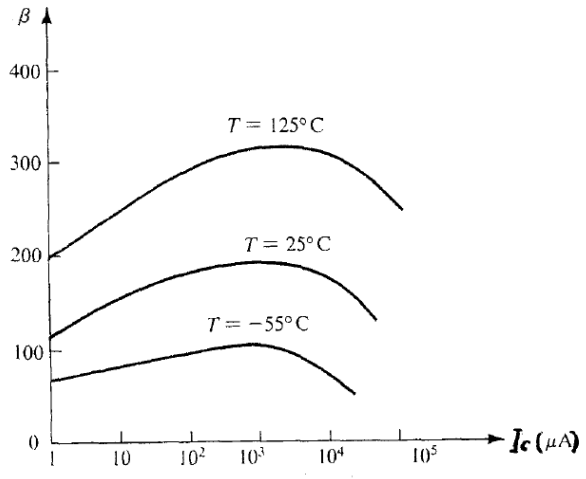
Σκοπός του εργαστηρίου είναι η μελέτη της λειτουργίας και της συμπεριφοράς ενός τρανζίστορ σε ένα κύκλωμα ενισχυτή κοινού εκπομπού. Στο πείραμα γίνονται μετρήσεις με τις κατάλληλες αναλύσεις των μετρήσεων αυτών, και παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι θεωρητικοί υπολογισμοί. Τέλος μέρος της εργασία είναι η προσομοίωση και μελέτη του κυκλώματος, με τη χρήση των λογισμικών PSpice και MatLab.

2. Σχεδιαγράμματα των κυκλωμάτων & Θεωρητικά στοιχεία

Α) Ενισχυτής κοινού εκπομπού:

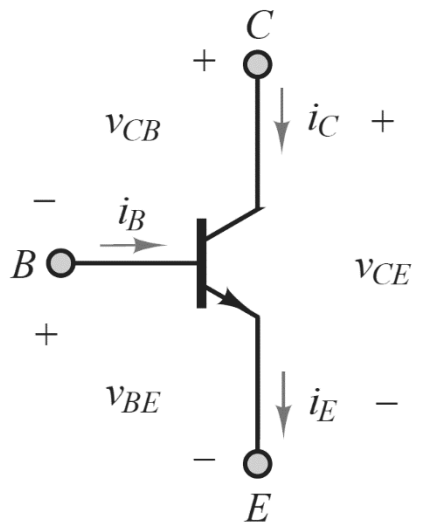


Στη λεγόμενη κανονική λειτουργία του, όπου το τρανζίστορ λειτουργεί στη γραμμική περιοχή του, έχουμε ότι το ρεύμα της βάσης είναι $i_B = \frac{i_C}{\beta}$, όπου η σταθερά β εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του τρανζίστορ και συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ 20 και 200. Παρόλα αυτά το β εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία και το ρεύμα συλλέκτη, ενώ επίσης μπορεί να μεταβάλλεται έντονα από κομμάτι σε κομμάτι ακόμα και για τον ίδιο τύπο τρανζίστορ. Για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερο η επίδοση ενός κυκλώματος να είναι ανεξάρτητη από αυτό.



Όπως είναι φανερό από το παρακάτω σχήμα, εφαρμόζοντας το νόμο των κομβικών τάσεων του Kirchhoff, προκύπτει ότι:

$$i_E = i_C + i_B \overset{\text{άρα}}{\Longrightarrow} i_E = \frac{\beta + 1}{\beta} i_C$$



Για τη καλύτερη λειτουργία του κυκλώματος σχεδιάζουμε το κύκλωμα έτσι ώστε $V_{BB} \gg V_{BE}$ και $R_E \gg \frac{R_B}{\beta+1}$, όπου $R_B = R_1||R_2$

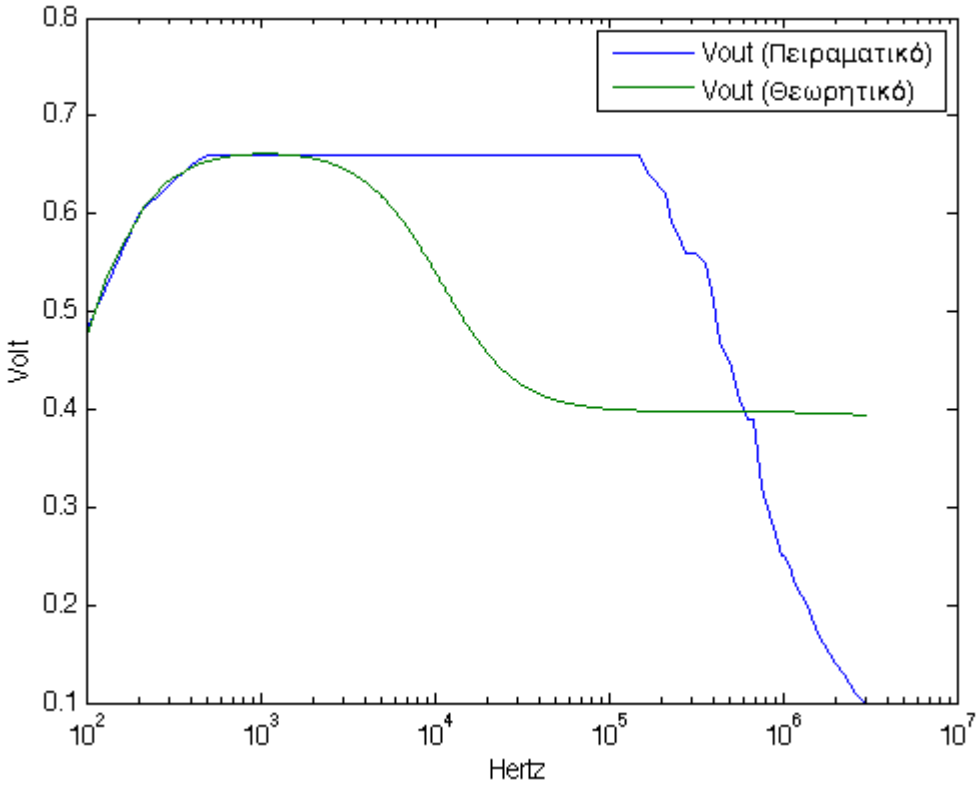
Η πρώτη συνθήκη εξασφαλίζει ότι μικρές μεταβολές του V_{BE}, γύρω από τη τυπική τιμή των 0,7 V θα επισκιαστούν από την πολύ μεγαλύτερη τάση V_{BB}.

Η δεύτερη συνθήκη, η οποία περιλαμβάνει το R_E, κάνει το I_E να μην είναι ευαίσθητο στις μεταβολές του β και για να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη μπορεί να διαλεχτεί το R_B να είναι μικρό. Η συνθήκη αυτή σημαίνει επίσης ότι θέλουμε να κάνουμε την τάση της βάσης ανεξάρτητη του β. Έτσι η τάση της βάσης θα καθορίζεται μόνο από το διαιρέτη τάσης των R1, R2 (άκαμπτο κύκλωμα). Αυτό μπορεί αν επιτευχθεί αν το ρεύμα του διαιρέτη τάσης είναι πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα της βάσης.

3. Πειραματικές μετρήσεις, προσομοιώσεις και ανάλυση

Μετρήσεις

$V_{in} = 0{,}070\ V, R_1 = 56K\Omega, R_2 = 5{,}6\ K\Omega, V_{cc} = 15V, RC = 6{,}8K\Omega,$ $RE = 680\Omega, C_1 = 330nF, C_2 = 1nF, \beta = 130$			
$f(KHz)$	$V_{out}(Volt)$	$f(KHz)$	$V_{out}(Volt)$
0,1±0,04	0,48±0,02	570±8	0,41±0,02
0,2±0,04	0,60±0,02	630±8	0,39±0,02
0,3±0,04	0,63±0,02	690±8	0,39±0,02
0,4±0,04	0,65±0,02	750±8	0,32±0,02
0,5±0,04	0,66±0,02	810±12	0,30±0,01
150±4	0,66±0,02	880±12	0,28±0,01
170±4	0,64±0,02	990±12	0,26±0,01
210±4	0,62±0,02	1000±12	0,25±0,01
220±4	0,61±0,02	1100±12	0,24±0,01
230±4	0,59±0,02	1200±16	0,22±0,01
250±4	0,58±0,02	1400±16	0,20±0,004
280±4	0,56±0,02	1600±16	0,17±0,004
320±4	0,56±0,02	1700±16	0,16±0,004
360±8	0,55±0,02	2000±20	0,14±0,004
400±8	0,51±0,02	2250±20	0,13±0,004
440±8	0,47±0,02	2650±20	0,11±0,004
490±8	0,45±0,02	3000±20	0,10±0,004



Παρατηρούμε ότι στη θεωρητικά αναμενόμενη καμπύλη, η τάση εξόδου θα έπρεπε να έχει ένα μέγιστο περίπου στο 1kHz και στη συνέχεια να αρχίζει να μειώνεται σταδιακά, με αρκετά μικρή μεταβολή. Αντίθετα στις μετρήσεις του εργαστηρίου παρατηρούμε ότι η ισχύς του σήματος εξόδου, παραμένει η ίδια μέχρι τα 150kHz και στη συνέχεια μειώνεται με πολύ έντονο ρυθμό.

Όσο αναφορά τη πρώτη διαπίστωση, ότι δηλαδή το σήμα παραμένει αμετάβλητο έως τα 150kHz, το πιο πιθανό είναι ότι έγινε κάποιο λάθος είτε στο τρόπο μετρήσεων, είτε στο κύκλωμα με το οποίο έγιναν οι μετρήσεις.

Η πολύ απότομη εξασθένηση που μπορούμε να δούμε, είναι πολύ πιθανό να οφείλεται αφενός μεν σε έναν από τους δυο παραπάνω λόγους, όμως είναι επίσης γνωστό, ότι τα περισσότερα τρανζίστορ στη πράξη παρουσιάζουν ένα αρκετά πιο μικρό εύρος φάσματος συχνοτήτων, από ότι στη θεωρία. Αυτός θα μπορούσε να είναι ένας λόγος, για τον οποίο ο ενισχυτής μας «κόβει» (εξασθενεί) τις πολύ υψηλές συχνότητες.

1. Να υπολογίσετε θεωρητικά την τιμή του I_c και να κάνετε μετρήσεις τάσεων ώστε να μπορείτε να την εκτιμήσετε. Συγκρίνετε τα αποτελέσματα.

Με βάση τη θεωρία:
(εφαρμόζοντας τάση εισόδου)

Αφαιρώντας τη τάση V_{cc}, εφαρμόζουμε το νόμο των τάσεων του Kirchhoff για το κύκλωμα V_{in}, C_1, R_2

$$V_{C1} + V_{in} + V_{R2} = 0 \implies V_{R2} = V_{in}\frac{R_2}{R_2 + \left(\frac{1}{i\omega C_1}\right)} \xrightarrow{\text{Για } f=10KHz}$$

$$U_{R2} = 0.07\cos(2\pi \cdot 10000 \cdot t) \ \ [1]$$

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε ξανά το νόμο των τάσεων του Kirchhoff για το κύκλωμα V_{CC}, R_1, R_2 αφαιρώντας αυτή τη φορά τη τάση εισόδου U_{in}

$$V_{R1} + V_{R2} + V_{CC} = 0 \implies V_{R2} = V_{CC}\frac{R_2}{R_1 + R_2} \implies$$

$$V_{R2} = 1{,}36V \ [2]$$

Επομένως χρησιμοποιώντας την αρχή της υπέρθεσης έχουμε ότι
$V_{R2} = [1] + [2]$

$$V_{R2} = 1{,}36 + 0{,}07\cos(2\pi \cdot 10000 \cdot t) \ \ V$$

Όμως γνωρίζουμε ότι το ένα άκρο της V_{R2} είναι γειωμένο. Επομένως προκύπτει ότι $V_{R2} = V_{bb}$

Εφαρμόζοντας το νόμο των κομβικών εντάσεων στο κόμβο Β

$$I_B = I_{in} + I_1 - I_2 \implies I_B = \frac{V_{bb} - V_{in}}{1/(i\omega C)} + \frac{V_{CC} - V_{bb}}{R_1} - \frac{V_{bb}}{R_2}$$

$$I_B = 7{,}14 \cdot 10^{-6} + 1{,}13 \cdot 10^{-6}\cos(2\pi \cdot 10000 \cdot t)\, A$$

Γνωρίζοντας ότι $I_C = \beta \cdot I_B \xRightarrow{\beta \approx 130}$

$$I_C = 0{,}93 + 0{,}15 \cos(2\pi \cdot 10000 \cdot t)\, mA$$

Αντίστοιχα, η θεωρητική τιμή του I_C χωρίς τη τάση εισόδου, θα είναι:

$$I_C = 0{,}93\, mA$$

Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις:
(χωρίς τάση εισόδου)

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{(C-E)}}{R_C} \Longrightarrow I_C = 1{,}14\, mA$$

2. Να κάνετε μετρήσεις για να δείτε πόσο «άκαμπτο» είναι το σύστημα αντιστατών πόλωσης του τρανζίστορ R_1, R_2. Συγκεκριμένα να μετρήσετε τη τάση dc στο κοινό σημείο των R_1, R_2 , έχοντας συνδέσει τη βάση του τρανζίστορ, στη συνέχεια να κάνετε το ίδιο χωρίς να είναι συνδεδεμένο το τρανζίστορ. Να κάνετε τους σχετικούς αριθμητικούς υπολογισμούς.

Το κύκλωμα θεωρείται άκαμπτο, όταν η τάση της βάσης V_B, θα καθορίζεται μόνο από το διαιρέτη των τάσεων R_1 και R_2.

Με τη βάση του τρανζίστορ συνδεδεμένη μετρήσαμε τη τάση V_B ως 1,32 V. Όταν αφαιρέσαμε τη βάση του τρανζίστορ, η τάση της βάσης του μετρήθηκε στα 1,34V. Επομένως προκύπτει ότι αν και η απόκλιση είναι σχετικά μικρή (της τάξης του 1,5%), παρόλα αυτά το κύκλωμα μας δε μπορεί να θεωρηθεί άκαμπτο.

3. Να υπολογιστεί θεωρητικά η αριθμητική τιμή της ενίσχυσης τάσης του συστήματος χωρίς φόρτο (RL πολύ μεγάλο) και για μεσαίες συχνότητες (οι αντιδράσεις των C_1, C_2 είναι αμελητέες). Να διαλέξετε ως μεσαία συχνότητα την $f = 10\ kHz$ και να κάνετε μετρήσεις για να προσδιορίσετε τη (χαμηλή) συχνότητα καμπής, f_b, ("γόνατο").

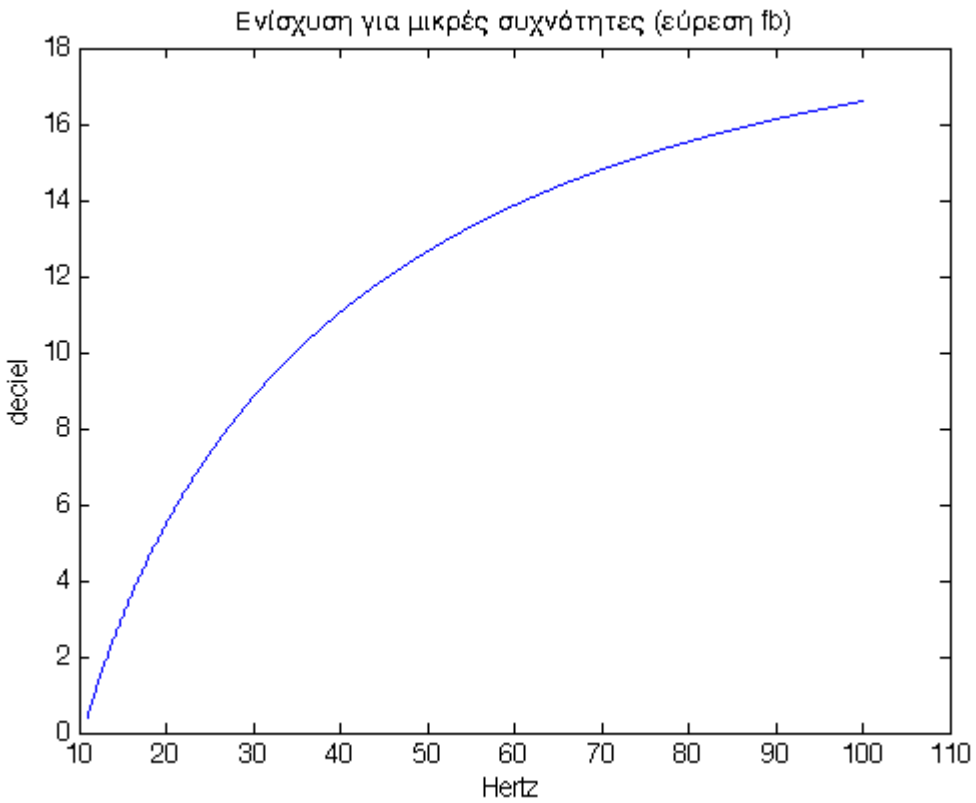
Έχουμε ότι: $I_C = \frac{V_{CC}-V_{out}}{R_C} \Longrightarrow V_{out} = V_{CC} - I_C R_C \Longrightarrow$

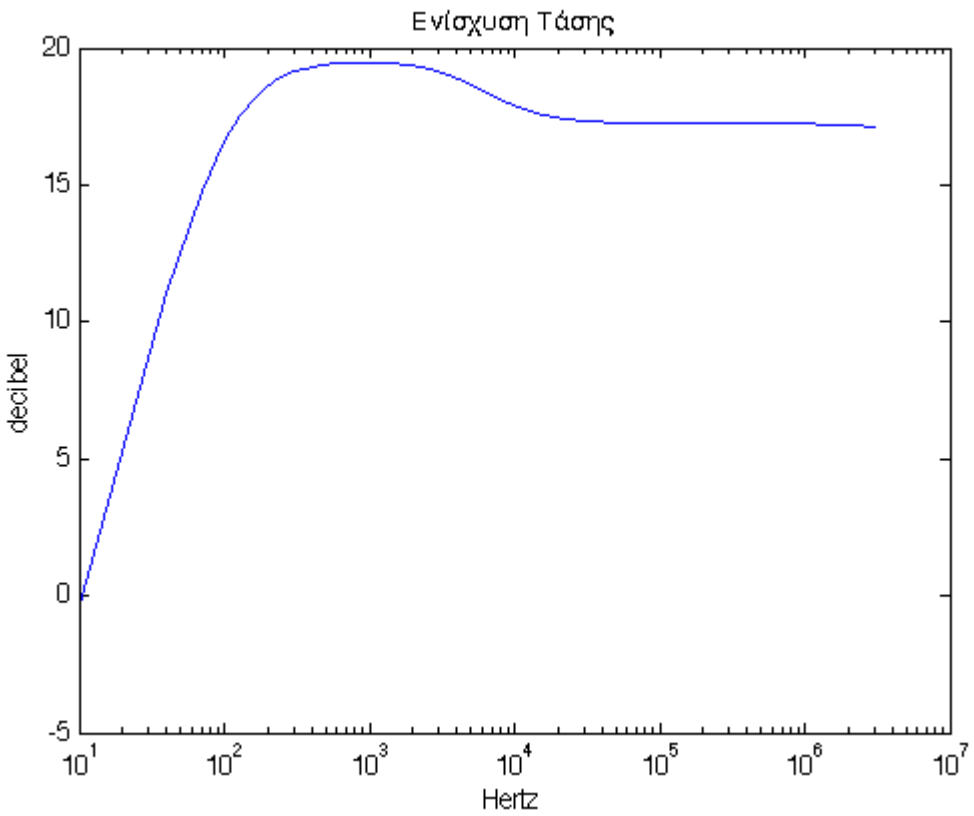
$$A_{Gain} = \left|\frac{V_{out}^*}{V_{in}}\right| \Longrightarrow A_{Gain} = \frac{0{,}15mA \cdot 6800\Omega}{70mV} \Longrightarrow$$

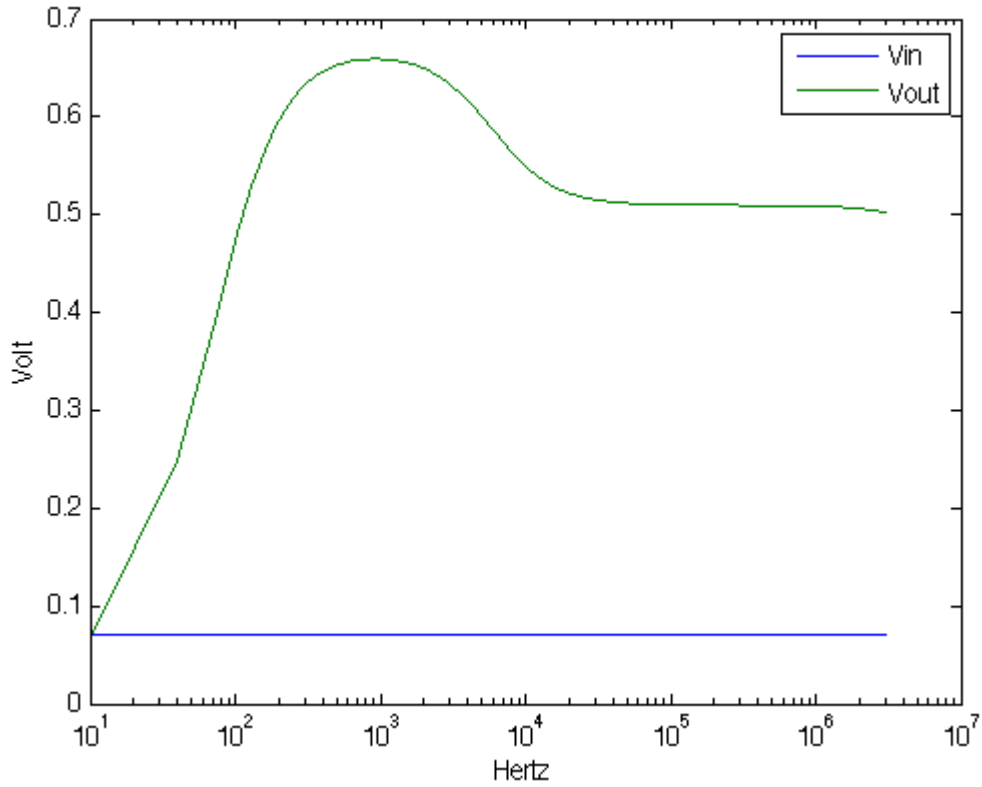
$$A_{Gain} = 14{,}57$$

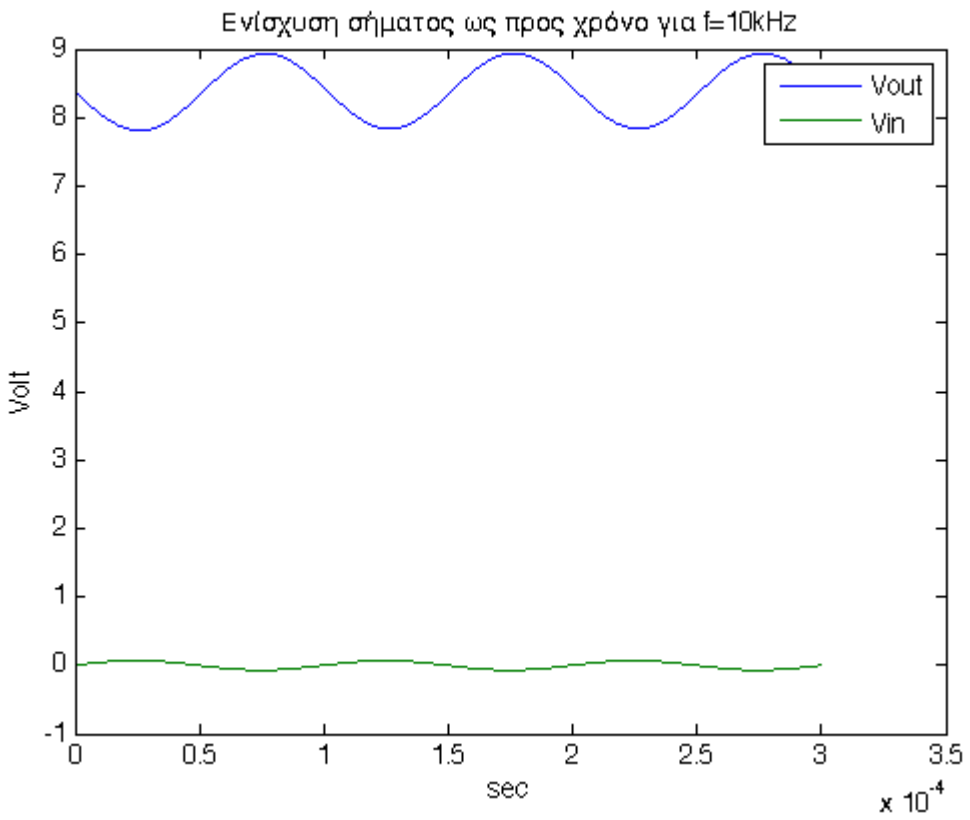
Όπου V_{out}^* είναι το πλάτος του συνημιτονοειδούς μέρους της συνάρτησης του V_{out}

Η συχνότητα καμπής δεν προσδιορίστηκε στο εργαστήριο. Για το λόγο αυτό έγινε θεωρητική προσομοίωση με τη χρήση του λογισμικού PSpice, όπου και υπολογίστηκε ως: $f_b = 15\ Hz$




Ενίσχυση Τάσης
20
15
10
5
0
-5
decibel
10^1
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
10^7
Hertz


0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
Volt
Vin
Vout
10^1
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
10^7
Hertz



4. Για $f = 10\ kHz$ να υπολογίσετε την αριθμητική τιμή της αντίστασης εισόδου του ενισχυτή, θεωρώντας ότι η αντίδραση του πυκνωτή C_1 (πυκνωτής αποσύζευξης) είναι αμελητέα. Να μετρήσετε την αντίσταση εισόδου. Αυτό μπορείτε να το κάνετε βάζοντας αντίσταση στην είσοδο σε σειρά με τον πυκνωτή και μετρώντας τη διαφορά δυναμικού (ac) στα άκρα της για γνωστό σήμα (ac) στην είσοδο του συστήματος.

Με βάση τη θεωρία:

Η αντίσταση εισόδου είναι αυτή που φαίνεται από την είσοδο του ενισχυτή. Και μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$R_{in} \equiv \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_1 || R_\pi$$

Όπου

$$R_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \frac{kT/e}{I_B} \xrightarrow{\text{Για } T=300K} \frac{V_T}{I_B} \approx \frac{25mV}{7{,}14\ \mu A} \Longrightarrow R_\pi \approx 3{,}5k\Omega$$

Επομένως:

$$\frac{1}{R_{in}} = \frac{1}{R_\pi} + \frac{1}{R_1} \Longrightarrow R_{in} = 3{,}3\ k\Omega$$

Με βάση τις πειραματικές μετρήσεις:

Η αντίσταση που τοποθετήσαμε σε σειρά με τον πυκνωτή ήταν $R_s = 8{,}2\ k\Omega$. Και η διαφορά δυναμικού που μετρήσαμε είναι $U_s = 0{,}22V$.

Άρα θα ισχύει ότι:

$$I_s = \frac{U_{in} - U_s}{R_s} = \frac{0{,}070 - 0{,}022}{8{,}2 \cdot 10^3} = 5{,}85\ \mu A$$

$$R^* = \frac{U_{in}}{I_s} = \frac{0{,}070}{5{,}85 \cdot 10^{-6}} = 11{,}97 k\Omega$$

$$R_{in} = R^* - R_s = 3{,}77\ k\Omega$$

5. Να υπολογίσετε και να μετρήσετε την αντίσταση εξόδου. Για τη μέτρηση αυτή μπορείτε να χρησιμοποιήσετε κατάλληλους φόρτους στην έξοδο σε σειρά με πολύ μεγάλο πυκνωτή.

Με βάση τη θεωρία:

Η αντίσταση εξόδου είναι αυτή που φαίνεται από την έξοδο του ενισχυτή. Και μπορεί να υπολογιστεί σε αντιστοιχία με την αντίσταση εισόδου ως:

$$R_{out} = R_e || R_C$$

Όπου

$$R_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{kT/e}{I_E} = \frac{kT/e}{I_B \cdot (\beta + 1)} \xrightarrow{\text{Για } T=300K} \frac{V_T}{I_B(\beta + 1)} \approx \frac{25mV}{7{,}14\ \mu A} \Longrightarrow$$

$$R_e \approx 26{,}7\Omega$$

Επομένως:

$$\frac{1}{R_{out}} = \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_C} \Longrightarrow R_{out} = 25{,}7\ \Omega$$

*Λόγο έλλειψης χρόνου στο εργαστήριο, δεν έγιναν οι αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

Σημειώσεις:

1. Στο εργαστήριο δεν είχαν υπολογιστεί τα σφάλματα μετρήσεων και επομένως οι τιμές των σφαλμάτων είναι προσεγγιστικές.

2. Στις γραφικές παραστάσεις δεν έχουν ληφθεί υπόψη τα σφάλματα μετρήσεων.

3. Τα δεδομένα για τις γραφικές παραστάσεις προέκυψαν από τη προσομοίωση του κυκλώματος με τη χρήση του πακέτου PSpice. Στη συνέχεια οι γραφικές παραστάσεις έγιναν μέσω του MatLab.

4. Το πρόχειρο μετρήσεων που υπογράφηκε είναι του συνεργάτη μου, Αθανάσιου Βασιλείου, από τον οποίο στη συνέχεια πήρα τις μετρήσεις μας.