

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

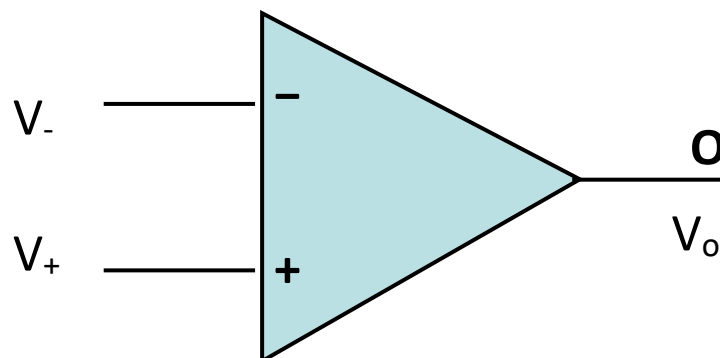
ΓΙΩΡΓΟΣ ΧΑΤΖΗΛΙΓΟΣ ΑΜ4835 2ο Έτος

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ Ι Ο ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ

1.1 Τελεστικοί ενισχυτές

1.1.1 Εισαγωγή: Αντικείμενο της εργαστηριακής άσκησης είναι η επαφή με ένα από τα πιο χρήσιμα κυκλώματα, αυτό του **τελεστικού ενισχυτή** (*operational amplifier – OpAmp*). Σε αυτή την άσκηση ο φοιτητής θα εξοικειωθεί με τις έννοιες της ενίσχυσης σήματος, της αντιστροφής σήματος και θα γνωρίσει κάποια βασικά εργαλεία ανάλυσης κυκλωμάτων.

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας πολύ υψηλού κέρδους διαφορικός ενισχυτής στον οποίο χρησιμοποιούνται τεχνικές ανάδρασης για να επιτευχθεί ο έλεγχος της χαρακτηριστικής απόκρισής του. Το κυκλωματικό του σύμβολο δίδεται στο Σχήμα 1.1 που ακολουθεί.



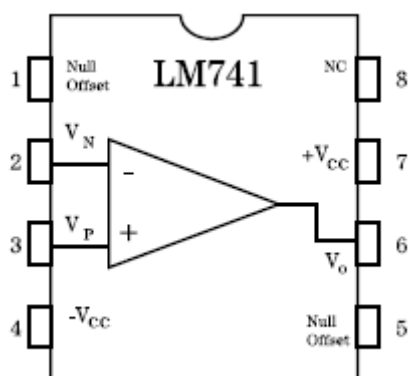
Σχήμα 1.1: Κυκλωματικό σύμβολο τελεστικού ενισχυτή

Οι ακροδέκτες + και - αποτελούν εισόδους σήματος του ενισχυτή ενώ ο ακροδέκτης O είναι η έξοδος σήματος. Η τάση εξόδου ενός τελεστικού ενισχυτή είναι ίση με τη διαφορά των τάσεων οι οποίες εφαρμόζονται στους ακροδέκτες εισόδου πολλαπλασιασμένη με το κέρδος ανοικτού βρόχου (A). Η τάση εξόδου V_o είναι θετική όταν η τάση που εφαρμόζεται στον θετικό ακροδέκτη (μη αναστρέφουσα είσοδος - V_+) είναι μεγαλύτερη εκείνης που εφαρμόζεται στον αρνητικό ακροδέκτη (αναστρέφουσα είσοδος - V_-). Ένας ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει ένα άπειρο κέρδος ανοικτού βρόχου, με αποτέλεσμα να απαιτείται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των εισόδων V_+ και V_- να είναι ακραία μικρή ώστε η τάση εξόδου V_o να είναι πεπερασμένη. Επιπλέον, ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει άπειρη αντίσταση εισόδου και μηδενική αντίσταση εξόδου. Έτσι, στην ανάλυση κυκλωμάτων με τελεστικούς ενισχυτές θεωρούμε ότι το ρεύμα στους ακροδέκτες εισόδου είναι μηδενικό, ενώ η τάση εξόδου, όταν ο τελεστικός οδηγεί κάποιο φορτίο, είναι ίση με την τάση του

ανοικτού κυκλώματος. Η τάση εξόδου ενός τελεστικού ενισχυτή δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_o = A(V_+ - V_-)$$

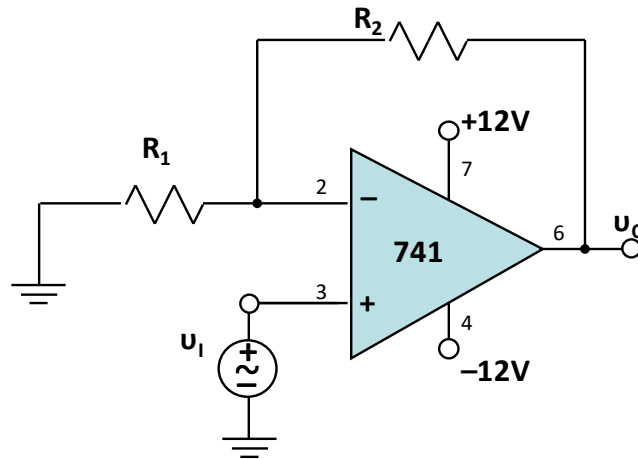
Οι τελεστικοί ενισχυτές χαίρουν ευρύτατης χρήσης σε πολλές εφαρμογές. Μπορούν να διασυνδεθούν με κατάλληλους τρόπους ώστε να επιτελέσουν διάφορες λειτουργίες όπως: αναστροφή, ενίσχυση, υποβιβασμό, άθροιση, ολοκλήρωση, διαφόριση, φιλτράρισμα καθώς και τη γένεση σημάτων (ταλαντωτές). Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση θα εξετασθούν η αναστρέφουσα και η μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία ενισχυτή τάσης καθώς και η συνδεσμολογία του ακόλουθου τάσης.



Σχήμα 1.2: Η τοπολογία των ακροδεκτών του τελεστικού ενισχυτή στο chip 741

1.1.2 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα 741: Στο Σχήμα 1.2 δίδεται η τοπολογία των ακροδεκτών του ολοκληρωμένου τελεστικού ενισχυτή 741. Οι ακροδέκτες του είναι σε διάταξη DIP (dual in-line package) όπου ο ακροδέκτης υπ' αριθμόν 1 προσδιορίζεται με βάση την εγκοπή η οποία υπάρχει στην μία πλευρά του ολοκληρωμένου. Προς τη μεριά αυτής της εγκοπής βρίσκονται, αριστερά ο πρώτος ακροδέκτης και δεξιά ο τελευταίος. Ο ακροδέκτης νούμερο 2 είναι η αναστρέφουσα είσοδος V_- , ο νούμερο 3 είναι η μη αναστρέφουσα είσοδος V_+ , ενώ ο ακροδέκτης 6 είναι η έξοδος V_o . Συνήθως οι ακροδέκτες τροφοδοσίας $-V_{CC}$ και $+V_{CC}$, 4 και 7 αντίστοιχα, δεν περιγράφονται στο κυκλωματικό σύμβολο του ενισχυτή για λόγους μεγαλύτερης ευκρίνειας του σχηματικού, αλλά στην πράξη θα πρέπει πάντα να συνδέονται στις κατάλληλες τάσεις τροφοδοσίας ώστε το κύκλωμα να λειτουργήσει. Οι ακροδέκτες 1 και 5 χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της τάσης εκτροπής (offset voltage) του τελεστικού δηλ. της τάσης που εμφανίζει στην έξοδό του όταν και οι δύο είσοδοι είναι γειωμένες. Σε πολλές εφαρμογές οι ακροδέκτες αυτοί δεν χρησιμοποιούνται και αφήνονται ανοικτοκυκλωμένοι («στον αέρα»). Ο ακροδέκτης 8 δεν παρέχει καμία λειτουργία και δεν χρησιμοποιείται. Πρόσθετα χαρακτηριστικά του κυκλώματος θα βρείτε στα εγχειρίδια χρήσης κυκλωματικών στοιχείων στο τέλος του φυλλαδίου.

1.2.2 Μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία: Σχεδιάστε την μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία του Σχήματος 1.5 στο περιβάλλον σχεδίασης του OrCAD. Επιλέξτε την $R_2=10K\Omega$. Χρησιμοποιήστε σαν πηγή σήματος εισόδου u_i την ημιτονική πηγή VSIN. Η τροφοδοσία του τελεστικού να πραγματοποιηθεί και πάλι με βάση το Σχήμα 1.4 και με τη χρήση DC πηγών τροφοδοσίας (VDC).



Σχήμα 1.5: Η μη αναστρέφουσα συνδεσμολογία

Α) Δώστε την έκφραση του κέρδους κλειστού βρόχου A_u της συνδεσμολογίας και υπολογίστε την R_1 έτσι ώστε να πάρετε κέρδος α) 21 και β) 201.

Υπογραφή:

$A_u = U_O/U_I = 1 + R_2/R_1$ (τύπος)	
$A_u = 21$	$A_u = 201$
$R_{1a} = 500\Omega$	$R_{1b} = 50\Omega$

Β) Χρησιμοποιήστε για είσοδο στο κύκλωμα μία σταθερή τάση 50mV (στις παραμέτρους της πηγής σήματος VSIN δώστε $FREQ=1KHz$, $VAMPL=0$ και $VOFF=50mV$). Αντικαταστήστε στο κύκλωμα σας τις τιμές της R_1 που βρήκατε νωρίτερα και εκτελέστε “ανάλυση στο πεδίο του χρόνου – transient analysis” (χρόνος εκτέλεσης 2ms – βήμα 1μs). Κάντε χρήση της βιβλιοθήκης “opamp.lib”. Καταγράψτε τις τιμές της εξόδου V_o σε κάθε περίπτωση.

Υπογραφή:

$V_i = 50mV$ ($u_i = 0$)	
$R_{1a} = 500\Omega$	$R_{1b} = 50\Omega$
$V_o = 1,05V$	$V_o = 10,5V$

Γ) Χρησιμοποιήστε για είσοδο στο κύκλωμα ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 1KHz και πλάτους 50mV (στις παραμέτρους της πηγής σήματος VSIN δώστε την τιμή $FREQ=1KHz$, $VAMPL=50mV$ και $VOFF=0$). Με τις ίδιες τιμές για την R_1 εκτελέστε “ανάλυση στο πεδίο του χρόνου – transient analysis” (χρόνος εκτέλεσης 2ms – βήμα 1μs). Καταγράψτε τις τιμές της u_o (u_{o1} και u_{o2}) για τις τιμές της u_i στις δύο κορυφές του ημιτόνου εισόδου (u_{i1} και u_{i2}), για κάθε τιμή της R_1 , καθώς και τη φάση της u_o σε σχέση με τη u_i .



Υπογραφή:

$V_i = 50\text{mV}$ και $V_l = 0$ [$u_l \equiv u_i = V_i \times \sin(\omega t)$]	
$R1_a =$	$R1_b =$
$u_{i1} = 50\text{mV} \Rightarrow u_{o1} =$	$u_{i1} = 50\text{mV} \Rightarrow u_{o1} =$
$u_{i2} = -50\text{mV} \Rightarrow u_{o2} =$	$u_{i2} = -50\text{mV} \Rightarrow u_{o2} =$
Φάση u_o ως προς u_i :	Φάση u_o ως προς u_i :

Δ) Χρησιμοποιήστε για είσοδο στο κύκλωμα ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 1KHz και πλάτους 50mV με DC συνιστώσα ίση με 50mV (στις παραμέτρους της πηγής σήματος VSIN δώστε την τιμή FREQ=1KHz, VAMPL=50mV και VOFF=50mV). Με τις προηγούμενες τιμές για την R1 εκτελέστε “ανάλυση στο πεδίο του χρόνου – transient analysis” (χρόνος εκτέλεσης 2ms – βήμα 1μs). Καταγράψτε τις τιμές της u_o για τις τιμές της u_i στις δύο κορυφές του ημιτόνου εισόδου και για κάθε τιμή της R1 καθώς και τη φάση της u_o σε σχέση με τη u_i . Ποια η DC τιμή V_o του σήματος εξόδου; Είναι αναμενόμενη αυτή η τιμή και γιατί;

Υπογραφή:

$V_i = 50\text{mV}$ και $V_l = 50\text{mV}$ [$u_l = V_l + u_i = V_l + V_i \times \sin(\omega t)$]	
$R1_a =$	$R1_b =$
$u_{i1} = 100\text{mV} \Rightarrow u_{o1} =$	$u_{i1} = 100\text{mV} \Rightarrow u_{o1} =$
$u_{i2} = 0\text{mV} \Rightarrow u_{o2} =$	$u_{i2} = 0\text{mV} \Rightarrow u_{o2} =$
Φάση u_o ως προς u_i :	Φάση u_o ως προς u_i :
$V_o =$	$V_o =$

Ε) Για τη μεγαλύτερη τιμή της R1, εκτελέστε DC ανάλυση σαρώνοντας την είσοδο V_l από -12V έως +12V με βήμα 10mV (στις παραμέτρους της πηγής σήματος VSIN δώστε την τιμή DC=0). Στο γραφικό περιβάλλον του PSpice παρουσιάστε τη χαρακτηριστική μεταφοράς του κυκλώματος $V_o = f(V_l)$. Σχεδιάστε τη χαρακτηριστική μεταφοράς στο πλαίσιο των αξόνων που ακολουθεί (βαθμονόμηση αξόνων!) και προσδιορίστε την γραμμική της περιοχή. Ποια είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τάση V_o που μπορεί να δώσει το συγκεκριμένο κύκλωμα; Συγκρίνεται αυτές τις τιμές με τις αντίστοιχες τιμές των τάσεων τροφοδοσίας του τελεστικού. Υπάρχει διαφορά και αν ναι γιατί; Από τη γραφική παράσταση προσδιορίστε το κέρδος του κυκλώματος.



Υπογραφή:

$V_I(V)$	-2,5	-2	-1.5	-1	-571m	-500m	-300m	-100m	100m	300m	500m	571m	...	2,5
$V_O(V)$	-11.991	-11.991	-11.991	-11.991	-11.991	-10.5	-6.3	-2.1	2.1	6.3	10.5	11.991	...	11.991

R1 =																			
										V_O									

Υπογραφή:

ΣΤ) Για τη μεγαλύτερη τιμή της $R1$, εκτελέστε AC ανάλυση σαρώνοντας τη συχνότητα της εισόδου από τα 10Hz έως τα 100MEGHZ με βήμα 10 σημεία/δεκάδα (στις παραμέτρους της πηγής σήματος VSIN δώστε την τιμή AC=1V). Στο γραφικό περιβάλλον του PSPICE παρουσιάστε τα διαγράμματα Bode για το κέρδος του κυκλώματος (σε dB) και την φάση ως προς τη συχνότητα. Προσδιορίστε το εύρος ζώνης του κυκλώματος. Ποια η συχνότητα γονάτου -3dB ($f_{(-3dB)}$); Ποιο το κέρδος A_v μέσα στο εύρος ζώνης; Το αποτέλεσμα της ανάλυσης για το κέρδος συμπίπτει με το αντίστοιχο της περίπτωσης (Ε); Ποια η συχνότητα μοναδιαίου κέρδους ($f_{(0dB)}$); Ποια η κλίση της χαρακτηριστικής του κέρδους στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων; Ποια η φάση στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων;

Υπογραφή:

R1 = 500Ω	
Συχνότητα γονάτου $f_{(-3dB)} = 48.774\text{KHz}$	Εύρος ζώνης = 10Hz εως 48.774
Κέρδος $A_{v(dB)} = 26..442\text{dB}$	εντός του εύρους ζώνης
Συχνότητα μοναδιαίου κέρδους $f_{(0dB)} = 896.546\text{KHz}$	
Κλίση χαρακτηριστικής = 20.385	dB/dec



Φάση (χαμηλές συχνότητες) = -24.176mdegrees εως -1,2221degrees

ΕΞΗΓΗΣΗ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΝΑ ΑΠΟ ΤΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ Α), Β), Ε), ΣΤ)

A) a) $A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow 21 = 1 + \frac{10^4}{R_1} \Rightarrow \boxed{R_1 = 500\Omega}$

β) $A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow 201 = 1 + \frac{10^4}{R_1} \Rightarrow \boxed{R_1 = 50\Omega}$

Β) Για σταθερή τάση $V_{eff} = 50mV$ έχουμε
για $R_{1a} = 500\Omega$, δίνει $V_o = (1 + R_2/R_1) V_i = (1 + 20) 50 \cdot 10^{-3} = 1.05V$
για $R_{1b} = 50\Omega$, δίνει $V_o = (1 + R_2/R_1) V_i = (1 + 200) 50 \cdot 10^{-3} = 10.05V$

δ) -

ε) -

Ε) $R_{1a} = 500\Omega$, DC Ανατροπή Σάρωση από -12V και έως +12V με βήμα 10mV

- Μέγιστη τάση εφόδου = 11.801V · Ελάχιστη τάση εφόδου = -11.803V
- Σημεία: (574.161m, 11.801) (575.483m, -11.803)

Παρατηρούμε ότι θα αναμέναμε η τάση V_o να φτάσει σε επίπεδο προσομοίωσης τα $V_{max} = 12V$ ή $V_{min} = -12V$ στο δηλαδή και η πηγές τάσης του τελευταίου ενισχυτή σταματά, επειδή ο ενισχυτής μας δεν είναι ιδανικός υπάρχουν σφάλματα και αποκλίσεις οπότε αναμέναμε χαμηλότερη τιμή.

Εύρος γραμμικής περιοχής $(\frac{V_-}{A_v}, V_-)$ έως $(\frac{V_+}{A_v}, V_+) = (0.574, -12)$ έως $(0.575, 12)$

- Για το A_v θα πάρω την κλίση της ευθείας η σε δύο τυχαία σημεία. Αιτάμεν τα σημεία A(199.697m, 4.194), B(199.884, 4.198)

Γρά, $A_v = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{83925}{389.581 \cdot 10^{-3}} = 20.926$ πολύ κοντά στην τιμή που αναμέναμε με

● ○ REDMI NOTE 9S



	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η	7 ^η	8 ^η	9 ^η	10 ^η ...
$V_i(V)$	-2.5	-2	-1	-0.571	-500m	-300m	-100m	100m	300m	500m
$V_o(V)$	11.991	11.991	11.991	11.991	10.5	6.3	2.1	2.1	6.3	10.5

$$V_o = \left(\frac{1 + R_o}{R_i} \right) V_i = (1 + 20) V_i = 21 \cdot V_i$$

Γενικός τύπος: $V_o = 21 V_i$ για την γραμμική περιοχή
 $-0.571 < V_i < 0.571$ (Volt)

1^η] $V_o = 21(-0.571) = -11.991$ Volt η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει εφόσον $-2.5 < 0.571$ δεν είναι στη γραμμική

2^η] $V_o = 21(-0.571) = -11.991$ Volt -/- -/- -/-

3^η] $V_o = 21(-0.571) = -11.991$ Volt

4^η] $V_o = -11.991$ Volt

5^η] $V_o = 21(-0.500) = -10.5$ Volt

6^η] $V_o = 21(-0.300) = -6.3$ Volt

7^η] $V_o = 21(-0.100) = -2.1$ Volt

8^η] $V_o = 21(0.100) = 2.1$ Volt

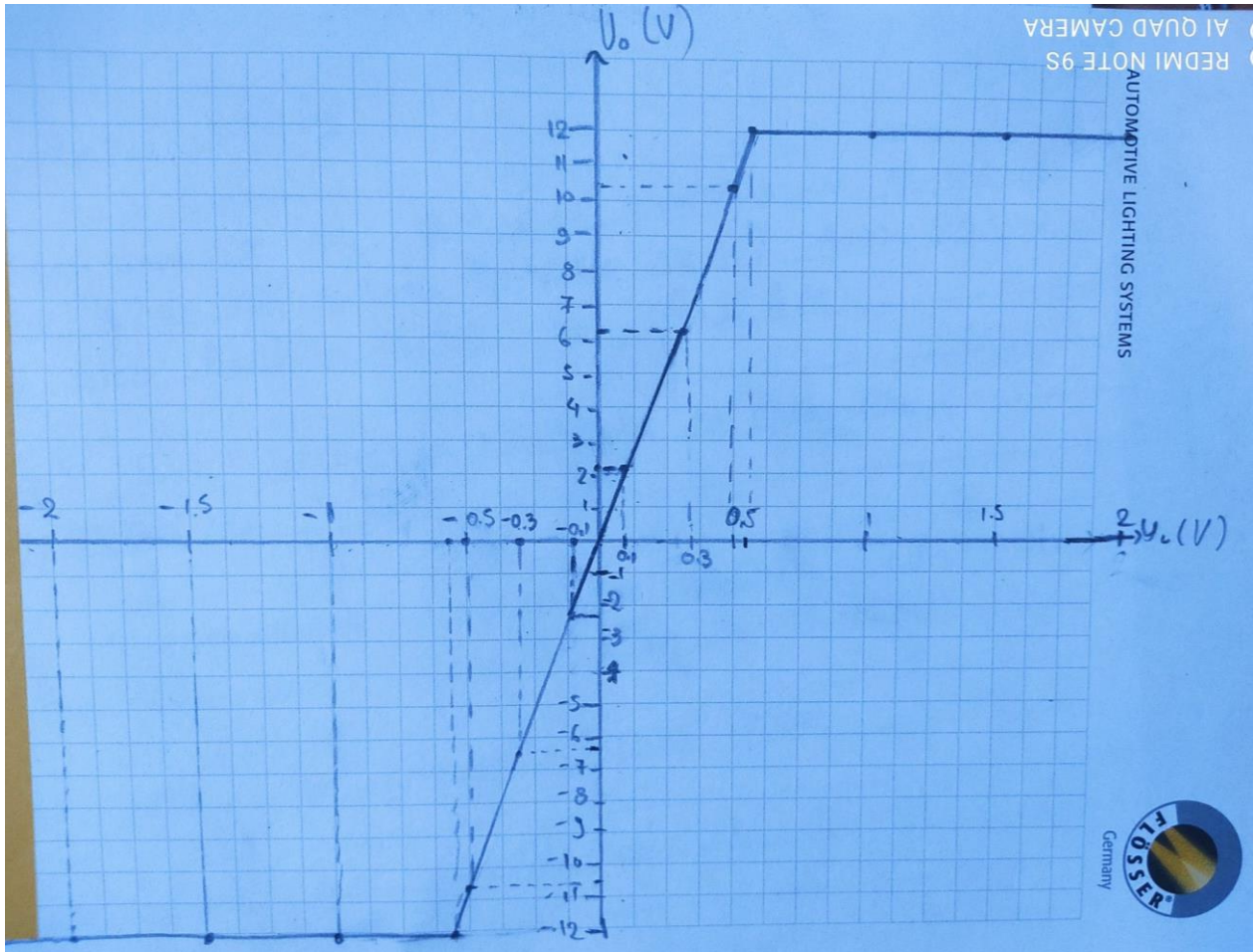
9^η] $V_o = 21(0.300) = 6.3$ Volt

10^η] $V_o = 21(0.500) = 10.5$ Volt

11^η] $V_o = 21(0.571) = 11.991$ Volt

12^η] $V_o = 21(0.571) = 11.991$ Volt

13^η] $V_o = 21(0.571) = 11.991$ Volt



||AC - Αναλυση||

α) Για την συχνότητα γονάτας βλέπω ότι η max τιμή του κέρδους είναι 26.442 dB Άρα θα πάω στα 23.442 dB στα 48.774 kHz

β) Ευρος Ζώνης: από τα 10 Hz έως την συχνότητα γονάτας διότι δεν βλέπουμε μεγάλη μεταβολή στην ενίσχυση. Άρα, $10 \text{ Hz} \dots 48.774 \text{ kHz}$

γ) Κέρδος $A_v = 26.442 \text{ dB}$

δ) Δεν συμφωνούν οι A_v των δυο ερωτημάτων αφού από την κλίση της ευθείας βρήκαμε στο (ε) $A_{v(2)} = 20.991$ και σε αυτό $A_{v(2)} = 26.442$. Άρα, $A_{v(2)} \neq A_{v(1)}$

ε) $f(0 \text{ dB})$ δηλ. $20 \log(1) = 0 \text{ Hz}$ που το βρίσκουμε $f(0 \text{ dB}) = 896.546 \text{ kHz}$

α) Κλίση χαρακτηριστικής διατετακτοσύνης πχ $f_1 = 100 \text{ kHz}$ και $f_2 = 1 \text{ MHz}$ ώστε $\frac{f_2}{f_1} = 10$ Άρα, $A(100 \text{ kHz}) = 19.248$
 $BC(11, -1.137)$ Άρα, $(y_B - y_A) = 20.385 \text{ dB/dec}$

ε) Διαφορά φάσης στις χαμηλές φάσεις ($10 \text{ Hz} \dots 1 \text{ kHz}$) είναι σχεδόν σταθερή η οποία είναι -24.176 degrees έως -1.221 degrees που μικρή περίσσεια ωθι με το μηδέν