



Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Εργαστήριο Μικροηλεκτρονικής – Εργασία 1

Χρήστος Μαργιώλης – 19390133

Απρίλιος 2022

Περιεχόμενα

1	Θεωρητικό μέρος	2
2	Αναζήτηση βιβλιογραφίας	2
3	Υλοποίηση της εργασίας	2
4	Συνδεσμολόγηση κυκλώματος	3
5	Εφαρμογή σήματος	3
5.1	Γράφημα εξόδου ως προς είσοδο	3
5.2	Θεωρητικό και πρακτικό κέρδος	4
5.3	Διαφορά φάσης	6
6	Αύξηση συχνότητας	6
7	Υλοποίηση σε breadboard	7

1 Θεωρητικό μέρος

Η εργασία αυτή έχει ως θέμα την υλοποίηση και μελέτη τελεστικών ενισχυτών. Τελεστικός ενισχυτής είναι ένα κύκλωμα το οποίο, πέρα από το ότι έχει ενισχυτική ικανότητα, μπορεί να εκτελέσει και μαθηματικές πράξεις (τελεστές), όπως πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμό, διαίρεση, παραγωγή και ολοκλήρωση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των τελεστικών ενισχυτών είναι η τεράστια ενίσχυση που προσφέρουν, ακόμα και με πολύ μικρές διαφορές δυναμικού.

Παρόλα αυτά, η τόσο μεγάλη ενισχυτική ικανότητα που παρέχουν, δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, οπότε χρησιμοποιούμε μεγάλες αντιστάσεις ώστε να περιορίσουμε το κέρδος (gain) του ενισχυτή.

Μερικές από τις θεμελιώδεις συνδεσμολογίες τελεστικών ενισχυτών είναι οι παρακάτω:

- Συγκριτής τάσης (voltage comparator).
- Αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής (inverting operational amplifier).
- Μη-αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής (non-inverting operational amplifier).
- Απομονωτής (buffer).

Ο συγκριτής τάσης δέχεται μία είσοδο και μία τάση αναφοράς (reference voltage), και έχει 2 πιθανές εξόδους που θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε με το λογικό 0 και 1, ή με την δομή if-else. Πιο συγκεκριμένα, αν η τάση εισόδου είναι μικρότερη της τάσης αναφοράς, τότε η έξοδος είναι η θετική τάση V_{cc} , αλλιώς στην αντίθετη περίπτωση, η έξοδος είναι η αρνητική τάση V_{ee} . Δηλαδή:

$$V_o = \begin{cases} V_{cc} & V_{in} < V_{ref} \\ V_{ee} & V_{in} > V_{ref} \end{cases}$$

Ο αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής αναστρέφει το σήμα εισόδου και έχει διαφορά φάσης 180° . Η αναστροφή αυτή επιτυγχάνεται με την σύνδεση του σήματος εισόδου στον αρνητικό ακροδέκτη V_n του ενισχυτή.

Ο μη-αναστρέφων ενισχυτής έχει αντιστραμμένες τις εισόδους από τον αναστρέφοντα ενισχυτή, και η αντίσταση εισόδου είναι γειωμένη. Το σήμα εξόδου του είναι σε φάση με το σήμα εισόδου, και πρέπει οπωσδήποτε να έχει κέρδος μεγαλύτερο του 1.

Ο buffer έχει πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου και μοναδιαίο κέρδος, οπότε είναι ιδανικός για σύνδεση κυκλωμάτων χωρίς να υπάρχει απώλεια σήματος. Στην υλοποίηση του είναι ένας μη-αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής, με την διαφορά ότι λείπει η feedback αντίσταση.

2 Αναζήτηση βιβλιογραφίας

Η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε είναι δύο ακαδημαϊκά άρθρα, ένα από το MIT [1] και ένα από το Πολυτεχνείο της Καλοφόρνια [2]. Περισσότερες πληροφορίες βρίσκονται στο τέλος της εργασίας.

3 Υλοποίηση της εργασίας

Για την υλοποίηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω εργαλεία:

- Tina-TI για την συνδεσμολογία και τις μετρήσεις του κυκλώματος.
- Tinkercad για την υλοποίηση του κυκλώματος σε breadboard.
- Latex για την συγγραφή της εργασίας.

4 Συνδεσμολόγηση κυκλώματος

- Συνδεσμολογήστε το παρακάτω κύκλωμα με $R_1 = R_2 = 100\text{ k}\Omega$ και $V_1 = 15\text{ V}$, $V_2 = -15\text{ V}$.

Η χρήση αντιστάσεων στο παρακάτω κύκλωμα, καθώς και η σύνδεση του θετικού ακροδέκτη του ενισχυτή στην γη, δείχνει ότι το κύκλωμα πρόκειται για έναν αναστρέφοντα τελεστικό ενισχυτή.

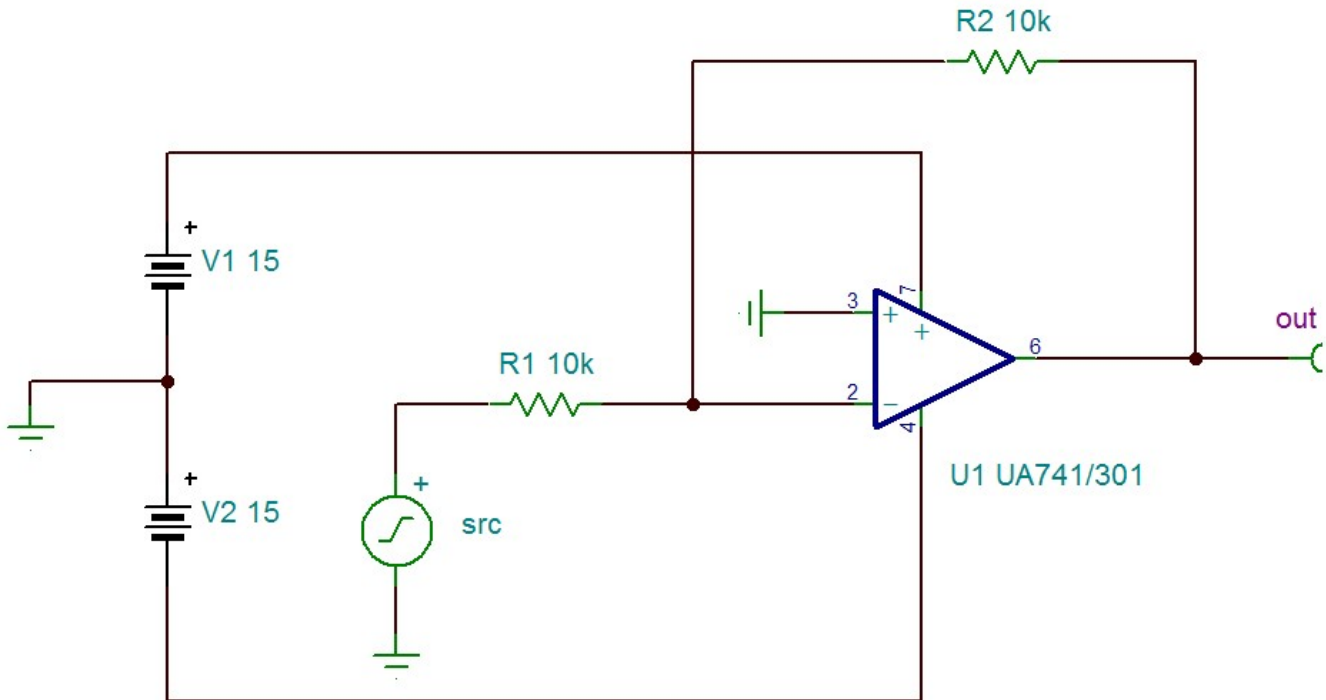


Figure 1: Αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής

5 Εφαρμογή σήματος

- Εφαρμόστε ημιτονικό σήμα $1\text{ kHz}/1V_{pp}$ στην είσοδο.
 - Αναπαραστήσετε σε γράφημα την έξοδο του κυκλώματος ως προς την είσοδο.
 - Υπολογίστε το θεωρητικό και πρακτικό κέρδος του ενισχυτή, στη συνέχεια συγκρίνατε τα δύο κέρδη. Υπάρχουν διαφορές; Πού οφείλονται;
 - Μετρήστε την διαφορά φάσης που παρατηρείται μεταξύ εισόδου και εξόδου.

5.1 Γράφημα εξόδου ως προς είσοδο

Με την αναπαράσταση της εξόδου του κυκλώματος ως προς την είσοδο, συμπεραίνουμε ότι πράγματι το κύκλωμα είναι ένας αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής, εφόσον το σήμα εξόδου είναι 180° εκτός φάσης.

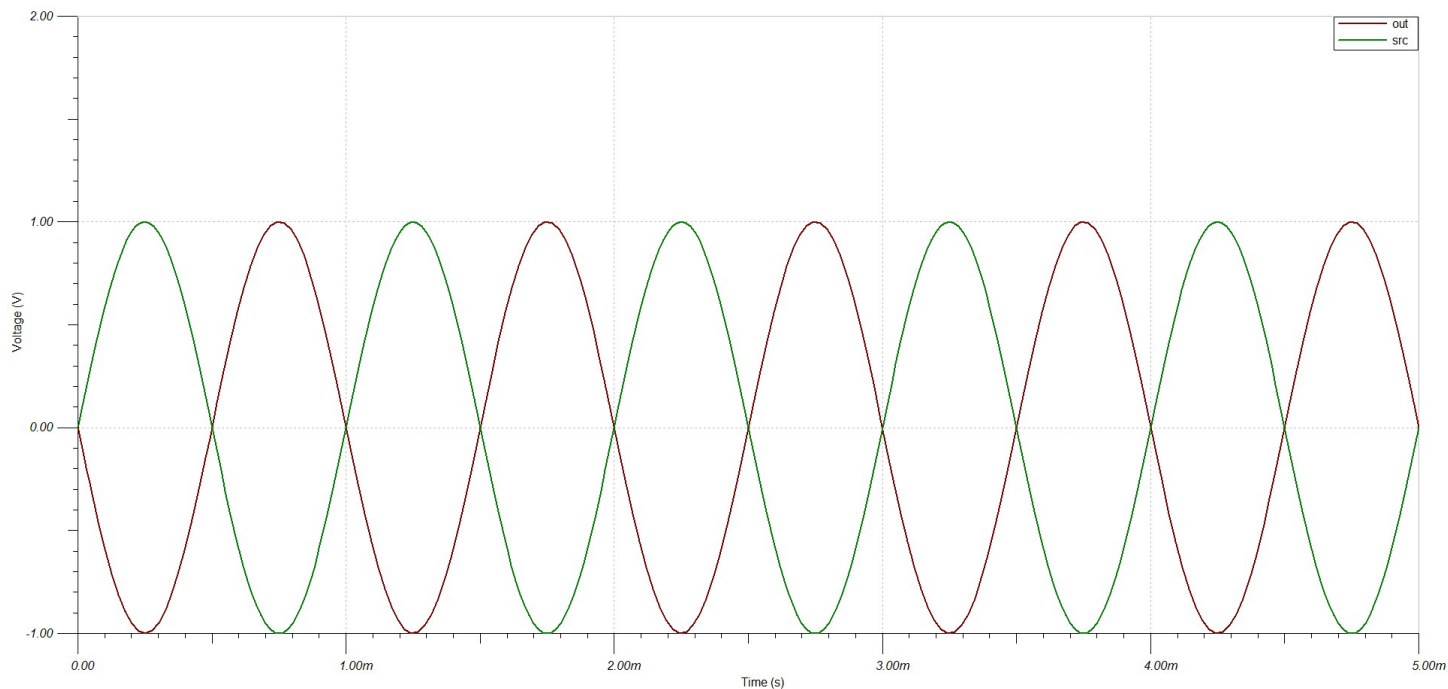


Figure 2: Καμπύλες στο ίδιο γράφημα

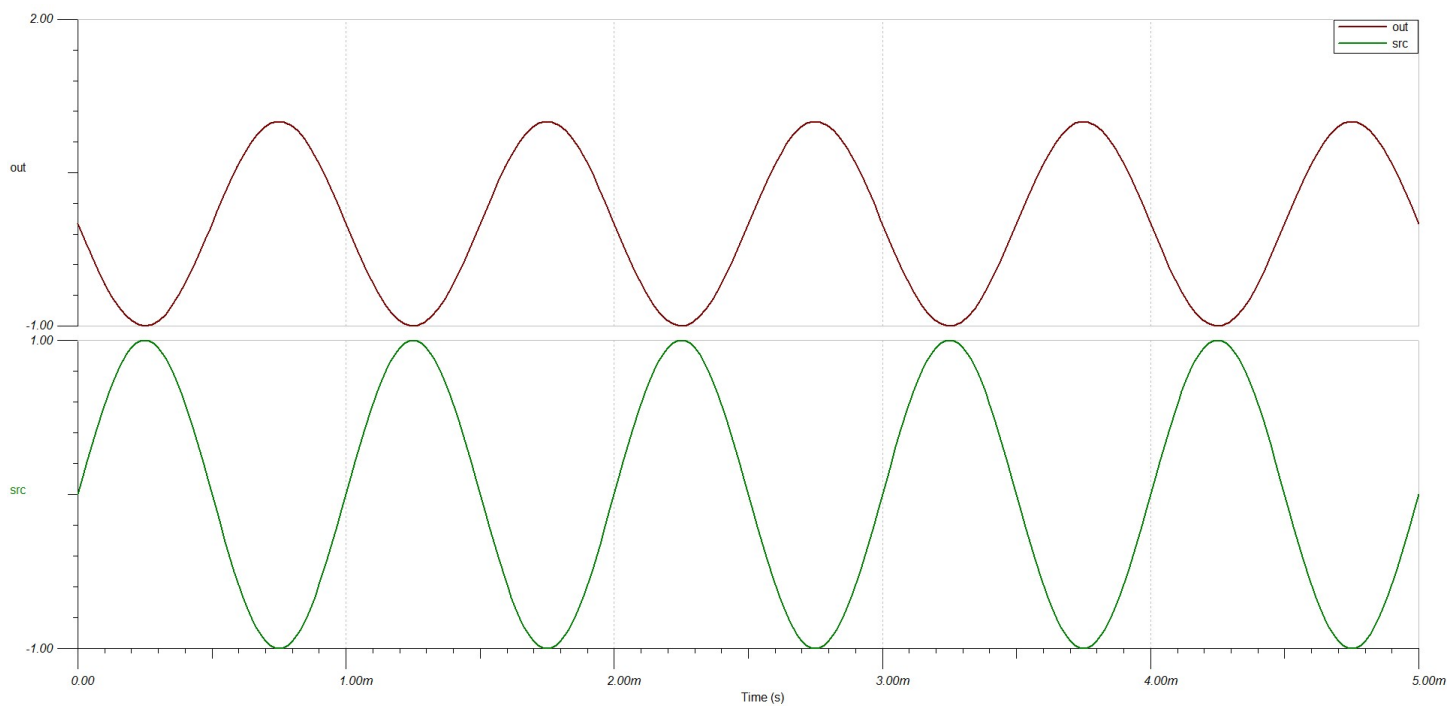


Figure 3: Καμπύλες σε ξεχωριστό γράφημα

5.2 Θεωρητικό και πρακτικό κέρδος

Το θεωρητικό κέρδος του αναστρέφοντα ενισχυτή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1}$$

Οπότε, έχουμε ότι:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow A_v = -\frac{10\text{ k}\Omega}{10\text{ k}\Omega} \Rightarrow A_v = -1$$

Μετατρέπουμε το κέρδος σε dB:

$$A_v(\text{dB}) = 20 \log_{10}|A_v| \Rightarrow A_v(\text{dB}) = 20 \log_{10}|-1| \Rightarrow A_v(\text{dB}) = 0 \text{ dB}$$

Το πρακτικό κέρδος, με βάση την παρακάτω μέτρηση, είναι 0.000 733 dB. Παρατηρούμε ότι το θεωρητικό και πρακτικό κέρδος δεν απέχουν πολύ – θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι είναι και ίδια. Ο λόγος που δεν μπορεί το πρακτικό κέρδος να είναι 100% ίδιο με το θεωρητικό, οφείλεται στο γεγονός ότι στην πραγματικότητα, τα υλικά των κυκλωμάτων (αντιστάσεις, πυκνωτές, κλπ), επηρεάζονται από φυσικούς παράγοντες (π.χ θερμότητα) και έτσι δεν λειτουργούν με βάση τις ιδανικές συνθήκες με τις οποίες λειτουργούν οι μαθηματικοί τύποι.

Παρατηρούμε επίσης ότι μετά από μία συγκεκριμένη συχνότητα, το κέρδος αρχίζει και πέφτει. Αυτό οφείλεται στο ότι η συχνότητα του σήματος εισόδου ξεπερνάει την ταχύτητα με την οποία ο ενισχυτής μπορεί να επεξεργαστεί το σήμα.

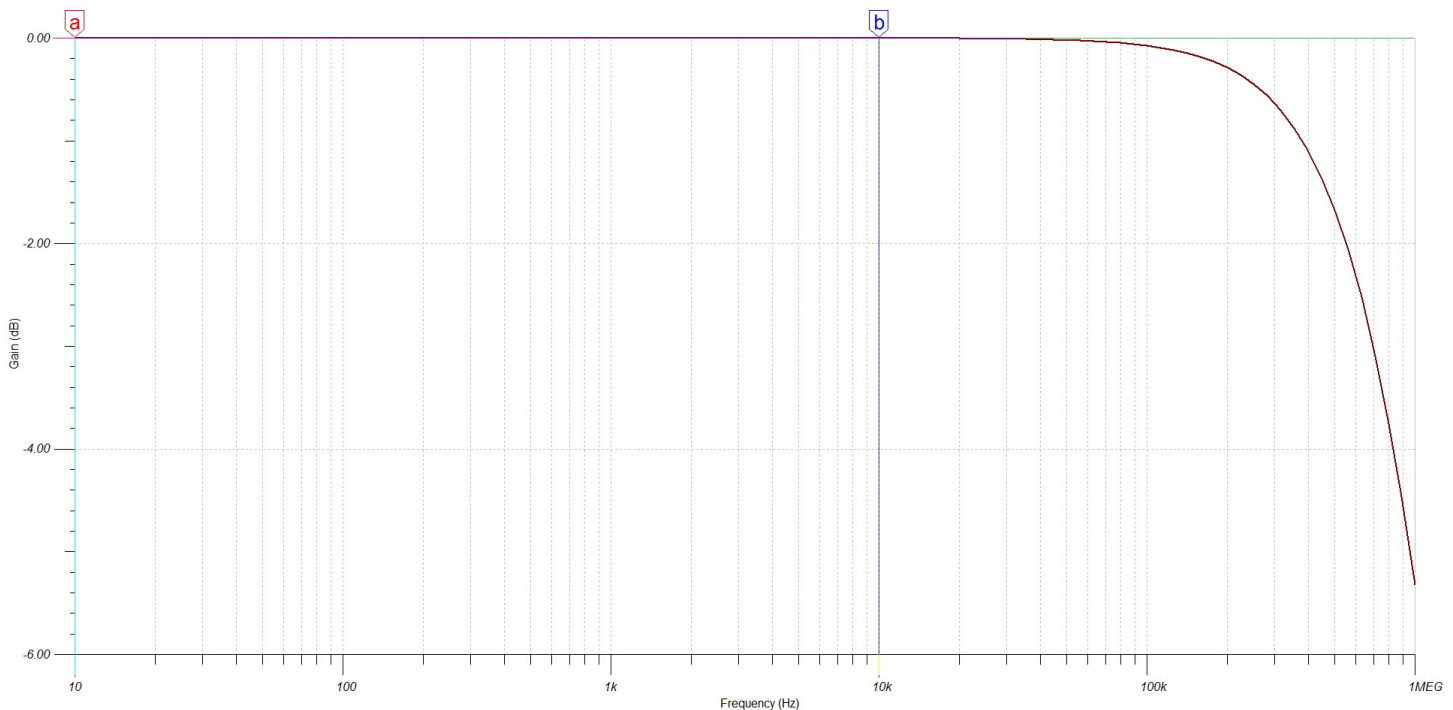


Figure 4: Γράφημα πρακτικού κέρδους

A	
x: 10	y: -82.48u
B	
x: 10k	y: -815.95u
A - B	
x: -9.99k	y: 733.47u

Figure 5: Υπολογισμός πρακτικού κέρδους

5.3 Διαφορά φάσης

Με βάση την παρακάτω μέτρηση, η διαφορά φάσης είναι περίπου π rad (180°), μέχρι που αρχίζει και πέφτει λογαριθμικά. Δηλαδή, το σήμα εισόδου βρίσκεται σε αντίθετη φάση με το σήμα εξόδου. Όπως και με την μέτρηση του πρακτικού κέρδους, έτσι και η διαφορά φάσης δεν μπορεί να αντιστοιχεί ακριβώς στα θεωρητικά αποτελέσματα, αλλά είναι πάρα πολύ κοντά.

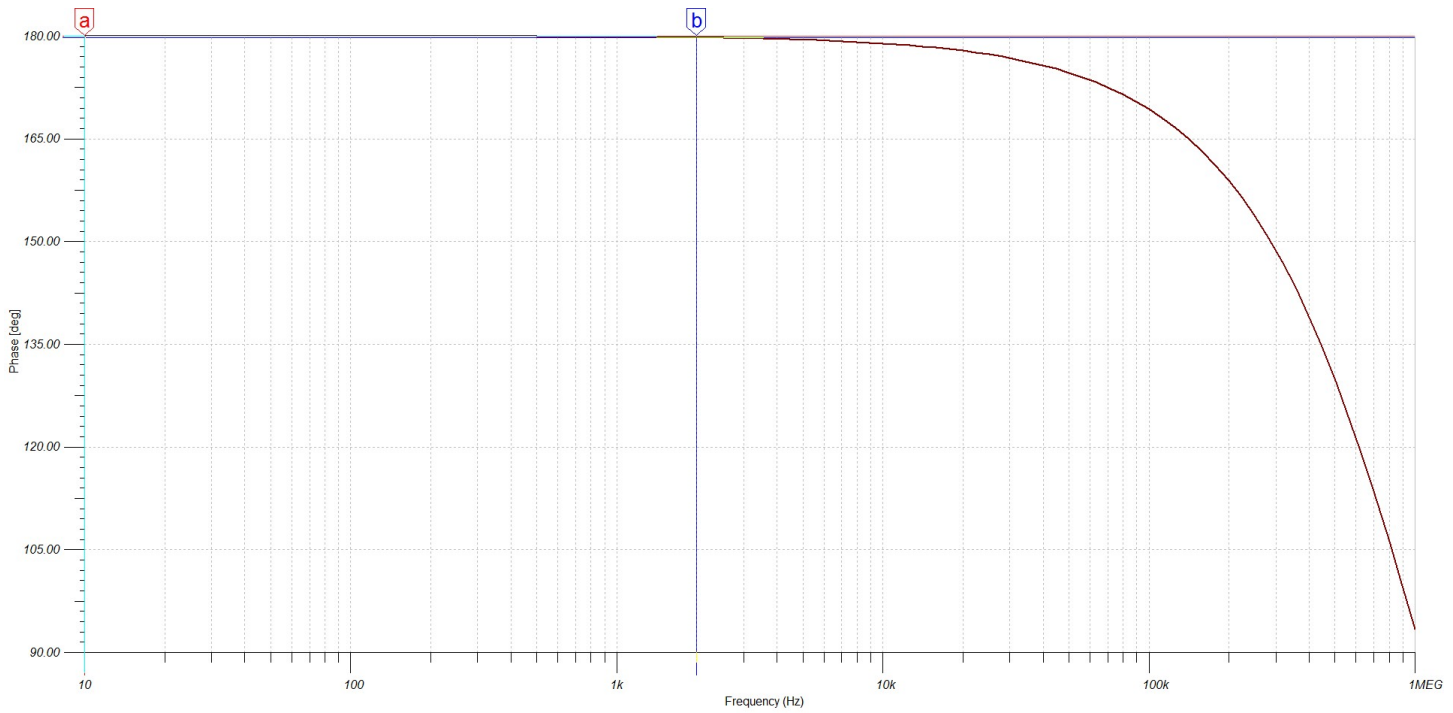


Figure 6: Γράφημα φάσης

A		
x:	10	y: 180
B		
x:	1.99k	y: 179.79
A - B		
x:	-1.98k	y: 212.04m

Figure 7: Υπολογισμός διαφοράς φάσης

6 Αύξηση συχνότητας

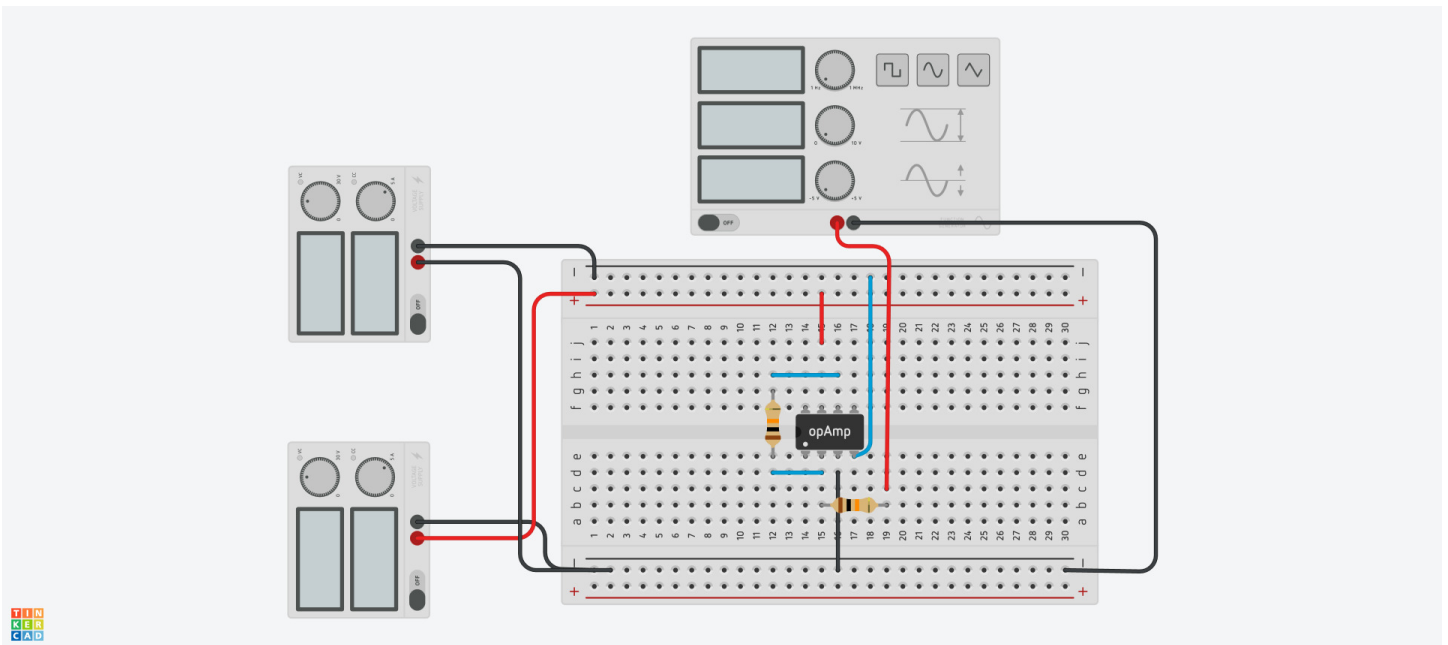
- Διατηρώντας το πλάτος του σήματος εισόδου σταθερό αυξήστε την συχνότητα εισόδου σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα. Τι παρατηρείτε; Πού οφείλεται;

Από τον παρακάτω πίνακα, παρατηρούμε ότι ασχέτως του πόσο θα αυξηθεί η συχνότητα του σήματος εισόδου, το κέρδος είναι ίδιο. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ενισχυτής έχει 0dB θεωρητικό (και 0.000733 πρακτικό) κέρδος, οπότε εφόσον ο ενισχυτής δεν έχει κέρδος, τότε όσο και να αυξήσουμε την συχνότητα, θα εξακολουθούμε να μην έχουμε κέρδος, αν δεν αλλάξουμε και το πλάτος του σήματος εισόδου.

$F(\text{Hz})$	$A(\text{dB})$
1 kHz	0 dB
10 kHz	0 dB
50 kHz	0 dB
100 kHz	0 dB
500 kHz	0 dB
1 MHz	0 dB
1.5 MHz	0 dB
2 MHz	0 dB

7 Υλοποίηση σε breadboard

- Παρουσιάστε το κύκλωμά σας υλοποιημένο σε breadboard μέσω της εφαρμογής Tinkercad.



Βιβλιογραφία

- [1] Cory Chaniotakis. "Operational Amplifiers". In: MIT, 2006. URL: https://ocw.mit.edu/courses/6-071j-introduction-to-electronics-signals-and-measurement-spring-2006/resources/22_op_amps1/.
- [2] Phyllis R. Nelson. "Introduction to Operational Amplifiers". In: California State Polytechnic, 2012. URL: <https://www.cpp.edu/~prnelson/courses/ece322/322-opamps-f12.pdf>.