ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Εισαγωγικό εργαστήριο ηλεκτρονικής και τηλεπικοινωνιών

4η εργαστηριακή άσκηση
Προσομοίωση
LTspice

Διδάσκοντες:

Ι. Παπανάνος
Ν. Βουδούκης

Ειρήνη Δόντη
Α.Μ 03119839

3ο εξάμηνο

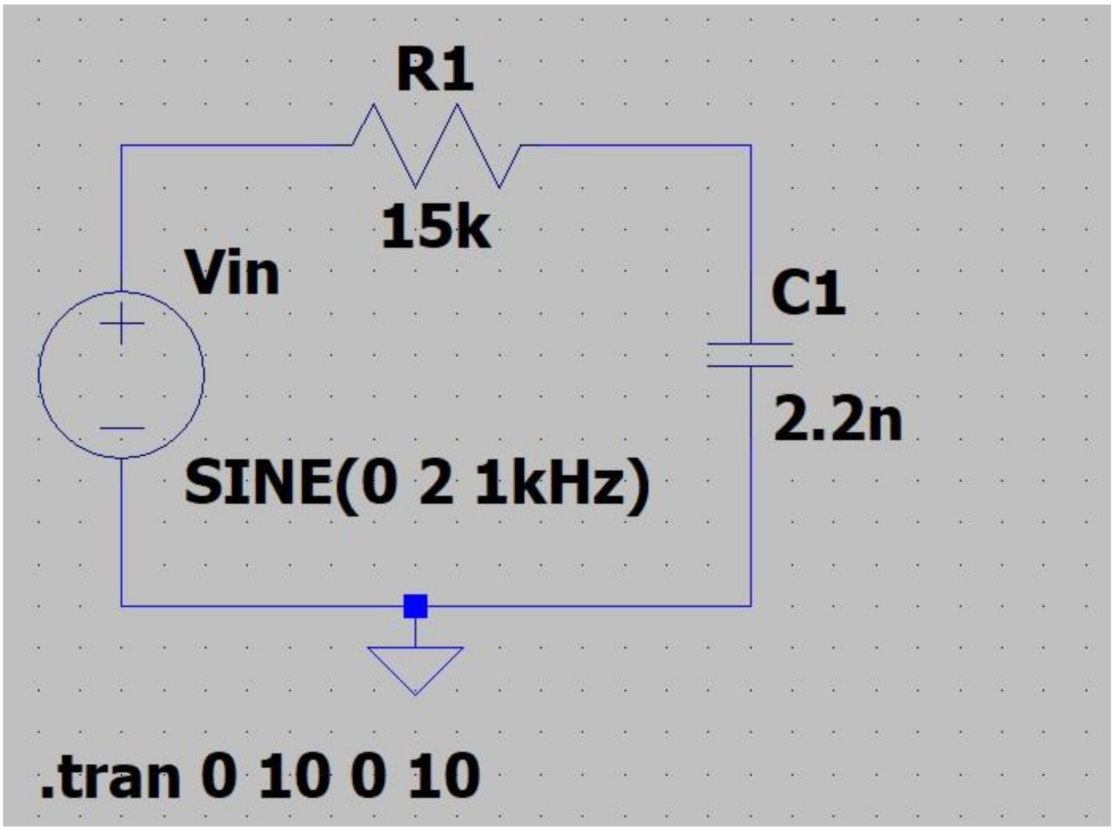
Αθήνα 2020 – 2021

Πείραμα 7

Βήμα 1

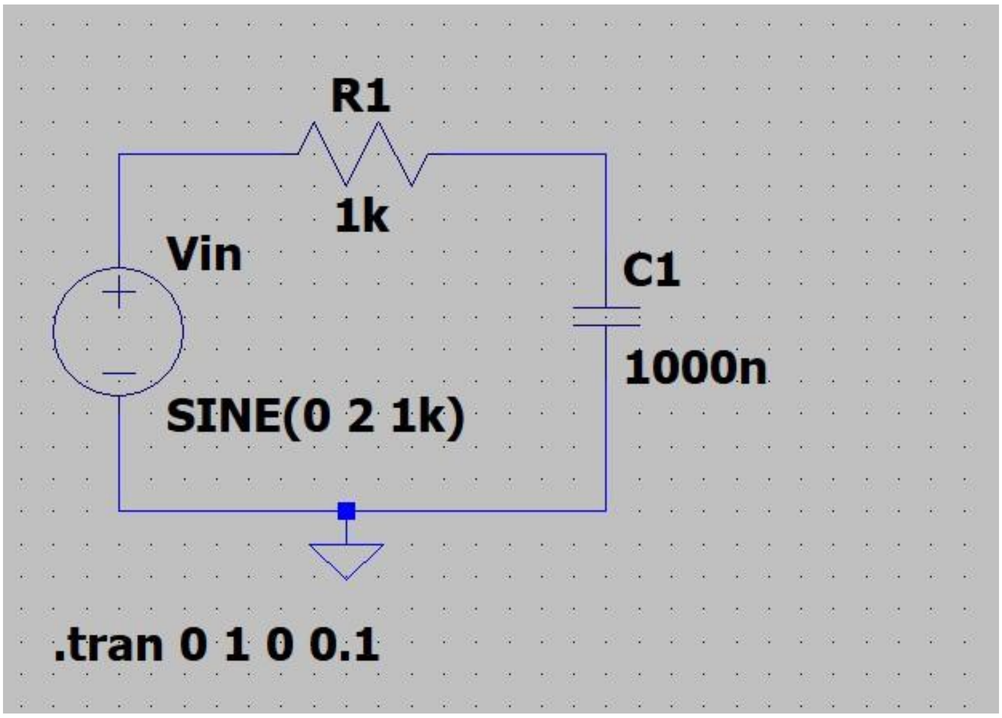
(α): Κύκλωμα με **R = 15 kΩ και C = 2,2 nF**:

Το προσομοιωμένο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



(β) Κύκλωμα με **R = 1kΩ και C = 1μF**:

Το προσομοιωμένο κύκλωμα είναι το παρακάτω:

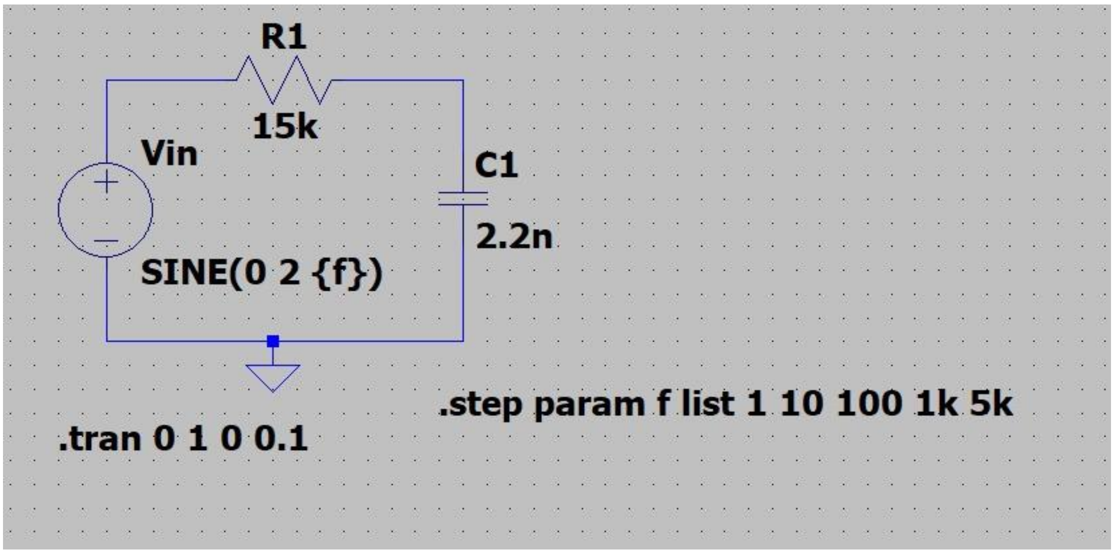


Βήμα 2

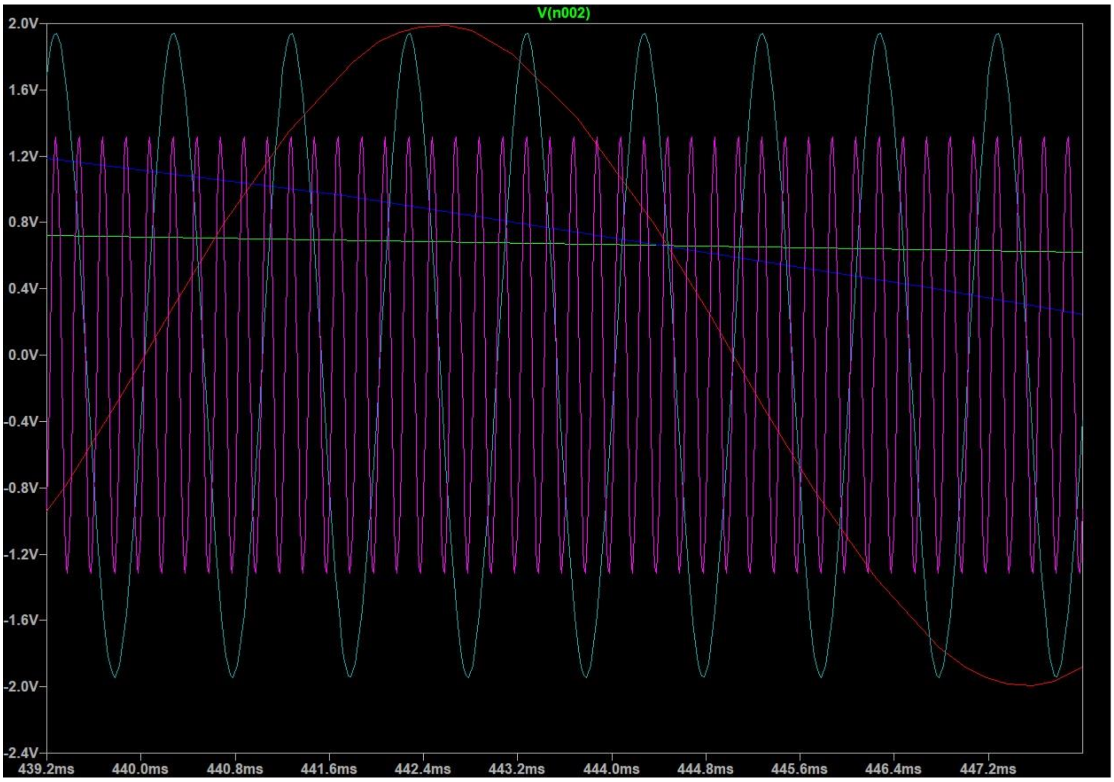
(α): Κύκλωμα με **R = 15 kΩ και C = 2,2 nF**:

Μεταβάλουμε την συχνότητα του σήματος εισόδου, έχοντας σταθερό πλάτος:

Το προσομοιωμένο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



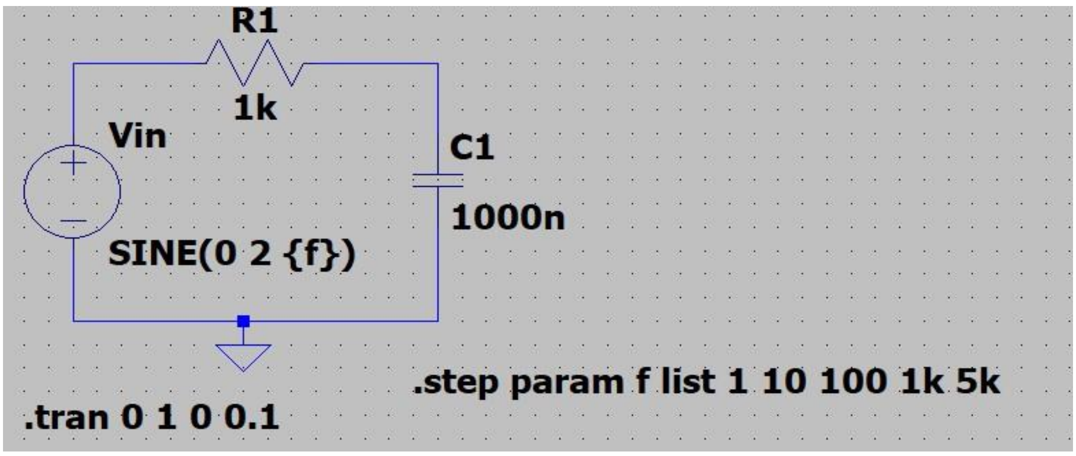
Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου συναρτήσει του χρόνου είναι η παρακάτω:



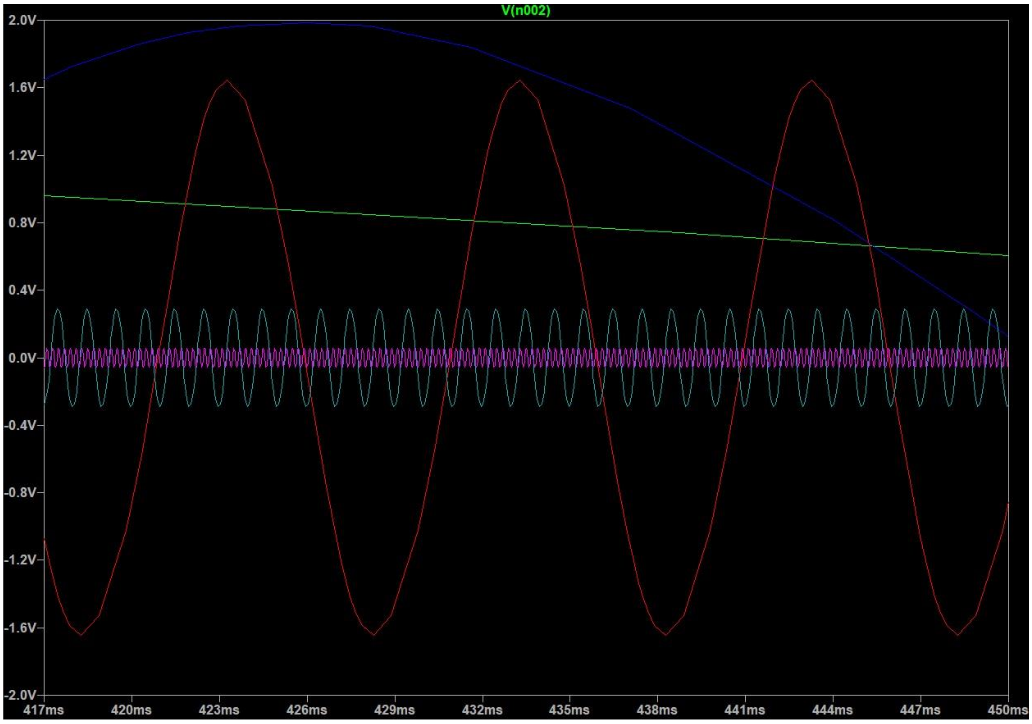
(β) Κύκλωμα με **R = 1kΩ και C = 1μF**:

Μεταβάλουμε την συχνότητα του σήματος εισόδου, έχοντας σταθερό πλάτος:

Το προσομοιωμένο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου συναρτήσει του χρόνου είναι η παρακάτω:



Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για ένα βαθυπερατό φίλτρο.

Γενικότερα, σε ένα βαθυπερατό φίλτρο, όταν η περίοδος του σήματος εισόδου είναι μικρή, ο πυκνωτής στην έξοδο δεν έχει αρκετό χρόνο για να φορτιστεί και να εκφορτιστεί πλήρως. Συνεπώς, η έξοδος δεν μπορεί να ακολουθήσει τις μεγάλες διακυμάνσεις του σήματος εισόδου και οι διακυμάνσεις της παραμένουν μικρές. Όταν η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι μεγάλη, το πλάτος της εξόδου γίνεται μικρό.

Στις πολύ χαμηλές συχνότητες, η τάση στον πυκνωτή είναι σχεδόν ίση με την τάση εισόδου και ο πυκνωτής συμπεριφέρεται σχεδόν ως ανοιχτοκύκλωμα. Αντιθέτως, στις πολύ υψηλές συχνότητες η τάση στον πυκνωτή είναι σχεδόν μηδενική και ο πυκνωτής συμπεριφέρεται ως “βραχυκύκλωμα”.

Εφόσον, λοιπόν, στο συγκεκριμένο πείραμα, αυξάνοντας τη συχνότητα εισόδου το πλάτος εξόδου μειώνεται, συμπεραίνουμε ότι πρόκειται για ένα **βαθυπερατό** φίλτρο.

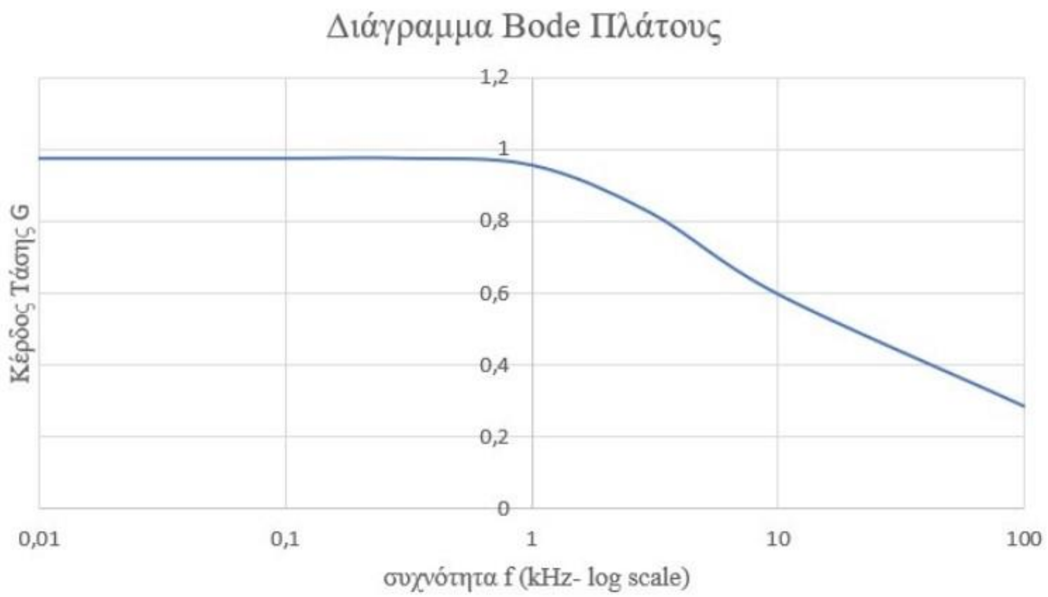
Βήμα 3 - 5

Απεικονίζουμε το μέτρο του κέρδους G συναρτήσει της συχνότητας για τις περιπτώσεις (α) και (β):

(α) Για **R = 15kΩ και C = 2,2nF**: fc = $\frac{1}{2*\pi*15*10^3 2,2*10^{-9}}$ = 4,823 kHz

Το Διάγραμμα Bode Πλάτους φαίνεται παρακάτω, όπως και οι τιμές που χρειάζονται για την υλοποίηση του διαγράμματος:

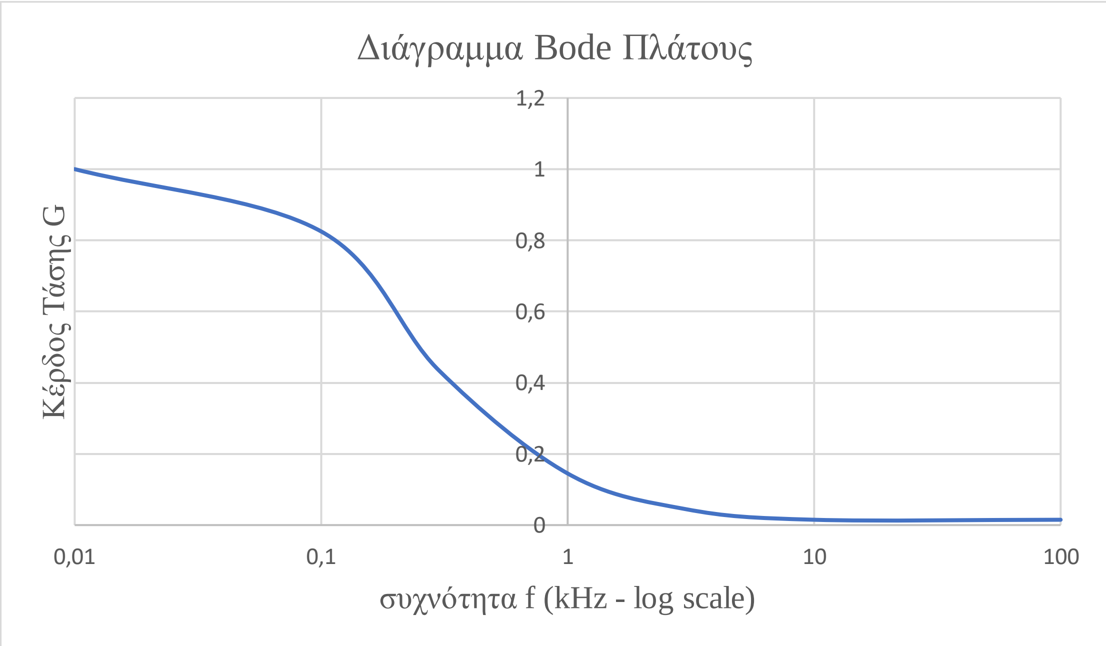
f (Hz)	G (Κέρδος Τάσης)
10	0,98
100	0,98
300	0,98
1000	0,96
3000	0,83
10000	0,59
100000	0,28



(β) Για **R = 1kΩ και C = 1μF**: fc = $\frac{1}{2*\pi*1*10^3 1*10^{-6}}$ = 0,16 kHz

Το Διάγραμμα Bode Πλάτους φαίνεται παρακάτω, όπως και οι τιμές που χρειάζονται για την υλοποίηση του διαγράμματος:

f (Hz)	G (Κέρδος Τάσης)
10	1
100	0,825
300	0,435
1000	0,145
3000	0,045
10000	0,015
100000	0,015



<u>Βήμα 6-8</u>

Απεικονίζουμε την ολίσθηση φάσης συναρτήσει της συχνότητας για τις περιπτώσεις (α) και (β):

(α) Κύκλωμα με **R = 15 kΩ και C = 2,2 nF**:

Έχουμε υπολογίσει ότι: fc = 4,8 kHz
Υπολογίζουμε, μέσω προσομοίωσης, ότι: Δt = 26,14 μS
φ = -Δt*fc*360 = - 43 μοίρες.

Οι τιμές της μετρημένης ολίσθησης φάσης από την προσομοίωση, για διάφορες τιμές της συχνότητας, απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα:

f (Hz)	φ
10	-2,48
100	-6,32
300	-9,66
1000	-14,86
3000	-35,66
10000	-71,82
100000	-86,69

Παρακάτω, απεικονίζεται η ζητούμενη γραφική:

(β) Κύκλωμα με **R = 1 kΩ και C = 1 μF**:

Έχουμε υπολογίσει ότι: fc = 0,16 kHz

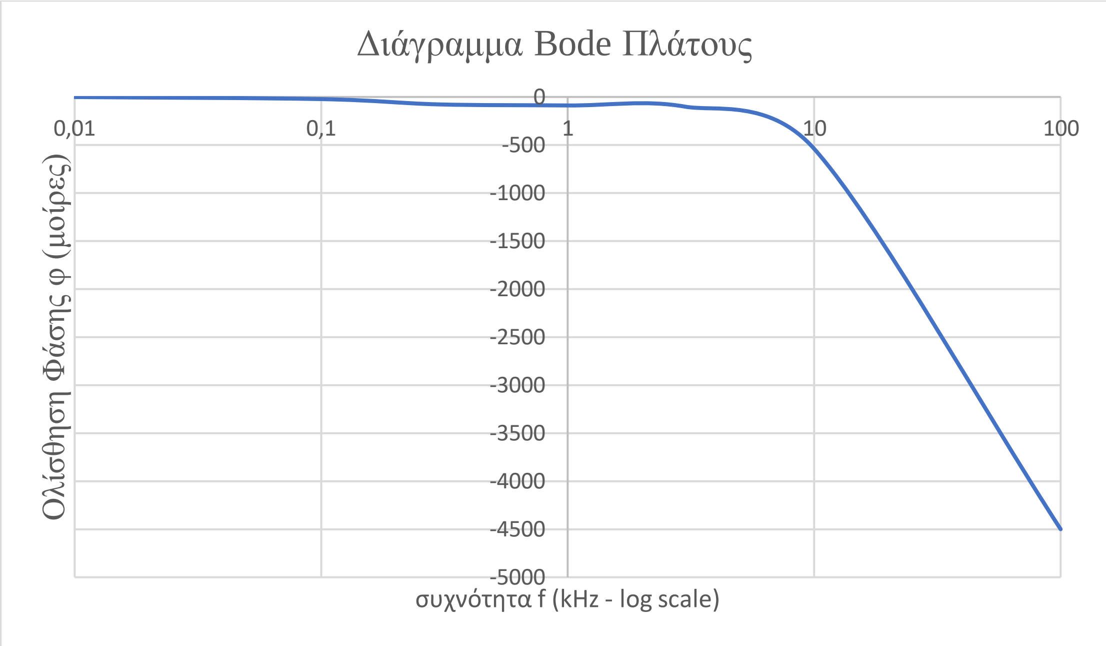
Υπολογίζουμε, μέσω προσομοίωσης, ότι: Δt = 0,76 μS

φ = -Δt*fc*360 = - 44 μοίρες.

Οι τιμές της μετρημένης ολίσθησης φάσης από την προσομοίωση, για διάφορες τιμές της συχνότητας, απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα:

f (Hz)	φ
10	-1,08
100	-22,68
300	-77,76
1000	-88,7
3000	-101,4
10000	-540
100000	-4500

Παρακάτω, απεικονίζεται η ζητούμενη γραφική:

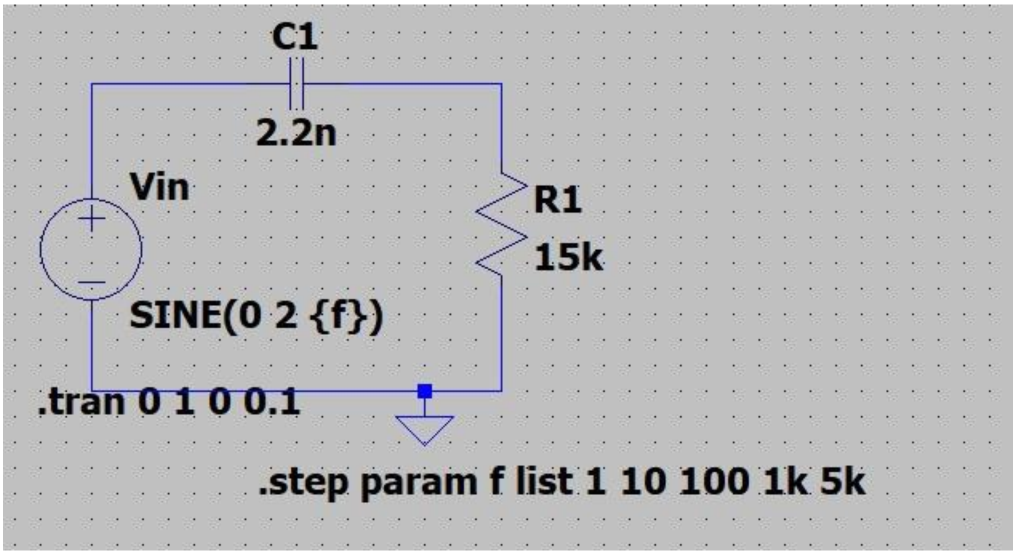


Βήμα 9

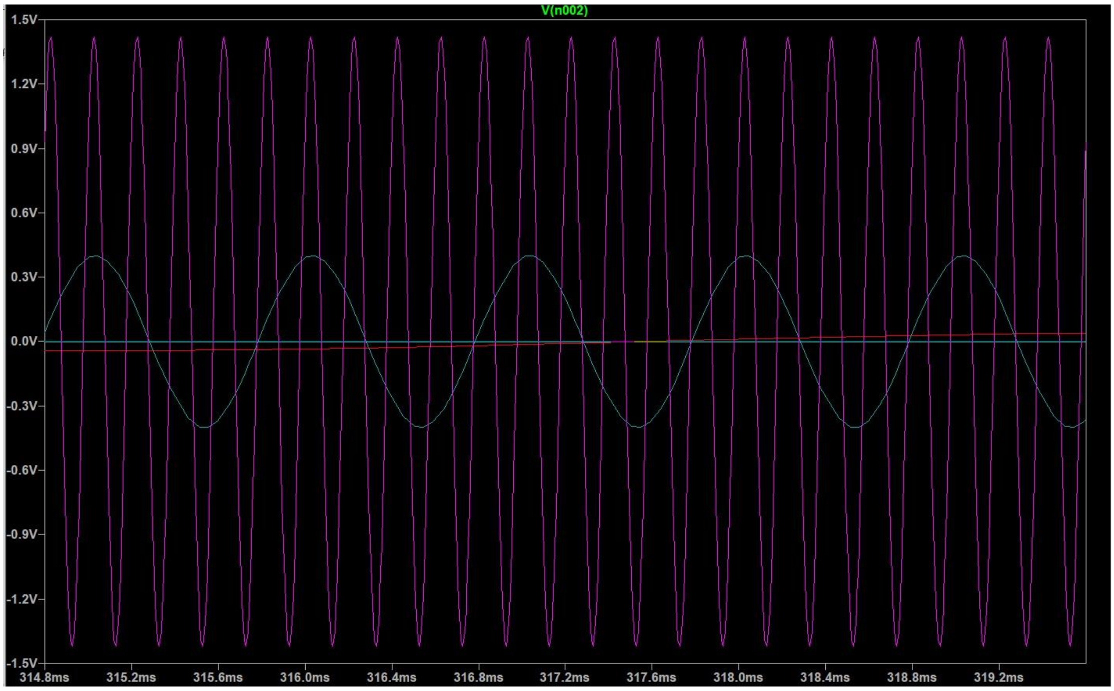
(α) Κύκλωμα με **R = 15 kΩ και C = 2,2 nF**:

Μεταβάλουμε την συχνότητα του σήματος εισόδου, έχοντας σταθερό πλάτος:

Το προσομοιωμένο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



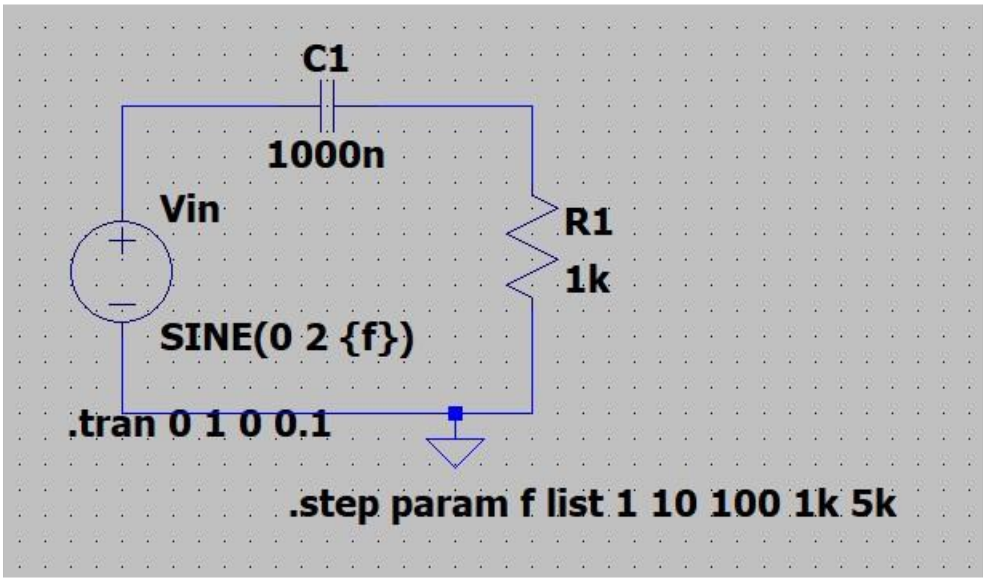
Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου συναρτήσει του χρόνου είναι η παρακάτω:



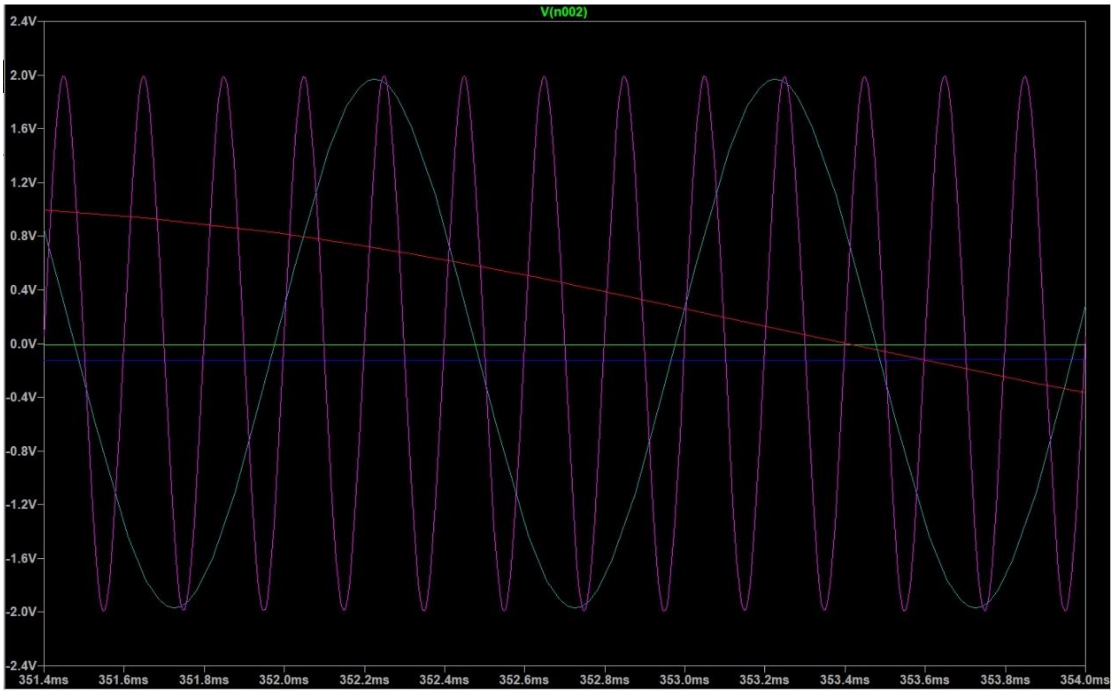
(β) Κύκλωμα με **R = 1 kΩ και C = 1 μF**:

Μεταβάλουμε την συχνότητα του σήματος εισόδου, έχοντας σταθερό πλάτος:

Το προσομοιωμένο κύκλωμα είναι το παρακάτω:



Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου συναρτήσει του χρόνου είναι η παρακάτω:



Στις παραπάνω κυματομορφές παρατηρούμε ότι η αύξηση της συχνότητας οδηγεί σε αύξηση του πλάτους της κυματομορφής εξόδου. Αυτό που παρατηρούμε είναι αναμενόμενο, καθώς το κύκλωμα που κατασκευάσαμε αποτελεί ένα υψιπερατό φίλτρο.

Πιο συγκεκριμένα, σε ένα υψιπερατό φίλτρο, στις πολύ χαμηλές συχνότητες, ο πυκνωτής συμπεριφέρεται "σχεδόν ως ανοιχτοκύκλωμα" και ουσιαστικά η έξοδος αποσυνδέεται από την είσοδο. Συνεπώς, σε χαμηλές συχνότητες η τάση εξόδου είναι μικρή, ενώ αντίθετα, σε υψηλές συχνότητες η τάση εξόδου αυξάνεται και τείνει να γίνει ίση με την τάση εισόδου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε υψηλές συχνότητες ο πυκνωτής συμπεριφέρεται "σχεδόν ως βραχυκύκλωμα".

Εν κατακλείδι, για ένα κύκλωμα σαν αυτό του βήματος 9, τα σήματα εισόδου με υψηλές συχνότητες περνούν στην έξοδο, ενώ τα σήματα με χαμηλές συχνότητες απορρίπτονται. Πρόκειται, δηλαδή, για ένα **υψιπερατό** φίλτρο.

Βήμα 10-11

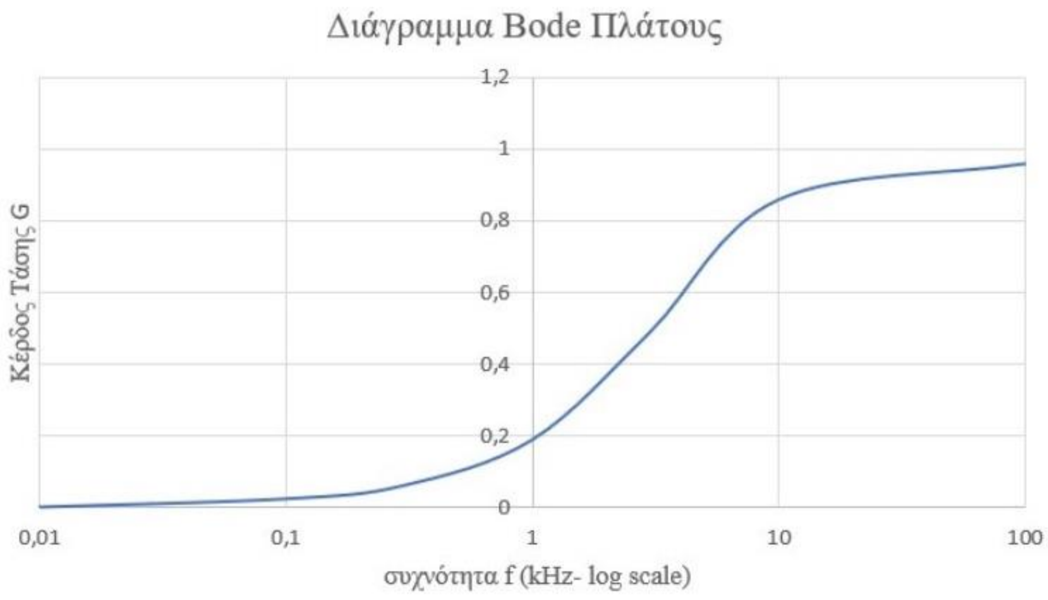
Απεικονίζουμε το μέτρο του κέρδους G συναρτήσει της συχνότητας για τις περιπτώσεις (α) και (β):

(α) Για **R = 15kΩ και C = 2,2nF**: fc = $\frac{1}{2*\pi*15*10^3 2{,}2*10^{-9}}$ = 4,823 kHz

Τα κέρδη τάσης από την προσομοίωση, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα:

f (Hz)	G (Κέρδος Τάσης)
10	0,00195
100	0,025
300	0,062
1000	0,19
3000	0,49
10000	0,86
100000	0,96

Παρακάτω, απεικονίζεται η ζητούμενη γραφική:

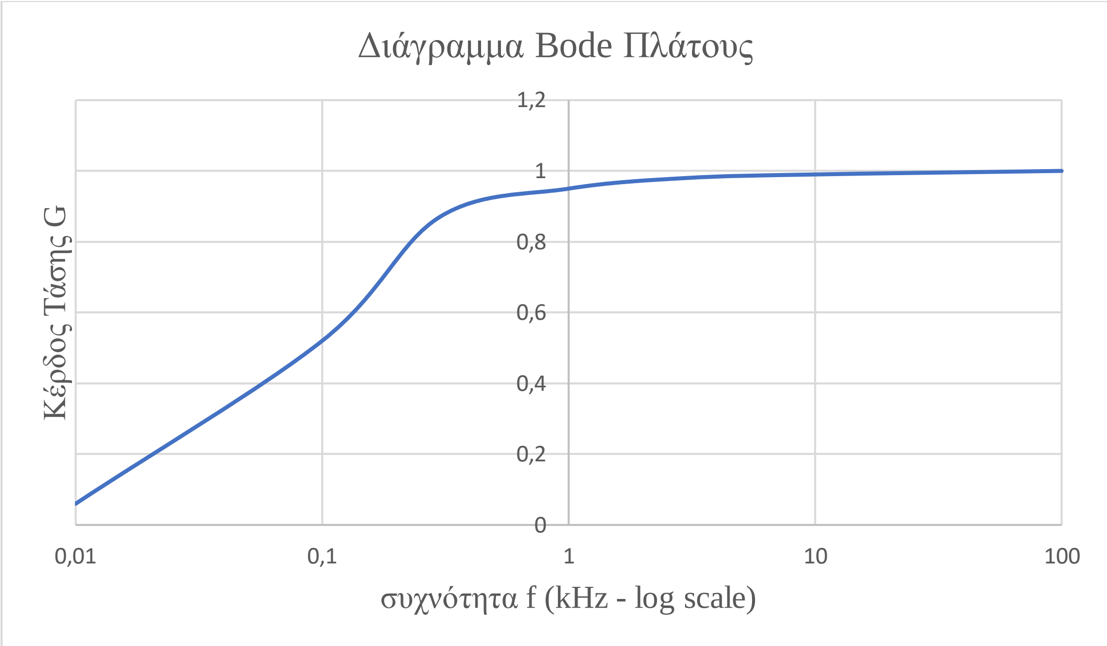


(β) Για **R = 1kΩ και C = 1μF**: fc = $\frac{1}{2*\pi*1*10^{3}1*10^{-6}}$ = 0,16 kHz

Τα κέρδη τάσης από την προσομοίωση, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα:

f (Hz)	G (Κέρδος Τάσης)
10	0,06
100	0,52
300	0,87
1000	0,95
3000	0,98
10000	0,99
100000	1

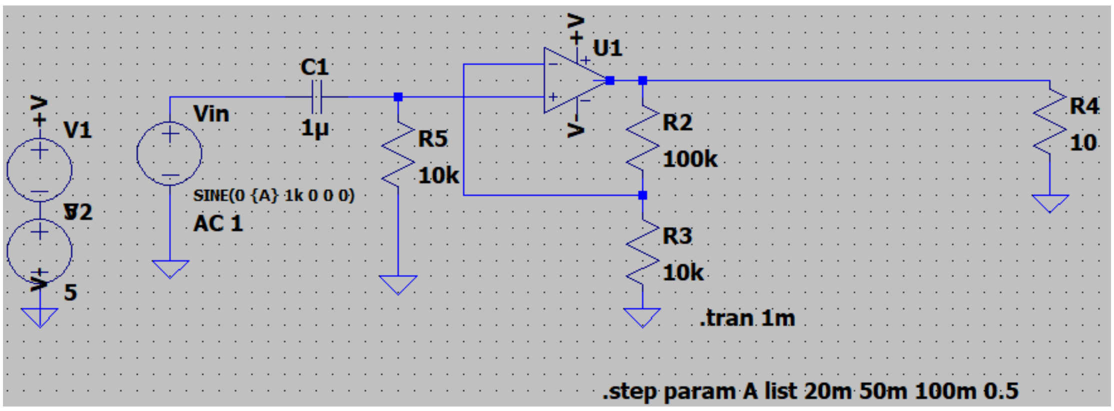
Παρακάτω, απεικονίζεται η ζητούμενη γραφική:



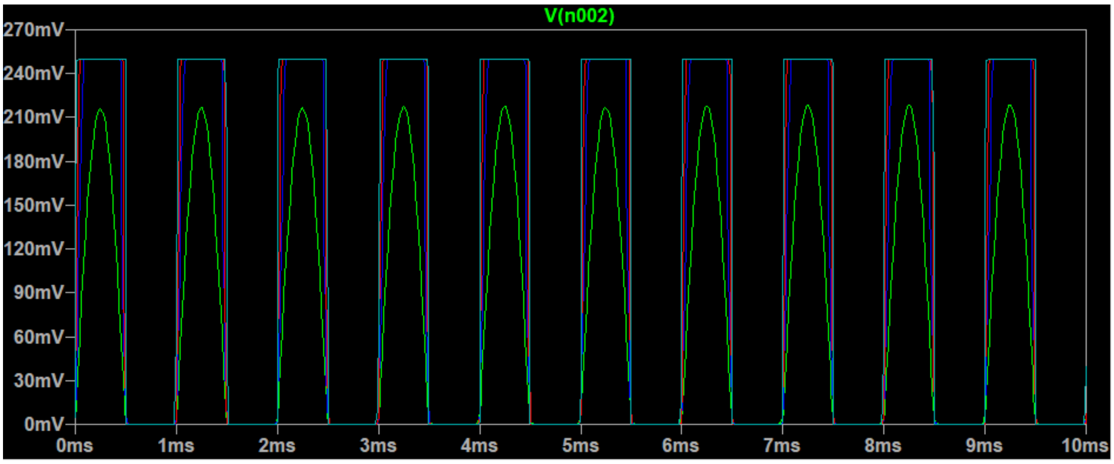
Βήμα 12-20

(α) Με χρήση ενισχυτή **UniversalOpamp 2**:

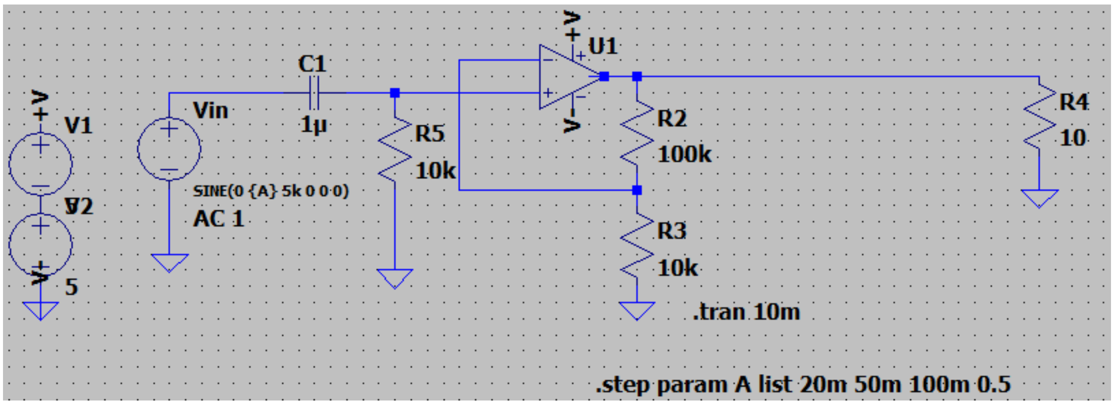
Για συχνότητα **f = 1kHZ** έχουμε τη παρακάτω προσομοίωση:



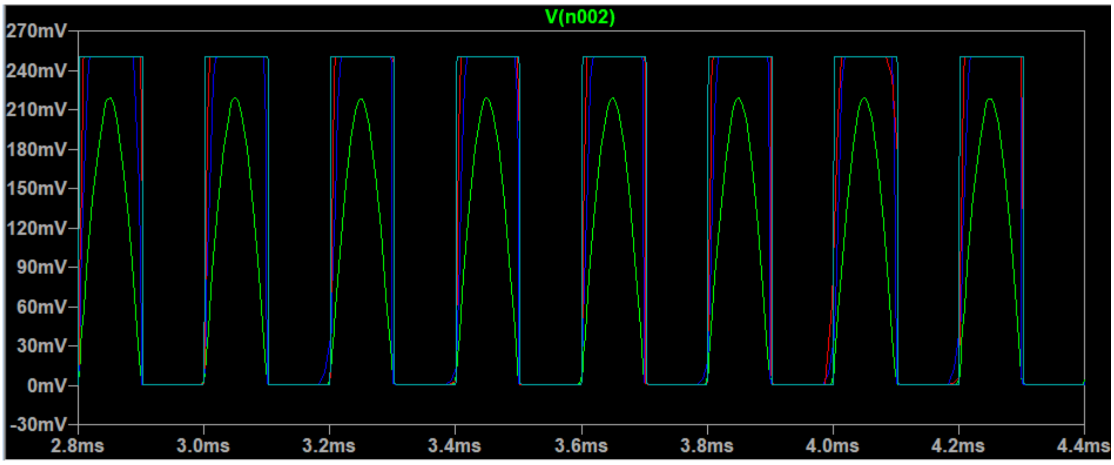
Οι γραφικές παραστάσεις της Vout συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες τιμές του πλάτους Α, είναι οι παρακάτω:



Για συχνότητα **f = 5kHZ** έχουμε τη παρακάτω προσομοίωση:

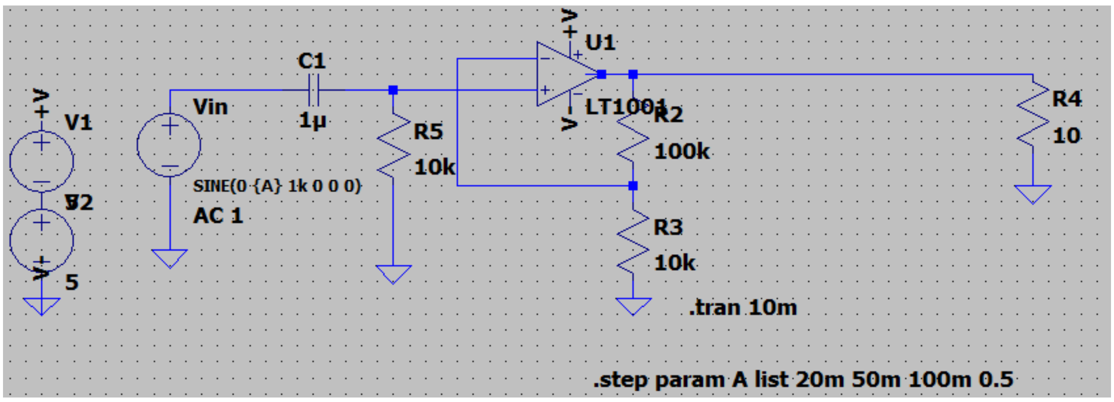


Οι γραφικές παραστάσεις της Vout συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες τιμές του πλάτους A, είναι οι παρακάτω:

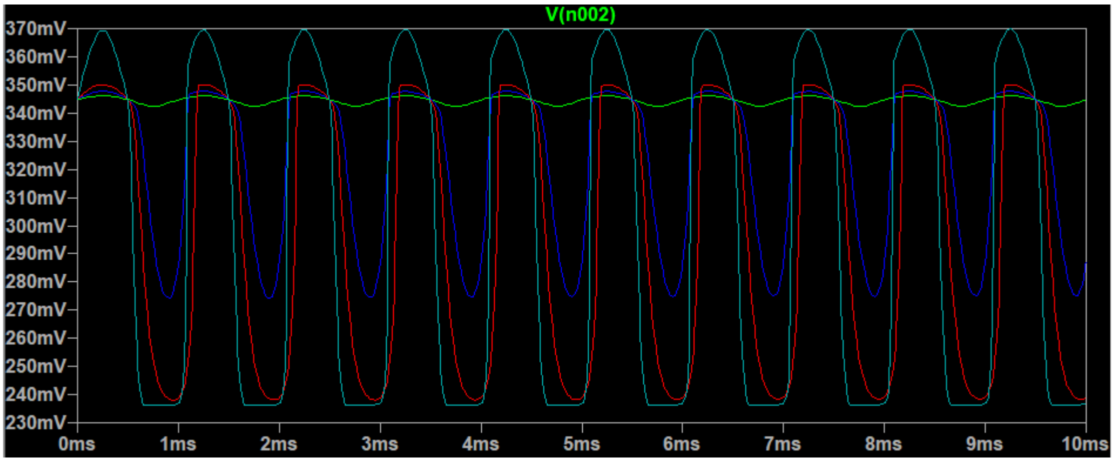


(β) Με χρήση ενισχυτή **LT1001**:

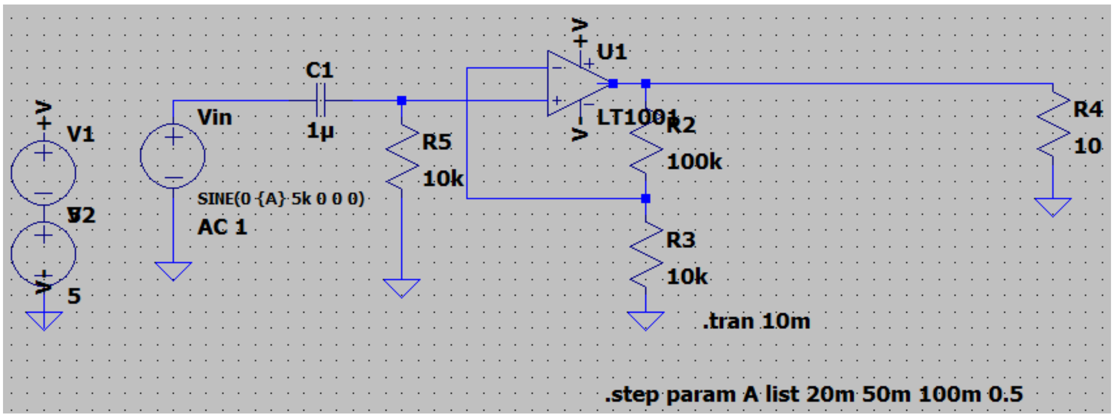
Για συχνότητα **f = 1kHZ** έχουμε τη παρακάτω προσομοίωση:



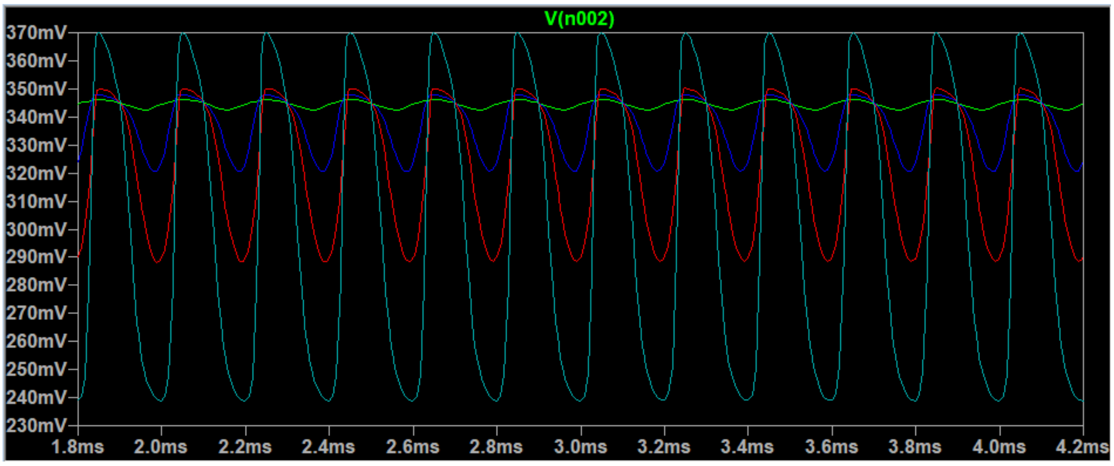
Οι γραφικές παραστάσεις της Vout συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες τιμές του πλάτους Α, είναι οι παρακάτω:



Για συχνότητα **f = 5kHZ** έχουμε τη παρακάτω προσομοίωση:



Οι γραφικές παραστάσεις της Vout συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες τιμές του πλάτους A, είναι οι παρακάτω:

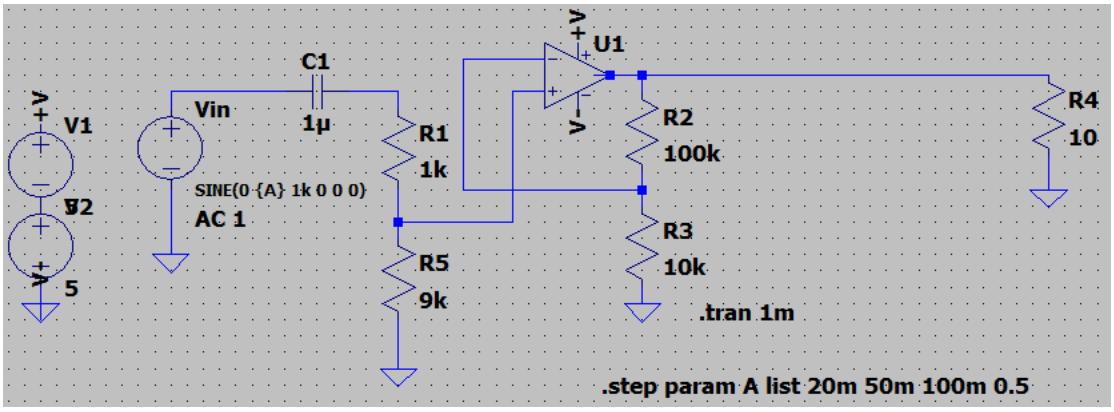


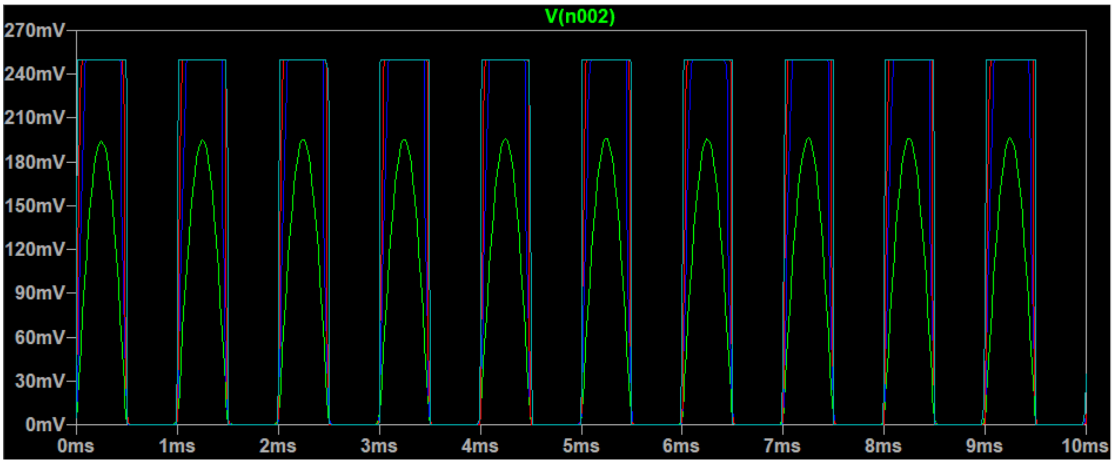
Και με τους δύο ενισχυτές των υποερωτημάτων (α) και (β), η μορφή της γραφικής δε αλλάζει με την αλλαγή της συχνότητας. Όμως, παρατηρούμε στις εκάστοτε γραφικές παραστάσεις ότι, όσο μεγαλώνει το πλάτος της τάσης εισόδου Vin, τόσο μεγαλώνει το πλάτος της τάσης εξόδου Vout μέχρι η τάση Vpp να γίνει στο (α) 250mV και στο (β) 590mV.

Στην συνέχεια, με χρήση του ενισχυτή **UniversalOpamp2**, έχουμε:

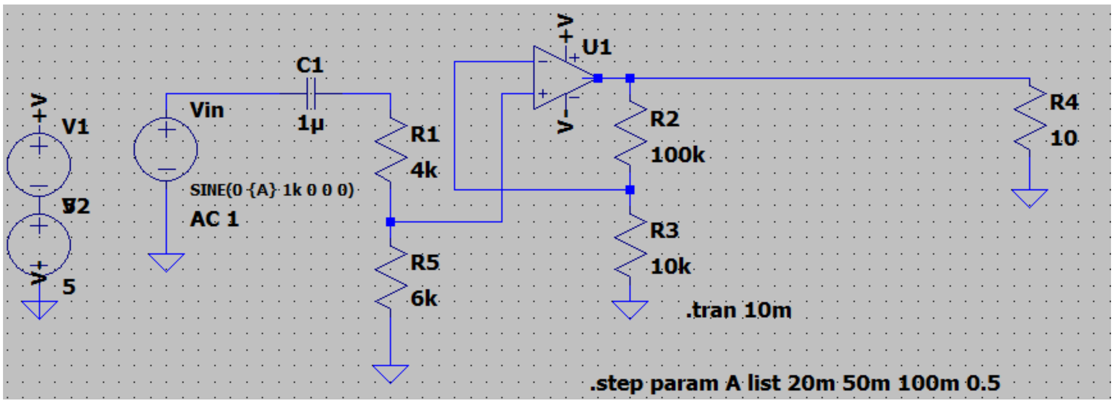
Για συχνότητα **f = 1kHZ** έχουμε τις προσομοιώσεις με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες τιμές του πλάτους A:

Για **R1 = 1kΩ**:

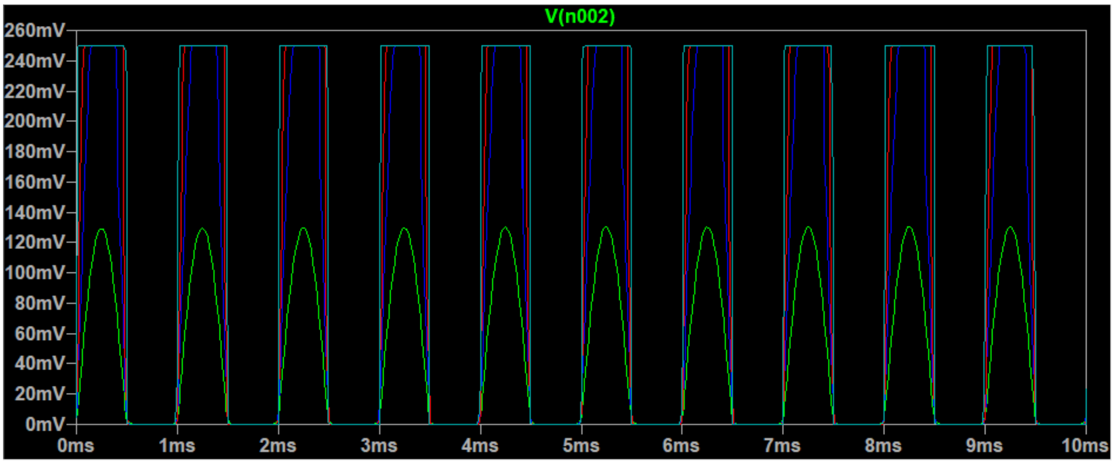




Για **R1 = 4kΩ**:

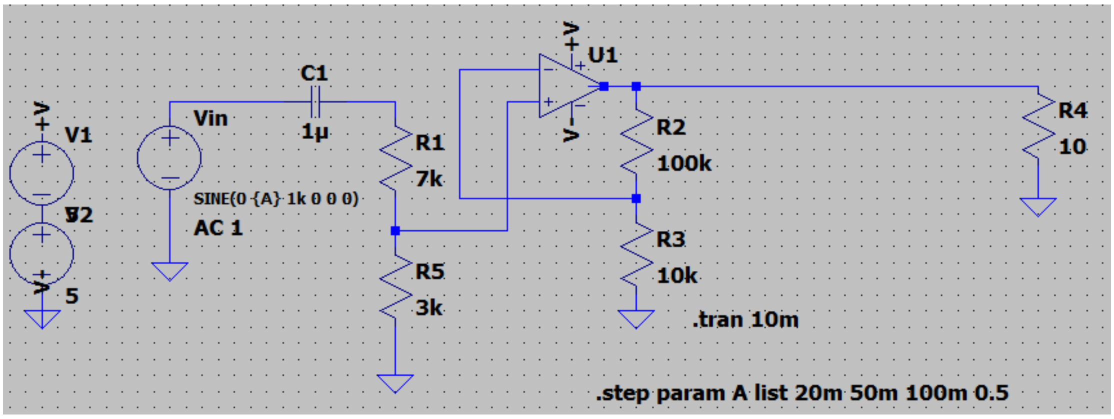


V+
V1
V2
V-
5
Vin
SINE(0 {A} 1k 0 0 0)
AC 1
C1
1µ
R1
4k
R5
6k
U1
V+
V-
R2
100k
R3
10k
R4
10
.tran 10m
.step param A list 20m 50m 100m 0.5

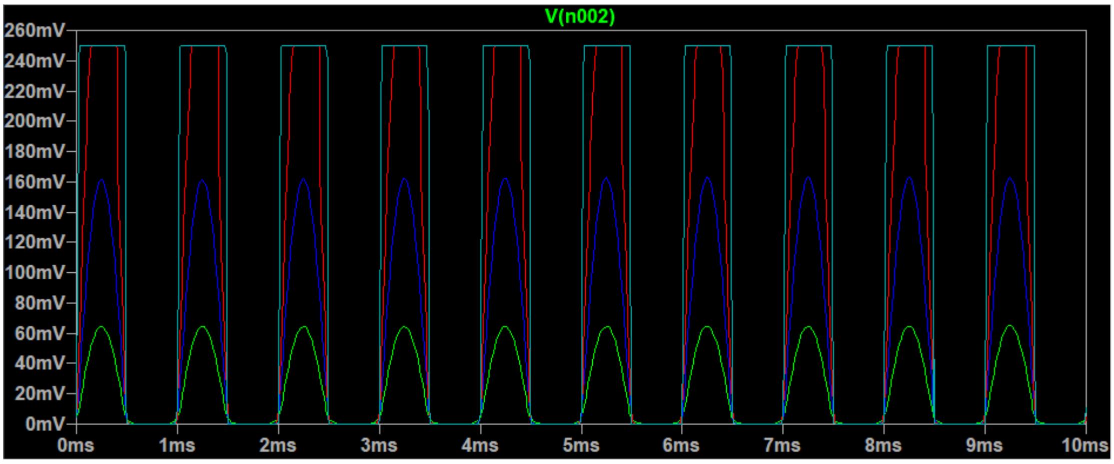


V(n002)
260mV
240mV
220mV
200mV
180mV
160mV
140mV
120mV
100mV
80mV
60mV
40mV
20mV
0mV
0ms
1ms
2ms
3ms
4ms
5ms
6ms
7ms
8ms
9ms
10ms

Για **R1 = 7kΩ**:



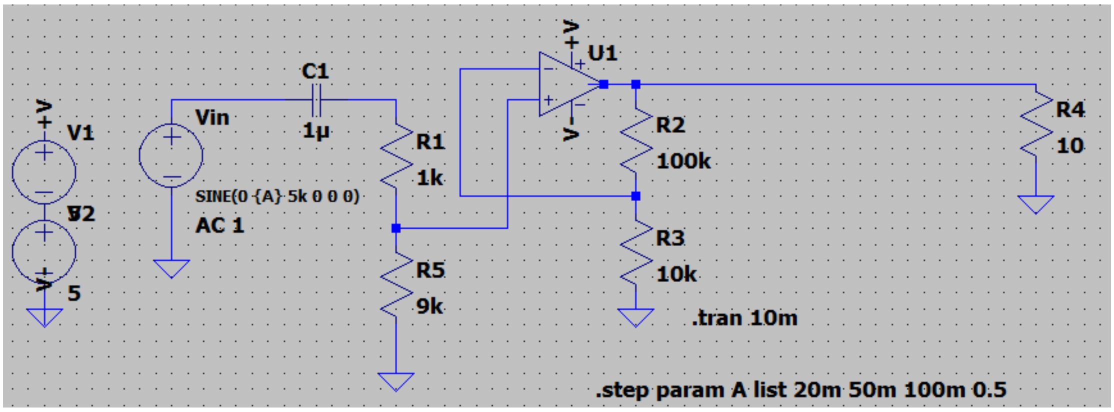
V1
V2
5
Vin
SINE(0 {A} 1k 0 0 0)
AC 1
C1
1µ
R1
7k
R5
3k
U1
R2
100k
R3
10k
R4
10
.tran 10m
.step param A list 20m 50m 100m 0.5

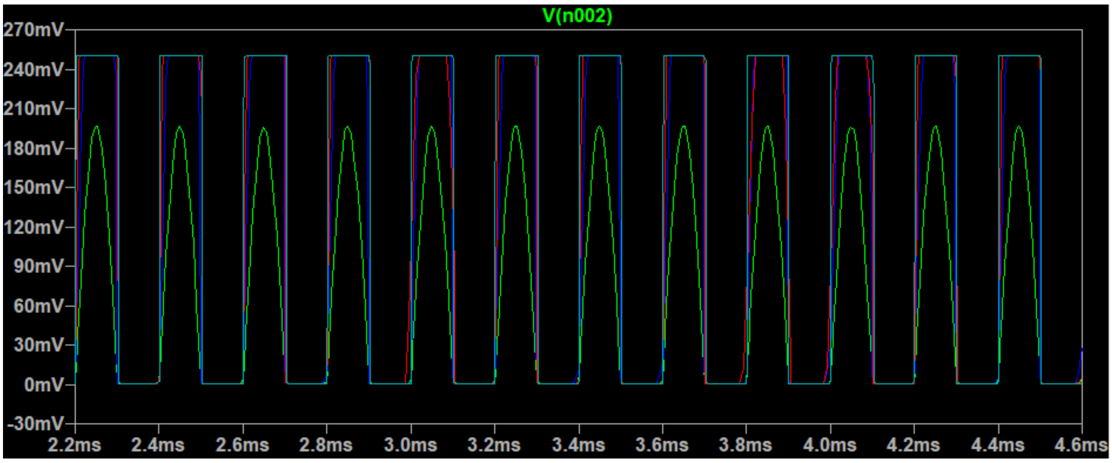


V(n002)
260mV
240mV
220mV
200mV
180mV
160mV
140mV
120mV
100mV
80mV
60mV
40mV
20mV
0mV
0ms
1ms
2ms
3ms
4ms
5ms
6ms
7ms
8ms
9ms
10ms

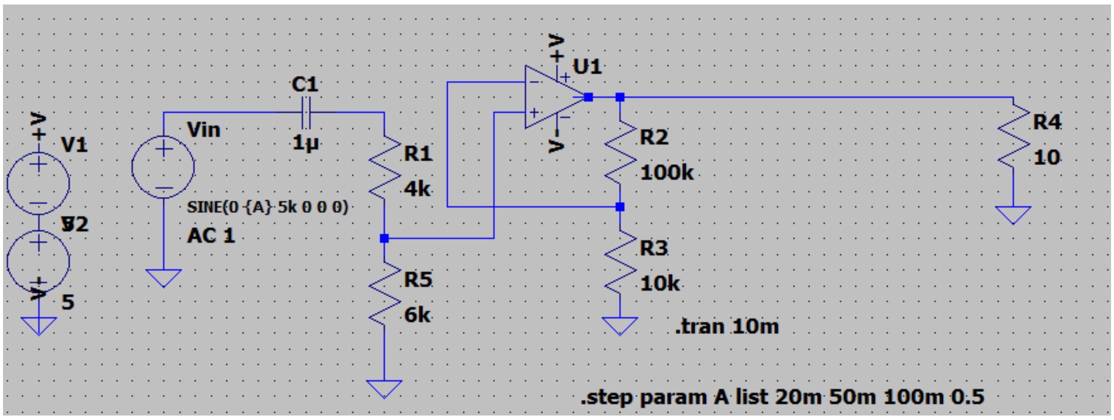
Για συχνότητα **f = 5kHZ** έχουμε τις προσομοιώσεις με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout συναρτήσει του χρόνου για τις διάφορες τιμές του πλάτους Α:

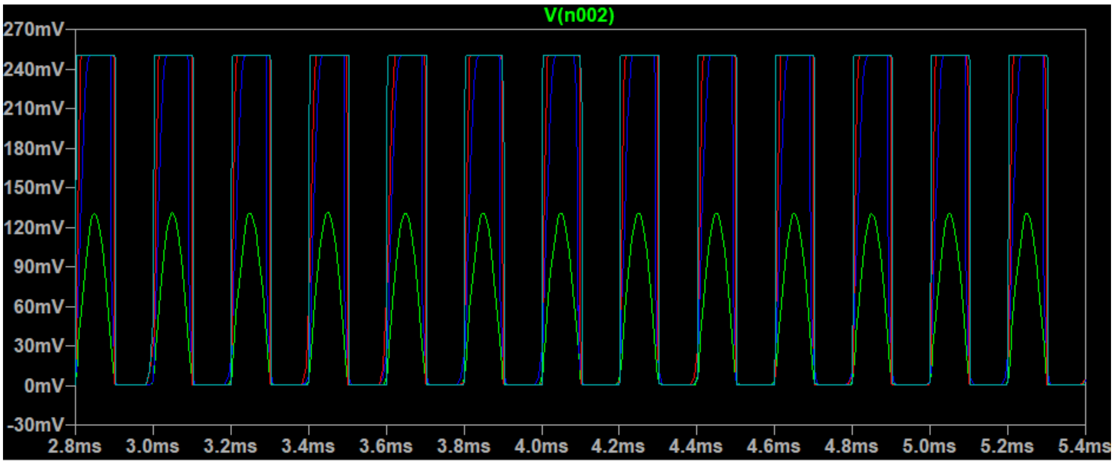
Για **R1 = 1kΩ**:



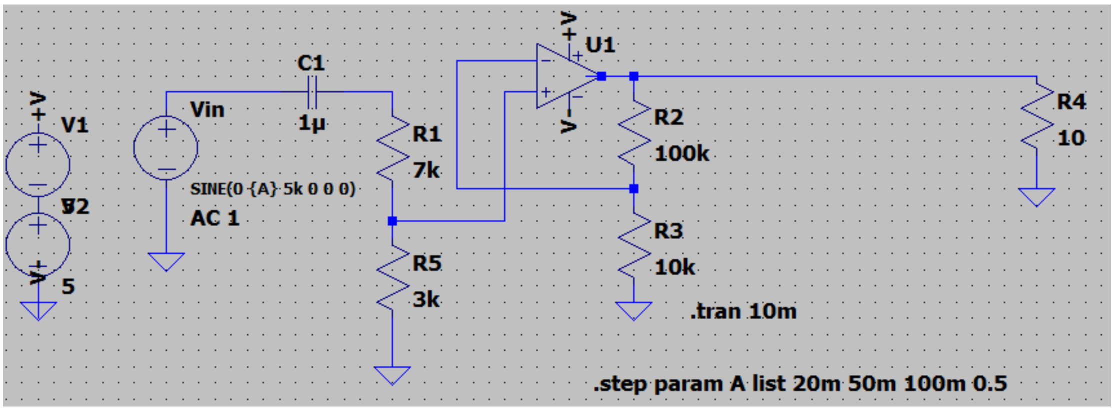


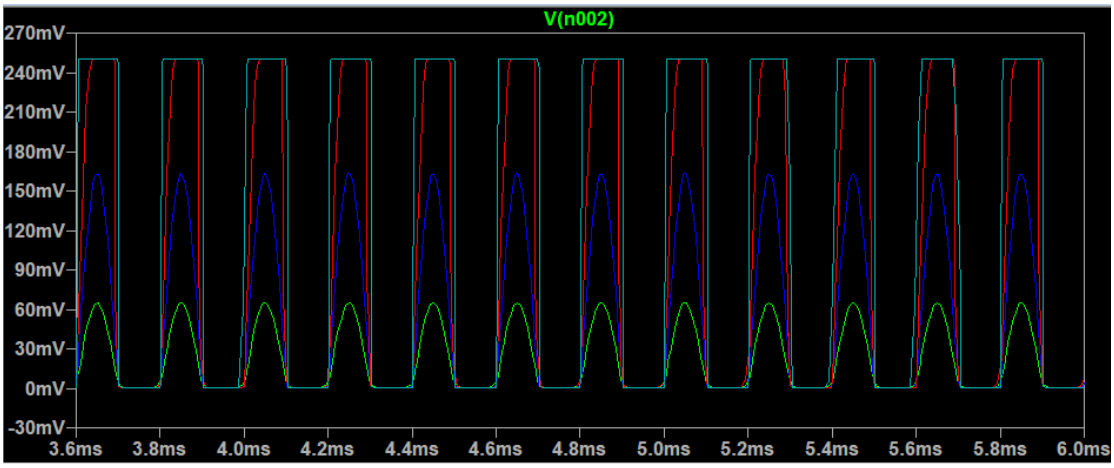
Για **R1 = 4kΩ**:


U1
C1
1µ
V1
Vin
R1
4k
R2
100k
R4
10
V2
5
SINE(0 {A} 5k 0 0 0)
AC 1
R5
6k
R3
10k
.tran 10m
.step param A list 20m 50m 100m 0.5


V(n002)
270mV
240mV
210mV
180mV
150mV
120mV
90mV
60mV
30mV
0mV
-30mV
2.8ms
3.0ms
3.2ms
3.4ms
3.6ms
3.8ms
4.0ms
4.2ms
4.4ms
4.6ms
4.8ms
5.0ms
5.2ms
5.4ms

Για **R1 = 7kΩ**:

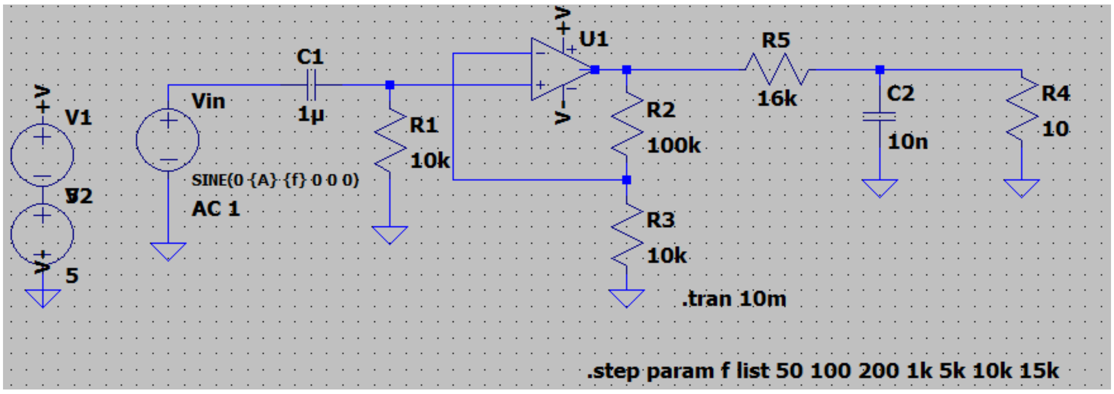




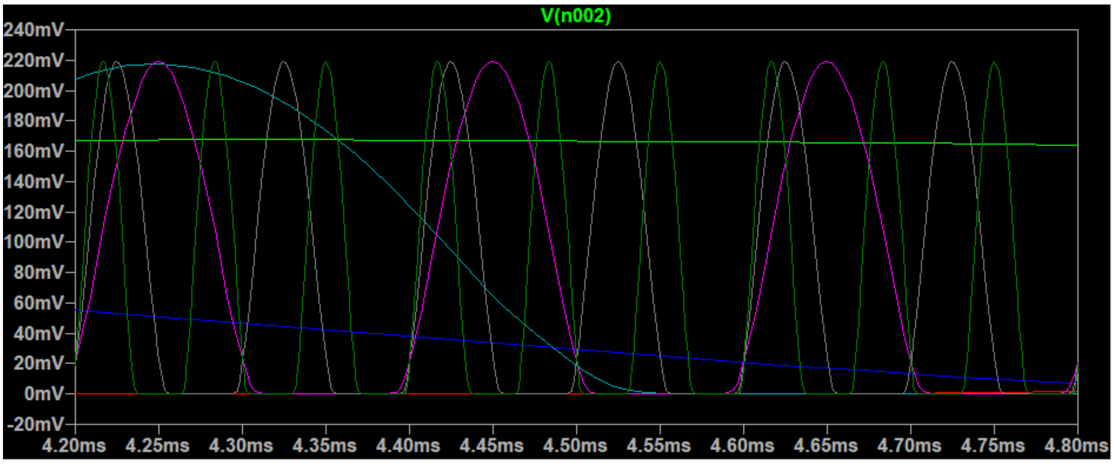
Παρατηρούμε και στις δύο συχνότητες ότι, όταν αυξάνεται η τιμή της αντίστασης R1, μειώνεται το πλάτος της τάσης εξόδου Vout, ενώ η μέγιστη Vpp είναι 250mV.

***Χαμηλοπερατό** Φίλτρο:*

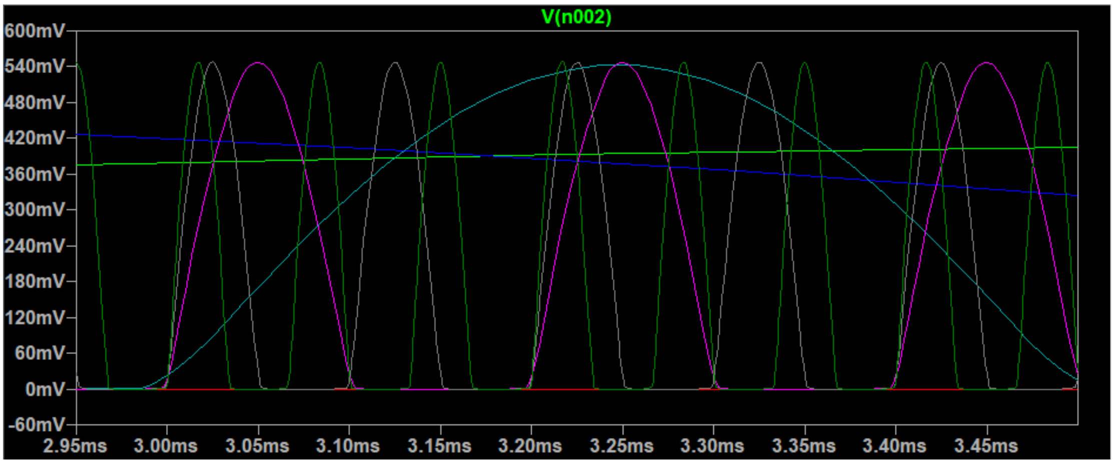
Η προσομοίωση για το επόμενο ζητούμενο κύκλωμα **με το χαμηλοπερατό φίλτρο**, είναι η εξής:



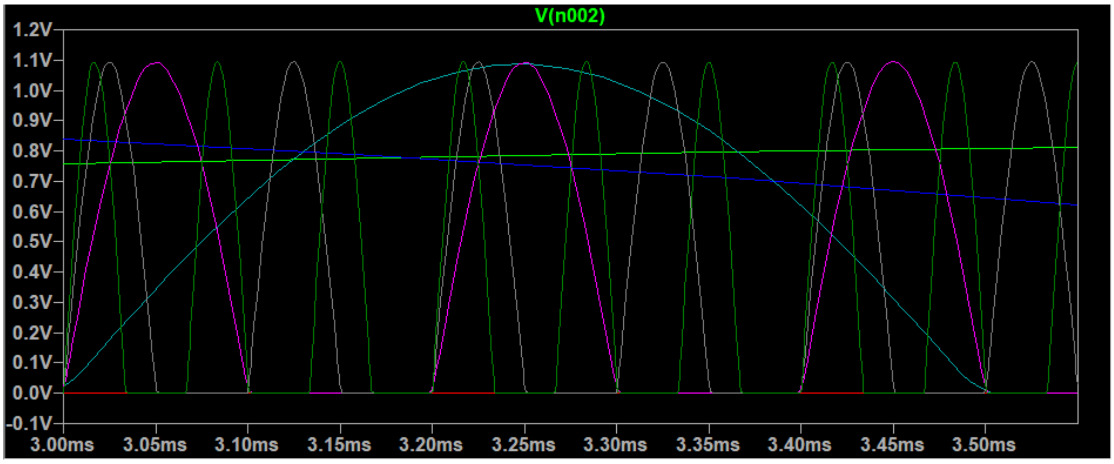
Αν το πλάτος εισόδου Α είναι ίσο με **20mV**, τότε οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, συναρτήσει του χρόνου είναι οι παρακάτω:



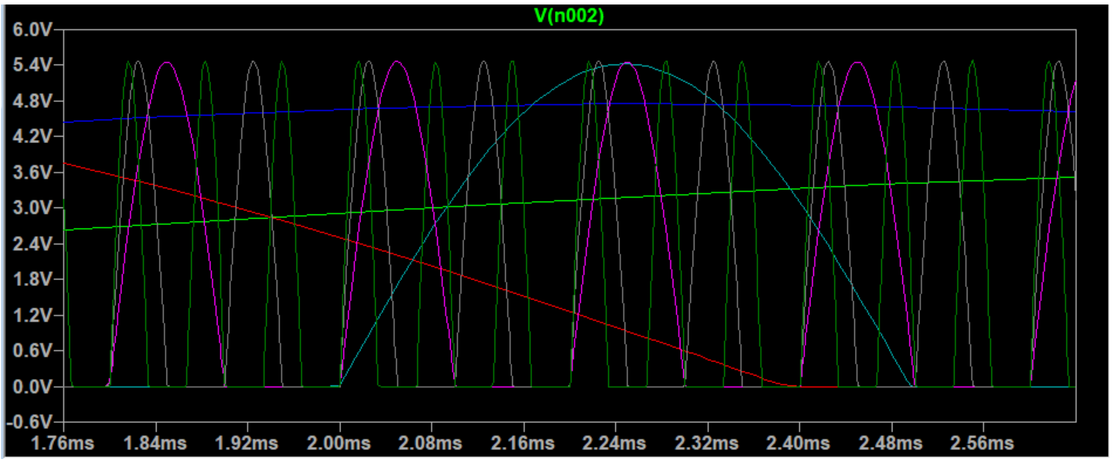
Αν το πλάτος εισόδου Α είναι ίσο με **50mV**, τότε οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, συναρτήσει του χρόνου είναι οι παρακάτω:



Αν το πλάτος εισόδου Α είναι ίσο με **100mV**, τότε οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, συναρτήσει του χρόνου είναι οι παρακάτω:



Αν το πλάτος εισόδου A είναι ίσο με **0.5V**, τότε οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, συναρτήσει του χρόνου είναι οι παρακάτω:

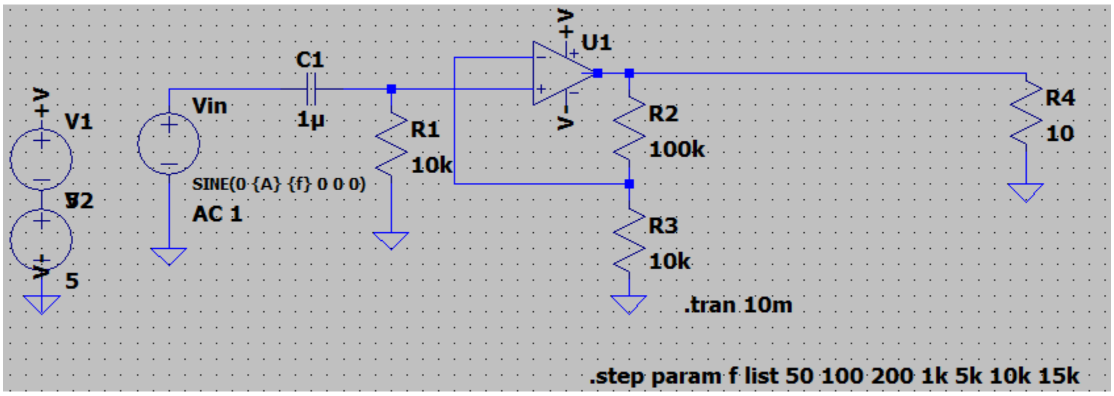


Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για ένα βαθυπερατό φίλτρο.
Γενικότερα, σε ένα βαθυπερατό φίλτρο, όταν η περίοδος του σήματος εισόδου είναι μικρή, ο πυκνωτής στην έξοδο δεν έχει αρκετό χρόνο για να φορτιστεί και να εκφορτιστεί πλήρως. Συνεπώς, η έξοδος δεν μπορεί να ακολουθήσει τις μεγάλες διακυμάνσεις του σήματος εισόδου και οι διακυμάνσεις της παραμένουν μικρές.
Όταν η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι μεγάλη, το πλάτος της εξόδου γίνεται μικρό.
Στις πολύ χαμηλές συχνότητες, η τάση στον πυκνωτή είναι σχεδόν ίση με την τάση εισόδου και ο πυκνωτής συμπεριφέρεται σχεδόν ως ανοιχτοκύκλωμα. Αντιθέτως, στις πολύ υψηλές συχνότητες η τάση στον πυκνωτή είναι σχεδόν μηδενική και ο πυκνωτής συμπεριφέρεται ως “βραχυκύκλωμα”.

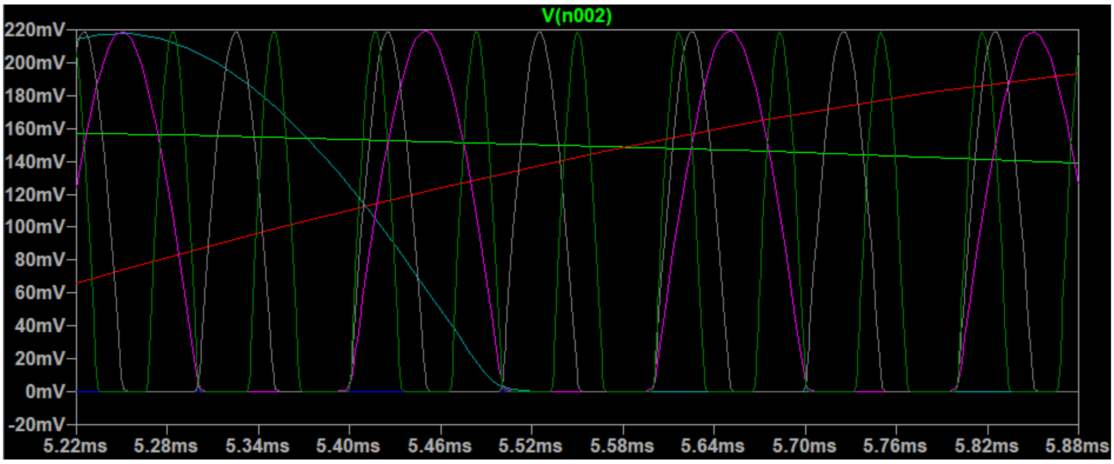
Εφόσον, λοιπόν, στο συγκεκριμένο πείραμα, αυξάνοντας τη συχνότητα εισόδου το πλάτος εξόδου **μειώνεται**, συμπεραίνουμε ότι πρόκειται για ένα βαθυπερατό φίλτρο.

Χωρίς Το Χαμηλοπερατό Φίλτρο:

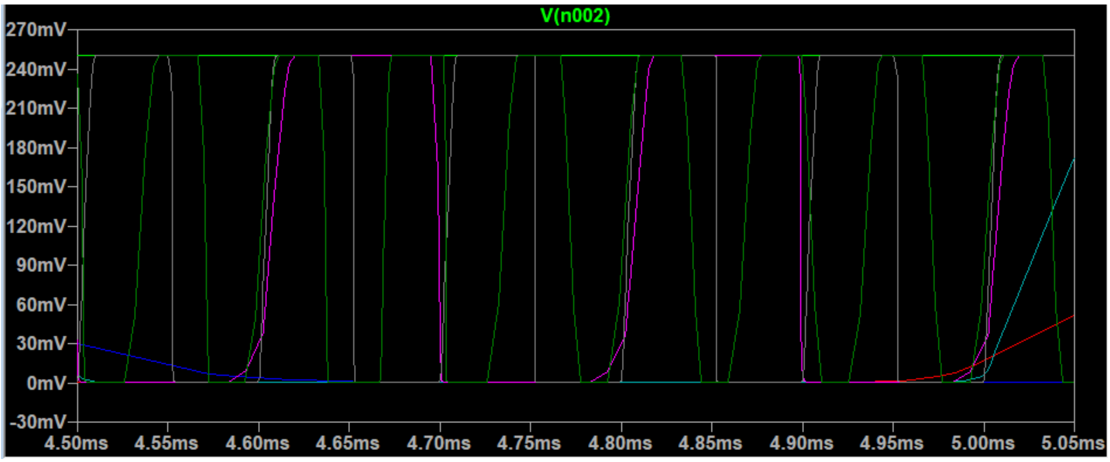
Χωρίς το χαμηλοπερατό φίλτρο, έχουμε την εξής προσομοίωση:



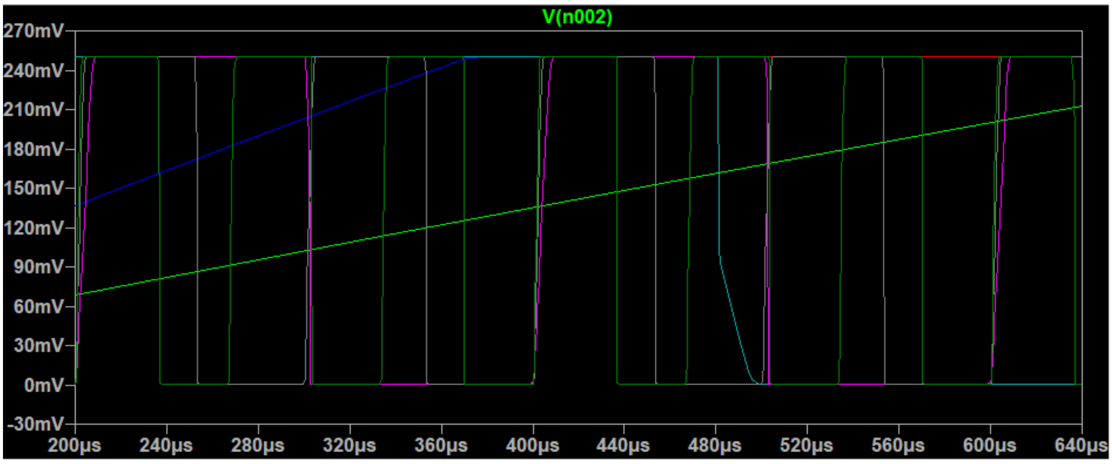
Αν το πλάτος εισόδου A είναι ίσο με **20mV**, τότε οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, συναρτήσει του χρόνου είναι οι παρακάτω:



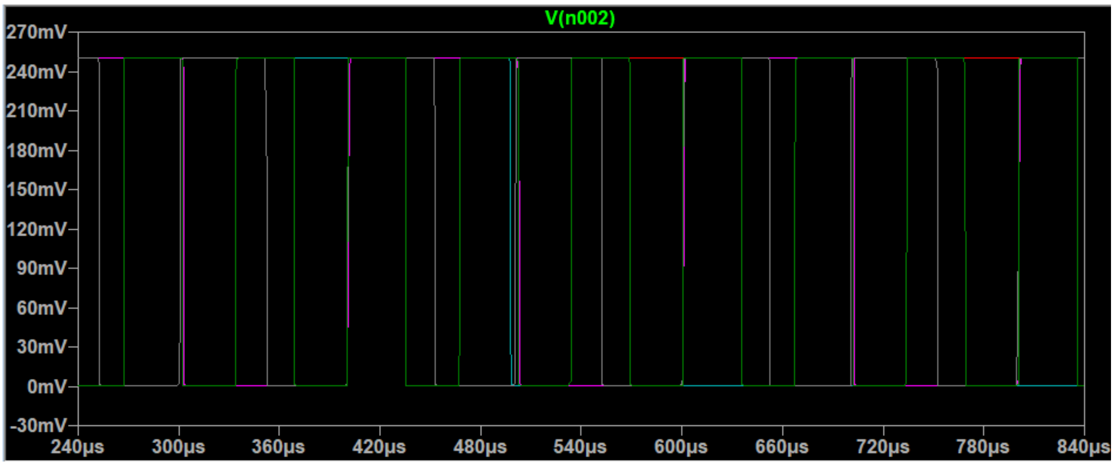
Αν το πλάτος εισόδου Α είναι ίσο με **50mV**, τότε οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, συναρτήσει του χρόνου είναι οι παρακάτω:



Αν το πλάτος εισόδου Α είναι ίσο με **100mV**, τότε οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, συναρτήσει του χρόνου είναι οι παρακάτω:



Αν το πλάτος εισόδου A είναι ίσο με **0.5 V**, τότε οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της Vout, για τις διάφορες τιμές της συχνότητας, συναρτήσει του χρόνου είναι οι παρακάτω:

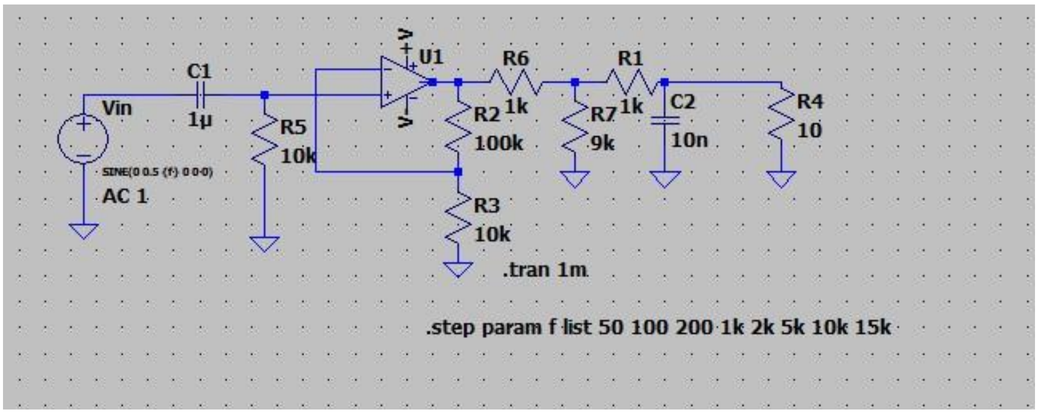


Αντίθετα με πριν, θα παρατηρήσουμε ότι, χωρίς το χαμηλοπερατό φίλτρο, αυξάνοντας τη συχνότητα εισόδου το πλάτος εξόδου αυξάνεται μέχρι η Vpp γίνει 250V.

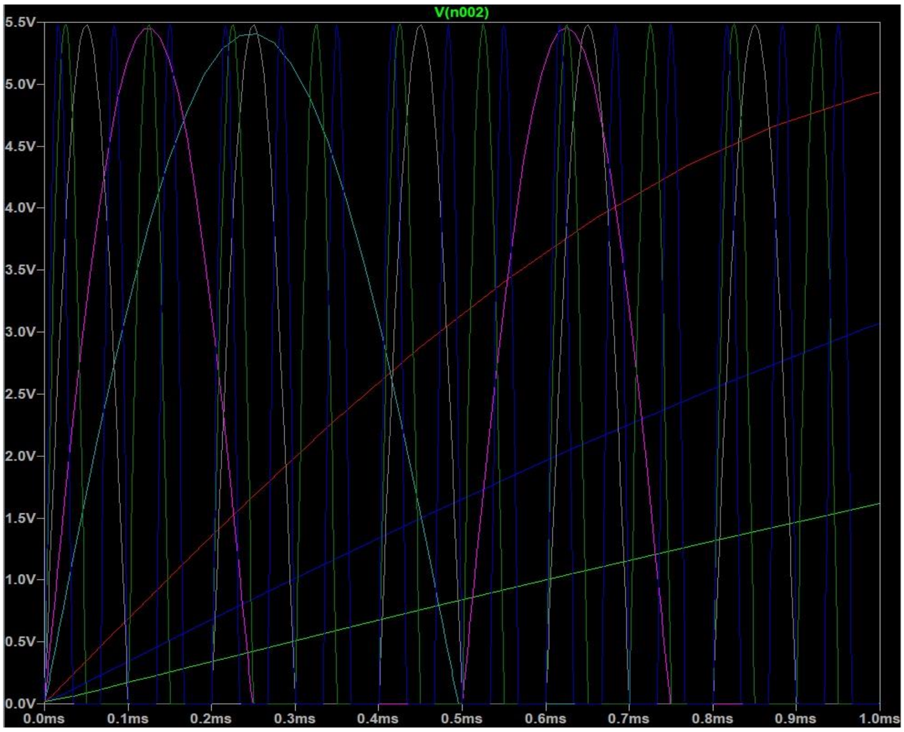
Με Μεταβλητό Χαμηλοπερατό *Φίλτρο:*

Μεταβάλλοντας την συχνότητα f, έχουμε την παρακάτω προσομοίωση:

Για **R6 = 1 kΩ και R7 = 9kΩ** :

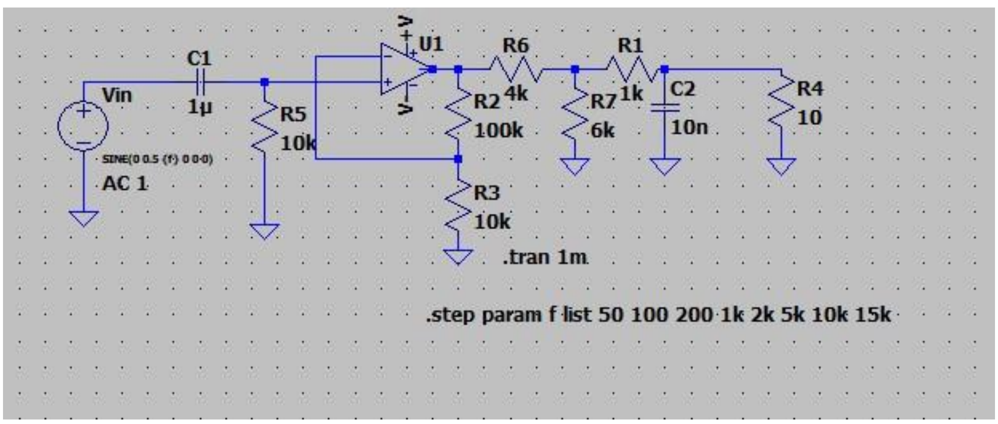


Οι γραφικές παραστάσεις της τάσης εξόδου, συναρτήσει του χρόνου είναι παρακάτω:

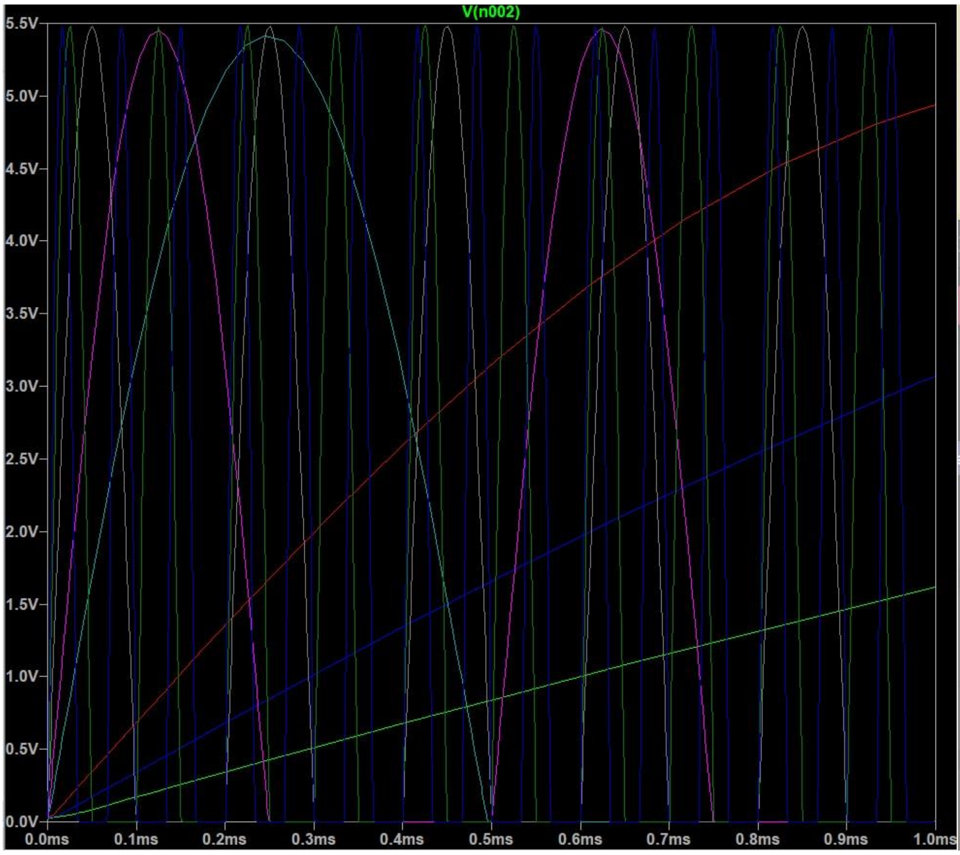


Μεταβάλλοντας την συχνότητα f, έχουμε την παρακάτω προσομοίωση:

Για **R6 = 4 kΩ και R7 = 6 kΩ** :

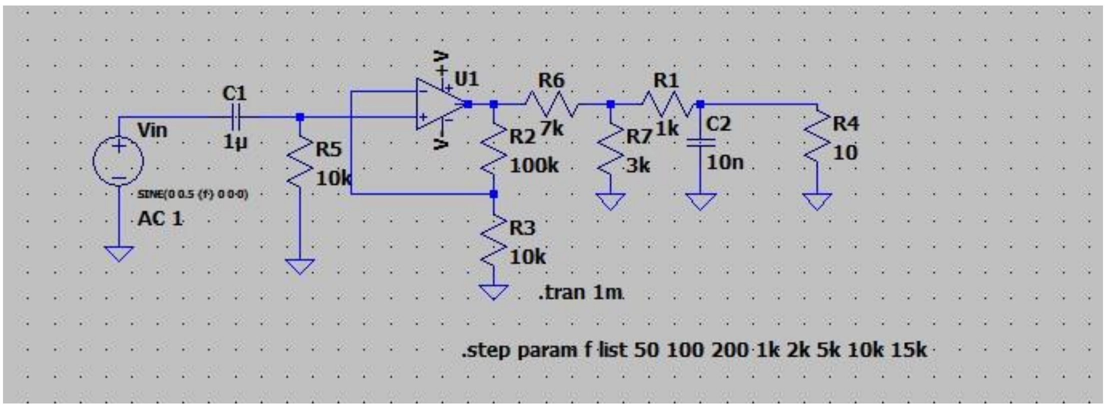


Οι γραφικές παραστάσεις της τάσης εξόδου, συναρτήσει του χρόνου, είναι οι παρακάτω:

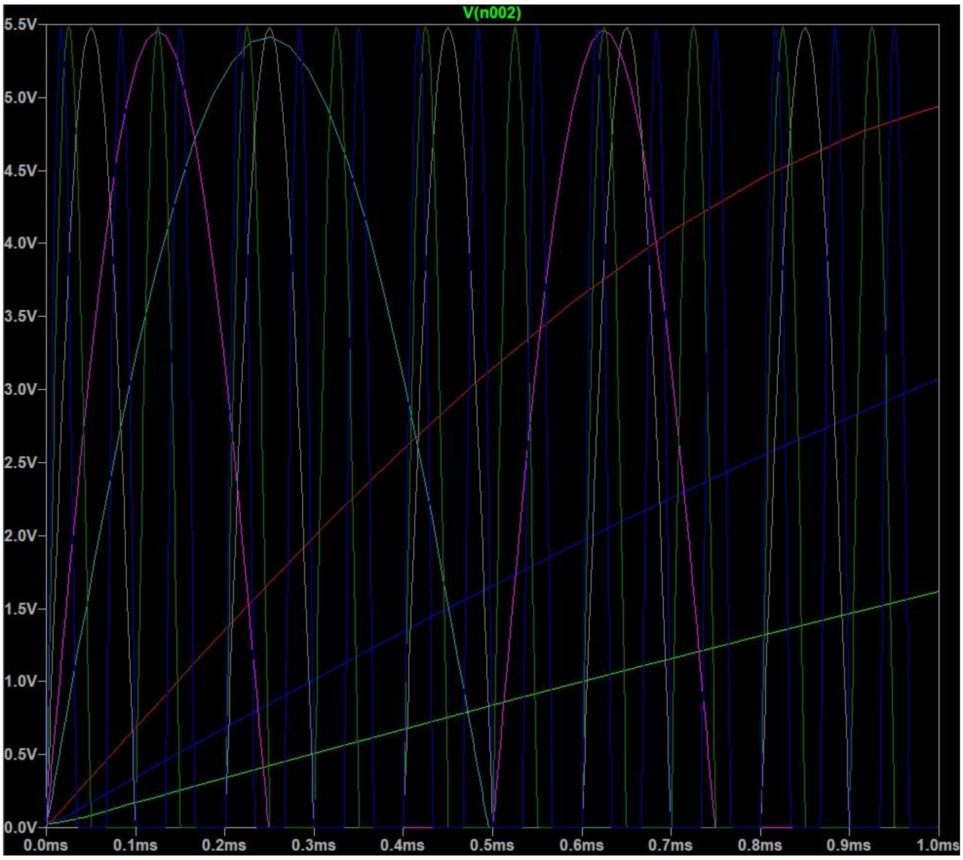


Μεταβάλλοντας την συχνότητα f, έχουμε την παρακάτω προσομοίωση:

Για **R6 = 7 kΩ και R7 = 3 kΩ** :



Οι γραφικές παραστάσεις της τάσης εξόδου, συναρτήσει του χρόνου, είναι οι παρακάτω:



Παρατηρούμε ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, οι γραφικές είναι παρόμοιες. Πρόκειται, όμως, σε κάθε περίπτωση για **μεταβλητά χαμηλοπερατό φίλτρο**, αφού στις πολύ χαμηλές συχνότητες, η τάση στον πυκνωτή είναι σχεδόν ίση με την τάση εισόδου και ο πυκνωτής συμπεριφέρεται σχεδόν ως ανοιχτοκύκλωμα. Αντιθέτως, στις πολύ υψηλές συχνότητες η τάση στον πυκνωτή είναι σχεδόν μηδενική και ο πυκνωτής συμπεριφέρεται ως "βραχυκύκλωμα". Εφόσον, λοιπόν, στο συγκεκριμένο πείραμα, αυξάνοντας τη συχνότητα εισόδου το πλάτος εξόδου **μειώνεται**, συμπεραίνουμε ότι πρόκειται για ένα βαθυπερατό φίλτρο. Αλλάζοντας , τέλος, την ρύθμιση του ποτενσιομέτρου, παρατηρούμε ότι μεταβάλλονται, έστω και λίγο, οι συχνότητες στις οποίες το πλάτος της τάσης εξόδου πλησιάζει την τάση εισόδου. Οπότε, εκτός από βαθυπερατό φίλτρο, μπορούμε να το χαρακτηρίσουμε και ως μεταβλητό.