

Διπλωματική Εργασία

**Κυκλώματα Δημιουργίας
Ηχητικών Εφέ
(Sound Effects Circuits)**

Ζάββου Μυρτώ

2015



Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Επιβλέπων Καθηγητής

Πλέσσας Φώτιος, Επίκουρος Καθηγητής

Δεύτερο μέλος επιτροπής

Σταμούλης Γεώργιος, Καθηγητής

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, **κ. Πλέσσα Φώτιο**, για την διαρκή καθοδήγηση, τις συμβουλές και τις πολύτιμες γνώσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, που μου στάθηκαν σε όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
-----------------	----------

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	4
----------------------------	----------

1.1 Σήματα και Φάσμα	4
1.2 Χρόνος, Περίοδος, Συχνότητα και Τονικότητα	5
1.3 Ημιτονοειδή Σήματα στο Πεδίο του Χρόνου	6
1.4 Σχήμα Κυματομορφής, Συμμετρία και Σχέσεις Αρμονικών	7
1.5 Συμμετρία Συνάρτησης Μεταφοράς και Αρμονικές	9
1.6 Παράδειγμα Περιττής Συμμετρίας	11
1.7 Παράδειγμα Άρτιας Συμμετρίας	12
1.8 Παράδειγμα Ούτε Άρτιας Ούτε Περιττής Συμμετρίας	13
1.9 Αρμονικές στη Θεωρία της Μουσικής	15
1.10 Βασικές Κυκλωματικές Διατάξεις	17

Κεφάλαιο 2 Κυκλώματα Παραμόρφωσης	21
--	-----------

2.1 Θεωρία της Παραμόρφωσης	21
2.2 Τεχνικές Δημιουργίας Εφέ Παραμόρφωσης	22
2.3 Ανάλυση του Κυκλώματος Παραμόρφωσης	24
2.4 Προσομοίωση του Κυκλώματος Παραμόρφωσης	26
2.5 Αποτελέσματα Εργαστηριακής Προσομοίωσης του Κυκλώματος Παραμόρφωσης	35

Κεφάλαιο 3 Κυκλώματα Αντήχησης	43
---------------------------------------	-----------

3.1 Θεωρία της Αντήχησης	43
3.1.1 Αντήχηση (Reverberation)	43
3.1.2 Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time)	44
3.1.3 Εξίσωση του Sabine	45
3.2 Τεχνικές Δημιουργίας Εφέ Αντήχησης	46
3.3 Ανάλυση του Κυκλώματος Αντήχησης	49
3.4 Αποτελέσματα Εργαστηριακής Προσομοίωσης του Κυκλώματος Αντήχησης	52

Κεφάλαιο 4	Κυκλώματα Καθυστέρησης	58
4.1	Θεωρία της Καθυστέρησης _____	58
4.1.1	Καθυστέρηση (Delay) _____	58
4.1.2	Εξέλιξη Τεχνολογίας Καθυστέρησης _____	58
4.2	Μελέτη του Κυκλώματος Καθυστέρησης _____	62
4.2.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο Κυκλώματος _____	62
4.2.2	Ανάλυση του Κυκλώματος _____	66
4.2.3	Σύγκριση Αναλογικής - Ψηφιακής Καθυστέρησης _____	69
4.3	Αποτελέσματα Εργαστηριακής Προσομοίωσης του Κυκλώματος Καθυστέρησης _____	75
Κεφάλαιο 5	Γενικά Συμπεράσματα	83
Βιβλιογραφία		84

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική έχει σαν αντικείμενο μελέτης τη δημιουργία διατάξεων εφέ ήχου. Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες των ηχητικών σημάτων και της λειτουργίας τους. Στη συνέχεια, μελετάμε τρία βασικά κυκλωματικά εφέ, την παραμόρφωση (distortion), την αντήχηση (reverb) και την καθυστέρηση (delay). Για κάθε εφέ παρουσιάζεται η θεωρία λειτουργίας του και η τεχνολογική του εξέλιξη στο πέρασμα των χρόνων. Έπειτα, μελετάμε τα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης διάταξης των κυκλωμάτων εφέ, η οποία επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να κατανοήσουμε σε μεγαλύτερο βάθος τη λειτουργία τους. Γίνεται ανάλυση των κυκλωμάτων και κάποια προσομοίωση στο ADS (Advanced Design System). Τέλος, γίνεται εργαστηριακή προσομοίωση των κυκλωμάτων, ώστε να επαληθεύσουμε τη λειτουργικότητά τους. Παράλληλα, γίνεται και ακουστική δοκιμή των κυκλωμάτων σε κιθάρα, λαμβάνοντας την έξοδο από ενισχυτή. Τα αποτελέσματα τόσο της εργαστηριακής προσομοίωσης όσο και της ακουστικής δοκιμής συλλέγονται για την εξαγωγή συμπερασμάτων και την ολοκλήρωση της μελέτης.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή^[1]

Από την οπτική γωνία ενός Ηλεκτρολόγου Μηχανικού, η κιθάρα είναι απλώς μια πηγή σήματος. Φυσικά, ένας κιθαρίστας γνωρίζει πως είναι πολλά περισσότερα από αυτό. Η κιθάρα είναι ο σύνδεσμος με τη ψυχή του κιθαρίστα. Από την άλλη, οι περισσότεροι κιθαρίστες γνωρίζουν ότι τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και την ενίσχυση του σήματος είναι κάτι παραπάνω από μια απλή συλλογή από τρανζίστορ και λυχνίες. Αυτά τα κυκλώματα και το σήμα κιθάρας είναι συνδεδεμένα με περίπλοκους και εντυπωσιακούς τρόπους. Υπάρχουν λίγοι τομείς στην Τέχνη και στη Μηχανική που συνδυάζονται με τόσο δυναμική συνεργασία.

Στην παρούσα Διπλωματική μελετάμε αυτή τη σχέση μεταξύ κυκλωμάτων και ήχου. Ένα καλοσχεδιασμένο κύκλωμα μπορεί να γίνει αφετηρία για ένα υπέροχο μουσικό αποτέλεσμα. Θα εξετάσουμε με ποιον τρόπο επηρεάζεται ο ήχος μέσα από συγκεκριμένα βασικά κυκλώματα που χρησιμοποιεί ένας κιθαρίστας. Πρώτα, όμως, θα αναλύσουμε κάποια βασικά θεωρητικά χαρακτηριστικά που έχει ο ήχος και οι κυματομορφές του.

1.1 Σήματα και Φάσμα

Τα σήματα μπορούν να εξεταστούν στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο της συχνότητας. Ένα από τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα είναι η τάση του σήματος. Στο πεδίο του χρόνου, ερευνούμε την τάση της οποίας το πλάτος είναι συνάρτηση του χρόνου $v(t)$. Για την αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιείται ο παλμογράφος.

Στο πεδίο της συχνότητας, ερευνούμε την τάση ως συνάρτηση της συχνότητας $V(f)$. Αυτή η αναπαράσταση μας δείχνει το φασματικό περιεχόμενο του σήματος. Για την αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιείται ο αναλυτής φάσματος.

1.2 Χρόνος, Περίοδος, Συχνότητα και Τονικότητα

Η συχνότητα μπορεί να οριστεί πιο αφηρημένα ως ο αριθμός των κύκλων που ολοκληρώνει ένα σήμα ανά δευτερόλεπτο. Η συχνότητα μετράται σε μονάδες Hertz (Hz).

$$f = \text{Κύκλοι/δευτερόλεπτο (Hertz, Hz)}$$

Στη μουσικολογία ο όρος *τονικότητα* υποδηλώνει τη συχνότητα, αλλά αντί να μετράται σε μονάδες Hertz, κάθε τονικότητα έχει το δικό της όνομα, όπως Λα Μείζονα, Ντο# Μείζονα, Ρε ελάσσονα κ.ά. Κάποιες συχνότητες πολύ γνωστές στη μουσικολογία είναι οι 82.4Hz (E2) και 110Hz (A2). Συνήθως, όταν εργαζόμαστε με ηχητικό εξοπλισμό χρησιμοποιούμε το 1kHz ως δοκιμαστική συχνότητα.

Τα σήματα που φαίνονται στην **Εικόνα 1.1** είναι παραδείγματα *περιοδικών σημάτων*. Η περίοδος του σήματος αναπαρίσταται με το γράμμα *T*.

Ως περίοδο ενός σήματος ορίζουμε τον χρόνο που χρειάζεται ένα σήμα ώστε να ολοκληρώσει έναν κύκλο. Στη μελέτη μας, θεωρούμε τα σήματα που εξετάζουμε ως περιοδικά.

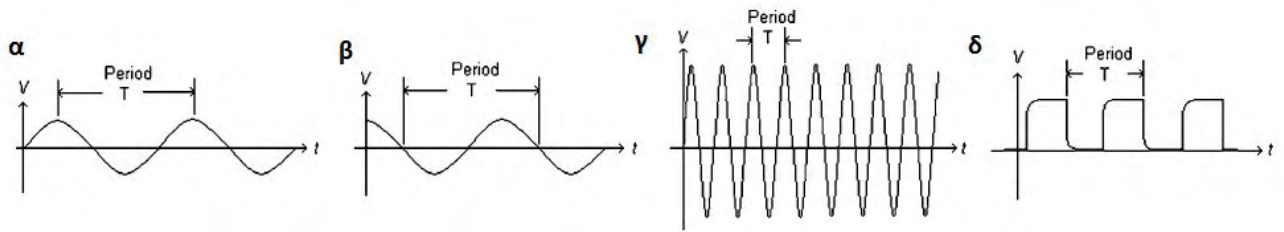
Η κυματομορφή της **Εικόνας 1.1α** είναι ένα ημιτονοειδές σήμα. Η κυματομορφή της **Εικόνας 1.1β** είναι ένα συνημιτονοειδές σήμα. Υπάρχει διαφορά φάσης 90° μεταξύ του ημιτόνου και του συνημιτόνου. Μπορούμε να πούμε ότι το ημιτονοειδές σήμα προηγείται κατά 90° σε σχέση με το συνημιτονοειδές σήμα ή ότι το συνημιτονοειδές σήμα έχει καθυστέρηση κατά 90° σε σχέση με το ημιτονοειδές σήμα. Εξαρτάται ποιο σήμα θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ως αναφορά. Στη διπλωματική αυτή, θα χρησιμοποιήσουμε ως αναφορά το ημιτονοειδές σήμα.

Η κυματομορφή στην **Εικόνα 1.1γ** είναι επίσης ένα ημιτονοειδές σήμα, αλλά έχει μεγαλύτερο πλάτος από τις υπόλοιπες κυματομορφές και μικρότερη περίοδο. Η περίοδος και η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογα ποσά. Η σχέση αυτή φαίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$f = \frac{1}{T}$$

και

$$T = \frac{1}{f}$$



Εικόνα 1.1 Παραδείγματα περιοδικών σημάτων

Η κυματομορφή στην **Εικόνα 1.1γ** έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες κυματομορφές, καθώς έχει τη μικρότερη περίοδο.

Η κυματομορφή στην **Εικόνα 1.1δ** είναι ένας τετραγωνικός παλμός με κάποια παραμόρφωση στις γωνίες. Η κυματομορφή έχει ένα DC offset, με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται ή να μεταφέρεται προς τα πάνω έτσι ώστε το πλάτος να μην πέφτει ποτέ κάτω από 0V. Για να αποκόψουμε τις DC συνιστώσες χρησιμοποιούμε πυκωντές σύζευξης.

1.3 Ημιτονοειδή Σήματα στο Πεδίο του Χρόνου

Γενικώς, ένα ημιτονοειδές σήμα τάσης δίνεται από την παρακάτω τριγωνομετρική εξίσωση:

$$v = V_p \sin(2\pi ft + \Phi)$$

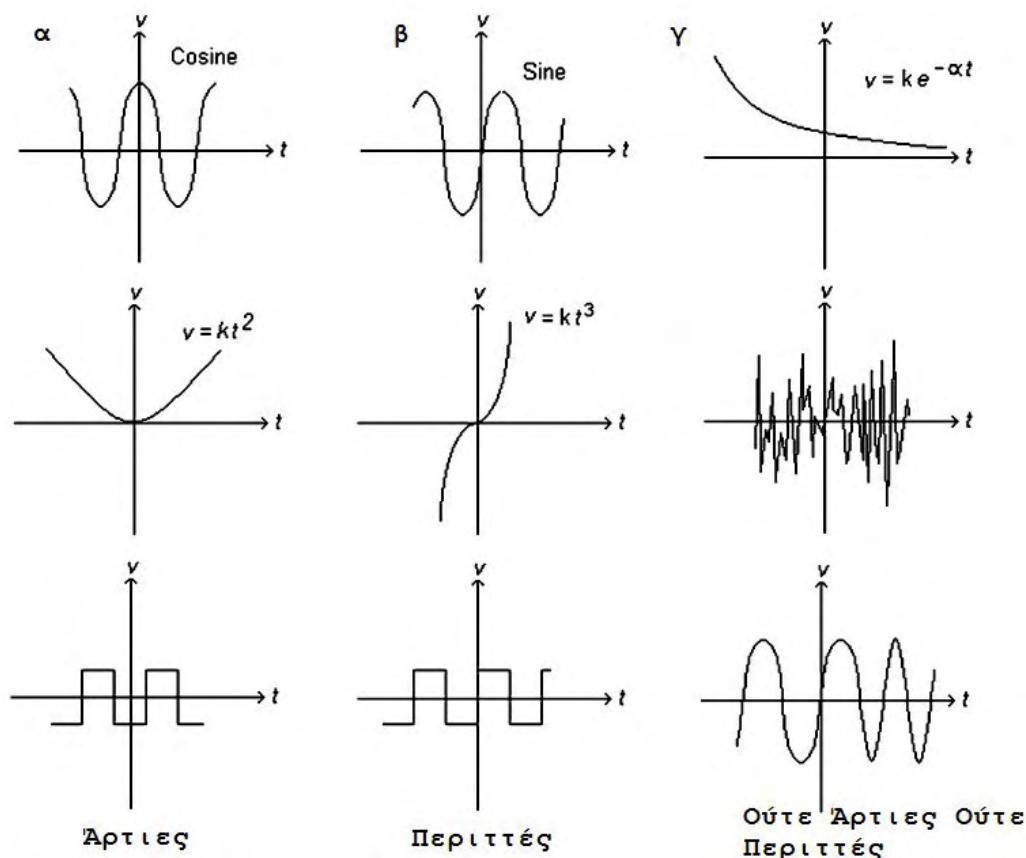
,όπου v είναι η τάση κάθε χρονική στιγμή, V_p το πλάτος του σήματος, f η συχνότητα σε Hz, t ο χρόνος σε second και Φ η φάση του σήματος. Η σταθερά 2π υποδηλώνει τα ακτίνια σε radians. Η μετατροπή της συχνότητας από Hertz σε radians γίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\omega = 2\pi f$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει μια άλλη μονάδα μέτρησης της συχνότητας από αυτή των Hertz, τα rad/s.

1.4 Σχήμα Κυματομορφής, Συμμετρία και Σχέσεις Αρμονικών

Η συνάρτηση του ημιτόνου είναι ένα παράδειγμα περιττής συνάρτησης. Η περιττή συνάρτηση είναι συμμετρική με τον εαυτό της ως προς την αρχή των αξόνων O . Μαθηματικά, η περιττή συνάρτηση υπακούει στη σχέση $v = -v(-t)$. Το συνημίτονο είναι μια άρτια συνάρτηση. Οι άρτιες συναρτήσεις είναι συμμετρικές με τον εαυτό τους ως προς τον άξονα των y . Αυτό σημαίνει ότι το αριστερό και το δεξί μέρος του σήματος είναι καθρέφτης ο ένας του άλλου. Στην **Εικόνα 1.2α,β** φαίνονται κάποια παραδείγματα περιττών και άρτιων συναρτήσεων, ενώ στην **Εικόνα 1.2γ** φαίνονται κάποιες συναρτήσεις που δεν παρουσιάζουν ούτε περιττή ούτε άρτια συμμετρία.



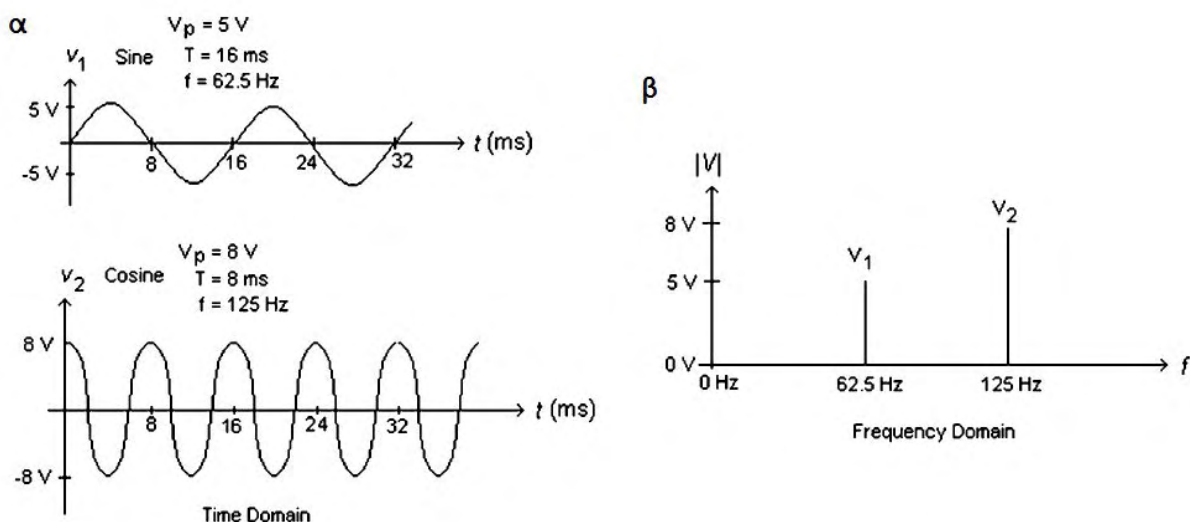
Εικόνα 1.2 Παραδείγματα άρτιας, περιττής και ούτε άρτιας ούτε περιττής συμμετρίας

Η αναπαράσταση του πεδίου συχνότητας (ή αλλιώς το φασματογράφημα) των συναρτήσεων που δεν έχουν ημιτονοειδές σχήμα αποτελείται από περισσότερες (πιθανόν, και άπειρες) συνιστώσες συχνότητας. Για παράδειγμα, ένα τετραγωνικό σήμα όπως αυτό που φαίνεται στην **Εικόνα 1.2** αποτελείται από περιττές αρμονικές της συχνότητας του αρχικού τετραγωνικού σήματος.

Αν το τετραγωνικό σήμα είναι μια άρτια συνάρτηση, οι αρμονικές θα έχουν συνημιτονοειδές σχήμα. Αν το τετραγωνικό σήμα είναι μια περιττή συνάρτηση, οι αρμονικές θα έχουν ημιτονοειδές σχήμα. Αν το τετραγωνικό σήμα είχε υποστεί ολίσθηση αριστερά ή δεξιά ώστε να μην έχει ούτε άρτια ούτε περιττή συμμετρία, το φασματογράφημα θα αποτελούσαν και πάλι από περιττές αρμονικές, οι οποίες θα ήταν ημίτονα ή συνημίτονα με διαφορετικές φάσεις.

Οι συναρτήσεις $v = kt^2$ και $v = kt^3$ είναι άρτια και περιττή αντίστοιχα (όπως φαίνεται από τους εκθέτες ή τις γραφικές τους παραστάσεις), αλλά δεν είναι περιοδικές. Οι μη περιοδικές συναρτήσεις αποτελούνται από συνεχή ημίτονα και συνημίτονα, αντί από διακριτές συνιστώσες συχνότητας.

Οι κυματομορφές που φαίνονται στην **Εικόνα 1.3α** είναι ημιτονοειδείς με πλάτη 5 και 8 V_{peak} και συχνότητες 62.5 και 125 Hz, αντίστοιχα.



Εικόνα 1.3 Σήμα ημίτονου και συνημιτόνου (**α**). Αναπαράσταση πεδίου συχνότητας (**β**).

Το φασματογράφημα συχνότητας ενός ημιτονοειδούς σήματος είναι απλώς μια ευθεία κατακόρυφη γραμμή με μηδενικό πλάτος, που ονομάζεται «ώθηση» (*impulse*). Το ύψος της «ώθησης» ισοδυναμεί με το πλάτος του ημιτονοειδούς σήματος. Η «ώθηση» τοποθετείται στην συχνότητα του ημιτονοειδούς σήματος στον άξονα των συχνοτήτων. Τα φάσματα για τα συγκεκριμένα ημιτονοειδή σήματα φαίνονται στην **Εικόνα 1.3β**.

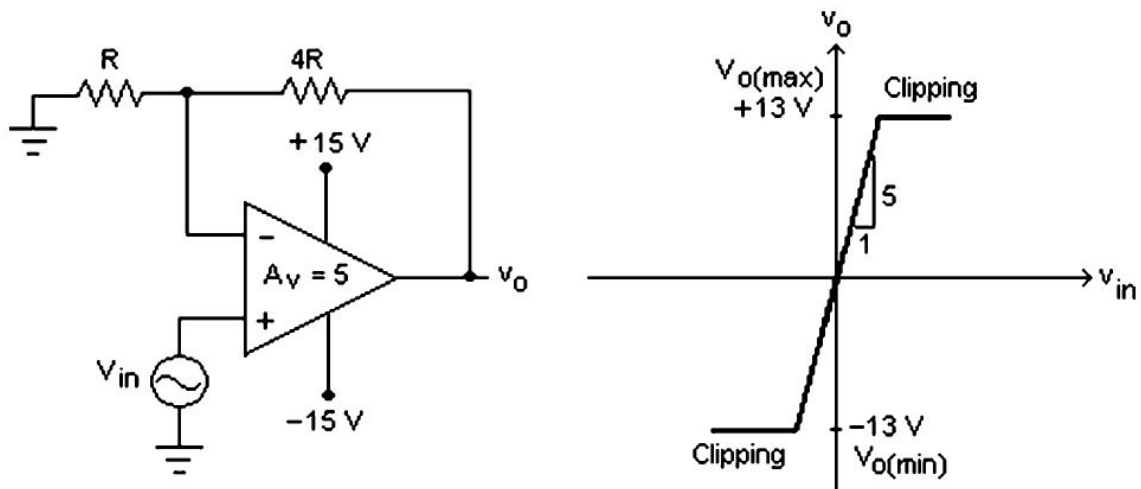
Παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση του φάσματος δεν μας δίνει καμία πληροφορία για τη σχετική φάση του σήματος εισόδου· μας δίνει πληροφορία μόνο για το πλάτος και τη φάση του σήματος. Θα πρέπει να δημιουργηθεί μια ξεχωριστή γραφική παράσταση φάσης για να λάβουμε αυτή τη πληροφορία.

1.5 Συμμετρία Συνάρτησης Μεταφοράς και Αρμονικές

Η συνάρτηση μεταφοράς είναι η σχέση (εξίσωση ή γράφημα) που περιγράφει τη σχέση εισόδου/εξόδου ενός κυκλώματος. Το γράφημα της συνάρτησης μεταφοράς μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τις αρμονικές που περιμένουμε να εμφανιστούν στο σήμα εξόδου του κυκλώματος.

Σε έναν ιδανικό ενισχυτή το κέρδος τάσης παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από τις συνθήκες που λειτουργεί ο ενισχυτής. Στην πραγματικότητα, όλοι οι ενισχυτές παρουσιάζουν κάποια στιγμή μη-γραμμική συμπεριφορά με αποτέλεσμα το κέρδος τάσης να μεταβάλλεται όταν η τάση εξόδου αλλάζει. Ένα παράδειγμα στο οποίο φαίνεται αυτό είναι όταν ο ενισχυτής "ψαλιδίζει". Όταν βρεθεί σε "ψαλιδισμό", η έξοδος δεν μπορεί να αυξηθεί παραπάνω παρά την αύξηση της τάσης εισόδου.

Η αρνητική τροφοδοσία έχει ως αποτέλεσμα ο ενισχυτής να συμπεριφέρεται περισσότερο γραμμικά. Συνεπώς, σε εφαρμογές που η γραμμική λειτουργικότητα είναι σημαντική (ενισχυτές υψηλής πιστότητας, ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης και εξοπλισμός δοκιμών, ιατρικά όργανα κ.α.) χρησιμοποιείται η αρνητική τροφοδοσία. Οι τελεστικοί ενισχυτές έχουν σχεδόν απόλυτα γραμμικές συναρτήσεις μεταφοράς μέχρι να βρεθούν σε "ψαλιδισμό", επειδή χρησιμοποιούν πολλές αρνητικές τροφοδοσίες στις περισσότερες εφαρμογές τους.



Εικόνα 1.4 Τελεστικός ενισχυτής με $A_v = 5$ και γραφική παράσταση συνάρτησης μεταφοράς

Στην **Εικόνα 1.4** φαίνεται η συνάρτηση μεταφοράς ενός τελεστικού ενισχυτή με $A_v=5$. Η κλίση της συνάρτησης μεταφοράς ισούται με το κέρδος τάσης του ενισχυτή. Στην περίπτωση αυτή ο "ψαλιδισμός" συμβαίνει στο $V_o = \pm 13\text{V}$.

Όσο ο ενισχυτής βρίσκεται στη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής μεταφοράς, η έξοδος θα είναι ακριβές αντίγραφο της εισόδου, αλλά στην κλίμακα « πλάτος : κέρδος τάσης ». Η έξοδος του γραμμικού ενισχυτή δεν περιέχει καμία συνιστώσα συχνότητας που δεν υπήρχε στο αρχικό σήμα εισόδου.

Όταν βρίσκεται στον "ψαλιδισμό", το ανώ και κατώ μέρος του σήματος εξόδου γίνεται επίπεδο, παραμορφώνοντας το σχήμα του σήματος. Αυτή είναι μια μορφή μη-γραμμικότητας, που έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν περιττές αρμονικές στην έξοδο. Υποθέτοντας ότι εφαρμόζεται ένα ημιτονοειδές σήμα εισόδου, μπορούμε να καταλάβουμε τι είδους αρμονικές εμφανίζονται στο σήμα εξόδου από τη συμμετρία της γραφικής παράστασης της συνάρτησης μεταφοράς:

Περιττή Συμμετρία Συνάρτησης Μεταφοράς

Αν η γραφική παράσταση της συνάρτησης μεταφοράς έχει περιττή συμμετρία (περιττή συνάρτηση), η έξοδος θα περιέχει μόνο περιττές αρμονικές.

Άρτια Συμμετρία Συνάρτησης Μεταφοράς

Αν η γραφική παράσταση της συνάρτησης μεταφοράς έχει άρτια συμμετρία (άρτια συνάρτηση), η έξοδος θα περιέχει μόνο άρτιες αρμονικές.

Ούτε Περιττή Ούτε Άρτια Συμμετρία Συνάρτησης Μεταφοράς

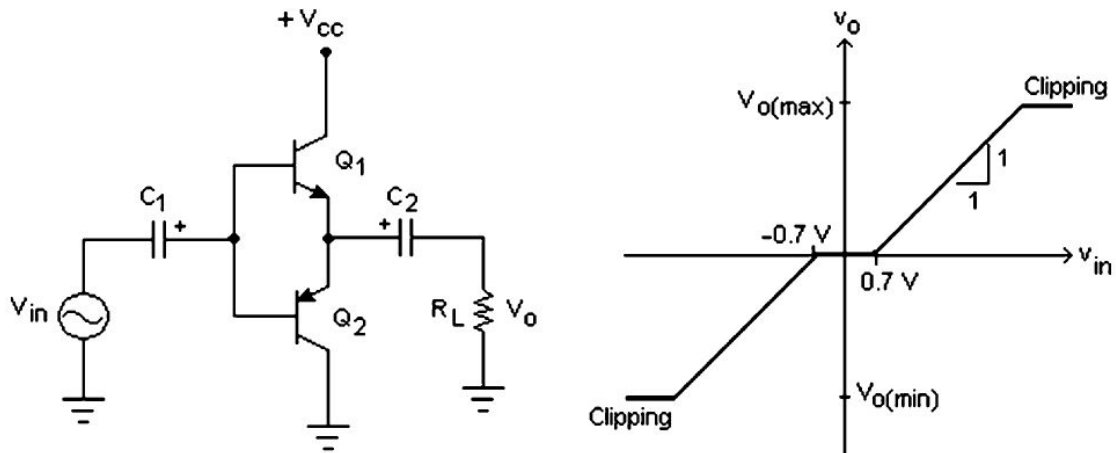
Αν η γραφική παράσταση της συνάρτησης μεταφοράς δεν έχει ούτε περιττή ούτε άρτια συμμετρία, τότε, γενικώς, η έξοδος θα περιέχει και περιττές και άρτιες αρμονικές.

1.6 Παράδειγμα Περιττής Συμμετρίας

Ο ενισχυτής Push-Pull κλάσης Β παράγει ένα σήμα εξόδου που παρουσιάζει παραμόρφωση διασταύρωσης (crossover distortion). Η παραμόρφωση διασταύρωσης δημιουργείται επειδή ο "ψαλιδισμός" συμβαίνει τη χρονική διάρκεια ανάμεσα στην αποκοπή του ενός τρανζίστορ και στο ξεκίνημα του άλλου.

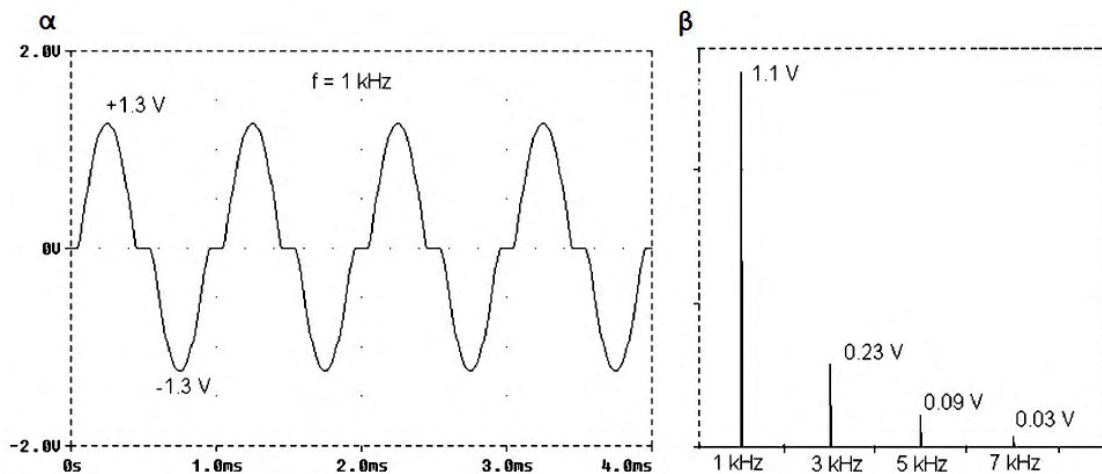
Η γραφική παράσταση της συνάρτησης μεταφοράς ενός push-pull ενισχυτή φαίνεται κατά προσέγγιση στην **Εικόνα 1.5**. Μια συνάρτηση που κατασκευάζεται συνδέοντας διαφορετικές γραμμές και καμπύλες από άκρη σε άκρη ονομάζεται τμηματική-συνεχής συνάρτηση. Η συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή push-pull είναι μια περιττή συνάρτηση, έτσι το σήμα εξόδου θα πρέπει να περιέχει μόνο περιττές αρμονικές.

Στην **Εικόνα 1.6** φαίνεται η κυματομορφή εξόδου και το φασματογράφημα του ενισχυτή της **Εικόνας 1.5**. Όπως περιμέναμε, η κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου δείχνει την παραμόρφωση διασταύρωσης και το φάσμα συχνοτήτων περιέχει μόνο περιττές αρμονικές της αρχικής συχνότητας 1kHz.



Εικόνα 1.5 Ενισχυτής push-pull, κλάσης B και γραφική παράσταση της συνάρτησης μεταφοράς του

Αν προσομοιώνουμε τον ενισχυτή σε “ψαλιδισμό”, το φασματογράφημα εξόδου θα περιείχε και πάλι μόνο αρμονικές, αλλά θα αυξάνονταν τα αντίστοιχα πλάτη τους.



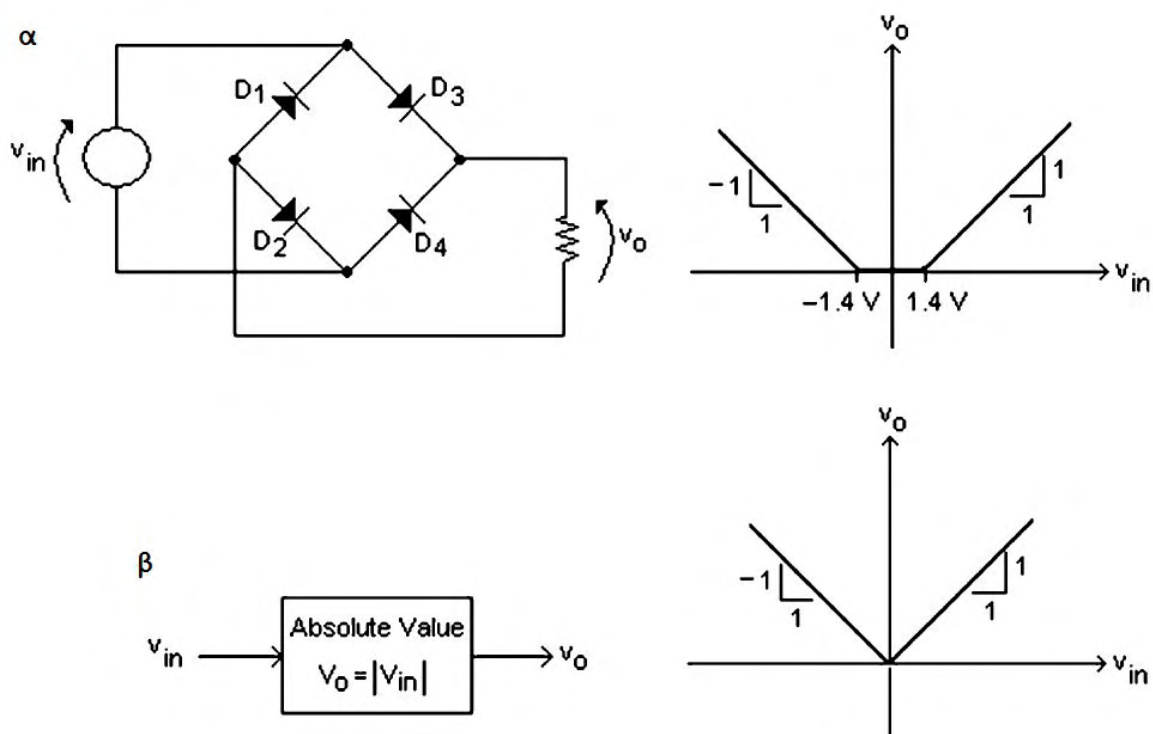
Εικόνα 1.6 Κυματομορφή με παραμόρφωση διασταύρωσης (α) . Φάσμα συχνοτήτων της κυματομορφής (β)

1.7 Παράδειγμα Άρτιας Συμμετρίας

Ένα από τα λίγα κυκλώματα που έχουν άρτια συμμετρία είναι ο ανορθωτής πλήρους κύματος. Ένας ανορθωτής πλήρους κύματος και η συνάρτηση μεταφοράς του φαίνονται στην **Εικόνα 1.7α**. Η

επίπεδη γραμμή στην αρχή των αξόνων προκαλείται από το φράγμα δυναμικού των διόδων στη γέφυρα.

Αν μπορούσαμε να εξαλείψουμε το φράγμα δυναμικού θα είχαμε έναν ιδανικό ανορθωτή πλήρους κύματος. Ένας ιδανικός ανορθωτής πλήρους κύματος παριστάνει την *συνάρτηση απόλυτης τιμής (absolute value function)*, η οποία φαίνεται στην **Εικόνα 1.7β**.



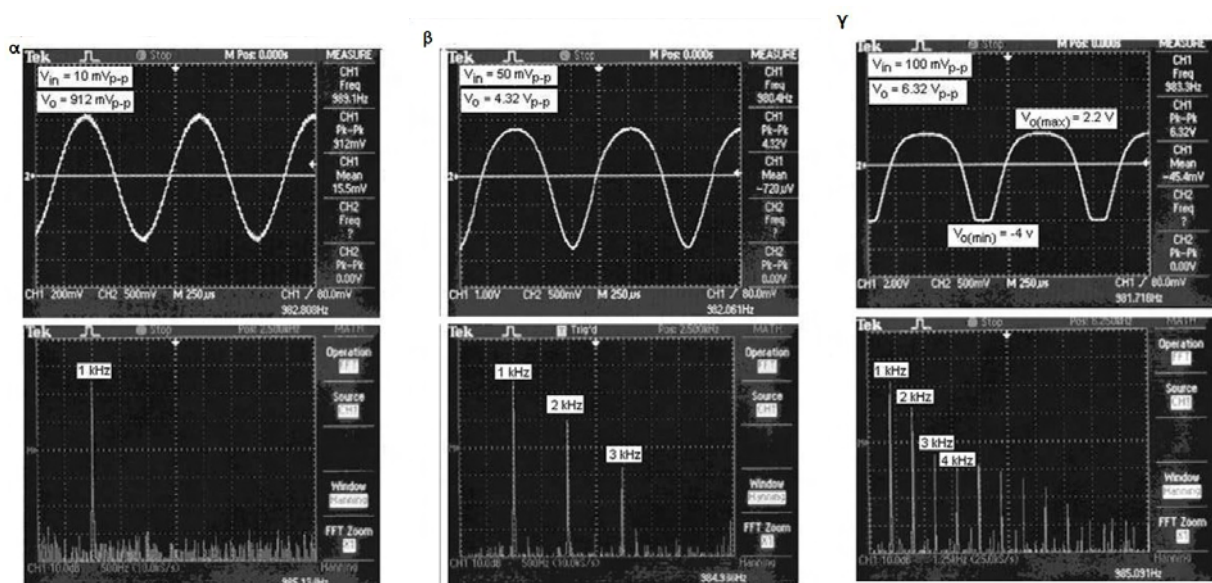
Εικόνα 1.7 Άρτια συμμετρία συναρτήσεων μεταφοράς. Ανορθωτής πλήρους κύματος (**α**). Κύκλωμα απόλυτης τιμής (**β**)

1.8 Παράδειγμα Ούτε Άρτιας Ούτε Περιττής Συμμετρίας

Η συνάρτηση συμμετρίας ενός ενισχυτή BJT A κλάσης δεν έχει ούτε άρτια ούτε περιττή συμμετρία. Το κύκλωμα και η συνάρτηση μεταφοράς του φαίνονται στην **Εικόνα 1.8**. Για μικρά σήματα (V_{in} μέσα στην κυκλωμένη περιοχή γύρω από την αρχή των αξόνων) η συνάρτηση μεταφοράς είναι κατά προσέγγιση γραμμική και ο ενισχυτής παράγει αμελητέα παραμόρφωση.

Φανταστείτε ότι εφαρμόζουμε ένα ημιτονοειδές σήμα 1kHz στον ενισχυτή. Όταν το πλάτος του σήματος εισόδου αυξάνεται, το κέρδος του ενισχυτή μεταβάλλεται. Όταν το v_{in} γίνεται θετικό, το κέρδος τάσης αυξάνεται· όταν το v_{in} γίνεται αρνητικό, το κέρδος τάσης μειώνεται. Η συμπεριφορά του τρανζίστορ είναι εκθετική, αλλά καθώς η μη-γραμμικότητα αρχίζει να γίνεται σημαντική, το κέρδος τάσης αρχίζει να γίνεται κατά προσέγγιση ανάλογο του v_{in}^2 (άρτια συνάρτηση). Έτσι, αρχικά, αρχίζει να εμφανίζεται η δεύτερη αρμονική (2kHz).

Καθώς η μη-γραμμικότητα αυξάνεται, εμφανίζονται και άρτιες και περιττές αρμονικές εξαιτίας της εκθετικής συμπεριφοράς του τρανζίστορ, που δεν έχει ούτε άρτια ούτε περιττή συμμετρία. Όταν βρίσκεται σε "ψαλιδισμό", αρχικά, αυξάνεται το πλάτος των περιττών αρμονικών. Οι χαρακτηριστικές αυτές φαίνονται στην **Εικόνα 1.9**.



Εικόνα 1.9 Η μη-γραμμικότητα του κέρδους ενισχυτή παραμορφώνει το v_o και δημιουργεί αρμονική παραμόρφωση

1.9 Αρμονικές στη Θεωρία της Μουσικής [2]

Στη μουσική δεν χρειάζεται να ξέρουμε ποιες συχνότητες αντιστοιχούν σε ποιες νότες στο πιάνο ή στην κιθάρα. Μια γνωστή συχνότητα που συνήθως γνωρίζουν ακόμα και οι μουσικοί είναι η νότα "Λα" στα 440 Hz. Η ηχητική απόσταση ανάμεσα στον πρώτο και τον τελευταίο ήχο/νότα μιας οκτάφθογγης κλίμακας, ονομάζεται **οκτάβα**. Στη δυτική μουσική, το μικρότερο δομικό υλικό χτισίματος της μουσικής, η μικρότερη ηχητική απόσταση που μπορεί να έχουν δύο νότες μεταξύ τους, είναι το **Ημιτόνιο** [3]. Η οκτάβα προκύπτει από το διπλασιασμό της συχνότητας της νότας από την οποία ξεκινάει. Για παράδειγμα, μια οκτάβα πάνω από τη νότα "Λα" στα 440Hz υπολογίζεται διπλασιάζοντας τη συχνότητά της, δηλαδή προκύπτει η "Λα" στα 880Hz. Μια οκτάβα κάτω από τη "Λα" στα 440Hz βρίσκεται η "Λα" στα 220Hz.

Στη δυτική μουσική κλίμακα όλες οι νότες απέχουν ίσα διαστήματα μεταξύ τους. Μία οκτάβα περιέχει **12 ημιτόνια**, χρειάζονται δηλαδή 12 ηχητικά βήματα για να καλύψουμε την απόσταση αυτή. Κάθε νότα είναι κατά ένα μικρό κλάσμα ψηλότερη από την προηγούμενη νότα. Έτσι, αν πάρουμε οποιαδήποτε νότα και την πολλαπλασιάσουμε με αυτό το κλάσμα ακριβώς δώδεκα φορές, θα πάρουμε έναν αριθμό που θα είναι το διπλάσιο της νότας από την οποία ξεκινήσαμε. Με άλλα λόγια, θα βρισκόμαστε μια οκτάβα πάνω από την νότα που ξεκινήσαμε. Το κλάσμα αυτό είναι η 12η ρίζα του δύο ($\sqrt[12]{2}$) και ισούται με 1.059463. Ένας άλλος τρόπος να το υπολογίσουμε είναι ότι η συχνότητα κάθε νότας είναι 5.9463% ψηλότερη από την προηγούμενη νότα.

Κάποια ζεύγη νοτών ακούγονται καλύτερα από κάποια άλλα, ανάλογα με το διάστημα που απέχουν μεταξύ τους. Αυτά τα "διαστήματα", έχουν ειδικές ονομασίες. Τα "διαστήματα" που ακούγονται καλύτερα έχουν πιο απλές αναλογίες συχνοτήτων (frequency ratio). Για παράδειγμα, το διάστημα "Μι" (82.4Hz) - "Λα" (110Hz) έχει αναλογία 110/82.4 που ισοδυναμεί με 4/3. Το διάστημα αυτό ονομάζεται "τέταρτη καθαρή". Επίσης, το διάστημα "Μι" (82.4Hz) - "Σι" (123.5Hz) έχει αναλογία 123.5/82.4 που ισοδυναμεί με 3/2. Το διάστημα αυτό ονομάζεται "πέμπτη καθαρή". Η επόμενη οκτάβα από το "Μι" (82.4Hz) στο "Μι" (164.8Hz) έχει αναλογία 164.8/82.4 που ισοδυναμεί με 2/1.

Συνεπώς, τα πιο εύηχα διαστήματα νοτών σχηματίζουν απλά κλάσματα συχνοτήτων (frequency-ratio-wise).

Οι αρμονικές μιας νότας είναι ένας αριθμός από πολλαπλάσια της συχνότητάς της. Οι άρτιες αρμονικές είναι νότες με διπλάσια (τετραπλάσια, εξαπλάσια κ.ο.κ) συχνότητα της αρχικής. Οι περιττές αρμονικές είναι νότες με τριπλάσια (πενταπλάσια, εφταπλάσια κ.ο.κ) συχνότητα της αρχικής.

Η δημιουργία νέων συνιστωσών συχνότητας στην έξοδο που είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας εισόδου ονομάζεται *αρμονική παραμόρφωση* (*harmonic balance*). Ο όρος "αρμονική" χρησιμοποιείται επειδή η νέες συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια του αρχικού σήματος εισόδου.

Για παράδειγμα, αν έχουμε βασική συχνότητα το 1kHz οι περιττές αρμονικές που εμφανίζονται είναι στα 3kHz, 5kHz και 7kHz. Τα 3kHz είναι μία οκτάβα πάνω από το 1kHz συν μια "τέλεια πέμπτη". Τα 5kHz είναι δύο οκτάβες πάνω από το 1kHz συν μια "τέλεια τρίτη". Τα 7kHz δεν αντιστοιχούν σε κάποιο διάστημα, πέφτουν ακριβώς ανάμεσα. Ακούγονται άσχημα, αλλά είναι σε πολύ χαμηλό επίπεδο σε σχέση με τις δύο πρώτες αρμονικές.

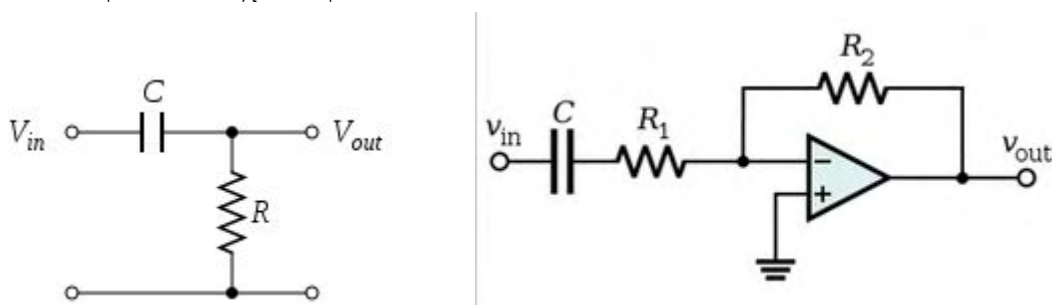
Οι άρτιες αρμονικές που εμφανίζονται είναι στα 2kHz, 4kHz και 6kHz. Τα 2kHz είναι μία οκτάβα πάνω από το 1kHz. Τα 4kHz είναι δύο οκτάβες πάνω από το 1kHz. Τα 6kHz είναι τρεις οκτάβες πάνω από το 1kHz συν μια "τέλεια πέμπτη", αλλά είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με τις δύο πρώτες αρμονικές που σχεδόν δεν λαμβάνεται υπόψιν.

Και στις δύο περιπτώσεις οι δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες είναι πιο σημαντικές, καθώς ακούγονται πιο δυνατά από όλες τις υπόλοιπες. Έτσι, οι άρτιες αρμονικές είναι οκτάβες τις αρχικής συχνότητας, ενώ οι περιττές σχηματίζουν συγχορδία (1η-3η-5η) με βασική νότα την αρχική συχνότητα. Οι άρτιες αρμονικές χαρακτηρίζονται ως "ήπια" παραμόρφωση. Ηχητικά είναι σχεδόν σαν να μην υπάρχει καθόλου παραμόρφωση, καθώς επαναλαμβάνεται η ίδια νότα σε υψηλότερες οκτάβες. Αντίθετα, οι περιττές αρμονικές χαρακτηρίζονται ως "έντονη" παραμόρφωση, καθώς στο άκουσμα εισέρχονται άλλες δύο νότες (3η - 5η).

1.10 Βασικές Κυκλωματικές Διατάξεις

Υψιπερατό Φίλτρο

Ένα υψιπερατό φίλτρο[4] είναι ένα ηλεκτρονικό φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση σημάτων με συχνότητα μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη συχνότητα αποκοπής και αποκόπτει συχνότητες μικρότερες της συχνότητας αποκοπής. Το ποσό εξασθένησης κάθε συχνότητας εξαρτάται από το σχεδιασμό του φίλτρου. Ένα υψιπερατό φίλτρο συνήθως μοντελοποιείται ως ένα γραμμικό σύστημα ανεξαρτήτου χρόνου. Μερικές φορές ονομάζεται bass-cut φίλτρο ή low-cut φίλτρο. Τα φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων έχουν πολλές χρήσεις, όπως την αποκοπή της DC συνιστώσας κυκλωμάτων ευαίσθητων σε μη-μηδενική μέση τάση ή συσκευών ραδιοσυχνοτήτων.

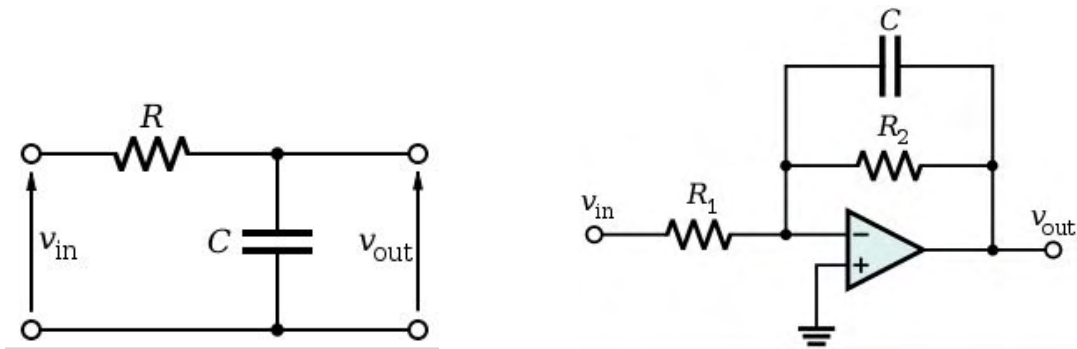


Χαμηλοπερατό Φίλτρο

Ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων[5] είναι ένα φίλτρο που επιτρέπει να περάσουν σήματα με συχνότητα μικρότερη από μια ορισμένη συχνότητα αποκοπής και εξασθενεί τα σήματα με συχνότητες υψηλότερες από τη συχνότητα αποκοπής. Το ποσό της εξασθένησης για κάθε συχνότητα εξαρτάται από το σχεδιασμό του φίλτρου. Το φίλτρο μερικές φορές ονομάζεται φίλτρο αποκοπής υψηλών συχνοτήτων, ή φίλτρο πρίμα αποκοπής σε εφαρμογές ήχου. Ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης είναι το αντίθετο ενός φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων. Ένα ζωνοπερατό φίλτρο είναι ένας συνδυασμός ενός φίλτρου χαμηλής διέλευσης και ενός υψιπερατού φίλτρου.

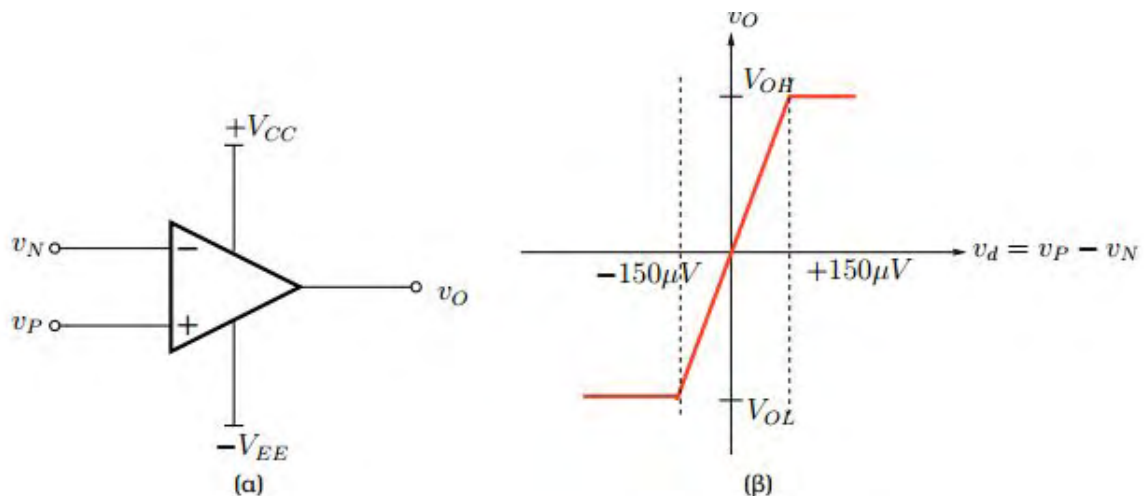
Υπάρχουν φίλτρα χαμηλής διέλευσης σε πολλές διαφορετικές μορφές, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (όπως το hiss-φίλτρο που χρησιμοποιείται σε ηχητικές εφαρμογές), τα φίλτρα anti-aliasing για σήματα προετοιμασίας πριν από τη

μετατροπή από αναλογικά σε ψηφιακά, ψηφιακά φίλτρα για την εξομάλυνση σύνολου δεδομένων, ηχοπετάσματα, θόλωμα των εικόνων κ.ο.κ. Τα φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων εξομαλύνουν τη μορφή του σήματος, αφαιρώντας τις βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις, και αφήνοντας τη μακροπρόθεσμη τάση.



Τελεστικός Ενισχυτής

Ο Τελεστικός ενισχυτής (ΤΕ) [6] είναι ένας διαφορικός ενισχυτής άμεσης ζεύξης, μεγάλης σταθερότητας και υψηλής απολαβής. Οι επιμέρους βαθμίδες ενίσχυσης, που συνθέτουν ένα ΤΕ, είναι άμεσα συζευγμένες (όχι μέσω πυκνωτών) και έτσι είναι δυνατή η ενίσχυση σημάτων μηδενικής συχνότητας (συνεχή σήματα) έως και αρκετών εκατοντάδων kHz. Ο ΤΕ συμβολίζεται με ένα τρίγωνο με τις δύο εισόδους στη μία βάση και την έξοδο στην απέναντι κορυφή (**Εικόνα 1.10**). Κάθε ΤΕ έχει δύο εισόδους: την **αναστρέφουσα** (inverting) και τη **μη αναστρέφουσα** (non-inverting) είσοδο, που συμβολίζονται με τα σύμβολα “-” και “+” αντιστοίχως, χωρίς αυτός ο συμβολισμός να έχει σχέση με την πολικότητα (ως προς το κοινό) των τάσεων στις εισόδους. Η τροφοδοσία ενός ΤΕ είναι συνήθως **διπολική** (bipolar), δηλαδή απαιτούνται δύο πηγές τάσης, η μία με θετική τάση και η άλλη με αρνητική τάση. Τυπικές τιμές τάσεων τροφοδοσίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ΤΕ είναι ± 15 V. Στην **Εικόνα 1.10** φαίνεται ένας τέτοιος τελεστικός ενισχυτής.



Εικόνα 1.10 Το σχηματικό του τελεστικού ενισχυτή μαζί με ένα παράδειγμα της χαρακτηριστικής εισόδου-εξόδου του

Εάν στην αναστρέφουσα είσοδο εφαρμοσθεί τάση v^- και στη μη αναστρέφουσα τάση v^+ , τότε η τάση στην έξοδο του ΤΕ παρέχεται από την εξίσωση:

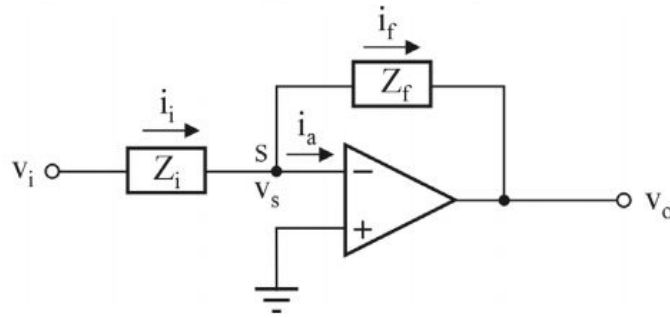
$$v_o = A(v^+ - v^-) \quad (1.10.1)$$

,όπου A είναι η απολαβή (ή συντελεστής ενίσχυσης) ανοικτού βρόχου (open-loop gain) του ΤΕ. Για τους συνηθισμένους ΤΕ είναι $A = 10^4 - 10^6$. Η Εξίσωση 1.10.1 ισχύει εφόσον η τάση εξόδου βρίσκεται μεταξύ δύο οριακών τιμών, που συνήθως είναι κατά 1-2 V ικρότερες (απολύτως) από τις τάσεις τροφοδοσίας του ΤΕ. Για παράδειγμα, εάν ο ΤΕ τροφοδοτείται με -15 και +15 V, η Εξίσωση 3.2.1 θα ισχύει για τιμές v_o από -13 έως +13 V (περίπου). Αυτή η περιοχή ονομάζεται περιοχή τελέσεων ή λειτουργίας (operational range) του ΤΕ.

Στην κατασκευή των κυκλωμάτων μας θα χρησιμοποιήσουμε τελεστικούς ενισχυτές σε διάταξη κλειστού βρόχου. Στη διάταξη **κλειστού βρόχου** (closed loop), με τη βοήθεια του κυκλώματος **ανατροφοδότησης** ή **ανάδρασης** (feedback), ένα κλάσμα του σήματος εξόδου επανεισάγεται στην αναστρέφουσα είσοδο (αρνητική ανατροφοδότηση). Με αυτή τη σύνδεση το σήμα εξόδου θα σταθεροποιηθεί στην τιμή εκείνη, που το κλάσμα αυτό θα εξουδετερώνει το αρχικό σήμα στην αναστρέφουσα είσοδο. Η διάταξη κλειστού βρόχου με αρνητική ανατροφοδότηση "χαλιναγωγεί" την υψηλή απολαβή ανοικτού βρόχου του ΤΕ και επιβάλλει μια κατά πολύ χαμηλότερη, αλλά απόλυτα ελεγχόμενη

και ρυθμιζόμενη τελική **απολαβή κλειστού βρόχου** (closed loop gain).

Στην **Εικόνα 1.11** απεικονίζεται το γενικό κύκλωμα ΤΕ με αρνητική ανατροφοδότηση, που πραγματοποιείται με σύνδεση της αναστρέφουσας εισόδου με την έξοδο του ΤΕ με μια αντίσταση ανατροφοδότησης Z_f (ωμική, χωρητική, επαγωγική ή σύνθετη). Το σήμα εισόδου (τάση v_i) εισάγεται στο κύκλωμα μέσω της αντίστασης εισόδου Z_i .



Εικόνα 1.11

Κεφάλαιο 2

Κυκλώματα Παραμόρφωσης

Στο κεφάλαιο αυτό, έχοντας το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται ώστε να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά ενός ηχητικού σήματος, θα μελετήσουμε ένα από τα πιο απλά κυκλώματα εφέ κιθάρας, το κύκλωμα παραμόρφωσης. Αρχικά, θα μελετήσουμε τη θεωρία λειτουργίας ενός τέτοιου κυκλώματος και στη συνέχεια, θα γίνει η προσομοίωσή του, αλλά και η κατασκευή του ώστε να εξετάσουμε τα ακουστικά αποτελέσματά του.

2.1 Θεωρία της Παραμόρφωσης

Η λέξη «παραμόρφωση» (distortion)[7] αναφέρεται σε οποιαδήποτε τροποποίηση της κυματομορφής του σήματος, αλλά στη μουσική χρησιμοποιείται για να αναφερθεί στη μη-γραμμική παραμόρφωση (με εξαίρεση τα φίλτρα) και ιδιαίτερα στην εισαγωγή νέων συχνοτήτων από μη- γραμμικότητες χωρίς μνήμη. Στη μουσική, η γραμμική παραμόρφωση δεν περιγράφεται ως παραμόρφωση διότι οι διαφορετικές μορφές της γραμμικής παραμόρφωσης έχουν συγκεκριμένα ονόματα που τις περιγράφουν. Η απλούστερη από αυτές είναι μια διαδικασία παραμόρφωσης γνωστή ως «ρύθμιση έντασης», η οποία περιλαμβάνει την παραμόρφωση του πλάτους ενός ηχητικού κύματος με έναν αναλογικό (ή «γραμμικό») τρόπο, ώστε να αυξάνεται ή να μειώνεται η ένταση του ήχου χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα του τόνου. Στο πλαίσιο της μουσικής, η πιο κοινή πηγή (μη γραμμικής) παραμόρφωση είναι ο «ψαλιδισμός» σε κυκλώματα ενισχυτών και είναι πιο γνωστός ως *overdrive*.

Ο *ψαλιδισμός* (Clipping) είναι μια μη γραμμική διαδικασία που παράγει συχνότητες που δεν φαίνονταν αρχικά στο σήμα ήχου. Αυτές οι συχνότητες μπορεί να είναι αρμονικές συνιστώσες, δηλαδή ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας εισόδου, ή «δυσαρμονικές» (“inharmonic”), που προκύπτουν από τη γενική παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης.

Ο «μαλακός ψαλιδισμός» (Soft Clipping) ισιώνει σταδιακά τις κορυφές ενός σήματος και αποδυναμώνει τις υψηλές περιττές αρμονικές. Ο «έντονος ψαλιδισμός» (Hard Clipping) ισιώνει τις κορυφές απότομα, με αποτέλεσμα να δυναμώνει τις υψηλές

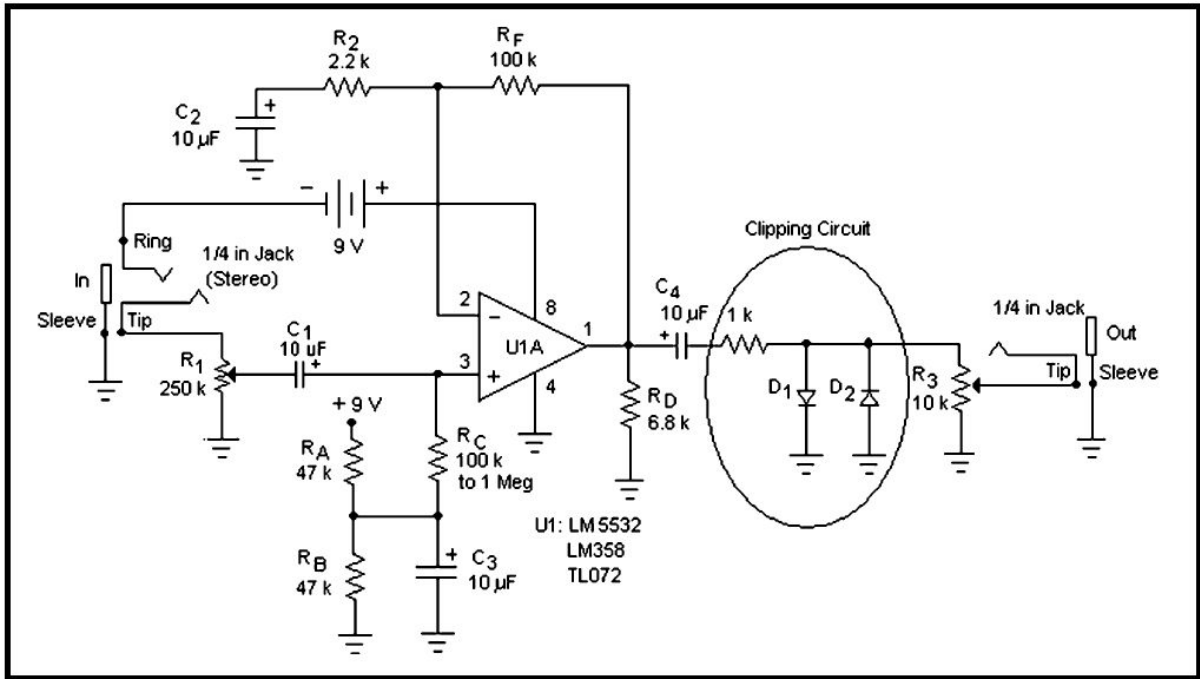
περιττές αρμονικές. Το άκουσμα αυτό περιγράφεται γενικά ως "hard".

2.2 Τεχνικές Δημιουργίας Εφέ Παραμόρφωσης

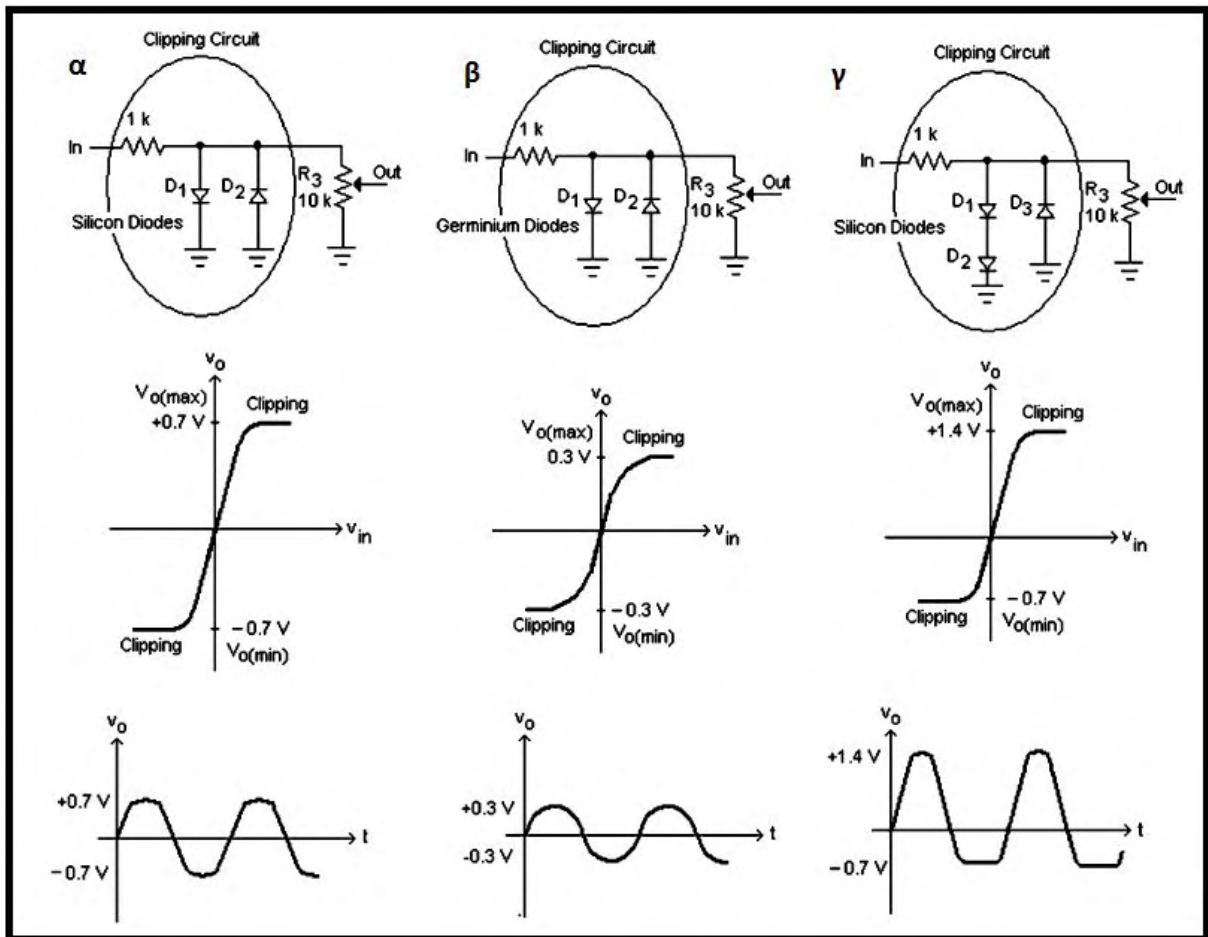
Ένας από τους πιο απλούς τρόπους να παράξουμε το εφέ της παραμόρφωση είναι να ψαλιδίσουμε την έξοδο του ενισχυτή με διόδους όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.1**. Εδώ έχουμε ένα κλασικό wave-shaping κύκλωμα που ονομάζεται *ψαλιδιστής διόδου (Diode Clipper)*. Η λειτουργία του ψαλιδιστή είναι πολύ απλή· υποθέτοντας ότι χρησιμοποιούνται δίοδοι σιλικόνης, όταν η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή φτάνει περίπου τα +0.7V η δίοδος D_1 άγει, εμποδίζοντας την περαιτέρω αύξηση της εξόδου. Στις αρνητικές τιμές εξόδου, η δίοδος D_2 περιορίζει την έξοδο στα -0.7V.

Ο απλός ψαλιδιστής διόδου παράγει σχετικά απότομο, συμμετρικό ψαλιδισμό. Το σήμα εξόδου αποτελείται από το αρχικό σήμα συν περιττές αρμονικές. Έτσι, όπως θα περιμέναμε, η παραμόρφωση είναι αρκετά "έντονη". Η συνάρτηση μεταφοράς και η κυματομορφή της τάσης εξόδου αυτού του "ψαλιδιστή" φαίνονται στην **Εικόνα 2.2α**.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές του κυκλώματος του βασικού ψαλιδιστή διόδου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αλλάξει ο ήχος της παραμόρφωσης. Για παράδειγμα, οι δίοδοι γερμανίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των διόδων σιλικόνης. Πέραν του ότι έχουν χαμηλότερο φράγμα δυναμικού από τη σιλικόνη, οι δίοδοι γερμανίου έχουν πιο ομαλή και σταδιακή διαγωγιμότητα με αποτέλεσμα να ψαλιδίζουν πιο "μαλακά" από τις δίοδους σιλικόνης. Αυτό φαίνεται στην **Εικόνα 2.2β**.



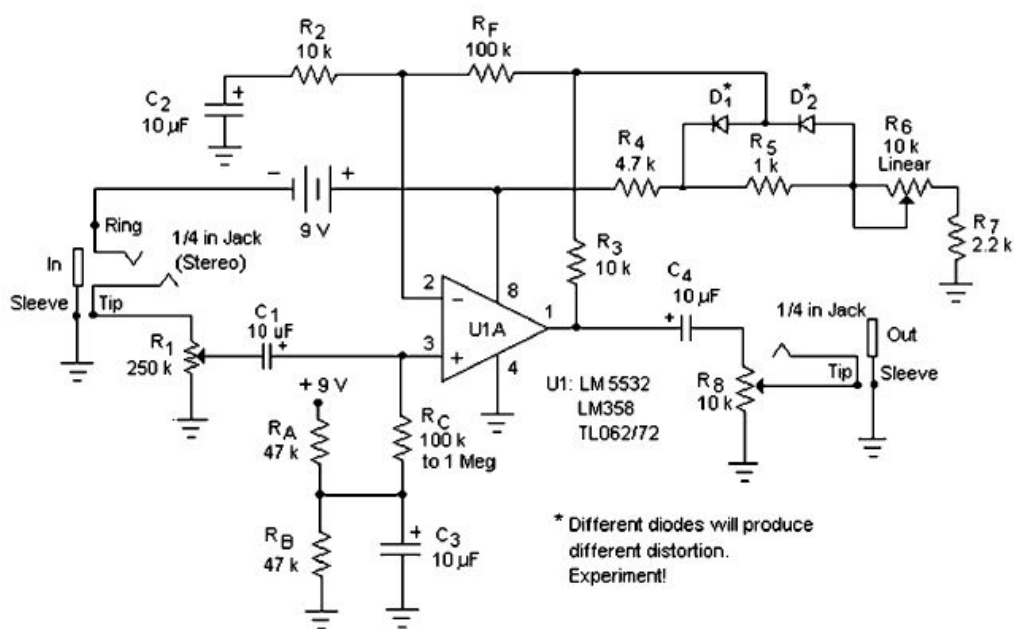
Εικόνα 2.1



Εικόνα 2.2

Ασύμμετρα θετικά και αρνητικά επίπεδα ψαλιδισμού μπορούν να επιτευχθούν τοποθετώντας διαφορετικούς αριθμούς διόδων στη σειρά, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.2γ**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν αρχικά και περιττές και άρτιες αρμονικές, αλλά όταν το κύκλωμα φτάσει σε έντονο ψαλιδισμό οι περιττές αρμονικές κυριαρχούν στο φάσμα εξόδου.

Μια παραλλαγή του ψαλιδιστή διόδου βρίσκεται στην **Εικόνα 2.3** [1].



Εικόνα 2.3

2.3 Ανάλυση του Κυκλώματος Παραμόρφωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την κυκλωματική ανάλυση του κυκλώματος παραμόρφωσης της **Εικόνας 2.3**. Το κύκλωμα αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς παράγει διαφορετικά ευδιάκριτα μεταξύ τους ακούσματα παραμόρφωσης μεταβάλλοντας την αντίσταση R6.

Αρχικά, το σήμα εισέρχεται από ένα μονοφωνικό input jack που συνδέεται με την έξοδο της κιθάρας. Η τροφοδοσία του κυκλώματος γίνεται με μπαταρία 9V. Αρχικά, το σήμα περνάει από το ποτενσιόμετρο R_1 250k Ω το οποίο έχει διπλό ρόλο· πρώτον, λειτουργεί σαν ρυθμιστής παραμόρφωσης και δεύτερον, σχηματίζει ένα υπεραπλοποιημένο φίλτρο μαζί με τον πυκνωτή C_1 . Η R_1 ανάλογα με την τιμή της ρυθμίζει την ποσότητα παραμόρφωσης που εισάγεται στο σήμα.

Στη συνέχεια, το σήμα θα περάσει από τον τελεστικό ενισχυτή U1A, η είσοδος του οποίου πολώνεται μέσω της αντίστασης R_c . Οι αντιστάσεις R_A και R_B σχηματίζουν έναν διαιρέτη τάσης ώστε να δώσουν μια τάση αναφοράς ίση με τη μισή τιμή της τάσης τροφοδοσίας $V_{cc} = 9V$, δηλαδή $V_R = 4.5 V$. Η τάση αναφοράς εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή U1A μέσω της R_c . Το ρεύμα πόλωσης που εξέρχεται από τον αναστρέφοντα ακροδέκτη είναι τυπικά πολύ μικρό (περίπου 40 nA), οπότε υπάρχει αμελητέα πτώση τάσης μετά την αντίσταση R_c , η οποία επιλέγεται να είναι μεγάλη ώστε να κρατάει υψηλή την αντίσταση εισόδου του ενισχυτή. Ο πυκνωτής C_3 χρησιμοποιείται απλά για να μειώσει τον θόρυβο εισόδου.

Η αντίσταση R_F σχηματίζει ένα μονοπάτι τροφοδοσίας για τον τελεστικό ενισχυτή U1A. Πριν φτάσει το μονοπάτι τροφοδοσίας στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή, συνδέεται με το υποκύκλωμα του ψαλιδιστή διόδου σε μια παραλλαγή. Οι δύο δίοδοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας αντίστασης R_5 . Η μεταβαλλόμενη αντίσταση R_6 ελέγχει τη συμμετρία της κυματομορφής εξόδου. Όταν η R_6 παίρνει την τιμή περίπου 2.5k Ω , η παραμόρφωση στην έξοδο είναι εξαιρετικά συμμετρική. Στις ακραίες τιμές της R_6 η κυματομορφή εξόδου ψαλιδίζεται ασύμμετρα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία άρτιων αρμονικών που μεταβάλλουν σημαντικά τον ήχο στο σήμα εξόδου. Η αντιστάσεις R_4 , R_5 και R_7 συμβάλουν στη ρύθμιση της συμμετρίας. Το μονοπάτι τροφοδοσίας καταλήγει στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή μέσω της αντίστασης R_3 .

Όσον αφορά την DC ανάλυση, οι πυκνωτές C_1 , C_2 και C_4 συμπεριφέρονται ως ανοιχτοκύκλωμα και το μη αναστρέφον DC κέρδος του τελεστικού ενισχυτή U1A είναι 1. Έτσι, η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή U1A είναι ίδια με την τάση που εμφανίζεται στον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη (4.5 V).

Όσον αφορά την AC ανάλυση, οι πυκνωτές λειτουργούν σαν βραχυκυκλώματα. Στον υπολογισμό του κέρδους του τελεστικού ενισχυτή U1A δεν λαμβάνεται υπόψιν ο ψαλιδιστής διόδου, καθώς

η βασική του λειτουργία του είναι η ρύθμιση της συμμετρίας της κυματομορφής εξόδου. Έτσι, το κέρδος του ενισχυτή υπολογίζεται προσεγγιστικά ως εξής:

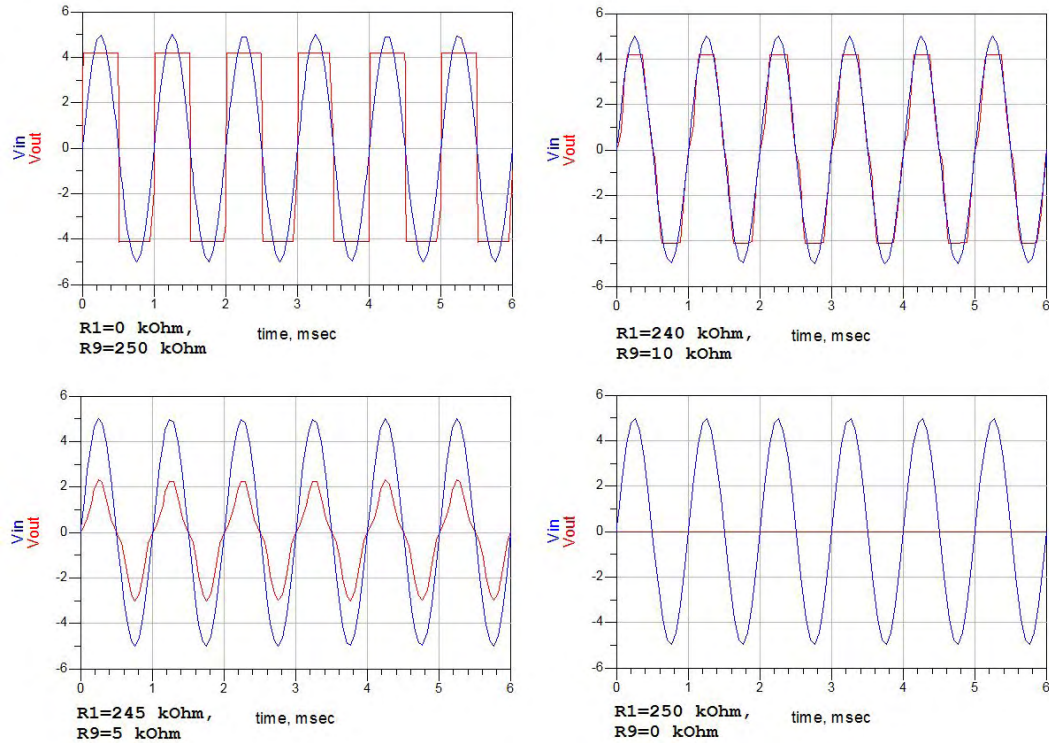
$$A_v = \frac{R_2}{R_1} + 1 = \frac{R_F + R_3}{R_2} + 1 = \frac{100k + 10k}{10k} + 1 = 12$$

Τέλος, το σήμα περνάει από το υπεραπλοποιημένο φίλτρο που σχηματίζουν ο πυκνωτής C_4 και το ποτενσιόμετρο R_8 . Η τιμή του C_4 πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να εμποδίζει την παρεμβολή της roll-off συχνότητας στο σήμα εξόδου. Το ποτενσιόμετρο R_8 ρυθμίζει την ένταση του ήχου. Το σήμα εξέρχεται από ένα μονοφωνικό jack output και καταλήγει στον ενισχυτή κιθάρας.

2.4 Προσομοίωση του Κυκλώματος Παραμόρφωσης

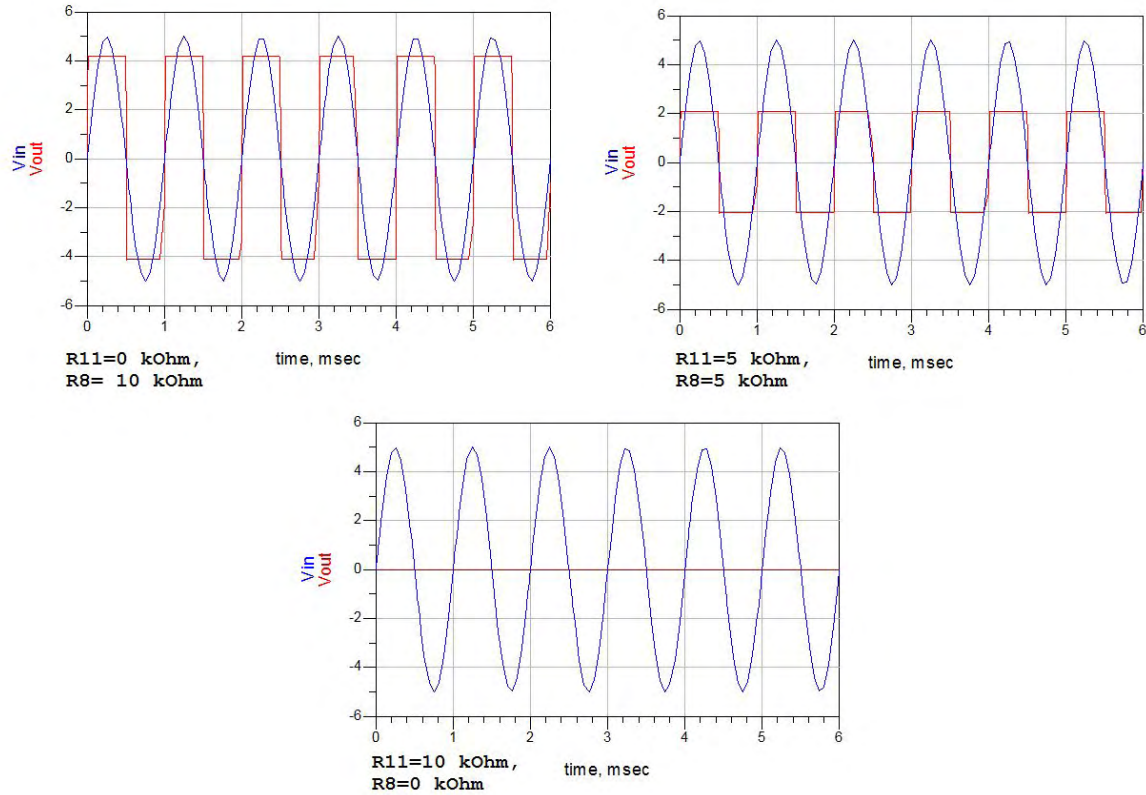
Στην ενότητα αυτή, θα κάνουμε την προσομοίωση του κυκλώματος παραμόρφωσης της **Εικόνας 2.3** στο ADS (Advanced Design System). Υπάρχουν τρεις μεταβαλλόμενες αντιστάσεις στο κύκλωμα η οποίες μεταβάλλουν την κυματομορφή εξόδου, οι R_1 , R_6 και R_8 . Θα εξετάσουμε τρία διαφορετικά στιγμιότυπα της προσομοίωσης ώστε να εξετάσουμε τις διαφορές στην κυματομορφή εξόδου ανάλογα με τη μεταβολή τους.

Αρχικά, προσομοιώνουμε το κύκλωμα δίνοντας τέσσερις διαφορετικές τιμές στις αντιστάσεις R_1 , R_6 $\{(0, 250 \text{ k}\Omega), (240, 10 \text{ k}\Omega), (245, 5 \text{ k}\Omega), (250, 0 \text{ k}\Omega)\}$, κρατώντας σταθερές τις μεταβαλλόμενες αντιστάσεις R_8 και R_8 στις τιμές 25% και 100% αντίστοιχα. Οι αντιστάσεις R_1 , R_6 αποτελούν ουσιαστικά το ποτενσιόμετρο R_1 και ρυθμίζουν τη ποσότητα παραμόρφωσης που εισέρχεται στο σήμα. Η προσομοίωση του κυκλώματος φαίνεται στην **Εικόνα 2.4**.



Εικόνα 2.4

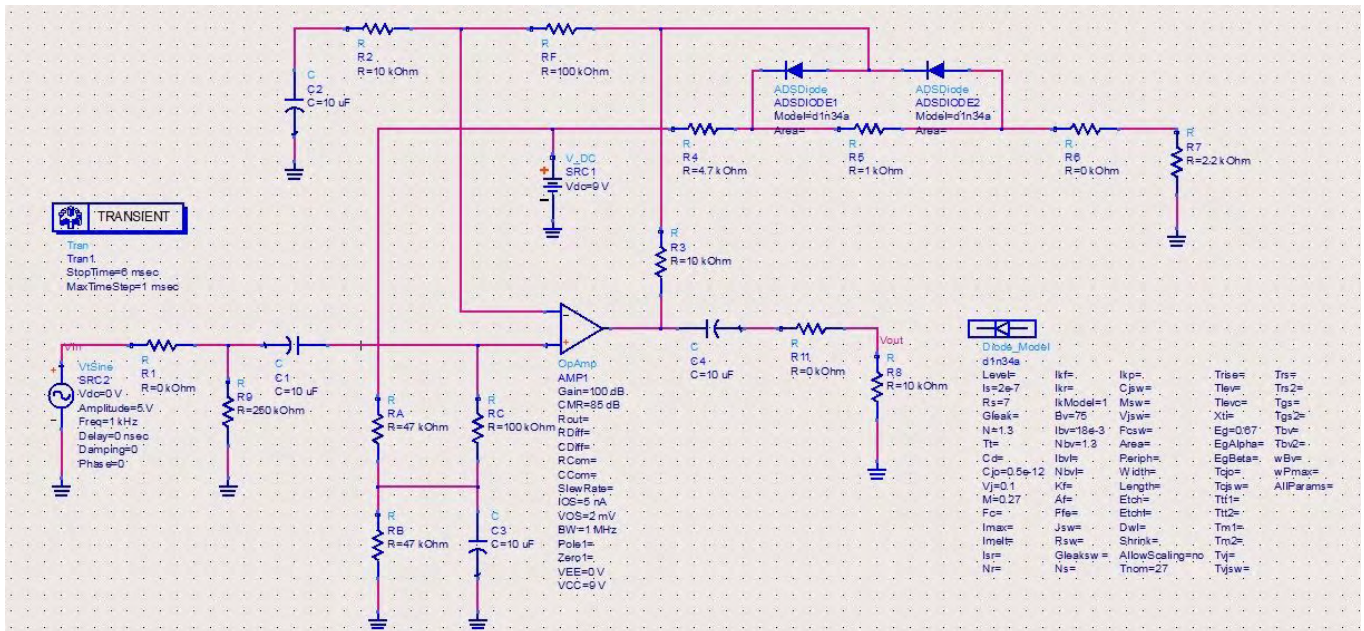
Στη συνέχεια, προσομοιώνουμε το κύκλωμα δίνοντας τρεις διαφορετικές τιμές στις αντιστάσεις R_{11} και R_8 $\{(0,10 \text{ k}\Omega), (5,5 \text{ k}\Omega), (10,0 \text{ k}\Omega)\}$ κρατώντας σταθερές τις μεταβαλλόμενες αντιστάσεις R_1 και R_6 στις τιμές 100% και 25% αντίστοιχα. Οι αντιστάσεις R_{11} , R_8 αποτελούν ουσιαστικά το ποτενσιόμετρο R_8 και ρυθμίζουν την ένταση του ηχητικού σήματος εξόδου. Η προσομοίωση του κυκλώματος φαίνεται στην **Εικόνα 2.5**.



Εικόνα 2.5

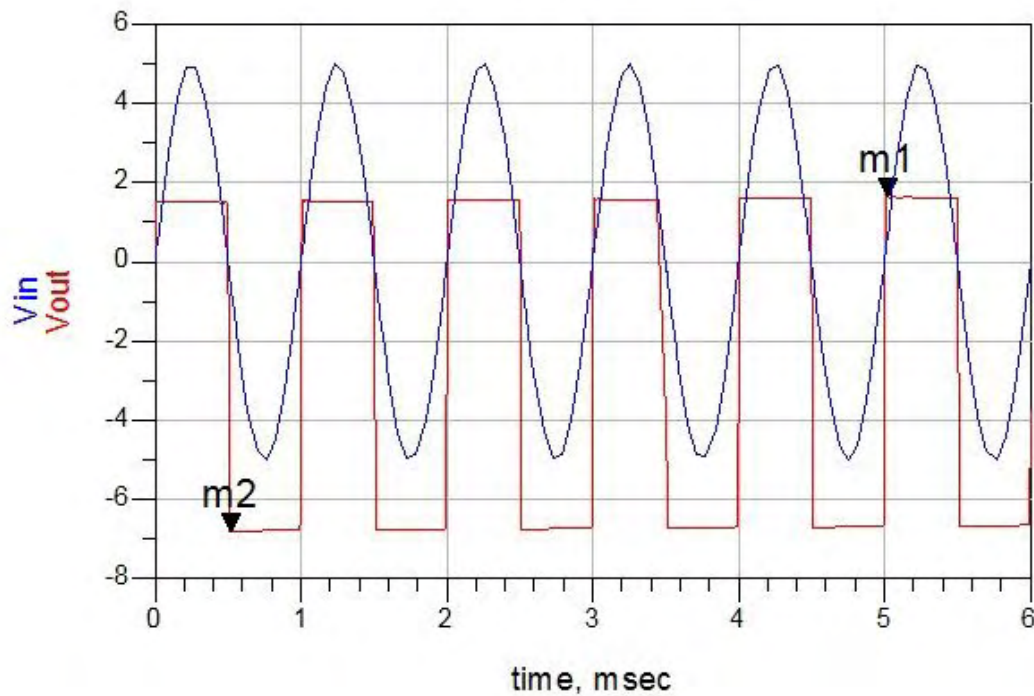
Τέλος, προσομοιώνουμε το κύκλωμα κρατώντας σταθερές τις τιμές των μεταβαλλόμενων αντιστάσεων εισόδου R_1 και εξόδου R_8 στη μέγιστη τιμή τους (100%).

Στο πρώτο στιγμιότυπο αυτής της προσομοίωσης, η μεταβαλλόμενη αντίσταση R_6 ρυθμίζεται στο 0%. Στην **Εικόνα 2.5α** φαίνεται η σχεδίαση κυκλώματος, ενώ στην **Εικόνα 2.6β** φαίνονται οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο.



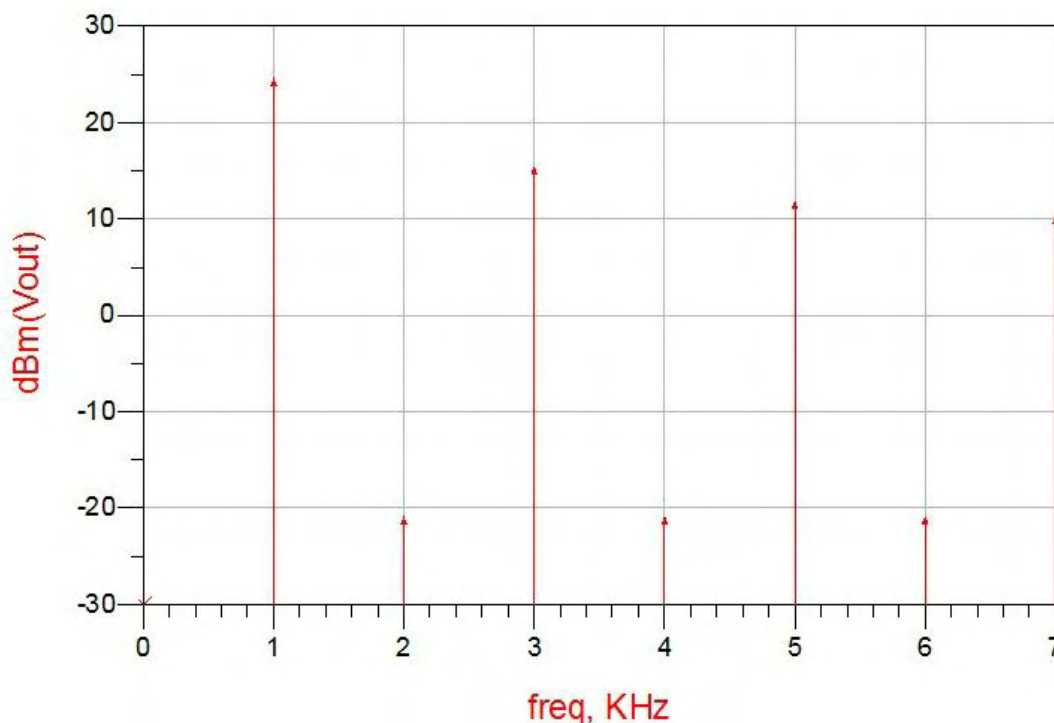
Εικόνα 2.6α

m1 indep(m1)=0.005 plot_vs(Vout, time)=1.633 Max	m2 indep(m2)=0.001 plot_vs(Vout, time)=-6.798 Min
--	---



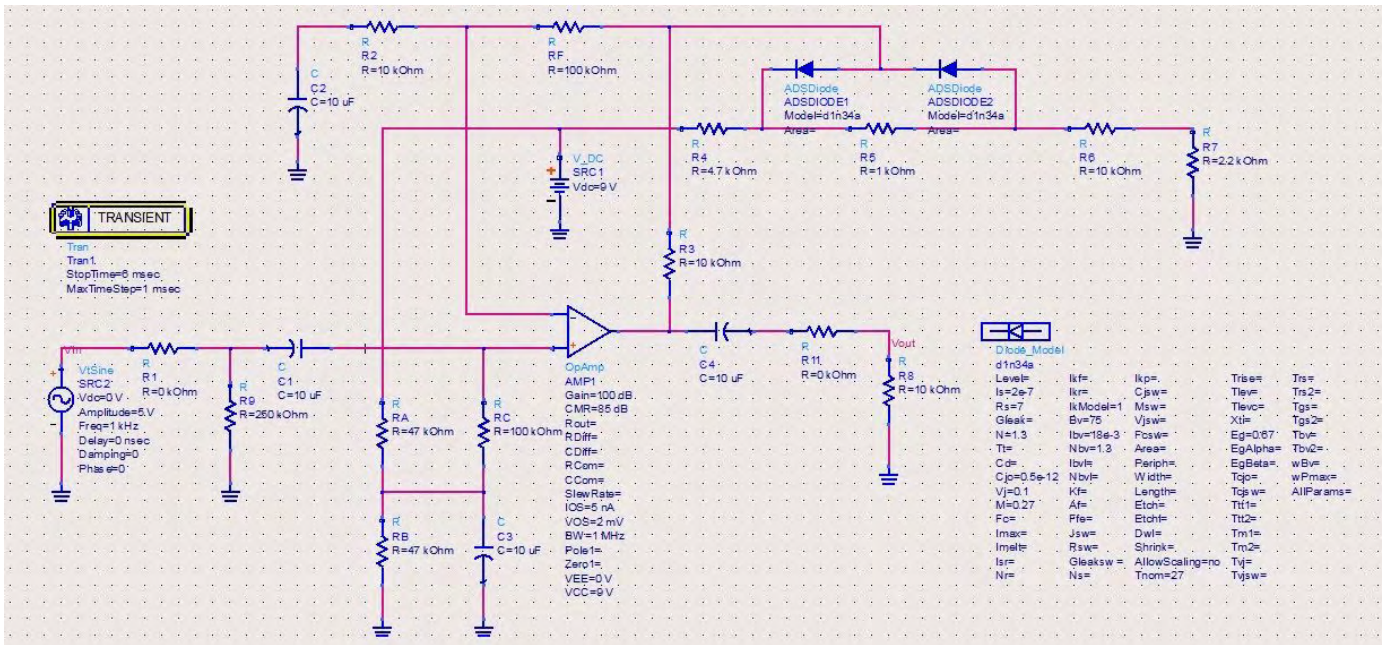
Εικόνα 2.6β

Στην **Εικόνα 2.6β** παρατηρούμε ότι η κυματομορφή εξόδου είναι ασύμμετρη. Στις θετικές τιμές εξόδου η δίοδος D_1 έχει δώσει ένα κατώφλι περίπου $+1.6V$, ενώ στις αρνητικές τιμές η δίοδος D_2 περιορίζει την έξοδο στην τιμή περίπου $-6,8V$. Αυτός ο ασύμμετρος ψαλιδισμός έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κυρίως περιττών αλλά και άρτιων αρμονικών με μικρό πλάτος, κάνοντας το άκουσμα της παραμόρφωσης λιγότερο έντονο. Στην **Εικόνα 2.7** φαίνεται το φασματογράφημα συχνοτήτων του κυκλώματος για αυτό το στιγμιότυπο.

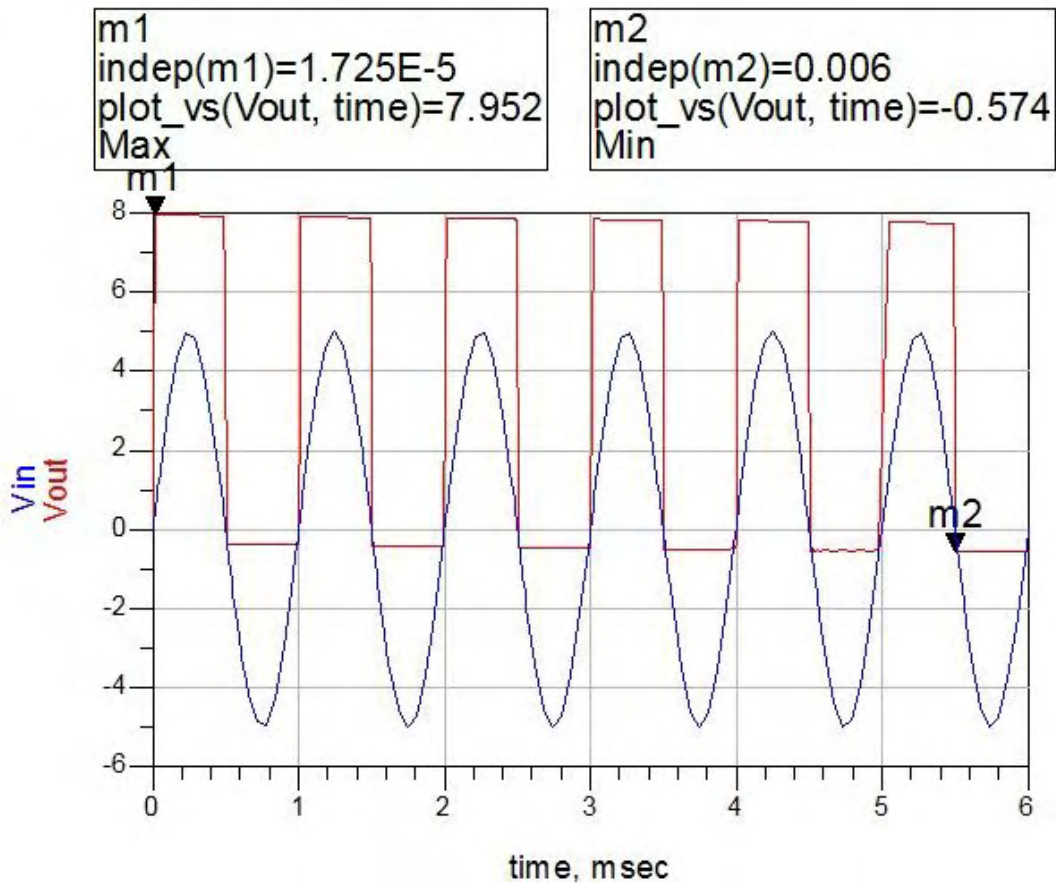


Εικόνα 2.7

Στο δεύτερο στιγμιότυπο, η μεταβαλλόμενη αντίσταση ρυθμίζεται στα $10k\Omega$ (100%). Στην **Εικόνα 2.8α** φαίνεται ο σχεδιασμός του κυκλώματος, ενώ στην **Εικόνα 2.8β** φαίνονται οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο.

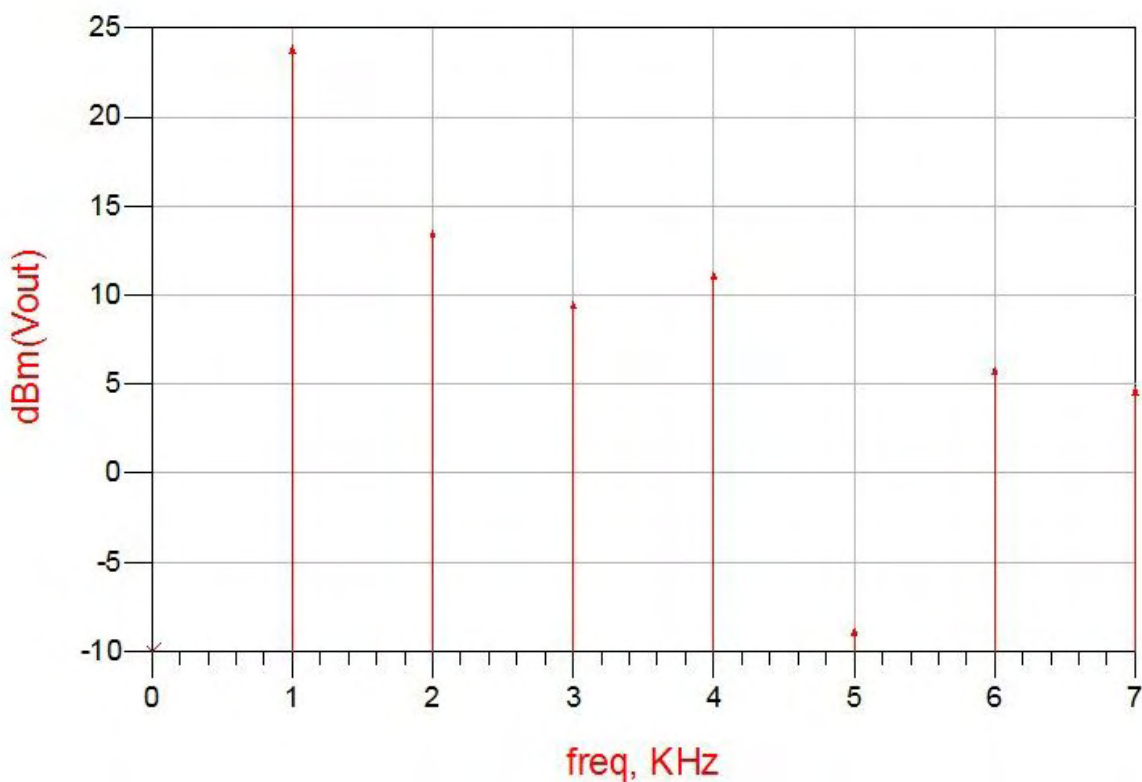


Εικόνα 2.8α



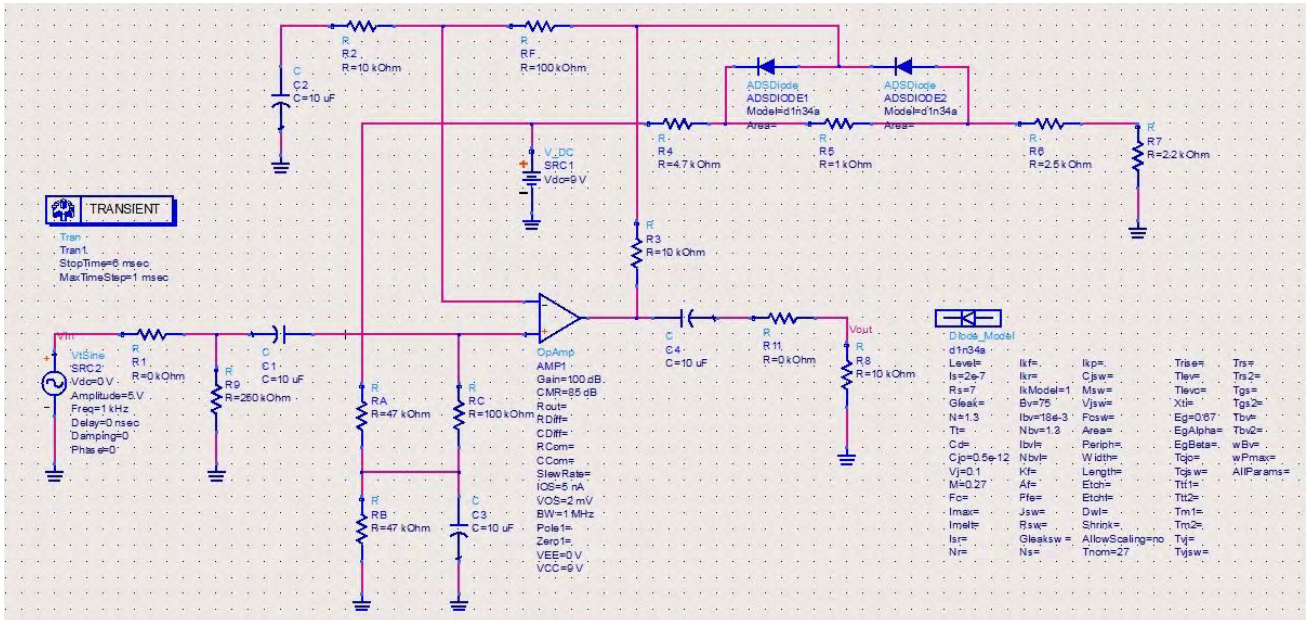
Εικόνα 2.8β

Στην **Εικόνα 1.6β** παρατηρούμε ότι η κυματομορφή εξόδου είναι και πάλι ασύμμετρη. Στις θετικές τιμές εξόδου η δίοδος D_1 έχει δώσει ένα κατώφλι περίπου $+7,9V$, ενώ στις αρνητικές τιμές η δίοδος D_2 περιορίζει την έξοδο στην τιμή περίπου $-0,6V$. Αυτός ο ασύμμετρος ψαλιδισμός έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περισσότερο άρτιων παρά περιττών αρμονικών, κάνοντας το άκουσμα της παραμόρφωσης ακόμα λιγότερο έντονο. Στην **Εικόνα 2.9** φαίνεται το φασματογράφημα συχνοτήτων του κυκλώματος για αυτό το στιγμιότυπο.

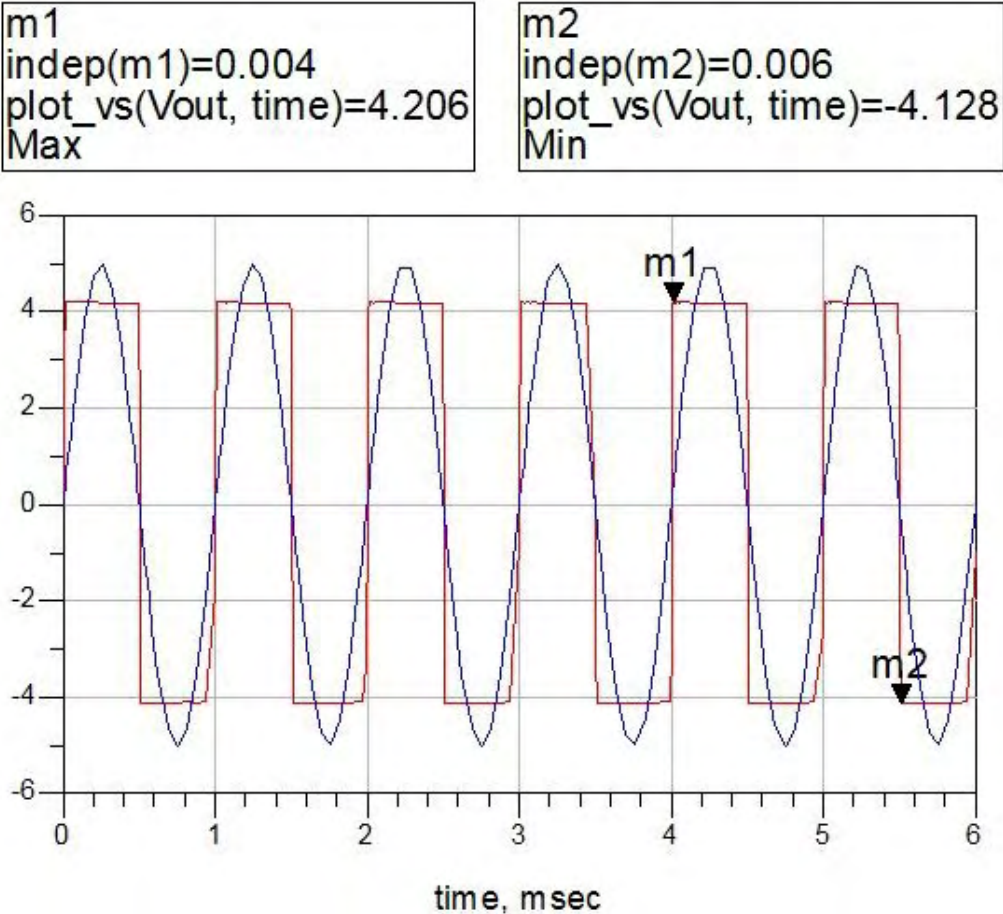


Εικόνα 2.9

Στο τρίτο στιγμιότυπο, η μεταβαλλόμενη αντίσταση ρυθμίζεται στα $2,5k\Omega$ (25%). Στην **Εικόνα 2.10α** φαίνεται η σχεδίαση του κυκλώματος, ενώ στην **Εικόνα 2.10β** φαίνονται οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο.

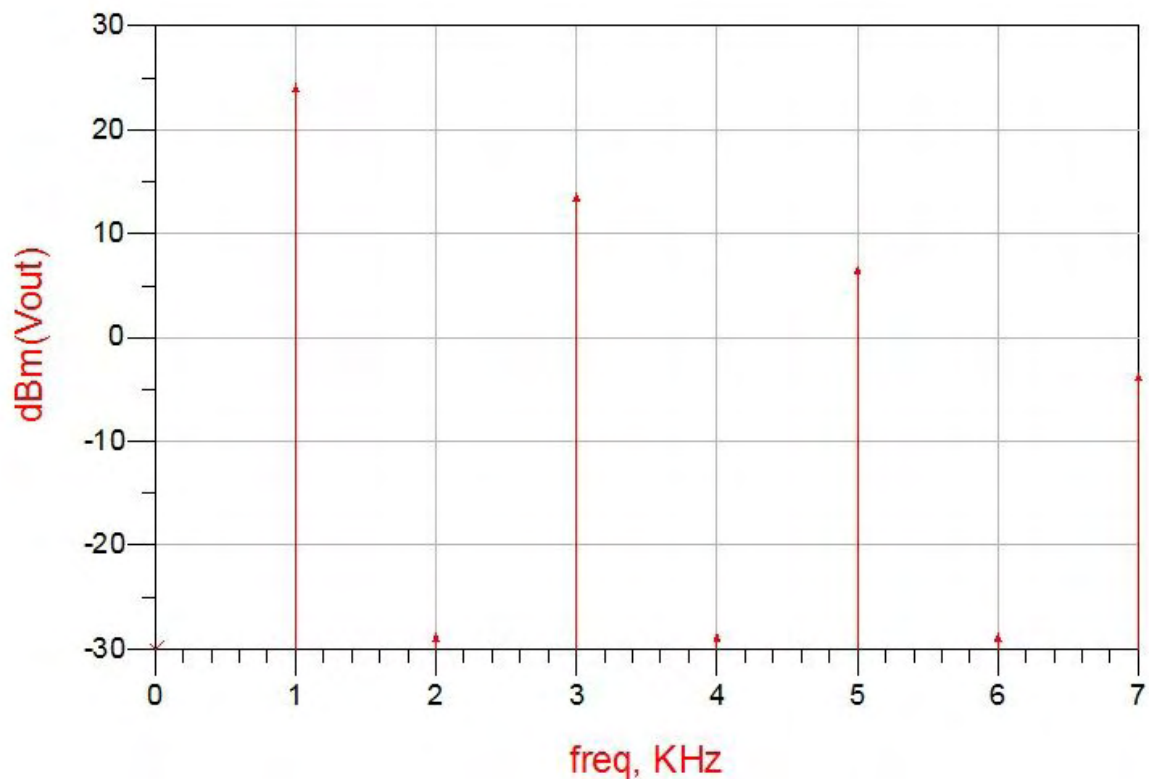


Εικόνα 2.10α



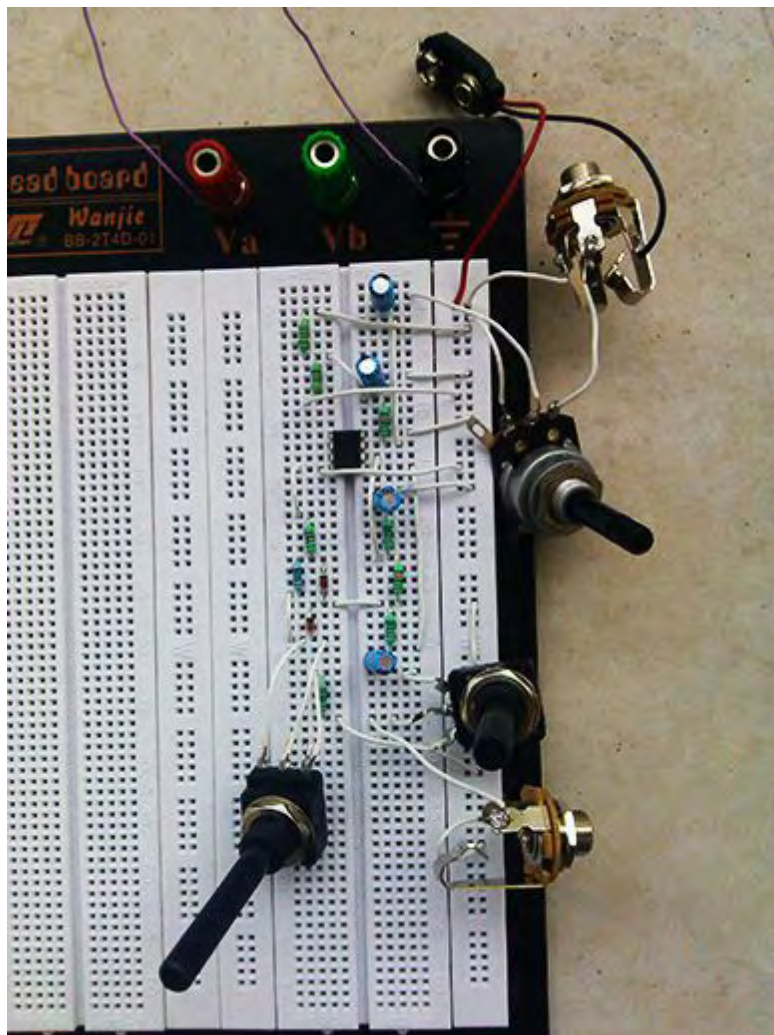
Εικόνα 2.10β

Στην **Εικόνα 2.10β** παρατηρούμε ότι η κυματομορφή εξόδου αυτή τη φορά είναι συμμετρική. Στις θετικές τιμές εξόδου η δίοδος D_1 έχει δώσει ένα κατώφλι περίπου $+4,2V$, ενώ στις αρνητικές τιμές η δίοδος D_2 περιορίζει την έξοδο στην τιμή περίπου $-4,1V$. Αυτός ο συμμετρικός ψαλιδισμός έχει ως αποτέλεσμα να κυριαρχούν περιττές αρμονικές, κάνοντας το άκουσμα έντονα παραμορφωμένο. Στην **Εικόνα 2.11** φαίνεται το φασματογράφημα συχνοτήτων του κυκλώματος για αυτό το στιγμιότυπο.

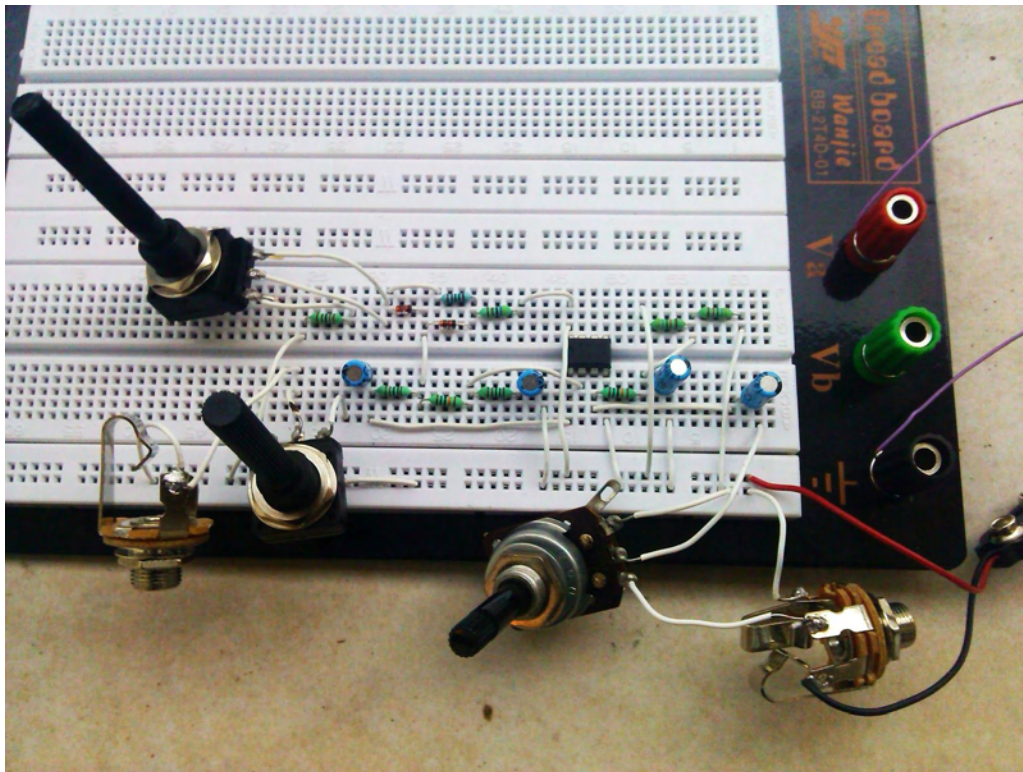


2.5 Αποτελέσματα Εργαστηριακής Προσομοίωσης του Κυκλώματος Παραμόρφωσης

Το κύκλωμα παραμόρφωσης της **Εικόνας 2.3** κατασκευάστηκε σε πλακέτα breadboard και φαίνεται στις **Εικόνες 2.12 α,β,γ**. Η τροφοδοσία του κυκλώματος γίνεται με μπαταρία 9V. Το σήμα εισέρχεται από την κιθάρα μέσω ενός στερεοφωνικού input jack και καταλήγει στον ενισχυτή μέσω ενός μονοφωνικού output jack.



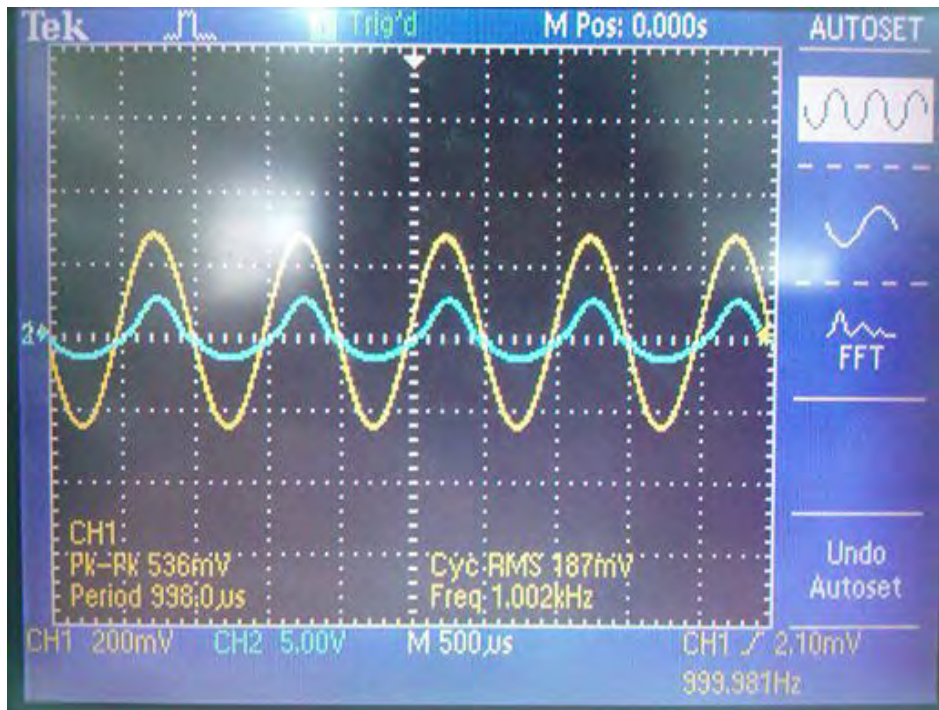
Εικόνα 2.12α



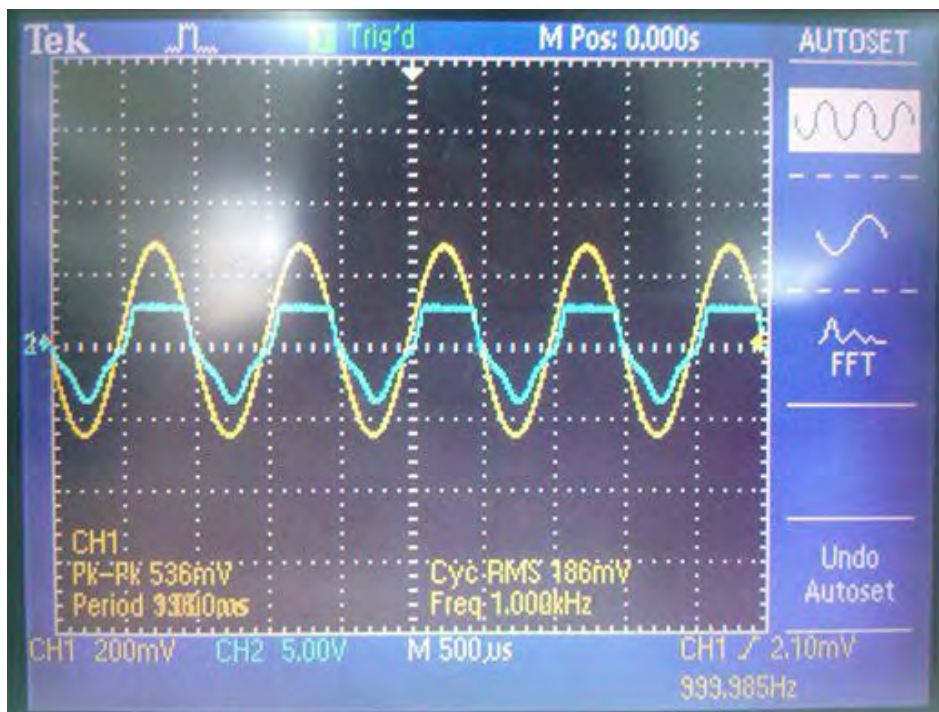
Εικόνα 2.12β

Στην εργαστηριακή προσομοίωση δώσαμε στην είσοδο ένα ημιτονοειδές σήμα με πλάτος $V_{p-p} = 10V$, $offset = 0$ και συχνότητα $1kHz$.

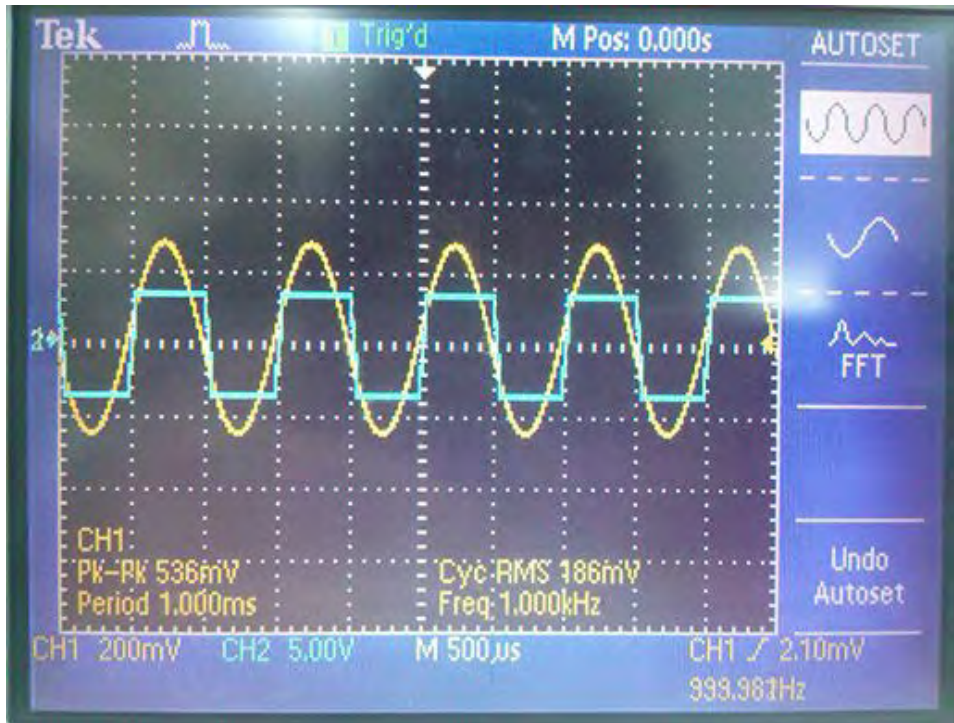
Αρχικά, κρατάμε σταθερές τις μεταβαλλόμενες αντιστάσεις R_6 και R_8 (25% και 100%) και μεταβάλλουμε την τιμή της αντίστασης R_1 από 0 - 100%. Τα στιγμιότυπα που παίρνουμε φαίνονται στις **Εικόνες 2.13α,β,γ**.



Εικόνα 2.13α

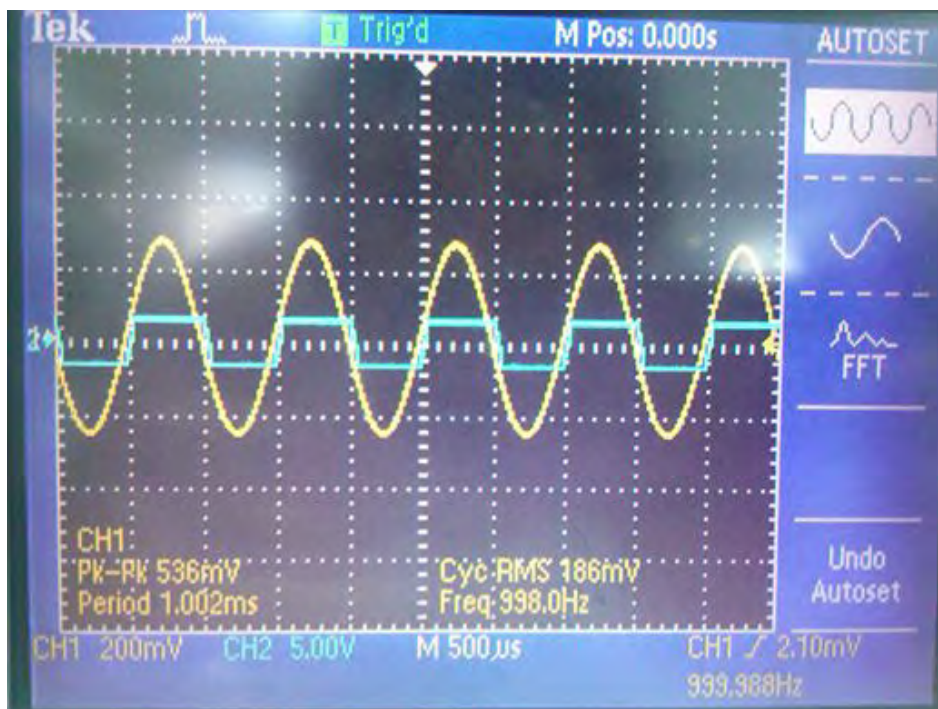


Εικόνα 2.13β

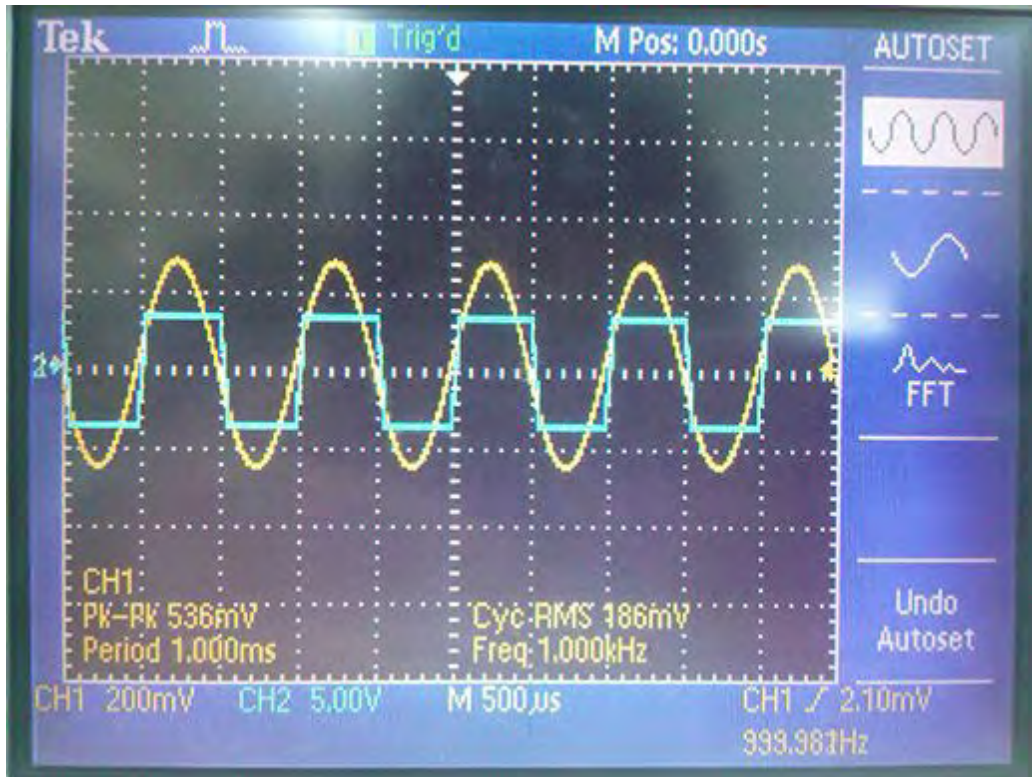


Εικόνα 2.13γ

Στη συνέχεια, κρατάμε σταθερές τις μεταβαλλόμενες αντιστάσεις R_1 , R_6 (στα 100% και 25%) και μεταβάλλουμε την αντίσταση R_8 . Τα στιγμιότυπα είναι τραβηγμένα όταν η αντίσταση έχει τιμή ίση με 5kOhm και 10kOhm. Στα 0 kOhm το σήμα αποκόπτεται. Τα στιγμιότυπα φαίνονται στις **Εικόνες 2.14α,β**.

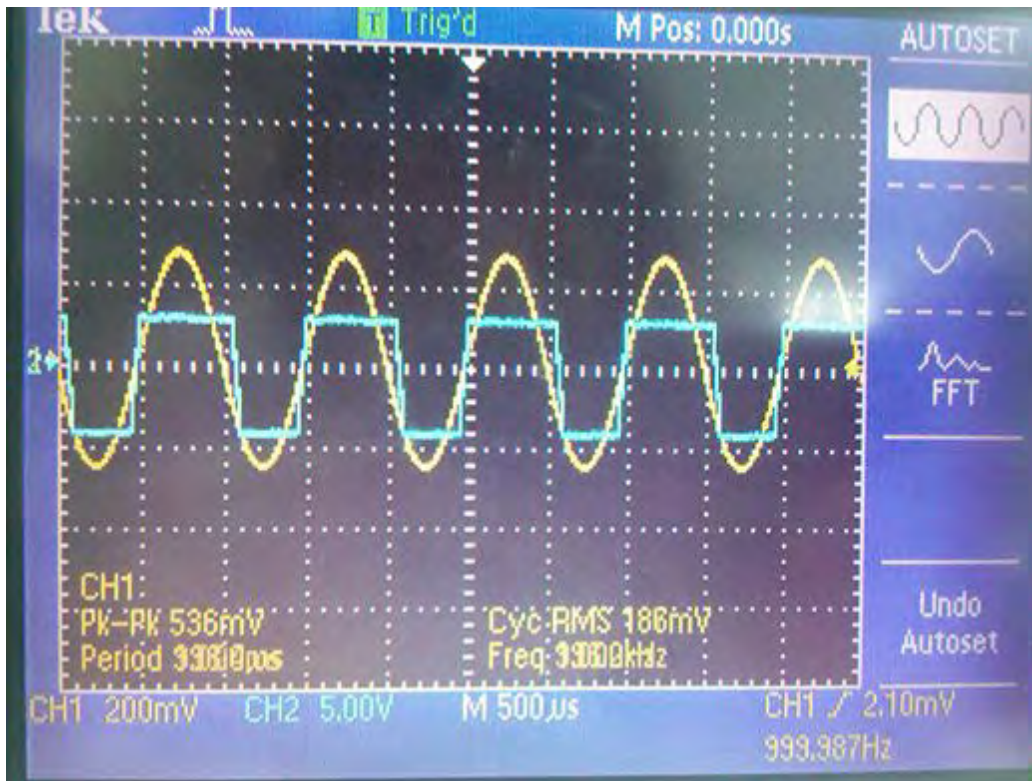


Εικόνα 2.14α

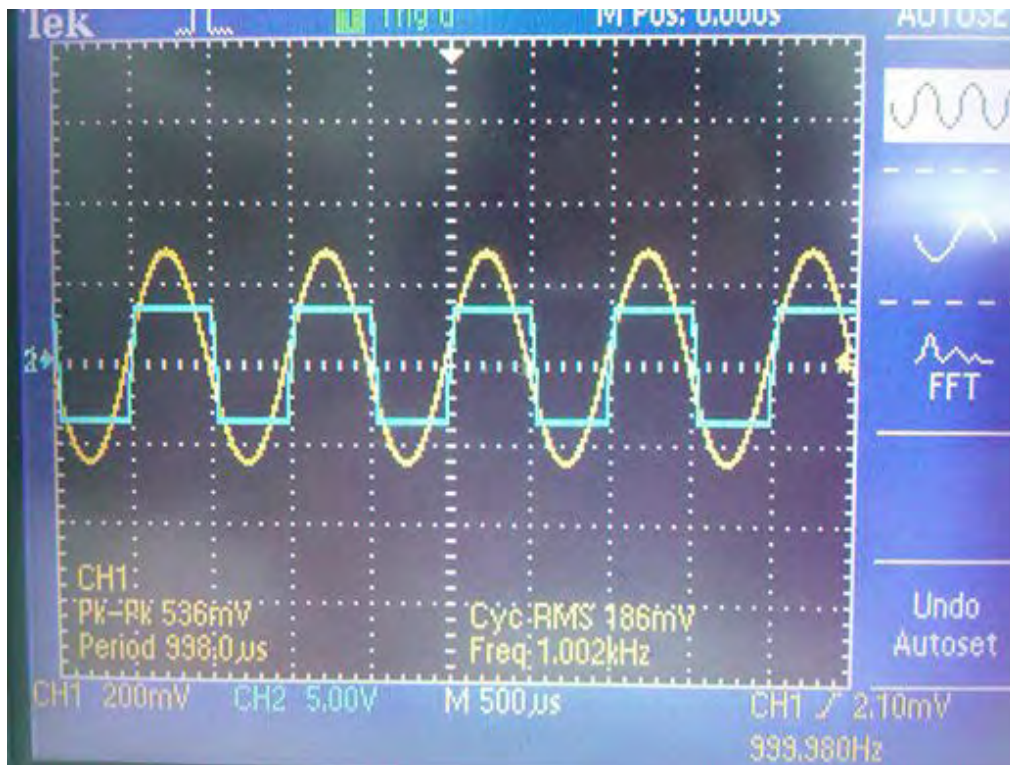


Εικόνα 2.14β

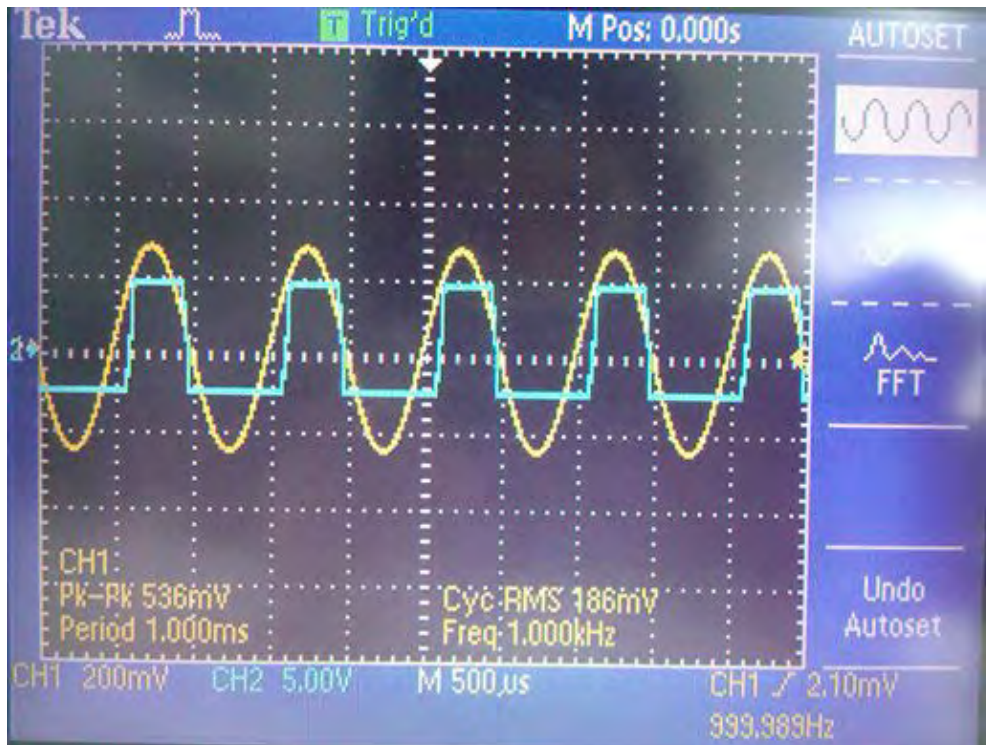
Στην επόμενη προσομοίωση, κρατάμε σταθερές τις μεταβαλλόμενες αντιστάσεις R_1 , R_8 (στα 100% και 100%) και μεταβάλλουμε την αντίσταση R_8 . Τα στιγμιότυπα είναι τραβηγμένα όταν η αντίσταση έχει τιμή ίση με 0 kOhm(0%), 2.5 kOhm(25%) και 10 kOhm(100%). Τα στιγμιότυπα φαίνονται στις **Εικόνες 2.15α,β,γ**.



Εικόνα 2.15α



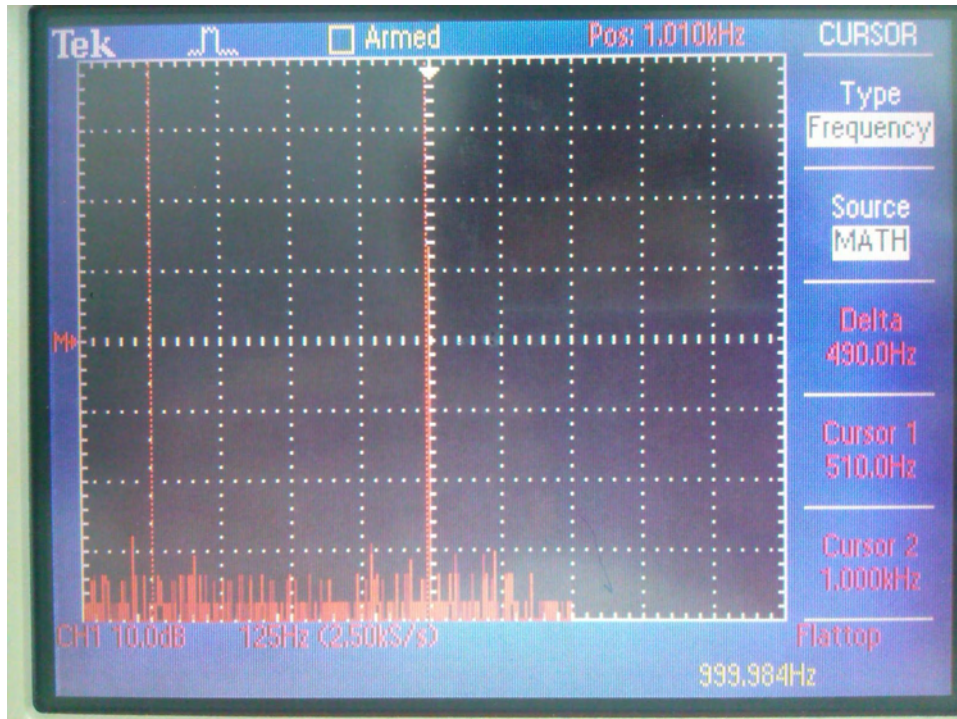
Εικόνα 2.15β



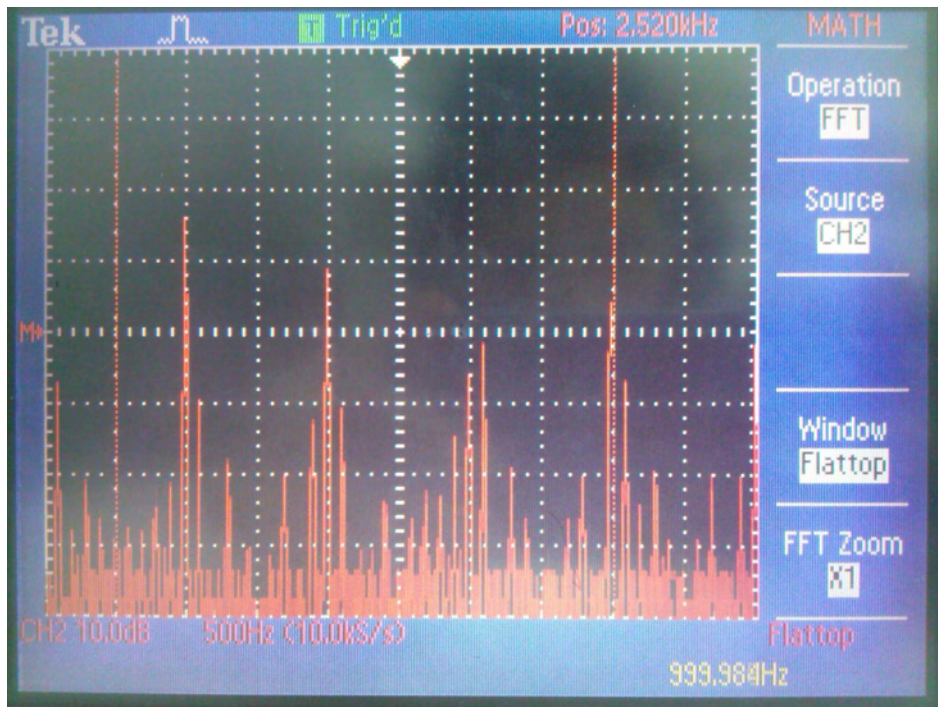
Εικόνα 2.15γ

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ασυμμετρία της κυματομορφής εξόδου ανάλογα με τη μεταβολή της αντίστασης R_6 . Στην **Εικόνα 2.15 α** και **β** η κυματομορφή είναι κεντραρισμένη στις αρνητικές και θετικές τιμές αντίστοιχα, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη “ήπιας” παραμόρφωσης. Ενώ στην **Εικόνα 2.15γ** η κυματομορφή είναι κεντραρισμένη στο μηδέν κάνοντας την παραμόρφωση έντονη.

Τέλος, πήραμε δύο στιγμιότυπα από το φάσμα των συχνοτήτων του κυκλώματος, ένα στην είσοδο και ένα στην έξοδο. Στην **Εικόνα 2.16α** φαίνεται το φάσμα συχνοτήτων εισόδου, στο οποίο παρατηρούμε τη βασική συχνότητα 1kHz. Ενώ στην **Εικόνα 2.16β** φαίνεται το φάσμα συχνοτήτων στην έξοδο με σταθερές τις αντιστάσεις R_1 , R_6 και R_8 (100%, 25% και 100%). Σε αυτήν την εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε τις περιττές αρμονικές στο 1kHz, στα 3kHz, στα 5kHz και στα 7kHz.



Εικόνα 2.16α



Εικόνα 2.16β

Τα στιγμιότυπα προσομοίωσης του εργαστηρίου επαληθεύουν με μεγάλη ακρίβεια την προσομοίωση του κυκλώματος που έγινε στο ADS.

Κεφάλαιο 3

Κυκλώματα Αντήχησης

Στο κεφάλαιο αυτό, θα μελετήσουμε ένα άλλο βασικό κύκλωμα εφέ κιθάρας, το κύκλωμα αντήχησης (*reverb*). Συγκεκριμένα, η μελέτη αφορά την κατασκευή ενός ψηφιακού (*digital*) *reverb*. Αρχικά, γίνεται μια ανάλυση πάνω στα βασικά χαρακτηριστικά του εφέ *reverb*. Στη συνέχεια, γίνεται μελέτη και ανάλυση του κυκλώματος. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα της κατασκευής του κυκλώματος.

3.1 Θεωρία της Αντήχησης

3.1.1 Αντήχηση (*Reverberation*)

Η έννοια *reverberation*[8] θα μπορούσε ανεπίσημα να αποδοθεί στα ελληνικά ως *αντήχηση*. Η αντήχηση, στην ψυχοακουστική και ακουστική, είναι η συνέχεια του ήχου μετά την παραγωγή του. Η αντήχηση ή το *reverb* δημιουργείται όταν ένας ήχος ή ένα σήμα αντανακλάται προκαλώντας έναν μεγάλο αριθμό από αντανακλάσεις που συσσωρεύονται και που έπειτα ξεθωριάζουν, καθώς ο ήχος απορροφάται από τις επιφάνειες των αντικειμένων στο χώρο - περιλαμβάνοντας έπιπλα, ανθρώπους και τον αέρα.

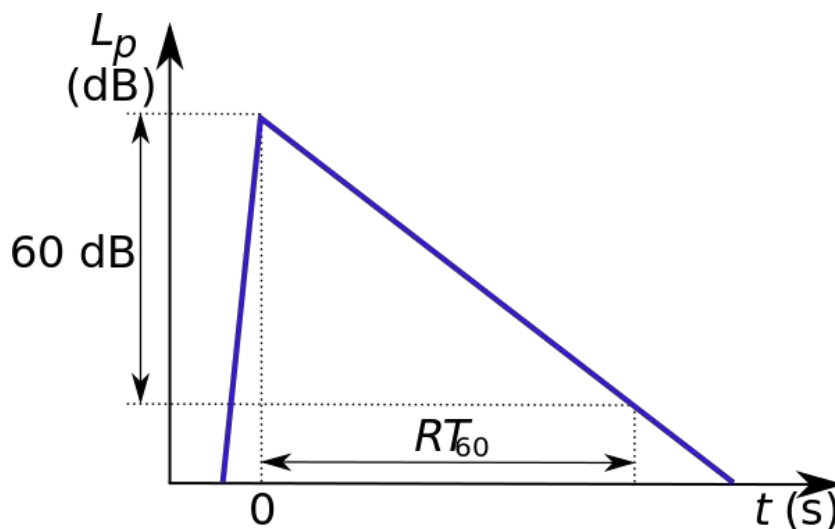
Οι ιδιότητες του *reverb*[9] είναι πιο εμφανείς στην περίπτωση ενός απότομου ηχητικού κρότου, όπως ένα στιγμιαίο χειροκρότημα ή ο ήχος που παράγει μια πόρτα που χτυπάει σε ένα μεγάλο δωμάτιο. Αρχικά, είναι δυνατόν το αυτί να ακούσει αντίλαλους (φαινόμενο της ηχούς), οι οποίοι αναφέρονται ως πρώιμες αντανακλάσεις. Ο χρόνος μεταξύ του αρχικού ήχου που παράγεται και της άφιξη της πρώτης αντανάκλασης αυτού, αναφέρεται ως χρόνος καθυστέρηση (*delay time*). Αυτές οι αρχικές καθυστερήσεις δίνουν στον ακροατή μια αίσθηση του συνολικού μεγέθους της ακουστικής του χώρου.

Αφού ταξιδέψουν αρκετές φορές οι καθυστερημένοι κρότοι προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου, οι επιμέρους καθυστερημένοι ήχοι επικαλύπτονται όλο και περισσότερο ο ένας με τον άλλον. Αυτός ο συνδυασμός των ήχων ονομάζεται *clutter* (ακαταστασία), και δίνει στον ακροατή την αίσθηση ποιότητας

της ακουστικής αντανάκλασης, ή του «liveliness» του περιβάλλοντος ακρόασης. Το συνδυασμένο μήκος αυτών των φάσεων ονομάζεται χρόνος απόσβεσης (decay time).

3.1.2 Χρόνος Αντήχησης (Reverberation Time)

Το πρότυπο που χρησιμοποιείται στην ακουστική της αρχιτεκτονικής είναι ο χρόνος που απαιτείται για να πέσει το ηχητικό σήμα με reverb στα 60 dB κάτω από το επίπεδο του αρχικού ήχου (χρόνος αντήχησης - reverberation time) [8]. Αυτός ο όρος είναι συχνά συντομογραφία ως RT60 (**Εικόνα 3.1**). Ο χρόνος αντήχησης αναφέρεται συχνά σαν μία τιμή, αν μετρηθεί ως ένα wide band signal (20 Hz έως 20kHz), ωστόσο, επειδή εξαρτάται από τη συχνότητα, μπορεί να περιγραφεί με μεγαλύτερη ακρίβεια όσον αφορά τις ζώνες συχνοτήτων (μια οκτάβα, 1/3 οκτάβας, 1/6 οκτάβας, κ.λπ.). Επειδή υπάρχει εξάρτηση από τη συχνότητα, ο χρόνος αντήχησης, μετρημένος σε narrow bands, θα διαφέρει ανάλογα με τη ζώνη συχνοτήτων που μετράται. Για ακρίβεια, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το εύρος των συχνοτήτων που αναφέρεται σε μια μέτρηση του χρόνου αντήχησης.



Εικόνα 3.1. Ένταση ήχου σε έναν χώρο με αντήχηση που διεγείρεται από ένα παλμό, ως συνάρτηση του χρόνου (απλοποιημένο διάγραμμα).

Στα τέλη του 19ου αιώνα, ο Wallace Clement Sabine ξεκίνησε πειράματα στο Πανεπιστήμιο του Χάρβαρντ ώστε να

διερευνήσει τις επιπτώσεις της απορρόφησης του χρόνου αντήχησης. Χρησιμοποιώντας ένα φορητό wind chest (πνευστό) και ένα organ pipe (εκκλησιαστικό ηλεκτροφόρο πνευστό όργανο) ως πηγή ήχου, ένα χρονόμετρο και τα αυτιά του, μέτρησε το χρόνο από τη διακοπή της πηγής μέχρι το inaudibility (μια διαφορά περίπου 60 dB). Βρήκε ότι ο χρόνος αντήχησης είναι ανάλογος με τις διαστάσεις του δωματίου και αντιστρόφως ανάλογος με την τιμή της απορρόφησης.

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης για ένα χώρο στον οποίο παίζεται μουσική εξαρτάται από τον τύπο της μουσικής που πρόκειται να αναπαραχθεί στο χώρο. Τα δωμάτια που χρησιμοποιούνται για την ομιλία συνήθως χρειάζονται ένα μικρότερο χρόνο αντήχησης, έτσι ώστε η ομιλία να μπορεί να γίνει κατανοητή με μεγαλύτερη σαφήνεια. Αν ο ανακλώμενος ήχος από μία συλλαβή ακούγεται ακόμα όταν η επόμενη συλλαβή ξεκινά, μπορεί να είναι δύσκολο να καταλάβουμε τι ειπώθηκε. Αν από την άλλη πλευρά, ο χρόνος αντήχησης είναι πολύ σύντομος, μπορεί να επηρεάσουν την τονική ισορροπία και την ένταση του ήχου. Το εφέ του reverb χρησιμοποιείται συχνά σε στούντιο για να προστεθεί βάθος στον ήχο. Η αντήχηση αλλάζει τη φασματική δομή του ήχου, αλλά δε μεταβάλλει την τονικότητα.

Στους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο αντήχησης ενός δωματίου περιλαμβάνονται το μέγεθος και το σχήμα του χώρου, καθώς επίσης τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του δωματίου. Κάθε αντικείμενο που τοποθετείται μέσα στο χώρο μπορεί επίσης να επηρεάσει το χρόνο αντήχησης, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων και ότι μπορεί να έχουν μαζί τους.

3.1.3 Εξίσωση του Sabine

Η εξίσωση αντήχησης (reverberation equation) του Sabine[8] αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1890 με ένα εμπειρικό τρόπο. Ίδρυσε μια σχέση μεταξύ του RT60 ενός δωματίου, του όγκο του, και της συνολικής απορρόφησης του (σε *sabins*). Αυτό δίνεται από την εξίσωση:

$$RT_{60} = \frac{24 \ln 10^1}{c_{20}} \frac{V}{Sa} \approx 0.1611 \text{ sm}^{-1} \frac{V}{Sa}$$

όπου C_{20} είναι η ταχύτητα του ήχου στο δωμάτιο (20 βαθμούς Κελσίου), V ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα, S η συνολική επιφάνεια του δωματίου σε τ.μ., a ο μέσος συντελεστής απορρόφησης των επιφανειών δωματίου, και Sa η συνολική απορρόφηση σε *sabins*.

Η συνολική απορρόφηση σε *sabins* (και συνεπώς ο χρόνος αντήχησης) αλλάζει γενικά ανάλογα με τη συχνότητα (η οποία ορίζεται από τις ακουστικές ιδιότητες του χώρου). Η εξίσωση δεν λαμβάνει υπόψη το σχήμα δωματίου ή τις απώλειες κατά τη διάρκεια ταξιδιού του ήχου μέσω του αέρα (σημαντικό σε μεγαλύτερους χώρους). Τα περισσότερα δωμάτια απορροφούν λιγότερη ενέργεια του ήχου σε χαμηλότερο εύρος συχνοτήτων με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερους χρόνους αντήχησης σε χαμηλότερες συχνότητες.

Ο Sabine κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος αντήχησης εξαρτάται από την ανακλαστικότητα του ήχου από τις διάφορες επιφάνειες που είναι διαθέσιμες μέσα στην αίθουσα. Εάν οι αντανάκλασεις έχουν μια σταθερή σχέση φάσης, ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας θα είναι μεγαλύτερος και ο ήχος θα χρειαστεί περισσότερο χρόνο για να σβήσει.

Ο χρόνος αντήχησης RT_{60} και ο όγκος V του δωματίου επηρεάζουν έντονα την κρίσιμη απόσταση d_c (conditional equation):

$$d_c \approx 0.057 \cdot \sqrt{\frac{V}{RT_{60}}}$$

, όπου η κρίσιμη απόσταση d_c μετριέται σε μέτρα, ο όγκος V μετριέται σε κυβικά μέτρα, και ο χρόνος αντήχησης RT_{60} μετριέται σε δευτερόλεπτα.

3.2 Τεχνικές Δημιουργίας Εφέ Αντήχησης

Ένας μουσικός καλλιτέχνης ή ένας παραγωγός ζωντανής ή ηχογραφημένης μουσική χρησιμοποιεί συχνά το εφέ του reverb στη δουλειά του. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα για να παράγουν ή να προσομοιώσουν το εφέ του reverb[8].

● **Φυσικό δωμάτιο**

Ο πιο φυσικός τρόπος για τη δημιουργία αντήχησης είναι να έχουμε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο ώστε να παράξουμε το είδος της αντήχησης που θέλουμε. Για παράδειγμα, πολλά στούντιο ηχογράφησης έχουν απορροφητικό υλικό στους τοίχους για να περιορίσουν το reverb και την επίδραση του δωματίου ηχογράφησης στον ήχο. Ένα άλλο παράδειγμα είναι μια αίθουσα συναυλιών με ειδικά σχεδιασμένα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε ο ήχος που φτάνει στο αυτί του ακροατή να είναι ιδανικός. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν μπορούμε να ελέγξουμε το δωμάτιο και θα θέλαμε πραγματικά να μπορούμε να έχουμε πρόσθετη αντήχησης. Ως εκ τούτου, με την πάροδο του χρόνου έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές μέθοδοι για την παραγωγή reverb και έχουν χρησιμοποιηθεί για μουσικούς σκοπούς.

● **Plate reverberators (αντήχηση με πλάκα μέταλλου)**

Ένα σύστημα plate reverb (πλάκας αντήχησης) χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα (transducer), παρόμοια με ένα μεγάφωνο, για να δημιουργήσει κραδασμούς σε μια μεγάλη πλάκα από ένα φύλλο μετάλλου. Ένας μαγνήτης (pickup) συλλέγει τις δονήσεις καθώς αναπηδούν σε ολόκληρη την πλάκα, και το αποτέλεσμα εξάγεται ως ένα ακουστικό σήμα. Στα τέλη της δεκαετίας του 1950, η Elektro-Mess-Technik (EMT) εισήγαγε το EMT 140· ένα μοντέλο 270 κιλών, δημοφιλές στα στούντιο ηχογραφήσεων, συμβάλλοντας σε πολλές επιτυχημένες ηχογραφήσεις όπως άλμπουμ των Beatles και των Pink Floyd που ηχογραφήθηκαν στο Abbey Road Studios στη δεκαετία του 1960, και άλλα που ηχογραφήθηκαν από τον Bill Porter στο RCA Studio B του Νάσβιλ.

Οι πρώτες μονάδες είχαν έναν μαγνήτη (pickup) για μονοφωνική έξοδο, ενώ μεταγενέστερα μοντέλα είχαν δύο μαγνήτες για στερεοφωνική χρήση. Ο χρόνος αντήχησης μπορεί να ρυθμιστεί με ένα στρώμα απόσβεσης, που κατασκευάζεται από πλασιωμένα ακουστικά πλακίδια. Όσο πιο κοντά είναι το στρώμα απόσβεσης, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος αντήχησης. Ωστόσο, το στρώμα δεν αγγίζει ποτέ την πλάκα. Ορισμένες μονάδες διέθεταν και τηλεχειριστήριο.

- **Spring reverberators (αντήχηση με ελατήρια)**

Ένα σύστημα spring reverb χρησιμοποιεί ένα μετατροπέα (transducer) στο ένα άκρο ενός ελατηρίου και έναν μαγνήτη στο άλλο, παρόμοια με τον μετατροπέα και τον μαγνήτη που χρησιμοποιούνται στους plate reverberators, για τη δημιουργία και τη συλλογή των δονήσεων μέσω του μεταλλικού ελατηρίου. Ο Laurens Hammond εφηύρετο 1939 μια πατέντα μηχανισμού αντήχησης βασισμένη στα ελατήρια. Οι ενισχυτές κιθάρας ενσωματώνουν συχνά το spring reverb λόγω της συμπαγούς κατασκευής τους και του χαμηλού κόστους. Οι spring reverberators ήταν κάποτε ευρέως διαδεδομένοι σε ημι-επαγγελματικές ηχογραφήσεις, λόγω του μικρού κόστους τους και του μικρού μεγέθους τους.



- **Digital reverberators (ψηφιακή αντήχηση)**

Οι digital reverberators χρησιμοποιούν διάφορους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος, προκειμένου να δημιουργήσουν το εφέ αντήχησης. Καθώς η αντήχηση ουσιαστικά προκαλείται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό αντίλαλων, απλοί αλγόριθμοι αντήχησης χρησιμοποιούν διάφορα κυκλώματα καθυστέρησης για να δημιουργήσουν μια μεγάλη σειρά αντίλαλων που σβήνουν. Πιο προηγμένες γεννήτριες digital reverb μπορούν να προσομοιώσουν την απόκριση χρόνου και συχνότητας ενός συγκεκριμένου δωματίου (χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις του δωματίου, την απορρόφηση και άλλες ιδιότητές του). Σε μια αίθουσα μουσικής, ο άμεσος ήχος φτάνει πάντα στο αυτί του ακροατή πρώτος, γιατί ακολουθεί τη συντομότερη διαδρομή. Λίγο μετά το άμεσο ήχο, φτάνει η αντήχηση του ήχου. Ο χρόνος μεταξύ των δύο ονομάζεται «προ-καθυστέρηση» (pre-delay).

Η αντίληψη ή reverb, είναι ένα εφέ ήχου που χρησιμοποιείται παγκοσμίως στα digital audio workstations (DAWs) και VST plug-ins.

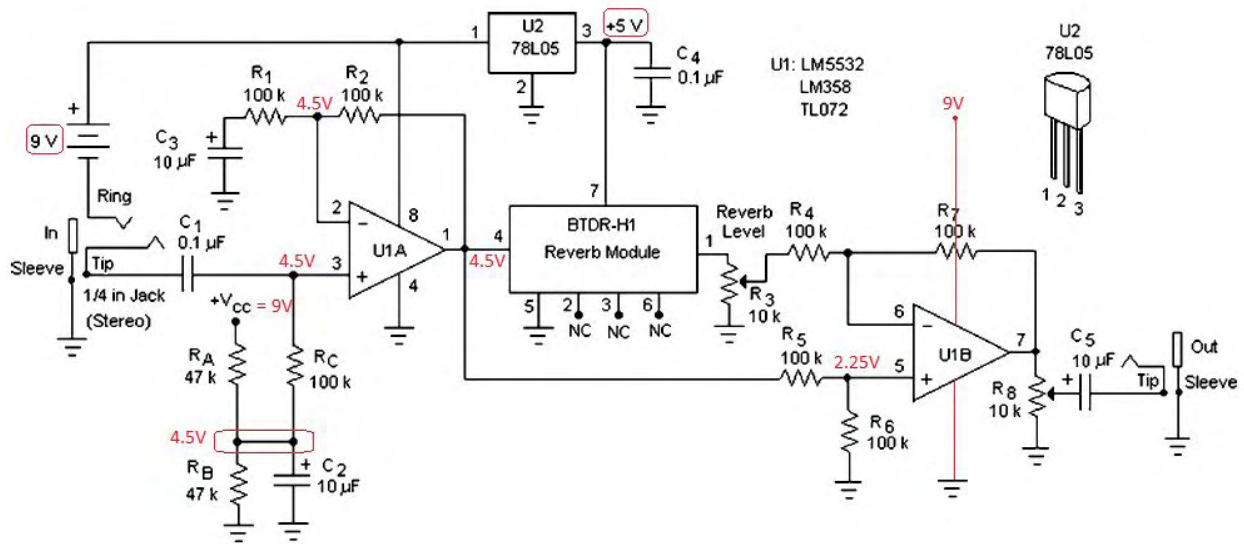
3.3 Ανάλυση του Κυκλώματος Reverb

Στην ενότητα αυτή, θα ασχοληθούμε με τη μελέτη και την κατασκευή ενός κυκλώματος ψηφιακού reverb. Συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιήσουμε το reverb module BTDR-1H (**Εικόνα 3.2**) ολοκληρωμένου κυκλώματος με medium decay time (2.5sec).



Εικόνα 3.2

Η τοπολογία του κυκλώματος για ένα πεντάλ ψηφιακού reverb είναι στην πραγματικότητα αρκετά παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται για ένα αναλογικό reverb ελατηρίων. Το αρχικό σήμα (DRY signal) της κιθάρας εισέρχεται στο κύκλωμα και στη συνέχεια, χωρίζεται έτσι ώστε ένα τμήμα του πηγαίνει στο ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) παραγωγής του reverb (WET signal), και το υπόλοιπο (DRY signal) αποστέλλεται στο τέλος του κυκλώματος για να αναμιχθεί με το τμήμα που πηγαίνει στο reverb[10] (**Εικόνα 3.3**) [1].



Εικόνα 3.3

Πιο συγκεκριμένα, το σήμα εισέρχεται από ένα στερεοφωνικό input jack. Η τροφοδοσία του κυκλώματος γίνεται με μία μπαταρία 9V. Αρχικά, το σήμα θα περάσει από τον τελεστικό ενισχυτή U1A. Οι αντιστάσεις R_A και R_B σχηματίζουν έναν διαιρέτη τάσης ώστε να δώσουν μια τάση αναφοράς ίση με τη μισή τιμή της τάσης $V_{cc} = 9V$, δηλαδή $V_R = 4.5 V$. Η τάση αναφοράς εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή U1A μέσω της R_C . Το ρεύμα πόλωσης που εξέρχεται από τον αναστρέφοντα ακροδέκτη είναι τυπικά πολύ μικρό (περίπου 40 nA), οπότε υπάρχει αμελητέα πτώση τάσης μετά την αντίσταση R_C , η οποία επιλέγεται να είναι μεγάλη ώστε να κρατάει υψηλή την αντίσταση εισόδου του ενισχυτή. Ο πυκνωτής C_2 χρησιμοποιείται απλά για να μειώσει τον θόρυβο εισόδου.

Η αντίσταση R_2 σχηματίζει ένα μονοπάτι τροφοδοσίας για τον τελεστικό ενισχυτή U1A. Όσον αφορά την DC ανάλυση, οι πυκνωτές C_1 , C_3 και C_5 συμπεριφέρονται ως ανοιχτοκύκλωμα και το μη αναστρέφων DC κέρδος του τελεστικού ενισχυτή U1A είναι 1. Έτσι, η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή U1A είναι ίδια με την τάση που εμφανίζεται στον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη (4.5 V).

Όσον αφορά την AC ανάλυση, οι πυκνωτές λειτουργούν σαν βραχυκυκλώματα και το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή U1A υπολογίζεται ως εξής:

$$A_v = \frac{R_2 + R_1}{R_1} = \frac{100k + 100k}{100k} = 2$$

Η αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή U1A είναι περίπου:

$$R_{in} \cong R_C$$

Στη συνέχεια, ένα μέρος του σήματος πηγαίνει στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του reverb και το υπόλοιπο στον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη του τελεστικού ενισχυτή U1B. Ο τελεστικός ενισχυτής U1B λειτουργεί σαν διαφορικός ενισχυτής. Πρακτικά, παίρνουμε τα δύο σήματα (αυτό που προκύπτει μετά την έξοδο από το reverb και το αρχικό ενισχυμένο σήμα) και τα αφαιρούμε. Αυτό το κάνουμε για να κρατήσουμε το βασικό σήμα και μεταβάλλοντας την αντίσταση R_3 (Reverb Level) να προσθέσουμε την ποσότητα του reverb που επιθυμούμε. Όταν η αντίσταση R_3 ρυθμίζεται στα 10k (max) τότε δεν περνά καθόλου το σήμα από το reverb και στην έξοδο παίρνουμε το αρχικό (dry) σήμα. Όσο η αντίσταση τείνει προς το 0 η αίσθηση του reverb γίνεται όλο και περισσότερο αντιληπτή. Στο 0 έχουμε το 100% του reverb.

Έτσι, μετά την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή U1A ένα μέρος του σήματος εισέρχεται από τον ακροδέκτη 4 στο reverb module (BTDR-H1). Στους ακροδέκτες του BTDR-H1 αντιστοιχούν τα εξής:

Pin	Function
1	V_o
2	V_o
3	Signal ground
4	V_{in}
5	Power ground (use pin only pin 5 if separate signal and power grounds are not used)
6	N.C.
7	V_{CC} (+5 V)

Η πόλωση του reverb module στον ακροδέκτη 7 στα +5V γίνεται από τον ρυθμιστή τάσης U2 (regulator). Για να αποφευχθούν ταλαντώσεις και η υπερθέρμανση του regulator τοποθετούμε στην έξοδό του έναν μικρό πυκνωτή C_4 .

Το BTDR-1H έχει εσωτερικούς πυκνωτές σύζευξης, έτσι πυκνωτές εισόδου και εξόδου δεν απαιτούνται.

Το σήμα μετά το reverb module φτάνει μέσω της αντίστασης R_4 στον αναστρέφοντα ακροδέκτη του τελεστικού ενισχυτή U1B. Στον

μη αναστρέφοντα ακροδέκτη εισέρχεται το σήμα εξόδου του τελεστικού ενισχυτή U1A. Ο τελεστικός ενισχυτής U1B πολώνεται από την τάση στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή U1A (4.5 V), μέσω ενός διαιρέτη τάσης στα 2.25 V.

Η έξοδος του διαφορικού ενισχυτή U1B δίνεται από τη σχέση:

$$v_o = \frac{R_7}{R_4} v_{id}$$

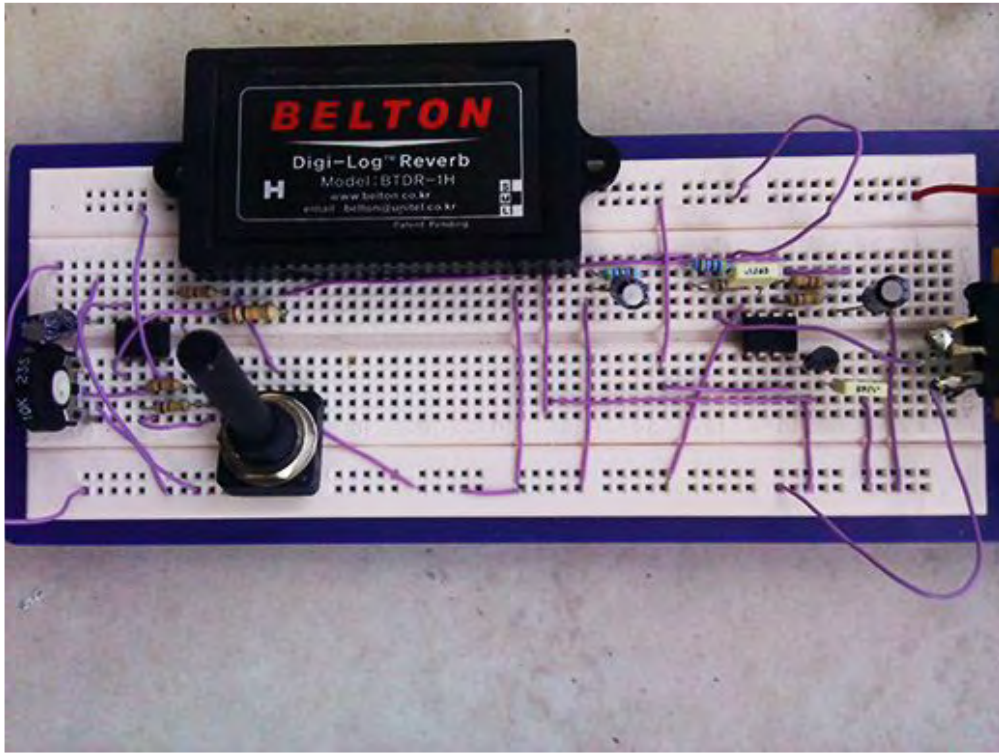
Επομένως, το κέρδος του ενισχυτή U1B είναι:

$$A_v = \frac{R_7}{R_4} = \frac{100k}{100k} = 1$$

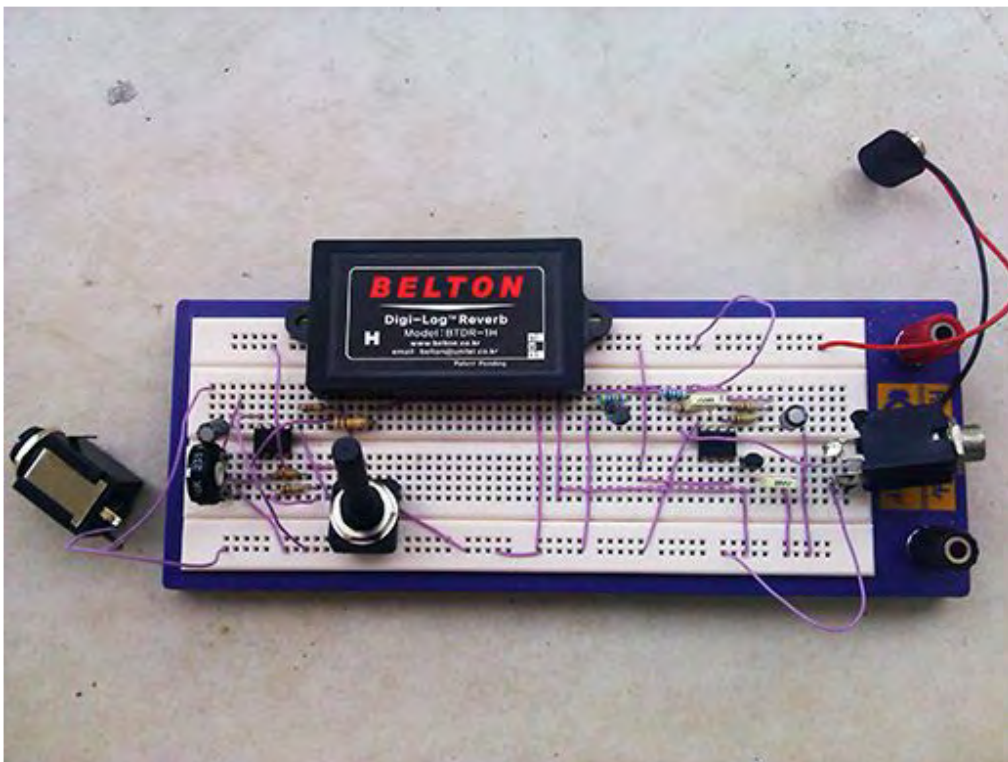
Τέλος, η έξοδος περνάει από μια μεταβαλλόμενη αντίσταση R_8 10k, η οποία πρακτικά ρυθμίζει την ένταση του ηχητικού σήματος στην έξοδο. Το σήμα εξόδου εξέρχεται από ένα μονοφωνικό output jack, στο συνδέεται ο ενισχυτής κιθάρας ώστε να ακούσουμε το ηχητικό αποτέλεσμα.

3.4 Αποτελέσματα Εργαστηριακής Προσομοίωσης του Κυκλώματος Αντήρησης

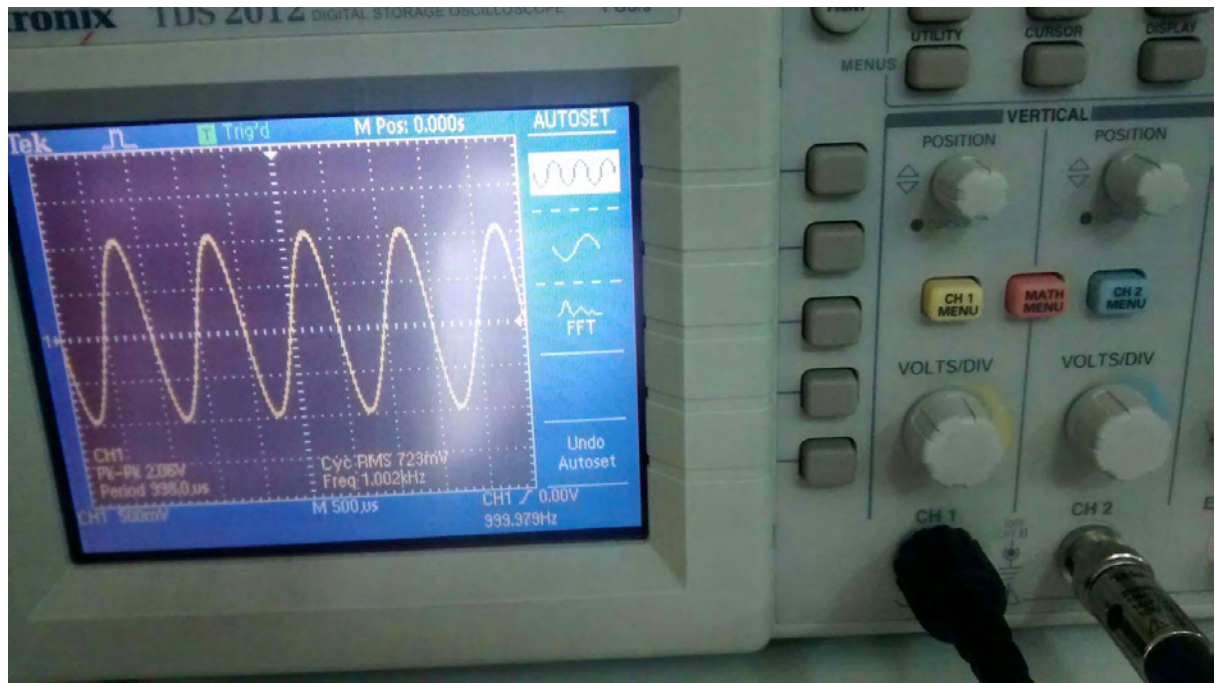
Παρότι τα αποτελέσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι κατά βάση ακουστικά, υλοποιήθηκε εργαστηριακή προσομοίωση για την παρατήρηση του σήματος σε έναν παλμογράφο. Το κύκλωμα κατασκευάστηκε σε πλακέτα Breadboard, όπως φαίνεται στις **Εικόνες 3.4 α,β**. Ως είσοδος δόθηκε ένα ημιτονοειδές σήμα με συχνότητα 1kHz και τάση $-1 \leftrightarrow 1$ ($2 V_{p-p}$), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.5**.



Εικόνα 3.4α

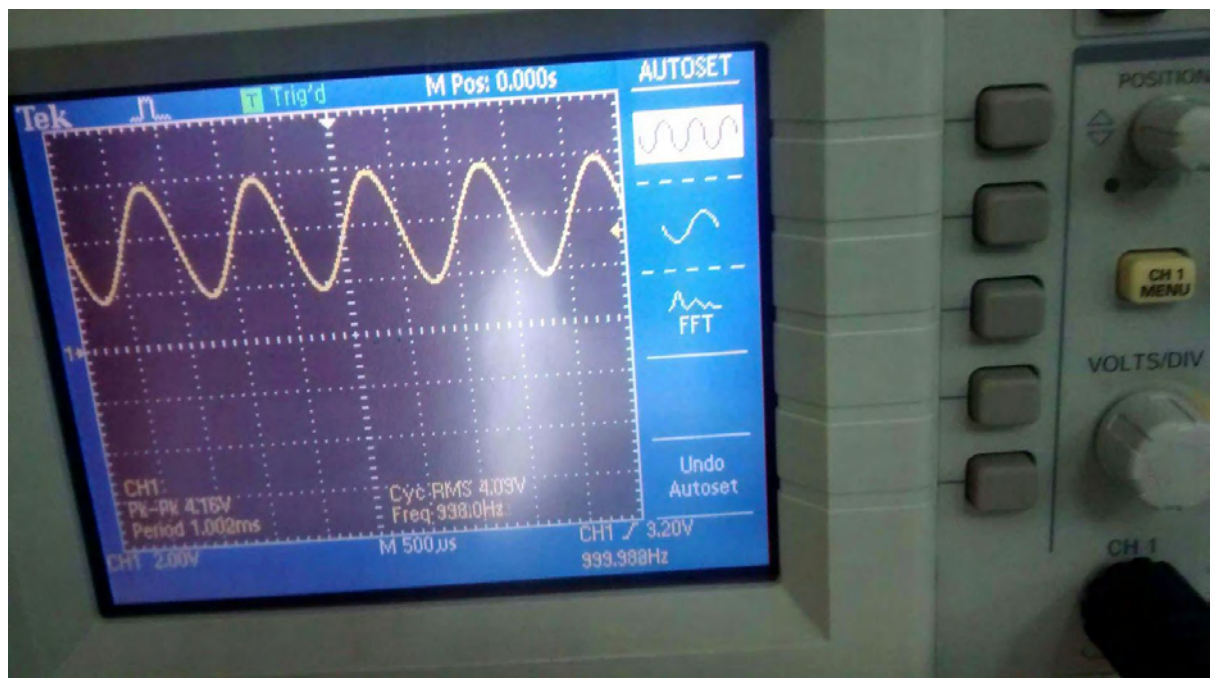


Εικόνα 3.4β



Εικόνα 3.5

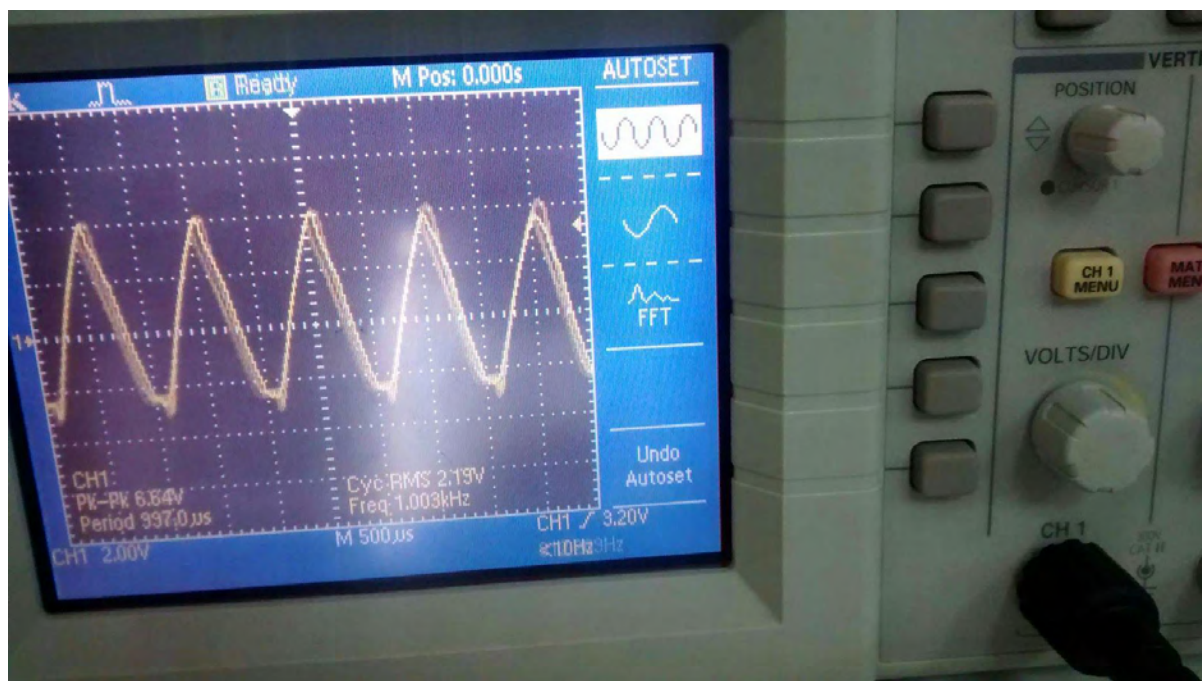
Στην **Εικόνα 3.6** φαίνεται το σήμα μετά την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή U1A και πριν την είσοδό του στο reverb module.



Εικόνα 3.6

Παρατηρούμε την ενίσχυση του σήματος με κέρδος $A_v = 2$, καθώς επίσης και τη μεταφορά του σήματος εξαιτίας της αποκοπής της DC συνιστώσας από τον πυκνωτή C_1 .

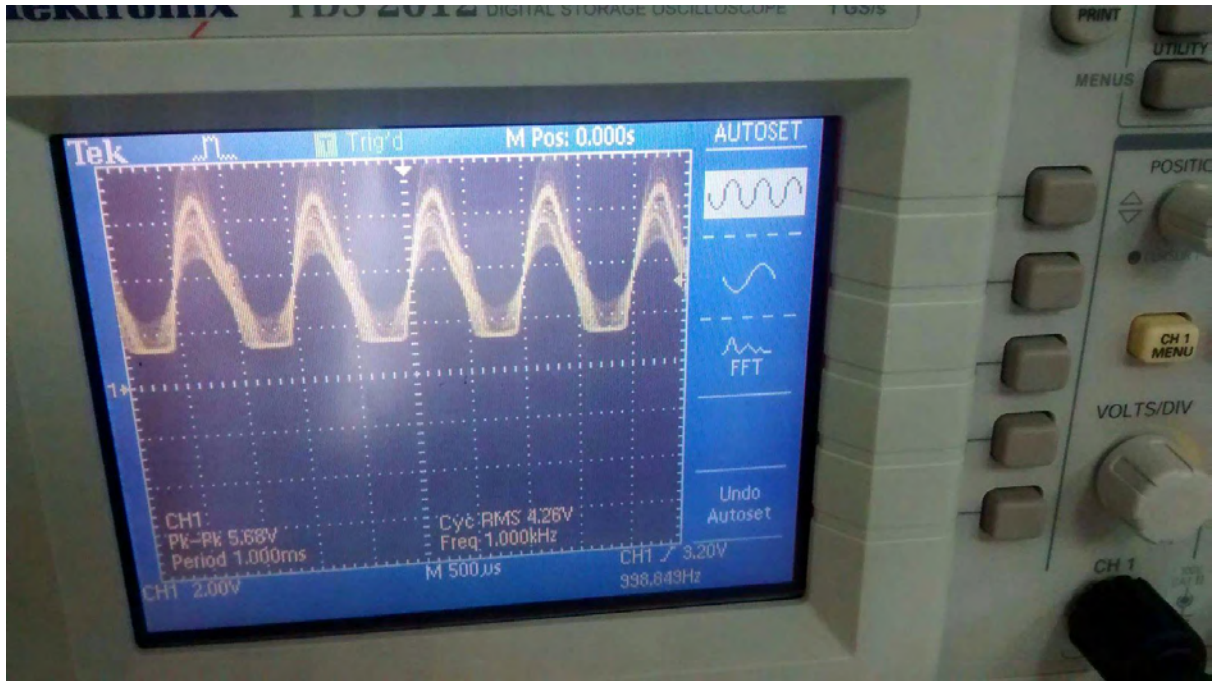
Στην **Εικόνα 3.7** βλέπουμε το σήμα στην έξοδο του reverb module (ακροδέκτη 4).



Εικόνα 3.7

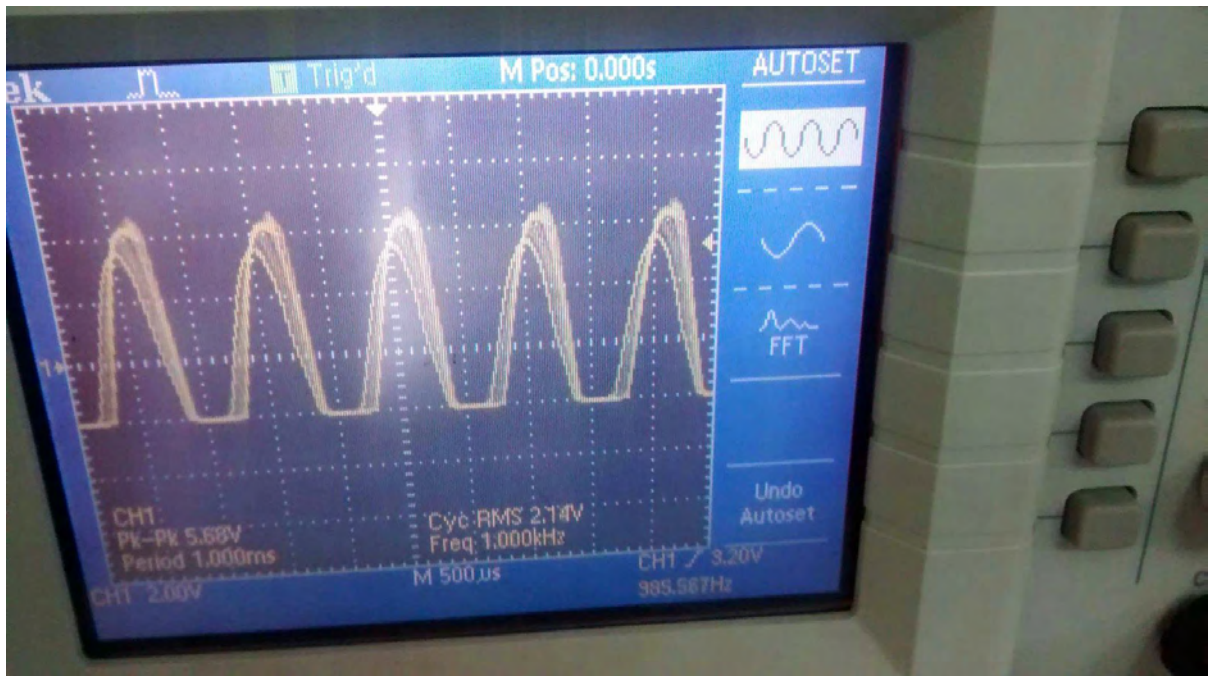
Στη φάση αυτή παρατηρούμε την πρόσμιξη άλλων "ξεθωριασμένων" σημάτων που έχουν υποστεί μικρές καθυστερήσεις σε σχέση με το αρχικό. Ακόμη, παρατηρούμε ότι το σήμα έχει υποστεί μια παραμόρφωση σε σχέση με το αρχικό. Η παραμόρφωση αυτή οφείλεται στην εμφάνιση αρμονικών συχνοτήτων ως αποτέλεσμα των αντανάκλασεων.

Στην **Εικόνα 3.8** φαίνεται το σήμα μετά την έξοδο του διαφορικού ενισχυτή U1B.



Εικόνα 3.8

Εδώ βλέπουμε το αποτέλεσμα της διαφοράς των δύο σημάτων (του αρχικού και του σήματος μετά την έξοδο του reverb). Τέλος, βλέπουμε το σήμα στην έξοδο του κυκλώματος στην **Εικόνα 3.9**.



Εικόνα 3.9

Εδώ μπορούμε να διακρίνουμε ένα μέρος του αρχικού σήματος μαζί με άλλα “ξεθωριασμένα” σήματα που έχουν υποστεί κάποια καθυστέρηση. Παρατηρούμε πως το σήμα επαναφέρεται στο αρχικό offset καθώς ο πυκνωτής C_8 αφήνει να περάσει η AC συνιστώσα.

Κεφάλαιο 4

Κυκλώματα Καθυστέρησης

Στο κεφάλαιο αυτό, θα μελετήσουμε ένα ακόμη βασικό κύκλωμα εφέ κιθάρας, το κύκλωμα καθυστέρησης (delay). Συγκεκριμένα, η μελέτη αφορά την κατασκευή ενός ψηφιακού (digital) delay. Αρχικά, γίνεται μια ανάλυση πάνω στα βασικά χαρακτηριστικά του εφέ καθυστέρησης. Στη συνέχεια, γίνεται μελέτη και ανάλυση του κυκλώματος. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα της κατασκευής του κυκλώματος.

4.1 Θεωρία της Καθυστέρησης

4.1.1 Καθυστέρηση (Delay) [11]

Ήδη από τη θεωρία της αντήχησης γνωρίζουμε ότι, ο χρόνος μεταξύ του αρχικού ήχου που παράγεται και της άφιξης της πρώτης αντανάκλασης αυτού, αναφέρεται ως χρόνος καθυστέρησης. Το εφέ καθυστέρησης βασίζεται πάνω σε αυτή τη θεωρία. Ουσιαστικά, το delay είναι ένα ακουστικό εφέ που καταγράφει το σήμα εισόδου σε ένα ακουστικό μέσο αποθήκευσης και στη συνέχεια, το αναπαράγει μετά από ένα χρονικό διάστημα. Όσον αφορά το καθυστερημένο σήμα, μπορεί είτε να αναπαράγεται πολλές φορές, είτε να επανεγγράφεται η αναπαραγωγή του, ώστε να δημιουργηθεί ο ήχος μια επαναλαμβανόμενης, φθίνουσας ηχώς.

Ο χρόνος καθυστέρησης μπορεί να είναι τόσο μικρός όσο μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου ή τόσο μεγάλος όσο μερικά δευτερόλεπτα. Το εφέ καθυστέρησης μπορεί να περιλαμβάνει μια μοναδική ηχώ ή πολλαπλές, που συνήθως "σβήνουν" γρήγορα.

4.1.2 Εξέλιξη Τεχνολογίας Καθυστέρησης [11]

Τα πρώτα συστήματα καθυστέρησης

Τα πρώτα εφέ καθυστέρησης υλοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας αυτοσχέδιες ταινίες που επαναλαμβάνονταν (loop tapes) σε μπομπίνες μαγνητικών συστημάτων καταγραφής. Μειώνοντας ή αυξάνοντας το μήκος της ταινίας επανάληψης και προσαρμόζοντας τις κεφαλές ανάγνωσης και εγγραφής, το εφέ καθυστέρησης

μπορούσε να ελέγχεται. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιούνταν κυρίως από τους πρώιμους συνθέτες του μουσικού είδους *Musique concrète* (με ιδρυτή τον Pierre Schaeffer), και συνθέτες όπως ο Karlheinz Stockhausen, οι οποίοι είχαν επινοήσει περίτεχνα συστήματα που περιλάμβαναν μεγάλες ταινίες, πολλαπλές συσκευές εγγραφής και συστήματα αναπαραγωγής, επεξεργάζοντας τον ήχο ενός ή συνόλου μουσικών. Οι Μηχανικοί Ήχου που δούλευαν πάνω στην ποπ μουσική σύντομα υιοθέτησαν παρόμοιες τεχνικές, ώστε να αυξήσουν τη χρήση του *plate reverb* και άλλες τεχνικές ηχογράφησης για την προσομοίωση της φυσικής ηχώς.

Στα τέλη του 1940 και στις αρχές του 1950, αρκετοί Μηχανικοί Ήχου ξεκίνησαν να φτιάχνουν συσκευές για στούντιο ηχογράφησης και αργότερα περισσότερες συμβατές μηχανές που θα χρησιμοποιούνταν σε συναυλίες. Πρωτοπόρος ήταν ο Les Paul. Μια συσκευή ορόσημο ήταν η *EchoSonic* του Αμερικανού Ray Butts, ένας φορητός ενισχυτής κιθάρας με ενσωματωμένη ταινία επανάληψης που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη *country* μουσική (Chet Atkins) και ιδιαίτερα στο *rock and roll* (Scotty Moore).

Η ηχώ ταινιών έγινε διαθέσιμη στο κοινό τη δεκαετία του 1950. Η **Μηχανή της ηχώς (Echo Machine)** είναι το πρώτο όνομα για τη συσκευή που επεξεργαζόταν τον ήχο ηλεκτρονικών οργάνων και επαναλάμβανε τον ήχο τους, προσομοιώνοντας την ηχώ. Η συσκευή έγινε διάσημη στους κιθαρίστες και χρησιμοποιήθηκε μεταξύ άλλων από τον Brian May, τον Jimmy Page και τον Syd Barrett.

Ένα παράδειγμα είναι το *Echoplex* το οποίο χρησιμοποίησε μία ταινία επανάληψης. Το μήκος της καθυστέρησης ρυθμιζόταν με την αλλαγή της απόστασης μεταξύ ταινίας εγγραφής και των κεφαλών αναπαραγωγής. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το *Roland Space Echo* με μια ταινία εγγραφής και πολλαπλών αναπαραγωγών και μεταβλητή ταχύτητα ταινίας. Ο χρόνος μεταξύ των επαναλήψεων της ηχώς ρυθμιζόταν μεταβάλλοντας την ταχύτητα της ταινίας. Το μήκος ή η ένταση της ηχώς ρυθμιζόταν με την αλλαγή της ποσότητας του σήματος ηχούς που επέστρεφε στο *pre-echo* σήμα. Διαφορετικά εφέ μπορούσαν να δημιουργηθούν με το συνδυασμό των διαφορετικών κεφαλών αναπαραγωγής. Ορισμένα μοντέλα περιελάμβαναν επίσης και αντήχηση με ελατήρια.

Αναλογική Καθυστέρηση

Πριν από την εφεύρεση της τεχνολογίας καθυστέρησης ήχου, αν οι καλλιτέχνες ήθελαν να εισάγουν στη μουσική τους το εφέ της καθυστέρησης, έπρεπε να κάνουν την ηχογράφηση σε έναν χώρο που είχε φυσική αντήχηση, γεγονός το οποίο αποτελούσε συχνά ταλαιπωρία για τους μουσικούς και τους μηχανικούς. Η δημοτικότητα του εύκολου στην εφαρμογή και σε πραγματικό χρόνο εφέ της ηχώς οδήγησε στην παραγωγή των συστημάτων που προσφέρουν μια μονάδα εφέ που θα μπορούσε να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ηχώ του κάθε διαστήματος ή πλάτους. Η παρουσία πολλαπλών «taps» (κεφαλές αναπαραγωγής) κατέστησε εφικτό να έχουμε καθυστερήσεις σε διάφορα ρυθμικά διαστήματα. Αυτό πρόσφερε στους μουσικούς ένα επιπλέον μέσο έκφρασης πάνω στη φυσική περιοδική ηχώ.

Αναλογική καθυστέρηση βασισμένη σε ταινία

Πολλοί επεξεργαστές καθυστέρησης βασισμένοι στην αναλογική εγγραφή ταινίας, όπως το EchoSonic του Ray Butts (1952), το Echoplex του Mike Battle (1959), ή το Roland Space Echo (1973), χρησιμοποίησαν την μαγνητική ταινία ως μέσο εγγραφής και αναπαραγωγής. Οι ηλεκτροκινητήρες καθοδηγούσαν μία ταινία επανάληψης μέσω μιας συσκευής με ποικιλία μηχανισμών, επιτρέποντας την τροποποίηση των παραμέτρων του εφέ. Στην περίπτωση του δημοφιλούς Echoplex EP-2, η κεφαλή αναπαραγωγής παρέμενε σταθερή, κατά τη διάρκεια της εγγραφής και η κεφαλή διαγραφής μπορούσε να ολισθαίνει, έτσι ώστε ο χρόνος καθυστέρησης της ηχώς να προσαρμόζεται με την αλλαγή της απόστασης μεταξύ των κεφαλών εγγραφής και αναπαραγωγής. Στο Space Echo, όλες οι κεφαλές ήταν σταθερές, αλλά η ταχύτητα της ταινίας μπορούσε να προσαρμοστεί, αλλάζοντας το χρόνο καθυστέρησης. Η λεπτή μαγνητική ταινία δεν ήταν απόλυτα κατάλληλη για συνεχή λειτουργία, έτσι η ταινία επανάληψης έπρεπε να αντικατασταθεί από καιρό σε καιρό για να διατηρηθεί η πιστότητα ήχου των επεξεργασμένων ήχων.

Καθυστέρηση Στέρεας Κατάστασης (Solid State)

Οι μονάδες καθυστέρησης Στέρεας Κατάστασης χρησιμοποιώντας bucket brigade αναλογικά κυκλώματα

καθυστερήσης έγιναν διαθέσιμα στη δεκαετία του 1970 και αποτελούσαν βασική εναλλακτική πηγή ηχώς.

Ένα bucket brigade ή μια bucket brigade συσκευή (BBD) [12] είναι μια γραμμή αναλογικής καθυστέρησης (analog delay line) διακριτού χρόνου, που αναπτύχθηκε το 1969 από τους F. Sangster και K. Teer των Εργαστηρίων Έρευνας της εταιρίας Philips. Αποτελείται από μια σειρά τμημάτων χωρητικότητας C0 έως Cn. Το αποθηκευμένο αναλογικό σήμα κινείται κατά μήκος της γραμμής των πυκνωτών, κατά ένα βήμα σε κάθε κύκλο ρολογιού. Το όνομα προέρχεται σε αναλογία με τον όρο bucket brigade (αλυσίδα κάδου), που χρησιμοποιείται για μια γραμμή ανθρώπων που περνούν κουβάδες με νερό.

Η πρώτη γνωστή κατασκευή, έγινε από μια εταιρεία ενίσχυσης του ήχου με έδρα την Βοστώνη το 1976. Η βασική τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Reticon SAD1024 IC. Αυτό το τσιπ και η κατασκευή έγιναν η βάση για τη δημιουργία του ενισχυτή Rockman μερικά χρόνια αργότερα. Στη δεκαετία του 1980, η κατασκευή αυτή χρησιμοποιήθηκε από την εταιρεία BOSS για το προϊόν μαζικής παραγωγής τους.

Παρ' ότι τα κυκλώματα Στέρεας Κατάστασης αναλογικής καθυστέρησης είναι λιγότερο ευέλικτα από τα κυκλώματα ψηφιακής καθυστέρησης και γενικώς έχουν μικρότερους χρόνους καθυστέρησης, πολλά κλασικά μοντέλα, όπως το Boss DM-2 εξακολουθούν να είναι περιζήτητα για την πιο "ζεστή" και πιο φυσική ποιότητα ηχώς και της σταδιακά φθίνουσας ηχώς. Επιπλέον, πολλές εταιρείες φτιάχνουν καινούργιες αναλογικές καθυστερήσεις. Παλιά συστήματα καθυστέρησης, όπως το Roland Space Echo και Echoplex εξακολουθούν να χαίρουν μεγάλης εκτίμησης και χρησιμοποιούνται ακόμη συχνά από τις σύγχρονες μπάντες.

Ψηφιακή καθυστέρηση

Η διαθεσιμότητα φθηνών ηλεκτρονικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και του 1980, οδήγησε στην ανάπτυξη των πρώτων ψηφιακών εφέ καθυστέρησης. Αρχικά, ήταν διαθέσιμα μόνο σε ακριβές μεγάλες μεταλλικές μονάδες, αλλά καθώς το κόστος έπεσε και τα ηλεκτρονικά έγιναν μικρότερα, έγιναν διαθέσιμα σε μορφή πεντάλ. Η πρώτη ψηφιακή καθυστέρηση σε μορφή πεντάλ ήταν το Boss DD-2 που κυκλοφόρησε το 1984. Οι μεγάλες μεταλλικές μονάδες καθυστέρησης εξελίχθηκαν σε ψηφιακές μονάδες αντήχησης και σε μονάδες

πολλαπλών ψηφιακών εφέ με καλύτερα αποτελέσματα από την καθαρή καθυστέρηση, όπως το reverb και τα εφέ μετατροπής τονικότητας στην κλίμακα του χρόνου .

4.2 Ανάλυση του Κυκλώματος Καθυστέρησης

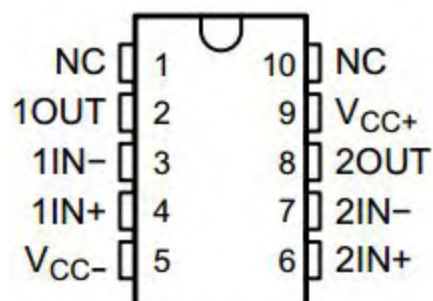
Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε το ψηφιακό κύκλωμα καθυστέρησης που φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**. Το κύκλωμα σχεδιάστηκε στο PSpice. Θα εξετάσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του και θα μελετήσουμε τις διαφορές αλλά και τις ομοιότητες που παρουσιάζει με ένα αντίστοιχο αναλογικό κύκλωμα.

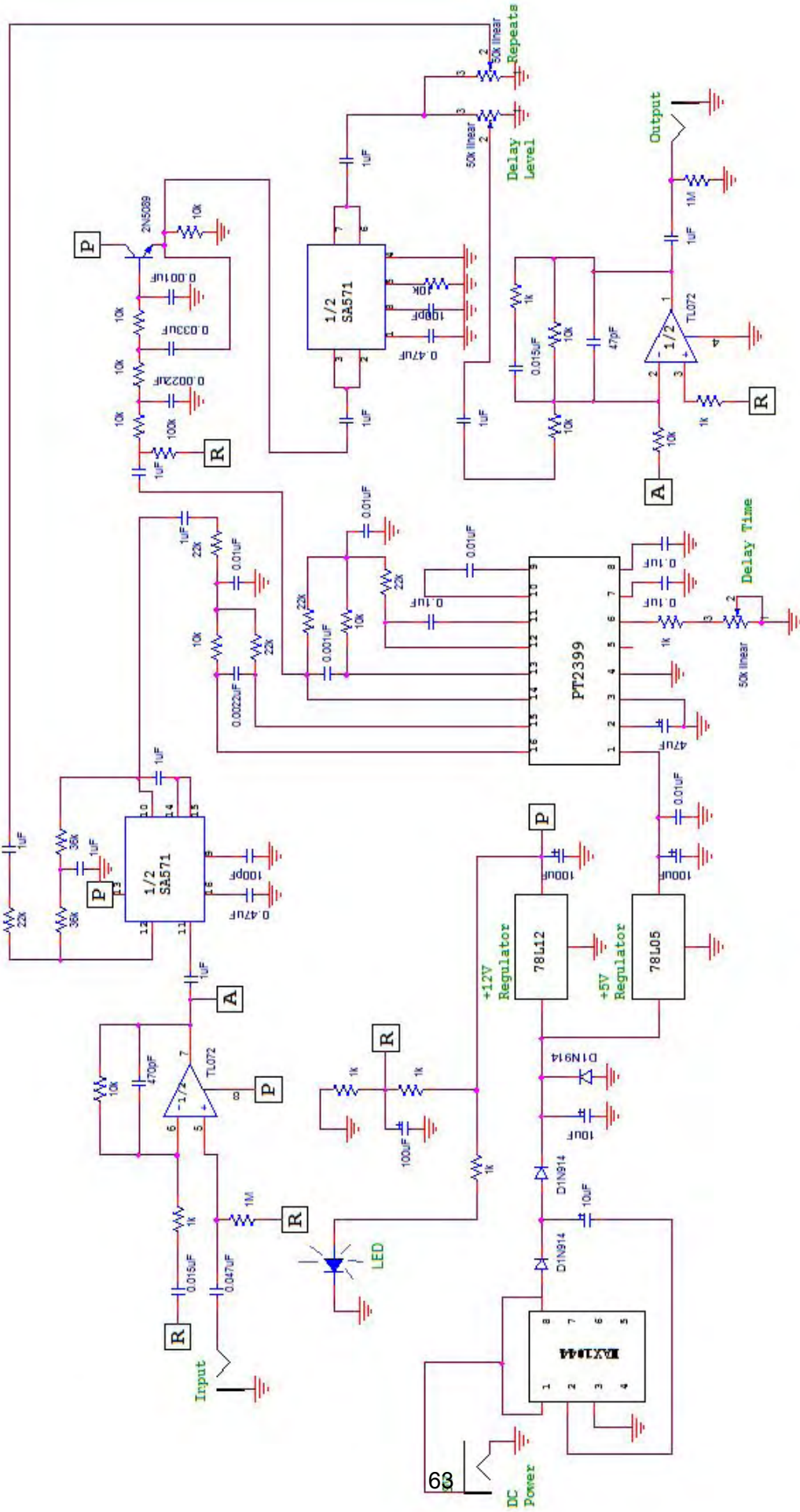
4.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο Κυκλώματος

Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία του κυκλώματος στην **Εικόνα 4.1**[17] θα παρουσιάσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του.

Τελεστικός Ενισχυτής TL072 [13]

Οι τελεστικοί ενισχυτές JFET-εισόδου έχουν χαμηλό δυναμικό πόλωσης εισόδου και ρεύμα εκτροπής και γρήγορο μέγιστο ρυθμό μεταβολής (slew rate). Τα χαμηλά επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης και θορύβου κάνουν το TL072 κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής πιστότητας και προ- ενίσχυσης ήχου. Ο ενισχυτής TL072 διαθέτει εισόδους JFET (για υψηλή αντίσταση εισόδου) σε συνδυασμό με διπολικά στάδια εξόδου ενσωματωμένα σε ένα ενιαίο μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα.





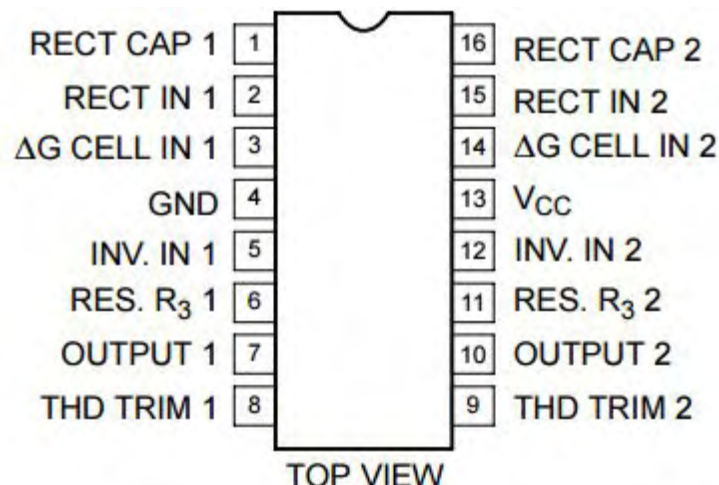
Εικόνα 4.1 Κύκλωμα Καθυσίωσης (Delay)

Συστολοδιαστολέας (Comparator) SA571 ή NE570 [14]

Στην επεξεργασία σήματος, η συστολοδιαστολή (comparing) είναι μια μέθοδος άμβλυσης των αρνητικών επιπτώσεων ενός καναλιού με περιορισμένο δυναμικό εύρος. Η ονομασία της είναι μια σύνθεση των δύο διαδικασιών επεξεργασίας του σήματος, της συστολής (compressing) και της διαστολής (expanding).

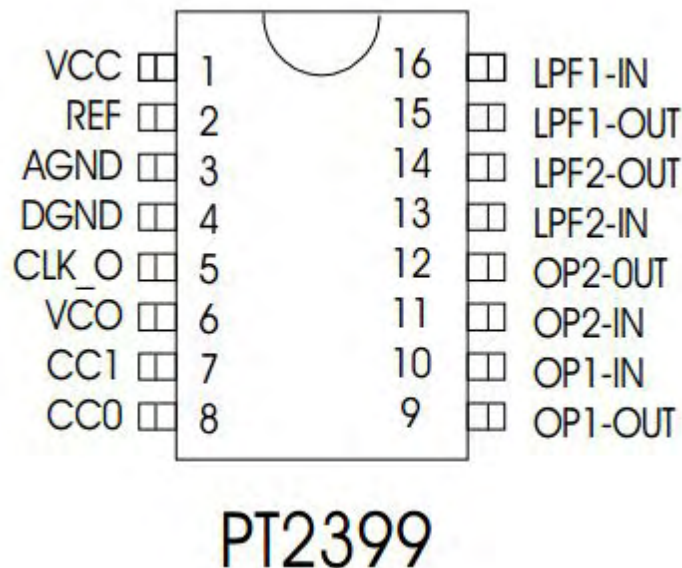
Το SA571 είναι ένα διπλό κύκλωμα ελέγχου κέρδους στην οποία είτε το κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας συστολέας (compressor) ή διαστολέας (expandor) δυναμικού εύρους. Κάθε κανάλι έχει έναν ανορθωτή πλήρους κύματος για την ανίχνευση της μέσης τιμής του σήματος, μια γραμμική θερμοκρασία, ρυθμιστή τιμής κέρδους, και έναν τελεστικό ενισχυτή.

Τα καλύτερα αναλογικά πετάλια καθυστέρηση, όπως το Boss DM-2 και το Ibanez AD-80, ενσωματώνουν την "προ-έμφαση" (pre-emphasis) και "αποέμφαση" (de-emphasis) της υψηλής συχνότητας και πιο σημαντικά το κύκλωμα NE570 compander για καλύτερη απόδοση θορύβου. Αυτά τα λειτουργικά τμήματα μπορούν εύκολα να προστεθούν σε ένα ψηφιακό κύκλωμα καθυστέρησης. Η συστολοδιαστολή χρειάζεται στο κύκλωμα BBD ώστε να ελέγχει τον θόρυβο, αλλά ακόμη και αν το ψηφιακό κύκλωμα δεν την χρειάζεται για την απόδοση του θορύβου, μπορεί να προστεθεί στο ψηφιακό κύκλωμα ώστε να συλλάβει τυχόν παρεμβολές που δημιουργήθηκαν στα αναλογικά κυκλώματα καθυστέρησης.



Επεξεργαστής Αντήχησης IC PT2399 (Echo Processor) [15]

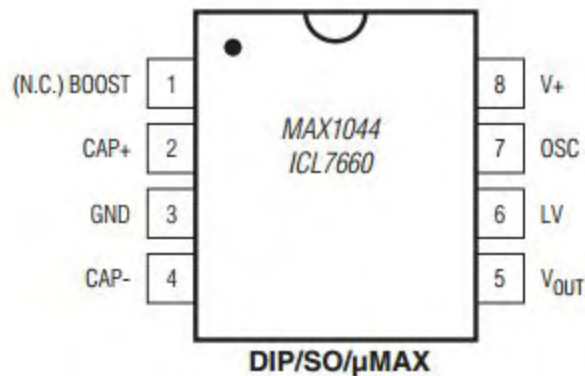
Το PT2399 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα επεξεργασίας του ήχου αντήχησης, που χρησιμοποιεί τεχνολογία CMOS, η οποία είναι εξοπλισμένη με ADC και DAC, υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας και εσωτερική μνήμη 44K. Η ψηφιακή επεξεργασία χρησιμοποιείται για να παράγει το χρόνο καθυστέρησης. Διαθέτει ένα εσωτερικό VCO κύκλωμα στο σύστημα ρολογιού, κάνοντας τη ρύθμιση της συχνότητας εύκολη. Το PT2399 είναι γνωστό για τα χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης (THD < 0.5%) και θορύβου (No < -90dBV) που παράγει, με αποτέλεσμα ο ήχος εξόδου να είναι υψηλής ποιότητας.



Μετατροπέας Τάσης Εναλλασσόμενων - Πυκνωτών MAX1044 (Switched-Capacitor Voltage Converters) [16]

Το MAX1044 είναι μονολιθικός, CMOS μετατροπέας τάσης εναλλασσόμενου πυκνωτή που αντιστρέφει, διπλασιάζει, διαιρεί, ή πολλαπλασιάζει μια θετική τάση εισόδου. Η λειτουργία είναι εγγυημένη από 1.5V μέχρι 10V χωρίς εξωτερική δίοδο σε όλο το εύρος της θερμοκρασίας. Μεταδίδουν 10mA με μια πτώση τάσης εξόδου 0.5V. Το MAX1044 έχει μια καρφίτσα «ώθησης» που αυξάνει τη συχνότητα του ταλαντωτή πάνω από τη ζώνη του ήχου και μειώνει τις εξωτερικές απαιτήσεις μεγέθους πυκνωτή.

Το MAX1044 συνδυάζει χαμηλό ρεύμα ηρεμίας και υψηλή απόδοση. Στο τσιπ περιλαμβάνονται το κύκλωμα ελέγχου του ταλαντωτή και τέσσερις διακόπτες ισχύος MOSFET. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν τη δημιουργία τροφοδοσίας -5V από +5V για την τροφοδοσία αναλογικών κυκλωμάτων. Για εφαρμογές που απαιτούν περισσότερη ισχύ, το MAX660 μεταδίδει μέχρι και 100mA με μια πτώση τάσης λιγότερη από 0.65V.



4.2.2 Ανάλυση του Κυκλώματος

Αρχικά, το σήμα της κιθάρας εισέρχεται στο κύκλωμα μέσω ενός μονοφωνικού jack input και περνάει από ένα υπεραπλοποιημένο φίλτρο που ουσιαστικά αποκόπτει την DC συνιστώσα του. Στον κόμβο R συνδέεται με έναν διαιρέτη τάσης που τροφοδοτείται από την έξοδο του ρυθμιστή τάσης των 12V. Μέσω του κόμβου R γίνεται η πόλωση του πρώτου μισού του τελεστικού ενισχυτή TL072 με μοναδιαίο κέρδος (μη-αναστρέφουσα συνδεσμολογία).

Το ενισχυμένο σήμα εξέρχεται από τον ακροδέκτη 7 του τελεστικού ενισχυτή TL072 και στην συνέχεια ένα μέρος του εισέρχεται στο δεύτερο μισό του τελεστικού ενισχυτή TL072 (αναστρέφουσα συνδεσμολογία) και το υπόλοιπο στον συστολοδιαστολέα (comprander) SA571.

Ο συστολοδιαστολέας ρυθμίζει την αναλογία σήματος-θορύβου και αποκόπτει ό,τι παρεμβολές βρεθούν στο σήμα. Το σήμα εξέρχεται από τον ακροδέκτη 10 του συστολοδιαστολέα και στη συνέχεια εισέρχεται από τον ακροδέκτη εισόδου 16 του ολοκληρωμένου κυκλώματος ψηφιακής καθυστέρησης PT2399. Το PT2399 παράγει τον χρόνο καθυστέρησης, ο οποίος ρυθμίζεται από τον ακροδέκτη 6 μέσω ενός ποτενσιόμετρου 50kOhm.

Το σήμα που έχει υποστεί καθυστέρηση εξέρχεται από τον ακροδέκτη 14 του συστολοδιαστολέα και μέσω μιας σειράς

υψιπερατών και χαμηλοπερατών φίλτρων καταλήγει στην είσοδο ενός ενισχυτή κοινού συλλέκτη. Το ενισχυμένο σήμα εξέρχεται από τον ακροδέκτη πηγής, ώστε να καταλήξει στον ακροδέκτη εισόδου 2 του συστολοδιαστολέα SA571. Εκεί γίνεται και πάλι φιλτράρισμα του θορύβου.

Μετά την έξοδο του σήματος από τον συστολοδιαστολέα το σήμα περνά από δύο ποτενσιόμετρα. Το ένα ρυθμίζει τον αριθμό των επαναλήψεων του σήματος που έχει υποστεί καθυστέρηση (Repeats). Αυτό επιτυγχάνεται στέλνοντας τον σήμα ξανά πίσω στον ακροδέκτη 12 του συστολοδιαστολέα, ώστε το καθυστερημένο σήμα να υποστεί ακόμη μια καθυστέρηση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ρυθμίζοντας, λοιπόν, την τιμή του ποτενσιόμετρου ελέγχουμε τον αριθμό επαναλήψεων που επιτρέπεται να περάσουν προς την έξοδο του σήματος.

Το άλλο ποτενσιόμετρο ρυθμίζει την ένταση της καθυστέρησης (Delay Level). Ρυθμίζοντας την τιμή του ελέγχουμε τη ποσότητα που περνάει προς τον αναστρέφοντα ακροδέκτη 2 του τελεστικού ενισχυτή TL072.

Στον αναστρέφοντα ακροδέκτη 2 του TL072 προστίθενται το καθυστερημένο σήμα με το αρχικό σήμα που είχε εξέλθει από το πρώτο μισό του TL072. Το σήμα ενισχύεται από το δεύτερο μισό του TL072 με κέρδος $\frac{10k + (10k // 1k)}{10k} \approx 1$ και μέσω ενός υψιπερατού φίλτρου εξέρχεται από ένα μονοφωνικό jack output.

Τέλος, η τροφοδοσία του κυκλώματος γίνεται μέσω ενός dc power jack και ενός αντίπτορα των 9V. Επειδή σε πολλά σημεία απαιτείται 12V τροφοδοσίας χρησιμοποιούμε τον μετατροπέα τάσης MAX1044, ο οποίος τροφοδοτεί και τους δύο ρυθμιστές τάσης ώστε να πάρουμε 12V και 5V, αντίστοιχα. Ο τελεστικός ενισχυτής TL072, το διπολικό τρανζίστορ και ο συστολοδιαστολέας SA571 τροφοδοτούνται μέσω του κόμβου P με 12V. Το delay module PT2399 τροφοδοτείται από τον ακροδέκτη 1 μέσω του ρυθμιστή τάσης στα 5V.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τάσεις στους ακροδέκτες των TL072 IC, PT2399 IC και SA571 IC [18].

Component	Location	Voltage
9 volt power supply		9v
TL072 IC	IC Pin 1	6v
	IC Pin 2	6v
	IC Pin 3	6v
	IC Pin 4	0v
	IC Pin 5	5.5v
	IC Pin 6	6v
	IC Pin 7	6v
	IC Pin 8	12v
PT2399 IC	IC Pin 1	5v
	IC Pin 2	2.5v
	IC Pin 3	0.015v
	IC Pin 4	0.015v
	IC Pin 5	2.8v
	IC Pin 6	2.5v
	IC Pin 7	0.9v
	IC Pin 8	0.9v
	IC Pin 9	2.5v
	IC Pin 10	2.5v
	IC Pin 11	2.5v
	IC Pin 12	2.5v

	IC Pin 13	2.5v
	IC Pin 14	2.5v
	IC Pin 15	2.5v
	IC Pin 16	2.5v
SA571 IC (NE571, etc)	IC Pin 1	1v
	IC Pin 2	1.8v
	IC Pin 3	1.8v
	IC Pin 4	0.003v
	IC Pin 5	1.8v
	IC Pin 6	6.5v
	IC Pin 7	6.5v
	IC Pin 8	1.8v
	IC Pin 9	1.8v
	IC Pin 10	6.0v
	IC Pin 11	1.8v
	IC Pin 12	1.8v
	IC Pin 13	12.0v
	IC Pin 14	1.8v
	IC Pin 15	1.8v
	IC Pin 16	1.0v

4.2.3 Σύγκριση Αναλογικής - Ψηφιακής Καθυστέρησης [13]

Στα πλαίσια των κυκλωμάτων εφέ, η αναλογική καθυστέρηση αναφέρεται σε ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί ένα bucket brigade type chip (BBD), το οποίο δημιουργεί την καθυστέρηση του σήματος.

Χρησιμοποιώντας βασικούς όρους, τα τσιπ BBD δημιουργούν μια αναλογική αναπαράσταση του σήματος αποθηκεύοντας το ηλεκτρικό φορτίο που διέρχεται κατά μήκος του "bucket brigade". Το φορτίο μεταφέρεται με ένα ρυθμό που καθορίζεται από το ρολόι και το μέγεθος του φορτίου, που αποθηκεύεται σε κάθε δεδομένη στιγμή, είναι μια αναλογική τιμή, σε αντίθεση με μια ψηφιακή καθυστέρηση, όπου στο πλάτος έχει εκχωρηθεί μια ψηφιακή τιμή που έχει διακριτά βήματα. Με την πρώτη ματιά, το BBD ως εκ τούτου, έχει καλύτερη ανάλυση, αλλά υπάρχουν κάποια προβλήματα. Υπάρχει υποβάθμιση του φορτίου καθώς περνά μέσα από το bucket brigade, και πιο σημαντικά, η διαδικασία μετάβασης του φορτίου από bucket σε bucket δημιουργεί θόρυβο ρολογιού στο σήμα.

Επομένως, το επεξεργασμένο σήμα, μετά την έξοδο από το BBD, μοιάζει με το ηχητικό σήμα, αλλά υπάρχουν "αιχμές" στην κυματομορφή που αντιστοιχούν στην συχνότητα του ρολογιού. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να αφαιρεθούν οι "αιχμές" με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο, συνήθως 30 ή 36 dB/οκτάβα με συχνότητα αποκοπής (σημείο -3 dB) περίπου στα 3 kHz. Αυτό επιτρέπει να περάσουν αρκετά υψηλές συχνότητες για ένα εύλογο ηχητικό σήμα, αλλά σταματά το θόρυβο ρολογιού. Επίσης, το περιορισμένο εύρος ζώνης υψηλής συχνότητας τυχαίνει να ακούγεται πιο φυσικό για τους περισσότερους ανθρώπους στην χρήση εφέ κιθάρας.

Χρησιμοποιώντας βασικούς όρους, η ψηφιακή καθυστέρηση λαμβάνει το πλάτος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή του ρολογιού και του αναθέτει μια διακριτή τιμή, έπειτα του αναθέτει μια άλλη διακριτή τιμή την επόμενη χρονική στιγμή του ρολογιού, και ούτω καθεξής. Αφού αποθηκευθεί και στη συνέχεια, μετατραπεί σε ένα αναλογικό σήμα μέσω ενός D/A μετατροπέα, η πρώτη κυματομορφή θα έχει τη μορφή «σκαλοπατιών», λόγω της αποθήκευση του διακριτού πλάτους (διαφορά ύψους μεταξύ κάθε σκαλοπατιού) και της συχνότητας του ρολογιού (πλάτος κάθε σκαλοπατιού). Προφανώς, όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός των

bits στην αποθήκευση του πλάτους και όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα του ρολογιού, τόσο μικρότερα είναι τα σκαλοπάτια που απεικονίζονται στην κυματομορφή, και τόσο πιο εύκολο είναι να τα φιλτράρει.

Εάν η συχνότητα του ρολογιού είναι αρκετά υψηλή και η ανάλυση πλάτος αρκετά υψηλή, τα σκαλοπάτια μπορούν να φιλτραριστούν εντελώς, αφήνοντας μόνο τον ήχο. Υπάρχει μια σχέση μεταξύ μέγιστου εύρους ζώνης ήχου, συχνότητας ρολογιού, και κλίσης του φίλτρου που απαιτούνται. Για παράδειγμα, τα 16 bit CDs χρησιμοποιούν μια συχνότητα ρολογιού των 44,1 kHz και παρέχουν 20 kHz εύρος ήχου, για τον λόγο αυτό απαιτείται μια πολύ απότομη κλίση φίλτρου. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

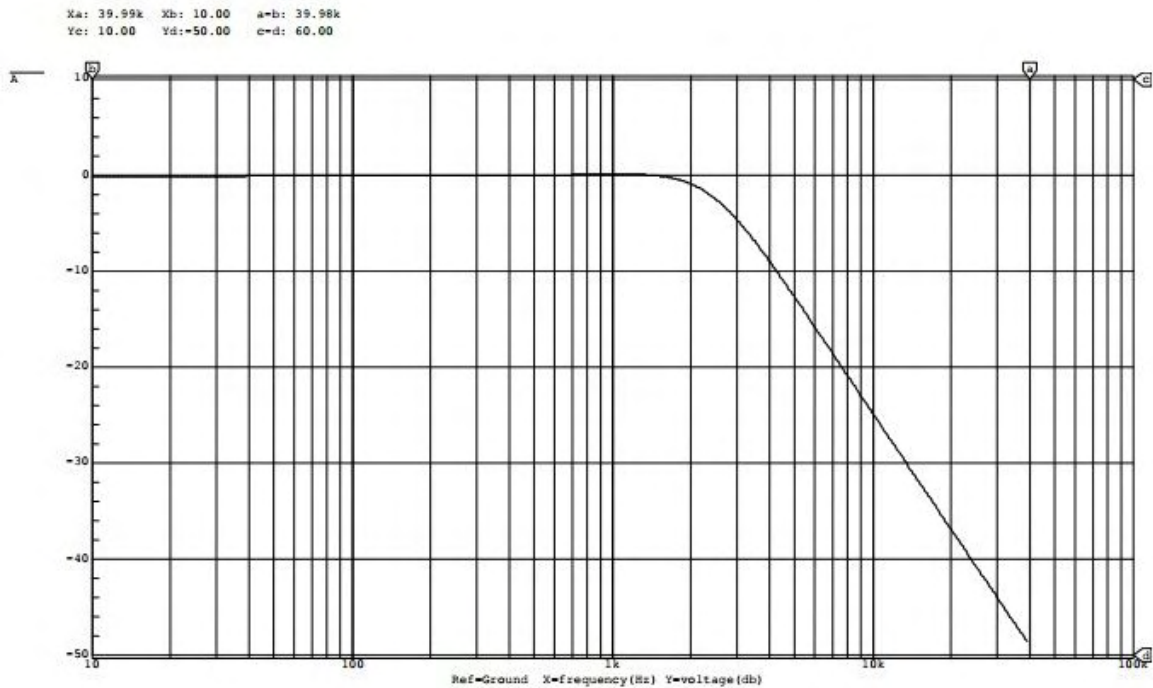
- Και οι ψηφιακές και η BBD τεχνολογίες εισάγουν παρεμβολές στο ηχητικό σήμα.
- Η αφαίρεση αυτών των παρεμβολών επιτυγχάνεται με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο και στις δύο τεχνολογίες.
- Η τεχνολογία BBD, θεωρητικά, θα μπορούσε να έχει καλύτερη ανάλυση πλάτους. Παρ' όλα αυτά, τα κάθετα μέρη των σκαλοπατιών στην ψηφιακή κυματομορφή θα εξομαλυνθούν από το χαμηλοπερατό φίλτρο και η πραγματική διαδικασία BBD bucket brigade δεν επιστρέφει το 100% της πληροφορίας για το πλάτος, έτσι μάλλον δεν υπάρχει σαφές πλεονέκτημα για το ένα ή το άλλο στο σημείο αυτό.

Ο κύριος λόγος που ένα ψηφιακό εφέ καθυστέρησης δεν ακούγεται όμορφα στα αυτιά μας είναι το πολύ υψηλό εύρος ζώνης συχνοτήτων. Η λύση, λοιπόν, για τη σωστή λειτουργία ενός ψηφιακού κυκλώματος καθυστέρησης, είναι να προσθέσουμε φίλτρα με τα ίδια χαρακτηριστικά που απαιτεί ένα κύκλωμα BBD. Το φίλτρο που τοποθετείται συνήθως πριν από τη γραμμή καθυστέρησης, ονομάζεται φίλτρο anti-alias, και το φίλτρο που τοποθετείται μετά τη γραμμή καθυστέρησης, το ονομάζουμε φίλτρο "μετα-καθυστέρησης" (post delay filter).

Φίλτρο Anti-Alias

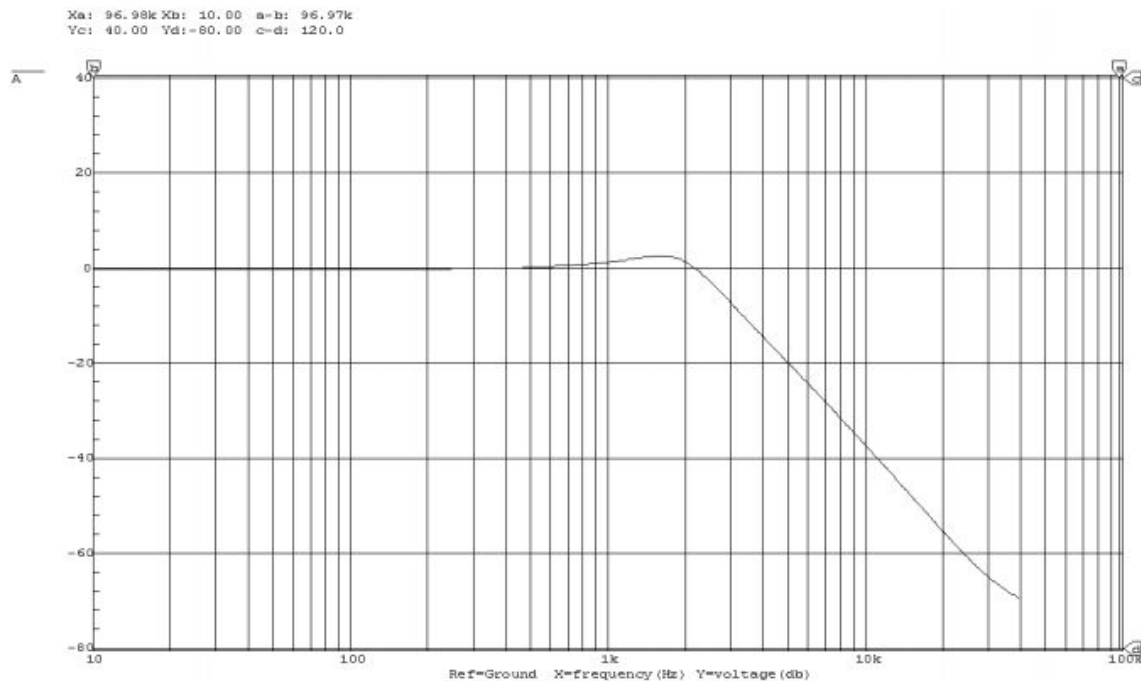
Το φίλτρο anti-alias περιορίζει την απόκριση συχνότητας σε όχι περισσότερο από 0,3 φορές της ελάχιστης ταχύτητας ρολογιού, το οποίο για ένα τσιπ BBD θα είναι τόσο χαμηλά όσο 10 kHz. Ο λόγος για τον οποίο απαιτείται το φίλτρο αυτό είναι

ότι η διαδικασία διαμόρφωσης του ηχητικού σήματος δημιουργεί αθροίσματα και διαφορές αρμονικών, οι οποίες πρέπει να φιλτράρονται. Αν χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα μια συχνότητα σήματος των 3 kHz και ένα ρολόι των 10 kHz, θα δημιουργηθούν αρμονικές στα 7 kHz ($10-3$) και στα 13 kHz ($10 + 3$). Έτσι, η απόκριση συχνότητας του φίλτρου πρέπει να παρέχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσβεση στα 7 kHz. Εάν χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα συχνότητες σήματος 5kHz και 10 kHz ρολογιού, μπορούμε να δούμε ότι η αρμονική διαφορά (5 kHz) είναι η ίδια με τη συχνότητα του σήματος, και ως εκ τούτου δεν μπορεί να μειωθεί χωρίς να εξασθενήσει το ίδιο το σήμα. Αυτός είναι και ο λόγος για το όριο των 0,3 φορές της συχνότητα του σήματος. Στην **Εικόνα 4.2** φαίνεται η απόκριση του anti-alias φίλτρου του κυκλώματος 4.1.



Εικόνα 4.2

Έτσι, η απόκριση συχνότητας κατά την είσοδο στο τσιπ καθυστέρησης PT2399 περιορίζεται περίπου στα 2 kHz, και οι υψηλότερες συχνότητες πέφτουν στα 12 dB/οκτάβα. Αυτό μπορεί να ακούγεται ακραίο, αλλά αυτή η απόδοση του φίλτρου είναι τυπική για την αναλογική καθυστέρηση. Για σύγκριση, παρατίθεται η ακόλουθη γραφική παράσταση του anti-alias φίλτρου που χρησιμοποιείται στο Boss DM-2 (**Εικόνα 4.3**).



Εικόνα 4.3

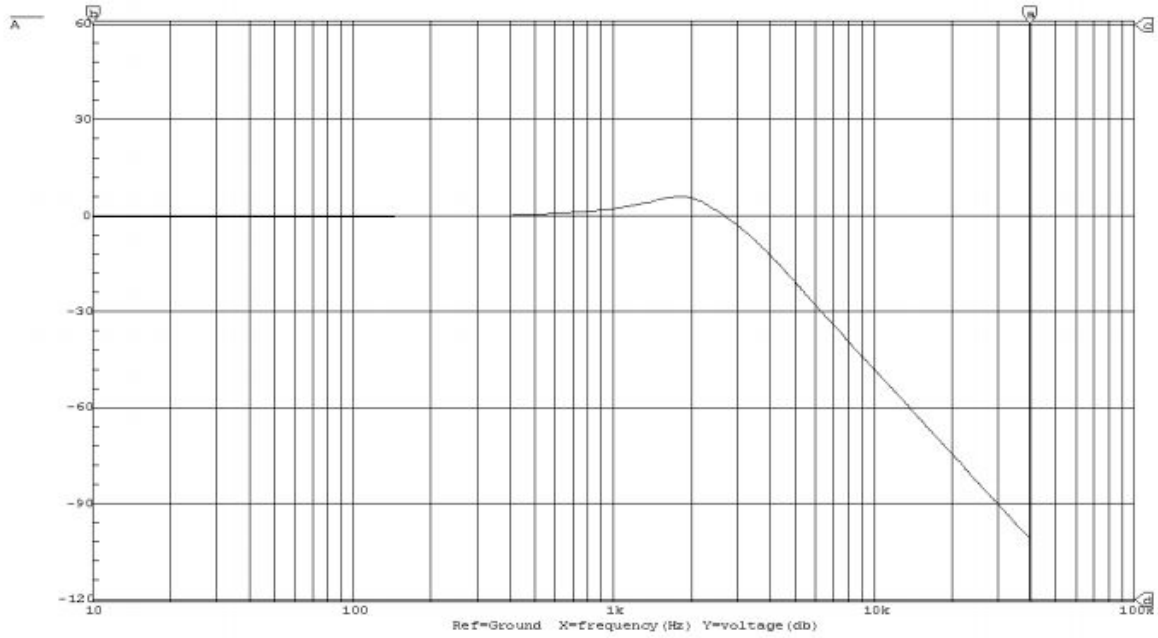
Το φίλτρο DM-2 είναι στα 18 dB ανά οκτάβα και γι' αυτό η κλίση της γραφική παράστασης είναι πιο απότομη, αλλά το κύριο σημείο που διακρίνουμε αν συγκρίνουμε τα δύο σχήματα είναι ότι η συχνότητα rolloff είναι παρόμοια.

Post Delay Φίλτρο

Ακόμη πιο σημαντικό για τον συνολικό ήχο είναι το φίλτρο “μετά-καθυστέρησης” (post delay filter). Στο κύκλωμα της **Εικόνας 4.1** χρησιμοποιείται φίλτρο των 30 dB/οκτάβα, με ολόιδια κλίση σε σχέση με αυτή του Boss DM-2, και η απόκριση συχνότητας έχει γίνει σχεδόν ταυτόσημη με την προσεκτική επιλογή των εξαρτημάτων. Στην **Εικόνα 4.4** φαίνεται η απόκριση του post delay φίλτρου του κυκλώματος της **Εικόνας 4.1**.

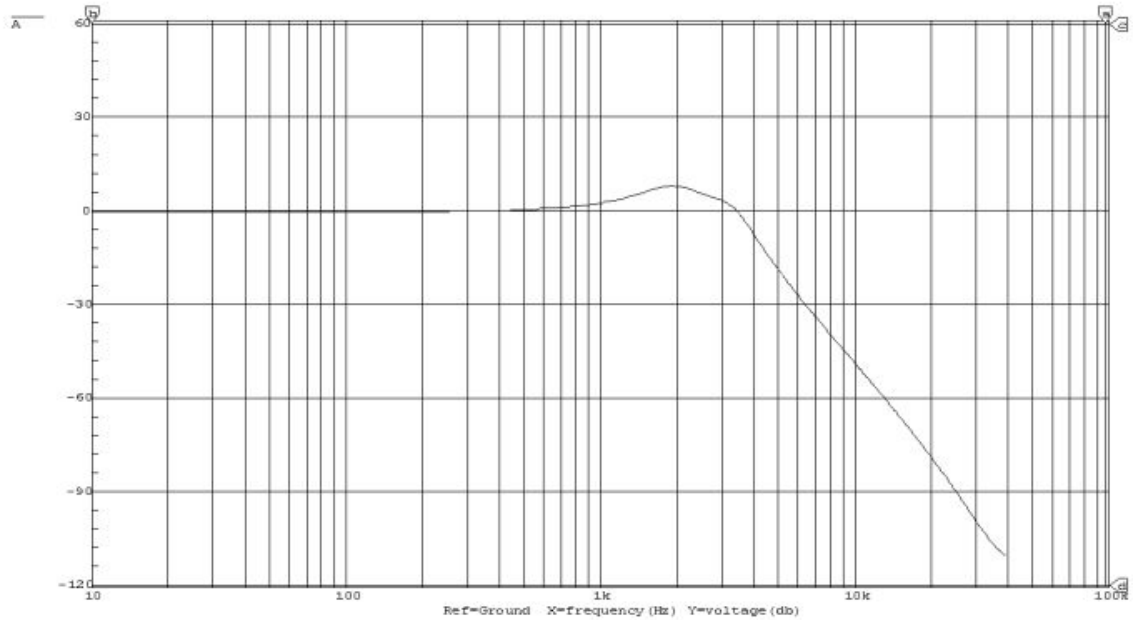
Όπως φαίνεται στο γράφημα, η απόκριση πέφτει πολύ γρήγορα μετά τα 2,5 kHz. Αυτή η ταχεία πτώση είναι ο κυριότερος παράγοντας του «ζεστού» ήχου για τον οποίο είναι γνωστή η αναλογική καθυστέρηση. Στην **Εικόνα 4.5** φαίνεται η απόκριση του post delay φίλτρου που χρησιμοποιείται στο Boss DM-2.

Xa: 39.57k Xb: 10.00 a-b: 39.56k
Yc: 60.00 Yd:-120.0 c-d: 180.0



Εικόνα 4.4

Xa: 96.98k Xb: 10.00 a-b: 96.97k
Yc: 60.00 Yd:-120.0 c-d: 180.0



Εικόνα 4.5

Μοιάζουν σχεδόν σαν να είναι το ίδιο γράφημα, αλλά παράγονται από δύο διαφορετικά κυκλώματα. Το κύκλωμα της **Εικόνας 4.1** χρησιμοποιεί τους ακροδέκτες LPF-2 στο PT2399 για 12 dB από τα 30 dB rolloff και ένα κύκλωμα τρανζίστορ για να παρέχει τα υπόλοιπα 18 dB ανά οκτάβα rolloff. Το Boss DM-2 χρησιμοποιεί ένα τρανζίστορ για να δημιουργήσει τα 18 dB της rolloff, και ένα άλλο τρανζίστορ για τα υπόλοιπα 12 dB της rolloff. Η απόκριση μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας Circuitmaker προσομοιώσεις, και οι τιμές του κυκλώματος της **Εικόνας 4.1** επιλέχθηκαν ώστε να παίρνουμε σχεδόν ίδια απόκριση.

PT2399 Delay Chip

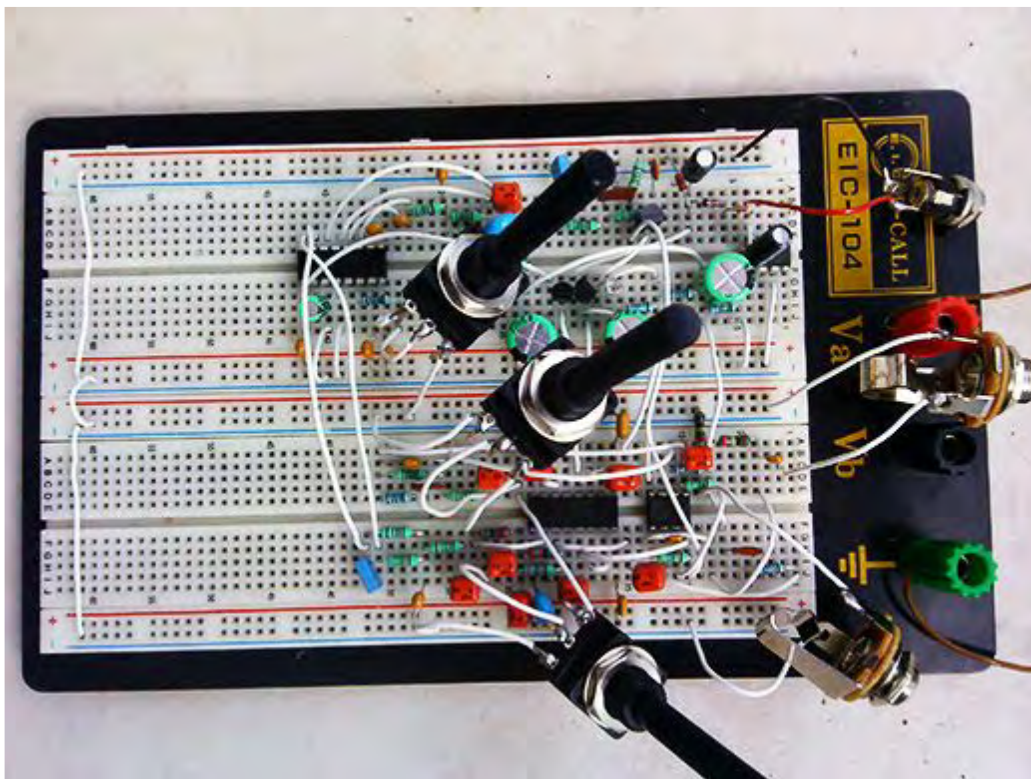
Τα παρακάτω είναι μερικά συμπεράσματα σχετικά με το πώς λειτουργεί το τσιπ σε ένα πραγματικό κύκλωμα εφέ κιθάρας.

- Η επιλογή αυτών των αποκρίσεων φίλτρου στο κύκλωμα (οι οποίες επιλέγονται βασικά για να μιμηθούν τον ήχο της αναλογικής καθυστέρησης), σε συνδυασμό με το τσιπ καθυστέρησης PT2399 έχει εξαιρετικά αποτελέσματα. Η εσωτερική απόκριση συχνότητας του PT2399 περιορίζεται περίπου στα 5 kHz μετά από την οποία υπάρχει παραμόρφωση, rolloff, και άλλες ψηφιακές αστάθειες.
- Αν δώσουμε ως είσοδο ένα ημίτονο με συχνότητα μεγαλύτερη από 4 kHz, η κυματομορφή εξόδου μοιάζει με τρίγωνο. Αυτό φαίνεται να οφείλεται σε περιορισμούς από το ίδιο το τσιπ. Ένα σήμα κιθάρας δε δίνει πολλές πληροφορίες πάνω από αυτήν την περιοχή, αλλά επιτρέποντας στο τσιπ καθυστέρησης να επεξεργαστεί αυτές τις συχνότητες, θα προσθέσει «τρίξιμο» στον ήχο εξαιτίας της παραμόρφωσης.
- Το μέγιστο πλάτος σήματος που μπορεί να επεξεργαστεί είναι περίπου 3 Volt_{p-p}. Πάνω από αυτό το επίπεδο το σήμα ψαλιδίζεται και παρουσιάζει επίσης κάποια ψηφιακή παραμόρφωση. Συνολικά, τα επίπεδα αυτά είναι αρκετά για μια κιθάρα, αλλά σίγουρα όχι για σήματα μικροφώνου κ.ά. (line-level signals).

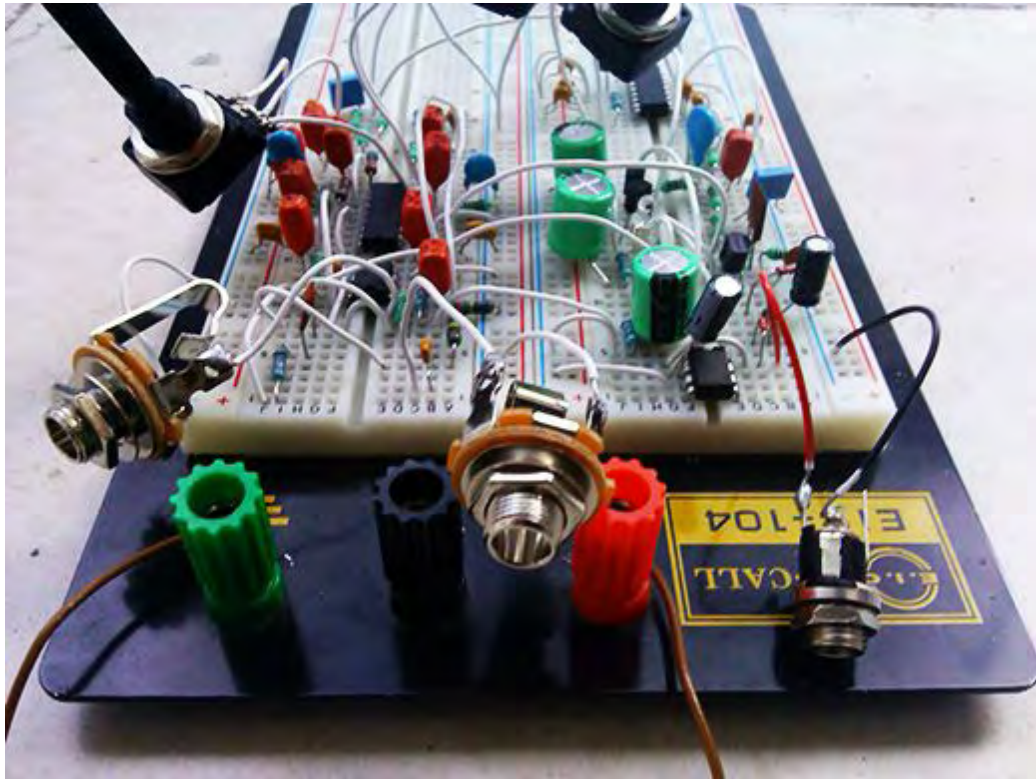
4.3 Αποτελέσματα Εργαστηριακής Προσομοίωσης του Κυκλώματος Καθυστέρησης

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της εργαστηριακής προσομοίωσης του κυκλώματος καθυστέρησης της **Εικόνας 4.1**. Το κύκλωμα χειρίζεται από τρία διαφορετικά σημεία: *delay level*, *repeats* και *delay time*. Μεταβάλλοντας, λοιπόν, της τιμές αυτών των σημείων παίρνουμε διαφορετικά στιγμιότυπα που εξηγούν τη λειτουργία τους.

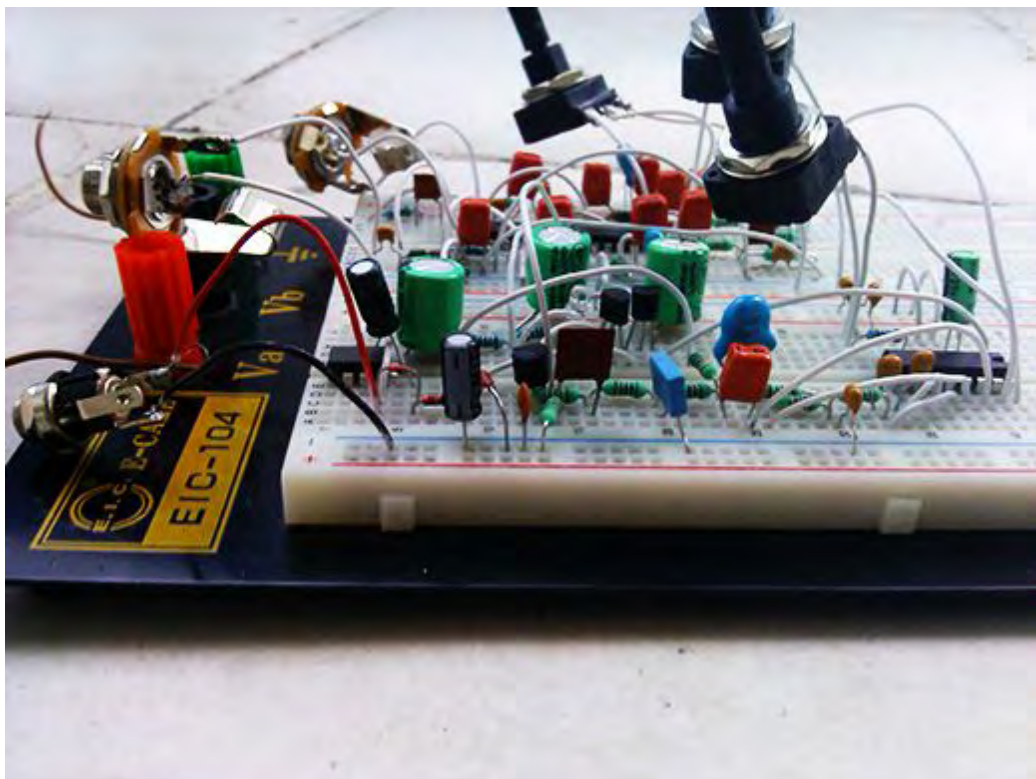
Αρχικά, το κύκλωμα κατασκευάστηκε σε πλακέτα Breadboard όπως φαίνεται στις **Εικόνες 4.6 α,β,γ**.



Εικόνα 4.6α

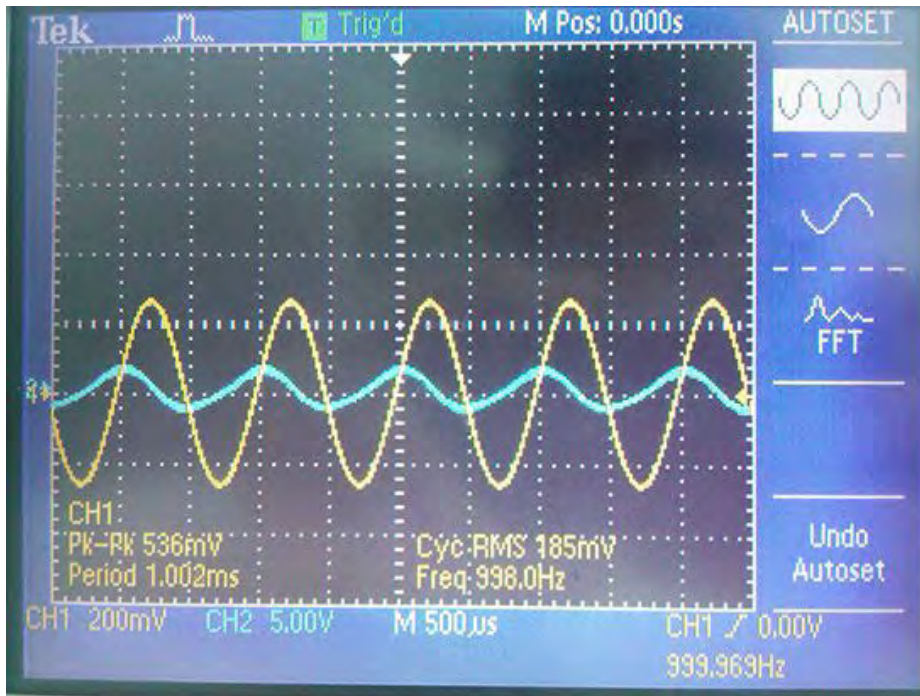


Εικόνα 4.6β

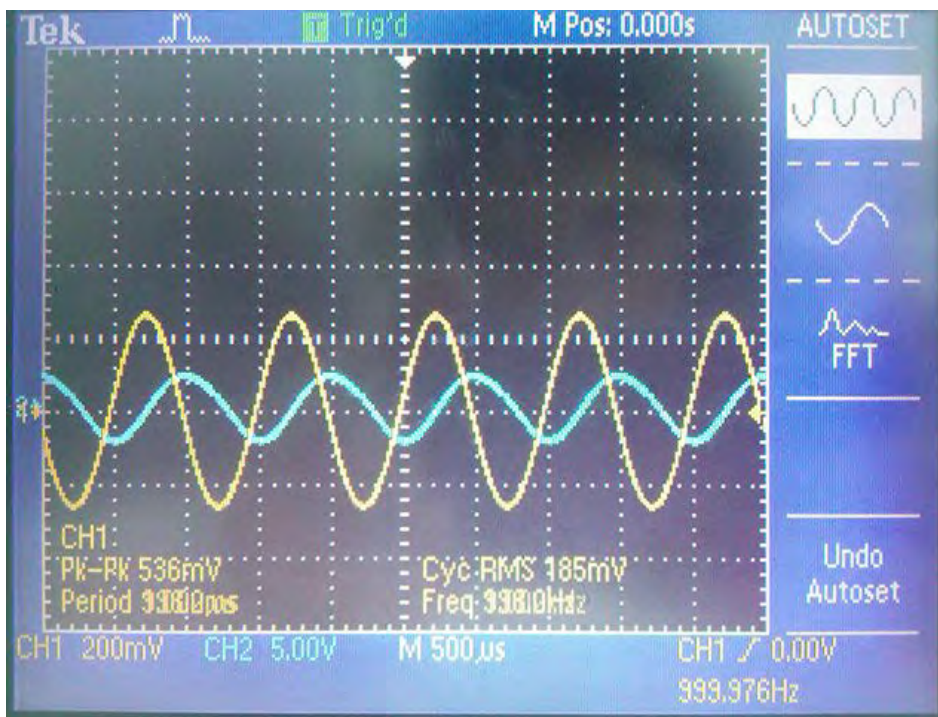


Εικόνα 4.6γ

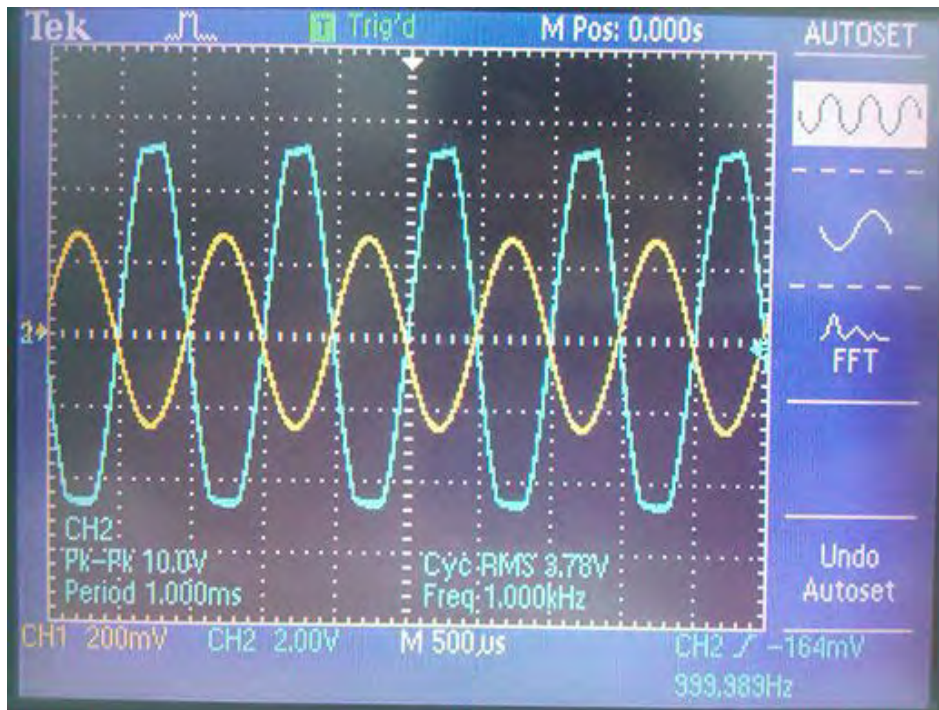
Πρώτα, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μεταβάλλοντας το delay level, κρατώντας σταθερά τα υπόλοιπα σε σχετικά χαμηλές τιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις **Εικόνες 4.7 α,β,γ**.



Εικόνα 4.7α



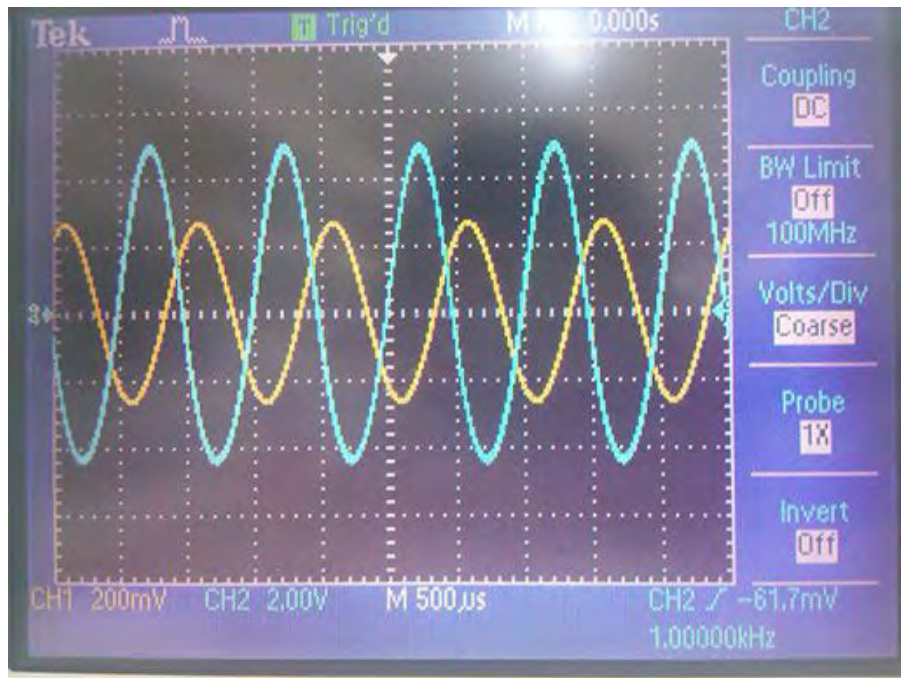
Εικόνα 4.7β



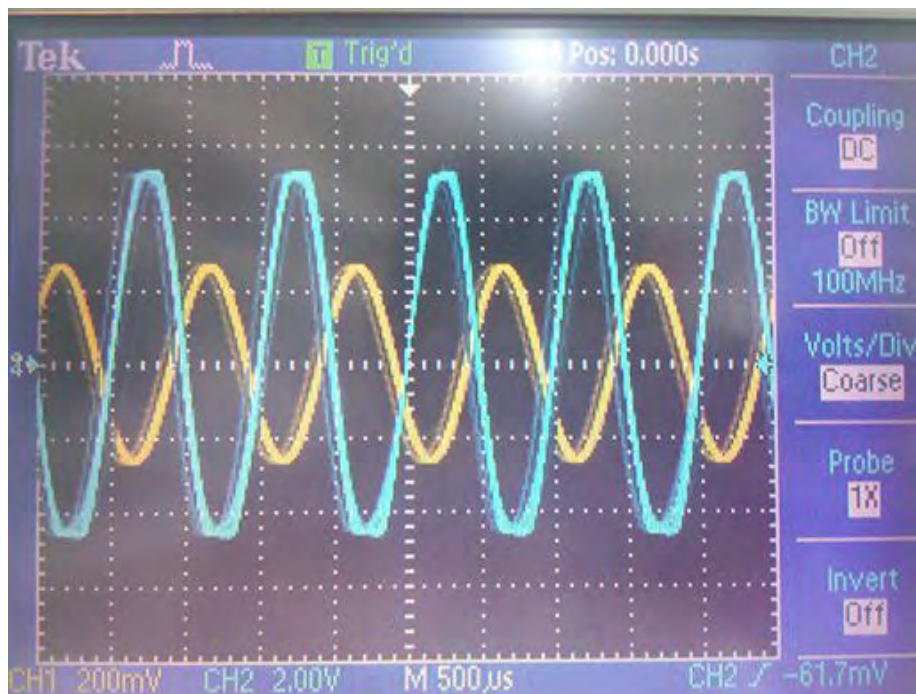
Εικόνα 4.7γ

Στις **Εικόνες 4.7 α,β,γ** βλέπουμε τη σταδιακή αύξηση του σήματος με την αύξηση του delay level. Όταν το delay level είναι ρυθμισμένο στην τιμή 0%, το σήμα εξόδου είναι το αρχικό σήμα εισόδου, ενώ στην τιμή 100% το σήμα εξόδου είναι το αρχικό σήμα συν τα σήματα καθυστερήσεων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τη μεταβολή του repeats. Το repeats καθορίζει, ουσιαστικά, τον αριθμό των επαναλήψεων που θα ακουστεί το καθυστερημένο σήμα στον ήχο εξόδου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις **Εικόνες 4.8 α,β**.



Εικόνα 4.8α



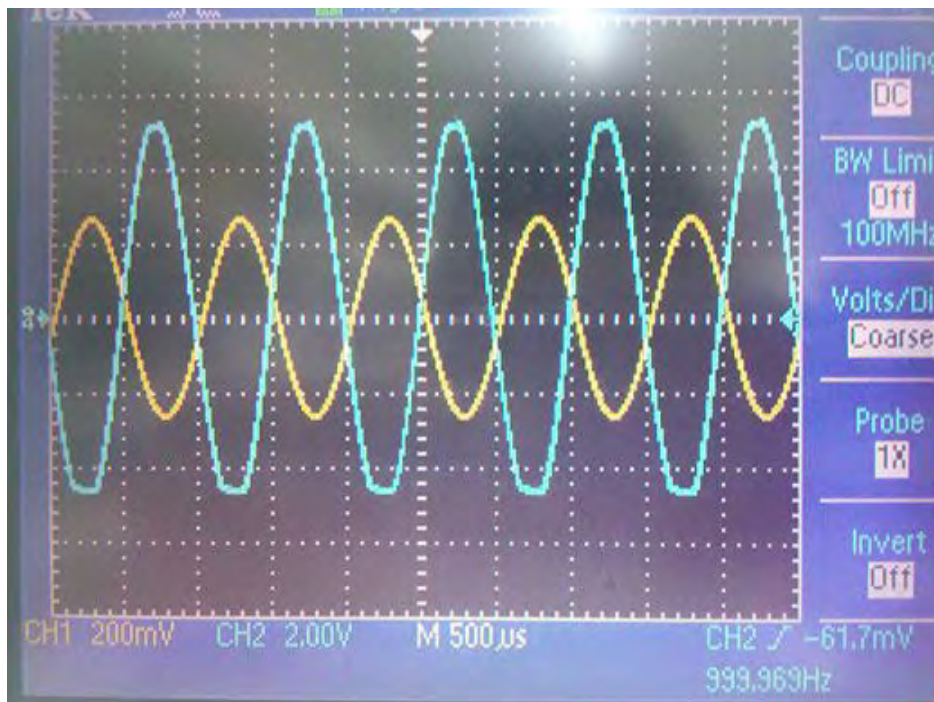
Εικόνα 4.8β

Στις **Εικόνες 4.8 α,β** παρατηρούμε την προσθήκη επαναλήψεων του καθυστερημένου σήματος ανάλογα με τη ρύθμιση του repeats. Όταν η τιμή του ρυθμίζεται στο 0%, στην έξοδο του κυκλώματος

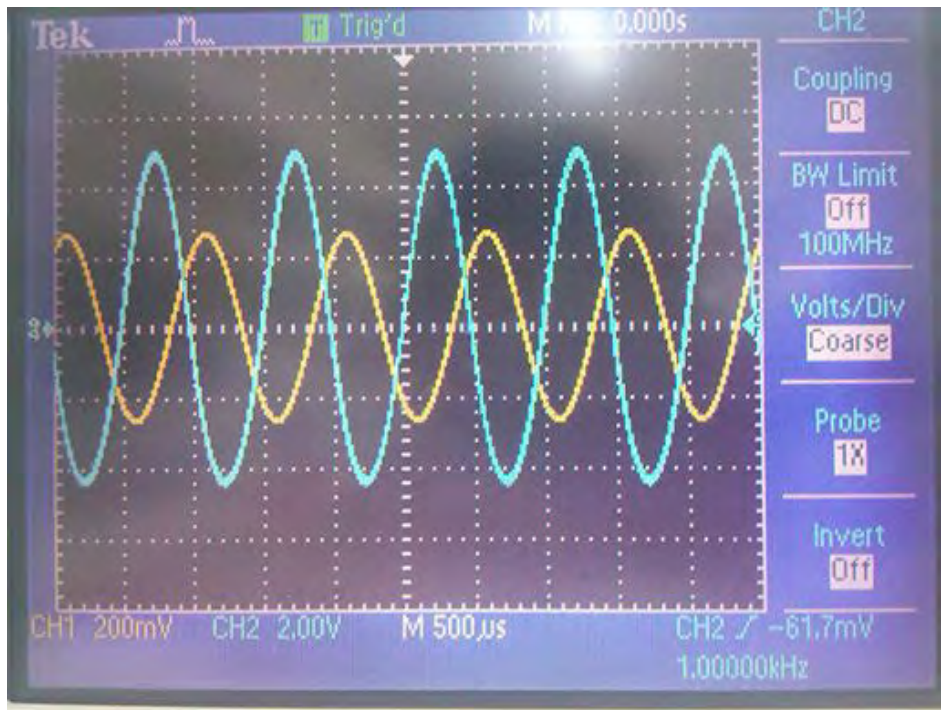
παίρνουμε το αρχικό σήμα συν το καθυστερημένο σήμα. Όταν η τιμή του είναι στο 100%, στην έξοδο του κυκλώματος παίρνουμε το αρχικό σήμα συν έναν πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων του καθυστερημένου σήματος, που αν τις αφήσουμε εξελίσσονται επ' άπειρο, προκαλώντας μια μεγάλη "φασαρία" σαν ηχητικό αποτέλεσμα.

Στην **Εικόνα 4.8β** μπορούμε να διακρίνουμε αυτές τις επαναλήψεις του σήματος.

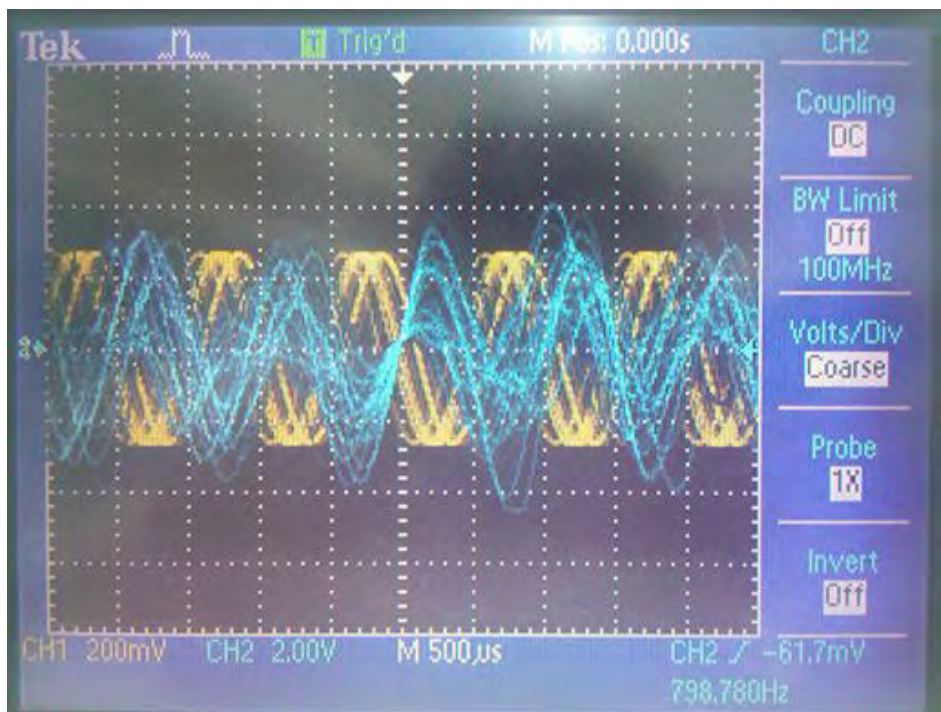
Τέλος, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τη ρύθμιση του delay time. Το delay time ρυθμίζει τον χρόνο καθυστέρησης του σήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις **Εικόνα 4.9 α,β,γ**.



Εικόνα 4.9α



Εικόνα 4.9β



Εικόνα 4.9γ

Στις **Εικόνες 4.9α,β** φαίνεται η διαφορά φάσης του αρχικού σήματος και του καθυστερημένου σήματος, που προκαλείται από τη μεταβολή του χρόνου καθυστέρησης. Η τιμή της μεταβαλλόμενης

αντίστασης είναι αρκετά μεγάλη, για το λόγο αυτό η ρύθμιση του χρόνου είναι αρκετά ευαίσθητη. Στην προσομοίωση η απότομη μεταβολή της αντίστασης, δίνει την αίσθηση ενός σήματος που “τρέχει” (**Εικόνα 4.9γ**).

Κεφάλαιο 5

Γενικά Συμπεράσματα

Καταλήγοντας, σκοπός αυτής της διπλωματικής ήταν να παρουσιάσει και να μελετήσει τα γενικά χαρακτηριστικά και τη λειτουργία βασικών κυκλωμάτων εφέ κιθάρας. Όλες οι διατάξεις που μελετήθηκαν παρουσίαζαν κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους ως προς τη βασική επεξεργασία και μετάδοση ενός ηχητικού σήματος. Με άξονα αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούμε να κατασκευάσουμε διάφορων ειδών εφέ ήχου, ακόμη πιο εξειδικευμένα. Στη παρούσα διπλωματική ασχοληθήκαμε με τα τρία πιο συνηθισμένα κυκλώματα εφέ ήχου, την παραμόρφωση, την αντήχηση και την καθυστέρηση.

Τα αποτελέσματα της εργαστηριακής προσομοίωσης ήταν εξαιρετικά. Επιβεβαίωσαν όλες τις προσδοκίες σχεδίασης των κυκλωμάτων και παρουσίασαν οπτικά τις ηχητικές μεταβολές των κυκλωμάτων ανάλογα με διαφορετικές ρυθμίσεις.

Σημαντικότερα όλων είναι τα ακουστικά αποτελέσματα που λάβαμε. Η διατάξεις των κυκλωμάτων που παρουσιάστηκαν, ιδίως αυτές της αντήχησης και της καθυστέρησης παρουσιάζουν εξαιρετική ποιότητα ήχου. Θα μπορούσαν άνετα να σταθούν δίπλα σε δημοφιλή πεντάλ του εμπορίου όπως το πεντάλ αντήχησης BOSS RV-5 και το πεντάλ καθυστέρησης BOSS DM-2. Το κύκλωμα παραμόρφωσης έχει, επίσης, ικανοποιητικά ακουστικά αποτελέσματα, αλλά λόγω της απλότητας της διάταξή του για τη καλύτερη μελέτη του, θα μπορούσε να επεκταθεί προσθέτοντας και άλλες παραμέτρους, όπως το overdrive κ.ά.

Βιβλιογραφία

- [1] Denton J. Dailey - Electronics for Guitarists, Springer
- [2] <http://www.endino.com/archive/arch2.html>
- [3] Wikipedia, Κλίμακα (μουσική)
- [4] Wikipedia, High-pass filter
- [5] Wikipedia, Low-pass filter
- [6] http://www.chem.uoa.gr/courses/organologia/PDF/Ch03_1xxy.pdf
- [7] Wikipedia, Distortion (music)
- [8] Wikipedia, Reverberation
- [9] http://www.accutronicsreverb.com/main/?skin=sub04_01.html
- [10] <http://screaminfx.com/tech/how-does-a-spring-reverb-tank-work-compared-to-how-a-digital-reverb-pedal-works.htm>
- [11] Wikipedia, Delay (audio effect)
- [12] Wikipedia, Bucket-brigade device
- [13] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl1074.pdf>
- [14] http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/SA571-D.PDF
- [15] <http://sound.westhost.com/pt2399.pdf>
- [16] <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/ICL7660-MAX1044.pdf>
- [17] http://www.generalguitargadgets.com/pdf/ggg_pt80_sc.pdf
- [18] http://www.generalguitargadgets.com/pdf/ggg_pt80_instruct.pdf
- [19] <http://www.generalguitargadgets.com/wp-content/uploads/pt80techinfo.pdf>