ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Υλοποίηση Φίλτρων Αναλογικών Κυκλωμάτων για Επεξεργασία Ήχου

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φιλοκτήμων Γεώργιος Ι. Τατσίδης, ΑΕΜ:210126

Επιβλέπων Καθηγητής: Μιχαήλ Μανιός
ΕΔΙΠ, Τμήμα Πληροφορικής, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Συν Επιβλέπων: Αστέριος Παπαδημητρίου
Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Καβάλα, 2026

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Υλοποίηση Φίλτρων Αναλογικών Κυκλωμάτων για Επεξεργασία Ήχου

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Φιλοκτήμων – Γεώργιος Ι. Τατσίδης, ΑΕΜ.: 210126

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία υποβλήθηκε στο Τμήμα Πληροφορικής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης για την απόκτηση του πτυχίου του Τμήματος.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Μιχαήλ Μανιός, ΕΔΙΠ, Τμήμα Πληροφορικής Δημοκριτείου Πανεπιστημίου
2ο Μέλος: Ελένη Βροχίδου, Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Πληροφορικής, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
3ο Μέλος: Ιωάννης Τσιμπερίδης, ΕΔΙΠ, Πληροφορικής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης

Καβάλα, 2026

Πνευματικά Δικαιώματα

Copyright © Φιλοκτήμων Γεώργιος Τατσίδης, 2026

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πληροφορικής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης δε δηλώνει απαραιτήτως την αποδοχή των απόψεων του/της συγγραφέα/ως.

Τήρηση ακαδημαϊκών αρχών και δεοντολογίας

Η παρούσα εργασία είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε εξ ολοκλήρου από τον φοιτητή Τατσίδη Φιλοκτήμων Γεώργιο του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής υπό την καθοδήγηση του επιβλέποντα.

Ο φοιτητής βεβαιώνει ότι κατά την εκπόνηση και τη συγγραφή της παρούσας πτυχιακής εργασίας τήρησε τα προβλεπόμενα από τον νόμο, τον εσωτερικό κανονισμό και τον κανονισμό εκπόνησης πτυχιακών εργασιών του Τμήματος, καθώς και ότι σεβάστηκε πλήρως τις Αρχές της Ακαδημαϊκής Ηθικής και του Κώδικα Δεοντολογίας, οι οποίες απαγορεύουν την παραποίηση των ερευνητικών/πειραματικών αποτελεσμάτων, την αναφορά ψευδών στοιχείων, την κατάχρηση της διανοητικής ιδιοκτησίας τρίτων και τη λογοκλοπή.

Ο/Η συγγραφέας

Τατσίδης Φιλοκτήμων Γεώργιος

DEMOCRITUS UNIVERSITY OF THRACE
SCHOOL OF SCIENCE
DEPARTMENT OF INFORMATICS

Design and Implementation of Analog Circuit Filters for Audio Processing

UNDERGRADUATE DISSERTATION

Tatsidis Filoktimon George**,** RN**:** 210126

A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the undergraduate degree in the Department of Informatics, Democritus University of Thrace.

COMMITTEE OF EXAMINERS

Supervisor: Michael Manios, EDIP, Department of Informatics, Democritus University of Thrace
Member 2: Eleni Vrochidou, Assistant Professor, Department of Informatics, Democritus University of Thrace
Member 3: Ioannis Tsimperidis, EDIP, Department of Informatics, Democritus University of Thrace

Kavala, March 2026

All rights reserved

Copyright © Filoktimon George Tatsidis, 2026

The approval of the undergraduate dissertation by the Department of Informatics, Democritus University of Thrace, does not necessarily indicate the acceptance of the views of the author.

Fulfillment of academic principles and ethics

The present undergraduate dissertation is original and was prepared entirely by the student Filoktimon George Tatsidis of the Undergraduate Program of Studies of the Department of Informatics, under the guidance of the supervisor. The student certifies that during the preparation and writing of this undergraduate dissertation he complied with the provisions of the law and the corresponding internal regulations of the Department, as well as that he/she fully respected the Principles of Academic Ethics and the Code of Ethics, which prohibit falsification of research/experimental results, false reporting, misuse of third-party intellectual property and plagiarism.

The author

Tatsidis Filoktimon George

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Σχεδίαση και Υλοποίηση Φίλτρων Αναλογικών Κυκλωμάτων για Επεξεργασία Ήχου» η οποία πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Πληροφορικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης κατά το έτος 2025-2026 συμβολίζει την περάτωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου προσέφεραν σε κάθε στάδιο των σπουδών μου, καθώς και τον θείο μου ο οποίος με βοήθησε ώστε να αποκτήσω τις απαραίτητες γνώσεις, δεξιότητες και εξοπλισμό για την υλοποίηση της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα για την υποστήριξη σε κάθε εμπόδιο που αντιμετώπισα, δίνοντας μου κουράγιο για να συνεχίσω.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον πρόεδρο του Τμήματος Δρ. Γεώργιο Α. Παπακώστα, τον επιβλέπων καθηγητή κ. Μιχαήλ Μανιό καθώς και την γραμματεία του τμήματος για την κατανόηση και στήριξη που μου παρείχαν δίνοντας μου περισσότερο χρόνο σε ένα δύσκολο λόγω θεμάτων υγείας στάδιο της ζωής μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέπων καθηγητή μου, τον κ. Μιχαήλ Μανιό για την πολύτιμη του βοήθεια, την υποστήριξη του και την άψογη επικοινωνία καθ’ όλη την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σχεδίαση και υλοποίηση φίλτρων αναλογικών κυκλωμάτων για επεξεργασία ήχου έχει μια συγκεκριμένη προσέγγιση και διαδικασία για την ορθή επίτευξη της. Η παρούσα πτυχιακή εργασία στοχεύει στο να τροποποιήσει ριζικά, να απλουστεύσει και να καταστήσει πιο οικονομική την κατασκευή ενός πεταλιού Overdrive έχοντας ως αρχικό σχέδιο το σχηματικό του Dunlop MXR Distortion+. Για την σχεδίαση του τελικού σχηματικού θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα LTSPICE, ένας προσομοιωτής κυκλωμάτων με πολυποίκιλες δυνατότητες και χρήσεις στον τομέα των ηλεκτρονικών. Έπειτα, το κύκλωμα θα σχεδιαστεί επάνω σε Breadboard για να δοκιμαστεί ο σχεδιασμός, και εφόσον υπάρχουν τα προσδοκόμενα αποτελέσματα, το κύκλωμα θα κολληθεί επάνω σε πλακέτα, το οποίο είναι το τελικό στάδιο.

Συγκεκριμένα, η πτυχιακή εργασία θα αποτελείται από τα επιμέρους ακόλουθα τμήματα.
Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται η εισαγωγή στο θέμα της πτυχιακής καθώς και αναλύονται οι στόχοι και η σημασία της. Στο Κεφάλαιο 2, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο περιλαμβάνει την ιστορία των αναλογικών πεταλιών, μια αναφορά στο πως παράγουν σήμα οι ηλεκτρικές κιθάρες, και λεπτομερή θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών των αναλογικών φίλτρων. Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται η τροποποίηση του αρχικού κυκλώματος και ο σχεδιασμός του τελικού, σύμφωνα με τύπους και κανόνες των αναλογικών ηλεκτρονικών. Επιπλέον, στο κεφάλαιο 3 γίνεται και η προσομοίωση του αρχικού και του τελικού κυκλώματος μέσω του προγράμματος LTSPICE, στο οποίο έχει γίνει και η σχεδίαση τους. Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται η κατασκευή του πεταλιού σε Breadboard και έπειτα σε Circuit Board, και η εφαρμογή του σε ενισχυτή με μουσικά όργανα. Στο Κεφάλαιο 5, αναλύονται τα προβλήματα που προέκυψαν, πως αντιμετωπίστηκαν μερικά από αυτά, και μελλοντικές βελτιώσεις. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, αναδεικνύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Επεξεργασία Ήχου, Αναλογικά Φίλτρα, Αναλογικά Ηλεκτρονικά

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Πετάλια κιθάρας, Μουσική, Επεξεργασία αναλογικού σήματος

ABSTRACT

The design and implementation of analog audio processing filters follows a specific approach and process in order to achieve the proper results. This thesis aims to radically modify, simplify and make the construction of an Overdrive pedal more cost effective, using as a guideline the schematic of the Dunlop MXR Distortion +. The software LTSPICE, a circuit simulator with diverse capabilities and applications in electronics, will be used to design the final schematic. Subsequently, the circuit will be assembled on a Breadboard to test the design. If the expected results are achieved, the circuit will be soldered onto a Hole-through Circuit Board which constitutes the final stage.

Specifically, the thesis consists of the following chapters. Chapter 1 provides an introduction to the topic of the thesis and analyzes its objectives and significance. Chapter 2 analyzes the theoretical background, including the history of analog pedals, a reference to how electric guitars produce signal, and a detailed theoretical analysis of the operation and characteristics of analog filters. Chapter 3 involves the modification of the original circuit and the design of the final one, according to the formulas and rules of analog electronics. Additionally, this chapter includes the simulation of both the original and final circuits via the LTSPICE software. Chapter 4 covers the construction of the pedal on a breadboard and subsequently on a circuit board, as well as its application with an amplifier and musical instruments. Chapter 5 analyzes the problems that arose, how some of them were addressed and potential future improvements. Finally, Chapter 6 highlights the conclusions drawn from the completion of the thesis.

SUBJECT AREA: Audio Processing, Analog Filters, Analog Electronics
KEYWORDS: Guitar pedals, Music, Analog Signal processing

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1 Πρόλογος 1
1.2 Σκοπός Εργασίας 1
1.3 Σημασία Εργασίας 2
2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Θεωρητικό Υπόβαθρο 3
2.1 Σύντομη αναφορά στα είδη Πεταλιών και την ιστορία τους 3
2.1.1 Fuzz 3
2.1.2 Distortion (Παραμόρφωση) 3
2.1.3 Overdrive 3
2.2 Ηλεκτρικές Κιθάρες και ο τρόπος που λειτουργούν 4
2.3 Παθητικά και Ενεργά φίλτρα 5
2.4 Τάξεις Φίλτρων 6
2.5 Βασικές Αρχές των Αναλογικών Φίλτρων και ιδανικές αποκρίσεις τους 8
2.5.1 Χαμηλοπερατά Φίλτρα (Low-Pass Filters): 8
2.5.2 Υψιπερατά Φίλτρα (High-Pass Filters): 10
2.5.3 Ζωνοπερατά Φίλτρα (Band-Pass Filters) 12
2.5.4 Ζωνοφρακτικά Φίλτρα (Band-Stop Filters) ή Φίλτρα Notch: 13
2.6 Τοπολογίες 16
2.7 Εφαρμογές στην Επεξεργασία Ήχου 17
3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Σχεδιασμός Αναλογικών Φίλτρων 18
3.1 Μελέτη αρχικού σχεδίου 18
3.1.1 Το Στάδιο του Τελεστικού Ενισχυτή 19
3.1.2 Το Στάδιο του «Clipping» 24
3.2 Προσομοίωση του αρχικού κυκλώματος 25
3.3 Σχεδίαση του πεταλιού της παρούσας πτυχιακής εργασίας 27
3.4 Υπολογισμός των στοιχείων 32
3.5 Προσομοίωση του πεταλιού 36
4. Υλοποίηση και Εφαρμογές 37
4.1 Υλοποίηση Αναλογικών Φίλτρων 37
4.1.1 Επιλογή Στοιχείων 37
4.1.2 Κατασκευή σε Breadboard 39
4.1.3 Κατασκευή του τελικού κυκλώματος σε πλακέτα βήμα προς βήμα 40
4.2 Δοκιμή του Πεταλιού σε ενισχυτή 46
5. Προβλήματα και μελλοντικές βελτιώσεις 46
5.1 Προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν 46

5.2 Προβλήματα που προέκυψαν κατά την δοκιμή 46
5.3 Μελλοντικές Βελτιώσεις..... 46
6. Συμπεράσματα.....47

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 2.2.1 - Η ανατομία του Μαγνήτη ……4
Εικόνα 2.2.2 - Η Λειτουργία του Μαγνήτη ……4
Εικόνα - 2.4.1 1ης τάξεως ενεργό φίλτρο……...7
Σχήμα 2.5.1 - Ιδανική χαμηλοπερατή απόκριση ……..8
Εικόνα 2.5.1 - Παθητικό Χαμηλοπερατό Φίλτρο (1ης τάξης)……...9
Εικόνα 2.5.2 - Ενεργό Χαμηλοπερατό Φίλτρο (1ης τάξης)……..9
Σχήμα 2.5.2 - Ιδανική υψιπερατή απόκριση……10
Εικόνα 2.5.3 - Παθητικό Υψιπερατό Φίλτρο (1ης τάξης)……11
Εικόνα 2.5.4 - Ενεργό Υψιπερατό Φίλτρο (1ης τάξης)……...11
Σχήμα 2.5.3 - Ιδανική ζωνοπερατή απόκριση……12
Εικόνα 2.5.5 - Παθητικό Ζωνοπερατό Φίλτρο.……13
Εικόνα 2.5.6 - Ενεργό Ζωνοπερατό Φίλτρο..…….13
Σχήμα 2.5.4 - Ιδανική ζωνοφρακτική απόκριση……..14
Εικόνα 2.5.7 - Ζωνοφρακτικό Φίλτρο……...14
Εικόνα 2.6.1 - Non-Inverting Amplifier……..15
Εικόνα 3.1.1 - Σχηματικό του MXR Distortion +……..17
Εικόνα 3.1.2 - Op-amp Stage του MXR Distortion+……18
Εικόνα 3.1.3 - Op-amp Stage του MXR Distortion +……...23
Εικόνα 3.2.1 - Προσομοίωση του κυκλώματος MXR Distortion+ σε SPICE……24
Εικόνα 3.2.2 - Παράμετροι προσομοίωσης……24
Εικόνα 3.2.3 - Προσομοίωση παλμογράφου στην είσοδο και έξοδο μέσω SPICE……26
Εικόνα 3.3.1 - Τα Pins και η συνδεσμολογία του……27
Εικόνα 3.3.2 - Τμήμα εισόδου……28
Εικόνα 3.3.3 - Τροφοδοσία του LM741 και προσθήκη εξόδου……..28
Εικόνα 3.3.4 - Σχηματισμός υψιπερατού φίλτρου και προσθήκη Clipping Stage……...29
Εικόνα 3.3.5 - Τελική μορφή κυκλώματος……30
Εικόνα 3.4.1 - Τελική μορφή του κυκλώματος με τιμές……..34
Εικόνα 3.5.1 - Προσομοίωση του Πεταλιού της Εργασίας……35
Εικόνα 4.1.1 - Κατασκευή του κυκλώματος σε BreadBoard…..……..38
Εικόνα 4.1.2 - Βήμα 1...…..……...39
Εικόνα 4.1.3 - Βήμα 2...…..…….....39

Εικόνα 4.1.4 - Βήμα 3...…..…….…….....40
Εικόνα 4.1.5 - Βήμα 4...…..…….....40
Εικόνα 4.1.6 - Βήμα 5...…..…….....41
Εικόνα 4.1.7 - Βήμα 6...…..…….....41
Εικόνα 4.1.8 - Βήμα 7...…..…….....41
Εικόνα 4.1.9 - Βήμα 8...…..…….....42
Εικόνα 4.1.10 - Βήμα 9...…..…….....42
Εικόνα 4.1.11 - Βήμα 10…..…….....43
Εικόνα 4.1.12 - Βήμα 11.....…….....43
Εικόνα 4.1.13 - Βήμα 12…..…….....44
Εικόνα 4.1.14 - Βήμα 13…..…….....44

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 - Τα χαρακτηριστικά του LM741 [18] 21
Πίνακας 2 - Λίστα Υλικών 38

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	**Ελληνικός όρος**
Adjustment Rate	Ρυθμός Ρύθμισης
Amplifier	Ενισχυτής
Analog	Αναλογικό
Attenuation Rate	Ρυθμός Εξασθένησης
Band-Pass	Ζωνοπερατό
Band-Stop	Ζωνοφρακτικό
Bandwidth	Εύρος Ζώνης
Battery	Μπαταρία
Boost	Ενίσχυση
Braided Shield Cable	Θωρακισμένο Καλώδιο (Πλέγμα)
Breadboard	Ράστερ
Brick Wall	Τείχος (Απότομη Αποκοπή)
Capacitor	Πυκνωτής
Ceramic Capacitor	Κεραμικός Πυκνωτής
Circuit Board	Πλακέτα
Clipping	Ψαλιδισμός
Common-mode Rejection Ratio	Λόγος Απόρριψης Κοινού Σήματος
Connector	Σύνδεση/Συνδετήρας/Βύσμα
Cutoff Frequency	Συχνότητα Αποκοπής
Diode	Δίοδος
Distortion	Παραμόρφωση
Effects Unit	Μονάδα Εφέ
Electrolytic Capacitor	Ηλεκτρολυτικός Πυκνωτής
Equalization	Ισοστάθμιση
Extreme Clipping	Ακραία Αποκοπή
Feedback Loop	Βρόχος Ανάδρασης
Female Jack	Θηλυκό Βύσμα (Jack)
Filter	Φίλτρο
Flux	Σολντερίνη (ή Φλάξ)

Frequency	Συχνότητα
Fuzz	Φαζ (Έντονη Παραμόρφωση)
Gain	Απολαβή (Κέρδος)
Ground	Γείωση
Guitar Pedal	Πετάλι Κιθάρας
Hard Clipping	Σκληρή Αποκοπή
High Input Impedance	Υψηλή Εμπέδηση Εισόδου
High-Pass	Υψιπερατό
Hole-through PCB	Πλακέτα Συμβατικής Στήριξης (Διαμπερής)
Impedance	Εμπέδηση
Input	Είσοδος
Input Bias Current	Ρεύμα Πόλωσης Εισόδου
Input Offset Voltage	Τάση Αντιστάθμισης Εισόδου
Input Resistance	Αντίσταση Εισόδου
Input Voltage Range	Εύρος Τάσης Εισόδου
Integrated Circuits	Ολοκληρωμένα Κυκλώματα
Isopropyl Alcohol	Ισοπροπυλική Αλκοόλη
Jumper	Καλώδιο Γεφύρωσης
Large Signal	Ισχυρό Σήμα
Lead Solder	Κόλληση Μόλυβδου (Καλάι)
Linear Potentiometer	Γραμμικό Ποτενσιόμετρο
Low Input Impedance	Χαμηλή Εμπέδηση Εισόδου
Low-Pass	Χαμηλοπερατό
Multiple Feedback	Πολλαπλή Ανάδραση
Noise Reduction	Μείωση Θορύβου
Non-Inverting	Μη-Αναστρέφων
Operational Amplifier	Τελεστικός Ενισχυτής
Output	Έξοδος
Output Short Circuit Current	Ρεύμα Βραχυκύκλωσης Εξόδου
Output Voltage Swing	Αιώρηση Τάσης Εξόδου
Overdrive	Υπερδήγηση
Overshoot	Υπέρβαση
Parameter	Παράμετρος
Passband	Ζώνη Διέλευσης

Phase Response	Απόκριση Φάσης
Pickup	Μαγνήτης (Οργάνου)
Potentiometer	Ποτενσιόμετρο
Power Consumption	Κατανάλωση Ισχύος
Power Supply	Τροφοδοτικό
Resistor	Αντίσταση
Rise Time	Χρόνος Ανόδου
Roll-off Rate	Ρυθμός Πτώσης
Saturation	Κόρος
Silicone Gun	Πιστόλι Σιλικόνης
Sine	Ημίτονο
Slew Rate	Ρυθμός Μεταβολής
Soft-Clipping	Μαλακή Αποκοπή
Soldering Iron	Κολλητήρι
Stage	Στάδιο
Stopband	Ζώνη Αποκοπής
Supply Current	Ρεύμα Τροφοδοσίας
Supply Voltage Rejection Ratio	Λόγος Απόρριψης Τάσης Τροφοδοσίας
Test Conditions	Συνθήκες Δοκιμής
Tone Shaping	Διαμόρφωση Τόνου
Tone Sucking	Απώλεια Τόνου
Topology	Τοπολογία
Total Input Impedance	Συνολική Εμπέδηση Εισόδου
Transient Response	Μεταβατική Απόκριση
Unit	Μονάδα
Voltage Amplitude	Πλάτος Τάσης
Voltage Gain	Απολαβή Τάσης
Voltage Offset	Μετατόπιση Τάσης

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

A	Ampere
AC	Alternating Current
C	Capacitor
dB	Decibel
DC	Direct Current
f_H	High Cut-off Frequency
F_L	Low Cut-off Frequency
Fc	Cut-off Frequency
GBWP	Gain-Bandwidth Product
GND	Ground
Hz	Hertz
IC	Integrated Circuit
L	Coil
LED	Light Emitting Diode
MFB	Multiple Feedback
Op-Amp	Operational Amplifier
PCB	Printed Circuit Board
R	Resistance
RC	Resistor Capacitor
RF	Radio Frequency
SPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
V	Volts
Ω	Ohms

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΉ

1.1 Πρόλογος

Η επεξεργασία ήχου αποτελεί ένα πολυδιάστατο επιστημονικό πεδίο το οποίο συνδυάζει την ηλεκτρονική μηχανική με την ακουστική αισθητική, στοχεύοντας στην βελτίωση και την τροποποίηση των ηχητικών σημάτων μέσω διαφόρων τεχνικών. Στο επίκεντρο αυτής της διαδικασίας βρίσκονται τα αναλογικά φίλτρα, τα οποία διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο, επιτρέποντας την επιλεκτική απομόνωση ή απόρριψη συγκεκριμένων περιοχών του φάσματος συχνοτήτων, την εξομάλυνση του σήματος και την αποτελεσματική απομάκρυνση ανεπιθύμητων θορύβων. Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στις εφαρμογές αυτών των αναλογικών φίλτρων για την επεξεργασία του ήχου που παράγεται από ηλεκτρικά έγχορδα μουσικά όργανα, όπως η ηλεκτρική κιθάρα και το ηλεκτρικό μπάσο, όπου η διαδικασία αυτή δεν είναι απλώς διορθωτική, αλλά βασική για το καλλιτεχνικό αποτέλεσμα. Τα φίλτρα αυτά, που για την χρήση σε ηλεκτρικές κιθάρες και μπάσα ονομάζονται πετάλια κιθάρας (Guitar Pedals) ή μονάδες εφέ (Effects Units) χρησιμοποιούν αναλογικά κυκλώματα για να παρέμβουν στη δυναμική και τη φασματική πυκνότητα του σήματος. Μέσω της χρήσης εξαρτημάτων όπως τους τελεστικούς ενισχυτές, τις αντιστάσεις, τους πυκνωτές και τις διόδους, οι μονάδες αυτές έχουν την ικανότητα να διαμορφώνουν τον τόνο και τη χροιά, καθώς και να προσθέτουν εφέ όπως η παραμόρφωση (Distortion), το Fuzz και το Overdrive. Τα συγκεκριμένα εφέ βασίζονται στη μη γραμμική απόκριση των κυκλωμάτων και στο λεγόμενο «ψαλίδισμα» (clipping) του σήματος, μετατρέποντας το καθαρό ημιτονοειδές σήμα που παράγουν οι χορδές τις κιθάρας και του μπάσου σε έναν πλούσιο ήχο που καθορίζει ολόκληρα μουσικά είδη εδώ και δεκάδες χρόνια.

1.2 Σκοπός Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η σχεδίαση αναλογικών φίλτρων για την επεξεργασία του ήχου που παράγεται από ηλεκτρικές κιθάρες. Στόχος της είναι λαμβάνοντας ως βάση κάποια ήδη σχεδιασμένα αναλογικά κυκλώματα, να τροποποιηθούν ορθά και με κατάλληλα υλικά ώστε να ληφθεί κάποιο επιθυμητό αποτέλεσμα επεξεργασμένου ήχου, λαμβάνοντας υπόψη την απλότητα του σχεδιασμού και το όσο το δυνατόν πιο οικονομικό κόστος κατασκευής. Η πτυχιακή εργασία επιδιώκει να παρουσιάσει τα αποτελέσματα της χρήσης αναλογικών φίλτρων επεξεργασίας ήχου στον χώρο των μουσικών οργάνων για την επίτευξη του επιθυμητού παραχθέντα ήχου.

1.3 Σημασία Εργασίας

Είναι γνωστό πως η μουσική είναι ένα πολύ μεγάλο και αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής του ανθρώπου, όντας η πιο καταναλισκόμενη μορφή τέχνης στην καθημερινότητα του, ειδικά τα τελευταία 30 χρόνια της ψηφιακής εποχής που η κατανάλωση της έχει γίνει πιο εύκολη από ποτέ λόγω της μη-περιορισμένης πρόσβασης και της διαθεσιμότητας της σε ολόκληρο τον κόσμο. Όπως όλες τις μορφές τέχνης, με τα χρόνια η μουσική αλλάζει και προσαρμόζεται στην τεχνολογία της εποχής ακολουθώντας τις εξελίξεις της, αλλά υπάρχουν είδη μουσικής τα οποία παρόλη την εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία 40 χρόνια, ακόμα προτιμούν να χρησιμοποιούν μηχανήματα και μέσα παλαιότερης τεχνολογίας. Το γεγονός αυτό θέτει ένα ερώτημα: γιατί παρόλο που υπάρχει πιο φτηνή και αποτελεσματική τεχνολογία, η πλειοψηφία των μουσικών των ειδών αυτών επιλέγουν vintage εξοπλισμό; Μήπως κάποια πράγματα δεν χρειάζονται την εξέλιξη της τεχνολογίας; Παρόλο που τα ψηφιακά πετάλια κατά κύριο λόγο είναι πιο φτηνά και αποτελεσματικά, ο ήχος που παράγεται από αναλογικά πετάλια φαντάζει νοσταλγικός, και η αμεσότητα τους και ο οργανικός τόνος τους, τα κάνει πιο ελκυστικά. Αυτή είναι η γνώμη πολλών μουσικών ακόμα και σήμερα.

Σημασία της εργασίας λοιπόν, είναι να επαναφέρει παλαιότερες τεχνολογίες και πιο συγκεκριμένα τα αναλογικά φίλτρα για την εφαρμογή τους στην μουσική, στον τομέα της επεξεργασίας ήχου ηλεκτρικών οργάνων και να βοηθήσει στο να απλοποιηθούν τα κυκλώματα αυτά. Με αυτήν την διαδικασία, γίνονται πιο κατανοητά και βοηθάει άτομα που θα ήθελαν να κατασκευάσουν κάτι αντίστοιχο.

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Σύντομη αναφορά στα είδη Πεταλιών και την ιστορία τους

Αρχικά, πρέπει να γίνει μια αναφορά στον λόγο που οι συσκευές αυτές ονομάζονται πετάλια. Οι κιθαρίστες σε συνθήκες ζωντανής συναυλίας, που δεν έχουν τα χέρια τους ελεύθερα, έπρεπε να μπορούν να αλλάζουν κάπως τον ήχο από π.χ. Καθαρό σε Τραχύ, αλλά όσο παίζουν κιθάρα, δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα χέρια τους για να κάνουν τέτοιες αλλαγές. Έτσι λοιπόν, οι συσκευές αυτές σχεδιάστηκαν ώστε να μπορούν να γίνουν αυτές τις αλλαγές με την χρήση των ποδιών, λειτουργώντας σαν πετάλια, έτσι βγήκε και το όνομα.

Υπάρχει μεγάλο πλήθος από διαφορετικά είδη πεταλιών, καθώς όλα ξεχωριστά προσφέρουν κάτι διαφορετικό στο τελικό αποτέλεσμα του ήχου, κάθε ένα από αυτά τα εφέ σχηματίζουν και διαμορφώνουν σημαντικά τον ήχο που παράγει το μουσικό όργανο για να δώσουν τον χαρακτήρα που απαιτεί το κάθε είδος μουσικής. Παραδείγματος χάριν, στην Blues μουσική παρόλο που γίνεται χρήση Distortion, ο ήχος είναι πιο απαλός, με ελαφρά στοιχεία παραμόρφωσης (π.χ. B.B. King), αλλά τα πιο «βαριά» είδη όπως η Metal σκοπίμως κάνουν έντονη χρήση της παραμόρφωσης από Distortion Pedals για να αποδοθεί αυτός ο χαρακτηριστικός τραχύς και «βίαιος» ήχος (π.χ. Black Sabbath), βαριά χρήση της παραμόρφωσης έκανε επίσης και η Psychedelic Rock (Ψυχεδελική Ροκ) μέσω του του Fuzz pedal, (π.χ. Jimi Hendrix) που ήταν από τα πρώτα είδη μουσικής που έκαναν χρήση τέτοιων εφέ. Γίνεται άρα να συμπεραθεί ότι τα πετάλια αυτά έχουν χαρακτηρίσει από την δεκαετία του 1960, και συνεχίζουν να χαρακτηρίζουν μέχρι και σήμερα, όλα τα είδη μουσικής που κάνουν χρήση ηλεκτρικών μουσικών οργάνων. Αξίζει όμως να γίνει μια αναφορά στα βασικά πετάλια τα οποία προετοίμασαν το έδαφος για τα επακόλουθα.

2.1.1 Fuzz

Το Fuzz pedal είναι αδιαμφισβήτητα από τα πρώτα πετάλια που βγήκαν στην αγορά για χρήση σε ηλεκτρική κιθάρα με το μοντέλο της Gibson το Gibson Maestro FZ-1 Fuzz Tone το οποίο παραμόρφωνε τον ήχο και τον έκανε πιο βαρύ και μπουκωμένο.
Πριν από αυτό, για να έχουν παρόμοιο ήχο οι μουσικοί, έκαναν σκοπίμως τρύπες στα ηχεία των ενισχυτών καθώς και υπερφόρτωναν τις λυχνίες τους.

2.1.2 Distortion (Παραμόρφωση)

Τα Distortion pedals προσθέτουν παραμόρφωση στον ήχο, η οποία καθιστά τον ήχο πιο τραχύ και γεμάτο. Το distortion έχει μόνιμο, βαρύ κορεσμό (saturation), ανεξάρτητα από την ένταση του ενισχυτή. Για να το πετύχει, «κόβει» το καθαρό σήμα (clipping) δημιουργώντας παραμόρφωση.

2.1.3 Overdrive

Το Overdrive pedal έχει σχεδιαστεί με σκοπό να προσομοιώνει τον ήχο ενός ενισχυτή λυχνίας που λειτουργεί στα όρια του. Σε αντίθεση με το distortion, το overdrive είναι δυναμικό που σημαίνει πως ανταποκρίνεται στο πόσο δυνατά αρπίζονται οι χορδές.

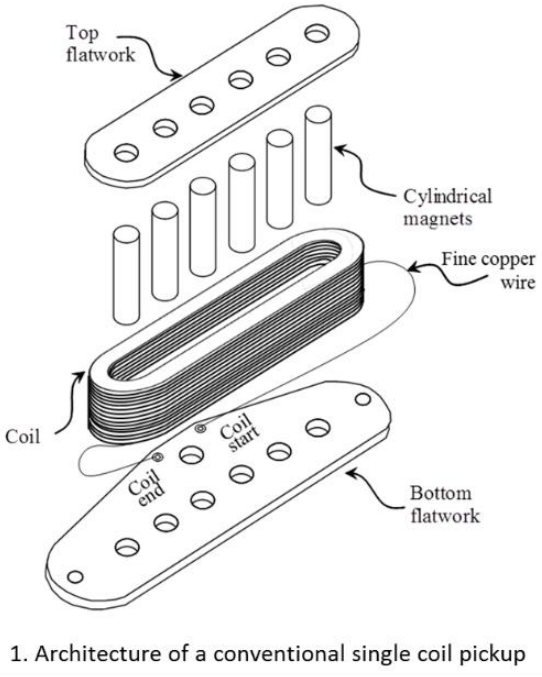
2.2 Ηλεκτρικές Κιθάρες και ο τρόπος που λειτουργούν

Προτού γίνει εμβάθυνση στην λειτουργία των αναλογικών φίλτρων, είναι σημαντικό να γίνει μία αναφορά στον τρόπο που λειτουργούν οι ηλεκτρικές κιθάρες και κατ' επέκτασιν στον λόγο για τον οποίο μπορεί να γίνει η επεξεργασία του ήχου που παράγουν.

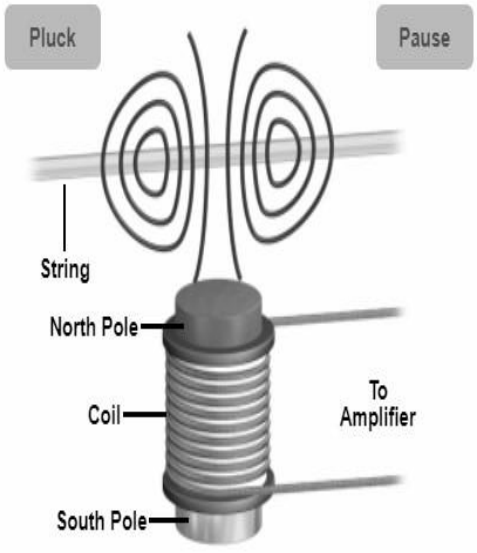
Οι ηλεκτρικές κιθάρες έχουν τρία κύρια χαρακτηριστικά για την παραγωγή του σήματος:

- Επινικελοποιημένες μαγνητικές χορδές όπου η κάθε μία έχει διαφορετικό πάχος/διάμετρο όπου όσο μικρότερη διάμετρο έχει η χορδή τόσο πιο ψηλή είναι η συχνότητα του σήματος[1, p. 1.01-1.41]
- Το ελάχιστο έναν μαγνήτη (pickup), συνήθως από αλνίκο ή κεραμικό υλικό, περιβάλλονται από χάλκινο σύρμα και δημιουργούν μαγνητικό πεδίο γύρω από τις χορδές.[1, p. 4.10-4.31, 5.01-5.17], [2], [3], [4]
- Ηλεκτρονικά Κυκλώματα: Το σήμα περνάει από ποτενσιόμετρα έντασης και τόνου καθώς και από επιλογείς που επιτρέπουν την ρύθμιση του σήματος πριν βγει από την κιθάρα.

Ουσιαστικά, για την παραγωγή σήματος, οι ηλεκτρικές κιθάρες μετατρέπουν τις δονήσεις των μεταλλικών χορδών σε ηλεκτρικό σήμα (AC) μέσω των μαγνητών, καθώς οι δονήσεις αυτές διαταράσσουν το μαγνητικό πεδίο δημιουργώντας ένα ασθενές ηλεκτρικό σήμα. Το παραχθέν αυτό σήμα έπειτα περνά από ποτενσιόμετρα και επιλογείς και μετά φτάνει στον ενισχυτή ή στην προκειμένη περίπτωση στο πετάλι. Το παραχθέν σήμα έχει ημιτονοειδή μορφή με συχνότητα η οποία κυμαίνεται τυπικά από 80 Hz μέχρι και 1000 Hz, μπορεί όμως να φτάσει ακόμα και τα 8000 Hz.[1]



Εικόνα 2.2.1 - Η ανατομία του Μαγνήτη [3]



Εικόνα 2.2.2 - Η Λειτουργία του Μαγνήτη [4]

2.3 Παθητικά και Ενεργά φίλτρα

Τα αναλογικά φίλτρα ανάλογα με τα στοιχεία που χρησιμοποιούν και τον τρόπο λειτουργίας τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα παθητικά φίλτρα και τα ενεργά φίλτρα.

Τα παθητικά φίλτρα χρησιμοποιούν αποκλειστικά παθητικά ηλεκτρονικά στοιχεία όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, διόδους και πηνία και ως αποτέλεσμα δεν απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία ρεύματος αλλά αρκεί μόνο η ενέργεια του · στην προκειμένη περίπτωση AC σήματος εισόδου που παράγει η ηλεκτρική κιθάρα. Παραδείγματος χάριν, ανάλογα με την συχνότητα του σήματος εισόδου, μεταβάλλεται η αντίδραση των πυκνωτών και των πηνίων, γεγονός που επιτρέπει την δημιουργία χαμηλοπερατών, υψιπερατών, ζωνοπερατών ή ζωνοφρακτικών φίλτρων.

Κύρια χαρακτηριστικά των παθητικών φίλτρων:

- Καθώς δεν υπάρχει ενίσχυση του σήματος λόγω της έλλειψης εξωτερικής τροφοδοσίας, η μέγιστη τάση εξόδου είναι πάντα μικρότερη ή ίση της τάσης εισόδου.[5], [6], [7], [8]
- Η συχνότητα αποκοπής και η κλίση αποκοπής εξαρτώνται εκτός από τα R (αντιστάσεις), C (πυκνωτές) και L (πηνία) και από το φορτίο το οποίο συνδέεται στην έξοδο του φίλτρου. [9]

Τα παθητικά φίλτρα όμως έχουν κάποιους πολύ σημαντικούς περιορισμούς:

- Δεν μπορούν να ενισχύσουν το σήμα αλλά μόνο να το αποδυναμώσουν, λόγω της έλλειψης εξωτερικής τροφοδοσίας.
- Η απόκριση συχνότητας τους εξαρτάται από το φορτίο που συνδέεται στην έξοδο.
- Τα πηνία που απαιτούνται για χαμηλές συχνότητες είναι ογκώδη και ακριβά, ως αποτέλεσμα εάν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια ή μικρό μέγεθος, το κόστος κατασκευής τους είναι απαγορευτικό. [10, p. 7]

Τα ενεργά φίλτρα αντιθέτως, εκτός από τα παθητικά στοιχεία χρησιμοποιούν και ενεργά στοιχεία όπως τα τρανζίστορ (transistor) και κυρίως ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits) αλλά πιο συγκεκριμένα τους τελεστικούς ενισχυτές (Operational Amplifiers) που είναι τύπος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Λόγω των ενεργών αυτών στοιχείων, είναι απαραίτητη η εξωτερική τροφοδοσία του κυκλώματος για την λειτουργία τους, και ως αποτέλεσμα δύναται η ενίσχυση του σήματος εξόδου.

Τα πλεονεκτήματα εφαρμογής ενεργών φίλτρων είναι:

- Ικανότητα ενίσχυσης του σήματος (Gain)
- Απλούστερη, μικρότερη και συνήθως πιο οικονομική κατασκευή σε σχέση με τα παθητικά φίλτρα λόγω της αποφυγής χρήσης πηνίων
- Μεγαλύτερος έλεγχος στην σχεδίαση
- Μεγαλύτερη ευελιξία
- Οι τελεστικοί ενισχυτές προσφέρουν υψηλή αντίσταση εισόδου και χαμηλή αντίσταση εξόδου πράγμα το οποίο σημαίνει πως το φίλτρο δεν επηρεάζεται εύκολα από το φορτίο εξόδου ή την πηγή εισόδου [11]

Τα μειονεκτήματα εφαρμογής ενεργών φίλτρων είναι:

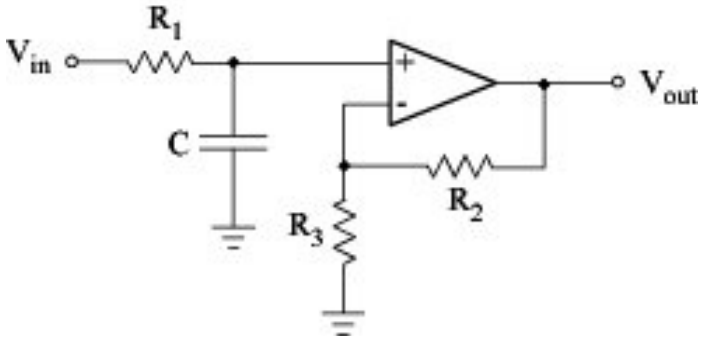
- Απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία για την τροφοδοσία του τελεστικού ενισχυτή, στα πετάλια ηλεκτρικής κιθάρας η τροφοδοσία αυτή τυπικά είναι 9V DC
- Σε σχέση με πολύ απλά παθητικά φίλτρα μπορεί να έχει ελαφρά μεγαλύτερο κόστος [10, p. 7]

2.4 Τάξεις Φίλτρων

Τα αναλογικά φίλτρα, και τα παθητικά αλλά και τα ενεργά, χαρακτηρίζονται από κάποια τάξη η οποία συμβολίζεται με το σύμβολο n. Ο παράγοντας ο οποίος καθορίζει την τάξη του φίλτρου διαφέρει μεταξύ των παθητικών και των ενεργών φίλτρων. Στα παθητικά φίλτρα, η τάξη του φίλτρου ισούται με το συνολικό πλήθος των πυκνωτών και των πηνίων που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα. Για παράδειγμα, εάν ένα φίλτρο έχει έναν πυκνωτή και ένα πηνίο, είναι δεύτερης τάξεως (n = 2), εάν ένα φίλτρο έχει δύο πυκνωτές και δύο πηνία, είναι τέταρτης τάξεως (n = 4) και ούτω καθεξής. Η τάξη κατ' ουσίαν μας περιγράφει πόσο περίπλοκο είναι ένα φίλτρο, όπου όσο πιο μεγάλη είναι η τάξη τόσο πιο περίπλοκο είναι το φίλτρο. Στα ενεργά φίλτρα, η τάξη του φίλτρου ισούται με το συνολικό πλήθος των RC κυκλωμάτων που περιέχει(RC = Resistance Capacitance / Resistor Capacitor), τα οποία ονομάζονται πόλοι. Αν ένα κύκλωμα περιέχει 4 RC κυκλώματα, τότε είναι τέταρτης τάξεως (n = 4). Λόγω της δυσκολίας στην μέτρηση των επιμέρους RC κυκλωμάτων σε ένα ενεργό φίλτρο, χρησιμοποιείται ένας απλούστερος τρόπος για τον καθορισμό της τάξης:
$n \cong$ #πυκνωτών όπου # συμβολίζει το πλήθος. Ουσιαστικά αντί να μετριόνται τα επιμέρους RC κυκλώματα, μετριέται το πλήθος των πυκνωτών και αυτό καθορίζει την τάξη του φίλτρου. Παραδείγματος χάριν, εάν ένα φίλτρο έχει 10 πυκνωτές, είναι δέκατης τάξεως (n = 10) και ούτω καθεξής.[8, p. 801]

Παραδείγματα τάξεων ενεργών φίλτρων

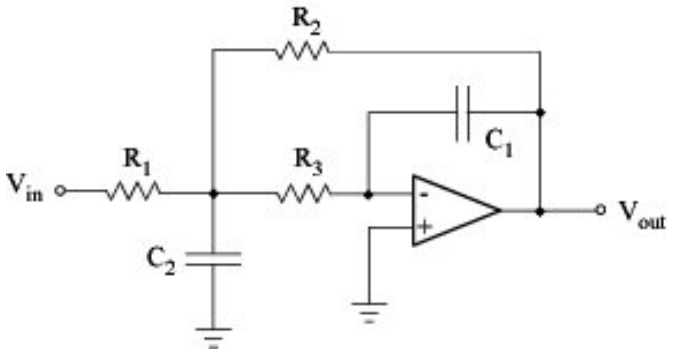
Πρώτης Τάξεως Ενεργό Χαμηλοπερατό Φίλτρο (Ολοκληρωτής RC)



Εικόνα - 2.4.1 1ης τάξεως ενεργό φίλτρο [12]

Όπως φαίνεται στο κύκλωμα της παραπάνω εικόνας, υπάρχει μόνο ένας πυκνωτής C, άρα αυτό το φίλτρο που απεικονίζεται είναι πρώτης τάξεως (n = 1).

Δεύτερης Τάξεως Ενεργό MFB (Multiple Feedback) Χαμηλοπερατό Φίλτρο



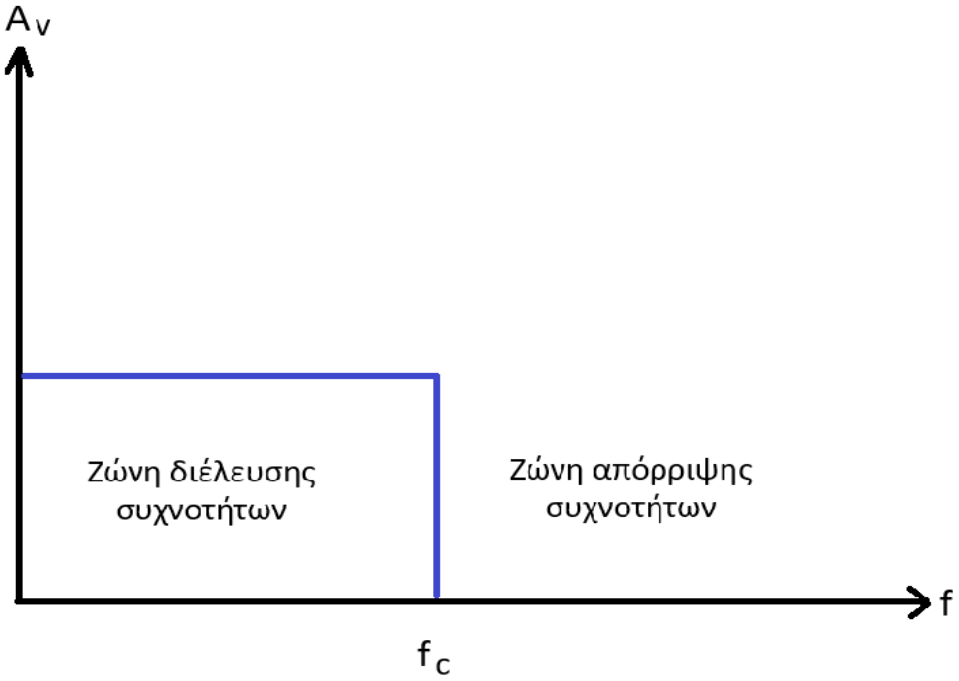
Εικόνα 2.4.2 - 2ης Τάξεως Ενεργό Φίλτρο [12]

Ομοίως, σε αυτό το κύκλωμα στην παραπάνω εικόνα υπάρχουν δύο πυκνωτές, τους C1 και C2, άρα αυτό το φίλτρο είναι δεύτερης τάξεως (n =2).

2.5 Βασικές Αρχές των Αναλογικών Φίλτρων και ιδανικές αποκρίσεις τους

Τα αναλογικά φίλτρα είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία επιτρέπουν ή απορρίπτουν συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων του σήματος. Ανάλογα με τη λειτουργία τους, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες φίλτρων:

2.5.1 Χαμηλοπερατά Φίλτρα (Low-Pass Filters): Τα χαμηλοπερατά φίλτρα είναι κυκλώματα τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων ενώ παράλληλα εξασθενούν ή απορρίπτουν τα σήματα των υψηλών συχνοτήτων πάνω από μία συγκεκριμένη συχνότητα αποκοπής (Cut-off frequency).
Στο σχήμα 2.5.1 φαίνεται η ιδανική απόκριση συχνότητας ενός χαμηλοπέρατου φίλτρου, η οποία ονομάζεται απότομη απόκριση (Brick wall) λόγω της ομοιότητας του δεξιού άκρου με τοίχο από τούβλα. Ένα χαμηλοπερατό φίλτρο επιτρέπει την διέλευση όλων των συχνοτήτων από το 0 μέχρι και την συχνότητα αποκοπής (fc) και απορρίπτει όλες τις συχνότητες πάνω από αυτήν.



Σχήμα 2.5.1 - Ιδανική χαμηλοπερατή απόκριση [8, p. 796]

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φίλτρου χαμηλής διέλευσης περιλαμβάνουν:

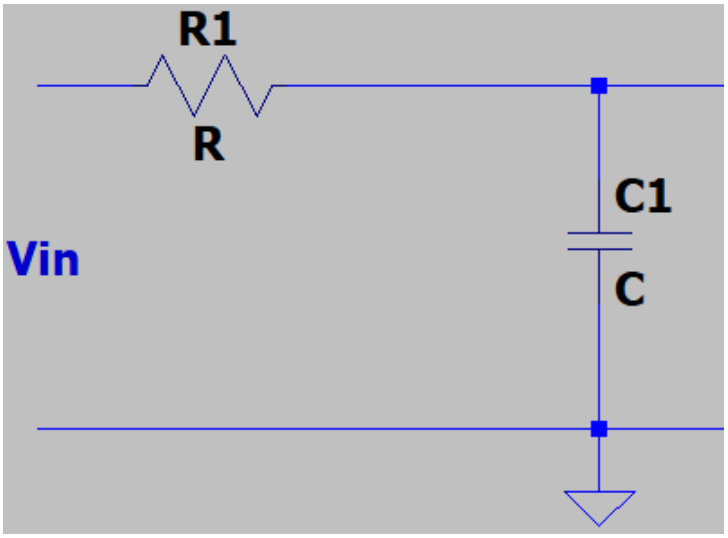
1. Ζώνη Διέλευσης (Passband): Βρίσκεται κάτω από τη συχνότητα αποκοπής. Προσδιορίζει το εύρος των χαμηλών συχνοτήτων που περνούν αμετάβλητες ή με ελάχιστη εξασθένηση.

2. Ζώνη Αποκοπής (Stopband): Βρίσκεται πάνω από τη συχνότητα αποκοπής. Αναφέρεται στο εύρος των υψηλών συχνοτήτων που απορρίπτονται ή εξασθενούν δραστικά από το φίλτρο, προσδιορίζοντας το φάσμα των συχνοτήτων που δεν επιτρέπεται να περάσουν. Η περιοχή μεταξύ της ζώνης διέλευσης και μετάβασης ονομάζεται περιοχή μετάβασης.
3. Ρυθμός Εξασθένησης (Attenuation rate): Περιγράφει την ταχύτητα με την οποία μειώνεται η ένταση των συχνοτήτων στην περιοχή της ζώνης αποκοπής (υψηλές συχνότητες), καθώς η συχνότητα αυξάνεται. Ένα ιδανικό χαμηλοπερατό φίλτρο έχει μηδενική εξασθένηση

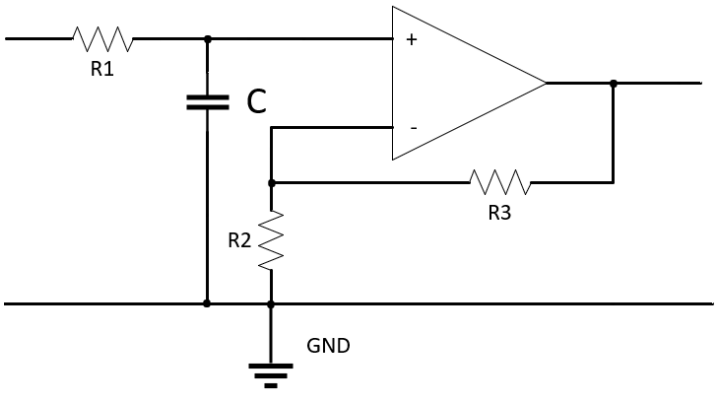
(απώλεια σήματος) στην ζώνη διέλευσης συχνοτήτων και άπειρη εξασθένηση στην ζώνη αποκοπής συχνοτήτων καθώς και κάθετη περιοχή μετάβασης.

4. Απόκριση Φάσης (Phase response): Αναφέρεται στις καθυστερήσεις που επιφέρει το φίλτρο στην φάση των σημάτων κατά την διέλευση τους μέσα από αυτό, γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα του σήματος μετά την διέλευση.

Ένα ιδανικό χαμηλοπερατό φίλτρο έχει μηδενική εξασθένηση (απώλεια σήματος) στην ζώνη διέλευσης συχνοτήτων και άπειρη εξασθένηση στην ζώνη αποκοπής συχνοτήτων καθώς και κάθετη περιοχή μετάβασης. Το ιδανικό χαμηλοπερατό φίλτρο επίσης έχει μηδενική μετατόπιση φάσης για όλες τις συχνότητες της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων.[8, p. 796]

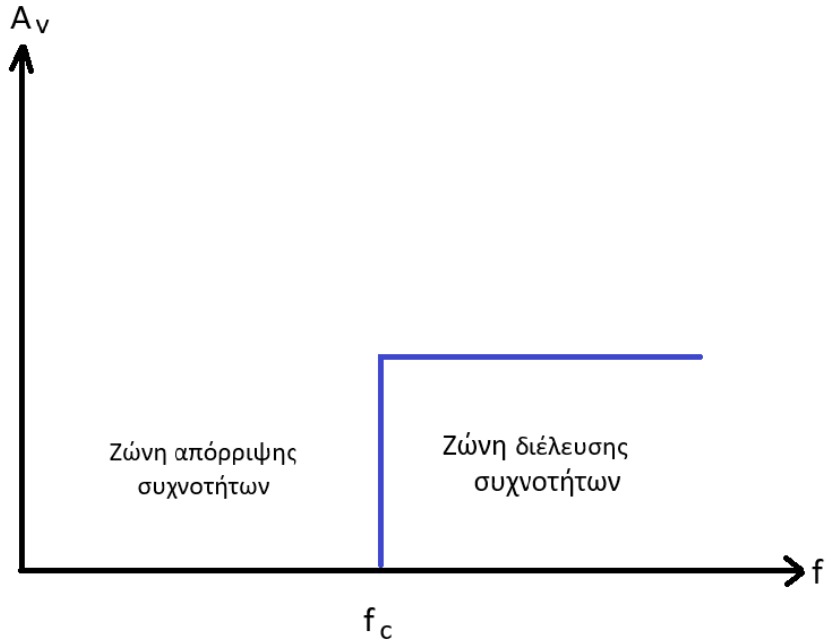


Εικόνα 2.5.1 - Παθητικό Χαμηλοπερατό Φίλτρο (1ης τάξης) [6], [11]



Εικόνα 2.5.2 - Ενεργό Χαμηλοπερατό Φίλτρο (1ης τάξης) [6], [11]

2.5.2 Υψιπερατά Φίλτρα (High-Pass Filters): Τα υψιπερατά φίλτρα είναι κυκλώματα τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση των υψηλών συχνοτήτων ενώ παράλληλα εξασθενούν ή απορρίπτουν τα σήματα των χαμηλών συχνοτήτων κάτω από μία συγκεκριμένη συχνότητα αποκοπής (Cut-off frequency), ουσιαστικά εκτελούν την αντίθετη λειτουργία σε σχέση με τα χαμηλοπερατά.
Στο σχήμα 2.5.2 φαίνεται η ιδανική απόκριση συχνότητας ενός υψιπερατού φίλτρου. Ένα υψιπερατό φίλτρο δεν επιτρέπει την διέλευση σε συχνότητες από το μηδέν μέχρι την συχνότητα αποκοπής (fc) και επιτρέπει την διέλευση σε αυτές πάνω από αυτήν.



Σχήμα 2.5.2 - Ιδανική υψιπερατή απόκριση[8, p. 797]

Ομοίως, τα βασικά τους χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

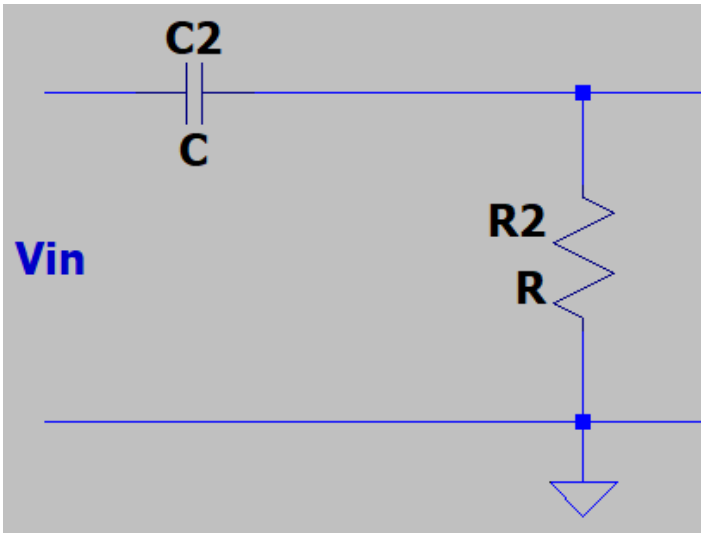
1. Ζώνη Αποκοπής (Stopband): Βρίσκεται κάτω από τη συχνότητα αποκοπής. Αναφέρεται στο εύρος των χαμηλών συχνοτήτων που απορρίπτονται ή εξασθενούν δραστικά από το φίλτρο, προσδιορίζοντας το φάσμα των συχνοτήτων που δεν επιτρέπεται να περάσουν.

2. Ζώνη Διέλευσης (Passband): Βρίσκεται πάνω από τη συχνότητα αποκοπής. Προσδιορίζει το εύρος των υψηλών συχνοτήτων που περνούν αμετάβλητες ή με ελάχιστη εξασθένηση.

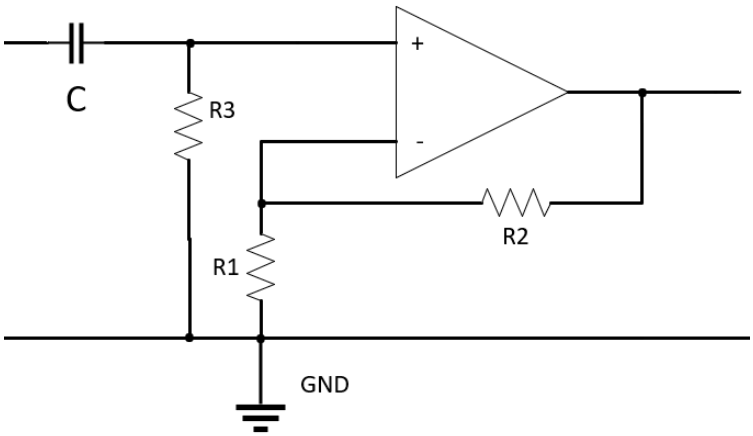
3. Ρυθμός Εξασθένησης (Attenuation rate): Περιγράφει την ταχύτητα με την οποία μειώνεται η ένταση των συχνοτήτων στην περιοχή της ζώνης αποκοπής (χαμηλές συχνότητες), καθώς η συχνότητα μειώνεται.

4. Απόκριση Φάσης (Phase response): Αναφέρεται στις καθυστερήσεις που επιφέρει το φίλτρο στην φάση των σημάτων κατά την διέλευση τους μέσα από αυτό, γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα του σήματος μετά την διέλευση.

Ένα ιδανικό υψιπερατό φίλτρο έχει άπειρη εξασθένιση στην ζώνη αποκοπής, μηδενική εξασθένιση στην ζώνη διέλευσης και κάθετη περιοχή μετάβασης. [8, p. 796]

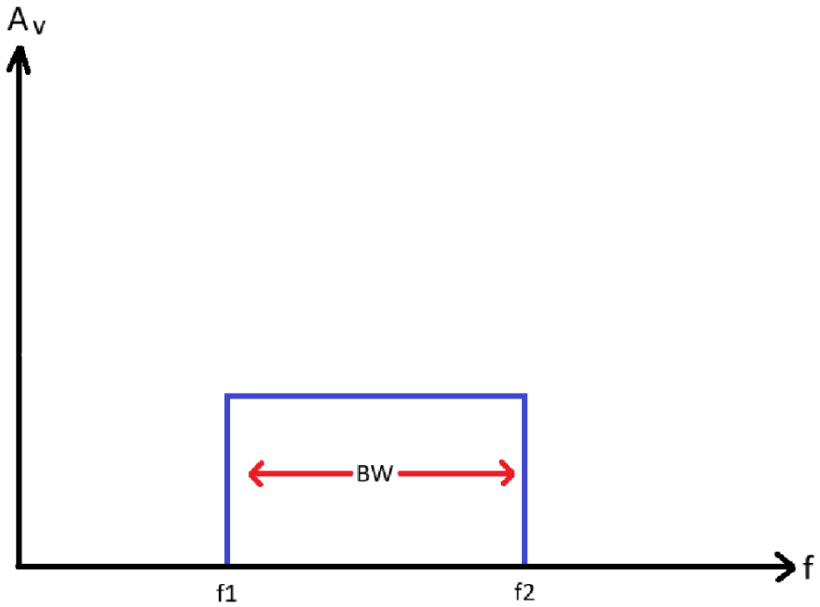


Εικόνα 2.5.3 - Παθητικό Υψιπερατό Φίλτρο (1ης τάξης)[7], [11]



Εικόνα 2.5.4 - Ενεργό Υψιπερατό Φίλτρο (1ης τάξης)[7], [11]

2.5.3 Ζωνοπερατά Φίλτρα (Band-Pass Filters): Τα ζωνοπερατά φίλτρα είναι κυκλώματα που επιτρέπουν τη διέλευση μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων και απορρίπτουν τις υπόλοιπες (τόσο τις χαμηλότερες όσο και τις υψηλότερες). Χαρακτηρίζονται από δύο συχνότητες αποκοπής: μια κάτω (f1) η οποία μπορεί να εκφραστεί και ως f_L (f_Low) δηλαδή η χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής και μια άνω (f2) η οποία μπορεί να εκφραστεί και ως f_H (f_High), δηλαδή η υψηλότερη συχνότητα αποκοπής.
Στο σχήμα 2.5.3 φαίνεται η ιδανική απόκριση συχνότητας ενός ζωνοπερατού φίλτρου. Η απότομη αυτή απόκριση εμποδίζει όλες τις συχνότητες από το 0 μέχρι το f1 (η χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής) έπειτα επιτρέπει την διέλευση για όλες τις συχνότητες από το f1 μέχρι το f2 (η υψηλότερη συχνότητα αποκοπής) και τέλος πάνω από το f2 δεν επιτρέπει την διέλευση σε καμία συχνότητα.



Σχήμα 2.5.3 - Ιδανική ζωνοπερατή απόκριση[8, p. 797]

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ζωνοπερατού φίλτρου περιλαμβάνουν:

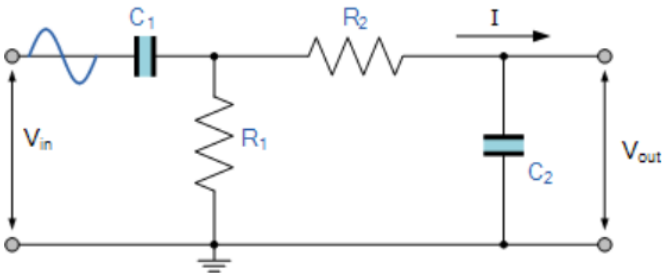
1. Ζώνη Διέλευσης (Passband): Βρίσκεται μεταξύ της κάτω και της άνω συχνότητας αποκοπής (f1 και f2) και περιλαμβάνει όλες τις συχνότητες μεταξύ τους. Προσδιορίζει τη ζώνη των συχνοτήτων που περνούν αμετάβλητες ή με ελάχιστη εξασθένηση.

2. Ζώνη Αποκοπής (Stopband): Αποτελείται από δύο περιοχές: τις συχνότητες κάτω από την κάτω συχνότητα αποκοπής και τις συχνότητες πάνω από την άνω συχνότητα αποκοπής. Αναφέρεται στα εύρη συχνοτήτων που απορρίπτονται ή εξασθενούν δραστικά.

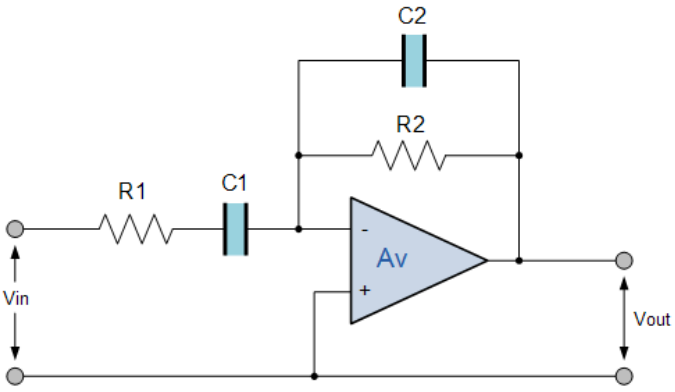
3. Ρυθμός Εξασθένησης (Attenuation rate): Περιγράφει την ταχύτητα με την οποία μειώνεται η ένταση των συχνοτήτων και στις δύο ζώνες αποκοπής (στις πολύ χαμηλές και στις πολύ υψηλές συχνότητες).

4. Απόκριση Φάσης (Phase response): Αναφέρεται στις καθυστερήσεις που επιφέρει το φίλτρο στην φάση των σημάτων εντός της ζώνης διέλευσης, γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα και τη μορφή του σήματος.

Ένα ιδανικό ζωνοπερατό φίλτρο έχει μηδενική εξασθένηση στην ζώνη διέλευσης, άπειρη εξασθένηση στην ζώνη απόρριψης συχνοτήτων και δύο κάθετες περιοχές μετάβασης.[8, p. 797]



Εικόνα 2.5.5 - Παθητικό Ζωνοπερατό Φίλτρο[13]

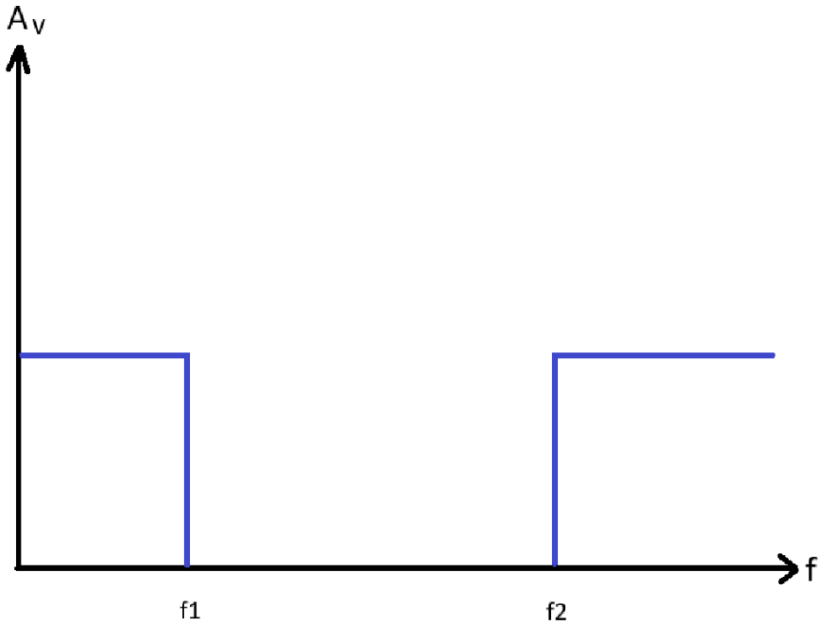


Εικόνα 2.5.6 - Ενεργό Ζωνοπερατό Φίλτρο[14]

2.5.4 Ζωνοφρακτικά Φίλτρα (Band-Stop Filters) ή Φίλτρα Notch:

Τα ζωνοφρακτικά φίλτρα είναι κυκλώματα τα οποία απορρίπτουν μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων και επιτρέπουν τις υπόλοιπες (τόσο τις χαμηλότερες όσο και τις υψηλότερες).
Τα ζωνοφρακτικά φίλτρα επιτρέπουν την διέλευση όλων των συχνοτήτων από το μηδέν έως και την χαμηλότερη συχνότητα αποκοπής, έπειτα απορρίπτουν όλες τις συχνότητες μεταξύ της χαμηλότερης και της ανώτερης συχνότητας αποκοπής και τέλος επιτρέπουν την διέλευση όλων των συχνοτήτων πάνω από την ανώτερη συχνότητα αποκοπής. Είναι, στην ουσία, το αντίθετο ενός ζωνοπερατού φίλτρου, απορρίπτουν μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων και επιτρέπουν τις υπόλοιπες. Χαρακτηρίζονται από δύο συχνότητες αποκοπής f1 και f2.

Στο σχήμα 2.5.4 φαίνεται η ιδανική απόκριση συχνότητας ενός ζωνοφρακτικού φίλτρου καθώς και οι δύο συχνότητες αποκοπής f1 και f2.



Σχήμα 2.5.4 - Ιδανική ζωνοφρακτική απόκριση [8, p. 798]

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ζωνοφρακτικού φίλτρου περιλαμβάνουν:

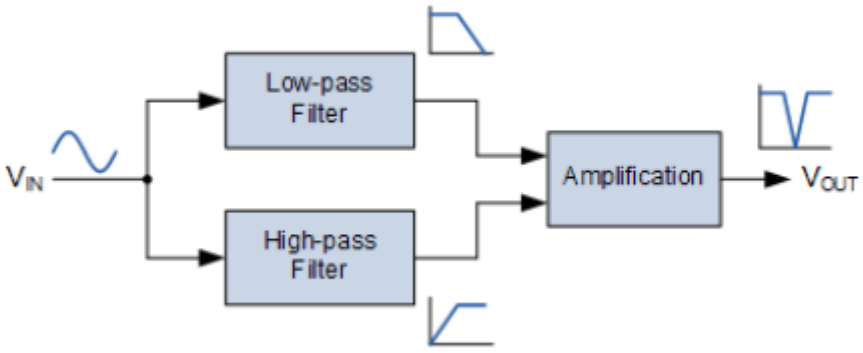
1. Ζώνη Αποκοπής (Stopband): Βρίσκεται μεταξύ της κάτω και της άνω συχνότητας αποκοπής. Αναφέρεται στη ζώνη των συχνοτήτων που απορρίπτονται ή εξασθενούν δραστικά από το φίλτρο.

2. Ζώνη Διέλευσης (Passband): Αποτελείται από δύο περιοχές: τις συχνότητες κάτω από την κάτω συχνότητα αποκοπής και τις συχνότητες πάνω από την άνω συχνότητα αποκοπής. Προσδιορίζει τα εύρη συχνοτήτων που περνούν αμετάβλητες ή με ελάχιστη εξασθένηση.

3. Ρυθμός Εξασθένησης (Attenuation rate): Περιγράφει την ταχύτητα με την οποία μειώνεται η ένταση των συχνοτήτων στην περιοχή της ζώνης αποκοπής.

4. Απόκριση Φάσης (Phase response): Αναφέρεται στις καθυστερήσεις που επιφέρει το φίλτρο στην φάση των σημάτων στις ζώνες διέλευσης, γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα του τελικού σήματος.

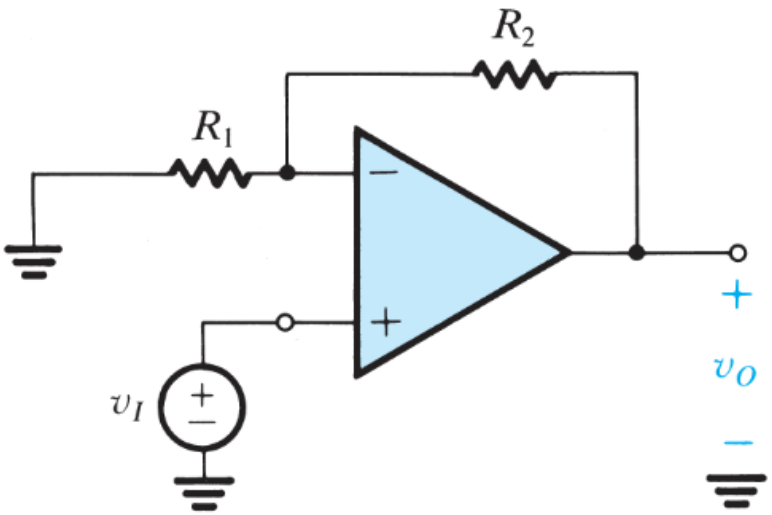
Ένα ιδανικό ζωνοφρακτικό φίλτρο έχει άπειρη εξασθένηση στην ζώνη διέλευσης συχνοτήτων και δύο κάθετες περιοχές μετάβασης. [8, p. 799]



Εικόνα 2.5.7 - Ζωνοφρακτικό Φίλτρο [15]

2.6 Τοπολογίες

Στην παρούσα πτυχιακή θα εξεταστεί και θα αξιοποιηθεί η τοπολογία του Non-Inverting Amplifier (Μη-Αναστρέφων Ενισχυτής) η οποία χρησιμοποιείται στα περισσότερα Overdrive και Distortion Pedals.



Εικόνα 2.6.1 - Non-Inverting Amplifier [16]

Σε αυτή την τοπολογία, το σήμα της κιθάρας μπαίνει στην θετική είσοδο (+) του τελεστικού ενισχυτή. Το κύριο χαρακτηριστικό της τοπολογίας αυτής είναι ότι η έξοδος του τελεστικού είναι σε φάση με την είσοδο. Τα κύρια στοιχεία που καθορίζουν την λειτουργία της τοπολογίας αυτής είναι οι δύο αντιστάσεις R1 και R2 που δημιουργούν ένα Feedback Loop (Βρόγχο αντίδρασης). Η ενίσχυση (Gain) καθορίζεται από την σχέση των δύο αυτών αντιστάσεων και υπολογίζεται με τον τύπο:

$$\boldsymbol{Gain = 1 + \frac{R2}{R1}}$$

2.7 Εφαρμογές στην Επεξεργασία Ήχου

Στην επεξεργασία ήχου, τα αναλογικά φίλτρα χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, όπως:

- **Ισοστάθμιση (Equalization):** Ρύθμιση της έντασης συγκεκριμένων συχνοτήτων για τη βελτίωση της ηχητικής ποιότητας.

- **Αποθορυβοποίηση (Noise Reduction):** Αφαίρεση ανεπιθύμητων θορύβων από το ηχητικό σήμα.

- **Διαμόρφωση Τόνου (Tone Shaping):** Προσαρμογή του ηχητικού χαρακτήρα σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη ή τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

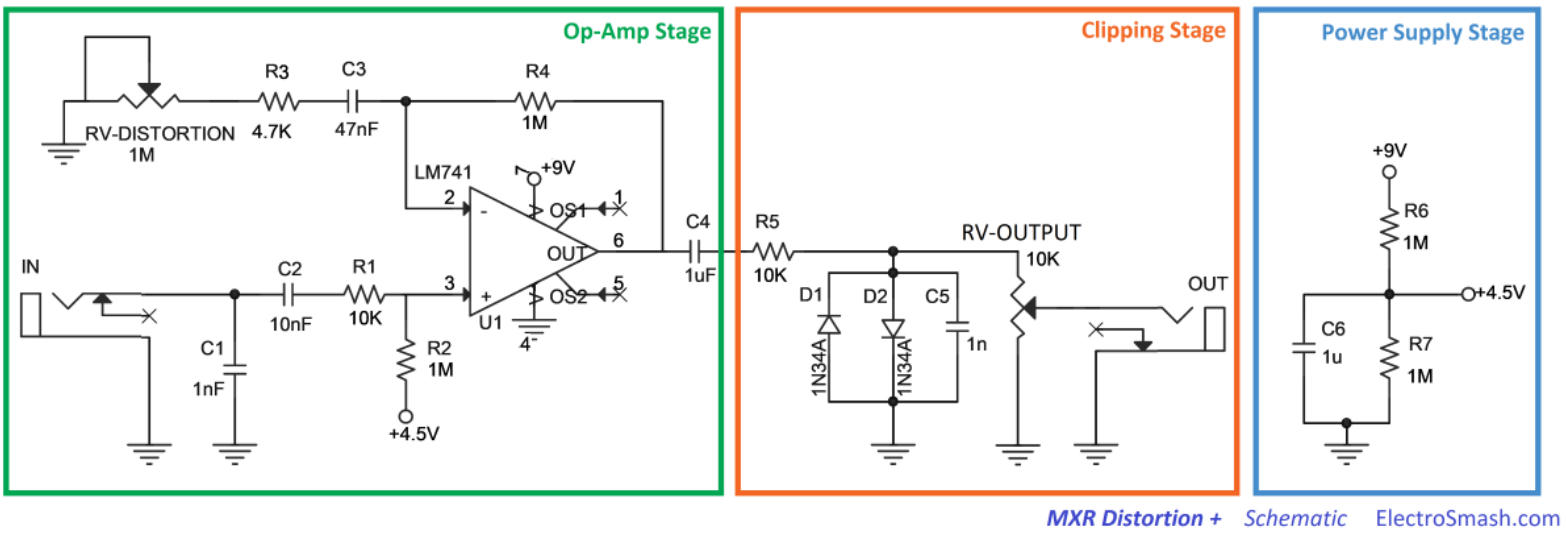
- **Προστασία Εξοπλισμού:** Αποτροπή διέλευσης ανεπιθύμητων συχνοτήτων που μπορεί να προκαλέσουν βλάβες σε ηχητικά συστήματα.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία θα εστιάσει στην εφαρμογή των ενεργών αναλογικών φίλτρων για την διαμόρφωση του τόνου του ήχου μουσικών οργάνων. Λαμβάνοντας το AC σήμα που παράγεται από έγχορδα ηλεκτρικά μουσικά όργανα, θα γίνεται επεξεργασία του μέσα στο κύκλωμα με σκοπό την προσθήκη Overdrive στο σήμα, όπου η παραμόρφωση θα είναι σκόπιμη και επιθυμητή, ενώ επίσης λόγω της ιδιότητας των ενεργών φίλτρων το σήμα θα ενισχύεται με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός τραχύ, υπερδηγημένου, παραμορφωμένου και ενισχυμένου ήχου.

3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ. Σχεδιασμός Αναλογικών Φίλτρων

3.1 Μελέτη αρχικού σχεδίου

Για την υλοποίηση της εργασίας θα γίνει επεξεργασία ενός ήδη υπάρχων πεταλιού με σκοπό την απλοποίηση του, την πιο οικονομική κατασκευή του καθώς και την τροποποίηση του τελικού αποτελέσματος του ήχου. Το πετάλι που επιλέχθηκε είναι το MXR Distortion + της DUNLOP. Το πετάλι αυτό βγήκε στην αγορά τα τέλη του 1970 και χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό στις ηχογραφήσεις από μεγάλα συγκροτήματα της Rock και Metal μουσικής. Ο χαρακτηριστικός ήχος του, οφείλεται στην χρήση διόδων γερμανίου στο στάδιο του clipping που προσφέρουν έναν fuzzy και παραμορφωμένο ήχο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το σχηματικό του κυκλώματος:[17]

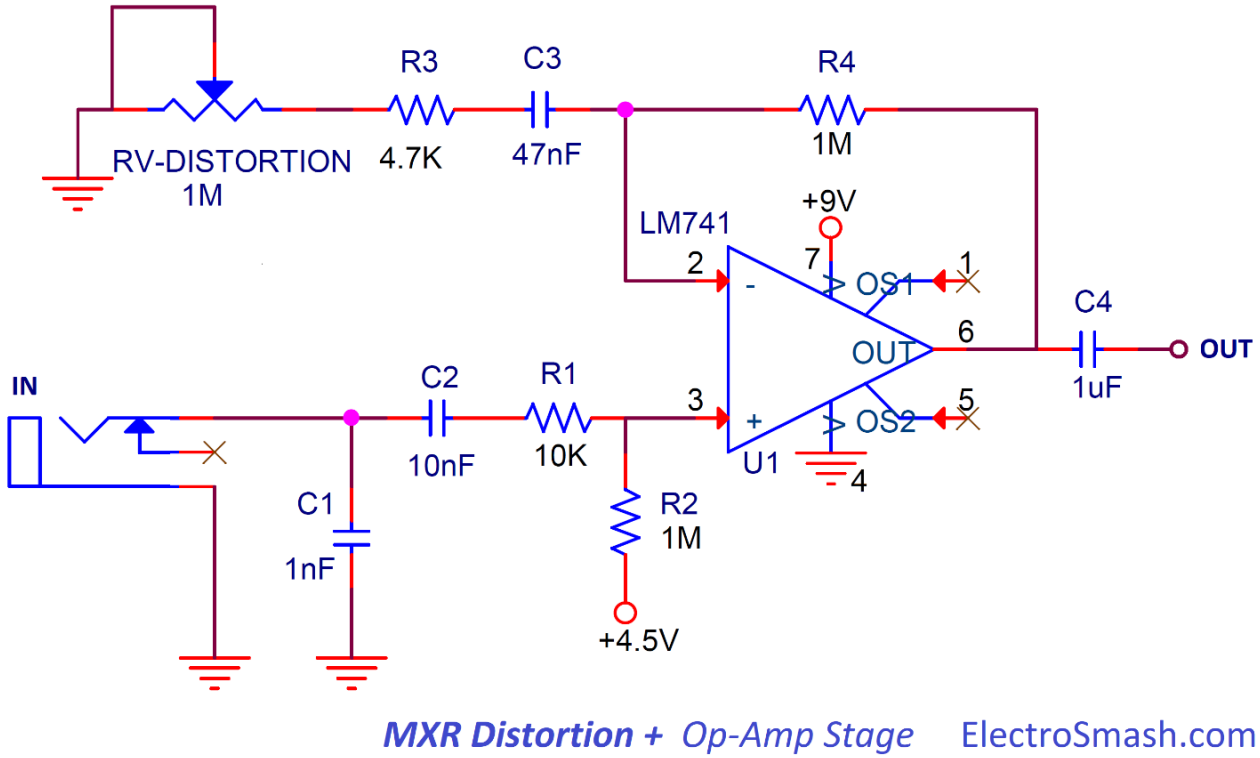


Εικόνα 3.1.1 - Σχηματικό του MXR Distortion + [17]

Το σχηματικό χωρίζεται σε τρία τμήματα/στάδια:

1. Το Στάδιο του Τελεστικού Ενισχυτή (Op-Amp Stage) (Ενότητα 3.1.1)
2. Το Στάδιο του Clipping (Clipping Stage) (Ενότητα 3.2.2)
3. Το Στάδιο της Τροφοδοσίας (Power Supply Stage) το οποίο δεν είναι απαραίτητο στο συγκεκριμένο στάδιο.

3.1.1 Το Στάδιο του Τελεστικού Ενισχυτή



Εικόνα 3.1.2 - Op-amp Stage του MXR Distortion + [17]

Στον πυρήνα του κυκλώματος βρίσκεται ένας τελεστικός ενισχυτής τύπου LM741, ο οποίος προσφέρει υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου (high input impedance), ενίσχυση τάσης (voltage gain) και φιλτράρισμα σήματος και λειτουργεί ως ενεργό υψιπερατό φίλτρο.

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι διαμορφωμένος σε τοπολογία non-inverting operational amplifier, οι αντιστάσεις R3 και R4 και το ποτενσιόμετρο RV καθορίζουν το gain της τάσης και οι πυκνωτές C1, C2, C3 και C4 φιλτράρουν το σήμα της κιθάρας, ο C1 επίσης καθώς είναι απευθείας γειωμένος αποτρέπει RF θόρυβο από το να εισαχθεί στο σήμα.

Υπολογισμός Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου (Z_{in})

Η αντίσταση που παρουσιάζει ένα κύκλωμα ήχου στην πηγή σήματος που είναι συνδεδεμένη με αυτό ονομάζεται σύνθετη αντίσταση εισόδου (Input Impedance)[18, pp. 41–46 & 302]

Ο τύπος του υπολογισμού του Z_{in} είναι:

$$\text{Zin} = \text{R1} + (\text{R2} \,//\, \text{ZinOpAmp}) \;\; + \text{ZvirtualGround} \quad [17], [18]$$

Όπου το Zin είναι η συνολική σύνθετη αντίσταση εισόδου του κυκλώματος (Total Input Impedance), το R1 τυπικά μία αντίσταση εισόδου σε σειρά με το μονοπάτι του σήματος, το R2 // $Z_{inOpAmp}$ αντιπροσωπεύει τον παράλληλο συνδυασμό μίας δεύτερης αντίστασης (R2) και της εσωτερικής Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου του τελεστικού ενισχυτή ($Z_{inOpAmp}$).

Λύνοντας, στην προκειμένη περίπτωση το R1 είναι η R1=10KΩ, το R2 είναι το R2=1MΩ, το $Z_{inOpAmp}$ είναι 2MΩ όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 1 από το Datasheet του LM741 και το $Z_{virtual\text{-}ground}$ βγαίνει 500KΩ από το κύκλωμα της τροφοδοσίας

Αν γίνει μέτρηση του $R_{parallel}$ (R_{par}) των R6 και R7:

$$\frac{1}{\text{Rpar}} = \frac{1}{\text{R6}} + \frac{1}{\text{R7}} \Leftrightarrow \frac{1}{\text{Rpar}} = \frac{1}{1\text{M}\Omega} + \frac{1}{1\text{M}\Omega} = \frac{2}{1\text{M}\Omega} \Rightarrow \text{Rpar} = \frac{1}{2\text{M}\Omega} = 500\text{K}\Omega$$

Άρα:

$$\text{Zin} = 10\text{K}\Omega + (1\text{M}\Omega // 2\text{M}\Omega) \; + 500\text{K}\Omega = 510\text{K}\Omega \; + 666\text{K}\Omega = 1176\text{K}\Omega = \sim 1.17\text{M}\Omega$$

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
Input offset voltage		RS ≤ 10 kΩ	TA = 25°C		1	5	mV
			TAMIN ≤ TA ≤ TAMAX			6	mV
Input offset voltage adjustment range		TA = 25°C, VS = ±20 V			±15		mV
Input offset current		TA = 25°C			20	200	nA
		TAMIN ≤ TA ≤ TAMAX			85	500	
Input bias current		TA = 25°C			80	500	nA
		TAMIN ≤ TA ≤ TAMAX				1,5	µA
Input resistance		TA = 25°C, VS = ±20 V		0.3	2		MΩ
Input voltage range		TAMIN ≤ TA ≤ TAMAX		±12	±13		V
Large signal voltage gain		VS = ±15 V, VO = ±10 V, RL ≥ 2kΩ	TA = 25°C	50	200		V/mV
			TAMIN ≤ TA ≤ TAMAX	25			
Output voltage swing		VS = ±15 V	RL ≥ 10 kΩ	±12	±14		V
			RL ≥ 2 kΩ	±10	±13		
Output short circuit current		TA = 25°C			25		mA
Common-mode rejection ratio		RS ≤ 10 Ω, VCM = ±12 V, TAMIN ≤ TA ≤ TAMAX		80	95		dB
Supply voltage rejection ratio		VS = ±20 V to VS = ±5 V, RS ≤ 10 Ω, TAMIN ≤ TA ≤ TAMAX		80	96		dB
Transient Response	Rise time	TA = 25°C, unity gain			0.3		µs
	Overshoot				5%		
Slew Rate		TA = 25°C, unity gain			0.5		v/µs
Supply Current		TA = 25°C			1.7	2.8	mA
Bandwidth		TA = 25°C			1		MHz
Power Consumption		VS = ±15 V	TA = 25°C		50	85	mW
			TA = TAMIN		60	100	
			TA = TAMAX		45	75	

Πίνακας 1 - Τα χαρακτηριστικά του LM741 *[19]*

Υπολογισμός Ενίσχυσης Τάσης

Με τον όρο ενίσχυση τάσης περιγράφουμε την ικανότητα ενός κυκλώματος να αυξάνει το πλάτος της τάσης ενός σήματος, ουσιαστικά είναι ένας αριθμητικός λόγος που δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η τάση στην έξοδο σε σύγκριση με την τάση στην είσοδο.
Η ενίσχυση τάσης για τον non-inverting op-amp υπολογίζεται με τον εξής τύπο:

$$\mathrm{Gv} = 1 + \left(\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{RV2+RV}}\right) \quad \textbf{ή} \quad \mathrm{Gv} = 1 + \frac{\mathrm{Rf}}{\mathrm{Rg}}$$ [16], [17], [18]

Στην σχέση αυτή, το R αφορά την αντίσταση ανατροφοδότησης R4, το RV είναι αφορά το ποτενσιόμετρο και το RV2 αφορά την αντίσταση που είναι σε σειρά με το ποτενσιόμετρο, στην προκειμένη περίπτωση την R3.
Κατά τον υπολογισμό του Gv , πρέπει να υπολογιστεί το $Gvmin$ και το $Gvmax$ στα οποία στο $Gvmin$ το ποτενσιόμετρο θα έχει την μέγιστη τιμή αντίστασης και στο $Gvmax$ θα έχει την ελάχιστη (μηδέν). Οπότε:

$$\mathrm{Gv(min)} = 1 + \frac{1\mathrm{M\Omega}}{4.7\mathrm{K\Omega} + 1\mathrm{M\Omega}} = 1.9 \approx 2$$

$$\mathrm{Gv(max)} = 1 + \frac{1\mathrm{M\Omega}}{4.7\mathrm{K\Omega} + 0\Omega} = 213.76 \approx 213.8$$

Τώρα πρέπει να γίνει η μετατροπή τους σε dB με τον τύπο:

$$\mathrm{dB} = 20 \times \log_{10}(\mathrm{X})$$

$$\mathrm{MindB} = 20 \times \log_{10}(2) \approx 6\ \mathrm{dB}$$

$$\mathrm{MaxdB} = 20 \times \log_{10}(213.8) \approx 46.6\ \mathrm{dB}$$

Αυτές οι τιμές για gain είναι αρκετά ικανοποιητικές για την εφαρμογή σε ηλεκτρικά όργανα.

Υπολογισμός Συχνότητας Αποκοπής (Cut-off Frequency)

Ο τύπος για τον υπολογισμό του Cut-off Frequency (Fc) είναι ο εξής:

$$fc = \frac{1}{2\pi \mathrm{RC}}$$ [8], [11], [17], [18]

Όπου R = R3 + RV και C = C3.
Το πετάλι αυτό καθώς χρησιμοποιεί ένα μεταβαλλόμενο υψιπερατό φίλτρο (λόγω του ποτενσιόμετρου), θα γίνει μέτρηση της συχνότητας αποκοπής στην χαμηλότερη αντίσταση του ποτενσιόμετρου, όταν το RV = 0Ω. Οπότε:

$$fc = \frac{1}{2\pi \cdot (\mathrm{R3} + \mathrm{RV}) \cdot \mathrm{C3}} = \frac{1}{2\pi \cdot (4700 + 0) \cdot 47 \cdot 10^{-9}} \approx 720\mathrm{Hz}$$

Υπολογισμός Κλίσης Αποκοπής (Roll-off Rate)

Καθώς το ενεργό φίλτρο του τελεστικού ενισχυτή έχει μόνο έναν πυκνωτή, που σημαίνει ότι είναι πρώτης τάξης, η κλίση αποκοπής είναι 6 dB / Οκτάβα (20 dB / Δεκάδα) [18, p. 52]είναι μία ήπια κλίση αποκοπής που σημαίνει ότι οι συχνότητες κάτω από την συχνότητα αποκοπής, δεν κόβονται άμεσα, άλλα σταδιακά απομακρύνονται.

Υπολογισμός Εύρους Ζώνης (Bandwidth)

Σε ένα ενεργό στάδιο τελεστικού ενισχυτή, το εύρος ζώνης είναι οι συχνότητες ανάμεσα από την συχνότητα αποκοπής που υπολογίστηκε και την μέγιστη συχνότητα αποκοπής του τελεστικού ενισχυτή η οποία ορίζεται από τα φυσικά κατασκευαστικά όρια του LM741. Σύμφωνα με τον πίνακα 1 με τα στοιχεία του τελεστικού ενισχυτή, ο LM741 έχει μέγιστη συχνότητα αποκοπής 1Mhz. Από προηγούμενους υπολογισμούς, η συχνότητα αποκοπής υπολογίστηκε ως 720Hz .

Ο τύπος υπολογισμού εύρους ζώνης είναι:

$$f_H = \frac{GBWP}{Gain} \qquad [8], [16], [18]$$

Όπου GBWP = 1,000,000 Hz και το Gain είναι το $Gv(\max) \approx 214$

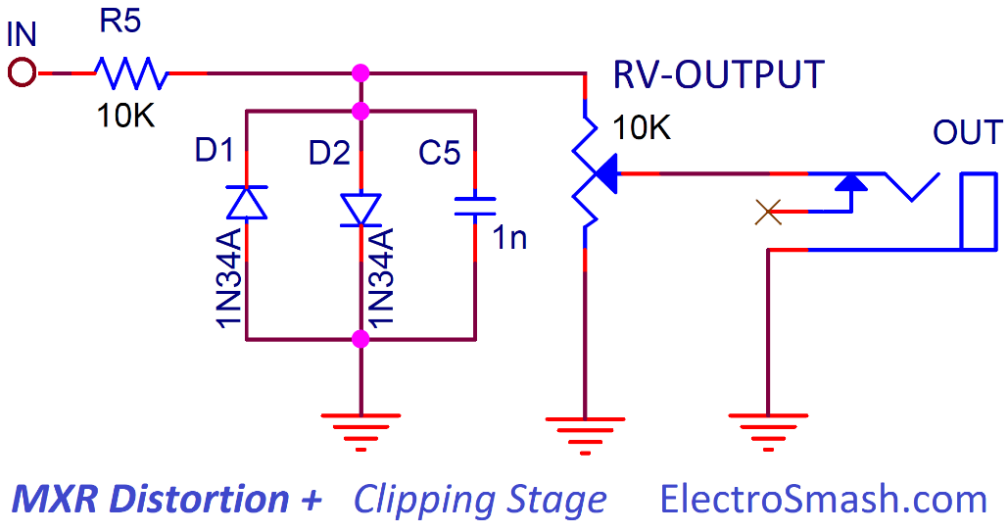
Αντικαθιστώντας:

$$f_H = \frac{GBWP}{Gain} = \frac{1{,}000{,}000}{214} \approx 4.7kHz$$

Οπότε, το συνολικό εύρος ζώνης είναι από περίπου 720Hz έως 4.7kHz

3.1.2 Το Στάδιο του «Clipping»

Το τελικό στάδιο είναι το στάδιο του «Clipping» το οποίο περιέχει δύο διόδους (την D1 και D2) γειωμένες. Αυτή η τοπολογία των διόδων προσθέτει μια ισχυρή παραμόρφωση (Hard Clip Distortion) παραμορφώνοντας ισχυρά το ηχητικό σήμα.



Εικόνα 3.1.3 - Op-amp Stage του MXR Distortion + [17]

Στο στάδιο του Clipping οι δίοδοι λειτουργούν σαν βαλβίδες οι οποίες επιτρέπουν το σήμα να περάσει μόνο μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο.

Υπάρχουν 3 τύποι Clipping

1. Soft Clipping (Overdrive): Οι κορυφές του κύματος δεν κόβονται απότομα αλλά στρογγυλεύουν σταδιακά.

2. Hard Clipping (Distortion): Το κύμα κόβεται απότομα και τετραγωνίζεται.

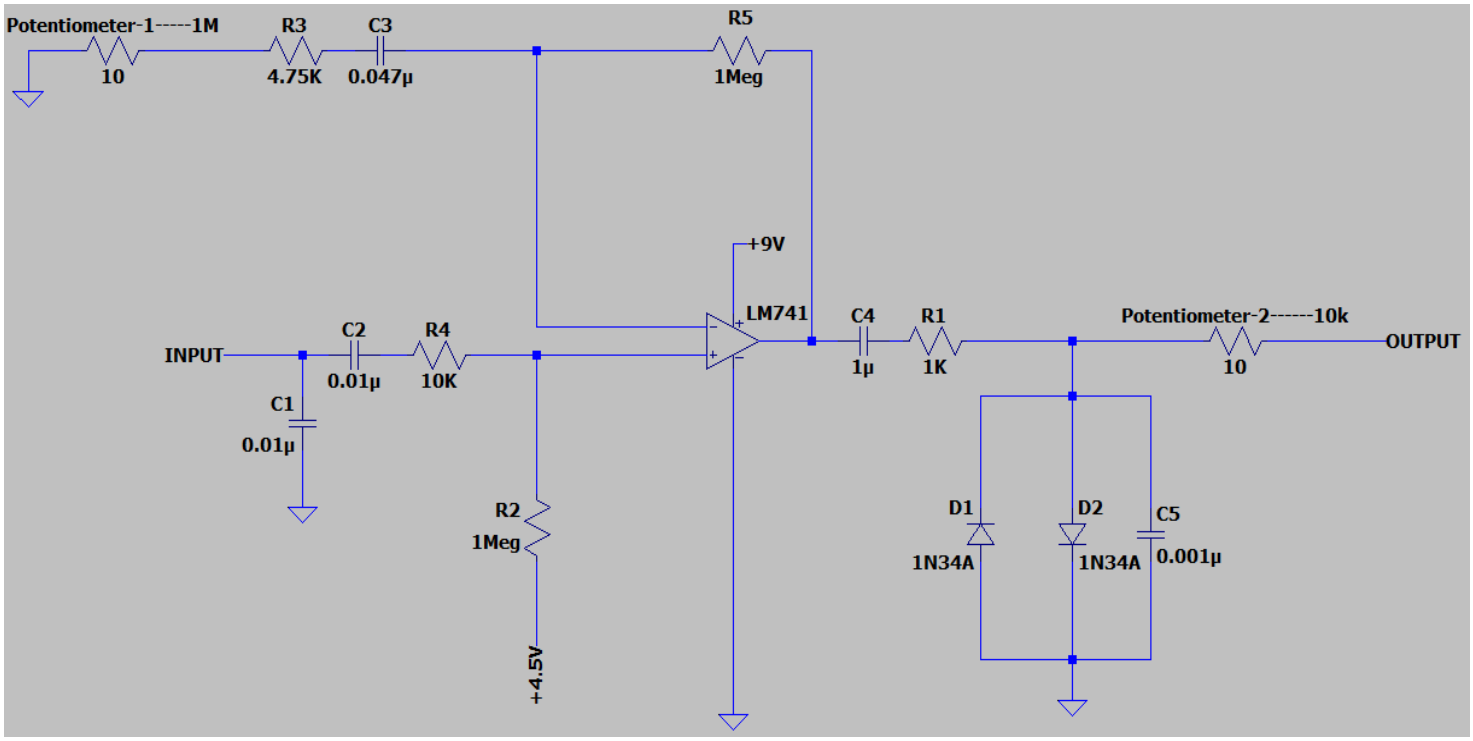
3. Extreme Clipping (Fuzz) : Το κύμα κόβεται τόσο πολύ που μετατρέπεται σχεδόν σε τετράγωνο

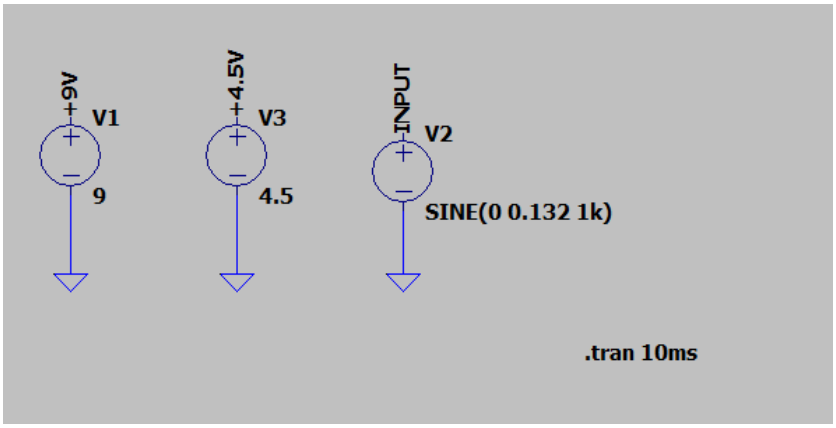
Όπως προαναφέρθηκε, το MXR Distortion +, όντας Distortion Pedal χρησιμοποιεί Hard Clipping για την επίτευξη του Hard Clip Distortion.

3.2 Προσομοίωση του αρχικού κυκλώματος

Για την δημιουργία και προσομοίωση του παραπάνω κυκλώματος σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή, αξιοποιήθηκε το λογισμικό LTSPICE, στο οποίο έγινε «μετάφραση» του κυκλώματος της εικόνας 3.1.1 σε μορφή SPICE και έπειτα η τροφοδοσία σήματος και ρεύματος για την προσομοίωση του με τα δεδομένα που αντιστοιχούν στις εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται.

Εικόνα 3.2.1 - Προσομοίωση του κυκλώματος MXR Distortion+ σε SPICE

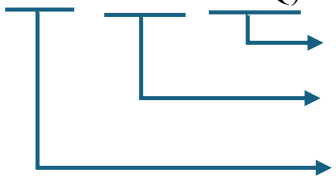




Εικόνα 3.2.2 - Παράμετροι προσομοίωσης

Για να επιτευχθεί η προσομοίωση, στην είσοδο του κυκλώματος έχει δημιουργηθεί μια ετικέτα με το όνομα input, η οποία συνδέεται με μία πηγή σήματος. Στην είσοδο της δίνεται ένα ημιτονοειδές κύμα, χαρακτηριστικό του σήματος της ηλεκτρικής κιθάρας. Η SINE έχει τις εξής παραμέτρους στο LTSPICE :

SINE(VOFF VAMPL FREQ)



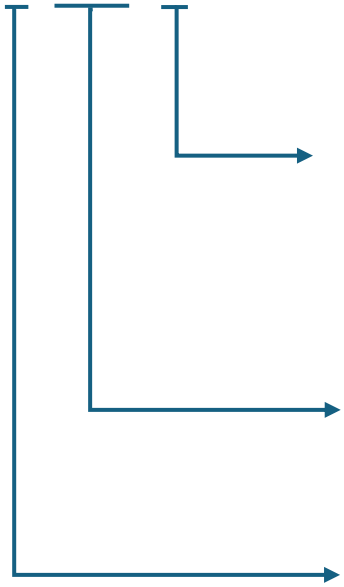
Frequency (Συχνότητα)

Voltage Amplitude (Πλάτος τάσης)

Voltage Offset (Μετατόπιση τάσης)

Πιο αναλυτικά, οι τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι:

SINE(0 0.132 1k)

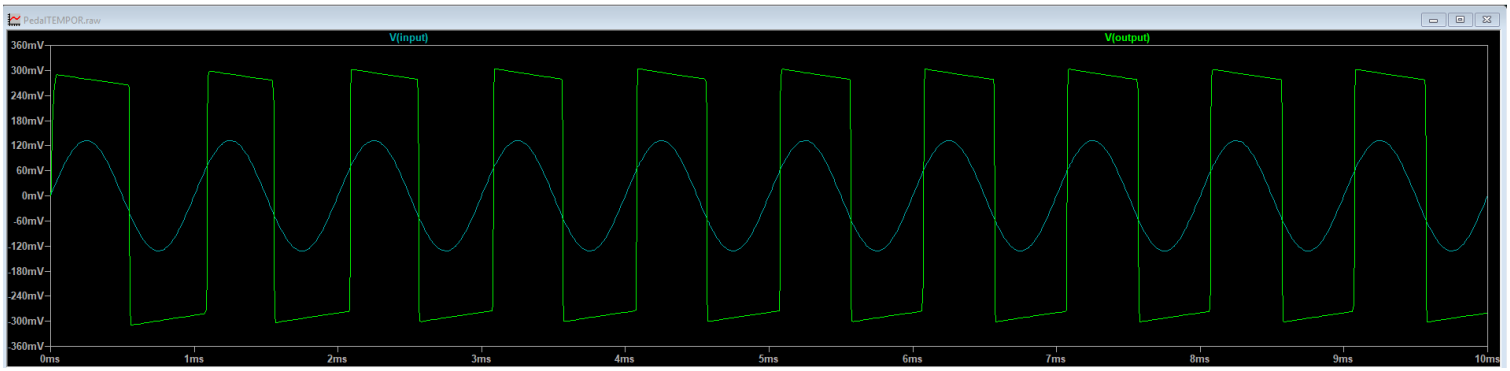


1k → 1kHz συχνότητα καθώς τυπικά το φάσμα των συχνοτήτων που παράγει μία ηλεκτρική κιθάρα αν εξαιρεθούν οι αρμονικές είναι περίπου 80Hz – 1kHz. Το 1kHz στην προκειμένη περίπτωση είναι στάνταρντ για δοκιμές σε εφαρμογές ήχου.[1] (679 – 687)

0.132 V amplitude → περίπου 132mV peak. Οι κιθάρες έχουν έξοδο περίπου 50 mV με 200 mV peak. Το 0.132 V είναι ένα ρεαλιστικό μέσο σήμα κιθάρας. Αυτό εξασφαλίζει ότι το πετάλι δεν θα προσομοιωθεί με μη ρεαλιστικά ισχυρά σήματα.

0 → Καθώς το σήμα της ηλεκτρικής κιθάρας είναι καθαρά AC, δεν χρειάζεται εισαγωγή DC.

Με αυτό τον τρόπο, ουσιαστικά γίνεται η προσομοίωση της δημιουργίας σήματος, σαν της ηλεκτρικής κιθάρας μόνο λιγότερο παραμορφωμένο εφόσον στην προσομοίωση δίνεται πιο καθαρό σήμα, καθώς και εισαγωγή αυτού του σήματος μέσα στο κύκλωμα με σκοπό την επεξεργασία του.



Εικόνα 3.2.3 - Προσομοίωση παλμογράφου στην είσοδο και έξοδο μέσω SPICE

Στην παραπάνω εικόνα, απεικονίζεται η προσομοίωση του κυκλώματος του MXR Dist + με τα δεδομένα SINE(0 0.132 1k). Στον παλμογράφο απεικονίζονται δύο σήματα, το στρογγυλό γαλάζιο ημιτονοειδές το οποίο είναι το σήμα της εισόδου (input), και το τραχύ πράσινο ενισχυμένο ημιτονοειδές το οποίο είναι το σήμα της εξόδου (output). Το επεξεργασμένο σήμα της εξόδου είναι πιο έντονο και τραχύ, με αποτέλεσμα σε εφαρμογές ήχου να ενισχύει την ένταση του σήματος καθώς και να την παραμορφώνει και να την κάνει clip. Περεταίρω επιβεβαιώθηκαν τα παραπάνω αποτελέσματα και από δύο βίντεο ανάλυσης του σήματος του πεταλιού αυτού σε υλική μορφή με παλμογράφο και όχι σε προσομοιωτή [20], [21].

3.3 Σχεδίαση του πεταλιού της παρούσας πτυχιακής εργασίας

Το πετάλι που θα σχεδιαστεί θα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Overdrive Pedal με χαρακτηριστικά Distortion πέρα από το Clipping Stage
2. Απλό και οικονομικό στην κατασκευή
3. Αποτελεσματικός σχεδιασμός
4. Καλής ποιότητας υλικά

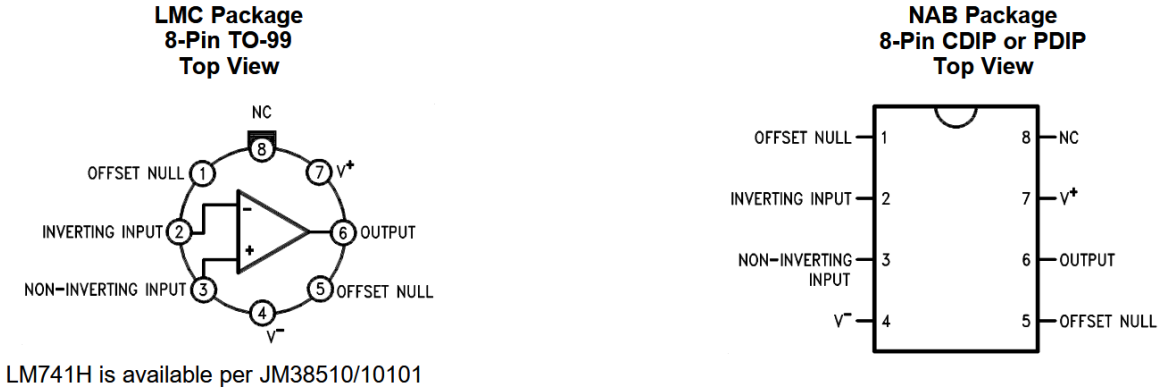
Τροποποιώντας ριζικά το MXR Distortion + το οποίο είναι ένα πετάλι παραμόρφωσης, θα σχεδιαστεί ένα πετάλι Overdrive, με μερικά στοιχεία παραμόρφωσης στον ήχο. Η διαδικασία αυτή, απαιτεί την ανάλυση του κυκλώματος σε επιμέρους τμήματα, και απλούστευση και τροποποίηση του κάθε τμήματος ξεχωριστά για την ευκολότερη και πιο αποτελεσματική επίτευξη του σχεδιασμού.

Αρχικά, για την απλοποίηση του κυκλώματος, για να αποφευχθεί ξεχωριστό κύκλωμα για την τροφοδοσία θα δημιουργηθεί ένας κλασικός διαιρέτης τάσης για να δοθούν τα +4.5 V στο 3ο pin του τελεστικού ενισχυτή. Για να επιτευχθεί αυτό, θα τοποθετηθεί μια αντίσταση 2.2 MΩ στο +9 V και μια ίδια στην γείωση, με αυτό τον τρόπο, η τάση στο σημείο που ενώνονται θα είναι ακριβώς η μισή τιμή της πηγής άρα +4.5 V.

$$\text{Vout} = \text{Vin} \times \frac{\text{R2}}{\text{R1} + \text{R2}} = 9 \times \frac{2.2}{4.4} = 9 \times \frac{1}{2} = +4.5\ \text{V}$$

Έγινε χρήση τόσο μεγάλων τιμών αντιστάσεων καθώς στα όργανα με μαγνήτες χρειάζεται υψηλή αντίσταση εισόδου για να αποφευχθεί το φαινόμενο «Tone Sucking» δηλαδή μια σοβαρή απώλεια συχνοτήτων[22]. Ανάμεσα από τον διαιρέτη τάσης και την είσοδο του AC σήματος του οργάνου, θα τοποθετηθεί ένας πυκνωτής για να σταματήσει αυτά τα +4.5 V από το να γυρίσουν πίσω προς το input καθώς και για να φιλτράρει το σήμα της κιθάρας καθώς λειτουργεί σαν ένα υψιπερατό παθητικό φίλτρο 1ης τάξης. Επίσης μπορεί να αποφευχθεί ο C1 ο οποίος πάει απευθείας στην γείωση για την αποφυγή RF καθώς θα γίνει χρήση θωρακισμένων καλωδίων. Έπειτα θα προστεθεί στο κύκλωμα ο τελεστικός ενισχυτής συνδέοντας το 3ο pin με τον διαιρέτη τάσης.

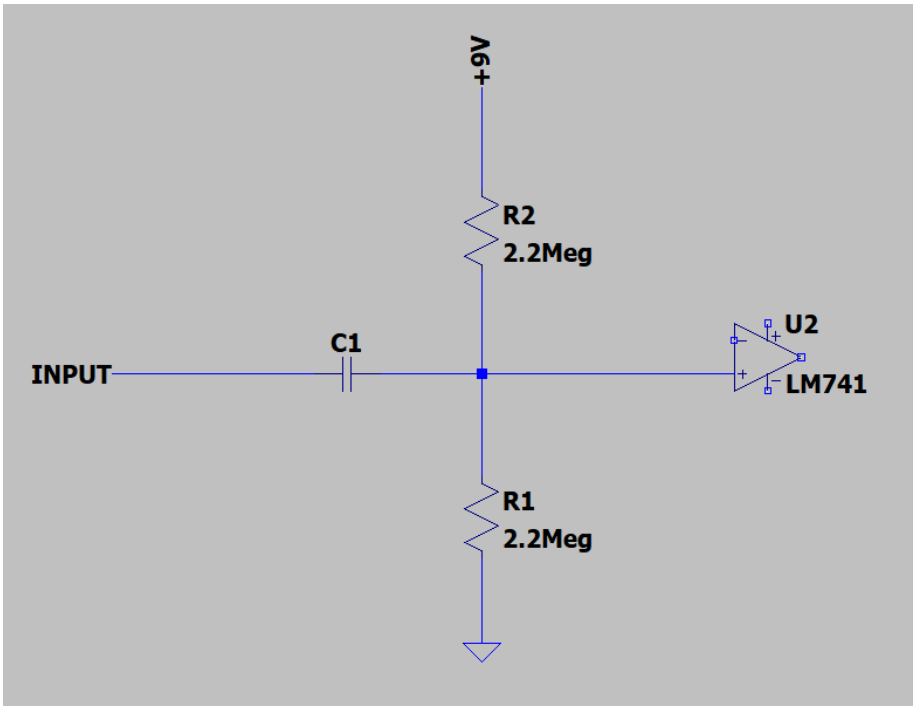
Pin Configuration and Functions



LM741H is available per JM38510/10101

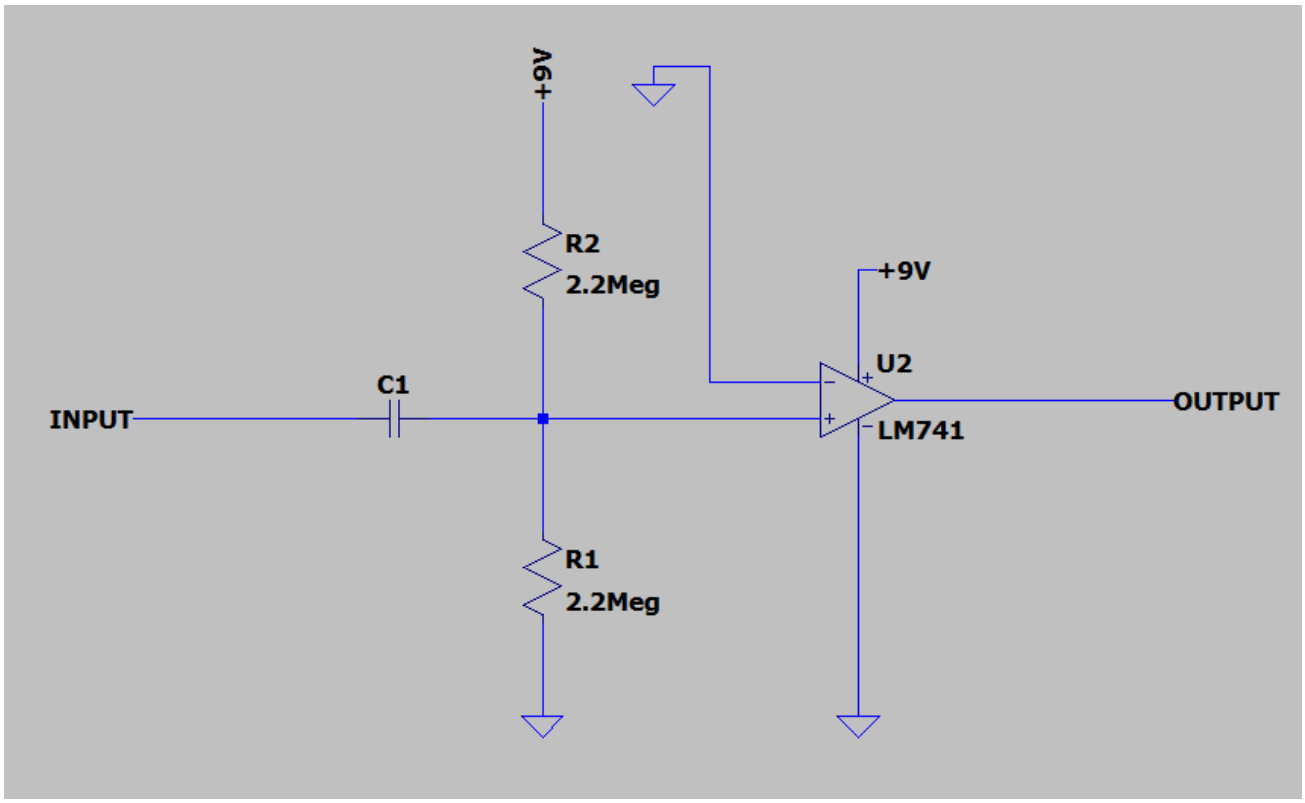
Εικόνα 3.3.1 - Τα Pins και η συνδεσμολογία του LM741 [19]

Το τμήμα της εισόδου διαμορφώνεται ως εξής:



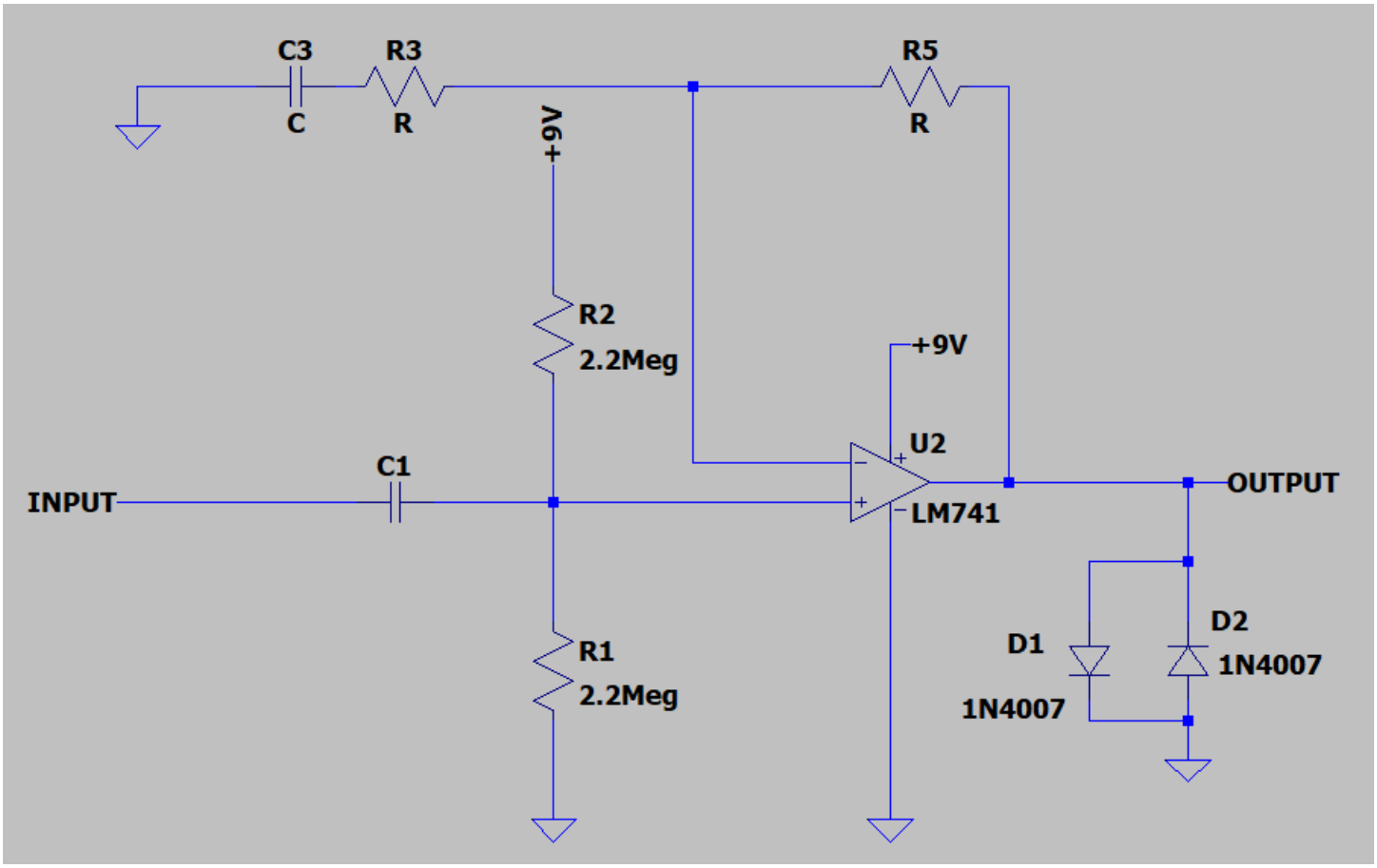
Εικόνα 3.3.2 - Τμήμα εισόδου

Το 4ο pin συνδέεται στην γείωση όπως αναγράφεται και στην συνδεσμολογία του LM741, στο 7ο pin συνδέονται τα +9, το 2ο προς το παρόν συνδέεται στην γείωση και το 6ο συνδέεται στην έξοδο.



Εικόνα 3.3.3 - Τροφοδοσία του LM741 και προσθήκη εξόδου

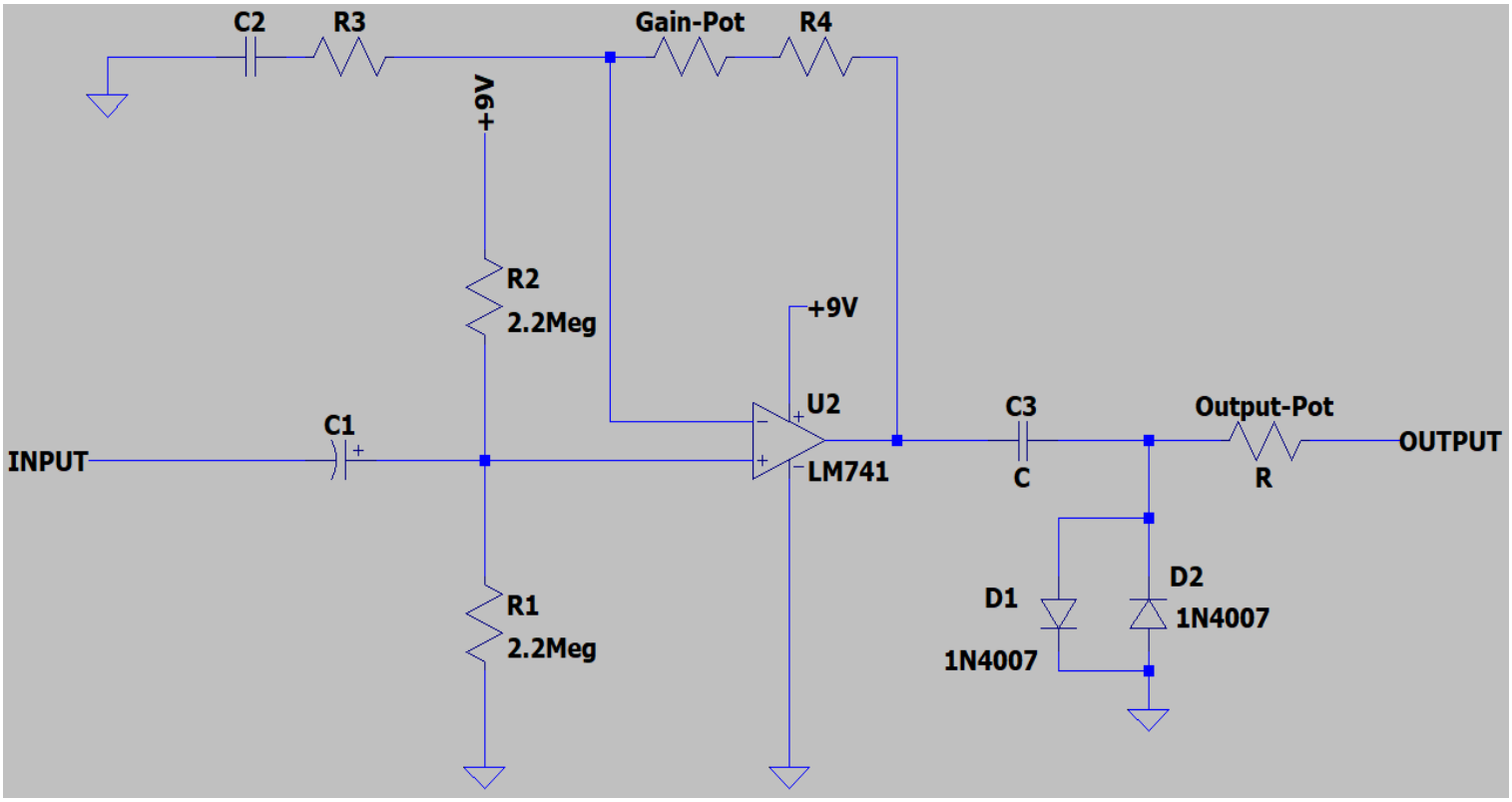
Ανάμεσα στον LM741 και την έξοδο θα τοποθετηθεί ένα απλό κύκλωμα με διόδους 1N4007 για το στάδιο του Clipping όπως αναφέρθηκε και στο 3.1.2, επιλέχθηκαν οι 1N4007 λόγω της πιο οικονομικής τιμής τους και της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας τους, καθώς και επειδή για την υλοποίηση χρειάζεται Soft Clipping λόγω του σχεδιασμού Overdrive Pedal, αν οι δίοδοι ήταν γερμανίου θα υπήρχε Hard Clipping και άρα καθαρά Distortion Pedal. Λόγω της τοπολογίας που ακολουθείται και του γεγονότος ότι σχεδιάζουμε ένα υψιπερατό φίλτρο συνδέεται η έξοδος του LM741 από το 6^{ο} pin με την γείωση του 2^{ου} pin ενώ και προστίθενται 2 αντιστάσεις, η μία πριν την σύνδεση με το pin 2 και η άλλη μετά καθώς και ένας πυκνωτής ανάμεσα από την τελευταία αντίσταση και την γείωση.



Εικόνα 3.3.4 - Σχηματισμός υψιπερατού φίλτρου και προσθήκη Clipping Stage

Τέλος, χρειάζεται να προστεθούν 2 ποτενσιόμετρα, ένα για το Gain στο στάδιο του φίλτρου και ένα για το επίπεδο έντασης στο στάδιο της εξόδου αμέσως πριν το Output, καθώς και ένας πυκνωτής ανάμεσα από τον τελεστικό ενισχυτή και το Output.

Το τελικό κύκλωμα διαμορφώνεται ως εξής:



Εικόνα 3.3.5 - Τελική μορφή κυκλώματος

3.4 Υπολογισμός των στοιχείων

Καθώς έχει σχηματιστεί το τελικό κύκλωμα του πεταλιού με τις τροποποιήσεις, το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστούν οι τιμές των στοιχείων που έχουν τοποθετηθεί.

Υπολογισμός Zin

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί το Zin. Στο 3.1.1 το Zin υπολογίστηκε με τον τύπο:

$$\mathrm{Zin} = \mathrm{R1} + (\mathrm{R2}//\mathrm{ZinOpAmp}) + \mathrm{ZvirtualGround}$$

Στην προκειμένη περίπτωση όμως, θα πρέπει να τροποποιηθεί ο τύπος καθώς η R1 με την R2 είναι παράλληλες και όχι σε σειρά όπως το προηγούμενο κύκλωμα αλλά και λόγω της έλλειψης ξεχωριστού κυκλώματος τροφοδοσίας. Η αλλαγή που θα πρέπει να γίνει είναι η εξής:

$$Zin = R1//R2//ZinOpAmp$$

Όπου το R1//R2 είναι το Rpar, άρα ο τύπος διαμορφώνεται ως εξής:

$$\mathrm{Zin} = \frac{Rpar \times ZinOpAmp}{Rpar + ZinOpAmp}$$

Το ZinOpAmp του LM741 είναι 2 MΩ φαίνεται και στον πίνακα 1
Και το Rpar διαμορφώνεται ως εξής

$$Rpar = \frac{1}{\frac{1}{\mathrm{R1}} + \frac{1}{\mathrm{R2}}} \Leftrightarrow \frac{1}{Rpar} = \frac{1}{2.2} + \frac{1}{2.2} = \frac{2}{2.2} \Leftrightarrow Rpar = \frac{2.2}{2} = 1.1\ \mathrm{M\Omega}$$

Άρα αντικαθιστώντας στον τύπο,

$$Zin = \frac{1.1 \times 2}{1.1 + 2} = \frac{2.2}{3.1} \approx 0.71\ \mathrm{M\Omega}$$

Υπολογισμός Ενίσχυσης Τάσης (Gv)

Το Gv χωρίζεται σε Gvmin και Gvmax ανάλογα με την ρύθμιση του ποτενσιόμετρου. Μία καλή τιμή για το Gvmin είναι το 2 και για το Gvmax ανάμεσα στο 100 με 300, για την προκειμένη εφαρμογή 200 με 250 άρα κοντά στα 225.

Ο τύπος που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι ο:

$$\mathrm{Gvmin/max} = 1 + \frac{Rf`}{Rg}$$

όπου Rf είναι το ποτενσιόμετρο Gain σε σειρά με την αντίσταση
R4 και Rg είναι η R3 άρα:

$$\text{Gvmin} = 2 \iff 2 = 1 + \frac{0 + \text{R4}}{\text{R3}} \iff \frac{\text{R4}}{\text{R3}} = 1 \iff \text{R3} = \text{R4}$$

για έλλειψη θορύβου και πιο καθαρό boost μπορεί να γίνει χρήση χαμηλών αντιστάσεων όπως π.χ. 1 kΩ.

$$\text{Gvmax} = 225 \iff 225 = 1 + \frac{\text{Rgain} + \text{R4}}{\text{R3}} \iff 224 = \frac{\text{Rgain} + 1}{1} \iff \text{Rgain} = 223\ \text{k}\Omega$$

Η πιο κοντινή τιμή ποτενσιόμετρου στα 223 kΩ είναι τα 220 kΩ

$$\text{Άρα Gvmax} = 1 + \frac{220 + 1}{1} = 222$$

Τα Gvmin και Gvmax σε dB είναι:

$$\text{GainMin}_{\text{dB}} = 20\log_{10}(2) \approx 6\ \text{db}$$

$$\text{GainMax}_{\text{dB}} = 20\log_{10}(222) \approx 46.9\ \text{db} \approx 47\ \text{dB}$$

Άρα, R3 = R4 = 1 kΩ και Gain-Pot = 220 kΩ

Υπολογισμός fc

Για τον υπολογισμό της συχνότητας αποκοπής θα χρησιμοποιηθεί η αντίσταση R3 με τον πυκνωτή C2 που είναι σε σειρά. Η συχνότητα αποκοπής στόχος είναι ανάμεσα στα 120 με 200 Hz ώστε και να αφαιρούνται τα βαθιά μπάσα και βουητά αλλά και να κρατάει όσες χαμηλές συχνότητες χρειάζονται ώστε να μην είναι απαραίτητη η συνοδεία από μπάσο, και ουσιαστικά να μην λείπει κάτι από τον ήχο. Η τιμή ανάμεσα στο 120 και το 200 (που είναι ο στόχος) είναι τα 160 Hz.

Ο τύπος υπολογισμού του fc είναι:

$$fc = \frac{1}{2\pi \cdot \text{R} \cdot \text{C}}\ \text{Αντικαθιστώντας,}\ 160 = \frac{1}{2\pi \cdot \text{R} \cdot \text{C}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot \text{C}}$$

Η πιο κοντινή τιμή κεραμικού πυκνωτή ώστε να επαληθεύεται αυτή η σχέση είναι τα 1μF ($1 \cdot 10^{-6}$F) και το fc = 159, επαληθεύοντας

$$fc = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \text{R} \cdot \text{C}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{0.00628} \approx 159\ \text{Hz}$$

Τα 159 Hz είναι μια πολύ ικανοποιητική τιμή για ένα πετάλι Overdrive, άρα C2 = 1μF

Υπολογισμός Εύρους Ζώνης (Bandwidth)

Με βάση το GBWP = 1,000,000 Hz του τελεστικού LM741:

$$fH = \frac{\text{GBWP}}{\text{Gv}_{\max}} = \frac{1{,}000{,}000}{222} \approx 4.5 \text{ kHz}$$

Άρα το συνολικό εύρος ζώνης του πεταλιού αυτού είναι από 159 Hz έως 4.5 kHz.

Υπολογισμός Κλίσης Αποκοπής

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, καθώς το ενεργό φίλτρο του τελεστικού ενισχυτή έχει μόνο έναν πυκνωτή, που σημαίνει ότι είναι πρώτης τάξης, η κλίση αποκοπής είναι 6 dB / Οκτάβα (20 dB / Δεκάδα) .

Υπολογισμός C1, C3, Output-Potentiometer

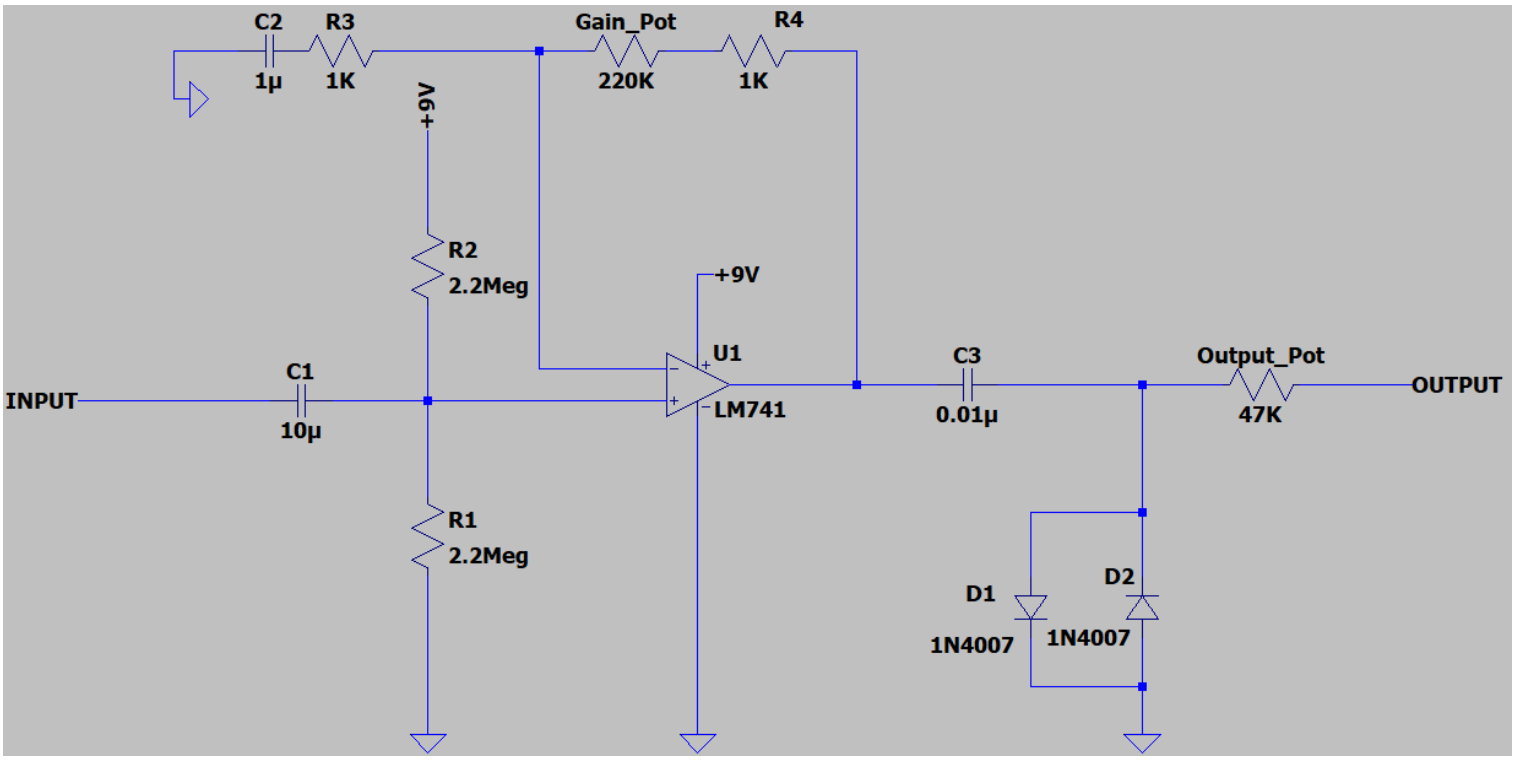
Τα στοιχεία που δεν έχουν πάρει τιμή ακόμα είναι οι πυκνωτές C1 και C3, καθώς και το ποτενσιόμετρο εξόδου. Καθώς όλο το φιλτράρισμα γίνεται πιο μέσα στο πετάλι, ο μόνος σκοπός του πυκνωτή C1 είναι να σταματήσει αυτά τα +4.5 V DC από το να γυρίσουν πίσω προς το input καθώς και να φιλτράρει το σήμα της κιθάρας αφού λειτουργεί σαν ένα υψιπερατό παθητικό φίλτρο, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Για τον σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιηθεί ένας κλασικός και οικονομικός ηλεκτρολυτικός πυκνωτής των 10μF στα 25 V. Ο πυκνωτής C3, λειτουργεί ως ένα παθητικό υψιπερατό φίλτρο με το ποτενσιόμετρο. Αν δοθεί μεγάλη τιμή στο C3, θα επιτρέπονται χαμηλότερες συχνότητες μέσα και το σήμα θα είναι πιο θαμπό και τετραγωνισμένο, ενώ αν τοποθετηθεί μικρότερη τιμή, το σήμα θα είναι πιο τραχύ. Μετά από δοκιμές στο Simulation, διαπιστώθηκε πως στο C3 ένας πυκνωτής 0.01μF (10nF) θα είχε το καλύτερο αποτέλεσμα σε σχέση με τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί. Επίσης εμπειρικά και έπειτα από δοκιμές διαπιστώθηκε πως σε συνδυασμό με τον πυκνωτή C3, η τιμή που θα πρέπει να έχει το ποτενσιόμετρο εξόδου για να «καθαρίζει» το πετάλι από τις πολύ χαμηλές συχνότητες στην έξοδο μέσω του παθητικού υψιπερατού φίλτρου που δημιουργούν είναι τα 47 kΩ.

Υπολογισμός Συχνότητας Αποκοπής του Παθητικού Φίλτρου

$$fc = \frac{1}{2\pi \cdot \text{R} \cdot \text{C}} = \frac{1}{2\pi \cdot 47.000 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = \frac{1}{2\pi \cdot 47.000 \cdot 0{,}00000001} \approx 338{,}6 \text{ Hz}$$

Τελική Μορφή και Τιμές Στοιχείων Πεταλιού

Το πετάλι στην τελική μορφή του έχει το εξής κύκλωμα με τις εξής τιμές:



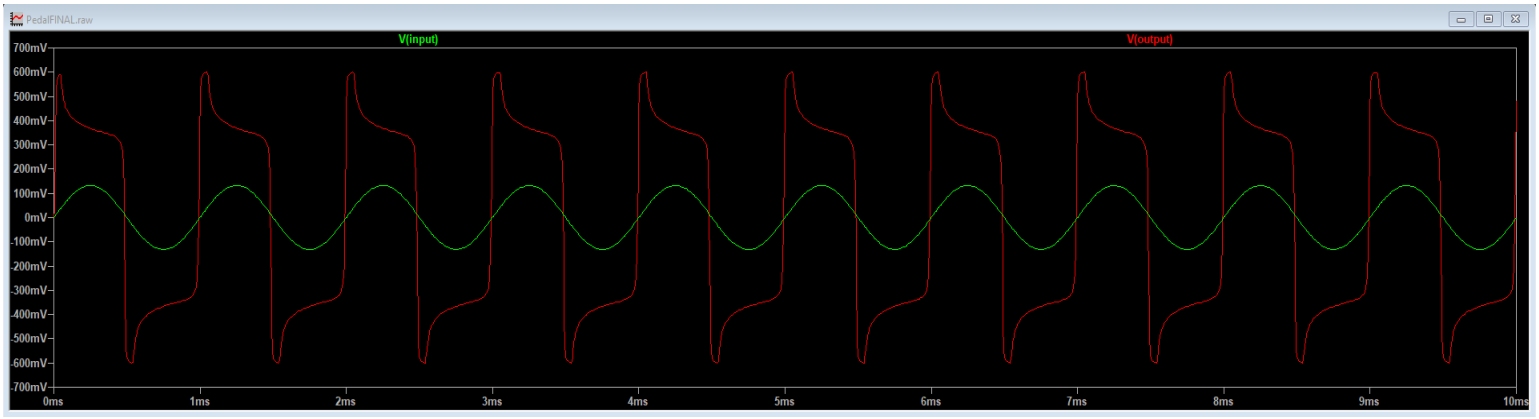
Εικόνα 3.4.1 - Τελική μορφή του κυκλώματος με τιμές

Λίστα Τιμών Στοιχείων:

Πυκνωτές: C1 = 10μF, C2 = 1μF, C3 = 10nF
Αντιστάσεις: R1 = 2.2 MΩ, R2 = 2.2 MΩ, R3 = 1 kΩ, R4 = 1 kΩ
Δίοδοι: D1 = 1N4007, D2 = 1N4007
Ποτενσιόμετρα: Gain_Pot = 220 kΩ, Output_Pot = 47 kΩ
Τελεστικός Ενισχυτής: Texas Instruments LM741

3.5 Προσομοίωση του πεταλιού

Με τις ίδιες τιμές στις παραμέτρους τροφοδοσίας και εισαγωγής σήματος με την προσομοίωση του MXR Distortion + θα γίνει και αυτού του πεταλιού.



Εικόνα 3.5.1 - Προσομοίωση του Πεταλιού της Εργασίας

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η προσομοίωση χρήσης παλμογράφου στο κύκλωμα. Η πράσινη κυματομορφή είναι το σήμα της κιθάρας στην είσοδο και η κόκκινη είναι το επεξεργασμένο σήμα στην έξοδο. Συγκριτικά με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προηγούμενου πεταλιού (Εικόνα 3.2.3) η διαφορά είναι μεγάλη. Η ενίσχυση του σήματος φτάνει τα 600 mV ενώ στο MXR Dist+ έφτανε μέχρι τα 300 mV, επίσης ξεκάθαρη είναι και η διαφορά στο στάδιο του Clipping, στο MXR Dist+ υπάρχει Hard Clipping λόγω των διόδων γερμανίου, το οποίο φαίνεται και στην κυματομορφή, ενώ στο νέο κύκλωμα, υπάρχει Soft Clipping, χαρακτηριστικό του Overdrive Pedal.

4. Υλοποίηση και Εφαρμογές

4.1 Υλοποίηση Αναλογικών Φίλτρων

Η υλοποίηση των αναλογικών φίλτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση διακριτών στοιχείων ή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η επιλογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως το κόστος, το μέγεθος και η απόδοση.
Για την υλοποίηση,απαιτούνται:

- Επιλογή Στοιχείων**:** Χρήση υψηλής ποιότητας αντιστάσεων, πυκνωτών, διόδων και τελεστικών ενισχυτών
- Τοποθέτηση του κυκλώματος σε Breadboard και δοκιμή του κυκλώματος
- Συναρμολόγηση και Δοκιμή: Συναρμολόγηση των στοιχείων στο Circuit Board και δοκιμή του φίλτρου με τη χρήση σήματος ηλεκτρικού μουσικού οργάνου και ενισχυτή σήματος με ηχείο.

4.1.1 Επιλογή Στοιχείων

Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για την κατασκευή σε Breadboard και έπειτα για την δημιουργία σε Circuit Board είναι τα εξής:

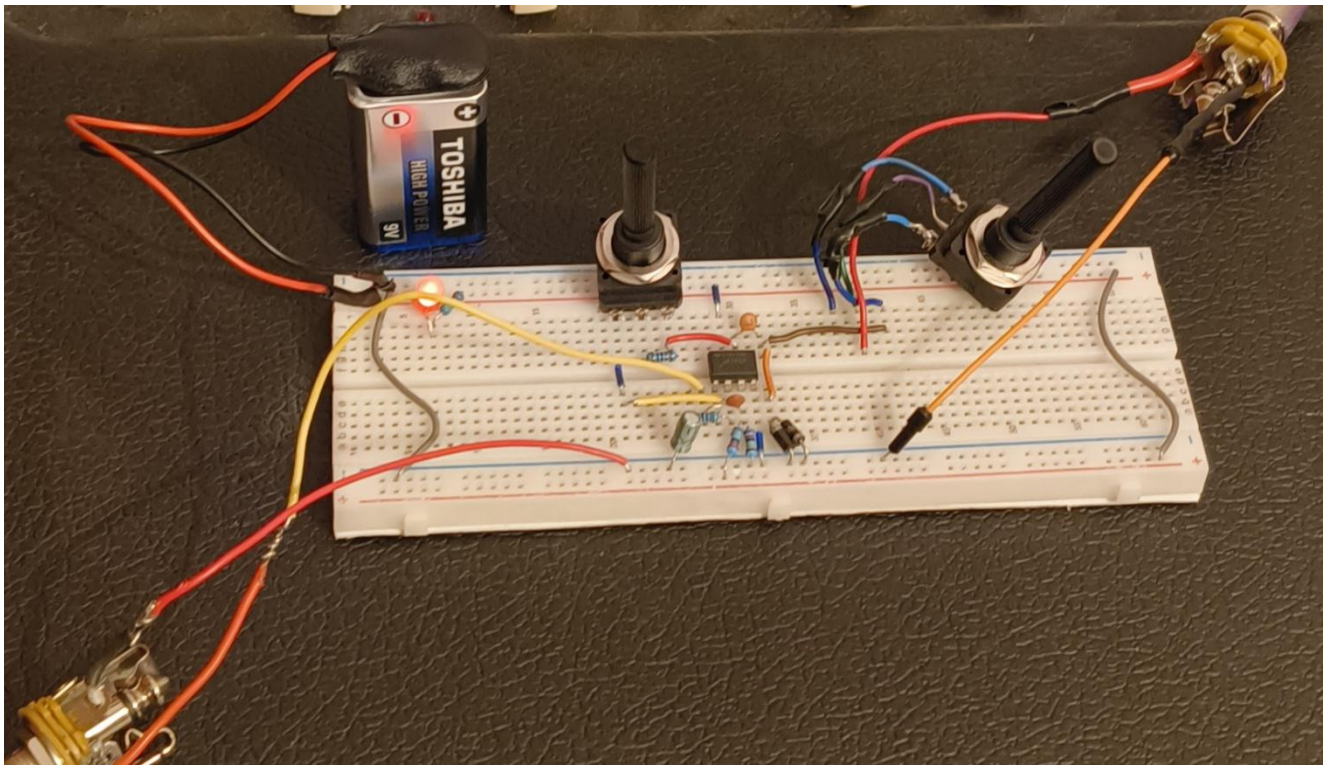
Από τους πυκνωτές ο C1 είναι 10μF στα 25 V για μέγιστη ασφάλεια και επιλέχθηκε δοκιμασμένος για να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του, ο C2 είναι 1μF στα 25 V, ο C3 10nF πάλι στα 25 V. Από τις αντιστάσεις οι R1 και R2 είναι στα 2.2 MΩ με 1% ανοχή και wattage rating 0.25 Watt, και οι R3 και R4 στα 1 kΩ με 1% ανοχή και wattage rating 0.25 Watt. Οι δίοδοι D1 και D2 είναι 1N4007 με μέγιστη τάση 1000V και ένταση 1A. Τα ποτενσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι γραμμικά για καλύτερο έλεγχο των επιπέδων έναντι των λογαριθμικών, το Gain_Pot είναι στα 220 kΩ και το Output_Pot στα 47 kΩ. Ο Τελεστικός Ενισχυτής που χρησιμοποιήθηκε είναι της Texas Instruments το μοντέλο μA741C το οποίο είναι κατά κύριο λόγο ίδιο με τον LM741 με βασική διαφορά τις θερμοκρασίες λειτουργίας, ο LM741 έχει εύρος λειτουργίας από -55^{o}C έως 125^{o}C ενώ ο μA741C από 0^{o}C έως 70^{o}C, κάτι το οποίο δεν απασχολεί κατασκευή τέτοιου είδους. Επίσης στην λίστα υλικών είναι μία Breadboard, ένα hole-through PCB, δύο 6.3mm mono female jacks για την είσοδο της κιθάρας και την έξοδο προς τον ενισχυτή, μια μπαταρία TOSHIBA 9V DC, ένας connector για την μπαταρία, jumper καλώδια για το Breadboard, καλώδια χαλκού για το Circuit board καθώς και θωρακισμένα καλώδια για τα input και output jacks. Για την υλοποίηση της κατασκευής στο PCB χρησιμοποιήθηκε κολλητήρι για ηλεκτρονικές κατασκευές, μολυβδούχο καλάι κόλλησης 60/40, πάστα συγκόλλησης (flux) για την βελτίωση του κολλήματος, ισοπροπυλική αλκοόλη για τον καθαρισμό της πλακέτας και πιστόλι θερμής σιλικόνης για την περεταίρω θωράκιση των καλωδίων της μπαταρίας για την αποφυγή βραχυκυκλώματος.

Component	Value	Quantity
Electrolytic Capacitor	10 μF	1
Ceramic Capacitor	1 μF	1
Ceramic Capacitor	10 nF	1
Resistor	2.2 MΩ	2
Resistor	1 kΩ	2
Diode	1N4007	2
Linear Potentiometer	220 kΩ	1
Linear Potentiometer	47 kΩ	1
Operational Amplifier	μA741C	1
Female Jack	6.3mm	2
Battery	9 V DC	1
Battery Connector	-	1
Jumper Cables	-	-
Copper Cables	-	-
Braided Shield Cable	-	-
Breadboard	-	1
Hole-through PCB	-	1
Soldering Iron	-	-
Lead Solder	60/40	-
Flux	-	-
Isopropyl Alcohol	≥99.8%	-
Silicone Gun	-	-

Πίνακας 2 - Λίστα Υλικών

4.1.2 Κατασκευή σε Breadboard

Το τελικό κύκλωμα μεταφρασμένο σε Breadboard με προσθήκη ενδεικτικού LED λειτουργίας είναι το εξής:



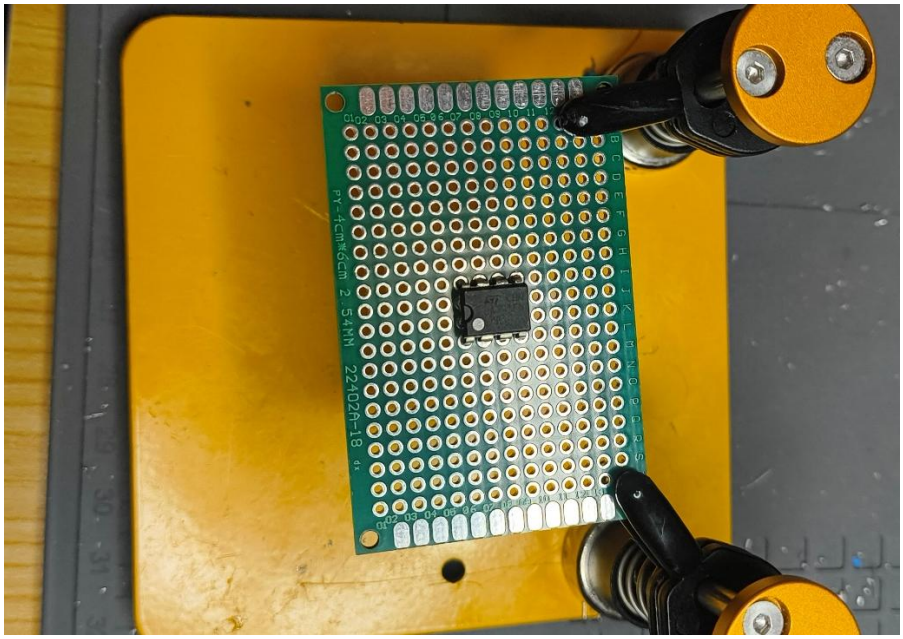
Εικόνα 4.1.1 – Κατασκευή του κυκλώματος σε Breadboard

Το κύκλωμα αφού πρώτα δοκιμαστεί σε ενισχυτή, με εισαγωγή σήματος ηλεκτρικής κιθάρας και ηλεκτρικού μπάσου και αφότου επιβεβαιωθεί από το αποτέλεσμα του παραχθέντα σήματος σε μορφή ήχου πως λειτουργεί σύμφωνα με τον σχεδιασμό και τις προδιαγραφές του και τα προσδοκόμενα αποτελέσματα που έχουν καθοριστεί, αποσυναρμολογείται και κατασκευάζεται με τα υλικά το τελικό κύκλωμα σε Hole-Through Circuit Board.

Καθώς μετά από τις δοκιμές σε ενισχυτή, πιο συγκεκριμένα τον Cort CM150B 150-Watt Bass Guitar Amplifier, με την δοκιμή ηλεκτρικής κιθάρας αλλά και ηλεκτρικού μπάσου παρατηρήθηκε πως το κύκλωμα λειτουργούσε απολύτως εντός των προδιαγραφών, καθώς και τα ποτενσιόμετρα λειτουργούσαν όπως λειτουργούσαν και στον προσομοιωτή, έγινε η αποσυναρμολόγηση για την κατασκευή του τελικού κυκλώματος σε πλακέτα.

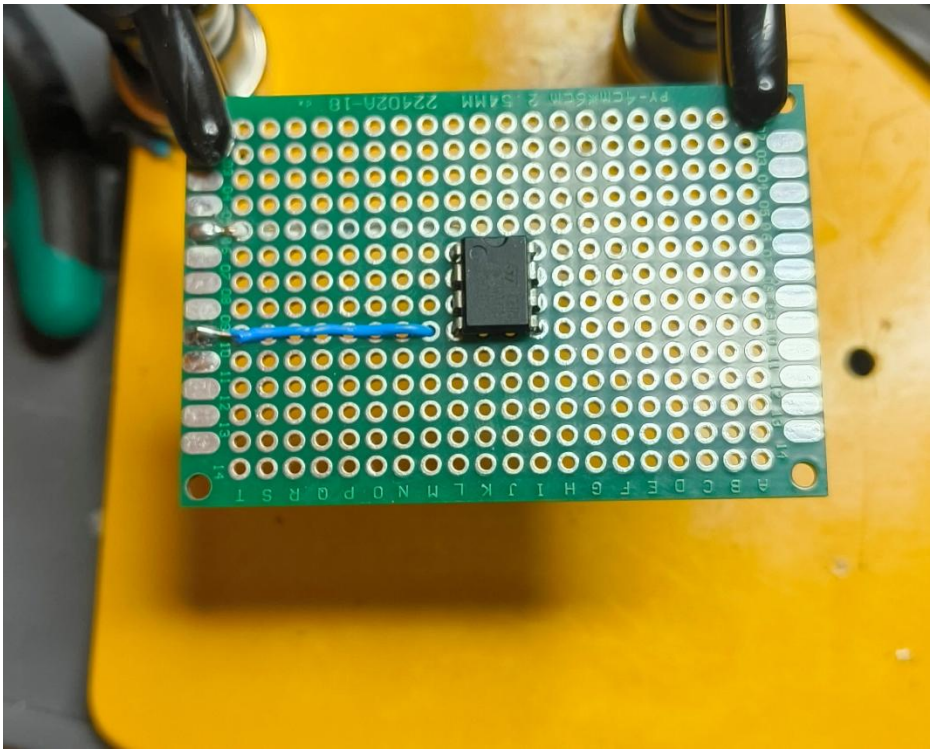
4.1.3 Κατασκευή του τελικού κυκλώματος σε πλακέτα βήμα προς βήμα

Αρχικά, γίνεται κόλληση του τελεστικού ενισχυτή μA741C στο κέντρο της πλακέτας, κολλώντας τα pins από την κάτω πλευρά.



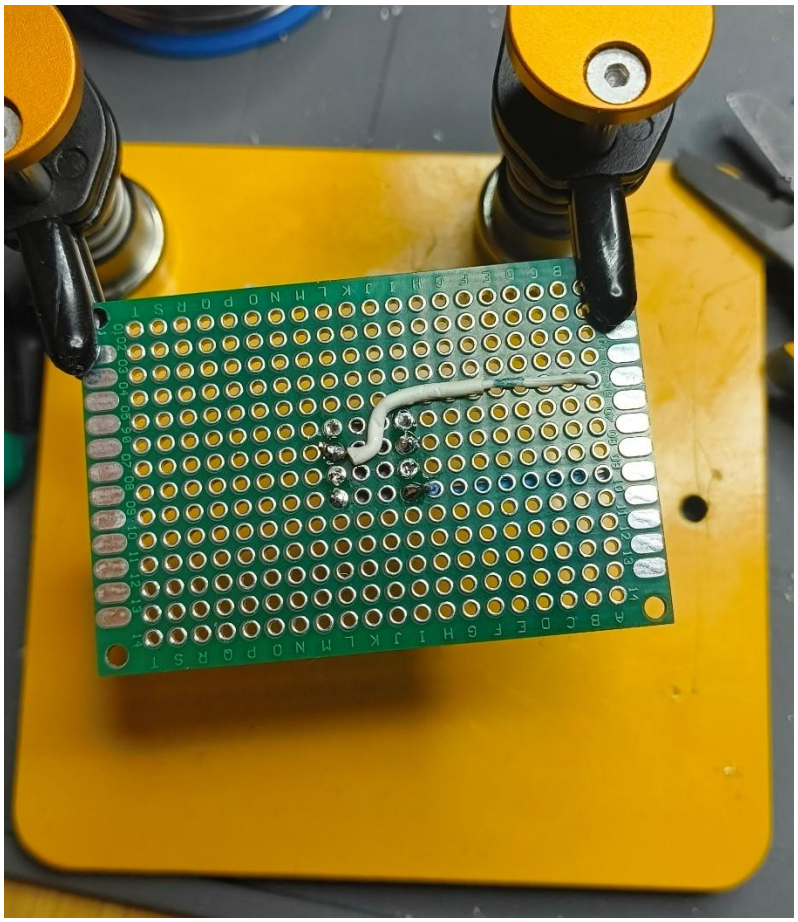
Εικόνα 4.1.2 - Βήμα 1

Ένα μπλε καλώδιο ενώνει το 4ο πόδι του τελεστικού ενισχυτή (το οποίο είναι το V^-) σε ένα σημείο το οποίο θα καθοριστεί ως το Ground της πλακέτας



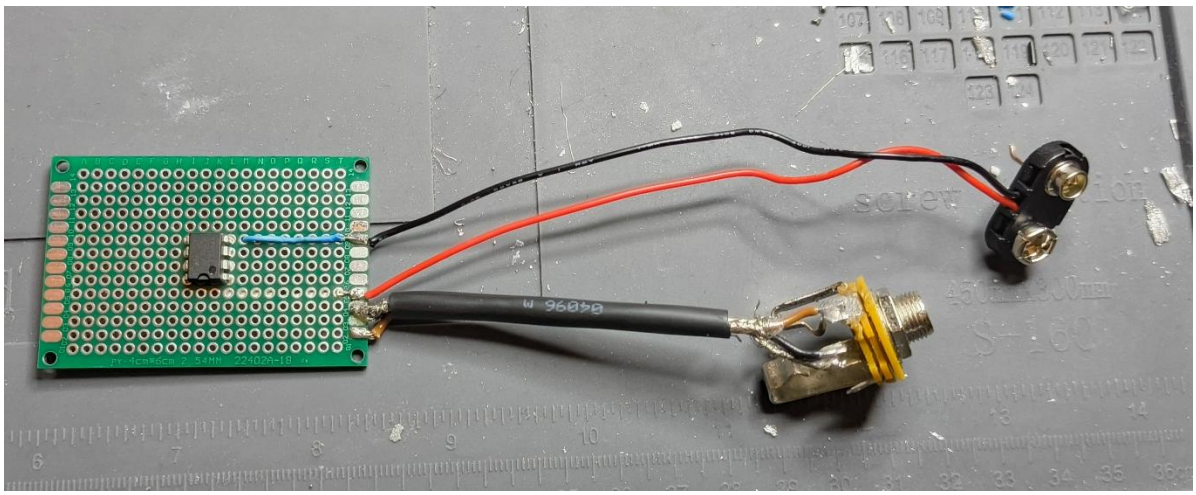
Εικόνα 4.1.3 - Βήμα 2

Ένα λευκό καλώδιο ενώνει το 7ο pin του τελεστικού ενισχυτή (το οποίο είναι το V^+) με ένα σημείο στην πλακέτα στο οποίο θα γίνει η τροφοδοσία



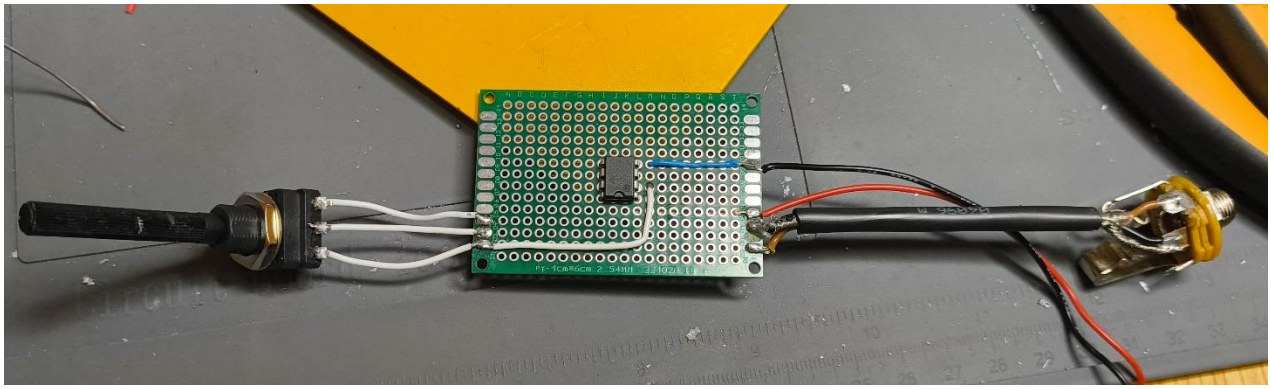
Εικόνα 4.1.4 - Βήμα 3

Γίνεται τοποθέτηση του connector της μπαταρίας στο + και – που ορίστικε πρίν, καθώς και τοποθετείται το Input Audio Jack, το οποίο είναι περασμένο με θωρακισμένο καλλόδιο



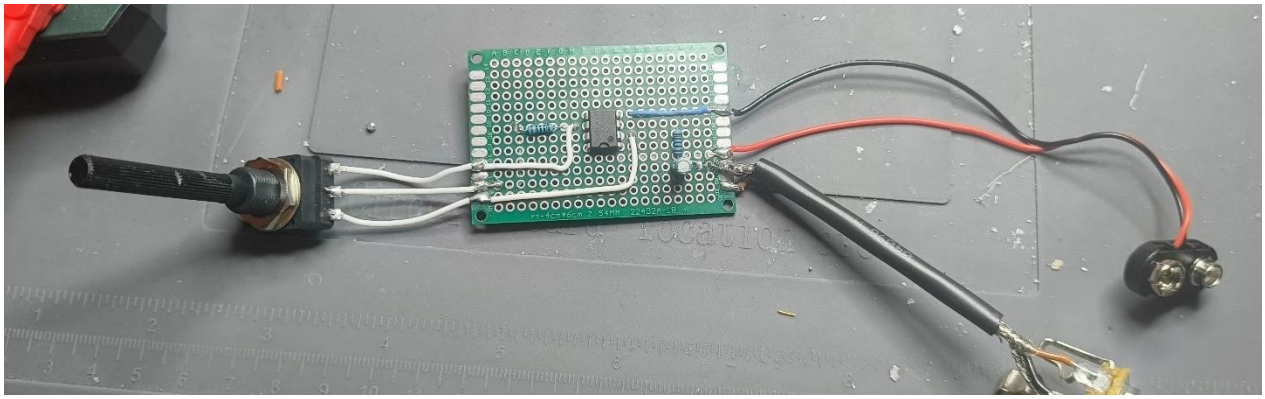
Εικόνα 4.1.5 - Βήμα 4

Τοποθετείται το ποτενσιόμετρο Gain_pot, από το οποίο το πρώτο πόδι (το Fixed End) συνδέεται με το 2ο pin του τελεστικού ενισχυτή (το Inverting Input)



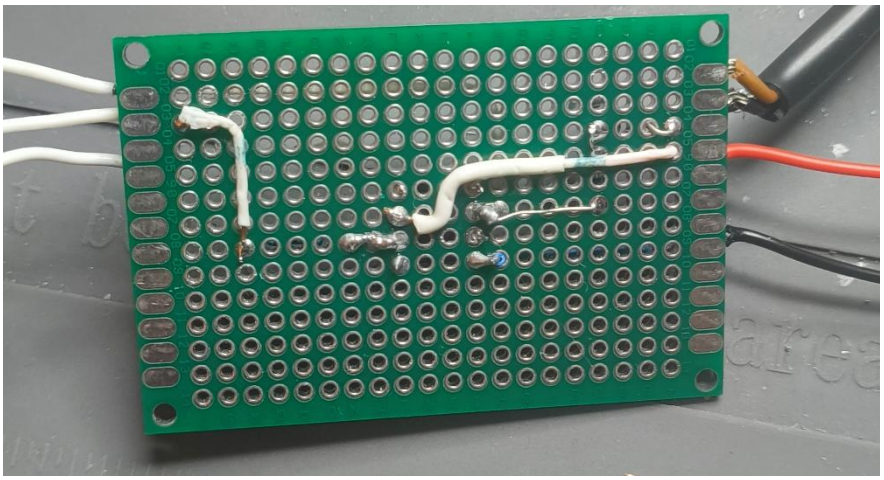
Εικόνα 4.1.6 - Βήμα 5

Το 3ο πόδι του ποτενσιόμετρου (πάλι Fixed End) συνδέεται με το 6ο pin του τελεστικού ενισχυτή (το Output), τοποθετείται ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής (C1) επάνω στο input, και οι αντιστάσεις του 1kΩ, η μία (R4) μετά το 3ο πόδι του ποτενσιόμετρου και η άλλη (R3) στο 2ο pin του τελεστικού ενισχυτή (Inverting Input)



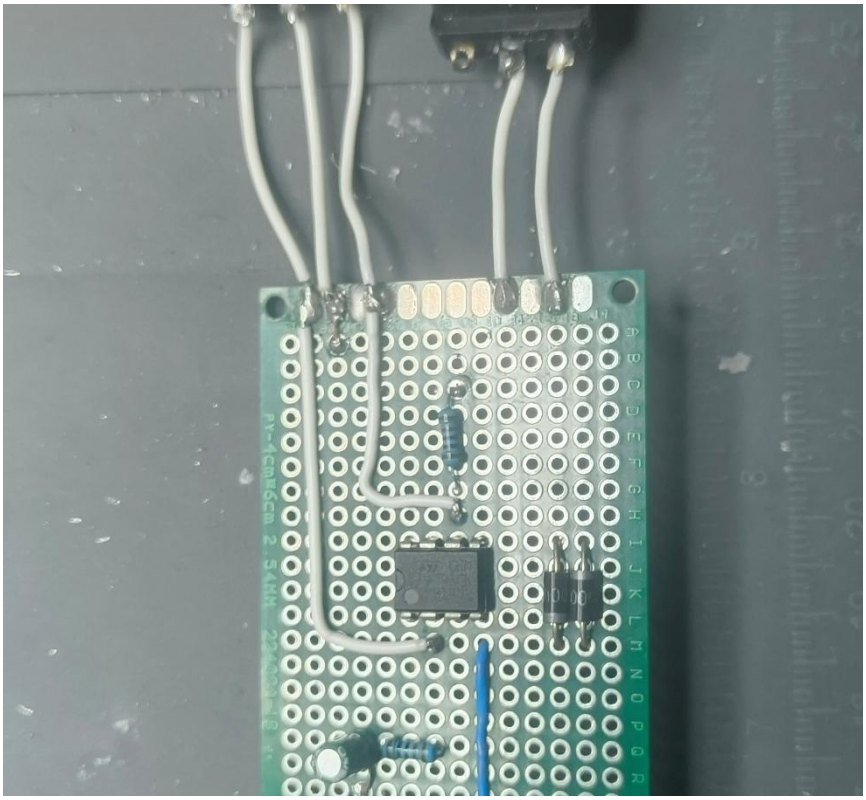
Εικόνα 4.1.7 - Βήμα 6

Σύνδεση του 2ου ποδιού του ποτενσιόμετρου (variable end) με την αντίσταση που συνδέθηκε στο 3ο πόδι του ποτενσιόμετρου



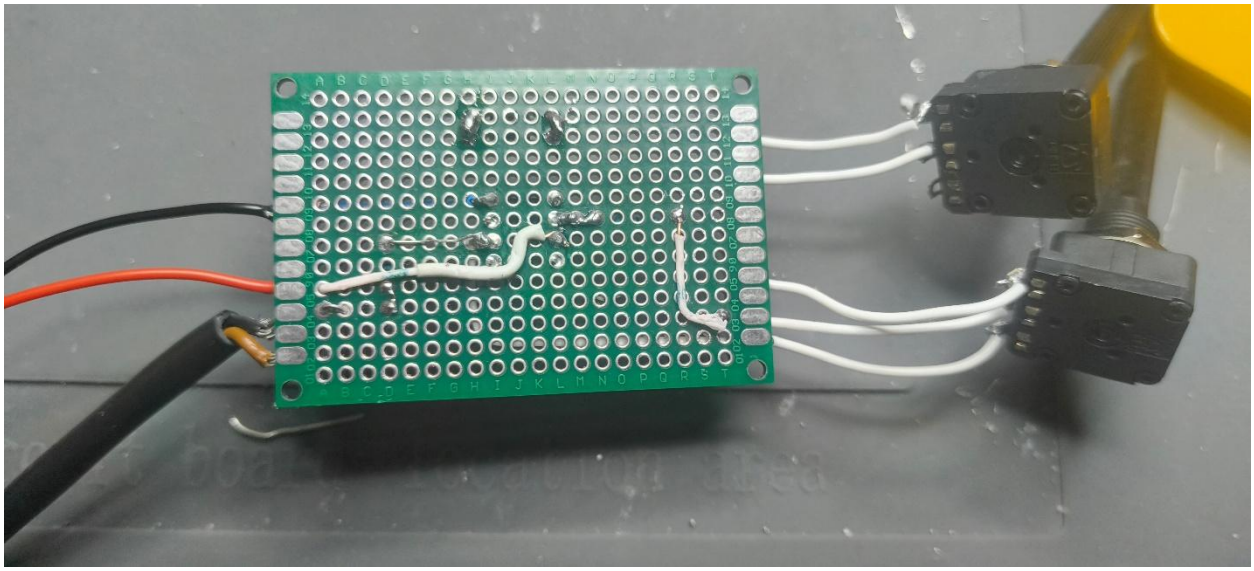
Εικόνα 4.1.8 - Βήμα 7

Τοποθέτηση του 2ου ποτενσιόμετρου Output_Pot (Το 2ο και 3ο πόδι), τοποθέτηση των διόδων για το clipping stage



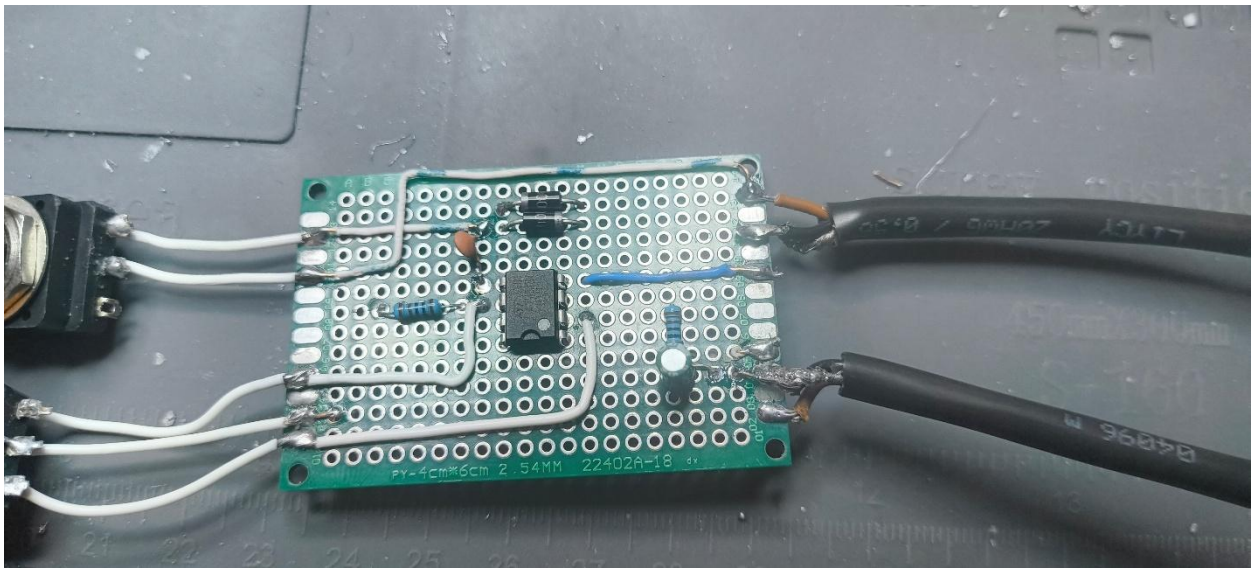
Εικόνα 4.1.9 - Βήμα 8

Σύνδεση των διόδων μεταξύ τους και με την έξοδο



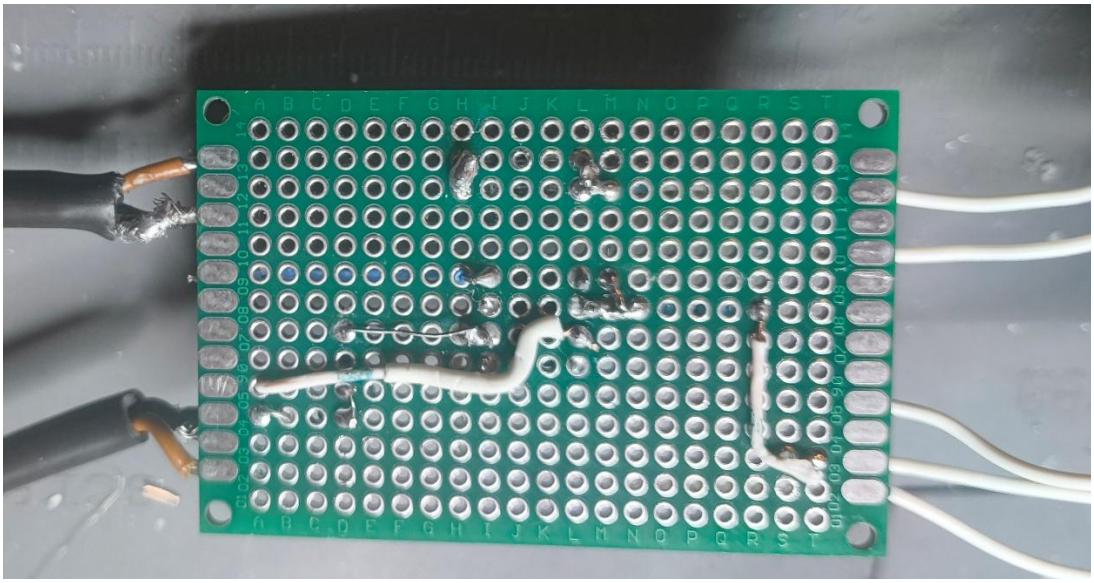
Εικόνα 4.1.10 - Βήμα 9

Τοποθέτηση και του καλλωδίου εξόδου του πεταλιού, σύνδεση του 2ου ποδιου του ποτενσιόμετρου εξόδου με το + του καλωδίου εξόδου, τοποθέτηση του C3 0.1μF στο 6ο pin του τελεστικού ενισχυτή (output) και σύνδεση με τις διόδους.



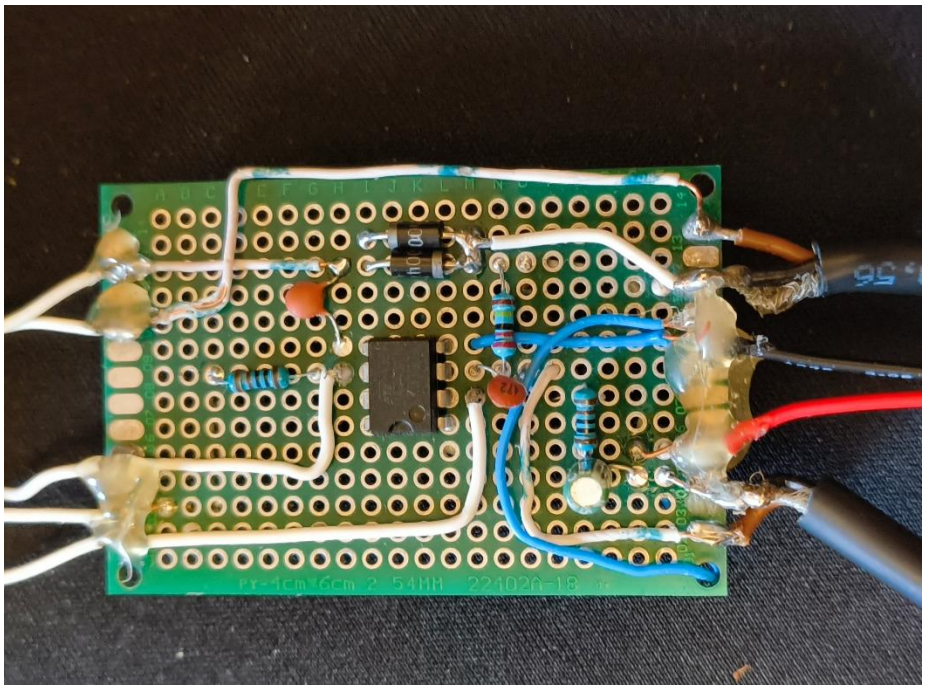
Εικόνα 4.1.11 - Βήμα 10

Ενώσεις από την κάτω πλευρά της πλακέτας



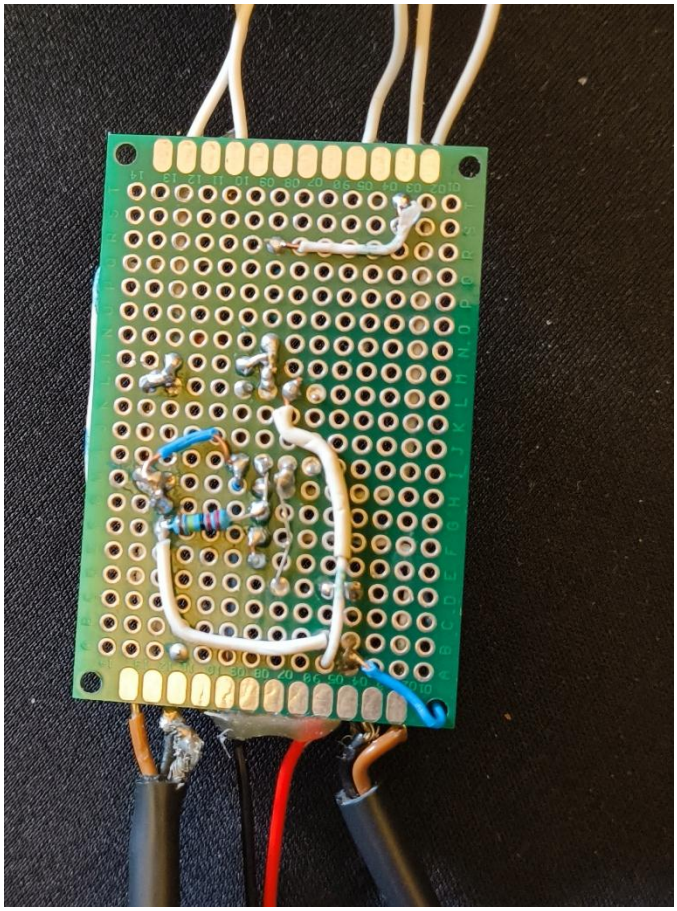
Εικόνα 4.1.12 - Βήμα 11

Τοποθέτηση του C2 και σύνδεση του στην αντίσταση R3 και στο Ground, της R1 απευθείας στην είσοδο και μετά στην γείωση, σύνδεση όλων των αναγκαίων γειώσεων με το Ground (-) της μπαταρίας, προσθήκη σιλικόνης για την προστασία των καλωδίων.



Εικόνα 4.1.13 – Βήμα 12

Τοποθέτηση της R2 η οποία συνδέεται στην είσοδο σήματος και στα 9 V της μπαταρίας



Εικόνα 4.1.14 – Βήμα 13

4.2 Δοκιμή του Πεταλιού σε ενισχυτή

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, έγινε δοκιμή του πεταλιού στον ίδιο ενισχυτή στον οποίον έγινε η δοκιμή του κυκλώματος της Breadboard, τον Cort CM150B 150-Watt Bass Guitar Amplifier σε καθαρό ήχο, με σκοπό να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του πεταλιού. Η δοκιμή έγινε με Ηλεκτρικό Μπάσο και Ηλεκτρική Κιθάρα, δοκιμάζοντας το πετάλι σε διαφορετικά επίπεδα του ποτενσιόμετρου του Gain, και διαπιστώθηκε η ορθή λειτουργία του πεταλιού. Στην πρώτη δοκιμή, δούλευαν όλα σωστά σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του σχεδιασμού, καθώς και τα αποτελέσματα ήταν ίδια με τα αποτελέσματα της δοκιμής του κυκλώματος της Breadboard.

5. Προβλήματα και μελλοντικές βελτιώσεις

5.1 Προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν

Πριν ολοκληρωθεί αυτή η πλακέτα, σε μια άλλη ολοκληρωμένη πλακέτα προέκυψε βραχυκύκλωμα λόγω της απόσπασης του + καλωδίου της μπαταρίας από την πλακέτα, το οποίο μετά έκανε επαφή με ένα άλλο μέρος του κυκλώματος, με αποτέλεσμα να καταστραφούν τα περισσότερα στοιχεία και να ξανά χρειαστεί να υλοποιηθεί από την αρχή. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα, τοποθετήθηκε σιλικόνη επάνω από τις συνδέσεις αυτές ώστε να μην μπορεί να γίνει αυτή η απόσπαση.

5.2 Προβλήματα που προέκυψαν κατά την δοκιμή

Κατά την διάρκεια δοκιμής του πεταλιού και πριν προστεθεί η σιλικόνη στις συνδέσεις των ποτενσιόμετρων, προέκυψε μια βλάβη λόγω της απόσπασης του 1^{ου} ποδιού του ποτενσιόμετρου Gain από την πλακέτα. Η λειτουργία του πεταλιού αποκαταστάθηκε αλλά το ποτενσιόμετρο του Gain δεν λειτουργεί σωστά και δεν γίνεται να χαμηλωθεί τέρμα το Gain σε σημείο που να είναι ο ήχος καθαρός, όπως γινόταν στο Breadboard και στην πλακέτα πριν την βλάβη αυτή.

5.3 Μελλοντικές Βελτιώσεις

Οι μελλοντικές βελτιώσεις περιλαμβάνουν:

1. Επιδιόρθωση της βλάβης του ποτενσιόμετρου Gain
2. Δημιουργία ενός κουτιού μέσα στο οποίο θα μπορούσε να τοποθετηθεί η πλακέτα για να αποφευχθούν βλάβες στο στάδιο της μεταφοράς και της χρήσης
3. Σχεδιασμός PCB για την διευκόλυνση της κατασκευής
4. Τοποθέτηση διακόπτη ON/OFF και τοποθέτηση μπουτόν Bypass ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνθήκες συναυλίας που αλλαγές στον ήχο πρέπει να γίνονται άμεσα και χωρίς την χρήση χεριών.

6. Συμπεράσματα

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας συμπερίλαβε κυρίως σε πρώτο στάδιο την δημιουργία ενός χώρου εργασίας στον οποίον θα ήταν γινόταν πρακτική εξάσκηση ώστε να καλλιεργηθούν οι απαιτούμενες ικανότητες για την υλοποίηση του πεταλιού. Έπειτα από αυτό, έγινε εμβάθυνση στην θεωρία των αναλογικών ηλεκτρονικών και των αναλογικών φίλτρων για να αποκτηθούν οι απαραίτητες βάσεις της γνώσης ώστε σε συνδυασμό της πρακτικής ικανότητας και της θεωρητικής γνώσης να μπορεί να υλοποιηθεί η πτυχιακή. Εάν ένα από τα δύο αυτά κομμάτια υστερούσε, η υλοποίηση δεν θα ήταν εφικτή σε τέτοιο βαθμό καθώς και η γνώση αλλά και η πράξη ήταν αρκετά απαιτητικές. Σίγουρα έχοντας μόνο τις πρακτικές ικανότητες και κάνοντας διάφορες δοκιμές θα γινόταν να δημιουργηθεί κάτι λειτουργικό, αλλά το να λειτουργήσει ομαλά χωρίς να προκαλέσει βλάβη σε κάποιο στοιχείο (καθώς τα περισσότερα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι πολύ ευαίσθητα) και ο σχεδιασμός να είναι αποτελεσματικός, χωρίς το θεωρητικό υπόβαθρο, θα ήταν δύσκολο.

Η πτυχιακή αυτή εστίασε στην τροποποίηση, απλούστευση, και οικονομικότερη κατασκευή ενός πεταλιού. Στο θεωρητικό κομμάτι βασίστηκε στα αναλογικά φίλτρα και τις κατηγορίες τους, τις τοπολογίες τους και τις τάξεις τους καθώς και στους νόμους του Ohm και τους κανόνες του Kirchhoff. Έπειτα εμβάθυνε περισσότερο σε σχέδια πεταλιών κιθάρας, όπως αυτό που τροποποιήθηκε, και τα στάδια και τις παραμέτρους τους. Στο πρακτικό κομμάτι εστίασε στην εξάσκηση κολλήματος στοιχείων σε πλακέτα, την μετατροπή ενός σχηματικού σε μορφή Breadboard, την εφαρμογή του επάνω σε πλακέτα, και στην επισκευή βλαβών.

Συμπεραίνεται πως η σχεδίαση και δημιουργία αναλογικών φίλτρων επεξεργασίας ήχου πρόκειται για μια απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία η οποία απαιτεί τον κατάλληλο χώρο και τον κατάλληλο εξοπλισμό, τις ικανότητες και την γνώση. Με αρκετή εξάσκηση και χρόνο όμως, η δημιουργία τους είναι εφικτή, και αρκετά επιβραβευτική ιδιαιτέρως για άτομα που ασχολούνται με την μουσική.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Manfred Zollner, *Physics of the Electric Guitar*, 2nd ed., vol. 1. Tilmann Zwicker, 2022, 2022. [Online]. Available: https://books.google.gr/books/about/Physics_of_the_Electric_Guitar.html?id=NmvBzwEACAAJ&redir_esc=y

[2] Josi Warman, "How Guitar Pickups Work." [Online]. Available: www.warmanguitars.co.uk/2024/09/03/how-guitar-pickups-work/

[3] Dr. Lawing, "How Does a Pickup Really Work?" [Online]. Available: https://lawingmusicalproducts.com/dr-lawings-blog/how-does-a-pickup-really-work

[4] Cathy Marchio and Stanford Magnets, "Permanent Magnets Used in Electric Guitar." [Online]. Available: https://www.stanfordmagnets.com/permanent-magnets-used-in-electric-guitar.html

[5] W. Storr, "Low Pass Filter - Passive RC Filter Tutorial," Basic Electronics Tutorials. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html

[6] Electronics Tutorials, "Active Low Pass Filter," Educational. [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html

[7] Electronics Tutorials, "Active High Pass Filter." [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_6.html

[8] A. P. Malvino, D. J. Bates, and P. E. Hoppe, *Electronic principles*, Ninth edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2021. [Online]. Available: https://books.google.gr/books/about/Electronic_Principles.html?id=ReNpEQAAQBAJ&redir_esc=y

[9] *Electronics Tutorial About Filters*.

[10] Athanasios Margaris, *Analog and Digital Filters*.

[11] Nirbindu Das and Quarktwin Technology, "Understanding Op Amp Filters – From Basics to Advanced Applications." [Online]. Available: https://www.quarktwin.com/blogs/integrated%20circuit/understanding-op-amp-filters-from-basics-to-advanced-applications/447

[12] IPCI-projeft, "Analogue Filters Tutorial."

[13] Electronics Tutorials, "Passive Band Pass Filter." [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_4.html

[14] Electronics Tutorials, "Active Band Pass Filter." [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_7.html

[15] Electronics Tutorials, "Band Stop Filter." [Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/band-stop-filter.html

[16] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic circuits*, Seventh edition. in The Oxford series in electrical and computer engineering. New York ; Oxford: Oxford University Press, 2015.

[17] Electrosmash, J. Parać, T. Van Ginkel, and JP Desruisseaux, "MXR Distortion + Analysis," MXR Distortion + Analysis. [Online]. Available: https://www.electrosmash.com/mxr-distortion-plus-analysis

[18] P. Horowitz and W. Hill, *The art of electronics*, Third edition, 21st printing with corrections. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2024.

[19] "LM741 DOCUMENTATION." TEXAS INSTRUMENTS, 1998. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf

[20] Maple Puppet, *MXR Distortion + signal analysis*, (Nov. 03, 2024). [Online Video]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=2ZdnwIn7aDU

[21] CaliforniaSonics, *Deep Dive: MXR Distortion + vs. Micro Amp vs. Rat (Distortion Plus)*, (Sep. 24, 2025). [Online Video]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=aixBLSd1Mp8
[22] Jack Orman, “Pedal Impedance,” Pedal Impedance, The In and Out of Impedance. [Online]. Available: https://www.muzique.com/lab/imp.htm