



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΗΧΟΥ
(ΜΟΝΟΦΩΝΙΚΟΣ VCA ΚΟΜΠΡΕΣΟΡΑΣ)**

Διπλωματική Εργασία

Χρήστος-Θεοφάνης Πατήλας

Επιβλέπων: Πλέσσας Φώτιος

Μήνας 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΗΧΟΥ
(ΜΟΝΟΦΩΝΙΚΟΣ VCA ΚΟΜΠΡΕΣΟΡΑΣ)**

Διπλωματική Εργασία

Χρήστος-Θεοφάνης Πατήλας

Επιβλέπων: Πλέσσας Φώτιος

Μήνας 2024



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**ANALOG AUDIO CIRCUITS
(MONO VCA COMPRESSOR)**

Diploma Thesis

Christos-Theofanis Patilas

Supervisor: Plessas Fotis

Month 2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων **Πλέσσας Φώτιος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Καραμπερόπουλος Δημήτριος**

ΕΔΙΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Σταμούλης Γεώργιος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές που με ώθησαν στο να εμβαθύνω τόσο στα ηλεκτρολογικά κυκλώματα όσο και στην κατηγορία του ήχου , τον Κ. Φώτη Πλέσσα , τον Κ. Δημήτρη Καραμπερόπουλο , τον Κ. Λουτρίδη Σπυρίδων .

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου , Σταυρούλα και Κωνσταντίνο τόσο για την στήριξη κατά τα χρόνια φοίτησής μου όσο και για την συνολική προσφορά , εμπιστοσύνη και αρωγή τους σε ό,τι στόχο είχα.

Διπλωματική Εργασία
ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΗΧΟΥ
(ΜΟΝΟΦΩΝΙΚΟΣ VCA ΚΟΜΠΡΕΣΟΡΑΣ)

Χρήστος-Θεοφάνης Πατήλας

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την μελέτη , παραμετροποίηση , δοκιμή και κατασκευή ενός αναλογικού , μονοφωνικού κομπρέσορα ήχου . Δίνει έμφαση στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και συστημάτων ήχου. Το κομμάτι της έρευνας-μελέτης , αφορά την κατανόηση των διαφόρων ειδών ενός κομπρέσορα καθώς και τα θεμελιώδη υποκυκλώματα που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του συνολικού κυκλώματος . Στο κομμάτι της παραμετροποίησης και της δοκιμής πραγματοποιούνται εργαστηριακές μετρήσεις και επιλογή των κατάλληλων ηλεκτρολογικών στοιχείων για το κύκλωμα . Τέλος πραγματοποιείται η ψηφιακή κατασκευή του κυκλώματος (schematic) , η κατασκευή του κυκλώματος σε πλακέτα δοκιμών (breadboard) και η δημιουργίας της πλακέτας του (PCB). Σκοπός της εργασίας είναι η εξοικείωση με τα κυκλώματα ήχου , η κατανόηση των αναγκαίων παραμέτρων τους και η κατασκευή ενός πλήρους λειτουργικού συστήματος .

Diploma Thesis
ANALOG AUDIO CIRCUITS
(MONO VCA COMPRESSOR)

Christos-Theofanis Patilas

Abstract

The present thesis entails the study, parameterization, testing, and construction of an analog audio compressor, emphasizing the design and development of electronic circuits and audio systems. In the research and study section, the focus lies on comprehending various types of compressors, along with the fundamental sub-circuits essential for completing the overall circuit. The parameterization and testing phase involve laboratory measurements and the selection of appropriate electrical components for the circuit. Finally, the digital construction of the circuit (schematic), the implementation on a breadboard, and the creation of the printed circuit board (PCB) are executed. The objective of this work is to familiarize oneself with audio circuits, understand their necessary parameters, and construct a fully functional system.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	v
Περίληψη	vi
Abstract	vii
Πίνακας περιεχομένων	viii
Κατάλογος σχημάτων	xi
Συντομογραφίες	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	1
1.1.1 Συνεισφορά	2
1.2 Οργάνωση του τόμου	3
2 Βασικά χαρακτηριστικά ενός κομπρέσορα	4
2.1 Εισαγωγή	4
2.1.1 Είδη κομπρέσορα	4
2.2 Βασικές δυνατότητες	5
2.3 Βασικά υποκυκλώματα ενός κομπρέσορα	6
2.4 Δευτερεύον υποκυκλώματα	7
3 Σχεδιασμός-Επεξήγηση των κυκλωμάτων	8
3.1 Εισαγωγή	8
3.1.1 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης	8
3.1.2 Τάση Εισόδου Εξόδου	8

3.1.3	Attack-Release Time	9
3.1.4	Input - Output Jacks	9
3.1.5	Υλοποίηση VCA με διόδους	9
3.2	Κύκλωμα ελέγχου πλάτους σήματος (VCA)	10
3.2.1	Divider - Multiplier Buffers	11
3.2.2	Diode String	13
3.2.3	CV Buffers	15
3.3	Κύκλωμα ανίχνευσης κορυφών (Peak Detector)	17
3.4	Κύκλωμα σύγκρισης κορυφής με το κατώφλι (Voltage Comparator) . .	20
3.5	Κύκλωμα εισόδου εξόδου (Input Output Gain)	22
3.5.1	Input Gain	22
3.5.2	Output Gain	23
3.6	Κύκλωμα Optical Feedback μέσω Arduino	24
3.7	Κύκλωμα τροφοδοσίας (Power Supply)	25
4	Μετρήσεις εργαστηρίου	26
4.1	Εισαγωγή	26
4.2	Μετρήσεις με παλμογράφο	27
4.2.1	Input-Output Gain multipliers	27
4.2.2	Peak detector	27
4.2.3	Compressor Input-Output-Threshold	28
4.2.4	Attack-Release	29
4.2.5	Attack	29
4.2.6	Release	30
4.2.7	Compression Limits	31
4.2.8	For Small Value Signal	31
4.2.9	For Large Value Signal	32
4.3	Μετρήσεις με λογισμικό ήχου	33
5	Schematic And Breadboard Prototype	34
5.1	Εισαγωγή	34
5.2	Prototype Schematic In Proteus	35

6	PCB DESIGN	38
6.1	Εισαγωγή	38
6.2	Final Schematic	39
6.3	Final PCB	40
7	Arduino Code	42
8	Συμπεράσματα	47
8.1	Μελλοντικές επεκτάσεις	47
8.1.1	Βελτιώσεις	47
8.1.2	Επεκτάσεις	48
	Βιβλιογραφία	49
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	51
A	Τελεστικοί ενισχυτές	52
B	Data Sheets - Pinouts	54

Κατάλογος σχημάτων

2.1	VCA Compressor Block Diagram Partial	6
2.2	VCA Compressor Block Diagram Full	7
3.1	Line Level Amplitude	8
3.2	Voltage Divider Vsignal Buffer	11
3.3	Voltage Multiplier Vsignal Buffer	12
3.4	Diode VCA	13
3.5	Positive - Control Voltage Buffer	15
3.6	Negative - Control Voltage Buffer	16
3.7	Basic Peak Detector	17
3.8	Updated Peak Detector	18
3.9	Pre Final Peak Detector	18
3.10	Negative Waveform Inverter	19
3.11	Voltage Comparator	20
3.12	Input Gain	22
3.13	Output Gain	23
3.14	TL072 Supply Caution	25
4.1	Input-Output Gain Oscilloscope	27
4.2	Peak Detector Oscilloscope	27
4.3	Input-Output-Threshold Oscilloscope	28
4.4	CV Limits Oscilloscope	28
4.5	Medium Attack-Slow Release Oscilloscope	29
4.6	Fast Attack-Slow Release Oscilloscope	29
4.7	Medium Release-Fast Attack Oscilloscope	30
4.8	Slow Release-Fast Attack Oscilloscope	30

4.9	No Compression Oscilloscope (Threshold > 300mV)	31
4.10	Some Compression Oscilloscope (Threshold = 140mV)	31
4.11	Losing Compression Oscilloscope (Threshold = 100mV)	31
4.12	No Compression Oscilloscope (Threshold > 1.4V)	32
4.13	Some Compression Oscilloscope (Threshold = 700mV)	32
4.14	Losing Compression Oscilloscope (Threshold = 100mV)	32
5.1	Breadboard Prototype	34
5.2	Main Circuit Schematic	35
5.3	Power Supply Circuit Schematic	36
5.4	Arduino Circuit Schematic	37
6.1	Final Schematic	39
6.2	PCB Layout - Routing (Top View)	40
6.3	Final PCB (Top View)	41
A.1	Op-Amp Buffer	52
A.2	Voltage Divider Op-Amp Buffer	52
A.3	Non Inverting Op-Amp	53
A.4	Inverting Op-Amp	53
A.5	Comparator Op-Amp	53
B.1	1N4148 Diode Forward Current-Forward Voltage	54
B.2	TL072 Pinout	54
B.3	Arduino Uno Pinout	55
B.4	LM7812 Pinout	55
B.5	LM7912 Pinout	55

Συντομογραφίες

CV	Control Voltage
VAC	Voltage AC
VDC	Voltage DC
VCA	Voltage Controlled Amplifier
V _p	Peak Voltage
Op-Amp	Operational Amplifier
V _{signal}	Σήμα ήχου στην είσοδο του κομπρέσορα
V _{s'}	Σήμα ήχου στην είσοδο του Diode String
DAW	Digital Audio Workstation

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο χώρος εφαρμογής της διπλωματικής εργασίας εντοπίζεται στον τομέα της ηχογράφησης και επεξεργασίας ήχου. Αυτός ο ευρύς τομέας καλύπτει διάφορες πτυχές, από τη σχεδίαση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων έως την παραγωγή και επεξεργασία ήχου. Χαρακτηρίζεται από τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας, την ανάγκη για υψηλή ποιότητα ήχου, και τη διαρκή ζήτηση για καινοτόμες λύσεις στον τομέα της ηχογράφησης. Ανάμεσα στα γενικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο χώρος περιλαμβάνονται η διασφάλιση υψηλής ποιότητας ήχου, η αποτελεσματική διαχείριση του δυναμικού εύρους ενός σήματος, η κατά κόρον χρήση ψηφιακών μέσων τα οποία οδηγούν σε μειωμένη απόδοση του ήχου (λόγο της ψηφιακής επεξεργασίας) και η έλλειψη φυσικότητας ενός ήχου που μόνο τα αναλογικά κυκλώματα επιτυγχάνουν.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία όπως προαναφέραμε επικεντρώνεται στα αναλογικά κυκλώματα ήχου και συγκεκριμένα στην ανάπτυξη ενός μονοφωνικού αναλογικού κομπρέσορα ήχου. Ο ρόλος του κομπρέσορα είναι να προσφέρει ευκρίνεια και ισορροπία σε ένα ηχητικό σήμα αλλάζοντας το δυναμικό του εύρος. Δέχεται μια κυματομορφή ήχου και μειώνει την ένταση των κορυφών της ώστε το σήμα να μην έχει μεγάλες διακυμάνσεις έντασης. Η διαδικασία του compression μπορεί να επιτευχθεί ψηφιακά με plugins μέσα σε προγράμματα DAW όμως με την ψηφιακή επεξεργασία ενός αναλογικού σήματος υπάρχουν επιπτώσεις στην ποιότητά του.

Συνοπτικά εντοπίζονται :

1. **Απώλεια Πληροφορίας:** Κατά τη διαδικασία της ψηφιακής μετατροπής, μπορεί να υπάρξει απώλεια πληροφορίας, κυρίως λόγω της δειγματοληψίας.
2. **Digital Artifacts:** Κατά την επεξεργασία, ενδέχεται να δημιουργηθούν Digital Artifacts , θόρυβος και παραμορφώσεις που δεν υπήρχαν στο αναλογικό σήμα.
3. **Quantization noise:** Η δειγματοληψία μπορεί να προκαλέσει (quantization noise) κατά την μετατροπή των αναλογικών τιμών σε ψηφιακές.
4. **Απώλεια Δυναμικού Εύρους:** Η περιορισμένη ακρίβεια των ψηφιακών αριθμητικών bit μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια δυναμικού εύρους και αποκοπή των υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων.
5. **Καθυστέρηση Σήματος:** Οι ψηφιακοί αλγόριθμοι επεξεργασίας μπορεί να προκαλέσουν καθυστέρηση στην έξοδο του σήματος, γνωστή και ως ψηφιακή καθυστέρηση.

Αυτό το οποίο παρατηρούμε είναι ότι όλα τα παραπάνω προβλήματα δημιουργούνται λόγω της ψηφιοποίησης ενός αρχικά αναλογικού σήματος . Σκοπός μας είναι λοιπόν η αναλογική συμπίεση (compression) του σήματος εισόδου.

1.1.1 Συνεισφορά

1. Μελέτη διαφορετικών ειδών και υλοποιήσεων αναλογικού κομπρέσορα.
2. Κατασκευή - επεξήγηση των κυκλωμάτων , εμβάθυνση στα αναλογικά κυκλώματα.
3. Πειραματικές δοκιμές και εύρεση κατάλληλων τιμών για τα αναλογικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν , έλεγχος ακρίβειας και απόδοσης.
4. Δημιουργία του schematic.
5. Breadboard prototype.
6. Υλοποίηση και κατασκευή του PCB board.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο2 παρουσιάζονται τα διάφορα είδη αναλογικού κομπρέσορα τα οποία χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία καθώς και τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες που οφείλει να έχει ένας κομπρέσορας .

Στο Κεφάλαιο3 πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η επεξήγηση τόσο των ηλεκτρολογικών υλικών που επιλέχθηκαν όσο και της λειτουργίας του κάθε κυκλώματος .

Στο Κεφάλαιο4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο και αφορούν την απόδοση του κομπρέσορα .

Στο Κεφάλαιο5 υλοποιούμε στο λογισμικό Proteus το schematic του κομπρέσορα καθώς και το breadboard prototype .

Στο Κεφάλαιο6 παρουσιάζουμε το τελικό schematic καθώς και δημιουργούμε το PCB του κυκλώματος .

Στο Κεφάλαιο7 εξηγούμε τον κώδικα του Arduino .

Κεφάλαιο 2

Βασικά χαρακτηριστικά ενός κομπρέσορα

2.1 Εισαγωγή

Όπως είδαμε έως τώρα ο αναλογικός κομπρέσορας είναι ένα κύκλωμα με είσοδο ένα αναλογικό σήμα ήχου και έξοδο ένα αναλογικό σήμα ήχου συμπιεσμένο . Για να καταστεί εφικτή η συμπίεση ο κομπρέσορας οφείλει να μπορεί να αντλήσει δεδομένα από το ήδη υπάρχον σήμα εισόδου , να τα συγκρίνει με τα δεδομένα που δίνει ο χρήστης και τέλος να επεξεργαστεί το σήμα . Αυτά τα δεδομένα έχουν την μορφή τιμών **VAC** ή **VDC** και προκύπτουν μέσω των επιμέρους υποκυκλωμάτων (που θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο) τα οποία συντελούν το τελικό κύκλωμα του αναλογικού κομπρέσορα .

2.1.1 Είδη κομπρέσορα

Στην βιομηχανία χρησιμοποιούνται πολλά είδη αναλογικών ή ψηφιακών compressor . Οι βασικοί τύποι ονομαστικά είναι [1] :

- **Tube compressor**
- **Optical compressor**
- **FET compressor**
- **VCA compressor**

Κάθε είδος έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα αλλά και εφαρμογές στον χώρο της μουσικής .

- **Οι Tube compressor** , χαρακτηρίζονται από ζεστό ήχο , χρώμα και αρμονικές , συνήθως χρησιμοποιούνται σε κανάλια φωνής , κανάλια κρουστών και μπάσων .
- **Οι Optical compressor** , χαρακτηρίζονται από την ομαλή και οργανική συμπίεση που προσφέρουν σε έναν ήχο καθώς και την προσθήκη αρμονικών σε ένα κανάλι ήχου .
- **Οι FET compressor** , χαρακτηρίζονται από την ταχύτητά τους , τον φωτεινό τους ήχο καθώς και την δύναμη που προσδίδουν στον ήχο . Χρησιμοποιούνται κυρίως σε κανάλια κρουστών , ηλεκτρικής κιθάρας .
- **Οι VCA compressor** , χαρακτηρίζονται από την γρήγορη ταχύτητά τους αλλά και την ελάχιστη παραμόρφωση στο ήχο , είναι ομαλοί δεν προσθέτουν χρώμα σε ένα κανάλι ήχου , χαρακτηρίζονται ως "διαφανείς" στην συμπίεση του ήχου .

Εμείς επιλέξαμε να υλοποιήσουμε έναν κομπρέσορα τύπου **VCA**. Η απόφαση αυτή προέκυψε καθώς ο τύπος **VCA** αποτελείται από αναλογικά κυκλώματα τα οποία δεν απαιτούν εξειδικευμένα υλικά (π.χ οι **Optical compressor** απαιτούν ένα light element και ένα optical cell , τα οποία είναι δύσκολα στην εύρεση ή και στην υλοποίησή τους εξ ' αρχής) .

2.2 Βασικές δυνατότητες

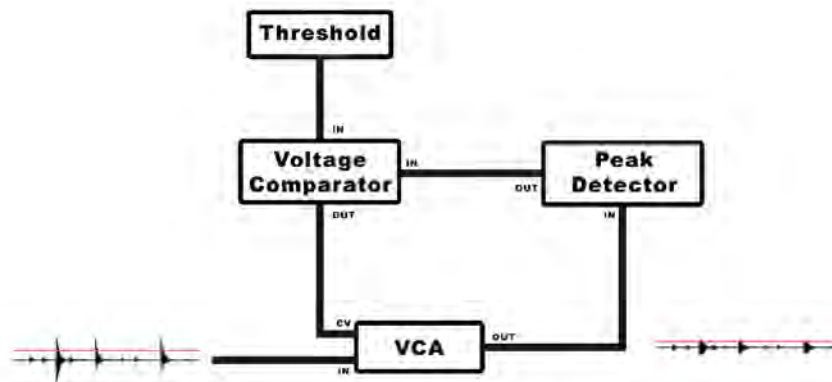
Ένας κομπρέσορας συνεπώς καλείτε να ανοιχνεύσει τις κορυφές ενός σήματος οι οποίες βρίσκονται πάνω από μια τιμή που ορίζει ο χρήστης και να ελαττώσει το πλάτος τους. Οπότε το κύκλωμά μας πρέπει να παρέχει τις παρακάτω δυνατότητες [2] :

1. **Ανίχνευση κορυφών σε ένα μη συμμετρικό σήμα AC.**
2. **Δυνατότητα μείωσης του πλάτους VAC των κορυφών .**
3. **Δυνατότητα ορισμού επιπέδου ανίχνευσης των κορυφών .**
4. **Δυνατότητα ελέγχου ταχύτητας (γρήγορα-αργά) που εφαρμόζεται η συμπίεση , (γρήγορα-αργά) που σταματά να επιδρά η συμπίεση .**
5. **Έλεγχος του πλάτους VAC του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου .**

2.3 Βασικά υποκυκλώματα ενός κομπρέσορα

Για να γίνει η συμπίεση του σήματος μέσω του κομπρέσορα τα υποκυκλώματά του λειτουργούν σε ένα **Feedback Loop** και διαρκώς κάνουν υπολογισμούς και συγκρίσεις . Στην ουσία το AC σήμα εισόδου περνάει από ένα κύκλωμα **Peak Detector** το οποίο εντοπίζει τις κορυφές του σήματος και τις προωθεί συνεχώς στο κύκλωμα του **Voltage Comparator** , εκεί η κάθε κορυφή συγκρίνεται με το **Threshold** που έχει ορίσει ο χρήστης και εάν **Detected Peak > Threshold** τότε μέσω του κυκλώματος **VCA** μειώνουμε το πλάτος του σήματος σε αυτά τα Peaks .

1. **Peak Detector** (ανίχνευση κορυφών) .
2. **VCA** (μεταβολή του πλάτους) .
3. **Voltage Comparator** (σύγκριση Detected Peak με Threshold) .

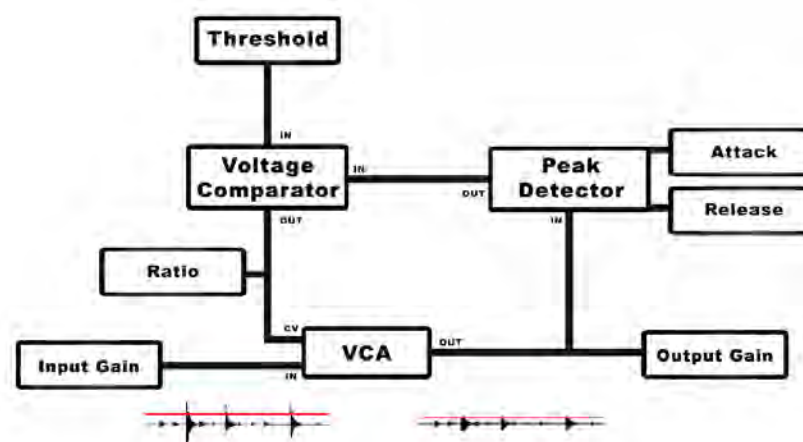


Σχήμα 2.1: VCA Compressor Block Diagram Partial

2.4 Δευτερεύον υποκυκλώματα

Πέραν των κυκλωμάτων που πραγματοποιούν την συμπίεση του σήματος, ο κομπρέσορας απαρτίζεται και από μερικά επιπλέον κυκλώματα που συντελούν στην πλήρη λειτουργικότητά του. Αρχικά τόσο το σήμα εισόδου όσο και το σήμα εξόδου για να επεξεργαστεί σωστά πρέπει να βρίσκεται σε μια περιοχή τιμών τάσης (για την οποία θα εξηγήσουμε παρακάτω) συνεπώς θέλουμε ένα είδος Gain Control στην είσοδο και στην έξοδο **Input-Output Gain**. Επιπλέον πρέπει να παρέχονται στον χρήστη πληροφορίες τόσο για την συμπίεση **Optical Feedback Circuit** όσο και για την τιμή της εισόδου και εξόδου **Warning Circuit** (θα αναφερθούμε παρακάτω). Επίσης ο χρήστης πρέπει να έχει την δυνατότητα να ελέγξει πόσο γρήγορα ή αργά ξεκινά και τελειώνει η συμπίεση **Attack-Release Time**. Τέλος για την λειτουργία του κομπρέσορα (και των υποκυκλωμάτων του) χρειάζεται και ένα κύκλωμα τροφοδοσίας **Power Supply Circuit**.

1. **Input-Output Gain** (έλεγχος πλάτους σήματος εισόδου-εξόδου).
2. **Attack-Release Time** (χρόνος για να ξεκινήσει ή να τελειώσει η συμπίεση).
3. **Optical Feedback Circuit** (κύκλωμα οπτικής απόκρισης της συμπίεσης που εφαρμόζεται).
4. **Warning Circuit** (κύκλωμα οπτικής απόκρισης που πληροφορεί εάν το σήμα εισόδου ή εξόδου υπερβαίνει τις προδιαγραφές του κομπρέσορα).
5. **Power Supply Circuit** (κύκλωμα τροφοδοσίας).



Σχήμα 2.2: VCA Compressor Block Diagram Full

Κεφάλαιο 3

Σχεδιασμός-Επεξήγηση των κυκλωμάτων

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επεξηγήσουμε πλήρως τον τρόπο λειτουργίας και παραμετροποίησης κάθε κυκλώματος. Παράλληλα θα παρουσιάσουμε το schematic των επιμέρους κυκλωμάτων και θα επεξηγήσουμε την επιλογή των συγκεκριμένων υλικών και συνδέσεων.

3.1.1 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης

3.1.2 Τάση Εισόδου Εξόδου

Δεδομένου ότι το κύκλωμά μας χρησιμοποιείται σε μια αλυσίδα συστημάτων ήχου και όχι αυτούσιο πρέπει να λάβουμε υπ' όψη τις τυποποιημένες τιμές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

Line level signals are the highest level signals before amplification. This is the type of signal that typically flows through your recording system after the preamplifier stage and before the amplifier that powers your speakers. The two types of line levels are consumer and professional.

- **Consumer** line level is rated around -10dBV and is what you'll find in products like a CD player.
- **Professional** line level is rated around +4 dBu and can be found in equipment like mixing desks, preamplifiers, and signal processing equipment.

Σχήμα 3.1: Line Level Amplitude

Η περιοχή τάσης VAC η οποία χρησιμοποιείτε τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο αυτών των κυκλωμάτων ονομάζεται **Line Level** και διαφοροποιείται ανάλογα εάν εφαρμόζεται σε οικιακό ή επαγγελματικό επίπεδο[3]. Όπου $-10\text{dBV} = 450\text{mVp}$, $+4\text{dBu} = 1.7\text{Vp}$.

Εδώ λοιπόν θα ήθελα να σημειώσω ότι με βάση τον εξοπλισμό που διαθέτω επέλεξα τα σήματα εισόδου να έχουν περιοχή τιμών από **100mVp AC** έως **1.4Vp AC** (εκτενής αναφορά στο κομμάτι "μελλοντικές επεκτάσεις").

- Σήματα μικρότερα από 100mVp AC μπορούν να συμπιεστούν όμως η απόδοσή του κομπρέσορα μειώνεται σημαντικά, *δεδομένου ότι τα συμπιέζουμε στα 100mVp και δεν χρησιμοποιούμε Input Gain (θα αναφερθούμε παρακάτω στο Input Gain).
- Για σήματα μεγαλύτερα του 1.4Vp ο κομπρέσορας ενημερώνει οπτικά τον χρήστη μέσω ενός led ότι η είσοδος είναι μεγαλύτερη από την επιτρεπτή και πρέπει η ένταση να μειωθεί πριν το σήμα εισέλθει στον κομπρέσορα.

3.1.3 Attack-Release Time

Οι χρόνοι Attack και Release διαφοροποιούνται από κομπρέσορα σε κομπρέσορα και είναι πολύ σημαντικοί ανάλογα με το είδος του σήματος που θέλουμε να συμπίεσουμε.

Για παράδειγμα στον αναλογικό κομπρέσορα **API 2500** έχουμε :

- Attack Time από **0.03ms** έως **30ms**.
- Release Time από **50ms** έως **2000ms**.

Περισσότερα σχετικά με τους χρόνους αυτούς και τον υπολογισμό τους θα δούμε στην συνέχεια.

3.1.4 Input - Output Jacks

Για την σύνδεση του κομπρέσορα με τα υπόλοιπα κυκλώματα ήχου ακολουθήσαμε το πρότυπο ενός μονοφωνικού κυκλώματος ήχου, μελετώντας παράλληλα αρκετούς αναλογικούς κομπρέσορες καταλήξαμε στην χρήση δύο θηλυκών 6.5mm Mono Jack για την είσοδο και την έξοδο.

3.1.5 Υλοποίηση VCA με διόδους

Ένα κύκλωμα VCA μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορες συνδεσμολογίες. Εμείς επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε διόδους σε συνδυασμό με κάποιους τελεστικούς ενισχυτές λόγω απλότητας, απόδοσης και μικρού κόστους.

3.2 Κύκλωμα ελέγχου πλάτους σήματος (VCA)

Στο υποκύκλωμα **VCA** , ελέγχεται το πλάτος του σήματος εισόδου **Vsignal (AC)**. Αναλυτικότερα , ένα σήμα (DC) που το ονομάζουμε **Control Voltage** ή αλλιώς **CV** εφαρμόζεται στα άκρα ενός **Diode String** , στο πάνω άκρο με την θετική (DC) τιμή του και στο κάτω άκρο με την αρνητική (DC) τιμή του . Το σήμα εισόδου **Vsignal** διέρχεται από το **Divider Buffer** και καταλήγει στην μέση του **Diode String** , εκεί εξασθενεί μέσω των διόδων και τέλος διέρχεται από τον **Multiplier Buffer** και συνεχίζει στο επόμενο κύκλωμα του κομπρέσορα .

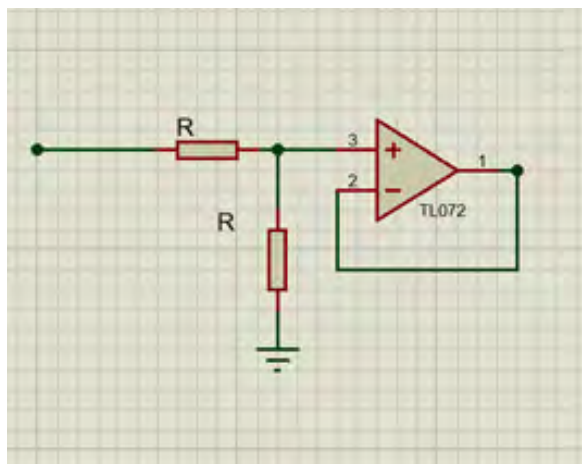
Οπότε το κύκλωμα του VCA απαρτίζεται από τα παρακάτω υποκυκλώματα :

- **Divider - Multiplier Buffers** .
- **Diode String** .
- **CV Buffers** .

Αναλυτικότερα :

- Το κύκλωμα **Divider - Multiplier Buffers** προετοιμάζει (διαιρεί με το δύο) το σήμα για να εισέλθει στο Diode String και έπειτα το επαναφέρει (πολλαπλασιάζει με το δύο) ώστε να συνεχίσει στο επόμενο κύκλωμα . Σκοπός του είναι να διασφαλίσει ότι η τάση **Vsignal** δεν επηρεάζει την λειτουργία του Diode String , η κάθε διόδος 1N4148 έχει Forward Voltage 0.7V (για δύο διόδους 1.4V) , επειδή το σήμα εισόδου **Vsignal** μπορεί να φτάσει την τιμή αυτή και να ανοίξει ανεπιθύμητα τις διόδους το ελλατώνουμε διαιρώντας με το δύο πριν από αυτές σε $V_{s'} = V_{signal} / 2$ και αναιρούμε αυτό πολλαπλασιάζοντας με το δύο μετά από αυτές . Το κύκλωμα αυτό είναι εμπνευσμένο από τον MoritzKlein [4].
- Το κύκλωμα **Diode String** οφείλεται για την μείωση του πλάτους του σήματος εισόδου καθώς όπως θα δούμε το αρχικό σήμα εισόδου εξασθενεί μέσω των διόδων . Το Diode String θέλουμε να ελέγχεται μόνο μέσω του CV γι' αυτό προηγουμένως διαμορφώσαμε το σήμα **Vsignal** σε $V_{s'}$. Το κύκλωμα αυτό είναι βασισμένο στο Diode VCA του Elliott Sound Products[5] .
- Τέλος τα **CV Buffers** παρέχουν την τάση CV και -CV στα άκρα του Diode String . Οι τάσεις CV και -CV θα δούμε ότι παρέχονται από το κύκλωμα του Voltage Comparator (το οποίο θα αναλύσουμε στην συνέχεια) .

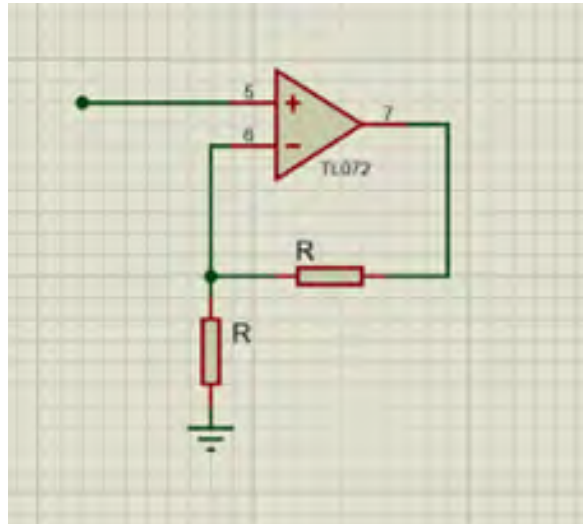
3.2.1 Divider - Multiplier Buffers



Σχήμα 3.2: Voltage Divider Vsignal Buffer

Το παραπάνω κύκλωμα(Σχήμα 3.2) πρόκειται για ένα **διαιρέτη τάσης** του οποίου η έξοδος περνάει από έναν τελεστικό ενισχυτή με πόλωση **Buffer** , η σχέση εισόδου εξόδου του αποδεικνύεται στο **Παράθεμα Α**

- Το πλάτος του σήματος **Vsignal** γίνεται μισό καθώς από το κύκλωμα διαιρέτη γνωρίζουμε ότι για δύο αντιστάσεις ίδιας τιμής ($R_1 = R_2$) το σήμα που λαμβάνουμε στο μέσω των δύο αντιστάσεων έχει τάση ίση με με το $\frac{1}{2}$ της τάσης στα άκρα των δύο αντιστάσεων .
- Ο ενισχυτής με την πόλωση **Buffer** μας διασφαλίζει ότι το παρόν κύκλωμα δεν θα επιδράσει ως φορτίο στο επόμενο , στην ουσία διαχωρίζει το κύκλωμα από το ακόλουθό του .
- Η τάση εξόδου στον ενισχυτή είναι ίδια με την τάση εισόδου καθώς από την θεωρία των τελεστικών ενισχυτών γνωρίζουμε ότι η είσοδος του ενισχυτή (+ -) προσπαθεί να διατηρήσει την ίδια τιμή τάσης μεταξύ του “+” και του “-” , συνεπώς και η τάση εξόδου όπου συνδέεται με το “-” θα έχει την ίδια τιμή με την είσοδο στο “+” .
- Έτσι έχουμε πλέον το σήμα **Vs' = Vsignal / 2**



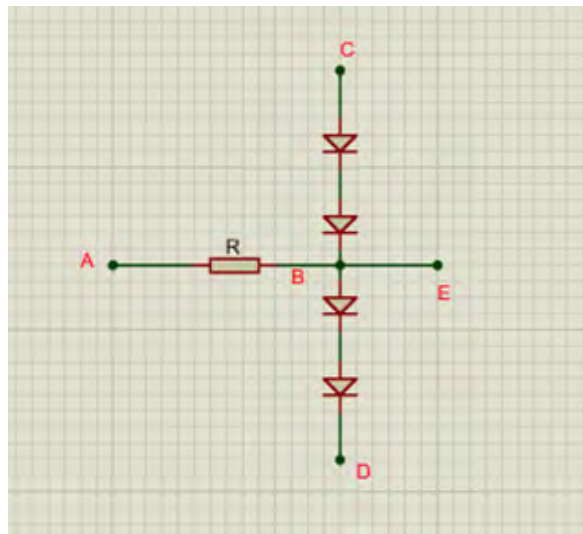
Σχήμα 3.3: Voltage Multiplier Vsignal Buffer

Το παραπάνω κύκλωμα(Σχήμα 3.3) πρόκειται για έναν τελεστικό ενισχυτή με πόλωση ως **μη αναστρέφον**, η σχέση εισόδου εξόδου του αποδεικνύεται στο **Παράθεμα Α**

- Ο ρόλος του είναι να **πολλαπλασιάσει το σήμα επί δύο** (αφού επιλέξαμε αντιστάσεις ίδιας τιμής) , έτσι ώστε να **επαναφέρουμε το πλάτος** που μειώσαμε στον (Σχήμα 3.2).
- Έτσι ουσιαστικά **αναιρούμε την σμίκρυνση του πλάτους που εφαρμόσαμε πριν τις διόδους** και **επαναφέρουμε το σήμα** χωρίς να επηρεάζονται οι δίοδοι και η λειτουργικότητά τους .
- Η εξίσωση η οποία περιγράφει την σχέση εισόδου και εξόδου είναι :

$$\text{Gain} = V_{out}/V_{in} = 1 + R1/R2$$
(όπου R1 η αντίσταση από το “-“ στο Out και R2 η αντίσταση από το “-“ στο GND).
- Συνεπώς για **Gain = 2** πρέπει **R1 = R2** .

3.2.2 Diode String



Σχήμα 3.4: Diode VCA

Το παραπάνω κύκλωμα(Σχήμα 3.4) αποτελεί το Diode String το οποίο οφείλεται για την μείωση του πλάτους του σήματος εισόδου V_{signal} .

- Στο σημείο 'A' είναι η είσοδος αυτού του υποκυκλώματος .
- Στο σημείο 'E' είναι η έξοδος αυτού του υποκυκλώματος .
- Στο 'A' συνδέεται η έξοδος του ενισχυτή Divider Buffer ενώ στο 'E' η είσοδος του ενισχυτή Multiplier Buffer .
- Στα σημεία 'C' και 'D' αντίστοιχα συνδέεται μια τάση $+CV$, $-CV$.
- Η αντίσταση R λειτουργεί ως current limiting resistor , φορτίο για να δημιουργηθεί πτώση τάσης στο σημείο 'E' .

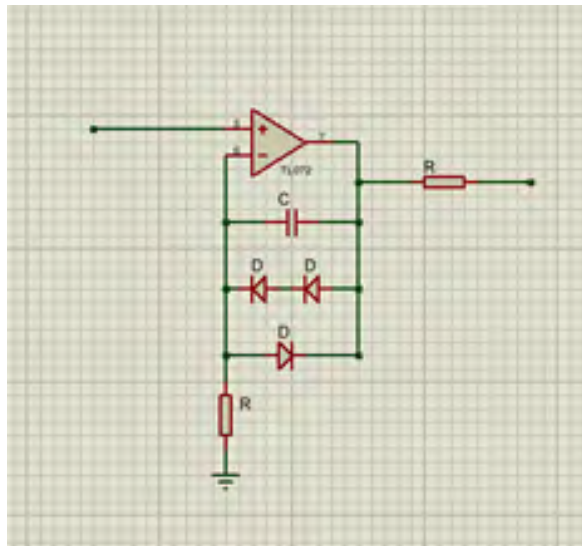
Έστω ότι το $+CV = -CV = 0$

- Επειδή το σήμα στο 'Α' είναι $V_s < 1.4V_p$ δεν μπορεί να ανοίξει τις διόδους και έτσι δεν τις διαρρέει ρεύμα (Forward Voltage of 1N4148 Diode is 0.7V) .
- Ταυτόχρονα επειδή το σημείο 'Ε' συνδέεται στην είσοδο ενός τελεστικού ενισχυτή , ρεύμα δεν μπορεί επίσης να κινηθεί σε αυτό το μονοπάτι ('Α' , 'Β' , 'Ε'). Συνεπώς η τάση που εφαρμόζεται στο σημείο 'Α' είναι ίση με το σημείο 'Β' και με το σημείο 'Ε' .
- Αρα το σήμα εισόδου δεν δέχεται καμία μετατροπή .

Έστω ότι το $+CV = +2$, $-CV = -2$

- Τότε στο σημείο 'Β' έχουμε τάση $0V$ (DC) αφού είναι το μέσο των σημείων 'C' και 'D' με τάσεις (DC) $+2V$, $-2V$.
- Ταυτόχρονα ρεύμα δεν μπορεί να κινηθεί προς το 'Ε' γιατί συνδέεται στην είσοδο ενός τελεστικού ενισχυτή .
- Τώρα όμως έχουμε **ροή ρεύματος στο μονοπάτι των διόδων** και όσο μεγαλύτερη η τιμή του CV τόσο μεγαλύτερη και η ροή ρεύματος καθώς ανοίγουν περισσότεροι οι δίοδοι .
- Με αυτό τον τρόπο **το ρεύμα του αρχικού σήματος εισόδου V_s εξασθενεί** , έτσι αφού η αντίσταση R είναι σταθερής τιμής από τον νόμο του Ohm βλέπουμε ότι **μειώνεται και η τάση** .
- **Συνεπώς το πλάτος του σήματος V_s μειώνεται** και μπορεί να ελεγχθεί μέσω της τάσης στα 'C' και 'D' .

3.2.3 CV Buffers



Σχήμα 3.5: Positive - Control Voltage Buffer

Το παραπάνω κύκλωμα (Σχήμα 3.5) πρόκειται για ένα τελεστικό ενισχυτή με μια **σύνθετη πόλωση** .

- Η είσοδος του ενισχυτή είναι μία τάση **VDC** που προκύπτει από τον Voltage Comparator (θα τον δούμε στην συνέχεια) .
- Ο ρόλος του πυκνωτή είναι να **αφαιρέσει τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις** .
- Η μια διάδος (αντιστροφή των δύο διόδων σε σειρά) διασφαλίζει ότι άμα το CV πάρει τιμή αρνητική η έξοδος του ενισχυτή δεν θα προσπαθήσει να γίνει αρνητική και να τραβήξει ρεύμα από τις δύο διόδους σε σειρά .
- Η αντίσταση στην έξοδο του ενισχυτή κάνει current limit στο ρεύμα το οποίο θα περάσει από τις διόδους του σχήματος (Σχήμα 3.4).
- Οι δύο διόδοι σε σειρά με την αντίσταση προς το GND **εξαναγκάζουν τον τελεστικό ενισχυτή να ανοίξει απευθείας τις διόδους του** (Σχήμα 3.4) .

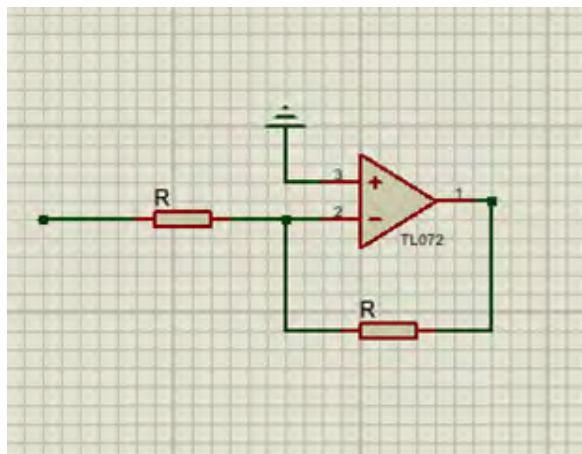
Ο λόγος που θέλουμε να γίνει το τελευταίο είναι διότι άμα **Threshold = Detected Peak** τότε ο **Voltage Comparator** (που θα δούμε στην συνέχεια) μας δίνει αποτέλεσμα μη-δέν .

Αυτό όμως **δεν συνάδει με το αποτέλεσμα που περιμένουμε** διότι στην ουσία αφήνει το σήμα να περάσει δίχως μεταβολή ενώ στην πραγματικότητα πρέπει να υπάρχει συμπίεση . Αυτό συμβαίνει καθώς όταν έχουμε Peak και Threshold ίδια τιμές (ή πολύ κοντινής) ο **Voltage Comparator** βγάζει μια τάση που δεν μπορεί ως CV να ανοίξει τις διόδους του (Σχήμα 3.4) .

Έτσι για να διορθώσουμε αυτό το πρόβλημα πρέπει να δημιουργήσουμε ένα κύκλωμα μέσω του οποίου **για μικρές τιμές του CV** θα έχουμε **άμεση ανταπόκριση των διόδων του** (Σχήμα 3.4).

Συμπεριλαμβάνοντας λοιπόν δύο διόδους στο feedback loop του τελεστικού ενισχυτή και συνδεοντάς τες με το GND , διασφαλίζουμε ότι **με μια μικρή τάση στο “+”** επειδή ο ενισχυτής θα προσπαθήσει να έχει ίδια τάση στα “+” , “-“ **θα υπάρξει αναγκαστικά στην έξοδο του ενισχυτή μια τάση ικανή να ανοίξει τις δύο αυτές διόδους** και συνεπώς τις διόδους του **Diode String** άρα θα πραγματοποιηθεί συμπίεση [6] .

(Χρησιμοποιούμε δύο διόδους καθώς έχοντας τον ενισχυτή +CV , και τον ενισχυτή -CV στην ουσία έχουμε διπλάσια τάση ικανή να διαχειριστεί τις τέσσερις διόδους στο (Σχήμα 3.4).)

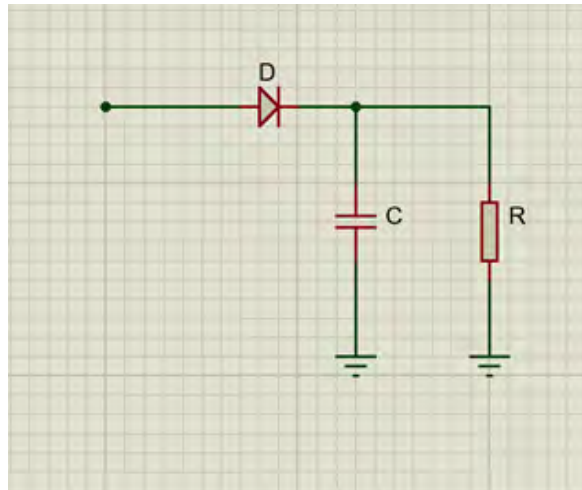


Σχήμα 3.6: Negative - Control Voltage Buffer

Το παραπάνω κύκλωμα(Σχήμα 3.6) πρόκειται για ένα **αναστρέφον** τελεστικό ενισχυτή (που έχει ως έξοδο το -CV) και ο ρόλος του οποίου είναι να αναστρέψει μια DC τιμή π.χ από +5V σε -5V , η σχέση εισόδου εξόδου του αποδεικνύεται στο **Παράθεμα Α**

3.3 Κύκλωμα ανίχνευσης κορυφών (Peak Detector)

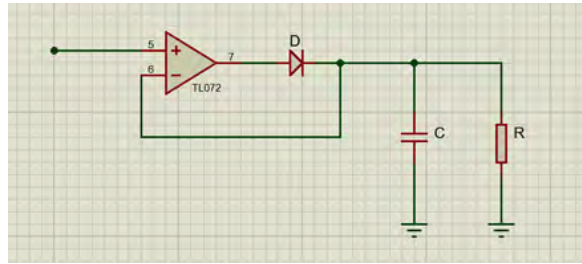
Η βασική ιδέα είναι ότι **δεχόμαστε μια είσοδο AC** και θέλουμε να μετρήσουμε το πλάτος των κορυφών της (και έπειτα δεδομένου ενός **Threshold** , τις κορυφές **που το υπερβαίνουν**). Για να υλοποιηθεί αυτό πρέπει με κάποιο τρόπο να μπορούμε να συγκρατήσουμε κάθε τιμή που ανιχνεύουμε. Το κύκλωμα του **Peak Detector** [7] ξεκινάει από το παρακάτω Σχήμα 3.7):



Σχήμα 3.7: Basic Peak Detector

- Το σήμα AC εισέρχεται **στην διόδο** και **φορτίζει τον πυκνωτή** , μόλις **ολοκληρωθεί η φόρτιση** του πυκνωτή **η ροή ρεύματος σταματά** (ρεύμα δεν μπορεί να επιστρέψει λόγω διόδου) , έτσι έχουμε την **τιμή της κορυφής στα άκρα του πυκνωτή** .
- Ο σκοπός της αντίστασης είναι **να αποφορτίζει τον πυκνωτή** έτσι ώστε να είναι έτοιμος να **ξαναφορτίσει** από την επόμενη κορυφή που θα έρθει ως είσοδος .
- **Η σχέση η οποία εκφράζει τον χρόνο αποφόρτισης του πυκνωτή είναι $t = 5 \cdot R \cdot C$.**

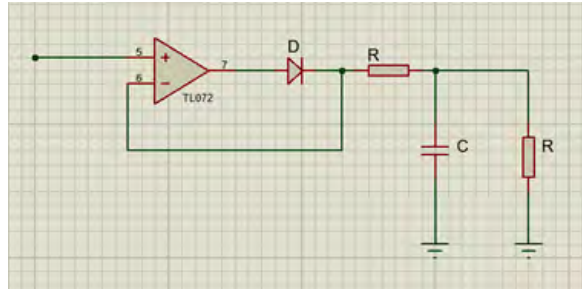
Αν όμως η κορυφή έχει μικρή τιμή τάσης V_p η διόδος δεν ανοίγει και έτσι δεν μπορούμε να την ανιχνεύσουμε. Για να επιλύσουμε το πρόβλημα πάλι θα κάνουμε χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή και θα έχουμε το **ανανεωμένο κύκλωμα του Peak Detector**(Σχήμα 3.8) .



Σχήμα 3.8: Updated Peak Detector

- Σε αυτό το κύκλωμα με μια είσοδο μικρής τιμής στο “+” ο τελεστικός ενισχυτής θα προσπαθήσει να επιτύχει ίδια τιμή στο “-“ και κατ’ επέκταση στην έξοδο όπου συνδέεται το “-“, άρα θα εξαναγκαστεί να ανοίξει την δίοδο [6] .

Αυτό το οποίο μένει για να ολοκληρωθεί το κύκλωμα του Peak Detector είναι το **ελεγχόμενο Attack Time** και το **ελεγχόμενο Release Time** . Για να ελέγξουμε το **Attack Time** , πρέπει ουσιαστικά να ελέγξουμε το **πόσο γρήγορα ξεκινά να φορτίζει ο πυκνωτής** , αυτό είναι εφικτό με την προσθήκη μιας αντίστασης , και έτσι έχουμε το παρακάτω κύκλωμα(Σχήμα 3.9) :



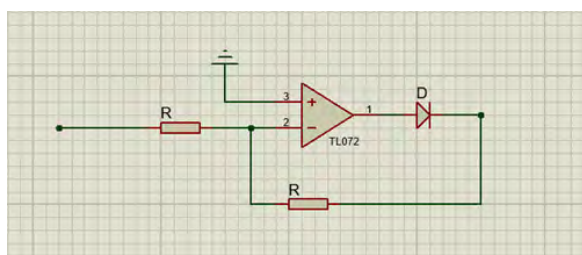
Σχήμα 3.9: Pre Final Peak Detector

- Η σχέση που εκφράζει τον χρόνο φόρτισης είναι ίδια με την σχέση του χρόνου αποφόρτισης $t = 5 \cdot R \cdot C$.
- Αντικαθιστώντας τις αντιστάσεις με ποτενσιόμετρα μπορούμε να αυξομειώνουμε τους χρόνους Attack , Release (σημαντικό για το Release να έχουμε ένα ποτενσιόμετρο αλλά και μια σταθερή αντίσταση σε σειρά ώστε να μην υπάρχει βραχυκύκλωμα προς το GND όταν το ποτενσιόμετρο είναι στα 0 Ω) .

Αυτό που παρατηρήσαμε όμως στο εργαστήριο ήταν πώς το σύντομο Attack δεν επιδρούσε άμεσα στην κυματομορφή μας, αυτό διότι ο χρόνος φόρτισης μας ακολουθεί μια λογαριθμική καμπύλη και είναι πιο αργός όταν σχεδόν γεμίζει ο πυκνωτής.

- Για να βελτιστοποιήσουμε αυτή τη κατάσταση συμπεριλάβαμε τελικά και το ποτενσιόμετρο του Attack Time μέσα στο feedback loop και έτσι επιτύχαμε μια σχετικά γραμμική απόκριση στην φόρτιση. (Το ολοκληρωμένο κύκλωμα του Peak Detector με τα ποτενσιόμετρα και τις τιμές των R και C υπάρχει στο schematic Κεφάλαιο 5 και Κεφάλαιο 6).

Στη συνέχεια αφού έχουμε ολοκληρώσει το Peak Detector πρέπει να κατασκευάσουμε ένα ακόμη **συμπληρωματικό του κύκλωμα** το οποίο **αποτελεί την είσοδο του Peak Detector**. Όπως γνωρίζουμε μια κυματομορφή ήχου εφόσον πρόκειται για σήμα AC έχει ένα θετικό και ένα αρνητικό τμήμα, το κύκλωμα του Peak Detector όμως λειτουργεί μόνο για θετικές κορυφές. Κατασκευάσαμε λοιπόν το κύκλωμα του (Σχήμα 3.10) το οποίο μετατοπίζει το αρνητικό μέρος του σήματος στον θετικό άξονα.

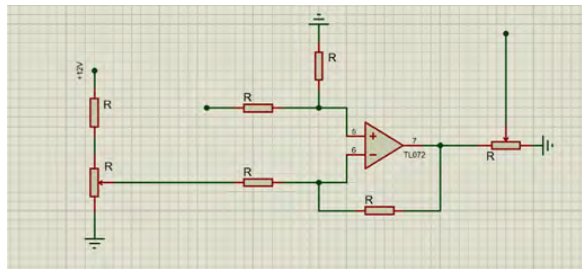


Σχήμα 3.10: Negative Waveform Inverter

Ο παραπάνω ενισχυτής επιτρέπει στο θετικό μέρος του σήματος να περάσει ως έχειν ενώ το αρνητικό του μέρος περνάει με ανεστραμμένο πρόσημο π.χ οι τιμές τάσης -1,5,-2 γίνονται 1,5,2.

3.4 Κύκλωμα σύγκρισης κορυφής με το κατώφλι (Voltage Comparator)

Στόχος αυτού του κυκλώματος είναι να συγκρίνει το **Threshold** με το εκάστοτε **Peak** και να παράξει μια τιμή την οποία έπειτα χρησιμοποιούμε ως **CV** στο κύκλωμα του **VCA**. Η πόλωση του τελεστικού ενισχυτή είναι η παρακάτω (Σχήμα 3.11), η σχέση εισόδου εξόδου του αποδεικνύεται στο **Παράθεμα Α**:



Σχήμα 3.11: Voltage Comparator

Ο συγκεκριμένος τελεστικός ενισχυτής βλέπουμε πως **αφαιρεί** από την είσοδο του στο “+” την είσοδο του στο “-” (δηλαδή **από το Peak το Threshold**) και στην έξοδο του μας δίνει το αποτέλεσμα την αφαίρεσης.

Οπότε στην έξοδο του ενισχυτή έχουμε το $CV' = Peak - Threshold$.

- Άμα το αποτέλεσμα είναι θετικό σημαίνει ότι **ο κομπρέσορας θέτετε σε λειτουργία** καθώς το Threshold είναι μικρότερο από το Peak (δηλαδή **εάν έχουμε θετικό CV**)
- Άμα το αποτέλεσμα είναι αρνητικό σημαίνει ότι **ο κομπρέσορας δεν λειτουργεί** καθώς το Threshold είναι μεγαλύτερο του Peak (δηλαδή **εάν έχουμε αρνητικό CV**)
- Άμα το αποτέλεσμα είναι μηδέν **ο κομπρέσορας τίθεται σε λειτουργία** καθώς το Threshold είναι ίσο με το Peak (δηλαδή **εάν έχουμε $CV = 0$**)

Threshold

- Το κύκλωμα ποτενσιόμετρου αντίστασης στην είσοδο “-“ πρόκειται για ένα μεταβλητό , ελεγχόμενο διαιρέτη τάσης που μας δίνει σαν έξοδο το Threshold . Η είσοδος του είναι **12VDC** και στην έξοδο έχουμε μια DC τάση **0VDC** έως **1.5VDC** . Ο λόγος που επιλέξαμε αυτό τον συνδυασμό είναι διότι με πειραματικές δοκιμές στο εργαστήριο καταλήξαμε ότι με αυτό το εύρος τιμών στο **Threshold** το ποτενσιόμετρο έχει ομοιόμορφη κατανομή και **μπορεί να επιδράσει αποδοτικά στα πλάτη κυματομορφών εισόδου** $100\text{mVp} < V_{\text{signal}} < 1.4\text{Vp}$.

Ratio

- Το ποτενσιόμετρο στην έξοδο του ενισχυτή ελέγχει το **Ratio** . Πρόκειται για ένα **μεταβλητό διαιρέτη τάσης** που έχει ως είσοδο την τιμή **$CV' = \text{Peak} - \text{Threshold}$** και ως έξοδο παράγει το τελικό **CV** . Έτσι μπορούμε να κάνουμε **πιο ομαλή την συμπίεση** , αν π.χ έχουμε Ratio 50% τότε η διαφορά μεταξύ Peak και Threshold πρέπει να είναι διπλάσια ώστε να έχουμε την πλήρη συμπίεση του κομπρέσορα. Ουσιαστικά δεδομένου ότι εντοπίσαμε μια κορυφή και έχουμε ορίσει ένα Threshold , **ανάλογα με το Ratio** έχουμε **πιο έντονη ή πιο ομαλή συμπίεση** .

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ο ρόλος των **Threshold** και **Ratio** **δεν είναι ίδιος** .

- Το **Threshold** ορίζει την τιμή όπου αρχίζει η συμπίεση ενώ το **Ratio** το πόσο απότομη ή ομαλή είναι η συμπίεση .
- Εάν θέσουμε το **Ratio** στο **100%** τότε ο κομπρέσορας θα προσπαθήσει να συμπίεσει **ο,τι βρίσκεται πάνω από το Threshold** αυτή η τεχνική χρήσης του κομπρέσορα τον καθιστά να πάρει μορφή **Limiter** ορίζοντας δηλαδή ένα ”ταβάνι” για την κυματομορφή όπου ποτέ δεν θα ξεπεράσει το Threshold .

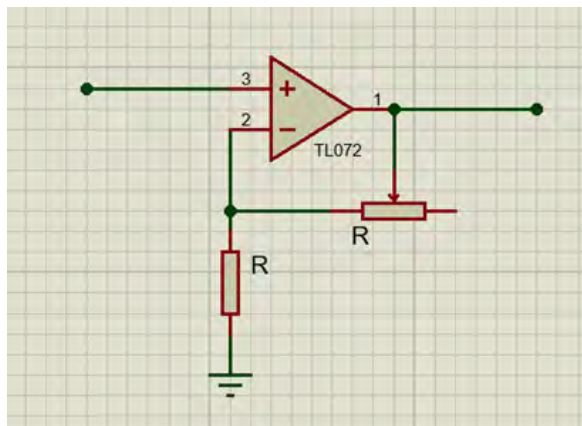
3.5 Κύκλωμα εισόδου εξόδου (Input Output Gain)

Στους περισσότερους κομπρέσορες δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να μπορεί να αυξάνει την ένταση του ήχου τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο. Όπως θα δούμε στην συνέχεια αυτή η λειτουργία είναι πολύ σημαντική για έναν κομπρέσορα.

3.5.1 Input Gain

Η ένταση εισόδου βοηθάει τον χρήστη να φέρει σε μια κλίμακα τιμών db τον ήχο εισόδου πριν κάνει compression. Συγκεκριμένα αν το αρχικό κανάλι ήχου είναι αρκετά χαμηλό τότε πριν το επεξεργαστεί ο κομπρέσορας πρέπει να αυξηθεί η έντασή του. Η τιμή V_{signal} της εισόδου όπως προαναφέραμε είναι πολύ σημαντική τόσο για τον ορθό εντοπισμό των Peak όσο και για την σωστή λειτουργία του Threshold καθώς το κύκλωμά μας έχει μοντελοποιηθεί για εισόδους με $V_p > 100mV_p$.

Συνεπώς για να έχουμε σωστό έλεγχο του σήματος εισόδου προσθέτουμε ένα **μεταβλητό Input Gain** (Σχήμα 3.12)



Σχήμα 3.12: Input Gain

Πρόκειται για ένα **μη αναστρέφον** τελεστικό ενισχυτή ο οποίος έχει GAIN από 0-3.

- Η εξίσωση η οποία περιγράφει την σχέση εισόδου και εξόδου είναι :

$$\text{Gain} = V_{out}/V_{in} = 1 + R_1/R_2$$

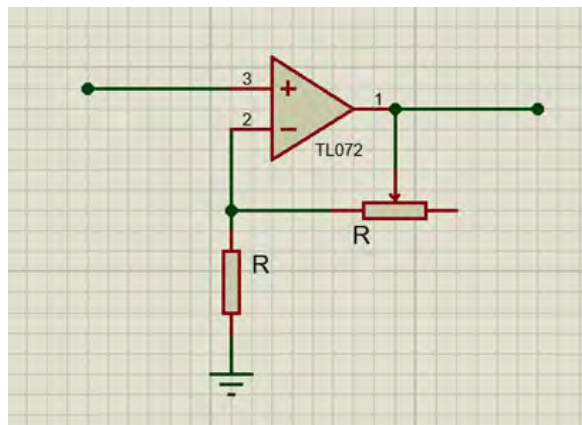
(R_1 το ποτενσιόμετρο, R_2 η αντίσταση στο GND)

(Η σχέση εισόδου εξόδου του αποδεικνύεται στο **Παράθεμα Α**).

3.5.2 Output Gain

Η ένταση εξόδου επιτελεί έναν εξίσου σημαντικό ρόλο. Όταν συμπιέσουμε ένα σήμα του οποίου οι κορυφές είναι αρκετά κοντά με το υπόλοιπο σήμα τότε η συνολική ένταση του σήματος **μειώνεται** . Σκοπός όμως του κομπρέσορα είναι να **μειώσει σε ένταση τα Peak** αλλά το υπόλοιπο σήμα να **μην ελλατωθεί** . Προσθέτοντας **Gain μετά την συμπίεση** θα μπορούσαμε να φέρουμε πάλι αυτά τα σημεία κοντά στην αρχική τους τιμή και ταυτόχρονα τα Peak θα έχουν μικρότερο πλάτος . Σημαντικό να τονίσουμε ότι **το τελικό σήμα μετά το Output Gain** μπορεί να έχει **μεγαλύτερη** ένταση από το αρχικό σήμα εισόδου η διαφορά είναι ότι στην έξοδο υπάρχει **μικρότερη δυναμική** δηλαδή τα Peak και το υπόλοιπο σήμα ήχου θα είναι πιο κοντά σε ένταση .

Το κύκλωμα Output Gain είναι ίδιο με το κύκλωμα Input Gain (Σχήμα 3.13) :



Σχήμα 3.13: Output Gain

Πρόκειται για έναν **μη αναστρέφον** τελεστικό ενισχυτή ο οποίος έχει GAIN από 0-3 .

- Η εξίσωση η οποία περιγράφει την σχέση εισόδου και εξόδου είναι :

$$\text{Gain} = V_{\text{out}}/V_{\text{in}} = 1 + R_1/R_2$$

(R1 το ποτενσιόμετρο , R2 η αντίσταση στο GND)

(Η σχέση εισόδου εξόδου του αποδεικνύεται στο **Παράθεμα Α**) .

3.6 Κύκλωμα Optical Feedback μέσω Arduino

Είναι πολύ βασικό για τον χρήστη μέσω του κομπρέσορα να του παρέχονται οπτικά δύο πληροφορίες .

- Η 1^η αφορά το **πόσο επιδρά ο κομπρέσορας στο σήμα** .
- Η 2^η αφορά το εάν **η είσοδος ή η έξοδος** του κομπρέσορα ξεπερνά τις τιμές **ορθής λειτουργίας του κυκλώματος** .

Για να υλοποιήσουμε αυτά τα δύο συστήματα επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα μικροελεκτή το **Arduino** . Πρόκειται για μια πλακέτα με μικρή τάση τροφοδοσίας , μικρό footprint , αναλογικές εισόδους καθώς και ψηφιακές εξόδους . Για τις μετρήσεις μας θα χρησιμοποιήσουμε τον Analog to Digital converter του Arduino καθώς και την συνάρτηση `analogRead()` [8] .

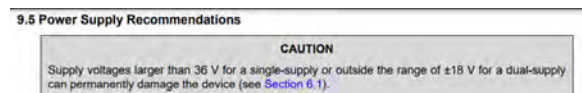
- Για να ελέγξουμε το **πόσο συμπιέζεται το σήμα μας** θα χρησιμοποιήσουμε την θήρα **Analog A0** του Arduino και θα μετρήσουμε το CV (αφού το περάσουμε από ένα κύκλωμα εντοπισμού κορυφών το οποίο μετράει μόνο τις θετικές κορυφές , καθώς για $CV < 0$ δεν έχουμε συμπίεση) , στο Κεφάλαιο 4 με τις εργαστηριακές μετρήσεις θα δούμε ότι **για τιμές CV έως 800mV επιτυγχάνουμε από την ελάχιστη έως και την μέγιστη συμπίεση** . Για την ένδειξη της συμπίεσης θα χρησιμοποιήσουμε 10 led (5 κόκκινα και 5 πράσινα) .
- Για να μετρήσουμε **την είσοδο ή την έξοδο** του κομπρέσορα θα χρησιμοποιήσουμε την **Analog A1** θήρα του Arduino , μέσω ενός διακόπτη ο χρήστης επιλέγει εάν θέλει να επιβλέπει την είσοδο ή την έξοδο και το σήμα εισόδου ή εξόδου διαβάζεται από το Arduino (αφού το περάσουμε από ένα κύκλωμα εντοπισμού κορυφών). Για την ένδειξη αυτή θα χρησιμοποιήσουμε 1 led (κόκκινο) .

Το Arduino διαβάζει μέσω των **Analog Pins** μια τιμή τάσης την οποία μετατρέπει σε ψηφιακό σήμα και μας παρέχει μια τιμή από 0 έως 1023 . Γνωρίζοντας το παραπάνω καθώς και ότι τα Analog Pins μπορούν να διαβάσουν από 0V έως 5V , μέσω του κώδικα μπορούμε να μετατρέψουμε την τιμή που διαβάσαμε σε Volt , $V = 5 * \text{analogRead(A)} / 1024$.

3.7 Κύκλωμα τροφοδοσίας (Power Supply)

Τόσο το Arduino όσο και οι ενισχυτές χρειάζονται μια **DC τάση τροφοδοσίας** .

- Το Arduino λειτουργεί με **5VDC**
- Ο τελεστικός ενισχυτής TL072 δέχεται **τάσεις διαφόρων τιμών** με μέγιστη πόλωση dual supply (δηλαδή θετική και αρνητική πόλωση) **+18VDC** , **-18VDC** όπως αναγράφεται στο data sheet του TL072 (Σχήμα 3.14):



Σχήμα 3.14: TL072 Supply Caution

Εμείς επιλέξαμε την χρήση **+12VDC** , **-12VDC** ως την τάση τροφοδοσίας (για το Arduino χρησιμοποιούμε ένα σταθεροποιητή τάσης 5V) , η τιμή αυτή επαρκεί τόσο για **το παρόν κύκλωμα** και τα στοιχεία του αλλά επιτρέπει και περιθώριο **μελλοντικής αναβάθμισης και αλλαγών** .

- Αρχικά επιλέξαμε έναν **μετασχηματιστή** με **είσοδο 220-230VAC** και **έξοδο δύο κανάλια AC** με τιμές περίπου **26VAC το καθένα** , ο τρόπος που επιτυγχάνει ο μετασχηματιστής την διπλή έξοδο είναι διότι **τα coils είναι center tapped στην πλευρά της εξόδου** .
- Στην συνέχεια οι εξόδοι του μετασχηματιστή συνδέονται στις διόδους που έχουν τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελέσουν ένα **Full Wave Bridge Rectifier** [9] μετατρέποντας αποδοτικά την **AC κυματομορφή** σε **DC κυματομορφή** .Έτσι τα αρχικά σήματα AC μετατρέπονται σε DC , ένα θετικού και ένα αρνητικού πρόσημου.
- Έπειτα κάνουμε χρήση των **LM7812** και **LM7912** που είναι **σταθεροποιητές τάσης** στα **12VDC** και στα **-12VDC** αντίστοιχα (τα LM7812 , LM7912 έχουν μέγιστο Input Voltage τα 27V και -27V αντίστοιχα) .
- Τέλος τοποθετούμε **παράλληλα στις εξόδους δύο πυκνωτές μεγάλης τιμής** που θα μας προσφέρουν μια **ομαλή και σταθερή τάση τροφοδοσίας** για τα κυλώματα του κομπρέσορα.

Κεφάλαιο 4

Μετρήσεις εργαστηρίου

4.1 Εισαγωγή

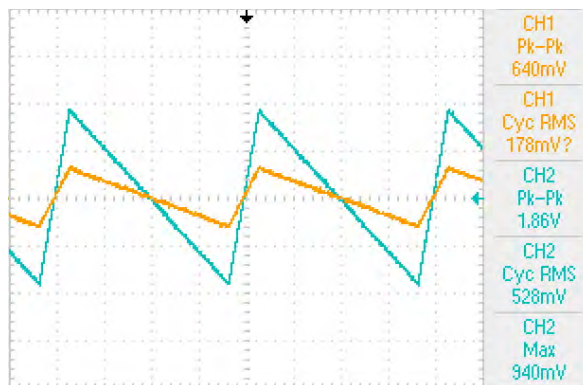
Στο εργαστήριο του τμήματος ΗΜΜΥ Βόλου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σχετικές με την απόδοση του κομπρέσορα και των επιμέρους κυκλωμάτων του . Οι μετρήσεις έγιναν με τον παλμογράφο Tektronix TDS2012C και μέσω της λειτουργίας του (print) συμπεριλήφθηκαν ως γραφήματα στην διπλωματική . Κατα την διάρκεια του πειραματισμού κατάφεραν να επιλυθούν διάφορα προβλήματα τα οποία οφείλονταν είτε στις τιμές των υλικών ενός υποκυκλώματος είτε στην δομή του αυτό καθ'αυτό .

Τα κύρια σημεία ενδιαφέροντός μας ήταν :

- **Πιθανός θόρυβος** που εντάσσεται στον αρχικό ήχο .
- **Παραμορφώσεις του Vsignal.**
- **Αστοχίες σε υπολογισμούς** (π.χ Attack - Release Time) .
- Εύρεση του **CV** που προσφέρει την μέγιστη συμπίεση .
- Μελέτη του **Threshold** και της απόδοσής του .
- Εφαρμογή της συμπίεσης σε ένα **σύνθετο κανάλι ήχου** .

4.2 Μετρήσεις με παλμογράφο

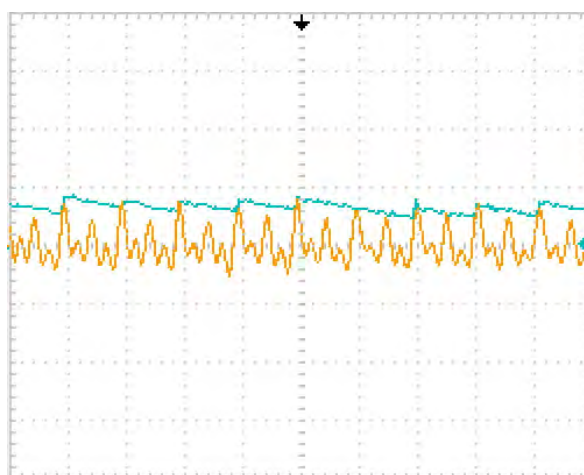
4.2.1 Input-Output Gain multipliers



Σχήμα 4.1: Input-Output Gain Oscilloscope

Στο (Σχήμα 4.1) η **κίτρινη γραμμή** συμβολίζει το **σήμα εισόδου Vsignal** και η **μπλε γραμμή** συμβολίζει την **έξοδο του κυκλώματος Input Gain ή Output Gain** (είναι όμοιο και για τα δύο). Παρατηρούμε ότι η ενίσχυσή μας (έως επί τρία) γίνεται **χωρίς παραμορφώσεις** και το σήμα μας διατηρεί την αρχική του ποιότητα ακόμη και μετά την ενίσχυσή.

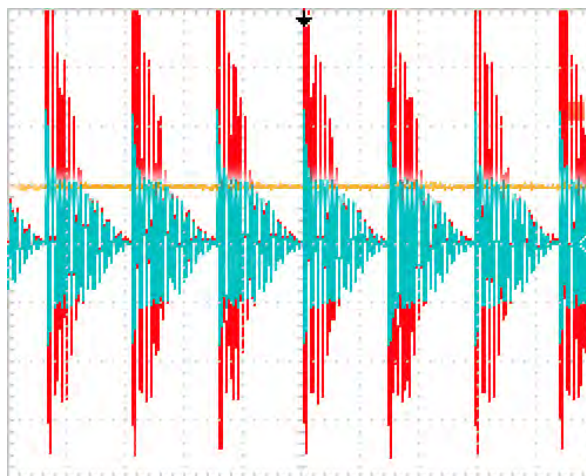
4.2.2 Peak detector



Σχήμα 4.2: Peak Detector Oscilloscope

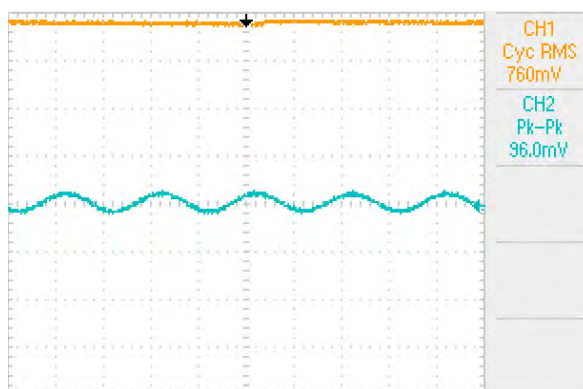
Στο (Σχήμα 4.2) η **κίτρινη γραμμή** συμβολίζει το **σήμα εισόδου Vsignal** και η **μπλε γραμμή** συμβολίζει την **έξοδο του Peak Detector**. Παρατηρούμε ότι οι κορυφές ανιχνεύονται με καλή ακρίβεια τόσο στο ύψος όσο και χρονικά.

4.2.3 Compressor Input-Output-Threshold



Σχήμα 4.3: Input-Output-Threshold Oscilloscope

Στο (Σχήμα 4.3) η **κίτρινη γραμμή** συμβολίζει το **Threshold** η **μπλε γραμμή** συμβολίζει την **έξοδο του κομπρέσορα** και η **κόκκινη γραμμή** την **είσοδο του κομπρέσορα**. Εδώ συμπιέζουμε έναν ήχο που προέρχεται από ένα drum machine. Η παραπάνω κυματομορφή αντιστοιχεί σε ένα kick drum. **Σκοπός της συμπίεσής μας ήταν να μειώσουμε την αρχή του ήχου όπου το kick ήταν έντονο και επικάλυπτε άλλα όργανα, ταυτόχρονα όμως να διατηρήσουμε την "ουρά" του kick που περιεχει χρήσιμη πληροφορία χωρίς συμπίεση.**

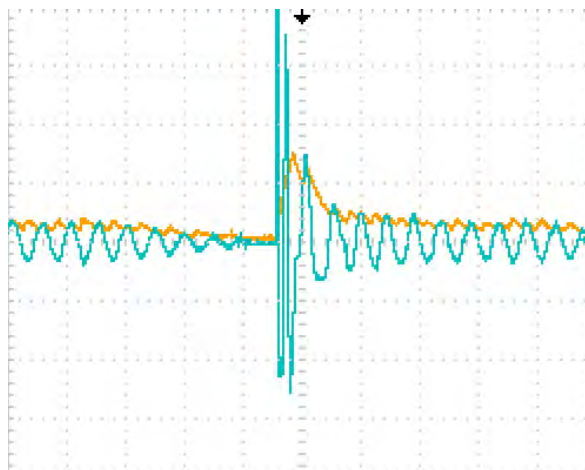


Σχήμα 4.4: CV Limits Oscilloscope

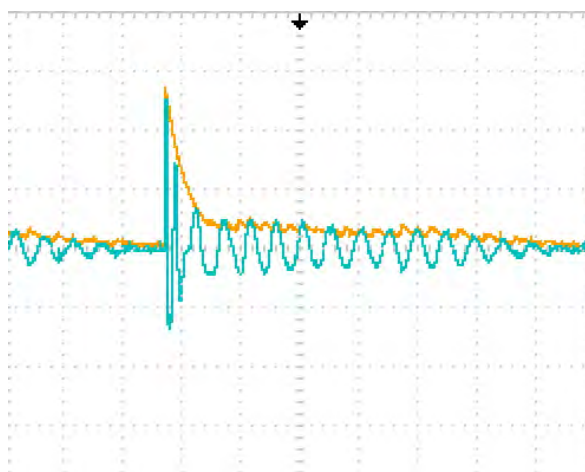
Στο (Σχήμα 4.4) η **κίτρινη γραμμή** συμβολίζει το **CV** η **μπλε γραμμή** συμβολίζει την **έξοδο του κομπρέσορα**. Παρατηρούμε ότι στη μέγιστη συμπίεση (εκεί που το μπλέ κανάλι δεν μπορούσε να συμπιεστεί περισσότερο) η τιμή του CV είναι περίπου 800mV.

4.2.4 Attack-Release

4.2.5 Attack



Σχήμα 4.5: Medium Attack-Slow Release Oscilloscope



Σχήμα 4.6: Fast Attack-Slow Release Oscilloscope

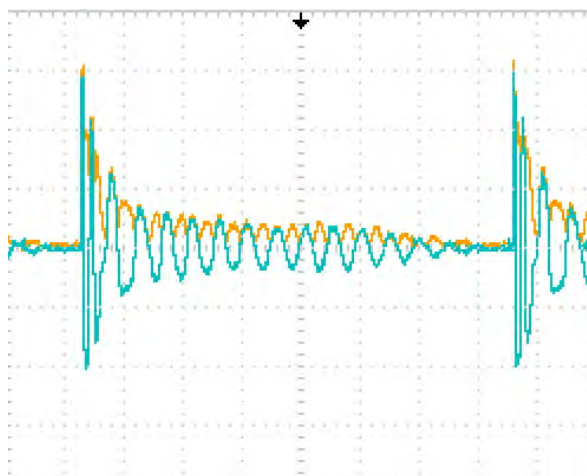
Στα (Σχήμα 4.5) , (Σχήμα 4.6) η **κίτρινη γραμμή** συμβολίζει το **Output του Peak Detector** η **μπλε γραμμή** συμβολίζει την **έξοδο του κομπρέσορα**.

Στο (Σχήμα 4.5) έχουμε εφαρμόσει **medium attack** και **slow release** .

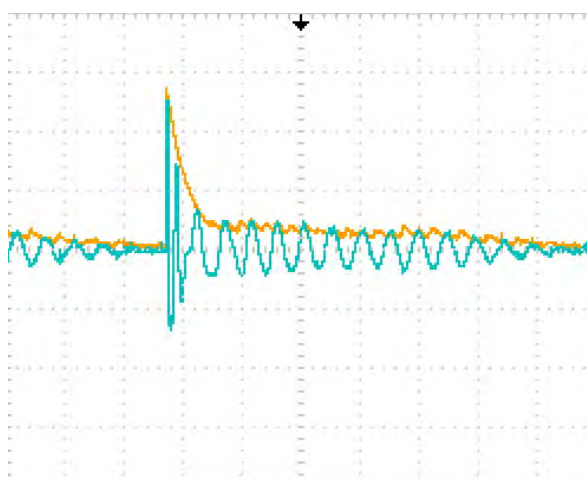
Στο (Σχήμα 4.6) έχουμε εφαρμόσει **fast attack** και **slow release** .

Αναφορικά με το **Attack Time** βλέπουμε ότι στην **medium** θέση η **συμπίεση** ξεκινάει **πιο αργά και ομαλά** ενώ στην **fast** θέση η **συμπίεση** είναι **άμεση** .

4.2.6 Release



Σχήμα 4.7: Medium Release-Fast Attack Oscilloscope



Σχήμα 4.8: Slow Release-Fast Attack Oscilloscope

Στα (Σχήμα 4.7) , (Σχήμα 4.8) η **κίτρινη γραμμή** συμβολίζει το **Output του Peak Detector** η **μπλε γραμμή** συμβολίζει την **έξοδο του κομπρέσορα**.

Στο (Σχήμα 4.7) έχουμε εφαρμόσει **medium release** και fast attack .

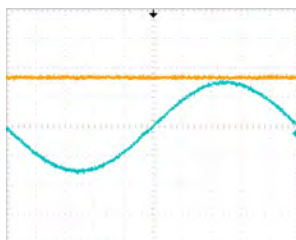
Στο (Σχήμα 4.8) έχουμε εφαρμόσει **slow release** και fast attack .

Αναφορικά με το **Release Time** βλέπουμε ότι στην **medium θέση** η **συμπίεση τελειώνει γρήγορα** και πάμε στην επόμενη κορυφή ενώ για **slow release time** η 1η **κορυφή κάνει release πολύ πιο αργά** .

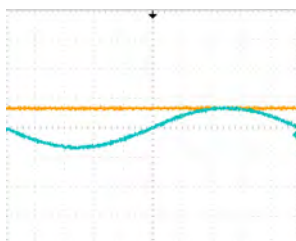
4.2.7 Compression Limits

4.2.8 For Small Value Signal

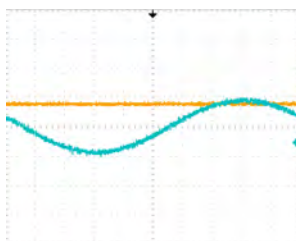
Για είσοδο 300mVp , SINE , 1kHz



Σχήμα 4.9: No Compression Oscilloscope (Threshold > 300mV)



Σχήμα 4.10: Some Compression Oscilloscope (Threshold = 140mV)



Σχήμα 4.11: Losing Compression Oscilloscope (Threshold = 100mV)

Στα (Σχήμα 4.9),(Σχήμα 4.10),(Σχήμα 4.11) η **κίτρινη γραμμή** συμβολίζει το **Threshold** η **μπλε γραμμή** συμβολίζει την **έξοδο του κομπρέσορα**.

Στο (Σχήμα 4.9) με **Threshold** εκτός της κυματομορφής δεν έχουμε συμπίεση .

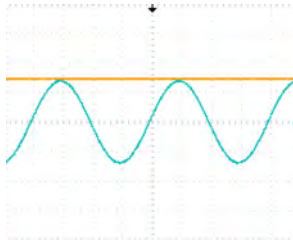
Στο (Σχήμα 4.10) με **Threshold** εντός της κυματομορφής έχουμε συμπίεση .

Στο (Σχήμα 4.11) σημείο όπου το **Threshold** σταματά να ακολουθά την συμπίεση .

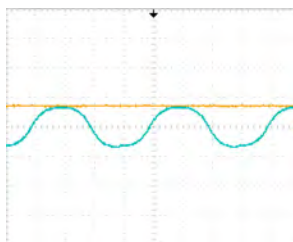
Το σήμα εισόδου είναι 300mVp η συμπίεση αρχίζει να χάνεται περίπου στα 100mVp .

4.2.9 For Large Value Signal

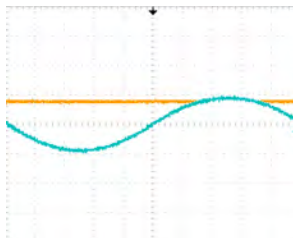
Για είσοδο 1.4Vp , SINE , 1kHz



Σχήμα 4.12: No Compression Oscilloscope (Threshold > 1.4V)



Σχήμα 4.13: Some Compression Oscilloscope (Threshold = 700mV)



Σχήμα 4.14: Losing Compression Oscilloscope (Threshold = 100mV)

Στα (Σχήμα 4.12),(Σχήμα 4.13),(Σχήμα 4.14) η **κίτρινη γραμμή** συμβολίζει το **Threshold** η **μπλε γραμμή** συμβολίζει την **έξοδο του κομπρέσορα**.

Στο (Σχήμα 4.12) με **Threshold** εκτός της κυματομορφής δεν έχουμε συμπίεση .

Στο (Σχήμα 4.13) με **Threshold** εντός της κυματομορφής έχουμε συμπίεση .

Στο (Σχήμα 4.14) σημείο όπου το **Threshold** σταματά να ακολουθά την συμπίεση .

Το σήμα εισόδου είναι 1400mVp η συμπίεση αρχίζει να χάνεται περίπου στα 100mVp .

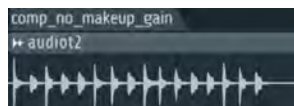
4.3 Μετρήσεις με λογισμικό ήχου

Χρησιμοποιώντας σαν είσοδο του κομπρέσορα κανάλια ήχου από ένα drum machine και συνδέοντας την έξοδο του μέσω ενός μίκτη στον υπολογιστή πραγματοποιήσαμε κάποιες οπτικές και ακουστικές μετρήσεις σε ένα πρόγραμμα DAW .

- Αρχικά το ανεπεξέργαστο κανάλι ήχου (ένα σετ κρουστών)



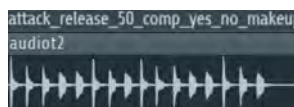
- Στη συνέχεια το συμπιεσμένο κανάλι ήχου χωρίς Output Gain



- Έπειτα το συμπιεσμένο κανάλι ήχου με Output Gain



- Τέλος το συμπιεσμένο κανάλι ήχου με Attack-Release 50% , χωρίς Output Gain



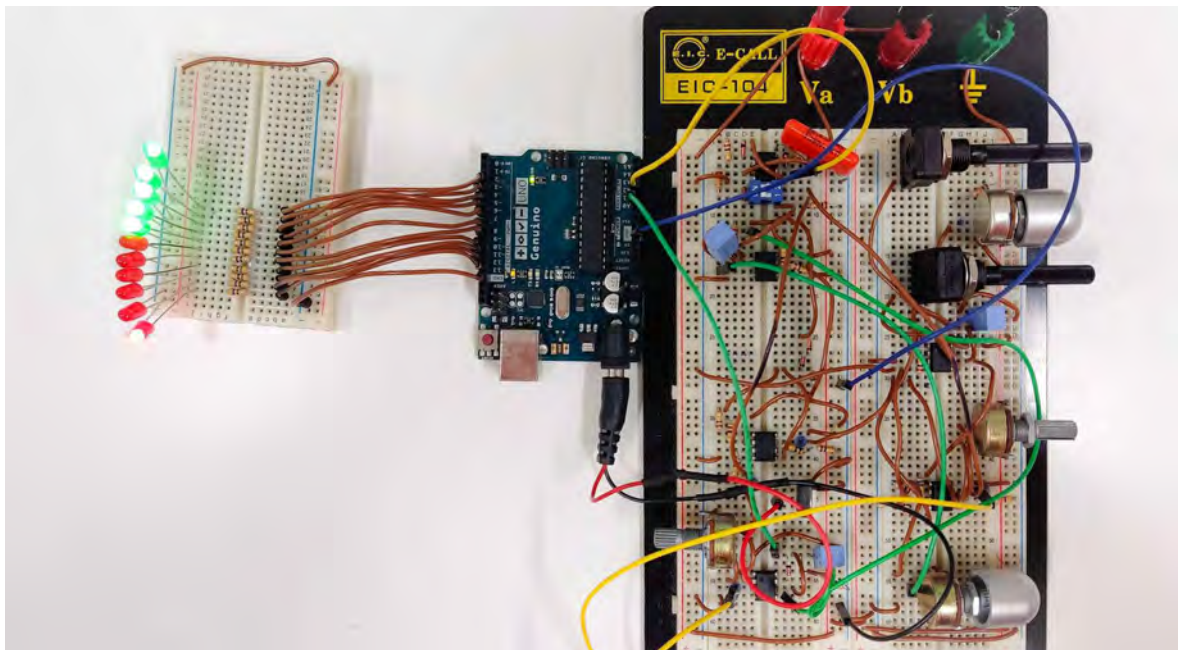
Αυτό που παρατηρήσαμε ακουστικά είναι ότι ο κομπρέσορας δεν προσθέτει σημαντικό θόρυβο ούτε αλλιώνει - παραμορφώνει σημαντικά την κυματομορφή . Σε κάποιες περιπτώσεις δεν ανιχνεύτηκαν άμεσα ορισμένα Peak πολύ μικρής διάρκειας και ένα ελάχιστο noise που εντοπίστηκε ακουστικά ενδεχομένως οφείλεται στο breadboard και τις συνδέσεις . Συνολικά όλα τα επιμέρους κυκλώματα λειτούργησαν ικανοποιητικά και εντός των υπολογισμών που είχαμε κάνει και καταφέραμε να συμπίεσουμε αποτελεσματικά κανάλια ήχου κρουστών και κανάλια ήχου φωνής .

Κεφάλαιο 5

Schematic And Breadboard Prototype

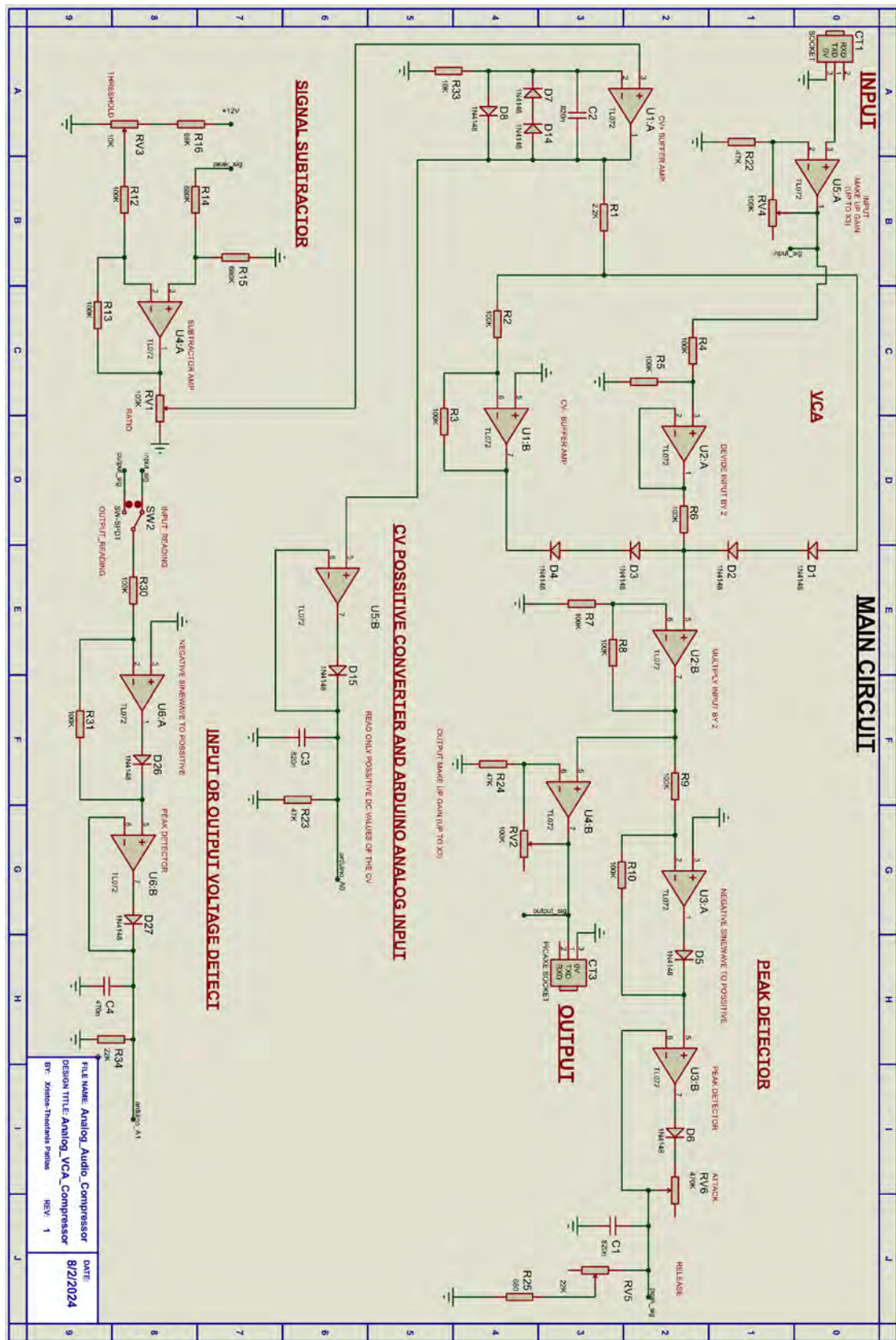
5.1 Εισαγωγή

Το αρχικό schematic πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό **Proteus** καθώς και το **Breadboard Prototype** στο εργαστήριο του τμήματος ΗΜΜΥ Βόλου . Χωρίσαμε το **schematic** σε 3 sheets, το **Main Circuit**, **Power Supply Circuit**, **Arduino Circuit** . Σε ορισμένα σημεία του κυκλώματος όπου υπήρχε πλήθος καλωδίων χρησιμοποιήθηκαν **Net Labels** (στο schematic του Proteus χρησιμοποιήθηκαν stereo jacks λόγω έλλειψης του mono footprint του 6.5mm jack) .

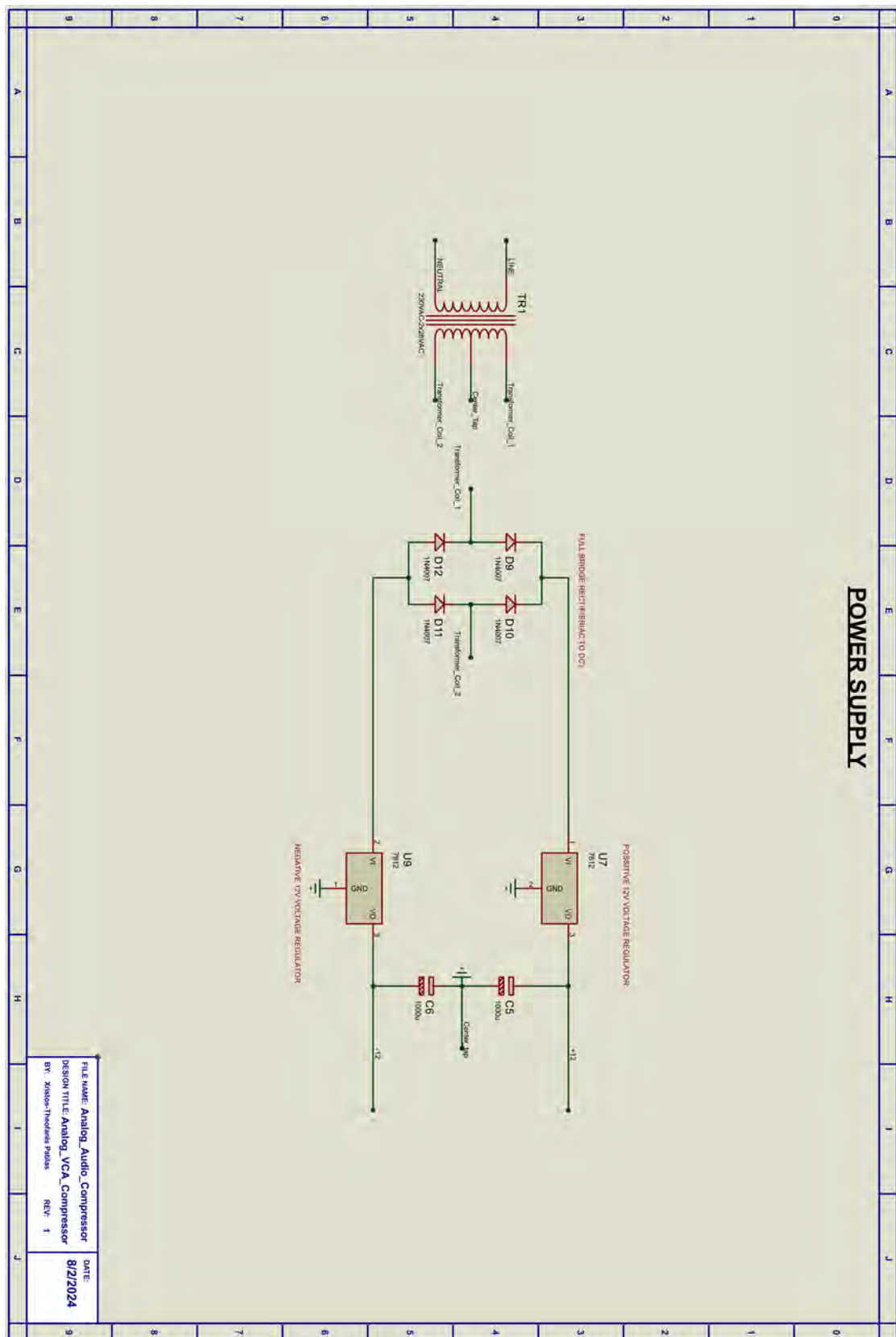


Σχήμα 5.1: Breadboard Prototype

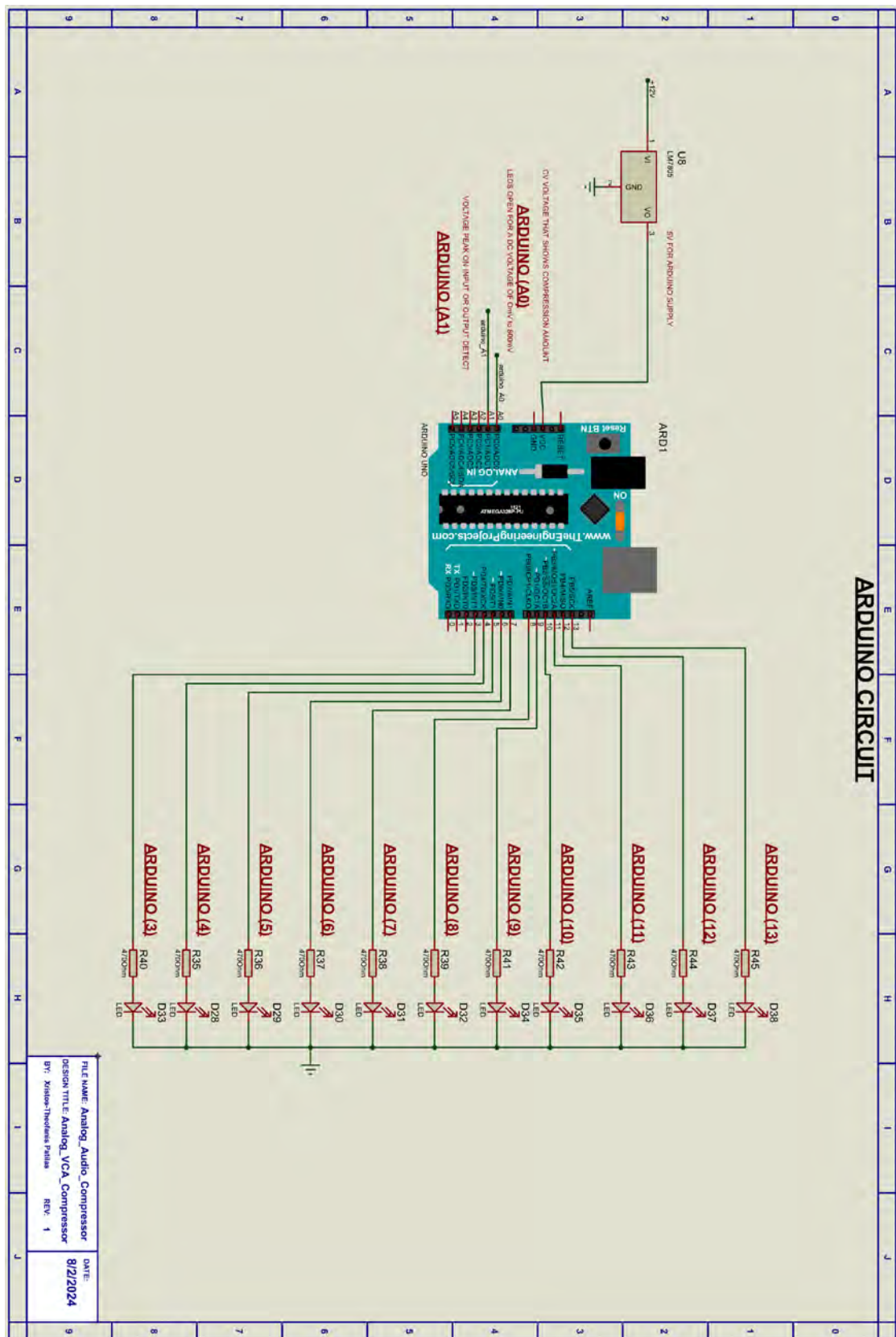
5.2 Prototype Schematic In Proteus



Σχήμα 5.2: Main Circuit Schematic



Σχήμα 5.3: Power Supply Circuit Schematic



Σχήμα 5.4: Arduino Circuit Schematic

Κεφάλαιο 6

PCB DESIGN

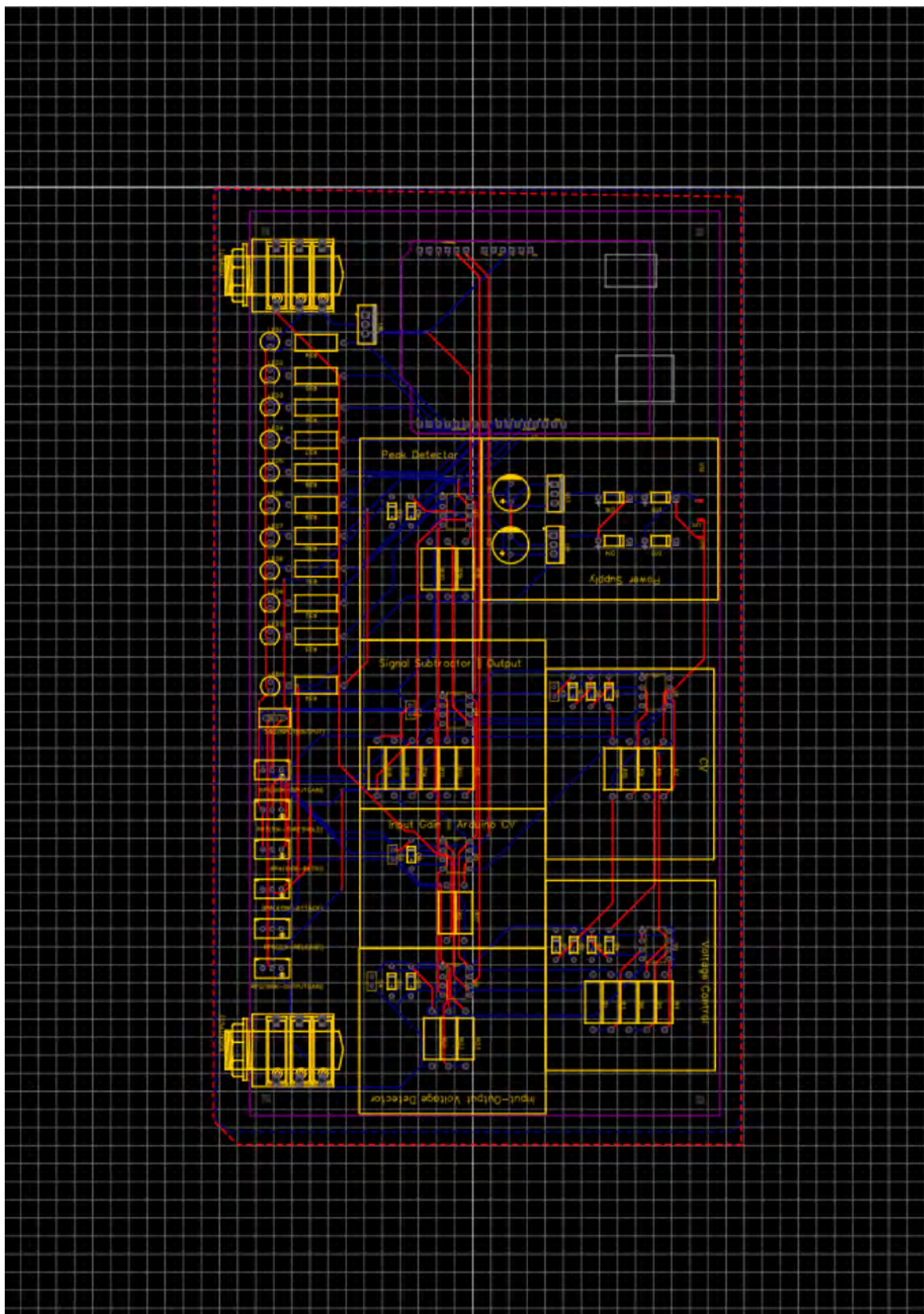
6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κομμάτι της διπλωματικής θα παρουσιάσουμε το **τελικό schematic** του κυκλώματος και το **PCB** το οποίο κατασκευάσαμε στην συνέχεια . Το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε είναι το **EasyEda** το οποίο μας επιτρέπει να κατασκευάσουμε το schematic και έπειτα να το μετατρέψουμε σε PCB . Στο κομμάτι της κατασκευής του PCB πραγματοποιήθηκαν όλες οι επιμέρους διαδικασίες :

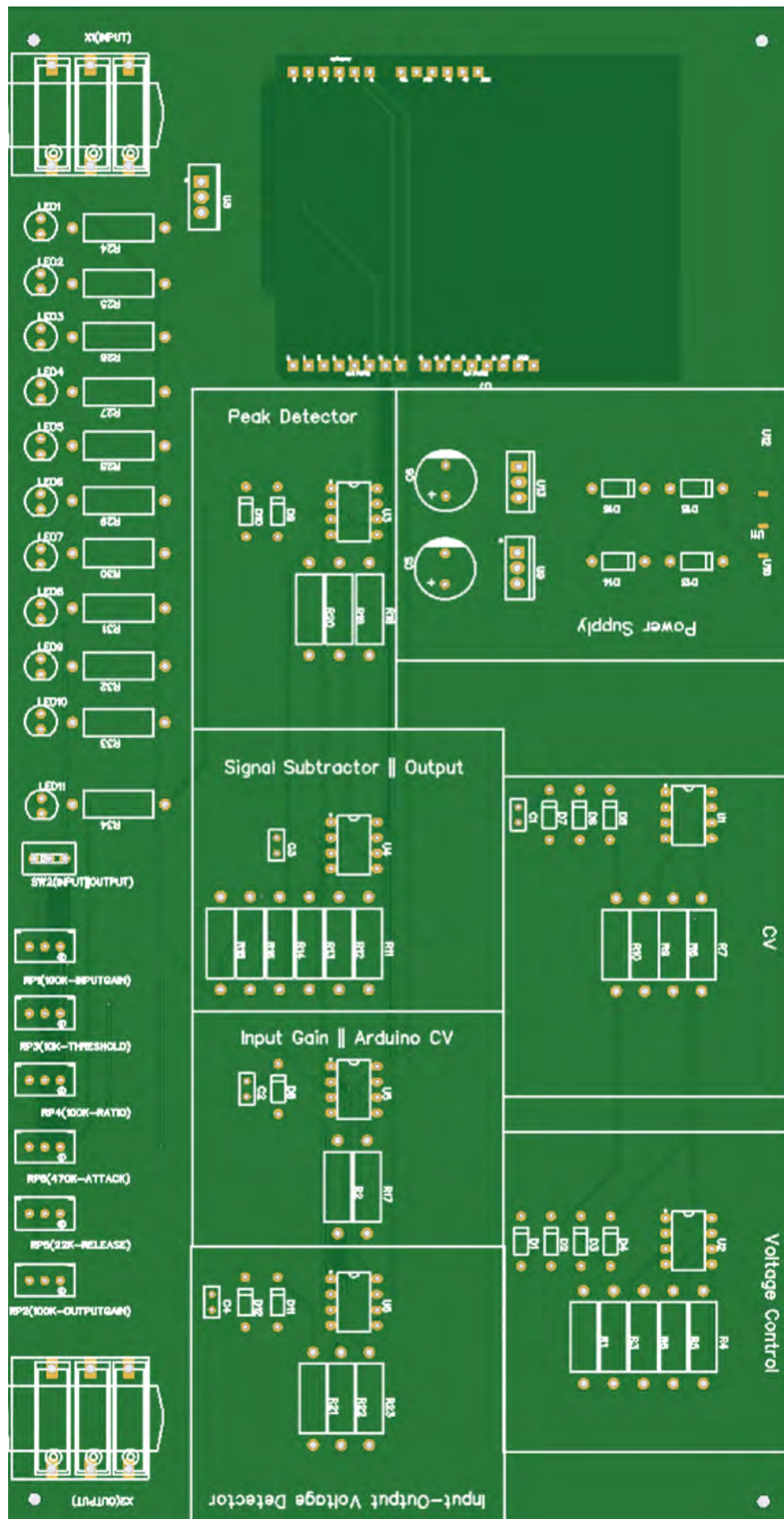
- **Placement** (Τοποθέτηση των υλικών στην πλακέτα) .
- **Routing** (Οι συνδέσεις και οι διαδρομές των ενώσεων των υλικών) .
- **Copper area build** (Τοποθέτηση ενιαίου στρώματος χαλκού για το GND) .
- **DRC check** (Ελεγχος κανόνων σχεδίασης) .
- **Εξαγωγή του Gerber File** (Εξαγωγή του αρχείου για εκτύπωση του PCB) .

Τόσο στο τελικό schematic όσο και στο PCB μεριμνήσαμε ώστε να υπάρχουν τα ονόματα των επιμέρους υλικών και τα ονόματα των επιμέρους κυκλωμάτων , αυτό βοηθάει τόσο στην κατανόηση του κυκλώματος όσο και στην εύκολη εύρεση και αντικατάσταση στοιχείων εάν φθαρούν σε βάθος χρόνου .

6.3 Final PCB



Σχήμα 6.2: PCB Layout - Routing (Top View)



Σχήμα 6.3: Final PCB (Top View)

Κεφάλαιο 7

Arduino Code

```
#define led_0 3
#define led_1 4
#define led_2 5
#define led_3 6
#define led_4 7
#define led_5 8
#define led_6 9
#define led_7 10
#define led_8 11
#define led_9 12
#define led_10 13
```

- Αρχικά κάνουμε **define** τα pins του Arduino που θα χρησιμοποιήσουμε και τους δίνουμε ένα χαρακτηριστικό όνομα π.χ το **Digital Pin 5** του Arduino **πλέον το ονομάζουμε led_2.**

Αυτό βοηθάει τόσο στην ανάγνωση του κώδικα όσο και στην "σύνδεση" του εκάστωτε led που αναφέρουμε στον κώδικα με το αντίστοιχο led στο breadboard .

Έτσι πλέον για να αναφερθούμε σε κάποιο led χρησιμοποιούμε το **led_x** (όπου x ο αριθμός απο το 0 εως το 10).

```
void setup() {  
    pinMode(led_0 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_1 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_2 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_3 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_4 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_5 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_6 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_7 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_8 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_9 ,OUTPUT);  
    pinMode(led_10 ,OUTPUT);  
}
```

- Στη συνέχεια στην συνάρτηση **Void setup ()** , ορίζουμε το είδος του κάθε Pin.

Η συνάρτηση αυτή τρέχει μια φορά και στην προκειμένη περίπτωση με το `pinMode(led_x,OUTPUT)` ορίζουμε ότι αυτά τα pins είναι έξοδοι , καθώς θέλουμε να εξάγουμε σήμα μέσω αυτών.

```
void loop() {

    float CV = ((float)analogRead(A0)) * (5.0 / 1024.0) ;
    float WARNING = ((float)analogRead(A1)) * (5.0 / 1024.0) ;

    if(CV>=0.02){
        digitalWrite(led_0 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_0 ,LOW);}

    if(CV>=0.080){
        digitalWrite(led_1 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_1 ,LOW);}

    if(CV>=0.160){
        digitalWrite(led_2 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_2 ,LOW);}

    if(CV>=0.240){
        digitalWrite(led_3 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_3 ,LOW);}

    if(CV>=0.320){
        digitalWrite(led_4 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_4 ,LOW);}
```

```
    if(CV>=0.400){
        digitalWrite(led_5 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_5 ,LOW);}

    if(CV>=0.480){
        digitalWrite(led_6 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_6 ,LOW);}

    if(CV>=0.560){
        digitalWrite(led_7 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_7 ,LOW);}

    if(CV>=0.640){
        digitalWrite(led_8 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_8 ,LOW);}

    if(CV>=0.720){
        digitalWrite(led_9 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_9 ,LOW);}

    if(WARNING >=1.400){
        digitalWrite(led_10 ,HIGH);
    }
    else { digitalWrite(led_10 ,LOW);}

    delay(50);
}
```

- Έπειτα στην συνάρτηση **Void loop()** που τρέχει επαναλαμβανόμενα , ορίζουμε δύο μεταβλητές τύπου **float** , την μεταβλητή **CV** και την μεταβλητή **WARNING** , η CV είναι η τιμή του CV το οποίο μετράμε και η WARNING είναι η τιμή της εισόδου ή εξόδου που μετράμε για να δούμε άμα υπερβαίνει τα 1.4Vp .
- Για το υπολογισμό των αναγνωσμένων τιμών όπως είπαμε χρησιμοποιούμε τον τύπο **V = 5 * analogRead(A) / 1024**
- Για να ενεργοποιήσουμε ή να απενεργοποιήσουμε το κάθε led χρησιμοποιούμε τις εντολές **digitalWrite(HIGH)** και **digitalWrite(LOW)** .
- Άμα **CV > τιμή** , τότε με την **digitalWrite** θέτουμε **HIGH** για να **ανάψει το led_x** (με x από 0 έως 9) ή **LOW** για να **σβήσει** .
- Άμα **WARNING > 1.4** , τότε με την **digitalWrite** θέτουμε **HIGH** για να **ανάψει το led_10** ή **LOW** για να **σβήσει** .
- Τέλος συμπεριλαμβάνουμε ένα μικρό **delay** ίσο με **50ms** .

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

Το κύκλωμα το οποίο κατασκευάσαμε αποτελεί μια πολύ καλή βάση για έναν αναλογικό μονοφωνικό κομπρέσορα VCA . Μελετώντας το είδαμε ότι η απόδοσή του είναι καλή και δεν παραμορφώνει ή δημιουργεί θόρυβο στην αρχική κυματομορφή , ταυτόχρονα πετυχαίνει ομαλή συμπίεση , διατηρώντας το κανάλι ήχου αναλογικό και έχοντας την δυνατότητα να επεξεργαστεί κανάλια ήχου διαφόρων ειδών .

8.1 Μελλοντικές επεκτάσεις

Το συγκεκριμένο κύκλωμα του μονοφωνικού VCA κομπρέσορα επιδέχεται σίγουρα τόσο βελτιώσεις όσο και επιπλέον προσθήκες .

8.1.1 Βελτιώσεις

Στο κομμάτι των βελτιώσεων παρατηρούμε ορισμένες ωφέλιμες αλλαγές.

- Αρχικά στο κύκλωμα Arduino μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξοικονόμηση χώρου είτε μικρότερο μοντέλο της σειράς Arduino είτε κάποιο ολοκληρωμένο μικρότερου μεγέθους .
- Όμοια και στο κύκλωμα του τροφοδοτικού μπορεί να σχεδιαστεί ένα κύκλωμα με δύο εξόδους μια θετική και μια αρνητική αλλά μικρότερου μεγέθους .
- Τα κυκλώματα του Peak Detector (Attack - Release) επίσης επιδέχονται βελτιώσεις στους χρόνους , την ακρίβεια και την απόδοση , κυρίως για σήματα μικρού χρόνου ή για να παρέχουν μεγαλύτερο εύρος (δηλαδή να καλύπτουν από ms έως και s) .

8.1.2 Επεκτάσεις

Στο κομμάτι των επεκτάσεων και της εξέλιξης του κύκλωματος εντοπίσαμε επίσης κάποιες ουσιώδεις προσθήκες .

- Αρχικά θα ήταν ωφέλιμο στο κύκλωμα οπτικής απόκρισης να συμπεριληφθεί μια οθόνη έναντι των led και να παρέχει στον χρήστη όχι μόνο στοιχεία περί της συμπίεσης αλλά και στοιχεία για τις τιμές του Attack , Release , Ratio , Threshold ή ακόμη και μια γραφική παράσταση του σήματος πριν και μετά την συμπίεση . Σε συνδυασμό με αυτό μπορεί έπειτα να δημιουργηθεί επιπλέον κύκλωμα το οποίο θα παρέχει τις πληροφορίες και ψηφιακά και θα επιτρέπει στον χρήστη να ελέγχει με ψηφιακά στοιχεία το αναλογικό κύκλωμα ή αντίστροφα .
- Μια εξίσου χρήσιμη εξέλιξη θα ήταν ο κομπρέσορας να γίνει stereo , δηλαδή η είσοδος και η έξοδος του να είναι στερεοφωνικά κανάλια ήχου και να δίνεται η επιλογή stereo ή mono .
- Άλλο ένα στοιχείο που παρατηρείτε συχνά στους κομπρέσορες και μπορεί να προστεθεί είναι ένας διακόπτης bypass ο οποίος επιτρέπει στον χρήστη την άμεση εναλλαγή και σύγκριση του σήματος πριν και μετά την συμπίεση .
- Τέλος αναφερόμενοι στην περιοχή τιμών για το Vsignal πέραν του εύρους τιμών που υλοποιήσαμε εμείς (100mVp - 1.4Vp) θα ήταν χρήσιμο να δοθεί μεγαλύτερο εύρος και ο κομπρέσορας να μπορεί να συμπίεσει εξίσου αποδοτικά μεγαλύτερα σήματα , για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να τροποποιηθεί τόσο το κύκλωμα του VCA όσο και η τιμή του Threshold .

Βιβλιογραφία

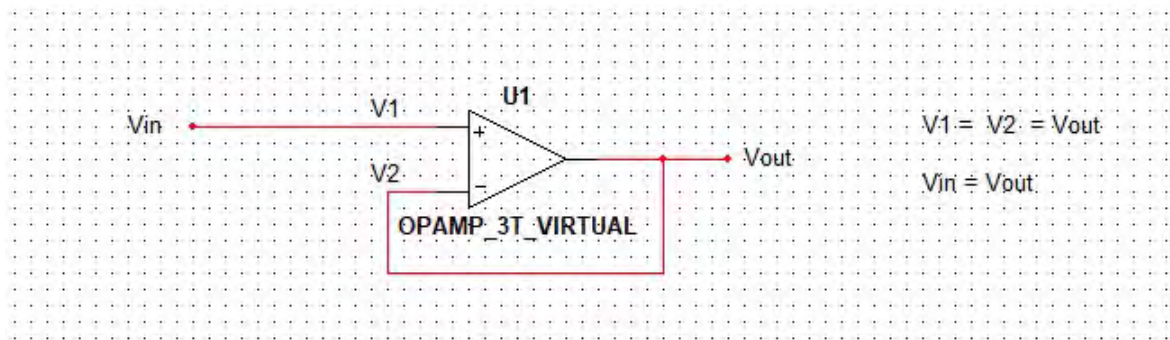
- [1] 4 types of compressors explained. <https://theproaudiofiles.com/types-of-compressors/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 07-12-2023.
- [2] What is an audio compressor. <https://www.site.uottawa.ca/~rhabash/ELG4135L8.pdf>. Ημερομηνία πρόσβασης: 01-12-2023.
- [3] What's the difference between mic, instrument, line, and speaker level signals? <https://www.sweetwater.com/sweetcare/articles/whats-the-difference-between-mic-instrument-line-and-speaker-level-signals/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 10-12-2023.
- [4] Moritz Klein. Designing a simple audio compressor from scratch. <https://www.youtube.com/watch?v=Wag-yTyAxPA&t=336s>. Ημερομηνία πρόσβασης: 12-12-2023.
- [5] Vca techniques investigated. <https://sound-au.com/articles/vca-techniques.html>. Ημερομηνία πρόσβασης: 12-12-2023.
- [6] Precision rectifier circuits. <https://www.site.uottawa.ca/~rhabash/ELG4135L8.pdf>. Ημερομηνία πρόσβασης: 01-12-2023.
- [7] Peak detector. <https://www.electronics-tutorial.net/analog-integrated-circuits/peak-detector/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 07-12-2023.
- [8] Analogread() function. <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/analog-io/analogread/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 07-12-2023.

- [9] 4-diode full wave bridge rectifier circuit, split supply. <http://www.interfacebus.com/Glossary-of-Terms-full-wave-bridge-rectifier-circuit.html>. Ημερομηνία πρόσβασης: 07-12-2023.

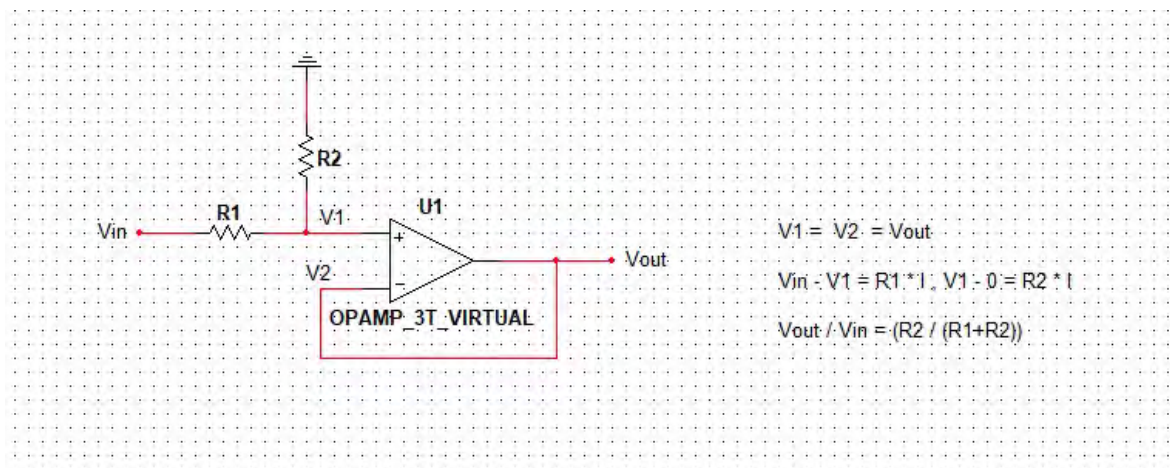
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α

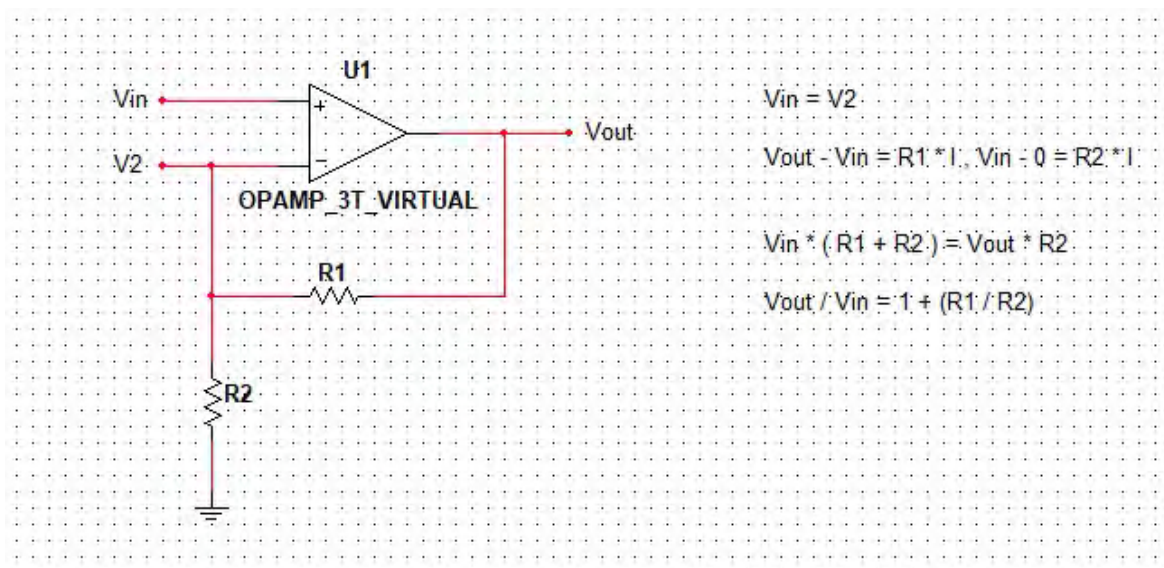
Τελεστικοί ενισχυτές



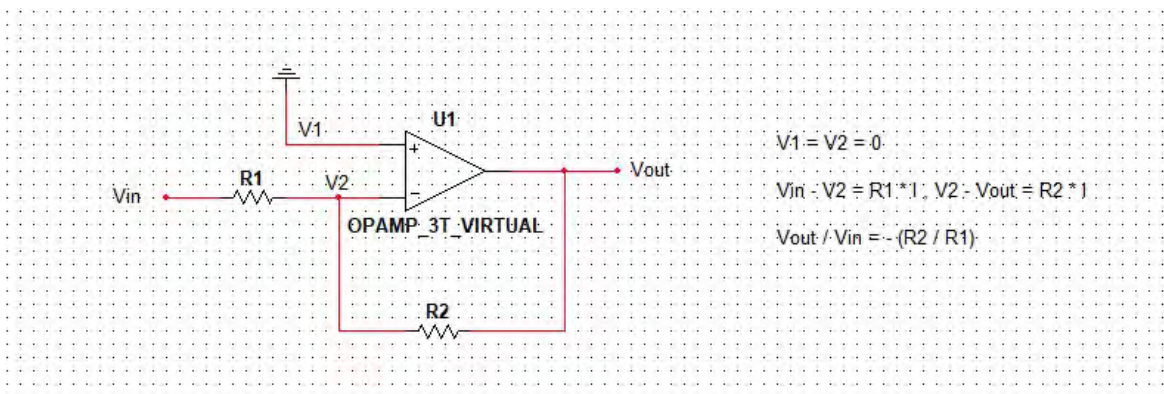
Σχήμα Α.1: Op-Amp Buffer



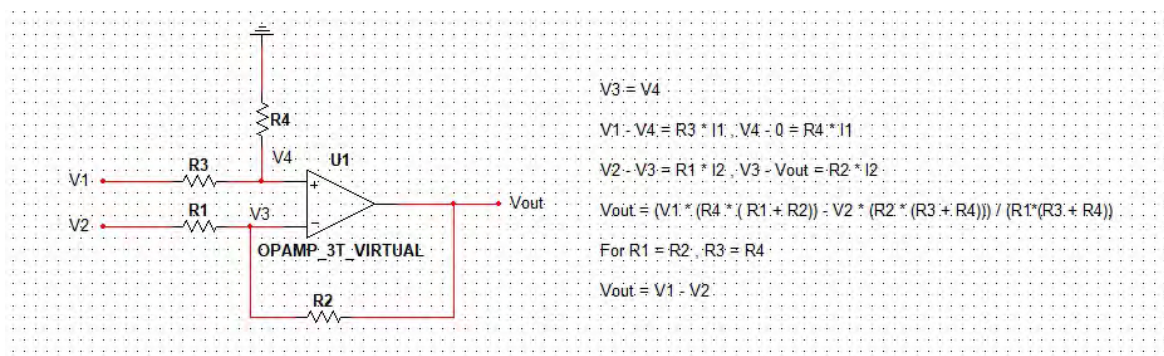
Σχήμα Α.2: Voltage Divider Op-Amp Buffer



Σχήμα A.3: Non Inverting Op-Amp



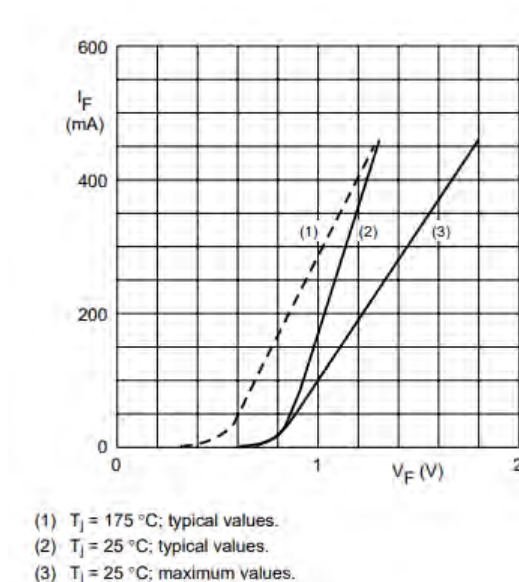
Σχήμα A.4: Inverting Op-Amp



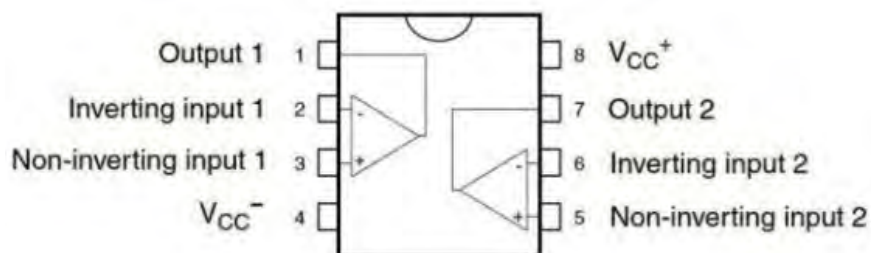
Σχήμα A.5: Comparator Op-Amp

Παράρτημα Β

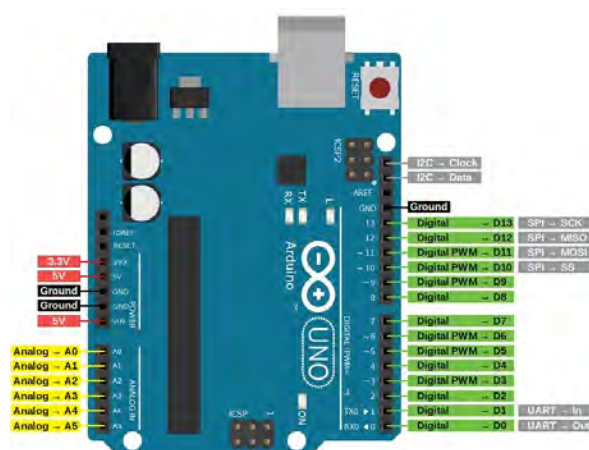
Data Sheets - Pinouts



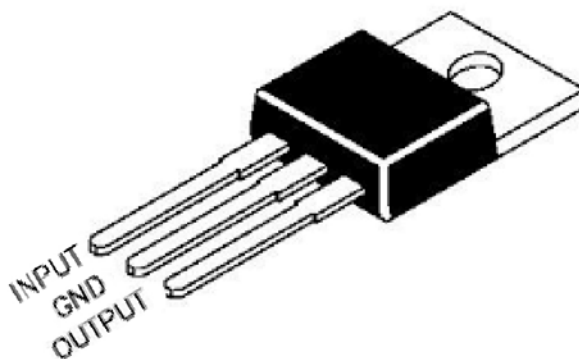
Σχήμα Β.1: 1N4148 Diode Forward Current-Forward Voltage



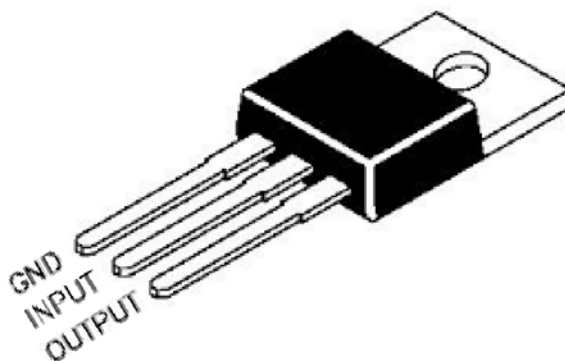
Σχήμα Β.2: TL072 Pinout



Σχήμα B.3: Arduino Uno Pinout



Σχήμα B.4: LM7812 Pinout



Σχήμα B.5: LM7912 Pinout