



ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Ασύρματο φορητό Bluetooth ηχοσύστημα με
ενισχυτή τάξης D »



Του φοιτητή
Ταχτσίδα Φώτιου
Αρ. Μητρώου: 517133

Επιβλέπων
Παπακώστας Δημήτριος
Καθηγητής

Ημερομηνία 24-05-2023

Τίτλος Δ.Ε. Ασύρματο φορητό Bluetooth ηχοσύστημα με ενισχυτή τάξης D

Κωδικός Δ.Ε. 23118

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/τών Ταχτσίδης Φώτιος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Παπακώστας Δημήτριος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 22-02-2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 22-02-2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Ταχτσίδα Φώτιου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Την παρούσα πτυχιακή εργασία την αφιερώνω στην οικογένειά μου και σε όσους με βοήθησαν στην διάρκεια της υλοποίησης της.»

Πρόλογος

Λόγω της χρόνιας ενασχόλησης στο χώρο της μουσικής και των ηχοσυστημάτων, η ιδέα ανάπτυξης ενός ασύρματου φορητού ηχοσυστήματος, αποτέλεσε την πιο κατάλληλη επιλογή θεματολογίας . Η επεξεργασία του ηχητικού σήματος και η αναπαραγωγή του, εμπεριέχει πολλούς τομείς ηλεκτρονικής επιστήμης και αποτελεί ένα μεγάλο μέρος στην επαγγελματική μου πορεία. Μετά την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας αποκόμισα πολλές γνώσεις σχετικά με την επεξεργασία και ενίσχυση του ήχου. Απέκτησα επιπλέον εμπειρία στη σχεδίαση κυκλωμάτων και πλακετών και παρατήρησα τα προβλήματα που μπορεί να παρουσιάσει κανείς στη σχεδίαση ενός ολόκληρου συστήματος. Τέλος, παρατήρησα πόσο σημαντική είναι η επιλογή των σωστών εξαρτημάτων για την κάθε εφαρμογή, με σκοπό τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος.

Περίληψη

Με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας, η επιστήμη των ενισχυτών σήματος βοήθησε σε πολλούς τομείς. Ο ενισχυτής τάξης D όμως, αποτέλεσε ένα πολύ μεγάλο βήμα στους ενισχυτές, καθώς προσφέρει μεγάλα ποσοστά ενίσχυσης της ισχύος με πολύ μικρή κατανάλωση ρεύματος. Σαν αποτέλεσμα, κατατάσσεται σε υψηλή θέση επιλογής, όσον αφορά φορητά συστήματα, όπου η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντική. Στην παρούσα εργασία, γίνεται μελέτη του ενισχυτή τάξης D. Γίνεται αναφορά στη δομή λειτουργίας του και στα βασικά κομμάτια από τα οποία αποτελείται. Ακόμα, σχεδιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα, που περιλαμβάνει τροφοδοσία, μεταφορά δεδομένων και το βασικό κύκλωμα ενίσχυσης του συστήματος. Μετά τη σχεδίαση του κυκλώματος και την υλοποίηση της πλακέτας PCB, επεξηγούνται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις του κυκλώματος. Τέλος, το κύκλωμα σχεδίασης της εργασίας, συγκρίνεται με ένα πραγματικό προϊόν του εμπορίου και παρατηρούνται οι διαφορές στα αποτελέσματα των μετρήσεων, αλλά και στη σημασία της σχεδίασης και στην επιλογή εξαρτημάτων.

«Wireless Bluetooth Soundsystem with Class D Amplifier»

«Fotios Tachtsidis»

Abstract

Over the years and with the development of technology, the science of signal amplifiers has helped in many fields. The class D amplifier, however, was a very big step forward in amplifiers, as it offers large percentages of power amplification with very little current consumption. As a result, it ranks as a high choice for portable systems where power consumption is important. In this work, the class D amplifier is studied. Reference is made to its operating structure and the basic parts of which it is composed. Furthermore, the design of an integrated circuit that includes power supply, data transfer and the basic amplification circuit of the system is carried out. After the circuit design and PCB implementation, all circuit measurements are explained in detail. Finally, the design circuit of the work is compared with a real commercial product and the differences in the results of the measurements and the importance of the design and the choice of components are observed.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά, τους καθηγητές, τους συμφοιτητές και τους συναδέλφους μου, που με βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, κύριο Παπακώστα Δημήτριο, για όλη τη βοήθεια και τη στήριξή του, καθ' όλη τη διάρκεια αυτής.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	V
Περίληψη.....	VI
Abstract	VII
Ευχαριστίες	VIII
Περιεχόμενα	IX
Κατάλογος Σχημάτων	XI
Κατάλογος Πινάκων	XII
Κεφάλαιο 1ο: Η εξέλιξη του ενισχυτή ηχητικού σήματος	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ο ενισχυτής ήχου.....	1
1.3 Audion	1
1.4 Ενισχυτής τάξης A.....	2
1.5 Ενισχυτής τάξης B.....	2
1.6 Ενισχυτής τάξης AB.....	4
1.7 Επίλογος	4
Κεφάλαιο 2ο: Ενισχυτής τάξης D.....	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Αρχή λειτουργίας.....	5
2.3 Συγκριτές	6
2.4 MOSFETS	7
2.5 Low pass filter	8
2.6 Επίλογος	9
Κεφάλαιο 3ο: Σχεδιασμός Κυκλώματος.....	11
3.1 Εισαγωγή	11
3.2 Διάγραμμα κυκλώματος	11
3.3 Μπαταρίες (Batteries).....	13
3.4 Σύστημα Τροφοδοσίας (PSU/Power Supply Unit).....	14
3.5 Γεννήτρια Τριγωνικού Σήματος (555 Timer).....	15
3.6 Μικροελεγκτής & Μετατροπέας αναλογικό σε ψηφιακό (ESP32 & DAC/Digital to Analog Converter)	17
3.7 Μετασχηματισμός τάσης ηχητικού σήματος (Signal Shift)	19
3.8 Ενισχυτής τάξης D.....	21
3.8.1 Συγκριτές (Comparators).....	21
3.8.2 Οδηγοί MOSFET (MOSFET Drivers)	22

3.8.3	MOSFETS.....	23
3.8.4	Χαμηλοπερατό Φίλτρο (Low-Pass-Filter)	24
3.9	Φορτίο (Load).....	25
3.10	Επίλογος	26
Κεφάλαιο 4ο:	Υλοποίηση και μετρήσεις.....	27
4.1	Εισαγωγή	27
4.2	Σχεδίαση PCB.....	27
4.3	Τροφοδοσία	28
4.4	Έξοδος μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα	29
4.5	Γεννήτρια τριγωνικού σήματος	30
4.6	Μετασχηματισμός ηχητικού σήματος	31
4.7	Μετρήσεις ενισχυτή τάξης D.....	33
4.7.1	Συγκριτές.....	33
4.7.2	Μετρήσεις Οδηγών MOSFET.....	38
4.7.3	Μετρήσεις MOSFETS.....	44
4.8	Μετρήσεις εξόδου.....	46
4.9	Κατανάλωση και απολαβή του συστήματος	48
4.10	Σύγκριση με προϊόν εμπορίου	49
4.11	Επίλογος	51
Κεφάλαιο 5ο:	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....	52
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Το τριώδιο Audion	1
Σχήμα 1.2: Κύκλωμα ενισχυτή τάξης A	2
Σχήμα 1.3: Κύκλωμα ενισχυτή τάξης B	3
Σχήμα 1.4: Διασταυρούμενη παραμόρφωση	3
Σχήμα 1.5: Κύκλωμα ενισχυτή τάξης AB	4
Σχήμα 2.1: Διάταξη ενισχυτή τάξης D	5
Σχήμα 2.2: Κυματομορφές ενισχυτή τάξης D	6
Σχήμα 2.3: Διάταξη βαθμίδας MOSFETS	7
Σχήμα 2.4: Κυματομορφές νεκρού χρόνου	8
Σχήμα 2.5: Χαμηλοπερατό φίλτρο LC	9
Σχήμα 3.1: Τα μέρη που αποτελείται το κύκλωμα σχεδίασης.....	12
Σχήμα 3.2: Συνδεσμολογία μπαταριών με το BMS.....	13
Σχήμα 3.3: Κύκλωμα τροφοδοσίας.....	14
Σχήμα 3.4: Κύκλωμα γεννήτριας τριγωνικού σήματος	16
Σχήμα 3.5: Κύκλωμα ESP32 και DAC.....	17
Σχήμα 3.6: Κώδικας υλοποίησης ESP32	18
Σχήμα 3.7: Κύκλωμα μετασχηματισμού της τάσης του ηχητικού σήματος.....	20
Σχήμα 3.8: Κύκλωμα συγκριτών	21
Σχήμα 3.9: Κύκλωμα MOSFET Driver	22
Σχήμα 3.10: Κύκλωμα MOSFET.....	23
Σχήμα 3.11: Κύκλωμα χαμηλοπερατού φίλτρου LC.....	25
Σχήμα 3.12: Κλέμες σύνδεσης εξωτερικών ηχείων.....	26
Σχήμα 4.1: Πλακέτα σχεδίασης	27
Σχήμα 4.2: Τάση τροφοδοσίας.....	28
Σχήμα 4.3: Τάση Voltage Regulator.....	29
Σχήμα 4.4: Κυματομορφή ηχητικού σήματος αριστερού καναλιού.....	29
Σχήμα 4.5: Κυματομορφή ηχητικού σήματος δεξιού καναλιού	30
Σχήμα 4.6: Κυματομορφή τριγωνικού σήματος.....	31
Σχήμα 4.7: Κυματομορφή μετασχηματισμού τάσης αριστερού καναλιού.....	32
Σχήμα 4.8: Κυματομορφή μετασχηματισμού τάσης δεξιού καναλιού	33
Σχήμα 4.9: Κυματομορφή εξόδου μη-αναστρέφων συγκριτή αριστερού καναλιού	34
Σχήμα 4.10: Κυματομορφή εξόδου αναστρέφων συγκριτή αριστερού καναλιού.....	34
Σχήμα 4.11: Κυματομορφές εξόδου συγκριτών αριστερού καναλιού	35
Σχήμα 4.12: Κυματομορφή εισόδου και εξόδου συγκριτών αριστερού καναλιού.....	35
Σχήμα 4.13: Μεταβολή κύκλου εργασίας PWM αριστερού καναλιού	36
Σχήμα 4.14: Κυματομορφή εξόδου μη-αναστρέφων συγκριτή δεξιού καναλιού	37
Σχήμα 4.15: Κυματομορφή εξόδου αναστρέφων συγκριτή δεξιού καναλιού	37
Σχήμα 4.16: Κυματομορφές εξόδου συγκριτών δεξιού καναλιού.....	38
Σχήμα 4.17: Κυματομορφή εξόδου High Side MOSFET Driver αριστερού καναλιού	39
Σχήμα 4.18: Κυματομορφή εξόδου Low Side MOSFET Driver αριστερού καναλιού	40
Σχήμα 4.19: Κυματομορφές εξόδου MOSFET Driver αριστερού καναλιού	40
Σχήμα 4.20: Κυματομορφή νεκρού χρόνου αριστερού καναλιού	41
Σχήμα 4.21: Κυματομορφή εξόδου High Side MOSFET Driver δεξιού καναλιού.....	42
Σχήμα 4.22: Κυματομορφή εξόδου Low Side MOSFET Driver δεξιού καναλιού	42
Σχήμα 4.23: Κυματομορφές εξόδου MOSFET Driver δεξιού καναλιού	43
Σχήμα 4.24: Κυματομορφές εξόδου MOSFET Driver δεξιού καναλιού	44
Σχήμα 4.25: Κυματομορφή εξόδου MOSFET αριστερού καναλιού	45
Σχήμα 4.26: Κυματομορφή εξόδου MOSFET δεξιού καναλιού	46

Σχήμα 4.27: Κυμματομορφή εξόδου συστήματος αριστερού καναλιού (0 dB)	47
Σχήμα 4.28: Κυμματομορφή εξόδου συστήματος δεξιού καναλιού (0 dB)	47
Σχήμα 4.29: Κατανάλωση ρεύματος κυκλώματος χωρίς σήμα εισόδου Error! Bookmark not defined.	
Σχήμα 4.30: Κατανάλωση ρεύματος με σήμα εισόδου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.31: Κυμματομορφή σήματος εισόδου XY-C15H.....	49
Σχήμα 4.32: Κυμματομορφή εξόδου XY-C15H.....	50

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις εξόδου DAC.....	30
Πίνακας 4.2: Μετρήσεις εξόδου μετασχηματιστή τάσης	33
Πίνακας 4.3: Μετρήσεις εξόδου συγκριτών	38
Πίνακας 4.4: Μετρήσεις εξόδου High Side Driver.....	44
Πίνακας 4.5: Μετρήσεις εξόδου Low Side Driver	44
Πίνακας 4.6: Μετρήσεις εξόδου MOSFET	46
Πίνακας 4.7: Μετρήσεις εξόδου συστήματος.....	48
Πίνακας 4.8: Μετρήσεις ισχύος κυκλώματος.....	48
Πίνακας 4.9: Σύγκριση εισόδων κυκλώματος πτυχιακής με το XY-C15H.....	50
Πίνακας 4.10: Σύγκριση εξόδων κυκλώματος πτυχιακής με το XY-C15H	50

Κεφάλαιο 1ο: Η εξέλιξη του ενισχυτή ηχητικού σήματος

1.1 Εισαγωγή

Κατά την πάροδο των χρόνων και με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι ενισχυτές ήχου έφτασαν από λυχνίες σε ολοκληρωμένες διατάξεις ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Με την ανακάλυψη του Transistor δημιουργήθηκαν τάξεις ενισχυτών που προσφέρουν μεγάλη ισχύ στις εξόδους με μεγάλες αποδόσεις. Με τον τρόπο αυτό το κόστος κατασκευής, αλλά και το μέγεθος των κυκλωμάτων ενίσχυσης ήχου μειώθηκε αισθητά.

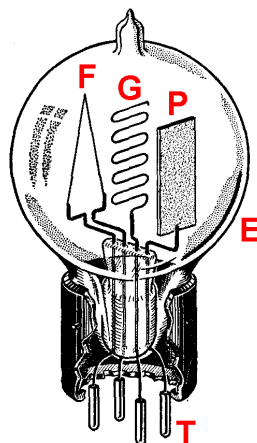
1.2 Ο ενισχυτής ήχου

Ο ενισχυτής ηχητικού σήματος είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που έχει ως βασικό χαρακτηριστικό την ενίσχυση σημάτων, ως προς το πλάτος τάσης αλλά και τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Η ανάγκη ενίσχυσης του ηχητικού σήματος έγκειται στο γεγονός ότι τα σήματα που παράγονται από συσκευές αναπαραγωγής ηχητικών σημάτων δεν είναι επαρκή σε ισχύ, έτσι ώστε να μπορούν να οδηγήσουν με σωστό τρόπο ηχοσυστήματα μεγάλης, αλλά και μικρής τάξης μεγέθους. Ο ενισχυτής επομένως, είναι ο μεσάζοντας μεταξύ της συσκευής αναπαραγωγής ήχου και του χρήστη. Με την πάροδο των χρόνων τα ηχοσυστήματα εξελίχθηκαν, με αποτέλεσμα να μπορούν να προσφέρουν στους οδηγούς των ηχείων μεγάλη ισχύ, με ελάχιστη απώλεια ενέργειας.[1]

1.3 Audion

Το Audion εφευρέθηκε το 1902 από τον Αμερικανό ηλεκτρολόγο μηχανικό Lee de Forest, εξού και η ονομασία που του δόθηκε Audion de Forest. Πρόκειται για την κατασκευή ενός τριωδίου, στη μορφή ενός σωλήνα κενού που αποτελούνταν από τρία μέρη. Με την προσθήκη ενός μορφοποιημένου καλωδίου, που ονομαζόταν πλέγμα ελέγχου ανάμεσα σε δύο στοιχεία, μια μεταλλική πλάκα ανόδου και ένα νήμα καθόδου, ο de Forest κατάφερε να ελέγξει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Με αυτόν τον τρόπο δημιούργησε τον πρώτο ενισχυτή σήματος, που χρησιμοποιήθηκε κατά βάση σε εφαρμογές ανίχνευσης και ενίσχυσης ραδιοκυμάτων, ενώ έπαιξε πρωταρχικό ρόλο για πολλά χρόνια στην εξέλιξη της ηλεκτρονικής επιστήμης, μέχρι την εφεύρεση του Transistor. [2]

Μετά την εφεύρεση του Transistor, η τεχνολογία αναπτύχθηκε ραγδαία. Με την πάροδο των χρόνων εφευρέθηκαν νέες διατάξεις ενισχυτών σήματος, που έχουν πλέον ως βασικό χαρακτηριστικό τους, την χρήση του Transistor. Για μερικές από τις διατάξεις που αναπτύχθηκαν, γίνεται αναφορά και στην παρούσα εργασία.



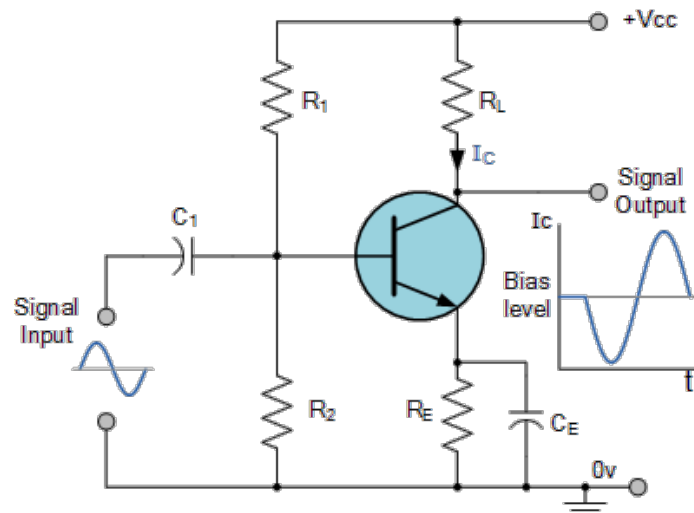
Σχήμα 1.1: Το τριώδιο Audion

1.4 Ενισχυτής τάξης A

Ο ενισχυτής τάξης A, γνωστός και ως ο πιο απλός ενισχυτής σήματος, είναι μέχρι στιγμής ο πιο διαδεδομένος τύπος ενίσχυσης σήματος. Με τη χρήση ενός μόνο απλού Transistor μπορεί κανείς να προσφέρει μεγάλο ποσοστό ενίσχυσης στην έξοδό του. Το βασικό χαρακτηριστικό στους ενισχυτές τάξης A είναι πως το Transistor βρίσκεται πάντα στην ενεργό περιοχή. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι για την αποφυγή απώλειας του σήματος.

Λόγω της εσωτερικής διόδου που δημιουργείται εσωτερικά στο Transistor, δεν είναι δυνατό να περάσουν αρνητικές τιμές τάσης, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σήμα ενίσχυσης, να πρέπει να βρίσκεται πάντα σε κατάσταση θετικής τάσης. Για να επιτευχθεί αυτό, προστίθεται μια DC συνιστώσα στο σήμα ενίσχυσης, με σκοπό να φέρει όλο το σήμα μέσα στην ενεργό περιοχή του Transistor. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγάλο ποσοστό ενίσχυσης σήματος, με πολύ απλό και γρήγορο τρόπο. [3][4]

Λόγω του ότι το Transistor βρίσκεται πάντοτε στην ενεργό περιοχή, δε φτάνει ποτέ σε κατάσταση αποκοπής, κατατάσσοντας έτσι τον ενισχυτή τάξης A ιδανικό για περιπτώσεις σημάτων με υψηλές συχνότητες. Ακόμα, η απλότητα του κυκλώματος, έχει ως αποτέλεσμα το τελικό σήμα ενίσχυσης να είναι απαλλαγμένο από τυχόν ηλεκτρονικό «θόρυβο». Καθώς το Transistor βρίσκεται πάντοτε στην κατάσταση της ενεργού περιοχής αυτού, ο ενισχυτής τάξης A φτάνει μόνο το 25% σε απόδοση. Αυτό σημαίνει πως το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται, έχει τη μορφή θερμικής. Για το λόγο αυτό, ο ενισχυτής αυτός δεν αποτελεί την κατάλληλη επιλογή για περιπτώσεις που η ενέργεια που μπορεί να παρέχει κανείς στο κύκλωμα είναι περιορισμένη, όπως για παράδειγμα κυκλώματα τροφοδοτούμενα από μπαταρίες. Τέλος, λόγω της συνεχόμενης λειτουργίας τους, τα Transistor της διάταξης του ενισχυτή τάξης A, έχουν μειωμένο προσδόκιμο ζωής, λόγω της φυσικής τους φθοράς. [3][4]

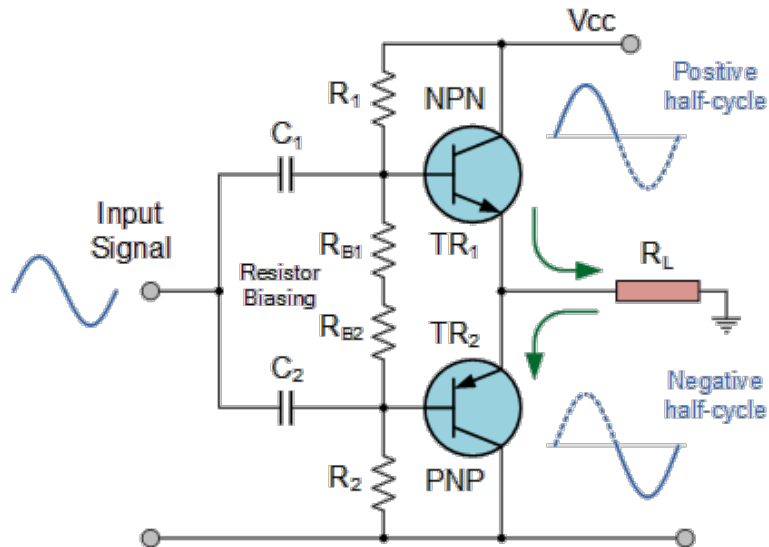


Σχήμα 1.2: Κύκλωμα ενισχυτή τάξης A

1.5 Ενισχυτής τάξης B

Καθώς ο ενισχυτής τάξης A παρουσίασε ορισμένα προβλήματα σχετικά με την απόδοση της ενέργειας του κυκλώματος με μόλις 25%, ήταν απαραίτητο να δημιουργηθεί μια καινούρια διάταξη για τη διαχείριση του σήματος ενίσχυσης. Με την προσθήκη ενός ακόμα Transistor, η διάταξη A μετατρέπεται σε διάταξη ενίσχυσης τάξης B. Πλέον, ο ενισχυτής τάξης B αποτελείται από ένα Transistor NPN και ένα Transistor PNP σε διάταξη push-pull κυκλώματος. Με τον τρόπο αυτόν, το σήμα που μπορεί να ενισχυθεί, φτάνει τον κύκλο εργασίας των 180°, συμπεριλαμβάνοντας έτσι το μεγαλύτερο μέρος αυτού. Το NPN Transistor άγει στη θετική ημιπερίοδο του σήματος, ενώ το PNP Transistor άγει στο κομμάτι της αρνητικής ημιπεριόδου. Τα Transistors στη σχετική διάταξη, δέχονται το ίδιο σήμα εισόδου και

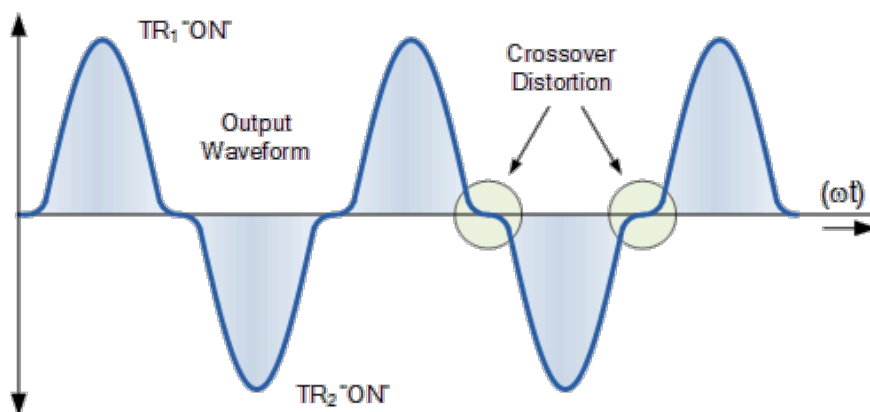
προσφέρουν σε αυτό ισάξια ποσότητα ενίσχυσης, δημιουργώντας έτσι ένα συμμετρικό κύκλωμα ενίσχυσης σήματος εξόδου. [3][4]



Σχήμα 1.3: Κύκλωμα ενισχυτή τάξης B

Με την προσθήκη του δεύτερου Transistor, ο ενισχυτής τάξης B αποκτά ένα μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με αυτόν της τάξης A. Σε απουσία σήματος εισόδου, όταν δηλαδή το κύκλωμα βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, δεν υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσου των Transistors, επομένως δεν υπάρχει και κατανάλωση ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, η απόδοση αυτού του τύπου ενισχυτή σχεδόν διπλασιάζεται σε σχέση με αυτή της τάξης A, φτάνοντας σχεδόν το 70% σε ιδανικές καταστάσεις. Με την προσθήκη όμως αυτού του πλεονεκτήματος, δημιουργείται ένα εξίσου μεγάλο μειονέκτημα. Παρουσιάζεται στη διάταξη της τάξης B, το πρόβλημα της διασταυρούμενης παραμόρφωσης (Crossover Distortion). [3][4]

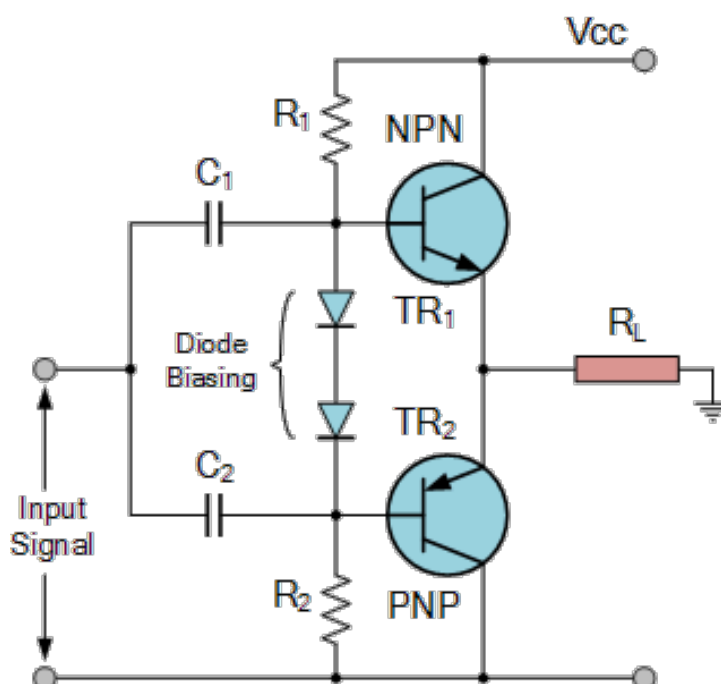
Λόγω της εσωτερικής διόδου των Transistors, υπάρχει ένα «παράθυρο» στο οποίο και τα δύο θα βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής. Όταν το σήμα εισόδου βρίσκεται κάτω από το 0.7 Volt (V), η εσωτερική διάοδος του Transistor δεν άγει, με αποτέλεσμα το σήμα εισόδου να μην απεικονίζεται στην έξοδο. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζει αρνητικές επιπτώσεις, καθώς μέρος του σήματος εισόδου χάνεται και δημιουργείται η λεγόμενη διασταυρούμενη παραμόρφωση του σήματος εξόδου. Ένας τρόπος καταπολέμησης αυτού του φαινομένου, είναι η δημιουργία μιας DC συνιστώσας και στις δύο βάσεις των Transistors, της τάξης του 0.7V. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα Transistor να βρίσκονται σχεδόν στην κατάσταση της ενεργού περιοχής, εξαλείφοντας την παραμόρφωση της εξόδου, διατηρώντας το ενισχυμένο σήμα καθαρό.[3][4]



Σχήμα 1.4: Διασταυρούμενη παραμόρφωση

1.6 Ενισχυτής τάξης AB

Λόγω της διασταυρούμενης παραμόρφωσης που δημιουργείται στην ταυτόχρονη αποκοπή και των δύο Transistor, ανακαλύφθηκε ένας καινούριος τρόπος για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Με το συνδυασμό του ενισχυτή τάξης A και του ενισχυτή τάξης B, δημιουργείται πλέον ο ενισχυτής τάξης AB. Καθώς η συνδυαστική τάση που ξεκινούν να άγουν οι εσωτερικές διόδους των Transistor είναι στα 1.4V, πρέπει να δημιουργηθεί μια ισάξια τάση για την πόλωση τους. Σε αντίθεση με τον ενισχυτή τάξης A, στον ενισχυτή τάξης AB, με την απλή προσθήκη δύο εξωτερικών διόδων στο κύκλωμα, επιτυγχάνεται το ίδιο φαινόμενο. Οι δύο διόδους άγουν και στο σύνολο παράγουν μια τάση 1.4V, 0.7V δηλαδή στην κάθε βάση του Transistor, αναγκάζοντάς τα να βρίσκονται στην αρχή της ενεργού περιοχής τους. Με τη δημιουργία αυτής της τάσης αναφοράς, παράγεται ένα μικρό ρεύμα που ρέει μέσα από τις διόδους, προκαλώντας μια μικρή κατανάλωση ενέργειας, χωρίς όμως να συγκρίνεται στο βαθμό κατανάλωσης ενέργειας και απόδοσης του ενισχυτή τάξης A. [3][4]



Σχήμα 1.5: Κύκλωμα ενισχυτή τάξης AB

1.7 Επίλογος

Με την ανακάλυψη του τριωδίου Audion, ανακαλύφθηκε ο τρόπος για την ενίσχυση ενός ηχητικού σήματος. Παρατηρήθηκε πως ο ενισχυτής τάξης A, αποτελεί τη βάση δημιουργίας και των λοιπών ενισχυτών που αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Με απόδοση μόνο 25%, ήταν απαραίτητο να δημιουργηθεί μια νέα τάξη ενισχυτή, ο ενισχυτής B, που με τη λειτουργία του σχεδόν διπλασίασε την απόδοση των κυκλωμάτων ενίσχυσης. Λόγω της διασταυρούμενης παραμόρφωσης που δημιουργούνταν όμως από τον ενισχυτή τάξης B, γεννήθηκε ο συνδυασμός των δύο αυτών τάξεων, ο ενισχυτής AB, που αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς και διαδεδομένους τρόπους ενίσχυσης ήχου.

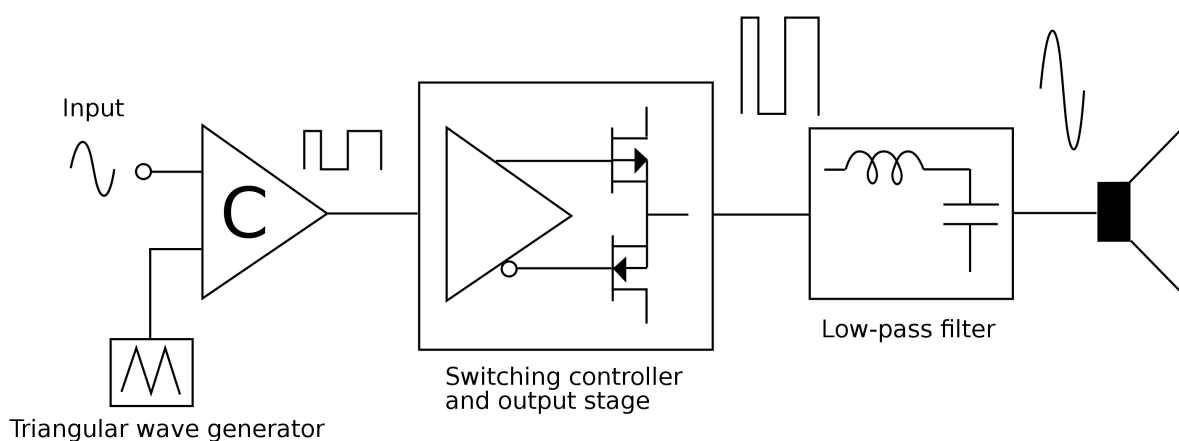
Κεφάλαιο 2ο: Ενισχυτής τάξης D

2.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στις τάξεις A, B και AB που ανήκουν στην κατηγορία των γραμμικών ενισχυτών. Το επόμενο είδος ενισχυτή σήματος ανήκει στην κατηγορία των ενισχυτών με διακοπτική λειτουργία. Οι ενισχυτές τάξης D, χρησιμοποιούν τεχνικές με αναλογικούς και ψηφιακούς διακόπτες σε υψηλές συχνότητες, για να ρυθμίσουν την ενίσχυση του σήματος. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας στα κυκλώματα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να φτάνουν αποδόσεις από 90% έως 95%. Οι ενισχυτές τάξης D αποτελούνται από δύο μεγάλες κατηγορίες, τη σχεδίαση Half -Bridge και τη σχεδίαση Full -Bridge. Λόγω της μεγάλης απόδοσης που μπορούν να προσφέρουν τέτοιου είδους ενισχυτές, προτιμάται η χρήση τους σε περιπτώσεις, με αναγκαίο τον περιορισμό της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα, εφαρμογές με φορητές μπαταρίες.

2.2 Αρχή λειτουργίας

Ο ενισχυτής τάξης D αποτελείται από τρία στάδια, με το πρώτο να είναι η σύγκριση και η παραγωγή ενός σήματος PWM (Pulse Width Modulation). Με την σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος υψηλής συχνότητας και του ηχητικού σήματος, παράγεται το PWM σήμα που εμπεριέχει το αρχικό ηχητικό δείγμα. Έπειτα, το δεύτερο στάδιο είναι η οδήγηση των MOSFET ισχύος. Με τη χρήση δύο PWM σημάτων που είναι ανεστραμμένα μεταξύ τους, οδηγούνται οι πύλες των MOSFET και παράγουν ενισχυμένο σήμα, σε τάση αλλά και σε ρεύμα. Τέλος, υπάρχει το στάδιο της εξαγωγής του ηχητικού σήματος από το υψίσυχο PWM, με τη χρήση αναλογικών παθητικών φίλτρων. Επειδή όμως το ανθρώπινο αυτί μπορεί να ακούει μόνο συχνότητες που κυμαίνονται από 20 – 20.000 Hz και τα ηχεία οδήγησης μπορούν να παράγουν συχνότητες εντός αυτού του ορίου, το τελικό σήμα περνά και φιλτράρεται από την τελευταία βαθμίδα. [4][5]

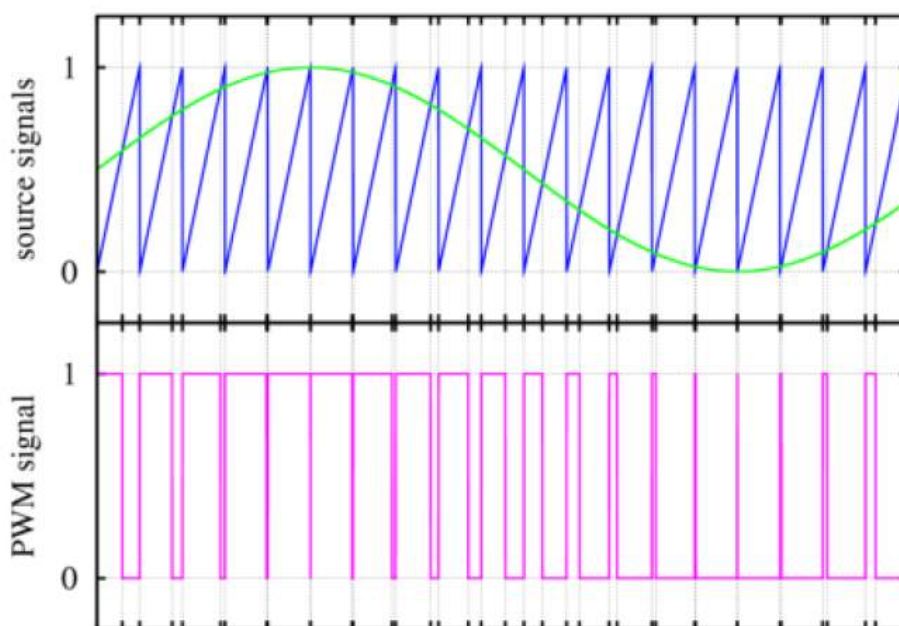


Σχήμα 2.1: Διάταξη ενισχυτή τάξης D

2.3 Συγκριτές

Η πρώτη βαθμίδα αποτελείται από δύο τελεστικούς ενισχυτές σε σχεδίαση συγκριτή. Τα σήματα που συγκρίνονται αποτελούνται από το ηχητικό σήμα που προέρχεται από μια συσκευή αναπαραγωγής ηχητικού σήματος και κυμαίνεται από 20 Hz μέχρι 20.000 Hz. Το δεύτερο σήμα που συγκρίνεται είναι ένα τριγωνικό σήμα, το οποίο πρέπει να είναι υψηλής συχνότητας, τουλάχιστον διπλάσιας από τη μέγιστη συχνότητα που μπορεί να φτάσει το ηχητικό σήμα. Ο λόγος ύπαρξης της μεγάλης συχνότητας, είναι για να μπορέσει η τελική έξοδος να έχει μεγάλη δειγματοληψία, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η παραμόρφωση του ηχητικού σήματος και η προσθήκη παρασιτικού θορύβου. [6][7]

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, το ηχητικό σήμα συγκρίνεται με το τριγωνικό και παράγεται με αυτόν τον τρόπο το PWM. Όταν το σήμα βρίσκεται στη θετική ημιπερίοδο, η έξοδος PWM κυμαίνεται με κύκλο εργασίας μεγαλύτερο του 50% και όσο η τάση φτάνει τη θετική κορυφή της ημιπεριόδου, τόσο και αυξάνεται ο κύκλος εργασίας. Αντίθετα, όταν το σήμα βρίσκεται στην αρνητική ημιπερίοδο, τότε ο κύκλος εργασίας της εξόδου του συγκριτή, είναι μικρότερος από 50%. Αντίστοιχα και εδώ, όσο η τάση ελαττώνεται, φτάνοντας την κορυφή της αρνητικής ημιπεριόδου, τόσο και ο κύκλος εργασίας του σήματος εξόδου ελαττώνεται. Στην περίπτωση που το σήμα βρίσκεται στο μηδέν, ο κύκλος εργασίας βρίσκεται στο 50%. [6][7]



Σχήμα 2.2: Κυματομορφές ενισχυτή τάξης D

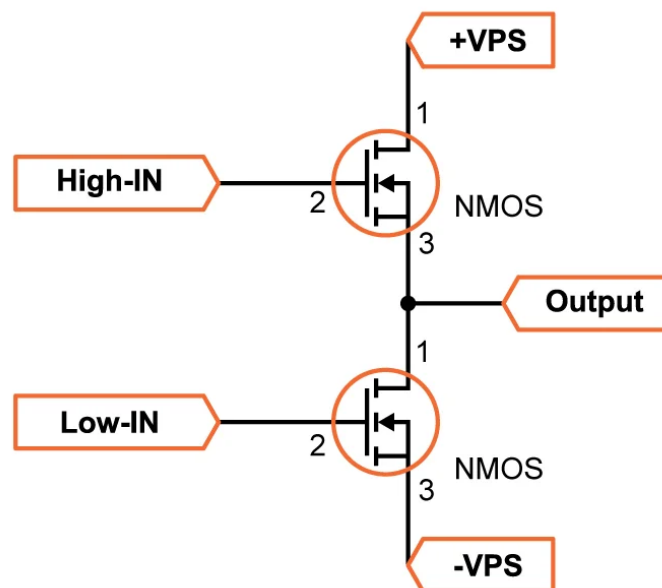
Το ηχητικό σήμα πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων του τριγωνικού σήματος. Στην περίπτωση που το ηχητικό σήμα βγει εκτός των ορίων του τριγωνικού, παρουσιάζεται παραμόρφωση στην έξοδο του συγκριτή. Όταν το ηχητικό σήμα ξεπερνά την τάση του τριγωνικού, η έξοδος του συγκριτή παραμένει στον κόρο, χωρίς όμως να υπάρχει αλλαγή στην κατάσταση. Ο κύκλος εργασίας φθάνει το 100%, με αποτέλεσμα στην έξοδο, να παρουσιάζεται παραμόρφωση λόγω της απουσίας παλμών. Στην πραγματικότητα, ο κύκλος εργασίας του συγκριτή πρέπει να κυμαίνεται εντός των ορίων 1% με 99% ή και λιγότερο, για να αποφεύγονται τέτοιου είδους προβλήματα. [6][7]

2.4 MOSFETS

Το βασικό μέρος που προσφέρει στον ενισχυτή τάξης D την υψηλή αυτή απόδοση, είναι η βαθμίδα της μεταφοράς ισχύος στο φορτίο, δηλαδή στα ηχεία. Για να επιτευχθεί αυτή η λειτουργία, σε αυτή τη βαθμίδα χρησιμοποιούνται MOSFET ισχύος. Με τη διαρρύθμιση Half-Bridge, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, χρησιμοποιούνται δύο MOSFET, που ανοίγουν και κλείνουν αντίστοιχα για τη δημιουργία του τελικού PWM σήματος. [5][6][7]

Η χρήση των MOSFET είναι απαραίτητη. Λόγω της πολύ μικρής εσωτερικής τους αντίστασης, παρουσιάζουν ελάχιστη κατανάλωση ισχύος, κατατάσσοντάς τα κατάλληλα για την υλοποίηση της βαθμίδας οδήγησης του φορτίου. Ακόμα, μπορούν να φτάσουν μεγάλες ταχύτητες στη διακοπτική τους λειτουργία, με τη δυνατότητα να οδηγούνται από λογικά σήματα της τάξης TTL. Όμως, με βάση την κατασκευαστική τους διαδικασία, δημιουργείται μια μικρή χωρητικότητα στην πύλη των MOSFET. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα σε πολύ μεγάλες ταχύτητες λειτουργίας. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει σωστή πηγή για την οδήγηση των πυλών των MOSFET, περιορίζεται η μεταφορά ισχύος από την πηγή στο φορτίο, επειδή ο εσωτερικός πυκνωτής που δημιουργείται, δεν προλαβαίνει να φορτίσει, με αποτέλεσμα να μην άγει πλήρως το MOSFET. [6][7][8]

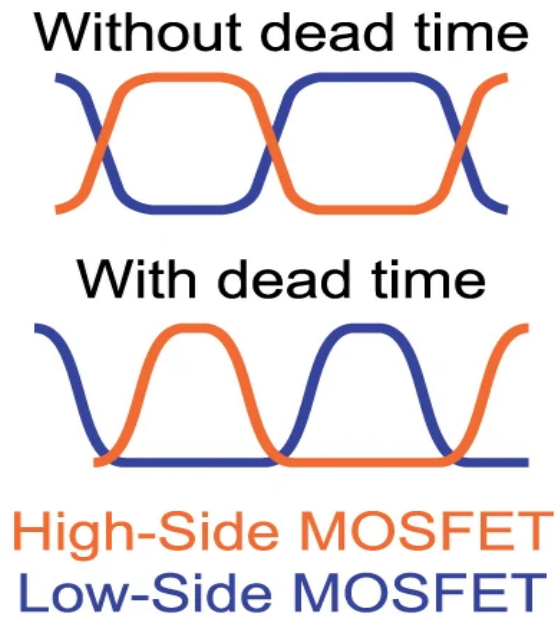
Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται MOSFET Drivers, δηλαδή έτοιμα ολοκληρωμένα κυκλώματα, που οδηγούν τις πύλες των MOSFET. Οι Drivers προσφέρουν στις πύλες των MOSFET το επαρκές ρεύμα που χρειάζονται, εξαλείφοντας με αυτό τον τρόπο το χρόνο φόρτισης των πυκνωτών, αναγκάζοντας την ακαριαία αλλαγή της κατάστασής τους.



Σχήμα 2.3: Διάταξη βαθμίδας MOSFETS

Μια ακόμη λειτουργία που προσφέρουν οι Drivers στο κύκλωμα, είναι η πρόσθεση του νεκρού χρόνου (Dead Time). Επειδή τα MOSFET οδηγούνται από δύο παλμούς που είναι αντίθετοι μεταξύ τους, όταν αλλάζει η κατάσταση τους, υπάρχει περίπτωση να είναι και τα δύο MOSFET ανοιχτά ταυτόχρονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το βραχυκύκλωμα της πηγής τροφοδοσίας με τη γείωση, επιτρέποντας έτσι να περάσει ένα πολύ μεγάλο ρεύμα διαμέσου των ημιαγωγών, μειώνοντας την απόδοση του κυκλώματος

και προκαλώντας βλάβες. Με την παρουσίαση του νεκρού χρόνου στους παλμούς οδήγησης, δημιουργείται μια καθυστέρηση στην αλλαγή κατάστασης των MOSFET, βεβαιώνοντας τη σωστή και την ασφαλή λειτουργία του κυκλώματος οδήγησης. [6][7][8]

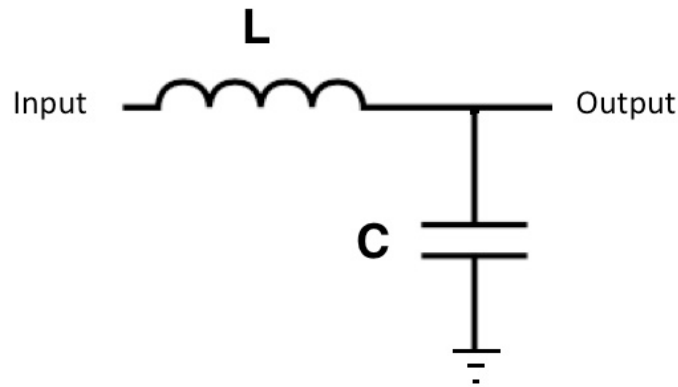


Σχήμα 2.4: Κυματομορφές νεκρού χρόνου

2.5 Low pass filter

Το τελευταίο κομμάτι στη σχεδίαση ενός ενισχυτή τάξης D, είναι ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων. Ένα τόσο απλό κομμάτι κυκλώματος μπροστά στην περίπλοκη σχεδίαση του ενισχυτή τάξης D, αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια του. Ο κύριος σκοπός του φίλτρου είναι η εξαγωγή του ηχητικού σήματος μέσα από το σήμα υψηλών συχνοτήτων PWM που παράγεται στην έξοδο.

Ο υπολογισμός του φίλτρου, είναι απαραίτητο να γίνεται με σωστό τρόπο και με μεγάλη ακρίβεια λόγω της επίπτωσης που έχει στα μέρη που αφορούν το μέγεθος, το κόστος και ειδικότερα, το θόρυβο που μπορεί να προσθέσει στο υπόλοιπο κύκλωμα. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν, στη σχεδίαση ενός τέτοιου ενισχυτή, προτιμάται συχνά η επιλογή, ενός απλού φίλτρου Second-Order LC Low-Pass Filter, όπως φαίνεται και στο σχέδιο (Εικόνα 10).[6][7][8]



Σχήμα 2.5: Χαμηλοπερατό φίλτρο LC

Ακόμα και ένα τόσο απλό φίλτρο LC, μπορεί να προσθέσει στο κύκλωμα αρκετό θόρυβο. Το σημαντικότερο κομμάτι στη σχεδίαση του φίλτρου είναι το πηνίο. Ο σωστός υπολογισμός της τιμής του πηνίου, όσο και τα χαρακτηριστικά του, όπως είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να περάσει μέσα από αυτό, είναι αναγκαία για την ομαλή λειτουργία της εξόδου. Στην περίπτωση που το ρεύμα διαρροής, ξεπεράσει το ανώτατο όριο του πηνίου, δημιουργείται ένα φαινόμενο δραστικής μείωσης της αυτεπαγωγής του πηνίου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί τα μεγάλα ρεύματα επηρεάζουν την μαγνητική ενέργεια του πηνίου.[6][7][8]

2.6 Επίλογος

Ο ενισχυτής τάξης D αποτελείται από διάφορες βαθμίδες. Με τη σύγκριση του τριγωνικού σήματος και του ηχητικού, παράγεται ένα PWM σήμα με υψηλή συχνότητα, που αργότερα θα οδηγήσει τις πύλες των MOSFET ισχύος για την παραγωγή του ενισχυμένου σήματος. Το τελικό στάδιο, είναι ο διαχωρισμός του πλέον, ενισχυμένου ηχητικού σήματος, από το PWM σήμα υψηλών συχνοτήτων, με τη βοήθεια ενός φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων. Η σχεδίαση ενός ενισχυτή τάξης D, απαιτεί σωστές τεχνικές και μεγάλη ακρίβεια, λόγω της δημιουργίας του θορύβου που προκαλείται στο ηλεκτρονικό κύκλωμα από τα διακοπτικά εξαρτήματα

Κεφάλαιο 3ο: Σχεδιασμός Κυκλώματος

3.1 Εισαγωγή

Μετά τη μελέτη λειτουργίας του ενισχυτή τάξης D που είναι και το κύριο μέρος της παρούσας πτυχιακής εργασίας, ακολουθεί το κεφάλαιο της θεωρητικής σχεδίασης του κυκλώματος. Το κύκλωμα σχεδίασης του ενισχυτή τάξης D υλοποιείται με τη σύγκριση των βασικών σημάτων, του ηχητικού, που είναι και το κύριο σήμα ενίσχυσης και του τριγωνικού. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση του κυκλώματος ακολουθούν τις τιμές του εμπορίου και οι θεωρητικοί υπολογισμοί υλοποιούνται για την πιο σωστή λειτουργία του κυκλώματος.

3.2 Διάγραμμα κυκλώματος

Στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το τελικό σύστημα σχεδίασης της παρούσας εργασίας. Το κύκλωμα περιλαμβάνει τις μπαταρίες, το σύστημα τροφοδοσίας PSU (Power Supply Unit), τη γεννήτρια τριγωνικού σήματος, τη μεταφορά και αναπαραγωγή του ηχητικού σήματος από την προσωπική συσκευή στο κύκλωμα με Bluetooth μέσω ενός μικροελεγκτή, ένα κύκλωμα επεξεργασίας του ηχητικού σήματος, και τέλος το κύριο κύκλωμα του ενισχυτή τάξης D.

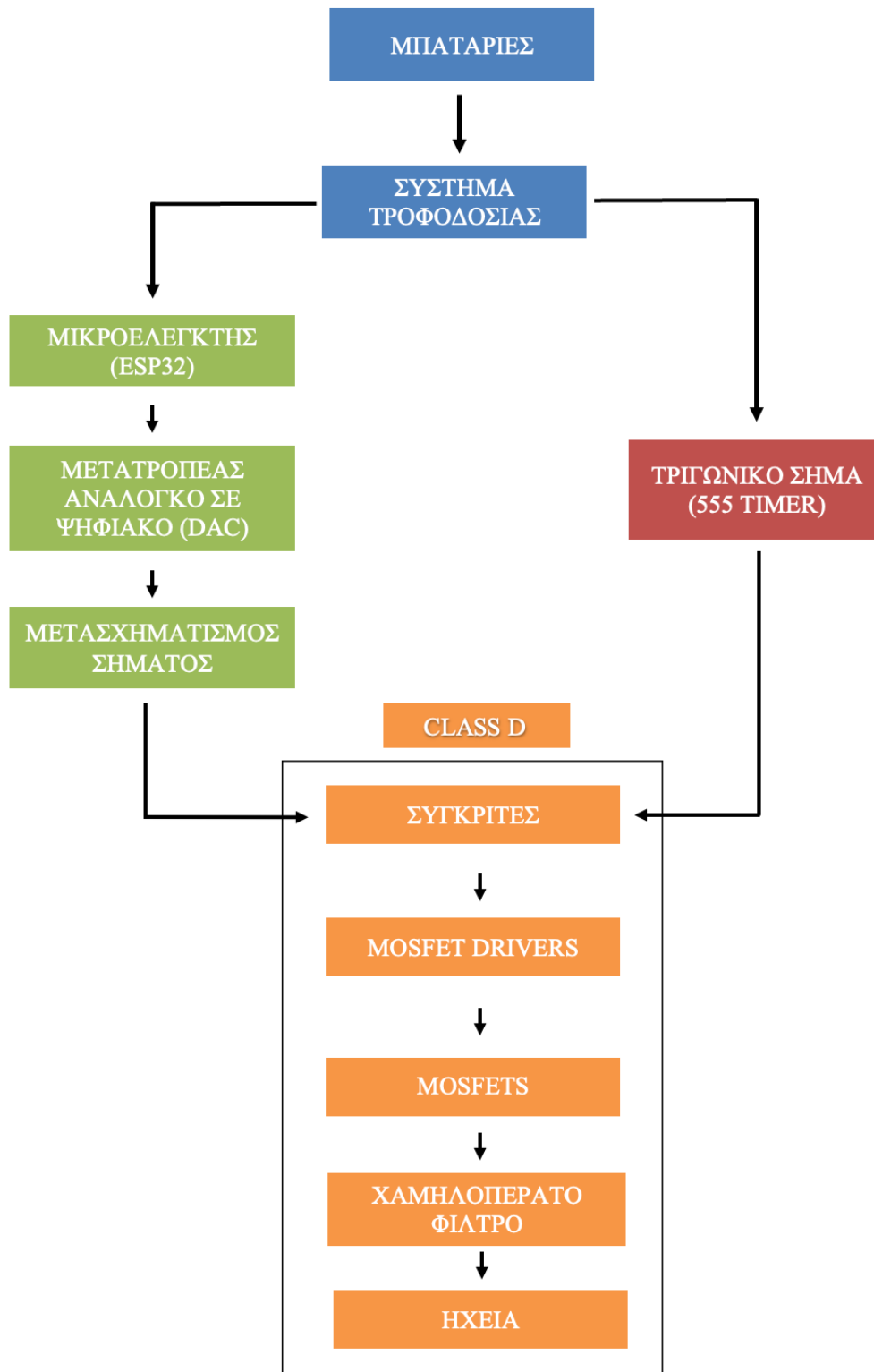
Η μεταφορά του ηχητικού σήματος γίνεται μέσω Bluetooth από τη συσκευή αναπαραγωγής, ασύρματα, μέσω του μικροελεγκτή ESP32. Με το πρωτόκολλο επικοινωνίας I2S, ο ESP32 επικοινωνεί με ένα εξωτερικό DAC (Digital to Analog Converter). Με τον τρόπο αυτό το ηχητικό σήμα μετατρέπεται από ψηφιακό σε αναλογικό και έπειτα περνά σε μία βαθμίδα μετασχηματισμού.

Το κύκλωμα γεννήτριας του τριγωνικού σήματος γίνεται με έναν 555 Timer. Το παραγόμενο τριγωνικό σήμα υψηλής συχνότητας εισέρχεται στην αναστρέφουσα και στη μη αναστρέφουσα είσοδο των συγκριτών της επόμενης βαθμίδας σε κάθε ένα από τα δύο κανάλια αντίστοιχα. Το ηχητικό σήμα πρέπει να καλύπτεται εντελώς από το τριγωνικό σήμα στις εισόδους των συγκριτών, για να μπορεί να συμπεριληφθεί όλη η πληροφορία του σήματος και να αποφευχθεί η παραμόρφωση του ήχου. Ο μετασχηματισμός της τάσης επομένως, γίνεται για τη σωστή ενσωμάτωση του σήματος αυτού στο τριγωνικό σήμα.

Έπειτα, μετά τη σύγκριση του ηχητικού με το τριγωνικό σήμα, παράγεται στην έξοδο των συγκριτών το PWM σήμα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σε κάθε κανάλι υπάρχουν δύο συγκριτές, ένας με συνδεσμολογία αναστρέφουσας και ένας με συνδεσμολογία μη αναστρέφουσας εξόδου. Επομένως, στην έξοδο παράγονται δύο παρόμοια σήματα PWM, τα οποία είναι αντίστροφα μεταξύ τους.

Μετά τους συγκριτές, τα PWM εισέρχονται στην επόμενη βαθμίδα, στον MOSFET Driver. Ο Driver είναι ένας ανά κανάλι και είναι υπεύθυνος για την οδήγηση της βαθμίδας ισχύος των MOSFET, προσφέροντας επαρκές ρεύμα για την ενεργοποίηση των πυλών των MOSFET και για την προσθήκη του Dead Time, με σκοπό την αποφυγή του βραχυκυκλώματος της εξόδου.

Στη βαθμίδα ισχύος, υπάρχουν δύο N- Channel MOSFET ανά κανάλι, τα οποία οδηγούνται από τους Driver. Με τη διακοπτική τους λειτουργία παράγουν το πλέον ενισχυμένο σήμα PWM. Το σήμα PWM έχει ως τάση κορυφής την πηγή τροφοδοσίας και εμπεριέχει το αρχικό ηχητικό σήμα. Τέλος, γίνεται η εξαγωγή του ηχητικού σήματος από το PWM σήμα υψηλών συχνοτήτων με τη βοήθεια ενός LC Low-Pass Filter και μέσω τερματικών κλεμών οδηγείται το σήμα στα ηχεία.



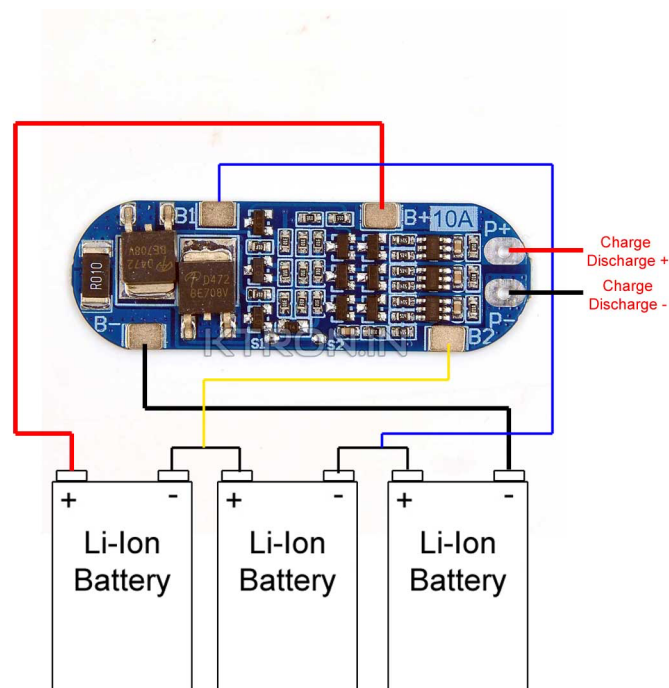
Σχήμα 3.1: Τα μέρη που αποτελείται το κύκλωμα σχεδίασης

3.3 Μπαταρίες (Batteries)

Για να μπορέσει το σύστημα να είναι φορητό, γίνεται η χρήση εξωτερικών μπαταριών. Για τη δημιουργία του Battery Pack χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Ion) τύπου 28650. Η τάση εξόδου μιας μεμονωμένης μπαταρίας είναι στα 4.2 V και η χωρητικότητα είναι στα 8.800 mAh. Για να δημιουργηθεί η τάση επιλογής λειτουργίας του συστήματος, κοντά στα 12 V, γίνεται η συνδεσμολογία των μπαταριών με τη μορφή 3S1P (3 Series – 1 Parallel). Με την τοποθέτηση τριών μπαταριών σε σειρά μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, επιτυγχάνεται η τάση τροφοδοσίας.

$$VB = V_{B1} + V_{B2} + V_{B3} = 4.2 + 4.2 + 4.2 = 12.6 V \quad (3.1)$$

Για τη σωστή φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών γίνεται η χρήση ενός εξωτερικού κυκλώματος διαχείρισης ενέργειας μπαταριών BMS (Battery Management System). Ρόλος αυτού του ηλεκτρονικού κυκλώματος είναι να κρατά την τάση κάθε μπαταρίας στο ίδιο επίπεδο. Ακόμα, κατά την φόρτιση των μπαταριών, εξασφαλίζει την ομοιόμορφη διανομή της ενέργειας και τις προστατεύει από υπερφόρτωση, πέρα από την ονομαστική τους τάση. Κατά την εκφόρτιση, οι μπαταρίες εκφορτίζονται με τον ίδιο ρυθμό η κάθε μια και προστατεύονται από υπερεκφόρτιση. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζονται, η ομαλή λειτουργία όλου του κυκλώματος από τυχόν αστάθειες και η διάρκεια ζωής των μπαταριών. Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η συνδεσμολογία των μπαταριών, με το κύκλωμα προστασίας και διαχείρισης.



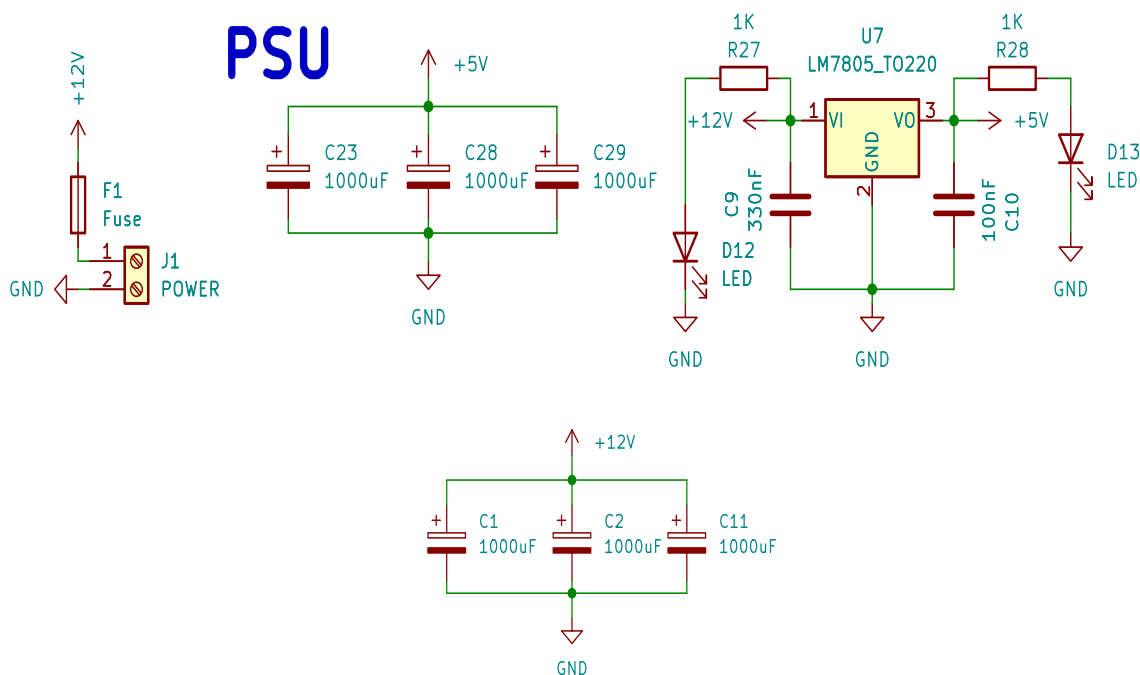
Σχήμα 3.2: Συνδεσμολογία μπαταριών με το BMS

3.4 Σύστημα Τροφοδοσίας (PSU/Power Supply Unit)

Η τροφοδοσία του κυκλώματος γίνεται μέσω της κλέμας J1. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από εξωτερικό σύστημα μπαταριών, που αναλύεται σε επόμενο υποκεφάλαιο. Η τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος είναι στα 12V και μετά την είσοδο της κλέμας περνά μέσα από μια κεντρική ασφάλεια της τάξης των 7.5A για την αποφυγή βλάβης από βραχυκύκλωμα, αλλά και για προστασία σε περίπτωση μεγάλου φορτίου.

Τα 12V είναι υπεύθυνα για την τροφοδότηση του φορτίου στην έξοδο των MOSFET αλλά και για την τροφοδοσία μερικών εξαρτημάτων. Λόγω των υψηλών συχνοτήτων, στο κύκλωμα δημιουργείται θόρυβος, οπότε προστίθενται τρεις ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές C1, C2 και C3 στην είσοδο του κυκλώματος της τάξης των 1000uF στα 63 VDC. Οι πυκνωτές προσφέρουν σταθερότητα στο κύκλωμα και λειτουργούν ως αποθήκες ενέργειας σε περίπτωση που υπάρχει απαίτηση και η τροφοδοσία δεν μπορεί να ανταπεξέλθει. Τα IC (Integrated Circuit) και ο μικροελεγκτής, τροφοδοτούνται από τάση των 5V. Για την δημιουργία των 5V, χρησιμοποιείται ο Voltage Regulator (Σταθεροποιητής Τάσης) LM7805. Με βάση τις προδιαγραφές του Datasheet προστίθενται στο κύκλωμα οι πυκνωτές C9 στην είσοδο του IC και C10 στην έξοδο του, με τιμές 330nF και 100nF αντίστοιχα. Ακόμα, προστίθενται στο κύκλωμα και δύο LED (Light Emitting Diode) σε συνδυασμό με τις αντιστάσεις R27 και R28 στο 1k Ohm για τον περιορισμό του ρεύματος, με σκοπό τον οπτικό έλεγχο του κυκλώματος.

Το LM7805 είναι υπεύθυνο για τη σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας στα 5V. Όπως αναφέρεται παραπάνω, τα IC του κυκλώματος τροφοδοτούνται από την τάση εξόδου του Voltage Regulator. Με βάση το Datasheet του κατασκευαστή, το LM7805 μπορεί να προσφέρει μέχρι και 1.5A συνεχόμενο ρεύμα στην έξοδο. Τα IC που τροφοδοτούνται από τον Voltage Regulator καταναλώνουν ρεύμα της τάξης των mA, αφήνοντας μεγάλο ποσοστό της ισχύος του Regulator αχρησιμοποίητη. Επομένως, η επιλογή του συγκεκριμένου IC είναι αρκετή για τη σωστή τροφοδοσία του κυκλώματος, επιτρέποντας παράλληλα την τροφοδοσία εξαρτημάτων, μελλοντικής προσθήκης.



Σχήμα 3.3: Κύκλωμα τροφοδοσίας

3.5 Γεννήτρια Τριγωνικού Σήματος (555 Timer)

Η παραγωγή του τριγωνικού σήματος προέρχεται από το IC 555 Timer [11]. Ο 555 έχει τέτοια συνδεσμολογία, που του επιτρέπει να δημιουργεί κύκλους εργασίας, χωρίς να υπάρχει κάποιο εξωτερικό Triggering. Για την υλοποίηση του κυκλώματος χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα RC, που φορτίζει και εκφορτίζει έναν πυκνωτή, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο το τριγωνικό σήμα.

Όταν το κύκλωμα τροφοδοτείται με τάση 5V, ξεκινά η διαδικασία φόρτισης του πυκνωτή C24 μέσω της αντίστασης R13. Κατασκευαστικά, ο 555 έχει δύο κατώφλια λόγω των εσωτερικών αντιστάσεων, που δημιουργούν αντίστοιχα δύο διαιρέτες τάσης. Οι τιμές των κατωφλίων είναι το 1/3 και τα 2/3 της τάσης τροφοδοσίας.

Επομένως στην περίπτωση του παρόντος κυκλώματος ισχύει:

$$V_{1/3} = V_{cc} * \frac{1}{3} = 5 * \frac{1}{3} = 1,666 V \quad (3.2)$$

$$V_{2/3} = V_{cc} * \frac{2}{3} = 5 * \frac{2}{3} = 3,333 V \quad (3.3)$$

Όταν η τάση του πυκνωτή C24 φθάσει την τιμή του άνω κατωφλίου της τάσης τροφοδοσίας, δηλαδή τα 3,333V, τότε αλλάζει η κατάσταση του 555 και ξεκινάει η εκφόρτωση του. Αντίστοιχα, όταν η τάση του πυκνωτή φθάσει το κάτω κατώφλι της τάσης τροφοδοσίας, δηλαδή τα 1,666V, τότε η κατάσταση αλλάζει με τον ίδιο τρόπο και ξανά ξεκινάει η φόρτιση του. Αυτό το φαινόμενο επαναλαμβάνεται συνεχώς, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο το τριγωνικό σήμα που κυμαίνεται μεταξύ των ορίων 1/3 και 2/3 της τάσης τροφοδοσίας, με πλάτος τάσης 1.667 Vp -p.

Για τη σωστή λειτουργία του υπολοίπου κυκλώματος, πρέπει η συχνότητα του τριγωνικού σήματος να είναι αρκετά μεγάλη. Η ρύθμιση της συχνότητας γίνεται μέσω του υπολογισμού του κυκλώματος RC. Για να υπολογιστεί η συχνότητα λειτουργίας του πρέπει να υπολογιστεί ο χρόνος φόρτισης και εκφόρτωσης του πυκνωτή.

Επομένως το ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή είναι:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_{13}} = \frac{5}{2k\Omega} = 2.5mA \quad (3.4)$$

Το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή είναι:

$$I_D = \frac{V_{CC}}{R_{13}} = \frac{5}{2k\Omega} = 2.5mA \quad (3.5)$$

Κεφάλαιο 3

Ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή είναι:

$$t_c = \frac{V_{CC} * C_{24}}{I_C} = \frac{5 * 1nF}{2.5mA} = 2\mu S \quad (3.6)$$

Ο χρόνος εκφόρτισης του πυκνωτή είναι:

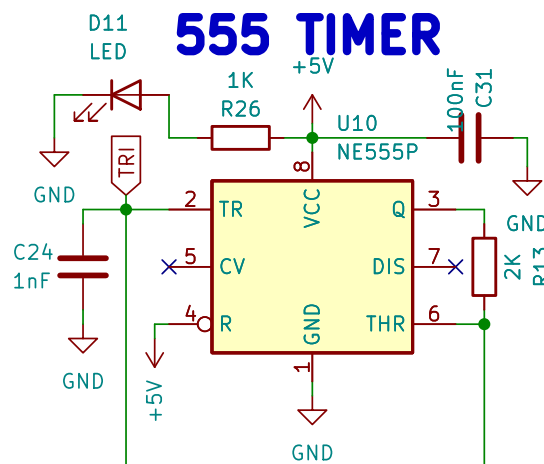
$$t_D = \frac{V_{CC} * C_{24}}{I_D} = \frac{5 * 1nF}{2.5mA} = 2\mu S \quad (3.7)$$

Επομένως, η περίοδος και η συχνότητα του τριγωνικού σήματος είναι:

$$T = t_c + t_D = 2\mu S + 2\mu S = 4\mu S \quad (3.8)$$

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{4\mu S} = 250kHz \quad (3.9)$$

Το τριγωνικό σήμα παράγεται από τον 555 Timer με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά και εισέρχεται στην επόμενη βαθμίδα των συγκριτών. Τέλος, στην τροφοδοσία του 555 προστίθεται ένας αντιθρομβικός πυκνωτής της τάξης των 100nF και ένα LED για οπτικό έλεγχο.



Σχήμα 3.4: Κύκλωμα γεννήτριας τριγωνικού σήματος

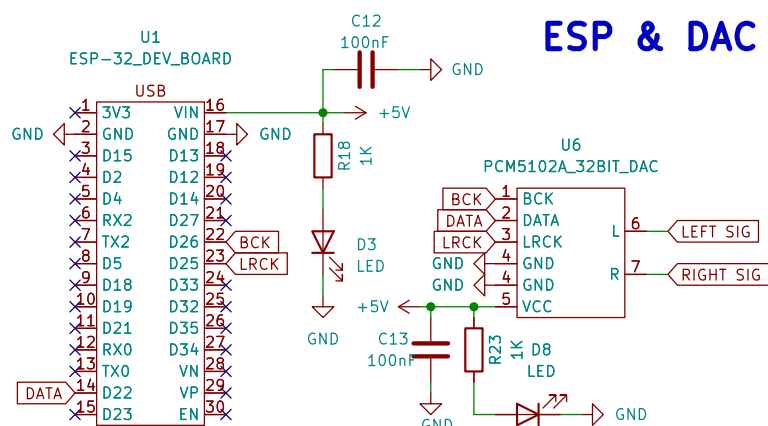
3.6 Μικροελεγκτής & Μετατροπέας αναλογικό σε ψηφιακό (ESP32 & DAC/Digital to Analog Converter)

Για τη μεταφορά του ηχητικού σήματος από την προσωπική συσκευή αναπαραγωγής στο κύκλωμα ενίσχυσης, χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής ESP32 [9]. Η βασική λειτουργία του ESP32 είναι να επικοινωνεί με τη συσκευή αναπαραγωγής μέσω Bluetooth και να μετατρέπει το ψηφιακό σήμα σε αναλογικό. Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή γίνεται λόγω του ενσωματωμένου Bluetooth, χωρίς να υπάρχει ανάγκη προσθήκης κάποιου επιπλέον Module και της δυνατότητας προγραμματισμού, μέσω του λογισμικού Arduino IDE.

Στο Σχήμα 3.5 αποτυπώνεται ο κώδικας του ESP32. Με τη χρήση της βιβλιοθήκης "BluetoothA2DPSink.h", ξεκινά η επικοινωνία Bluetooth και τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω της συσκευής στον ESP32 και έπειτα στον εξωτερικό DAC. Μέσω του κώδικα, γίνεται αρχικοποίηση ορισμένων παραμέτρων όπως το Sample Rate, το Bit Rate, γίνεται επιλογή των ακροδεκτών του μικροελεγκτή, δίνεται ονομασία στην συσκευή Bluetooth και ορίζεται ο τρόπος λειτουργίας του ανάλογα με την εφαρμογή.

Ο ESP32, κατασκευαστικά προσφέρει έναν DAC (Digital to Analog Converter), με ανάλυση 8-bit. Με τη χρήση του ενσωματωμένου αυτού μετατροπέα το ηχητικό σήμα θα παρουσίαζε μεγάλη παραμόρφωση και η ποιότητα του ήχου θα ήταν χαμηλή. Για το λόγο αυτό, στο κύκλωμα χρησιμοποιείται ένας εξωτερικός DAC με ανάλυση 32-bit. Η μεταφορά των δεδομένων γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου I2S (Inter-IC Sound). Το I2S είναι ένα σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων και την επικοινωνία ψηφιακών συσκευών αναπαραγωγής ήχου.

Ο PCM5102A [10] είναι ο DAC που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα του ενισχυτή. Μετά την επικοινωνία του με τον ESP32 και τη μεταφορά δεδομένων, εξάγει το αναλογικό σήμα σε αριστερό και δεξί κανάλι. Με βάση το Datasheet του PCM5102A η αναλογική έξοδος μπορεί να παράγει σήμα που φτάνει τα 2.1 Vrms. Επομένως το IC μπορεί να παράγει σήματα της τάξης των 5.93 Vp -p, με 2.965 Vp στην θετική ημιπερίοδο και -2.965 Vp στην αρνητική ημιπερίοδο του σήματος. Για να μπορέσει το ηχητικό σήμα να συγκριθεί με το τριγωνικό και να παραχθεί το απαράμορφο PWM σήμα, απαιτείται μετασχηματισμός της τάσης του ηχητικού σήματος, για να βρίσκεται το ηχητικό σήμα μέσα στα όρια του τριγωνικού.



Σχήμα 3.5: Κύκλωμα ESP32 και DAC

```

#include "BluetoothA2DPSink.h"

BluetoothA2DPSink a2dp_sink;

void setup()
{
  static i2s_config_t i2s_config = {
    .mode = (i2s_mode_t) (I2S_MODE_MASTER | I2S_MODE_TX),
    .sample_rate = 44100, // updated automatically by A2DP
    .bits_per_sample = (i2s_bits_per_sample_t)32,
    .channel_format = I2S_CHANNEL_FMT_RIGHT_LEFT,
    .communication_format = (i2s_comm_format_t)
    (I2S_COMM_FORMAT_STAND_I2S),
    .intr_alloc_flags = 0, // default interrupt priority
    .dma_buf_count = 8,
    .dma_buf_len = 64,
    .use_apll = true,
    .tx_desc_auto_clear = true // avoiding noise in case of data
    unavailability
  };

  i2s_pin_config_t my_pin_config = {
    .bck_io_num = 26,
    .ws_io_num = 25,
    .data_out_num = 22,
    .data_in_num = I2S_PIN_NO_CHANGE
  };

  a2dp_sink.set_pin_config(my_pin_config);
  a2dp_sink.set_i2s_config(i2s_config);
  a2dp_sink.start("CLASS D");
}

void loop() {
}

```

Σχήμα 3.6: Κώδικας υλοποίησης ESP32

3.7 Μετασχηματισμός τάσης ηχητικού σήματος (Signal Shift)

Όπως αναφέρεται παραπάνω, η τάση του τριγωνικού σήματος κυμαίνεται στα όρια του 1.666V μέχρι 3.333V. Η αναλογική έξοδος του ηχητικού σήματος από τον DAC κυμαίνεται με πλάτος τάσης 5.93 Vp-p. Για τη σωστή σύγκριση του ηχητικού σήματος με το τριγωνικό στην επόμενη βαθμίδα, πρέπει να γίνει μετασχηματισμός της τάσης του ηχητικού σήματος, για να κυμαίνεται εντός των ορίων του τριγωνικού.

Για το μετασχηματισμό του σήματος γίνεται χρήση του τελεστικού ενισχυτή TLC272 [12]. Ο TLC272 είναι ένα IC που περιλαμβάνει δύο τελεστικούς ενισχυτές σε ένα ολοκληρωμένο. Λόγω της ανάγκης μετασχηματισμού δύο σημάτων, για το αριστερό και δεξί κανάλι αντίστοιχα, είναι μια πρακτική επιλογή η χρήση του. Η συνδεσμολογία των τελεστικών είναι μη -αναστρέφουσα με εξασθένιση του σήματος και έχουν την παρακάτω μορφή.

$$V_{OUT} = V_{IN} * A + V_{REF} \quad (3.10)$$

Για την αποφυγή της παραμόρφωσης του σήματος PWM πρέπει το ηχητικό σήμα να έχει πλάτος μικρότερο ή ίσο από το πλάτος του τριγωνικού σήματος, δηλαδή να έχει πλάτος μικρότερο ή ίσο με 1.7 V. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα γίνεται υπολογισμός του ποσοστού ενίσχυσης των τελεστικών ενισχυτών.

$$A = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{1.7}{5.93} = 0.2866 \quad (3.11)$$

Με τη χρήση των αντιστάσεων αναφοράς R16 και R17 στα 100kΩ, γίνεται ρύθμιση των ποτενσιομέτρων G1 και G2 στην παρακάτω αντίσταση, για τη δημιουργία του ποσοστού ενίσχυσης των τελεστικών ενισχυτών.

$$A = \frac{G1}{R17} \Rightarrow G1 = 28.66 \text{ k}\Omega \quad (3.12)$$

Σε συνδυασμό με την εξασθένιση του σήματος, το αναλογικό ηχητικό σήμα που παράγεται από τον DAC έχει και αρνητική ημιπερίοδο. Επειδή η τροφοδοσία του κυκλώματος είναι μονοπολική, πρέπει να προστεθεί στο ηχητικό σήμα μια DC συνιστώσα. Με τη συνδεσμολογία ενός διαιρέτη τάσης επιτυγχάνεται η δημιουργία της DC τάσης που προστίθεται στο ηχητικό σήμα. Καθώς η τάση του τριγωνικού σήματος ξεκινά από τα 1.666V, η τάση του ηχητικού σήματος πρέπει να κυμαίνεται με τάση αναφοράς :

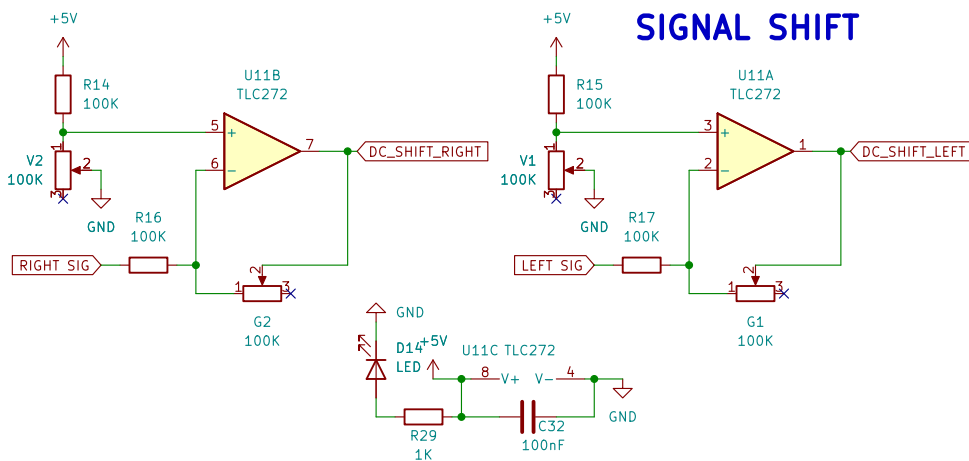
Κεφάλαιο 3

$$V_{REF} = 1.666 + \frac{V_{P-P}}{2} = 1.666 + 0.85 = 2.516 V \quad (3.13)$$

Με τη χρήση αντιστάσεων αναφοράς R14 και R15 στα 47kΩ, ρυθμίζονται τα ποτενσιόμετρα V1 και V2 στην παρακάτω αντίσταση, για τη δημιουργία της τάσης αναφοράς.

$$V_{REF} = V_{CC} * \frac{V2}{V1} \Rightarrow V2 = 47.6 k\Omega \quad (3.14)$$

Τα δύο κυκλώματα είναι πανομοιότυπα, οπότε οι τιμές των ποτενσιομέτρων για τη ρύθμιση της τάσης αναφοράς, αλλά και για τη ρύθμιση της ενίσχυσης των τελεστικών είναι ίδιες.



Σχήμα 3.7: Κύκλωμα μετασχηματισμού της τάσης του ηχητικού σήματος

3.8 Ενισχυτής τάξης D

3.8.1 Συγκριτές (Comparators)

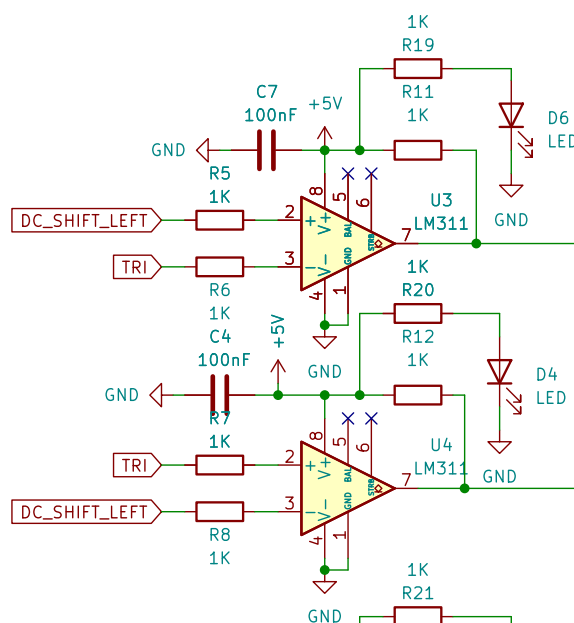
Μετά την ανάλυση των περιφερειακών κυκλωμάτων, που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του κυκλώματος, σειρά έχει το κυρίως κύκλωμα του ενισχυτή τάξης D, που αποτελείται από τους συγκριτές, τους MOSFET Drivers, τα MOSFET ισχύος και τα φίλτρα εξόδου. Η πρώτη βαθμίδα είναι αυτή του Σχήματος 3.8, η βαθμίδα των συγκριτών.

Με τη χρήση δύο τελεστικών ενισχυτών LM311 [13] σε κάθε κανάλι του κυκλώματος, συγκρίνεται το ηχητικό με το τριγωνικό σήμα. Λόγω της χρήσης σήματος, της τάξης των 250kHz, επιλέγεται ο συγκεκριμένος συγκριτής. Η συνδεσμολογία των τελεστικών είναι αναστρέφουσα και μη-αναστρέφουσα, ανάλογα με την είσοδο του ηχητικού σήματος στους τελεστικούς.

Αναλύοντας τη μη -αναστρέφουσα συνδεσμολογία, όταν η τάση του ηχητικού σήματος είναι μεγαλύτερη από την τάση του τριγωνικού, τότε το εσωτερικό τρανζίστορ του τελεστικού U3 βρίσκεται σε αποκοπή και μέσω της pull-up αντίστασης R11 στην έξοδο θα έχουμε 5V, δηλαδή λογικό '1', αφού το ρεύμα θα ρέει από την τροφοδοσία μέσω της pull-up στην έξοδο. Όταν η τάση του ηχητικού σήματος είναι μικρότερη από του τριγωνικού, το εσωτερικό τρανζίστορ στην έξοδο του τελεστικού, βρίσκεται στον κόρο. Αυτό αναγκάζει το ρεύμα να ρέει μέσω της pull-up αντίστασης R11 και να ενώνεται μέσω του τελεστικού στη γείωση του κυκλώματος. Με αυτόν τον τρόπο, στην έξοδο του τελεστικού θα υπάρχει τάση 0V, δηλαδή λογικό '0'.

Στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία, οι δύο αυτές καταστάσεις αναστρέφονται. Επομένως, όταν η τάση του ηχητικού σήματος είναι μεγαλύτερη από του τριγωνικού, στην έξοδο υπάρχει τάση 0V και όταν η τάση του ηχητικού σήματος είναι μικρότερη του τριγωνικού, στην έξοδο θα υπάρχει τάση 5V.

Με αυτή τη συνδεσμολογία, δημιουργούνται δύο PWM σήματα, αντίθετα μεταξύ τους, με συχνότητα 250kHz από το τριγωνικό σήμα και με το ηχητικό να εμπεριέχεται στο σήμα εξόδου. Η παρακάτω συνδεσμολογία είναι του αριστερού καναλιού. Η ίδια συνδεσμολογία, υπάρχει αντίστοιχα και για το δεξί κανάλι.

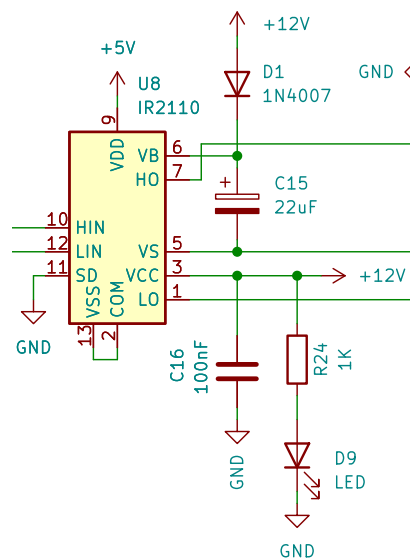


Σχήμα 3.8: Κύκλωμα συγκριτών

3.8.2 Οδηγοί MOSFET (MOSFET Drivers)

Τα δύο σήματα PWM, εισέρχονται στην επόμενη βαθμίδα του κυκλώματος, τους MOSFET Drivers. Το IC που επιλέχθηκε για την οδήγηση των MOSFET εξόδου είναι το IR2110 [14]. Πρόκειται για έναν Driver που είναι κατάλληλος για την ταχύτητα του κυκλώματος, προσφέρει αρκετό ρεύμα για την οδήγηση των MOSFET εξόδου και προσθέτει στα σήματα PWM το νεκρό χρόνο, για την αποφυγή βραχυκυκλώματος της εξόδου.

Το IR2110 μπορεί να τροφοδοτήσει τις πύλες των MOSFET με επαρκές ρεύμα, με βάση το Datasheet, έχει τη δυνατότητα να προσφέρει έως και 2.5A στην έξοδό του και να λειτουργεί ελέγχοντας τάσεις μέχρι και την τάξη των 500V, με τη χρήση λογικών σημάτων TTL (Transistor-Transistor-Logic). Αποτελείται από δύο εισόδους για τα δύο αντίθετα σήματα PWM και έχει ξεχωριστή έξοδο για το κάθε ένα. Η συνδεσμολογία περιλαμβάνει και έναν Bootstrap πυκνωτή C15 με τιμή 22uF, ο οποίος χρησιμοποιείται για να δημιουργεί μεγαλύτερη τάση στην πύλη του High-Side MOSFET από το Drain και με αυτόν τον τρόπο βεβαιώνεται η πλήρης ενεργοποίηση του. Ο πυκνωτής, κατά την διάρκεια της απουσίας παλμού οδήγησης, φορτίζει μέσω της διόδου D1. Όταν δοθεί ο παλμός, εκφορτίζει και αυξάνει την τάση πάνω από την τάση της πηγής στην πύλη του MOSFET, για την πλήρη ενεργοποίηση του.



Σχήμα 3.9: Κύκλωμα MOSFET Driver

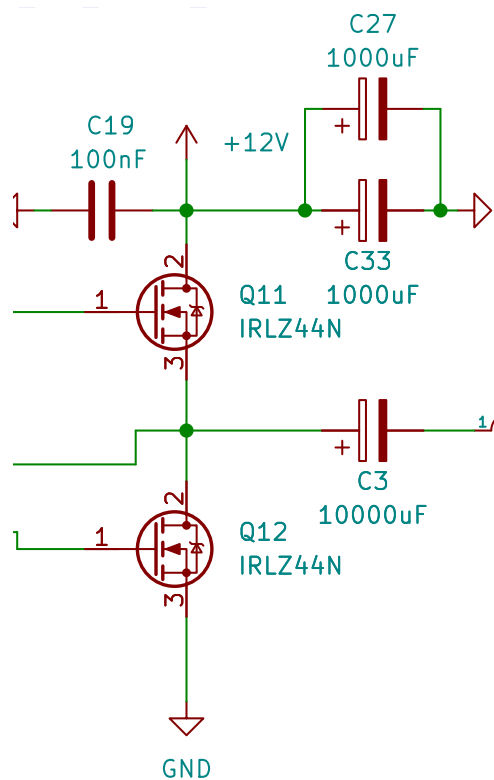
3.8.3 MOSFETS

Η επόμενη βαθμίδα, αποτελείται από τα MOSFET ισχύος. Αυτή η βαθμίδα ευθύνεται για την ενίσχυση του PWM σήματος. Με τη χρήση δύο MOSFET N-Channel IRLZ44N [15] για το κάθε κανάλι αντίστοιχα, γίνεται η μεταφορά του ενισχυμένου σήματος.

Το IRLZ44N είναι ένα N-Channel MOSFET, έχει τη δυνατότητα να οδηγεί σήματα μεγάλης ισχύος, με τη χρήση παλμών TTL. Λόγω της πολύ μικρής εσωτερικής αντίστασης που παρουσιάζει, της τάξης των 0.022Ω , έχει πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του Drain και Source, με αποτέλεσμα να καταναλώνει πολύ λίγη ενέργεια.

Το Q11 είναι το High-Side MOSFET και το Q12 είναι το Low-Side MOSFET. Όταν ο Driver ενεργοποιεί την High-Side έξοδο, στην πύλη του Q11 δημιουργείται τάση μεγαλύτερη αυτής της τροφοδοσίας. Αντίστοιχα στη Low-Side έξοδο του Driver, υπάρχει τάση 0V, άρα στην πύλη του Q12 υπάρχουν 0V. Αυτό αναγκάζει το Q11 να άγει πλήρως και το Q12 να είναι σε αποκοπή. Σε αυτή την κατάσταση, το ρεύμα ρέει από την τροφοδοσία του κυκλώματος μέσω του Q11 και συνεχίζει προς το φορτίο, δηλαδή στην επόμενη βαθμίδα. Αντιθέτως, όταν δηλαδή στο High-Side υπάρχει τάση μικρότερη της τροφοδοσίας και στο Low-Side 12V, το Q11 είναι σε αποκοπή και το Q12 βρίσκεται στον κόρο. Με τον τρόπο αυτό, η ροή του ρεύματος είναι αντίστροφη και ρέει από το φορτίο, μέσω του Q12 στη γείωση.

Για την περίπτωση που η τροφοδοσία του κυκλώματος δεν προσφέρει στο φορτίο το επαρκές ρεύμα που ζητάει, υπάρχουν οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές C27 και C33, που συμπληρώνουν το ρεύμα που χρειάζεται και προσφέρουν σταθερότητα στη λειτουργία της εξόδου.



Σχήμα 3.10: Κύκλωμα MOSFET

3.8.4 Χαμηλοπερατό Φίλτρο (Low-Pass-Filter)

Η τελευταία βαθμίδα του ενισχυτή τάξης D, είναι και μια από τις πιο σημαντικές. Τα φίλτρα εξόδου αποτελούνται από φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων σε διάταξη LC. Το ενισχυμένο PWM σήμα υψηλών συχνοτήτων της τάξης των 250kHz, εμπεριέχει το αρχικό ηχητικό σήμα που προέρχεται από την συσκευή αναπαραγωγής. Αρμοδιότητα του φίλτρου είναι να εξαλείφει τις υψηλές συχνότητες του κυκλώματος και να επιτρέπει μόνο τις χαμηλές.

Το ηχητικό σήμα έχει και θετική, αλλά και αρνητική ημιπερίοδο. Λόγω της απουσίας αρνητικής τροφοδοσίας, το ενισχυμένο ηχητικό σήμα κυμαίνεται μεταξύ της τάσης τροφοδοσίας και της γείωσης. Αυτό προκαλεί επιπλέον κατανάλωση ενέργειας επειδή τα ηχεία έχουν πάντα ζήτηση ρεύματος ακόμα και σε κατάσταση αδράνειας. Για την αποφυγή αυτής της κατάστασης, προστίθεται ο πυκνωτής C3. Η χρήση του παρόντος πυκνωτή, είναι να ακυρώνει την DC συνιστώσα και να μεταφέρει την περιοχή λειτουργίας των ηχείων με τάση αναφοράς τα 0V. Στις κλέμες LT1 και LW1 συνδέεται το φορτίο του αριστερού καναλιού.

Το ανθρώπινο αυτί, είναι ικανό να ακούει μόνο συχνότητες από 20Hz μέχρι 20kHz. Επομένως, οι συχνότητες που είναι πάνω από τα 20kHz, δεν είναι απαραίτητες και προκαλούν μόνο περίσσεια κατανάλωση ενέργειας.

Για τη ρύθμιση του φίλτρου, ορίζεται η συχνότητα για τα -3dB, στα 25kHz. Το βασικό εξάρτημα που χρήζει σωστού υπολογισμού, είναι το πηνίο. Με βάση τη μελέτη κυκλωμάτων από φίλτρα του εμπορίου, εμφανίζονται τιμές του πηνίου στα 10uH. Οπότε, η τιμή του πηνίου επιλέγεται ως 10uH και τοποθετούνται εξαρτήματα που επιτρέπουν τη διέλευση ρεύματος της τάξης των 20A.

Με τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίζεται και η τιμή του πυκνωτή.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C}} \Rightarrow C = \frac{1}{4\pi^2 * (f_c)^2 * L} \Rightarrow \quad (3.15)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * (25kHz)^2 * 10uH} = 4.0528 \mu F$$

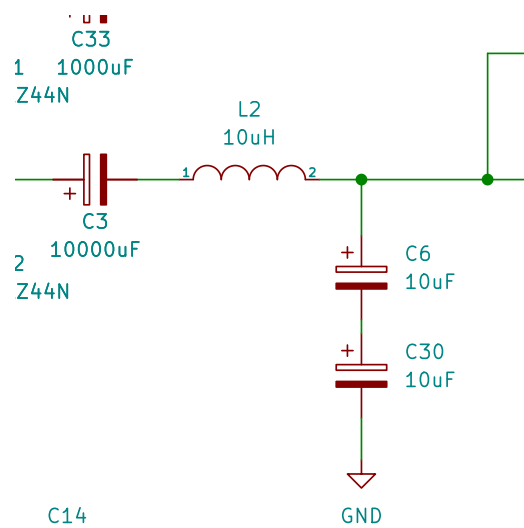
Λόγω της ανάγκης χρήσης πυκνωτών, που είναι ειδικοί για ηχητικό σήμα, γίνεται χρήση δύο πυκνωτών 10uF σε σειρά. Η νέα χωρητικότητα πλέον ορίζεται:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C6} + \frac{1}{C30}} = \frac{1}{\frac{1}{10uF} + \frac{1}{10uF}} = 5 \mu F \quad (3.16)$$

Επομένως η νέα συχνότητα αποκοπής στα -3dB ορίζεται:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10\mu H * 5\mu F}} = 22.5079 \text{ kHz} \quad (3.17)$$

Οι τιμές του Σχήματος 3.11 αναφέρονται στο αριστερό κανάλι του ενισχυτή. Για το δεξί κανάλι υπάρχουν τα ίδια εξαρτήματα με τις ίδιες τιμές.

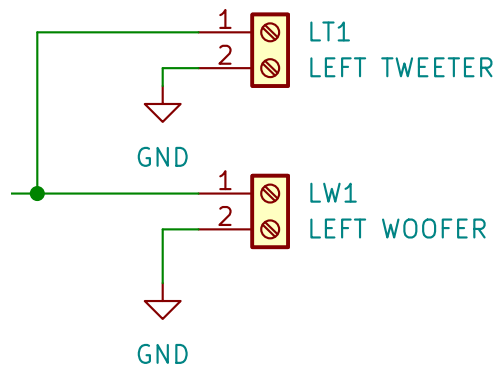


Σχήμα 3.11: Κύκλωμα χαμηλοπερατού φίλτρου LC

3.9 Φορτίο (Load)

Για το φορτίο χρησιμοποιούνται δύο ηχεία και για τα δύο κανάλια του ενισχυτή. Για τις υψηλές συχνότητες χρησιμοποιούνται τα Tweeter και για τις μεσαίες και χαμηλές συχνότητες, τα Midwoofer. Λόγω της μικρής τάσης λειτουργίας στην έξοδο του συστήματος, είναι απαραίτητη η σωστή επιλογή αντίστασης ηχείων. Για να μπορέσει το σύστημα να παρέχει την μεγαλύτερη ισχύ εξόδου, που αυτομάτως συνεπάγεται μεγαλύτερη ένταση ηχητικού σήματος, επιλέγεται η μικρότερη δυνατή αντίσταση όλων των ηχείων στα 4 Ω. Με αυτόν τον τρόπο και με την παράλληλη συνδεσμολογία στην έξοδο του συστήματος, σε κάθε κανάλι υπάρχει αντίσταση ισοδύναμη με:

$$R_{OL} = R_{TWEETER} \parallel R_{MIDWOOFER} = \frac{R_{TWEETER} * R_{MIDWOOFER}}{R_{TWEETER} + R_{MIDWOOFER}} = \frac{4 * 4}{4 + 4} = 2 \Omega \quad (3.18)$$



Σχήμα 3.12: Κλέμες σύνδεσης εξωτερικών ηχείων

3.10 Επίλογος

Το κεφάλαιο των θεωρητικών υπολογισμών αποτελεί το βασικό κομμάτι στη σχεδίαση ενός ολοκληρωμένου συστήματος. Ο σωστός υπολογισμός των εξαρτημάτων προωθεί τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται η σχεδίαση του πραγματικού κυκλώματος με τη χρήση προγράμματος σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Έπειτα, πραγματοποιείται η σχεδίαση της πλακέτας και επιβεβαιώνεται η λειτουργία του κυκλώματος με τις μετρήσεις.

Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση και μετρήσεις

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στη σχεδίαση της πλακέτας και στις μετρήσεις των τιμών του πραγματικού κυκλώματος. Για τη μέτρηση του κυκλώματος, αναπαράγεται ένα ημιτονοειδές ηχητικό σήμα, σε πλήρη ένταση, από την μεριά της συσκευής αναπαραγωγής, της τάξης του 1 kHz και για την τροφοδοτήσή του χρησιμοποιείται εξωτερικό τροφοδοτικό συνεχόμενης τάσης στα 12 VDC.

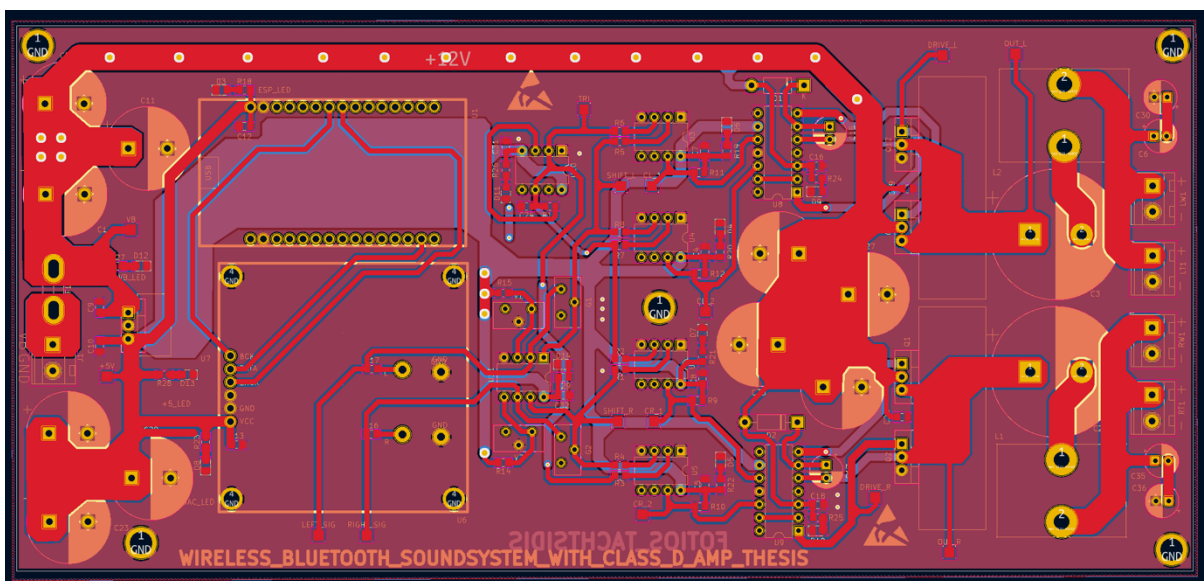
Όλες οι μετρήσεις γίνονται με την χρήση του παλμογράφου DSOX1204G της KEYSIGHT TECHNOLOGIES και με αναφορά ως προς την γείωση (0 V).

4.2 Σχεδίαση PCB

Για τη δημιουργία της πλακέτας PCB, χρησιμοποιείται το σχεδιαστικό πρόγραμμα KiCad. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η σχεδίαση της τελικής πλακέτας του ασύρματου ηχοσυστήματος. Οι κόκκινες χαλκοδιαδρομές, αποτελούν τη μπροστινή όψη της πλακέτας και οι μπλε χαλκοδιαδρομές αποτελούν την πίσω όψη. Για τις χαλκοδιαδρομές των σημάτων στο κέντρο της πλακέτας χρησιμοποιείται πάχος διαδρομής 1 mm, ενώ για τη μεταφορά της ενέργειας στα ολοκληρωμένα και στην τελική έξοδο του κυκλώματος χρησιμοποιείται πάχος χαλκοδιαδρομής της τάξης των 2mm, 4mm και 5mm.

Η σχεδίαση της πλακέτας ξεκινά από την αριστερή πλευρά. Από το σύστημα τροφοδοσίας ξεκινά η ροή του ρεύματος, αμέσως μετά υπάρχουν τα δύο μεγάλα τετράγωνα που στεγάζουν το μικροελεγκτή και το μετατροπέα του ψηφιακού σε αναλογικό σήμα. Στο κέντρο της πλακέτας βρίσκεται το κυρίως κύκλωμα, το κύκλωμα του ενισχυτή τάξης D, που αποτελείται από 8 ολοκληρωμένα κυκλώματα.

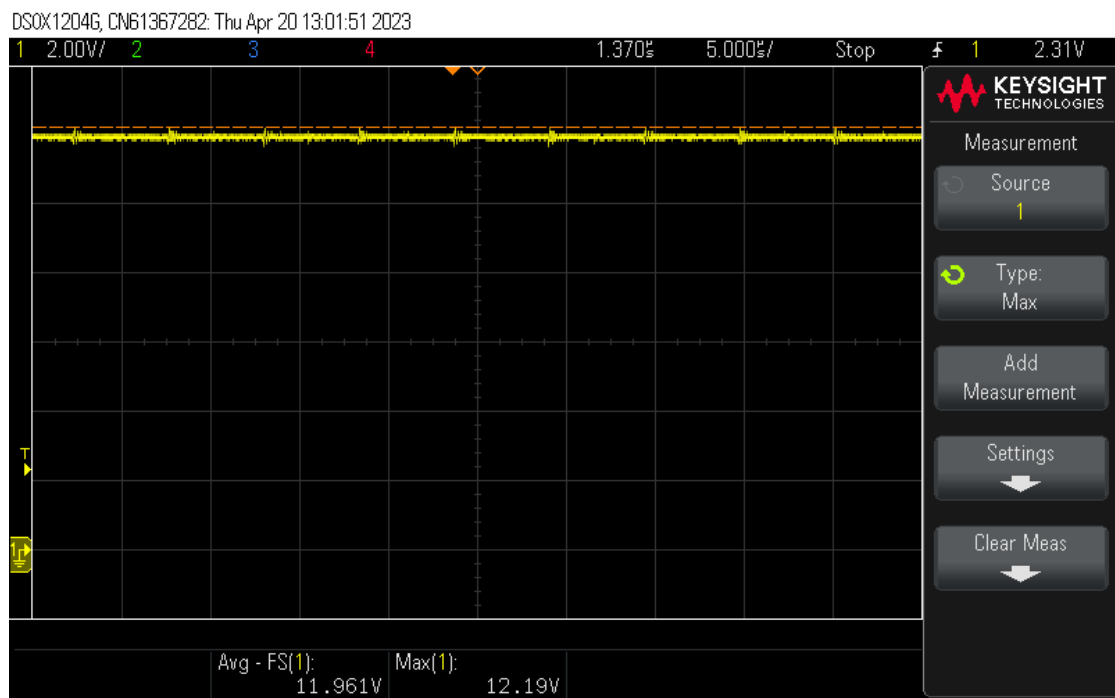
Τα πρώτα δύο ολοκληρωμένα είναι ο 555 Timer, στο οποίο αναπαράγεται το τριγωνικό σήμα και ο TLC272, όπου μετασχηματίζεται το ηχητικό σήμα. Στη συνέχεια, εμφανίζονται οι τέσσερις συγκριτές LM311 που δημιουργούν τα PWM σήματα και ακολούθως, οι δύο Drivers IR2110 που οδηγούν την αμέσως επόμενη βαθμίδα που είναι τα MOSFETS. Στην περιοχή των MOSFETS υπάρχει ελεύθερος χώρος (δύο μεγάλα ορθογώνια παραλληλόγραμμα). Ο χώρος αυτός δίνει την δυνατότητα προσθήκης ψήκτρας στα MOSFET. Τέλος στο δεξί κομμάτι της πλακέτας, βρίσκονται τα φίλτρα της τελικής εξόδου.



Σχήμα 4.1: Πλακέτα σχεδίασης

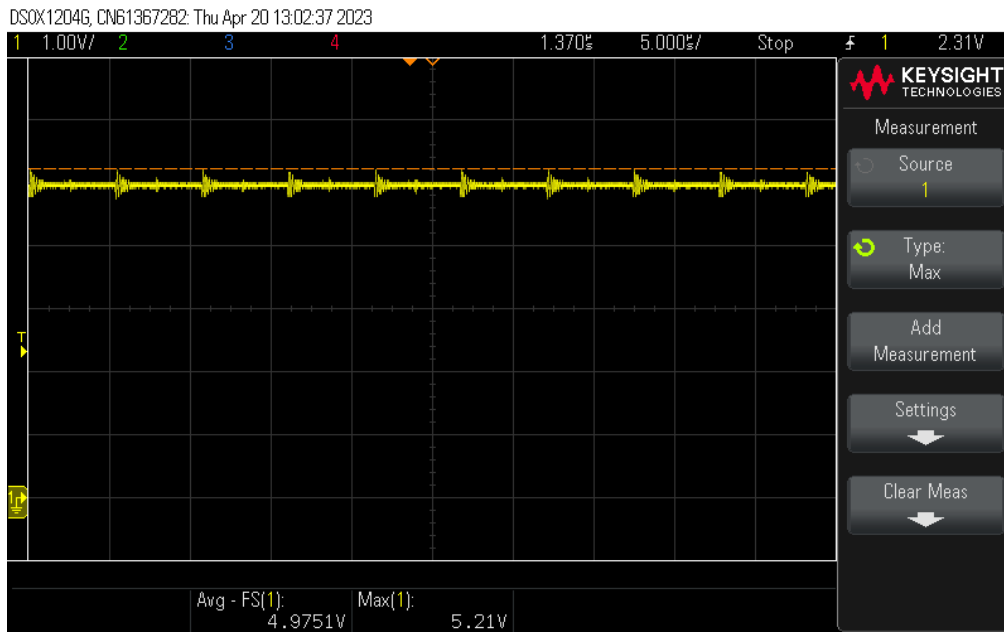
4.3 Τροφοδοσία

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται η τροφοδοσία του κυκλώματος στην είσοδο 1 της κλέμας J1 (Εικόνα 12). Η μέτρηση του παλμογράφου είναι στα 11.961V , με κάποιες διακυμάνσεις στην τροφοδοσία που φτάνουν τα 12.19 Vp. Αυτές οι μικρές διακυμάνσεις προκαλούνται από τα υπόλοιπα εξαρτήματα του κυκλώματος. Καθώς το κύκλωμα λειτουργεί με διακοπτική λειτουργία, επηρεάζεται το αρχικό σήμα τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.2: Τάση τροφοδοσίας

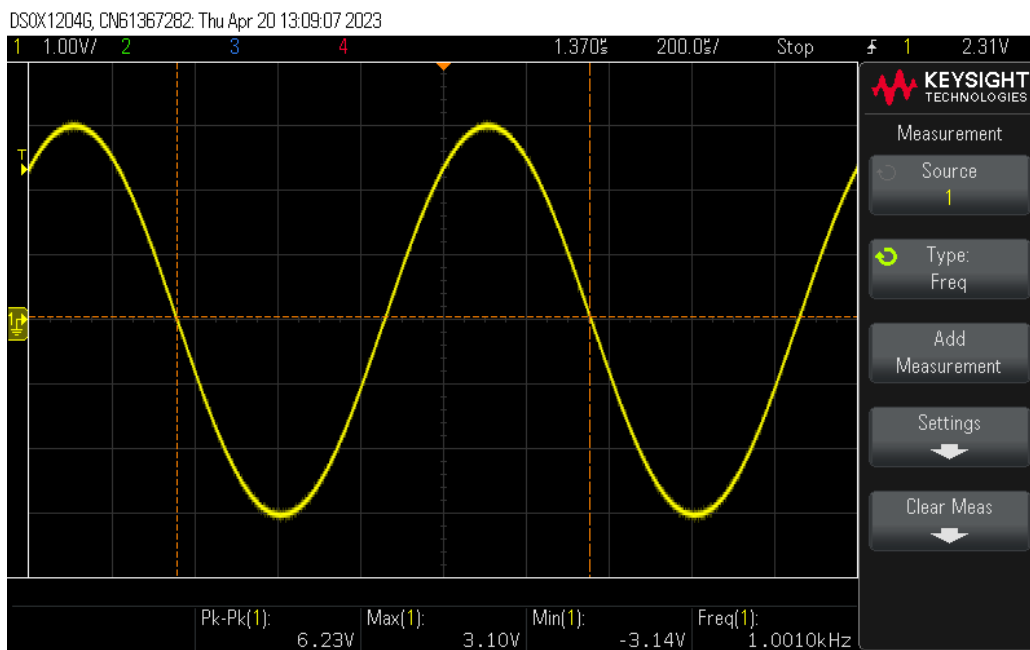
Στο Σχήμα 4.3 το Probe το παλμογράφου είναι τοποθετημένο στην έξοδο του σταθεροποιητή τάσης LM7805 (U7) στον ακροδέκτη 3 (Εικόνα 12). Η μέτρηση που απεικονίζεται στον παλμογράφο είναι της τάξης των 4.9751 V. Παρατηρείται πως υπάρχει ένας μικρός θόρυβος στο σήμα τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα την πρόκληση μικρών διακυμάνσεων, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο, στιγμιαία τάση τροφοδοσίας στα 5.21 Vp. Το πρόβλημα αυτό δεν επηρεάζει τη λειτουργία του κυκλώματος, επειδή όλα τα εξαρτήματα είναι λειτουργικά και πάνω από την τάση κορυφής.



Σχήμα 4.3: Τάση Voltage Regulator

4.4 Έξοδος μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα

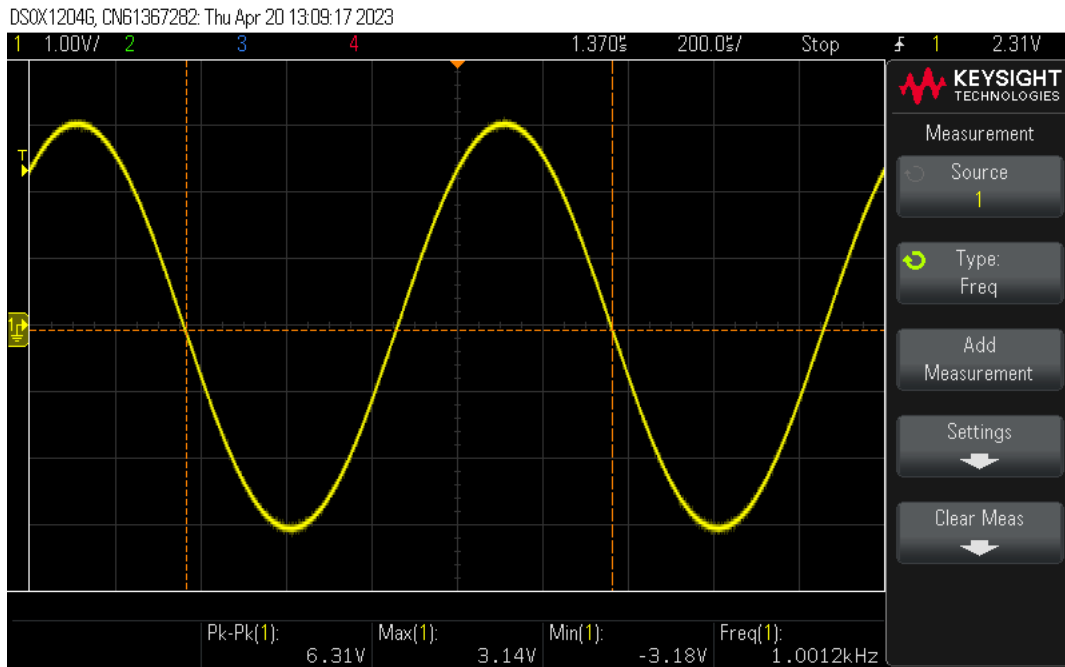
Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η αριστερή έξοδος του μετατροπέα του ψηφιακού σε αναλογικό σήμα. Το Probe του παλμογράφου είναι τοποθετημένο στον ακροδέκτη 6 του ολοκληρωμένου κυκλώματος U6 (Εικόνα 14). Το πλάτος του ηχητικού σήματος 1 kHz σε πλήρη ένταση από την συσκευή αναπαραγωγής, φθάνει την τιμή των 6.23 Vp-p, με τάση κορυφής 3.10 V και με τάση βάσης -3.14 V. Παρατηρείται, πως με βάση το Datasheet του κατασκευαστή, ο μετατροπέας στην παρούσα κατάσταση παράγει μεγαλύτερο πλάτος σήματος κατά 0.3 V, που βρίσκεται μέσα στα αποδεκτά όρια ανοχών.



Σχήμα 4.4: Κυματομορφή ηχητικού σήματος αριστερού καναλιού

Κεφάλαιο 4

Στο Σχήμα 4.5 το Probe του παλμογράφου είναι τοποθετημένο στη δεξιά έξοδο του μετατροπέα, στον ακροδέκτη 7 του U6 (Εικόνα 14). Το πλάτος του σήματος είναι στα 6.31 V_{p-p}, με τάση κορυφής στα 3.14 V και τάση βάσης στα -3.18 V. Παρατηρείται πως η τάση εξόδου του μετατροπέα είναι μεγαλύτερη από την αριστερή έξοδο, όμως εξακολουθεί να βρίσκεται μέσα στα αποδεκτά όρια ανοχών.



Σχήμα 4.5: Κυματομορφή ηχητικού σήματος δεξιού καναλιού

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις εξόδου DAC

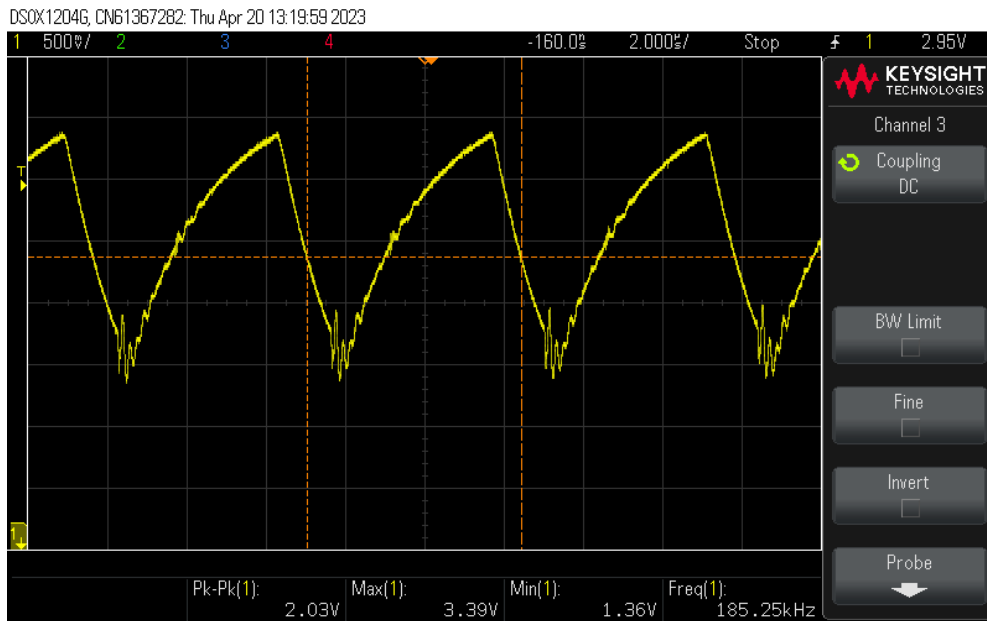
Κανάλι	Τάση κορυφής (V)	Τάση βάσης (V)	Τάση πλάτους (V _{p-p})
Αριστερό	3.10	-3.14	6.23
Δεξί	3.14	-3.18	6.31

4.5 Γεννήτρια τριγωνικού σήματος

Στο Σχήμα 4.6, απεικονίζεται η έξοδος του τριγωνικού σήματος από τον 555 Timer. Το Probe του παλμογράφου τοποθετείται στον ακροδέκτη 2 του U10 (Εικόνα 13). Με βάση τον παλμογράφο, παρατηρείται στο τριγωνικό σήμα μια κυμάτωση, ίδια με αυτή της τάσης τροφοδοσίας. Το τριγωνικό σήμα συμβαδίζει σε μεγάλο βαθμό με τους θεωρητικούς υπολογισμούς, με πλάτος τάσης στα 2.03 V και κατώφλια στα 1.36 V και 3.39 V αντίστοιχα.

Το σημείο στο οποίο παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση από τους θεωρητικούς υπολογισμούς, είναι στην συχνότητα του σήματος. Οι τιμές των εξαρτημάτων υπολογίζονται για τριγωνικό σήμα της τάξης των 250 kHz, ενώ στο πραγματικό κύκλωμα το σήμα παρουσιάζει πολύ μικρότερη συχνότητα λειτουργίας στα 195,25 kHz. Η απόκλιση των τιμών έχει μεγάλο εύρος διακυμάνσεων, όμως δεν επηρεάζει σε

σημαντικό βαθμό τη λειτουργία του κυκλώματος, καθώς μια τιμή του τριγωνικού σήματος από τα 150 kHz και πάνω είναι αρκετή για τη σωστή λειτουργία του.

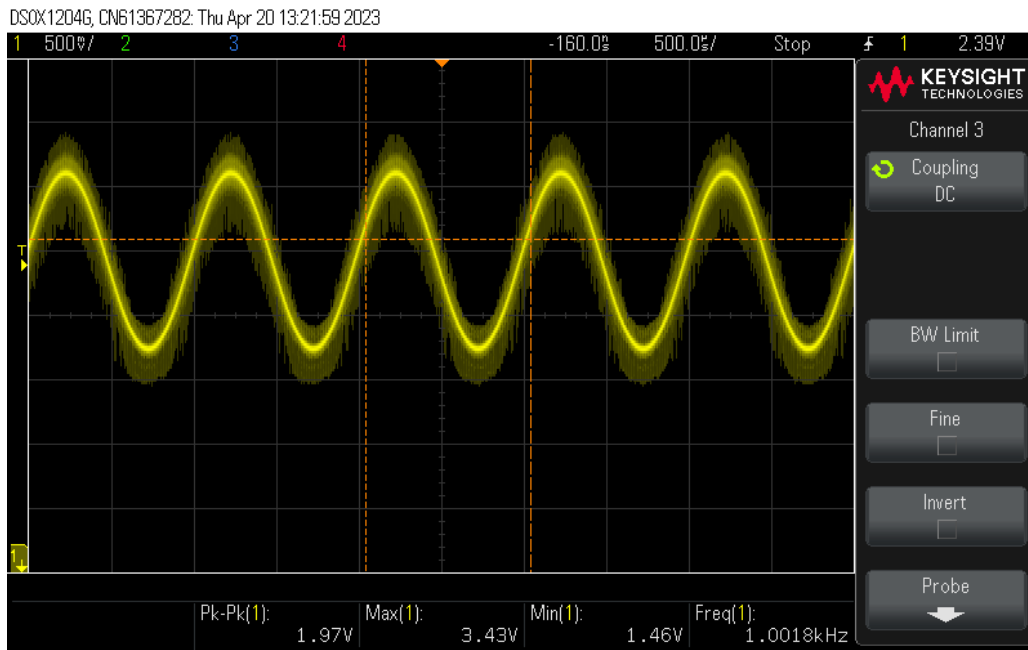


Σχήμα 4.6: Κυματομορφή τριγωνικού σήματος

4.6 Μετασχηματισμός ηχητικού σήματος

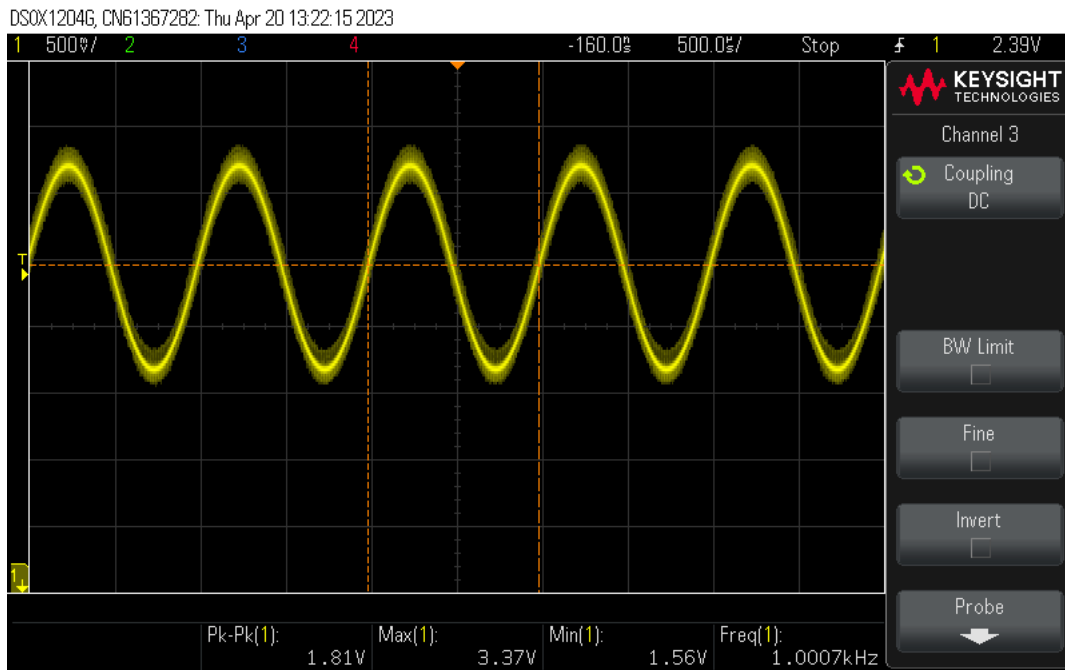
Στο Σχήμα 4.7, απεικονίζεται το μετασχηματισμένο ηχητικό σήμα στην έξοδο του TLC 272. Το Probe του παλμογράφου τοποθετείται στον ακροδέκτη 1 του U11A (Εικόνα 16). Εκ πρώτης όψεως, παρατηρείται στο ηχητικό σήμα, ένας θόρυβος. Το πλάτος τάσης του ηχητικού σήματος έχει τιμή του 1.97 V_{p-p}, με κορυφή 3.43 V και βάση στο 1.46 V. Η τιμή του πλάτους της τάσης του ηχητικού σήματος είναι οριακά χαμηλότερη από αυτή του τριγωνικού σήματος. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η παραμόρφωσή του ήχου και το σήμα εξόδου είναι πιο καθαρό.

Κεφάλαιο 4



Σχήμα 4.7: Κυματομορφή μετασχηματισμού τάσης αριστερού καναλιού

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.8, απεικονίζεται το μετασχηματισμένο ηχητικό σήμα εξόδου του τελεστικού ενισχυτή TLC 272. Το Probe του παλμογράφου τοποθετείται στον ακροδέκτη 7 του U11B (Εικόνα 16). Σε αυτή την περίπτωση ο θόρυβος στο σήμα εμφανίζει βελτιώσεις. Το πλάτος τάσης του ηχητικού σήματος είναι στο 1.81 V, με τάση κορυφής 3.37 V και τάση βάσης στα 1.56 V. Οι τιμές αυτές συμβαδίζουν περισσότερο με τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Συγκρίνοντας τα δύο σήματα, παρατηρείται πως το σήμα του δεξιού καναλιού είναι καλύτερο, από άποψη θορύβου και θεωρητικών τιμών.



Σχήμα 4.8: Κυματομορφή μετασχηματισμού τάσης δεξιού καναλιού

Πίνακας 4.2: Μετρήσεις εξόδου μετασχηματιστή τάσης

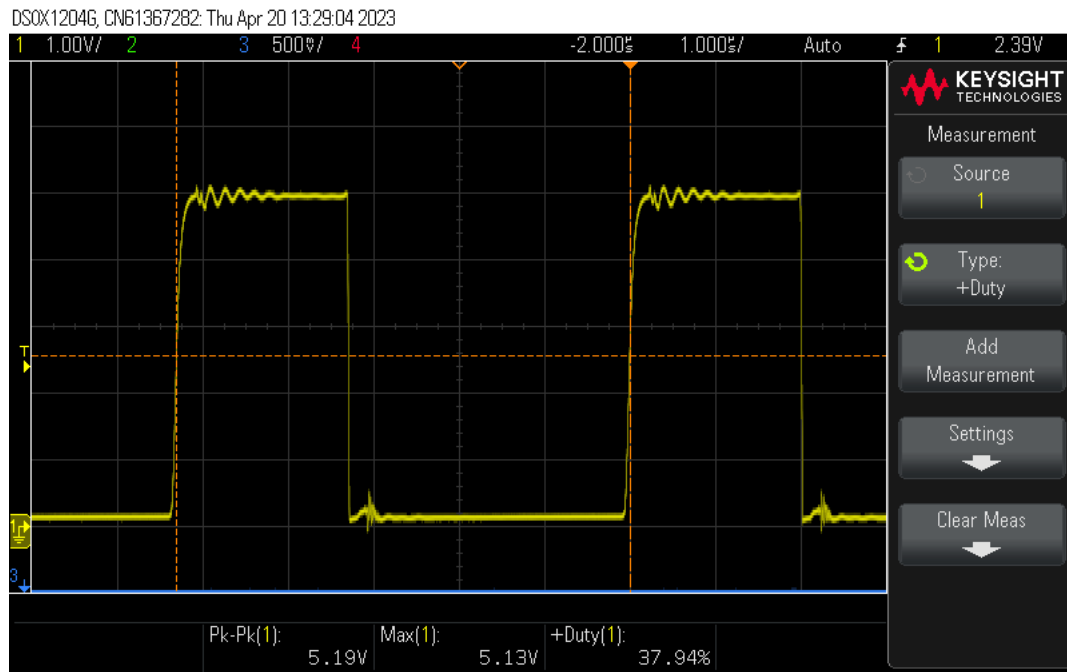
Κανάλι	Τάση κορυφής (V)	Τάση βάσης (V)	Τάση πλάτους (Vp-p)
Αριστερό	3.43	1.46	1.97
Δεξί	3.37	1.56	1.81

4.7 Μετρήσεις ενισχυτή τάξης D

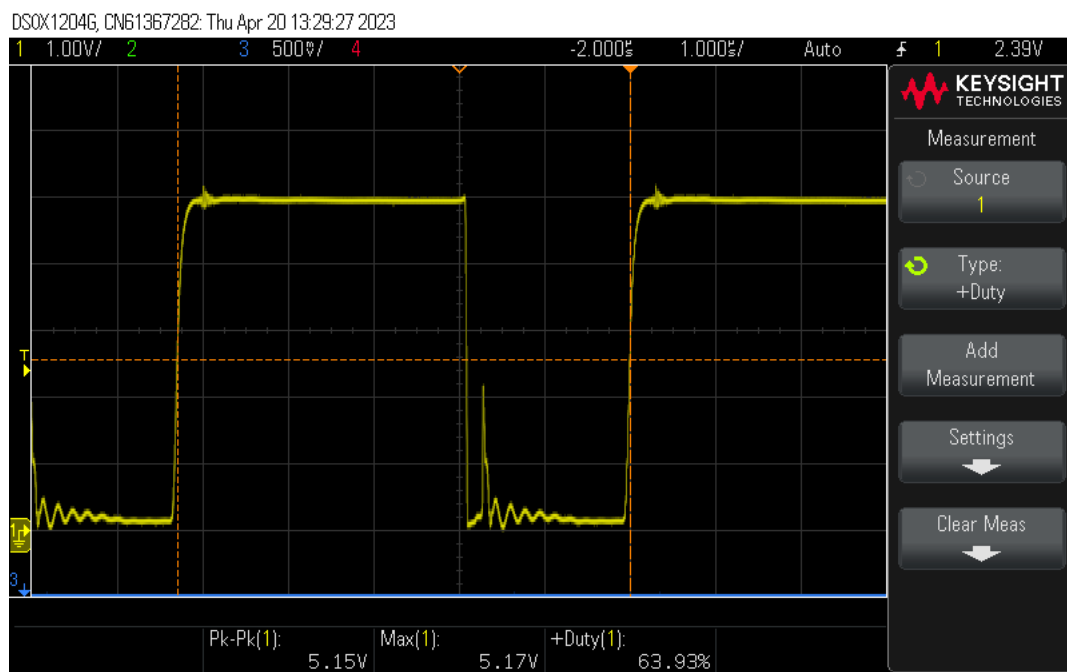
4.7.1 Συγκριτές

Στη συνέχεια, ακολουθεί το κύριο μέρος του ηχοσυστήματος, το κομμάτι δημιουργίας του PWM. Σε αυτήν την περίπτωση στην είσοδο του ηχοσυστήματος δεν υπάρχει κάποιο σήμα. Επομένως, οι μετρήσεις είναι σε κατάσταση ηρεμίας. Στο Σχήμα 4.9 και τοποθετώντας το Probe του παλμογράφου στον ακροδέκτη 7 του U3 (Σχήμα 3.8), απεικονίζεται στην οθόνη το PWM που παράγεται από τη σύγκριση των δύο σημάτων, του ηχητικού και του τριγωνικού, στον συγκριτή με μη-αναστρέφουσα συνδεσμολογία του αριστερού καναλιού. Ο χρόνος που το σήμα μεταβαίνει από την κατάσταση 0 στην κατάσταση 1 είναι πολύ μικρός και δεν επηρεάζει το υπόλοιπο κύκλωμα. Η τάση κορυφής του σήματος φθάνει τα 5.13 V, ενώ ο κύκλος εργασίας είναι 37.94 %. Στο Σχήμα 4.10 τοποθετείται το Probe στον ακροδέκτη 7 του U4 (Σχήμα 3.8). Η τάση κορυφής της εξόδου του ενισχυτή με αναστρέφουσα συνδεσμολογία είναι στα 5.17 V, ενώ ο κύκλος εργασίας στα 63.93 %. Παρατηρείται, πως ο ένας κύκλος εργασίας είναι συμπληρωματικός του άλλου, όπως ορίζεται.

Κεφάλαιο 4

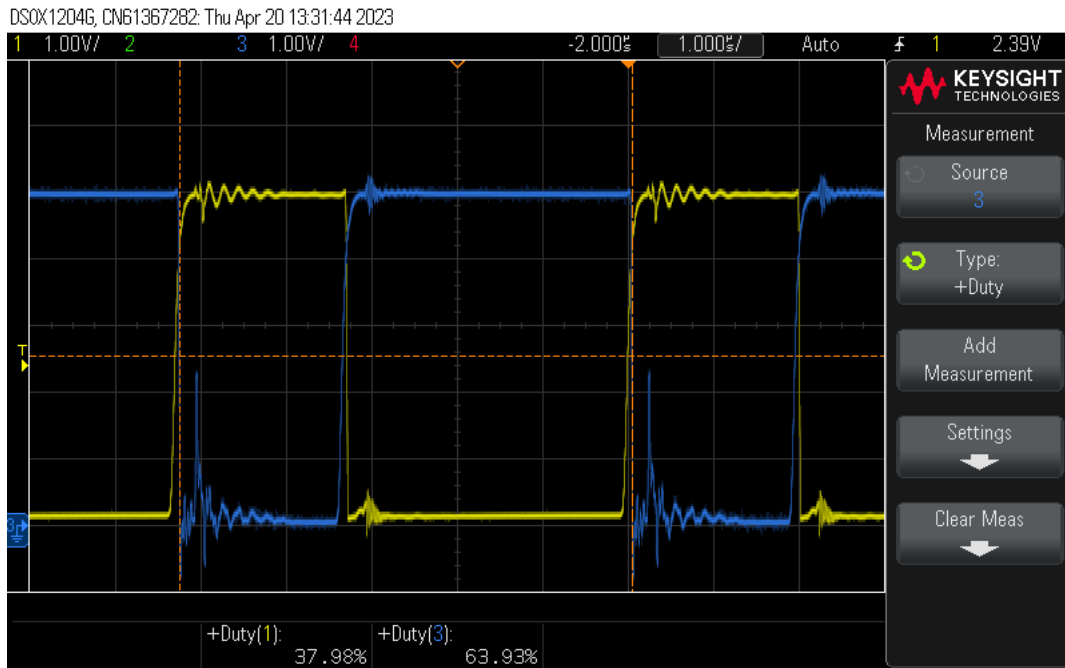


Σχήμα 4.9: Κυματομορφή εξόδου μη-αναστρέφων συγκριτή αριστερού καναλιού



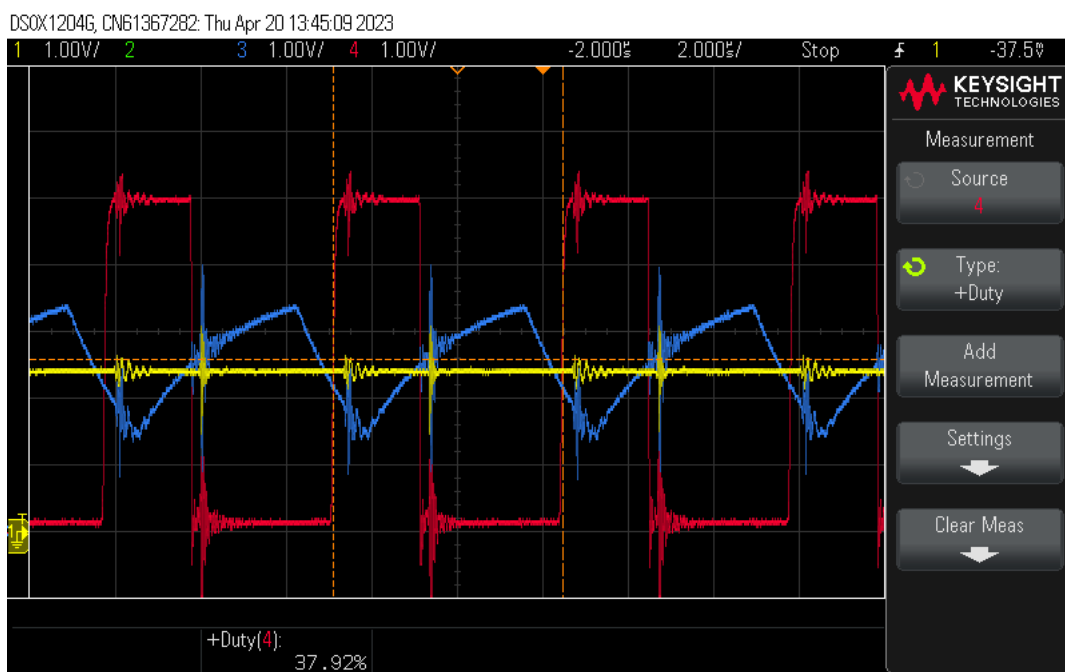
Σχήμα 4.10: Κυματομορφή εξόδου αναστρέφων συγκριτή αριστερού καναλιού

Στο Σχήμα 4.11 απεικονίζονται οι δύο κυματομορφές, αναστρέφουσα και μη-αναστρέφουσα.



Σχήμα 4.11: Κυματομορφές εξόδου συγκριτών αριστερού καναλιού

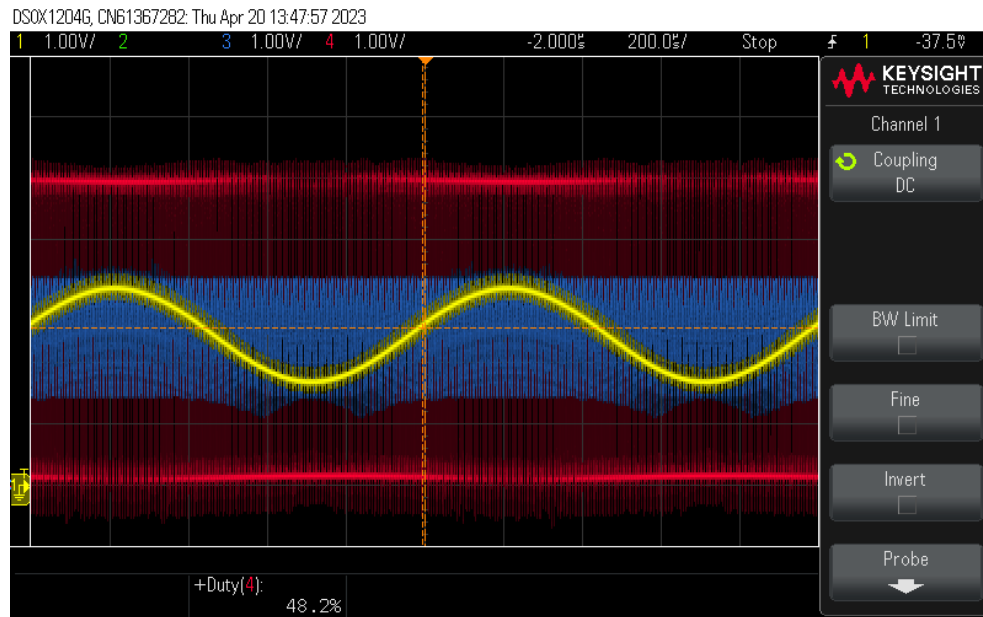
Στο Σχήμα 4.12, υπάρχουν τα δύο σήματα εισόδου του συγκριτή, δηλαδή το ηχητικό σήμα (Κίτρινο), το τριγωνικό σήμα (Μπλε) και η έξοδος του Μη-Αναστρέφων συγκριτή (Κόκκινο). Παρατηρείται, πως κατά τη σύγκριση των δύο σημάτων εισόδου, αλλάζει η κατάσταση της εξόδου του συγκριτή, δημιουργώντας έτσι το σήμα PWM.



Σχήμα 4.12: Κυματομορφή εισόδου και εξόδου συγκριτών αριστερού καναλιού

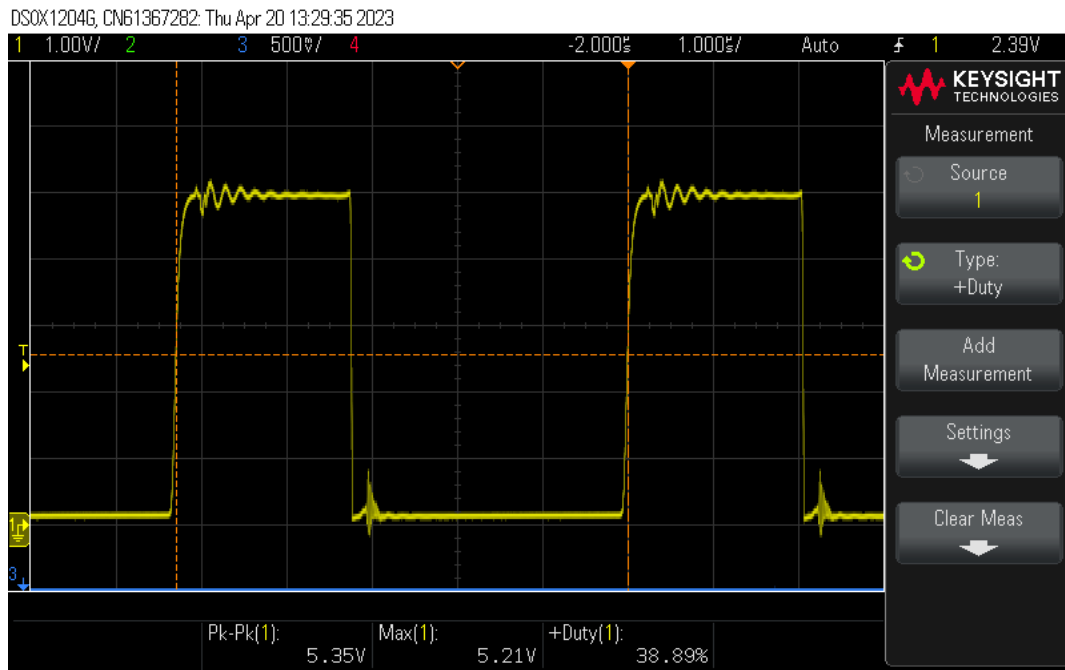
Κεφάλαιο 4

Στη συνέχεια, αναπαράγεται από την ασύρματη συσκευή το ημιτονοειδές ηχητικό σήμα και στο Σχήμα 4.13, απεικονίζονται τα τρία σήματα του συγκριτή. Παρατηρείται, πως κατά την αλλαγή της τάσης του ηχητικού σήματος, σε σχέση με το τριγωνικό, ο κύκλος εργασίας του PWM μεταβάλλεται. Στα πυκνά σημεία του κόκκινου σήματος, ο κύκλος εργασίας φθάνει οριακά το 100 %, ενώ στα αραιά σημεία αυτού φθάνει το κατώφλι του 0 %.

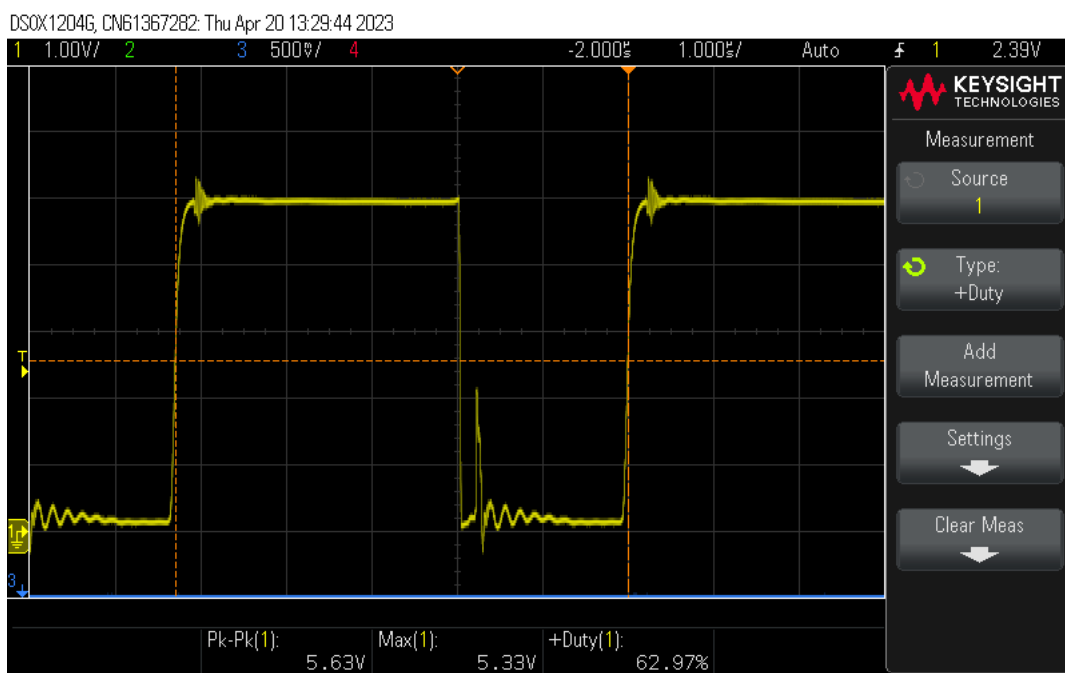


Σχήμα 4.13: Μεταβολή κύκλου εργασίας PWM αριστερού καναλιού

Στο δεξί κανάλι τοποθετείται το Probe στον ακροδέκτη 7 του U2 συγκριτή με συνδεσμολογία Μη-Αναστρέφουσας εξόδου. Οι μετρήσεις του δεξιού καναλιού γίνονται χωρίς είσοδο ηχητικού σήματος, δηλαδή σε κατάσταση ηρεμίας. Στο Σχήμα 4.14, η τάση κορυφής του σήματος PWM του Μη-Αναστρέφοντα συγκριτή είναι 5.21 V και ο κύκλος εργασίας είναι στα 38.89 %. Αντίστοιχα, τοποθετείται το Probe στον ακροδέκτη 7 του αναστρέφοντα συγκριτή U5. Στο Σχήμα 4.15, απεικονίζεται η έξοδος του PWM σήματος του αναστρέφοντα συγκριτή με τάση κορυφής 5.33 V και κύκλο εργασίας 62.97 %.



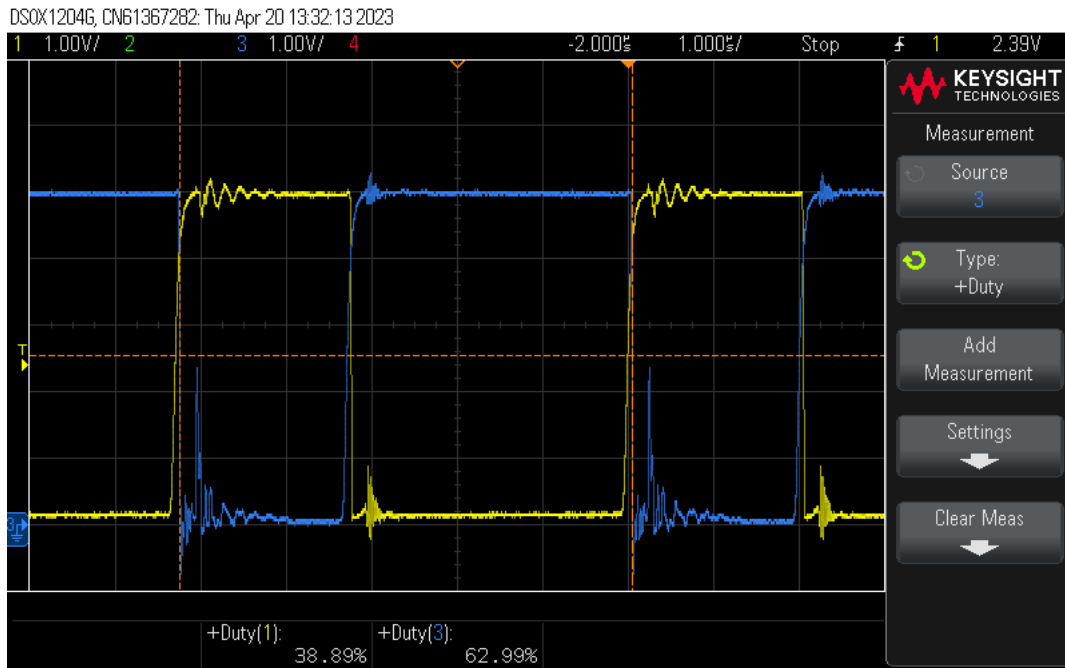
Σχήμα 4.14: Κυματομορφή εξόδου μη-αναστρέφων συγκριτή δεξιού καναλιού



Σχήμα 4.15: Κυματομορφή εξόδου αναστρέφων συγκριτή δεξιού καναλιού

Κεφάλαιο 4

Στο Σχήμα 4.16, απεικονίζονται τα δύο σήματα από τις εξόδους των συγκριτών του δεξιού καναλιού. Με κίτρινο χρώμα είναι το σήμα του Μη-Αναστρέφων συγκριτή και με μπλε χρώμα είναι το σήμα του αναστρέφων συγκριτή. Οι κύκλοι εργασίας τους είναι συμπληρωματικοί ο ένας για τον άλλο, επειδή δέχονται τα ίδια σήματα. Όμως, παρατηρείται ταλάντωση του συστήματος και στην κατάσταση κατά τη θετική μετάβαση, αλλά και στην κατάσταση μετάβασης από τη θετική στην αρνητική. Αυτές οι ταλαντώσεις επηρεάζουν το κύκλωμα, καθώς μπορούν να προσθέσουν επιπλέον κατανάλωση σε αυτό.



Σχήμα 4.16: Κυματομορφές εξόδου συγκριτών δεξιού καναλιού

Πίνακας 4.3: Μετρήσεις εξόδου συγκριτών

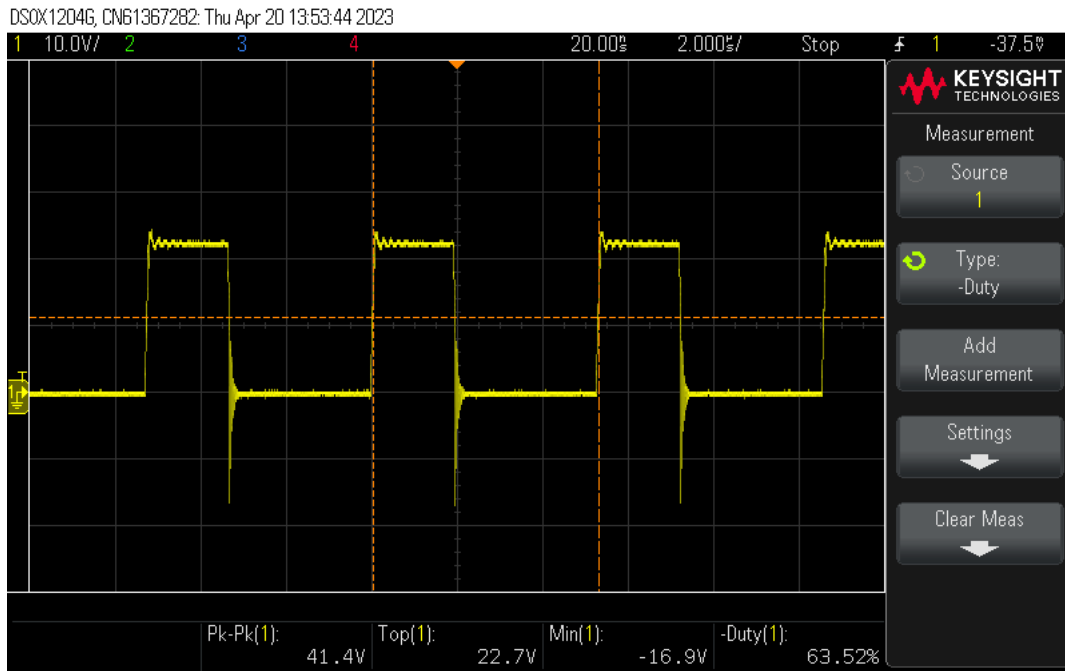
Κανάλι	Τάση πλάτους (V)	Θετικός κύκλος εργασίας (%)	Αρνητικός κύκλος εργασίας (%)
Αριστερό	5.19	37.92	62.08
Δεξί	5.35	38.89	62.99

4.7.2 Μετρήσεις Οδηγών MOSFET

Το επόμενο κομμάτι μετρήσεων αφορά τους οδηγούς της βαθμίδας εξόδου, τους οδηγούς MOSFET. Όλες οι μετρήσεις γίνονται χωρίς σήμα εισόδου, άρα το σύστημα βρίσκεται σε ηρεμία.

Το Probe του παλμογράφου τοποθετείται στον ακροδέκτη 6 του U8 (Σχήμα 3.9). 4.17, απεικονίζεται η High έξοδος του οδηγού MOSFET του αριστερού καναλιού. Η τάση κορυφής της εξόδου είναι στα 22.7 V. Λόγω του κυκλώματος Bootstrap που υπάρχει, η τάση στην High έξοδο του οδηγού MOSFET είναι μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος. Η τάση βάσης του σήματος είναι στα 0V, όμως παρατηρείται στον παλμογράφο μια ανάστροφη τάση της τάξης των -16.9 V. Αυτή η τάση

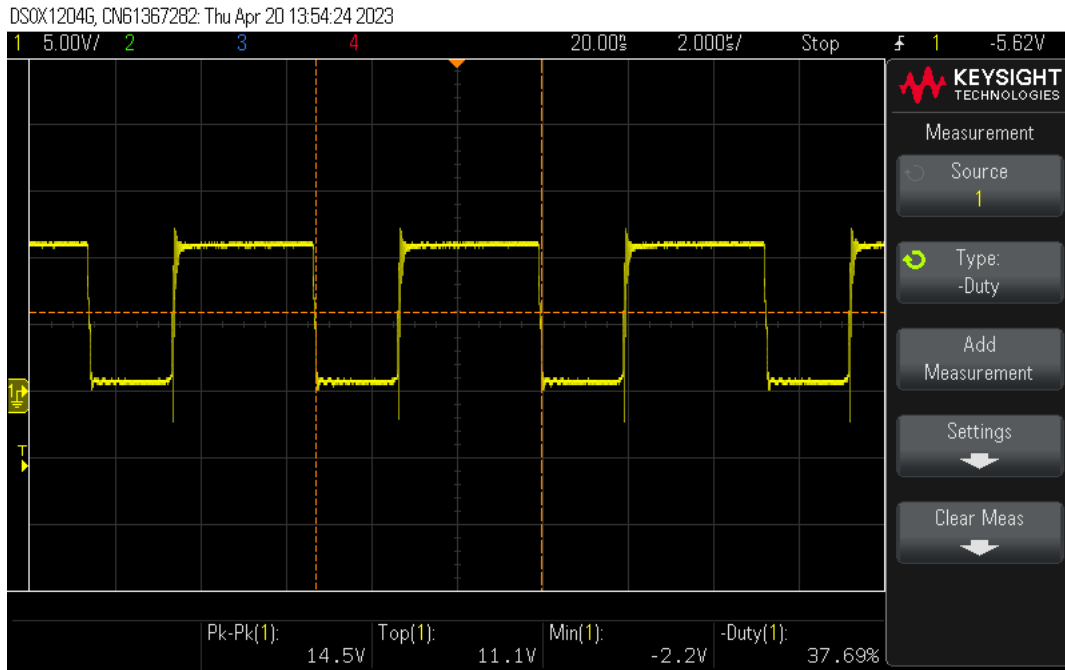
δημιουργείται από την εκφόρτωση του πυκνωτή και μπλοκάρεται από τη δίοδο του κυκλώματος Bootstrapping, για να μην επιστρέψει στην τροφοδοσία. Λόγω αυτού του φαινομένου και λόγω της ταχείας φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή, η δίοδος D1 θερμαίνεται και καταναλώνει επιπλέον ρεύμα, ανεβάζοντας με αυτόν τον τρόπο την κατανάλωση ενέργειας του κυκλώματος. Ο θετικός κύκλος εργασίας του οδηγού είναι στα 36,48 %, όπως και στην είσοδο του.



Σχήμα 4.17: Κυματομορφή εξόδου High Side MOSFET Driver αριστερού καναλιού

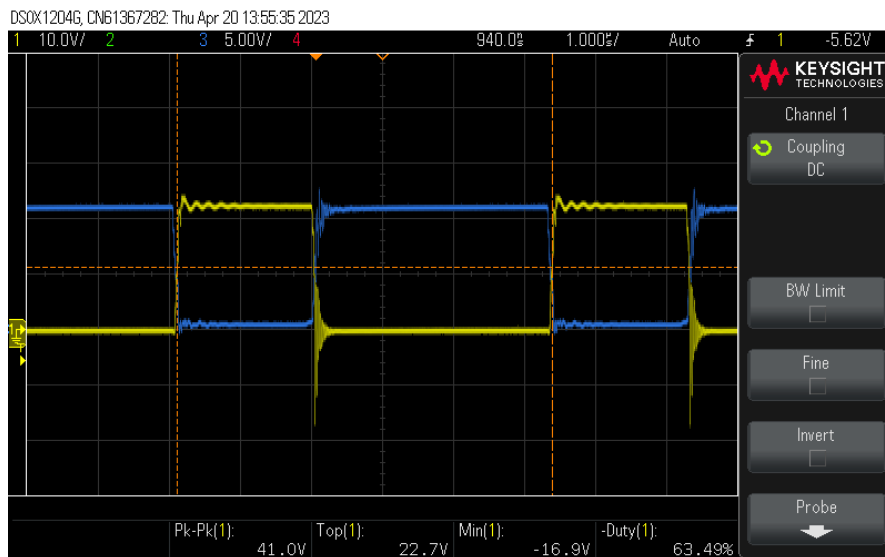
Το Probe του παλμογράφου τοποθετείται στον ακροδέκτη 1 του U8 (Σχήμα 3.9). Στο Σχήμα 4.18, απεικονίζεται η Low έξοδος του οδηγού MOSFET του αριστερού καναλιού. Η τάση κορυφής του σήματος βρίσκεται στα 11.1 V, αρκετά κοντά στην τάση τροφοδοσίας, όπως ορίζεται. Η τάση βάσης βρίσκεται στα 0 V, όμως στον παλμογράφο, παρατηρείται μια ανάστροφη τάση της τάξης των -2.2 V, που προκαλείται από το ίδιο φαινόμενο του High Side MOSFET Driver. Ο αρνητικός κύκλος εργασίας του Low Side οδηγού είναι 62.31 %

Κεφάλαιο 4



Σχήμα 4.18: Κυματομορφή εξόδου Low Side MOSFET Driver αριστερού καναλιού

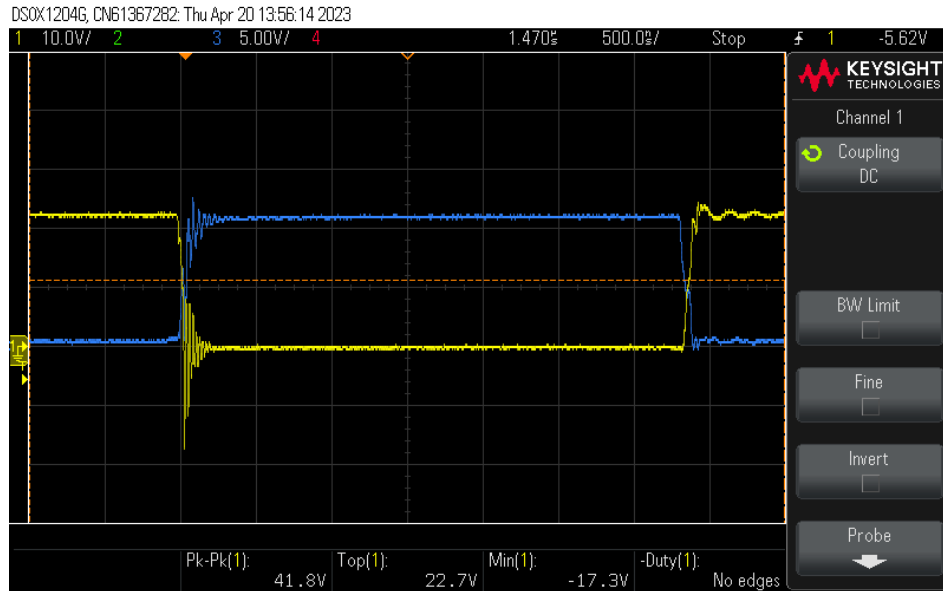
Στο Σχήμα 4.19, απεικονίζεται, η High Side κυματομορφή (Κίτρινη), σε σχέση με τη Low Side κυματομορφή (Μπλε). Όπως φαίνεται και στον παλμογράφο, οι δύο κυματομορφές αλληλοσυμπληρώνονται από την άποψη του κύκλου εργασίας, όμως φαίνονται οι διαφορές τους, σε σχέση με τις τάσεις κατωφλίου τους, με βάση την κλίμακα του παλμογράφου.



Σχήμα 4.19: Κυματομορφές εξόδου MOSFET Driver αριστερού καναλιού

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.20, ο Νεκρός χρόνος που υπό κανονικές συνθήκες προστίθεται στις κυματομορφές της εξόδου του αριστερού καναλιού, απουσιάζει, ως εκ τούτου, για μία χρονική στιγμή, τα MOSFET στην έξοδο, είναι και τα δύο ανοιχτά. Αυτό επιτρέπει τη διέλευση ενός μεγάλου ρεύματος

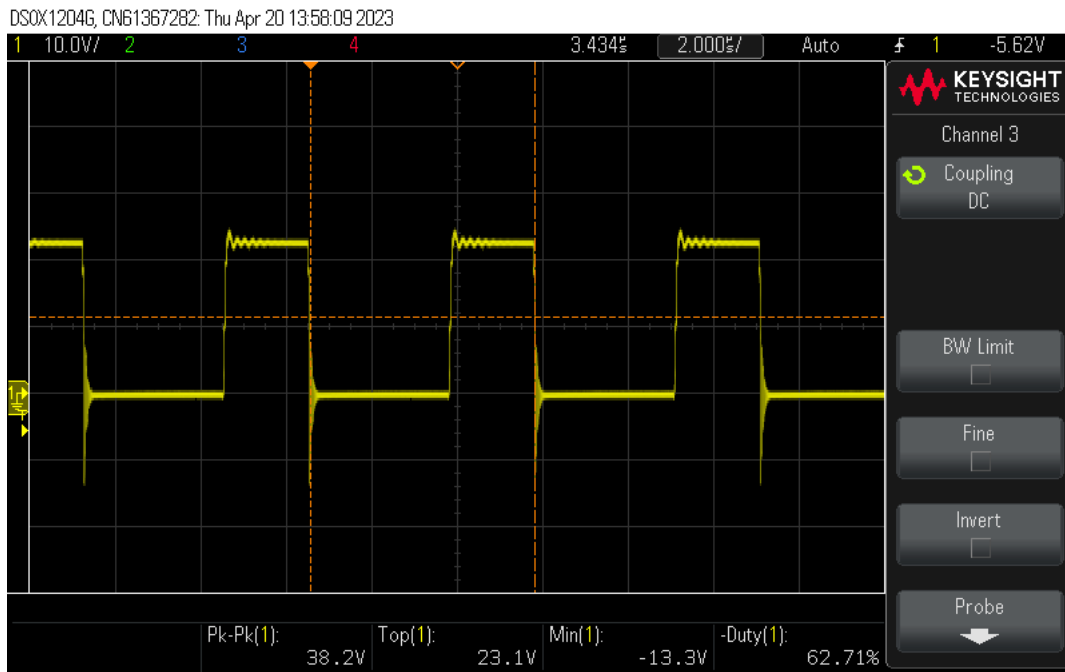
μέσα από τα MOSFET, αφού βραχυκυκλώνεται η τροφοδοσία με την έξοδο. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται περιττή κατανάλωση ενέργειας, δημιουργία αρνητικών τάσεων και θέρμανση των MOSFETS.



Σχήμα 4.20: Κυματομορφή νεκρού χρόνου αριστερού καναλιού

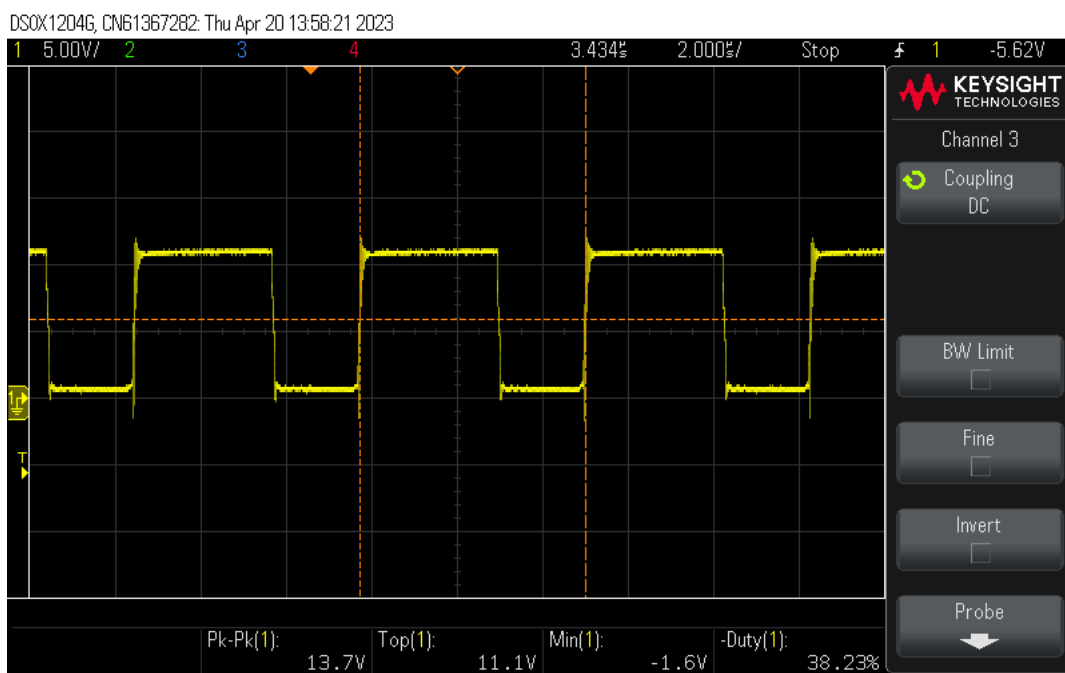
Το Probe του παλμογράφου τοποθετείται στον ακροδέκτη 7 του οδηγού MOSFET U9 του δεξιού καναλιού του ενισχυτή. Στο Σχήμα 4.21 απεικονίζεται η κυματομορφή εξόδου High Side του οδηγού. Όπως και στο αριστερό κανάλι, η τάση κορυφής του ακροδέκτη βρίσκεται στην τάση των 23.1 V, που είναι μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος, λόγω του κυκλώματος Bootstrap του συγκεκριμένου καναλιού. Η τάση της βάσης του οδηγού πρέπει να βρίσκεται στο 0 V, αλλά λόγω των αναστροφών ρευμάτων που παρουσιάζονται κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή, εμφανίζεται στον παλμογράφο τάση βάσης ίση με -13.3 V, που μπλοκάρει από τη δίοδο τροφοδοσίας του πυκνωτή για να μη φθάσει ως την τροφοδοσία. Ο θετικός κύκλος εργασίας του σήματος High Side PWM είναι 37.29 %, όπως και η τιμή εισόδου του.

Κεφάλαιο 4



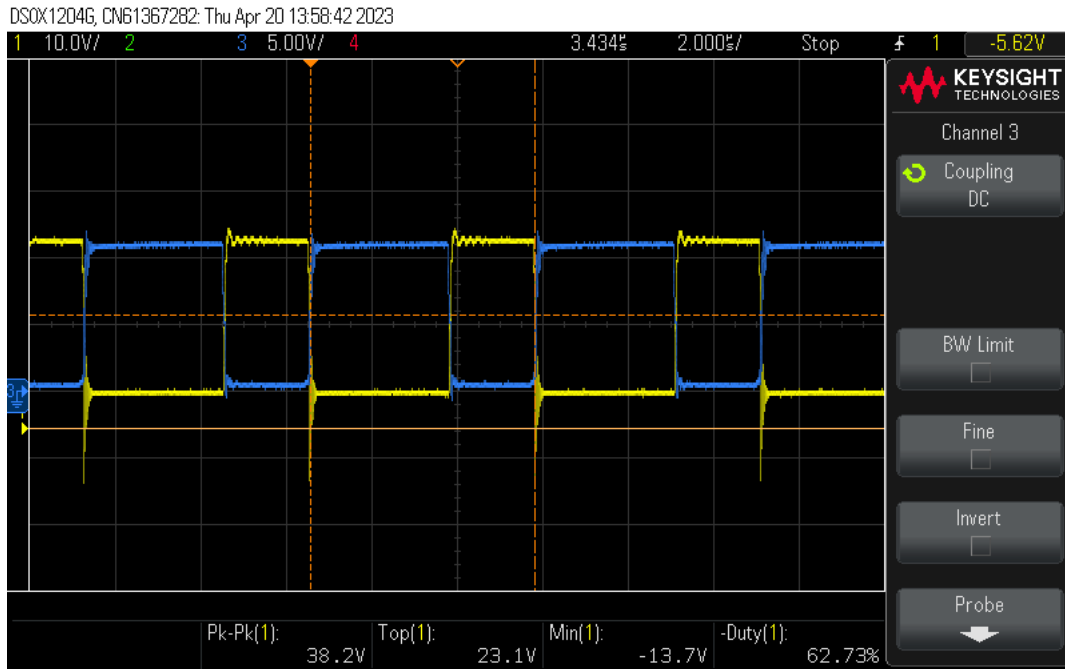
Σχήμα 4.21: Κυματομορφή εξόδου High Side MOSFET Driver δεξιού καναλιού

Το Probe του παλμογράφου τοποθετείται στον ακροδέκτη 1 του δεξιού οδηγού U9. Στο Σχήμα 4.22 απεικονίζεται το Low Side PWM σήμα του οδηγού. Η τάση κορυφής του Low side ακροδέκτη είναι κοντά στην τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος στα 11.1 V. Η τάση βάσης πρέπει να είναι στο 0 V, όμως, όπως και στο αριστερό κανάλι υπάρχει μια ανάστροφη τάση την τάξης του 1.6 V, που προκαλείται από την εκφόρτιση του πυκνωτή. Ο θετικός κύκλος εργασίας είναι στα 38.23%, όπως και η είσοδος του οδηγού.



Σχήμα 4.22: Κυματομορφή εξόδου Low Side MOSFET Driver δεξιού καναλιού

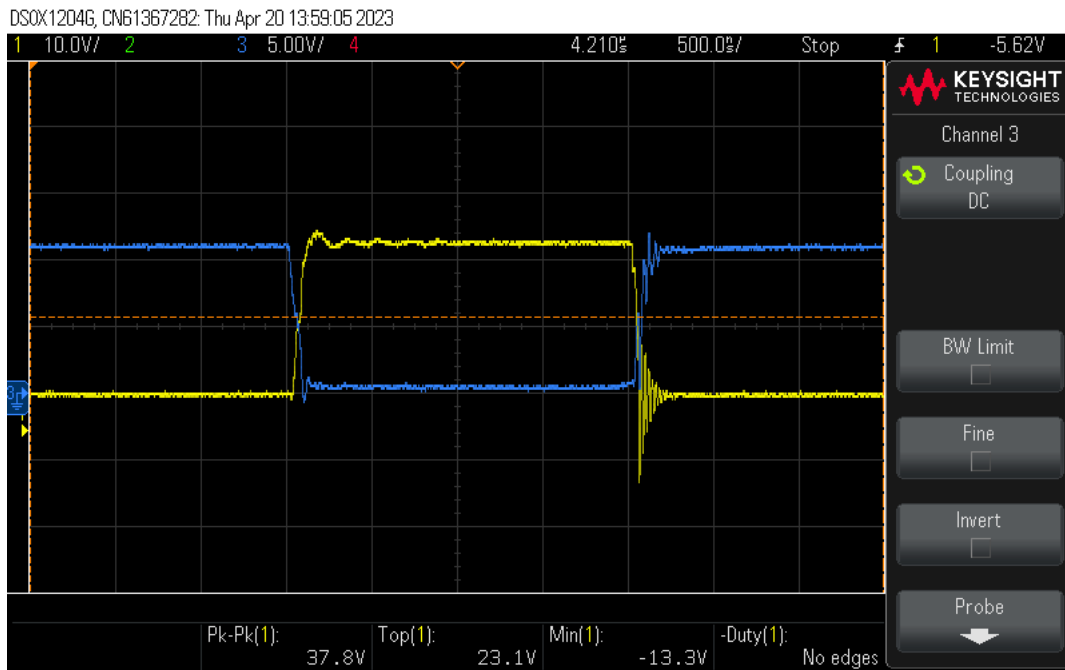
Στο Σχήμα 4.23, απεικονίζονται οι δύο κυματομορφές του οδηγού MOSFET U9. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται η High Side κυματομορφή και με μπλε χρώμα απεικονίζεται η Low Side κυματομορφή. Οι κύκλοι εργασίας των δύο αυτών κυματομορφών αλληλοσυμπληρώνονται, όπως ορίζεται.



Σχήμα 4.23: Κυματομορφές εξόδου MOSFET Driver δεξιού καναλιού

Στο Σχήμα 4.24, απεικονίζονται τα δύο σήματα του οδηγού και ως συμπέρασμα, όπως και στο αριστερό κανάλι, απουσιάζει ο νεκρός χρόνος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βραχυκυκλώνει η τροφοδοσία με τη γείωση, επιτρέποντας να περάσει μέσα από τα MOSFET του δεξιού καναλιού, ένα μεγάλο στιγμιαίο ρεύμα. Τα MOSFET θερμαίνονται σταδιακά, καθώς υπάρχει περιττή κατανάλωση ενέργειας ηλεκτρικού ρεύματος, επάνω τους.

Κεφάλαιο 4



Σχήμα 4.24: Κυματομορφές εξόδου MOSFET Driver δεξιού καναλιού

Πίνακας 4.4: Μετρήσεις εξόδου High Side Driver

Κανάλι	Τάση πλάτους (V)	Τάση κορυφής (V)	Τάση βάσης (V)	Θετικός κύκλος εργασίας (%)
Αριστερό High Side	41.4	22.7	-16.9	36.48
Δεξί High Side	38.2	23.1	-13.3	37.29

Πίνακας 4.5: Μετρήσεις εξόδου Low Side Driver

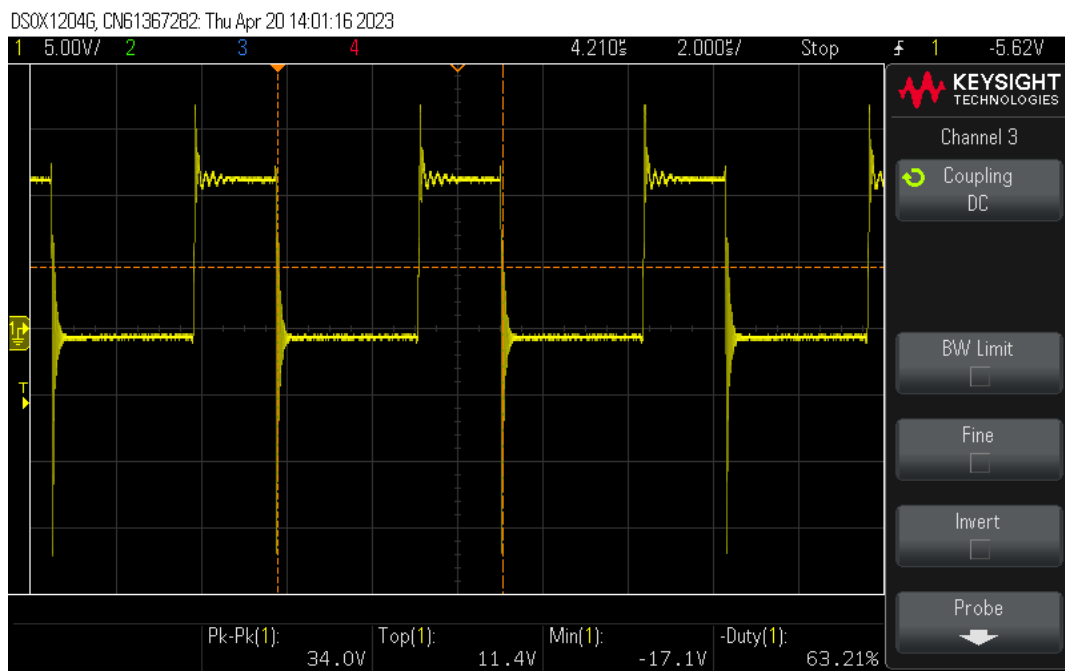
Κανάλι	Τάση πλάτους (V)	Τάση κορυφής (V)	Τάση βάσης (V)	Θετικός κύκλος εργασίας (%)
Αριστερό Low Side	14.5	11.1	-2.2	62.31
Δεξί Low Side	13.7	11.1	-1.6	61.77

4.7.3 Μετρήσεις MOSFETS

Η επόμενη υποενότητα μετρήσεων, αφορά τη βαθμίδα ισχύος των MOSFET. Το Probe του παλμογράφου, τοποθετείται στο κέντρο των δύο MOSFET του αριστερού καναλιού (Σχήμα 3.10). Στο Σχήμα 4.25, απεικονίζεται το πλέον ενισχυμένο σήμα εξόδου PWM. Το σήμα PWM πρέπει να κυμαίνεται από την τάση αναφοράς, που είναι η γείωση, δηλαδή το 0 V, μέχρι την τάση τροφοδοσίας που είναι τα 12 V. Με βάση τα δεδομένα από την εικόνα του παλμογράφου, η τάση κορυφής είναι στα 11,4 V και η τάση βάσης είναι στο 0 V. Ο θετικός κύκλος εργασίας της εξόδου των MOSFET σε κατάσταση ηρεμίας είναι στα 36.79 %.

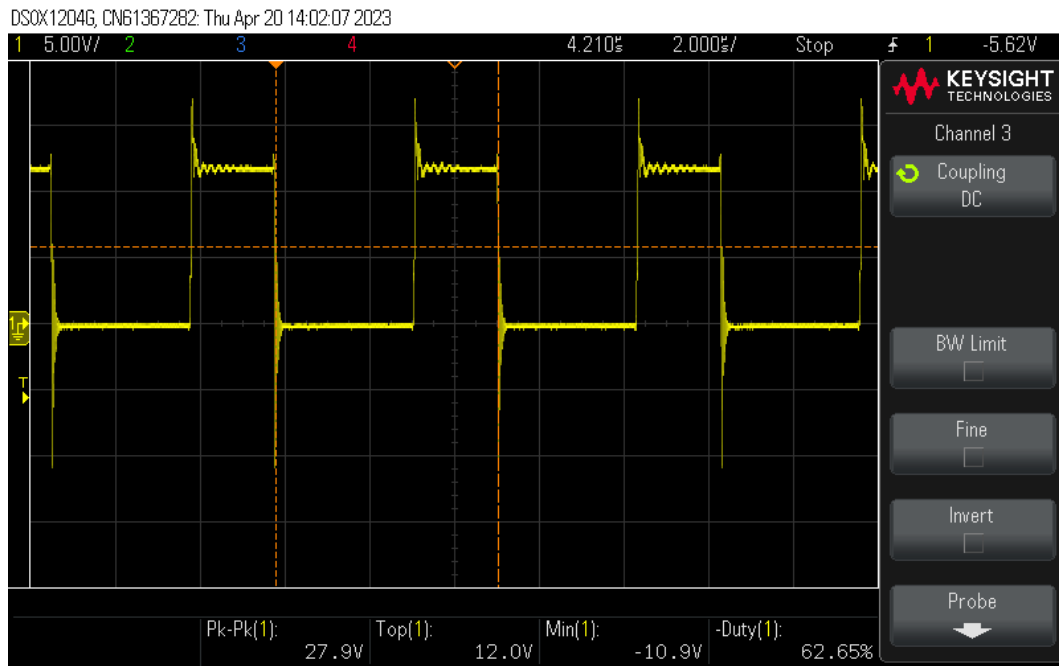
Λόγω της απουσίας του νεκρού χρόνου από τον οδηγό MOSFET του αριστερού καναλιού, για μια στιγμή, κατά την αλλαγή της κατάστασης εξόδου, η τροφοδοσία του κυκλώματος και η γείωση βραχυκυκλώνονται, επιτρέποντας έτσι να περάσει μέσα από τα δύο MOSFET εξόδου ένα μεγάλο ρεύμα, μέχρι φθάσει στην αποκοπή το ένα από τα δύο. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την εικόνα του παλμογράφου. Η τάση κορυφής φτάνει στιγμιαία την τιμή των 17 V και η τάση βάσης φτάνει την τιμή των -17.1V.

Αποτέλεσμα του παρακάτω φαινομένου είναι ότι η ισχύς που καταναλώνεται πάνω στα MOSFET, αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό εκείνη την στιγμή και η θερμοκρασία των MOSFET αυξάνεται σταδιακά κατά την λειτουργία. Σημαντικό μειονέκτημα που προκύπτει από αυτό το φαινόμενο, είναι η μείωση της απόδοσης του κυκλώματος, καθώς μεγάλο ποσοστό ισχύος καταναλώνεται ως θερμική ενέργεια.



Σχήμα 4.25: Κυματομορφή εξόδου MOSFET αριστερού καναλιού

Το Probe τοποθετείται στο κέντρο των MOSFET του δεξιού καναλιού. Στο Σχήμα 4.26, όπως και στο αριστερό κανάλι, ίδια προβλήματα παρουσιάζονται και στο δεξί κανάλι. Επειδή απουσιάζει ο νεκρός χρόνος από τον οδηγό, υπάρχει και εδώ βραχυκύκλωμα στην έξοδο των MOSFET, μειώνοντας την απόδοση του κυκλώματος. Όμως, η κατάσταση του δεξιού καναλιού είναι καλύτερη σε σχέση με αυτή του αριστερού. Η τάση κορυφής είναι πιο κοντά στην τάση τροφοδοσίας στα 12 V και η αρνητική κορυφή που δημιουργείται είναι κατά 6.2 V μικρότερη στα 10.9 V, σε σχέση με αυτή του αριστερού καναλιού. Ο θετικός κύκλος εργασίας, σε κατάσταση ηρεμίας της εξόδου στα MOSFET του δεξιού καναλιού είναι στο 37.35 %.



Σχήμα 4.26: Κυματομορφή εξόδου MOSFET δεξιού καναλιού

Πίνακας 4.6: Μετρήσεις εξόδου MOSFET

Κανάλι	Τάση πλάτους (V)	Τάση κορυφής (V)	Τάση βάσης (V)	Θετικός κύκλος εργασίας (%)
Αριστερό	34	11.4	-17.1	36.79
Δεξί	27.9	12	-10.9	37.35

4.8 Μετρήσεις εξόδου

Η τελευταία υποενότητα μετρήσεων, αφορά την κεντρική έξοδο του κυκλώματος μετά τα φίλτρα εξόδου. Για τις μετρήσεις, αναπαράγεται στην είσοδο του κυκλώματος, το ημιτονοειδές σήμα σε πλήρη ένταση (0 dB). Το Probe τοποθετείται στον ακροδέκτη 1 της κλέμας εξόδου LT1, του αριστερού καναλιού.

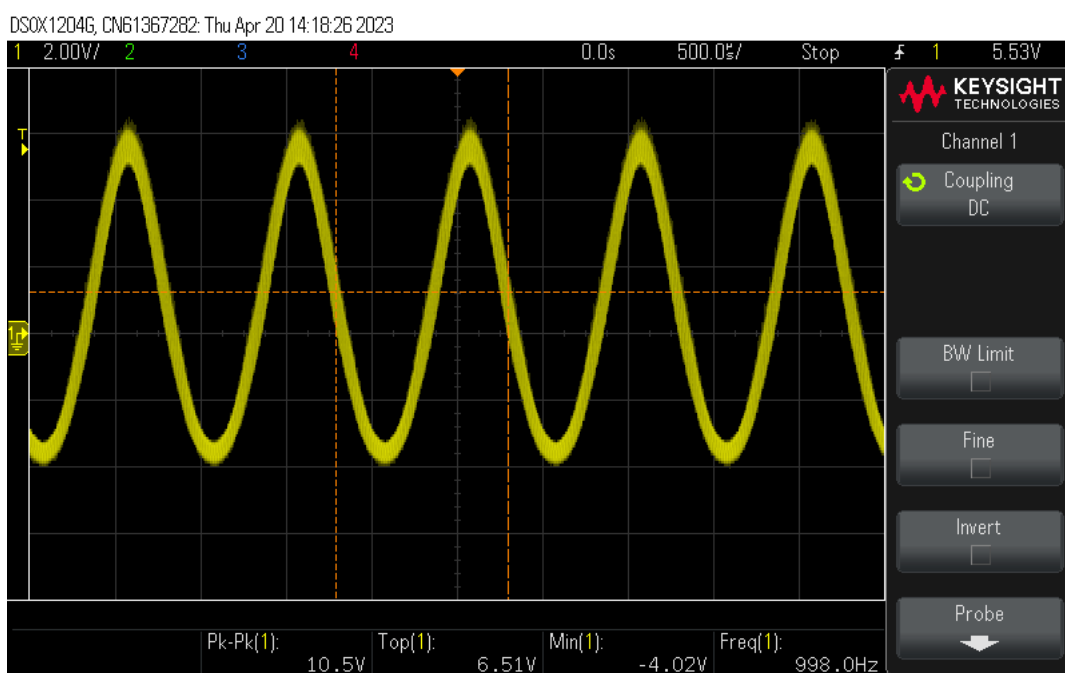
Μετά τον πυκνωτή C3 στην έξοδο του κυκλώματος, το σήμα εξόδου πρέπει να κυμαίνεται γύρω από το 0 V ως τάση αναφοράς. Αυτό συμβαίνει επειδή κόβεται η DC συνιστώσα του σήματος εξόδου και οι τάσεις κατωφλίου είναι πλέον τα +6 V και τα -6 V.

Στο Σχήμα 4.27, απεικονίζεται η έξοδος του αριστερού καναλιού. Εκ πρώτης όψεως, στο σήμα εξόδου, παρατηρείται ένας θόρυβος που αναπτύσσεται πάνω στο ηχητικό σήμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της μικρής συχνότητας του τριγωνικού σήματος. Το ηχητικό σήμα, φθάνει την τάση κορυφής στα 5.55 V, τιμή που πλησιάζει αρκετά τη θεωρητική τιμή. Η αρνητική τάση κορυφής όμως, με τιμή -3.7 V, απέχει από τη θεωρητική τάση, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη συνολική ισχύ εξόδου προς το φορτίο. Η συχνότητα του σήματος εξόδου είναι η ίδια με τη συχνότητα του σήματος εισόδου στο 1 kHz. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση της τονικότητας του ηχητικού σήματος εξόδου αμετάβλητη, συγκριτικά με αυτή της εισόδου.



Σχήμα 4.27: Κυματομορφή εξόδου συστήματος αριστερού καναλιού (0 dB)

Το Probe τοποθετείται στην κλέμα εξόδου κυκλώματος RT1 του δεξιού καναλιού (Σχήμα 3.11). Στο Σχήμα 4.28 απεικονίζεται η έξοδος του ενισχυμένου σήματος του δεξιού καναλιού. Η τάση κορυφής του σήματος φθάνει τα 6.51 V, ενώ η αρνητική τάση κορυφής τα 4.02 V. Το συμπέρασμα που προκύπτει από τη σύγκριση των δύο σημάτων εξόδου, είναι πως το δεξί κανάλι είναι κατά ένα βαθμό πιο καθαρό, υπάρχει λιγότερος θόρυβος και πως οι τάσεις κορυφής είναι μεγαλύτερες. Ως αποτέλεσμα μεταφέρεται μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος προς το φορτίο, σε αντίθεση με το αριστερό κανάλι.



Σχήμα 4.28: Κυματομορφή εξόδου συστήματος δεξιού καναλιού (0 dB)

Πίνακας 4.7: Μετρήσεις εξόδου συστήματος

Κανάλι	Τάση πλάτους (V)	Τάση κορυφής (V)	Τάση βάσης (V)
Αριστερό Low Side	9.2	5.55	-3.7
Δεξί Low Side	10.5	6.51	-4.02

4.9 Κατανάλωση και απολαβή του συστήματος

Για την μέτρηση της κατανάλωσης ρεύματος σε κατάσταση ηρεμίας του συστήματος, τοποθετείται ένα αμπερόμετρο σε σειρά με τις μπαταρίες και την τροφοδοσία της πλακέτας. Το ρεύμα που καταναλώνει η πλακέτα σε κατάσταση ηρεμίας χωρίς να υπάρχει το σήμα εισόδου έχει την τιμή των 0.52A . Επιβεβαιώνεται πως υπάρχει περιττή κατανάλωση ρεύματος καθώς το κύκλωμα ενίσχυσης δεν λειτουργεί με τις ιδανικές καταστάσεις. Στην συνέχεια, προστίθεται στο κύκλωμα το ημιτονοειδές σήμα του 1 kHz στα 0 dB με συνολικό ρεύμα κατανάλωσης του κυκλώματος της τάξης των 0.83A. Παρατηρείται πως το συνολικό ρεύμα είναι αυξημένο λόγω του φορτίου της εξόδου. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζεται η ισχύς του κυκλώματος σε κατάσταση αδράνειας:

$$P_{IN} = V_B * I_{RMS} = 12 * 0.52 = 6.24 W \quad (4.1)$$

Και σε κατάσταση με σήμα εισόδου:

$$P_{IN(0dB)} = V_B * I_{RMS} = 12 * 0.83 = 9.96 W \quad (4.2)$$

$$P_{OUT(0dB)} = P_{IN(0dB)} - P_{IN} = 9.96 - 6.24 = 3.72 W \quad (4.3)$$

Υπολογίζεται η απολαβή του κυκλώματος:

$$\eta\% = \frac{P_{OUT(0dB)}}{P_{IN(0dB)}} * 100\% = \frac{3.72}{9.96} * 100\% = 37.3\% \quad (4.4)$$

Πίνακας 4.8: Μετρήσεις ισχύος κυκλώματος

Ισχύς χωρίς εισοδο (W)	Ισχύς με εισοδο (W)	Ισχύς εξόδου (W)	Απολαβή (%)
6.24	9.96	3.72	37.3

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω αποτελέσματα η απολαβή του κυκλώματος είναι πολύ χαμηλή λόγω της κατάστασης που επικρατεί στην βαθμίδα ενεργοποίησης των MOSFETS.

4.10 Σύγκριση με προϊόν εμπορίου

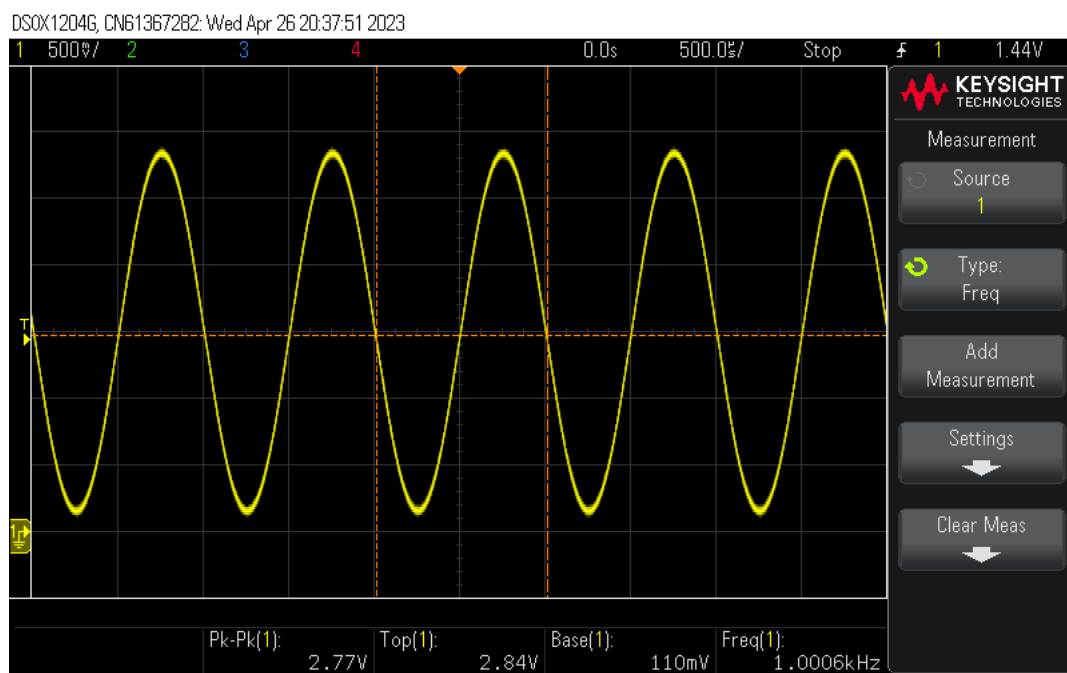
Το κεφάλαιο των μετρήσεων ολοκληρώνεται με τη σύγκριση του ενισχυτή σε σχέση με ένα προϊόν του εμπορίου. Το προϊόν σύγκρισης είναι η πλακέτα XINYI Sini Audio XY-C15H της εταιρίας Sinilink. Πρόκειται για μια ολοκληρωμένη πλακέτα ενισχυτή τάξης D, με δύο κανάλια αριστερού και δεξιού σήματος της τάξης των 20 W αντίστοιχα.

Η πλακέτα σύγκρισης χρησιμοποιεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα AP3016D για την ενίσχυση του σήματος που λαμβάνει μέσω Bluetooth, από μια ασύρματη συσκευή αναπαραγωγής. Η πλακέτα τροφοδοτείται με τάση 12 V και η είσοδος είναι ένα ημιτονοειδές ηχητικό σήμα στο 1 kHz στ 0 dB. Επειδή ο ενισχυτής είναι ένα μεμονωμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα, οι μετρήσεις σύγκρισης περιορίζονται στο σήμα εισόδου και εξόδου.

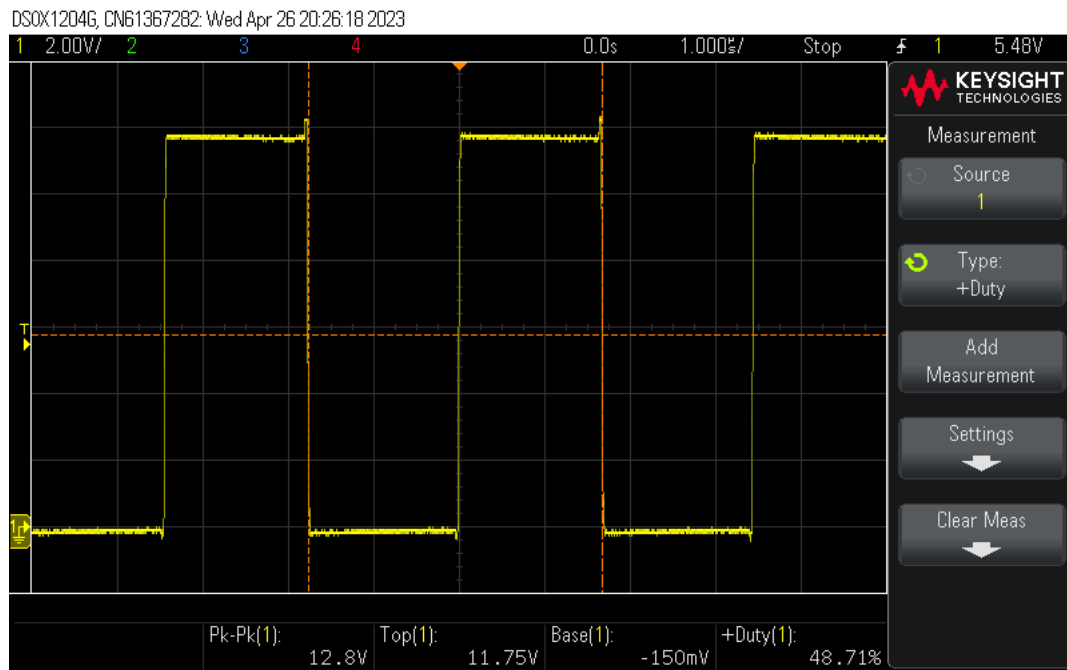
Στο Σχήμα 4.29, απεικονίζεται το σήμα εισόδου του 1 kHz, που αναπαράγεται από τη συσκευή μεταφοράς δεδομένων της πλακέτας. Το πλάτος της κυματομορφής είναι στα 2.77 V_{p-p} και το σήμα τροφοδοτείται κατευθείαν στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του ενισχυτή AP3016D. Η κορυφή του σήματος είναι στα 2.84 V, ενώ η βάση είναι στα 110 mV.

Στο Σχήμα 4.30 απεικονίζεται η μια από τις δύο εξόδους του ενισχυτή. Σημειώνεται πως η συγκεκριμένη πλακέτα δεν περιλαμβάνει φίλτρο εξόδου, επομένως οι κυματομορφές έχουν τη μορφή PWM και συγκρίνονται με την έξοδο από τα MOSFET. Η τάση κορυφής της εξόδου είναι στα 11.75 V, η βάση είναι στα -150 mV και ο θετικός κύκλος εργασίας του PWM σήματος είναι στο 49,71%.

Παρατηρείται πως τα σήματα του ενισχυτή είναι αρκετά καθαρά και δεν περιλαμβάνουν θόρυβο. Ακόμα, οι χρόνοι μετάβασης την κατάσταση από 0 σε 1 της εξόδου, είναι σχεδόν άμεσοι και δεν περιλαμβάνουν απότομες αλλαγές, αλλά ούτε και ταλαντώσεις. Αυτό συμβαίνει επειδή ο ενισχυτής τάξης D συμπεριλαμβάνεται πλήρως σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ακόμα με βάση τους πίνακες σύγκρισης 4.8 και 4.9, παρατηρείται η διαφορά μεταξύ των εισόδων και των εξόδων, του κυκλώματος πτυχιακής με το ολοκληρωμένο κύκλωμα του XY-C15H.



Σχήμα 4.29: Κυματομορφή σήματος εισόδου XY-C15H



Σχήμα 4.30: Κυματομορφή εξόδου XY-C15H

Πίνακας 4.9: Σύγκριση εισόδων κυκλώματος πτυχιακής με το XY-C15H

Κανάλι	Τάση πλάτους (V)	Τάση κορυφής (V)	Τάση βάσης (V)
Κύκλωμα πτυχιακής	6.23	3.10	-3.14
XY-C15H	2.77	2.84	0.11

Πίνακας 4.10: Σύγκριση εξόδων κυκλώματος πτυχιακής με το XY-C15H

Κανάλι	Τάση πλάτους (V)	Τάση κορυφής (V)	Τάση βάσης (V)	Θετικός κύκλος εργασίας (%)
Κύκλωμα πτυχιακής	27.9	12	-10.9	36.79
XY-C15H	12.8	11.75	-0.15	48.71

4.11 Επίλογος

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο, παρατηρείται πως το κύκλωμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας λειτουργεί χωρίς δυσκολία στη μεταφορά και αναπαραγωγή του ηχητικού σήματος. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, οι περισσότερες κυματομορφές του πραγματικού κυκλώματος, φθάνουν σε έναν ικανοποιητικό βαθμό τα θεωρητικά αποτελέσματα. Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων μέτρησης, προκαλούνται λόγω ανοχών των πραγματικών εξαρτημάτων της πλακέτας και λόγω των πραγματικών συνθηκών που επικρατούν στο περιβάλλον. Η σχεδίαση της πλακέτας, πραγματοποιήθηκε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για την αποφυγή των παραπάνω φαινομένων. Ακόμα, παρατηρείται η σημασία της χρήσης ενός έτοιμου ολοκληρωμένου κυκλώματος ενισχυτή τάξης D σε συστήματα ανάπτυξης, καθώς βελτιώνει την ποιότητα και τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Φθάνοντας προς το τέλος αυτής της πτυχιακής εργασίας, γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα του ενισχυτή τάξης D. Η μετατροπή ενός ηχητικού σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό για την ενίσχυση του, μπορεί να αποτελέσει μεγάλη πρόκληση για τους μηχανικούς. Όπως παρατηρήθηκε στην παραπάνω μελέτη και υλοποίηση του κυκλώματος, τα θεωρητικά αποτελέσματα, σε ορισμένα σημεία δε συμβαδίζουν με τα πραγματικά. Αυτό προκύπτει λόγω απουσίας ιδανικών συνθηκών στον πραγματικό κόσμο και ύπαρξης ανοχών και παραγόντων που επηρεάζουν τη λειτουργία των κυκλωμάτων. Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο ενισχυτής τύπου D προσφέρει μεγάλο ποσοστό ενίσχυσης, με χαμηλό οικονομικό και χωροταξικό κόστος, όπως και μικρή κατανάλωση ενέργειας.
- Οι μετρήσεις του κυκλώματος υλοποίησης, απέχουν από τους θεωρητικούς υπολογισμούς.
- Η σωστή επιλογή των εξαρτημάτων του κυκλώματος, αποτελεί σημαντικό κομμάτι στην σχεδίαση ενός σωστού συστήματος.
- Η βαθμίδα εξόδου του ενισχυτή, δε λειτουργεί σύμφωνα με το θεωρητικό κομμάτι και καταναλώνει επιπλέον ενέργεια από το σύστημα τροφοδοσίας.
- Υπάρχει απουσία του νεκρού χρόνου στην βαθμίδα των οδηγών, με αποτέλεσμα την δημιουργία επιπλέον προβλημάτων.
- Η σύγκριση με ένα προϊόν εμπορίου, απέδειξε τη σημασία χρήσης των έτοιμων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στα συστήματα σχεδίασης.

Τέλος, για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, είναι σημαντικό να γίνουν προτάσεις βελτίωσης του ηλεκτρονικού κυκλώματος, με σκοπό την ορθότερη λειτουργία αυτού. Η χρήση ενός και μόνο ολοκληρωμένου κυκλώματος θα μπορούσε να είναι η ιδανική απάντηση στην επίλυση όλων των προβλημάτων. Για την ορθότερη λειτουργία της μελλοντικής σχεδίασης προτείνονται οι παρακάτω προτάσεις βελτίωσης:

- Χρήση ενός έτοιμου ολοκληρωμένου κυκλώματος.
- Αλλαγή του οδηγού MOSFET, με έναν που προσθέτει νεκρό χρόνο στην οδήγηση των πυλών αυτών.
- Διόρθωση κυκλώματος Bootstrapping, με την προσθήκη μιας αντίστασης σε σειρά με την δίοδο για την σωστή φόρτιση του Bootstrap πυκνωτή.
- Αλλαγή της Bootstrap διόδου με μια Schottky, με σκοπό τη βελτίωση του χρόνου επαναφοράς για τη μείωση κατανάλωσης ρεύματος.
- Ενσωμάτωση των κυκλωμάτων του μικροελεγκτή ESP32 και του DAC στην πλακέτα σχεδίασης, για την εξοικονόμηση χώρου και κόστους.
- Αντικατάσταση των εξαρτημάτων Through Hole Technology (THT), με Surface Mount Technology (SMD), για την εξοικονόμηση χώρου και μείωση όγκου της πλακέτας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ben Duncan. High Performance Audio Power Amplifiers. Jordan Hill, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1996.
- [2] de Forest, Lee, “The Audion, A New Reciever for Wireless Telegraphy,” *Trans. AIEE*. American Institute of Electrical and Electronic Engineers. 25: 735–763
- [3] Douglas Self. Audio Power Amplifier Design Sixth Edition. New York: Routledge, 2017.
- [4] Albert Malvino, David Bates. Ηλεκτρονική, 8^η Έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2017.
- [5] Μιχάλης Ν. Σπάσος, Κώστας Θ. Αμοιρίδης. Σύγχρονες Εφαρμογές Αναλογικών Εφαρμογών, 2^η Έκδοση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΑΪΒΑΖΗ, 2018.
- [6] International Rectifier, Appl. Note AN-1071, Class D Audio Amplifier Basics.
- [7] Maxim Integrated, Appl. Note 3977, Class D Amplifiers: Fundamentals of Operation and Recent Developments.
- [8] E. Gaalaas, “Class D audio amplifiers: what, why, and how,” *Analog Devices Analog Dialog*, vol. 40, no. 2, Jun 2006.
- [9] Espressif Systems, “ESP32 Series, Version 4.2, Datasheet”, 2023.
- [10] Texas Instruments, “2V RMS DirectPath™, 112/106/100dB Audio Stereo DAC With 32-bit, 384kHz PCM Interface” , PCM5102A Datasheet, May, 2012.
- [11] Texas Instruments, “Precision Timers”, NE555, Datasheet, 2010.
- [12] Texas Instruments, “LinCMOS Precision Dual Operational Amplifiers”, TLC272, Datasheet, 1994.
- [13] Texas Instruments, “Differential Comparators with Strobes”,LM311, Datasheet, 2003.
- [14] International Rectifier, “High and Low Side Driver”, IR2110, Datasheet, 2005.
- [15] International Rectifier, “HEXFET Power MOSFET” , IRLZ44N, Datasheet, 1997.