



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**‘Ανάπτυξη μεγαφώνου παραμετρικής διάταξης για
κατευθυντική αναπαραγωγή ήχου’**

**‘Development of parametric array loudspeaker for directional sound
reproduction’**

(Πεστιμαλτζιάν Καραμπέτ Κάρλος)

Επιβλέπων : Δρ. Χρήστος Γιακόπουλος

Αθήνα Δεκέμβριος, 2022

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Δρ. Χρήστο Γιακόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την υποστήριξη, και την υπομονή. Επίσης οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου Χριστίνα, Βερόνικα, Ηλέκτρα για τον πολύτιμο χρόνο που τους στέρησα κατά την διάρκεια της μεταπτυχιακής μου προσπάθειας.

Πίνακας περιεχομένων

‘Ανάπτυξη μεγαφώνου παραμετρικής διάταξης για κατευθυντική αναπαραγωγή

ήχου’	0
1 Γενικά.....	4
1.1 Διάδοση ηχητικών κυμάτων	4
1.2 Ιστορικά στοιχεία.....	5
1.3 Θεμελιώδης θεωρία.....	7
1.4 Θεωρητική βάση	9
1.5 Μαθηματική προσέγγιση	12
2 Κατασκευή Ηχείου.....	15
2.1 Διάτρητη πλακέτα	15
2.2 Υπερηχητικοί μορφοτροπίς (transducers)	16
3 Κατασκευή Κυκλώματος[24]	20
3.1 Κύκλωμα διαμόρφωσης.....	21
3.2 Κύκλωμα οδήγησης.....	22
4 Πειραματικές μετρήσεις.....	24
4.1 Εξοπλισμός	24
4.2 Στήσιμο της πειραματικής διάταξης	26
4.3 Πρώτη σειρά μετρήσεων.....	27
4.4 Δεύτερη σειρά μετρήσεων	32
4.5 Τρίτη σειρά μετρήσεων:.....	34
4.6 Τέταρτη σειρά μετρήσεων:	37
5 Αποτελέσματα των μετρήσεων	40
6 Φωτογραφικό Υλικό	44
7 Βιβλιογραφία.....	46
8 Παράρτημα Α.....	47

1 Γενικά.

1.1 Διάδοση ηχητικών κυμάτων

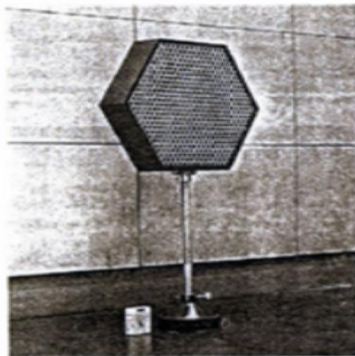
Μέσω της ταλάντωσης κάποιου υλικού και της παλμικής κίνησής του οφείλεται η παραγωγή του ήχου η οποία ονομάζεται ηχητική πηγή. Η ύλη ή η ουσία μέσω της οποίας μεταδίδεται ο ήχος ονομάζεται μέσο. Το μέσο μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο. Ένα κύμα είναι μια διαταραχή που κινείται μέσω ενός μέσου όταν τα σωματίδια του μέσου θέτουν τα γειτονικά τους σωματίδια σε κίνηση που αυτά με τη σειρά τους παράγουν παρόμοια κίνηση σε άλλα. Τα σωματίδια του μέσου δεν κινούνται προς τα εμπρός, αλλά η διαταραχή μεταφέρεται προς τα εμπρός. Αυτό συμβαίνει κατά τη διάδοση του ήχου σε ένα μέσο, επομένως ο ήχος μπορεί να απεικονιστεί ως κύμα. Τα ηχητικά κύματα χαρακτηρίζονται από την κίνηση των σωματιδίων στο μέσο και ονομάζονται μηχανικά κύματα. Ο αέρας είναι το βασικότερο μέσο για να ταξιδεύει ο ήχος που ακούμε. Όταν ένα δονούμενο αντικείμενο κινείται προς τα εμπρός, πιέζει και συμπιέζει τον αέρα μπροστά του δημιουργώντας μια περιοχή υψηλής πίεσης. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται συμπίεση. Αυτή η συμπίεση αρχίζει να απομακρύνεται από το δονούμενο αντικείμενο. Ακολούθως, όταν το δονούμενο αντικείμενο κινείται προς τα πίσω δημιουργεί μια περιοχή χαμηλής πίεσης που ονομάζεται αραιώση (rarefaction). Καθώς το παλλόμενο αντικείμενο κινείται εμπρός και πίσω δημιουργείται μια σειρά συμπίεσης και αραιώσεων στον αέρα. Αυτά κάνουν το ηχητικό κύμα να διαδίδεται μέσω του μέσου.. Η πίεση σχετίζεται με τον αριθμό των σωματιδίων ενός μέσου σε έναν δεδομένο όγκο. Περισσότερη πυκνότητα των σωματιδίων στο μέσο δίνει μεγαλύτερη πίεση και το αντίστροφο. Έτσι, η διάδοση του ήχου μπορεί να απεικονιστεί ως διάδοση παραλλαγών πυκνότητας ή παραλλαγών πίεσης στο μέσο.

Μπορούμε να περιγράψουμε ένα ηχητικό κύμα με βάση:

- την συχνότητα
- το πλάτος και
- την ταχύτητα

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η παραμετρική συστοιχία αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 ως μια τεχνική σόναρ [3], όχι μόνο για τη βελτίωση της κατευθυντικότητας της δέσμης σόναρ, αλλά και την αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, που έχει ως αποτέλεσμα μικρότερους παλμούς και ως εκ τούτου υψηλότερες αναλύσεις [4]. Κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών πολλοί ερευνητές τόσο στις ΗΠΑ [5–9] όσο και στην ΕΣΣΔ [10,11] συνέχισαν να αναπτύσσουν θεωρίες και μαθηματικούς φορμαλισμούς που σχετίζονται με τη μη γραμμική διάδοση ακουστικών κυμάτων. Και ενώ είχε υπάρξει κάποιο επίπεδο συζήτησης και πειραματισμών [5] σχετικά με αυτές τις μη γραμμικές διεργασίες στον αέρα, μόλις το 1975 [12] υπήρξε μια ουσιαστική μελέτη παραμετρικής διάταξης για τον αέρα. Αυτοί οι ερευνητές μπόρεσαν να δείξουν τα αναμενόμενα μη γραμμικά φαινόμενα που υπάρχουν στον αέρα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και αργότερα, αρκετές ομάδες [13-16] είχαν προσπαθήσει να κατασκευάσουν ένα μεγάφωνο που χρησιμοποιούσε αυτά τα μη γραμμικά φαινόμενα για να παράγει ήχο. Ενώ κατάφεραν τη δημιουργία ακουστικού σήματος, αντιμετώπιζαν σημαντικά προβλήματα με την ακουστική παραμόρφωση του ήχου και τις μεγάλες απαιτήσεις ισχύος. Πιο πρόσφατα, άλλοι ερευνητές, όπως ο [17] έδειξαν ανανεωμένο ενδιαφέρον για την τεχνολογία, αλλά αυτά τα συστήματα ήταν ουσιαστικά πανομοιότυπα με αυτά που δημοσιεύθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980 [18], χρησιμοποίησαν τους ίδιους μετατροπείς και τις ίδιες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, με αποτέλεσμα να περιλαμβάνουν τις ίδιες ελλείψεις. Όλα τα παραπάνω μέχρις ότου ο Joseph Pompei κατασκευάσει μια συσκευή με περίπου αποδεκτά αποτελέσματα από άποψη ακουστικής παραμόρφωσης [19]. Το Πρώτο παραμετρικό ηχείο παρουσιάστηκε από τον Yoneyama το 1982 (εικόνα 1) με την χρήση DSM AM (Double Side Band Amplitude Modulation Berkday envelope proposal) διαμόρφωσης, αλλά με πολύ υψηλό THD.[15]



First Parametric Array Loudspeaker Yoneyama

Εικόνα 1 Το πρώτο παραμετρικό ηχείο

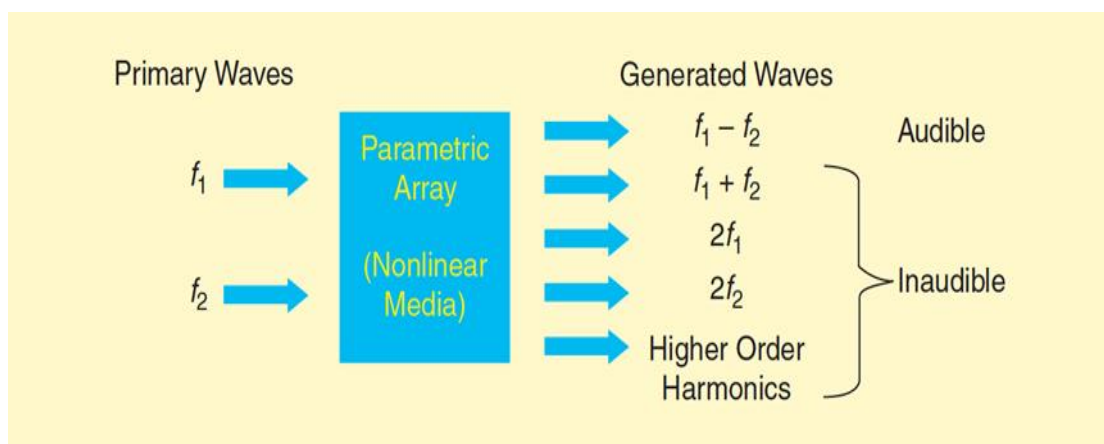
Στις μέρες μας υπάρχουν δημοσιευμένες προσπάθειες με στόχο την ποιότητα και την γραμμική απόκριση του παραμετρικού ηχείου[25] αλλά απαιτούν και άλλη διερεύνηση ως προς την κατευθυντικότητα αλλά και την τελική ποιότητα. Τα βασικά προβλήματα που παραμένουν είναι στην υψηλή παραμόρφωση που αποκλείει την χρήση τους σε εφαρμογές ποιότητας (High quality, High Fidelity) και ο περιορισμός στο ότι δεν μπορούν να αναπαράγουν στο χαμηλό ακουστικό φάσμα. Ως εκ τούτου τα βρίσκουμε σε απλές εφαρμογές διαφήμισης και εξυπηρέτησης καταναλωτών. Παρακάτω βλέπουμε εφαρμογές σε βιβλιοθήκες , μουσεία , διαφημιστικά stand και μηχανές αναψυκτικών.



1.3 Θεμελιώδης θεωρία.

Η θεμελιώδης θεωρία του παραμετρικού ηχείου βασίζεται στην λειτουργία του παραμετρικού πίνακα, που ανακαλύφθηκε και εξηγείται από τον Westervelt στο 1960, σε μία συνεδρίαση της Ακουστικής Εταιρείας της Αμερικής. Το 1975, οι Bennet και Η Blackstock απέδειξαν ότι ένα παραμετρικό ηχείο μπορούσε να λειτουργήσει με μέσο μεταφοράς τον αέρα όταν στην αποστολή κυμάτων σε συχνότητες 18,6 kHz και 23,6 kHz σε συγκροτημένες δέσμες παρατήρησαν ένα νέο κύμα από την διαφορά των δύο αυτών συχνοτήτων στα 5 kHz.

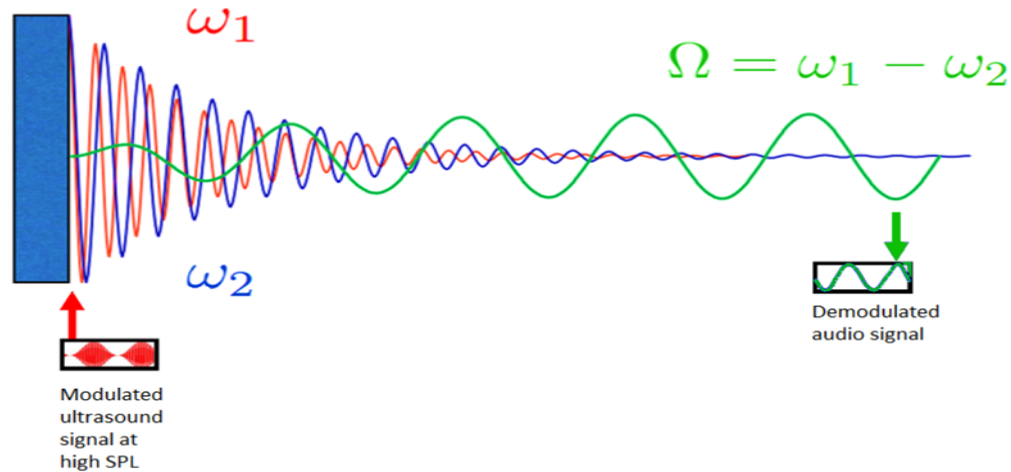
Ο Westervelt περιέγραψε το φαινόμενο του παραμετρικού πίνακα ως: «δύο επίπεδα κύματα διαφορετικών συχνοτήτων που όταν ταξιδεύουν στην ίδια κατεύθυνση παράγουν δύο νέα κύματα, ένα που έχει συχνότητα ίση με το άθροισμα των αρχικών συχνοτήτων και το άλλο ίσο με τη διαφορά τους.»



Εικόνα 2 αλληλεπίδραση των δυο κυμάτων και τα παράγωγα τους

Η εικόνα (2) δείχνει την δημιουργία των κυμάτων με το άθροισμα και την διαφορά συχνότητας, καθώς και τα άλλα παραγόμενα κύματα σε υψηλότερες αρμονικές των πρωτογενών. Σημειώνεται ότι μόνο η διαφορά των δυο συχνοτήτων είναι σε φάσμα που μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ανθρώπινο αυτί.

Τα κύματα αυτά εξασθενούν στον αέρα πιο γρήγορα στις υψηλότερες συχνότητες και σε αυξανόμενες αποστάσεις από το ηχείο. Το κύμα από τη διαφορά των δύο συχνοτήτων, το οποίο είναι σε χαμηλότερη συχνότητα και γίνεται αντιληπτή από τον άνθρωπο, μειώνεται λιγότερο από την απορρόφηση του αέρα. Επομένως, μετά από κάποια απόσταση της



Εικόνα 3 Εξασθένηση των υψηλών συχνοτήτων και το παραμένον ακουστικό σήμα

διάδοσης, μόνο τα ακουστικά κύματα της ηχητικής δέσμης παραμένουν σε επαρκές πλάτος ώστε να ακούγονται από τον άνθρωπο. Εικόνα (3)

Η μη γραμμικότητα του αέρα οφείλεται στην διαφορά των χρόνων συμπίεσης και αποσυμπίεσης των μορίων του. Όταν συμπιέζονται, τα μόρια κινούνται γρήγορα στην νέα θέση αλλά όταν σταματάει η δύναμη που τα συμπιέζει τα μόρια του αέρα καθυστερούν να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση.

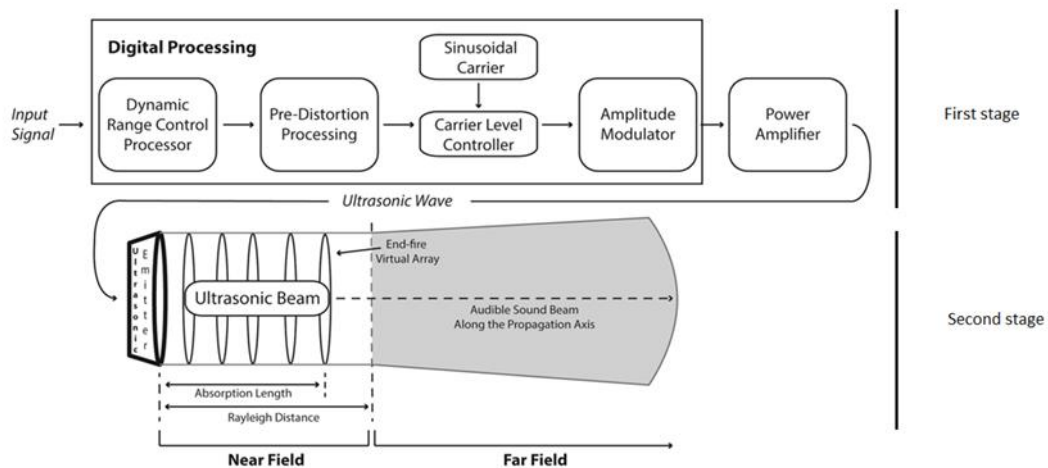
Υπάρχουν δύο βασικές αποστάσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον παραμετρικό πίνακα, (εικόνα 4)

- Η απόσταση Rayleigh και
- Το μήκος απορρόφησης.

Απόσταση Rayleigh ορίζεται ως η απόσταση από τον πίνακα στην οποία υπάρχει μετάβαση από μια κοντινή περιοχή σε μια μακρινή περιοχή. Μέσα στην απόσταση Rayleigh, το μέτωπο του κύματος είναι περίπου επίπεδο. Μετά την απόσταση Rayleigh, το μέτωπο κύματος γίνεται πιο σφαιρικό και εξασθενεί πιο γρήγορα, με ρυθμό -6dB ανά διπλασιασμό της απόστασης.

Το μήκος απορρόφησης ορίζεται ως η απόσταση πέρα από την οποία η μη γραμμική αλληλεπίδραση των κυμάτων πλέον δεν υπάρχει. Το μήκος απορρόφησης ονομάζεται

επίσης αποτελεσματικό μήκος πίνακα (βλ. Εικ. 3), προσδιορίζοντας την απόσταση που διανύθηκε από τη δέσμη υπερήχων προτού σταματήσει να παράγει «εικονικές» πηγές ήχου. Το αποτελεσματικό μήκος του παραμετρικού πίνακα ονομάζεται επίσης ως το εύρος των εικονικών ακουστικών πηγών. Η διαδικασία ενδοδιαμόρφωσης στο εσωτερικό της κύριας δέσμης διεγείρει τα μόρια του αέρα σε ταλαντώσεις σε ακουστική συχνότητα, Αυτή η ταλάντωση θεωρείται εικονική πηγή. Η κατευθυντικότητα μιας πηγής ήχου σχετίζεται με την αναλογία μήκους κύματος προς το μέγεθος της πηγής. Για πηγές μικρότερες από ή ίσες της τάξης ενός μήκους κύματος, ο ήχος διαδίδεται ουσιαστικά παν-κατευθυντικά. Για πηγές ήχου πολύ μεγαλύτερες από τα μήκη κύματος ο ήχος διαδίδεται με υψηλή κατευθυντικότητα



Εικόνα 4 Σύστημα Παραμετρικού ηχείου όπου απεικονίζονται οι δυο αποστάσεις

1.4 Θεωρητική βάση

Οι θεωρίες που εξηγούν τη λειτουργία αυτών των ηχείων αφορούν στον τομέα της μη γραμμικής ακουστικής, κλάδου που ασχολείται με ηχητικά κύματα αρκετά μεγάλου πλάτους. Για την κατανόηση αυτών των φαινομένων ξεκινάμε με την εξίσωση ακουστικών κυμάτων:

$$\nabla^2 P(r, t) = \frac{2}{c^2} \frac{\partial^2 P(r, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

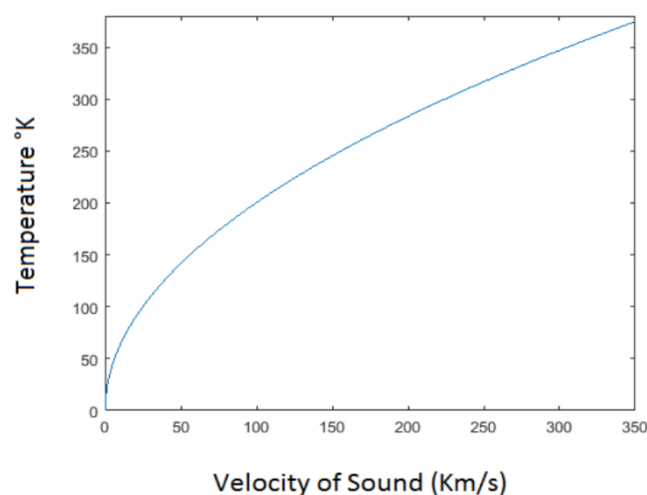
Στην σχέση 1 το πλάτος της πίεσης του ακουστικού πεδίου P , εκφραζόμενο σε γενική μορφή, περιγράφεται από την Λαπλασιανή ∇^2 και είναι ευθέως ανάλογο της δεύτερης

παραγώγου του ίδιου πεδίου ως προς το χρόνο t και αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της ταχύτητας του ήχου.

Ο τρόπος με τον οποίο μεταδίδεται η ενέργεια στο χώρο μοντελοποιείται ανάλογα με το σύστημα αναφοράς και το σχήμα που προκύπτει από τον τελεστή Laplace (π.χ. σφαιρικό, καρτεσιανό, κυλινδρικό, και τα λοιπά.) Η εξίσωση (1) είναι μια απλή εξίσωση κυματικής και θεωρεί ότι το μέσο είναι ισότροπο, που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν διακυμάνσεις των μεγεθών (π.χ. μέση πυκνότητα, θερμοκρασία και τοπική πίεση) σε όλους τους άξονες, και η ταχύτητα του ήχου θεωρείται σταθερή. Στην πραγματικότητα υπάρχουν αλλαγές στην πυκνότητα, τη θερμοκρασία (Εικόνα 1) και στην τοπική πίεση που επηρεάζει την ταχύτητα του ήχου. Ο όρος c εξαρτάται από το Bulk Modulus B (που εξαρτάται από την πίεση και την θερμοκρασία) και από την πυκνότητα ρ του αέρα με την ακόλουθη σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2)$$

Στην σχέση 2, το R είναι η σταθερά των αερίων, το M είναι η μέση μοριακή μάζα του αέρα και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία σε κλίμακα Kelvin. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι η εξίσωση του κύματος σε αυτή τη μορφή είναι μια εξιδανικευμένη περιγραφή του τι συμβαίνει όταν διαδίδεται η ενέργεια. Αυτή η εξίσωση περιγράφει τη διάδοση μιας διαταραχής σε ένα μέσο που του έχει επιβληθεί μια συγκεκριμένη πίεση. Αν το μέσο δεν είναι ιδανικό τότε επηρεάζουν τη διάδοση διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως επίσης και εάν τα πλάτη των κυμάτων είναι αρκετά υψηλά. Για παράδειγμα, η εικόνα (4) δείχνει την

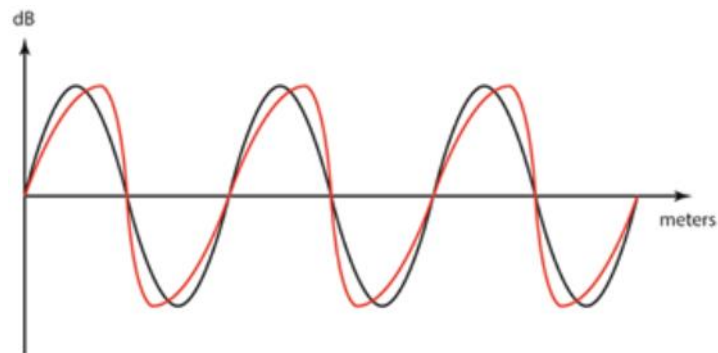


Εικόνα 5 σχέση ταχύτητα στον αέρα με την θερμοκρασία

εξάρτηση της ταχύτητας του ήχου στον αέρα με τη θερμοκρασία:

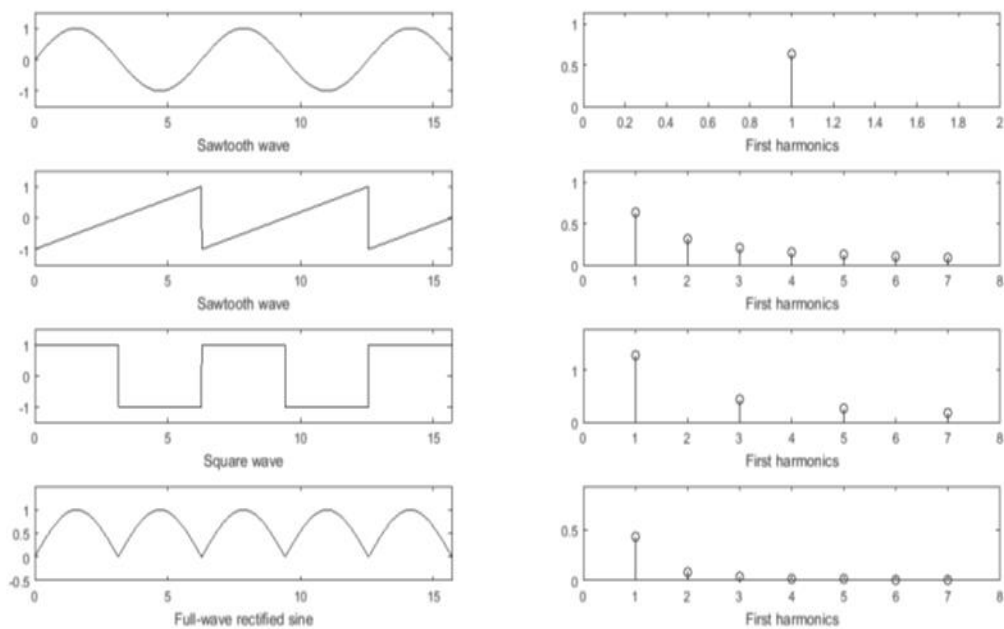
Όταν ένα κύμα κατά την διάδοση του αντιμετωπίζει διακυμάνσεις στην ταχύτητα, σταδιακά αλλάζει την μορφή του.

Η μαύρη καμπύλη στην εικόνα (6) αντιπροσωπεύει ένα κύμα που δεν είναι παραμορφωμένο



Εικόνα 6 Αλλαγές στην μορφή του κύματος από τις διακυμάνσεις ταχύτητας

και η κόκκινη δείχνει ένα κύμα που έχει υποστεί παραμόρφωση. Τα σημεία στην κορυφή με την υψηλή πίεση ταξιδεύουν πιο γρήγορα από τα σημεία με λιγότερη πίεση στις κοιλάδες τα οποία μετατοπίζονται πιο αργά. Το μαύρο κύμα από καθαρό ημίτονο πλέον έχοντας αλλάξει μορφή έχει αποκτήσει αρμονικές συνιστώσες.[8]



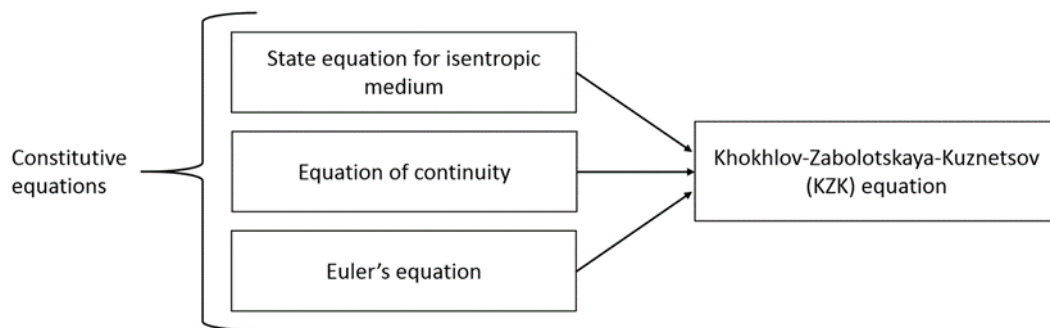
Εικόνα 7 Παραδείγματα σημάτων με το φασματικό τους περιεχόμενο

Στην εικόνα (7) έχουμε μερικά παραδείγματα φασματικής ανάλυσης σημάτων, με πιο χαρακτηριστικά το καθαρό συνημίτονο που δεν αναλύεται και το τετράγωνο που η ανάλυσή

του φτάνει στο άπειρο. Αντίστοιχα στην εικόνα (6) παρατηρούμε την σταδιακή μετατροπή του ημιτονικού σήματος σε τριγωνικό οπότε και την εμφάνιση αρμονικών. Αυτό το μη γραμμικό φαινόμενο καθιστά δυνατή τη δημιουργία κάποιων ‘επιθυμητών’ χαρακτηριστικών από την παραμόρφωση και ουσιαστικά την αιτία λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας, δηλαδή την παραγωγή ακουστικού αποτελέσματος από το υψίσυχο μη ακουστικό σήμα.

1.5 Μαθηματική προσέγγιση

Όπως παρουσιάζεται στα [21][22][23], το παραμετρικό ηχείο (επίσης γνωστό ως Audio Spot Light), μπορεί να δημιουργήσει κύμα ήχου υψηλής κατεύθυνσης, από το επιθυμητό ηχητικό σήμα σε υψηλή συχνότητα διαμόρφωσης. Αναφέραμε νωρίτερα ότι μια ηχητική δέσμη γίνεται ιδιαίτερα κατευθυντική όταν το μέγεθος της πηγής είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του ήχου και είναι ευρέως διαθέσιμο στη βιβλιογραφία [23] ότι σε υψηλότερες συχνότητες, ο ήχος γίνεται εξαιρετικά κατευθυντικός. Για την θεωρία ξεκινάμε από την εξίσωση Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK) που εξηγεί τα συνδυασμένα αποτελέσματα της μη γραμμικότητας, της περίθλασης και της απορρόφησης στα κατευθυντικά ηχητικά κύματα.[20]



Σε αυτή την εξίσωση συνδυάζονται:

1. Η εξίσωση κατάστασης

$$\frac{c}{c_0} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (3)$$

2. Η εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

3. Και η εξίσωση Euler

$$-\nabla p = \rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] \quad (5)$$

Και καταλήγουμε στην

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial r} = \frac{c_0}{2} \nabla_r^2 p + \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2} \quad (6)$$

Όπου

- p είναι η ακουστική πίεση ήχου,
- c_0 είναι η ταχύτητα του ηχητικού σήματος,
- δ είναι η διαχυτικότητα του ήχου,
- β είναι ο συντελεστής μη γραμμικότητας και
- ρ_0 η πυκνότητα του μέσου (στην περίπτωση μας ο αέρας).

Η αναλυτική λύση της εξίσωσης μας δείχνει την αλλοίωση του κύματος που «αυτόαποδιαμορφώνεται» (self-demodulation) από την μη γραμμικότητα του αέρα. Στην εικόνα(8) βλέπουμε το αποτέλεσμα εξομοίωσης σε ένα σήμα burst με Gaussian μορφή σε διαφορετικές αποστάσεις από την εκπομπή του.

Στην εξίσωση KZK παρατηρούμε ότι οι δύο πρώτοι όροι:

$$\frac{c_0}{2} \nabla_r^2 p + \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} \text{ την ονομάζουμε P1 (7)}$$

είναι γραμμικοί στο p και η λύση τους σχετίζεται με την αναπαραγωγή ήχου χαμηλής παραμόρφωσης ενώ ο τελευταίος όρος:

$$\frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2} \text{ την ονομάζουμε P2 (8)}$$

είναι μη γραμμικός στο p και η λύση του σχετίζεται με την γεωμετρία της ακουστικής δέσμης.

Ένα σύνολο απλών κατά προσέγγιση λύσεων (όπως προτείνεται στο [23]) για το p δίνεται από τις :

$$p_1 = [p_0 E(t) \sin(r\omega_c t)] e^{-\alpha x} \quad (9)$$

$$p_2 = \frac{\beta p_0^2 a^2}{16 \cdot \rho_0 \alpha c_0^4 x} \cdot \frac{\partial^2 E^2(\tau)}{\partial \tau^2} \quad (10)$$

όπου:

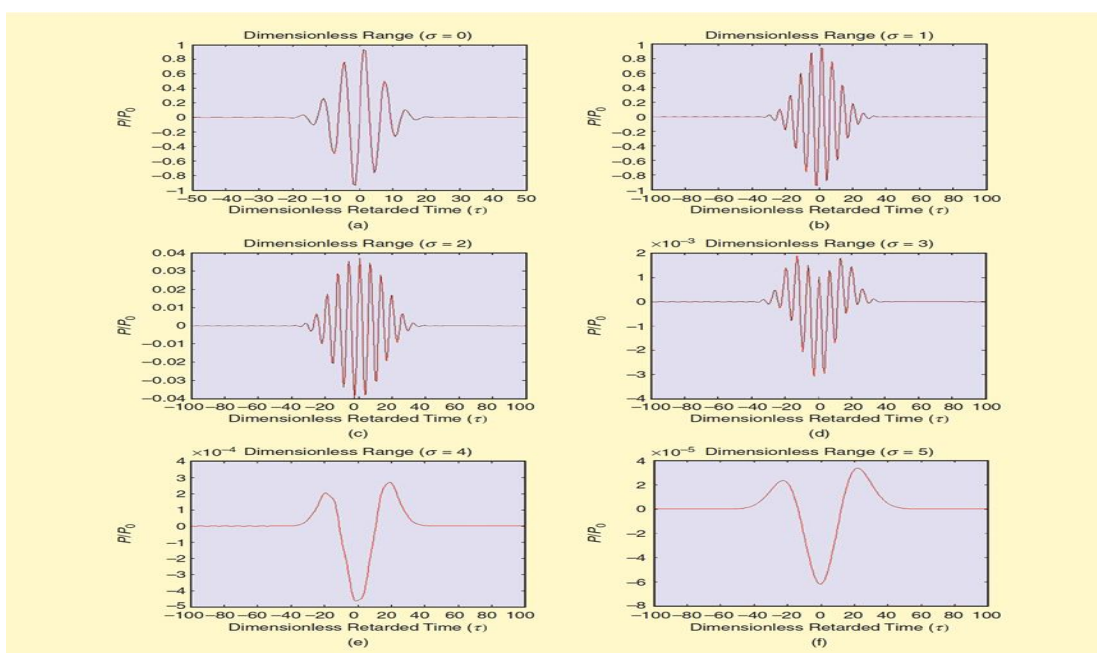
- a είναι η διάσταση του μορφοτροπέα,
- α είναι η απορρόφηση υπερήχων (ανάλογο προς ωc^2),
- ωc είναι η φέρουσα συχνότητα υπερήχων και
- $E(t)$ είναι το σήμα διαμόρφωσης του σήματος διαμορφωμένου σε (AM). Από τις δυο εξισώσεις βγάζουμε τις παρακάτω πληροφορίες

(i) P_1 , αντιπροσωπεύει το αποσβενόμενο σήμα AM.

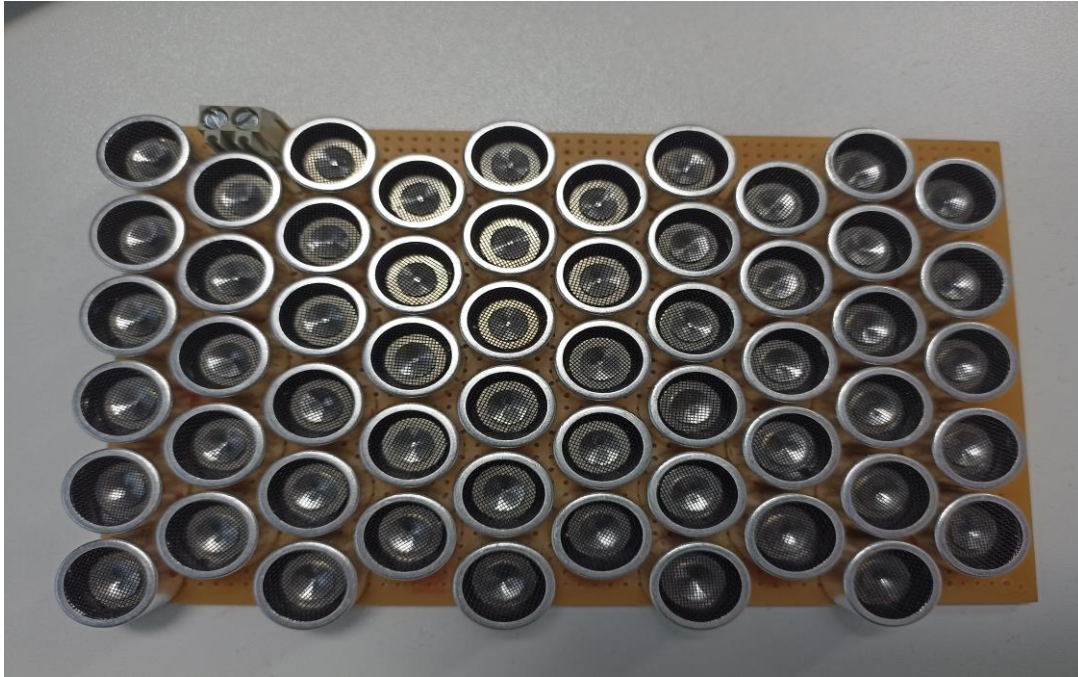
(ii) p_2 είναι ανάλογο p_0^2 , που σημαίνει ότι τα επίπεδα ακουστικής πίεσης σχετίζονται μη γραμμικά με τα επίπεδα πίεσης υπερήχων

(iii) p_2 είναι ανάλογο του a^2 , που σημαίνει ότι τα επίπεδα ακουστικής πίεσης σχετίζονται άμεσα με την διάσταση του μορφοτροπέα

(iv) p_2 είναι ανάλογο του $\frac{\partial^2 E^2(\tau)}{\partial \tau^2}$ που σημαίνει ότι τα επίπεδα ακουστικής πίεσης έχουν φασματική κλίση +12db/οκτάβα. Αυτό σημαίνει ότι οι χαμηλότερες συχνότητες χρειάζονται περισσότερη ισχύ για να αναπαραχθούν. Επίσης τα επίπεδα ακουστικής πίεσης έχουν τετράγωνη σχέση με το σήμα διαμόρφωσης, $E(t)$.



Εικόνα 8 εξομοίωση KZK



Εικόνα 9 Το ηχείο στην τελική του μορφή

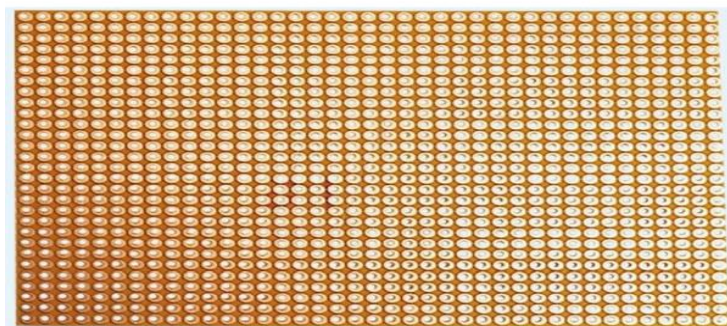
2 Κατασκευή Ηχείου

Το ηχείο κατασκευάστηκε από δυο βασικά υλικά

- Διάτρητη πλακέτα
Υπερηχητικούς μορφοτροπείς (transducers)

2.1 Διάτρητη πλακέτα

Η διάτρητη πλακέτα έχει διαστάσεις 10x16cm και είναι κατασκευασμένη από βακελίτη. Έχει έτοιμες τρύπες σε όλη την επιφάνεια και από την μια όψη περιμετρικά κάθε τρύπας υπάρχει μικρή επιφάνεια χαλκού για την κόλληση των εξαρτημάτων. Πάνω στην πλακέτα τοποθετήθηκαν και κολλήθηκαν οι μορφοτροπείς (transducers). Κατά την τοποθέτηση

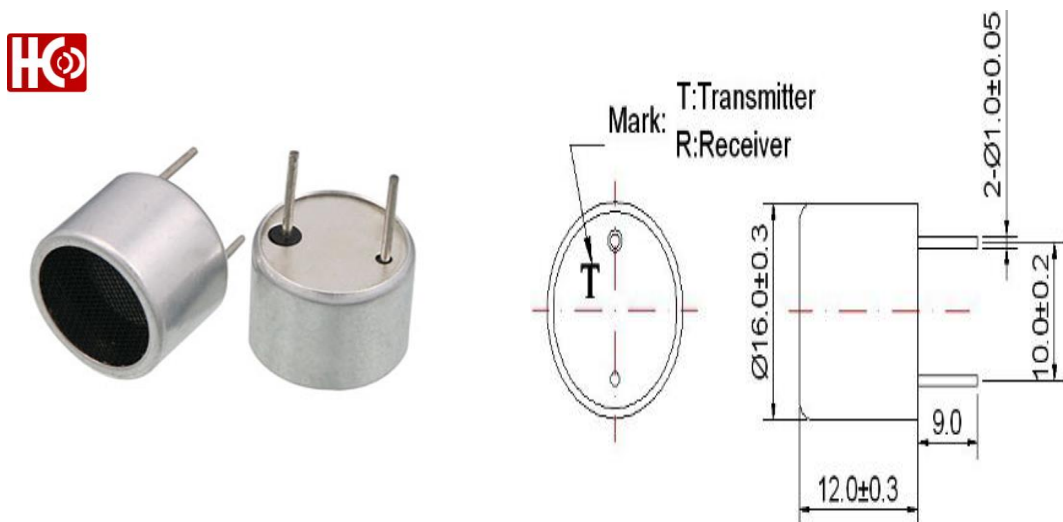


Εικόνα 10 Πίσω όψη διάτρητης πλακέτας

έπρεπε να γίνει επεξεργασία στις τρύπες της πλακέτας, με λεπτό αιχμηρό αντικείμενο, για να μεγαλώσει η διάμετρος τους. Οι διαστάσεις στην απόσταση των τρυπών δεν ταίριαζε με την απόσταση στους ακροδέκτες του μορφοτροπέα. Η μικρή διάνοιξη ήταν αρκετή για να ταιριάξουν οι δυο διαστάσεις και να περαστεί το εξάρτημα στην πλακέτα. Η πλακέτα είναι διαθέσιμη στην αγορά σε πολλές διαστάσεις και παραλλαγές σε όλα τα καταστήματα ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

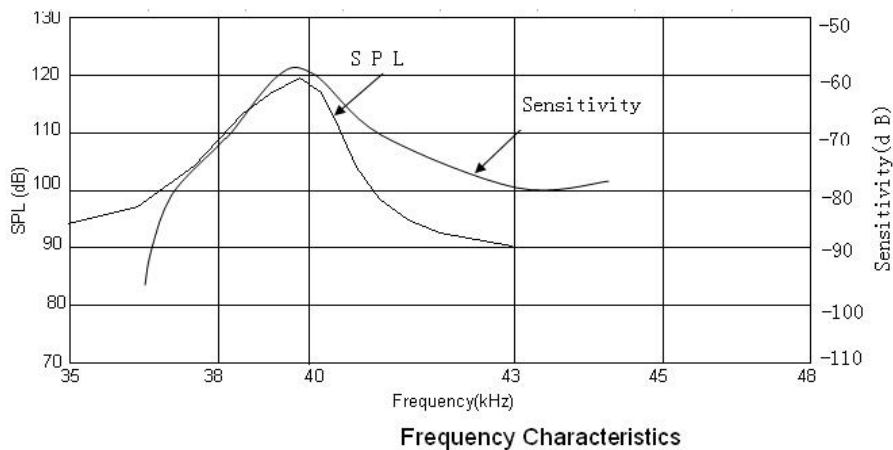
2.2 Υπερηχητικοί μορφοτροπέες (transducers)

Οι μορφοτροπέες είναι εξαρτήματα που περιέχουν ένα κρύσταλλο με προσαρμοσμένη μια



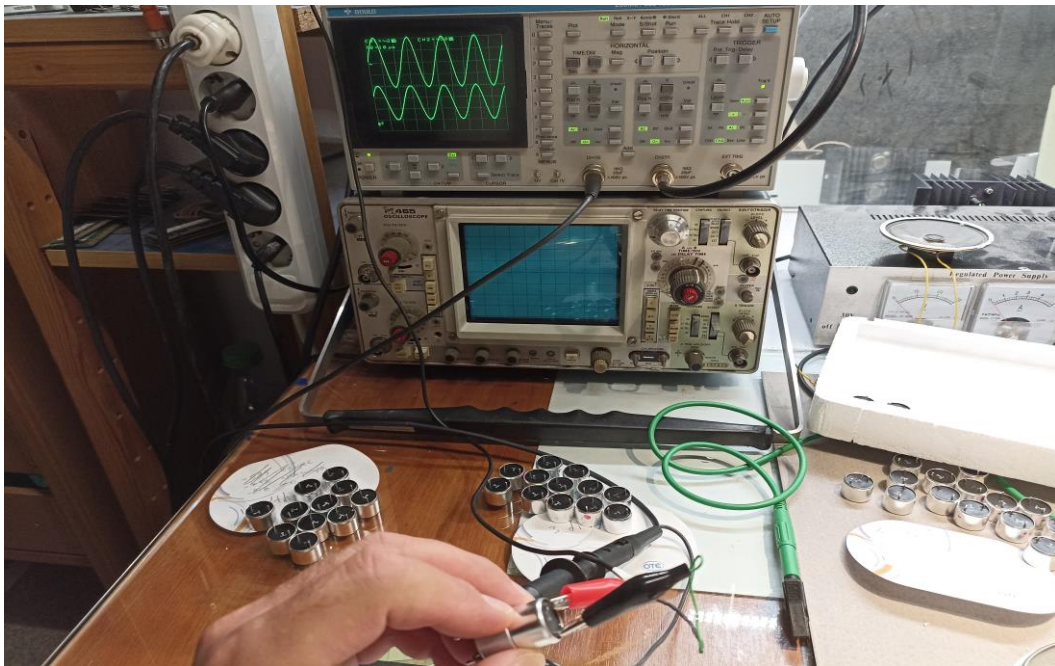
Εικόνα 11 Ο μορφοτροπέας της κατασκευής με τις διαστάσεις του

μεμβράνη. Βασίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο όπου η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του κρυστάλλου κάνουν την μεμβράνη να πάλλεται και με την σειρά της να δημιουργεί αυξομειώσεις στην πίεση του αέρα στην επιφάνια της. Στην αγορά υπάρχουν μορφοτροπέες



Εικόνα 12 Καμπύλη απόδοσης πομπού και δέκτη

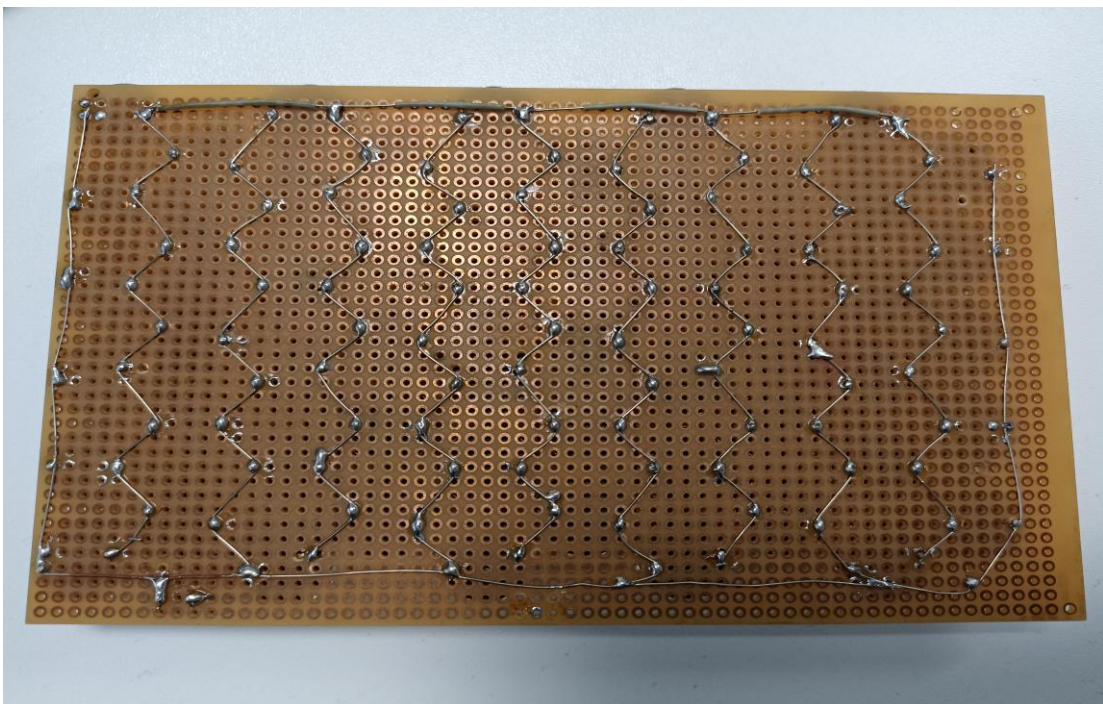
σε διαφορετικές διαστάσεις και μορφές. Το εξάρτημα εμφανίζει χωρητική συμπεριφορά κατά την λειτουργία του στο κύκλωμα. Κατασκευάζονται σε δυο μορφές σαν πομποί και σαν δέκτες. Πάνω σε κάθε εξάρτημα αναγράφεται η μορφή και η συχνότητα λειτουργίας. Στην εικόνα 4 βλέπουμε τις καμπύλες απόκρισης (πομπού) και ευαισθησίας (δέκτη) των εξαρτημάτων που επιλέξαμε για την κατασκευή. Για την κατασκευή επέλεξα εξαρτήματα με διάμετρο 16mm σε περίβλημα αλουμινίου και ανοιχτή την μπροστινή πλευρά (υπάρχει ένα προστατευτικό πλέγμα μέσα από το οποίο είναι ορατή η μεμβράνη). Για την κατασκευή προμηθευτήκαμε πομπούς για λειτουργία στα 40 KHz. Οι μορφοτροπείς παραγγέλθηκαν από το εξωτερικό γιατί δεν υπήρχαν στην ελληνική αγορά σαν μεμονωμένα εξαρτήματα αλλά τα βρίσκουμε ενταγμένα σε άλλα κυκλώματα και συστήματα. Είναι τα εξαρτήματα που βρίσκουμε σε συναγερμούς αυτοκίνητων σε κυκλώματα για μέτρηση απόστασης με υπέρηχους και άλλα. Για την κατασκευή του ηχείου έγινε επιλογή των καλύτερων σε απόδοση μορφοτροπέων. Σε αυτή την διαδικασία χρησιμοποίησα την γεννήτρια σημάτων με την οποία εφάρμοσα ημιτονικό σήμα διαδοχικά σε όλα τα εξαρτήματα και με την χρήση παλμογράφου (συνδεδεμένου στα δύο άκρα ενός εξαρτήματος τύπου δέκτη) μέτρησα την λήψη που λαμβάνει από τον πομπό. Επέλεξα τα εξαρτήματα, που εμφάνιζαν στα άκρα του δέκτη, την κυματομορφή με το μεγαλύτερο πλάτος. Πομπός και δέκτης ήταν τοποθετημένα εφαπτόμενα αντικριστά.



Εικόνα 13 Η διαδικασία ελέγχου των εξαρτημάτων

Στην εικόνα 13 διακρίνουμε τα δυο εξαρτήματα, στο ένα έχω εφαρμόσει το σήμα από την γεννήτρια (είναι το σήμα που βλέπουμε στην πάνω καμπύλη του παλμογράφου) και στο δεύτερο μετρώ το σήμα που λαμβάνει (κάτω καμπύλη του παλμογράφου). Ταυτόχρονα με την ίδια διαδικασία σημάδεψα και την πολικότητα στους ακροδέκτες των εξαρτημάτων. Όταν άλλαξα την πολικότητα στα άκρα του εξαρτήματος δοκιμής (πομπού) άλλαζε και η πολικότητα στο σήμα που εμφανίζονταν στον δέκτη. Με έναν μαρκαδόρο, σημάδεψα τον θετικό πόλο στο ποδαράκι του εξαρτήματος δοκιμής όταν το σήμα που έστειλε η γεννήτρια σήματος από τον πομπό, ήταν συμφασική με το σήμα που λαμβάναμε από τον δέκτη. Στην εικόνα 5 το εξάρτημα στην έξω πλευρά (όπου διακρίνουμε τα δυο κροκοδειλάκια), είναι ο πομπός όπου εφαρμόζουμε σήμα και ο ακροδέκτης με το κόκκινο κροκοδειλάκι θα σημειωθεί σαν θετικός. (Οι δυο καμπύλες στον παλμογράφο είναι συμφασικές).

Κατά την κατασκευή προσπάθησα να καλύψω την διάσταση της πλακέτας με όσο το δυνατόν περισσότερα εξαρτήματα. Από την πίσω πλευρά της πλακέτας κόλλησα όλες τις επαφές ώστε να είναι συνδεδεμένα παράλληλα (τα εξαρτήματα συνδέθηκαν με την δια πολικότητα σύμφωνα με την διαδικασία ελέγχου). Στο τέλος προσάρμοσα ένα ακροδέκτη για την σύνδεση των καλωδίων στην κατασκευή

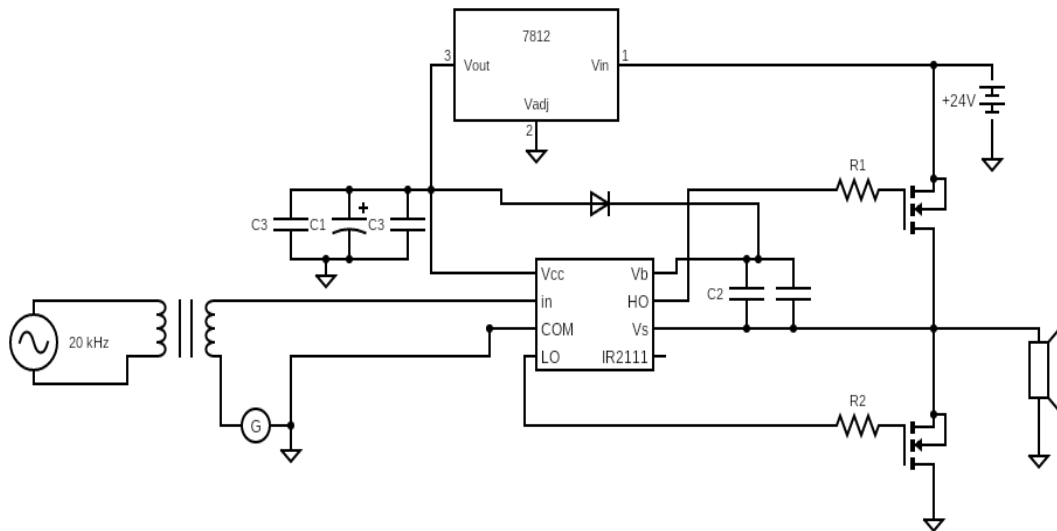


Εικόνα 14 Η πίσω πλευρά του ηχείου με τις κολλήσεις των μορφοτροπέων

3 Κατασκευή Κυκλώματος[24]

Το κύκλωμα πραγματοποιεί δυο βασικές λειτουργίες

- Την Διαμόρφωση του σήματος και
- την οδήγηση του ηχείου

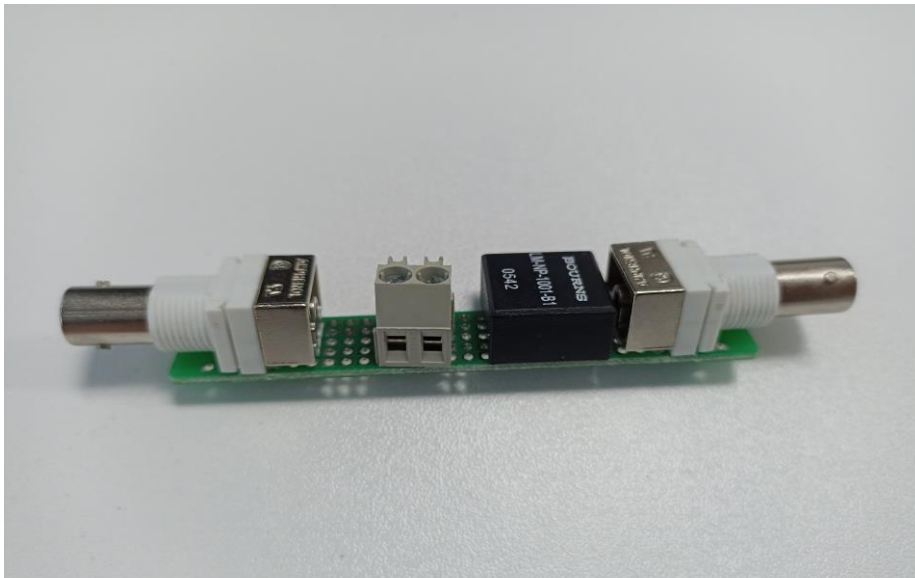


Εικόνα 15 Το τελικό κύκλωμα της κατασκευής

Λίστα Υλικών Κυκλώματος οδήγησης		
1	M/Σ	BOURNS LM-NP-1001-B1
2	FET	IRF540
3	IC	IR2111
4	V-regulator	LM7812
5	Diod	1N4007
6	Ressistors R1	47 ohm
7	Cap C2 x2	100nF
8	Cap C1	100pF
9	Cap C3 x2	25v/1000μF

3.1 Κύκλωμα διαμόρφωσης.

Στην αριστερή πλευρά του κυκλώματος υπάρχει ένας μετασχηματιστής. Στο πρωτεύων του μετασχηματιστή συνδέουμε την γεννήτρια του φέροντος σήματος f_0 . Στο σχέδιο αναγράφεται η συχνότητα των 20KHz, είναι η συχνότητα με την οποία οδηγήσαμε το σύστημα στην διαδικασία των μετρήσεων. Στο δευτερεύων του μετασχηματιστή είναι συνδεδεμένα σε σειρά η είσοδος του ακουστικού σήματος, που παράγεται από την γεννήτρια G και η είσοδος του κυκλώματος οδήγησης. Η παραπάνω συνδεσμολογία έχει σαν αποτέλεσμα την διαμόρφωση κατά πλάτος (AM) του φέροντος f_0 από την ακουστική συχνότητα της γεννήτριας (G).

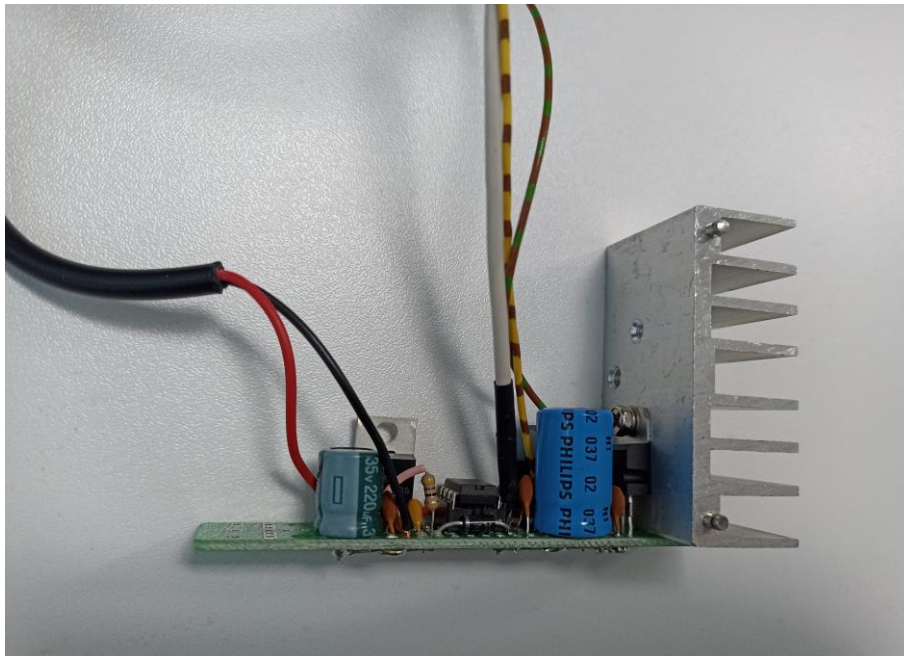


Εικόνα 16 Το κύκλωμα διαμόρφωσης στην τελική μορφή

Στην Εικόνα 8 βλέπουμε κατασκευασμένο το κύκλωμα διαμόρφωσης. Στις δυο πλευρές διακρίνουμε τους συνδέσμους (BNC connectors) για την είσοδο και την έξοδο των σημάτων. Στην αριστερή πλευρά (δίπλα στον μαύρο μετασχηματιστή) βρίσκεται η είσοδος όπου συνδέουμε την γεννήτρια του φέροντος F_0 και στην δεξιά πλευρά τον σύνδεσμο της εξόδου. Στην έξοδο συνδέουμε το καλώδιο που καταλήγει στο κύκλωμα οδήγησης. Στο μέσο της πλακέτας διακρίνουμε στην κλέμα εισόδου του ακουστικού σήματος f_1 .

3.2 Κύκλωμα οδήγησης.

Το κύκλωμα οδήγησης (κέντρο του κυκλώματος) περιλαμβάνει μια σειρά από εξαρτήματα με βασικότερο το ολοκληρωμένο (IR2111). Το ολοκληρωμένο έχει σαν βασική λειτουργία την οδήγηση των δυο τρανζίστορ τύπου FET που αυτά με την σειρά τους τροφοδοτούν διαδοχικά τα ηχεία. Το πάνω τρανζίστορ (βλέπε εικόνα 7) που είναι συνδεδεμένο την έξοδο HO (High output) κατά την αγωγή του τροφοδοτεί με +24 volt το ηχείο και το κάτω τρανζίστορ που είναι συνδεδεμένο στην LO (Low output) που κατά την αγωγή του γειώνει (και αποφορτίζει) του ηχείο. Το κύκλωμα τροφοδοτείται με τάση 24volt για την οδήγηση του ηχείου ενώ υπάρχει και ένας σταθεροποιητής (7812).



Εικόνα 17 το κύκλωμα οδήγησης στην τελική μορφή

Στην εικόνα 9 βλέπουμε το κατασκευασμένο κύκλωμα οδήγησης. Δεξιά διακρίνουμε μια μεγάλη ψήκτρα η οποία είναι προσαρμοσμένη πάνω στο ολοκληρωμένο LM7812. Το LM7812 είναι ολοκληρωμένο σταθεροποίησης τάσης (voltage regulator) στα 12volt. Στο κύκλωμα το LM7812 υποβιβάζει την τάση από τα 24Volt και τα σταθεροποιεί στα 12Volt. Επειδή η διαφορά μεταξύ των δυο τάσεων είναι μεγάλη το ολοκληρωμένο ανεβάζει υψηλή θερμοκρασία, οπότε είναι χρήσιμη μια ψήκτρα για την απαγωγή της θερμότητας ώστε να μην κινδυνεύσει το εξάρτημα από υπερθέρμανση. Το ολοκληρωμένο IR 2111 εκτελεί την λειτουργία half – bridge

driver. Τα δυο mosfet για να έρθουν σε αγωγιμότητα θα πρέπει να λάβουν το απαραίτητο φορτίο στην πύλη τους (Gate). Το mosfet δεν απαιτεί ρεύμα για να λειτουργήσει όπως είναι το bjt τρανζίστορ αλλά μια τιμή τάσης σε σχέση με την πηγή (Source). Η πύλη του mosfet όταν βρίσκεται σε ηρεμία και επειδή παρουσιάζει χωρητικά χαρακτηριστικά, όταν θα εφαρμοστεί τάση στο άκρο της εμφανίζεται σαν βραχυκύκλωμα στην πηγή που την τροφοδοτεί. Ως εκ τούτου η πηγή θα πρέπει για ένα μικρό κλάσμα του χρόνου να παρέχει ένα ικανό ποσό ρεύματος (φορτιού) μέχρις ότου ο πυκνωτής (της πύλης) φορτιστεί ώστε να εμφανιστεί η απαιτούμενη τάση στα άκρα του mosfet(πύλης , πυγής). Αυτή την λειτουργία πραγματοποιεί το ολοκληρωμένο IR2111 παράλληλα και με άλλες λειτουργίες που έχουν σαν σκοπό να προστατεύσουν το mosfet και την λειτουργία όλου του κυκλώματος. Αντίστοιχα και οι αντιστάσεις (μικρής τιμής) στα άκρα των πυλών στα δυο mosfet έχουν σκοπό να περιορίσουν το αρχικό ρεύμα για να προστατεύει το εξάρτημα. Στην Half bridge λειτουργία τα δυο mosfet άγουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές γιατί σε περίπτωση που ενεργοποιούν ταυτόχρονα θα παρουσιάζονταν βραχυκύκλωμα. Μια ακόμα δικλίδα προστασία του ολοκληρωμένου είναι η αδύνατη ταυτόχρονη τροφοδότηση και των δυο οδηγούντων εξαρτημάτων.

Τα δυο mosfet είναι συνδεδεμένα σε δικτύωμα totem pole. Το επάνω ονομάζετε High side και το κάτω low side. Το low side mosfet όταν δεχτεί τάση στην πύλη του και επειδή έχει την πυγή του στην γη θα έρθει εύκολα σε αγωγιμότητα. Το ίδιο δεν ισχύει για το high side επειδή ο μεσαίος κόμβος βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό. Για τον σκοπό αυτό υπάρχει στο κύκλωμα το δικτύωμα της διόδου με τον πυκνωτή (δυο πυκνωτές C2 στο κύκλωμα μας). Κατά την εναλλαγή των παλμών οδήγησης και αγωγιμότητας του κάτω (low side) mosfet ο πυκνωτής C2 μέσω της διόδου Diod φορτίζεται, οπότε κατά την επόμενη περίοδο όπου σβήνει το κάτω mosfet και πρέπει να αρχίσει να άγει το επάνω, έχει κρατήσει χαμηλό δυναμικό για την πυγή του high side και του επιτρέπει να άγει.

Οι υπόλοιποι πυκνωτές κάνουν χρέη σταθεροποίησης για την τροφοδοσία του κυκλώματος.

Το LM7812 είναι ένα κλασικό ολοκληρωμένο σταθεροποίησης τάσης και το βρίσκουμε στο εμπόριο με ποικίλες άλλες τιμές τροφοδότησης πέραν των 12 volt.

Τα καλώδια που συνδέονται πάνω στην πλακέτα είναι τα ακόλουθα:

- Το μαύρο αριστερά που καταλήγει στα δυο (Κόκκινο - μαύρο) τροφοδοτεί το κύκλωμα με την απαιτούμενη τάση. Το συνδέουμε στο σταθεροποιημένο τροφοδοτικό των 24volt.
- Το λευκό στο μέσο της φωτογραφίας, συνδέεται στην έξοδο του διαμορφωτή και εισάγει στο κύκλωμα το διαμορφωμένο σήμα που θα οδηγήσουμε το ηχείο.
- Τα δυο δίχρωμα καλώδια (Κίτρινο _ καφέ – καφέ _ πράσινο) συνδέονται στο ηχείο και αποτελούν την έξοδο του κυκλώματος. Τα συνδέουμε στην κλέμα πάνω στην διάτρητη πλακέτα.

4 Πειραματικές μετρήσεις

Για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών και της απόδοσης της συσκευής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην πίεση του ήχου σε συγκεκριμένες θέσεις. Στην διαδικασία των μετρήσεων μεταβλήθηκαν κάποια χαρακτηριστικά που αφορούσαν το κύκλωμα οδήγησης και το ακουστικό σήματα εκπομπής

Αναλυτικά οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Η συχνότητα ακουστικού σήματος εκπομπής
- Η συχνότητα του φέροντος σήματος
- Το πλάτος του φέροντος σήματος διαμόρφωσης

4.1 Εξοπλισμός

Κατά την διαδικασία μέτρησης της απόδοσης χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός

1. Γεννήτρια σημάτων για την παραγωγή του φέροντος f_0 , Τύπος: Keysight Agilent 33210A. είναι ψηφιακή γεννήτρια DDS με εύρος συχνοτήτων έως και τα 10MHz



2. Μικρόφωνο B&K 4189 για την μέτρηση των πιέσεων του ήχου.



Έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά

- Capacitance: pF
- Diameter: 1/2
- Dynamic range: 16.5 – 134 dB
- Frequency range: 20 – 20000 Hz
- Inherent noise: 16.5 dB A
- Lower limiting frequency -3dB: 12 Hz
- Optimised: Free field
- Polarization: Prepolarized
- Polarization voltages: V
- Pressure coefficient: -0.01 dB/kPa
- Sensitivity: 50 mV/Pa
- Standards: IEC 61094-4 WS2F
- Temperature coefficient: -0.006 db/°C
- Temperature range: -20 – 80 C

Και είναι συνδυσμένο με αναλογικό προενισχυτή, τυπου:2671

3. Κάρτα καταγραφής δεδομένων DAC της National Instruments, τύπος: NI USB-9162, που έχει 4 αναλογικά κανάλια εισόδου, εύρος τάσης εισόδου -5 ... +5 Volts και AD μετατροπέα των 24 bits



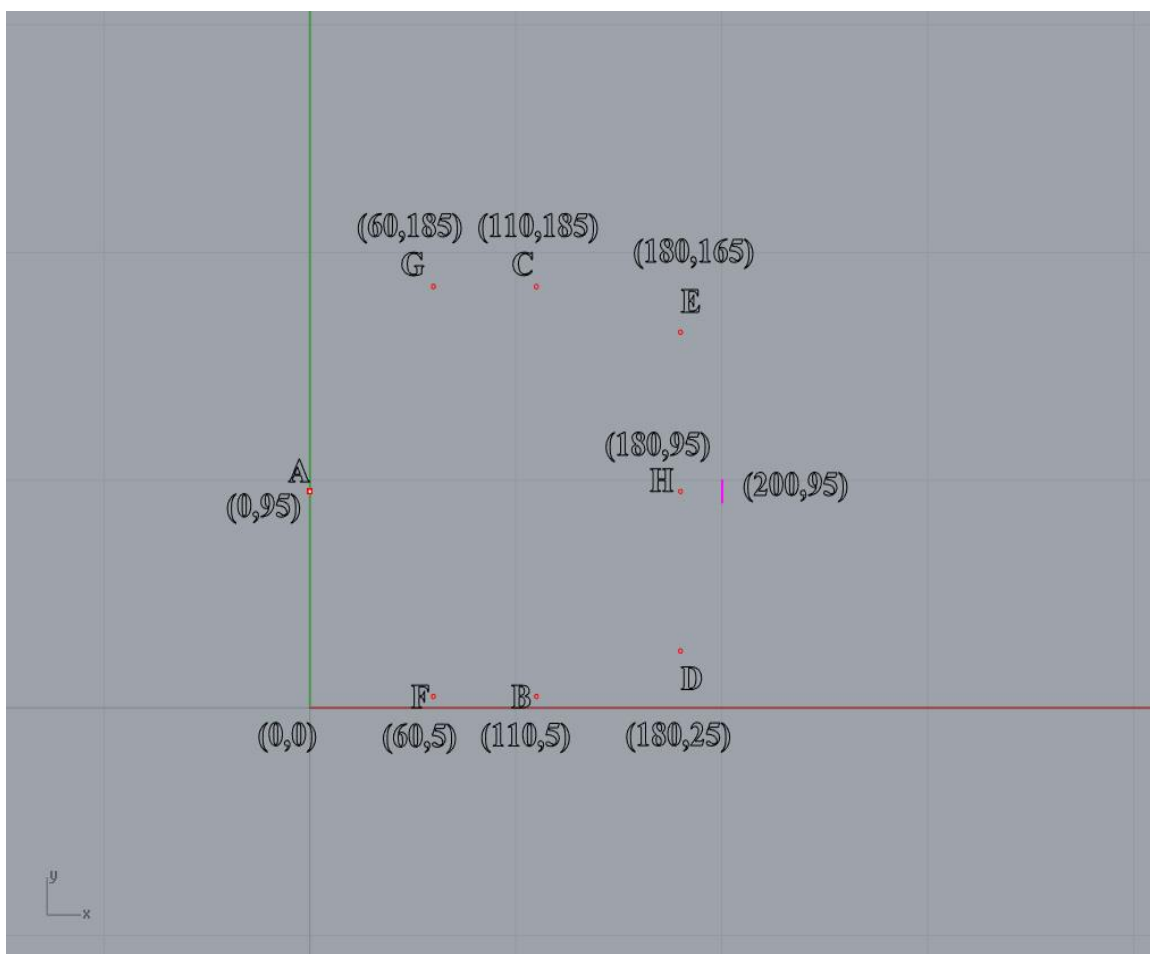
4. Εξωτερικό τροφοδοτικό για την τροφοδοσία του κυκλώματος οδήγησης ρυθμισμένο στα 24Volt

4.2 Στήσιμο της πειραματικής διάταξης

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το μικρόφωνο που τοποθετήθηκε σε καθορισμένες θέσεις απέναντι από το ηχείο. Διαδοχικά μεταβλήθηκαν οι μεταβλητές

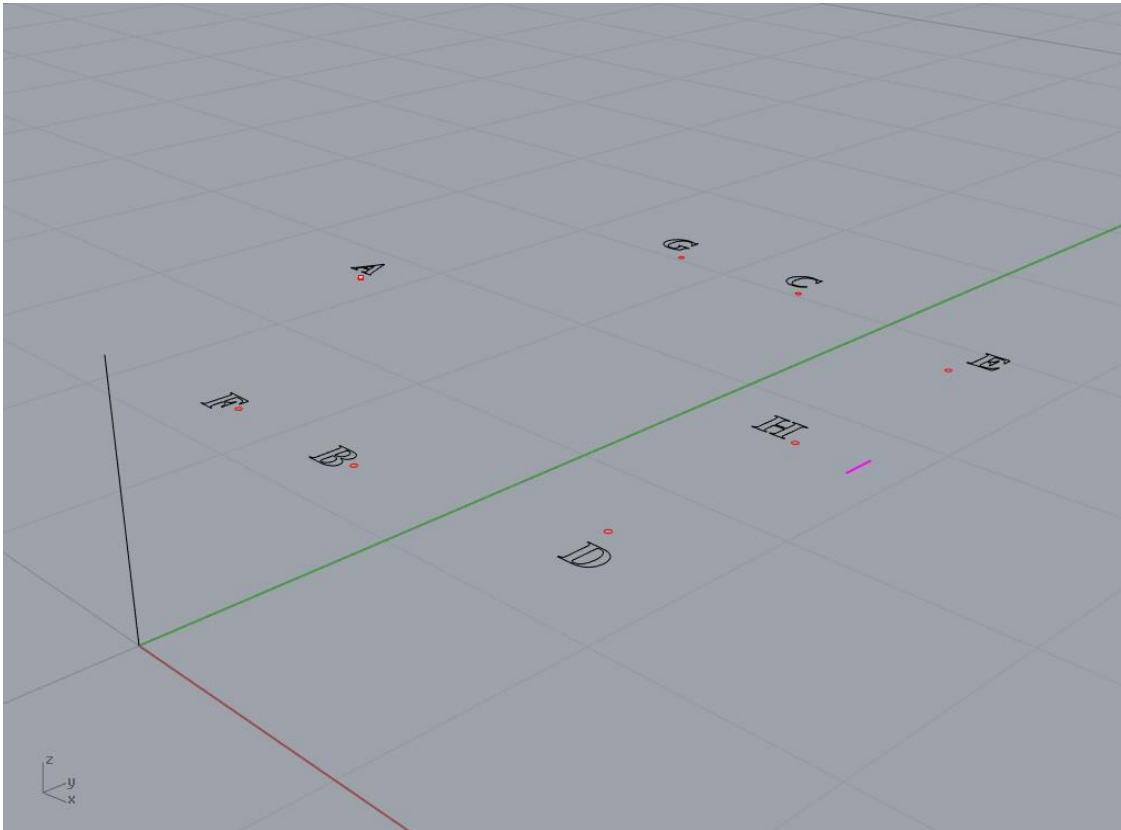
που αναγράφουμε παραπάνω και με την χρήση αναλυτή φάσματος που συγκέντρωνε τα δεδομένα από την μετρητική κάρτα (DAC) καταγράφηκε η απόδοση του ηχείου στα διαφορετικά σημεία του χώρου.

Στην εικόνα 10 έχουν καταγραφεί τα σημεία μετρήσεων.(ροζ κουκίδες). Οι δυο κάθετες



Εικόνα 18 Θέσεις μετρήσεων του πειράματος

μεταξύ τους γραμμές (κόκκινη - πράσινη) οριοθετούν τον χώρο μέσα στον οποίο έγινε η διαδικασία. Το σημείο (0,0) αποτελεί το σημείο αναφοράς για τις αποστάσεις που απεικονίζονται. Το ηχείο είναι τοποθετημένο σε απόσταση 2 μέτρων από την θέση A και στους 95 cm από την κόκκινη πλευρά, διακρίνεται σαν κάθετη ροζ παύλα στο σημείο



Εικόνα 19 Τρισδιάστατη απεικόνιση σημείων.

(200,95). Στις θέσεις A και B πραγματοποιήθηκαν οι περισσότερες μετρήσεις και αποτελούν την απόσταση των δυο μέτρων απέναντι από το ηχείο (σημείο A) και την κάθετη απόσταση των 90 cm και σε γωνία 45 μοιρών (σημείο B). Όλες οι θέσεις τοποθετήθηκαν στο 1m από το έδαφος.

4.3 Πρώτη σειρά μετρήσεων

Η διαδικασία των μετρήσεων ξεκίνησε με σταθερές όλες τις παρακάτω μεταβλητές. Μετρήθηκαν οι πιέσεις σε διαφορετικές αποστάσεις από το ηχείο όπως αυτές απεικονίζονται στην εικόνα 10.

Τάση τροφοδοσίας : 24v

Συχνότητα φέροντος : $f_0 = 20\text{Khz}$

Πλάτος φέροντος $A_{p-p} : 4\text{v}$

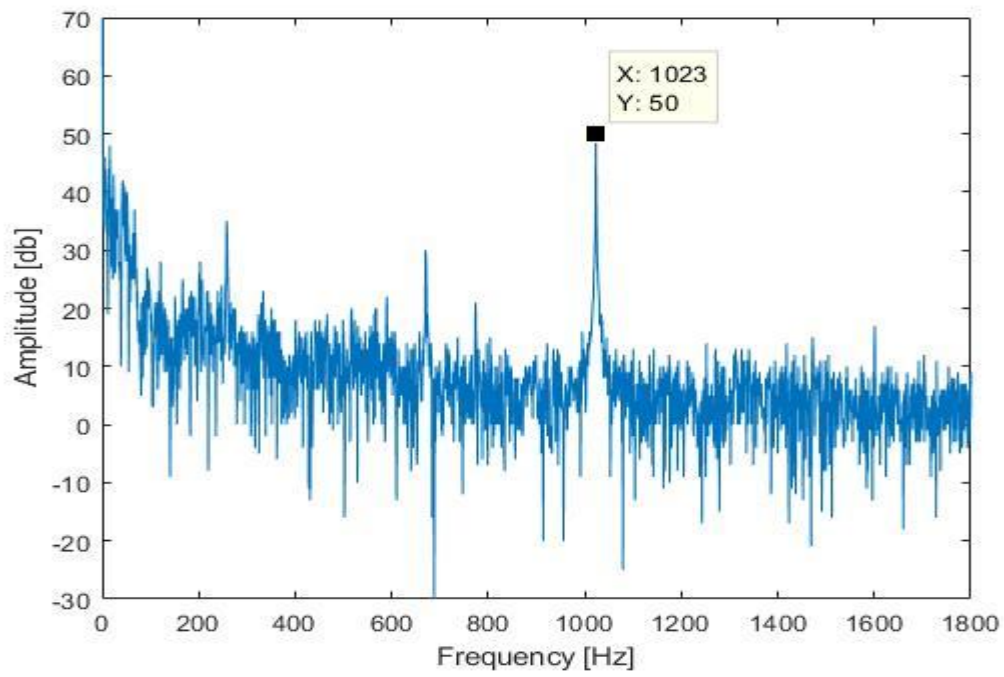
Συχνότητα σήματος : $f_1 = 1000\text{ Hz}$

Τάση εξόδου ενισχυτή : $V_{rms} = 0,64\text{v}$

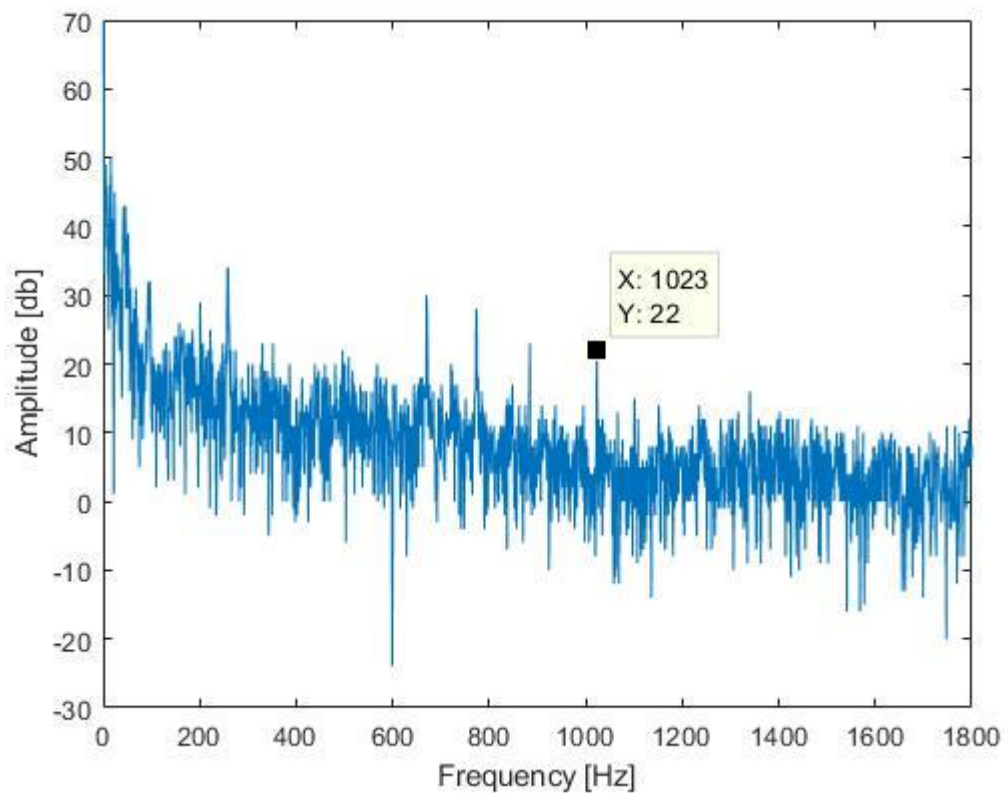
Συχνότητα δειγματοληψίας : 10 KHz

Πλήθος δηγμάτων : $P = 10000$

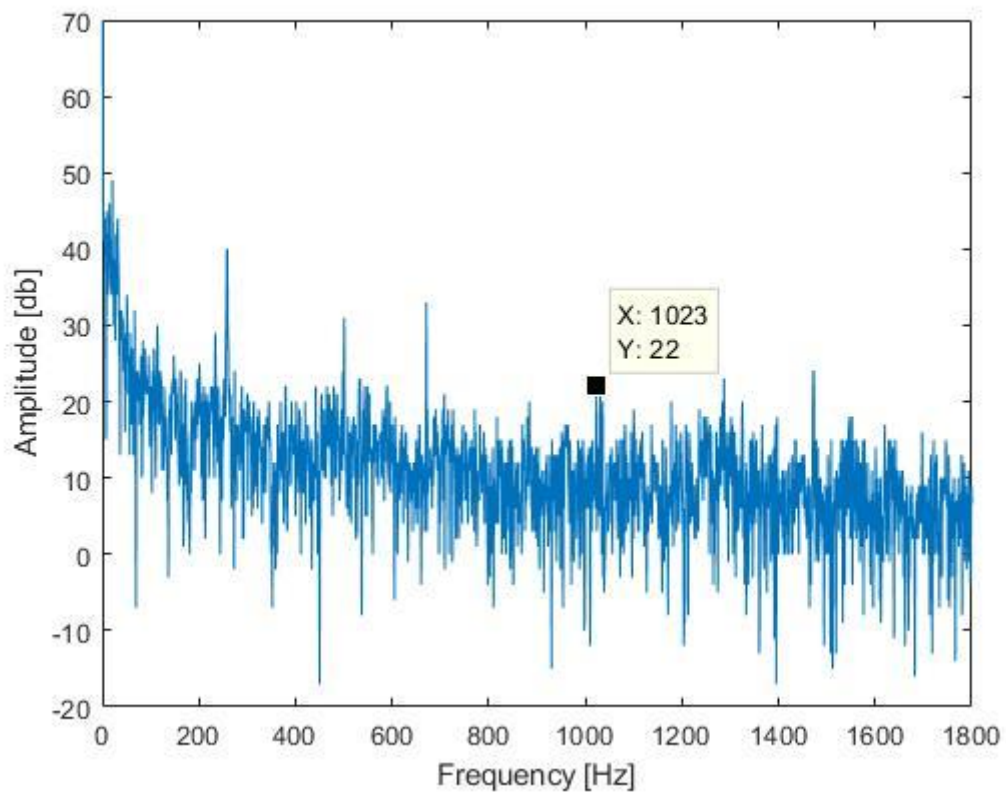
Θέση Α



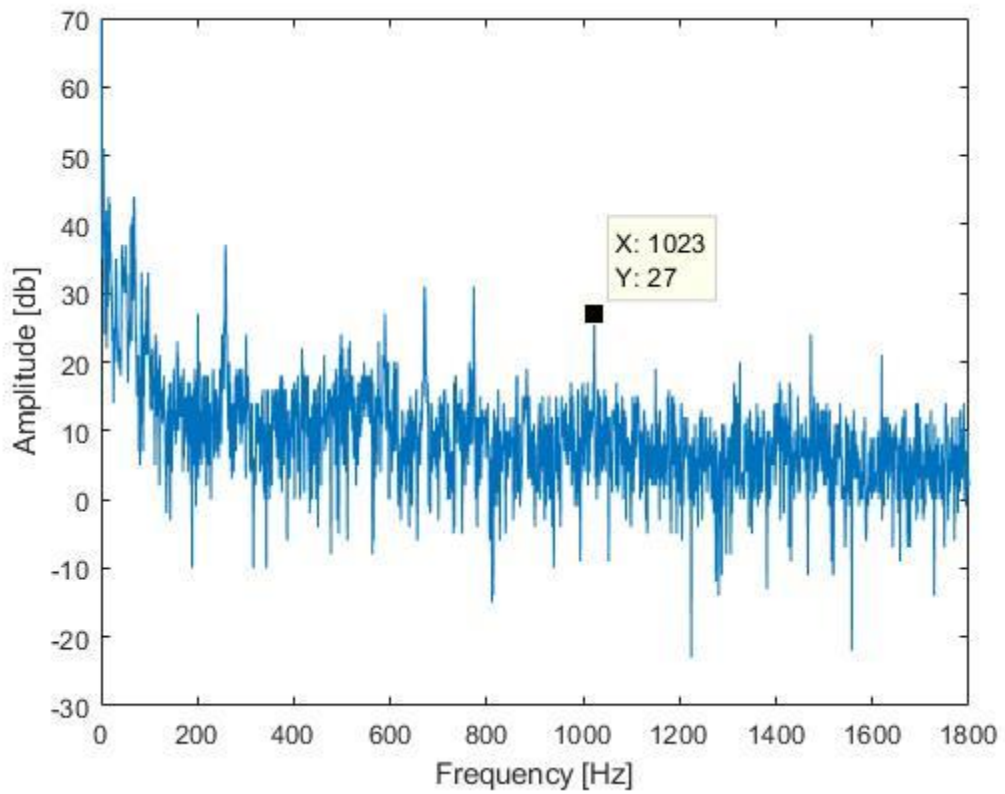
Θέση Β



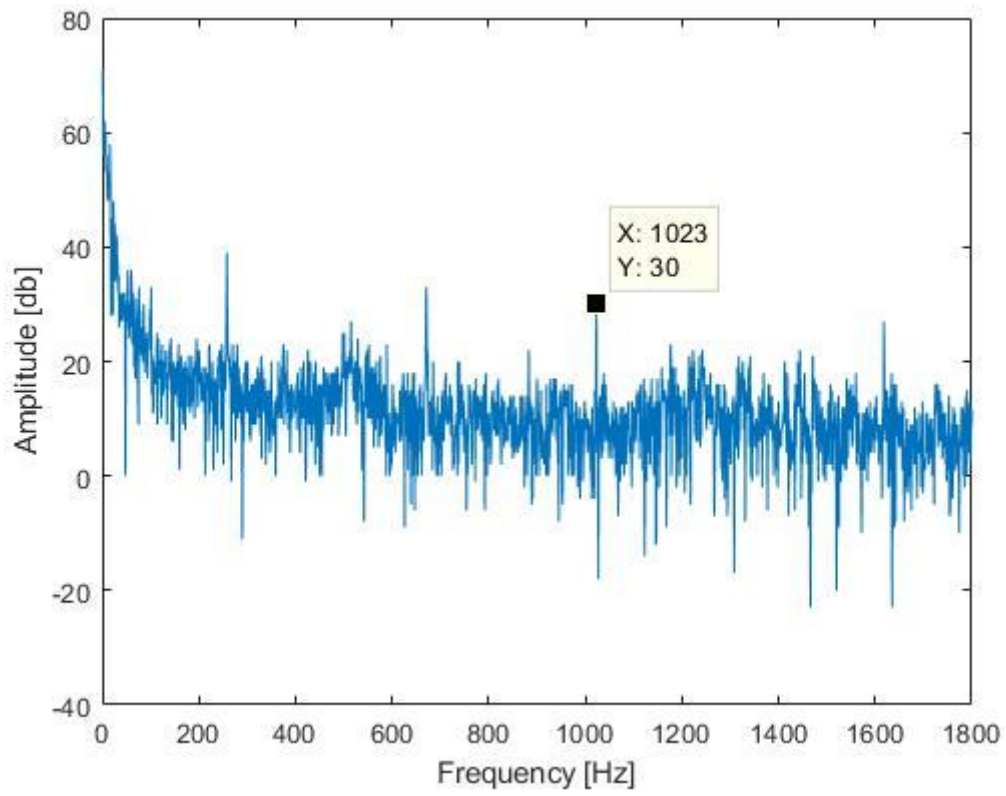
Θέση C



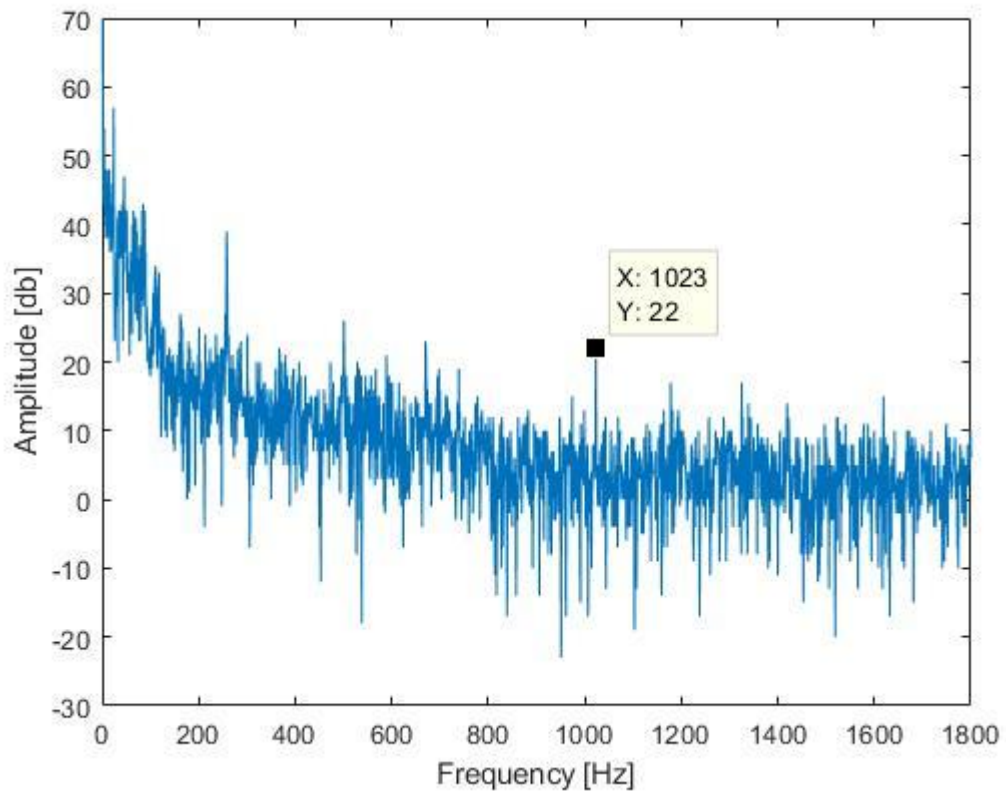
Θέση D



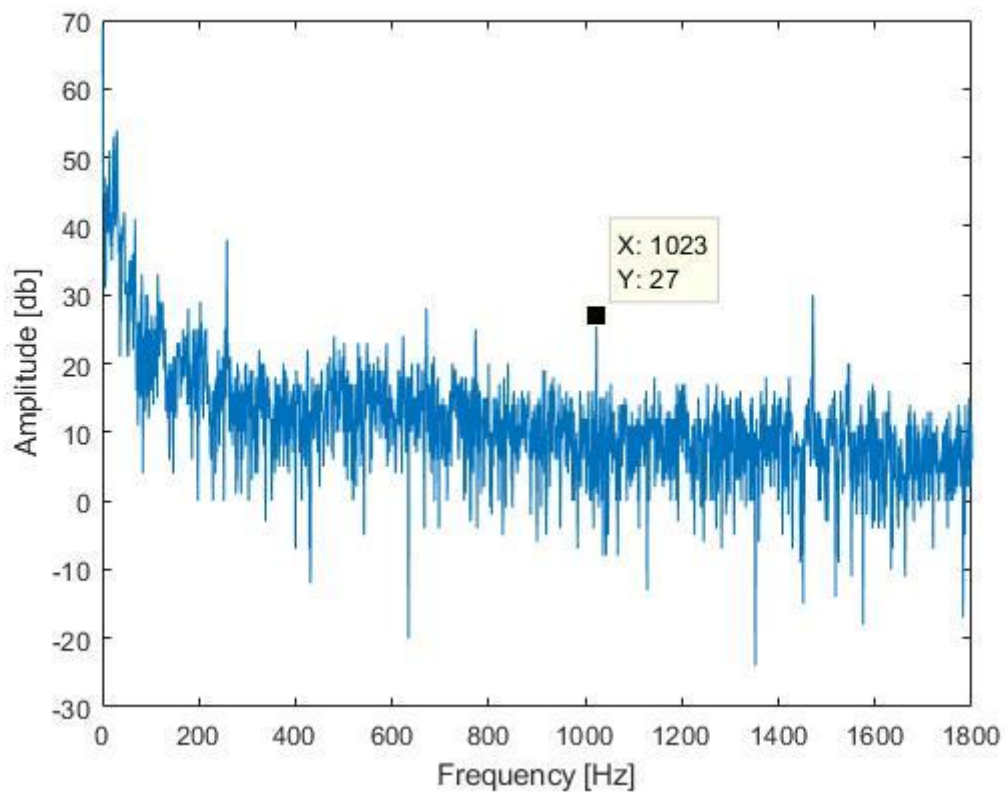
Θέση E



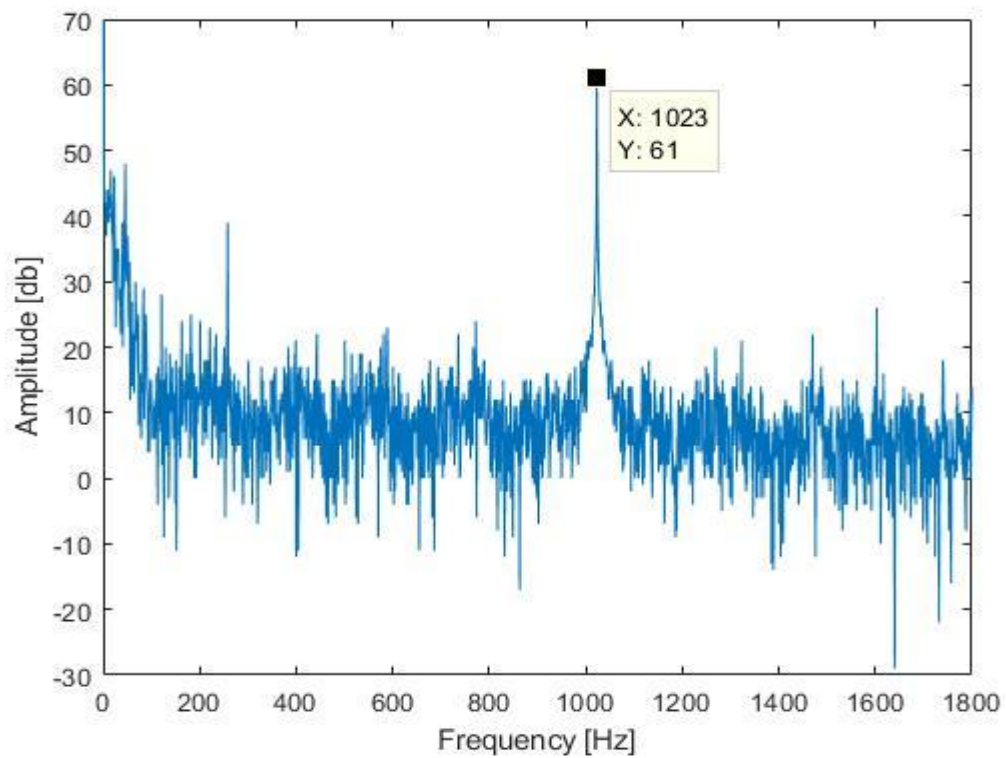
Θέση F



Θέση G



Θέση H



4.4 Δεύτερη σειρά μετρήσεων

Κρατάμε σταθερά τα παρακάτω χαρακτηριστικά και μεταβάλλουμε την συχνότητα του σήματος. Μετράμε την απόδοση του συστήματος σε δυο διαφορετικές θέσεις (Α Αριστερή γραφική και Β Δεξιά γραφική).

Τάση τροφοδοσίας :24v

Συχνότητα φέροντος : $f_0 = 20\text{Khz}$

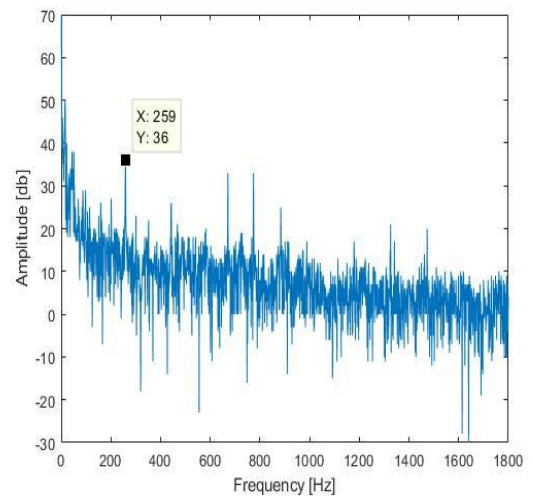
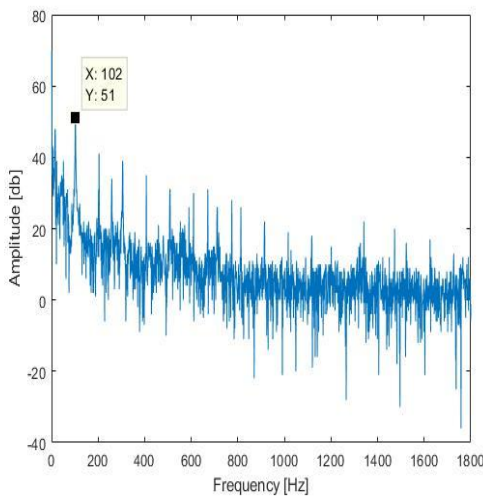
Πλάτος φέροντος $A_{p-p} : 4\text{v}$

Τάση εξόδου ενισχυτή : $V_{rms} = 0,64\text{v}$

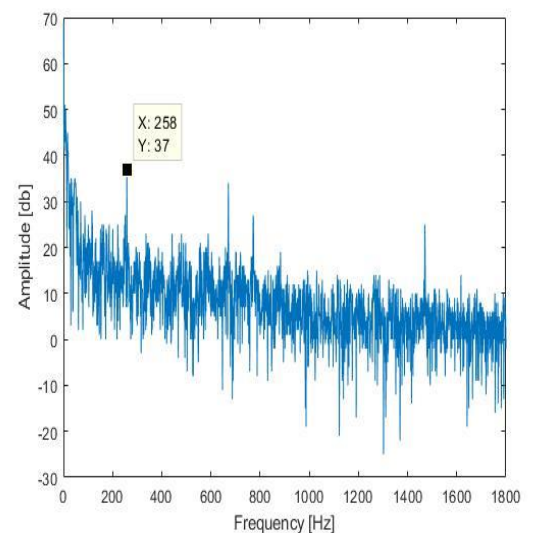
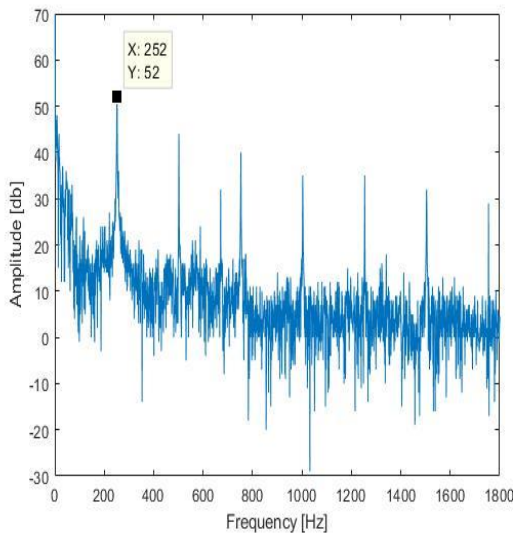
Συχνότητα δειγματοληψίας : 10 KHz

Πλήθος δηγμάτων : $P = 10000$

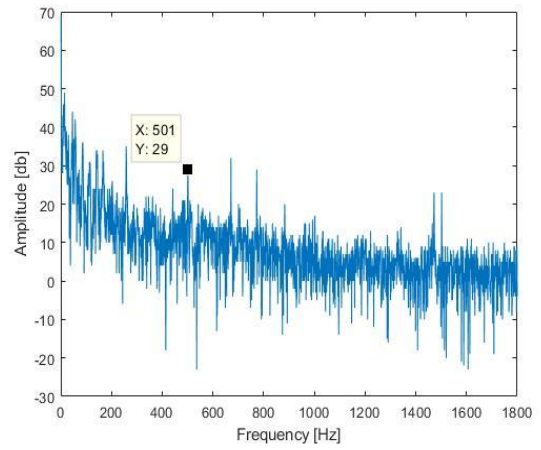
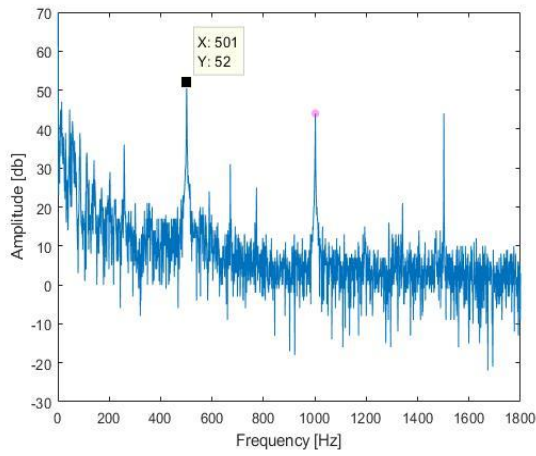
$f_1 = 100\text{Hz}$



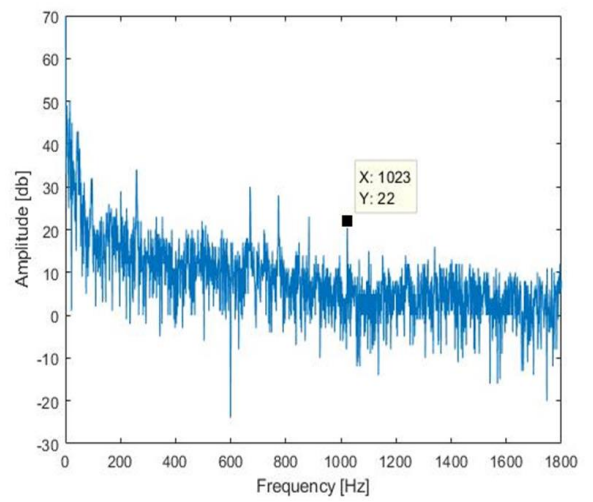
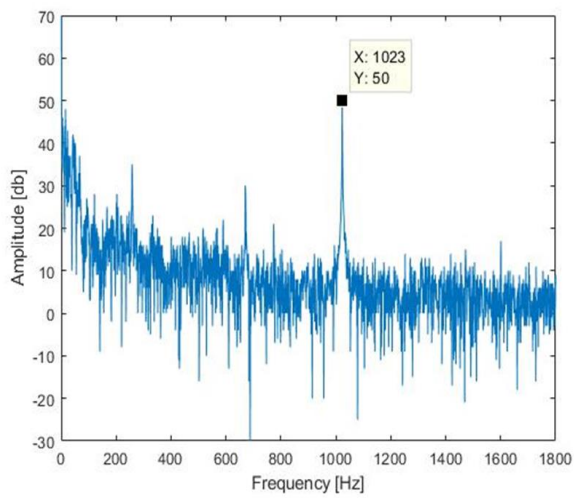
$f_1 = 250\text{Hz}$



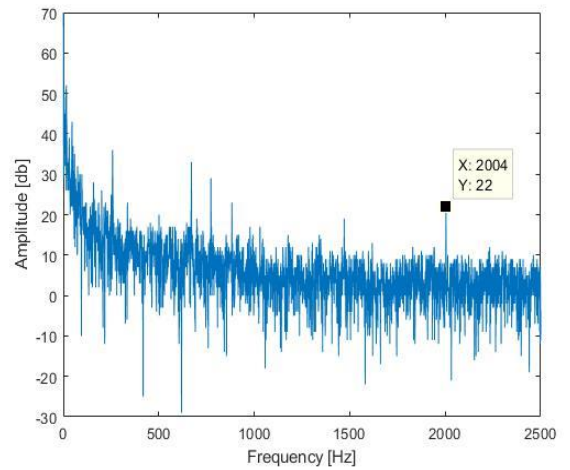
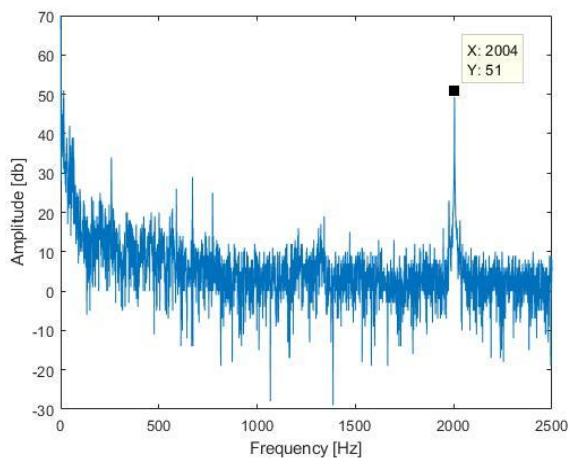
$f_1 = 500\text{Hz}$



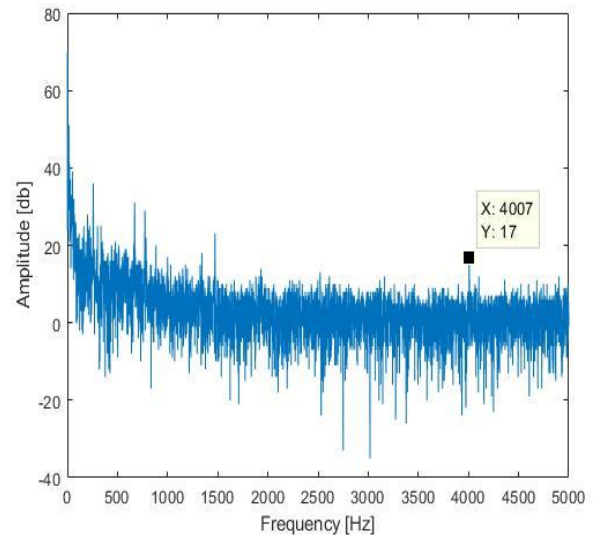
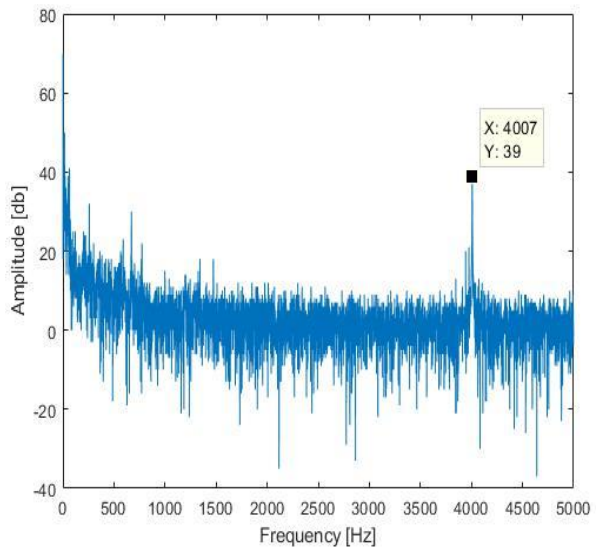
$f_1 = 1000\text{Hz}$



$f_1 = 2000\text{Hz}$



f1 =4000Hz



4.5 Τρίτη σειρά μετρήσεων:

Κρατάμε σταθερά τα παρακάτω χαρακτηριστικά και μεταβάλλουμε την συχνότητα φέροντος. Μετράμε την απόδοση του συστήματος στην θέση (A).

Τάση τροφοδοσίας :24v

Συχνότητα σήματος : f1 = 1000 Hz

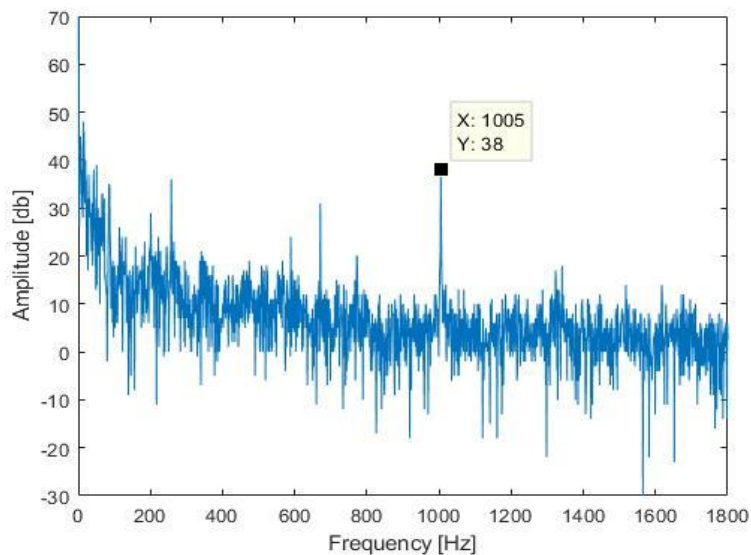
Πλάτος φέροντος Ar-p : 4v

Τάση εξόδου ενισχυτή : Vrms = 0,64v

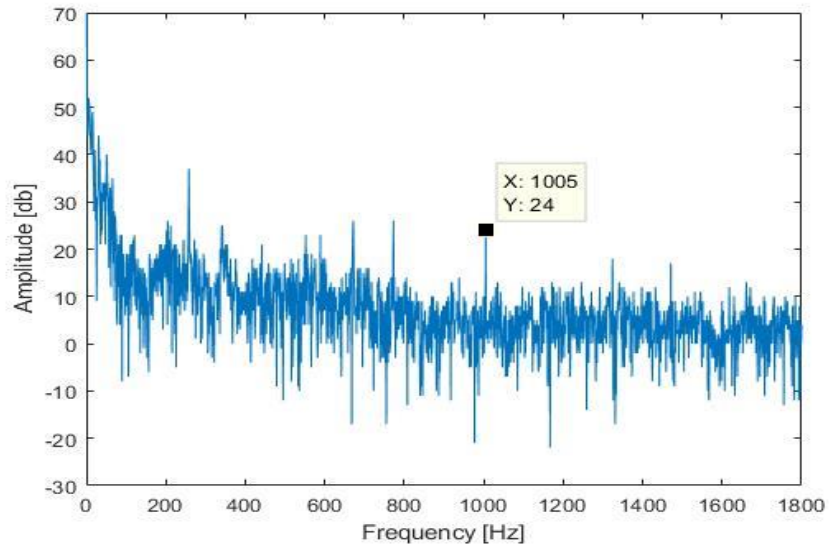
Συχνότητα δειγματοληψίας : 10 KHz

Πλήθος δηγμάτων : P = 10000

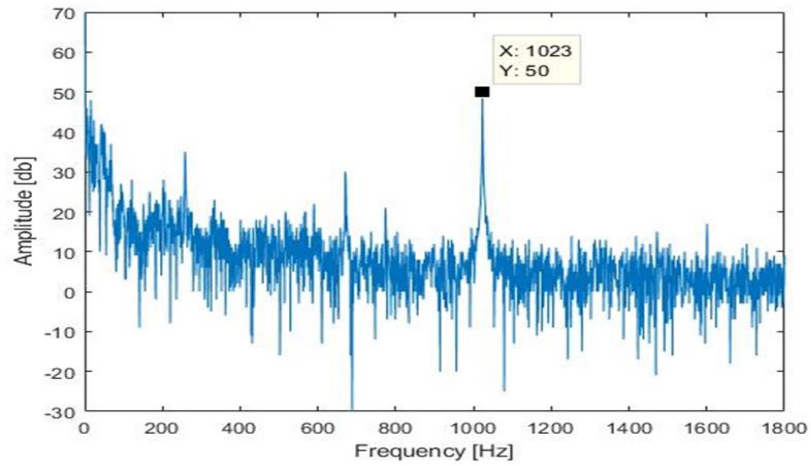
f₁ =10 KHz



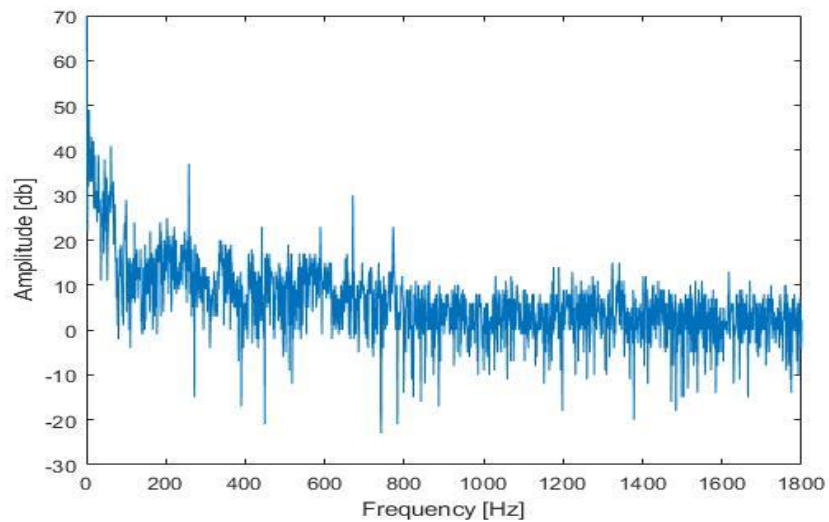
$f_1 = 15 \text{ KHz}$



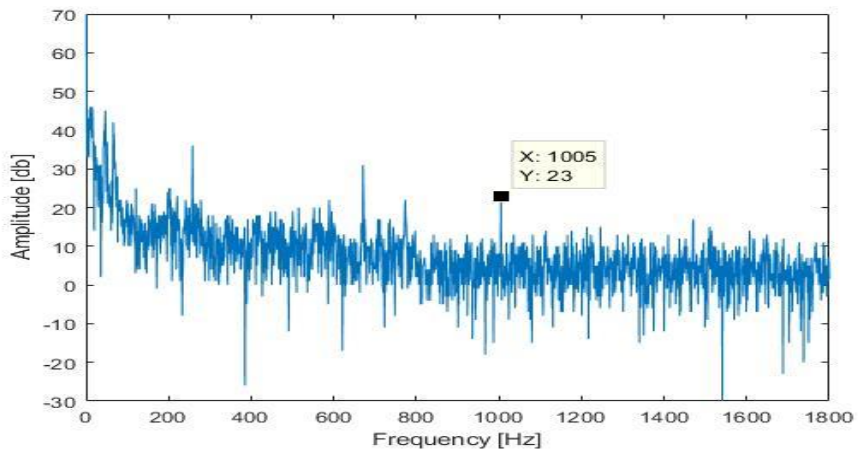
$f_1 = 20 \text{ KHz}$



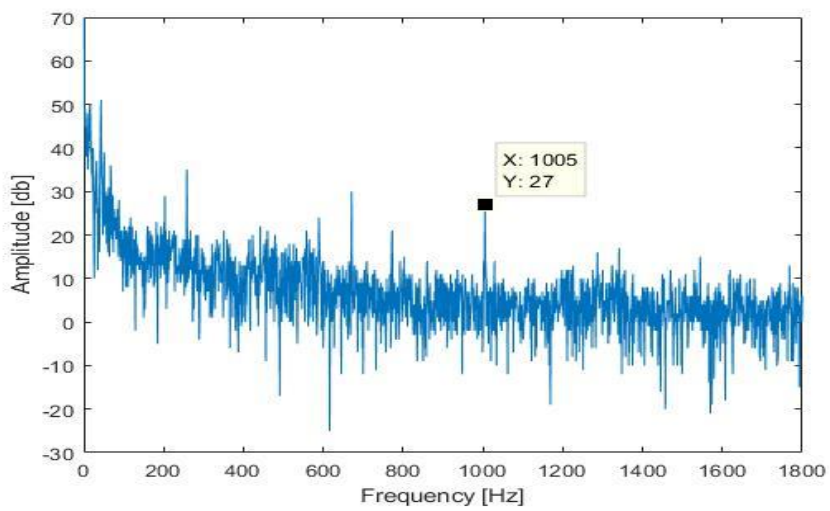
$f_1 = 25 \text{ KHz}$



f1 =30 KHz

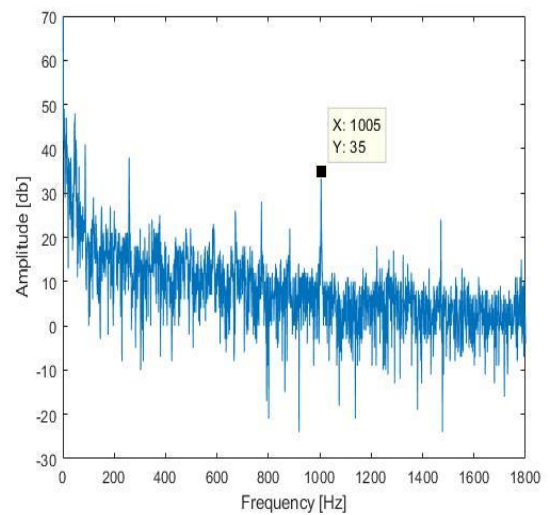
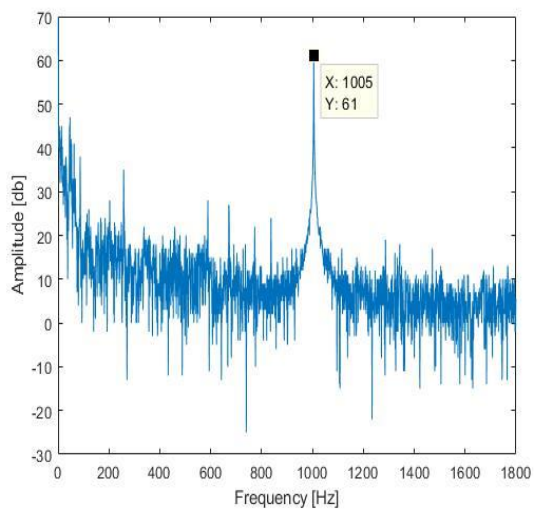


f1 =35 KHz



f1 =40 KHz

20Μέτρηση στην θέση B



4.6 Τέταρτη σειρά μετρήσεων:

Κρατάμε σταθερά τα παρακάτω χαρακτηριστικά και μεταβάλλουμε το πλάτος του φέροντος f_0 . Μετράμε την απόδοση του συστήματος σε δυο θέσεις (Α Αριστερή γραφική και Β Δεξιά γραφική).

Τάση τροφοδοσίας : 24V

Συχνότητα σήματος : $f_1 = 1000$ Hz

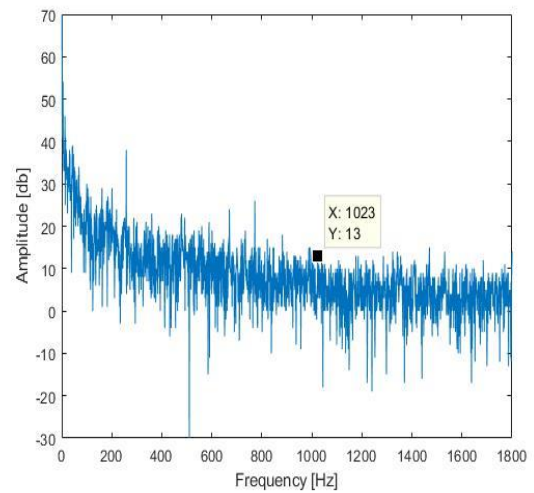
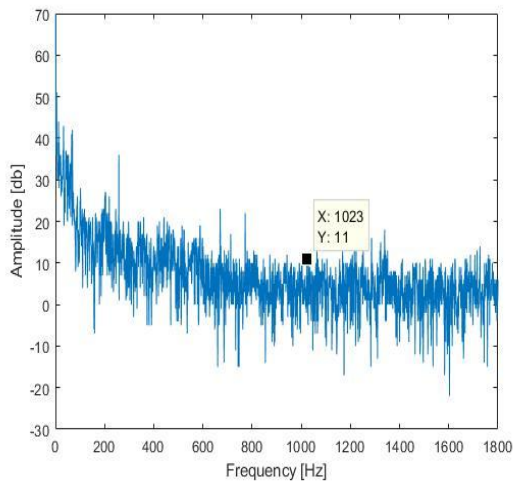
Πλάτος φέροντος $A_{p-p} : 4$ V

Τάση εξόδου ενισχυτή : $V_{rms} = 0,64$ V

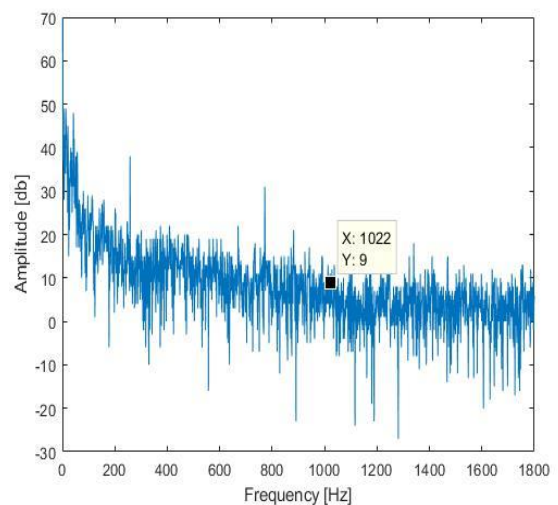
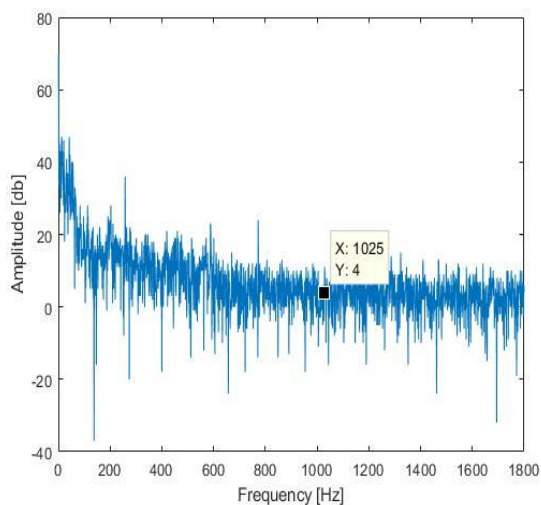
Συχνότητα δειγματοληψίας : 10 KHz

Πλήθος δηγμάτων : $P = 10000$

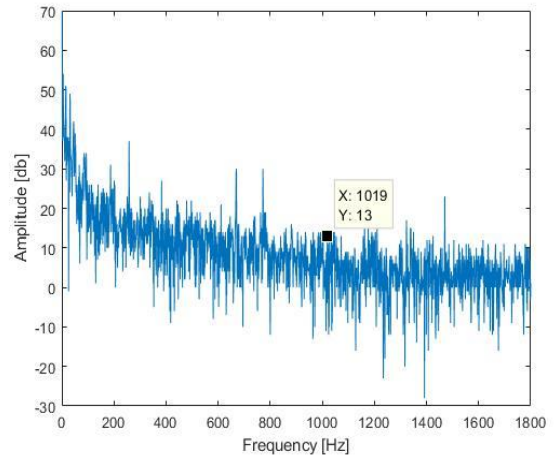
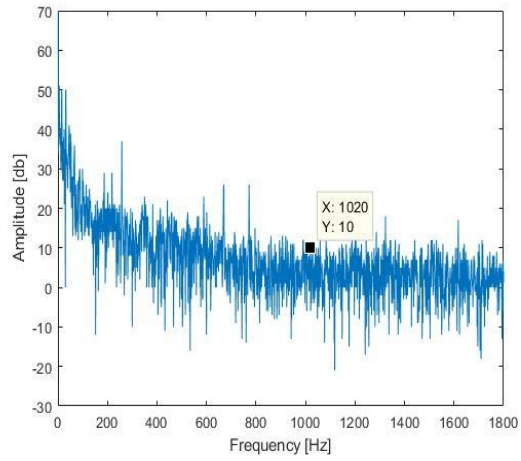
Volt pick to pick : 2 Volt



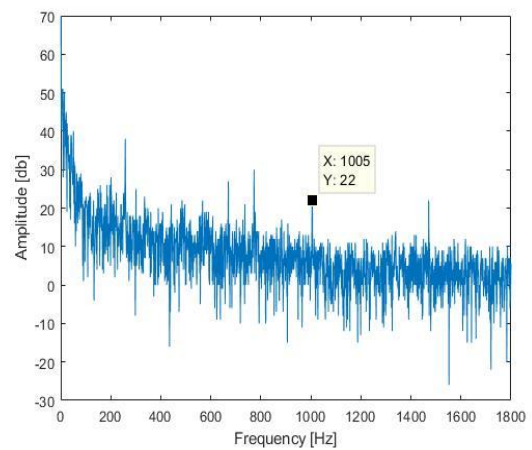
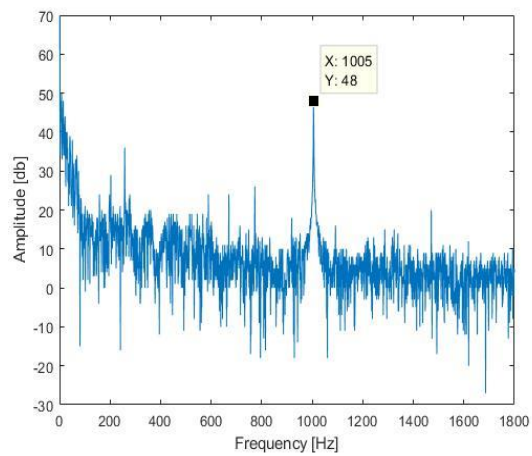
Volt p-p: 2,5 Volt



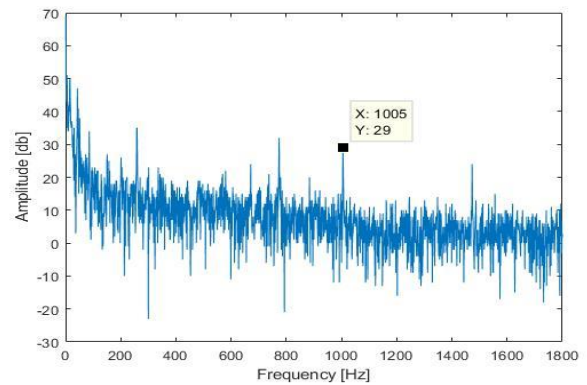
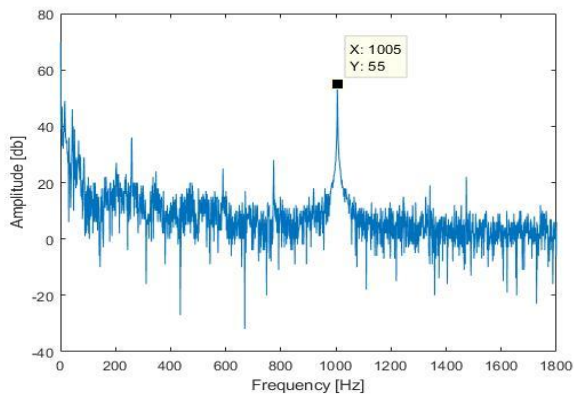
Volt p-p:3 Volt



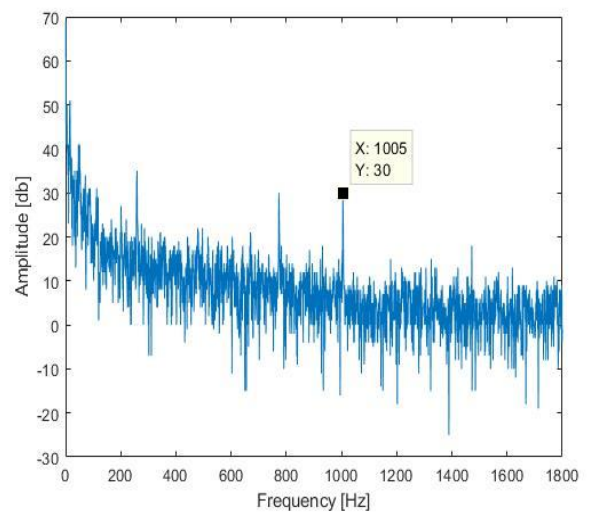
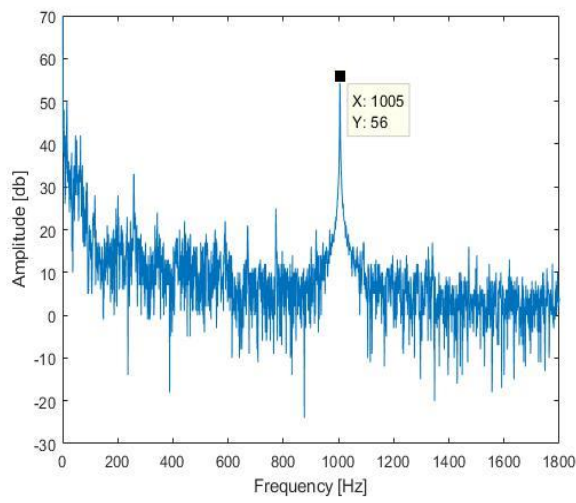
Volt p-p:3,5 Volt



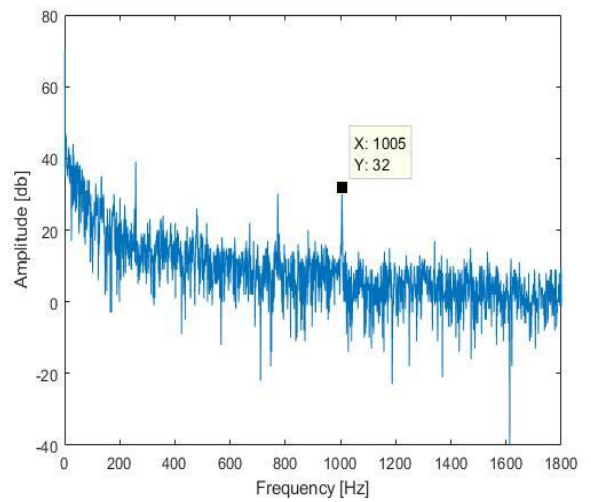
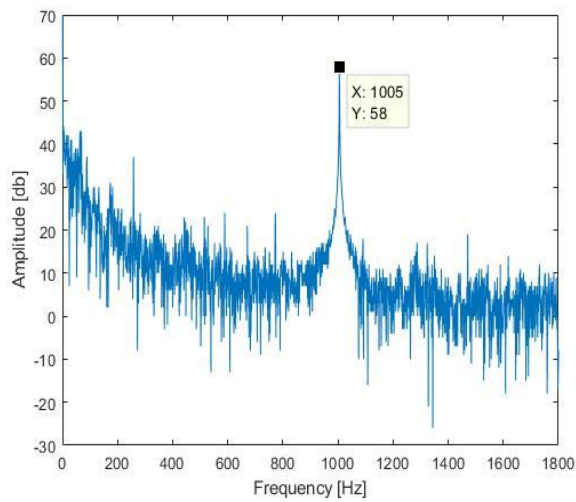
Volt p-p:4,5 Volt



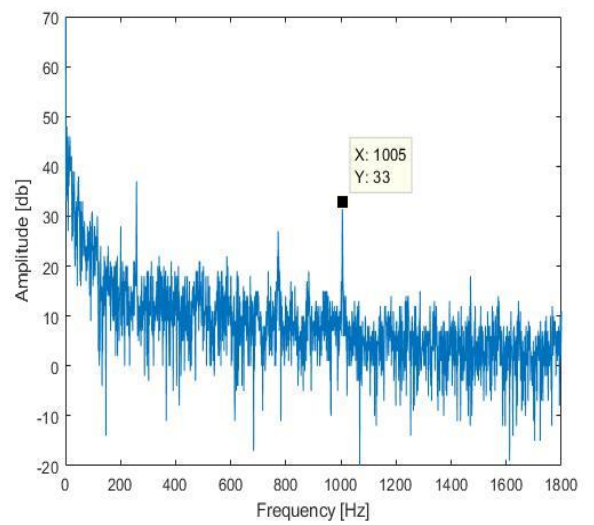
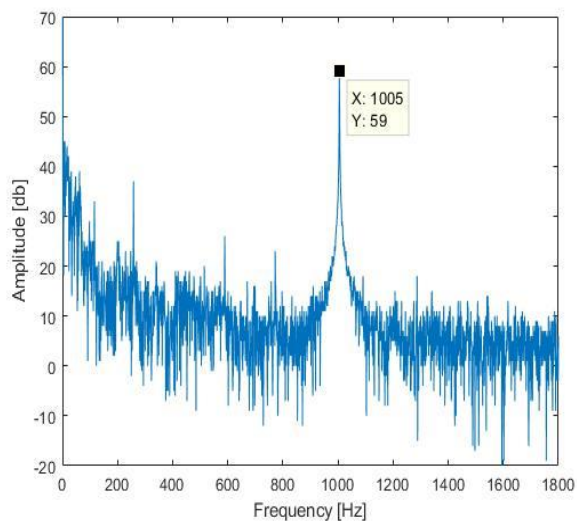
Volt p-p:5 Volt



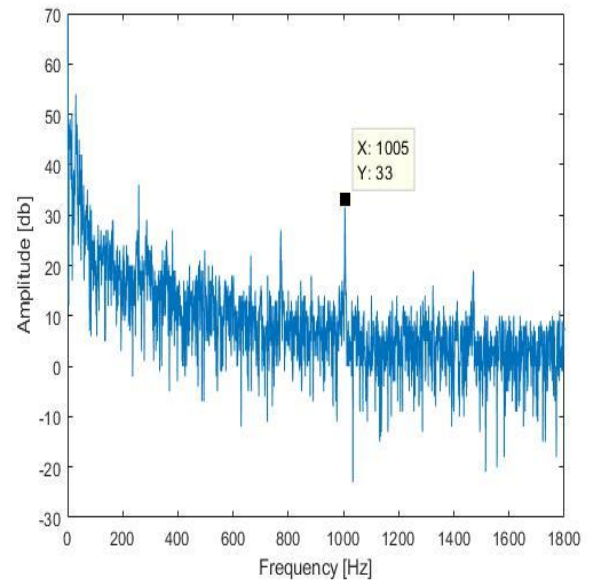
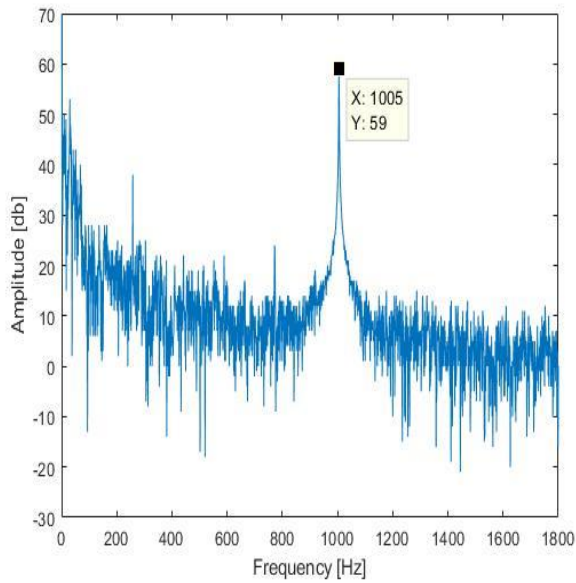
Volt p-p:6 Volt



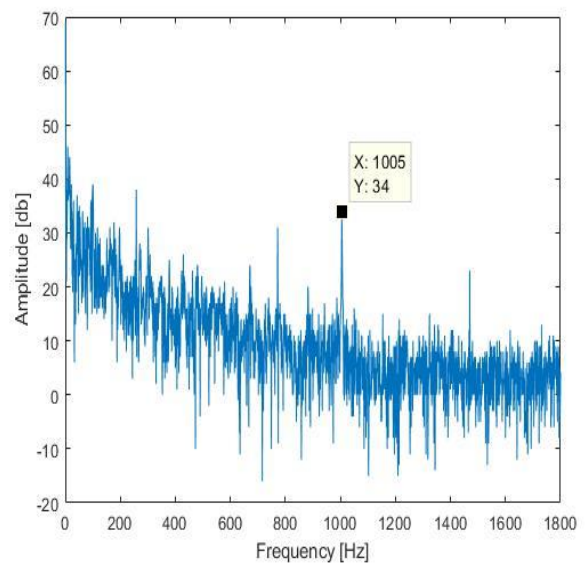
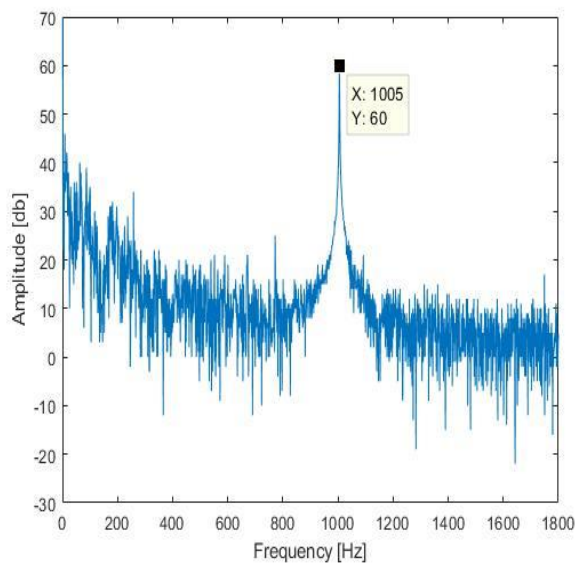
Volt p-p:7 Volt



Volt p-p:8 Volt



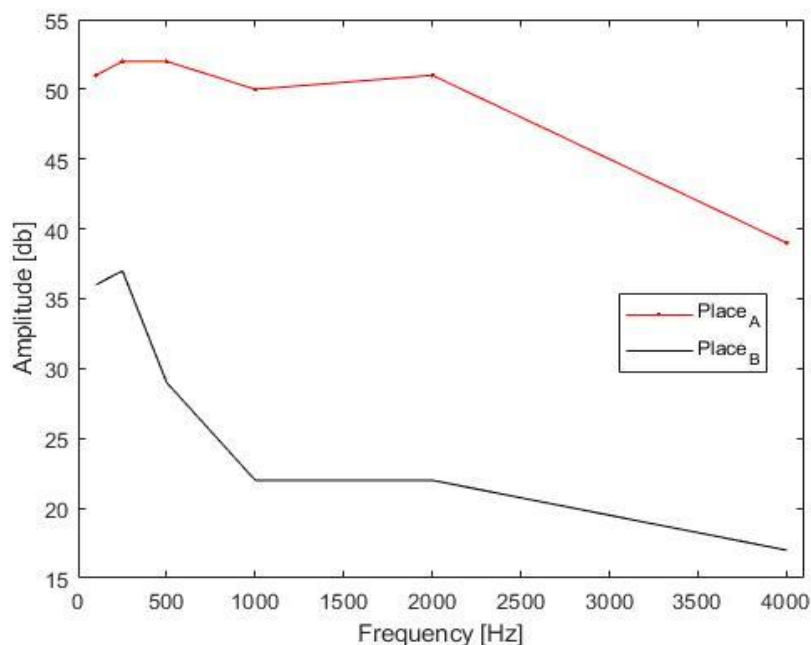
Volt p-p:9 Volt



5 Αποτελέσματα των μετρήσεων

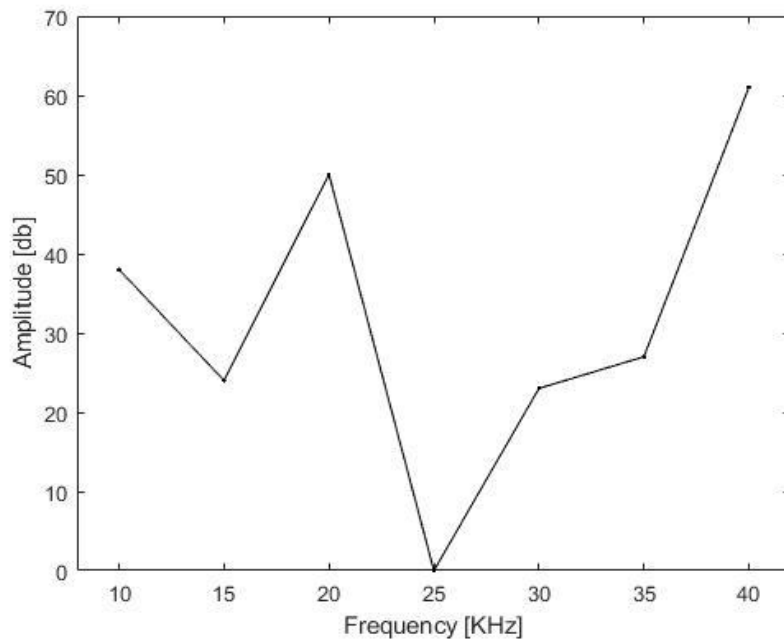
1. Θόρυβος: Σε όλες τις μετρήσεις είναι εμφανείς τόνοι που έχουν να κάνουν με τον θόρυβο στον χώρο του πειράματος. Στις συχνότητες (περίπου) των 250 , 650 και 800 Hz υπάρχουν αρμονικές σε όλες τις μετρήσεις και είναι αποτέλεσμα του εξοπλισμού που έπρεπε να υπάρχει στον χώρο για το πείραμα, αφορούν τους ανεμιστήρες του υπολογιστή για τις μετρήσεις και του ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων για την οδήγηση του ηχείου.

2. Στην πρώτη σειρά μετρήσεων παρατηρούμε την μεγάλη διακύμανση της πίεσης από τα σημεία που βρίσκονται στην ευθεία του ηχείου με τα σημεία στην περίμετρο. Στους 10 πόντους, σημείο Η από το ηχείο η πίεση παίρνει την τιμή των 61db και στην ίδια ευθεία σε απόσταση 180 cm, σημείο Α, η πίεση παίρνει την τιμή 50 db. Σε απόσταση 170 cm Αποσβένει 11 db. Περιμετρικά της ευθείας η πίεση στα σημεία F,G,C,B πέφτει στα 22db .
3. Στην δεύτερη σειρά μετρήσεων παρατηρούμε την απόδοση του συστήματος στις διαφορετικές συχνότητες στο σήμα εκπομπής f1 σε δυο διαφορετικά σημεία στον χώρο (Α και Β). Στο σημείο Α (απέναντι από το ηχείο) βλέπουμε σταθερή απόδοση (στα 51 db) έως και τα 2000Hz και κατόπιν πτώση (στα 39db) στην συχνότητα των 4000Hz. Η πτώση πιθανό οφείλεται στην μεγάλη απόσβεση του ακουστικού σήματος υψηλής συχνότητας από τον αέρα. Ταυτόχρονα παρατηρούμε για την θέση Β καταρχήν την μικρότερη απόδοση (που άλλωστε αναμέναμε) λόγω της απόστασης από το κέντρο του ηχείου αλλά και την απότομη πτώση στις πιέσεις με την αύξηση της συχνότητας από πολύ χαμηλότερες τιμές



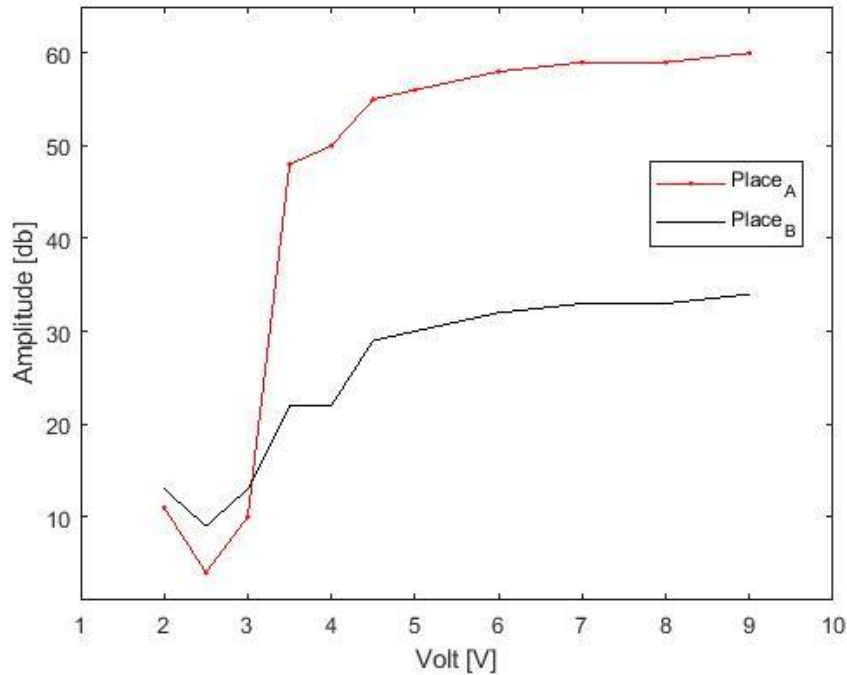
Εικόνα 21 Καμπύλες απόδοσης σε συνάρτηση της συχνότητας εισόδου

4. Στην τρίτη μετρήσεων σειρά μεταβάλλουμε την συχνότητα φέρωντος f_0 από την τιμή των 10KHz έως την τιμή των 40 KHz παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη μεταβολή στην τιμή της απόδοσης του συστήματος με μεγαλύτερη τιμή στην συχνότητα των 40KHz που αποτελεί και την τιμή που μας δίνει ο κατασκευαστής. Αυτό που δεν βλέπουμε είναι η γραμμική πτώση που υπάρχει στην καμπύλη των χαρακτηριστικών του εξαρτήματος. Υπάρχει και μια τιμή στα 25KHz όπου το σήμα που εκπέμπουμε χάνεται μέσα στον θόρυβο.



Εικόνα 22 Καμπύλες απόδοσης σε συνάρτηση της συχνότητας φέρωντος

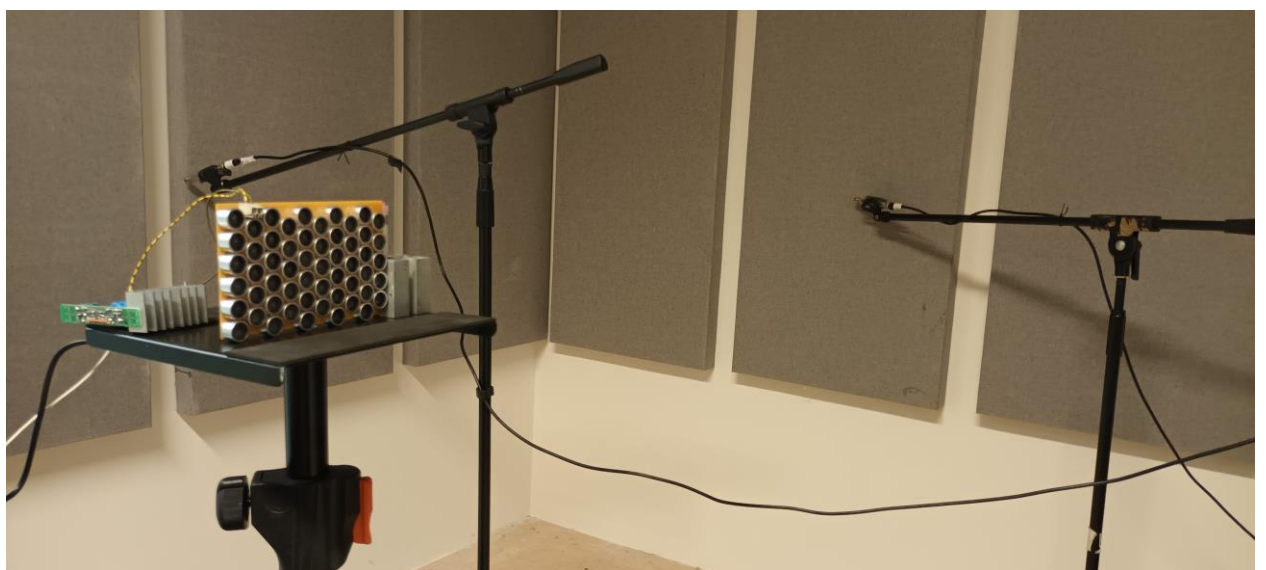
5. Στην τέταρτη και τελευταία σειρά μετρήσεων μεταβλήθηκε το πλάτος του φέρωντος f_0 . Στις καμπύλες είναι για άλλη μια φορά διακριτή η διαφορά στις πιέσεις στα δυο διαφορετικά σημεία του χώρου, κάτι που υποδηλώνει την υψηλή κατευθυντικότητα του ηχείου. Όπως επίσης και η χαμηλή συσχέτιση του πλάτους διαμόρφωσης στην απόδοση. Πρέπει να επισημάνουμε ότι το σύστημα ξεκινάει να λειτουργεί πάνω από τα 3,5 volt, χαμηλότερα από αυτή τη τιμή το σήμα που εκπέμπουμε χάνεται στον θόρυβο του χώρου.



Εικόνα 23 Καμπύλες απόδοσης σε συνάρτηση της τάσης διαμόρφωσης

Στην αρχή της προσπάθειας υλοποιήθηκε κύκλωμα PWM για την διαμόρφωση του ακουστικού σήματος. Η διαδικασία αν και φαινόταν απλή δεν είχε σαν αποτέλεσμα μια έστω καλή απόδοση από το κύκλωμα. Το ολοκληρωμένο TL 494 που εκτελούσε την διαμόρφωση έπρεπε να δεχτεί υψηλές στάθμες στην είσοδο του μέχρις ότου καταφέρει να βγάλει σήμα στην έξοδο. Αναγκαστικά, έπρεπε να τροφοδοτηθεί από την έξοδο ενισχυτή με την στάθμη του volume στην μέγιστη τιμή ώστε να παραχθούν σήματα ικανοποιητικά για οδήγηση στο επόμενο στάδιο. Πέραν αυτού και πάντα σύμφωνα με την θεωρία, τα σήματα που παράχθηκαν σε αυτή την περίπτωση από το ηχείο, ήταν με μεγάλη παραμόρφωση. Αναζητώντας εκ νέου τη θεωρία, δοκιμάστηκε η διαμόρφωση AM με έναν απλό μετασχηματιστή (με λόγο μετασχηματισμού ένα προς ένα) και ελήφθησαν τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην εργασία.

6 Φωτογραφικό Υλικό





7 Βιβλιογραφία

- [1] Tan, L., & Jiang, J. (2001). Adaptive Volterra Filters for Active Control of Nonlinear Noise Processes
- [2] S.J. Elliott, W. J. (2018). Head tracking extends local active control of broadband sound to higher frequencies.
- [3] Peter J. Westervelt. Scattering of sound by sound. *Journal of the Acoustical Society of America*, 29(2):199-203, 1957.
- [4] Mark F. Hamilton and David T. Blackstock, editors. *Nonlinear Acoustics*. Academic Press, Boston, 1998.
- [5] J. L. S. Bellin and R. T. Beyer. Experimental investigation of an end-fire array. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34(8):1051-1054, August 1962.
- [6] Mark F. Hamilton. Effects of noncollinear interaction on parametric acoustic arrays in dispersive fluids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 76(5):1493-1504, Nov 1984.
- [7] Mark F. Hamilton et al. Nonlinear effects in the farfield of a directive sound source. *Journal of the Acoustical Society of America*, 78(1):202-216, July 1985.
- [8] David T. Blackstock. Generalized Burgers' equation for plane waves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77(6):2050-2053, June 1985.
- [9] H. O. Berkta. Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications. *Journal of Sound and Vibration*, 2(4):435-461, 1965.
- [10] N. S. Bakhvalov et al. *Nonlinear Theory of Sound Beams*. American Institute of Physics, 1987. ISBN 0-88318-520-2.
- [11] N. S. Bakhvalov et al. Focused high-amplitude sound beams. *Soviet Physical Acoustics*, 24(1):10-15, Jan-Feb 1978.
- [12] M. B. Bennett and David T. Blackstock. Parametric array in air. *Journal of the Acoustical Society of America*, 57:562-568, 1975.
- [13] Toshiaki Nakamura. Waveform variation of pulsed parametric source. In *Proceedings of the 11th International Congress on Acoustics*, Toulouse, France, 1983.
- [14] Kenichi Aoki et al. A parametric loudspeaker - applied examples. *Electronics and Communications in Japan*, 77(1):64-73, 1994.

- [15] Masahide Yoneyama et al. The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design. *Journal of the Acoustical Society of America*, 73(5):1532-1536, May 1983.
- [16] Yoneyama M. Kamakura, T. and K. Ikegaya. Developments of parametric loudspeaker for practical use. In 10th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Kobe, 1984.
- [17] Elwood G. Norris. The creation of audible sound from ultrasonic energy: A fundamental paradigm shift. In *Proceedings from the ASA 133rd meeting*, 2pEA5, 1997.
- [18] David T. Blackstock. Audio application of the parametric array. In *Proceedings of the ASA 134th Meeting*, 2pEA5, 1997.
- [19] F. Joseph Pompei. The use of airborne ultrasonics for generating audible sound beams. In *Proceedings of the Audio Engineering Society, 105th Convention*, San Francisco, 1998
- [20] Real time remote cancellation of multi tones in an extended acoustic cavity using directional ultrasonic loudspeaker (2014) Anushman G., Sri Hari K., Issa P.
- [21] Chao Ye, Ming Wu, Jun Yang, "Actively created quiet zones by Parametric Loudspeaker as Control Source in the Sound Field". *AIP Conf. Proc.* 1474, 367-374 ,2012R Nicole, "Title of paper with only first word capitalized." *J. Name Stand. Abbrev.*, in press.
- [22] Laura A Brooks, Anthony C. Zander, Collin H. Hansen, "Investigation into the Feasibility of Using a Parametric Array Control Source in an Active Noise Control".pp.1-7 *Proceeding of ACOUSTICS 2005*.M. Young, *The Technical Writer's Handbook*. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [23] Pompei, Joseph F. "Sound from Ultrasound: The Parametric Array as an Audible sound source". PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 2002.
- [24] Parametric Speaker By Paul Noel 217 Prospect St New Haven CT, 06510 (989)450-9465
- [25] 2019_Development of multi-way parametric array loudspeaker using multiplexed double sideband modulation

8 Παράρτημα Α

IR2111(S) & (PbF)

HALF-BRIDGE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
 Fully operational to +600V
 Tolerant to negative transient voltage
 dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Matched propagation delay for both channels
- Internally set deadtime
- High side output in phase with input
- Also available LEAD-FREE

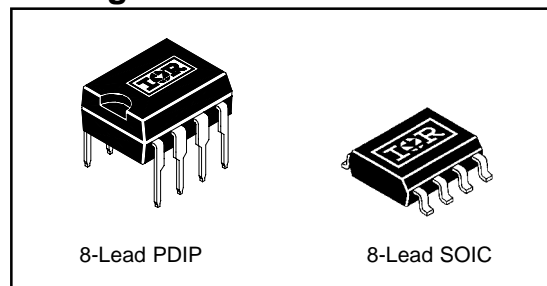
Description

The IR2111(S) is a high voltage, high speed power MOSFET and IGBT driver with dependent high and low side referenced output channels designed for half-bridge applications. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic input is compatible with standard CMOS outputs. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Internal deadtime is provided to avoid shoot-through in the output half-bridge. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 600 volts.

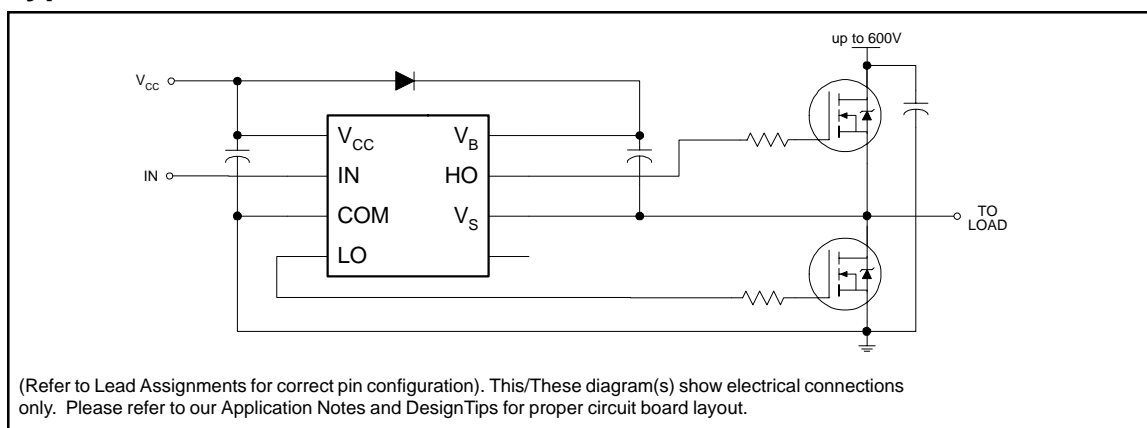
Product Summary

V_{OFFSET}	600V max.
$I_{\text{O}+/-}$	200 mA / 420 mA
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{\text{on/off}}$ (typ.)	750 & 150 ns
Deadtime (typ.)	650 ns

Packages



Typical Connection



Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in figures 7 through 10.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units	
V _B	High side floating supply voltage	-0.3	625	V	
V _S	High side floating supply offset voltage	V _B - 25	V _B + 0.3		
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S - 0.3	V _B + 0.3		
V _{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	-0.3	25		
V _{LO}	Low side output voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3		
V _{IN}	Logic input voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3		
dV _S /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50	V/ns	
P _D	Package power dissipation @ T _A ≤ +25°C	(8 Lead PDIP)	—	1.0	W
		(8 lead SOIC)	—	0.625	
R _{thJA}	Thermal resistance, junction to ambient	(8 lead PDIP)	—	125	°C/W
		(8 lead SOIC)	—	200	
T _J	Junction temperature	—	150	°C	
T _S	Storage temperature	-55	150		
T _L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300		

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S offset rating is tested with all supplies biased at 15V differential.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{IN}	Logic input voltage	0	V _{CC}	
T _A	Ambient temperature	-40	125	°C

Note 1: Logic operational for V_S of -5 to +600V. Logic state held for V_S of -5V to -V_{BS}. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V, C_L = 1000 pF and T_A = 25°C unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in figure 3.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	550	750	950	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	—	150	180		$V_S = 600V$
t_r	Turn-on rise time	—	80	130		
t_f	Turn-off fall time	—	40	65		
DT	Deadtime, LS turn-off to HS turn-on & HS turn-off to LS turn-on	480	650	820		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	—	30	—		

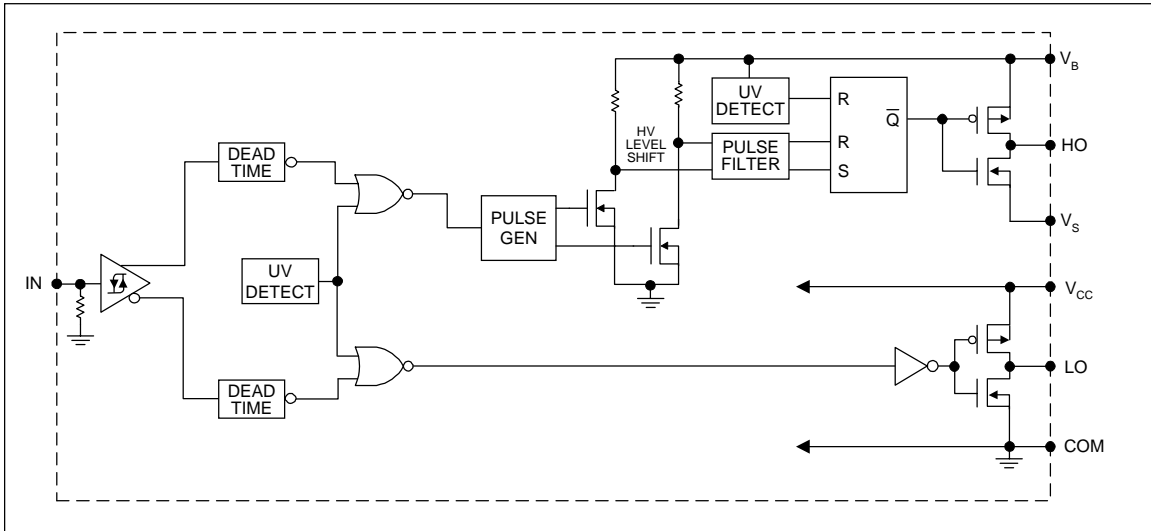
Static Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V and T_A = 25°C unless otherwise specified. The V_{IN} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to COM. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage for HO & logic "0" for LO	6.4	—	—	V	$V_{CC} = 10V$
		9.5	—	—		$V_{CC} = 15V$
		12.6	—	—		$V_{CC} = 20V$
V_{IL}	Logic "0" input voltage for HO & logic "1" for LO	—	—	3.8		$V_{CC} = 10V$
		—	—	6.0		$V_{CC} = 15V$
		—	—	8.3		$V_{CC} = 20V$
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	—	—	100	mV	$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	—	—	100		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	—	50	100		$V_{IN} = 0V$ or V_{CC}
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	—	70	180		$V_{IN} = 0V$ or V_{CC}
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	—	30	50		$V_{IN} = V_{CC}$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
V_{BSUV+}	V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	7.6	8.6	9.6	V	
V_{BSUV-}	V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	7.2	8.2	9.2		
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	7.6	8.6	9.6		
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	7.2	8.2	9.2		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	200	250	—	mA	$V_O = 0V$, $V_{IN} = V_{CC}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	420	500	—		$V_O = 15V$, $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

IR2111(S) & (PbF)

Functional Block Diagram



Lead Definitions

Symbol	Description
IN	Logic input for high side and low side gate driver outputs (HO & LO), in phase with HO
V _B	High side floating supply
HO	High side gate drive output
V _S	High side floating supply return
V _{CC}	Low side and logic fixed supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

Lead Assignments

<p>8 Lead DIP</p>	<p>8 Lead SOIC</p>
IR2111	IR2111S
Part Number	

IR2111(S) & (PbF)

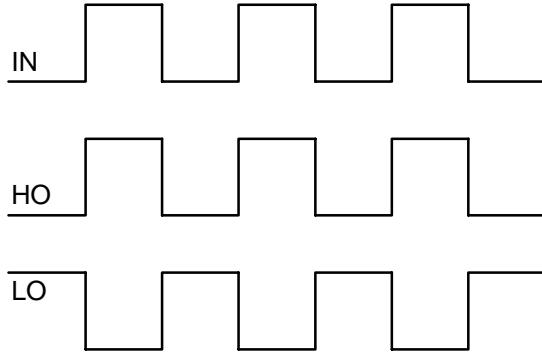


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

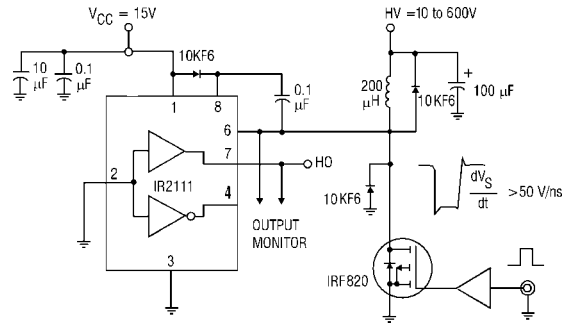


Figure 2. Floating Supply Voltage Transient Test Circuit

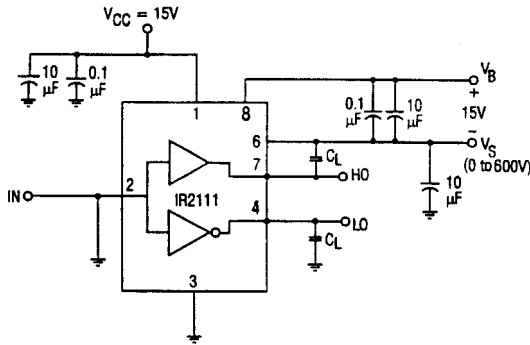


Figure 3. Switching Time Test Circuit

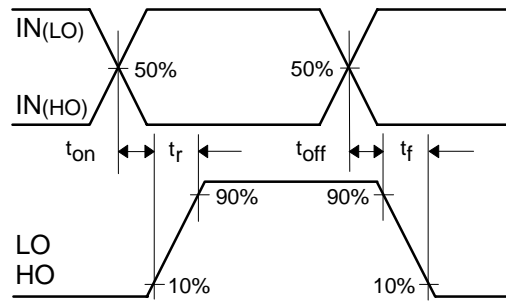


Figure 4. Switching Time Waveform Definition

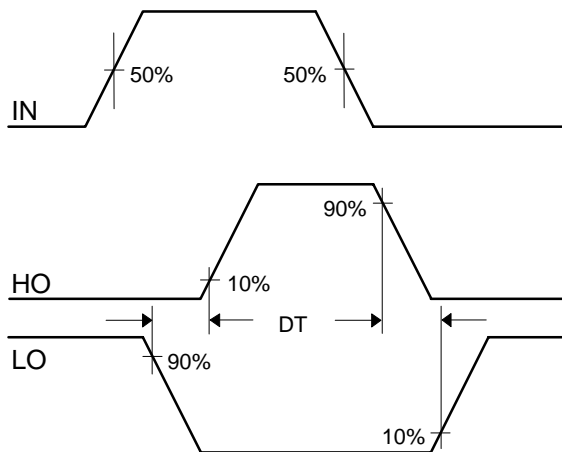


Figure 5. Deadtime Waveform Definitions

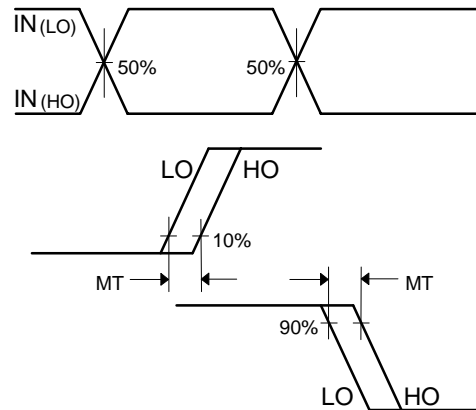


Figure 6. Delay Matching Waveform Definitions

IR2111(S) & (PbF)

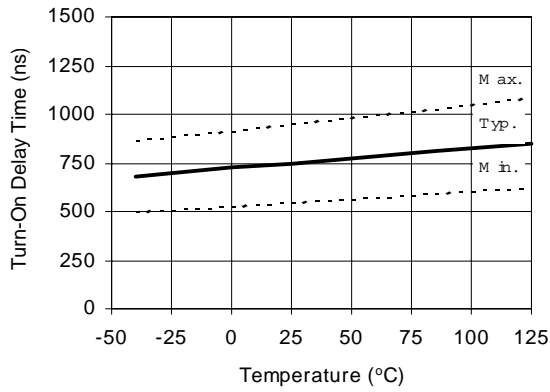


Figure 11A Turn-On Time vs Temperature

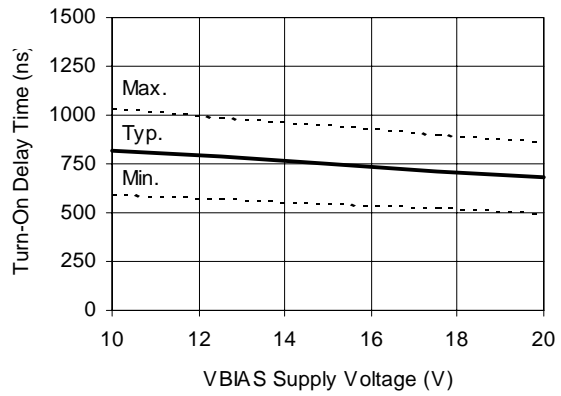


Figure 11B Turn-On Time vs Voltage

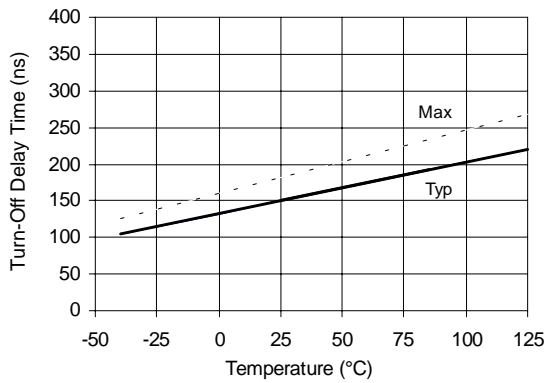


Figure 12A Turn-Off Time vs Temperature

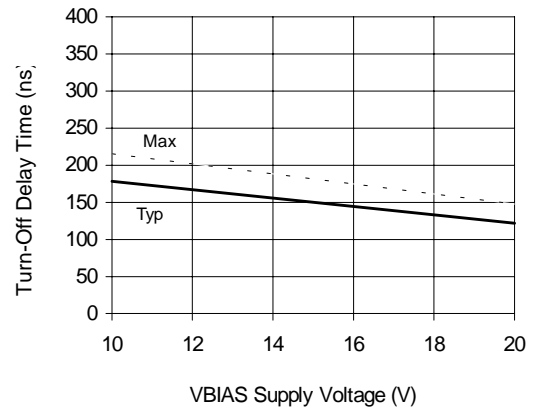


Figure 12B Turn-Off Time vs Voltage

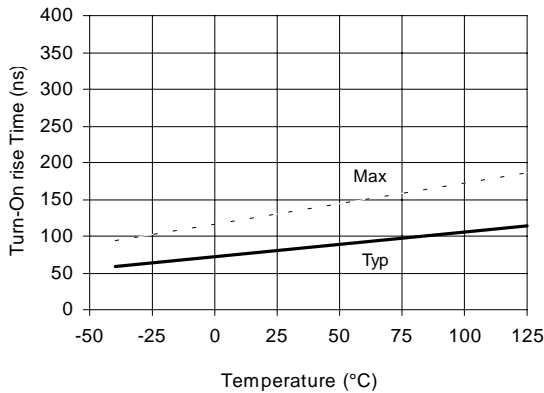


Figure 13A Turn-On Rise Time vs Temperature

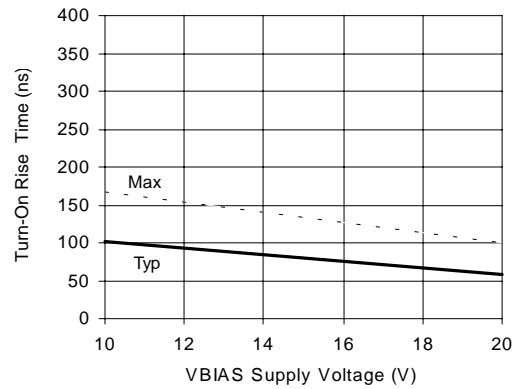


Figure 13B Turn-On Rise Time vs Voltage

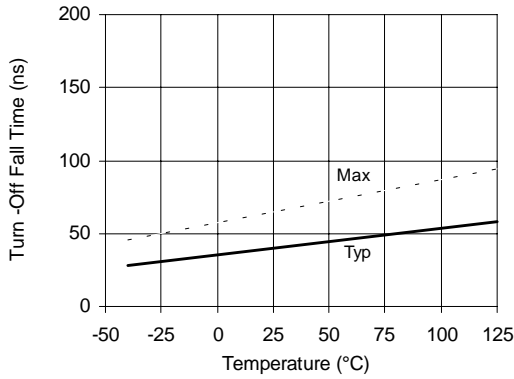


Figure 14A Turn-Off Fall Time vs Temperature

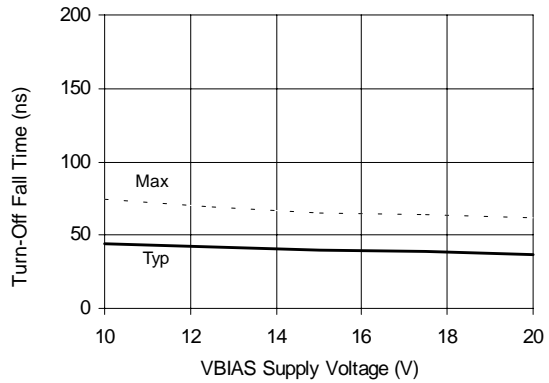


Figure 14B Turn-Off Fall Time vs Voltage

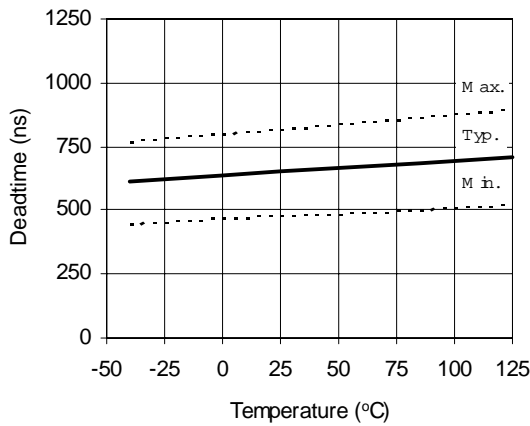


Figure 15A Dead Time vs Temperature

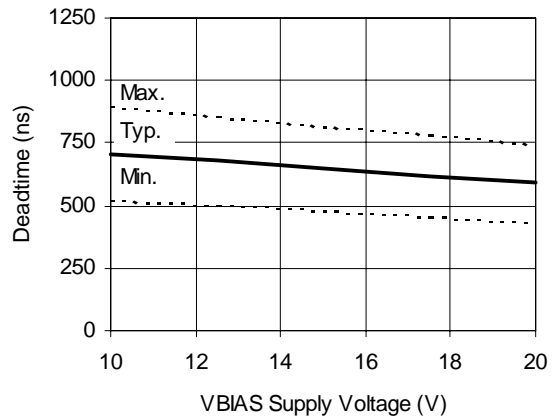


Figure 15B Dead Time vs Voltage

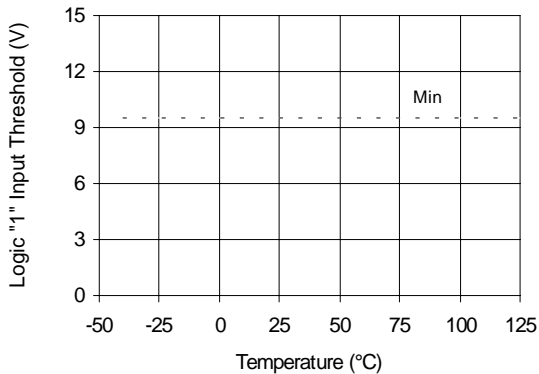


Figure 16A Logic "1" Input voltage for HO & Logic "0" for LO vs Temperature

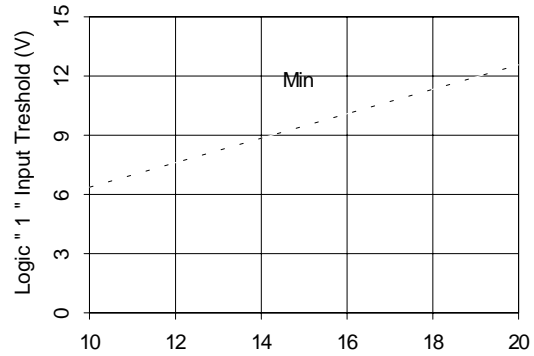


Figure 16B Logic "1" Input voltage for HO & Logic "0" for LO vs Voltage

IR2111(S) & (PbF)

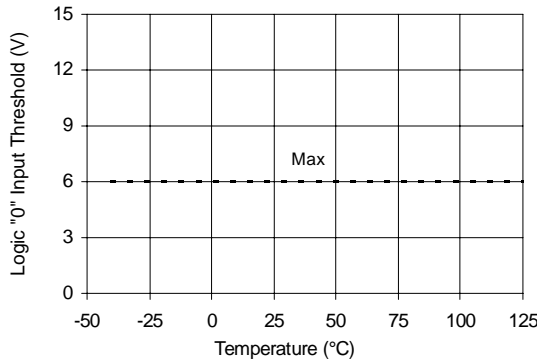


Figure 17A Logic "0" Input voltage for HO & Logic "1" for LO vs Temperature

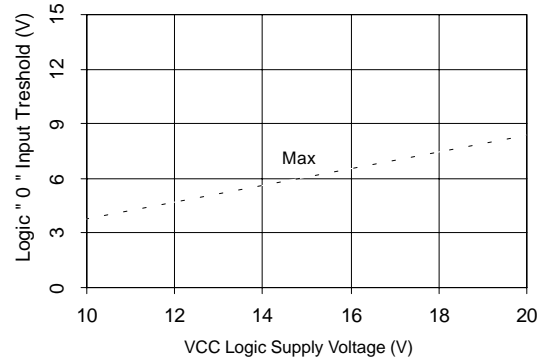


Figure 17B Logic "0" Input voltage for HO & Logic "1" for LO vs Voltage

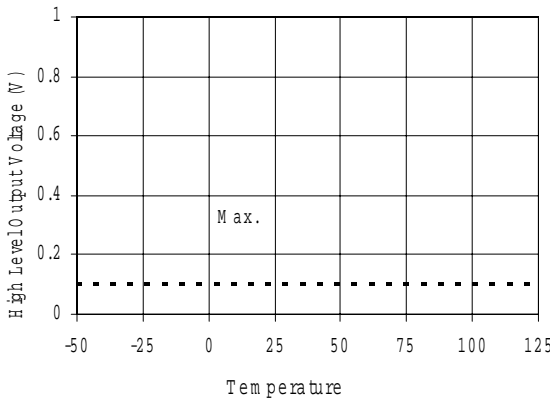


Figure 18A. High Level Output vs. Temperature

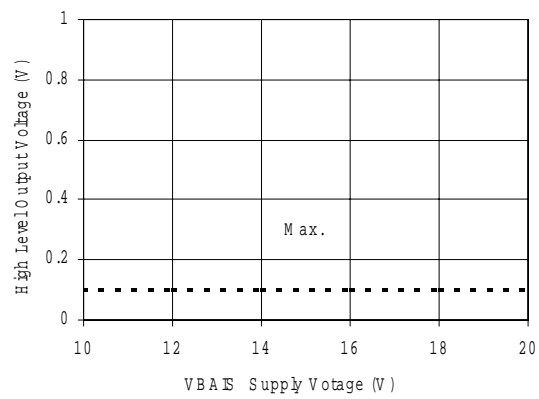


Figure 18B. High Level Output vs. Voltage

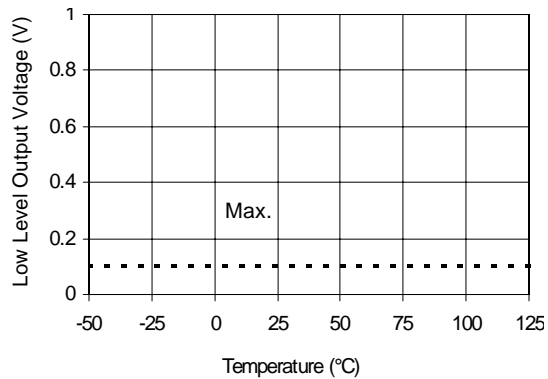


Figure 19A. Low Level Output vs. Temperature

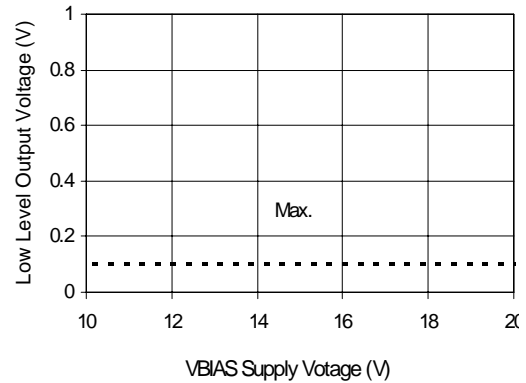


Figure 19B. Low Level Output vs. Voltage

IR2111(S) & (PbF)

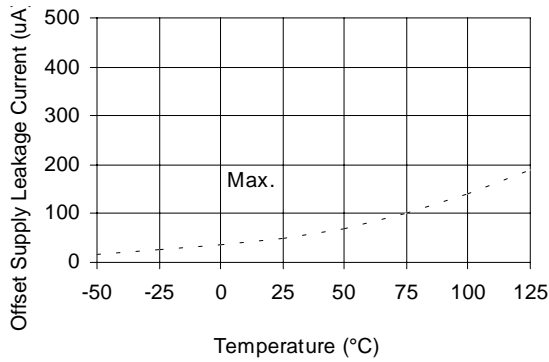


Figure 20A Offset Supply Current vs Temperature

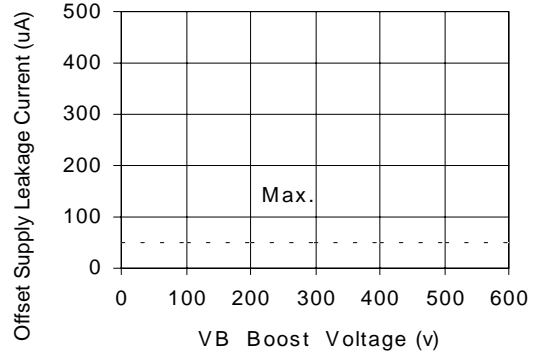


Figure 20B Offset Supply Current vs Voltage

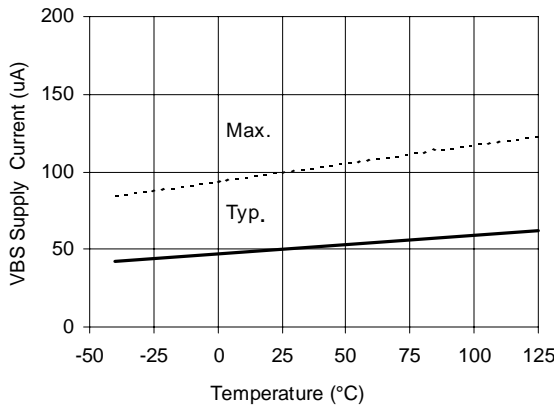


Figure 21A VBS Supply Current vs Temperature

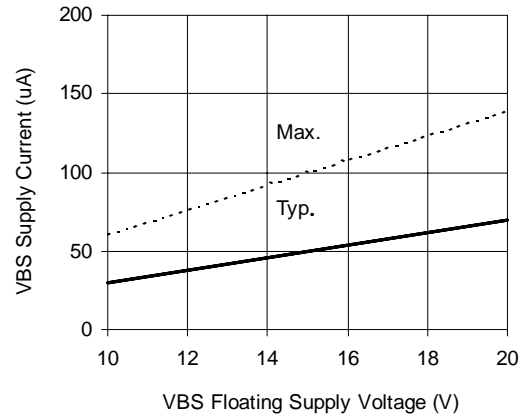


Figure 21B VBS Supply Current vs Voltage

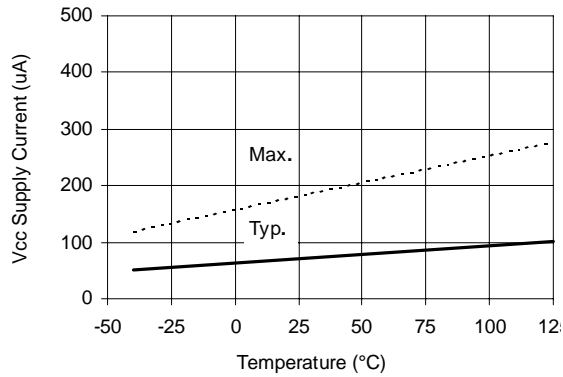


Figure 22A VCC Supply Current vs Temperature

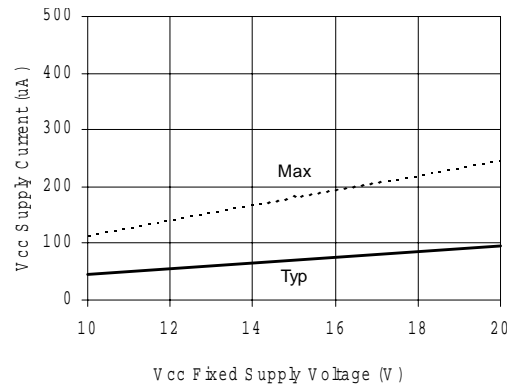


Figure 22B VCC Supply Current vs Voltage

IR2111(S) & (PbF)

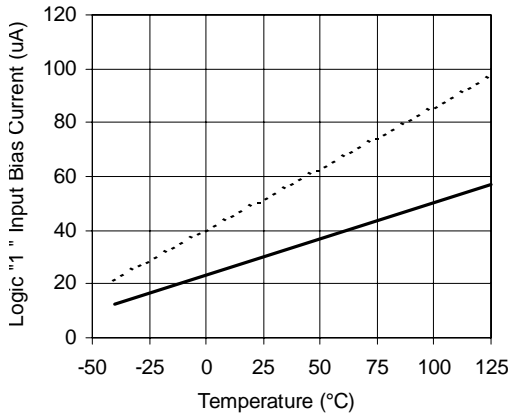


Figure 23A Logic "1" Input Current vs Temperature

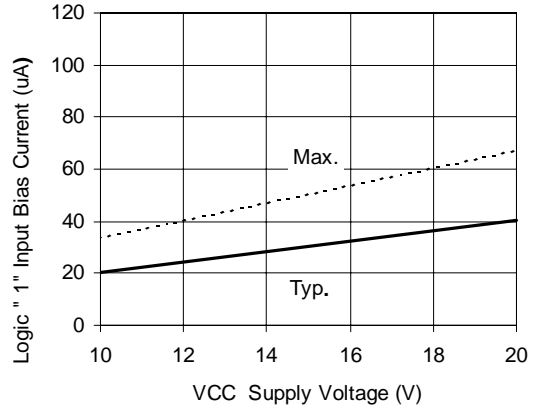


Figure 23B Logic "1" Input Current vs V_{CC} Voltage

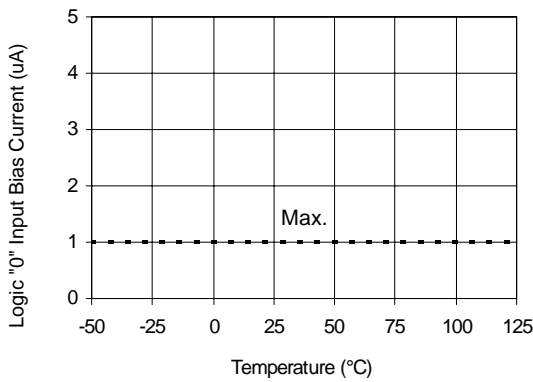


Figure 24A. Logic "0" Input Current vs. Temperature

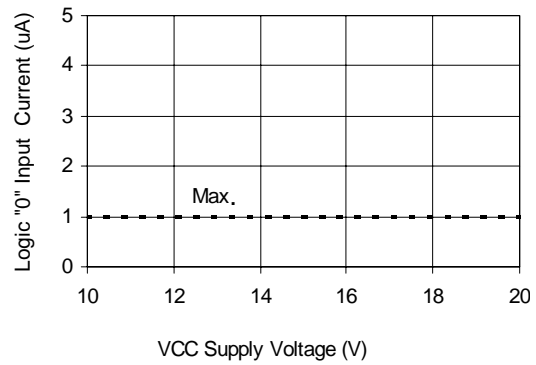


Figure 24B. Logic "0" Input Current vs. V_{CC} Voltage

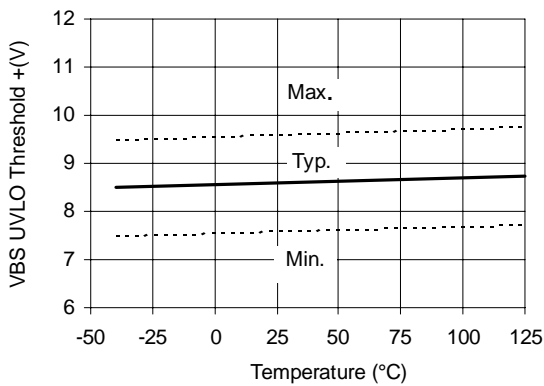


Figure 25 VBS Undervoltage Threshold (+) vs Temperature

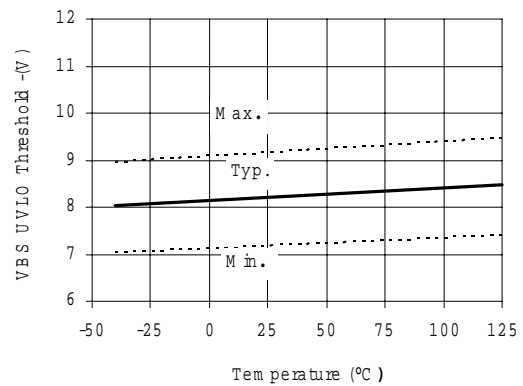


Figure 26 VBS Undervoltage Threshold (-) vs Temperature

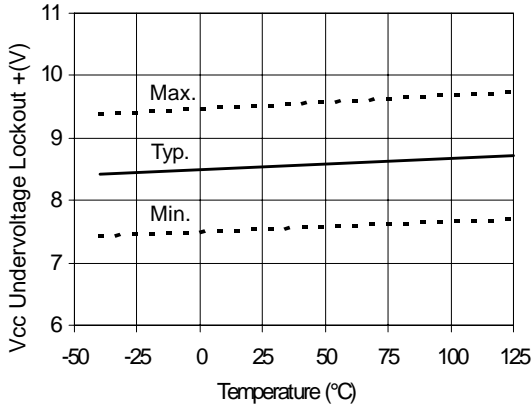


Figure 27 Vcc Undervoltage (-) vs Temperature

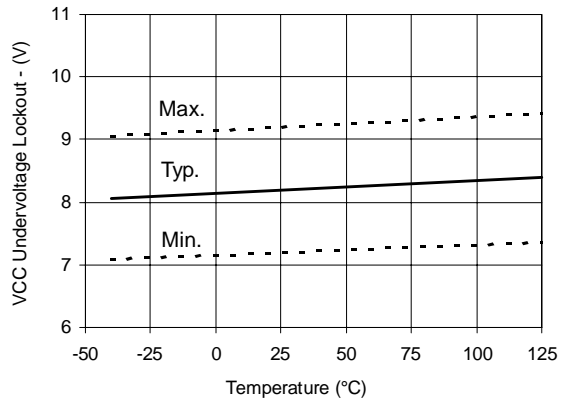


Figure 28 Vcc Undervoltage (-) vs Temperature

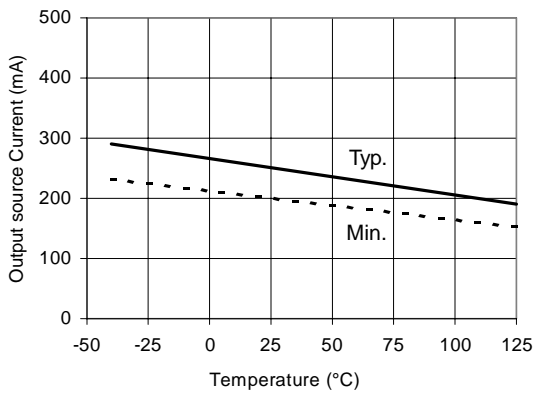


Figure 29A Output Source Current vs Temperature

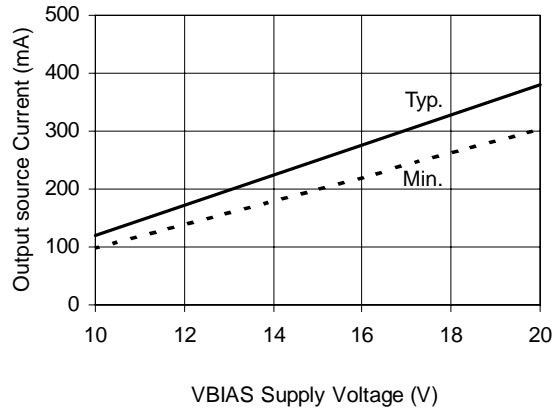


Figure 29B Output Source Current vs Voltage

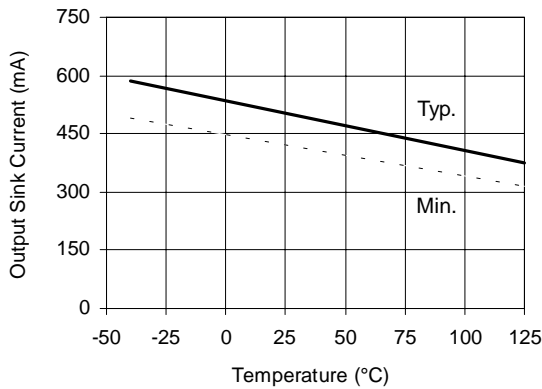


Figure 30A Output Sink Current vs Temperature

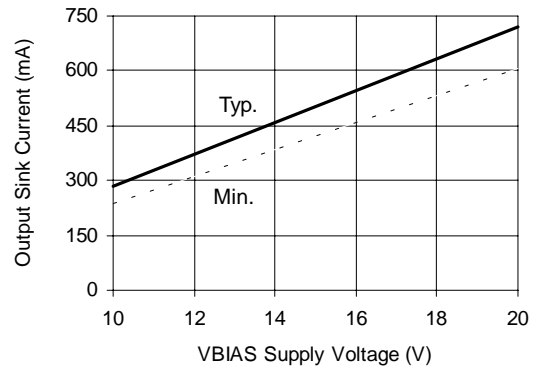


Figure 30B Output Sink Current vs Voltage

IR2111(S)&(PbF)

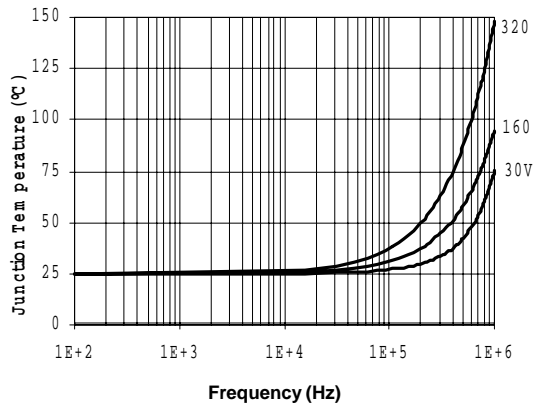


Figure 31. IR2111 T_J vs. Frequency (IRFBC20)
R_{GATE} = 33Ω, V_{CC} = 15V

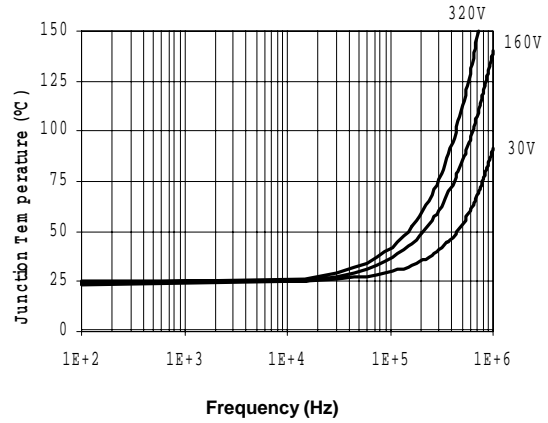


Figure 32. IR2111 T_J vs. Frequency (IRFBC30)
R_{GATE} = 22Ω, V_{CC} = 15V

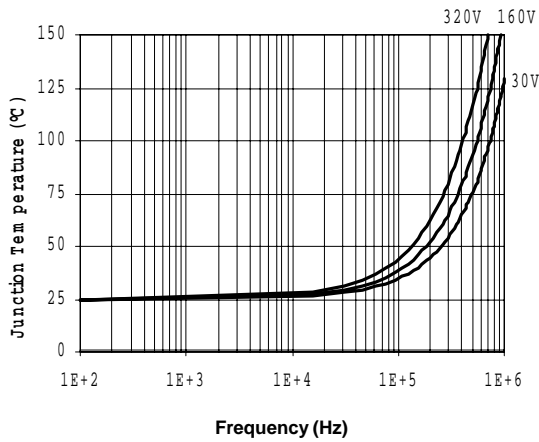


Figure33. IR2111 T_J vs. Frequency (IRFBC40)
R_{GATE} = 15Ω, V_{CC} = 15V

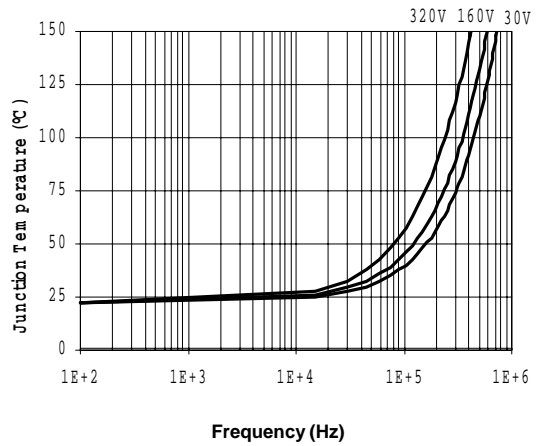


Figure 34. IR2111 T_J vs. Frequency (IRFPC50)
R_{GATE} = 10Ω, V_{CC} = 15V

IR2111(S) & (PbF)

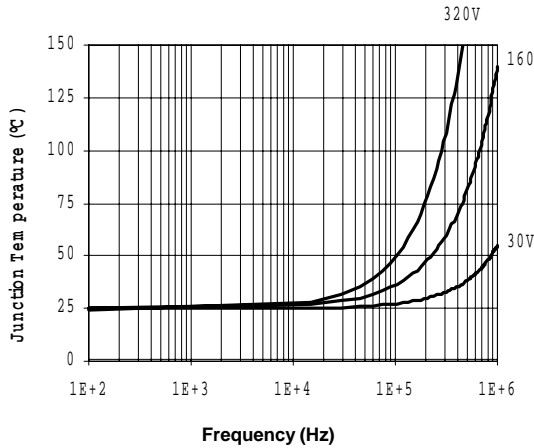


Figure 35. IR2111S T_J vs. Frequency (IRFBC20)
R_{GATE} = 33Ω, V_{CC} = 15V

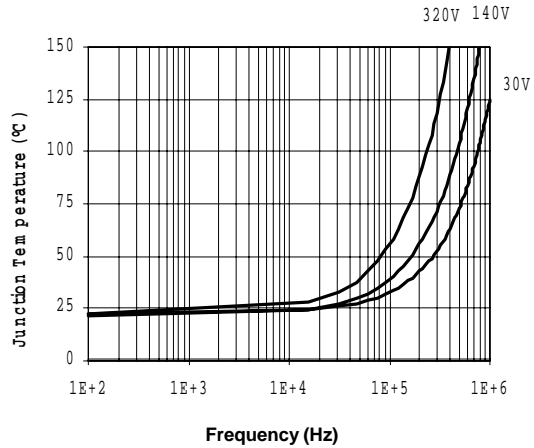


Figure 36. IR2111S T_J vs. Frequency (IRFBC30)
R_{GATE} = 22Ω, V_{CC} = 15V

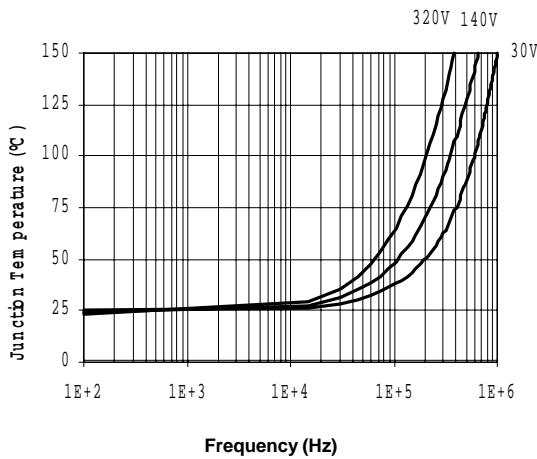


Figure 37. IR2111S T_J vs. Frequency (IRFBC40)
R_{GATE} = 15Ω, V_{CC} = 15V

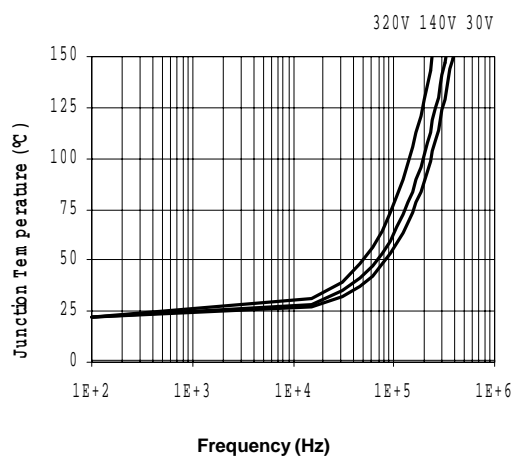
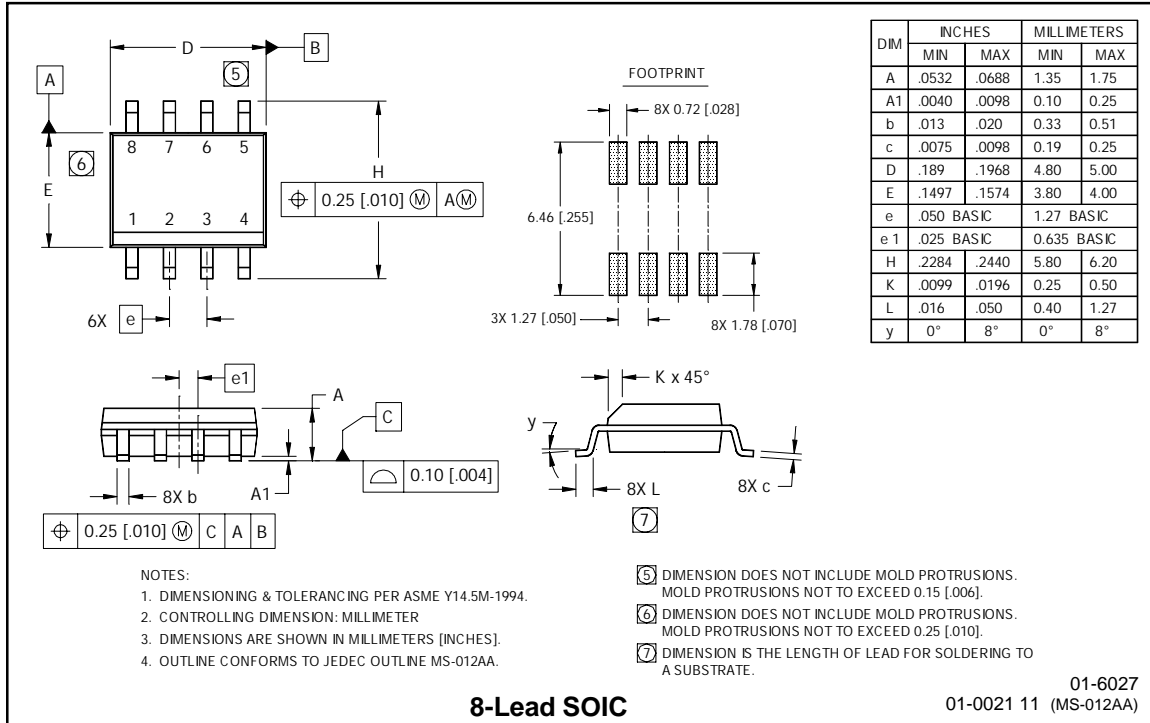
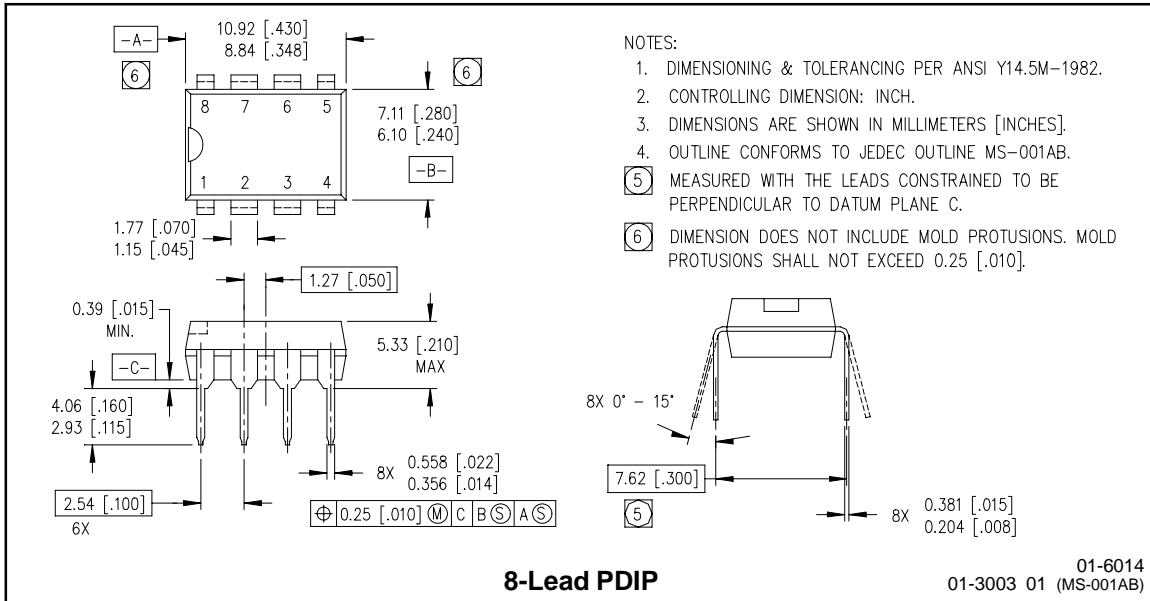


Figure 38. IR2111S T_J vs. Frequency (IRFPC50)
R_{GATE} = 10Ω, V_{CC} = 15V

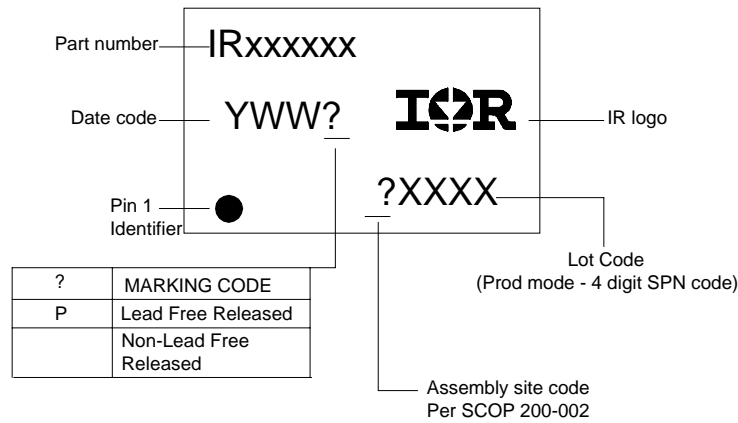
IR2111(S) & (PbF)

International
IRF Rectifier

Case outlines



LEADFREE PART MARKING INFORMATION



ORDER INFORMATION

Basic Part (Non-Lead Free)

8-Lead PDIP IR2111 order IR2111
 8-Lead SOIC IR2111S order IR2111S

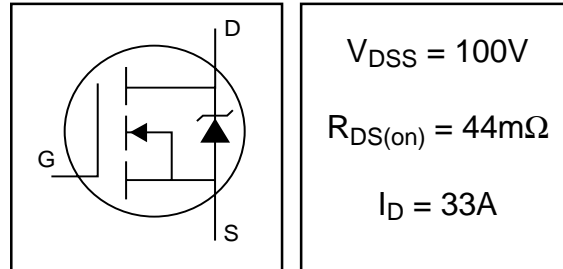
Leadfree Part

8-Lead PDIP IR2111 order IR2111PbF
 8-Lead SOIC IR2111S order IR2111SPbF

IRF540N

HEXFET® Power MOSFET

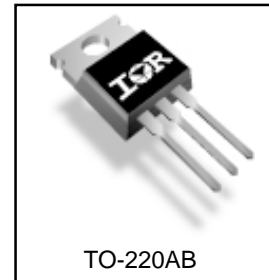
- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



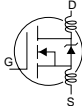
Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	33	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	23	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	110	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	130	W
	Linear Derating Factor	0.87	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ①	16	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	13	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	7.0	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
T_{STG}			
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

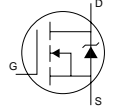
Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.15	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V _{(BR)DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	V _{GS} = 0V, I _D = 250μA
ΔV _{(BR)DSS/ΔT_J}	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.12	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D = 1mA
R _{DS(on)}	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	44	mΩ	V _{GS} = 10V, I _D = 16A ④
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} = V _{GS} , I _D = 250μA
g _{fs}	Forward Transconductance	21	—	—	S	V _{DS} = 50V, I _D = 16A④
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V _{DS} = 100V, V _{GS} = 0V
		—	—	250		V _{DS} = 80V, V _{GS} = 0V, T _J = 150°C
I _{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V _{GS} = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V _{GS} = -20V
Q _g	Total Gate Charge	—	—	71	nC	I _D = 16A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		V _{DS} = 80V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	21		V _{GS} = 10V, See Fig. 6 and 13
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	11	—	ns	V _{DD} = 50V
t _r	Rise Time	—	35	—		I _D = 16A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	39	—		R _G = 5.1Ω
t _f	Fall Time	—	35	—		V _{GS} = 10V, See Fig. 10 ④
L _D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L _S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C _{iss}	Input Capacitance	—	1960	—	pF	V _{GS} = 0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	250	—		V _{DS} = 25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	40	—		f = 1.0MHz, See Fig. 5
E _{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	—	700⑤	185⑥		mJ

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I _S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	33	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I _{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode)①	—	—	110		
V _{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.2	V	T _J = 25°C, I _S = 16A, V _{GS} = 0V ④
t _{rr}	Reverse Recovery Time	—	115	170	ns	T _J = 25°C, I _F = 16A
Q _{rr}	Reverse Recovery Charge	—	505	760	nC	di/dt = 100A/μs ④
t _{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L _S +L _D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting T_J = 25°C, L = 1.5mH
R_G = 25Ω, I_{AS} = 16A. (See Figure 12)
- ③ I_{SD} ≤ 16A, di/dt ≤ 340A/μs, V_{DD} ≤ V_{(BR)DSS},
T_J ≤ 175°C
- ④ Pulse width ≤ 400μs; duty cycle ≤ 2%.
- ⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑥ This is a calculated value limited to T_J = 175°C .

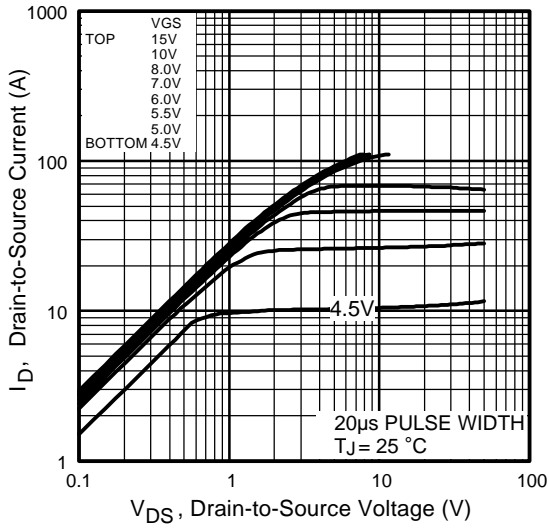


Fig 1. Typical Output Characteristics

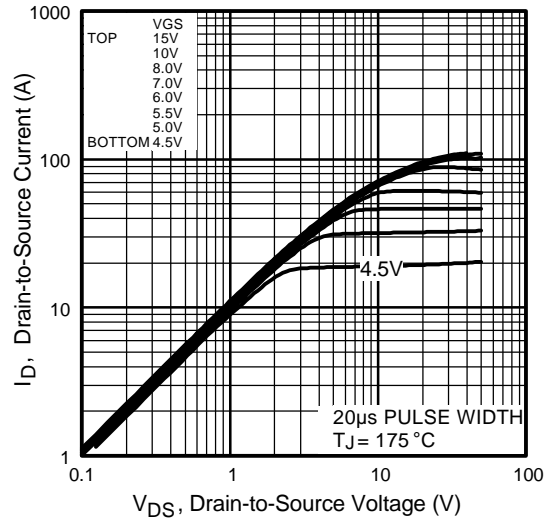


Fig 2. Typical Output Characteristics

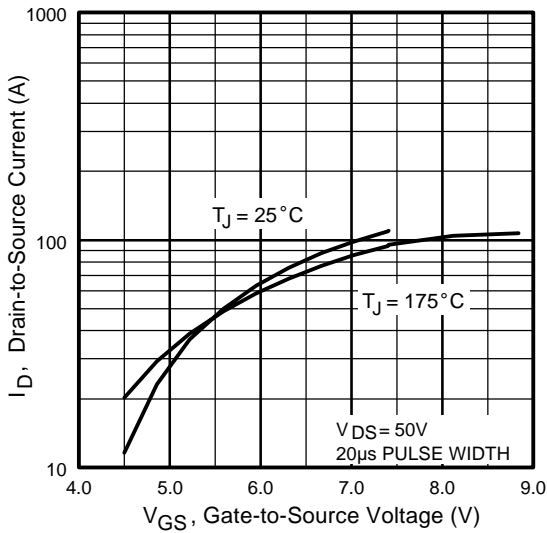


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

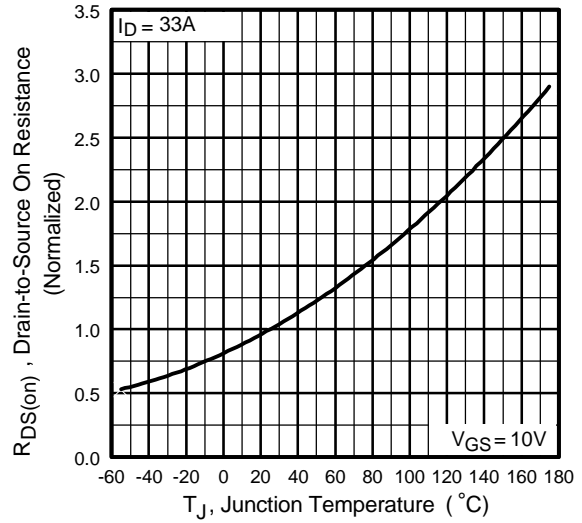


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

IRF540N

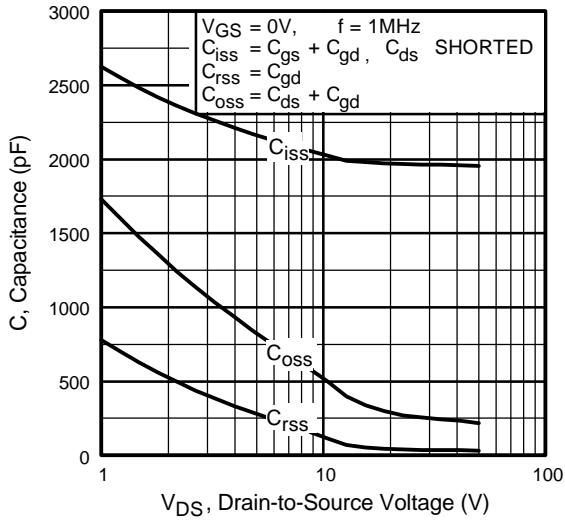


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

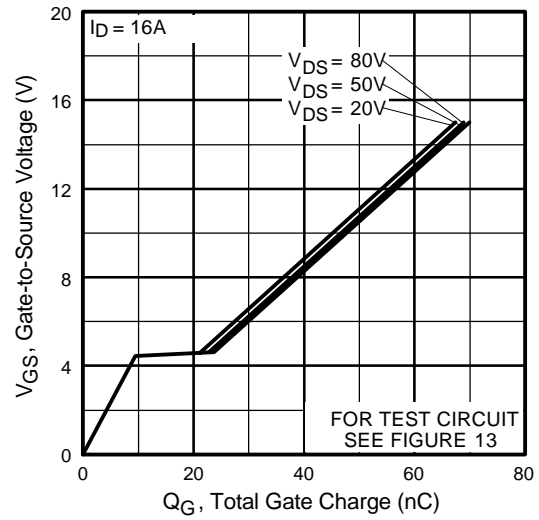


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

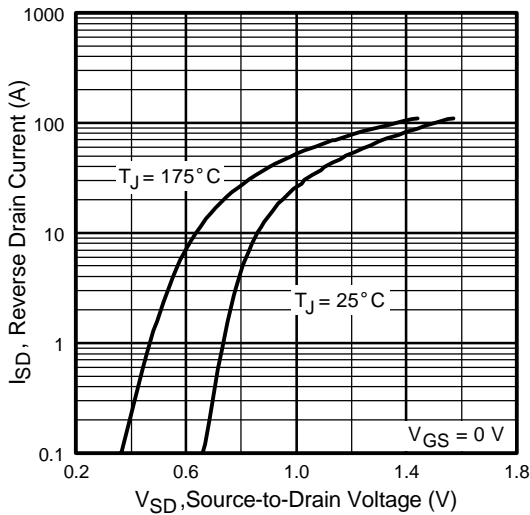


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

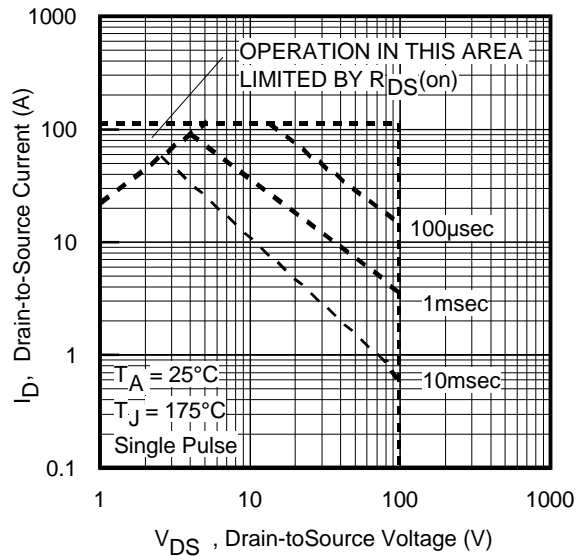


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

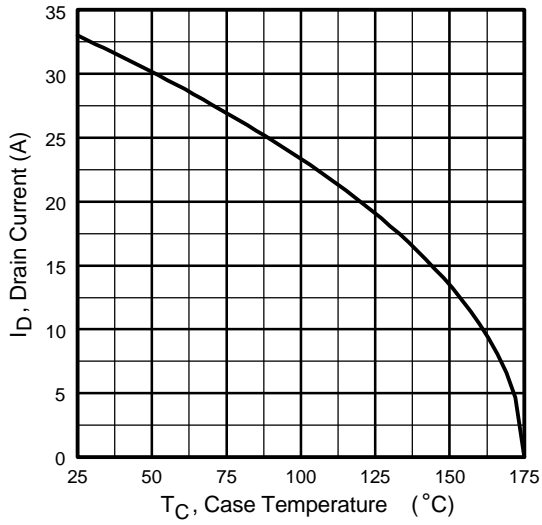


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

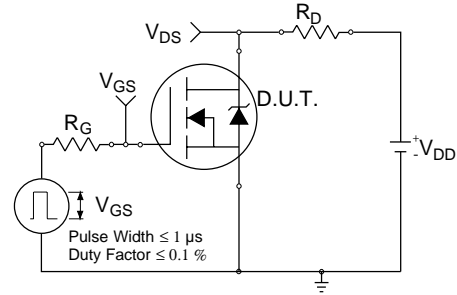


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

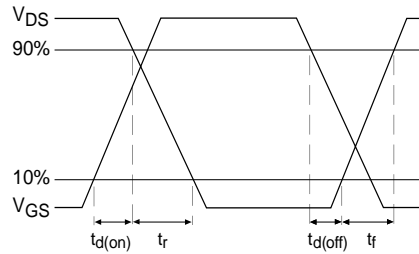


Fig 10b. Switching Time Waveforms

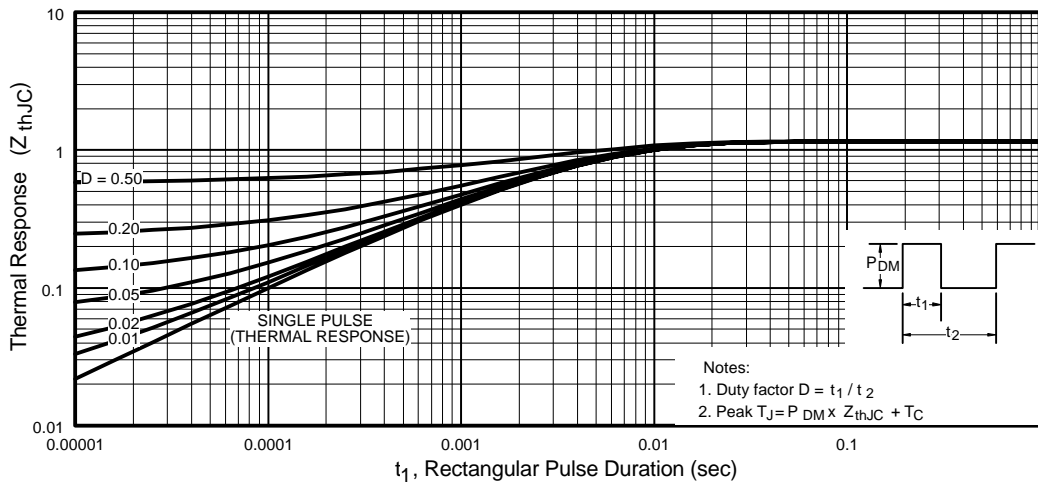


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRF540N

International
IR Rectifier

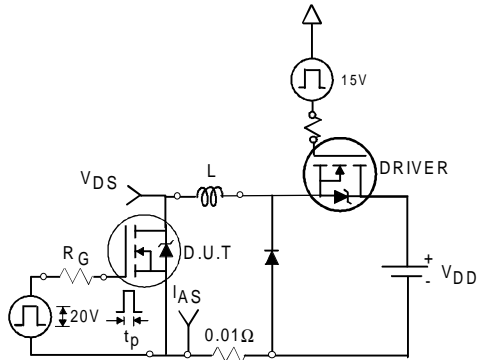


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

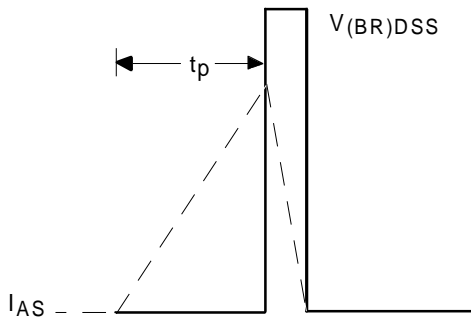


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

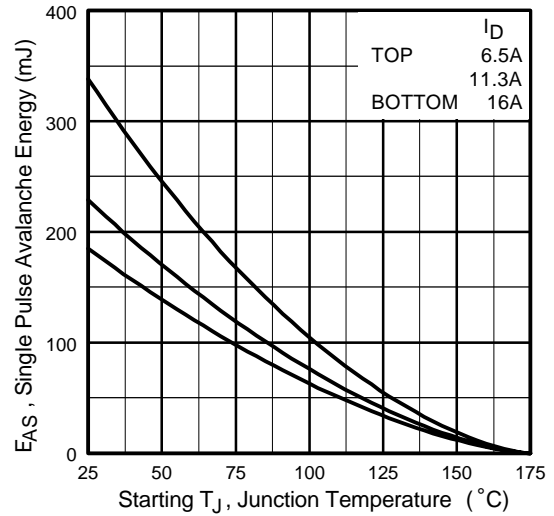


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

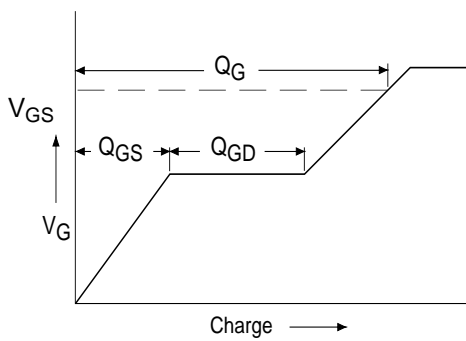


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

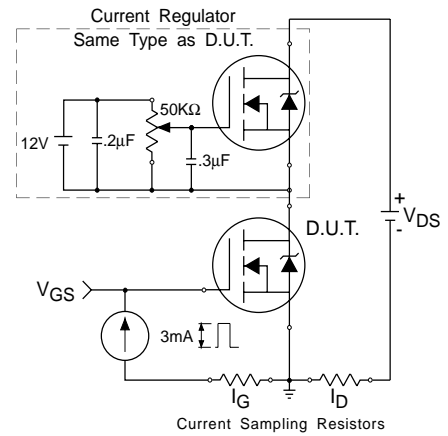
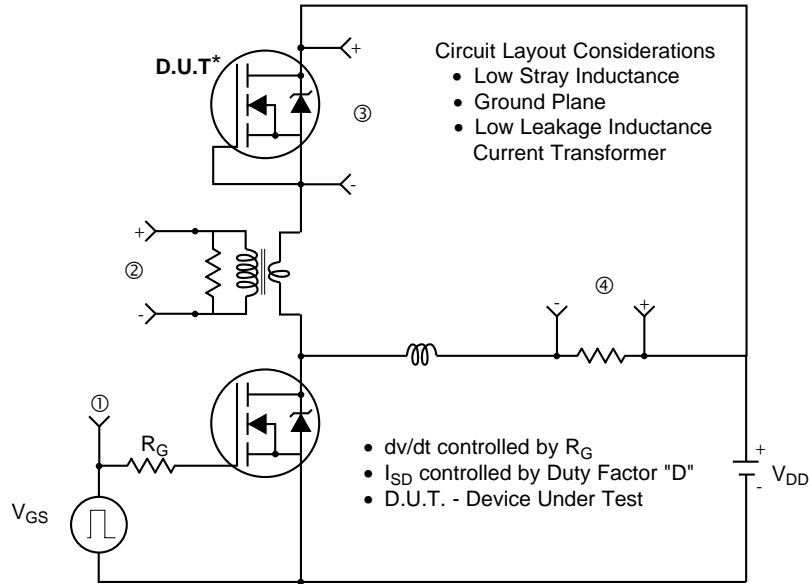
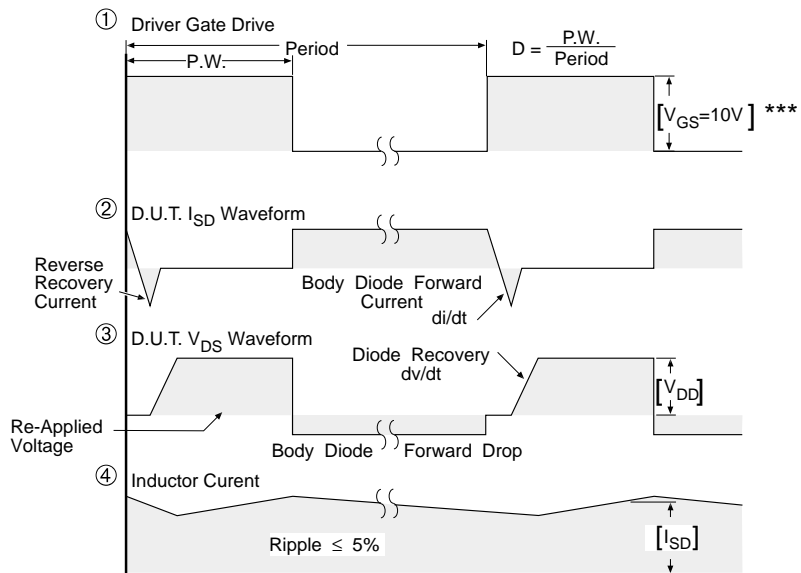


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit



* Reverse Polarity of D.U.T for P-Channel



*** $V_{GS} = 5.0V$ for Logic Level and 3V Drive Devices

Fig 14. For N-channel HEXFET® power MOSFETs

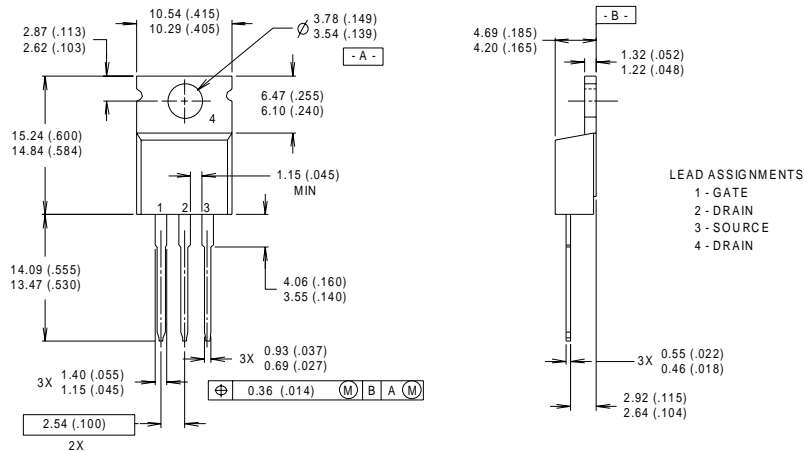
IRF540N

International
IR Rectifier

Package Outline

TO-220AB

Dimensions are shown in millimeters (inches)



NOTES:

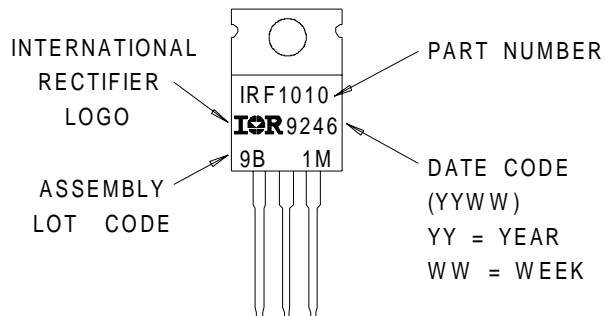
- 1 DIMENSIONING & TOLERANCING PER ANSII Y14.5M, 1982.
- 2 CONTROLLING DIMENSION : INCH

- 3 OUTLINE CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-220AB.
- 4 HEATSINK & LEAD MEASUREMENTS DO NOT INCLUDE BURRS.

Part Marking Information

TO-220AB

EXAMPLE : THIS IS AN IRF1010
WITH ASSEMBLY
LOT CODE 9B1M



Data and specifications subject to change without notice.
This product has been designed and qualified for the industrial market.
Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International
IR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
TAC Fax: (310) 252-7903

Visit us at www.irf.com for sales contact information.03/01

www.irf.com