

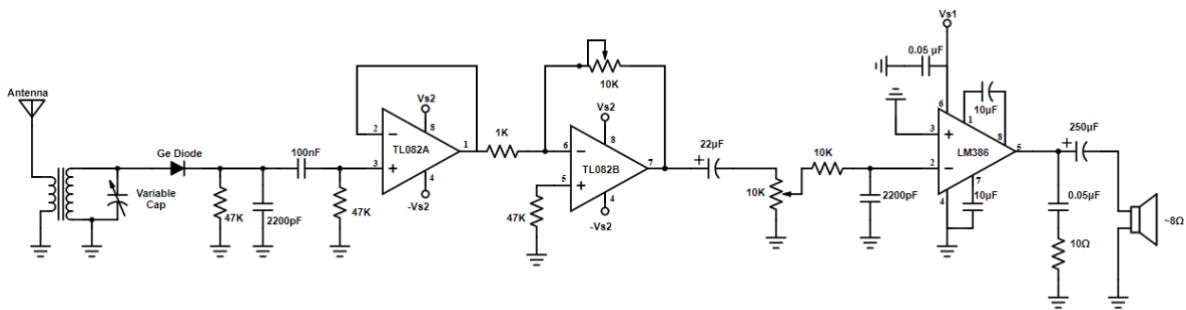
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

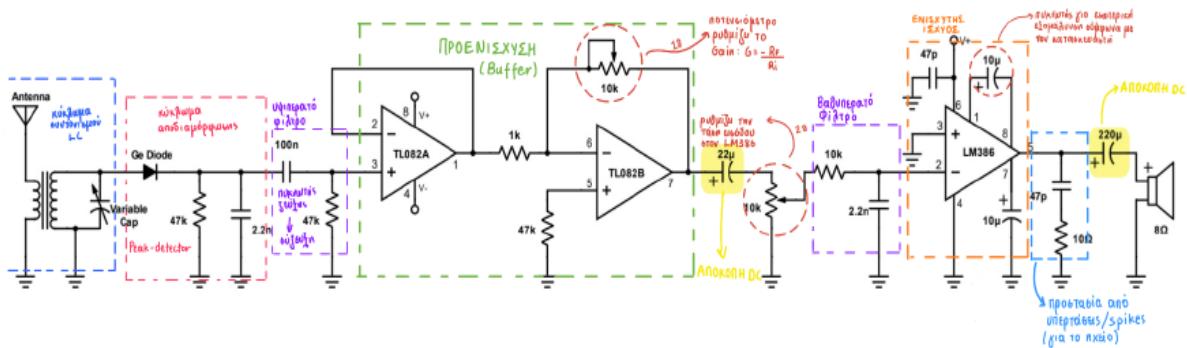


ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΟΔΗΓΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΚΟΥ ΔΕΚΤΗ ΑΜ (ΤΕΛΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ)

ΑΓΓΕΛΟΣ ΚΑΜΑΡΙΑΔΗΣ | angeloskamariadis@gmail.com



ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΡΟΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ



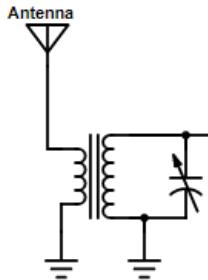
ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ

- 2 Πηνία
- 1 Δίοδος
- 1 Αντίσταση $47\text{k}\Omega$
- 1 Πυκνωτής 2200pF
- 1 Πυκνωτής 100nF
- 1 Αντίσταση $47\text{k}\Omega$
- 1 TL082A
- 1 Αντίσταση $1\text{k}\Omega$
- 1 TL082B
- 1 Αντίσταση $47\text{k}\Omega$
- 1 Αντίσταση $10\text{k}\Omega$
- 1 Πυκνωτής $22\mu\text{F}$
- 2 Ποτενσιόμετρα $10\text{k}\Omega$
- 1 Αντίσταση $10\text{k}\Omega$
- 1 Πυκνωτής 2200pF
- 1 LM386
- 2 Πυκνωτές $10\mu\text{F}$
- 1 Πυκνωτής $0.05\mu\text{F}$
- 1 Πυκνωτής $250\mu\text{F}$
- 1 Πυκνωτής $0.05\mu\text{F}$
- 1 Αντίσταση 10Ω
- 1 Ηχείο
- Καλώδια

ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΣ

- Εάν κάποια υλικά δεν είναι διαθέσιμα, χρησιμοποιούμε αυτά με την πλησιέστερη σε αυτά τιμή.
- Για τις κατάλληλες τάσεις τροφοδοσίας, το επιτρεπτά όρια σήματος εισόδων κτλ. ανατρέχουμε στα datasheets των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- Για τον μετασχηματιστή χρειαζόμαστε δύο πηνία. Το πηνίο με τις πολλές σπείρες είναι το δευτερεύων. Το πηνίο με τις λίγες σπείρες είναι το πρωτεύων. Για το πρωτεύον, τηλίγουμε πηνιόσυρμα πάνω από το σπείρωμα του δευτερεύοντος σχηματίζοντας 10-15 σπείρες. Προκειμένου το πρωτεύων τύλιγμα να σταθεροποιηθεί πάνω από το δευτερεύον, χρησιμοποιούμε υγρή κόλλα.
- Για τον μεταβλητό πυκνωτή (στο κύκλωμα συντονισμού) χρησιμοποιούμε το trimmer με το μοβ χρώμα. Μεταβάλλουμε από τα 10-60pF.
- Για το στάδιο της προ-ενίσχυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν όποια από τα ολοκληρωμένα TL071, TL072, TL081, TL082 έχουμε στη διάθεση σας. Συγκεκριμένα το TL071 είναι ισοδύναμο με το TL081 και το TL072 είναι ισοδύναμο με το TL082. Επίσης, τα TL072 και TL082 αποτελούνται από δύο TL071 και TL081 αντίστοιχα. Στο προτεινόμενο σχηματικό, στο στάδιο της προ-ενίσχυσης, χρησιμοποιούμε ένα ολοκληρωμένο (TL082), από το οποίο εκμεταλλευόμαστε και τους δύο ενισχυτές που περιέχει.
- Ο πυκνωτής 10μF μεταξύ των pins 1 και 8 του LM386 χρησιμοποιείται για την αύξηση του κέρδους τάσης του ενισχυτή ισχύος. Οι Bypass πυκνωτές χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στο datasheet του LM386.
- Μπορούμε να τροφοδοτήσουμε τους ενισχυτές στο στάδιο της προενίσχυσης με μονή ή διαφορική τροφοδοσία.
- Για τον έλεγχο της κατασκευής ξεκινάμε από τον ενισχυτή ισχύος.
- Προτείνεται να ελεγχθεί το κύκλωμα πάνω σε ένα breadboard πριν υλοποιηθεί πάνω στην διάτρητη πλακέτα

ΚΕΡΑΙΑ, ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ



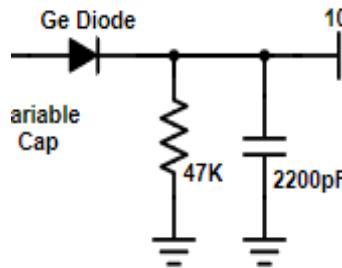
Η κεραία λειτουργεί ως ο δέκτης του ραδιοφωνικού σήματος, συγκεκριμένα στη συχνότητα των 729 kHz. Το σήμα αυτό είναι διαμορφωμένο κατά πλάτος (AM), γεγονός που σημαίνει πως χρησιμοποιεί ένα φέρον κύμα υψηλής συχνότητας. Το φέρον αυτό κύμα περιβάλλεται από το σήμα πληροφορίας, το οποίο κυμαίνεται στο ακουστικό φάσμα του ανθρώπου (20 Hz – 20 kHz). Αυτή η τεχνική διαμόρφωσης είναι απαραίτητη, καθώς η συχνότητα εκπομπής σχετίζεται αντίστροφα με το μέγεθος της απαιτούμενης κεραίας. Επομένως, χαμηλότερες συχνότητες θα απαιτούσαν δυσανάλογα μεγάλες κεραίες, καθιστώντας τη μετάδοση μη πρακτική. Η διαμόρφωση επιτρέπει επίσης τη συνύπαρξη πολλαπλών ραδιοφωνικών σημάτων, καθώς παρόμοιο περιεχόμενο μπορεί να μεταδίδεται ταυτόχρονα μέσω διαφορετικών φερόντων συχνοτήτων (π.χ. το ίδιο μουσικό κομμάτι από διάφορους σταθμούς). Δεδομένου ότι το λαμβανόμενο σήμα είναι αρκετά ασθενές, απαιτείται ενίσχυση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των στοιχείων L1 και L2, δύο πηνίων τυλιγμένων γύρω από φερρίτη, σχηματίζοντας έναν μετασχηματιστή. Η ενίσχυση της τάσης εξαρτάται από τον λόγο των σπειρών των πηνίων, ενώ παράλληλα, λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας, μειώνεται αντίστοιχα η ένταση του ρεύματος, καθώς ο μετασχηματιστής είναι παθητικό στοιχείο. Για την επιλογή του επιθυμητού ραδιοφωνικού σταθμού ανάμεσα στα πολυάριθμα σήματα που λαμβάνει η κεραία, απαιτείται ένα κύκλωμα συντονισμού. Το κύκλωμα αυτό δρα ως παθητικό ζωνοπερατό φίλτρο, απομονώνοντας τη συγκεκριμένη συχνότητα (π.χ. 729 kHz) και αποκόπτοντας τις ανεπιθύμητες. Η λειτουργία του βασίζεται στον συνδυασμό ενός πηνίου και ενός πυκνωτή, οι τιμές των οποίων καθορίζουν τη συχνότητα συντονισμού σύμφωνα με τη σχέση:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Στην παρούσα εφαρμογή, το κύκλωμα συντονισμού περιλαμβάνει το δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή (L2) και τον μεταβλητό πυκνωτή C1.

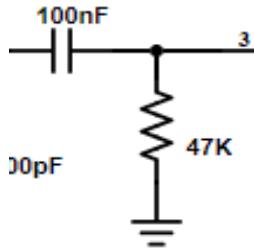
Με τη ρύθμιση της χωρητικότητας του πυκνωτή, μπορούμε να τροποποιήσουμε τη συχνότητα συντονισμού, επιτρέποντάς μας να επιλέξουμε το επιθυμητό ραδιοφωνικό σήμα.

ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗΣ



Αφού πλέον έχουμε παραλάβει το σήμα στη ζητούμενη συχνότητα των 729 kHz, είναι απαραίτητο να προχωρήσουμε στην αποδιαμόρφωσή του. Η διαδικασία αυτή στοχεύει στην ανάκτηση του ανώτερου περιγράμματος του σήματος, το οποίο περιέχει την ουσιαστική πληροφορία. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιούμε ένα κύκλωμα ανιχνευτή κορυφής (Πείραμα 10), το οποίο αποτελείται από μια δίοδο, μια αντίσταση και έναν πυκνωτή. Η δίοδος λειτουργεί αποκόπτοντας το αρνητικό ημιπερίοδο του σήματος, επιτρέποντας στον πυκνωτή να φορτίζεται και να αποδίδει το ανώτερο περίγραμμα του αρχικού σήματος. Παράλληλα, η αντίσταση ρυθμίζει τον ρυθμό εκφόρτισης του πυκνωτή, με την τιμή της να καθορίζει αν η απόκριση θα είναι ταχύτερη ή πιο αργή, ώστε να ακολουθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια τις διακυμάνσεις του σήματος. Στην παρούσα εφαρμογή, το κύκλωμα αποδιαμόρφωσης αποτελείται από μια δίοδο γερμανίου (Ge), μια αντίσταση R1 με τιμή 47 kΩ και έναν πυκνωτή C2 χωρητικότητας 2200 pF. Η επιλογή της δίοδου Ge είναι στρατηγική λόγω της χαμηλής τάσης πτώσης της (0,2-0,3 V), που την καθιστά ιδανική για την επεξεργασία του ασθενούς σήματος εισόδου, ακόμα και μετά την ενίσχυση μέσω του μετασχηματιστή. Αντίθετα, μια κλασική δίοδος πυριτίου (Si) παρουσιάζει πτώση τάσης 0,5-0,7 V, γεγονός που ενδέχεται να οδηγήσει στην εξάλειψη του σήματος εισόδου. Έτσι, η δίοδος Ge διασφαλίζει την αποτελεσματική αποδιαμόρφωση χωρίς την απώλεια πολύτιμης πληροφορίας.

ΥΨΙΠΕΡΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ

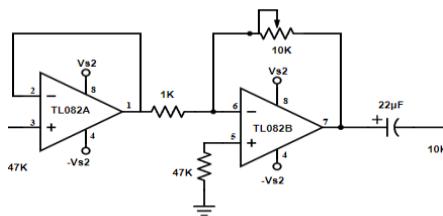


Μετά τον αποδιαμορφωτή ακολουθεί ένα παθητικό φίλτρο υψηλών συχνοτήτων (υψιπερατό), το οποίο έχουμε αναλύσει εκτενώς στο Πείραμα 7. Τα παθητικά φίλτρα δεν ενισχύουν τα σήματα, καθώς δεν διαθέτουν εξωτερική τροφοδοσία όπως οι ενισχυτές. Ο ρόλος τους είναι να απομακρύνουν σήματα συγκεκριμένων συχνοτήτων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετρήσεις ή το τελικό σήμα (π.χ. αποτρέπουν τον θόρυβο παρεμβολών να φτάσει στο ηχείο). Η συχνότητα αποκοπής, στην οποία επιτυγχάνεται αυτό, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$fc = \frac{1}{2\pi RC}$$

Στο συγκεκριμένο υψιπερατό φίλτρο συμμετέχουν ο πυκνωτής C3 και η αντίσταση R2. Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι ένας πυκνωτής συνδεδεμένος σε σειρά σε ένα κύκλωμα μπλοκάρει τις συνεχείς (DC) συνιστώσες, επιτρέποντας μόνο τη διέλευση του εναλλασσόμενου (AC) σήματος. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και στη λειτουργία AC coupling του παλμογράφου. Παράλληλα, ως μέρος του υψιπερατού φίλτρου, ο πυκνωτής απομονώνει τις χαμηλές συχνότητες και διευκολύνει τη διέλευση των υψηλών.

BUFFER ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΤΑΣΗΣ (ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ)

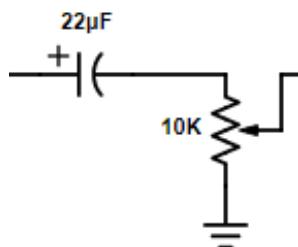


Το κύκλωμα του απομονωτή (Buffer - TL082A στην παραπάνω εικόνα) αποτελεί ένα ενεργό στοιχείο, συγκεκριμένα έναν τελεστικό ενισχυτή με εξωτερική τροφοδοσία. Παρόλο που δεν ενισχύει το σήμα, κάτι που διαφαίνεται και από την απουσία αντιστάσεων στην είσοδο και την έξοδο του ενισχυτή,

επιτελεί έναν σημαντικό ρόλο. Συγκεκριμένα, απομονώνει τα διαφορετικά στάδια του κυκλώματος, αποτρέποντας ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων. Ο συνδυασμός του Buffer με το παθητικό υψηπερατό φίλτρο της προηγούμενης ενότητας συνθέτει ένα ενεργό υψηπερατό φίλτρο. Στη συνέχεια, ακολουθεί ο προενισχυτής (TL082B στην παραπάνω εικόνα), επίσης με εξωτερική τροφοδοσία, ο οποίος αναλαμβάνει την ενίσχυση της τάσης. Η συνδεσμολογία του είναι αναστρέφουσα, καθώς η είσοδος συνδέεται στην αναστρέφουσα είσοδο (-input), γεγονός που οδηγεί σε έξοδο σήματος με διαφορά φάσης 180° (ανεστραμμένο σήμα), χωρίς αυτό να επηρεάζει αρνητικά τη λειτουργία. Το κέρδος του προενισχυτή στην αναστρέφουσα συνδεσμολογία υπολογίζεται από τον λόγο των αντιστάσεων, ο οποίος μπορεί να ρυθμιστεί μέσω του ποτενσιομέτρου. Αρκεί η σύνδεση του μεσαίου και ενός ακριανού ακροδέκτη του ποτενσιομέτρου, αλλά για αποφυγή θορύβου από τον ασύνδετο ακροδέκτη, συνιστάται η σύνδεση και του τρίτου ακροδέκτη με τον μεσαίο. Τέλος, το ολοκληρωμένο κύκλωμα TL082 περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητους τελεστικούς ενισχυτές, τους TL082A και TL082B, με διακριτές εισόδους και εξόδους σε διαφορετικούς ακροδέκτες του ίδιου ολοκληρωμένου. Η ενίσχυση συμβαίνει ως εξής:

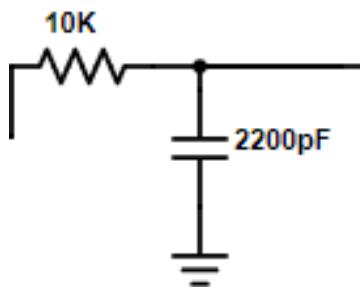
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R5}{R3}$$

ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΚΑΙ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΟ



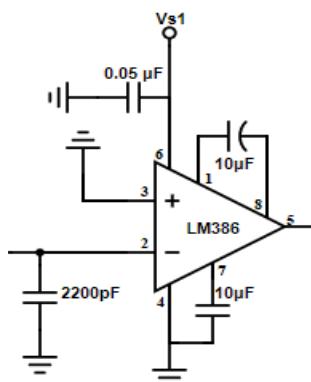
Ο πυκνωτής $C4 = 22\mu F$ που βρίσκεται μετά τον προενισχυτή λειτουργεί ως φίλτρο, αποκόπτοντας τις DC συνιστώσες. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται πιθανές DC συνιστώσες που μπορεί να έχουν προκληθεί στο σήμα από τις τροφοδοσίες, τους ενισχυτές κ.ά. Το επόμενο ποτενσιόμετρο δρα ως διαιρέτης τάσης, λαμβάνοντας το σήμα εξόδου του προενισχυτή και μέσω των επιμέρους αντιστάσεών του επιτρέπει σε μέρος του αρχικού σήματος να προχωρήσει στο επόμενο στάδιο, δηλαδή στην είσοδο του ενισχυτή ισχύος (LM386). Τελικά, με τη ρύθμιση των δύο ποτενσιομέτρων καθορίζεται η συνολική ενίσχυση και η ένταση του σήματος που θα αναπαράγεται από το ηχείο.

ΒΑΘΥΠΕΡΑΤΟ ΦΙΛΤΡΟ



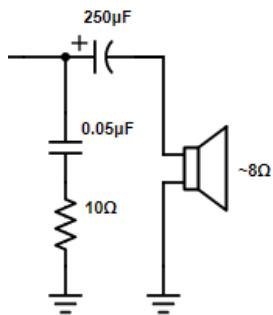
Πριν τον ενισχυτή ισχύος έχουμε και ένα βαθυπερατό φίλτρο για να αποκόψουμε τις υψηλές συχνότητες, τη λειτουργία του οποίου συζητήσαμε στο Πείραμα 7.

ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ



Μέχρι στιγμής έχουμε ενισχύσει μόνο την τάση του σήματος μας. Το ηχείο του ραδιοφώνου όμως λόγω της χαμηλής αντίστασής του απαιτεί αρκετό ρεύμα για να λειτουργήσει, κάτι που δεν μπορεί να προσφέρει ο TL082. Επομένως, θα χρειαστεί και ένας ενισχυτής ισχύος που μπορεί να προσφέρει το απαιτούμενο ρεύμα. Ο LM386 χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές ήχου και η συνδεσμολογία του δίδεται στο datasheet του.

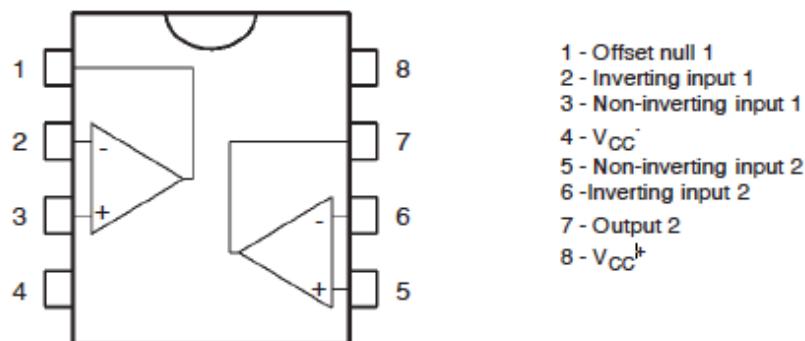
HXEIO



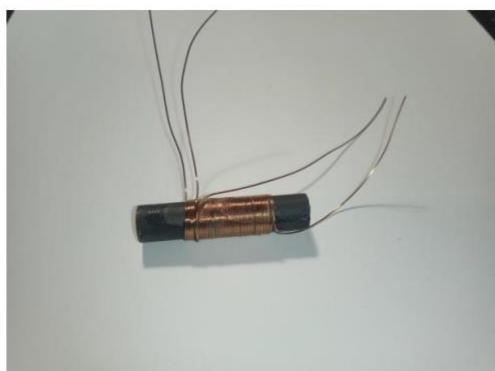
Ο πυκνωτής C9 και η αντίσταση R8 προτείνονται επίσης από το datasheet του LM386 για την προστασία του σταδίου εξόδου από απότομες διακυμάνσεις (spikes) που μπορεί να προκαλέσει το ηχείο. Τέλος, ο πυκνωτής C10 συνδεδεμένος σε σειρά εξαλείφει και πάλι τις DC συνιστώσες που μπορεί να έχουν δημιουργηθεί, ώστε το τελικό σήμα να οδηγηθεί στο ηχείο.

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΜΕΡΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

- TL082 PIN CONNECTIONS (TEXAS INSTRUMENTS)

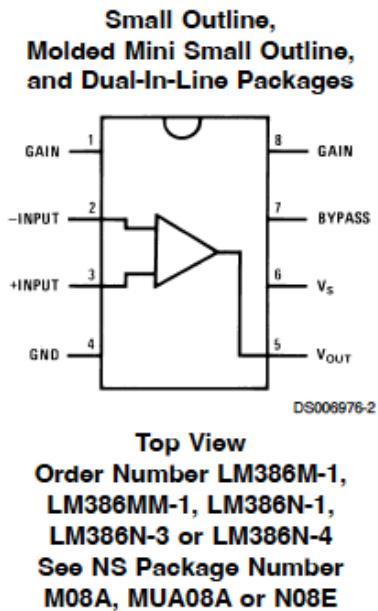


- Διάταξη του Μετασχηματιστή



Η διάταξη του μετασχηματιστή

- LM386 PIN CONNECTIONS (TEXAS INSTRUMENTS)



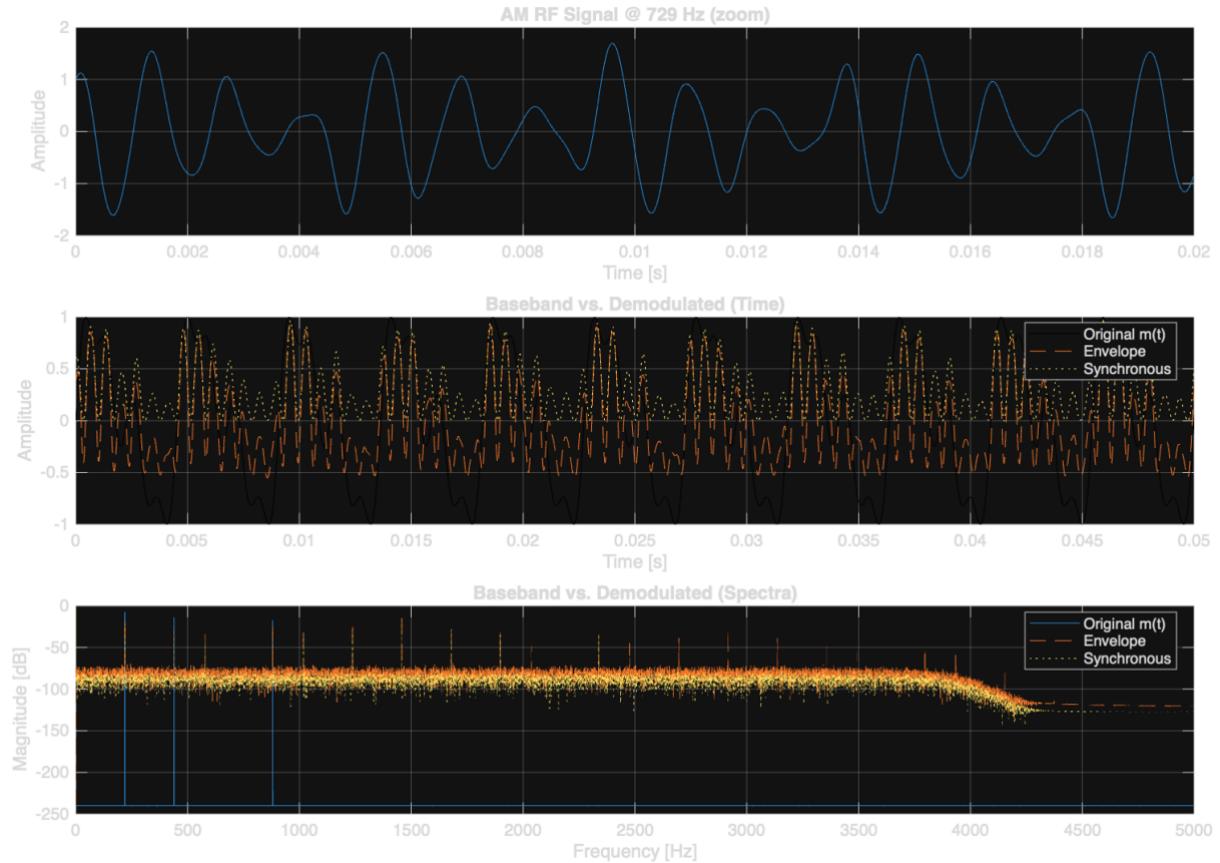
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ, ΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΗΤΗΣ ΠΛΑΚΕΤΑΣ

Για να τοποθετήσουμε δύο στοιχεία του κυκλώματος σε σειρά, τα τοποθετούμε με τον τρόπο που εξυπηρετεί καλύτερα, λαμβάνοντας υπόψη τον διαθέσιμο χώρο για κάθε στοιχείο. Στη συνέχεια, τοποθετούμε το δεύτερο στοιχείο σε μια τρύπα, δίπλα στο πρώτο, και συγκολλάμε με καλάι τον δεξιό ακροδέκτη του πρώτου στοιχείου με τον αριστερό ακροδέκτη του δεύτερου. Για την παράλληλη σύνδεση, η διαδικασία είναι παρόμοια, με τη διαφορά ότι τα δύο στοιχεία τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους. Αν οι ακροδέκτες των δύο στοιχείων δεν μπορούν να τοποθετηθούν σε ίσες αποστάσεις, τους συνδέουμε με ένα καλώδιο. Έπειτα, συγκολλάμε κάθε ακροδέκτη του ενός στοιχείου με τον αντίστοιχο του άλλου. Η χρήση καλωδίων πραγματοποιείται με την ίδια διαδικασία, ακολουθώντας τις οδηγίες που έχουμε διδαχθεί στα εργαστήρια του μαθήματος.

Για τις κολλήσεις, χρησιμοποιούμε ένα κολλητήρι και «καλάι», ενώ ακολουθούμε τη διαδικασία που παρουσιάζεται στο παρακάτω video του οποίου παραθέτουμε το link.

<https://www.youtube.com/watch?v=AqvHogekDI4>

Με τη χρήση του λογισμικού MATLAB, σχεδιάστηκαν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις οι οποίες παρουσιάζουν την λειτουργία του κυκλώματος.



Όπως παρατηρούμε, τα παραπάνω γραφήματα απεικονίζουν τη διαδικασία διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης πλάτους, για ένα ηχητικό σήμα με συχνότητα φέροντος $f_c = 729$ Hz.

Στο πρώτο γράφημα, απεικονίζεται το διαμορφωμένο σήμα υψηλής συχνότητας (RF). Το σήμα αυτό, προκύπτει από τη σχέση:

$$s(t) = [1 + \mu m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

όπου: $m(t)$ είναι το ηχητικό σήμα που φέρει την πληροφορία (σήμα βασικής ζώνης), $f_c = 729$ Hz είναι η συχνότητα του φέροντος κύματος με οποίο διαμορφώνουμε το σήμα βασικής ζώνης ούτως ώστε να μπορεί να μεταδοθεί και τέλος $\mu = 0.7$ είναι ο δείκτης διαμόρφωσης (modulation index).

Η κυματομορφή παρουσιάζει μια χαμηλής συχνότητας περιβάλλουσα που ακολουθεί τη μορφή του $m(t)$ και μια υψηλής συχνότητας ταλάντωση γύρω από αυτήν, που οφείλεται στο φέρον κύμα.

Αυτή η περιβάλλουσα είναι ουσιαστικά η πληροφορία που μεταδίδεται μέσω της μεταβολής του πλάτους του φέροντος.

Στο δεύτερο γράφημα, συγκρίνονται τα τρία σήματα στον χρόνο:

- Μαύρη καμπύλη: το αρχικό ηχητικό σήμα $m(t)$
- Πορτοκαλί διακεκομμένη: το σήμα μετά από αποδιαμόρφωση με περιβάλλουσα (envelope detection)
- Κίτρινη τελεία-παύλα: το σήμα μετά από συγχρονισμένη (coherent) αποδιαμόρφωση

Η αποδιαμόρφωση περιβάλλουσας υλοποιεί μια απλή ανόρθωση και στη συνέχεια διέρχεται το σήμα από βαθυπερατό φίλτρο, ανακτώντας την αργή μεταβολή του πλάτους, δηλαδή το $m(t)$.

Η συγχρονισμένη αποδιαμόρφωση πολλαπλασιάζει το λαμβανόμενο σήμα με ένα τοπικό φέρον ίδιο με το αρχικό, $\cos(2\pi f_c t)$, και έπειτα το εφαρμόζει σε ένα βαθυπερατό φίλτρο για να απομονώσει το επιθυμητό φάσμα γύρω από τη βασική ζώνη.

Αν το τοπικό φέρον είναι τέλεια συγχρονισμένο σε φάση και συχνότητα, η ανάκτηση είναι σχεδόν ιδανική, όπως παρατηρείται από τη μορφολογική ομοιότητα των κυματομορφών. Παρατηρείται ότι και οι δύο μέθοδοι αποδιαμόρφωσης αναπαράγουν την πληροφορία με ικανοποιητική πιστότητα, αλλά η συγχρονισμένη παρουσιάζει καλύτερη γραμμικότητα και λιγότερη παραμόρφωση, ιδίως για χαμηλά επίπεδα SNR.

Το τελευταίο γράφημα, απεικονίζει τα φάσματα πλάτους (Magnitude Spectrum) των τριών σημάτων, με άξονα συχνότητας έως 5 kHz.

Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο αρχικό φάσμα του $m(t)$, το οποίο έχει ενέργεια κυρίως μέχρι ~3 με 4 kHz, όπως αναμένεται για ένα ηχητικό σήμα.

Η πορτοκαλί και η κίτρινη καμπύλη δείχνουν τα φάσματα των δύο αποδιαμορφωμένων σημάτων. Παρατηρείται ότι αναπαράγουν σωστά τη φασματική δομή του αρχικού σήματος, με μικρές αποκλίσεις λόγω θορύβου και φύλτρων. Η στάθμη των πλευρικών ζωνών μειώνεται ομαλά με τη συχνότητα, γεγονός που αντιστοιχεί στη φυσική απόκριση του χαμηλοπερατού φίλτρου. Η λογαριθμική κλίμακα (dB) αναδεικνύει το εύρος δυναμικού λόγου και επιτρέπει την εκτίμηση του λόγου σήματος προς θόρυβο μετά την αποδιαμόρφωση.