



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΡΑΔΙΟΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑ

Σχεδιασμός και Υλοποίηση Ενός Βηματικού Εξασθενητή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Πιπέλιας

Α.Μ. : 2019106

Επιβλέπων: Αναστασόπουλος Μάρκος
Αναπλ. Καθηγητής ΕΚΠΑ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

Μέλη Εξεταστικής επιτροπής:

Αναστασόπουλος Μάρκος
Αναπλ. Καθηγητής ΕΚΠΑ

Τζανακάκη Άννα
Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Νισταζάκης Έκτορας
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Copyright © Δημήτριος Πιπέλιος, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα κ. Μάρκο Αναστασόπουλο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του παρέχοντάς μου σημαντική βοήθεια και καθοδήγηση όλο αυτό το διάστημα, αλλά και για τις χρήσιμες γνώσεις που αποκόμισα κατά την παρακολούθηση των προπτυχιακών του διαλέξεων. Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Πέτρο Γεωργιάδη, ο οποίος με την επιμονή και τις καίριες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης συνέβαλλε στη διαμόρφωση ενός άρτιου αποτελέσματος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά και τους συγγενείς μου για την αμέριστη ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν σε όλη την πορεία μου.

Περίληψη

Στην αυτήν την εργασία αρχικά γίνεται μία αναφορά στην έννοια του εξασθενητή και στην ανάγκη εφεύρεσής του καθώς και στην ιστορική αναδρομή κατά την εξέλιξή του. Επίσης, παραθέτονται κάποια τύποι εξασθενητών ανάλογα με την τεχνολογία ή τα κυκλώματα που χρησιμοποιούν και γίνεται λόγος για τις πιθανές διατάξεις των αντιστάσεων στο κύκλωμα ενός εξασθενητή όταν αυτός έχει συνδεθεί σε σειρά με τα δύο φορτία εισόδου-εξόδου. Στο επόμενο βήμα γίνεται ο υπολογισμός των τιμών των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν μέσω των εξισώσεων που χαρακτηρίζουν το κύκλωμα του κάθε εξασθενητή.

Ακολουθούν αρκετές προσομοιώσεις που έγιναν με την βοήθεια του προγράμματος KiCad, σε DC αλλά και Transient ανάλυση επαληθεύοντας και με τους δύο αυτούς τρόπους τις επιθυμητές εξασθενήσεις. Στα κυκλώματα δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδιασμοί αντιστάσεων ώστε να επιτευχθούν εξασθενήσεις 5 dB, 10 dB και 20 dB η οποίες θα χρησιμοποιηθούν στο τελικό κύκλωμα. Έπειτα, γίνεται αναφορά στα ηλεκτρονικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση του εξασθενητή αναλύοντας περισσότερο τα πιο βασικά του μέρη όπως είναι οι microcontrollers και η Oled οθόνη. Στη συνέχεια παραθέτεται το τελικό σχέδιο του κυκλώματος, μέσω του Eeschema του KiCad και εξηγείται ο τρόπος σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων του, πως γίνεται η τροφοδοσία τους καθώς και πως επιτυγχάνεται η εξασθένιση.

Στην επόμενη ενότητα αρχικά αναφέρεται ο τρόπος σύνδεσης των δύο microcontrollers, μέσω του Arduino UNO, με τον Η/Υ ώστε να γίνει ο προγραμματισμός τους. Πιο συγκεκριμένα, στους δύο microcontrollers θα φορτωθούν διαφορετικοί κώδικες, λόγω των διαφορετικών εργασιών που θα κάνουν, οι οποίοι αναλύονται και σχολιάζονται σε κάθε βήμα. Έπειτα, ακολουθεί η υλοποίηση του κυκλώματος σε ένα breadboard, χρησιμοποιώντας μόνο τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία, ώστε να ελεγχεί ο σωστός προγραμματισμός των

microcontrollers μέσω των αποτελεσμάτων που θα έδειχνε η Oled οθόνη και τα αντίστοιχα leds.

Το επόμενο βήμα απαιτεί τον σχεδιασμό και την τύπωση της πλακέτας PCB ώστε να τοποθετηθούν πάνω της τα στοιχεία του εξασθενητή. Για το λόγο αυτό αρχικά γίνεται ανάλυση στην επιλογή ή τον σχεδιασμό των footprints των στοιχείων ώστε να δημιουργηθεί η απαιτούμενη netlist. Έπειτα, κάνοντας εφαρμογή της netlist στο πρόγραμμα, τοποθετούνται τα footprints πάνω στο σχέδιο και συνδέονται μέσω διαδρομών που μεταφέρουν την ισχύ και το σήμα μεταξύ των στοιχείων. Σημαντική είναι η υλοποίηση του βηματικού εξασθενητή καθώς παραθέτονται αρκετά σχήματα της τελικής πλακέτας η οποία ελέγχεται μέσω δοκιμών αναφορικά με τις εξασθενήσεις που δημιουργεί. Τέλος, αναφέρονται προτάσεις για τυχόν μελλοντική βελτίωση του κυκλώματος αλλά και της χρήσης του σε συνδιασμό με έναν πομποδέκτη (USRP).

Λέξεις Κλειδιά

Βηματικός εξασθενητής, KiCad, Microcontroller, Oled display, κώδικας προγραμματισμού

Abstract

At first, this thesis makes reference to the concept of the attenuator and the need for its invention as well as to its historical evolution. Some types of attenuators are listed based on the technology or circuits they use and the various resistor arrangements in an attenuator circuit connected in series with the input-output loads are discussed. Then, the desired values of the elements are calculated through the equations characterizing the circuit of each attenuator.

Next, the thesis presents several simulations performed on KiCad, verifying the desired attenuations both through DC and transient analysis. Various combinations of resistors were tested to achieve the desired 5, 10 and 20 dB attenuations of the final circuit. Then, reference is made to the electronic components used to implement the attenuator by further analysing its fundamental parts, such as the microcontrollers and the Oled screen. The final circuit diagram is then presented, via KiCad's Eeschema, focusing on the circuitry of the individual components and how attenuation is thereby achieved.

The next section focuses on how to connect the two microcontrollers, via the Arduino UNO, to the PC so as to program them. More specifically, the two microcontrollers will be loaded with different software, as performing different tasks, analysed and commented on at each step. Next, the implementation of the circuit on a breadboard using only the basic electronic components is presented, in order to verify the programming of the microcontrollers through the results showing up on the Oled screen and the respective LEDs.

The next step requires the design and printing of the PCB board so as to place the attenuator components on it. Therefore an analysis is initially made in the selection or design of the component footprints in order to create the required netlist. Then, by applying the netlist to the application, the footprints are placed on the drawing and connected via conductive paths. The implementation of the step attenuator is important as several shapes of the final board are listed and the respective

attenuations are verified through a series of tests. Finally, suggestions for future circuit improvements and its combined usage with a transceiver (USRP) are made.

Keywords

Step attenuator, KiCad, Microcontroller, Oled display, software code

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract.....	6
Κεφάλαιο 1.....	11
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	11
1.2 Είδη εξασθενητών.....	12
1.3 Προσέγγιση ανάλησης κυκλώματος.....	17
1.4 Είδη κυκλωμάτων εξασθενητών.....	19
1.5 Προσδιορισμός των τιμών των αντιστάσεων.....	20
1.6 Συσχετισμός των αντιστάσεων.....	22
Κεφάλαιο 2.....	24
2.1 Προσομοίωση εξασθενητή (DC ανάλυση).....	24
2.2 Προσομοίωση εξασθενητή (Transient ανάλυση).....	28
2.3 Στοιχεία τελικού εξασθενητή.....	31
2.3.1 Microcontroller.....	31
2.3.2 Oled οθόνη.....	32
2.3.3 Δευτερεύοντα στοιχεία εξασθενητή.....	33
2.4 Σχεδίαση τελικού εξασθενητή (KiCad).....	36
Κεφάλαιο 3.....	39
3.1 Προγραμματισμός των microcontrollers.....	39
3.2 Κώδικας για Oled οθόνη.....	40
3.3 Κώδικας για relays.....	45
3.4 Υλοποίηση κυκλώματος (breadboard).....	49

Κεφάλαιο 4.....	52
4.1 Επιλογή και δημιουργία των footprints.....	52
4.2 Σχεδιασμός της πλακέτας PCB.....	55
4.3 Υλοποίηση του βηματικού εξασθενητή.....	60
4.4 Δοκιμή του εξασθενητή.....	62
4.5 Βελτιστοποίηση του κυκλώματος.....	65
4.6 Εφαρμογές του εξασθενητή.....	67
Βιβλιογραφία.....	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εξάρτηση αντιστάσεων με εξασθένηση.....	1
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά του ATtiny85 microcontroller.....	1
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά της Oled οθόνης.....	1
Πίνακας 4: Συνδεσμολογία των pins Arduino Uno – ATtiny85.....	1
Πίνακας 5: Παράμετροι τύπωσης της πλακέτας.....	1

Κεφάλαιο 1

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η σύγχρονη εποχή για τον έλεγχο των ραδιοσυχνοτήτων και μικροκυμάτων μέσω των ημιαγωγών ξεκίνησε πριν από περισσότερο από μισό αιώνα, αμέσως μετά την εφεύρεση του τρανζίστορ. Με την εμφάνιση πιο αξιόπιστων συσκευών ημιαγωγών τη δεκαετία του 1950, η θεωρητική και εφαρμοσμένη έρευνα για εφαρμογές ελέγχου ραδιοσυχνοτήτων και μικροκυμάτων αυξήθηκε δραματικά. Έκτοτε, τα σχέδια κυκλωμάτων έχουν επεκταθεί σε εφαρμογές ευρείας εμβέλειας σε επικοινωνιακά συστήματα για προσωπική χρήση είτε σε έργα υποδομής, ακόμη και σε ιατρικές εφαρμογές, όπως σε σαρωτές μαγνητικών τομογραφιών. Κάποιες τοπολογίες κυκλωμάτων ελέγχου είναι οι διακόπτες συσκευών μονού και πολλαπλού ελέγχου, οι εξασθενητές και οι μετατοπιστές φάσης.

Εξασθενητής ονομάζεται ένα κύκλωμα που εισάγει μια σκόπιμη απώλεια στη μετάδοση ενός σήματος από το ένα σημείο στο άλλο, ανεξάρτητα από τη συχνότητα. Γενικά, είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για σκοπούς εξασθένησης και διατηρεί μια σταθερή σύνθετη αντίσταση και στα δύο άκρα εισόδου και εξόδου, ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται. Ο λόγος της ισχύος εισόδου προς την ισχύ εξόδου εκφράζεται με λογαριθμικούς όρους όπως ντεσιμπέλ (dB).

Οι εξασθενητές μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν ίσες ή άνισες σύνθετες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου ώστε να παρέχουν διαφορετικούς βαθμούς εξασθένησης. Μπορούν να είναι σταθερές ή μεταβλητές, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Οι εξασθενητές έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με συγκεκριμένες σύνθετες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου. Εάν δουλεύεται μεταξύ πηγών και φορτίων με διαφορετικές τιμές σύνθετων αντιστάσεων από τις τιμές των αντιστάσεων του εξασθενητή, η απώλεια μετάδοσης αυξάνεται. Επιπλέον, ο σχεδιασμός ενός εξασθενητή βασίζεται στις αντιστάσεις πηγών και φορτίων, επομένως ένα επαγωγικό ή χωρητικό φορτίο θα αλλάξει την απόκριση συχνότητας.

1.2 Είδη εξασθενητών

Ο εξασθενητής είναι παθητικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποσότητας ισχύος που μεταφέρεται από το ένα σημείο στο άλλο σε μια γραμμή μεταφοράς. Έτσι, υπάρχουν δύο επιλογές. Όποια ισχύς έρχεται να εξασθενεί ή να αντανακλάται είτε να καταναλώνεται σε ορισμένα στοιχεία διασποράς. Για παράδειγμα σε μια πηγή σήματος που δίνει τάση 20 Volt και χρειάζεται να δούμε αυτό το σήμα εκείνη τη στιγμή θα χρειαστεί να συνδέσουμε ένα παλμογράφο, ο οποίος δεν μπορούν να χειριστεί σήμα 20 Volt. Επομένως, πρέπει να μεσολαβεί ένας εξασθενητή ώστε το σήμα να φτάσει στα 5 Volt, ανάλογα με τις προδιαγραφές του παλμογράφου.

Μερικά από τα είδη που διακρίνονται οι εξασθενητές είναι οι:

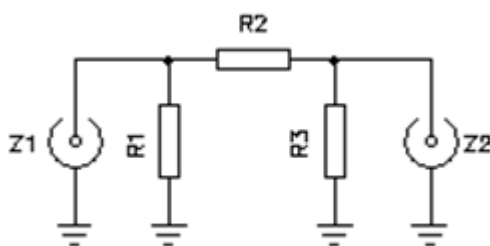
- Σταθεροί εξασθενητές (Fixed attenuators)
- Μεταβλητοί εξασθενητές (Variable attenuators)
- Βηματικοί εξασθενητές (Step Attenuators)

καθώς και οι:

- Εξασθενητές ομοαξονικής γραμμής (Coaxial line attenuators)
- Κυματοδηγοί εξασθενητές (Waveguide attenuators)
- Εξασθενητές οπτικών ινών (Optical fiber attenuators)

Σταθεροί εξασθενητές:

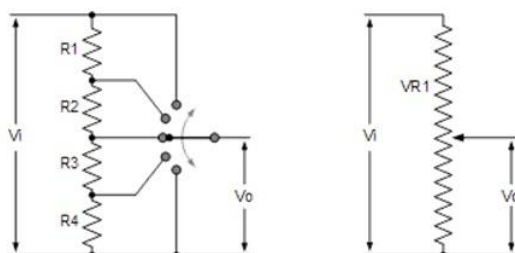
Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, οι σταθεροί εξασθενητές είναι τύποι εξασθενητών που χρησιμοποιούνται για σταθερά επίπεδα εξασθένησης. Αυτοί οι τύποι εξασθενητών χρησιμοποιούνται κυρίως τοποθετώντας τους πάνω σε επιφάνειες ή συνδέοντάς τους με καλώδια. Διαφορετικά επίπεδα εξασθένησης επιτυγχάνονται όταν αυτοί οι εξασθενητές συνδέονται σε μια σειρά.



Σχήμα 1.2.1 – Κύκλωμα σταθερού εξασθενητή

Μεταβλητοί εξασθενητές:

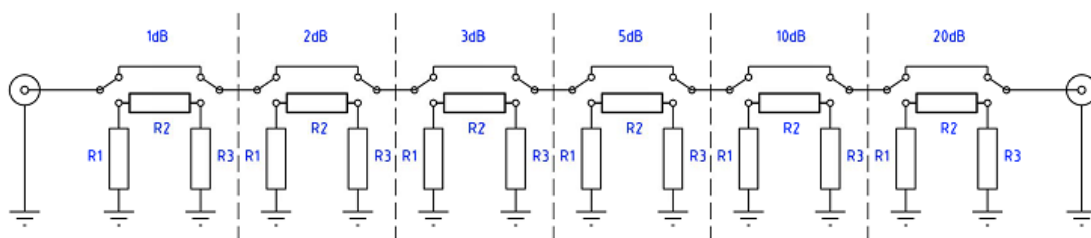
Αυτοί οι τύποι εξασθενητών είναι το ακριβώς αντίθετο των σταθερών εξασθενητών καθώς χρησιμοποιούνται για μεταβλητά επίπεδα εξασθένησης. Οι μεταβλητοί εξασθενητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή διαφορετικών επιπέδων εξασθένησης, δηλαδή υπάρχει η επιλογή ρύθμισης της απαιτούμενου εξασθένησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα κύκλωμα διαιρέτη τάσης του οποίου το ποσό της εξασθένησης καθορίζεται από την αναλογία τάσης εξόδου/εισόδου.



Σχήμα 1.2.2 – Κύκλωμα μεταβλητού εξασθενητή

Βηματικοί εξασθενητές:

Οι βηματικοί εξασθενητές είναι σχεδόν παρόμοιοι με τους σταθερούς εξασθενητές, αλλά με ένα επιπλέον πλεονέκτημα της δυνατότητας παροχής διαφορετικών σταθερών επιπέδων εξασθένησης σε προ-βαθμονομημένα βήματα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση microchips, ομοαξονικών γραμμών και κυματοδηγών.



Σχήμα 1.2.3 – Κύκλωμα βηματικού εξασθενητή

Εξασθενητές ομοαξονικής γραμμής:

Στον εξασθενητή ομοαξονικής γραμμής τοποθετείται ένα υλικό με απώλειες σε μορφή λεπτού φιλμ στο κέντρο του αγωγού. Έτσι, η όποια ισχύς ρέει στην ομοαξονική γραμμή, μέρος της ενέργειάς της απορροφάται από αυτό το υλικό με τις απώλειες. Αυτό παρέχει σταθερή εξασθένηση στο εισερχόμενο σήμα. Η εξασθένηση δεν είναι τίποτα άλλο παρά απώλεια και καθώς είναι σταθερή, θα παρέχετε σταθερό ποσό εξασθένησης.



Σχήμα 1.2.4 – Εξασθενητής ομοαξονικής γραμμής

Κοιματοδηγοί εξασθενητές:

Σε έναν κοιματοδηγό σταθερού εξασθενητή χρησιμοποιείται μια λεπτή διηλεκτρική λωρίδα επικαλυμμένη με ένα φιλμ με αντίσταση η οποία τοποθετείται στο κέντρο του κοιματοδηγού. Το φιλμ τοποθετείται στον κοιματοδηγό παράλληλα με το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο E . Η ποσότητα της εξασθένησης που παρέχεται από τον σταθερό εξασθενητή εξαρτάται από την αντοχή του διηλεκτρικού υλικού, τη θέση της λωρίδας, το υλικό που χρησιμοποιείται για την επικάλυψή της καθώς και από την συχνότητα λειτουργίας εντός του κοιματοδηγού.

Σε έναν κοιματοδηγό μεταβλητού εξασθενητή χρησιμοποιείται ένα πτερύγιο με αντίσταση το οποίο μετακινείται από τη μία πλευρά του τοιχώματος του κοιματοδηγού προς το κέντρο του, στρέφοντας μία βίδα, όπου το πεδίο E θεωρείται μέγιστο. Αυτό το φιλμ έχει τέτοιο σχήμα ώστε να δίνει γραμμική μεταβολή εξασθένησης.



Σχήμα 1.2.5 – Κοιματοδηγός σταθερού εξασθενητή



Σχήμα 1.2.6 – Κοιματοδηγός μεταβλητού εξασθενητή

Εξασθενητές οπτικών ινών:

Οι εξασθενητές οπτικών ινών, ονομάζονται επίσης οπτικοί εξασθενητές, είναι παθητικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μείωση του επιπέδου ισχύος ενός οπτικού σήματος. Δεδομένου ότι το πολύ φως μπορεί να κορέσει τον δέκτη οπτικών ινών, γίνεται χρήση των οπτικών εξασθενητών για να μειωθεί η ισχύς του φωτός και να επιτευχθεί η καλύτερη απόδοση του συστήματος.

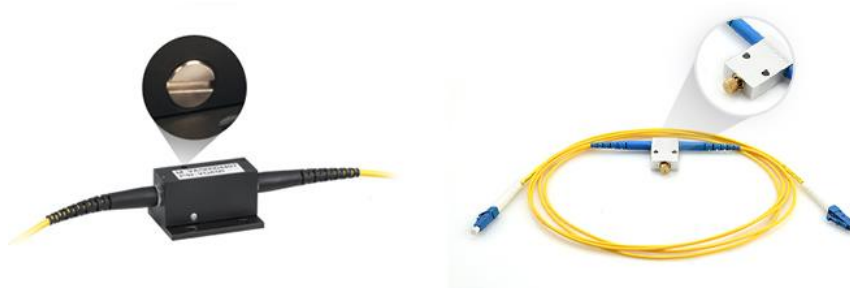
Οι οπτικοί εξασθενητές επιτυγχάνουν την επιθυμητή εξασθένηση στους συνδέσμους των οπτικών ινών κάνοντας χρήση τριών διαφορετικών αρχών, οι οποίες είναι:

- i. Η αρχή απώλειας κενού
- ii. Η αρχή απορρόφησης
- iii. Η αρχή ανάκλασης

Οι εξασθενητές οπτικών ινών μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους όπως με βάση τον τύπο σύνδεσης, τον τύπο καλωδίου κ.λπ. Γενικά, είναι ευρέως αποδεκτό ότι ομαδοποιούνται ως σταθεροί οπτικοί εξασθενητές (FOA) και μεταβλητοί οπτικοί εξασθενητές (VOA). Λαμβάνοντας υπόψη τους τύπους των καλωδίων, μπορούν επίσης να χωριστούν σε εξασθενητές μονής λειτουργίας και πολλαπλών λειτουργιών.



Σχήμα 1.2.7 – Σταθερός οπτικός εξασθενητής

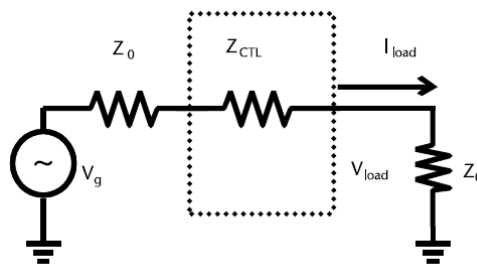


Σχήμα 1.2.8 – Μεταβλητοί οπτικοί εξασθενητές

Υπάρχουν εξασθενητές ραδιοσυχνοτήτων που έχουν ως κύρια χαρακτηριστικά την ομοαξονική δομή με ακρίβεια, το χαμηλό SWR και την επαναληψιμότητα. Υπάρχουν εξασθενητές ήχου, ονομάζονται επίσης line-level εξασθενητές, που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της έντασης εξόδου του ηχείου.

1.3 Προσέγγιση ανάλυσης κυκλώματος

Η προσέγγιση ανάλυσης κυκλώματος σε αυτή την υποενότητα είναι μια μελέτη των χαρακτηριστικών τάσης και ρεύματος του στοιχείου ελέγχου, σε συνδέσεις σε σειρά και με διακλαδώσεις.



Σχήμα 1.3.1 – Στοιχείο ελέγχου σε σειρά

Το Σχήμα 1.3.1 δείχνει ένα συνδεδεμένο σε σειρά στοιχείο ελέγχου με ένα φορτίο Z_0 και με τη γεννήτρια προσαρμοσμένη στο φορτίο.

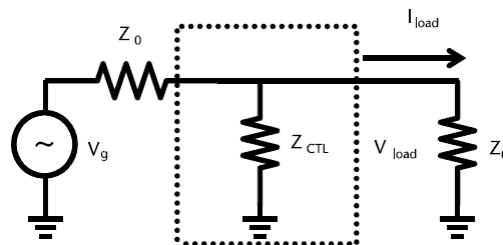
Αν υποθέσουμε ότι μια σύνθετη αντίσταση Z_{CTL} είναι συνδεδεμένη σε σειρά, τότε η τάση και το ρεύμα στο φορτίο μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την παραδοσιακή ανάλυση κυκλώματος ως:

$$V_{load} = V_g \frac{Z_0}{2Z_0 + Z_{CTL}} \quad I_{load} = V_g \frac{1}{2Z_0 + Z_{CTL}} = \frac{V_{load}}{Z_0}$$

Η σύνθετη αντίσταση ελέγχου Z_{CTL} , του Σχήματος 1.3.1, δημιουργεί μια αναντιστοιχία αντίστασης μεταξύ της πηγής και του φορτίου, οπότε ο σχετικός συντελεστής ανάκλασης όπως φαίνεται από την πηγή ορίζεται ως:

$$\Gamma = \frac{(Z_{CTL} + Z_0) - Z_0}{(Z_{CTL} + Z_0) + Z_0} = \frac{Z_{CTL}}{Z_{CTL} + 2Z_0}$$

Το Σχήμα 1.3.2 δείχνει ένα συνδεδεμένο με διακλάδωση στοιχείο ελέγχου με ένα φορτίο Z_0 και με τη γεννήτρια προσαρμοσμένη στο φορτίο.



Σχήμα 1.3.2 – Στοιχείο ελέγχου με διακλάδωση

Για το στοιχείο ελέγχου που συνδέεται με διακλάδωση, η τάση και το ρεύμα φορτίου μπορούν να προκύψουν με παρόμοιο τρόπο, δίνοντας τις ακόλουθες εκφράσεις:

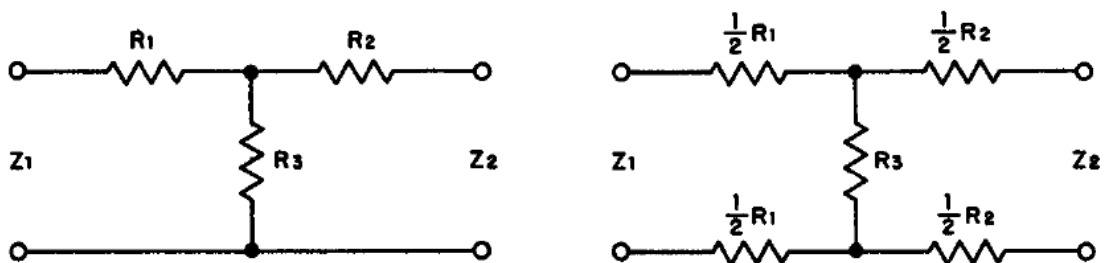
$$V_{load} = V_g \frac{Z_{CTL}}{2Z_{CTL} + Z_0} \quad I_{load} = \frac{V_g}{Z_0} \frac{Z_{CTL}}{2Z_{CTL} + Z_0} = \frac{V_{load}}{Z_0}$$

Μια παρόμοια προσέγγιση με αυτή που χρησιμοποιείται στη σύνδεση σε σειρά του στοιχείου ελεγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση στην περίπτωση που η σύνδεση γίνεται με διακλάδωση. Η σύνθετη αντίσταση ελέγχου Z_{CTL} , του Σχήματος 1.3.2, δημιουργεί μια αναντιστοιχία σύνθετης αντίστασης μεταξύ της πηγής και του φορτίου και ο σχετικός συντελεστής ανάκλασης όπως φαίνεται από την πηγή μπορεί να γραφτεί ως:

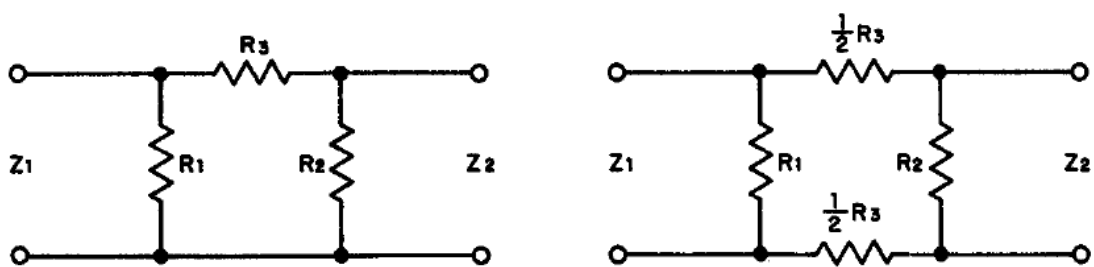
$$\Gamma = \frac{-Z_0}{2Z_{CTL} + Z_0}$$

1.4 Είδη κυκλωμάτων εξασθενητών

Οι εξασθενητές σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους διάταξης κυκλώματος, όπως διαμορφώσεις Pi, T, L, H και O. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι εξασθενητών που ταξινομούνται με βάση τα κυκλώματά τους, π.χ.



Σχήμα 1.4.1 – Unbalanced-T και Balanced-T εξασθενητές



Σχήμα 1.4.2 – Unbalanced-Pi και Balanced-Pi εξασθενητές

Οι σταθεροί εξασθενητές συνήθως έχουν τη μορφή T ή Pi και μπορεί να είναι μη ισορροπημένοι (unbalanced) ή ισορροπημένοι (balanced). Κυκλώματα εξασθενητών διαφορετικού σχήματος φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

Στην ανάπτυξη που προηγήθηκε, το Z_1 λαμβάνεται ως η μεγαλύτερη αντίσταση ενώ το Z_2 είναι η μικρότερη, οι οποίες μπορούν να είναι οι σύνθετες αντιστάσεις εισόδου ή εξόδου του δικτύου.

Η αναλογία απώλειας ενός εξασθενητή συνήθως εξαρτάται από την ισχύ και ορίζεται ως:

$$K = \frac{P_1}{P_0}$$

όπου K είναι ο λόγος απώλειας, P_1 είναι η ισχύς εισόδου προς τον εξασθενητή και P_0 είναι η ισχύς εξόδου, δηλαδή αυτή που εξέρχεται από το δίκτυο.

Αν υποθέσουμε ότι οι σύνθετες αντιστάσεις εισόδου και εξόδου δεν πρέπει να είναι ίσες, τότε η αναλογία Z_1 προς Z_2 θα υπερβεί τη μονάδα αφού η Z_1 θεωρείται η μεγαλύτερη από τις δύο σύνθετες αντιστάσεις.

Για κάθε λόγο Z_1/Z_2 υπάρχει ένα ελάχιστο K που θα πρέπει να έχει ο εξασθενητής. Αυτό σημαίνει ότι κατά το σχεδιασμό ενός εξασθενητή θα πρέπει να προβλεφθεί ένας καθορισμένος λόγος ελάχιστων απωλειών, οι οποίοι μπορούν να προσδιοριστούν από την εξίσωση:

$$K_{min} = \frac{2Z_1}{Z_2} - 1 + 2 \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2} \left(\frac{Z_1}{Z_2} - 1 \right)}$$

1.5 Προσδιορισμός των τιμών των αντιστάσεων

Ακολουθεί μια ανάρτηση των εξισώσεων που καθορίζουν τις τιμές των αντιστάσεων οι οποίες απαιτούνται για τον σχεδιασμό σταθερών εξασθενητών,

όπως του balanced-T και του unbalanced-T, καθώς και του balanced-Pi και του unbalanced-Pi.

Για τον T εξασθενητή έχουμε:

$$R_1 = \frac{Z_1(K + 1) - 2\sqrt{KZ_1Z_2}}{K - 1}$$

$$R_2 = \frac{Z_2(K + 1) - 2\sqrt{KZ_1Z_2}}{K - 1}$$

$$R_3 = \frac{2\sqrt{KZ_1Z_2}}{K - 1}$$

Εάν $Z_1 = Z_2$ οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να αναχθούν στις ακόλουθες μορφές:

$$R_1 = R_2 = Z_1 \left(\frac{\sqrt{K} - 1}{\sqrt{K} + 1} \right)$$

$$R_3 = \frac{2Z_1\sqrt{K}}{K - 1}$$

Αντίστοιχα οι εξισώσεις του Pi εξασθενητή είναι οι εξής:

$$R_1 = \frac{(K - 1)Z_1\sqrt{Z_2}}{(K + 1)\sqrt{Z_2} - 2\sqrt{KZ_1}}$$

$$R_2 = \frac{(K - 1)Z_2\sqrt{Z_1}}{(K + 1)\sqrt{Z_1} - 2\sqrt{KZ_2}}$$

$$R_3 = \frac{K - 1}{2} \sqrt{\frac{Z_1Z_2}{K}}$$

Επίσης, οι προηγούμενες εξισώσεις απλουστεύονται εάν $Z_1 = Z_2$ όπως φαίνεται παρακάτω:

$$R_1 = R_2 = Z_1 \left(\frac{\sqrt{K} + 1}{\sqrt{K} - 1} \right)$$

$$R_3 = \frac{Z_1(K - 1)}{2\sqrt{K}}$$

1.6 Συσχετισμός των αντιστάσεων

Για διάφορα επίπεδα εξασθένησης κάποιες άλλες χρήσιμες εξισώσεις είναι οι εξής:

$$K = \frac{V_i}{V_0} = 10^{\text{dB}/20}$$

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_0} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_i}{V_0} \right)$$

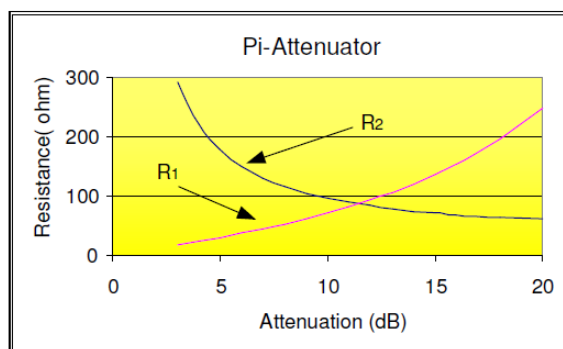
και πιο συγκεκριμένα για τον P_i εξασθενητή που αναφέρθηκε παραπάνω ισχύουν και οι ακόλουθες σχέσεις:

$$R_3 = Z \left(\frac{K^2 - 1}{2K} \right)$$

$$R_1 = R_2 = Z \left(\frac{K + 1}{K - 1} \right)$$

Όπου $Z = Z_1 = Z_2$

Το Σχήμα 1.6.1 δείχνει την τιμή μιας αντίστασης σε διακλάδωση R_1 και μιας αντίστασης σε σειρά $R_2 = R_3$ ως συνάρτηση της απαιτούμενης εξασθένησης.



Σχήμα 1.6.1 – Εξάρτηση αντιστάσεων με εξασθένιση

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτονται τις τιμές των αντιστάσεων για τον Pi εξασθενητή που συνδέεται με πηγή και φορτίο αντίστασης 50 Ω αντίστοιχα.

Resistors for Pi-Attenuator			
Attenuation			
dB	$K = V_i/V_0$	R_1	$R_2 = R_3$
1.0	1.12	5.77	869.55
2.0	1.26	11.61	436.21
3.0	1.41	17.61	292.40
4.0	1.58	23.85	220.97
6.0	2.00	37.35	150.48
10.0	3.16	71.15	96.25
20.0	10.00	247.50	61.11

Πίνακας 1 – Εξάρτηση αντιστάσεων με εξασθένιση

Όπου, **dB** = εξασθένιση σε decibels

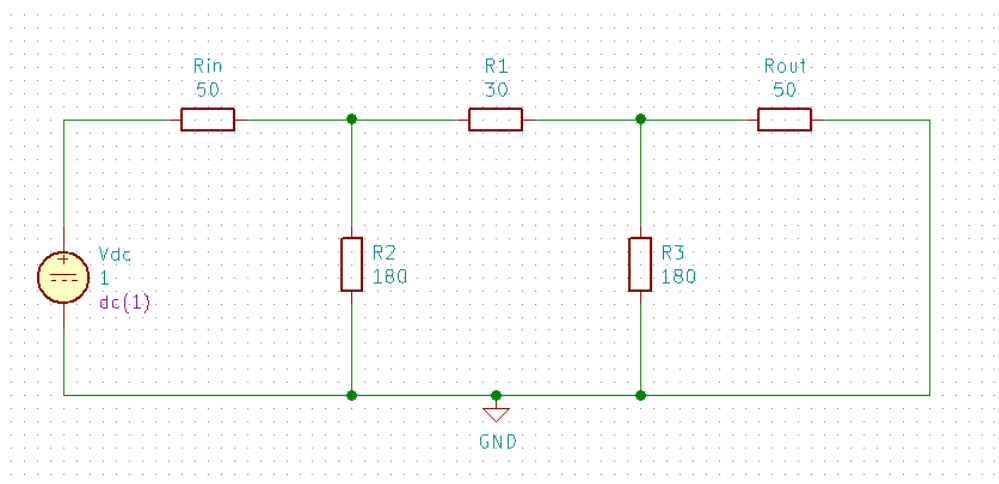
και $K > 1$

Κεφάλαιο 2

2.1 Προσομοίωση εξασθενητή (DC ανάλυση)

Επιλέγοντας την συνδεσμολογία των αντιστάσεων ενός Pi εξασθενητή, γίνεται προσομοίωση του κυκλώματος κάνοντας χρήση του προγράμματος KiCad (5.0.2). Αρχικά, γίνεται η σχεδίαση του κυκλώματος, μέσω του Eeschema του KiCad, χρησιμοποιώντας μία πηγή σταθερής τάσης DC, δύο φορτία R_{in} και R_{out} αντίστοιχα και τον Pi εξασθενητή. Τα δύο φορτία, R_{in} και R_{out} έχουν τιμές 50 Ω το καθένα και αντιστοιχούν στα δύο στοιχεία που μεσολαβεί ο εξασθενητής, όπως είναι ένας πομποδέκτης και μια κεραία αποστολής και λήψης.

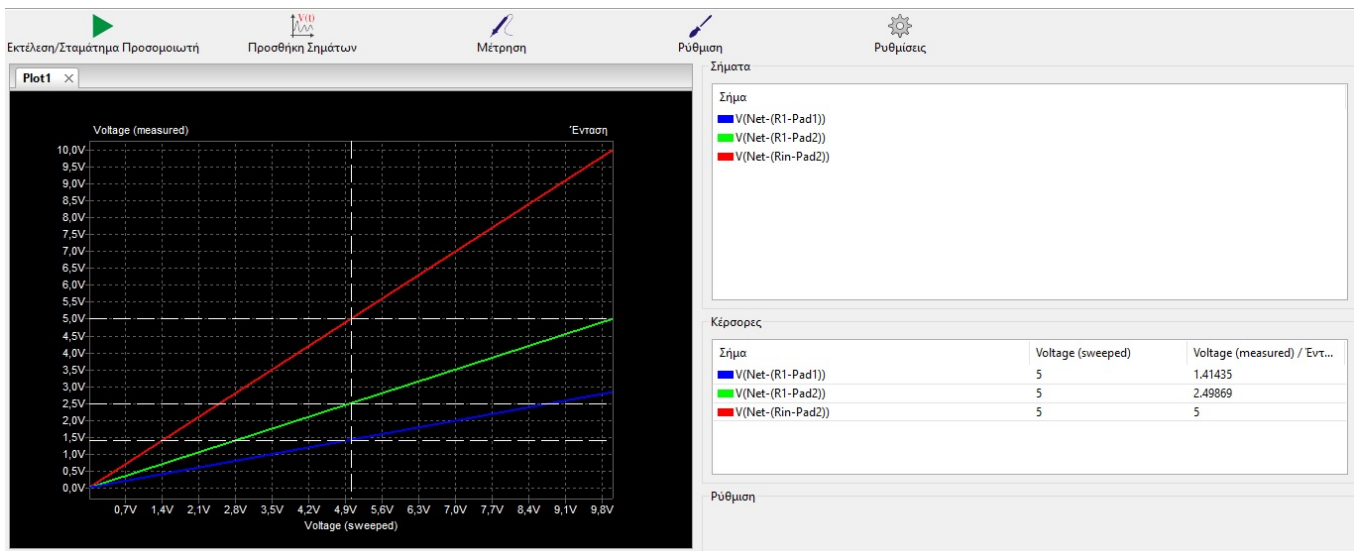
Οι τιμές των αντιστάσεων στο πρώτο κύκλωμα Pi εξασθενητή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.1, έχουν επιλεγθεί ώστε να γίνει εξασθένιση 5 dB.



Σχήμα 2.1.1 – Κύκλωμα εξασθενητή 5 dB

Έπειτα, για να ελέγξουμε την ορθότητα του κυκλώματος ως προς την επιθυμητή εξασθένηση, γίνεται DC ανάλυση με χρήση του Προσομοιωτή Spice του KiCad. Πιο συγκεκριμένα μετράμε τις τιμές των τάσεων στα απαιτούμενα σημεία πάνω στα καλώδια του κυκλώματος και τις εφαρμόζουμε στις αντίστοιχες εξισώσεις.

Στο Σχήμα 2.1.2 απεικονίζονται οι τάσεις στην πηγή V_{DC} (κόκκινο), στην είσοδο του εξασθενητή (πράσινο) και στην έξοδο του εξασθενητή (μπλε). Έπειτα, επιλέγοντας την ίδια τεταγμένη και στις τρεις ευθείες, υπολογίζω την κλίση των ευθειών ώστε να βρω τις τιμές των τάσεων, που αντιστοιχούν στα προαναφερθέντα σημεία του κυκλώματος.



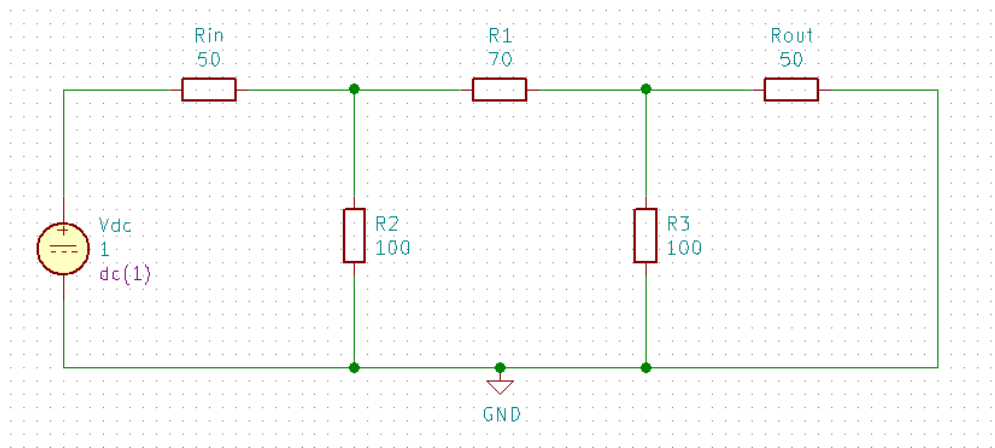
Σχήμα 2.1.2 – Προσομοιωτής εξασθενητή 5 dB

Τέλος, εφαρμόζουμε τις τιμές στην επόμενη εξίσωση και υπολογίζουμε την εξασθένηση σε dB:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_o} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_i}{V_o} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{DC} - V_{in}}{V_{out} - V_{GND}} \right) \Rightarrow$$

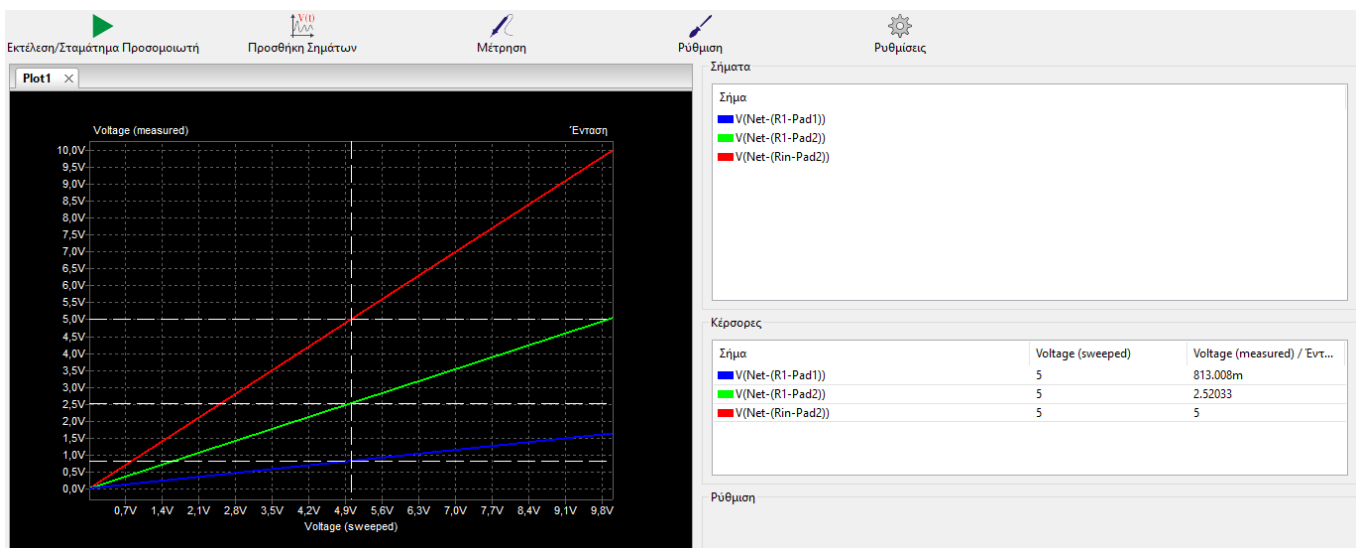
$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{5V - 2.49V}{1.41V - 0} \right) = 5dB$$

Στο Σχήμα 2.1.1, απεικονίζεται το δεύτερο κύκλωμα ενός Pi εξασθενητή, με καινούργιες τιμές αντιστάσεων ώστε να προκύπτει εξασθένιση 10 dB.



Σχήμα 2.1.3 – Κύκλωμα εξασθενητή 10 dB

Γίνεται η ίδια προσομοίωση στον Προσομοιωτή Spice, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.4, και μετράμε πάλι τις τάσεις στα ίδια σημεία του κυκλώματος. Παρατηρούμε ότι η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στην έξοδο του εξασθενητή (μπλε), μικρυνε. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, δηλαδή της πτώσης τάσης στην έξοδο του εξασθενητή, λόγω της μεγαλύτερης εξασθένισης που επιλέχθηκε.

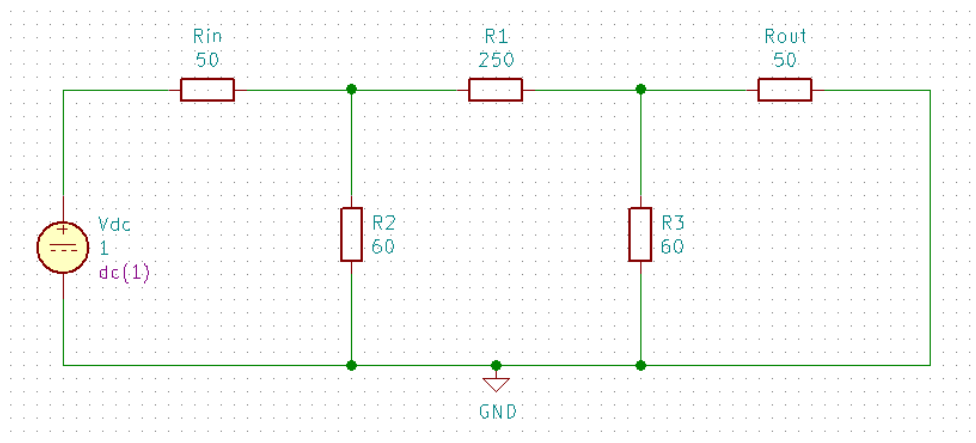


Σχήμα 2.1.4 – Προσομοιωτής εξασθενητή 10 dB

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία ελέγχου της ορθότητας του κυκλώματος ως προς την εξασθένιση, με τον πρώτο εξασθενητή που αναλύσαμε. Έτσι, εφαρμόζοντας τις τιμές των τάσεων στις αντίστοιχες εξισώσεις ισχύει:

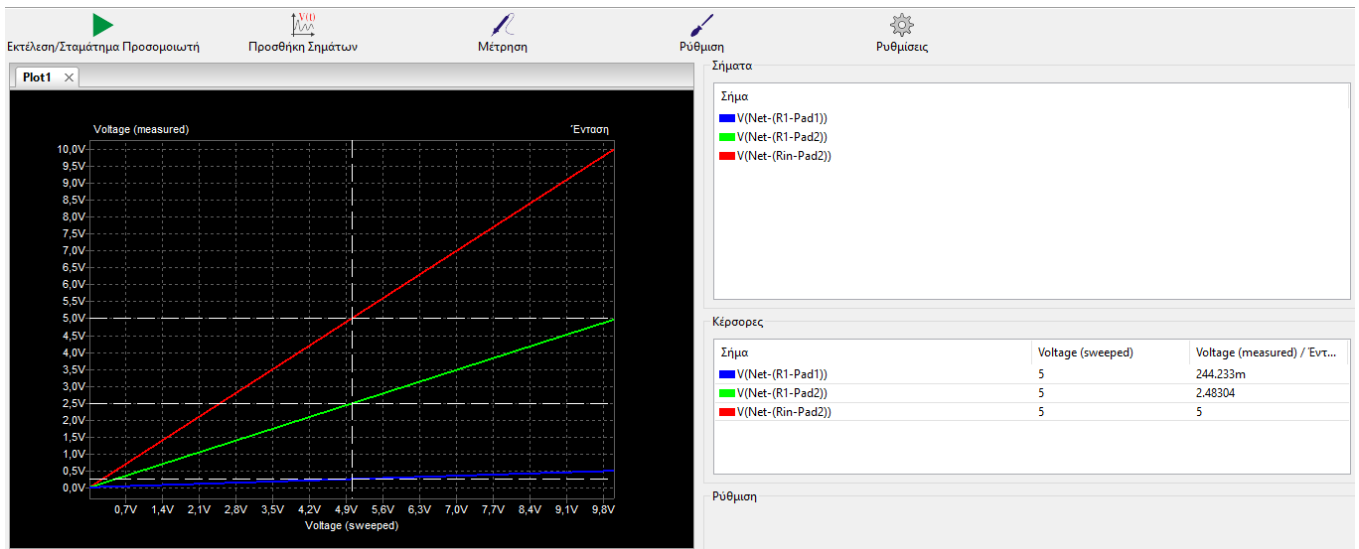
$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{DC} - V_{in}}{V_{out} - V_{GND}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{5V - 2.52V}{0.813V - 0} \right) = 9.7dB$$

Στο Σχήμα 2.1.5, απεικονίζεται το τρίτο και τελευταίο κύκλωμα ενός Pi εξασθενητή που θα χρησιμοποιηθεί στο τελικό κύκλωμα του εξασθενητή. Σε αυτό το κύκλωμα έχουν επιλεγθεί αντιστάσεις ώστε να προκύπτει εξασθένιση 20 dB.



Σχήμα 2.1.5 – Κύκλωμα εξασθενητή 20 dB

Όμοια, το Σχήμα 2.1.6 δείχνει την προσομοίωση του τρίτου κυκλώματος κατά την οποία μέσω της DC ανάλυσης θα γίνει η μέτρηση των τάσεων στα απαιτούμενα σημεία τους κυκλώματος. Παρατηρώ, πως όπως και πριν, η κλίση της ευθείας που αντιστοιχεί στην έξοδο του εξασθενητή (μπλε) έχει μικρύνει κι άλλο, λόγω της μεγαλύτερης πτώσης τάσης στο συγκεκριμένο σημείο.



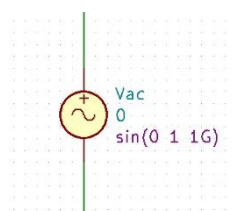
Σχήμα 2.1.6 – Προσομοιωτής εξασθενητή 20 dB

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία ελέγχου της εξασθένησης του κυκλώματος, εφαρμόζουμε τις τιμές των τάσεων στις αντίστοιχες εξισώσεις και έχουμε:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{DC} - V_{in}}{V_{out} - V_{GND}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{5V - 2.48V}{0.244V - 0} \right) = 20.2dB$$

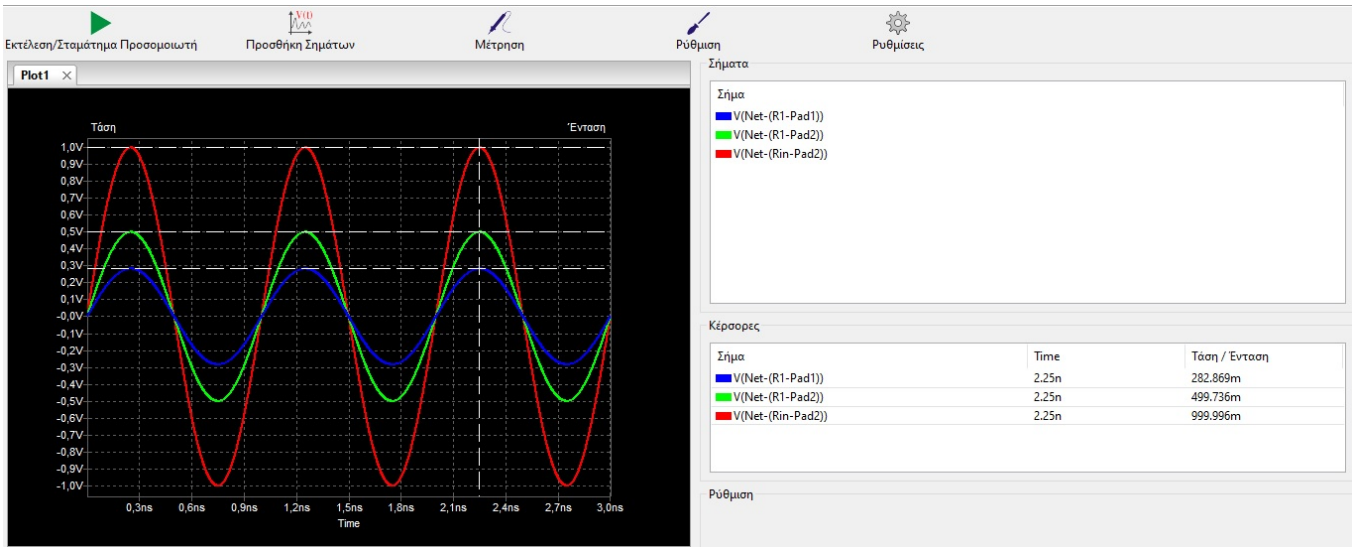
2.2 Προσομοίωση εξασθενητή (Transient ανάλυση)

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι στα ίδια αποτελέσματα θα καταλήγαμε αν η πηγή που χρησιμοποιούμε στο κύκλωμα παρείχε εναλλασσόμενη τάση AC. Στο Σχήμα 2.2.1 φαίνεται αυτή η πηγή έχοντας ως χαρακτηριστικά της, πλάτος κύματος 1V και συχνότητα 1GHz .

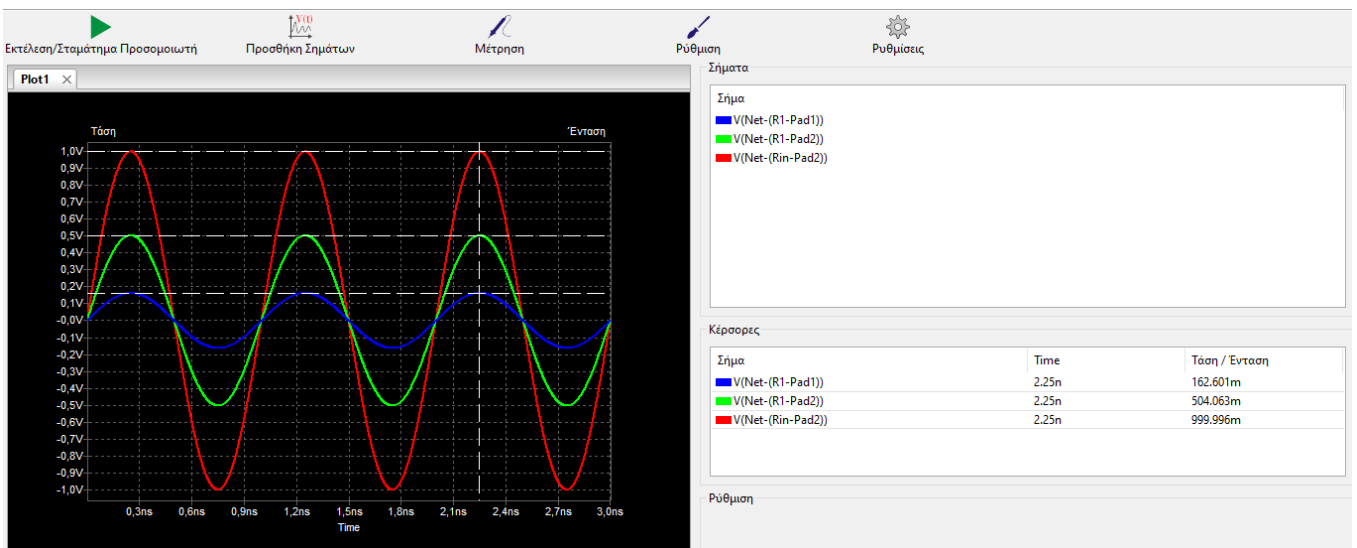


Σχήμα 2.2.1 – Πηγή εναλλασσόμενης τάσης

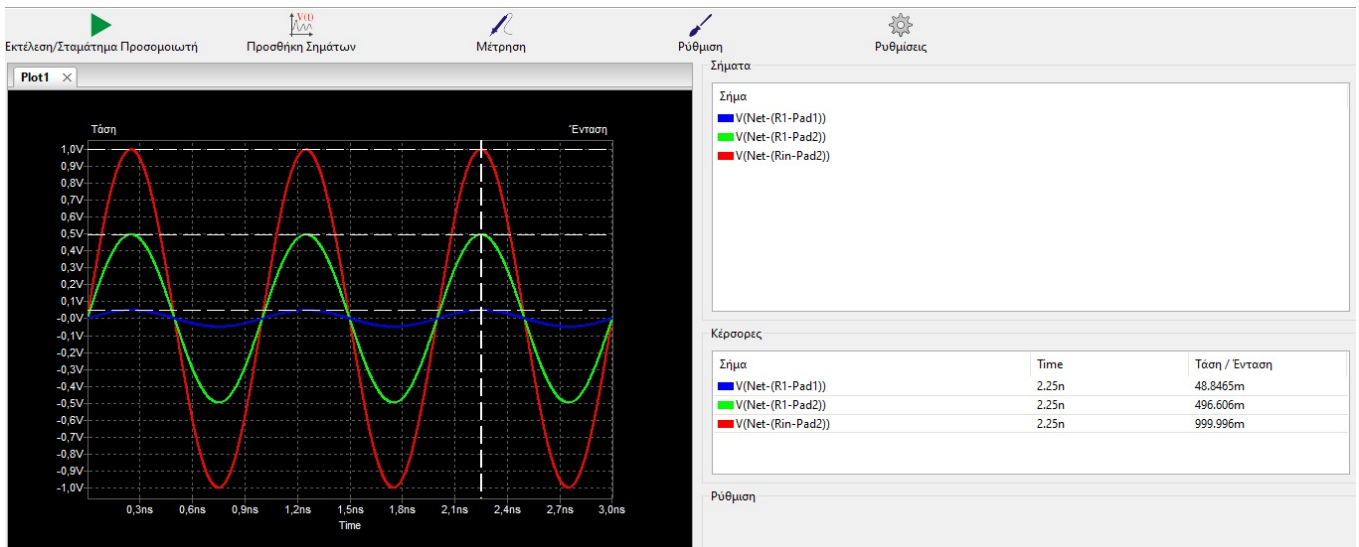
Η επιλογή μιας εναλλασσόμενης τάσης, για να υποστεί εξασθένηση στο τελικό κύκλωμα, γίνεται ώστε στην περίπτωση που θέλουμε να εξασθενήσουμε σήματα που αποστέλλονται ή λαμβάνονται από έναν πομποδέκτη. Στα σχήματα που ακολουθούν, γίνεται Transient ανάλυση των ίδιων τριών κυκλωμάτων με εξασθενήσεις 5dB, 10dB και 20dB αντίστοιχα.



Σχήμα 2.2.2 – Προσομοιωτής εξασθενητή 5 dB



Σχήμα 2.2.3 – Προσομοιωτής εξασθενητή 10 dB



Σχήμα 2.2.4 – Προσομοιωτής εξασθενητή 20 dB

Σε αυτή την περίπτωση της πηγής εναλλασσόμενης τάσης, τα τρία σημεία που θέλουμε να μετρήσουμε πάνω στο κύκλωμα απεικονίζονται ως ημίτονα και πιο συγκεκριμένα: η τάση στην πηγή V_{DC} (κόκκινο), η τάση στην είσοδο του εξασθενητή (πράσινο) και η τάση στην έξοδο του εξασθενητή (μπλε). Έπειτα, επιλέγω την ίδια τεταγμένη και στα τρία ημίτονα στο μέγιστο (pick) του κάθε ημιτόνου. Με αυτόν τον τρόπο μπορώ να βρω τις τιμές των τάσεων που χρειάζονται ώστε να τις αντικαταστήσω στις απαιτούμενες εξισώσεις.

Οπότε, για το πρώτο κύκλωμα ισχύει:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{DC} - V_{in}}{V_{out} - V_{GND}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{1V - 0.499V}{0.282V - 0} \right) = 5dB$$

για το δεύτερο κύκλωμα ισχύει:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{DC} - V_{in}}{V_{out} - V_{GND}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{1V - 0.504V}{0.162V - 0} \right) = 9.7dB$$

και για το τρίτο κύκλωμα ισχύει:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{DC} - V_{in}}{V_{out} - V_{GND}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{1V - 0.496V}{0.048V - 0} \right) = 20.4dB$$

2.3 Στοιχεία τελικού εξασθενητή

Η ιδέα είναι να σχεδιαστεί ένα κύκλωμα βηματικού εξασθενητή χρησιμοποιώντας απλούστερα κυκλώματα εξασθενητών, όπως αναλύθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα. Θα χρησιμοποιηθούν ποικίλα ηλεκτρονικά στοιχεία όπως microcontrollers, display, relays, push button και άλλα, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

2.3.1 Microcontroller

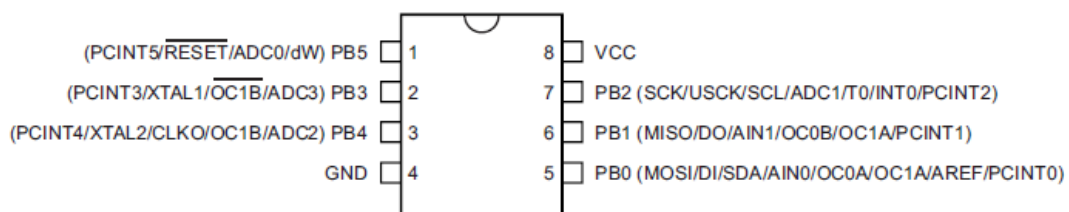
Το βασικό στοιχείο για την λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι οι δυο microcontrollers που θα χρησιμοποιηθούν, οι οποίοι θα προγραμματιστούν για να εκτελούν διαφορετική εργασία ο καθένας. Έχει επιλεγεί ο Atmel® ATtiny85 ο οποίος είναι ένας AVR® μικροελεγκτής CMOS 8-bit χαμηλής κατανάλωσης που βασίζεται στην βελτιωμένη αρχιτεκτονική RISC. Εκτελεί ισχυρές εντολές σε έναν μόνο κύκλο ρολογιού που πλησιάζουν το 1MIPS (Million Instructions per Second) ανά MHz επιτρέποντας στον σχεδιαστή να βελτιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την ταχύτητα επεξεργασίας. Στον Πίνακα 2 αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του.

Memories	<ul style="list-style-type: none">• 8Kbyte of in-system programmable program memory flash• 512 bytes in-system programmable EEPROM• 512 bytes internal SRAM
I/O and packages	<ul style="list-style-type: none">• Six programmable I/O lines• 8-pin SOIC• 20-pin QFN
Operating voltage	<ul style="list-style-type: none">• 2.7 – 5.5V for Atmel® ATtiny25/45/85
Speed grade	<ul style="list-style-type: none">• 0 to 8MHz at 2.7 to 5.5V, 0 – 16MHz at 4.5 to 5.5V
Temperature range	<ul style="list-style-type: none">• –40°C to +125°C

Low power consumption	<ul style="list-style-type: none"> • Active mode: 300μA at 1MHz, 2.7V • Power-down mode: 0.2μA at 2.7V
-----------------------	--

Πίνακας 2 – Χαρακτηριστικά του ATtiny85 microcontroller

Για την σωστή σύνδεση των υπόλοιπων στοιχείων του κυκλώματος πρέπει να είναι γνωστά τα pins του microcontroller, καθώς και οι λειτουργίες που έχει το κάθε ένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.1.



Σχήμα 2.3.1 – Microcontroller pins

2.3.2 Oled οθόνη

Μια Oled οθόνη θα αναγράφει την τιμή της εξασθένησης που επιλέγουμε κάθε φορά, καθώς και άλλες πληροφορίες. Η συγκεκριμένη Oled οθόνη αποτελείται από 128 στήλες και 64 γραμμές και χρησιμοποιεί ως πρόγραμμα οδήγησης, single-chip CMOS OLED/PLED, το SSD1306 με ελεγκτή για σύστημα απεικόνισης γραφικών με κουκκίδες από διόδους εκπομπής φωτός από οργανικό/πολυμερές υλικό. Το SSD1306 ενσωματώνει τον έλεγχο της αντίθεσης της οθόνης καθώς και τον έλεγχο της φωτεινότητας με 256 βήματα, που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειάς της.

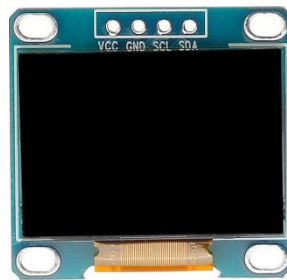
Τα δεδομένα/εντολές αποστέλλονται από το γενικό MCU (microcontroller unit) μέσω των Parallel Interface, I2C interface ή Serial Peripheral Interface που είναι συμβατά. Αξίζει να τονιστεί ότι για την ομαλή λειτουργία του ρολογιού του διαύλου επικοινωνίας I2C, η Oled οθόνη θα πρέπει να τροφοδοτείται με τάση περίπου 3,3V. Η υψηλότερη τιμή τάσης καθιστά την λειτουργία της προβληματική και δεν

εμφανίζεται καμία ένδειξη, ενώ η τροφοδοσία της με χαμηλότερη τιμή τάσης κάνει την Oled οθόνη πιο ευαίσθητη στην λήψη θορύβου με αποτέλεσμα να εμφανίζει λανθασμένες ενδείξεις. Στον Πίνακα 3 αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της.

Power supply	<ul style="list-style-type: none">• VDD = 1.65V to 3,3V for IC logic
Supply Current	<ul style="list-style-type: none">• 12,5uA ± 2uA
Oscillation frequency	<ul style="list-style-type: none">• 333kHz to 407kHz
Operating temperature	<ul style="list-style-type: none">• -40°C to 85°C

Πίνακας 3 – Χαρακτηριστικά της Oled οθόνης

Στο Σχήμα 2.3.2 φαίνονται αντίστοιχα με τον microcontroller τα pins της Oled οθόνης.



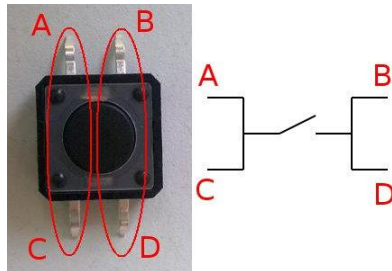
Σχήμα 2.3.2 – Oled οθόνη pins

2.3.3 Δευτερεύοντα στοιχεία εξασθενητή

Στο τελικό κύκλωμα του βηματικού εξασθενητή θα χρησιμοποιηθούν διάφορα ηλεκτρονικά στοιχεία όπως push button switch, USB female, βύσματα SMA, relays, αντιστάσεις και βάσεις. Τα παραπάνω στοιχεία αναλύονται στη συνέχεια.

Push button switch

Το ακόλουθο σχήμα βοηθάει στο να κατανοηθεί η λειτουργία ενός push button switch όταν του πιέζουμε με βάση των pins που έχει. Πιο συγκεκριμμένα τα pins A και C είναι βραχυκυκλωμένα, όπως και τα pins B και D αντίστοιχα και βραχυκυκλώνονται όλα τα pins μαζί για όση ώρα πιέζουμε τον διακόπτη.



Σχήμα 2.3.3.1 – Push button switch

SMA βύσμα

Θα χρησιμοποιηθούν επίσης δύο γωνιακά SMA βύσματα, το ένα για την εισαγωγή του σήματος στο κύκλωμα και το δεύτερο για την εξαγωγή του εξασθενημένου πλέον σήματος από το κύκλωμα. Τα τέσσερα πόδια στις γωνίες της βάσης του βύσματος θα είναι γειωμένα ενώ το κεντρικό πόδι του, με την μικρότερη διατομή, θα μεταφέρει το σήμα.

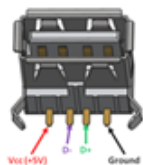


Σχήμα 2.3.3.2 – SMA βύσμα

USB connector

Η τροφοδοσία των microcontrollers και της Oled οθόνης αντίστοιχα, γίνεται μέσω ενός USB female Type-A connector. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.3.3.3 και 2.3.3.4 η

5V τάση που μπαίνει στο κύκλωμα καθώς και η γείωση συνδέονται στα δύο εξωτερικά pins, ενώ τα δύο ενδιάμεσα pins χρησιμεύουν για μετάδοση πληροφορίας και δεν θα συνδεθούν στο συγκεκριμένο κύκλωμα.



Σχήμα 2.3.3.3 – USB pins



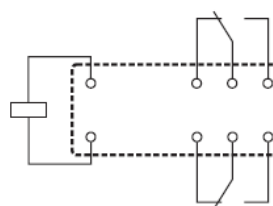
Σχήμα 2.3.3.4 – USB connector

Relay

Ένα πολύ σημαντικό ηλεκτρονικό στοιχείο στο κύκλωμα του εξασθενητή είναι τα relays τα οποία δουλεύουν ως ηλεκτρονικοί διακόπτες. Τα συγκεκριμένα relays θα ενεργοποιούνται εφαρμόζοντας διαφορά τάσης 5V στα δύο τους πόδια και κλείνει ο διακόπτης τους επιτρέποντας να περάσει συνεχές ή εναλλασσόμενο σήμα από τα άλλα δύο πόδια τους, όπως γίνεται όταν πιέζουμε το push button switch. Επίσης, είναι DPDT (Double Pole Double Throw) relays, λειτουργούν σε ρεύματα έως 16A και μπορούν να ενεργοποιηθούν εφαρμόζοντας και εναλλασσόμενη τάση 250V.



Σχήμα 2.3.3.5 – DPDT relay



Σχήμα 2.3.3.6 – Relay pins

Αντιστάσεις και βάσεις στοιχείων

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται ενδεικτικά το είδος των αντιστάσεων που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και οι βάσεις των microcontrollers και των relays που θα

τοποθετηθούν πάνω στο τελικό PCB κύκλωμα. Η χρήση των βάσεων έχει το πλεονέκτημα της αλλαγής των ηλεκτρονικών στοιχείων που εφαρμόζουν πάνω τους σε περίπτωση καταστροφής τους, σε αντίθεση με την τοποθέτηση των στοιχείων άμεσα πάνω στην πλακέτα του PCB.



Σχήμα 2.3.3.7 – Αντιστάσεις



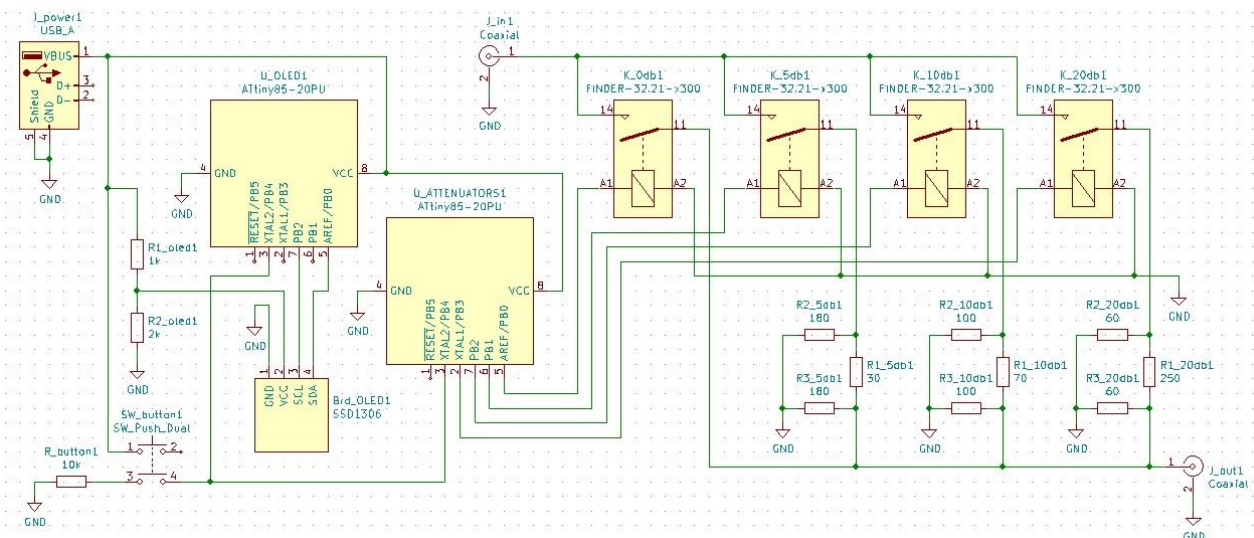
Σχήμα 2.3.3.8 – Βάση microcontroller



Σχήμα 2.3.3.9 – Βάση relay

2.4 Σχεδίαση τελικού εξασθενητή (KiCad)

Σε αυτήν την υποενότητα πραγματοποιείται η σχεδίαση του τελικού κυκλώματος του βηματικού εξασθενητή, κάνοντας χρήση της συνδεσμολογίας των Pi εξασθενητών και πάλι μέσω του προγράμματος KiCad (5.0.2). Στο συγκεκριμένο κύκλωμα με την βοήθεια του push button switch μπορούν να επιλεγθούν εξασθενήσεις 0 dB, 5 dB, 10 dB και 20 dB, οι οποίες θα αναγράφονται στην Oled οθόνη, με βάση τα κυκλώματα που αναλύθηκαν στις ενότητες 2.1 και 2.2.



Σχήμα 2.4 – Τελικός βηματικός εξασθενητής (Eeschema)

Στο Σχήμα 2.4 αποτυπώνεται το κύκλωμα μέσω του Eeschema και ακολουθεί μία ανάλυση των συνδέσεων μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του και της λογικής του σχεδιασμού που ακολουθήθηκε.

Τροφοδοσία

Όπως προαναφέρθηκε, η τροφοδοσία του κυκλώματος πραγματοποιείται με την βοήθεια του USB connector (J_power) ο οποίος δίνει σταθερή τάση 5V. Οι microcontrollers (U_ATTENUATORS, U_OLED) τροφοδοτούνται άμεσα με τάση 5V, ενώ η Oled οθόνη (Brd_OLED) με τάση 3,3V που είναι και η τάση λειτουργίας της. Αυτό επιτυγχάνεται συνδέοντας την τροφοδοσία με έναν διαιρέτη τάσης (R1_oled - R2_oled), δηλαδή με δύο αντιστάσεις με συγκεκριμένες τιμές (1 kΩ, 2 kΩ), ώστε να μετατραπούν τα 5V σε 3,3V. Επιπλέον, ο USB connector συνδέεται με τον push button switch (SW_button) ώστε να δίνει τάση (ή αλλιώς σήμα) στους microcontrollers όταν πιέζεται ο διακόπτης. Μία αντίσταση (R_button) 10 kΩ συνδέεται μεταξύ του διακόπτη και της γείωσης για να διασφαλιστεί η τάση 0V του διακόπτη όταν αυτός είναι σε κατάσταση off.

Εξασθένηση

Το σήμα εισέρχεται στο κύκλωμα μέσω του πρώτου SMA βύσματος (J_in) και περνώντας από όποιο relay (K) είναι ενεργοποιημένο κάθε φορά δέχεται την εξασθένηση του αντίστοιχου P_i εξασθενητή. Πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο στην περίπτωση που το σήμα περνάει από το πρώτο relay (K_0dB) δεν υπόκειται σε εξασθένηση αφού δεν έχει συνδεθεί κανένας εξασθενητής με το συγκεκριμένο relay. Τέλος, το εξασθενημένο ή μη σήμα εξέρχεται από το κύκλωμα μέσω του δεύτερου SMA βύσματος (J_out).

Συνδεσμολογία

Η συνδεσμολογία όλων των στοιχείων γίνεται με την βοήθεια των datasheets τους ώστε γνωρίζοντας την λειτουργία του κάθε pin των στοιχείων να επιτευχθεί το επιθυμητό κύκλωμα βηματικού εξασθενητή.

Έτσι, ο microcontroller που ελέγχει την Oled οθόνη συνδέεται μαζί της μέσω των pins SDA (με pin 0) και SCL (με pin 2), τα οποία υπάρχουν και στα δύο αυτά ηλεκτρονικά στοιχεία και μεταφέρουν τις πληροφορίες για τις εντολές προς την Oled οθόνη. Επίσης, ο microcontroller που ελέγχει τα τέσσερα relays συνδέεται μαζί τους μέσω των τεσσάρων pins τους A1 (με pins 0, 1, 2 και 3) για τις αντίστοιχες εξασθενήσεις 0 dB, 5 dB, 10 dB και 20 dB.

Τέλος, το σήμα που μεταφέρεται από το SMA βύσμα εισόδου εισέρχεται στα relays μέσω των pins 14 και εξέρχεται από αυτά από τα pins 11 ώστε να περάσει απο τον αντίστοιχο κύκλωμα εξασθενητή και να καταλήξει στο SMA βύσμα εξόδου.

Κεφάλαιο 3

3.1 Προγραμματισμός των microcontrollers

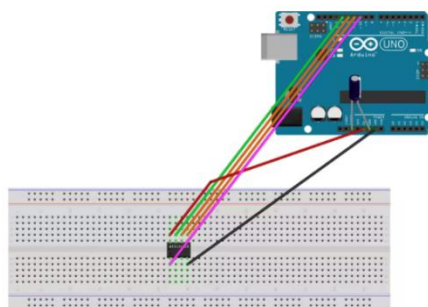
Η επιλογή να χρησιμοποιηθούν οι microcontrollers ATtiny85 ως τα βασικά στοιχεία του κυκλώματος απαιτεί τον προγραμματισμό τους. Αυτός επιτυγχάνεται συνδέοντάς τους με την πλακέτα Arduino UNO ώστε να περάσει στον microcontroller ο κώδικας μέσω του προγράμματος Arduino IDE (1.8.15). Για την σύνδεση του Arduino UNO με τον ATtiny85 θα χρειαστούν ακόμα υλικά όπως ένα breadboard, ένας πυκνωτής 10μF και αρκετά καλώδια σύνδεσης.

Arduino Uno	ATtiny85
5V	Vcc
Gnd	Gnd
Pin 13	Pin 2
Pin 12	Pin 1
Pin 11	Pin 0
Pin 10	Reset

Πίνακας 4 – Συνδεσμολογία των pins Arduino Uno – ATtiny85

Ο πυκνωτής 10μF παρεμβάλεται μεταξύ των pins RESET και GND στο Arduino UNO, για να αποφευχθεί το αυτόματο reset του Arduino όταν ανεβάζουμε το πρόγραμμα στον Attiny85.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται γραφικά η προαναφερόμενη συνδεσμολογία για τον προγραμματισμό του microcontroller.



Σχήμα 3.1 – Συνδεσμολογία Arduino Uno – ATtiny85

Είναι πολύ σημαντικό να κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις στο πρόγραμμα Arduino IDE του υπολογιστή ώστε να υποστηρίξει τον ATtiny85. Οπότε, αρχικά θα εγκαταστήσουμε τον board "attiny by Davis A. Mellis" από τον Board Manager και θα επιλέξουμε τον ATtiny85 στην επιλογή του "Processor". Ο συγκεκριμένος microcontroller έχει προεπιλεγμένη ως συχνότητα ρολογιού τα 1MHz, οπότε αλλάζουμε την επιλογή "Clock" σε 8MHz (internal). Τέλος, επιλέγουμε Arduino as ISP στην επιλογή του "Programmer" και πατάμε Burn Bootloader για να κάνουμε τον microcontroller να τρέξει στην συχνότητα 8MHz.

Έτσι, αφού έχουν γίνει οι απαραίτητες ρυθμίσεις στο Arduino IDE μπορεί πλέον να προγραμματιστεί ο κάθε microcontroller ξεχωριστά. Στις ενότητες που ακολουθούν παραθέτονται οι δύο κώδικες που θα τρέξουν στους ATtiny85, καθώς και αναλύσεις στα επιμέρους τμήματά τους.

3.2 Κώδικας για Oled οθόνη

Το πρώτο βήμα για την δημιουργία του κώδικα είναι η δήλωση των απαιτούμενων βιβλιοθηκών ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν οι εντολές που θα χρησιμοποιηθούν.

Έτσι στον συγκεκριμένο κώδικα έχουν δηλωθεί οι βιβλιοθήκες:

Libraries

```
#include <TinyWireM.h>
```

```
#include <TinyOzOLED.h>
```

```
#include <avr/pgmspace.h>
```

Στη συνέχεια, δηλώνονται οι σταθερές και οι μεταβλητές που θα αναφερθούν στον κώδικα ως εξής:

Constants

```
const int buttonPin = 4; // δήλωση του pin που συνδέεται με το push button
```

(δήλωση του pin 4)

Variables

```
int val = 0; // μετρητής των πιέσεων του push button
```

(δήλωση αρχικής τιμής με "0")

```
int buttonState = 0; // τωρινή κατάσταση του push button
```

(δήλωση αρχικής τιμής με "0")

```
int lastButtonState = 0; // προηγούμενη κατάσταση του push button
```

(δήλωση αρχικής τιμής με "0")

Έπειτα, γράφεται η βασική συνάρτηση του κώδικα η οποία τρέχει μόλις ενεργοποιηθεί ο microcontroller και περιλαμβάνει εντολές δήλωσης των εισόδων του αλλά και εντολές για την εμφάνιση πληροφοριών του εξασθενητή.

Void setup

```
delay(2000); // εισαγωγή καθυστέρησης
```

Inputs

```
pinMode(buttonPin, INPUT); // δήλωση εισόδου του microcontroller
```

(δήλωση του pin από το οποίο παίρνει σήμα, δηλαδή εντολή, ο microcontroller)

Messages

```
OzOled.init();
```

```
OzOled.println("Step Attenuator"); // αναγραφόμενο μήνυμα
```

```
OzOled.setCursor(0, 1); // δήλωση στήλης και γραμμής
```

(δήλωση στήλης "0" και γραμμής "1")

```
OzOled.println(" by"); // αναγραφόμενο μήνυμα
```

```
OzOled.setCursor(0, 2); // δήλωση στήλης και γραμμής
```

(δήλωση στήλης "0" και γραμμής "2")

```
OzOled.println("DimitrisPipelias"); // αναγραφόμενο μήνυμα
```

```
delay(2000); // εισαγωγή καθυστέρησης
```

(δήλωση χρονικού ορίου εμφάνισης των μηνυμάτων)

```
OzOled.clearDisplay(); // καθαρισμός οθόνης
```

(για αποφυγή ταυτόχρονης εμφάνισης χαρακτήρων από τα τωρινά και τα επόμενα μηνύματα)

Είναι σημαντικό να εξηγηθεί ότι η εισαγωγή της αρχικής καθυστέρησης στην αρχή του κώδικα γίνεται ώστε κάθε φορά που ενεργοποιείται η Oled οθόνη να έχει

τον απαιτούμενο χρόνο να διαγράψει από την μνήμη της τα δεδομένα που υπήρχαν από την τελευταία φορά που χρησιμοποιήθηκε και έπειτα ακολουθεί η φόρτωση των εντολών από τον microcontroller. Χωρίς αυτήν την καθυστέρηση η Oled οθόνη δεν θα εμφάνιζε κανένα δεδομένο κάθε φορά που τροφοδοτούνταν.

Τέλος, γράφεται η δεύτερη συνάρτηση του κώδικα η οποία τρέχει μόλις ολοκληρωθεί η πρώτη συνάρτηση και επαναλαμβάνεται συνέχεια κάνοντας μία “λούπα”. Η λειτουργία της συγκεκριμένης συνάρτησης είναι να διαβάζει το σήμα που έρχεται από το push button, να διατηρεί την κατάστασή του σε “HIGH” ή “LOW” ώστε να εμφανίζεται και να διατηρείται στην Oled οθόνη η αντίστοιχη ένδειξη κάθε φορά που το πιέζουμε.

Void loop

```
val = digitalRead(buttonPin); // ανάγνωση σήματος από το push button  
  
    (στέλνει ένα σήμα “HIGH”, δηλαδή μία εντολή, στον  
    microcontroller για όση ώρα πιέζεται το push button)  
  
if ((val == HIGH) && (lastButtonState == LOW)) // διατήρηση κατάστασης  
  
    (ανάγνωση τωρινής και προηγούμενης κατάστασης)  
  
    buttonState = 1 + buttonState; // διατήρηση κατάστασης  
  
    (αύξηση της τιμής της τωρινής κατάστασης κατά 1)  
  
    delay(20); // εισαγωγή καθυστέρησης  
  
    (για την αποφυγή μη ηθελημένης λήψης δύο διαδοχικών  
    σημάτων ενώ πιέζεται μία φορά το push button)  
  
lastButtonState = val; // διατήρηση κατάστασης  
  
    (αλλαγή δήλωσης της τωρινής κατάστασης στην  
    προηγούμενη κατάσταση)
```

```

if (buttonState == 0) { // κατάσταση "0"

    OzOled.setCursorXY(0, 1); // δήλωση στήλης και γραμμής

    OzOled.println("Attenuation 0db"); // αναγραφόμενο μήνυμα

    OzOled.setCursorXY(0, 2); // δήλωση στήλης και γραμμής

    OzOled.println(" press for more "); // αναγραφόμενο μήνυμα

} else if (buttonState == 1) {

    OzOled.setCursorXY(0, 1);

    OzOled.println("Attenuation 5db");

} else if (buttonState == 2) {

    OzOled.setCursorXY(0, 1);

    OzOled.println("Attenuation 10db");

} else if (buttonState == 3) {

    OzOled.setCursorXY(0, 1);

    OzOled.println("Attenuation 20db");

} else {

    buttonState = 0; // επαναφορά κατάστασης σε "0"

```

Στις επόμενες καταστάσεις, δηλαδή για buttonState = 1, 2 και 3, οι εντολές δήλωσης στήλης και γραμμής και αναγραφόμενου μηνύματος είναι παρόμοιες για αυτό και δεν ξανά αναφέρονται.

Επίσης, δεν ξανά δίνεται η εντολή για την εμφάνιση του μηνύματος "press for more" επειδή η Oled οθόνη ανανεώνει μόνο τις γραμμές που επιβάλλει ο κώδικας

σε κάθε αλλαγή της κατάστασης και το συγκεκριμένο μήνυμα βρίσκεται στην δεύτερη γραμμή, οπότε παραμένει να εμφανίζεται.

Στην τελευταία γραμμή του κώδικα παρατηρείται να δίνεται η εντολή για επιστροφή στην αρχική κατάσταση "0" με το 4^ο κατά σειρά πάτημα του push button. Αυτό γίνεται ώστε να επαναλαμβάνονται οι τέσσερις καταστάσεις και κατά συνέπεια να αλλάζουν τα μηνύματα στην Oled οθόνη με κάθε πάτημα του push button.

Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί ότι στην Oled οθόνη χρησιμοποιείται εκ κατασκευής μία οπτικά μικρή γραμματοσειρά και για τον λόγο αυτό έγινε διπλασιασμός του μεγέθους της. Αυτό επετεύχθη αλλάζοντας κάποιες εντολές στο αρχείο .cpp στην δεύτερη βιβλιοθήκη που χρησιμοποιήθηκε στην αρχή του κώδικα ώστε να χρησιμοποιούνται περισσότερες θέσεις (pixels) της Oled οθόνης για την εμφάνιση του κάθε χαρακτήρα της γραμματοσειράς.

Τέλος, ένα από τα χαρακτηριστικά της Oled οθόνης είναι ότι σε κάθε γραμμή της μπορούν να αναγραφούν έως 16 χαρακτήρες και κάθε φορά που εκτελείται μία νέα εντολή εμφάνισης ενός μηνύματος, οι νέοι χαρακτήρες αντικαθιστούν τους προηγούμενους χωρίς να διαγράφονται οι υπόλοιποι κατά μήκος της γραμμής. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί δίνοντας εντολές μηνυμάτων με ακριβώς 16 χαρακτήρες, ακόμα και με την χρήση κενών διαστημάτων, ώστε να αντικαθίστανται όλοι οι χαρακτήρες κατά μήκος της εκάστοτε γραμμής.

3.3 Κώδικας για relays

Στον συγκεκριμένο κώδικα δεν χρειάστηκε να δηλωθούν βιβλιοθήκες σαν πρώτο βήμα σε αντίθεση με τον προηγούμενο κώδικα.

Παρ' όλα αυτά οι σταθερές και οι μεταβλητές που αναφέρονται στον κώδικα θα δηλωθούν κανονικά ως εξής:

Constants

```
const int buttonPin = 4; // δήλωση του pin που συνδέεται με το push button
```

```
const int ledPin0 = 0; // δήλωση του pin που συνδέεται με το πρώτο relay
```

```
const int ledPin1 = 1; // δήλωση του pin που συνδέεται με το δεύτερο relay
```

```
const int ledPin2 = 2; // δήλωση του pin που συνδέεται με το τρίτο relay
```

```
const int ledPin3 = 3; // δήλωση του pin που συνδέεται με το τέταρτο relay
```

Variables

```
int val = 0; // μετρητής των πιέσεων του push button
```

```
int buttonState = 0; // τωρινή κατάσταση του push button
```

```
int lastButtonState = 0; // προηγούμενη κατάσταση του push button
```

Οι εντολές δήλωσης των pins που συνδέονται με τα relays έχουν την ονομασία “ledPin” αντί για “relayPin”, που θα ήταν το αναμενόμενο, επειδή για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του κώδικα χρησιμοποιήθηκαν leds ώστε να επιβεβαιώνεται οπτικά ποια pins απο τον microcontroller ενεργοποιούνται.

Έπειτα, όπως και στον προηγούμενο κώδικα, γράφεται η βασική συνάρτηση του κώδικα και περιλαμβάνει εντολές δήλωσης των εισόδων και εξόδων του microcontroller.

Void setup

Inputs

```
pinMode(buttonPin, INPUT); // δήλωση εισόδου του microcontroller
```

Outputs

```
pinMode(ledPin0, OUTPUT); // δήλωση εξόδου του microcontroller
```

(δήλωση του pin 0 από το οποίο δίνει σήμα, δηλαδή εντολή, ο microcontroller)

```
pinMode(ledPin1, OUTPUT); // δήλωση εξόδου του microcontroller
```

(δήλωση του pin 1 από το οποίο δίνει σήμα, δηλαδή εντολή, ο microcontroller)

```
pinMode(ledPin2, OUTPUT); // δήλωση εξόδου του microcontroller
```

(δήλωση του pin 2 από το οποίο δίνει σήμα, δηλαδή εντολή, ο microcontroller)

```
pinMode(ledPin3, OUTPUT); // δήλωση εξόδου του microcontroller
```

(δήλωση του pin 3 από το οποίο δίνει σήμα, δηλαδή εντολή, ο microcontroller)

```
delay(5000); // εισαγωγή καθυστέρησης
```

(η διαχείριση των relays μπορεί να γίνει μετά την συγκεκριμένη καθυστέρηση)

Τέλος, γράφεται η δεύτερη συνάρτηση του κώδικα που η λειτουργία της είναι αρχικά να διαβάζει το σήμα που έρχεται από το push button και να διατηρεί την κατάστασή του σε "HIGH" ή "LOW" όπως και στον προηγούμενο κώδικα αλλά με την διαφοροποίηση ότι κάθε φορά που το πιέζουμε θα στέλνει σήμα σε διαφορετικό pin ώστε να ενεργοποιείται το αντίστοιχο relay.

Void loop

```
val = digitalRead(buttonPin); // ανάγνωση σήματος από το push button
```

```
if ((val == HIGH) && (lastButtonState == LOW)) // διατήρηση κατάστασης
```

```
    buttonState = 1 + buttonState; // διατήρηση κατάστασης
```

```
    delay(170); // εισαγωγή καθυστέρησης
```

```

lastButtonState = val; // διατήρηση κατάστασης

if (buttonState == 0) { // κατάσταση "0"

    digitalWrite(ledPin0, HIGH); // αποστολή σήματος
                                (δίνεται εντολή μέσω του pin 0 να ενεργοποιηθεί το
                                πρώτο relay)

    digitalWrite(ledPin1, LOW); // μη αποστολή σήματος
                                (δεν δίνεται εντολή μέσω του pin 1 να ενεργοποιηθεί το
                                δεύτερο relay)

    digitalWrite(ledPin2, LOW); // μη αποστολή σήματος
                                (δεν δίνεται εντολή μέσω του pin 2 να ενεργοποιηθεί το
                                τρίτο relay)

    digitalWrite(ledPin3, LOW); // μη αποστολή σήματος
                                (δεν δίνεται εντολή μέσω του pin 3 να ενεργοποιηθεί το
                                τέταρτο relay)

} else if (buttonState == 1) {

    digitalWrite(ledPin0, LOW);

    digitalWrite(ledPin1, HIGH);

    digitalWrite(ledPin2, LOW);

    digitalWrite(ledPin3, LOW);

} else if (buttonState == 2) {

    digitalWrite(ledPin0, LOW);

    digitalWrite(ledPin1, LOW);

```



```

digitalWrite(ledPin2, HIGH);

digitalWrite(ledPin3, LOW);

} else if (buttonState == 3) {

digitalWrite(ledPin0, LOW);

digitalWrite(ledPin1, LOW);

digitalWrite(ledPin2, LOW);

digitalWrite(ledPin3, HIGH);

} else {

    buttonState = 0; // επαναφορά κατάστασης σε "0"

```

Όπως και στον προηγούμενο κώδικα, στις καταστάσεις για `buttonState = 1, 2` και `3`, οι εντολές αποστολής ή μη εντολής στον `microcontroller` είναι παρόμοιες για αυτό και δεν ξανά αναφέρονται.

Η εντολή για επιστροφή στην αρχική κατάσταση "0" με το 4^ο κατά σειρά πάτημα του `push button` που αναγράφεται στην τελευταία γραμμή του κώδικα, επίσης γίνεται ώστε να επαναλαμβάνονται οι τέσσερις καταστάσεις με το κάθε πάτημά του.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι πολλά από τα επεξηγηματικά σχόλια, που αναφέρονται σε όμοιες εντολές οι οποίες εμφανίζονται αρκετές φορές στους δύο κώδικες, δεν ξανά αναφέρονται για την αποφυγή πλεονασμού.

3.4 Υλοποίηση κυκλώματος (breadboard)

Σε αυτή την υποενότητα θα γίνει ανάλυση στην λειτουργία που θα έχουν οι δύο `microcontrollers` με βάση τον κώδικα που τρέχει στον καθένα και θα σχολιαστούν ορισμένες κοινές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό τους.

Αρχικά και οι δύο microcontrollers ελέγχονται από το ίδιο push button και για αυτό το λόγο οι εντολές διατήρησης της κατάστασής του είναι ίδιες και για τους δύο κώδικες.

Επίσης, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι η εισαγωγή διαφορετικών χρόνων καθυστερήσεων, ώστε να αποφευχθεί η λήψη δύο σημάτων του push button ενώ έχει πιεστεί μόνο μία φορά, γίνεται για λόγους συγχρονισμού. Πιο συγκεκριμένα, ενώ και οι δύο microcontrollers έχουν προγραμματιστεί να λειτουργούν με την ίδια εσωτερική συχνότητα, η Oled οθόνη έχει αναλογικά αρκετά μικρότερη συχνότητα λειτουργίας από τον αντίστοιχο microcontroller με αποτέλεσμα να μην συγχρονίζονται οι τιμές της εξασθένησης που εμφανίζει με τα αντίστοιχα relays στις γρήγορες εναλλαγές των καταστάσεων του push button.

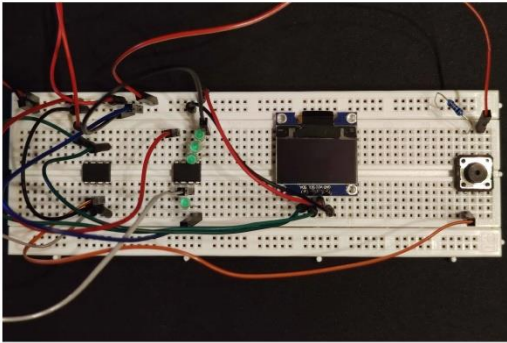
Άλλο ένα σημείο στους κώδικες που πρέπει σχολιαστεί είναι η επιλογή των 5000ms ως χρονική καθυστέρηση στον δεύτερο κώδικα έως ότου να μπορέσει ο χρήστης να επιλέξει ποιο relay θα ενεργοποιηθεί και ο λόγος είναι η κάλυψη των δύο χρονικών καθυστερήσεων, από 2000ms η κάθε μία, που εισήχθησαν στην αρχή του πρώτου κώδικα.

Η λειτουργία που πραγματοποιεί ο microcontroller που ελέγχει την Oled οθόνη είναι να εμφανίζεται σε αυτήν το εισαγωγικό μήνυμα όταν τροφοδοτείται με ρεύμα και έπειτα να αναγράφει τις τιμές των εξασθενήσεων που επιλέγονται από τον χρήστη.

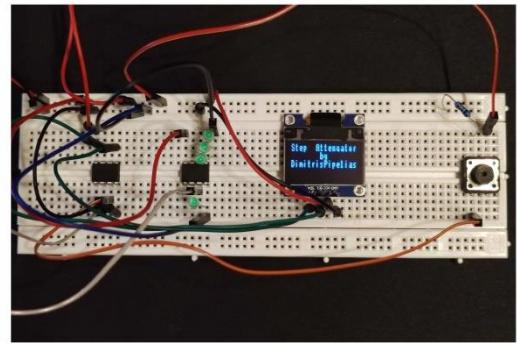
Από την άλλη, η λειτουργία που εκτελεί ο δεύτερος microcontroller είναι να επιλέγει, μέσω του χρήστη, ποιο relay θα ενεργοποιείται και αντίστοιχα ποιος εξασθενητής, ώστε να περάσει το σήμα που θέλουμε για να υποστεί εξασθένηση σε συγχρονισμό πάντα με τις τιμές που αναγράφονται στην Oled οθόνη.

Τέλος, γίνεται η τοποθέτηση των βασικών στοιχείων του τελικού κυκλώματος του εξασθενητή σε breadboard ώστε να τροφοδοτηθούν με ρεύμα και γίνει ο έλεγχος ορθότητας της συνδεσμολογίας τους αλλά και του σωστού προγραμματισμού των microcontrollers.

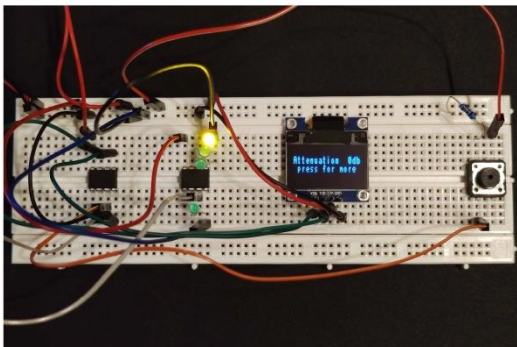
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται όλα τα βήματα και οι καταστάσεις που ακολουθεί το κύκλωμα απο την στιγμή που τροφοδοτείται μέχρι να επιλεχθούν όλες οι τιμές εξασθενήσεων με το πάτημα του push button από τον χρήστη. Επισημαίνεται ξανά ότι για ευκολότερο (οπτικό) έλεγχο στην θέση των relays έχουν τοποθετηθεί leds.



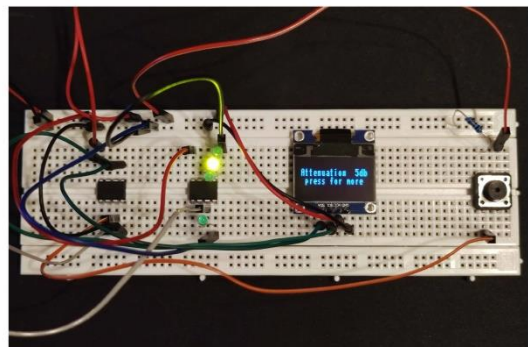
Σχήμα 3.4.1 – Τροφοδοσία κυκλώματος



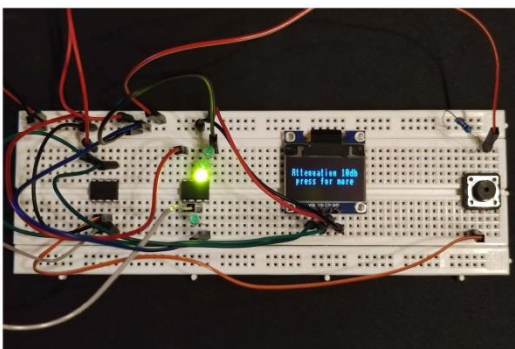
Σχήμα 3.4.2 – Εισαγωγικές πληροφορίες



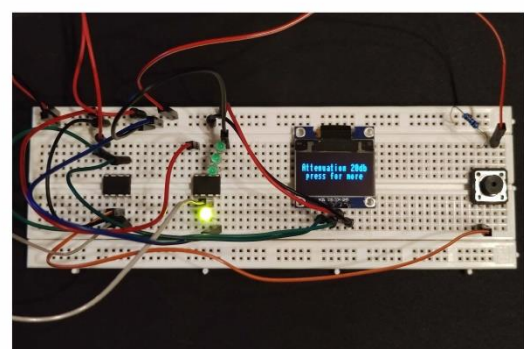
Σχήμα 3.4.3 – Χωρίς εξασθένιση



Σχήμα 3.4.4 – Εξασθένιση 5dB



Σχήμα 3.4.5 – Εξασθένιση 10dB



Σχήμα 3.4.6 – Εξασθένιση 20dB

Κεφάλαιο 4

4.1 Επιλογή και δημιουργία των footprints

Σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε σε πρώτο βήμα ο σχεδιασμός του κυκλώματος του βηματικού εξασθενητή με την βοήθεια του Eeschema του KiCad. Ωστόσο, για να υλοποιηθεί ο εξασθενητής, δηλαδή για να μπορέσει να τυπωθεί το κύκλωμα σε πλακέτα, θα πρέπει να σχεδιαστεί ένα αρχείο PCB.

Αρχικά, είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν τα footprints που σχετίζονται με τα symbols του Eeschema. Τόσο τα footprints όσο και τα symbols είναι τα σχηματικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στο PCB layout και στο Eeschema αντίστοιχα.

Δημιουργία netlist

Η netlist είναι ένα αρχείο του KiCad στο οποίο αναγράφονται οι συνδέσεις των στοιχείων μεταξύ τους. Για την δημιουργία της netlist αρχικά θα πρέπει να γίνει αντιστοίχιση των symbols με τα footprints τους που περιέχονται στη βιβλιοθήκη του προγράμματος.

Για να γίνει εύκολα η αναγνώριση του κάθε είδους των στοιχείων και κατ' επέκταση η επιλογή τους από την προτεινόμενη λίστα, αρχικά είναι πολύ σημαντική η ονοματοθεσία των στοιχείων στο Eeschema. Η επιλογή των footprints μπορεί να γίνει πιο εύκολη με την χρήση των διαθέσιμων φίλτρων που διαθέτει η λίστα όπως το φίλτρο με βάση λέξεις κλειδιά, το φίλτρο με βάση τον αριθμό των pins των στοιχείων και το φίλτρο με βάση την βιβλιοθήκη που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Παρατηρείται ότι στην λίστα υπάρχει ένα μεγάλος αριθμός από

διαθέσιμα footprints, γεγονός που βοηθάει στην σωστή αντιστοίχισή τους με τα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, η αντιστοίχιση γίνεται κυρίως με βάση των χαρακτηριστικών των στοιχείων όπως είναι οι διαστάσεις τους, οι αποστάσεις των οπών μεταξύ τους, αν θα τοποθετηθούν όρθια ή οριζόντια στην πλακέτα κ.ά. Επίσης, με την χρήση της 3D απεικόνισης που παρέχεται από το πρόγραμμα μπορεί να γίνει πιο λεπτομερής έλεγχος για την ορθή επιλογή των footprints.

Στο σχήμα που ακολουθεί αναφέρονται τα διαθέσιμα footprints με βάση το είδος τους καθώς και η αντιστοιχία που έγινε μεταξύ αυτών και των symbols που είχαν χρησιμοποιηθεί στο Eeschema.

Battery	1 Brd_OLED1 -	SSD1306 : SSD1306:128x64OLED	1 Battery:BatteryHolder_Bulgin_BK0036_1xC
Button_Switch_Keyboard	2 J_in1 -	Coaxial : Connector_Coaxial:SMB_Jack_Vertical	2 Battery:BatteryHolder_Eagle_l2BH611-GR
Button_Switch_SMD	3 J_out1 -	Coaxial : Connector_Coaxial:SMB_Jack_Vertical	3 Battery:BatteryHolder_Keystone_103_1x20mm
Button_Switch_THT	4 J_power1 -	USB_A : Connector_USB:USB_A_CNCtech_1001-011-01101_Horizontal	4 Battery:BatteryHolder_Keystone_104_1x23mm
Buzzer_Beeper	5 K_0db1 -	FINDER-32.21-x300 : Relay_THT:Relay_DPDT_Finder_40.52	5 Battery:BatteryHolder_Keystone_105_1x2430
Calibration_Scale	6 K_10db1 -	FINDER-32.21-x300 : Relay_THT:Relay_DPDT_Finder_40.52	6 Battery:BatteryHolder_Keystone_106_1x20mm
Capacitor_SMD	7 K_20db1 -	FINDER-32.21-x300 : Relay_THT:Relay_DPDT_Finder_40.52	7 Battery:BatteryHolder_Keystone_107_1x23mm
Capacitor_THT	8 K_5db1 -	FINDER-32.21-x300 : Relay_THT:Relay_DPDT_Finder_40.52	8 Battery:BatteryHolder_Keystone_500
Capacitor_Tantalum_SMD	9 R1_10db1 -	70 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	9 Battery:BatteryHolder_Keystone_1042_1x18650
Connector	10 R1_20db1 -	250 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	10 Battery:BatteryHolder_Keystone_1058_1x2032
Connector_Audio	11 R1_5db1 -	30 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	11 Battery:BatteryHolder_Keystone_1060_1x2032
Connector_BarrelJack	12 R1_0led1 -	1k : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	12 Battery:BatteryHolder_Keystone_2462_2xAA
Connector_Card	13 R2_10db1 -	100 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	13 Battery:BatteryHolder_Keystone_2466_1xAAA
Connector_Coaxial	14 R2_20db1 -	60 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	14 Battery:BatteryHolder_Keystone_2468_2xAAA
Connector_DIN	15 R2_5db1 -	180 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	15 Battery:BatteryHolder_Keystone_2479_3xAAA
Connector_Daugh	16 R2_0led1 -	2k : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	16 Battery:BatteryHolder_Keystone_2993
Connector_FFC-FFC	17 R3_10db1 -	100 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	17 Battery:BatteryHolder_Keystone_3000_1x12mm
Connector_HDMI	18 R3_20db1 -	60 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	18 Battery:BatteryHolder_Keystone_3001_1x12mm
Connector_Harwin	19 R3_5db1 -	180 : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	19 Battery:BatteryHolder_Keystone_3008_1x2450
Connector_Hirose	20 R_button1 -	10k : Resistor_THT:R_Axial_DIN0207_L6.3mm_D2.5mm_P7.62mm_Ho	20 Battery:BatteryHolder_Keystone_3009_1x2450
Connector_IDC	21 SW_button1 -	SW_Push_Dual : Button_Switch_THT:SW_TH_Tactile_Omron_B3F-10xx	21 Battery:BatteryHolder_Keystone_3034_1x20mm
Connector_JAE	22 U_ATTENUATORS1 -	ATTiny85-20FU : Package_DIP:DIP-8_W7.62mm	22 Battery:BatteryHolder_LINK_BAT-HLD-012-SMT
Connector_JST	23 U_OLED1 -	ATTiny85-20FU : Package_DIP:DIP-8_W7.62mm	23 Battery:BatteryHolder_MED_BC2AAFC_2xAA
Connector_Molex			24 Battery:BatteryHolder_MED_BC12AFC_2xAA
Connector_Multicomp			25 Battery:BatteryHolder_MED_BC2003_1x2032
			26 Battery:BatteryHolder_MPD_BH-18650-PC2

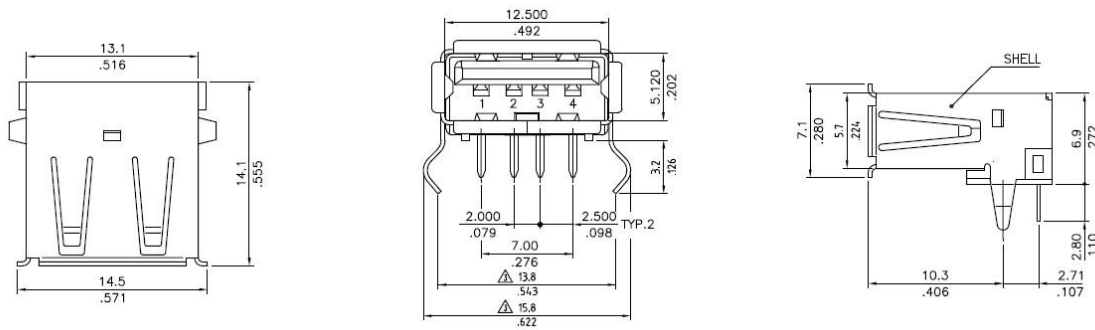
Σχήμα 4.1.1 – Αντιστοίχιση symbols-footprints

Δημιουργία footprint

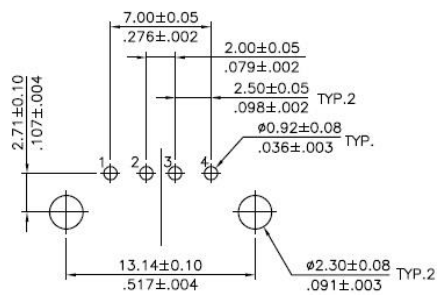
Στην περίπτωση που το footprint που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε δεν περιέχεται στις διαθέσιμες βιβλιοθήκες, το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα σχεδιασμού του από την αρχή ή ακόμα και την επεξεργασία ενός ήδη υπάρχοντος με την βοήθεια του Footprint Editor.

Οπότε, για το λόγο ότι δεν βρέθηκε αρχείο που να σχετίζεται επαρκώς με ένα από τα ηλεκτρονικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν, ακολούθησε η επεξεργασία

ενός ήδη υπάρχοντος footprint του USB connector. Πολλές χρήσιμες πληροφορίες για τις διαστάσεις του USB connector, ώστε να γίνει ένας σωστός σχεδιασμός, τις παίρνουμε από το datasheet του, μέρη του οποίου φαίνονται στα δύο επόμενα σχήματα.

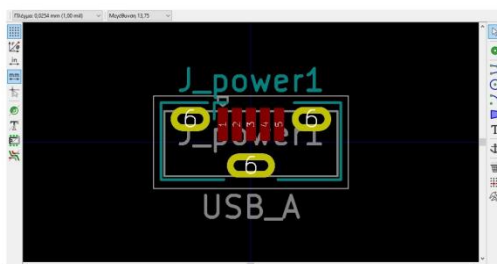


Σχήμα 4.1.2 – Διαστάσεις USB connector

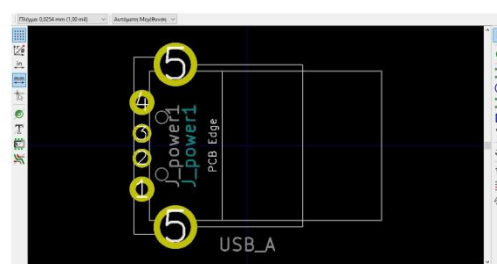


Σχήμα 4.1.3 – Διαστάσεις USB connector (PCB board layout)

Πρέπει να αναφερθεί ότι για την σχεδίαση των στοιχείων αλλά και ολόκληρης της πλακέτας χρησιμοποιούνται τα χιλιοστά (mm) σαν σύστημα μέτρησης απόστασης και όχι οι ίντσες (in). Στα σχήματα 4.1.4. και 4.1.5 παραθέτονται το footprint του USB connector που επεξεργάστηκε αλλά και το τελικό σχέδιο.



Σχήμα 4.1.4 – Αρχικό footprint

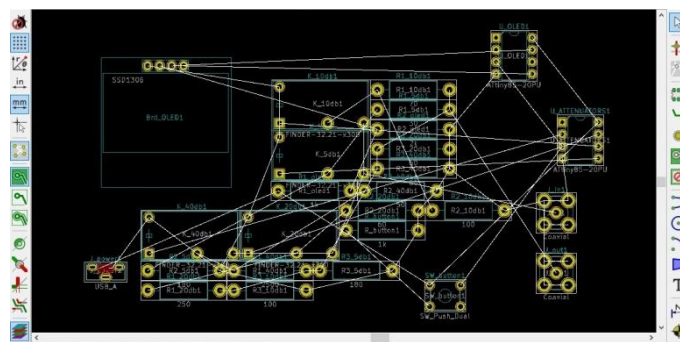


Σχήμα 4.1.5 – Τελικό footprint (επεξεργασμένο)

Μεγαλύτερη ανάλυση στον σχεδιασμό ενός footprint όσον αφορά τα μεγέθη των οπών αλλά και στην συνδεσμολογία των διαφόρων στοιχείων του PCB σχεδίου θα γίνει στην επόμενη υποενότητα.

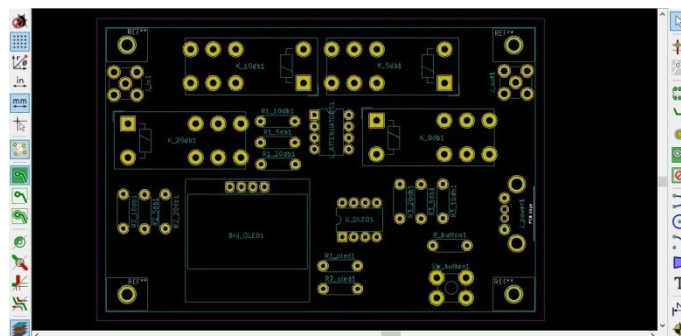
4.2 Σχεδιασμός της πλακέτας PCB

Η εισαγωγή της netlist στο PCB αρχείο θα βοηθήσει στην διάταξη των στοιχείων πάνω στην πλακέτα. Στο Σχήμα 4.2.1 φαίνεται το “ratsnest” που δημιουργήθηκε στο οποίο επισημαίνονται οι συνδέσεις των στοιχείων μεταξύ τους ώστε να είναι πιο εύκολη η χάραξη των διαδρομών (traces) που τα ενώνουν.



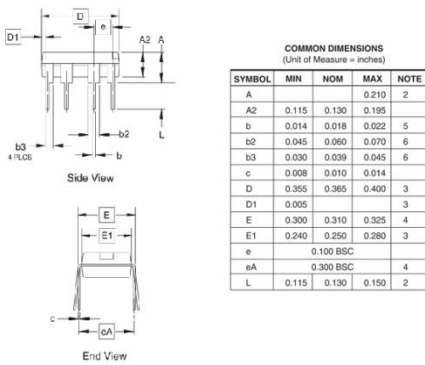
Σχήμα 4.2.1 – Ratsnest

Το επόμενο βήμα είναι η σχεδίαση του πλαισίου της πλακέτας που θα μπου μέσα όλα τα στοιχεία της netlist. Έτσι, επιλέχθηκε για πρακτικούς λόγους και διακριτικότητας το μέγεθος της πλακέτας να έχει διαστάσεις μιας ID κάρτας και πιο συγκεκριμένα της CR100 ID card (67 mm x 99 mm), όπως φαίνεται παρακάτω.

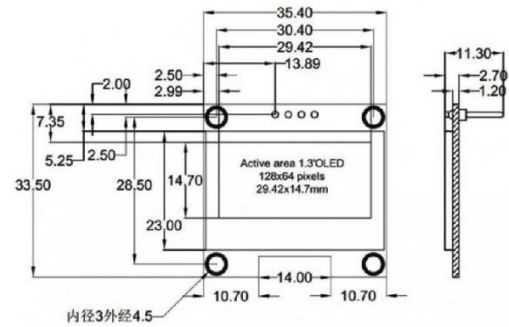


Σχήμα 4.2.1 – Τοποθέτηση στοιχείων στην πλακέτα

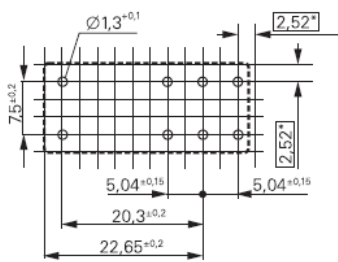
Επίσης, για την σωστή επιλογή και χρήση των footprints πάνω στο σχέδιο θα ανατρέξουμε πάλι στις πληροφορίες που δίνουν τα datasheets των ηλεκτρονικών στοιχείων. Κάποια από τα μέρη των datasheets που χρησιμοποιήθηκαν παραθέτονται στα επόμενα σχήματα.



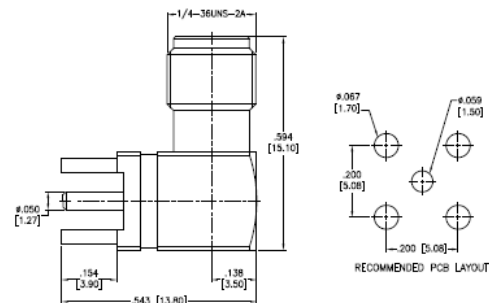
Σχήμα 4.2.3 – Διαστάσεις microcontroller (PCB board)



Σχήμα 4.2.4 – Διαστάσεις Oled οθόνης (PCB board)



Σχήμα 4.2.5 – Διαστάσεις relay (PCB board)



Σχήμα 4.2.6 – Διαστάσεις SMA connector (PCB board)

Τα συγκεκριμένα σχεδιαγράμματα δίνουν πληροφορίες αναφορικά με τις διαμέτρους και τις αποστάσεις των οπών μεταξύ τους οι οποίες είναι απαραίτητο να τις γνωρίζουμε για την διόρθωση των footprints. Χωρίς την χρήση τους δεν θα εφαρμόζαν σωστά τα στοιχεία στην πλακέτα.

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για την σωστή διάταξη των στοιχείων μέσα στο πλαίσιο πρέπει να ληφθούν υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά τύπωσης της πλακέτας ανάλογα με την κάθε εταιρεία. Για την συγκεκριμένη εταιρεία οι αντίστοιχοι παράμετροι αναγράφονται στον Πίνακα 5.

Διαστάσεις / Αποστάσεις (mm)		Τρύπημα (mm)	
Ελάχιστο πάχος γραμμής	0,127	Ελάχιστη οπή	0,4
Ελάχιστη απόσταση χαλκού από χαλκό	0,1524	Μέγιστη οπή με τρυπάνι	5,0
Ελάχιστη διάμετρος pad	1,016		
Ελάχιστο πάχος στεφανιού στα pads	0,2032		
Ελάχιστη απόσταση χαλκού από άκρη πλακέτας	1,27		

Πίνακας 5 – Παράμετροι τύπωσης της πλακέτας

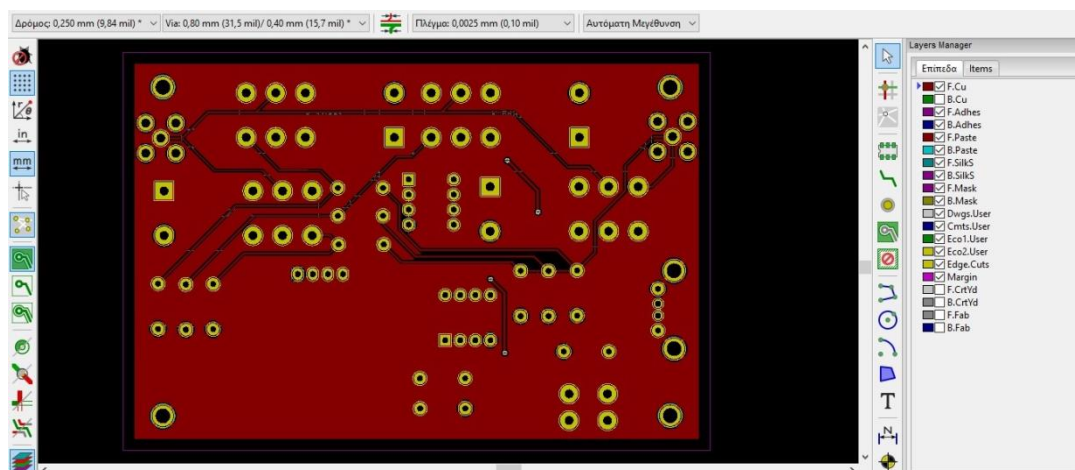
Έπειτα, γίνεται η μετατροπή των διαμέτρων των οπών (through-holes) και των στεφανών των pads αλλά και αλλαγή στην ονοματοδοσία κάποιων pads για την διευκόλυνση της σύνδεσής τους, αποφεύγοντας την διασταύρωση των διαδρομών που τα ενώνουν. Η διάμετροι των οπών επιλέγονται με βάση τα σχεδιαγράμματα των στοιχείων όπως προαναφέρθηκε και γύρω από κάθε οπή υπάρχει ένα στεφάνι χαλκού με πάχος 0,5 mm το οποίο αρκετό ώστε να κολλήσει το καλάνι μετέπειτα. Πρέπει αν σημειωθεί ότι ορισμένες οπές που θα περάσουν pins στοιχείων τα οποία δεν θα κάνουν κάποια λειτουργία στο κύκλωμα έχουν μικρότερη διάμετρο και λεπτότερο πάχος χάλκινου στεφανιού γύρω τους, λόγω του ότι βοηθάνε απλά στην καλύτερη στήριξη του στοιχείου πάνω στην πλακέτα.

Το επόμενο πολύ σημαντικό βήμα για την σχεδίαση της πλακέτας είναι η χάραξη των διαδρομών (traces), δηλαδή των ηλεκτρικών συνδέσεων μεταξύ των στοιχείων, ακολουθώντας ορισμένους κανόνες ανάλογα με το είδος των συνδέσεων. Για παράδειγμα, οι διαδρομές που τροφοδοτούν τα στοιχεία του κυκλώματος μεταφέρουν περισσότερο ρεύμα οπότε πρέπει να έχουν μεγαλύτερο πάχος από τις διαδρομές που μεταφέρουν το σήμα για εξασθένηση. Σε αντίθετη περίπτωση θα υπερθερμανθούν, με αποτέλεσμα να λιώσουν δημιουργώντας ανοιχτό κύκλωμα. Για το λόγο αυτό γίνεται αρχικά υπολογισμός του πάχους που θα επιλέξουμε για την κάθε διαδρομή ανάλογα με τα ρεύματα που τις διαρρέουν, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

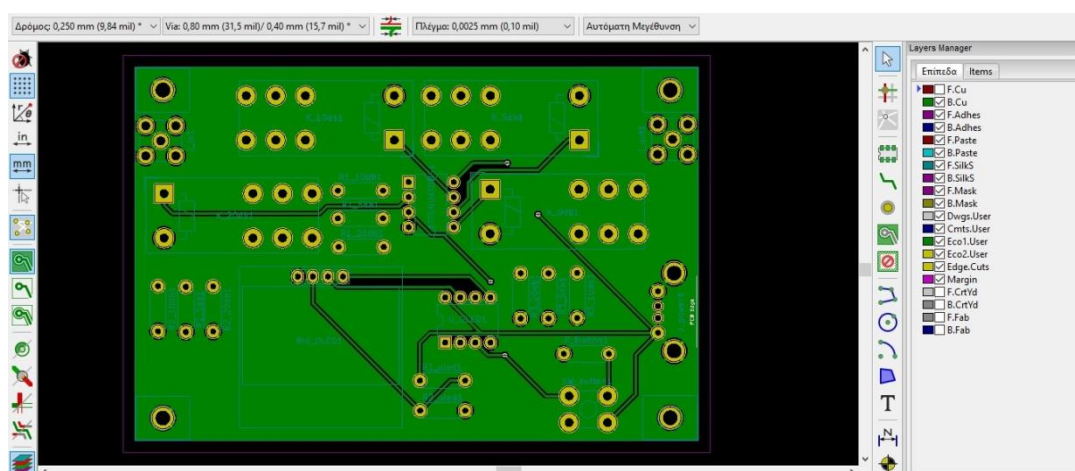
- Microcontroller current (VCC and GND) = 200 mA \Rightarrow Trace width = 0,03 mm
- Microcontroller current (per I/O) = 40mA \Rightarrow Trace width = 0,004 mm
- Oled display sink current = 15mA \Rightarrow Trace width = 0,001 mm
- Signal current = 4-20 mA \Rightarrow Trace width = 0,0002 – 0,0015 mm

Σημειώνεται ότι τα τελικά πάχη των διαδρομών έχουν επιλεγεί να είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από αυτά που ικανοποιούν τα παραπάνω ρεύματα, για λόγους ασφαλείας.

Στο κύκλωμα του συγκεκριμένου εξασθενητή υπάρχουν δύο είδη συνδέσεων μεταξύ των στοιχείων. Ορισμένες είναι για την τροφοδοσία των στοιχείων και την μεταφορά εντολών από τους microcontrollers και οι υπόλοιπες για την μεταφορά του εισερχόμενου σήματος προς εξασθένιση. Έτσι, για την καλύτερη δρομολόγηση των συνδέσεων ώστε να αποφευχθούν οι διασταυρώσεις ή τα μεγάλα μήκη των διαδρομών, θα χρησιμοποιηθούν και οι δύο όψεις της πλακέτας. Πιο αναλυτικά, στην πάνω πλευρά της πλακέτας θα χαραχθούν οι διαδρομές του εισερχόμενου σήματος ενώ στην κάτω πλευρά οι υπόλοιπες, όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 4.2.7 – Χάραξη διαδρομών (πάνω πλευρά)



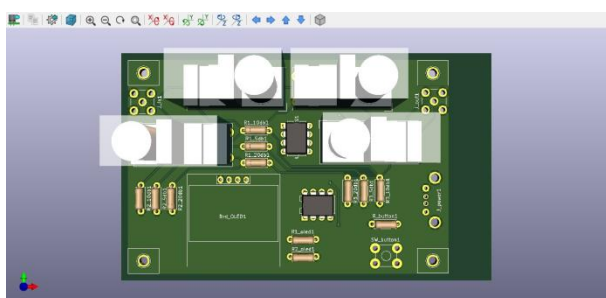
Σχήμα 4.2.8 – Χάραξη διαδρομών (κάτω πλευρά)

Ακόμα, παρατηρείται ότι δύο διαδρομές (τροφοδοσίας και ελέγχου από το push button του ενός microcontroller) διακόπτονται στην κάτω πλευρά της πλακέτας, έπειτα συνεχίζονται στην πάνω πλευρά από το ίδιο σημείο, ξανά διακόπτονται και συνεχίζονται πάλι από το ίδιο σημείο στην κάτω πλευρά μέχρι να φτάσουν στις τελικές συνδέσεις τους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μικρότερων οπών (vias), από τις οπές που περνάνε τα pins των στοιχείων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των δύο πλευρών της πλακέτας στην περίπτωση που θέλουμε να αποφύγουμε την διασταύρωση των διαδρομών.

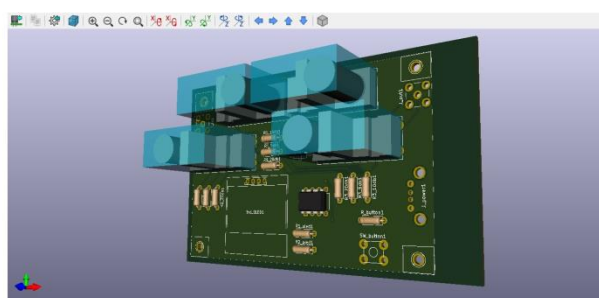
Επίσης, τα όλα τα στοιχεία του κυκλώματος πάνω στην πλακέτα είναι προσανατολισμένα σε γωνίες 90° ενώ οι διαδρομές είναι ευθύγραμμα τμήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε γωνίες 45° και 90°. Αυτό συμβαίνει για κατασκευαστικούς λόγους αφού τα μηχανήματα που τυπώνουν τις πλακέτες μετακινούν τα μέρη τους σε ευθείες γραμμές και με γωνίες 45° και 90°. Ακόμα, καλό είναι να μην χαράζονται διαδρομές με οξείες γωνίες για το λόγο ότι κάποια μηχανήματα χρησιμοποιούν χημικές ουσίες οι οποίες συσσωρεύονται στα σημεία ένωσης των ευθύγραμμων τμημάτων που μελλοντικά φθείρουν τον χαλκό και δημιουργούν ανοιχτό κύκλωμα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην περίπτωση που μεταφέρεται σήμα υψηλής συχνότητας (της τάξεως των GHz) θα πρέπει να αποφεύγονται στην χάραξη των διαδρομών οι γωνίες των 90° επειδή δημιουργούνται πολλές ανακλάσεις του σήματος.

Τέλος, το πρόγραμμα σχεδίασης που χρησιμοποιείται παρέχει την δυνατότητα 3D απεικόνισης της πλακέτας μετά την ολοκλήρωση της όλης διαδικασίας όπως φαίνεται παρακάτω.



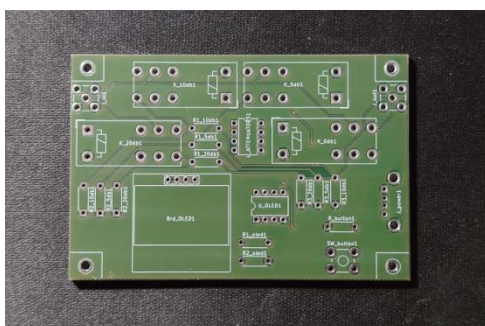
Σχήμα 4.2.9 – PCB πλακέτα 3D (front)



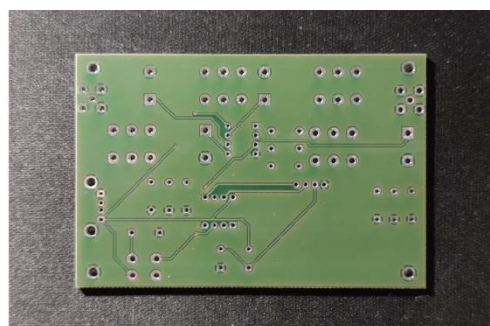
Σχήμα 4.2.10 – PCB πλακέτα 3D (side)

4.3 Υλοποίηση του βηματικού εξασθενητή

Μετά τον σχεδιασμό της πλακέτας που περιλαμβάνει τις οπές και τις διαδρομές για την σύνδεση των ηλεκτρονικών στοιχείων μεταξύ τους γίνεται η τύπωσή της. Τα σχετικά αρχεία του σχεδιαστικού προγράμματος αποστέλλονται σε εταιρεία τύπωσης πλακετών PCB ώστε να υλοποιηθεί η πλακέτα και έπειτα να γίνει η συγκόλληση των στοιχείων πάνω της. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι δύο πλευρές της τυπωμένης πλέον πλακέτας.



Σχήμα 4.3.1 – PCB πλακέτα τυπωμένη (front)



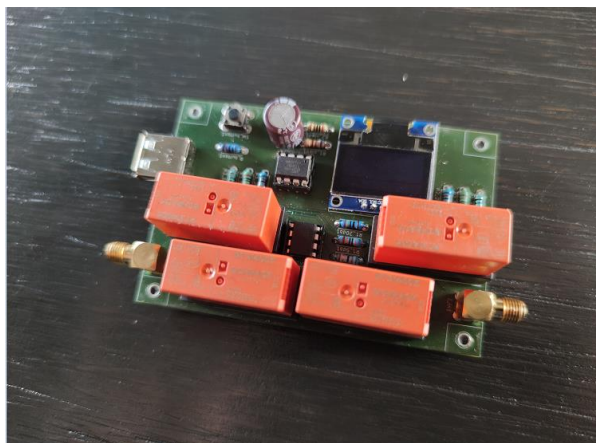
Σχήμα 4.3.2 – PCB πλακέτα τυπωμένη (back)

Κάποια άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά της τυπωμένης πλακέτας είναι τα εξής:

- Υλικό βάσης: FR-4
- Πάχος βάσης: 1,5 mm
- Πάχος χαλκού: 35 μm
- Τύπος τύπωσης: Διπλή όψη
- Χρώμα μάσκας: Πράσινο
- Τελείωμα επιφανείας: HAL (κασσίτερος)
- Είδος κοπής: V-cut

Αξίζει να σημειωθεί ότι με βάση τα υλικά που χρησιμοποίησε η εταιρεία για την υλοποίηση της πλακέτας το σήμα που θα περάσει από τις χάλκινες διαδρομές της μπορεί να φτάσει και σε συχνότητες μερικών GHz.

Στο επόμενο βήμα γίνεται η συγκόλληση των ηλεκτρονικών στοιχείων στην πλακέτα σύμφωνα με την ονοματοδοσία που υπάρχει πάνω της, χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό κολλητήρι και καλάι. Ακόμα, έγινε πλαστικοποίηση της κάτω πλευράς της πλακέτας με σπρέι, προστατεύοντάς την από την υγρασία ή υψηλές θερμοκρασίες τα οποία μελλοντικά την καταστρέφουν. Η ολοκληρωμένη πλακέτα με το κύκλωμα του βηματικού εξασθενητή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.3.

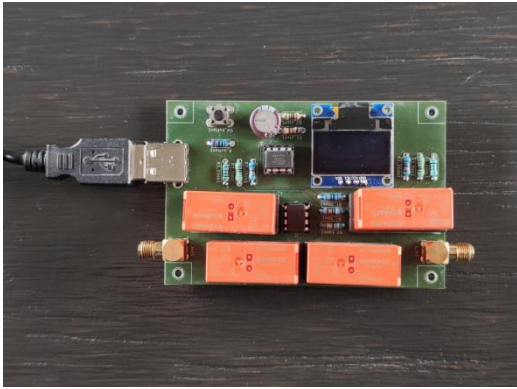


Σχήμα 4.3.3 – Βηματικός εξασθενητής

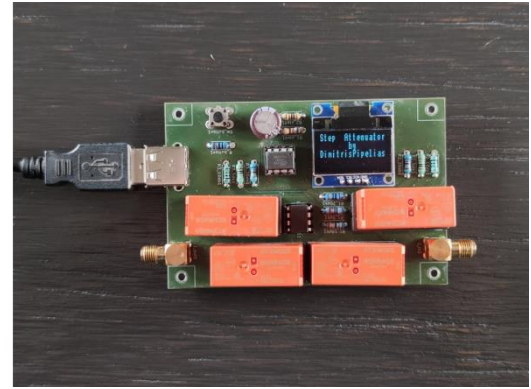
Η τροφοδοσία του συγκεκριμένου κυκλώματος γίνεται συνδέοντάς το με ένα καλώδιο USB male/male ώστε να μπορεί να συνδεθεί σε φορτιστή τοίχου (με OutPut: 5V, 1A) είτε απευθείας σε θύρα USB 2 ενός Η/Υ.

Επίσης, είναι πρέπει να αναφερθεί η μικρή μετατροπή που έγινε στο κύκλωμα καθώς στην πράξη, η τάση που έπαιρνε η Oled οθόνη μειωνόταν απότομα από την αρχική της τιμή κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα, με αποτέλεσμα να υπολειτουργεί. Έτσι, συνδέθηκε παράλληλα με τη μία αντίσταση ($R2_{oled}$) του διαιρέτη τάσης ένας πυκνωτής 100μF ο οποίος εξομαλύνει τις απότομες διακυμάνσεις της τάσεως τροφοδοσίας της Oled οθόνης αποτρέποντάς την από το να “κολλήσει”.

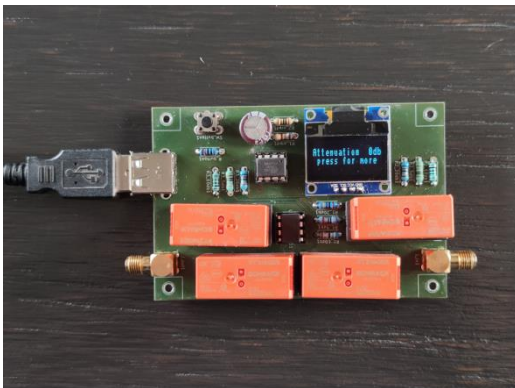
Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζεται η λειτουργία του βηματικού εξασθενητή όταν τελικώς συνδεθεί με ένα φορτιστή τοίχου. Φαίνονται ενδεικτικά τα μηνύματα που εμφανίζονται στην Oled οθόνη κατά την εκκίνησή του καθώς και η ένδειξη της εξασθένησης των 10 dB με την χρήση του push button.



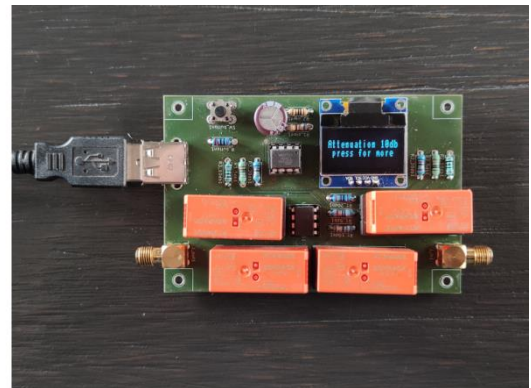
Σχήμα 4.3.4 – Βηματικός εξασθενητής (τροφοδοσία)



Σχήμα 4.3.5 – Βηματικός εξασθενητής (εισαγωγικές πληροφορίες)



Σχήμα 4.3.6 – Βηματικός εξασθενητής (χωρίς εξασθένιση)

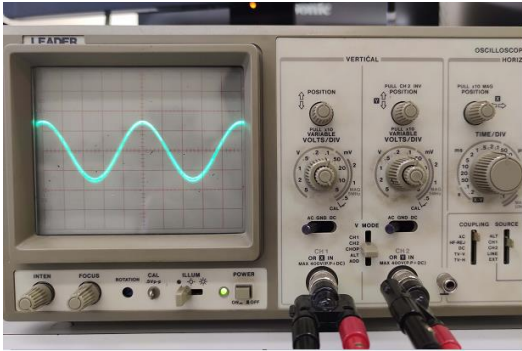


Σχήμα 4.3.7 – Βηματικός εξασθενητής (εξασθένιση 10dB)

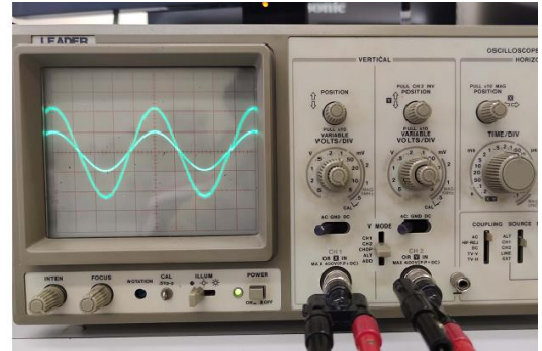
4.4 Δοκιμή του εξασθενητή

Σε αυτήν την υποενότητα θα γίνει ο έλεγχος του κυκλώματος του εξασθενητή, χρησιμοποιώντας μία πηγή τάσης και έναν παλμογράφο, ώστε να επαληθευτεί η εξασθένιση που θα μπορέσει να προκαλέσει σε ένα σήμα. Η δοκιμή στο εργαστήριο γίνεται μεταφέροντας στην είσοδο του κυκλώματος ένα ημιτονοειδές σήμα συχνότητας 1kHz και πλάτους $1V_{pp}$ (peak to peak) και ελέγχοντας την εξασθένιση του εξερχόμενου σήματος στην οθόνη του παλμογράφου.

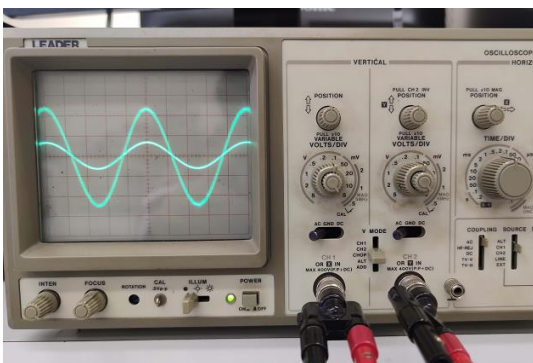
Πιο συγκεκριμένα, στον παλμογράφο θα απεικονίζονται δύο σήματα, αυτό της εισόδου και αυτό της εξόδου, έτσι ώστε να γίνεται άμεσα η σύγκριση και ο υπολογισμός της αντίστοιχης εξασθένησης.



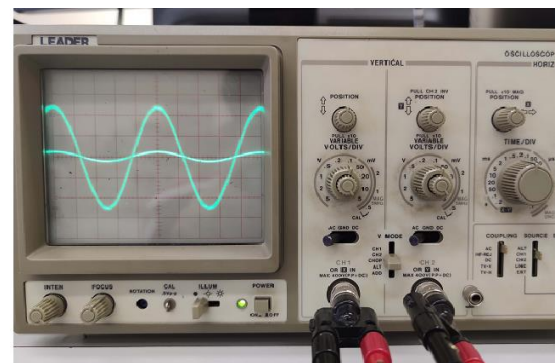
Σχήμα 4.4.1 – Χωρίς εξασθένηση (είσοδος-έξοδος)



Σχήμα 4.4.2 – Εξασθένηση 5dB (είσοδος-έξοδος)



Σχήμα 4.4.3 – Εξασθένηση 10dB (είσοδος-έξοδος)



Σχήμα 4.4.4 – Εξασθένηση 20dB (είσοδος-έξοδος)

Στη συνέχεια μπορώ να αντικαταστήσω τις μετρήσιμες τιμές των μεγίστων (peaks) των ημιτόνων στις αντίστοιχες εξισώσεις που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα και να υπολογίσω τις εξασθενήσεις.

Οπότε, για τον πρώτο εξασθενητή έχουμε:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{ppin}}{V_{ppout}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4.5 \times 0.1V}{2 \times 0.1V} \right) = 7dB$$

για τον δεύτερο εξασθενητή έχουμε:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{pp_{in}}}{V_{pp_{out}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4.8 \times 0.1V}{1.35 \times 0.1V} \right) = 11dB$$

και για τον τρίτο εξασθενητή έχουμε:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{pp_{in}}}{V_{pp_{out}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4.9 \times 0.1V}{0.44 \times 0.1V} \right) = 20.9dB$$

Παρατηρείται ότι υπάρχουν αποκλίσεις στις τιμές των εξασθενήσεων από τις αναμενόμενες οι οποίες μάλιστα μικραίνουν καθώς η εξασθένιση αυξάνεται. Αυτή η παρέκκλιση στις τιμές των εξασθενήσεων είναι πιθανό να οφείλεται σε μικρές διαφορές των αντιστάσεων μεταξύ αυτών που έπρεπε να χρησιμοποιηθούν και αυτών που ήταν διαθέσιμων στην αγορά ή ακόμα και σε σφάλματα μέτρησης των οργάνων.

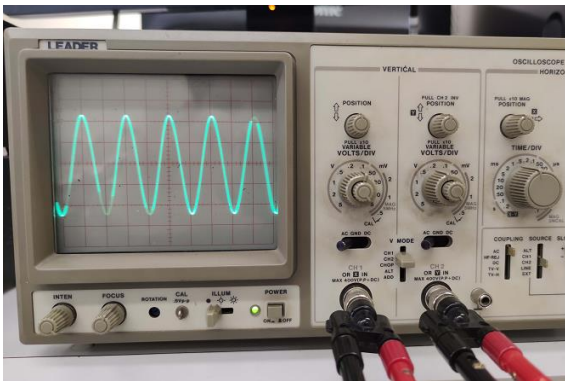
Επίσης, έγινε δοκιμή και σε ένα σταθερό εξασθενητή με αναγραφόμενη τιμή εξασθένισης τα 10dB, ο οποίος φαίνεται στο επόμενο σχήμα, ώστε να ελεγχθεί αν υπάρχει απόκλιση και πόσο με βάση τις ενδείξεις του παλμογράφου.



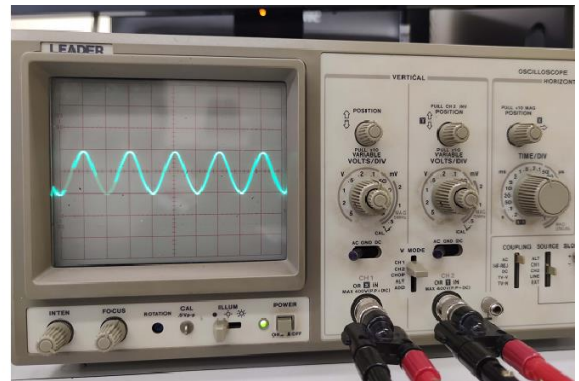
Σχήμα 4.4.5 – Σταθερός εξασθενητής 10dB

Στα σχήματα που ακολουθούν αναγράφονται το σήμα εισόδου και το σήμα εξόδου μετά την εξασθένιση που υπόκειται από τον σταθερό εξασθενητή έχοντας

πολλαπλασιάζει αυτή την φορά κάθε “εκατοστό” της τεταγμένης του ημιτόνου με 0.2V και 0.1V αντίστοιχα.



Σχήμα 4.4.6 – Χωρίς εξασθένηση (είσοδος)



Σχήμα 4.4.7 – Εξασθένηση 10dB (έξοδος)

Έτσι, για τον σταθερό εξασθενητή έχουμε:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{ppin}}{V_{ppout}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4.8 \times 0.2V}{2 \times 0.1V} \right) = 13.6dB$$

Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση στην εξασθένηση των 10dB που πρέπει να δημιουργεί ο σταθερός εξασθενητής (13.6dB) από την αντίστοιχη του βηματικού εξασθενητή (11dB) ο οποίος μελετήθηκε και κατασκευάστηκε σε αυτήν την εργασία.

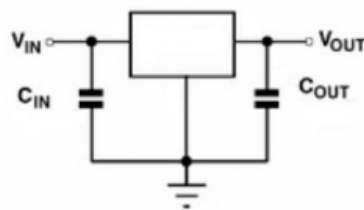
4.5 Βελτιστοποίηση του κυκλώματος

Είναι βέβαιο πως στο κύκλωμα μπορούν να υπάρξουν μελλοντικές αλλαγές για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να αφορούν την σταθεροποίηση της τάσης λειτουργίας του κυκλώματος καθώς και την αύξηση της τιμής του ρεύματος όπου αυτό χρειάζεται.

Ένα παράδειγμα για τη βελτιστοποίηση μέρους του κυκλώματος είναι η σταθεροποίηση της τάσης εισόδου στην Oled οθόνη. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί

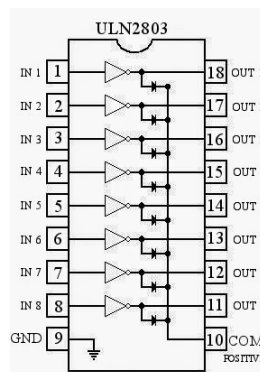
αντικαθιστώντας τις δύο αντιστάσεις του διαιρέτη τάσης που συνδέεται με την Oled οθόνη με έναν ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) στα 3,3V που χρειάζονται.

Ο συγκεκριμένος ρυθμιστής τάσης χρησιμοποιείται σε κυκλώματα για να μετατρέψει την τάση τροφοδοσίας τους των 5V σε τάση 3,3V. Συνδέεται με τα υπόλοιπα στοιχεία τους μέσω τριών pins (V_{in} , GND και V_{out}) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.1 και για την καλύτερη λειτουργία του σε απότομες αλλαγές της τάσης, συνήθως τοποθετούνται δύο πυκνωτές μεταξύ εισόδου-γείωσης και εξόδου-γείωσης.



Σχήμα 4.5.1 – Ρυθμιστής τάσης (voltage regulator)

Μία άλλη σημαντική βελτιστοποίηση που μπορεί να εφαρμοστεί έχει να κάνει με την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας των relays. Πιο συγκεκριμένα, τα relays χρειάζονται ρεύμα έντασης τουλάχιστον 10mA για την ενεργοποίησή τους και στην περίπτωση που δεν μπορεί να τους το παρέχει ο microcontroller, μπορούν να τοποθετηθούν ULN2803 microchips μεταξύ των εξόδων του microcontroller και των relays. Αυτά τα microchips μπορούν να μεταφέρουν περισσότερο ρεύμα μέχρι και σε 8 relays και αποτελούνται από μία συστοιχία τρανζίστορ σε συνδεσμολογία Darlington όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.5.2 – ULN2803 microchip

4.6 Εφαρμογές του εξασθενητή

Το κύκλωμα του συγκεκριμένου εξασθενητή έχει πολλές χρήσεις για να επιτευχθεί εξασθένηση στην ισχύ ή στο σήμα που θα εισέρθει σε μία ηλεκτρονική συσκευή. Ένα παράδειγμα εφαρμογής του είναι η μείωση του σήματος που στέλνει ή λαμβάνει ένας πομποδέκτης (USRP) εξασφαλίζοντας την προστασία του από την υπερφόρτωση.

Πιο συγκεκριμένα το USRP B210, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.1, έχει σαν χαρακτηριστικά για την σωστή λειτουργία του την μέγιστη ενίσχυση μεταδιδόμενου σήματος τα 20 dB και ελάχιστη εξασθένηση εισερχόμενου σήματος τα 15 dB.



Σχήμα 4.6.1 – USRP B210

Αυτό υποδηλώνει ότι θα πρέπει ανάμεσα στον πομποδέκτη και την κεραία να μεσολαβεί ο βηματικός εξασθενητής και ανάλογα με την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος να επιλεχθεί η επιθυμητή τιμή εξασθένησης ώστε η ισχύς του σήματος να μην υπερβαίνει τα -15 dBm κατά την είσοδό του στον πομποδέκτη.

Τέλος, στην περίπτωση που συνδέονται σε σειρά δύο USRPs B210 θα πρέπει πάλι να μεσολαβεί ένας εξασθενητής με τιμές εξασθένησης τουλάχιστον 35 dB λόγω του ότι η έξοδος (TX) του ενός USRP βγάζει μέγιστη ισχύ 20 dBm ενώ η είσοδος (RX) του δεύτερου USRP μπορεί να λάβει μέγιστη ισχύ -15 dBm όπως προαναφέρθηκε. Έτσι, για παράδειγμα τοποθετώντας ενδιάμεσα έναν εξασθενητή που δημιουργεί 40 dB εξασθένηση, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εισέρθει στον δεύτερο εξασθενητή θα είναι $20 \text{ dBm} - 40 \text{ dBm} = -20 \text{ dBm}$ ($< -15 \text{ dBm}$) η οποία είναι αποδεκτή.

Βιβλιογραφία

1. Caverly, R. (2016). *Microwave and RF Semiconductor Control Device Modeling*. Artech House Publishers.
2. Schure, A. (1961). *Filters and Attenuators*. New York, J.F. Rider.
3. Egan, W. F. (2003). *Practical RF System Design*. Wiley-IEEE Press.
4. Eskelinen, P. (2004). *Introduction to RF Equipment and System Design*. Artech House Publishers.
5. Richard W. Quine, M. T. (2010). *A Very Fast Switched Attenuator Circuit for Microwave and R.F. Applications*. Concepts Magn Reson Part B.
6. Song, I. (2018). *Design and Analysis of a Low Loss, Wideband Digital Step Attenuator With Minimized Amplitude and Phase Variations*. IEEE Journal of Solid-State Circuits.
7. White, J. F. (2016). *High Frequency Techniques: An Introduction to RF and Microwave Design and Computer Simulation*. Wiley-IEEE Press.
8. Beatty, R. W. (1967). *Microwave Attenuation Measurements and Standards*.
9. Retrieved from Electronics Tutorials: <https://www.electronicstutorials.ws/attenuators/attenuator.html>
10. Retrieved from All About Circuits: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-1/attenuators/>
11. Retrieved from Ettus Research: https://kb.ettus.com/B200/B210/B200mini/B205mini#B210_2
12. Retrieved from Advanced Circuits 4PCB: <https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>
13. Retrieved from Hel.Pro PCB: <http://www.pcb.gr/parameters.html>