



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Κατασκευή Ψηφιακά Ελεγχόμενης Πηγής Ρεύματος και του Τροφοδοτικού της

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Χ. Τσιμπούρης

Επιβλέπων: Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Κατασκευή Ψηφιακά Ελεγχόμενης Πηγής Ρεύματος και του Τροφοδοτικού της

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Χ. Τσιμπούρης

Επιβλέπων: Πάυλος-Πέτρος Σωτηριάδης

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Φεβρουαρίου 2025.

.....
Πάυλος-Πέτρος Σωτηριάδης

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025

.....
Γεώργιος Χ. Τσιμπούρης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Τσιμπούρης, 2025

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.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο ψηφιακός έλεγχος και η κατασκευή μίας πηγής ρεύματος με αναλογική έξοδο, η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 0 ως 42mA. Ο έλεγχος της επιτυγχάνεται με χρήση ενός ψηφιακού ποτενσιόμετρου και η τροφοδοσία της εξασφαλίζεται από ένα τροφοδοτικό, το οποίο επίσης κατασκευάστηκε. Ο έλεγχος του ποτενσιόμετρου αυτού γίνεται από έναν Arduino nano, για τον προγραμματισμό του οποίου γράφτηκε ένας κώδικας σε C++, ούτως ώστε η πλακέτα Arduino να δέχεται από τον χρήστη τις επιθυμητές τιμές ρεύματος ως εισόδους και να δίνει τις κατάλληλες εντολές στο ποτενσιόμετρο προς επίτευξή τους. Προκειμένου να τροφοδοτηθεί ο Arduino nano, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα επιπλέον τροφοδοτικό με διαφορετική τάση εξόδου από το προηγούμενο.

Αρχικά το κύκλωμα σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα LTspice με σκοπό την επίτευξη των προδιαγραφών. Ακολούθως έγιναν οι μετρήσεις σε δοκιμαστικές πλακέτες through hole για να εντοπιστούν τυχόν ασυμφωνίες με τα θεωρητικά αποτελέσματα και στην συνέχεια ακολούθησε η σχεδίαση στο πρόγραμμα Altium_Designer προκειμένου να γίνει η αναπαράσταση της διάταξης και των διασυνδέσεων των εξαρτημάτων πάνω στις τελικές πλακέτες. Τέλος, μετά την προμήθεια των κατάλληλων πλακετών PCB έγιναν οι οριστικές κολλήσεις, οι συνδέσεις των στοιχείων και η εισαγωγή τους σε ένα κουτί κατασκευών. Η επιλογή του επιθυμητού ρεύματος γίνεται από τον χρήστη με χρησιμοποίηση ενός ψηφιακού περιστροφικού κωδικοποιητή (digital rotary encoder) που βρίσκεται εξωτερικά και συνδέεται απευθείας με τον Arduino. Το επιθυμητό ρεύμα καθώς και κάποια άλλα δεδομένα αναγράφονται σε μία οθόνη lcd η οποία απαιτεί τάση 5V για την λειτουργία της. Για την προστασία του κυκλώματος και την αποτροπή διαφόρων κινδύνων τοποθετήθηκαν ασφάλειες σε κατάλληλα σημεία.

Λέξεις κλειδιά

Τελεστικός ενισχυτής, τρανζίστορ mosfet, Arduino nano, ψηφιακό ποτενσιόμετρο διπολικό τρανζίστορ, μετασχηματιστής, πυκνωτής, δίοδος, πλακέτα PCB ,οθόνη lcd

Abstract

The purpose of this work is the digital control and the construction of a current source with analog output, which can range from 0 to 42mA. Its control is achieved using a digital potentiometer and its power supply is ensured by a power supply, which was also manufactured. The control of this potentiometer is achieved by an Arduino nano, for the programming of which a code was written in C++, so that the Arduino board accepts from the user the desired current values as inputs and gives the appropriate commands to the potentiometer to achieve them. In order to power the Arduino nano, an additional power supply was designed and constructed with different output voltage level than the previous one.

Initially, the circuit was designed in the LTspice program in order to meet the specifications. Then, the measurements were made on through hole test boards to identify any mismatches with the theoretical results and the design in the Altium Designer program was followed in order to represent the layout and interconnections of the components on the final boards. Finally, after obtaining the appropriate boards PCB the final glueing, the connections of the elements and their insertion into a construction box were made. The selection of the desired current is done by the user, using a digital rotary encoder located externally and connected directly to the Arduino. The desired current as well as other data are indicated on an LCD display, which requires 5V voltage for its operation. To protect the circuit and prevent various hazards, fuses were placed in appropriate places.

Keywords

Operational amplifier, mosfet transistor, Arduino nano, digital potentiometer, bipolar transistor, transformer, capacitor, diode, PCB board, lcd display

Ευχαριστίες

Επιθυμώ να ευχαριστήσω τον καθηγητή ΕΜΠ κύριο Παύλο-Πέτρο Σωτηριάδη που είναι ο επιβλέπων αυτής της εργασίας για την βοήθεια του και για τις πολύτιμες επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφερε σε αυτό το έτος, αλλά και στα προηγούμενα. Ευχαριστώ επίσης τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κύριο Α. Παναγόπουλο και τον κύριο Α. Αντωνόπουλο, αλλά και τους μεταδιδακτορικούς ερευνητές Γ. Γεωργούση, Χ. Δήμα και Κ. Ασημακόπουλο για το προσωπικό τους ενδιαφέρον. Ευχαριστώ τους γονείς μου για την δική τους σημαντική βοήθεια στην αποπεράτωση των σπουδών μου. Ιδιαίτερη όμως αναφορά επιθυμώ να κάνω στο πρόσωπο της εκ μητρός γιαγιάς μου Αναστασίας Καραχάλιου-Καλτσά, η βοήθεια της οποίας είναι ανεκτίμητη. Την ευχαριστώ για την καθοριστική επιρροή της στη ζωή μου από τη στιγμή που γεννήθηκα μέχρι σήμερα καθώς και για την κολοσσιαία προσφορά της στην εκπαιδευτική μου πορεία. Η ολόψυχη αφιέρωση σε αυτήν της παρούσας διπλωματικής εργασίας, την οποία λόγοι εγκάρδιας αγάπης και δικαιοσύνης επιβάλουν, αποτελεί μία μηδαμινής αξίας έκφραση ευγνωμοσύνης για την υπεράνθρωπη και ειλικρινή στήριξή της και η σύγκριση με αυτήν δεν αξίζει να παραλληλιστεί ούτε με την προσφορά του Διομήδη στον Γλαύκο των χάλκινων όπλων του έναντι των χρυσών δεκαπλάσιας αξίας που έλαβε από εκείνον (Ιλιάδα, Ζ 234-236).

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή.....	11
Κεφάλαιο 1. Θεωρητική Ανάλυση.....	13
1.1) Τροφοδοτικό πηγής ρεύματος.....	14
1.2) Πηγή ρεύματος.....	17
1.3) Τροφοδοτικό 11V.....	22
Κεφάλαιο 2. Σύνδεση του συνολικού κυκλώματος σε δοκιμαστική πλακέτα.....	23
Κεφάλαιο 3. Χρήση του Altium Designer για την σχεδίαση των σχηματικών της διάταξης.....	28
Κεφάλαιο 4. Προγραμματισμός πλακέτας Arduino nano.....	32
4.1) Εισαγωγή στον Arduino nano.....	32
4.2) Περιγραφή της λειτουργίας του ψηφιακού περιστροφικού κωδικοποιητή και της επικοινωνίας του με την πλακέτα Arduino nano.....	34
4.3) Περιγραφή ψηφιακού ποτενσιόμετρου.....	36
4.4) Σύνδεση πλακέτας με την οθόνη lcd.....	37
4.5) Ανάλυση και παρουσίαση του κώδικα για τον προγραμματισμό του Arduino Nano Every της εργασίας.....	38
4.5.1) Ονομασία θυρών του Arduino και ορισμός απαραίτητων συναρτήσεων πριν την συνάρτηση void setup().....	39
4.5.2) Η συνάρτηση void setup().....	43
4.5.3) Η συνάρτηση void loop ().....	44
4.5.4) Παράθεση του κώδικα.....	45
Κεφάλαιο 5. Τελική πλήρης κατασκευή και λειτουργία της διάταξης.....	51
Βιβλιογραφία.....	53

Εισαγωγή

Το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος και η κατασκευή μίας πηγής ρεύματος που περιλαμβάνει ψηφιακό τμήμα (το οποίο εξασφαλίζεται με την παρουσία ενός ψηφιακού ποτενσιόμετρου) και του τροφοδοτικού της. Η συνολική διάταξη λειτουργεί λαμβάνοντας ηλεκτρική τάση ενεργού τιμής 230 V και παράγει στην έξοδό της ηλεκτρικό ρεύμα που δύναται να κυμαίνεται, ανάλογα με την επιλογή του χρήστη, από 0 ως 42 mA. Η επιλογή αυτή γίνεται με χρήση ενός ψηφιακού περιστροφικού κωδικοποιητή (digital rotary encoder) στο εξωτερικό και είναι ορατή στον χρήστη, μέσω μίας οθόνης υγρών κρυστάλλων (liquid-crystal display- lcd).

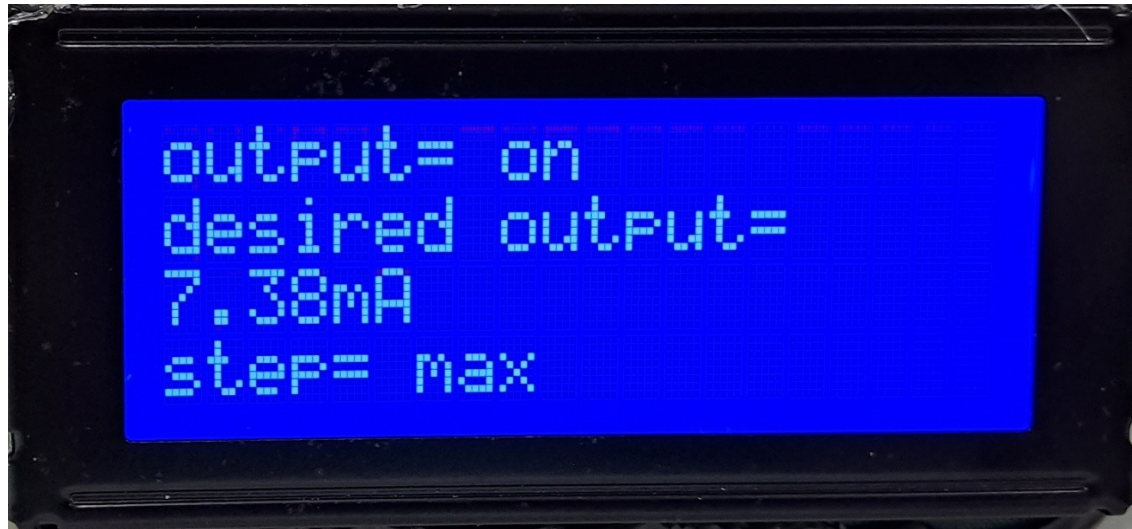
Στο εσωτερικό της κατασκευής τα στοιχεία που συγκροτούν το συνολικό κύκλωμα, δηλαδή την πηγή και το τροφοδοτικό της, βρίσκονται ενσωματωμένα πάνω σε δύο πλακέτες PCB. Για την επιθυμητή λειτουργία του κυκλώματος έχει επιλεγεί ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο που ελέγχεται από έναν καταλλήλως προγραμματισθέντα Arduino nano, ο οποίος συνδέεται επίσης στον εξωτερικό ψηφιακό κωδικοποιητή από τον οποίο δέχεται τις εισόδους του, αλλά και στην οθόνη lcd στην οποία εμφανίζονται τα επιθυμητά δεδομένα. Συγκεκριμένα, ο χρήστης περιστρέφει την λαβή του ευρισκόμενου στο εξωτερικό του κουτιού κωδικοποιητή επιλέγοντας έτσι της τιμή ρεύματος στην έξοδο. Αυτή η ενέργεια προκαλεί την λήψη κάποιων δεδομένων από τον Arduino nano, ο οποίος ακολούθως μεταβάλλει την αντίσταση στον δρομέα του ψηφιακού ποτενσιόμετρου με την αποστολή κατάλληλης εντολής, πράγμα που θα επιφέρει την εμφάνιση της επιθυμητής τιμής ρεύματος στην έξοδο της πηγής, βάσει της ανάλυσης που θα ακολουθήσει. Ταυτόχρονα, η ενημέρωση του χρήστη για την κατάσταση της εξόδου εξασφαλίζεται με την εμφάνιση αυτής στην οθόνη lcd, μεταξύ άλλων δεδομένων που θα παρουσιαστούν κατωτέρω. Προκειμένου να επιτευχθεί η ορθή λειτουργία, είναι απαραίτητο η πλακέτα Arduino nano να εκτελεί έναν κώδικα, γραμμένο σε C++, που συντάχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino IDE για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας.

Η τροφοδοσία του Arduino γίνεται από ένα τροφοδοτικό που παράγει την απαιτούμενη τάση (11V), το οποίο κατασκευάστηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής και βρίσκεται επίσης στο εσωτερικό του κουτιού σε ξεχωριστή τρίτη πλακέτα PCB. Ο χρήστης μπορεί να προσθέσει στην έξοδο της πηγής οποιοδήποτε φορτίο επιθυμεί, του οποίου η αντίσταση εισόδου βρίσκεται κάτω από 100Ω, χωρίς να επηρεασθεί το ρεύμα που παρέχει η πηγή. Για την προστασία του κυκλώματος αλλά και την αποτροπή ανεπιθύμητων ενεργειών, όπως η υπερθέρμανση, προστέθηκαν ασφάλειες σε ορισμένα σημεία και ό,τι άλλο κρίθηκε απαραίτητο (πχ ψύκτρες, δίοδοι κ.λπ.), όπως θα αναλυθεί.

Σε πρώτο στάδιο μελετήθηκαν κάποιες σημειώσεις και έγινε χρήση κάποιων βιβλίων, τα οποία παρατίθενται στην βιβλιογραφία στο τέλος της εργασίας και σχετίζονται με ηλεκτρονικά κυκλώματα, ψηφιακό έλεγχο και προγραμματισμό και έπειτα ακολούθησε η σταδιακή σχεδίαση και υλοποίηση, όπως θα παρουσιαστεί.

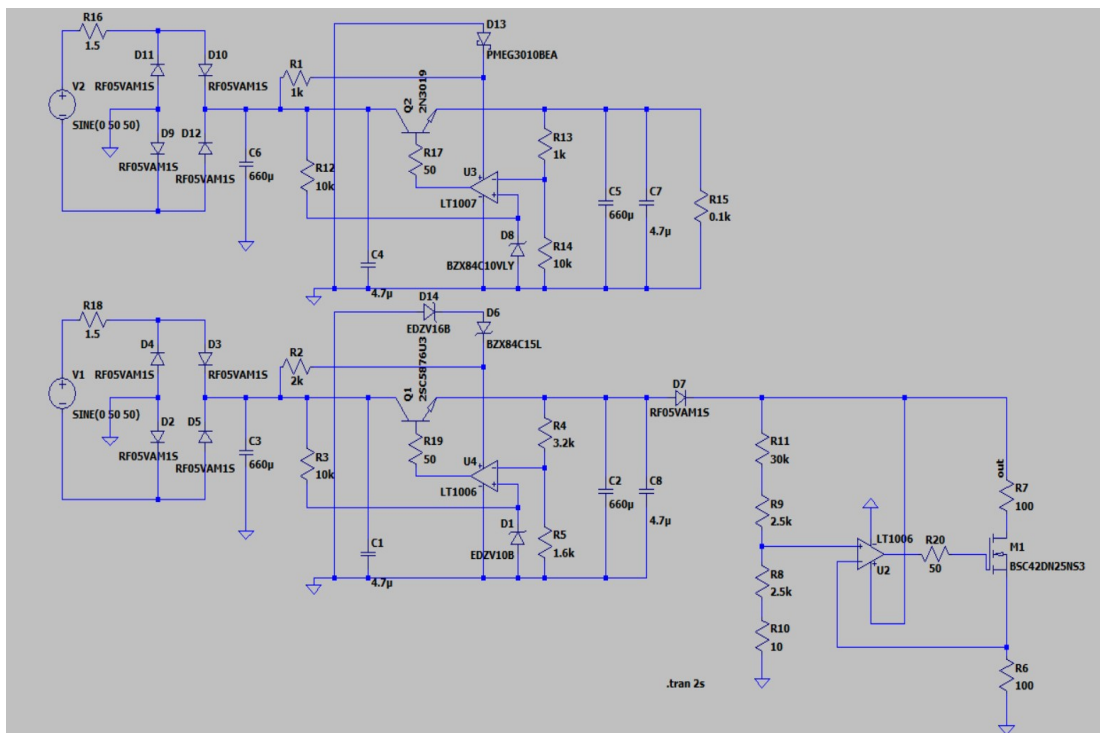
Στα παρακάτω κεφάλαια αναλύονται κατά σειρά: στο πρώτο κεφάλαιο η θεωρητική μελέτη και λειτουργία της διάταξης, αλλά και η σχεδιάσή της και η προσομοίωση στο πρόγραμμα LTspice (συνοδευόμενη από την παράθεση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης), στο δεύτερο κεφάλαιο οι δοκιμαστικές μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο, στο τρίτο η σχεδίαση που ακολούθησε στο πρόγραμμα Altium Designer, στο τέταρτο ο τρόπος λειτουργίας της πλακέτας Arduino nano, καθώς και το ψηφιακό ποτενσιόμετρο, ο digital encoder, η οθόνη lcd και ο προγραμματισμός του Arduino nano (παρουσίαση και ανάλυση του κώδικα που τελικά εκτελεί) και τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο το τελικό στάδιο της εργασίας, που περιλαμβάνει την πρακτική κατασκευή του κυκλώματος σε πλακέτες PCB και την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του.

Κεφάλαιο 1. Θεωρητική Ανάλυση



Κεφάλαιο 1. Θεωρητική Ανάλυση

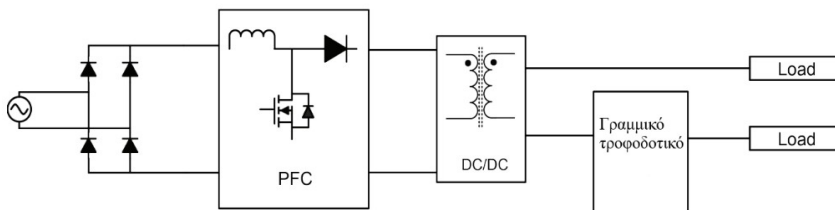
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η λειτουργία των κυκλωμάτων[1-5] [7], παρατίθεται η σχεδιάσή τους στο πρόγραμμα LTspice καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την θεωρητική ανάλυσή. Αρχικά, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η πηγή ρεύματος και το τροφοδοτικό της (κάτω τροφοδοτικό), αλλά και το τροφοδοτικό για το Arduino και τα λοιπά στοιχεία (άνω τροφοδοτικό), όπως σχεδιάστηκαν στο LTspice και ακολουθεί η ανάλυση, με αναφορές σε αυτό το σχήμα. Το ποτενσιόμετρο παριστάνεται ως διαιρέτης τάσης με δύο αντιστάσεις (R8, R9) συνολικής ωμικής αντίστασης 5kΩ στην θετική είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, που βρίσκεται στην ανάδραση της πηγής ρεύματος, ενώ στην θέση του φορτίου έχει τοποθετηθεί μία αντίσταση (R7) 100Ω.



Εικόνα 1.1. Η πηγή ρεύματος και τα δύο τροφοδοτικά σχεδιασμένα στο LTspice

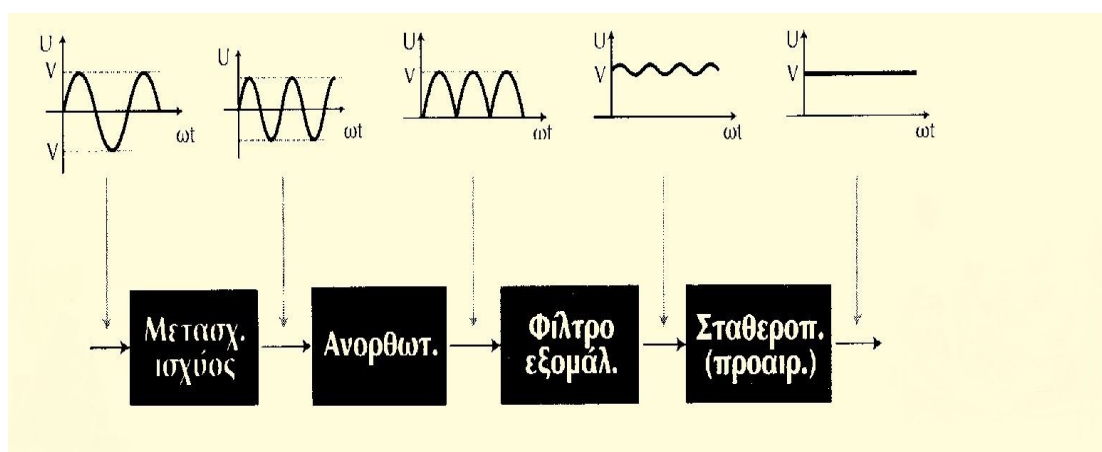
1.1) Τροφοδοτικό πηγής ρεύματος:

Η γενική μορφή ενός τροφοδοτικού, δηλαδή μίας συσκευής που παράγει συνεχή τάση, παρουσιάζεται στην εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2. Γενική μορφή τροφοδοτικού

Μεταξύ της ανορθωτικής διάταξης και του μετατροπέα dc/dc, συνήθως είναι η παρεμβολή ενός σταδίου power factor correction (PFC), παθητικού ή (συνήθως) ενεργητικού όπως ενός boost converter, για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος (λόγος πραγματικής προς φαινόμενη ισχύ) και την επίτευξη ταύτισης της φάσης του ρεύματος με αυτή της τάσης. Μετά τον dc/dc μετατροπέα βρίσκεται η θέση ενός γραμμικού τροφοδοτικού, με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία. Η γενική μορφή ενός γραμμικού τροφοδοτικού πρέπει να περιλαμβάνει τέσσερα στάδια. Πρώτα πρώτα, παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα και εν συνεχεία αναλύονται τα επιμέρους τμήματα της, όπως υλοποιήθηκαν για τα δύο τροφοδοτικά στα πλαίσια της διπλωματικής:



Εικόνα 1.3. Γενική μορφή γραμμικού τροφοδοτικού

Το τροφοδοτικό της πηγής ρεύματος επιθυμούμε να παραγάγει σταθερή τάση 30V, η οποία θα τροφοδοτήσει το κύκλωμα της πηγής. Στο πρώτο του στάδιο έχει έναν μετασχηματιστή. Αποτελείται από δύο πηνία (πρωτεύον και δευτερεύον) τυλιγμένα γύρω από έναν σιδερένιο πυρήνα, με λόγο σπειρών 6.5:1. Το πρωτεύον λαμβάνει εναλλασσόμενη τάση ενεργούς τιμής 230V και συχνότητας 50Hz. Σύμφωνα με τον λόγο μετασχηματισμού το δευτερεύον παράγει τάση ενεργούς τιμής 35V, ίδιας συχνότητας. Επιπρόσθετα, η παρουσία του μετασχηματιστή εξασφαλίζει ηλεκτρική απομόνωση του κυκλώματος από την γραμμή μεταφοράς. Στο άνωθεν σχήμα (εικόνα 1.1. κύκλωμα στο LTspice) δεν συμπεριλαμβάνεται ο μετασχηματιστής. Το δευτερεύον πηνίο του αναπαρίσταται με μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης από 0V μέχρι $(2)^{1/2} \cdot 35 = 50V$. Επειδή και για τα δύο τροφοδοτικά απαιτείται η τάση του δευτερεύοντος πηνίου του μετασχηματιστή των πρώτων τους σταδίων να είναι εναλλασσόμενη ίδιας συχνότητας και ιδίου πλάτους, στο τελικό στάδιο της πρακτικής κατασκευής δεν χρησιμοποιήθηκαν δύο, αλλά ένας μετασχηματιστής περιλαμβάνων δύο δευτερεύοντα πηνία, έχοντα τον ίδιο λόγο σπειρών ως προς το πρωτεύον.

Η έξοδος του δευτερεύοντος πηνίου συνδέεται με μία ανορθωτική διάταξη με διόδους, που συνιστά το επόμενο στάδιο του τροφοδοτικού. Αποτελείται από τέσσερις διόδους (στο LTspice επιλέχθηκε ο τύπος RF05VAM1S) συνδεδεμένες κατάλληλα ούτως ώστε από αυτή την διάταξη να διέρχεται σήμα για οποιαδήποτε

τιμή του περιοδικού σήματος τάσης. Συγκεκριμένα, όταν άγουν οι δίοδοι D2, D3 (καθώς μόνο αυτές είναι ορθά πολωμένες), οι D4, D5 βρίσκονται σε αποκοπή. Αντίστοιχα στην αντίθετη περίπτωση άγουν οι D4, D5 και βρίσκονται σε αποκοπή οι D2, D3. Η diode είναι μη γραμμικό στοιχείο και ως εκ τούτου το διερχόμενο δι' αυτής ρεύμα κατά την διάρκεια της αγωγής της (υπό συνθήκες ορθής πόλωσης) δεν μεταβάλλεται γραμμικά αλλά εκθετικά, σύμφωνα με την σχέση: $I = I_S(e^{u/V_T}-1)$, με I_S ρεύμα κορεσμού εξαρτώμενο από την θερμοκρασία και τις διαστάσεις της diode, V_T θερμική τάση (σταθερή για δεδομένη θερμοκρασία) και u η τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες της. Επίσης τότε παρουσιάζεται πτώση τάσης περίπου 0,7V, στα άκρα της. Ως εκ τούτου, το σήμα τάσης στην έξοδο της γέφυρας θα είναι συνεχώς κυμαινόμενο με ανώτερη τιμή σχεδόν τα 50V (για την ακρίβεια λίγο πιο κάτω από αυτήν την τιμή εξαιτίας της πτώσης τάσης στα άκρα της μικρής αντίστασης του σχήματος, αλλά και στα άκρα των αγουσών diode). Προτιμάται ο όρος «συνεχώς κυμαινόμενο σήμα τάσης» και αποφεύγεται η χρήση του όρου «εναλλασσόμενη τάση», καθώς η πολικότητα του σήματος δεν μεταβάλλεται.

Όμως, μετά από αυτό το στάδιο απαιτείται η ύπαρξη ενός φίλτρου. Η προσθήκη ενός πυκνωτή 660μF μετά την γέφυρα, λειτουργεί ως φίλτρο καθώς μειώνει δραστικά τις διακυμάνσεις εξασφαλίζοντας ότι το σήμα τάσης θα είναι σχεδόν σταθερό γύρω από μία τιμή λίγο μικρότερη από 48V, λόγω της προαναφερθείσης επίδρασης των πτώσεων τάσης, παρουσιάζοντας μόνο πολύ μικρού πλάτους διακυμάνσεις. Εν παραλλήλω με αυτόν υπάρχει και ένας μη ηλεκτρολυτικός πυκνωτής μικρής τιμής 4,7μF, ο οποίος λόγω της γρήγορης απόκρισής του φιλτράρει τις υψίσυχνες αρμονικές. Το στάδιο που ακολουθεί (τελευταίο της διάταξης του τροφοδοτικού) είναι ένας σταθεροποιητής τάσης που παράγει το επιθυμητό σήμα για την τροφοδοσία της πηγής ρεύματος, δηλαδή ένα στερούμενο κυματώσεων συνεχές σήμα τιμής 30V, ανεξάρτητο από τις μεταβολές ρεύματος του φορτίου του τροφοδοτικού. Αποτελείται από ένα κύκλωμα ανάδρασης με έναν τελεστικό ενισχυτή. Χρησιμοποιήθηκε ένα NPN διπολικό τρανζίστορ (BJT) τύπου 2SC5876U3, ο συλλέκτης του οποίου συνδέεται στην έξοδο της ανορθωτικής διάταξης, η βάση του μέσω μίας μικρής ωμικής αντίστασης 50Ω στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή και ο εκπομπός του δίνει το σήμα εξόδου του τροφοδοτικού.

Ο επιλεγθείς τύπος του τελεστικού ενισχυτή είναι ο LT1006. Το ρεύμα που εμφανίζεται στους ακροδέκτες εισόδου είναι μηδενικό. Το κέρδος του θεωρείται πολύ υψηλό. Για να διασφαλιστεί η λειτουργία του απαιτείται dc τάση. Έτσι, στον ακροδέκτη της θετικής τροφοδοσίας προστέθηκαν δύο συνδεδεμένες σε σειρά ανάστροφα πολωμένες diode Zener (όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1), με τάση κατάρρευσης 15V και 16V αντίστοιχα, ώστε ο ενισχυτής να λαμβάνει συνολική τάση 31V. Η αντίσταση των 2kΩ καθορίζει το ρεύμα που διέρχεται από αυτές. Ως γνωστόν η diode Zener αποτελεί ειδικό τύπο diode που λειτουργεί στην περιοχή διάσπασης, δηλαδή όταν η απόλυτη τιμή της τάσης ανάστροφης πόλωσης υπερβαίνει μία οριακή τιμή (τάση κατάρρευσης). Το φαινόμενο δεν είναι

καταστροφικό εφόσον η καταναλισκόμενη ισχύς από την δίοδο είναι περιορισμένη. Ο ακροδέκτης της αρνητικής τροφοδοσίας του ενισχυτή συνδέεται στην γη.

Ο τελεστικός ενισχυτής λαμβάνει την διαφορά τάσης στους ακροδέκτες εισόδου του και την ενισχύει πολλαπλασιάζοντάς την με τον συντελεστή κέρδους του, Α. Αυτό το γινόμενο αποτελεί την τάση εξόδου του. Η παρουσία μίας ανάστροφα πολωμένης διόδου Zener με τάση κατάρρευσης 10V προσφέρει την επιθυμητή σταθερή τάση στον θετικό ακροδέκτη του ενισχυτή. Ο αρνητικός ακροδέκτης εισόδου του συνδέεται με την έξοδο του τροφοδοτικού μέσω ενός διαιρέτη τάσης, ο λόγος τιμών αντιστάσεων του οποίου πρέπει να είναι 2:1 ούτως ώστε να εμφανίζεται τάση 10V στην αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή. Έτσι, η διαφορά τάσης των εισόδων είναι μηδαμινή και πολλαπλασιαζόμενη με το υπερβολικώς υψηλό κέρδος Α προκαλεί στην έξοδο του τελεστικού σήμα τάσης με τιμή λίγο μεγαλύτερη από 30V, όπως επιδιώκουμε. Η ίδια τάση περίπου (λόγω του πολύ μικρού ρεύματος στην έξοδο του ενισχυτή) υπάρχει και στην βάση του διπολικού τρανζίστορ, πράγμα απαραίτητο προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή πόλωση του. Μία αντίσταση 50Ω προστέθηκε μεταξύ της βάσης του διπολικού και της εξόδου του τελεστικού για τον περιορισμό ρευμάτων μεταξύ των δύο σε περίπτωση σφάλματος.

Επιλέχθηκαν αντιστάσεις με τιμές 3,2kΩ και 1,6kΩ για τον διαιρέτη τάσης στον αναστρέφοντα ακροδέκτη του ενισχυτή, ώστε να μην καταναλώνουν υπερβολική ισχύ. Πράγματι, διαπιστώθηκε ότι για αυτές τις τιμές το ρεύμα που διέρχεται από τον κλάδο είναι περίπου 6mA και σύμφωνα με τον τύπο για τον υπολογισμό της ισχύος των αντιστάσεων: $I^2 \cdot R$ προκύπτει ότι αμφότερες καταναλώνουν ισχύ πολύ λιγότερη από 250mW, τιμή που αποτελεί το όριο κατανάλωσης ισχύος για τις αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν αργότερα στις κολλήσεις στις πλακέτες PCB. Παράλληλα με τον κλάδο των αντιστάσεων τοποθετήθηκαν δύο πυκνωτές 660μF και 4,7μF, ηλεκτρολυτικός και μη ηλεκτρολυτικός αντίστοιχα, που διασφαλίζουν την βελτίωση της ποιότητας της κυματομορφής τάσης του τροφοδοτικού. Οι τύποι διόδων Zener που χρησιμοποιήθηκαν στο LTspice είναι BZX84C15L, EDZV10B και EDZV16B.

1.2) Πηγή ρεύματος:

Η πηγή συνεχούς ρεύματος αποτελεί ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει κυρίως ένα τρανζίστορ MOSFET n-τύπου σε συνδεσμολογία ανάδρασης με έναν τελεστικό ενισχυτή. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.1, μεταξύ αυτής και της εξόδου του τροφοδοτικού παρεμβλήθηκε μία ορθά πολωμένη δίοδος η οποία προστατεύει την διάταξη από τυχόν σφάλματα. Αποτέλεσμα αυτής της παρεμβολής είναι ότι, εξαιτίας της πτώσης τάσης στα άκρα της διόδου, η τιμή της τάσης μετά την δίοδο είναι σχεδόν 29V. Η δομή και η λειτουργία της διάταξης της πηγής ρεύματος είναι η εξής:

Η υποδοχή του τρανζίστορ (τύπου BSC42DN25NS3) συνδέεται σε σειρά με το φορτίο, του οποίου η αντίσταση εισόδου δεν θα υπερβαίνει τα 100Ω (τιμή της

αντίστασης που υπάρχει σε αυτή την θέση, στην άνωθεν εικόνα 1.1). Η τιμή του ρεύματος στην έξοδο της πηγής θα είναι σταθερή για κάθε μεταβολή της αντίστασης, όσο αυτή παραμένει μικρότερη αυτής της τιμής, καθώς σε διαφορετική περίπτωση (λόγω της σταθερής τάσης των 29V που παρέχεται από το τροφοδοτικό), θα έπρεπε να είχε γίνει άλλη μελέτη λόγω υπερθέρμανσης. Η άλλη μεριά του φορτίου είναι συνδεδεμένη στην υψηλή τάση των 29V. Η πηγή του τρανζίστορ μέσω μίας αντίστασης R6 τιμής 100Ω καταλήγει στην γη, ενώ η πύλη του συνδέεται με την έξοδο του ενισχυτή με παρεμβολή μίας αντίστασης 50Ω. Ο τελεστικός ενισχυτής (τύπου LT1006) έχει, όπως πριν, μηδενικό ρεύμα στις εισόδους του και μεγάλο κέρδος. Ο ακροδέκτης της αρνητικής τροφοδοσίας συνδέεται στην γη και της θετικής στην θετική τάση των 29V. Τέλος, η αναστρέφουσα είσοδος του ενώνεται με την πηγή του τρανζίστορ και η μη αναστρέφουσα με το ψηφιακό ποτενσιόμετρο. Στο LTspice επιλέχθηκε ένας διαιρέτης τάσης συνολικής αντίστασης 5kΩ (R9=2.5 + R8=2.5 στην εικόνα 1.1) για την αναπαράσταση του ποτενσιόμετρου.

Ανάλογα με το επιθυμητό ρεύμα εξόδου, που ορίζει ο χρήστης, δίνεται εντολή από τον Arduino nano στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο για μεταβολή της αντίστασης που «βλέπει» ο θετικός ακροδέκτης εισόδου του τελεστικού. Συγκεκριμένα, σε συνθήκες ηρεμίας, λόγω της μηδενικής ροής ρεύματος από την πύλη του n-τύπου τρανζίστορ, το ρεύμα που διέρχεται από το φορτίο, δηλαδή από την υποδοχή του θα διέρχεται και από την πηγή του, άρα και από την αντίσταση R6. Συνεπώς θα υπάρχει μία σταθερή τάση στον αναστρέφοντα ακροδέκτη εισόδου του τελεστικού που είναι ίση με την τάση στον άλλο ακροδέκτη (μηδενική διαφορά τάσης). Την στιγμή που θα δοθεί εντολή από τον χρήστη για αλλαγή του ρεύματος στην έξοδο της πηγής ρεύματος, ο Arduino μεταβάλλει καταλλήλως (σύμφωνα με τον προγραμματισμό του) τον λόγο αντιστάσεων R9/R8 του ποτενσιόμετρου. Για παράδειγμα, αν είναι επιθυμητή η αύξηση του ρεύματος τότε ο λόγος θα μειωθεί. Ως εκ τούτου, παρουσιάζεται διαφορά τάσης μεταξύ των εισόδων του ενισχυτή, αφού πλέον ο μη αναστρέφων ακροδέκτης «βλέπει» υψηλότερη τάση. Συνεπώς η τάση εξόδου του ενισχυτή, που ταυτίζεται με την τάση της πύλης του τρανζίστορ V_g (λόγω μηδενικής ροής ρεύματος μέσω της αντίστασης των 50Ω), θα αυξηθεί επίσης. Σύμφωνα με την σχέση για το ρεύμα υποδοχής των τρανζίστορ MOSFET:

$$I_D = 1/2 * \mu C_{ox} (V_g - V_t)^2 \quad \text{με } \mu, C_{ox}, V_t \text{ σταθερά μεγέθη}$$

προκύπτει ότι θα επέλθει μεταβολή στο ρεύμα I_D (στην συγκεκριμένη περίπτωση θα επέλθει αύξηση), που αποτελεί και το ρεύμα του φορτίου. Επιτυγχάνεται έτσι το αποτέλεσμα στην έξοδο που επιθυμεί ο χρήστης.

Τότε επίσης θα εμφανιστούν και οι ακόλουθες δράσεις στο τμήμα της ανάδρασης: λόγω της σταθερής ωμικής αντίστασης R6 (100Ω), η αύξηση του ρεύματος θα αλλάξει (αυξήσει) και την τιμή της τάσης της πηγής του τρανζίστορ (άρα και του αρνητικού ακροδέκτη εισόδου του ενισχυτή) βάσει της σχέσης V=R*I, με τελικό αποτέλεσμα την ταύτισή της ξανά με την τάση του ετέρου ακροδέκτη και την αποκατάσταση της ισορροπίας. Τόσο στο LTspice όσο και στην πλακέτα κολλήσεων τοποθετήθηκε μεταξύ του ψηφιακού ποτενσιόμετρου και της γης μία

αντίσταση των 10Ω καθώς και μία άλλη με τιμή $30k\Omega$ μεταξύ αυτού και της τάσης των $29V$, προκειμένου να μην εμφανιστεί ποτέ στον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη του τελεστικού ενισχυτή ούτε απολύτως μηδενική τάση ούτε ακριβώς $29V$, πράγμα που αν συνέβαινε θα αποτελούσε οριακή κατάσταση, αφού σε αυτή την περίπτωση η τάση σε αυτόν τον ακροδέκτη θα λάβαινε την ίδια τιμή με την τάση της αρνητικής ή της θετικής τροφοδοσίας του ενισχυτή αντίστοιχα οδηγώντας τον σε κορεσμό.

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθεται κάθε συνδυασμός των τιμών των αντιστάσεων $R8$ και $R9$ που συνιστούν την αναπαράσταση του ψηφιακού ποτενσιόμετρου $5k\Omega$ στο LTspice (αρχίζοντας από τις τιμές $R8=0\Omega$, $R9=5k\Omega$ και τελειώνοντας με τις $R8=5k\Omega$ και $R9=0\Omega$), και το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου της πηγής ρεύματος για τον καθένα. Αυτές οι τιμές ρεύματος μετρήθηκαν στο πρόγραμμα και παρουσιάζουν το αποτέλεσμα που παρατηρείται στην έξοδο όταν υπάρχει ένας δεδομένος λόγος αντιστάσεων στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο, πράγμα που θα υπογραμμιστεί και στον προγραμματισμό του Arduino nano (ο οποίος ελέγχει την λειτουργία του ποτενσιόμετρου) αργότερα.

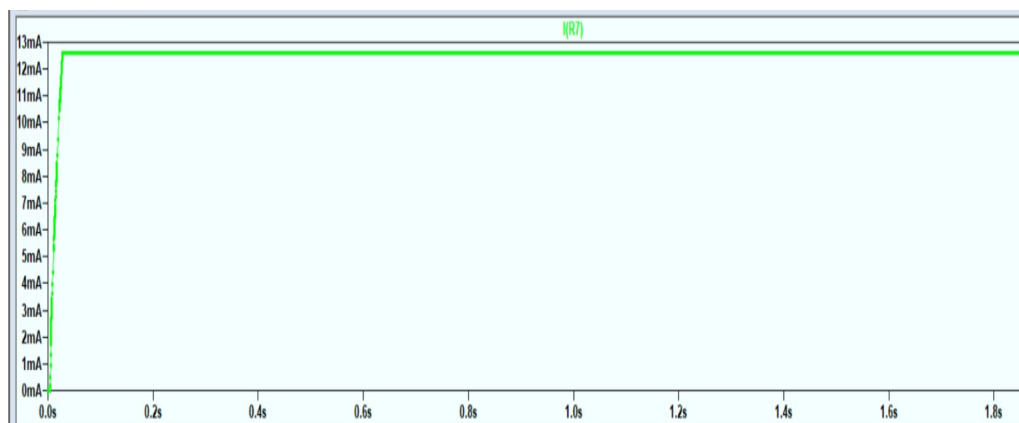
R8 (σε $k\Omega$)	R9 (σε $k\Omega$)	Ρεύμα εξόδου (σε mA)
0	5	0.092 (σχεδόν μηδέν)
0.05	4.95	0.5
0.1	4.9	0.92
0.15	4.85	1.33
0.2	4.8	1.75
0.25	4.75	2.17
0.3	4.7	2.59
0.35	4.65	3.01
0.4	4.6	3.42
0.45	4.55	3.84
0.5	4.5	4.26
0.55	4.45	4.68
0.6	4.4	5.09
0.65	4.35	5.51
0.7	4.3	5.93
0.75	4.25	6.35
0.8	4.2	6.76
0.85	4.15	7.18
0.9	4.1	7.6
0.95	4.05	8.02
1	4	8.43
1.05	3.95	8.85
1.1	3.9	9.27
1.15	3.85	9.68
1.2	3.8	10.1
1.25	3.75	10.52
1.3	3.7	10.93
1.35	3.65	11.35

1.4	3.6	11.77
1.45	3.55	12.19
1.5	3.5	12.6
1.55	3.45	13.02
1.6	3.4	13.44
1.65	3.35	13.85
1.7	3.3	14.27
1.75	3.25	14.69
1.8	3.2	15.1
1.85	3.15	15.52
1.9	3.1	15.94
1.95	3.05	16.36
2	3	16.77
2.05	2.95	17.19
2.1	2.9	17.61
2.15	2.85	18.02
2.2	2.8	18.44
2.25	2.75	18.86
2.3	2.7	19.27
2.35	2.65	19.69
2.4	2.6	20.11
2.45	2.55	20.52
2.5	2.5	20.94
2.55	2.45	21.36
2.6	2.4	21.77
2.65	2.35	22.19
2.7	2.3	22.6
2.75	2.25	23.02
2.8	2.2	23.44
2.85	2.15	23.85
2.9	2.1	24.27
2.95	2.05	24.69
3	2	25.1
3.05	1.95	25.52
3.1	1.9	25.94
3.15	1.85	26.35
3.2	1.8	26.77
3.25	1.75	27.19
3.3	1.7	27.6
3.35	1.65	28.02
3.4	1.6	28.43
3.45	1.55	28.85
3.5	1.5	29.27
3.55	1.45	29.68
3.6	1.4	30.10
3.65	1.35	30.52

3.7	1.3	30.93
3.75	1.25	31.35
3.8	1.2	31.76
3.85	1.15	32.18
3.9	1.1	32.60
3.95	1.05	33.01
4	1	33.43
4.05	0.95	33.85
4.1	0.9	34.26
4.15	0.85	34.68
4.2	0.8	35.09
4.25	0.75	35.51
4.3	0.7	35.93
4.35	0.65	36.34
4.4	0.6	36.76
4.45	0.55	37.17
4.5	0.5	37.59
4.55	0.45	38.01
4.6	0.4	38.42
4.65	0.35	38.84
4.7	0.3	39.26
4.75	0.25	39.67
4.8	0.2	40.09
4.85	0.15	40.50
4.9	0.1	40.92
4.95	0.05	41.34
5	0.001	41.75

Πίνακας 1.1. Ρεύμα εξόδου για κάθε λόγο αντιστάσεων $R8/R9$

Οι μετρήσεις έγιναν με αντίσταση φορτίου 100Ω , αν και όπως ειπώθηκε η μεταβολή της δεν επηρεάζει το ρεύμα εξόδου, όπως επιθυμούμε, εφόσον η αντίσταση παραμένει εντός των ορίων, δηλαδή μέχρι 100Ω . Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η τιμή του ρεύματος στην έξοδο του κυκλώματος για λόγο αντιστάσεων $R9/R8 = 3.5/1.5$, ο οποίος αντιστοιχεί σε τιμή ρεύματος ίση με 12.6mA :



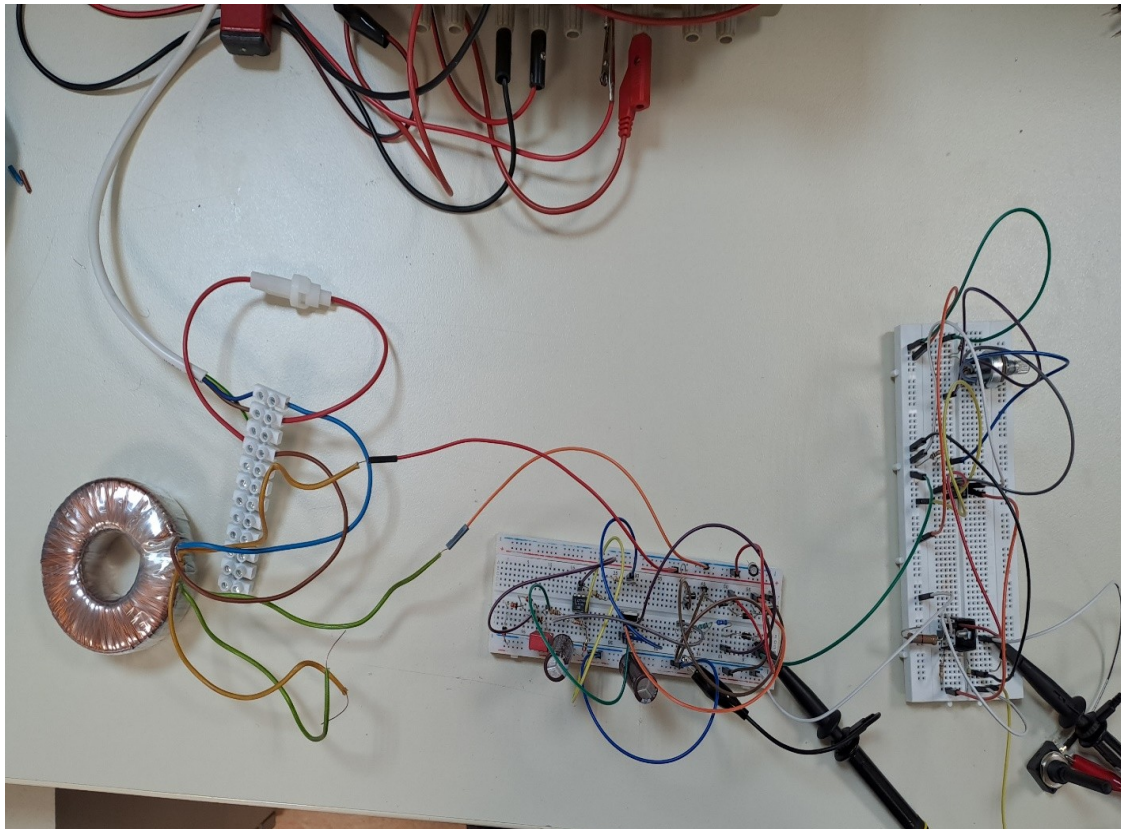
Εικόνα 1.4. Ρεύμα εξόδου για λόγο αντιστάσεων $R9/R8 = 3.5/1.5$

1.3) Τροφοδοτικό 11V:

Προκειμένου να εξασφαλισθεί η τροφοδοσία του Arduino nano, της οθόνης και του digital encoder κατασκευάστηκε ένα επιπλέον τροφοδοτικό ίδιας συνδεσμολογίας με το προηγούμενο, που παράγει σταθερή τάση τιμής 11V. Στην εικόνα 1.1, στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, φαίνεται και η δική του συνδεσμολογία στο πρόγραμμα LTspice. Ο τύπος του διπολικού τρανζίστορ που επιλέχθηκε σε αυτή την περίπτωση είναι ο 2N3019, καθώς διαθέτει $V_{ce0}=80V$, δηλαδή έχει μεγαλύτερη αντοχή στην διαφορά τάσης μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού (η οποία έχει μεγαλύτερη τιμή στο τρανζίστορ του εν λόγω τροφοδοτικού) από το 2SC5876U3 ($V_{ce0}=60V$), που τοποθετήθηκε στο τροφοδοτικό των 30V. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένας τελεστικός ενισχυτής τύπου LT1007 και για την θετική τροφοδοσία του μία δίοδος Zener τύπου PMEG3010BEA, έχουσα τάση κατάρρευσης 30V. Μεταξύ αυτής και του συλλέκτη του τρανζίστορ τοποθετήθηκε μία αντίσταση $1k\Omega$ για τον έλεγχο του ρεύματος που διέρχεται από αυτήν και από τον ακροδέκτη θετικής τροφοδοσίας του τελεστικού ενισχυτή. Επίσης, μία άλλη δίοδος Zener τύπου BZX84C10VLY με τάση κατάρρευσης 10V συνδέθηκε με τον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη του τελεστικού προκειμένου αυτός ο ακροδέκτης να βρίσκεται σε σταθερό επίπεδο τάσης. Ο αναστρέφων ακροδέκτης συνδέθηκε μέσω ενός διαιρέτη τάσης με λόγο αντιστάσεων 1:10 με την έξοδο των 11V, ούτως ώστε σε αυτόν τον ακροδέκτη να υπάρχει τάση 10V και συνεπώς η διαφορά τάσης των δύο εισόδων να είναι πρακτικά ανύπαρκτη, πράγμα που σε συνδυασμό με το υψηλότερο κέρδος του ενισχυτή επιφέρει πεπερασμένη τάση στην έξοδό του με τιμή λίγο υψηλότερη από 11V, δηλαδή από την τάση στον εκπομπού του διπολικού, συνθήκη αναγκαία για την διατήρηση της ορθής πόλωσής του, όπως υπογραμμίσθηκε στην παρουσίαση του προηγούμενου τροφοδοτικού. Κατά τα λοιπά η διάταξη παρέμεινε ίδια.

Κεφάλαιο 2. Σύνδεση του συνολικού κυκλώματος σε δοκιμαστική πλακέτα

Μετά την σχεδίαση των τροφοδοτικών και της πηγής ρεύματος στο LTspice και την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας τους ακολούθησε η αγορά των απαραίτητων εξαρτημάτων και η κατασκευή των κυκλωμάτων πρώτα σε δοκιμαστικές πλακέτες για να ελεγχθεί ότι τα θεωρητικά αποτελέσματα συμπίπτουν με τις πρακτικές μετρήσεις- δοκιμές. Η κατασκευή και ο έλεγχος έγιναν στο εργαστήριο Ηλεκτρονικής στο Β κτίριο της σχολής. Παρακάτω παρουσιάζεται η εικόνα του τροφοδοτικού των 30V και της πηγής ρεύματος, που σχεδιάστηκαν σε διαφορετικές πλακέτες και συνδέθηκαν καταλλήλως[1] [2] [4] [5] [7].



Εικόνα 2.1. Η πηγή ρεύματος και το τροφοδοτικό της σε δοκιμαστικές πλακέτες

Ο μετασχηματιστής παρότι αποτελεί το πρώτο στάδιο του τροφοδοτικού δεν τοποθετήθηκε πάνω σε δοκιμαστική πλακέτα λόγω του όγκου του, αλλά δίπλα. Το πρωτεύον πηνίο του συνδέθηκε με την πρίζα, η οποία παρέχει εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 50Hz και RMS τιμής 230V, δηλαδή την απαραίτητη κυματομορφή. Μεταξύ του μετασχηματιστή και της πρίζας προστέθηκαν δύο τηκόμενες ασφάλειες slow-blow για προστασία από βραχυκύκλωμα στο πρωτεύον αλλά και ενδεχόμενης υπερθέρμανσης- καταστροφής κάποιου στοιχείου των τροφοδοτικών, προκληθείσης από κατανάλωση υπέρογκης ποσότητας ρεύματος από το φορτίο ή τον Arduino nano. Οι αργές ασφάλειες (slow-blow) σε αντίθεση με τις γρήγορες, είναι ανθεκτικές σε στιγμιαίες υπερβάσεις της ονομαστικής τιμής ρεύματός τους και συνεπώς καθίστανται κατάλληλες για κυκλώματα που διέπονται από στιγμιαία

υψηλά ρεύματα (λ.χ. κατά την εκκίνηση), όπως τα συγκεκριμένα. Το καλώδιο που συνδέει το πρωτεύον πηνίο του μετασχηματιστή και την πρίζα διαθέτει μία φάση, έναν ουδέτερο και μία γη. Ασφάλεια τοποθετήθηκε στην φάση και στον ουδέτερο, τα οποία συνδέονται με τα δύο άκρα του πρωτεύοντος πηνίου. Επίσης, στο τελικό στάδιο παρεμβλήθηκε ένας διακόπτης μεταξύ των ασφαλειών και της πρίζας, ώστε ο χρήστης να δύναται να διακόψει την τροφοδοσία των πλακετών, χωρίς να είναι απαραίτητη η εξαγωγή του καλωδίου από την πρίζα. Ο μετασχηματιστής έχει δύο δευτερεύοντα πηνία. Το ένα συνδέθηκε με το δεύτερο στάδιο του τροφοδοτικού των 30V (δηλαδή την ανορθωτική διάταξη με διόδους) και το άλλο με το δεύτερο στάδιο του δεύτερου τροφοδοτικού (δεν παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1, σε αυτή το εν λόγω πηνίο είναι ελεύθερο). Το ρεύμα παρουσιάζει κάποιες ανώτερες αρμονικές μεταξύ αυτών των πηνίων και των ανορθωτικών διατάξεων των τροφοδοτικών που οφείλονται στην απουσία εν σειρά συνδεδεμένων ηλεκτρονικών ισχύος ή άλλης διάταξης φιλτραρίσματος.

Για να επιτευχθούν οι τιμές των στοιχείων που φαίνονται στο LTspice επιλέχθηκε ο απαραίτητος αριθμός εξαρτημάτων. Για παράδειγμα, για την αντίσταση των 3.2kΩ στο τροφοδοτικό των 30V συνδέθηκαν σε σειρά 3 αντιστάσεις με τιμές 0.8kΩ, 0.8kΩ και 1.6kΩ. Οι τύποι των στοιχείων που επιλέχθηκαν είναι αυτοί που αναφέρονται στην θεωρητική ανάλυση, εκτός ορισμένων εξαιρέσεων. Τα NPN τρανζίστορ που προτιμήθηκαν στην πράξη είναι τύπου BD241C, καθώς αυτά παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή στην διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος (συγκεκριμένα 3A). Επιπλέον, για να διαφυλαχθεί πλήρως η προστασία τους από την υπερθέρμανση χρησιμοποιήθηκαν ψύκτρες αλουμινίου που βιδώθηκαν στην κορυφή τους. Οι ψύκτρες αλουμινίου είναι απαγωγείς θερμότητας, δηλαδή υλικά που απορροφούν θερμότητα, και συνεπώς προστατεύουν τα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος στα οποία ενσωματώνονται (και επομένως ολόκληρο το κύκλωμα) από υπερβολική θέρμανση που ενδεχομένως θα επιφέρει την καταστροφή τους.

Η αντίσταση R6 των 100Ω μεταξύ της πηγής του τρανζίστορ mosfet και της γης διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, η τιμή του οποίου μπορεί να φτάσει τα 41.75mA. Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς που καταναλώνει βρίσκεται κάτω των 0.2W (με βάση τον τύπο $P = I^2R$). Επομένως, αφού αυτή η τιμή, που αποτελεί την μέγιστη ισχύ που θα καταναλώσει η συγκεκριμένη αντίσταση, είναι αρκετά κάτω των 0.25W χρησιμοποιήθηκε αντίσταση αυτής της προδιαγραφής. Απεναντίας, για την αναπαράσταση του φορτίου του δεύτερου τροφοδοτικού τοποθετήθηκαν 2 αντιστάσεις 1W (δηλαδή μεγαλύτερης αντοχής) συνδεδεμένες εν παραλλήλω, καθώς η ισχύς που καταναλώνεται ξεπερνά τα 0.25W, και τιμής 200Ω. Βέβαια, στο τελικό στάδιο το φορτίο αυτού του τροφοδοτικού καταναλώνει πολύ λιγότερο ρεύμα, όπως θα δούμε. Η κατανάλωση ισχύος των λοιπών εξαρτημάτων είναι εντός των επιτρεπτών ορίων και συνεπώς δεν απαιτείται καμία ιδιαίτερη επιλογή.

Η ορθά πολωμένη δίοδος που βρίσκεται μετά το τελευταίο στάδιο του τροφοδοτικού των 30V, δηλαδή μετά τον σταθεροποιητή τάσης, τοποθετήθηκε στην ίδια πλακέτα με το τροφοδοτικό. Η κάθοδος της διόδου παρέχει την τάση

τροφοδοσίας της πηγής ρεύματος, που σχεδιάστηκε στην άλλη πλακέτα. Έτσι, η δίοδος συνδέθηκε με την γραμμή τροφοδοσίας αυτής της πλακέτας, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1. Πραγματοποιήθηκε επίσης σύνδεση των επιπέδων γης των πλακετών, για να υπάρχει κοινή αναφορά τάσης μεταξύ των δύο κυκλωμάτων, πράγμα αναγκαίο λόγω της επικοινωνίας τους, μιας και η τροφοδοσία του ενός παρέχεται από το άλλο. Κοινή αναφορά επίσης πρέπει να υπάρχει και με την πλακέτα του τροφοδοτικού του Arduino nano, καθώς ο Arduino nano επικοινωνεί με το ψηφιακό ποτενσιόμετρο, άρα με την πλακέτα της πηγής ρεύματος και συνεπώς (εμμέσως) και με την πλακέτα του τροφοδοτικού των 30V. Οι συνδέσεις των γαιών σε αυτό το στάδιο της εργασίας, έγιναν προσωρινά με καλώδια τύπου jumper (όπως και οι συνδέσεις των εξαρτημάτων) και στο τελικό στάδιο, οριστικά σε πλακέτες PCB με πολύκλωνα καλώδια, όπως θα παρατεθεί.

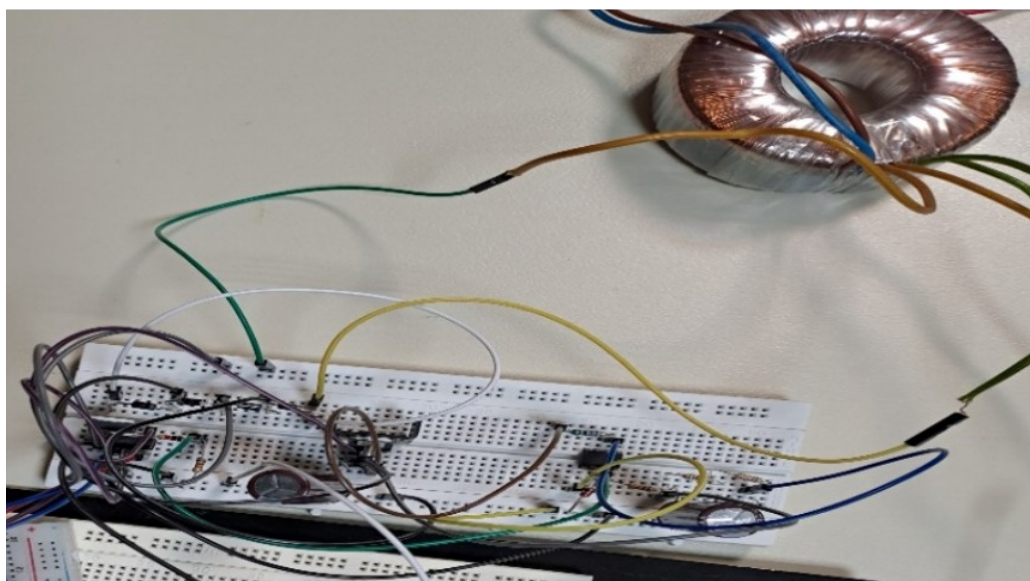
Για τις δοκιμές που έγιναν σε αυτό το στάδιο δεν χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό ποτενσιόμετρο και ο Arduino nano, αλλά ένα αναλογικό ποτενσιόμετρο των 5kΩ που συνδέθηκε στον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη του τελεστικού ενισχυτή της πηγής ρεύματος. Όπως ειπώθηκε, η έξοδος της πηγής δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές της αντίστασης του φορτίου του. Για να επιβεβαιωθεί και αυτό στην πράξη, χρησιμοποιήθηκε επίσης ένα αναλογικό ποτενσιόμετρο των 100Ω που συνδέθηκε στον συλλέκτη του τρανζίστορ mosfet, δηλαδή στην θέση του φορτίου. Μεταξύ αυτού και της θετικής τροφοδοσίας παρεμβλήθηκε μία ορθά πολωμένη δίοδος προς αποτροπή διάδοσης ανάστροφων ρευμάτων στην διάταξη, που ενδεχομένως προκύψουν από λαθεμένο χειρισμό του χρήστη (λχ από την προσθήκη στην θέση του φορτίου ενός φορτισμένου πυκνωτή). Η επιλογή αυτή διατηρήθηκε και στο τελικό στάδιο της κατασκευής του κυκλώματος σε πλακέτα PCB.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής σε αυτό το στάδιο, ο μετασχηματιστής συνδέθηκε μέσω των ασφαλειών με την πρίζα, και ακολούθως με το πολύμετρο του εργαστηρίου μετρήθηκε το σήμα τάσης στην έξοδο του τροφοδοτικού (μετά την δίοδο) και διαπιστώθηκε ότι τόσο η θεωρητική μελέτη όσο και η σύνδεση των ηλεκτρικών εξαρτημάτων έγιναν με τον ορθό τρόπο, καθώς το σήμα βρέθηκε ίσο με 29V, που αποτελεί την επιθυμητή τιμή, για την οποία έγινε η μελέτη και η σχεδίαση.

Τα αναλογικά ποτενσιόμετρα μεταβάλλουν το λόγο αντιστάσεων τους με χειροκίνητη περιστροφή. Ως εκ τούτου, με αυτόν τον τρόπο δοκιμάστηκε η αντίδραση της εξόδου της πηγής (που συνεχώς μετρούταν με πολύμετρο) σε μεταβολές τόσο του ποτενσιόμετρου των 5kΩ (του συνδεδεμένου με τον τελεστικό ενισχυτή) όσο και αυτού των 100Ω (στην έξοδο της πηγής). Πρώτον, διαπιστώθηκε ότι όταν η μετακίνηση του δρομέα του πρώτου προκαλεί αύξηση της τάσης στην έξοδο του λόγω μεταβολής του λόγου αντιστάσεων, το ρεύμα εξόδου της πηγής επίσης αυξάνεται, λαμβάνον τιμές που αντιστοιχούν στην εκάστοτε τιμή του λόγου σύμφωνα με τον πίνακα 1.1 που παρατέθηκε ανωτέρω. Στο στάδιο της τελικής κατασκευής χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό ποτενσιόμετρο, οι τιμές τάσης στην έξοδο του οποίου μεταβάλλονται σύμφωνα με τις εντολές που δέχεται από τον Arduino nano, οι οποίες εξαρτώνται από το επιθυμητό ρεύμα εξόδου που δηλώνεται από τον

χρήστη. Δεύτερον, με την τροποποίηση της τιμής του ποτενσιόμετρου των 100Ω που διαδραματίζει τον ρόλο της αντίστασης φορτίου, επιβεβαιώθηκε ότι για δεδομένη κατάσταση του ποτενσιόμετρου των 5kΩ, το ρεύμα εξόδου δεν εξαρτάται από τις αλλαγές αυτής της αντίστασης, όπως επιδιώχθηκε.

Όσον αφορά το τροφοδοτικό που παράγει τάση 11V, κατασκευάστηκε σε ξεχωριστή πλακέτα δοκιμών για να επαληθευθεί η ορθή λειτουργία του. Η εικόνα 2.2 παρακάτω δείχνει το κύκλωμα. Το δεύτερο δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή συνδέθηκε στην ανορθωτική διάταξη με διόδους -που αποτελεί το δεύτερο στάδιό του τροφοδοτικού - με καλώδια ανάπτυξης εφαρμογών, έχοντα θηλυκό βύσμα στο ένα άκρο τους και αρσενικό στο άλλο. Με χρήση του πολύμετρου μετρήθηκε η τάση στην έξοδό του και βρέθηκε ίση με την θεωρητικώς υπολογισθείσα τιμή. Απαραίτητη κρίθηκε και εδώ η προσθήκη ψύκτρας στο NPN τρανζίστορ για την αποσόβηση εμφάνισης υψηλής θερμοκρασίας που θα επέφερε πιθανώς της καταστροφή του. Επαναλαμβάνεται ότι αυτό το τροφοδοτικό σχεδιάστηκε για να παρέχει την απαιτούμενη τάση (11V) για την λειτουργία του Arduino nano, ο οποίος απαιτεί τάση τιμής 7-21V, αλλά και της οθόνης lcd που απαιτεί τάσεις 5V για την λειτουργία της και 3,3V για το led της, και του digital encoder (5V επίσης). Προκειμένου να δημιουργηθούν τα τελευταία επίπεδα τάσης χρησιμοποιήθηκαν voltage regulators (σταθεροποιητές τάσης). Πιο αναλυτικά, η τάση των 5V για την οθόνη και τον digital encoder παράγεται από έναν voltage regulator που συνδέεται στην έξοδο του παραπάνω τροφοδοτικού. Η τάση 11V που δέχεται στην είσοδό του είναι εντός των ορίων που ορίζονται στο datasheet του (μέγιστη τάση 16V). Παρομοίως, για την παραγωγή της απαραίτητης για την τροφοδοσία του led της οθόνης τάσης 3,3V συνδέθηκε στην έξοδο του τροφοδοτικού ένας voltage regulator, έχων όμοιο όριο τάσης για την είσοδο του, που δύναται να την παραγάγει αλλά και ένας επιπλέον που παράγει τάση 3V, σε περίπτωση που καταστεί απαραίτητος. Αυτός δεν συνδέθηκε απευθείας στην έξοδο του τροφοδοτικού, αλλά στην έξοδο του πρώτου voltage regulator, αφού η μέγιστη τάση που αντέχει στην είσοδό του είναι 6V, σύμφωνα με το datasheet του. Η τροφοδοσία του ψηφιακού ποτενσιόμετρου αποφασίσθηκε να γίνεται από την πλακέτα Arduino nano. Η διάταξη του τροφοδοτικού παρουσιάζεται, όπως υλοποιήθηκε αρχικά σε δοκιμαστική πλακέτα:



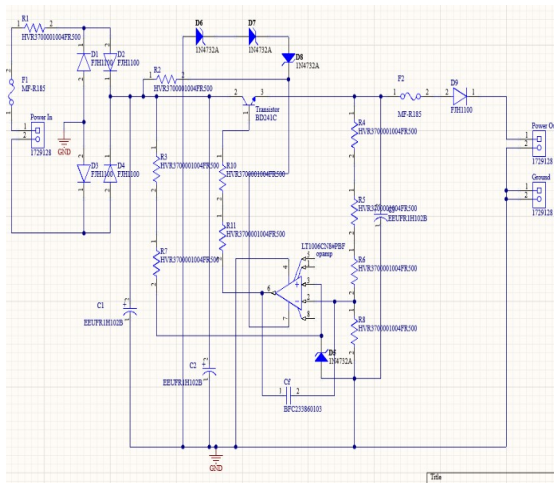
Εικόνα 2.2. Τροφοδοτικό των 11 V σε δοκιμαστική πλακέτα

Κεφάλαιο 3. Χρήση του Altium Designer για την σχεδίαση των σχηματικών της διάταξης

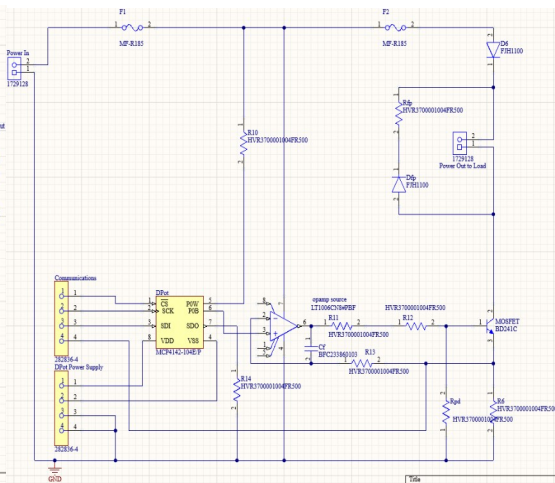
Μετά την θεωρητική μελέτη και την κατασκευή του συνολικού κυκλώματος σε πλακέτες δοκιμών, αφού διαπιστώθηκε η ορθή λειτουργία του, ακολούθησε η σχεδιάσή του στο πρόγραμμα Altium Designer, η οποία περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο [4] [5] [7], ούτως ώστε να καθοριστούν με ακρίβεια οι συνδέσεις των στοιχείων μεταξύ τους και συνεπώς να πραγματοποιηθούν σε πλακέτες PCB, κατά το τελικό στάδιο της διπλωματικής.

Το Altium Designer είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για την σχεδίαση κυκλωμάτων (βασικών και πολύπλοκων) πριν την κόλλησή τους σε πλακέτα PCB. Παρέχει πολλές δυνατότητες, μεταξύ των οποίων η δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης της πλακέτας (πέραν της απλής σχεδίασης του ηλεκτρονικού κυκλώματος) και ανάλυσης της λειτουργίας της. Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, το λογισμικό αυτό λήφθηκε από το διαδίκτυο (επίσημη ιστοσελίδα) και αποθηκεύτηκε στον σκληρό δίσκο του προσωπικού μου υπολογιστή. Στον οδηγό του λογισμικού περιέχονται ενδιαφέρουσες επιπρόσθετες πληροφορίες και λεπτομερή περιγραφή του Altium Designer, τα οποία παραλείπονται καθώς δεν αποτελούν θέμα της παρούσης εργασίας, αφού το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιήθηκε μόνο προς σχεδίαση των κυκλωμάτων και όχι προς ανάλυση τους.

Η πηγή ρεύματος, το τροφοδοτικό της, καθώς και το δεύτερο τροφοδοτικό των 11V, σχεδιάστηκαν στο Altium Designer σε τρία διαφορετικά αρχεία και ακολούθως το κάθε ένα αναπαραστάθηκε σε μία πλακέτα PCB. Αρχικά, δημιουργήθηκαν τρία projects και σε κάθε ένα έγινε η σχεδίαση του σχηματικού ενός από τα παραπάνω κυκλώματα. Τα σχηματικά αυτά παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 3.1. Το τροφοδοτικό των 30 V



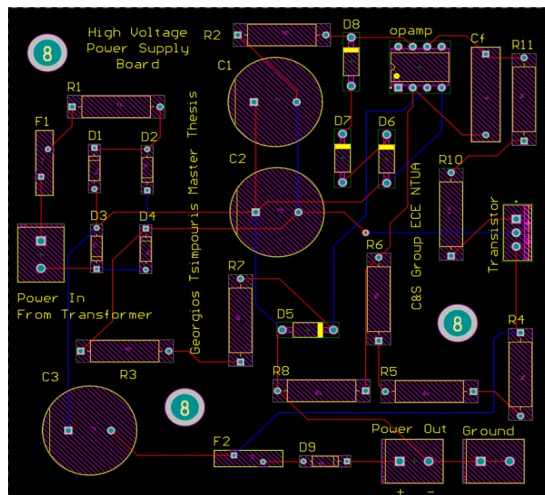
Εικόνα 3.2. Η πηγή ρεύματος στο Altium Designer

τοποθετήθηκε το ολοκληρωμένο MCP4142-104E/P και συνδέθηκε με βάση τους ακροδέκτες του ψηφιακού ποτενσιόμετρου MCP4151 που χρησιμοποιήθηκε.

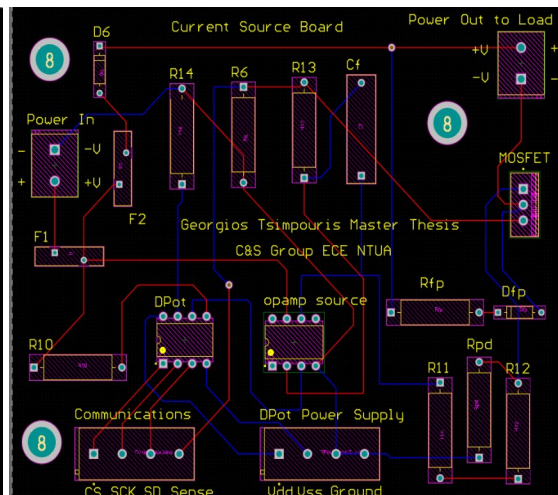
Είναι εμφανές ότι υπάρχουν οι εξής διαφορές με την σχεδίαση των ίδιων κυκλωμάτων σε δοκιμαστική πλακέτα, που προηγήθηκε: Πρώτον, τοποθετήθηκαν ορισμένα επιπλέον εξαρτήματα (οι πυκνωτές C_f και στα τρία κυκλώματα, οι αντιστάσεις R_{fp} , R_{pd} , R_{13} και η δίοδος D_{fp}), τα οποία προστέθηκαν ώστε να είναι δυνατή η συμπερίληψή τους στις πλακέτες PCB προς αποτροπή ενδεχόμενης εμφάνισης ταλαντώσεων των τάσεων των τροφοδοτικών ή του ρεύματος εξόδου κατά το τελικό στάδιο. Τελικά, επειδή δεν παρατηρήθηκε κατά την τελική λειτουργία του κυκλώματος οποιαδήποτε ανωμαλία, δεν κρίθηκε απαραίτητη η συμπερίληψή τους στις πλακέτες PCB. Επίσης, στο κύκλωμα της πηγής ρεύματος αντί για τρανζίστορ τύπου mosfet, χρησιμοποιήθηκε το διπολικό BD241C, μιας και δεν βρέθηκε ο συγκεκριμένος τύπος mosfet που χρησιμοποιήθηκε τελικά στην πλακέτα PCB και οι διαστάσεις του παραπάνω τρανζίστορ κρίθηκαν κατάλληλες και για την τοποθέτηση αυτού του τύπου. Οι αναγκαίοι voltage regulators είναι αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν πρακτικά. Η χρησιμότητα του επιπλέον τρανζίστορ στο κύκλωμα του τροφοδοτικού των 11 V θα εξηγηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα, υπάρχουν σε κάποια σημεία ασφάλειες τύπου MF-R185 για την προστασία του κυκλώματος από υψηλά ρεύματα, που έπρεπε να συμπεριληφθούν στα σχηματικά, καθώς τοποθετήθηκαν ασφάλειες σε εκείνα τα σημεία στα κυκλώματα κατά την τελική υλοποίηση- κατασκευή τους σε πλακέτες PCB. Οι συνδέσεις των πλακετών μεταξύ τους, των επιπέδων γειώσεων τους, αλλά και η επικοινωνία των κυκλωμάτων με την πλακέτα Arduino nano, με τον digital encoder, την οθόνη lcd και τον μετασχηματιστή με πολύκλινα καλώδια, εξασφαλίζονται με την ύπαρξη fixed terminal blocks τύπου 282836-4 και 1729128 που ενσωματώθηκαν στις πλακέτες και συνδέθηκαν με τα λοιπά εξαρτήματα όπως φαίνεται. Με τον ίδιο τρόπο εξασφαλίστηκε και η δυνατότητα σύνδεσης φορτίου στην έξοδο της πηγής ρεύματος.

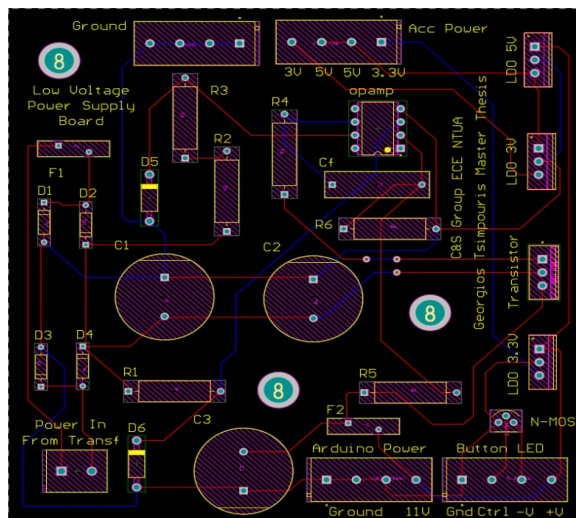
Ακολούθησε η αναπαράσταση των τριών κυκλωμάτων πάνω σε πλακέτες PCB, που έγινε στο Altium Designer. Και οι τρεις πλακέτες έχουν διαστάσεις μικρότερες από 10x10 mm. Παρακάτω, παρατίθενται τα σχηματικά των πλακετών που εν συνεχεία εκτυπώθηκαν:



Εικόνα 3.4. Σχηματικό τροφοδοτικού 30 V



Εικόνα 3.5. Σχηματικό πηγής ρεύματος

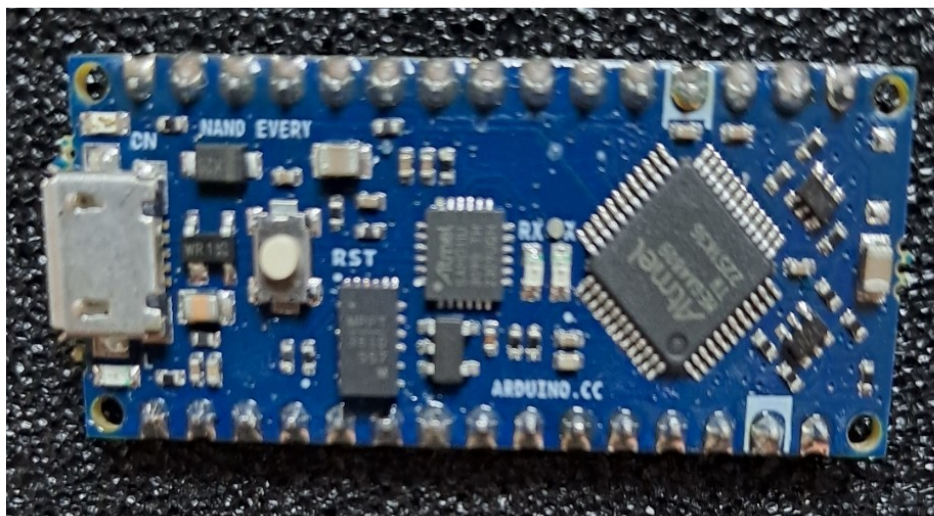


Εικόνα 3.6. Σχηματικό τροφοδοτικού 11 V

Η διάταξη των εξαρτημάτων έγινε κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο με πρότυπο την τελική τοποθέτησή τους στις πλακέτες PCB. Όπως φαίνεται, έχουν σημειωθεί 3 τρύπες σε κάθε πλακέτα ώστε και οι τρεις να δύνανται να προσαρμοστούν στο κουτί κατασκευών κατά το τελικό στάδιο. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε η αποστολή των σχεδίων στην εταιρεία jlcpcb προς προμήθευση των πλακετών και, μετά την παραλαβή τους, η κόλληση των εξαρτημάτων στην επιφάνειά τους. Πριν παρουσιαστεί όμως αυτό το τελευταίο στάδιο, στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται η πλακέτα Arduino nano, ο κώδικας για τον προγραμματισμό της και γενικότερα το ψηφιακό τμήμα της εργασίας, που αποτελεί βασικό μέρος της και πυρήνα της λειτουργίας της συνολικής διάταξης.

Κεφάλαιο 4. Προγραμματισμός πλακέτας Arduino nano

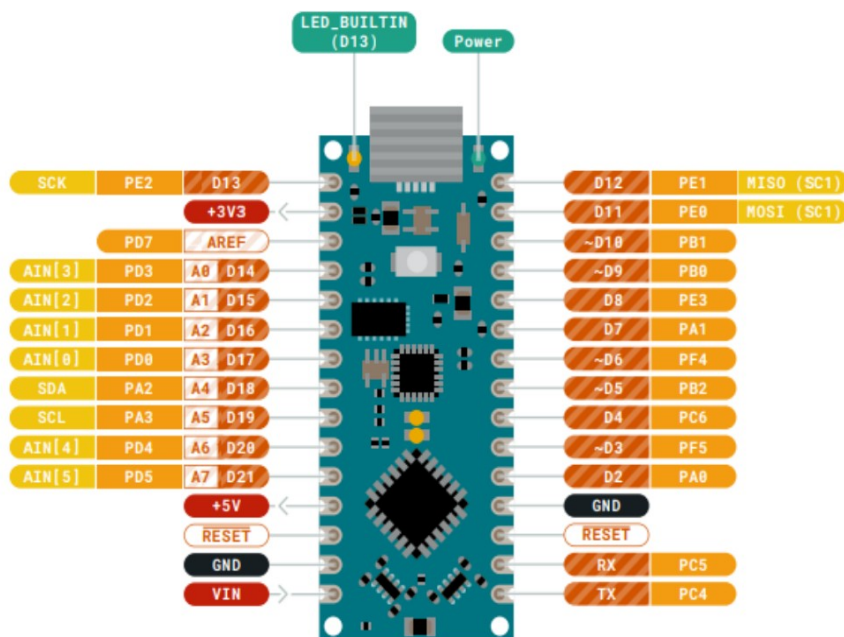
Όπως αναφέρθηκε, στον μη αναστρέφοντα ακροδέκτη του τελεστικού ενισχυτή της πηγής ρεύματος συνδέθηκε ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο, το οποίο παρουσιάζει στην έξοδό του αντίσταση, η τιμή της οποίας καθορίζεται από έναν Arduino nano. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται ο κώδικας που συντάχθηκε για τον προγραμματισμό του Arduino nano[6] ενώ προηγείται συνοπτική περιγραφή της δομής και της λειτουργίας αυτού και των λοιπών απαραίτητων στοιχείων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο Arduino nano και συγκεκριμένα μία εξέλιξή του (Arduino Nano Every), η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής.



Εικόνα 4.1. Ο Arduino Nano Every που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία

4.1) Εισαγωγή στον Arduino nano:

Ο Arduino Nano Every είναι μία πλακέτα διαστάσεων 18x45mm, στην επιφάνεια της οποίας βρίσκεται ενσωματωμένος ένας μικροελεγκτής τύπου ATmega4809. Μικροελεγκτής είναι ένας τύπος μικροεπεξεργαστή, που περιλαμβάνει μνήμη, κυκλώματα εισόδου/ εξόδου και υλοποιείται σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος. Η αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου επεξεργαστή είναι AVR. Επιπλέον η πλακέτα διαθέτει μνήμη Flash μεγέθους 48KB, στην οποία αποθηκεύεται ο επιθυμητός για τον προγραμματισμό της κώδικας (εκεί διατηρείται και μετά την απενεργοποίηση της πλακέτας), καθώς και μνήμη τύπου SRAM 6KB όπου διατηρούνται οι τιμές των μεταβλητών κατά την διάρκεια της τροφοδοσίας της. Τέλος, υπάρχει και μνήμη EEPROM για την μη απώλεια των τιμών των μεταβλητών μετά την διακοπή της τροφοδοσίας. Στο κάτωθι σχήμα φαίνονται όλοι οι ακροδέκτες της πλακέτας. Η τροφοδοσία της με ρεύμα γίνεται με καλώδιο USB Mini-B από την αντίστοιχη θύρα της (pin Vin). Η τάση τροφοδοσίας της μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 7V και 21V. Η πλακέτα διαθέτει επίσης και δύο pins για γείωση (GND) μέσω των οποίων συνδέεται λχ στην γη κάποιων συσκευών, με τις οποίες το κοινό επίπεδο τάσης αναφοράς είναι αναγκαίο και επιδιωκόμενο.



Εικόνα 4.2. Pinout διάγραμμα του Arduino nano

Στην πλακέτα υπάρχουν συνολικά 30 θύρες, που χρησιμεύουν για διάφορες λειτουργίες, καθώς και για την δυνατότητα επικοινωνίας της με εξωτερικές συσκευές. Συγκεκριμένα, εκτός των pins της γης και της τροφοδοσίας της που αναφέρθηκαν, διαθέτει δύο θύρες για επανεκκίνηση (reset), 8 ακροδέκτες για αναλογική είσοδο και 22 για ψηφιακή είσοδο/ έξοδο. Οι 8 αναλογικές θύρες εισόδου δύνανται να χρησιμοποιηθούν και ως ψηφιακές και συνεπώς συμπεριλαμβάνονται στις 22. Ο Arduino nano βλέπει ως λογικό HIGH τα 5V και ως λογικό LOW τα 0V. Αν αυτά τα όρια υπερβληθούν, ο μικροελεγκτής θα καταστραφεί. Ως εισόδοι, οι ψηφιακές θύρες αντιλαμβάνονται μόνο αυτές τις δύο στάθμες και ως έξοδοι δίνουν αντίστοιχα 0V ή 5V. Πέντε από τις ψηφιακές θύρες (σημειώνονται στην εικόνα με το σύμβολο: ~) έχουν το εξής χαρακτηριστικό: χρησιμοποιούν την τεχνική PWM για την προσομοίωση αναλογικού σήματος.

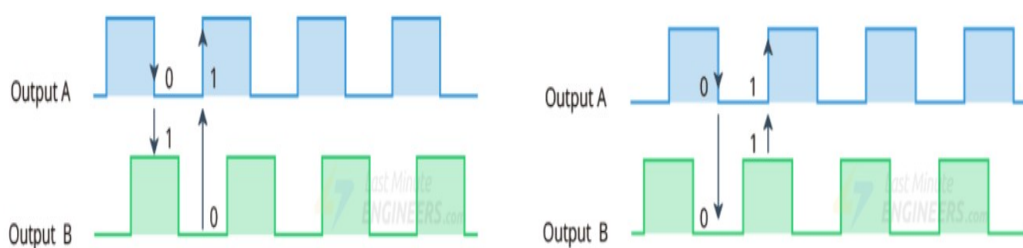
Η τεχνική PWM (Pulse Width Modulation) χρησιμοποιείται λόγω της έλλειψης αναλογικών εξόδων στην πλακέτα. Με αυτή μεταβάλλεται το duty cycle του κάθε παλμού εξόδου (που παίρνει τιμή 0V ή 5V) ούτως ώστε να προσομοιώνονται και οι ενδιάμεσες τιμές τάσης (δηλαδή μεταξύ 0V και 5V). Κάθε θύρα εισόδου/ εξόδου αντέχει ρεύμα μέχρι 20mA. Οι αναλογικές εισόδοι διαθέτουν εσωτερικά αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (A/D converter) 10bit προκειμένου να δύνανται να δέχονται μία αναλογική είσοδο, κυμαινόμενη από 0V ως 5V, και να την μετατρέπουν σε ψηφιακό αριθμό. Αυτό γίνεται με αντιστοίχιση της τάσης σε έναν ακέραιο αριθμό μεταξύ του 0 και του 1023. Ο μικροελεγκτής μπορεί λοιπόν να διακρίνει 1024 επίπεδα του αναλογικού σήματος, πράγμα που δείχνει την υψηλή ακρίβειά του για μικρές διακυμάνσεις τάσης στην είσοδο. Επίσης, η πλακέτα διαθέτει δύο

ακροδέκτες μέσω των οποίων παρέχει τάση επιπέδου 5V και 3,3V αντίστοιχα. Η θύρα AREF αποτελεί μία αναλογική αναφορά.

Ο κώδικας για την λειτουργία του Arduino nano εισήχθη μέσω ενός καλωδίου τύπου USB από τον προσωπικό μου υπολογιστή. Για την συγγραφή του, η οποία γίνεται ουσιαστικά στην γλώσσα προγραμματισμού C++, απαιτείται η χρήση του λογισμικού Arduino IDE, το οποίο για τις ανάγκες της διπλωματικής εγκαταστάθηκε. Είναι συμβατό με διάφορα λειτουργικά συστήματα (Windows, Linux, macOS) και περιλαμβάνει χρήσιμες βιβλιοθήκες και συναρτήσεις για την μεταφορά δεδομένων από και προς τον Arduino nano όπως την αποστολή/ ανάγνωση μίας ακολουθίας bytes μέσω κάποιας σειριακής θύρας.

4.2) Περιγραφή της λειτουργίας του ψηφιακού περιστροφικού κωδικοποιητή και της επικοινωνίας του με την πλακέτα Arduino nano:

Πρώτα απ' όλα, για λόγους πληρότητας, περιγράφεται συνοπτικά ο ψηφιακός περιστροφικός κωδικοποιητής, μιας και αποτελεί μέρος της εργασίας: Ο ψηφιακός περιστροφικός κωδικοποιητής (digital rotary encoder) είναι ένα εξάρτημα αντιστοίχισης μίας γωνιακής θέσης ή κίνησης ενός άξονα σε ένα ψηφιακό σήμα εξόδου, που περιλαμβάνει μία εξωτερική λαβή (διακόπτη), η οποία ελέγχεται από τον χρήστη. Ειδικότερα, μετατρέπει την θέση ή την κίνηση του διακόπτη (ο χειρισμός του οποίου γίνεται με περιστροφή) σε δυαδικό σήμα εξόδου, που συνίσταται σε μία σειρά τετραγωνικών παλμών. Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι κωδικοποιητή: ο απόλυτος, ο οποίος αναφέρεται στην τρέχουσα θέση του άξονα και ο αυξητικός, ο οποίος αναφέρεται στην κίνησή του (μεταβολή της θέσης). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας ανήκων στην δεύτερη κατηγορία κωδικοποιητής. Είναι πιο ευέλικτος από ένα ποτενσιόμετρο καθώς δύναται να εκτελέσει πλήρη κύκλο (περιστροφή 360°) σε αντίθεση με το τελευταίο που εκτελεί μόνο περιστροφή 270°. Εσωτερικά περιλαμβάνει κάποιες ζώνες επαφής που συνδέονται με τον ακροδέκτη γείωσης, καθώς και δύο ακροδέκτες επαφής A, B οι οποίοι παράγουν μία ακολουθία τετραγωνικών παλμών έκαστος, όταν περιστρέφεται η λαβή του κωδικοποιητή. Συγκεκριμένα, καθώς η λαβή περιστρέφεται, οι A, B συνδέονται διαδοχικά με την γη, μέσω των ζωνών επαφής με τις οποίες εφάπτονται. Με την δεξιόστροφη περιστροφή, ο ακροδέκτης A συνδέεται με την γη πριν τον B, ενώ με την αριστερόστροφη αντίστροφα, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 4.3. Δεξιόστροφη περιστροφή κωδικοποιητή **Εικόνα 4.4. Αριστερόστροφη περιστροφή**

Έτσι δημιουργούνται δύο ακολουθίες τετραγωνικών παλμών σε κάθε περίπτωση. Παρατηρούμε ότι κατά την δεξιόστροφη περιστροφή, αμέσως μετά την αλλαγή της κατάστασης του ακροδέκτη A (δηλαδή την μετάβαση από λογικό 0 σε λογικό 1 ή από 1 σε 0) ο ακροδέκτης B βρίσκεται στην αντίθετη κατάσταση. Αντίστροφα κατά την αριστερόστροφη περιστροφή, αμέσως μετά την αλλαγή της κατάστασης του A, ο B βρίσκεται στην ίδια κατάσταση. Συνεπώς, βασιζόμενοι σε αυτή την παρατήρηση, μπορούμε να συμπεράνουμε την κατεύθυνση της περιστροφής της λαβής του κωδικοποιητή. Επιπλέον, ο αριθμός των θέσεων περιστροφής του διακόπτη προσδιορίζεται από την έξοδο του ακροδέκτη A, αφού σε κάθε περιστροφή του κατά μία θέση εκτελείται τετραγωνικός παλμός στην έξοδο αυτού του ακροδέκτη. Εκτός των παραπάνω ακροδεκτών (A, B, ακροδέκτης γείωσης) υπάρχουν άλλοι δύο: ο ακροδέκτης της θετικής τροφοδοσίας, ο οποίος λαμβάνει την απαιτούμενη τάση λειτουργίας, δηλαδή τα 5V στην παρούσα εργασία, και ο ακροδέκτης key, ο οποίος δηλώνει αν πιέστηκε ο διακόπτης, γιατί εκτός της δεξιόστροφης και αριστερόστροφης περιστροφής έχει επιπλέον την δυνατότητα κάθετης συμπίεσης. Το ρεύμα που διέρχεται από τον κωδικοποιητή που χρησιμοποιήθηκε είναι 1mA και η διάρκεια ζωής του ξεπερνά τις 100.000 περιστροφές.

Αρχικά, ο ψηφιακός κωδικοποιητής συνδέθηκε με την πλακέτα Arduino nano: Ο ακροδέκτης τροφοδοσίας του συνδέθηκε με την παράγουσα τάση 5V έξοδο της πλακέτας (θα ειπωθεί και στο πέμπτο κεφάλαιο) και ο κοινός ακροδέκτης με την γη της. Η πλακέτα λαμβάνει δεδομένα από τις ψηφιακές θύρες της D14, D15, D16, στις οποίες συνδέονται οι άλλοι τρεις ακροδέκτες του ψηφιακού κωδικοποιητή.

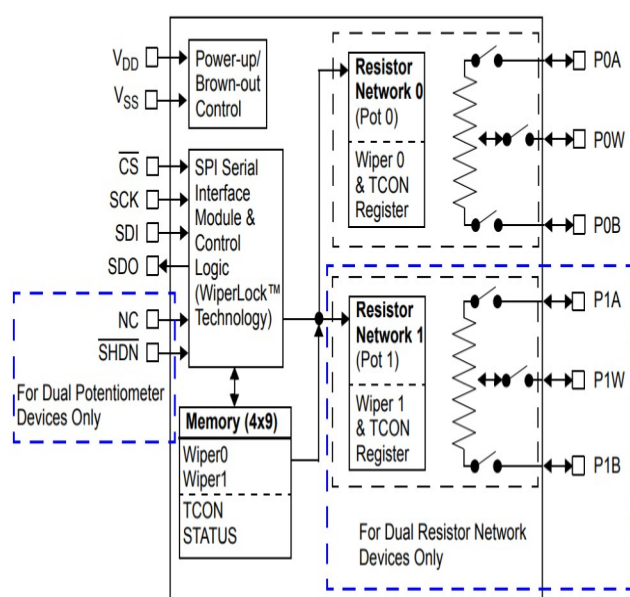
Στόχος της εργασίας είναι η εξής γενική λειτουργία του Arduino nano: Με την περιστροφή από τον χρήστη της λαβής του ευρισκόμενου στο εξωτερικό μέρος του κουτιού κατασκευών ψηφιακού κωδικοποιητή (digital encoder), ο Arduino nano θα λαμβάνει δύο σήματα από τους ακροδέκτες εξόδου του κωδικοποιητή A και B, ο καθένας εκ των οποίων συνδέεται με μία ψηφιακή θύρα του. Αυτά, με βάση τα παραπάνω, θα αντιστοιχούν σε μία ορισμένη θέση και κατεύθυνση περιστροφής της λαβής του κωδικοποιητή, προσδιορίζοντας έτσι την επιθυμητή τιμή του ρεύματος εξόδου. Παράλληλα, θα εμφανίζεται στην οθόνη lcd κατ' εντολή του Arduino η επιθυμητή αυτή τιμή, για να γνωστοποιείται στον χρήστη. Η πλακέτα (βάσει του επιθυμητού ρεύματος) θα στέλνει μία εντολή στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο προς

κατάλληλη αλλαγή της αντίστασης στην έξοδό του, δηλαδή της αντίστασης που αντιλαμβάνεται ο μη αναστρέφων ακροδέκτης του τελεστικού ενισχυτή της πηγής ρεύματος, η οποία θα προκαλέσει την επιθυμητή μεταβολή στο ρεύμα εξόδου, σύμφωνα με την θεωρητική ανάλυση που παρατίθεται στο πρώτο κεφάλαιο.

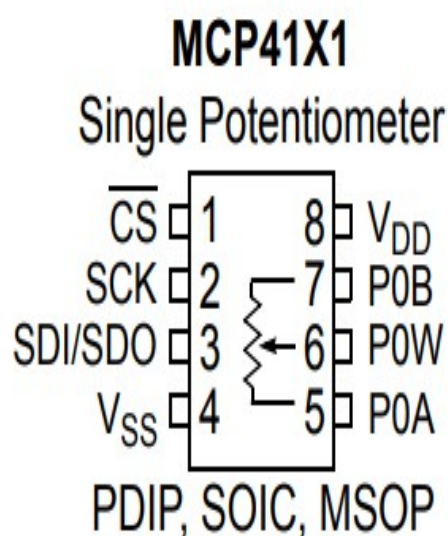
4.3) Περιγραφή ψηφιακού ποτενσιόμετρου:

Προκειμένου να κατανοηθεί η δομή του κώδικα που παρατίθεται παρακάτω, κρίνεται απαραίτητο να προηγηθεί μία συνοπτική περιγραφή των χαρακτηριστικών του ψηφιακού ποτενσιόμετρου, καθώς και του τρόπου σύνδεσης και επαφής με την πλακέτα Arduino nano, πράγμα που γίνεται σε αυτή την υποενότητα.

Πρώτα απ' όλα, ποτενσιόμετρο είναι ένα είδος καταμεριστή τάσης (διάταξη δύο αντιστάσεων που αυξάνει την περιοχή μέτρησης ενός βολτομέτρου) που διέπεται από μεταβλητή σχέση καταμερισμού, η οποία εξασφαλίζει την ύπαρξη μη σταθερού διαιρέτη τάσης. Το ψηφιακό ποτενσιόμετρο πραγματοποιεί αλλαγή του λόγου αντιστάσεων κατόπιν ψηφιακής εντολής που δέχεται (λχ από μία πλακέτα Arduino nano, όπως στην παρούσα εργασία). Το block διάγραμμα του γενικού περιλαμβάνοντος ποτενσιόμετρο/α chip, αλλά και του τύπου MCP41X1, καθώς για την εργασία επιλέχθηκε ο τύπος MCP4151, παρουσιάζεται κάτωθι:



Εικόνα 4.5. Block διάγραμμα chip



Εικόνα 4.6. Block διάγραμμα τύπου MCP41X1

Συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα παρουσίας στο ίδιο chip δύο ποτενσιόμετρων (διπλό chip), αλλά για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε απλώς ένα (μονό chip). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και ως ρεοστάτης. Η τάση τροφοδοσίας του μπορεί να φτάνει τα 5,5V, ενώ η αντίσταση στα άκρα του είναι 5kΩ, τιμή που αποτελεί βέβαια την μέγιστη αντίσταση, καθώς αυτή θα μεταβάλλεται μεταξύ των 0Ω και αυτής της τιμής, ανάλογα με την εκάστοτε εντολή της πλακέτας. Διαθέτει 8-bit ανάλυση, δηλαδή δέχεται ψηφιακές εντολές μήκους 8bits (257 βήματα).

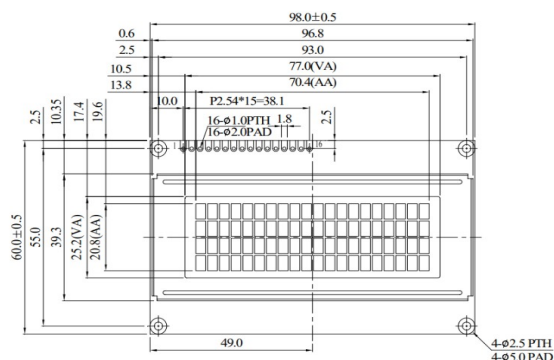
Ο ακροδέκτης CS λαμβάνει την πληροφορία που καθορίζει ποιο ποτενσιόμετρο του chip θα χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση ύπαρξης περισσοτέρων του ενός στο ίδιο chip. Στην συγκεκριμένη όμως περίπτωση, που υπάρχει μόνο ένα, αυτό το ποτενσιόμετρο χρησιμοποιείται όταν το σήμα στον εν λόγω ακροδέκτη είναι LOW, ενώ δεν αξιοποιείται όταν είναι HIGH, μιας και ο συγκεκριμένος ακροδέκτης διαθέτει αρνητική λογική αντιστοίχιση. Ο ακροδέκτης SCK δέχεται από την πλακέτα το σήμα ρολογιού που καθορίζει την αλλαγή των παλμών και σηματοδοτεί έτσι την μετάδοση του επόμενου bit πληροφορίας, η ανάγνωση του οποίου γίνεται μέσω του ακροδέκτη SDI. Από τους ακροδέκτες Vss και Vdd, το ποτενσιόμετρο λαμβάνει την χαμηλή και υψηλή τάση αντίστοιχα, που είναι απαραίτητες για την λειτουργία του. Η θύρα P0B είναι ο κατώτερος ακροδέκτης του καταμεριστή, ο οποίος στην εργασία συνδέεται μέσω της αντίστασης 10Ω στην γη, ενώ η θύρα P0W αποτελεί τον δρομέα του καταμεριστή και συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη του τελεστικού ενισχυτή, στον οποίο φαίνεται συνδεδεμένος ένας διαιρέτης τάσης στην εικόνα 1.1, όπου παρατίθεται το κύκλωμα στο LTspice. Τέλος, η θύρα P0A αποτελεί τον ανώτερο ακροδέκτη του καταμεριστή, ο οποίος συνδέεται μέσω μίας αντίστασης 30kΩ στην θετική τροφοδοσία.

Όσον αφορά την σύνδεσή του με την πλακέτα Arduino nano, αυτή έγινε ως εξής:

Ο ακροδέκτης CS συνδέθηκε με την ψηφιακή θύρα της πλακέτας D12, ο SCK με την D11, ο SDI με την D10, από τις οποίες το ποτενσιόμετρο λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες που αναφέρθηκαν. Ο ακροδέκτης Vss συνδέεται με την γη του Arduino, καθώς πρέπει να έχει μηδενική τάση και τέλος ο ακροδέκτης V_{DD} με τον, προσφέροντά τα απαραίτητα για την τροφοδοσία του 5V, ακροδέκτη του Arduino nano που φαίνεται στην εικόνα 4.2.

4.4) Σύνδεση πλακέτας με την οθόνη lcd:

Προκειμένου να εμφανίζονται ορισμένα δεδομένα στον χρήστη, χρησιμοποιήθηκε μία οθόνη lcd (liquid crystal display). Οι διαστάσεις της είναι 20X4, δηλαδή έχει 4 γραμμές 20 χαρακτήρων, για την παρουσίαση αυτών των δεδομένων. Η δομή της αλλά και η ίδια, φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 4.7. Δομή οθόνης lcd



Εικόνα 4.8. Οθόνη lcd που χρησιμοποιήθηκε

Περιλαμβάνει 16 ακροδέκτες. Ο πρώτος συνδέθηκε στην γη μίας πλακέτας, η οποία πρέπει να είναι κοινή με την γη του Arduino, καθώς η οθόνη επικοινωνεί με αυτόν με ψηφιακά σήματα. Από τον δεύτερο ακροδέκτη, πρέπει να λαμβάνεται η απαραίτητη για την τροφοδοσία της οθόνης τάση των 5V, μέσω κατάλληλου voltage regulator (σταθεροποιητή τάσης), που συνδέθηκε στην έξοδο του τροφοδοτικού των 11V, όπως περιεγράφηκε στο τέλος του δεύτερου κεφαλαίου. Το pin 3, σύμφωνα με το datasheet της οθόνης πρέπει να λαμβάνει μία τάση αναφοράς ευρισκόμενη μεταξύ των 0 V και της θετικής τροφοδοσίας της, πράγμα που επιτεύχθηκε με την χρήση ενός αναλογικού ποτενσιόμετρου μεταξύ γης και θετικής τροφοδοσίας. Το pin 4 συνδέεται με την ψηφιακή θύρα D2 του Arduino, το pin 5 συνδέεται με την ψηφιακή θύρα D3 της πλακέτας και το pin 6 με την D4, ώστε η οθόνη να μπορεί να επικοινωνήσει με τον Arduino nano. Οι ακροδέκτες 7, 8, 9 και 10 δεν χρησιμοποιούνται. Οι θύρες 11- 14 της οθόνης, από τις οποίες δύνανται να μεταδοθούν κατά αμφίδρομο τρόπο ψηφιακά δεδομένα, συνδέονται με τους ψηφιακούς ακροδέκτες D5, D6, D7, D8 του Arduino αντίστοιχα. Τέλος, οι θύρες 15 και 16 χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία του led της οθόνης και ως εκ τούτου η πρώτη πρέπει να λαμβάνει την αναγκαία τάση των 3.3V από την έξοδο του εξασφαλίζοντος αυτήν voltage regulator και η δεύτερη συνδέεται με την γη.

Για την λειτουργία της οθόνης απαιτείται ρεύμα περίπου 1.5mA και για τον φωτισμό (led) περίπου 50mA, ρεύματα που διαρρέουν τους αντίστοιχους voltage regulators που αναφέρθηκαν. Προκειμένου να γίνει χρήση κατάλληλων εντολών για την επικοινωνία του Arduino nano με την οθόνη, συμπεριλήφθηκε στον κώδικα που συντάχθηκε για τον προγραμματισμό της πλακέτας η βιβλιοθήκη <LiquidCrystal.h>.

4.5) Ανάλυση και παρουσίαση του κώδικα για τον προγραμματισμό του Arduino Nano Every της εργασίας:

Σε ό,τι αφορά την δομή του κώδικα πρέπει να επισημανθεί ότι αυτός πρέπει να αποτελείται από δύο βασικές συναρτήσεις, την void setup () και την void loop (). Αυτές μπορεί να καλέσουν και άλλες που ενδεχομένως υπάρχουν στον κώδικα, όπως στην παρούσα περίπτωση. Η ύπαρξή αυτών των δύο συναρτήσεων είναι επιβεβλημένη καθώς η απουσία και των δύο ή μίας εξ αυτών θα εμποδίσει την μεταγλώττιση του πηγαίου κώδικα. Ο ορισμός των μεταβλητών μπορεί να γίνει και εκτός αυτών των δύο, στην αρχή του κώδικα. Η συνάρτηση void setup () εκτελείται αμέσως μόλις η πλακέτα τροφοδοτηθεί με ρεύμα κατά την εκκίνηση ή την επανεκκίνηση, μία μόνο φορά. Σε αυτή λαμβάνουν χώρα οι απαραίτητες αρχικοποιήσεις (ορισμός pins ως είσοδοι ή έξοδοι κ.λπ.). Η συνάρτηση void loop () περιλαμβάνει το κύριο τμήμα του κώδικα και εκτελείται συνεχώς όσο η πλακέτα τροφοδοτείται με ρεύμα. Η επικοινωνία των δύο συναρτήσεων πραγματοποιείται με global μεταβλητές. Ολόκληρος ο κώδικας παρατίθεται στο τέλος της υποενότητας.

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την σύνταξη του κώδικα:

- `pinMode(pin, mode)`: Χρησιμοποιείται στην συνάρτηση `void setup()` και σε άλλες συναρτήσεις προς δήλωση κάθε ακροδέκτη του Arduino nano (`pin`) ως είσοδο, οπότε το `mode` λαμβάνει την τιμή `INPUT`, ή ως έξοδο οπότε το `mode` λαμβάνει την τιμή `OUTPUT`.
- `Μεταβλητή= analogRead (pin)`: Χρησιμοποιείται για την ανάγνωση μίας αναλογικής τιμής από μία αναλογική είσοδο του Arduino nano (`pin`). Η τιμή αυτή θα κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1023 λόγω του A/D μετατροπέα που διαθέτει κάθε αναλογική είσοδος (όπως αναφέρθηκε) και θα αποθηκευτεί στην `Μεταβλητή`. Η συνάρτηση `digitalRead (pin)` χρησιμοποιείται αντίστοιχα για ανάγνωση μίας ψηφιακής τιμής.
- `Map (μεταβλητή, αρχ. min, αρχ. max, τελ. min, τελ. max)`: Χρησιμοποιείται για αντιστοίχιση τιμών από ένα εύρος σε ένα άλλο και λειτουργεί μόνο με ακέραιους αριθμούς.
- `Lcd.begin( cols, rows)`: Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των διαστάσεων (αριθμός στηλών και γραμμών) της οθόνης `Lcd`.
- `Lcd.print (data)`: Χρησιμοποιείται για την εκτύπωση των επιθυμητών δεδομένων (`data`) στην οθόνη `Lcd`.
- `Lcd.setCursor (col, row)`: Χρησιμοποιείται για την μετακίνηση του κέρσορα στην θέση της οθόνης `Lcd` όπου θα εγγραφεί το προσεχές κείμενο.
- `millis()`: Η συνάρτηση επιστρέφει το χρονικό διάστημα (σε χιλιοστά του δευτερολέπτου) που παρήλθε από την έναρξη της εκτέλεσης του προγράμματος από την πλακέτα Arduino. Η τιμή του είναι τύπου `unsigned long`.
- `digitalWrite( pin, value)`: Χρησιμοποιείται για απόδοση σε μία ψηφιακή θύρα εξόδου του Arduino (`pin`) μίας τιμής (`value`) η οποία δύναται να πάρει μόνο δύο στάθμες, `LOW` και `HIGH`.

4.5.1) Ονομασία θυρών του Arduino και ορισμός απαραίτητων συναρτήσεων πριν την συνάρτηση `void setup()`:

Αρχικά, πριν τον ορισμό της συνάρτησης `setup()`, ορίστηκαν ορισμένες θύρες του Arduino nano λαμβάνοντας ονόματα μεταβλητών με τις οποίες μεταχειρίστηκαν από τις συναρτήσεις του κώδικα. Για παράδειγμα με την εντολή

```
const int chipSelectPin = 12;
```

η ψηφιακή θύρα 12 της πλακέτας Arduino nano έλαβε το όνομα `chipSelectPin` και έτσι προσεγγίζεται από τις συναρτήσεις του κώδικα. Όλες οι εντολές που βρίσκονται στην αρχή του κώδικα και αφορούν τα ονόματα των ακροδεκτών της πλακέτας φαίνονται:

```
const int clockPin = 11;
const int dataPin = 10;
const int chipSelectPin = 12;
const int dig1= 14;
```



```
const int dig2= 15;
const int dig3= 16;
const int dig4=17;
const int ledswitch= 18;
```

Ορίστηκαν επίσης μεταβλητές τύπου int, bool, static bool, float, volatile byte, unsigned long και const unsigned long που χρησιμοποιούνται από τον παρακάτω συνταχθέντα κώδικα για υλοποίηση ορισμένων ενεργειών. Επίσης, με χρήση της εντολής LiquidCrystal, δημιουργείται μία μεταβλητή του τύπου LiquidCrystal, η οποία λαμβάνει τις απαραίτητες παραμέτρους για την αντιστοίχιση των ακροδεκτών του Arduino με τις επιθυμητές θύρες της οθόνης lcd. Προφανώς, είναι αναγκαία η συμπερίληψη στον κώδικα της βιβλιοθήκης <LiquidCrystal.h> για την επικοινωνία του με την οθόνη lcd, όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 4.4.

Ακολουθως, ορίζονται οι συναρτήσεις initPins(), transferData(byte data). Στην συνάρτηση initPins() ορίζονται οι ψηφιακοί ακροδέκτες D10, D11, D12 του Arduino nano (dataPin, clockPin και chipSelectPin αντίστοιχα), που όπως αναφέρθηκε είναι συνδεδεμένες με τους ακροδέκτες SDI, SCK και CS του ψηφιακού ποτενσιόμετρου αντίστοιχα, ως έξοδοι της πλακέτας και έπειτα αρχικοποιούνται και οι τρεις ακροδέκτες με απενεργοποίηση. Σημειώνεται εδώ πάλι ότι, σύμφωνα με το datasheet του ποτενσιόμετρου, η θύρα του CS δέχεται αρνητική λογική. Συνεπώς, τίθεται σε απενεργοποίηση με HIGH (λογικό 1). Παρατίθενται οι εντολές που συνιστούν την συνάρτηση:

```
void initPins()
{
  pinMode(clockPin, OUTPUT);
  pinMode(dataPin, OUTPUT);
  pinMode(chipSelectPin, OUTPUT);
  digitalWrite(clockPin, LOW);
  digitalWrite(dataPin, LOW);
  digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
}
```

Στη συνέχεια, ορίστηκε η συνάρτηση transferData(byte data), που όταν κληθεί δέχεται ως όρισμα μία μεταβλητή τύπου byte, περιλαμβάνουσα 8bits, και την μεταδίδει ως πληροφορία στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο. Χρησιμοποιούνται μικρές καθυστερήσεις προκειμένου να διασφαλισθεί η ορθή αποδοχή από το ποτενσιόμετρο των εκάστοτε μεταβολών της κατάστασης των ακροδεκτών του και να γίνει έτσι ορθώς η μετάδοση των bits. Αρχικά ενεργοποιείται ο ακροδέκτης chipSelectPin (με LOW λόγω αρνητικής λογικής) ούτως ώστε να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το ποτενσιόμετρο. Για να γίνει η ανάγνωση από το ποτενσιόμετρο, του bit που βρίσκεται στην θύρα SDI επιβάλλεται να υπάρξει θετική μετάβαση του σήματος ρολογιού (το οποίο λαμβάνεται από το ποτενσιόμετρο μέσω του ακροδέκτη SCK), δηλαδή ενεργοποίηση της θύρας του Arduino clockPin. Μια θετική μετάβαση του παλμού ρολογιού προκαλεί ανάγνωση, από το ποτενσιόμετρο, του bit πληροφορίας που βρίσκεται τότε στην θύρα SDI.

Μεταδίδονται πρώτα 8 διαδοχικά μηδενικά καθώς, σύμφωνα με το datasheet, προκειμένου το ποτενσιόμετρο να δεχθεί ακολούθως 1 byte (το οποίο είναι το όρισμα της ορισθείσης συνάρτησης και αντιστοιχεί στην επιδιωκόμενη τιμή της θέσης του δρομέα), επιβάλλεται να προηγηθεί η αποστολή από την πλακέτα Arduino nano προς αυτό 8 διαδοχικών μηδενικών. Ως εκ τούτου, τίθεται στο λογικό 0 ο ακροδέκτης dataPin από τον οποίο η θύρα SDI του ποτενσιόμετρου διαβάζει κάθε bit πληροφορίας. Έπειτα, υπάρχει ένα for loop κατά την εκτέλεση του οποίου μεταδίδονται 8 συνεχείς παλμοί ρολογιού στην θύρα clockPin, ενώ η θύρα dataPin παραμένει σε χαμηλή τάση 0V (λογικό 0), με αποτέλεσμα το ποτενσιόμετρο να διαβάζει 8 διαδοχικά μηδενικά. Μεσολαμβάν κάποιες μικρές χρονικές καθυστερήσεις προκειμένου να γίνει αντιληπτός κάθε ολόκληρος παλμός.

Σε κάθε εκτέλεση του επόμενου for loop, επιλέγεται 1 bit της πληροφορίας, που αντιστοιχεί στην επιθυμητή θέση του δρομέα του ποτενσιόμετρου, data (συνολικού μήκους 8 bits όπως ειπώθηκε), αρχίζοντας από το αριστερότερο bit, με εφαρμογή λογικού AND (&) μεταξύ της πληροφορίας data και μίας λογικής ακολουθίας έχουσας σε κάθε θέση της 0 πλην της θέσης που αντιστοιχεί στο bit της data που επιθυμούμε κάθε φορά να απομονώσουμε. Το απομονωθέν bit στέλνεται στον ακροδέκτη dataPin της πλακέτας Arduino nano. Αυτή η διαδικασία γίνεται πριν την θετική μετάβαση του παλμού ρολογιού στην θύρα clockPin, η οποία σηματοδοτεί την ανάγνωση του επιλαχόντος bit από το ποτενσιόμετρο. Καθ' όλη την διάρκεια της μετάδοσης του byte πρέπει φυσικά να είναι ενεργοποιημένη η θύρα chipSelectPin. Μετά την εκτέλεση αυτού του for loop όμως, ο ακροδέκτης αυτός απενεργοποιείται (με HIGH όπως αναφέρθηκε), πράγμα απαραίτητο έτσι ώστε σε περίπτωση λάθους πληροφορίας, που ενδεχομένως προκύψει εξαιτίας απώλειας κάποιου bit λόγω θορύβου, το λάθος να παραμείνει εντός αυτού του byte και η μετάδοση των υπόλοιπων να πραγματοποιηθεί ομαλώς. Το μέρος του κώδικα που αποτελεί την συνάρτηση transferData(byte data) παρουσιάζεται κάτωθι:

```
void transferData(byte data)
{
    delayMicroseconds(pulseDelay);
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
    delayMicroseconds(pulseDelay);
    digitalWrite(dataPin, LOW);
    delayMicroseconds(pulseDelay);

    for(int i=0; i<8; i++)
    {
        digitalWrite(clockPin, LOW);
        delayMicroseconds(pulseDelay);
        digitalWrite(clockPin, HIGH);
        delayMicroseconds(pulseDelay);
```

```

}

for (byte mask=0b10000000; mask>=0b00000001; mask>>=1)
{
    digitalWrite(clockPin, LOW);
    delayMicroseconds(pulseDelay);
    digitalWrite(dataPin,(data&mask)?HIGH:LOW);
    delayMicroseconds(pulseDelay);
    digitalWrite(clockPin, HIGH);
    delayMicroseconds(pulseDelay);
}

digitalWrite(clockPin, LOW);
delayMicroseconds(pulseDelay);
digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
delayMicroseconds(pulseDelay);
}

```

Η επόμενη συνάρτηση που ορίζεται είναι η `doEncoderA()`, η οποία καλείται, στα πλαίσια διακοπής, κάθε φορά που προκαλείται μεταβολή του ψηφιακού κωδικοποιητή (digital encoder) και ειδικότερα όταν αλλάζει η τιμή του ακροδέκτη του, A. Όπως εξηγήθηκε, η λαβή του μπορεί να περιστραφεί δεξιά και αριστερά. Επαναλαμβάνεται ότι η πλακέτα Arduino nano συνδέεται με τον κωδικοποιητή μέσω των ψηφιακών ακροδεκτών D14, D15, D16 (`dig1`, `dig2`, `dig3` αντίστοιχα). Συγκεκριμένα, οι παραπάνω ακροδέκτες συνδέονται με τους A, B και key του encoder. Χρησιμοποιείται διακοπή για την αποτροπή οποιασδήποτε απώλειας ανάγνωσης στις εισόδους `dig1` και `dig2`.

Πρώτα πρώτα, σε αυτή την συνάρτηση εφαρμόζεται μία καθυστέρηση 1000μs όταν η λογική μεταβλητή `rotating` είναι `true` (τιμή που της ανατίθεται στην συνάρτηση `loop` σε κάθε εκτέλεσή της), προκειμένου να αποφευχθεί η ανάγνωση ανεπιθύμητων σπινθηρισμών που θα προκαλούσε λανθασμένες ενέργειες. Για να διασφαλισθεί η διαδοχική αποδοχή παλμών, η τιμή της λογικής μεταβλητής `A_set` που έχει αρχικοποιηθεί με `false` αλλάζει όταν ο παλμός στον ακροδέκτη A του encoder πάρει την τιμή 1 και, κατά την επόμενη κλήση της ίδιας συνάρτησης, επιστρέφει στην αρχική του τιμή `false` (όταν δηλαδή ολοκληρωθεί ο παλμός).

Από τις εικόνες 4.3 και 4.4 παρατηρούμε ότι κατά την δεξιόστροφη περιστροφή, κάθε φορά που ο παλμός του ακροδέκτη A γίνεται 1, ο παλμός του B βρίσκεται στο επίπεδο 0 (ο πρώτος προηγείται του δεύτερου), ενώ κατά την αριστερόστροφη κάθε φορά που ο παλμός του ακροδέκτη B γίνεται 1, ο παλμός του A βρίσκεται στο επίπεδο 0. Η συγκεκριμένη συνάρτηση αυξάνει την μεταβλητή `wiper` τύπου `volatile byte` σε περίπτωση δεξιόστροφης περιστροφής του διακόπτη, δηλαδή όταν ο παλμός του A (που διαβάζεται από την θύρα `dig1`) προηγείται του παλμού του B. Η αύξηση γίνεται κατά 1 ή κατά 10 μονάδες, ανάλογα με την τιμή της λογικής μεταβλητής `step` η οποία καθορίζεται από το πάτημα του, συνδεόμενου με την θύρα `dig3` της πλακέτας, ακροδέκτη `key` του encoder όπως παρουσιάζεται κατόπιν, στην

συνάρτηση loop(). Αρχικοποιείται στην τιμή false στην void setup(). Η συνάρτηση doEncoderA() παρουσιάζεται κάτωθι:

```
void doEncoderA() {  
  if ( rotating ) delayMicroseconds (1000);  
  
  if ( digitalRead(dig1) != A_set ) {  
    A_set = !A_set;  
  
    if ( A_set && !B_set ) {  
      if(step== HIGH) wiper += 10;  
      else wiper +=1; }  
  
    rotating = false;  
  }  
}
```

Ακολουθεί η συνάρτηση void doEncoderB() η οποία κάνει την αντίστοιχη διαδικασία, σε περίπτωση όμως που συμβαίνει αριστερόστροφη περιστροφή. Μειώνει δηλαδή την μεταβλητή wiper όταν ο παλμός του ακροδέκτη B του encoder προηγείται αυτού του A, κατά 1 ή 10 μονάδες ανάλογα με την τιμή της μεταβλητής step.

4.5.2) Η συνάρτηση void setup():

Στην συνάρτηση void setup() ορίστηκαν κάποιοι ψηφιακοί ακροδέκτες του Arduino nano και συγκεκριμένα οι D13 και ledswitch ως ακροδέκτες εξόδου, με χρήση της συνάρτησης pinMode(pin, mode) και τέθηκαν σε χαμηλό λογικό επίπεδο (LOW). Καλείται η συνάρτηση initPins() που περιεγράφηκε παραπάνω. Επιπλέον, αρχικοποιούνται οι λογικές μεταβλητές step και on_off. Επιπρόσθετα, αρχίζει η επικοινωνία της πλακέτας με το ψηφιακό ποτενσιόμετρο, δίνοντάς του εντολή μηδενισμού της αντίστασης στην έξοδό του και ακολουθεί η χρήση της εντολής lcd.begin (20, 4) με την οποία ορίζονται οι διαστάσεις της οθόνης (20 στήλες το εύρος και 4 γραμμές το ύψος). Επίσης, αρχικοποιούνται ως είσοδοι οι ψηφιακές θύρες dig1, dig2, dig3 και dig4 (οι τρεις πρώτες συνδέονται με τον ψηφιακό κωδικοποιητή και η τέταρτη με έναν εξωτερικό διακόπτη) της πλακέτας με ενεργοποιημένη την εσωτερική αντίσταση έλξης. Όταν δεν υπάρχει μεταβολή της λαβής του κωδικοποιητή, οι θύρες παραμένουν στην προηγούμενη κατάστασή τους. Τέλος, ορίζεται η ύπαρξη διακοπών κατά τις οποίες καλούνται οι παραπάνω συναρτήσεις doEncoderA() και doEncoderB(), κάθε φορά που συμβαίνει περιστροφή της λαβής του ψηφιακού κωδικοποιητή, δηλαδή κάθε φορά που μεταβάλλονται οι τιμές των ακροδεκτών του, A και B, οι οποίες αναγινώσκονται από τις ψηφιακές θύρες dig1 και dig2 της πλακέτας Arduino nano αντίστοιχα. Φαίνονται κάτωθι οι εντολές που συνιστούν την συνάρτηση void setup() του πηγαίου κώδικα, οι οποίες

εκτελούνται μόνο μία φορά κατά την εκκίνηση ή την επανεκκίνηση, όπως αναφέρθηκε:

```
void setup() {  
  
    pinMode(13, OUTPUT);  
    digitalWrite(13, LOW);  
    initPins();  
    transferData(0b00000000);  
    lcd.begin(20, 4);  
    pinMode(dig1, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(dig2, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(dig3, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(dig4, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(ledswitch, OUTPUT);  
    digitalWrite(ledswitch, LOW);  
    on_off= false;  
    step= HIGH;  
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(dig1), doEncoderA, CHANGE);  
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(dig2), doEncoderB, CHANGE);  
  
    delay(10);  
}
```

4.5.3) Η συνάρτηση void loop ():

Αρχικά, σε αυτή την συνάρτηση ανατίθεται στην μεταβλητή rotating η τιμή true, όπως αναφέρθηκε. Ακολούθως ελέγχεται αν έχει συμπιεστεί κάθετα από τον χρήστη ο digital encoder, αν δηλαδή έχει ενεργοποιηθεί ο συνδεδεμένος με την θύρα dig3 του Arduino nano ακροδέκτης του, key, ώστε η μεταβλητή step να λάβει την κατάλληλη τιμή, η οποία καθορίζει το βήμα αύξησης/ μείωσης της μεταβλητής wiper κατά την κλήση της συνάρτησης doEncoderA()/ doEncoderB(), όταν συμβαίνει δεξιόστροφη/ αριστερόστροφη περιστροφή της λαβής του encoder αντίστοιχα. Χρησιμοποιείται η τεχνική debouncing, προκειμένου να επιτευχθεί η αγνόηση των σπινθηρισμών μέσω της παράβλεψης οποιασδήποτε μεταβολής στην κατάσταση του ακροδέκτη για ένα χρονικό διάστημα που ορίστηκε ίσο με 600 ms (debouncingTime). Μετά αναγιγνώσκεται η κατάσταση ενός εξωτερικού πιεστικού διακόπτη on_off (με χρήση της παραπάνω τεχνικής), που τοποθετήθηκε ώστε με την συμπίεσή του από τον χρήστη να εμφανίζεται στην έξοδο της πηγής ρεύματος το ρεύμα που έχει επιλέξει. Αν ο διακόπτης δεν έχει πιεστεί τότε οποιαδήποτε επιλογή ρεύματος από τον χρήστη μέσω του encoder, δεν προκαλεί την αποστολή κατάλληλης εντολής στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο και συνεπώς δεν μεταβάλλεται η τιμή του ρεύματος στην έξοδο. Αντίθετα, αν ο διακόπτης πιεστεί τότε αποστέλλεται η απαραίτητη εντολή στο ποτενσιόμετρο προς επίτευξη αυτής της επιθυμητής τιμής στην έξοδο, με κλήση της συνάρτησης transferData, με όρισμα την τρέχουσα τιμή

της μεταβλητής wiper. Η κατάσταση της εξόδου (on σε περίπτωση πατήματος του διακόπτη/off στην αντίθετη περίπτωση) φαίνεται στην πρώτη γραμμή της οθόνης lcd προς ενημέρωση του χρήστη. Το επιπλέον τρανζίστορ που φαίνεται στο κύκλωμα του τροφοδοτικού των 11 V, στο κάτω δεξί μέρος της εικόνας 3.3 του κεφαλαίου 3, προσφέρει την δυνατότητα ανάμματος του led αυτού του διακόπτη.

Στη συνέχεια, με την συνάρτηση map, η λειτουργία της οποίας εξηγήθηκε στο 4.5, η τιμή της wiper αντιστοιχίζεται από το εύρος τιμών 0-256 που βρίσκεται, στο εύρος 0-42 που αντιστοιχεί στην περιοχή που κυμαίνεται η τιμή του ρεύματος εξόδου. Έτσι, υπολογίζεται η εκάστοτε επιθυμητή τιμή ρεύματος.

Τέλος, τυπώνεται στην οθόνη η επιθυμητή τιμή ρεύματος στην δεύτερη και τρίτη γραμμή της, αλλά και το επίπεδο της μεταβλητής step (min αν step= LOW και max αν step= HIGH), στην τέταρτη γραμμή της, που καθορίζει αν η τιμή της μεταβλητής wiper θα μεταβάλλεται κατά 1 ή κατά 10, με την κάτωθι ακολουθία εντολών:

```
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print("desired output=");  
lcd.setCursor(0, 2);  
lcd.print(current);  
lcd.print("mA");  
lcd.print(" ");  
lcd.setCursor(0, 3);  
lcd.print("step= ");  
if(step) lcd.print("max");  
else lcd.print("min");
```

Με την εντολή digitalWrite(13, !digitalRead(13)), που αποτελεί την τελευταία του κώδικα και καλείται σε κάθε εκτέλεση της loop(), αναβοσβήνει το led της πλακέτας Arduino nano.

4.5.4) Παράθεση του κώδικα:

Ολόκληρος ο κώδικας παρουσιάζεται παρακάτω:

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
LiquidCrystal lcd(2,3,4,5,6,7,8);
```

```
const unsigned long pulseDelay = 1;
```

```
const unsigned long debouncingTime= 600;
```

```
const int clockPin = 11;
```

```
const int dataPin = 10;
```

```

const int chipSelectPin = 12;
const int dig1= 14;
const int dig2= 15;
const int dig3= 16;
const int dig4= 17;
const int ledswitch= 18;
unsigned long old_time= 0;

void initPins()
{
  pinMode(clockPin, OUTPUT);
  pinMode(dataPin, OUTPUT);
  pinMode(chipSelectPin, OUTPUT);
  digitalWrite(clockPin, LOW);
  digitalWrite(dataPin, LOW);
  digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
}

void transferData(byte data)
{
  delayMicroseconds(pulseDelay);
  digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
  delayMicroseconds(pulseDelay);
  digitalWrite(dataPin, LOW);
  delayMicroseconds(pulseDelay);

  for(int i=0; i<8; i++)
  {
    digitalWrite(clockPin, LOW);
    delayMicroseconds(pulseDelay);
    digitalWrite(clockPin, HIGH);
    delayMicroseconds(pulseDelay);
  }

  for (byte mask=0b10000000; mask>=0b00000001; mask>>=1)
  {
    digitalWrite(clockPin, LOW);

```

```

    delayMicroseconds(pulseDelay);
    digitalWrite(dataPin,(data&mask)?HIGH:LOW);
    delayMicroseconds(pulseDelay);
    digitalWrite(clockPin, HIGH);
    delayMicroseconds(pulseDelay);
}

digitalWrite(clockPin, LOW);
delayMicroseconds(pulseDelay);
digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
delayMicroseconds(pulseDelay);
}

volatile byte wiper= 0;
float current;
static bool rotating= false;
bool A_set= false;
bool B_set= false;
bool step;
bool on_off= false;
int output_voltage;

void doEncoderA() {

    if (rotating) delayMicroseconds (1000);

    if ( digitalRead(dig1) != A_set ) {
        A_set = !A_set;

        if ( A_set && !B_set ) {
            if(step== HIGH) wiper += 10;
            else wiper += 1;  }

        rotating = false;
    }
}

```

```

void doEncoderB() {
  if ( rotating ) delayMicroseconds (1000);
  if ( digitalRead(dig2) != B_set ) {
    B_set = !B_set;
    if ( B_set && !A_set ) {
      if(step== HIGH) wiper -= 10;
      else wiper -= 1; }
    rotating = false;
  }
}

void setup() {

  pinMode(13, OUTPUT);
  digitalWrite(13, LOW);
  initPins();
  transferData(0b00000000);
  lcd.begin(20, 4);
  pinMode(dig1, INPUT_PULLUP);
  pinMode(dig2, INPUT_PULLUP);
  pinMode(dig3, INPUT_PULLUP);
  pinMode(dig4, INPUT_PULLUP);
  pinMode(ledswitch, OUTPUT);
  digitalWrite(ledswitch, LOW);
  on_off= false;
  step= HIGH;
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(dig1), doEncoderA,
CHANGE);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(dig2), doEncoderB,
CHANGE);

  delay(10);
}

void loop() {

```



```

rotating = true;

if (digitalRead(dig3) == LOW) {
    if(millis() -old_time> debouncingTime ) step= !step;
    old_time= millis();
}

if(digitalRead(dig4)== LOW) {
    if(millis() -old_time> debouncingTime ) {
        on_off= !on_off;
        old_time= millis();
    }
}

if (on_off){
    transferData(wiper);
    lcd.home();
    lcd.print("output= ");
    lcd.print("on ");
}
else
{
    transferData(0);
    lcd.home();
    lcd.print("output= ");
    lcd.print("off");
}
current= (float)map(wiper*100, 0, 25600, 0, 4200);
current= current/100;
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("desired output=");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(current);
lcd.print("mA");
lcd.print("  ");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("step= ");
if(step) lcd.print("max");

```

```
else lcd.print("min");  
  digitalWrite(13,!digitalRead(13));  
}
```

Κεφάλαιο 5. Τελική πλήρης κατασκευή και λειτουργία της διάταξης

Μετά την περάτωση των παραπάνω βημάτων ακολούθησε η πλήρης κατασκευή των τριών κυκλωμάτων σε τρεις διαφορετικές πλακέτες, όπως αναφέρθηκε, με συγκόλληση των εξαρτημάτων στην επιφάνειά τους [4] [5] [7]. Η επικοινωνία των πλακετών μεταξύ τους, με τον μετασχηματιστή (που αποτελεί το πρώτο στάδιο των δύο τροφοδοτικών), με το φορτίο, αλλά και με την πλακέτα Arduino nano, η οποία τοποθετήθηκε σε μία συμβατή για Arduino nano βάση, έγινε με χρήση πολύκλωνων καλωδίων. Με τον ίδιο τρόπο επικοινωνεί η πλακέτα Arduino nano με την οθόνη, τον encoder και το ψηφιακό ποτενσιόμετρο.

Τηρήθηκε το κυκλωματικό σχέδιο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3, με εξαίρεση δύο σημεία. Πρώτον, η πηγή ρεύματος λαμβάνει 30V από το σημείο πριν την διόδο μεταξύ αυτής και του τροφοδοτικού της, καθώς παρατηρήθηκε μικρή διακύμανση της τάσης εξόδου του τροφοδοτικού όταν αυτή λαμβάνεται μετά την διόδο, στην περίπτωση αισθητής αλλαγής του φορτίου του. Αυτό φυσικά δεν πρόκειται να συμβεί, μιας και το τροφοδοτικό θα είναι μονίμως συνδεδεμένο με την πηγή ρεύματος, αλλά για λόγους ορθότητας προτιμήθηκε αυτή η παράκαμψη.

Δεύτερον, η απαραίτητη τάση για την τροφοδοσία του encoder, της οθόνης και του led της αποφασίστηκε να λαμβάνεται από τις θύρες της πλακέτας Arduino nano που παρέχουν τάσεις 5V και 3.3V και όχι από τις εξόδους των voltage regulators, οι οποίοι συνεπώς αφαιρέθηκαν. Αυτό έγινε επειδή κατά την λειτουργία του κυκλώματος παρατηρήθηκε αυξημένη θερμοκρασία στο τρανζίστορ του παρέχοντος τάση 11 V τροφοδοτικού, παρά την παρουσία ψύκτρας. Αυτή η αλλαγή έγινε στο τελικό στάδιο, κυρίως για προληπτικούς λόγους. Σύμφωνα με το datasheet του τρανζίστορ, αυτό διαθέτει θερμική αντίσταση junction-to-ambient ίση με $62.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Με δεδομένο ότι η τάση στα άκρα του είναι περίπου 40V και το ρεύμα που διέρχεται πλέον από αυτό (μετά την αφαίρεση των voltage regulators) είναι περίπου 30mA, η ισχύς που εμφανίζεται είναι σχεδόν 1.2W και ως εκ τούτου η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι περίπου 75°C , θερμοκρασία που δεν επιφέρει την καταστροφή του.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, συνδέθηκε ένας εξωτερικός διακόπτης μεταξύ ασφαλειών και πρίζας για να μπορεί ο χρήστης να απομονώνει ηλεκτρικά το συνολικό κύκλωμα χωρίς να χρειάζεται η εξαγωγή του καλωδίου από την πρίζα. Συνδέθηκε επίσης και ένας δεύτερος εξωτερικός διακόπτης με την πλακέτα Arduino nano, η συμπίεση του οποίου, όπως ειπώθηκε στην ενότητα 4.5.3, προκαλεί αυτομάτως την αποστολή της εντολής που αντιστοιχεί στο επιλεγθέν από τον χρήστη ρεύμα, από τον Arduino nano στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο και συνεπώς την εμφάνιση αυτής της τιμής του ρεύματος στην έξοδο της πηγής.

Τέλος, τόσο οι τρεις πλακέτες όσο και ο μετασχηματιστής και η πλακέτα Arduino nano επί της βάσης της τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό ενός κουτιού κατασκευών κατάλληλων διαστάσεων (280x190x95mm). Ο χειριστής ενεργοποιώντας τον πρώτο διακόπτη τροφοδοτεί με ρεύμα το πρωτεύων πηνίο του μετασχηματιστή και ακολούθως περιστρέφοντας και συμπιέζοντας κάθετα (όπως αναφέρθηκε στα κεφάλαια 4.2, 4.5.1 και 4.5.3) τον ευρισκόμενο εξωτερικά ψηφιακό κωδικοποιητή

μπορεί να επιλέξει την τιμή ρεύματος που επιθυμεί στην έξοδο της πηγής. Αυτή η τιμή εμφανίζεται στην οθόνη lcd ως επιθυμητή τιμή ρεύματος και θα επιτευχθεί στην έξοδο με την συμπίεση του δεύτερου διακόπτη. Όπως ειπώθηκε, στην οθόνη πέρα από την επιθυμητή τιμή ρεύματος στην έξοδο, εμφανίζεται και η κατάσταση του τελευταίου διακόπτη, αλλά και το επίπεδο της λογικής μεταβλητής step.



Βιβλιογραφία:

- [1] Choe, Young-Joe, Hyohyun Nam, and Jung-Dong Park. "A Low-Dropout Regulator with PSRR Enhancement through Feed-Forward Ripple Cancellation Technique in 65 nm CMOS Process." *Electronics* 9.1 (2020): 146.
- [2] Sánchez-Sinencio, Edgar. "Low drop-out (LDO) linear regulators: design considerations and trends for high power-supply rejection (PSR)." *Texas A & M University* (2010).
- [3] Application note: Brent McDonald and Ben Lough. "Power Factor Correction (PFC) Circuit Basics." Texas Instruments (2020).
- [4] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith. "Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα", Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2017.
- [5] Horowitz, Paul, Winfield Hill, and Ian Robinson. The Art of Electronics. Vol 2. Cambridge: Cambridge university press, 1989.
- [6] Νίκος Μ. Χατζηγιαννάκης. "Η γλώσσα C++ σε βάθος", Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2014.
- [7] Gray R. Paul, Hurst J. Paul, Lewis H. Stephen, Meyer G. Robert. "Ανάλυση και σχεδίαση αναλογικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.", Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007.