



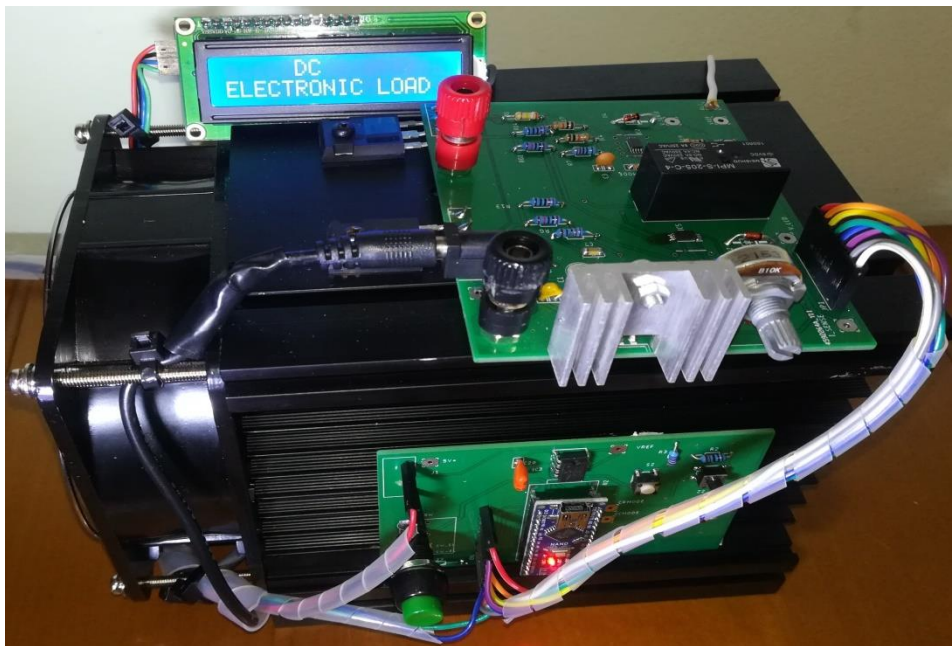
ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ DC
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΧΑΤΖΗΘΕΟΧΑΡΗΣ, 516155

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΟΡΔΑΝΗΣ ΚΙΟΣΚΕΡΙΔΗΣ

Θεσσαλονίκη, 2022

Τίτλος: Σχεδίαση Και Υλοποίηση Ενός DC Ηλεκτρονικού Φορτίου

Κωδικός Πτυχιακής Εργασίας: 20206

Όνομ/νυμο Φοιτητή: Χατζηθεοχάρης Κωνσταντίνος, 516155

Όνομ/νυμο Εισηγητή: Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Ημερομηνία Ανάλυσης: 19/10/2020

Ημερομηνία Περάτωσης: 31/08/2022

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

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην υπάρχουσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η μελέτη, η ανάλυση και ο σχεδιασμός ενός DC ηλεκτρονικού φορτίου με τη χρήση γραμμικών MOSFET. Αρχικά, γίνεται μελέτη της δομής των MOSFET, αναλύεται η αρχή λειτουργίας των τρανζίστορ και καθορίζονται τα χαρακτηριστικά των MOSFET. Μετά, αναλύονται οι λειτουργίες που μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση του συνδιασμού των τελεστικών ενισχυτών με τα MOSFET ισχύος και εκτελείται η προσομοίωση των λειτουργιών του σταθερού ρεύματος και της σταθερής αντίστασης μέσω της εφαρμογής του Spice, όπου εξάγουμε τις χαρακτηριστικές εξισώσεις της τελικής κατασκευής. Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή, με βάση τις προδιαγραφές που θέσαμε, των εξαρτημάτων και αναλύεται λεπτομερώς η επιλογή της παράλληλης σύνδεσης των MOSFET. Μετέπειτα, αναλύεται η λειτουργία του μικροελεγκτή στο κύκλωμα, σχεδιάζονται οι πλακέτες ελέγχου και ισχύος με τη χρήση της εφαρμογής Eagle και γίνονται οι μετρήσεις ορθής λειτουργίας της συσκευής. Τέλος, προτείνονται αλλαγές που θα βοηθήσουν στην καλύτερη λειτουργία της συσκευής.

Λέξεις κλειδιά: Λειτουργίες CC και CR, MOSFET, τελεστικοί ενισχυτές, τάση αναφοράς V_{REF}

ABSTRACT

In the existing thesis investigate, explicate and design circuit of a DC electronic load with utilization linear MOSFETs. First, the structure of MOSFETs is studied, the operating principle of transistors is analyzed and the characteristics of MOSFETs are determined. Then, the functions that can be achieved using the combination of operational amplifiers with power MOSFETs are analyzed and the constant current and constant resistance functions are simulated through the application of Pspice, where we derive the characteristic equations of the final construction. The selection of the components based on the specifications and the choice of the parallel connections of the MOSFETs is analyzed in detail. After that, the operation of the microcontroller in the circuit is analyzed, the control and power boards are designed in the Eagle application and the measurements of the correct operation of the device are made. Finally, changes are suggested that will help the device function better.

Keywords: Operation CC and CR, MOSFET, operational amplifiers, voltage reference V_{REF}

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT.....	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ MOSFET ΙΣΧΥΟΣ	12
1.1 Αρχή λειτουργίας του MOSFET	13
1.2 Χαρακτηριστικά των MOSFET ισχύος.....	16
1.2.1 Τάση διάσπασης V_{DSS}	16
1.2.2 Αντίσταση MOSFET $R_{DS(on)}$	16
1.2.3 Μέγιστη θερμοκρασία διασταύρωσης $T_{J(max)}$	16
1.2.4 Συνεχές ρεύμα εκροής I_D	17
1.2.5 Μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος	18
1.2.6 Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA).....	19
1.2.7 Θερμική απαγωγή στοιχείων	20
1.3 Σύνδεση τελεστικού ενισχυτή με τα MOSET ισχύος	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ DC	
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	23
2.1 Ανάλυση λειτουργιών	23
2.1.1 Ανάλυση λειτουργίας σταθερού ρεύματος (CC).....	23
2.1.2 Ανάλυση λειτουργίας σταθερής τάσης (CV).....	25
2.1.3 Ανάλυση λειτουργίας σταθερής αντίστασης (CR).....	26
2.1.4 Ανάλυση λειτουργίας σταθερής ισχύς (CP).....	27
2.2 Προσομοίωση κυκλώματος σε orcad.....	28
2.2.1 MOSFET ισχύος.....	30
2.2.2 Τάση αναφοράς V_{REF}	30

2.2.3 Προσομοίωση λειτουργίας σταθερού ρεύματος.....	31
2.2.4 Προσομοίωση λειτουργίας σταθερής αντίστασης.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ DC ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	36
3.1 Προδιαγραφές των κατάλληλων MOSFET	36
3.1.1 Προδιαγραφές ψύκτρας με εξαναγκασμένη μεταφορά αέρα	38
3.1.2 Θέματα σχετικά με την παράλληλη σύνδεση των MOSFET	39
3.2 Προδιαγραφές κατάλληλων τελεστικών ενισχυτών.....	40
3.3 Προδιαγραφές κατάλληλης αντίστασης ισχύος	41
3.4 Προδιαγραφές αντιστάσεων του διαιρέτη τάσης	41
3.5 Επιλογή μετατροπέα σήματος απο ψηφιακό σε αναλογικό	42
3.6 Επιλογή σταθεροποιητή τάσης.....	43
3.7 Επιλογή τροφοδοσίας εξαρτημάτων συσκευής.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ARDUINO	44
4.1 Δομή λογισμικού	45
4.2 Χαρακτηριστικά και λειτουργία οθόνης	47
4.3 Χειρισμός συσκευής μέσω του προγράμματος.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ	52
5.1 Υλοποίηση κυκλωμάτων με χρήση διάτρητης πλακέτας.....	52
5.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση κυκλώματος με χρήση PCB	53
5.3 Μετρήσεις ορθής λειτουργίας κυκλώματος	57
5.3.1 Μετρήσεις με την χρήση διάτρητης πλακέτας	57
5.3.2 Μετρήσεις με την χρήση PCB.....	58
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	69
ΜΕΡΟΣ Α.....	69
ΜΕΡΟΣ Β.....	73
ΜΕΡΟΣ Γ	76

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η κατασκευή μιας πλήρους λειτουργικής συσκευής η οποία θα χρησιμοποιείται για να τον έλεγχο ενός φορτίου ισχύος. Η συσκευή έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σαν πηγή τάσης και ως ωμικός αντιστάτης, εναλλάσσοντας αυτές τις δύο λειτουργίες ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου.

Ένα ηλεκτρονικό φορτίο συνεχούς ρεύματος είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές μονάδες για τη δοκιμή και τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας των πηγών ισχύος. Το DC ηλεκτρονικό φορτίο προσομοιώνει ένα σύστημα που καταναλώνει ισχύ και έχει την δυνατότητα να μετράει την τάση, το ρεύμα, την αντίσταση και την ισχύ, εμφανίζοντας τα αποτελέσματα σε οποιαδήποτε οθόνη θέλουμε. Η σπουδαιότητα μιας τέτοιας συσκευής βρίσκεται στο γεγονός ότι μπορούμε να μετρήσουμε με ακρίβεια τις τιμές που παράγει μια πηγή ισχύος χωρίς να βλάψουμε το φορτίο ή το κύκλωμα που θα τροφοδοτηθεί από την πηγή.

Στο πρώτο κεφάλαιο μελετάται η βασική δομή των MOSFET ισχύος, καθορίζονται τα βασικά μέρη και παρουσιάζονται οι κατηγορίες των τρανζίστορ. Ακόμη, γίνεται αναλυτική αναφορά στην αρχή λειτουργίας των MOSFET ισχύος, προσδιορίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά, όπως η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας και η θερμική απαγωγή των MOSFET και αναφέρεται η ιδιότητα και η λειτουργία των τελεστικών ενισχυτών στο κύκλωμα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι τέσσερις λειτουργίες που επιτελεί ένα DC ηλεκτρονικό φορτίο και πραγματοποιείται η προσομοίωση των βασικών κυκλωμάτων μέσω της εφαρμογής PSpice. Για κάθε λειτουργία υπάρχουν οι σχηματικές αναλύσεις των κυκλωμάτων και οι γραφικές απεικονίσεις των χαρακτηριστικών εξισώσεων. Για την προσομοίωση επιλέχθηκαν οι λειτουργίες της σταθερής αντίστασης και του σταθερού ρεύματος, με την προϋπόθεση ότι η ισχύς θα έχει προκαθορισμένη μέγιστη τιμή.

Στο τρίτο κεφάλαιο καθορίζονται οι προδιαγραφές του ηλεκτρονικού φορτίου και προσδιορίζονται οι επιλογές των εξαρτημάτων. Αναφέρονται οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε η παράλληλη διάταξη των τρανζίστορ, όπως επίσης και οι λόγοι που μας οδήγησαν στην επιλογή των MOSFET ισχύος, της ψύχτρας τους, των

τελεστικών ενισχυτών, των αντιστάσεων ισχύος αλλά και της τροφοδοσίας όλων των παρελκομένων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται η δομή και η λειτουργία του μικροελεγκτή, περιγράφεται η σύνδεση των περιφερειακών εξαρτημάτων και αναλύεται ο χειρισμός της συσκευής με βάση την διαδικασία που επιλέγουμε.

Στο πέμπτο κεφάλαιο προσδιορίζεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση, αρχικά με την χρήση διάτρητης πλακέτας και εν συνεχεία με PCB, των πλακετών ισχύος και ελέγχου, ελέγχεται η ορθή λειτουργία της συσκευής και πραγματοποιείται η μέτρηση των αποτελεσμάτων, ανάλογα με την λειτουργία που θέτουμε.

Τέλος, αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάγαμε κατά την υλοποίηση της κατασκευής, αναλύοντας τις σημαντικότερες αλλαγές που παρατηρήθηκαν στα MOSFET ισχύος αλλά και στα άλλα παρελκόμενα εξαρτήματα, προτείνοντας αλλαγές στους Τ.Ε, στον ανεμιστήρα του συστήματος ψύξης αλλά και στο σχεδιασμό του διαιρέτη τάσης της λειτουργίας σταθερής αντίστασης.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 : Θερμικές ιδιότητες MOSFET.....	19
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα λειτουργίας σταθερού ρεύματος.....	59
Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα λειτουργίας σταθερής αντίστασης.....	61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Απεικόνιση P-Καναλιού MOSFET.....	12
Εικόνα 1.2: Εσωτερική μορφή N-Καναλιού MOSFET.....	13
Εικόνα 1.3: Σχηματικά Σύμβολα α) P-Καναλιού MOSFET, β) N-Καναλιού MOSFET.....	14
Εικόνα 1.4 : Ανάλυση θερμικής αντίστασης.....	20
Εικόνα 1.5: Εσωτερικό σχέδιο τελεστικού ενισχυτή.....	21
Εικόνα 1.6: Λειτουργία MOSFET με τη χρήση του ενισχυτή.....	22
Εικόνα 2.1 : Παράδειγμα CC λειτουργίας.....	23
Εικόνα 2.2 : Παράδειγμα CV λειτουργίας.....	25
Εικόνα 3.1: Προσθήκη R_G αντίστασης στο κύκλωμα.....	39
Εικόνα 3.2 : Κύκλωμα παράλληλης σύνδεσης MOSFET.....	40
Εικόνα 4.1 : Λειτουργία των ακροδεκτών του μικροελεγκτή.....	44
Εικόνα 4.2: Εξωτερική όψη οθόνης.....	47
Εικόνα 4.3: Σύνδεση μικροελεγκτή με την οθόνη.....	48
Εικόνα 4.4: Αρχικό μήνυμα συσκευής.....	49
Εικόνα 4.5: Εμφάνιση μηνύματος “SELECT MODE”.....	49
Εικόνα 4.6: Μαθηματικός τύπος εύρεσης I_{SET}	50

Εικόνα 4.7: Εμφάνιση μηνύματος “CR MODE”	50
Εικόνα 4.8: Ειδοποίηση απενεργοποίησης του I_{SET}	50
Εικόνα 4.9: Αποτελέσματα των τιμών σταθερού ρεύματος.....	51
Εικόνα 4.10: Αποτελέσματα των τιμών σταθερής αντίστασης.....	51
Εικόνα 4.11: Εσφαλμένη κατάσταση DC ΗΦ.....	51
Εικόνα 5.1: Κατασκευή αρχικής πλακέτας.....	52
Εικόνα 5.2 : Τελική μορφή πλακέτας ισχύος.....	56
Εικόνα 5.3 : Τελική μορφή πλακέτας ελέγχου.....	56
Εικόνα 5.4: Απεικόνιση μετρήσεων DC ΗΦ.....	57
Εικόνα 5.5: Μετρήσεις ορθής λειτουργίας DC ΗΦ.....	58

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1: V-I MOSFET ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ.....	15
Διάγραμμα 1.2 : Ρεύμα εκροής σε συνάρτηση με την θερμοκρασία T_C	17
Διάγραμμα 1.3 : Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας σε T_C α) στους 25 °C, β) στους 75 °C.....	19
Διάγραμμα 2.1: Απεικόνιση αποτελεσμάτων I-V σταθερού ρεύματος.....	25
Διάγραμμα 2.2 : Απεικόνιση αποτελεσμάτων I-V σταθερής τάσης.....	26
Διάγραμμα 2.3 : Απεικόνιση αποτελεσμάτων I-V σταθερής αντίστασης.....	27
Διάγραμμα 2.4 : Απεικόνιση αποτελεσμάτων I-V σταθερής ισχύς.....	28
Διάγραμμα 2.5 : Απεικόνιση τάσης αναφοράς-τάση φορτίου.....	30
Διάγραμμα 2.6 : Απεικόνιση τάσης-ρεύματος φορτίου.....	31
Διάγραμμα 2.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης σταθερού ρεύματος.....	32

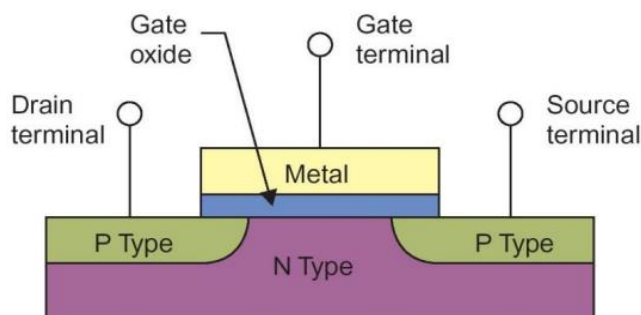
Διάγραμμα 2.8: Έξοδος βαθμίδας U2B –Βαθμίδα απεικόνισης ρεύματος.....	33
Διάγραμμα 2.9 : Απεικόνιση διαιρέτη τάσης-τάση φορτίου.....	34
Διάγραμμα 2.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης σταθερής αντίστασης.....	35
Διάγραμμα 4.1:Διάγραμμα ροής λογισμικού του κυκλώματος.....	45
Διάγραμμα 4.2 : Εσωτερική μορφή της LCD οθόνης.....	46
Διάγραμμα 5.1 : Απόκλιση τιμών ρεύματος συσκευής-τροφοδοτικού.....	62
Διάγραμμα 5.2 : Απόκλιση τιμών τάσης συσκευής-τροφοδοτικού.....	62
Διάγραμμα 5.3 : Μέτρηση φωτοβολταϊκού πάνελ.....	63

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Προσομοίωση σε ORCAD.....	29
Σχήμα 5.1: Κύκλωμα PCB ισχύος.....	54
Σχήμα 5.2: Κύκλωμα PCB ελέγχου.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ MOSFET ΙΣΧΥΟΣ

Metal-Oxide-Semiconductor FET



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση P-Καναλιού MOSFET

ΠΗΓΗ: http://www.ece.ucy.ac.cy/courses/ece202/lectures/ECE202_8.pdf

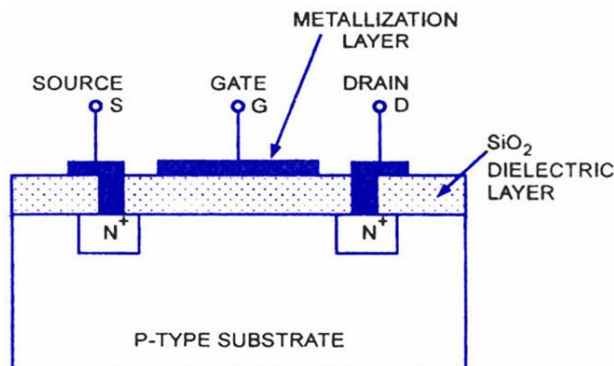
Το εξάρτημα MOSFET (Metal – Oxide Semiconductor FET) οφείλει το όνομά του στην περιγραφή κατασκευής της Πύλης (G). Τα MOSFET ισχύος είναι ένας τύπος FET τρανζίστορ που ειδικεύεται στο χειρισμό υψηλών τιμών ισχύος. Τα συγκεκριμένα τρανζίστορ παρουσιάζουν υψηλή ταχύτητα μεταγωγής και μπορούν να λειτουργήσουν πολύ καλύτερα, σε σύγκριση με τα απλά MOSFET, στην περίπτωση που έχουμε χαμηλά επίπεδα τάσης. Ωστόσο, η αρχή λειτουργίας τους είναι παρόμοια με αυτή των απλών MOSFET¹. Το MOSFET αποτελεί μια διάταξη τρανζίστορ η οποία έχει τρία μέρη μία πηγή, μια πύλη και έναν απαγωγό (εκροή). Σε αντίθεση με το JFET, η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι, με αποτέλεσμα το ρεύμα πύλης να είναι πάρα πολύ μικρό, ανεξάρτητα από τη φορά της τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και πηγής. Ως μονωτικό, χρησιμοποιείται ένα πολύ λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ της μεταλλικής πύλης και του ημιαγωγού. Τα MOSFET διακρίνονται σε MOSFET κένωσης (depletion) και εμπλουτισμού (enhancement). Τα MOSFET κένωσης χαρακτηρίζονται ως normally ON, ενώ τα MOSFET εμπλουτισμού ως normally OFF. Τα είδη MOSFET κατασκευάζονται ως καναλιού-n ή καναλιού-p.²

¹ Power MOSFET. (2020). Ανακτήθηκε από <https://www.electrical4u.com/power-mosfet/>

² Κιοσκερίδης, Ι. Ν. (2019). Ηλεκτρονικά ισχύος. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα

1.1 Αρχή λειτουργίας του MOSFET

Η αρχή λειτουργίας των MOSFET ισχύος είναι η ίδια με αυτή των απλών MOSFET. Η συχνότητα των MOSFET ισχύος είναι αρκετά υψηλή που φθάνει έως και τα 100 KHz.³ Η κεντρική ιδέα της λειτουργίας των τρανζίστορ τύπου FET είναι η ακόλουθη: Με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διαπερνά το διηλεκτρικό υλικό της πύλης και δημιουργεί (MOSFET προσαύξησης) ή τροποποιεί (MOSFET διακένωσης) ένα στρώμα αναστροφής. Το στρώμα αναστροφής έχει αντίθετο τύπο αγωγιμότητας από αυτό του υποβάθρου και ταυτόσημο με αυτό που διαχέεται σε πηγή και απαγωγό. Σε μια δομή όπου η πηγή (S) και ο απαγωγός (D) είναι n-τύπου και το υπόστρωμα p-τύπου, το κανάλι αναστροφής που θα σχηματιστεί μεταξύ πηγής και απαγωγού, με την εφαρμογή κατάλληλης διαφοράς δυναμικού, θα είναι n-τύπου. Δημιουργείται έτσι μια σύνδεση που επιτρέπει τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και εκροής. Η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της πύλης και του σώματος του υποστρώματος (που συνήθως το υπόστρωμα βραχυκυκλώνεται με την πηγή) διαμορφώνει την αγωγιμότητα του καναλιού, ελέγχοντας έτσι τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού.⁴



Εικόνα 1.2: Εσωτερική μορφή N-Καναλιού MOSFET

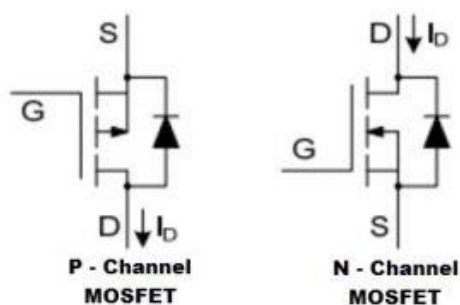
ΠΗΓΗ: <https://www.semiconductorforu.com/enhancement-type-n-channel-mosfet/>

Την στιγμή που θα εφαρμόσουμε μια διαφορά τάσης μεγαλύτερη του μηδενός στα άκρα της εκροής σε σχέση με την πηγή, το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος που θα ρέει είναι ηλεκτρόνια που κινούνται μέσα από το κανάλι. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τον άλλο τύπο MOSFET, καναλιού-p, στα οποία η πλειονότητα των

³ <https://www.elprocus.com/power-mosfet/>

⁴ Κατσίδης, Χ. (2007). Εισαγωγή στη μικροηλεκτρονική. Ανακτήθηκε από <https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY482/>.

φορέων ρεύματος είναι οπές. Ένα MOSFET εμπλουτισμού είναι συνήθως ενεργοποιημένο (το μέγιστο ρεύμα ρέει από την εκροή στην πηγή) όταν δεν υπάρχει διαφορά τάσης μεταξύ των ακροδεκτών πύλης και πηγής. Ωστόσο, εάν εφαρμοστεί θετική τάση στην πύλη, το κανάλι της πηγής γίνεται περισσότερο ανθεκτικό, έως ότου η τάση της πύλης να γίνει τόσο υψηλή όπου το τρανζίστορ κλείσει εντελώς. Ένα MOSFET τύπου ενίσχυσης είναι της αντίθετης μορφής. Το τρανζίστορ είναι απενεργοποιημένο όταν η τάση που βρίσκεται μεταξύ της πύλης και της πηγής είναι μηδέν ($V_{GS} = 0V$). Στην περίπτωση αυτή, εάν εφαρμόσουμε θετική τάση στην πύλη του τρανζίστορ, το κανάλι πηγής-εκροής γίνεται λιγότερο ανθεκτικό. Η τάση που μπορούμε να εφαρμόσουμε σε κάθε μία περίπτωση δίνεται στα φύλλα δεδομένων των εταιριών.



Εικόνα 1.3: Σχηματικά σύμβολα α) P-Καναλιού MOSFET, β) N-KΑΝΑΛΙΟΥ MOSFET

ΠΗΓΗ: <https://www.elprocus.com/power-mosfet/>

Στην εικόνα 1.3 παρουσιάζονται τα MOSFET τύπου εμπλουτισμού. Με την εφαρμογή τάσης στα άκρα της V_{GS} , το ρεύμα εκροής I_D θα αυξηθεί. Η σχέση που συνδέει την τάση της πύλης με αυτή της εκροής εξαρτάται από την εξίσωση (1.1). Με τον τύπο εύρεσης του ρεύματος εκροής, βρίσκουμε το ρεύμα I_D του MOSFET στη γραμμική περιοχή.

$$I_D = K (V_{GS} - V_T)^2 \quad (1.1)$$

- Το I_D είναι το ρεύμα εκροής
- Το K είναι η σταθερά συσκευής
- Το V_{GS} είναι η τάση πύλης
- Το V_T είναι η τάση κατωφλίου⁵

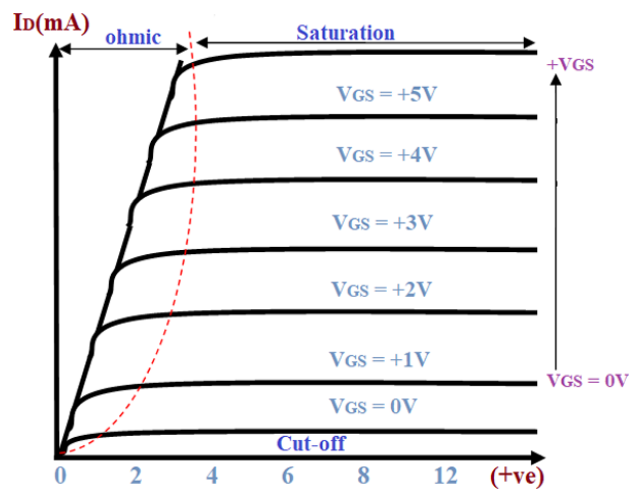
Η σταθερά K υπολογίζεται από τον τύπο $K = [(\mu \times C)/2] \times (W/L)$

⁵ What is a Power MOSFET : Working & Its Applications. Ανακτήθηκε από <https://www.elprocus.com/power-mosfet/>.

- Το μ είναι η ευκινησία των ηλεκτρονίων στο κανάλι
- Το C είναι η χωρητικότητα του μονωτικού στρώματος SiO₂
- Το W είναι το πλάτος καναλιού
- Το L είναι το μήκος καναλιού

Το MOSFET βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής όταν η διαφορά τάσης της πύλης, που βρίσκεται σε συσχετισμό με την τάση της πηγής, είναι μικρότερη από τη τάση κατωφλίου $V_{GS(th)}$ και η τάση V_{DS} δεν υπερβαίνει την τάση διάσπασης V_{DSS} . Η τάση διάσπασης στα MOSFET συμβολίζεται με V_{DSS} (Drain – Source Breakdown Voltage) και οφείλεται στη διάσπαση χιονοστιβάδας της επαφής σώματος με τη εκροή. Η ενεργός περιοχή περιλαμβάνει το τμήμα των χαρακτηριστικών του MOSFET, όπου το ρεύμα της εκροής είναι σταθερό και ανεξάρτητο της τάσης V_{DS} . Το MOSFET λειτουργεί στην ενεργό περιοχή όταν ισχύει η σχέση (1.2).⁶

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)} \quad (1.2)$$



Διάγραμμα 1.1: V-I MOSFET ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

ΠΗΓΗ: <https://components101.com/articles/mosfet-symbol-working-operation-types-and-applications>

Στο διάγραμμα 1.1 παρουσιάζεται οι V-I χαρακτηριστικές του MOSFET τύπου εμπλουτισμού. Παρατηρούμε ότι όταν έχουμε $V_{GS} < V_{TH}$, τότε βρισκόμαστε στην κατάσταση αποκοπής. Στην ενεργό περιοχή βρισκόμαστε την στιγμή που η τάση $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$, ενώ στην γραμμική όταν η $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$.

⁶ Κιοσκερίδης, I. N. (2019). Ηλεκτρονικά ισχύος. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα

1.2 Χαρακτηριστικά των MOSFET ισχύος

Για να κατανοήσουμε και να επιλέξουμε το κατάλληλο MOSFET ισχύος που θέλουμε, θα πρέπει εξ αρχής να γνωρίζουμε τις προϋποθέσεις – χαρακτηριστικά, για την ορθή λειτουργία του εξαρτήματος μέσα στο κύκλωμα. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά αναλύονται παρακάτω:

- Τάση διάσπασης V_{DSS}
- Αντίσταση $R_{DS(ON)}$
- Μέγιστη θερμοκρασία διασταύρωσης $T_{J(max)}$
- Συνεχές ρεύμα εκροής I_D
- Μέγιστη επιτρεπόμενη απαγωγή ισχύος P_D
- Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας SOA
- Θερμική απαγωγή στοιχείων

1.2.1 Τάση διάσπασης V_{DSS}

Η τάση διάσπασης, V_{DSS} , είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να διαχειριστεί το MOSFET πριν την καταστροφή του. Συνήθως η τάση διάσπασης αποτυπώνεται στην κωδική ονομασία του κάθε MOSFET. Η ανάποδη πόλωση των MOSFET επιφέρει τις ίδιες καταστροφικές επιπτώσεις, εάν ξεπεραστεί η τιμή που αναγράφεται στα datasheet.

1.2.2 Αντίσταση MOSFET $R_{DS(on)}$

Η αντίσταση που βρίσκεται ανάμεσα στην εκροή και την πηγή του MOSFET είναι σημαντική για την απώλεια ισχύος και την αύξηση της θερμότητας του ημιαγωγού. Όσο χαμηλότερη είναι η αντίσταση τόσο μικρότερη είναι η απώλεια ισχύος της συσκευής και τόσο πιο μικρή θα είναι η θερμότητα που θα υπάρξει στην επιφάνεια του τρανζίστορ. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου οι θερμοκρασίες λειτουργίας υπερβαίνουν τους 100°C. Σε πολλές εφαρμογές, η χαμηλή αντίσταση ενεργοποίησης εξαλείφει την πιθανότητα χρήσης παράλληλων MOSFET, γεγονός που οδηγεί σε βελτιωμένη αξιοπιστία και χαμηλότερο συνολικό κόστος κατασκευής.

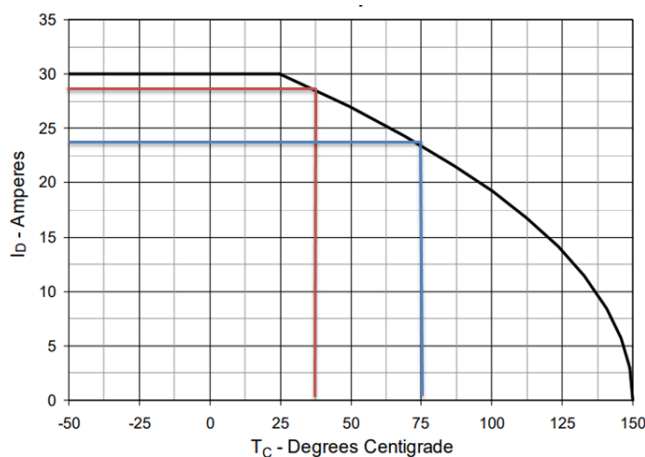
1.2.3 Μέγιστη θερμοκρασία διασταύρωσης $T_{J(max)}$

“Η μέγιστη θερμοκρασία διασταύρωσης, $T_{J(max)}$, αποτελεί συνάρτηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της ίδιας της συσκευής, καθώς και της συσκευασίας

που χρησιμοποιείται.” Οι θερμικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται καθορίζουν την δυνατότητα εξαγωγής θερμότητας από τη συσκευή. Από τα φύλλα δεδομένων των εταιριών μπορούμε να διακρίνουμε τη θερμική αντίσταση είτε σε °C/W είτε σε K/W. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμική αντίσταση, τόσο πιο αποτελεσματικό είναι το MOSFET στην εξάλειψη της θερμότητας.⁷

1.2.4 Συνεχές ρεύμα εκροής I_D

Το συνεχές ρεύμα εκροής είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός MOSFET, διότι με αυτήν την πληροφορία μπορούμε να βρούμε την δυνατότητα που έχει το συγκεκριμένο MOSFET να οδηγήσει ένα μέγιστο ρεύμα στο φορτίο. Στα datasheet του MOSFET ισχύος IXTH30N50L2 παρατηρούμε ότι σε θερμοκρασίες θήκης τρανζίστορ από -50 °C έως 25 °C, το ρεύμα εκροής παραμένει στην τιμή των $I_D = 30$ A. Σε θερμοκρασία 37.5 °C το ρεύμα εκροής ανέρχεται στην τιμή των 27.5 A, ενώ σε θερμοκρασία 75 °C στην τιμή των 23.5 A. Από το διάγραμμα είναι φανερό ότι όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία των MOSFET, τόσο το ρεύμα εκροής ελαχιστοποιείται, έως την στιγμή που η θερμοκρασία ανέβει πάνω από τους 150 °C όπου μηδενίζεται. Η μείωση του ρεύματος σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έχει καμπυλόμορφο σχήμα και η μείωση ξεκινάει, σχεδόν πάντα, από τους 25 °C.



Διάγραμμα 1.2 : Ρεύμα εκροής σε συνάρτηση με την θερμοκρασία T_C

ΠΗΓΗ: https://www.mouser.com/datasheet/2/240/ixyss11317_1-2272492.pdf

⁷ Power Management 101: Power MOSFET Characteristics. (2009). Ανακτήθηκε από <https://www.electronicdesign.com/technologies/discrete-power-semis/article/21191080/power-management-101-power-mosfet-characteristics>.

1.2.5 Μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ισχύος

Η απαγωγή ισχύος του τρανζίστορ είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να διαχέει συνεχώς το MOSFET υπό καθορισμένες θερμικές συνθήκες. Όταν μια ψύκτρα είναι συνδεδεμένη σε ένα MOSFET, η απαγωγή ισχύος υπολογίζεται από το άθροισμα: 1) της θερμικής αντίστασης από το κανάλι προς τη θήκη (εσωτερική θερμική αντίσταση), 2) τη θερμική αντίσταση μονωτή, 3) τη θερμική αντίσταση επαφής και 4) τη θερμική αντίσταση ψύκτρας. Η επιτρεπόμενη απαγωγή ισχύος ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες υπό τις οποίες χρησιμοποιείται το MOSFET (όπως η θερμοκρασία που υπάρχει στο περιβάλλον, αλλά και οι συνθήκες απαγωγής θερμότητας).⁸

Πίνακας 1.1 : Θερμικές ιδιότητες MOSFET

Symbol	Test Conditions (T _J = 25°C, Unless Otherwise Specified)	Characteristic Values		
		Min.	Typ.	Max.
g _{fs}	V _{DS} = 10V, I _D = 0.5 • I _{D25} , Note 1	9	12	15 S
C _{iss}	V _{GS} = 0V, V _{DS} = 25V, f = 1MHz		8100	pF
C _{oss}			530	pF
C _{rss}			115	pF
R _{GI}	Integrated Gate Input Resistor		3.5	Ω
t _{d(on)}	Resistive Switching Times V _{GS} = 10V, V _{DS} = 0.5 • V _{DSS} , I _D = 0.5 • I _{D25} R _G = 0Ω (External)		35	ns
t _r			117	ns
t _{d(off)}			94	ns
t _f			40	ns
Q _{g(on)}			240	nC
Q _{gs}	V _{GS} = 10V, V _{DS} = 0.5 • V _{DSS} , I _D = 0.5 • I _{D25}		58	nC
Q _{gd}			135	nC
R _{thJC}				0.31 °C/W
R _{thCS}	(TO-247&TO-3P)		0.25	°C/W

ΠΗΓΗ: https://www.mouser.com/datasheet/2/240/ixyss11317_1-2272492.pdf

Στον πίνακα των απόλυτων μέγιστων χαρακτηριστικών, υποδεικνύεται η απαγωγή ισχύος P_D. Το P_D και η θερμική αντίσταση R_{thJC} συσχετίζονται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P D = \frac{T_j - T_c}{R_{thjc}} = \frac{150 - 25}{0.31} = 403 W \quad (1.3)$$

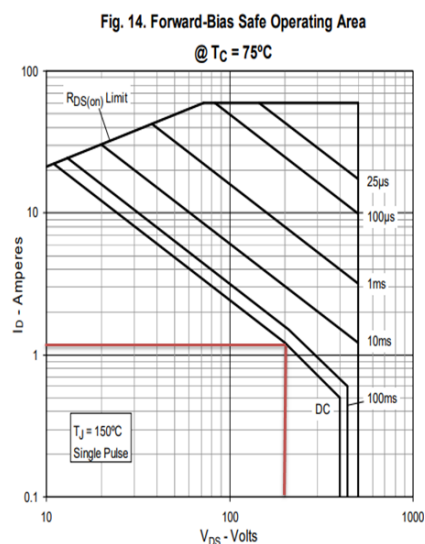
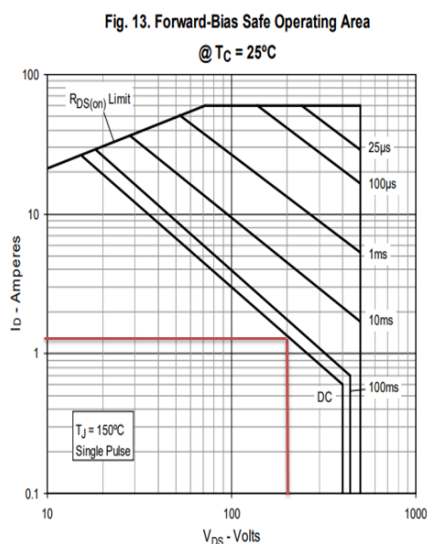
Σύμφωνα με τον πίνακα 1.1, στο T_J αντικαθίσταται η απόλυτη μέγιστη τιμή των 150°C και για την T_C χρησιμοποιούνται οι 25°C, που είναι η προϋπόθεση για την

⁸ What is the definition of power dissipation?. (2018). Ανακτήθηκε από <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/faq/mosfet/what-is-the-definition-of-power-dissipation.html>.

απαγωγή ισχύος σε συνθήκες περιβάλλοντος. Τέλος, για την τιμή την αντίστασης R_{thJC} , λαμβάνεται η μέγιστη τιμή των $0,31^{\circ} C/W$.⁹

1.2.6 Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA)

Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας του MOSFET προσδιορίζει τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια του τρανζίστορ, ώστε να γνωρίζουμε τα μέγιστα όρια της τάσης και του ρεύματος του εξαρτήματος, μέσα στα οποία μπορεί να λειτουργεί χωρίς να υπάρξει φθορά στο τρανζίστορ. Τα MOSFET δεν πρέπει να εκτίθενται σε συνθήκες πέρα από τον ασφαλή χώρο λειτουργίας. Σχεδόν σε όλα τα φύλλα δεδομένων των MOSFET περιλαμβάνεται ένα διάγραμμα απεικόνισης SOA, το οποίο περιγράφει τον μέγιστο χρόνο που μπορεί να εκτεθεί ένα MOSFET σε μια συγκεκριμένη τάση ή ρεύμα¹⁰. Στο διάγραμμα 1.3 απεικονίζονται οι περιοχές ασφαλούς λειτουργίας του n-καναλιού τρανζίστορ IXTH30N50L2. Το πρώτο διάγραμμα δείχνει ότι εάν εφαρμοστεί τάση 200 V και αφήσουμε να περάσει ρεύμα 20A, θα λειτουργήσει για 1 ms χωρίς να καταστραφεί το MOSFET, με την προϋπόθεση ότι η θήκη του τρανζίστορ θα διατηρηθεί στους 25 °C.



Διάγραμμα 1.3 : Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας σε T_C α) στους 25 °C, β) στους 75 °C

ΠΗΓΗ: https://www.mouser.com/datasheet/2/240/ixyss11317_1-2272492.pdf

⁹ MOSFET Thermal Resistance and Power Dissipation: Packages Capable of Back-Surface Heat Dissipation. (2020). Ανακτήθηκε από <https://techweb.rohm.com/knowledge/si/s-si/03-s-si/8955>.

¹⁰ Eddleman, D. (2017). MOSFET Safe Operating Area and Hot Swap Circuits. Ανακτήθηκε από <https://www.analog.com/en/technical-articles/mosfet-safe-operating-area-and-hot-swap-circuits.html>.

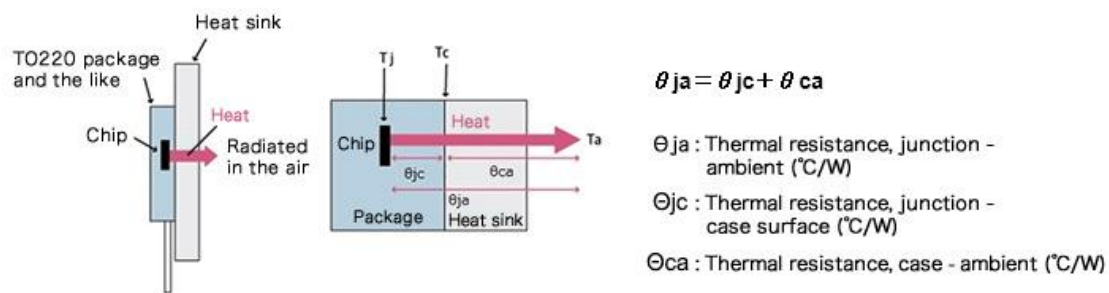
1.2.7 Θερμική αγωγή στοιχείων

Η θερμοκρασία διασταύρωσης T_J , στην οποία είναι προκαθορισμένο να λειτουργούν τα MOSFET, υπολογίζεται από τον τύπο (1.4). Σύμφωνα με αυτόν το T_J ισούται με την πρόσθεση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_A με το γινόμενο της θερμικής αντίστασης και της ισχύς. Αυτή είναι η πιο βασική εξίσωση για το T_J .

$$T_{\text{JUNCTION}} = T_{\text{AMBIENT}} + \theta_{JA} [^{\circ}\text{C}/\text{W}] * \text{POWER} [\text{W}] \quad (1.4)$$

Η εικόνα 1.4 δείχνει τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της θερμικής αντίστασης. Το σχήμα περιλαμβάνει μια πλάκα αγωγής θερμότητας (ψύκτρα θερμότητας) και το MOSFET σε «TO-220» πακέτο θήκης (package). Οι θερμικές αντιστάσεις σχετίζονται από τον τύπο :

$$\Theta_{JA} = \Theta_{JC} + \Theta_{CA} \quad (1.5)$$



Εικόνα 1.4 : Ανάλυση θερμικής αντίστασης

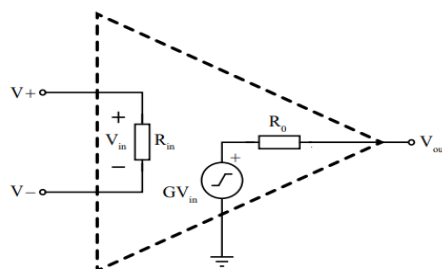
ΠΗΓΗ: <https://techweb.rohm.com/knowledge/si/s-si/04-s-si/7129>

Η θερμική αντίσταση θ_{CA} όταν δεν υπάρχει ψύκτρα είναι το αποτέλεσμα της αφαίρεσης του θ_{JC} από τη δεδομένη τιμή του Θ_{JA} (1.6). Όταν υπάρχει ψύκτρα, η θερμική αντίσταση της ψύκτρας αντιστοιχεί σε Θ_{CA} , και αντιστρόφως, το θ_{JA} δεν είναι απλώς η τιμή που δίνεται, αλλά είναι το αποτέλεσμα της προσθήκης θ_{JC} και θ_{CA} (1.7). Τα συμπεράσματα (1.6) και (1.7) προκύπτουν από την σχέση (1.5). Το θ_{JC} είναι αρκετά χαμηλότερο σε σύγκριση με το θ_{JA} , και έτσι το θ_{JA} μπορεί να μειωθεί σημαντικά ανάλογα με τη θερμική αντίσταση της ψύκτρας. Εάν για παράδειγμα το θ_{JA} (που υποδεικνύεται στα datasheet ως R_{thJA}) είναι $40^{\circ}\text{C}/\text{W}$, αλλά χρησιμοποιείται

ψύκτρα με θερμική αντίσταση $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$, τότε η θ_{JA} μπορεί να μειωθεί στους $11,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$.¹¹

1.3 Σύνδεση τελεστικού ενισχυτή με τα MOSET ισχύος

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένα θεμελιώδες δομικό στοιχείο στα αναλογικά κυκλώματα. Στη εικόνα 1.5 απεικονίζεται το εσωτερικό μοντέλο ενός τελεστικού ενισχυτή. Ένας ενισχυτής μπορεί να μας παρέχει διάφορους αριθμούς εισόδων-εξόδων, στην απλούστερη μορφή του διαθέτει δύο εισόδους και μία έξοδο. Οι είσοδοι αποτελούνται από μία μη αναστρέφουσα είσοδο που μπορούμε να την αναγνωρίσουμε από το θετικό πρόσημο και μία αναστρέφουσα είσοδο που συμβολίζεται και αναπαριστάται με αρνητικό πρόσημο. Η έξοδος των ολοκληρωμένων παρέχει μια υψηλή ενίσχυση της διαφοράς τάσεων μεταξύ των δύο εισόδων. Το σχήμα για απλότητα σχεδιάστηκε χωρίς τροφοδοσία και γείωση. Όταν χρησιμοποιείται ένα ιδανικό μοντέλο του ενισχυτή, η σύνθετη αντίσταση εισόδου R_{IN} θεωρείται ότι είναι άπειρη και η αντίσταση εξόδου R_O θεωρείται μηδέν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ροή μηδενικού ρεύματος στις εισόδους και δυνατότητα παροχής απεριόριστου ρεύματος στην έξοδο χωρίς πτώση τάσης. Στην πραγματικότητα, ο R_{IN} μπορεί να έχει τιμές μέχρι και μερικά $\text{M}\Omega$ και ο R_O μερικές δεκάδες ohms.



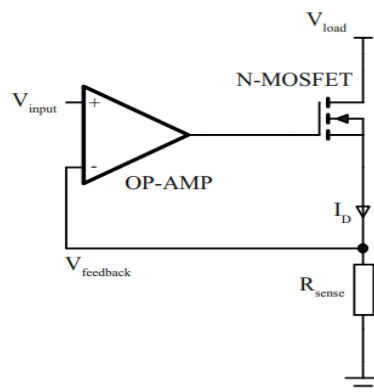
Εικόνα 1.5: Εσωτερικό σχέδιο τελεστικού ενισχυτή

ΠΗΓΗ: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/169764/169764.pdf>

Μία από τις λειτουργίες που επιτελεί ο τελεστικός ενισχυτής είναι η χρήση του ως ενισχυτής σφάλματος. Το σήμα σφάλματος είναι η διαφορά μεταξύ της τιμής αναφοράς εισόδου και της πραγματικής αξία του. Η διεργασία ή η μεταβλητή που πρέπει να ελέγχεται από την έξοδο του ενισχυτή, τροφοδοτείται πίσω στην αναστρέφουσα είσοδο. Κατά την διεργασία αυτή ο ενισχυτής αλλάζει συνεχώς την τιμή εξόδου του με τέτοιο τρόπο ώστε η διαφορά μεταξύ της αναστρέφουσας και της

¹¹ Confirmation of the Chip Temperature. (2018). Ανακτήθηκε από <https://techweb.rohm.com/knowledge/si/s-si/04-s-si/7129>.

μη αναστρέφουσας εισόδου να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Σε ένα βέλτιστο κύκλωμα ελέγχου, ο ενισχυτής θα εξαναγκάσει το σήμα ανάδρασης να είναι ίσο με το σήμα που εφαρμόζεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο. Στην εικόνα 1.6 φαίνεται ο βασικός βρόχος ελέγχου που χρησιμοποιείται. Το σήμα σφάλματος που είναι η διαφορά μεταξύ του σήματος αναφοράς εισόδου (V_{input}) και του σήματος ανάδρασης ($V_{feedback}$) ενισχύεται για τον έλεγχο του MOSFET. Η τάση πύλης ελέγχει το ρεύμα που διαρρέει στο MOSFET και στην συνέχεια περνάει μέσα από την αντίσταση ισχύος (R_{sense}).¹² Με βάση τις παραπάνω πληροφορίες, γίνεται κατανοητό ότι θα πρέπει ο T.E. να τηρεί κάποιους κανόνες. Η DC ακρίβεια και η τάση τροφοδοσίας του T.E. είναι τα κυριότερα μέρη που πρέπει να διευκρινιστούν. Η DC ακρίβεια καθορίζεται από την τάση ασυμμετρίας εισόδου του ενισχυτή. “Τάση ασυμμετρίας εισόδου ονομάζουμε την DC τάση που πρέπει να εφαρμοσθεί μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου ενός T.E., έτσι ώστε η τάση ηρεμίας στην έξοδο να γίνει μηδέν.” Εάν ο T.E. έχει DC σύζευξη, το σφάλμα ασυμμετρίας εισόδου θα ενισχυθεί από το κέρδος κλειστού βρόχου του, με αποτέλεσμα η τάση ασυμμετρίας να είναι μία ένδειξη της διακριτικής ικανότητας του.¹³



Εικόνα 1.6: Λειτουργία MOSFET με τη χρήση του ενισχυτή

ΠΗΓΗ: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/169764/169764.pdf>

¹² Samimi, S. & Rosen, L. (2012). Small Electronic Load Design and analysis of a small electronic load for testing on-board DC/DC converters. (Master of Science Thesis). Ανακτήθηκε από CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/169764/169764.pdf>.

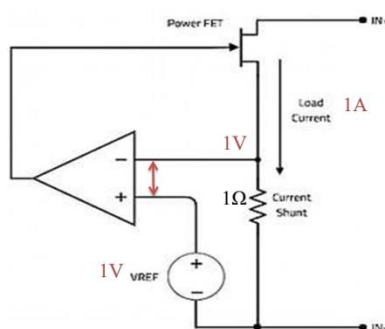
¹³ Σπάσος, Μ. Ν., (2018). Αναλογική επεξεργασία σημάτων αισθητηρίων. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΑΪΒΑΖΗ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ DC ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

2.1 Ανάλυση λειτουργιών

Η ανάλυση των κυκλωμάτων αλλά και οι διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στις λειτουργίες παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Ένα DC ηλεκτρονικό φορτίο μπορεί να πραγματοποιήσει τέσσερις διαφορετικές λειτουργίες. Η κάθε λειτουργία μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξαρτήτως η μία από την άλλη, ανάλογα με την πηγή ισχύος που χρησιμοποιήσουμε. Η μορφή των κυκλωμάτων CC, CV και CR διαφέρει στην συνδεσμολογία που πραγματοποιείται στις εισόδους του τελεστικού αλλά και στην προσθήκη αντιστάσεων στα CV και CR.

2.1.1 Ανάλυση λειτουργίας σταθερού ρεύματος (CC)



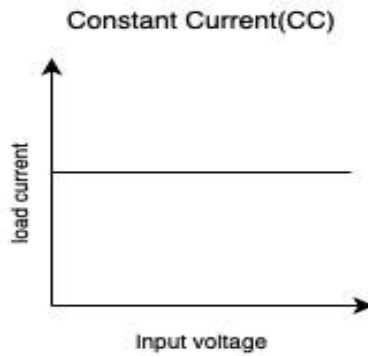
Εικόνα 2.1: Παράδειγμα CC λειτουργίας

ΠΗΓΗ: <https://blog.programmablepower.com/blog/how-electronic-loads-work>

Η κυκλωματική μορφή της λειτουργίας του σταθερού ρεύματος παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1. Το σχήμα αποτελεί ένα απλοποιημένο κύκλωμα ενός DC ΗΦ. Η ενεργοποίηση του κυκλώματος ξεκινάει την στιγμή που θα δοθεί στο “IN+” διαφορά τάσης μεγαλύτερη του “IN-”, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα 0V. Κατά την ενεργοποίηση το ηλεκτρονικό φορτίο θα αντλεί σταθερό ρεύμα από τη συσκευή η οποία βρίσκεται υπό δοκιμή ανεξάρτητα από την τάση εξόδου. Η τάση στη μη αναστρέφουσα είσοδο καθορίζει το ρεύμα που θα ρέει στη συσκευή, τόσο μέσω του FET ισχύος όσο και της μετρητικής αντίστασης. Η τάση που βρίσκεται στα άκρα της αντίστασης συγκρίνεται με την τάση αναφοράς και η διαφορά μεταξύ των δύο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της αντίστασης εκροής-πηγής, RDS, του FET ισχύος. Εάν το ρεύμα που ρέει μέσα στο κύκλωμα έχει

μεγαλύτερη τιμή από το επιθυμητό σταθερό ρεύμα, το κύκλωμα θα ρυθμίσει την V_{GS} του FET με σκοπό την αύξηση του R_{DS} της πύλης του FET και έτσι θα υπάρξει μείωση του ρεύματος ενώ σε αντίθετη περίπτωση, εάν το ρεύμα φορτίου είναι χαμηλότερο από το επιθυμητό, το κύκλωμα θα ρυθμίσει την τάση της πύλης έτσι ώστε να υπάρξει μείωση του R_{DS} και κατεπέκταση αύξηση του ρεύματος που ρέει στο φορτίο. Σε ένα πραγματικό DC ηλεκτρονικό φορτίο, το V_{REF} παρέχεται από ένα μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα (DAC), όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση την διαδικασία αυτή πραγματοποιεί ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο. Ο χρήστης ρυθμίζει την τάση εξόδου του DAC για να δώσει την τάση που χρειάζεται, ώστε να υπάρξει ένα επιθυμητό ρεύμα. Η προδιαγραφή που προσδιορίζει την ακρίβεια της CC λειτουργίας καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια του ψηφιακού μετατροπέα. Για την κατανόηση της λειτουργίας δίνεται το παράδειγμα της εικόνας 2.1. Όταν η τάση αναφοράς V_{REF} τροφοδοτήσει τον τελεστικό ενισχυτή με τάση $V_{REF}=1V$, η μη αναστρέφουσα είσοδος θα ισούται με $1V$. Την στιγμή που η αναστρέφουσα είσοδος (λόγω της συνδεσμολογίας του ενισχυτή) γίνει ίση με τη μη αναστρέφουσα, τότε η έξοδος του τελεστικού θα ενεργοποιήσει την V_{GS} , όπου η V_{GS} θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της $V_{GS(th)}$, με αποτέλεσμα ανάλογα με το ρεύμα που θα επιτρέπει το MOSFET να περάσει από την αντίσταση, σύμφωνα και με τον νόμο του Kirchhoff, να έχουμε στην αντίσταση $I = \frac{V}{R} = \frac{1V}{1\Omega} = 1 A$. Στο κύκλωμα η τάση αναφοράς V_{REF} εκτός από την ενεργοποίηση του MOSFET, παίζει σημαντικό ρόλο και στο 'πόσο' ρεύμα θα περάσει στην αντίσταση (μέσω της V_{GS}), αλλά και στην ακριβή τιμή ρεύματος που θα υπάρχει επάνω στην μετρητική αντίσταση. Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και ο τελεστικός που θα χρησιμοποιηθεί. Η τάση εξόδου του τελεστικού, η δυνατότητα μονοπολικής σύνδεσης αλλά και η τάση ασυμμετρίας εισόδου είναι εξίσου σημαντικά στην υλοποίηση ενός, όσο το δυνατόν, γραμμικού DC ΗΦ.¹⁴

¹⁴ Martin, B. (2017). How Electronic Loads Work. Ανακτήθηκε από <https://blog.programmablepower.com/blog/how-electronic-loads-work>.

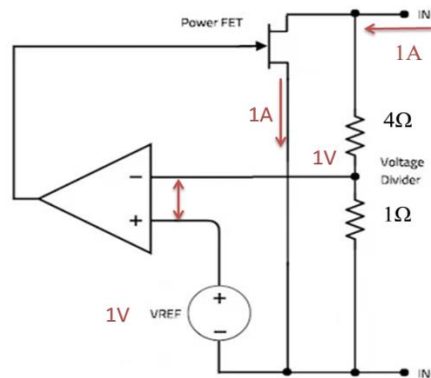


Διάγραμμα 2.1: Απεικόνιση αποτελεσμάτων I-V σταθερού ρεύματος

ΠΗΓΗ: <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/05/26/basic-electronics-electronic-load-and-battery-testing/>

Η έξοδος της τάσης σε συνάρτηση με το ρεύμα παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.1. Στον άξονα X εικονίζεται το φορτίο του ρεύματος και στον άξονα Y η τάση εισόδου. Το σημείο λειτουργίας είναι το σημείο που τέμνει του δύο άξονες, όπου στην περίπτωση της CC λειτουργίας το $Q(V_{in}, 1A)$. Σαν V_{in} μπορούμε να επιλέξουμε τιμές από $V_{GS(th)}$ έως την τάση V_{DSS} , που θα ορίσουμε εμείς με βάση τα φύλλα δεδομένων των FET ισχύος.

2.1.2 Ανάλυση λειτουργίας σταθερής τάσης (CV)

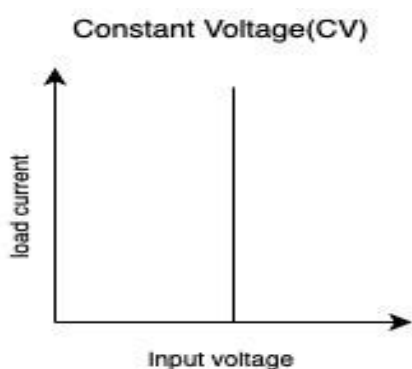


Εικόνα 2.2 : Παράδειγμα CV λειτουργίας

ΠΗΓΗ: <https://blog.programmablepower.com/blog/how-electronic-loads-work>

Η λειτουργία της σταθερής τάσης παρουσιάζεται στην εικόνα 2.2. Η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στα κυκλώματα CV και CC βρίσκεται στην συνδεσμολογία της αναστρέφουσας εισόδου αλλά και ότι στην περίπτωση της CV δεν τοποθετείται αντίσταση φορτίου στην πηγή του FET. Αυτές οι δύο συνθήκες κάνουν υποχρεωτική την ύπαρξη πηγής ρεύματος στην είσοδο του φορτίου. Ο ενισχυτής δέχεται στην αναστρέφουσα είσοδο ως σήμα την τάση που παράγει ο διαιρέτη τάσης εισόδου των

δύο αντιστάσεων, αυτό το σήμα συγκρίνεται με την τάση αναφοράς V_{REF} και η έξοδος που παράγεται από το συγκριτή χρησιμοποιείται ως είσοδος στην πύλη των FET, όπου με την σειρά της η V_{GS} καθορίζει την αύξηση ή τη μείωση του R_{DS} . Η τάση αναφοράς V_{REF} παρέχεται από ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο που μετατρέπει το ψηφιακό σήμα που δέχεται από τον μικροελεγκτή σε αναλογικό. Την στιγμή που η τάση V_{GS} ξεπεράσει το κατώφλι $V_{GS(th)}$, (το όριο της τάσης κατωφλίου αναγράφεται στα datasheet) αρχίζει η ροή του ρεύματος από την πηγή προς το FET και εν συνεχεία από το FET διαμέσου της αντίστασης στην γείωση.¹⁵



Διάγραμμα 2.2 : Απεικόνιση αποτελεσμάτων I-V σταθερής τάσης

ΠΗΓΗ: <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/05/26/basic-electronics-electronic-load-and-battery-testing/>

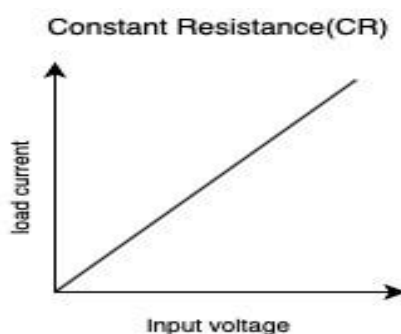
Τα αντίστοιχα αποτελέσματα εξόδου τάσης και ρεύματος φαίνονται στο διάγραμμα 2.2. Στον άξονα X εικονίζεται το φορτίο του ρεύματος και στον άξονα Y η τάση είσοδου. Το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στο σημείο που τέμνονται οι δύο άξονες, όπου στην περίπτωση του παραδείγματος το $Q(V_{in}, 1 A)$. Σαν V_{in} μπορεί να υπάρξει οποιαδήποτε τάση χαμηλότερη της V_{DSS} του MOSFET. Να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι η CV λειτουργία δεν χρησιμοποιήθηκε στην τελική κατασκευή. Η λειτουργία CV δεν επιλέχθηκε να υλοποιηθεί στην τελική κατασκευή λόγω της εξόδου του τελεστικού, ο οποίος ενεργοποιεί το MOSFET σε μια συγκεκριμένη τάση V_{GS} , επηρεάζοντας το ρεύμα που διαρέει στην αντίσταση φορτίου, που στην περίπτωση της CV λειτουργίας δεν υπάρχει κάποια μετρητική αντίσταση.

2.1.3 Ανάλυση λειτουργίας σταθερής αντίστασης (CR)

Η λειτουργία της σταθερής αντίστασης ενός DC ηλεκτρονικού φορτίου είναι κατάλληλη για τη φόρτωση μιας πηγής ισχύος που είναι από τη φύση της πηγή τάσης ή ρεύματος. Το κύκλωμα της σταθερής αντίστασης είναι ο συνδιασμός των

¹⁵ Martin, B. (2017). How Electronic Loads Work. Ανακτήθηκε από <https://blog.programmablepower.com/blog/how-electronic-loads-work>.

κυκλωμάτων CC και CV, χωρίς την ύπαρξη της τάσης αναφοράς. Πιο αναλυτικά, ο ενισχυτής δέχεται ως σήμα στην αναστρέφουσα είσοδο την τάση που βρίσκεται στην πηγή των FET και την συγκρίνει με την τάση που παράγει ο διαιρέτης τάσης εισόδου, που εισέρχεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο. Η έξοδος του τελεστικού ενεργοποιεί το FET και ρέει το ρεύμα από το τρανζίστορ στην αντίσταση.



Διάγραμμα 2.3 : Απεικόνιση αποτελεσμάτων I-V σταθερής αντίστασης

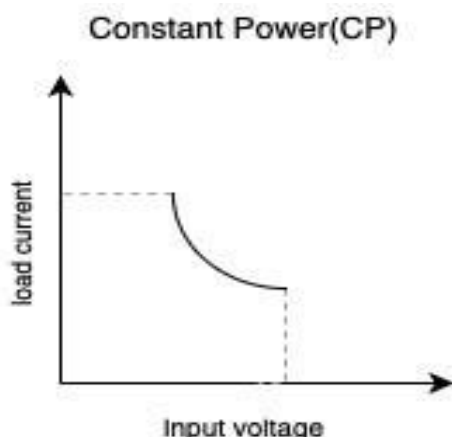
ΠΗΓΗ: <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/05/26/basic-electronics-electronic-load-and-battery-testing/>

Η αλλαγή της αντίστασης του διαιρέτη τάσης, όπου απεικονίζεται στην εικόνα 2.2, από μια μηδενική τιμή έως και την μέγιστη τιμή της αντίστασης, (στο παράδειγμα έχουμε ως μέγιστη 1Ω) μας δίνει το αντίστοιχο διάγραμμα I-V που εικονίζεται στο διάγραμμα 2.3.

2.1.4 Ανάλυση λειτουργίας σταθερής ισχύς (CP)

Ένα σταθερό φορτίο ισχύος έχει σχεδιαστεί για να ρυθμίζει δυναμικά το ρεύμα αντίστροφα με την τάση φορτίου, έτσι ώστε η ισχύς του φορτίου να είναι σταθερή, σύμφωνα με τον τύπο $P = V \times I$. Καθώς η τάση αυξάνεται ή μειώνεται, το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος στην αντίσταση ισχύος είναι σταθερή ισχύς. Αυτό το γεγονός συμβάλλει στη διατήρηση της σταθερής ισχύς που διαχέει στο κύκλωμα καθώς πέφτει η τάση. Οι ηλεκτρονικές συσκευές με SMPS προσεγγίζουν αυτόν τον τύπο φορτίου, καθώς χρησιμοποιούν γενικά ρυθμιστές για τη δημιουργία σταθερής τάσης. Ένα φορτίο ισχύος μπορεί να διαχειριστεί την τάση και το ρεύμα του κυκλώματος και να τα ρυθμίζει ανάλογα με τις ανάγκες του. Ο ρυθμιστής θα παράγει μια σταθερή ισχύ ίση με τη σταθερή τάση στο τετράγωνο, διαιρούμενο με σταθερή αντίσταση. Εάν ο ρυθμιστής είναι 100% αποδοτικός, θα χρησιμοποιήσει όλη την ισχύ στο φορτίο. Εφόσον η τάση εισόδου ανεβαίνει, το ρεύμα εισόδου μειώνεται για τη διαφύλαξη του γινομένου $V \times I$, ώστε να ισούται με την ισχύ του φορτίου. Οι

περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές προσαρμόζονται σε αυτό το μοντέλο εντός του αποδεκτού εύρους τάσης εισόδου που μπορεί να είναι +/-10%.¹⁶



Διάγραμμα 2.4 : Απεικόνιση αποτελεσμάτων I-V σταθερής ισχύς

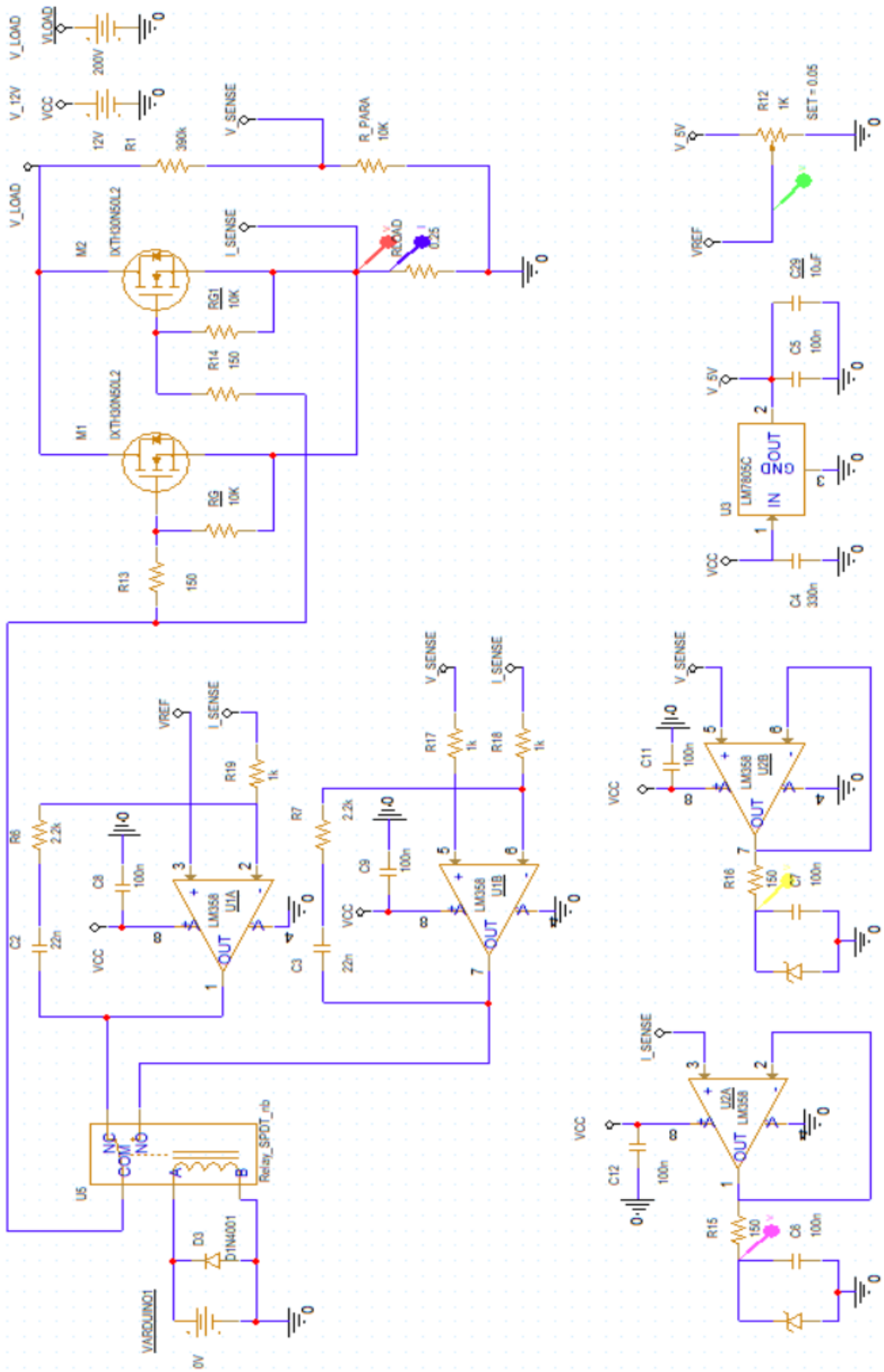
ΠΗΓΗ: <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/05/26/basic-electronics-electronic-load-and-battery-testing/>

Το αντίστοιχο διάγραμμα της τάσης και του ρεύματος της CP λειτουργίας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4. Όπως παρατηρούμε η γραφική παράσταση έχει ένα καμπυλόμορφο σχήμα. Το μέγιστο ρεύμα περιορίζει την τάση τροφοδοσίας του φορτίου, ενώ μια μέγιστη τάση περιορίζει και αυτή το ρεύμα που ρέει στο φορτίο.

2.2 Προσομοίωση κυκλώματος σε orcad

Για την ορθή λειτουργία των κυκλωμάτων σταθερής αντίστασης και σταθερού ρεύματος πραγματοποιήθηκε προσομοίωση μέσω της εφαρμογής PSpice της Cadence. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται γραφικά ο σχεδιασμός των κυκλωμάτων σταθερού ρεύματος και σταθερής αντίστασης αλλά και τα υποκυκλώματα που βοηθούν στην διαδικασία τους. Για να υπάρχει τήρηση των προδιαγραφών, η τάση V_{LOAD} ορίστηκε από τιμές 0V έως την μέγιστη τάση των 200V, η τάση των T.E διατηρείται σταθερή στα 12V και το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να ρέει στο κύκλωμα, λόγω της V_{REF} και της R_{LOAD} , περιορίζεται στα 20 A. Η εναλλαγή των λειτουργιών σταθερής τάσης και σταθερού ρεύματος γίνεται με των χρήση ρελέ, που ελέγχεται διά μέσου του μικροελεκτη Atmega328.

¹⁶ Basic Electronics: Electronic Load and Battery Testing. (2020). Ανακτήθηκε από <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/05/26/basic-electronics-electronic-load-and-battery-testing/>.



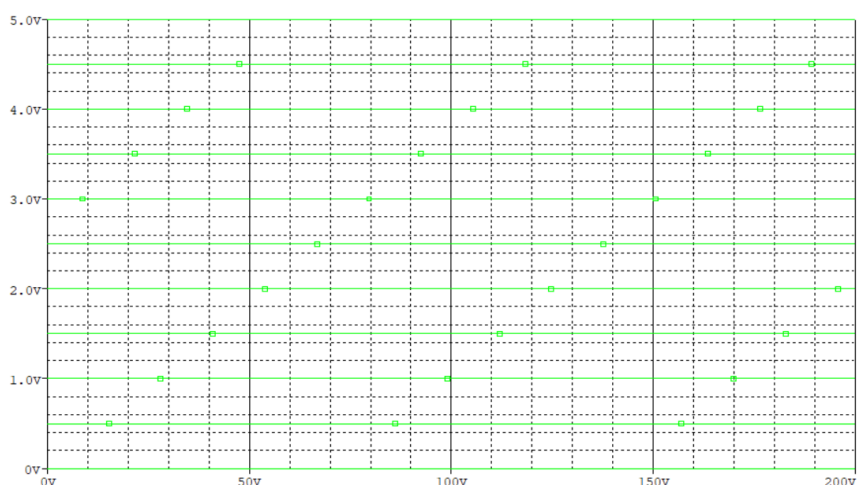
Σχήμα 2.1: Προσομύηση σε ORCAD

2.2.1 MOSFET ισχύος

Για τη προσομοίωση του DC ΗΦ επιλέχθηκαν τα n τύπου MOSFET IXTH30N50L2 της εταιρίας IXY. Η επιλογή της παράλληλης σύνδεσης έγινε λόγω του πλεονεκτήματος που παρέχει σε σχέση με το ρεύμα αλλά και με βάση των θερμικών απωλειών των MOSFET. Οι αντιστάσεις R13 και R14 (150 Ω) χρησιμοποιούνται για την αποφυγή του latching (κλειδώματος) μεταξύ των τρανζίστορ και οι αντιστάσεις RG (10K) για τη γρήγορη σβέση των MOSFET κατά την απενεργοποίησή τους. Οι αντιστάσεις είναι σημαντικές, αφού χωρίς αυτές θα είχαμε ως συνέπεια την καταστροφή των MOSFET.

2.2.2 Τάση αναφοράς V_{REF}

Για την ρύθμιση της τάσης που βρίσκεται στη πύλη των MOSFET, έτσι ώστε να υπάρχει ενεργοποίηση και κατεπέκταση ροή του επιθυμητού ρεύματος που θέλουμε, επιλέχθηκε ο σταθεροποιητής LM7805 (U3), ο οποίος τροφοδοτείται με τάση 12 V (ίδια τάση με αυτή των ενισχυτών) και έχει σταθερή έξοδο 5V. Το αναλογικό ποτενσιόμετρο του 1KΩ, ρυθμίζει την υπάρχουσα τάση των 5V σε κατώτερες τιμές. Στην βαθμίδα U3, για την βέλτιστη λειτουργία του σταθεροποιητή, χρησιμοποιείται ο πυκνωτής C4 για τον έλεγχο της επαγωγής εισόδου και ο C5 παράλληλα με τον C29 για τη σταθεροποίηση του κυκλώματος. Ο C4 υπολογίστηκε και επιλέχθηκε στη τιμή των 330nF, ενώ ο πυκνωτής C5 και ο C29 σε τιμές 100nF και 10μF αντίστοιχα. Ανάλογα με το SET που θα θέσουμε στο ποτενσιόμετρο, θα υπάρχει αντίστοιχα και αλλαγή στην τάση πύλης των MOSFET. Το σήμα που παρέχεται στη μη αναστρέφουσα είσοδο του U1A απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα.

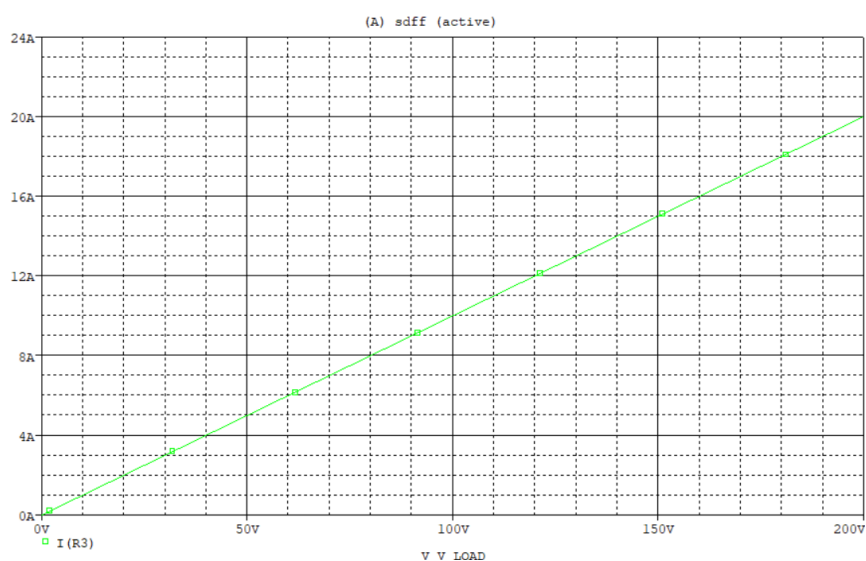


Διάγραμμα 2.5 : Απεικόνιση τάσης αναφοράς-τάση φορτίου

Στην διάγραμμα 2.5 απεικονίζεται η V_{REF} σε συσχέτιση με την V_{LOAD} . Για την καλύτερη απεικόνιση της τάσης, τέθηκε ως βήμα αναφοράς 0.5V. Για set=0.5 παρατηρούμε ότι η V_{REF} ισούται με 2.5V ενώ για set=1, παρατηρούμε ότι η V_{REF} ισούται με 5V.

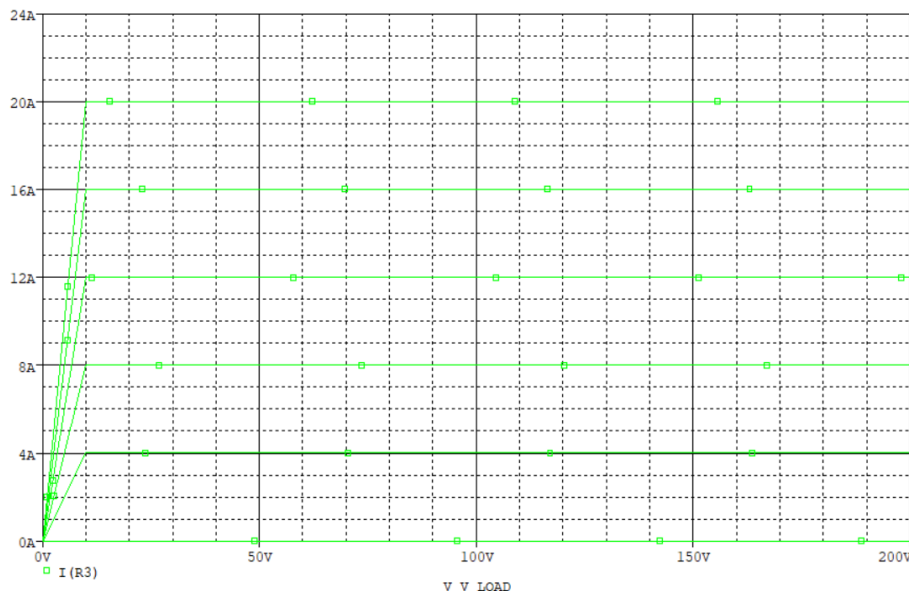
2.2.3 Προσομοίωση λειτουργίας σταθερού ρεύματος

Η λειτουργία του σταθερού ρεύματος υλοποιείται από την βαθμίδα U1A. Ο ενισχυτής LM358 χρησιμοποιείται ως ρυθμιστής ρεύματος εισόδου του DC ΗΦ συγκρίνοντας την τάση της μετρικής αντίστασης με μια τάση αναφοράς V_{REF} , αποδίδοντας έτσι την κατάλληλη τάση στη V_{GS} . Η αντίσταση R6 και ο πυκνωτής C2 χρησιμοποιήθηκαν ως φίλτρο, ώστε να αποτραπεί η ταλάντωση του ενισχυτή. Ο πυκνωτής C2 περιορίζει το AC κέρδος, λειτουργώντας ως χαμηλοπερατό φίλτρο ενώ το R6 περιορίζει το DC κέρδος. Για την αποφυγή ταλαντώσεων, την αποφυγή μεταπτώσεων και για την αποθήκευση ενέργειας επιλέχθηκε ο πυκνωτής C8. Η αντίσταση R19 περιορίζει το μέγιστο ρεύμα της αναστρέφουσας εισόδου και προστατεύει το ολοκληρωμένο από πιθανές δυσλειτουργίες. Το Relay_5V του σχήματος 2.1 χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό της CC λειτουργία από την λειτουργία της σταθερής αντίστασης CR. Το Relay_5V λειτουργεί με τη χρήση διακόπτη. Η λειτουργία CR θα ενεργοποιηθεί την στιγμή που θα υπάρξει διαφορά δυναμικού τουλάχιστον 5V στο εσωτερικό του πηνίο στο ρελέ. Κατά την ενεργοποίησή του DC ΗΦ ενεργοποιείται αυτόματα η CC λειτουργία, ο κοινός ακροδέκτης συνδέεται με τον ακροδέκτη normal close και η έξοδος του U1A με την πύλη των MOSFET .



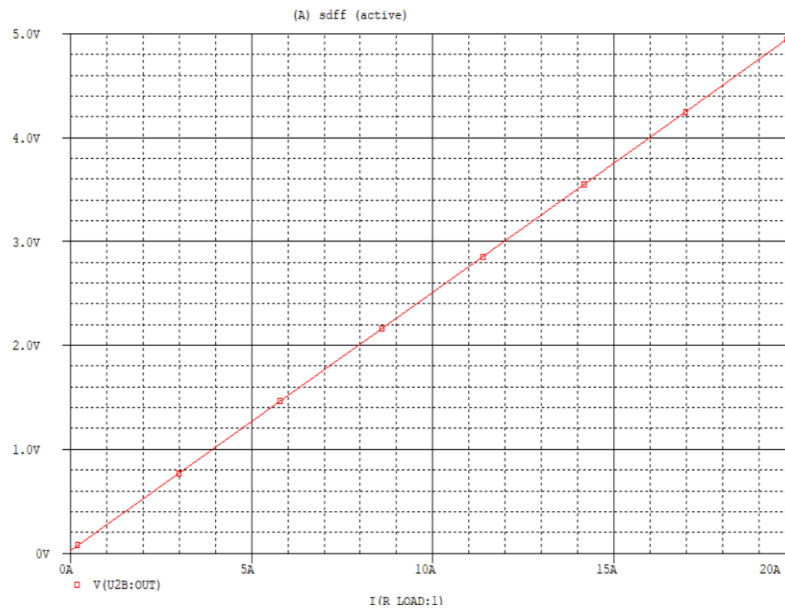
Διάγραμμα 2.6 : Απεικόνιση τάσης-ρεύματος φορτίου

Στο διάγραμμα 2.6 απεικονίζεται η τάση είσοδου του φορτίου συναρτήσει του ρεύματος εξόδου. Για το συγκεκριμένο διάγραμμα δόθηκε ως βήμα τάσης φορτίου $V_{LOAD} = 200V$, έτσι ώστε να παρατηρήσουμε τη μέγιστη τιμή ρεύματος σε μια μέγιστη τιμή τάσης. Παρατηρούμε ότι στα 200V το μέγιστο ρεύμα είναι 20A. Λόγω του ότι η ισχύς που έχουμε επιλέξει για την υλοποίηση του φορτίου είναι 200W, το ρεύμα που θα μπορούν να διαχειριστούν τα MOSFET χωρίς να υπάρξει πρόβλημα στην συσκευή θα είναι $P = V \times I \Rightarrow I = 200W / 200V = 1A$. Αυτό σημαίνει ότι στην πραγματικότητα η συσκευή θα μπορεί να εξάγει ρεύμα ίσο με 1A για κάθε $V_{LOAD} = 200V$.



Διάγραμμα 2.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης σταθερού ρεύματος

Για την απεικόνιση της λειτουργίας του σταθερού ρεύματος επάνω στη μετρική αντίσταση του φορτίου διάγραμμα 2.7, ώστε να επαληθεύσουμε την ορθή λειτουργία των MOSFET, ρυθμίστηκε η τάση του φορτίου από 0V έως 200V με βήμα 10V και η τάση αναφοράς στη μη αναστρέφουσα από 0V έως 5V με βήμα 1V. Στον άξονα X βρίσκεται η τάση V_{LOAD} και στον Y το ρεύμα I_{LOAD} . Από την έξοδο συμπεραίνουμε ότι υπάρχει γραμμικότητα αλλά και σταθεροποίηση του μέγιστου ρεύματος στα 20 A. Συμπεραίνουμε ακόμα ότι η τάση του φορτίου δεν επηρεάζει το ρεύμα που ρέει στο φορτίο. Η τάση V_{REF} είναι αυτή που καθορίζει το ρεύμα. Αν για παράδειγμα, θέλαμε να ελέγξουμε τις μέγιστες τιμές ενός τροφοδοτικού 30V/4A, θα πρέπει να θέσουμε ως τάση αναφοράς 1V. Η τάση του φορτίου στην συγκεκριμένη περίπτωση θα ισούται με 30V και το ρεύμα $I_t = \frac{V_{REF}}{V_{RLOAD}} = \frac{1V}{0.25} = 4A$.



Διάγραμμα 2.8: ‘Εξοδος βαθμίδας U2B –Βαθμίδα απεικόνισης ρεύματος

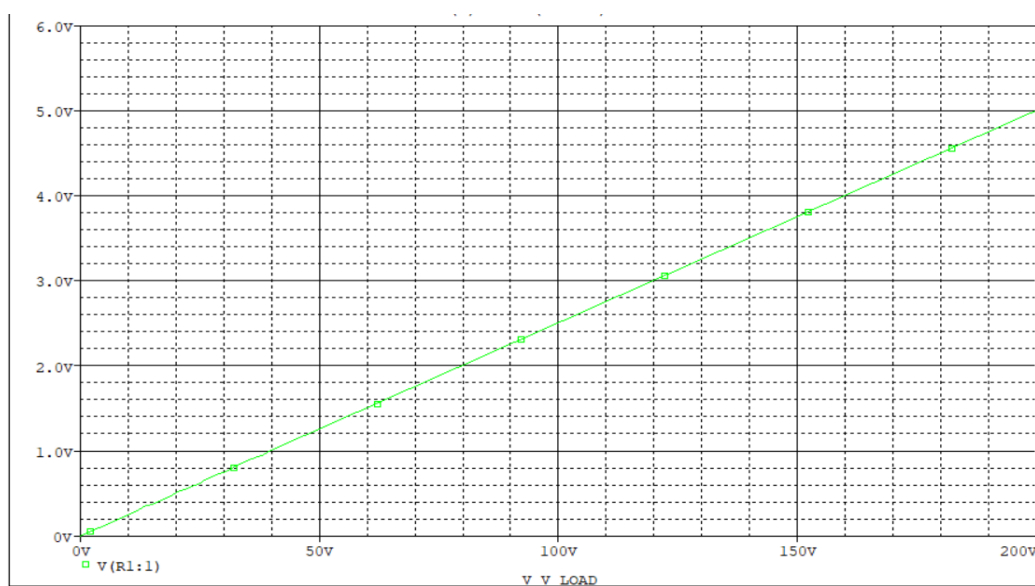
Για να μπορεί το ΗΦ να ανιχνεύει τις αλλαγές του ρεύματος και της τάσης των ακροδεκτών και να τα προβάλλει στην οθόνη, ο μικροελεγκτής δέχεται σαν εισόδους τα σήματα ανάδρασης ISENCE και VSENCE, βαθμίδες U1B και U2B αντίστοιχα. Προκειμένου αυτά τα σήματα να οδηγηθούν επιτυχώς σαν εισόδοι του ενσωματωμένου ADC στον μικροελεγκτή και για να απομονωθούν από το υπόλοιπο κύκλωμα, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ένα κύκλωμα ακόλουθου τάσης για κάθε σήμα. Η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος κλειστού βρόχου με τη ανάδραση, είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή ανοιχτού βρόχου. Ομοίως, η αντίσταση εξόδου μειώνεται περαιτέρω με την ανάδραση σε σχέση με αυτήν που είχε ο τελεστικός ενισχυτής ανοιχτού βρόχου. Αυτές οι ιδιότητες του ακόλουθου τάσης τον αναγάγουν σε μία ιδανική βαθμίδα απομόνωσης. Με την ενέργεια αυτή απομονώνουμε το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης και διαφυλάσσουμε τον μικροελεγκτή από ανεπιθύμητα ρεύματα και τάσεις που θα προκαλούσαν ζημίες στο μικροελεγκτή. Η τάση εισόδου εφαρμόζεται στην ακίδα της μη αναστρέφουσας είσοδου και η τάση της αναστρέφουσας είσοδου, λόγω της ιδιότητας του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή, θα ισούται με την τάση της μη αναστρέφουσας είσοδου. Η τάση εξόδου, λόγω της κατασκευαστικής δομής του Τ.Ε, ισούται με την τάση εισόδου και στο μέγεθος και στην πολικότητα.¹⁷ Στο διάγραμμα 2.8 βλέπουμε το ρεύμα του φορτίου σε συσχέτιση με την τάση αναφοράς. Για παράδειγμα για να έχουμε 20Α, σύμφωνα με την προσομοίωση, θα πρέπει να έχουμε

¹⁷ Παπαβραμίδου, Π. Α. & Παπακώστας Δ. Κ. (2014). Ηλεκτρονικές εξερευνήσεις. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

ως τάση αναφοράς 5V ενώ για 5A, 1.25V. Οι δίοδοι zener επιλέχθηκαν στην τιμή των 5V (πρακτικά 5,1V), με δεδομένο ότι ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα arduino nano είναι ο atmega328, περιορίζει την τάση εισόδου σε κάθε pin σε 5V.

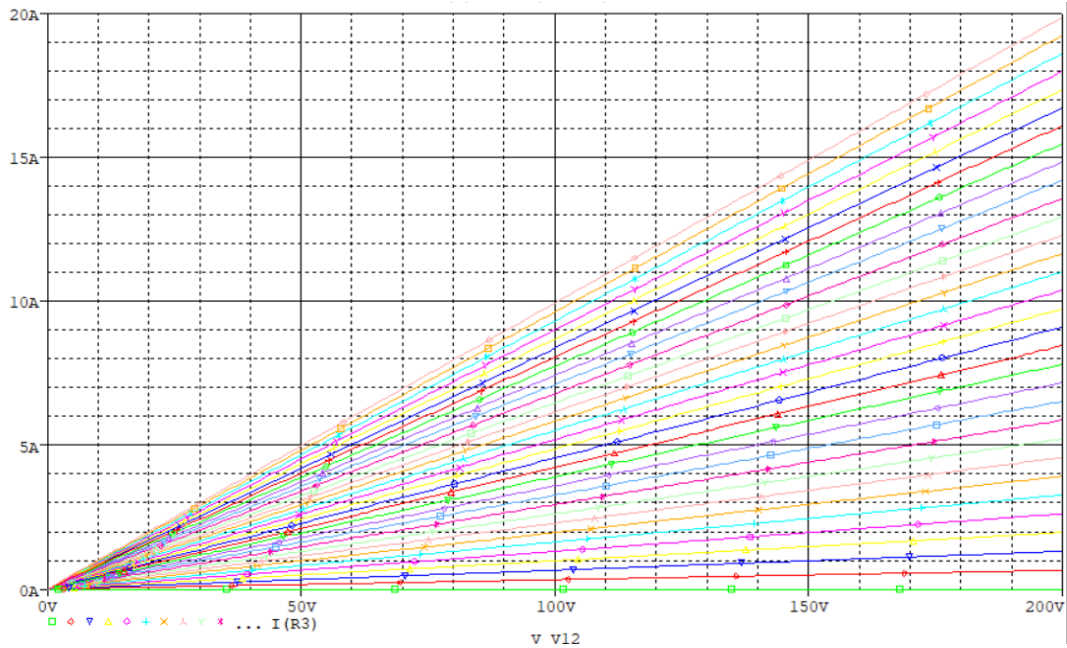
2.2.4 Προσομοίωση λειτουργίας σταθερής αντίστασης

Στην προσομοίωση της CR λειτουργίας με την αλλαγή της αντίστασης R_PARAMETRIC του διαιρέτη τάσης, ελέγχουμε τις τιμές εξόδου ρεύματος και τάσης. Από τον τύπο του διαιρέτη τάσης και με δεδομένο ότι θα χρησιμοποιήσουμε αναλογικό ποτενσιόμετρο τιμής 10KΩ, βρίσκουμε την τιμή της $R1 = \frac{V_{LOAD} * R2 - R2 * V_{ΔΙΑΙΡΕΤΗ}}{V_{ΔΙΑΙΡΕΤΗ}} = 390K\Omega$. Με βάση τα παραπάνω η μέγιστη τάση της μη αναστρέφουσας εισόδου θα κυμαίνεται από 0V έως 5V, ικανοποιητικές τιμές για τον μικροελεγκτή. Η απεικόνιση της τάσης V_SENSE σε συσχέτιση με αυτή της τάσης εισόδου του φορτίου φαίνεται στο διάγραμμα 2.9.



Διάγραμμα 2.9 : Απεικόνιση διαιρέτη τάσης-τάση φορτίου

Για παράδειγμα, αν από 10 KΩ η αντίσταση γίνει 1 KΩ, θα έχουμε απο τον τύπο του διαιρέτη τάσης έξοδο 0.5V αντί για 5V (για την μέγιστη τάση φορτίου). Συμπεραίνουμε από τον τύπο $V=I \times R$ ότι με τη πτώση της τάσης θα έχουμε και χαμηλότερο ρεύμα στα άκρα της μετρητικής αντίστασης.



Διάγραμμα 2.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης σταθερής αντίστασης

Για την προσομοίωση σε λειτουργία σταθερής αντίστασης CR, επιλέχθηκε η παραμετροποίηση της R2, η οποία θα λειτουργήσει ως αναλογικό ποτενσιόμετρο. Η τιμή στα άκρα του ποτενσιόμετρου θα παραμένει σταθερή στα 5V ενώ ο μεσαίος ακροδέκτης θα ρυθμίζει την τιμή της V_SENSE. Διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται η τάση στους ακροδέκτες του ΗΦ, τόσο αυξάνεται το ρεύμα, με γραμμικό τρόπο, που το φορτίο δέχεται από την πηγή. Στο διάγραμμα 2.10 παρατηρούμε με διαφορετικό χρώμα τις εναλλαγές της αντίστασης και την έξοδο V-I που μας προσφέρουν οι διαφορετικές τιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ DC ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Οι ηλεκτρικές και οι θερμικές προδιαγραφές του ΗΦ, κατά τη φάση του σχεδιασμού, καθορίστηκαν ως εξής:

- Μέγιστη Τάση Ακροδεκτών (V_{LOAD}): 200 V
- Μέγιστο Ρεύμα Εισόδου (I_{LOAD}): 20 A
- Μέγιστη θερμική ισχύς (P_{LOAD}): 200 W

Από τα παραπάνω δεδομένα η θερμική ισχύς περιορίζει τις μέγιστες τιμές τάσης και ρεύματος του φορτίου. Συγκεκριμένα, όταν το ΗΦ διαρρέεται από το μέγιστο ρεύμα εισόδου των 20 A, μπορεί να δεχθεί το πολύ $200W/20A = 10V$, ενώ στη μέγιστη τάση του μπορεί να διαρρέεται από ρεύμα $200W /200V= 1 A$.

3.1 Προδιαγραφές των κατάλληλων MOSFET

Για την επιλογή των κατάλληλων MOSFET ισχύος, θα πρέπει να λάβουμε ως δεδομένο ότι διαλέξαμε την παράλληλη διάταξη (λόγω του πλεονεκτήματος που έχουν σε σχέση με το ρεύμα). Η επιλογή των MOSFET έγινε με βάση κάποιες παραμέτρους. Το V_{DS} (πηγή - εκροής) ταυτίζεται με την τάση του ΗΦ. Σαν V_{LOAD} επιλέχθηκε η τιμή των 200 V. Σύμφωνα με την τάση αυτή, θα πρέπει να επιλέξουμε ένα MOSFET με τάση διάσπασης μεγαλύτερη των 200 V. Το I_D (ρεύμα αγωγής) ταυτίζεται με το ρεύμα που διαρρέει στο ΗΦ, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η τιμή των 20A. Για την επιλογή του κατάλληλου MOSFET, όσο αφορά το ρεύμα, θα πρέπει να προσέξουμε και τις θερμικές επαγωγές της θήκης εξαρτημάτων. Η ισχύς του φορτίου επιλέχθηκε στη τιμή των $P_{LOAD}=200W$. Με αυτές τις παραμέτρους συμπεραίνουμε ότι το καταλληλότερο MOSEFT είναι το IXTH30N50L2 της εταιρίας IXY.¹⁸ Το συγκεκριμένο MOSFET ανήκει στην κατηγορία των Linear MOSEFT, οπότε αποφεύγεται η καθίζηση της αντίστασης στην κατάσταση $R_{DS(on)}$ και διαθέτει την ικανότητα γραμμικής λειτουργίας.¹⁹ Η μέγιστη τάση διάσπασης V_{DSS} ανέρχεται στην τιμή των 500V, με μέγιστο ρεύμα αγωγής $I_D =$

¹⁸OptiMOS™ Linear FET. Ανακτήθηκε από <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/optimos-and-strongirfet-latest-family-selection-guide/optimos-linear-fet-100v-150v-200v-/>.

¹⁹IXYS CORPORATION. (2014). LinearL2TM, Power MOSFET, w/ Extended FBSOA. Ανακτήθηκε από https://m.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/discrete_mosfets/littelfuse_discrete_mosfets_n-channel_linear_ixt_30n50_datasheet.pdf.pdf.

30A στους 25°C και 18A στους 100 °C (η επιλογή της συγκεκριμένης θερμοκρασίας έγινε με βάση τις θερμικές απώλειες του MOSFET), σε συσκευασία τύπου «TO-247», με δυνατή θερμική αντίσταση $R_{thjc} = 0,31^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Η απορρόφηση ισχύος, η οποία είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να διαχέει το MOSFET συνεχώς υπό καθορισμένες θερμικές συνθήκες, όπου σε λειτουργία $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$ περιορίζεται στα 400W, είναι αρκετά ικανοποιητική αν υποθέσουμε ότι θα επιλεγθούν δύο MOSFET λόγω του ρεύματος αγωγής I_D . Θα πρέπει να προσέξουμε ότι η θερμοκρασία των MOSFET θα φτάσει έως και τους 90°C. Από τον τύπο (3.1) μπορούμε να διευκρινίσουμε τον ακριβή αριθμό των MOSFET που θα χρησιμοποιηθούν:

$$PD = \frac{(T_{jmax} - T_c)}{R_{thjc}} \quad (3.1)$$

- $T_{jmax} = 150^{\circ}\text{C}$ από datasheet υλικού
- T_c έχουμε σε θερμοκρασία 90 °C
- $PD = 100 \text{ Watt}$ λόγω παραλληλισμού
- $R_{thjc} = 0.31^{\circ}\text{C}/\text{W}$ από datasheet υλικού

Με δεδομένο ότι η θερμοκρασία λόγω του συστήματος ψύξης δεν θα ξεπεράσει τους 90°C, συμπεραίνουμε από τον τύπο (3.2) ότι θα χρειαστούν δύο στοιχεία.

$$PD = \frac{T_j - T_c}{R_{thjc}} = \frac{150 - 90}{0.31} = 193 \text{ W} \quad (3.2)$$

Όσο αφορά την περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (SOA), διαπιστώνουμε από τα φύλλα δεδομένων ότι ακόμα και στους 75°C, στη μέγιστη τάση των 200 V, δεν ξεπερνάει το MOSFET το μέγιστο ρεύμα $I_{max} = \frac{P}{V} = 1\text{A}$. Από τον τύπο εύρεσης του ρεύματος εκροής (3.3), βρίσκουμε το ρεύμα που μπορεί να διαχειριστεί κάθε MOSFET, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μέχρι $(0.05) \times 100 = 0.5\text{A}$. Ακόμα και στην περίπτωση που το κάθε MOSFET ξεπεράσει την θερμοκρασία των 100°C, λόγω του ότι το μέγιστο ρεύμα που διαχειρίζεται το IXTH30N50L2 ανέρχεται στην τιμή των 18A, ουσιαστικά η προσθήκη δύο τρανζίστορ θα μπορούσε να διαχειριστεί το μέγιστο ρεύμα των 20 A, με την προϋπόθεση ότι η μέγιστη τάση θα περιοριστεί στην τιμή των 10 V, ώστε να είμαστε μέσα στα όρια της ισχύος που θέσαμε.

$$I_D = \frac{1}{V_{DS}} \times 100 \quad (3.3)$$

3.1.1 Προδιαγραφές ψύχτρας με εξαναγκασμένη μεταφορά αέρα

Αρχικά, για την επιλογή της κατάλληλης ψύξης των MOSFET, έπρεπε να προσδιοριστεί η τοποθεσία της ψύχτρας. Για παράδειγμα, ορισμένα συστήματα λειτουργούν σε πλήρως κλιματιζόμενα μέρη, ορισμένα συστήματα βρίσκονται εκτεθειμένα σε ανοιχτούς χώρους και μερικά από αυτά τοποθετούνται κοντά σε θερμά μηχανήματα. Γνωρίζοντας τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες θα βρίσκεται η συσκευή, πρέπει να προσδιορίσουμε το μέρος που θα τοποθετηθεί το σύστημα και με βάση αυτό να επιλεγεί η μέγιστη θερμοκρασία του συγκεκριμένου περιβάλλοντος. Για τον σχεδιασμό του συστήματος ψύξης, τέθηκε ως βασικό προαπαιτούμενο τα τρανζίστορ να μην ξεπερνούν τους 90°C. Σύμφωνα με τα φύλλα δεδομένων του IXTH30N50L2, παρατηρούμε ότι το τρανζίστορ έχει σαν μέγιστη θερμοκρασία τους 150°C. Η τιμή της θερμοκρασίας θα θέλαμε ιδανικά να μην ξεπερνάει τους 50°C, μια τιμή διπλάσια από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να μην υπάρξει βλάβη των εξαρτημάτων. Από το διάγραμμα 1.2 “Ρεύμα εκροής σε συνάρτηση με την θερμοκρασία θήκης”, παρατηρούμε ότι στην θερμοκρασία των 93,75°C μπορούμε να εξάγουμε μέγιστο ρεύμα κοντά στα 20A, αρκετά παραπάνω από τα 10A που χρειάζεται το κάθε MOSFET ώστε να λειτουργεί σωστά, όταν το φορτίο βρίσκεται στη μέγιστη ισχύ των 200W. Ως επακόλουθο των παραπάνω και σύμφωνα με την σχέση (1.4), θα πρέπει η θερμική αντίσταση να είναι μικρότερη των $\theta_{JA} = 0,65^\circ\text{C/W}$. Στην παραπάνω σχέση ως θερμοκρασία περιβάλλοντος ορίσαμε τους 25°C και ισχύ τα 100 W που θα έχουν τα δύο MOSFET ισχύος. Δεδομένου ότι η συσκευασία “TO-247” έχει θερμική αντίσταση $R_{\theta_{JC}} = 0,31^\circ\text{C/W}$, σύμφωνα με την σχέση (1.5) του κεφαλαίου 1.3.5, η ελάχιστη κατάλληλη $R_{\theta_{SA, \min}}$ θα ισούται με:

$$R_{\theta_{SA, \min}} = \theta_{JA} - \theta_{JC} = 0,65^\circ\text{C/W} - 0,31^\circ\text{C/W} = 0,34^\circ\text{C/W} \quad (3.4)$$

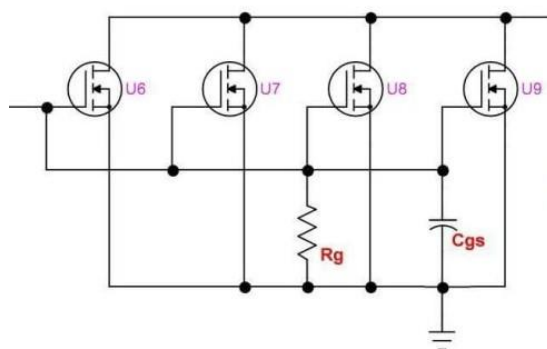
Εάν στον τύπο (3.4) προσθέσουμε και την θερμική αντίσταση θήκης - ψύχτρας, όπου σύμφωνα με τα δεδομένα είναι $R_{\theta_{CS}} = 0,25^\circ\text{C/W}$, έχουμε σαν τελική θερμοκρασία $R_{\theta_{SA}} = 0,09^\circ\text{C/W}$.²⁰

²⁰ Selecting the Right Heat Sink for your Design – Steps for Heat Sink Calculation and Selection. (2020). Ανακτήθηκε από <https://components101.com/articles/selecting-the-right-heat-sink-for-your-design-and-steps-for-heat-sink-calculation-and-selection>

Στην κατασκευή, λόγω της πολύ μικρής θερμικής αντίστασης $R_{\theta SA}$, επιλέχθηκε ψύχτρα με ενσωματωμένο ανεμιστήρα, ώστε να υπάρξει εξαναγκασμένη μεταφορά του αέρα με το χαμηλότερο δυνατό κόστος κατασκευής. Το RH04B-F220AC του κατασκευαστή RELPOL είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο, έχοντας ως θερμική αντίσταση στους 200 LFM, τους $0.15^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι στις οριακές τους καταστάσεις τα MOSFET θα μπορέσουν να διατηρηθούν κάτω από τους 96°C , όπου είναι και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο.²¹

3.1.2 Θέματα σχετικά με την παράλληλη σύνδεση των MOSFET

Λόγω της κατασκευαστικής δομής των τρανζίστορ, όπου υπάρχει ένα πολύ λεπτό διηλεκτρικό μονωτικό μεταξύ της πύλης και της πηγής, μπορεί να δημιουργηθεί στο σημείο της GS σημαντική χωρητικότητα. Η αντίσταση R_G έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφορτίζει τη πύλη, τη στιγμή που απενεργοποιούνται τα τρανζίστορ. Η αναφερόμενη αντίσταση διασφαλίζει ότι κατά τη σβέση του σήματος θα υπάρξει πιο γρήγορη αποφόρτιση των MOSFET και θα αποτραπεί μια πιθανή ζημιά του κυκλώματος. Η συνδεσμολογία της αντίστασης γίνεται μεταξύ της πύλης και της πηγής του κάθε MOSFET και η τιμή της αντίστασης κυμαίνεται μεταξύ των $1\text{K}\Omega$ και $10\text{K}\Omega$, ωστόσο και χαμηλότερες τιμές θα παρείχαν καλύτερα αποτελέσματα στην αποφόρτιση. Για τον σχεδιασμό του κυκλώματος επιλέχθηκε η αντίσταση ακριβείας $1/4\text{ W}$ με τιμή $10\text{ K}\Omega$.

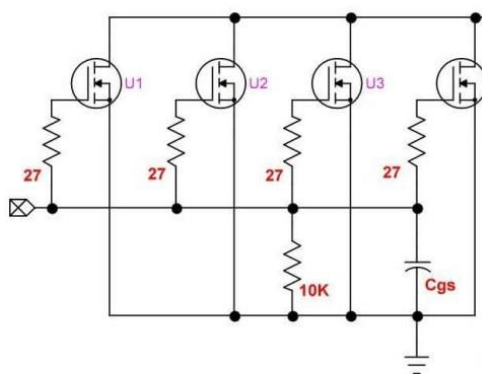


Εικόνα 3.1: Προσθήκη R_G αντίστασης στο κύκλωμα

ΠΗΓΗ: <https://www.bristolwatch.com/ele2/pm.htm>

²¹Relpol S.A. (2020). RH radiatory do przekaźników RSR52, RSR62. Ανακτήθηκε από <https://www.tme.eu/Document/629098d34a5e4ce9cf4f46f359a8a36e/RH04A-F220AC.PDF>.

Το πρόβλημα του κυκλώματος στην εικόνα 3.1 είναι ότι όταν τα MOSFET συνδέονται παράλληλα, η χωρητικότητα πολλαπλασιάζεται. Στην εικόνα 3.2 απεικονίζεται η επίλυση στο πρόβλημα που δημιουργείται με την χωρητικότητα της πύλης. Η χρήση χαμηλής τιμής αντίστασης ανάμεσα στην πύλη και τη τάση που οδηγεί τα MOSFET, επιτρέπει την εκθετική ή σταδιακή φόρτιση των εσωτερικών πυκνωτών μειώνοντας τις πιθανότητες αρνητικών αιχμών στους ακροδέκτες εκροής-πύλης. Για τις χαμηλές συχνότητες (50 Hz έως 1 kHz) η τιμή της βρίσκεται μεταξύ των 100 και 470 Ω, ενώ για συχνότητες πάνω από 1kHz μέχρι 10 kHz επιλέγεται η τιμή των 100 Ω. Για τις πολύ υψηλές συχνότητες (10 kHz και άνω) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50 Ω.²²



Εικόνα 3.2 : Κύκλωμα παράλληλης σύνδεσης MOSFET

ΠΗΓΗ: <https://www.bristolwatch.com/ele2/pm.htm>

Οι αντιστάσεις των 27Ω που παρουσιάζονται στη εικόνα 3.2, επιλέχθηκαν στην τιμή των 150Ω στην τελική κατασκευή.

3.2 Προδιαγραφές κατάλληλων τελεστικών ενισχυτών

Για την υλοποίηση της κατασκευής επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα LM358AN της εταιρείας Texas Instruments. Ο συγκεκριμένος τελεστικός μπορεί να διαχειριστεί μία τάση τροφοδοσίας έως και 32V, κατάλληλο εύρος τροφοδοσίας εφόσον χρειαζόμαστε μονοπολική τροφοδοσία των 12V. Περιλαμβάνει δύο μονάδες τελεστικού ενισχυτή, με αρκετά μεγάλο κέρδος ανοιχτού βρόχου που ανέρχεται στα 100dB. Μπορεί να εξάγει έως και 20 mA με ρυθμό 300 mV/μs, που είναι κατά πολύ μικρότερο από το μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό μεταβολής της τάσης στην πύλη του

²² Loflin, L. (2018). Connecting MOSFETs in Parallel. Ανακτήθηκε από <https://www.bristolwatch.com/ele2/pm.htm>.

επιλεγμένου MOSFET ισχύος (=35 V/ns).²³ Η χρησιμοποίηση του τελεστικού με αυτό τον τρόπο, ώστε η V_{GS} του MOSFET να ελέγχεται και να ανατροφοδοτείται στον τελεστικό, μας είναι αναγκαία ώστε να ελέγχουμε εκτός της τάσης στα άκρα των αντιστάσεων του φορτίου και την ελάχιστη $V_{GS(th)}$ των MOSFET. Σαν μέγιστη τάση κατωφλίου $V_{GS(th)}$ του IXTH30N50L2, από τα φύλλα δεδομένων έχουμε τα 4.5V, αρκετά μικρότερη τιμή από τα 12V που μπορεί να εξάγει ο τελεστικός (περίπου στα 11V εάν τον τροφοδοτήσουμε με 12V).²⁴

3.3 Προδιαγραφές κατάλληλης αντίστασης ισχύος

Προκειμένου να υλοποιηθεί η ανάδραση για τα κυκλώματα ελέγχου σταθερής αντίστασης και σταθερού ρεύματος, ώστε να οδηγηθούν σε αναλογική είσοδο του μικροελεγκτή Atmega328, χρειάζεται μια αντίσταση ισχύος που θα προσδιορίζει το ρεύμα εισόδου του φορτίου. Το μέγιστο ρεύμα που θα χρησιμοποιηθεί στο κύκλωμα ορίστηκε στα 20A. Λόγω του ότι η τάση αναφοράς, η οποία θα ρυθμίζεται από το ποτενσιόμετρο, κυμαίνεται από 0V έως 5V και σύμφωνα με το τύπο:

$$R \text{ ισχύος} = \frac{V_{\text{αναφοράς}}}{I_{\text{φορτίου}}} \quad (3.5)$$

Η R ισχύος θα ισούται με 0.25 Ω.

$$\text{Από το τύπο :} \quad P = I^2 \times R \quad (3.6)$$

βρίσκουμε την μέγιστη ισχύ των αντιστάσεων. Από (3.5) και (3.6), η μέγιστη ισχύς της μετρητικής αντίστασης υπολογίζεται ως $P_R = I^2 \times R = 20^2 \times 0.25 = 100 \text{ W}$. Η οικονομικότερη λύση είναι να διαλέξουμε τέσσερις αντιστάσεις των 1Ω /30W σε παράλληλη σύνδεση.²⁵

3.4 Προδιαγραφές αντιστάσεων του διαιρέτη τάσης

Η τάση που θα παραχθεί από τις αντιστάσεις, διαδραματίζει αρκετά σημαντικό ρόλο τόσο για την CC όσο και για την CR λειτουργία. Η τάση αναφοράς και η τάση που βρίσκεται στα άκρα της R1 αντίστασης υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

²³ Παναγιώτου, Α. (2016). Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικού φορτίου. (Διπλωματική εργασία). Ανακτήθηκε από Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών [https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10416/3/Panagiotou\(ele\).pdf](https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10416/3/Panagiotou(ele).pdf).

²⁴ Texas Instruments Incorporated. (2022). Industry-Standard Dual Operational Amplifiers. Ανακτήθηκε από https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1651580963902&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.com%252F.

²⁵ Transfer Multisort Elektronik. CRL30W-1R SR PASSIVES. Ανακτήθηκε από <https://www.tme.eu/en/details/crl30w-1r/30w-resistors/sr-passives/>.

$$V_{REF} = V_{LOAD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.7)$$

$$V_1 = V_{LOAD} - V_{REF} \quad (3.8)$$

$$V_1 = V_{LOAD} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.9)$$

Από τις σχέσεις (3.7), (3.8) και (3.9), λόγω του ότι επιλέχθηκε το ποτενσιόμετρο με αντίσταση 10 KΩ και η V_{REF} ισούται με 5V έχουμε: $R_1 = \frac{(V_{LOAD} - V_{REF}) \times R_2}{V_{LOAD} - V_1} = \frac{195 \times 10.000}{5} = 390 \text{ K}\Omega$.

Το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει το διαιρέτη τάσης θα ισούται με: $I_{MAX} = \frac{V_{LOAD}}{(R_1 + R_2)} = \frac{200V}{400K\Omega} = 0,5 \text{ mA} = 500 \mu\text{A}$.²⁶

3.5 Επιλογή μετατροπέα σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP4921 είναι ένας μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα μεγέθους 12-bit. Σύμφωνα με τον τύπο εύρεσης τιμών από bit, μπορούμε να πετύχουμε $2^{12} = 4096$ τιμές. Αυτό σημαίνει ότι ο DAC θα μπορούσε να παράγει 4096 διαφορετικές εξόδους. Χρησιμοποιώντας αυτήν την τιμή, μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση ενός αναλογικού βήματος. Για τον υπολογισμό των βημάτων απαιτείται η τάση αναφοράς. Εφόσον η τάση αναφοράς για τη συσκευή είναι 5V, η τάση βήματος είναι $5/4095$ (4096-1 επειδή το αρχικό σημείο του ψηφιακού συστήματος αρίθμησης δεν είναι ένα αλλά μηδέν), έχουμε ως αποτέλεσμα 0,0012210mV. Έτσι, η αλλαγή ενός bit θα αλλάξει την αναλογική έξοδο με 0,0012210.²⁷ Ο DAC MCP4921 επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή μέσω του πρωτοκόλλου SPI. Για επικοινωνία SPI, μια συσκευή πρέπει να είναι η main, η οποία θα υποβάλλει δεδομένα ή εντολές στην συσκευή που είναι συνδεδεμένη ως slave. Στο σύστημα επικοινωνίας SPI, πολλαπλές εξαρτημένες συσκευές μπορούν να συνδεθούν με την κύρια συσκευή.²⁸

²⁶ Παναγιώτου, Α. (2016). Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικού φορτίου. (Διπλωματική εργασία). Ανακτήθηκε από Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών [https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10416/3/Panagioutou\(ele\).pdf](https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10416/3/Panagioutou(ele).pdf).

²⁷ Gupta, S. (2019). DAC MCP4921 Interfacing with PIC Microcontroller PIC16F877A. Ανακτήθηκε από <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/pic16f877a-mcp4921-dac-interfacing-tutorial>.

²⁸ Microchip Technology Inc. (2004). MCP4921/4922: 12-Bit DAC with SPI™ Interface. Ανακτήθηκε από <https://gr.mouser.com/datasheet/2/268/21897a-70809.pdf>.

3.6 Επιλογή σταθεροποιητή τάσης

Ο σταθεροποιητής τάσης χρησιμοποιείται στην κατασκευή για τον υποβιβασμό της τάσης των 12V σε αυτή των 5V. Ο σταθεροποιητής L7805C έχει την ικανότητα παροχής ρεύματος έως 1,5 A με dropout voltage στα 2V. Για τον λόγο αυτό, ως V_{in} (η τροφοδοσία θα πρέπει να είναι σε DC) θα πρέπει να εφαρμόσουμε στα άκρα του regulator μια τάση μεγαλύτερη των $5 + 2 = 7$ V (τουλάχιστον). Εάν λάβουμε υπόψη ότι αυτή η τάση μας παρέχεται από το τροφοδοτικό των 12V/2A, τότε υπάρχουν όλα τα προαπαιτούμενα για την σωστή λειτουργία του.²⁹

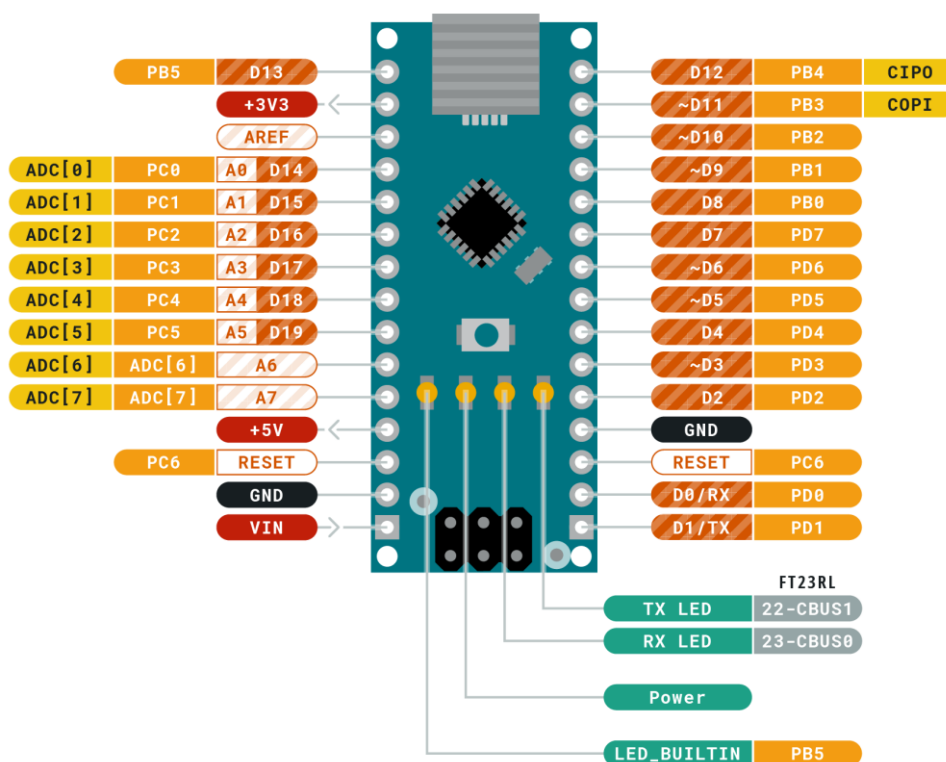
3.7 Επιλογή τροφοδοσίας εξαρτημάτων συσκευής

Η τροφοδοσία των τελεστικών όπως και του ολοκληρωμένου συστήματος του μικροελεγκτή ανέρχεται στα 12 VDC. Η συγκεκριμένη τάση επιλέχθηκε με δεδομένο ότι η τάση αυτή αρκεί και για τα δύο εξαρτήματα, αλλά και με την προϋπόθεση ότι είναι κατά πολύ υψηλότερη της $V_{GS(th)}$ των MOSFET. Για τον λόγο αυτό στην κατασκευή χρησιμοποιήθηκε εξωτερικό τροφοδοτικό 12 V/2A. Η τροφοδοσία του ανεμιστήρα ανέρχεται στην τιμή των 230VAC. Με δεδομένο ότι η αγορά της ψύχτρας ισχύος έγινε με ενσωματωμένο ανεμιστήρα και για λόγους οικονομίας δεν έγινε η αλλαγή του, αν και θα μπορούσαμε να επιλέξουμε έναν ανεμιστήρα 12VDC, ώστε να τροφοδοτείται από το τροφοδοτικό των 12V, χωρίς να υπάρχει διπλή τροφοδοσία.

²⁹Texas Instruments Incorporated. (2020). LM78L 100-mA Fixed Output Linear Regulator. Ανακτήθηκε από <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm78l.pdf>.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ ARDUINO

Το Arduino nano είναι μια ολοκληρωμένη πλακέτα που βασίζεται στο μικροελεγκτή ATmega328. Διαθέτει 14 ψηφιακές ακίδες εισόδου/εξόδου (από τις οποίες οι 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι PWM), 8 αναλογικές εισόδους, υποδοχή για σύνδεση με Mini-B USB και κουμπί επαναφοράς. Με την χρήση του συγκεκριμένου Arduino μπορούμε να επικοινωνήσουμε μέσω I2C, SPI και UART, όπου στην περίπτωση μας τα pins A4 και A5 είναι σημαντικά για την λειτουργία της LCD οθόνης. Η τροφοδοσία εισόδου του κυμαίνεται από 7 έως 12V, ενώ η μέγιστη τάση και το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να διαχειριστούν τα pins είναι 5V και 20mA αντίστοιχα.³⁰



Εικόνα 4.1 : Λειτουργία των ακροδεκτών του μικροελεγκτή

ΠΗΓΗ: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>

Ο μικροελεγκτής Arduino nano στην κατασκευή του DC ηλεκτρονικού φορτίου χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των μετρήσεων τάσης, ρεύματος και ισχύς, την ένδειξη εσφαλμένης κατάστασης σε περίπτωση που η ισχύς του φορτίου ξεπεράσει το

³⁰Arduino Nano. technical specs. Ανακτήθηκε από <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>.

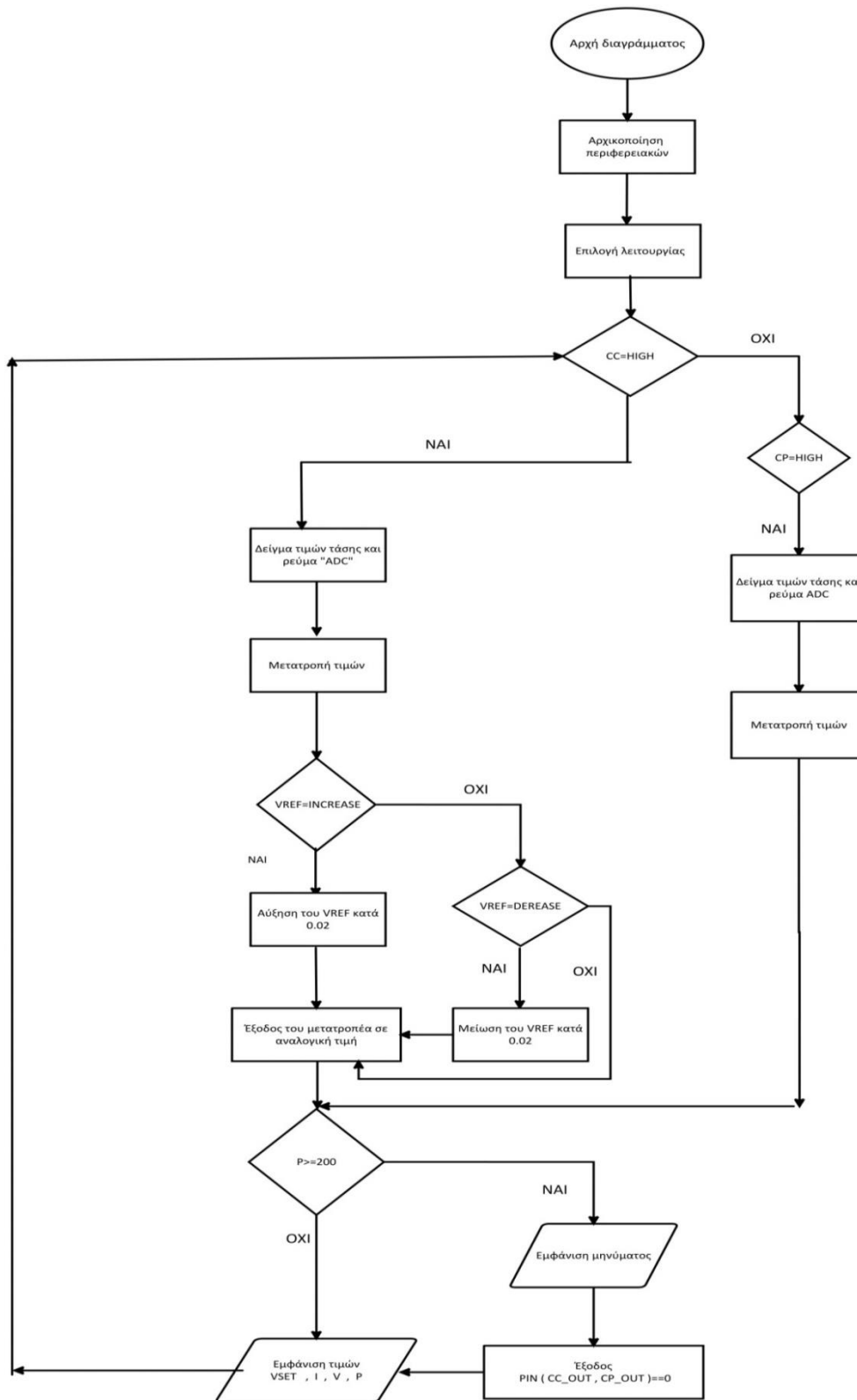
όριο της απαιτούμενης τιμής του και την απεικόνιση του ρεύματος I_{SET} . Ο μικροελεγκτής ακόμα ελέγχει την ορθή λειτουργία των λειτουργιών CC και CR καθώς και την εναλλαγή από CC σε CR.

4.1 Δομή λογισμικού

Για τον προγραμματισμό της ολοκληρωμένης πλακέτας χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή του Arduino IDE. Η γλώσσα της εφαρμογής βασίζεται σε μια διαφοροποιημένη γλώσσα C και C++, που έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να κάνει τον μικροελεγκτή όσο το δυνατόν πιο εύχρηστο.³¹

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής, για την καλύτερη ανάλυση της δομής του λογισμικού που αναπτύχθηκε, απεικονίζεται η σειριακή μορφή του προγράμματος. Το πρώτο μέρος του διαγράμματος αφορά την αρχικοποίηση των περιφερειακών εισόδου-εξόδου και των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Το δεύτερο μέρος αποτελείται από ένα σύνολο εντολών που ελέγχουν την κατάλληλη λειτουργία που θα επιτελεί το φορτίο εκείνη την συγκεκριμένη στιγμή (CC ή CR). Αρχικά ελέγχεται με λογική συνθήκη η επιλογή που θα χρησιμοποιήσουμε, μετέπειτα γίνεται η δειγματοληψία τάσης και ρεύματος σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 0 - 1024 (10 bit ADC) από τις αναλογικές εισόδους A1 και A0 αντίστοιχα και τέλος γίνεται ο μετασχηματισμός τους σε πραγματικές τιμές τάσης και ρεύματος ώστε να είναι κατανοητές προς τον χρήστη. Για την υλοποίηση της λειτουργίας σταθερού ρεύματος χρησιμοποιείται μια επιπλέον λογική συνθήκη, η οποία ελέγχει την τάση εξόδου του ψηφιακού ποτενσιόμετρου DAC. Η συνθήκη αυτή ανιχνεύει τις αλλαγές που γίνονται στις ψηφιακές εισόδους D2, D3 και ανάλογα βγάζει αυξημένη ή μειωμένη έξοδο κατά 0.02V προς την εισοδο του DAC. Η επεξεργασία του ψηφιακού μετατροπέα αποτελεί υποπρογράμμα που καλείται από το κύριο πρόγραμμα. Μετά την επεξεργασία των τιμών και εφόσον η ισχύς είναι κατώτερη των 200W εμφανίζονται στην οθόνη LCD τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Τέλος, υπάρχει συνθήκη που όταν το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος (ισχύς) ξεπεράσει το όριο που θέσαμε εμφανίζεται το αντίστοιχο μήνυμα.

³¹ What Language Is an Arduino Programmed In?. (2019). Ανακτήθηκε από <https://coolcomponents.co.uk/blogs/news/what-language-is-an-arduino-programmed-in>.



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα ροής λογισμικού του κυκλώματος

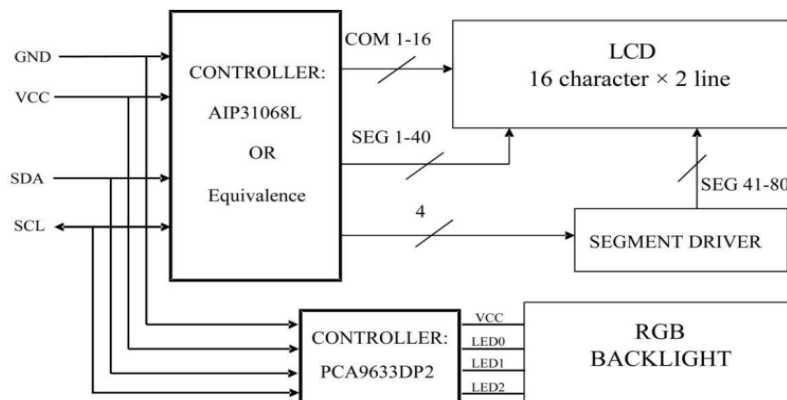
4.2 Χαρακτηριστικά και λειτουργία οθόνης



Εικόνα 4.2: Εξωτερική όψη οθόνης

ΠΗΓΗ: https://wiki.dfrobot.com/Gravity_I2C_16x2_Arduino_LCD_with_RGB_Font_Display_SKU_DFR0554

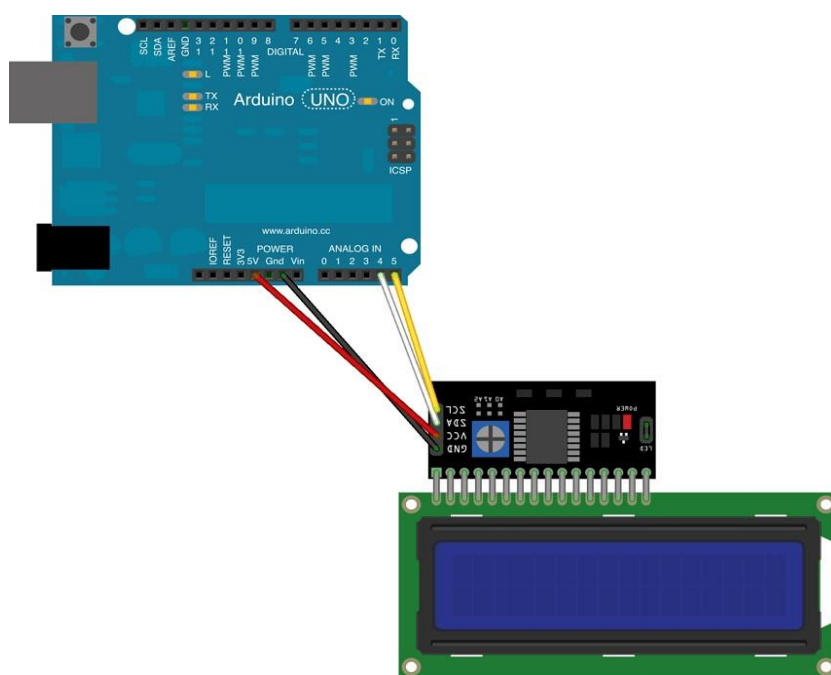
Η απεικόνιση των τιμών ρεύματος, τάσης και ισχύς πραγματοποιήθηκε με την χρήση της LCD οθόνης Gravity I2C 16x2, η οποία διαθέτει οπίσθιο φωτισμό RGB. Η LCD οθόνη χρησιμοποιεί διεπαφή επικοινωνίας I2C. Αυτό σημαίνει ότι η σύνδεση της οθόνης με τον μικροελεγκτή θα γίνει μόνο με τέσσερα pin, αντί των οχτώ που είναι για τις απλές οθόνες. Το εύρος τάσης λειτουργίας της είναι από 3,3V έως 5V, το ρεύμα που χρειάζεται είναι μικρότερο των 60 mA και το εύρος θερμοκρασίας που μπορεί να λειτουργεί από -20°C έως 70°C. Οι διαστάσεις της συγκεκριμένης οθόνης είναι 87,0 x 32,0 x 13,0 mm / 3,42 x 1,26 x 0,51 ίντσες.



Διάγραμμα 4.2 : Εσωτερική μορφή της LCD οθόνης

ΠΗΓΗ: <https://www.mouser.com/ProductDetail/DFRobot/DFR0464?qs=0lQeLiL1qybNSQV2fLbE9g%3D%3D>

Το μπλοκ διάγραμμα της οθόνης LCD απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα. Ο controller AIP31068L δέχεται ως εισόδους την τάση τροφοδοσίας $VCC = 5V$, την γείωση GND, τα σήματα SDA - SCL και αποδίδει τρεις εξόδους, δύο προς την κεντρική οθόνη και μια προς τον driver. Το I2C χρησιμοποιεί μόνο δύο αμφίδρομες γραμμές ανοιχτού συλλέκτη ή ανοιχτής εκροής, τη γραμμή δεδομένων σειράς (SDA) και τη γραμμή σειριακού ρολογιού (SCL). Με το controller PCA9633DP2 μπορούμε επίσης να αλλάξουμε το χρώμα της οθόνης (RGB). Η οθόνη έχει δυνατότητα απεικόνισης 16 χαρακτήρων, σε κάθε μια από τις δύο γραμμές.³²



Εικόνα 4.3: Σύνδεση μικροελεγκτή με την οθόνη

ΠΗΓΗ: <https://forum.arduino.cc/t/arduino-uno-r3-mega-2560-and-lcd-by-i2c-16x2-and-20x4-on-pcf8574t/201952>

Η σύνδεση της οθόνης με την πλακέτα του μικροελεγκτή παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3. Όπως παρατηρούμε χρειάζονται μόνο τα pin της τροφοδοσίας, γείωσης, SDA και SCL τα οποία είναι τα 5V, GND, η αναλογική είσοδος A4 και η αναλογική είσοδος-έξοδος A5 αντίστοιχα ώστε να ενεργοποιηθεί η οθόνη.

³²DFRobot Electronics. Specification. Ανακτήθηκε από https://wiki.dfrobot.com/Gravity_I2C_16x2_Arduino_LCD_with_RGB_Font_Display_SKU_DFR0554.

4.3 Χειρισμός συσκευής μέσω του προγράμματος

Για την κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος και των αντίστοιχων μηνυμάτων που εμφανίζονται στην οθόνη, στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί ο χειρισμός της DC συσκευής. Η προσομοίωση της LCD οθόνης έγινε μέσω της ιστοσελίδας wokwi.com. Αρχικά με το που εφαρμόσουμε μια διαφορά δυναμικού στα άκρα της συσκευής εμφανίζεται το μήνυμα “DC ELECTRONIC LOAD” και ενεργοποιείται ο controller.



Εικόνα 4.4: Αρχικό μήνυμα συσκευής

Στην συνέχεια εμφανίζεται το μήνυμα “SELECT MODE“. Με την εμφάνιση του αντίστοιχου μηνύματος μπορούμε να επιλέξουμε την λειτουργία που επιθυμούμε.



Εικόνα 4.5: Εμφάνιση μηνύματος “SELECT MODE”

Εάν δεν ενεργοποιηθεί ο διακόπτης της λειτουργίας “CR MODE”, ενεργοποιείται αυτόματα η επιλογή CC και εμφανίζεται το μήνυμα “CC MODE” στην οθόνη. Μετέπειτα, παρουσιάζεται στην οθόνη ο μαθηματικός τύπος που θα χρησιμοποιηθεί ώστε ο χρήστης να κατανοήσει, πριν το πάτημα του push button, την αλλαγή που επιφέρει η V_{REF} στο ρεύμα επιλογής μας.



Εικόνα 4.6: Μαθηματικός τύπος εύρεσης I_{SET}

Εφόσον ο διακόπτης CR πατηθεί εμφανίζεται το μήνυμα “WAIT FOR 5 SEC.” και με το πέρας 5 δευτερολέπτων το μήνυμα “CR MODE”.



Εικόνα 4.7: Εμφάνιση μηνύματος “CR MODE”

Με το πάτημα του κουμπιού “CR MODE”. Υπάρχει μια καθυστέρηση πέντε δευτερολέπτων ώστε να μην συμπέσουν μαζί οι δύο λειτουργίες. Με το πέρας του χρονικού διαστήματος, εμφανίζεται στην οθόνη μήνυμα που μας ειδοποιεί ότι δεν λειτουργεί πλέον το I_{SET} όπως και τα button αύξησης και μείωσης. Η αλλαγή πλέον πραγματοποιείται μόνο μέσω του αναλογικού ποτενσιομέτρου.



Εικόνα 4.8: Ειδοποίηση απενεργοποίησης του I_{SET}



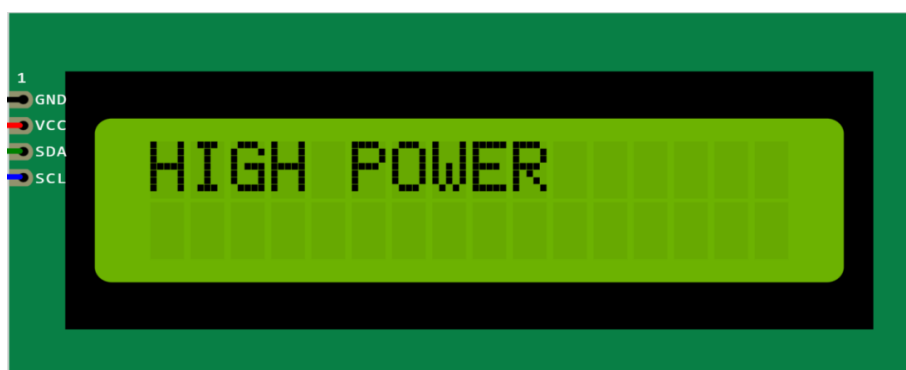
Εικόνα 4.9: Αποτελέσματα των τιμών σταθερού ρεύματος

Τέλος, στην οθόνη απεικονίζονται οι τιμές ισχύς, τάσης, ρεύματος και το SET (ενεργοποιείται μόνο στην “CC MODE”). Στην περίπτωση που δεν έχουμε επιλέξει κάποια κατάσταση ή υπάρχει πρόβλημα του κυκλώματος, οι τιμές είναι μηδενικές. Στην περίπτωση του “CR MODE” η τιμή “S” είναι πάντα μηδενική.



Εικόνα 4.10: Αποτελέσματα των τιμών σταθερής αντίστασης

Με την επιλογή φορτίου προς έλεγχο μεγαλύτερο των 200W ισχύς, εμφανίζεται το μήνυμα “HIGH POWER” και απενεργοποιούνται όλες οι λειτουργίες.



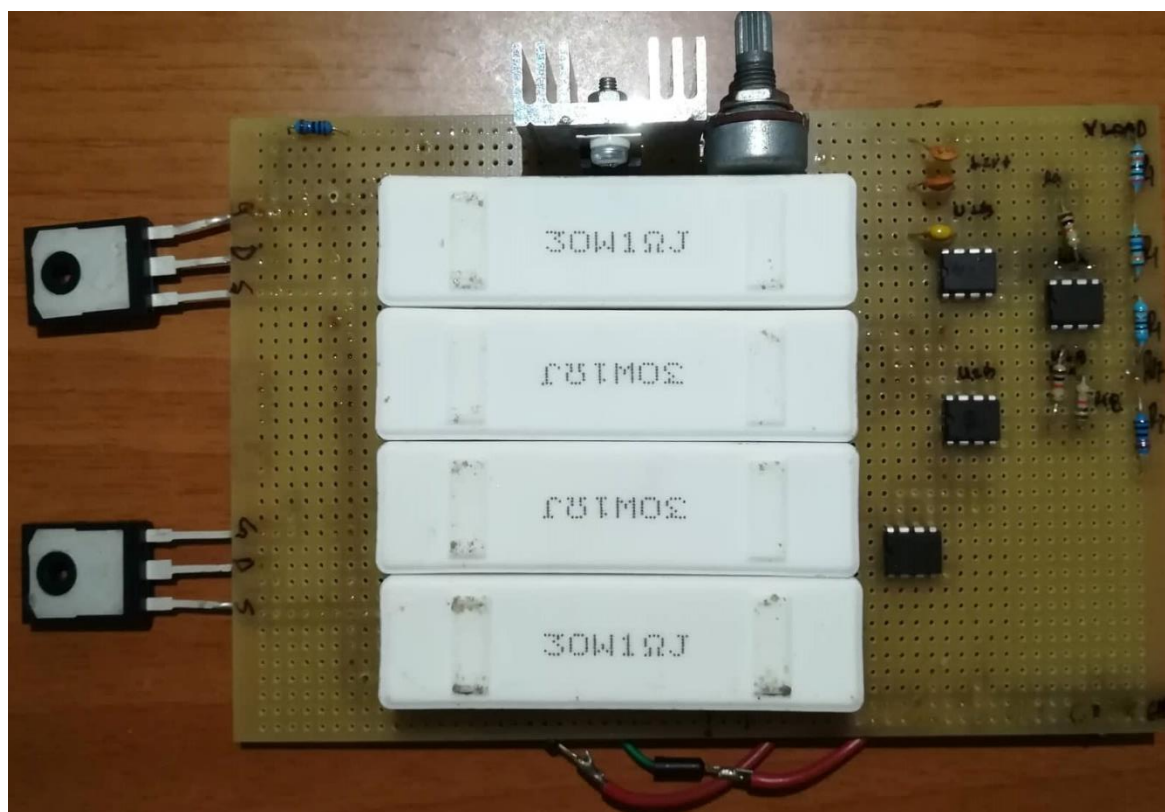
Εικόνα 4.11: Εσφαλμένη κατάσταση DC ΗΦ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του κυκλώματος, αρχικά με την χρήση διάτρητης πλακέτας, μετέπειτα με PCB και οι μετρήσεις ορθής λειτουργίας του φορτίου που βρίσκεται υπό δοκιμή, ώστε να υπάρξουν ακριβή αποτελέσματα.

5.1 Υλοποίηση κυκλωμάτων με χρήση διάτρητης πλακέτας

Η κατασκευή της διάτρητης πλακέτας πραγματοποιήθηκε ως αρχικό στάδιο, ώστε να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία των κυκλωμάτων πριν την κατασκευή του PCB.



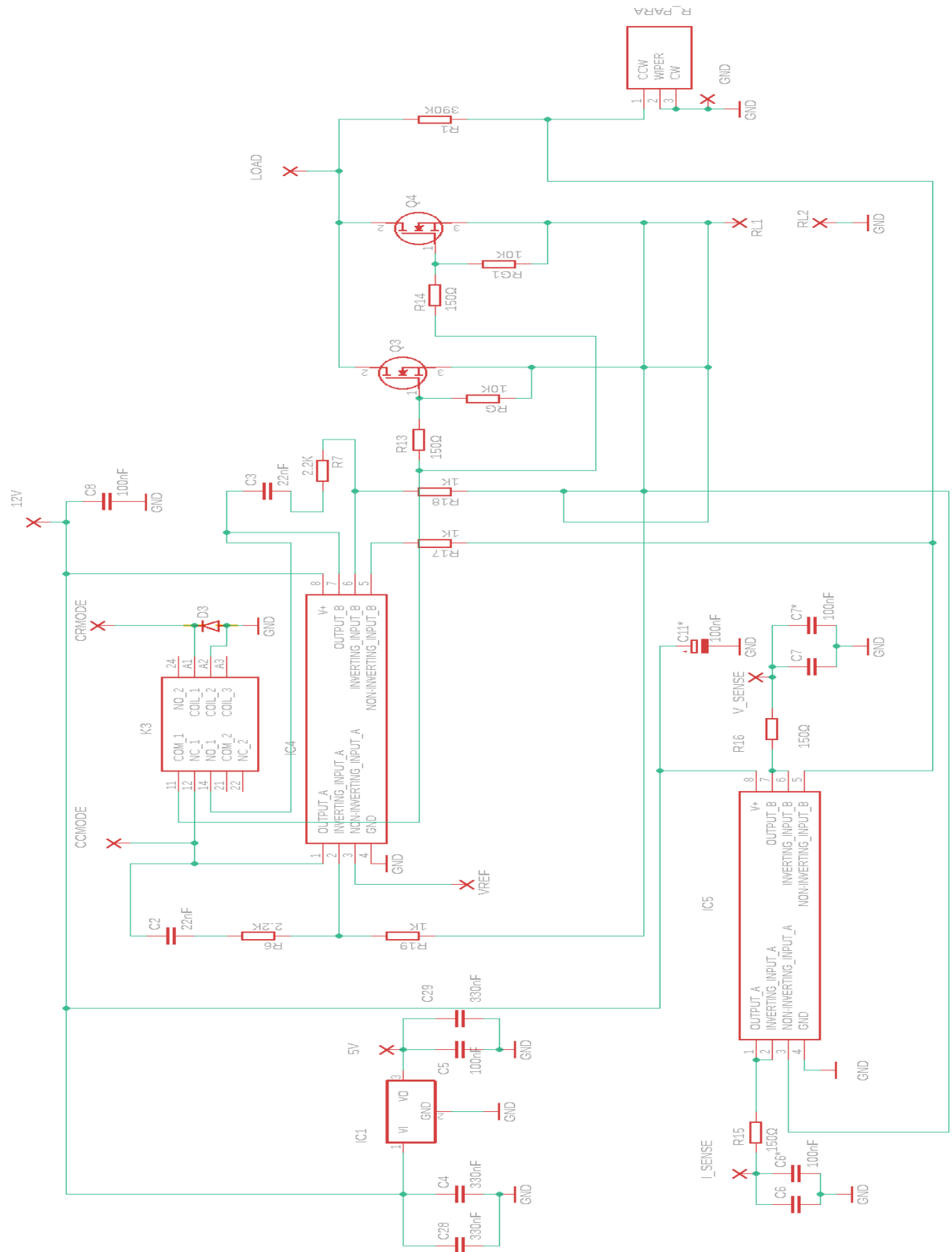
Εικόνα 5.1: Κατασκευή αρχικής πλακέτας

Στην εικόνα 5.1 απεικονίζονται από αριστερά προς τα δεξιά τα “n” τύπου MOSFET, οι αντιστάσεις ισχύος, ο σταθεροποιητής μαζί με το ποτενσιόμετρο, τα ολοκληρωμένα με τους πυκνωτές και τις αντιστάσεις που τα απαρτίζουν. Στην μορφή που είναι κατασκευασμένο απουσιάζει το ψηφιακό ποτενσιόμετρο και κατεπέκταση τα buttons που το απαρτίζουν.

5.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση κυκλώματος με χρήση PCB

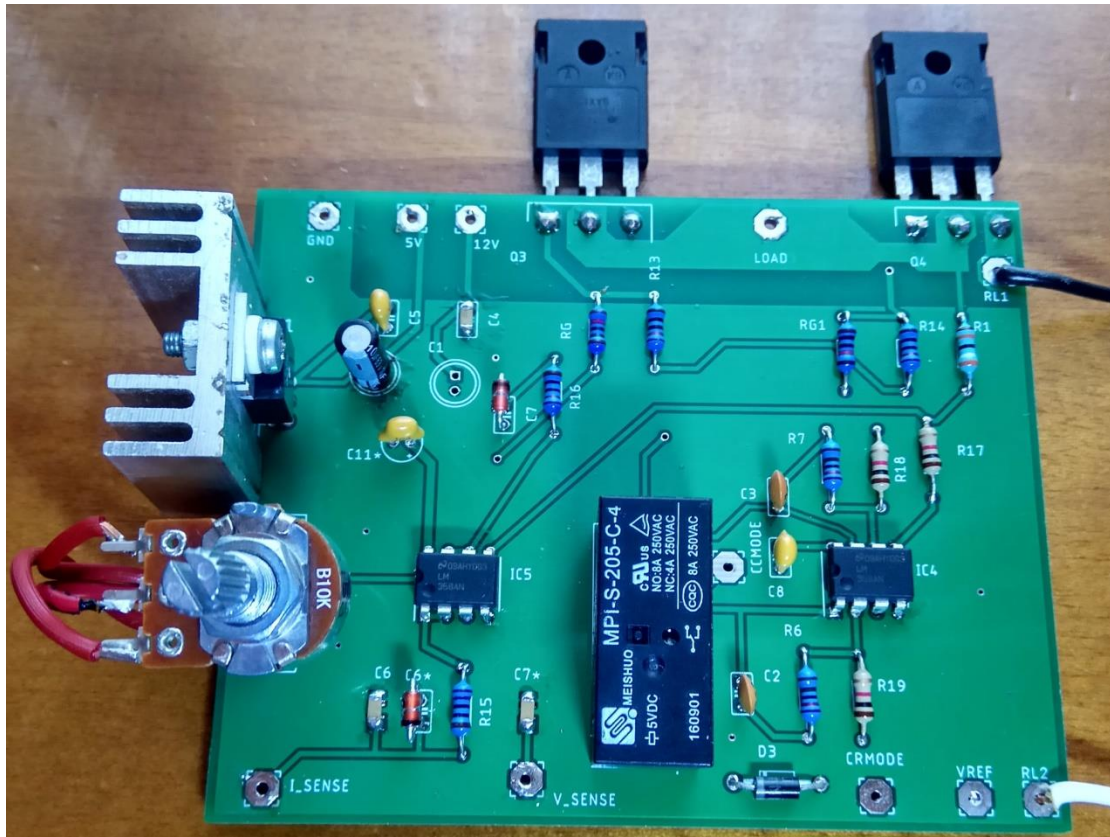
Η υλοποίηση της κατασκευής μέσω PCB χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα βρίσκεται το κύκλωμα ισχύος, ενώ στο δεύτερο το κύκλωμα ελέγχου και απεικόνισης των αποτελεσμάτων. Ο σχεδιασμός των πλακετών έγινε με την χρήση του προγράμματος EAGLE (έκδοσης 9.6.2). Το σχηματικό κύκλωμα της πλακέτας ισχύος παρουσιάζεται στην εικόνα 5.1. Ο T.E. IC4 επιτελεί τις λειτουργίες CC και CR, ενώ ο IC5 χρησιμοποιείται στο ΗΦ για την παρακολούθηση και την απεικόνιση των τιμών του ρεύματος και της τάσης του φορτίου στην οθόνη. Ο IC1 σταθεροποιητής 78L05 τροφοδοτεί την πλακέτα ελέγχου και το ρελέ K3 (για την εναλλαγή λειτουργιών). Τα MOSFET ισχύος, όπως και όλα τα άλλα παρελκόμενα των βασικών εξαρτημάτων, αναλύονται λεπτομερώς στις προηγούμενες ενότητες. Στην περίπτωση της αντίστασης ισχύος R_{LOAD} , λόγω του ότι δεν βρέθηκε αντίσταση των απαιτήσεων που αναζητούσαμε (τιμή R/W), αλλά και λόγω του ότι οι υπόλοιπες αντιστάσεις ήταν πιο ακριβές, επιλέχθηκε η παράλληλη σύνδεση τεσσάρων αντιστάσεων σε εξωτερική διάτρητη πλακέτα που θα συνδέεται στα pad RL1 και RL2 (όπως φαίνεται στο σχηματικό). Το κύκλωμα της πλακέτας ελέγχου παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2. Το Arduino nano τροφοδοτείται με 12V, μέσω του pin V_{IN} , και χρησιμοποιεί επτά αναλογικές και ψηφιακές εισόδους. Η αναλογική είσοδος A0 και A1 δέχονται ως σήμα εισόδου τα I_{SENCE} και V_{SENCE} τα οποία μετατρέπονται μέσω του μικροελεγκτή από 0V έως 5V στις επιθυμητές τιμές. Οι αναλογικές εισοδοί A4 και A5 συμβάλουν στην σωστή μεταφορά δεδομένων της I^2C οθόνης και τέλος οι A6 και A7 δέχονται ως σήμα τις αλλαγές στο πάτημα των button S1 και S2. Τα S1 και S2 button, χρησιμοποιούνται για την αύξηση και μείωση αντίστοιχα της V_{REF} του T.E στην CC λειτουργία κατά 0.02V και τροφοδοτούνται από το pin των 5 V. Η ψηφιακή είσοδος D4 και η D7 χρησιμοποιούνται στην επιλογή λειτουργίας σταθερούς ρεύματος ή σταθερής αντίστασης. Με το κλείσιμο του διακόπτη SW, ο μικροελεγκτής αντιλαμβάνεται στον ακροδέκτη D7 τη διαφορετική κατάσταση και γίνεται η αναλλαγή από CC σε CR “MODE” και το αντίθετο. Οι δίοδοι Zener (Z1 και Z2) προστατεύουν τις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή από υπερτάσεις κατά το κλείσιμο του SW διακόπτη, περιορίζοντας την τάση στα 5V. Το ολοκληρωμένο IC3 ψηφιακό ποτενσιόμετρο δέχεται τα δεδομένα από την δεσμευμένη ψηφιακή πόρτα D10 και εξάγει από τον ακροδέκτη A8 την επιθυμητή τάση που θέλουμε. Για την αποφυγή λαθών υπάρχει ανατροφοδότηση του ολοκληρωμένου MCP4921 με το Arduino, ώστε να υπάρξει η ακριβής απεικόνιση της τιμής που θέσαμε χωρίς

αποκλίσεις. Τέλος, η πλακέτα ελέγχου διαθέτει το J1, τοπογραφικό ποτενσιόμετρο, στην περίπτωση που θέλουμε να ελέγξουμε αναλογικά την τάση εισόδου V_{REF} αντί για ψηφιακά.

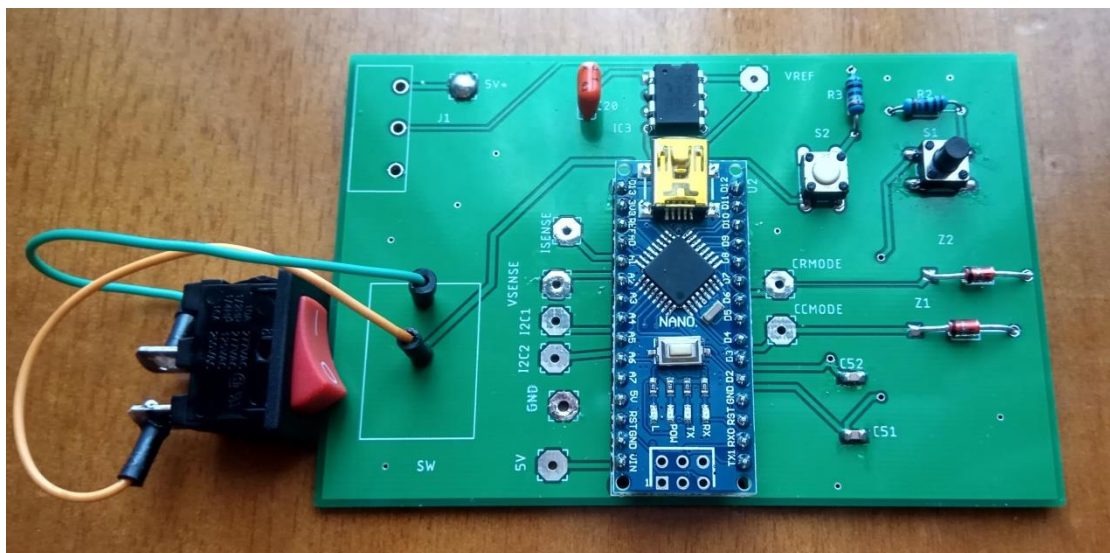


Σχήμα 5.1: Κύκλωμα PCB ισχύος

Τα δύο σχηματικά έχουν κάποια κοινά σημεία (π.χ. το ISENSE), τα οποία ενώνονται με καλώδια, έτσι ώστε να έχουμε την σωστή τροφοδοσία - γείωση των πλακετών αλλά και τον σωστό έλεγχο του μικροελεγκτή.



Εικόνα 5.2 : Αρχική μορφή πλακέτας ισχύος



Εικόνα 5.3 : Αρχική μορφή πλακέτας ελέγχου

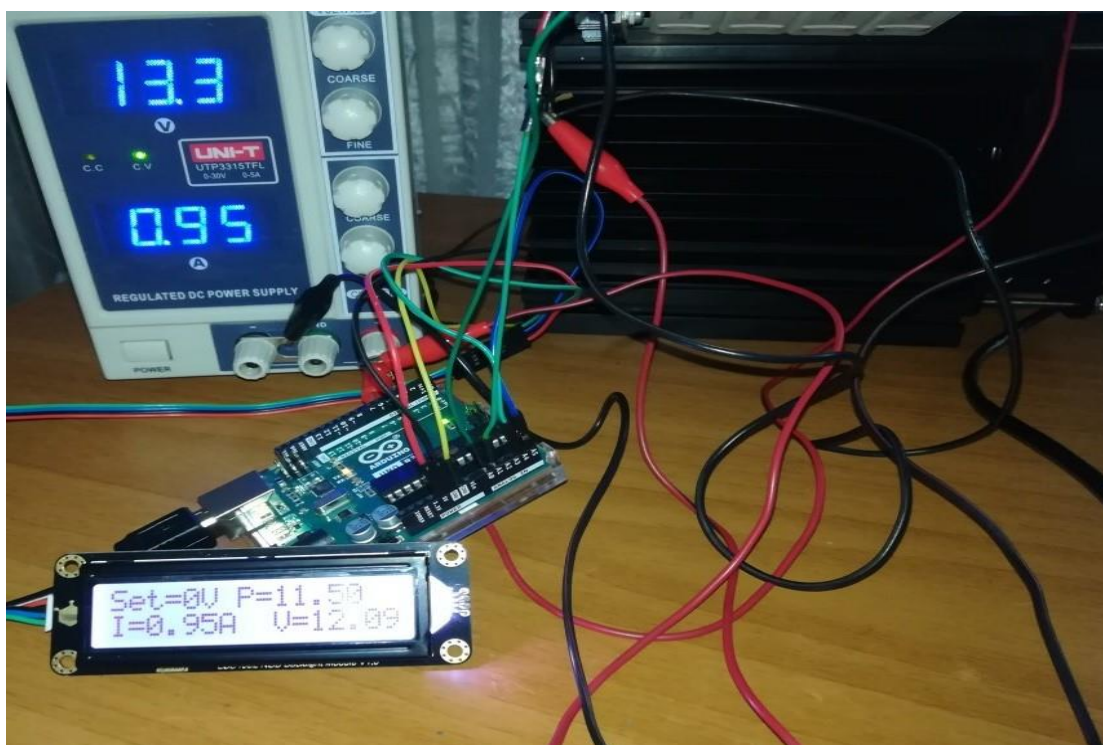
Στην εικόνα 5.2 και στην εικόνα 5.3 παρουσιάζονται οι μορφές των PCB ισχύος και ελέγχου αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι στα rad “ R_{L1} ” και “ R_{L2} ” συνδέεται η παράλληλη σύνδεση των αντιστάσεων $1\Omega / 30W$ της εικόνας 5.1.

5.3 Μετρήσεις ορθής λειτουργίας κυκλώματος

Με στόχο την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του DC ΗΦ, χρησιμοποιήθηκε ως δοκιμαστικό φορτίο το τροφοδοτικό UTP3315TFL της εταιρίας UNI-T. Το συγκεκριμένο τροφοδοτικό έχει ως μέγιστη τάση εξόδου 30V και μέγιστο ρεύμα 5A. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εξάγει, σύμφωνα με τον τύπο $P=V \times I$, είναι 150W, που είναι αποδεκτή τιμή για τις προδιαγραφές του ΗΦ. Με τον ίδιο τρόπο που εργαστήκαμε στις προηγούμενες υποενότητες, έτσι και σε αυτήν την επιμέρους ενότητα, θα αναλυθούν τα αποτελέσματα εξόδου, αρχικά με την χρήση της διάτρητης πλακέτας και μετέπειτα του ολοκληρωμένου PCB.

5.3.1 Μετρήσεις με την χρήση διάτρητης πλακέτας

Οι αρχικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση διάτρητης πλακέτας. Το μέγιστο ρεύμα και η μέγιστη τάση περιορίστηκαν στα 30V / 2A αντίστοιχα. Από τις μετρήσεις που έγιναν, διαπιστώθηκε μια μικρή απόκλιση των τιμών. Η απόκλιση των τιμών οφείλεται στο input offset των τελεστικών, που συγκεκριμένα για τον LM358AN δεν είναι μηδενικής τιμής (κυμαίνεται από μερικά μV έως 3mV).

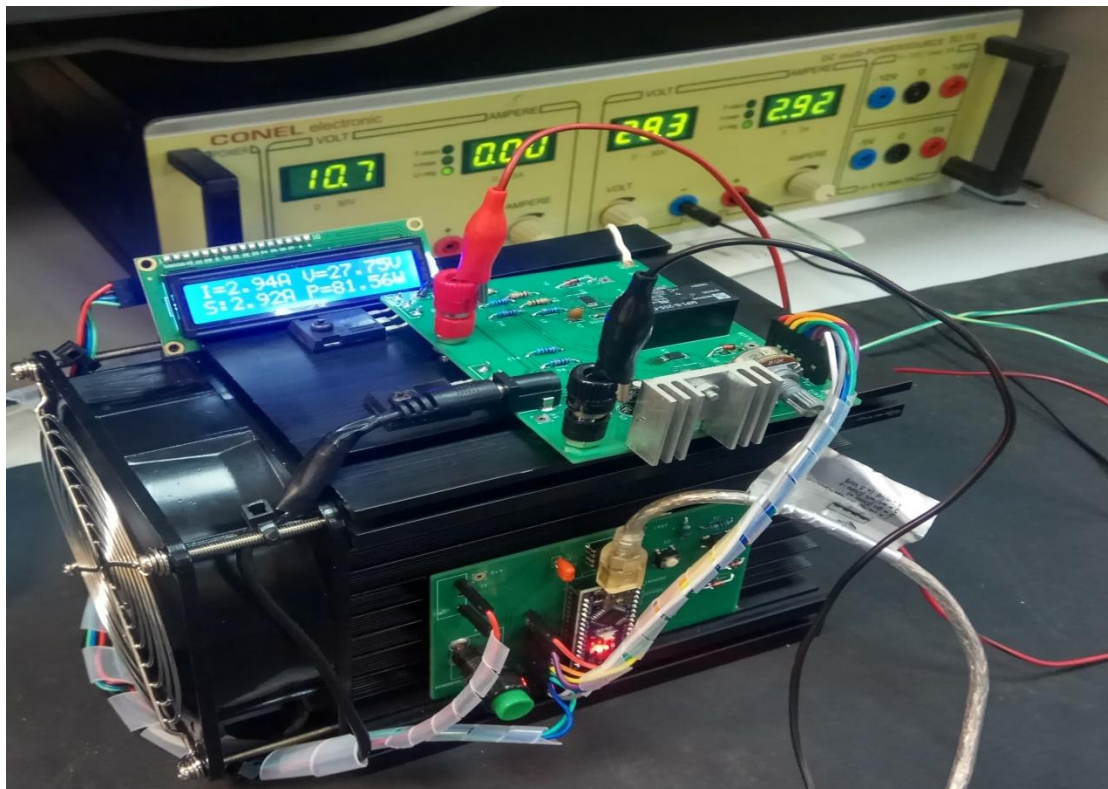


Εικόνα 5.4: Απεικόνιση μετρήσεων DC ΗΦ

Στην εικόνα 5.4 απεικονίζονται στην οθονή το ρεύμα $I = 0.95 \text{ A}$, η τάση $V = 12,1\text{V}$ και η ισχύς $P = 11.50\text{W}$. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του ρεύματος δεν υπάρχει σχετική απόκλιση, ενώ στην περίπτωση της τάσης υπάρχει απόκλιση 3 mV . Η υλοποίηση αυτής της μορφής υλοποιήθηκε με τη χρήση του μικροελεγκτή Arduino υπο R3, για τη διευκόλυνση της κατασκευής αλλά και για την άμεση τοποθέτηση των βραχυκυκλωτήρων.

5.3.2 Μετρήσεις με την χρήση PCB

Η ορθή λειτουργία της κατασκευής ελέγχθηκε, εκτός από το display του τροφοδοτικού, με την βοήθεια ψηφιακού πολύμετρου UT139C της εταιρείας UNIT. Οι μετρήσεις τις οποίες πήραμε από την συσκευή περιορίστηκαν στις μέγιστες τιμές του τροφοδοτικού $30\text{V} / 5\text{A}$. Η μέγιστη ισχύς που ασκήθηκε στην συσκευή κατά τον έλεγχο πλησίασε τα 150W , με εφαρμογή τάσης $30,4\text{V}$ και ρεύμα κοντά σε 5A . Οι καλωδιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη συσκευή περιόρισαν τη μέγιστη τιμή ρεύματος που μπορούσαμε να διαχειριστούμε 10A . Λόγω του προβλήματος της ασυμμετρίας των τάσεων στις εισόδους του τελεστικού, μέσω προγράμματος ρυθμίστηκε κλιμακωτά η τάση και το ρεύμα με τέτοιο τρόπο ώστε να είμαστε όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές τιμές χωρίς να υπάρχει απόκλιση.



Εικόνα 5.5: Μετρήσεις ορθής λειτουργίας DC ΗΦ

Στην εικόνα 5.5 εμφανίζεται ο έλεγχος του DC ΗΦ με την χρήση τροφοδοτικού και πολύμετρου, σε λειτουργία σταθερού ρεύματος. Η τάση των 28.3V παρατηρούμε στην LCD οθόνη ότι κυμαίνεται από 27.75V έως 28 V (επιθυμητά αποτελέσματα), το ρεύμα των 2.92A κυμαίνεται από 2.92A έως 2.94A, ενώ η ισχύς κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές των 81.56W έως 82.32W. Το ψηφιακό πολύμετρο, που είναι συνδεδεμένο στα άκρα της αντίστασης ισχύος των 100W / 0.25Ω, μας δείχνει ότι η διαφορά δυναμικού είναι 0.73 V. Σύμφωνα με τον τύπο $I = \frac{V}{R}$, διαπιστώνουμε ότι η τιμή ρεύματος είναι $I = \frac{0.73 V}{0.25 \Omega} = 2.92A$, ικανοποιητικό αποτέλεσμα εφόσον έχουμε θέσει ως τιμή Iset=2.92A. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εξόδου τάσης και ρεύματος με την “CC MODE” εφαρμογή στο ΗΦ.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα λειτουργίας σταθερού ρεύματος

V voltage I current	10V		20V		30V	
	ΤΡΟΦ.	ΠΟΛΥΜ.	ΤΡΟΦ.	ΠΟΛΥΜ.	ΤΡΟΦ.	ΠΟΛΥΜ.
-	370mA	0,095mV	320mA	0.086mV	360mA	0.093mV
0,25A	600mA	0,155mV	500mA	0.125mV	500mA	0.125mV
0,5A	830mA	0,213mV	770mA	0.192mV	790mA	0.205mV
0,75A	1,02A	0,271mV	1A	0.25mV	1A	0.25mV
1A	1,25A	0,321mV	1.25A	0.317mV	1.25A	0.321mV
1,25A	1,45A	0,375mV	1.45A	0.373mV	1.46A	0.377mV
1,5A	1,67A	0,431mV	1.67A	0.430mV	1.68A	0.434mV
1,75A	2A	0,5mV	1.91A	0.490mV	1.91A	0.494mV
2A	2,16A	0,559mV	2.11A	0.545mV	2.13A	0.55mV
2,25A	2,67A	0,69mV	2.5A	0.625mV	2.5A	0.625mV
2,5A	2,81A	0,725mV	2.78A	0.695mV	2.78A	0.725mV
2,75A	3A	0,779mV	3A	0.76mV	3A	0.75mV

I current \ V voltage	10V		20V		30V	
	ΤΡΟΦ.	ΠΟΛΥΜ.	ΤΡΟΦ.	ΠΟΛΥΜ.	ΤΡΟΦ.	ΠΟΛΥΜ.
-						
3,25A	3,15A	0,7875mV	3,2A	0,81V	3,2A	0,82V
3,5A	3,6A	0,9mV	3,5A	0,875V	3,5A	0,875V
3,75A	3,80A	0,95mV	3,65A	0,91V	3,75A	0,93V
4A	4,05A	1V	4A	1V	4A	1V
4,25A	4,20A	1,05V	4,25A	1,06V	4,25A	1,06V
4,5A	4,56A	1,14V	4,6A	1,15V	4,55A	1,15V
4,75A	4,8A	1,2V	4,85A	1,21V	4,74A	1,19V
5A	5A	1,25V	5,1A	1,275V	5A	1,25V

Στο πίνακα 5.1 εμφανίζονται οι τιμές του ρεύματος στις γραμμές “I current”, ενώ οι τάσεις εμφανίζονται στις στήλες “V voltage”. Οι στήλες με κίτρινο χρώμα απεικονίζουν τα αποτελέσματα της οθόνης του τροφοδοτικού, ενώ με πράσινο χρώμα τα αποτελέσματα του πολυμέτρου. Οι μηδενικές τιμές των τάσεων και των ρευμάτων δεν τοποθετήθηκαν στον πίνακα. Το “I current” αυξάνεται με βήμα 0.25A ενώ το “V voltage” με 10V. Παρατηρούμε από τον πίνακα τιμών ότι οι τιμές των αμπερ είναι παραπλήσιες με αυτές που θέσαμε ως στόχο και στις δύο μορφές ελέγχου που διαθέτουμε. Μια από τις πληροφορίες που είναι σημαντική να αναφερθεί είναι ότι το ψηφιακό ποτενσιόμετρο MCP4921 δεν αρχίζει από μηδενική τιμή, αλλά “κρατάει” κατά την έναρξη τροφοδοσία του μερικά mV. Η ένδειξη του display στο τροφοδοτικό μας ενημερώνει ότι αυτά τα mV ξεκινάνε το I_{SET} από τα 8 mA. Για την αποφυγή αυτής της κατάστασης, την στιγμή που στο φορτίο εφαρμόσουμε μια διαφορά δυναμικού θετικότερη από αυτή των 0V, δόθηκε από το πρόγραμμα η δυνατότητα να εμφανιστούν αυτά mA, ακόμα και αν δεν μπορεί ο μικροελεγκτής να τα αντιληφθεί. Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί πως όσο μεγαλύτερη είναι η τάση που δέχεται ο T.E. τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η απόκλιση των αποτελεσμάτων, για αυτό και

μέσω πρόγραμματος έγινε η προσπάθεια εξάλειψης αυτών των αποκλίσεων με τη χρήση εντολών.

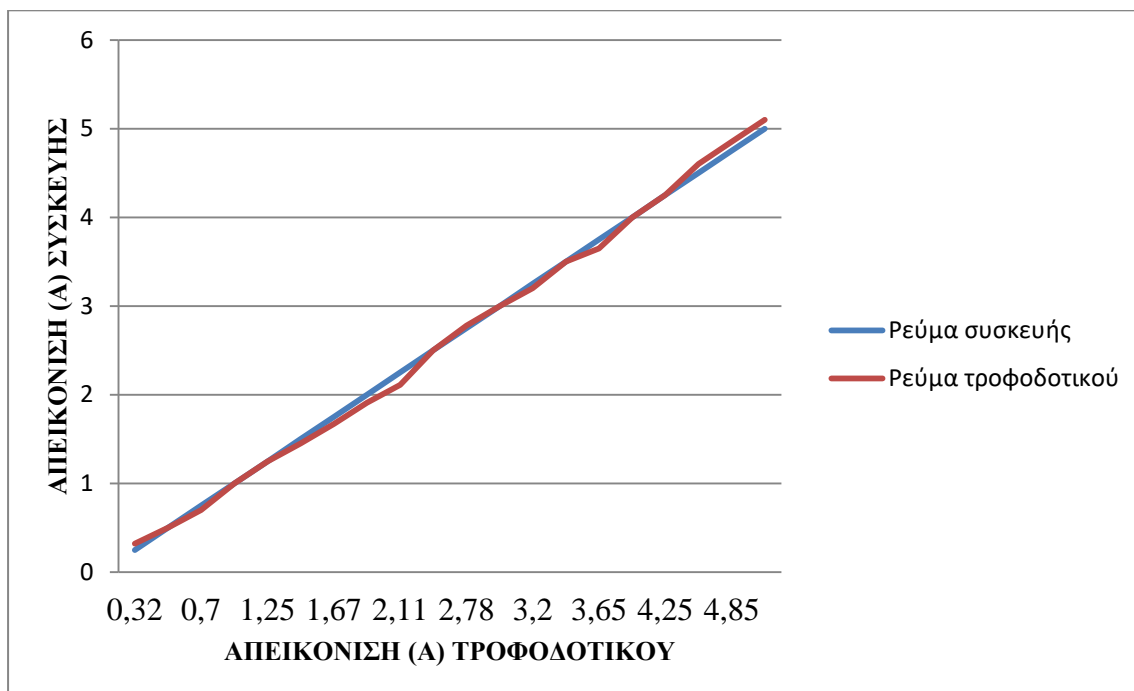
Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα λειτουργίας σταθερής αντίστασης

V	5V	10V	15V	20V	25V	30V
R _{SET} =1K	0,05A	0,1A	0,16A	0,2A	0,28A	0,31A
R _{SET} =2,5K	0,127A	0,25A	0,38A	0,5A	0,62A	0,75A
R _{SET} =5K	0,27A	0,6A	0,75A	1A	1,25A	1,6A
R _{SET} =7,5K	0,36A	0,81A	1,25A	1,5A	1,9A	2,25A
R _{SET} =10K	0,45A	1,02A	1,67A	1,91A	2,5A	2,95A

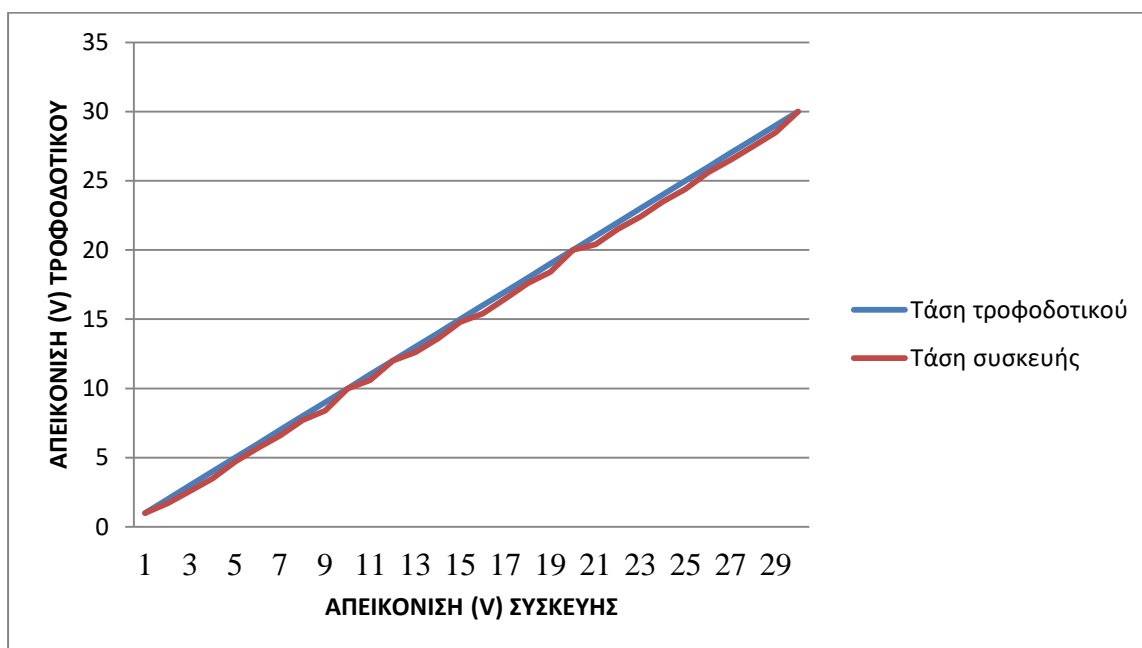
Στο πίνακα 5.2 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των τιμών της σταθερής αντίστασης. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται η τάση φορτίου και η τάση R_{SET} του ποτενσιόμετρου, ενώ με κίτρινο χρώμα το ρεύμα που ρέει μέσα στο φορτίο στην συγκεκριμένη τάση. Το “V” αυξάνεται με βήμα 5V και το “I” θα πρέπει να αυξάνεται, αναλογικά, σύμφωνα με τον τύπο $I = \frac{V}{R}$, όπου “V” η τάση αναφοράς και R η αντίσταση ισχύος 0.25 Ω.

Στα διαγράμματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τιμών ρεύματος και τάσης, της τελικής κατασκευής, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη του T.E. TLV9152IPWR, αντί του LM358AN, διορθώνεται το πρόβλημα της V_{IO}. Στο διάγραμμα 5.1 απεικονίζονται με μπλε χρώμα το ρεύμα της συσκευής, ενώ με κόκκινο χρώμα το ρεύμα του τροφοδοτικού που είναι προς έλεγχο. Το I_{max} περιορίζεται στην τιμή των 5A. Στο διάγραμμα 5.2 απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα η τάση συσκευής και με μπλέ χρώμα η τάση του τροφοδοτικού, που είναι προς έλεγχο. Το V_{max} περιορίζεται στην τιμή των 30V. Για την απόκλιση των αποτελεσμάτων ευθύνεται η ακρίβεια του μικροελεγκτή αλλά και το γεγονός ότι η σύνδεση των πλακετών ελέγχου και ισχύος γίνεται μέσω βραχυκυκλωτήρων. Η τάση την οποία εξάγει η συσκευή πρέπει να κυμαίνεται σε τιμές από 0V έως 200V,

συνθήκη που ο μικροελεγκτής δεν μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια (ο μικροελεγκτής ανιχνεύει τιμές από 0V έως 5V, τις οποίες μετατρέπει σε πραγματικές).



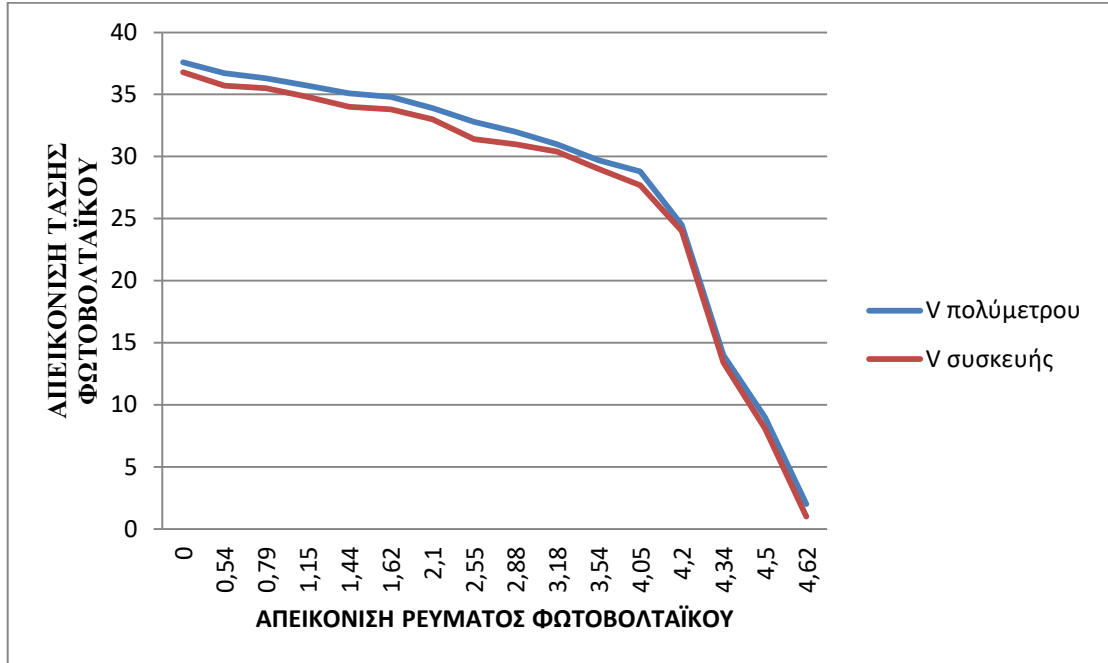
Διάγραμμα 5.1 : Απόκλιση τιμών ρεύματος συσκευής-τροφοδοτικού



Διάγραμμα 5.2 : Απόκλιση τιμών τάσης συσκευής-τροφοδοτικού

Στο διάγραμμα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ελέγχου ενός φωτοβολταϊκού πάνελ 50V/5A, που μετρήθηκαν με την χρήση της κατασκευής και του πολύμετρου. Σύμφωνα με τα δεδομένα που εξάγαμε παρατηρούμε απόκλιση των τάσεων σε τιμές

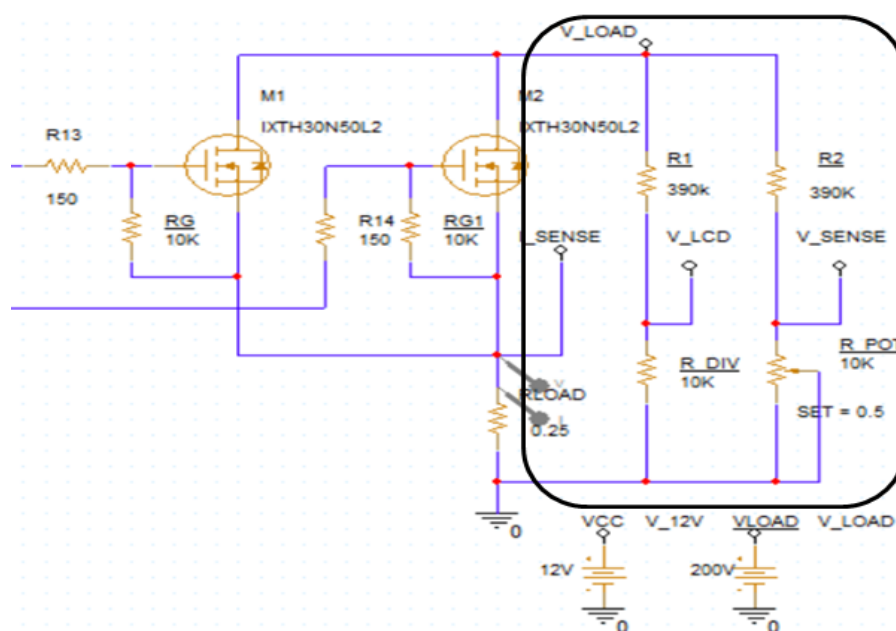
μεγαλύτερες των 28V. Η μέγιστη απόκλιση παρατηρήθηκε στην τιμή των 32,8V. Παρατηρούμε επίσης ότι οι τιμές του ρεύματος, των δύο περιπτώσεων, είναι σχεδόν ίδιες, αν και υπάρχουν μικρές αποκλίσεις. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων ρυθμίστηκε με την χρήση εντολών.



Διάγραμμα 5.3 : Μέτρηση φωτοβολταϊκού πάνελ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την διάρκεια της σχεδίασης και κατασκευής του πρακτικού σκέλους της παρούσας εργασίας εντοπίστηκαν τα κάτωθι συμπεράσματα, σχετικά με την σωστή λειτουργία των κυκλωμάτων “CC” και “CR”. Παρατηρήθηκε ότι η λειτουργία της DC συσκευής ήταν ορθή, αν και η αντικατάσταση κάποιων επιμέρους εξαρτημάτων θα επέφεραν καλύτερη απόδοση. Οι μετρήσεις των λειτουργιών σταθερής αντίστασης και σταθερού ρεύματος ήταν αρκετά κοντά στις θεωρητικές τιμές που υπολογίσαμε, με κάποιες μικρές διακυμάνσεις. Κατά την ενεργοποίηση των MOSFET ισχύος σε τιμές άνω των 80W, υπήρξε αύξηση της θερμοκρασίας των τρανζίστορ στο περίβλημά τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας δεν μετρήθηκε επειδή δεν είχαμε στην διάθεση μας το συγκεκριμένο εξοπλισμό. Η εναλλαγή των δύο λειτουργιών, όπως και η εφαρμογή του λογισμικού στο κύκλωμα, υπήρξε πολύ καλή και εύκολη στο χειρισμό. Παρατηρήθηκαν στη CR και CC λειτουργία οι τιμές των τάσεων και της ισχύς που εμφανίζεται στην LCD οθόνη να είναι διαφορετικές από τις τιμές του πολυμέτρου. Η αιτία των διαφορετικών αποτελεσμάτων βρίσκεται στο γεγονός του ότι το αναλογικό ποτενσιόμετρο είχε μεγάλη ανοχή αντίστασης. Η μεγάλη διαφορά τιμής των απλών ποτενσιομέτρων με τα ποτενσιόμετρα ακριβείας μας οδήγησε στην διαφοροποίηση του κυκλώματος. Για τη διαφορετική απεικόνιση των αποτελεσμάτων ευθύνεται ο κοινός διαιρέτης τάσης των βρόχων V_SENSE και V_LCD. Η επίλυση του προβλήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Στην εικόνα βλέπουμε ότι με τη χρήση διαφορετικού διαιρέτη τάσης, λύνεται το πρόβλημα της απεικόνισης των τάσεων, για τιμές αντιστάσεων από 0Ω έως 10 ΚΩ, χωρίς να επηρεάζεται το κύκλωμα της σταθερής αντίστασης. Η V_SENSE λαμβάνει τιμές από 0V έως 5V, αλλάζοντας την τάση στον ακροδέκτη του ενισχυτή “CR”, ενώ η V_LCD παραμένει στην τιμή της τάσης που τροφοδοτούμε εκείνη την στιγμή (στην περίπτωση των 30V είναι 0.75V). Όσο αναφορά στον λάθος σχεδιασμός του τοπογραφικού “R_PARA”(σχεδιασμός ροοστάτη αντί ποτενσιομέτρου), στο παράρτημα Β εμφανίζονται οι τροποποιήσεις του PCB, ώστε να είναι όσο πιο βέλτιστο μπορεί το κύκλωμα. Η διαφορά τάσης του ενισχυτή, που επαληθεύτηκε μετά την κατασκευή του PCB ισχύος, ήταν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που έπρεπε να λυθούν. Παρατηρήθηκε και διορθώθηκε το ζήτημα αυτό με την βοήθεια του λογισμικού με την χρήση κατάλληλων εντολών. Επιλέχθηκε ο T.E TLV9152IPWR της εταιρίας Texas Instruments, με βάση τα προαπαιτούμενα που αναφέρθηκαν, για την αντικατάσταση του υπάρχοντος τελεστικού. Ο τελεστικός έχει περίπου τα ίδια χαρακτηριστικά με τον LM358AN, με σημαντικότερη όμως διαφορά στο input offset των εισόδων (μέγιστη V_{IO} τα 200μV). Ο ενισχυτής περιέρχεται σε πακέτο 8-TSSOP, γεγονός που μας οδηγεί στην χρησιμοποίηση ειδικού μετατροπέα 8-TSSOP σε DIP-8 λόγω κατασκευής του PCB, είναι μονοπολικός με μέγιστη τροφοδοσία 16V και μπορεί να χρησιμοποιήσει δύο κανάλια εξόδου. Με τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι είναι μια βελτιωμένη λύση σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιήσαμε στην αρχική συσκευή, άλλα και ότι με την χρησιμοποίηση του μπορούμε να αποφύγουμε τις αποκλίσεις των τιμών. Τέλος, η χρησιμοποίηση ενός ανεμιστήρα 12 VDC θα έλυne το πρόβλημα της καλωδίωσης, συνδέοντας τον ανεμιστήρα του συστήματος ψύξης στο τροφοδοτικό των 12V/2A της κατασκευής. Οι αλλαγές των PCB ισχύος και ελέγχου εικονίζονται στο παράρτημα Μέρος Α, ενώ στο παράρτημα Μέρος Β εμφανίζονται οι εντολές που απευθύνονται στην ανανεωμένη έκδοση των PCB. Στο παράρτημα Μέρος Γ απεικονίζονται οι μορφές της αρχικής και της τελικής κατασκευής, στην οποία τελική κατασκευή υπάρχουν οι αλλαγές που προτείνονται (εκτός του συστήματος ψύξης).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

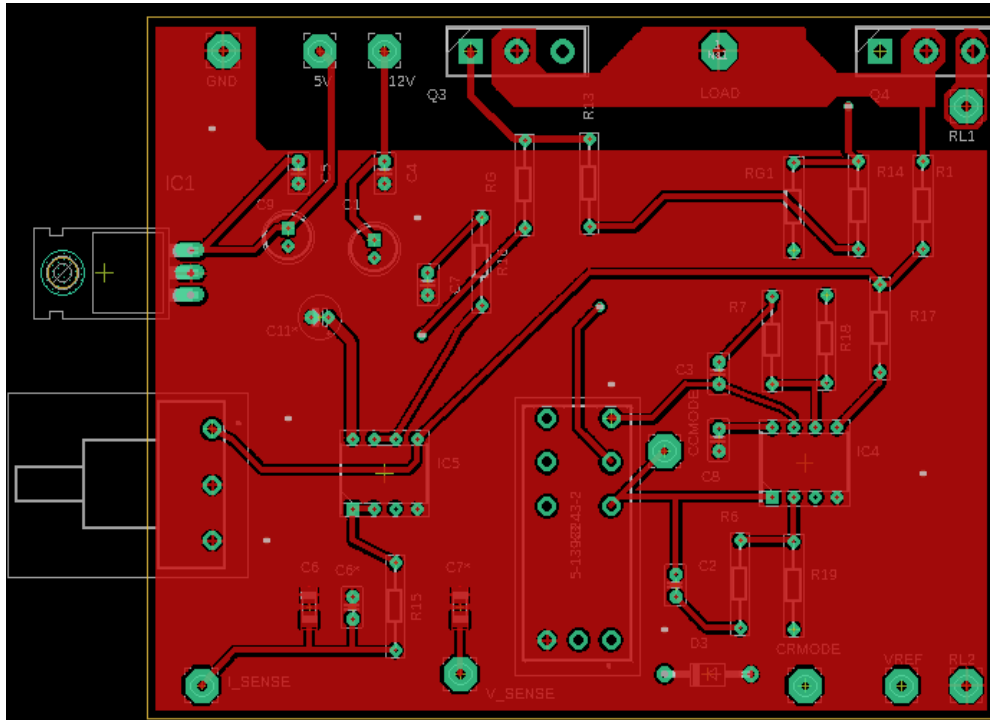
- Κιοσκερίδης, Ι. Ν. (2019). *Ηλεκτρονικά ισχύος*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα
- Κατσίδης, Χ. (2007). *Εισαγωγή στη μικροηλεκτρονική*. Ανακτήθηκε από <https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY482/>.
- Παπαβραμίδου, Π. Α. & Παπακώστας Δ. Κ. (2014). *Ηλεκτρονικές εξερευνηήσεις*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Παναγιώτου, Α. (2016). *Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικού φορτίου*. (Διπλωματική εργασία). Ανακτήθηκε από Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών [https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10416/3/Panagioutou\(ele\).pdf](https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/10416/3/Panagioutou(ele).pdf).
- Σπάσος, Μ. Ν., (2018). *Αναλογική επεξεργασία σημάτων αισθητηρίων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΑΪΒΑΖΗ.
- Arduino Nano. technical specs. Ανακτήθηκε από <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>.
- Basic Electronics: Electronic Load and Battery Testing. (2020). Ανακτήθηκε από <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/05/26/basic-electronics-electronic-load-and-battery-testing/>.
- Confirmation of the Chip Temperature. (2018). Ανακτήθηκε από <https://techweb.rohm.com/knowledge/si/s-si/04-s-si/7129>.
- DFRodot Electronics. Specification. Ανακτήθηκε από https://wiki.dfrobot.com/Gravity_I2C_16x2_Arduino_LCD_with_RGB_Font_Display_SKU_DFR0554.
- Eddleman, D. (2017). MOSFET Safe Operating Area and Hot Swap Circuits. Ανακτήθηκε από <https://www.analog.com/en/technical-articles/mosfet-safe-operating-area-and-hot-swap-circuits.html>.
- Gupta, S. (2019). DAC MCP4921 Interfacing with PIC Microcontroller PIC16F877A. Ανακτήθηκε από <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/pic16f877a-mcp4921-dac-interfacing-tutorial>.
- IXYS CORPORATION. (2014). LinearL2TM, Power MOSFET, w/ Extended FBSOA. Ανακτήθηκε από https://m.littelfuse.com/~media/electronics/datasheets/discrete_mosfets/littelfuse_discrete_mosfets_n-channel_linear_ixt_30n50_datasheet.pdf.pdf.
- Loflin, L. (2018). Connecting MOSFETs in Parallel. Ανακτήθηκε από <https://www.bristolwatch.com/ele2/pm.htm>.

- MOSFET Thermal Resistance and Power Dissipation: Packages Capable of Back-Surface Heat Dissipation. (2020). Ανακτήθηκε από <https://techweb.rohm.com/knowledge/si/s-si/03-s-si/8955>.
- Martin, B. (2017). How Electronic Loads Work. Ανακτήθηκε από <https://blog.programmablepower.com/blog/how-electronic-loads-work>.
- Microchip Technology Inc. (2004). MCP4921/4922: 12-Bit DAC with SPI™ Interface. Ανακτήθηκε από <https://gr.mouser.com/datasheet/2/268/21897a-70809.pdf>.
- OptiMOS™ Linear FET. Ανακτήθηκε από <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/optimos-and-strongirfet-latest-family-selection-guide/optimos-linear-fet-100v-150v-200v-/>.
- Power MOSFET. (2020). Ανακτήθηκε από <https://www.electrical4u.com/power-mosfet/>.
- Power Management 101: Power MOSFET Characteristics. (2009). Ανακτήθηκε από <https://www.electronicdesign.com/technologies/discrete-power-semis/article/21191080/power-management-101-power-mosfet-characteristics>.
- Relpol S.A. (2020). RH radiatory do przekaźników RSR52, RSR62. Ανακτήθηκε από <https://www.tme.eu/Document/629098d34a5e4ce9cf4f46f359a8a36e/RH04A-F220AC.PDF>.
- Samimi, S. & Rosen, L. (2012). Small Electronic Load Design and analysis of a small electronic load for testing on-board DC/DC converters. (Master of Science Thesis). Ανακτήθηκε από CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/169764/169764.pdf>.
- Selecting the Right Heat Sink for your Design – Steps for Heat Sink Calculation and Selection. (2020). Ανακτήθηκε από <https://components101.com/articles/selecting-the-right-heatsink-for-your-design-and-steps-for-heatsink-calculation-and-selection>.
- Texas Instruments Incorporated. (2022). Industry-Standard Dual Operational Amplifiers. Ανακτήθηκε από <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358.pdf>.

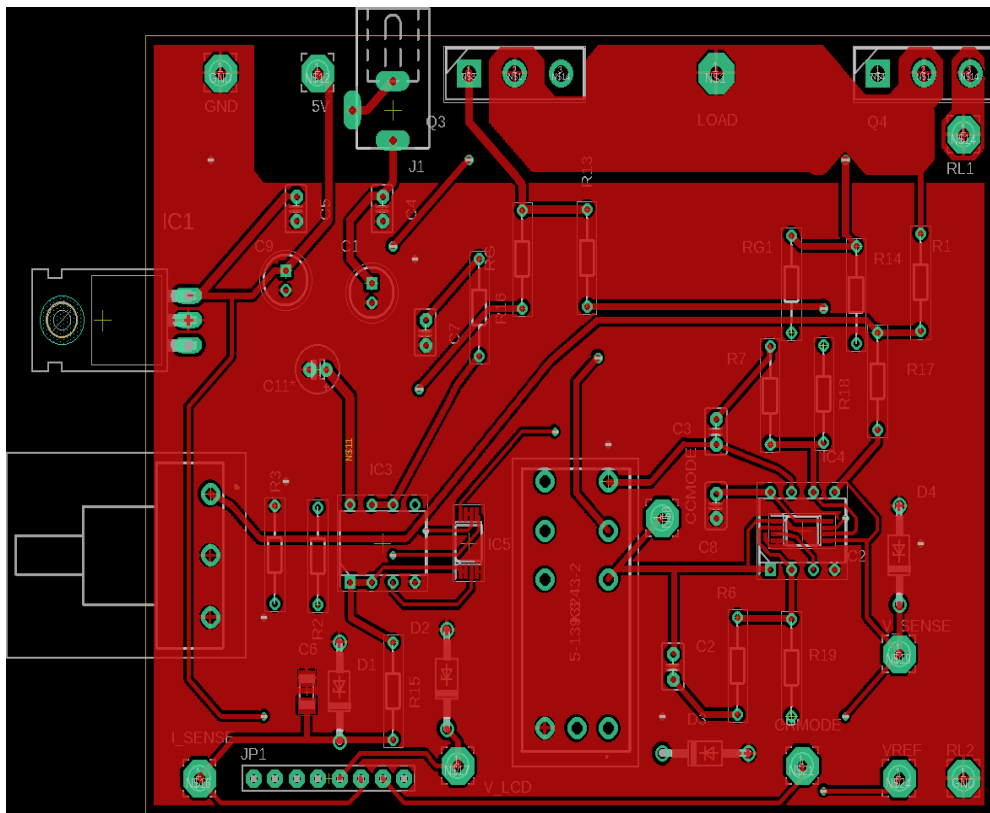
- Texas Instruments Incorporated. (2020). LM78L 100-mA Fixed Output Linear Regulator. Ανακτήθηκε από <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm78l.pdf>.
- Transfer Multisort Elektronik. CRL30W-1R SR PASSIVES. Ανακτήθηκε από <https://www.tme.eu/en/details/crl30w-1r/30w-resistors/sr-passives/>.
- What is the definition of power dissipation?. (2018). Ανακτήθηκε από <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/faq/mosfet/what-is-the-definition-of-power-dissipation.html>.
- What Language Is an Arduino Programmed In?. (2019). Ανακτήθηκε από <https://coolcomponents.co.uk/blogs/news/what-language-is-an-arduino-programmed-in>.
- What is a Power MOSFET : Working & Its Applications. Ανακτήθηκε από <https://www.elprocus.com/power-mosfet>.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

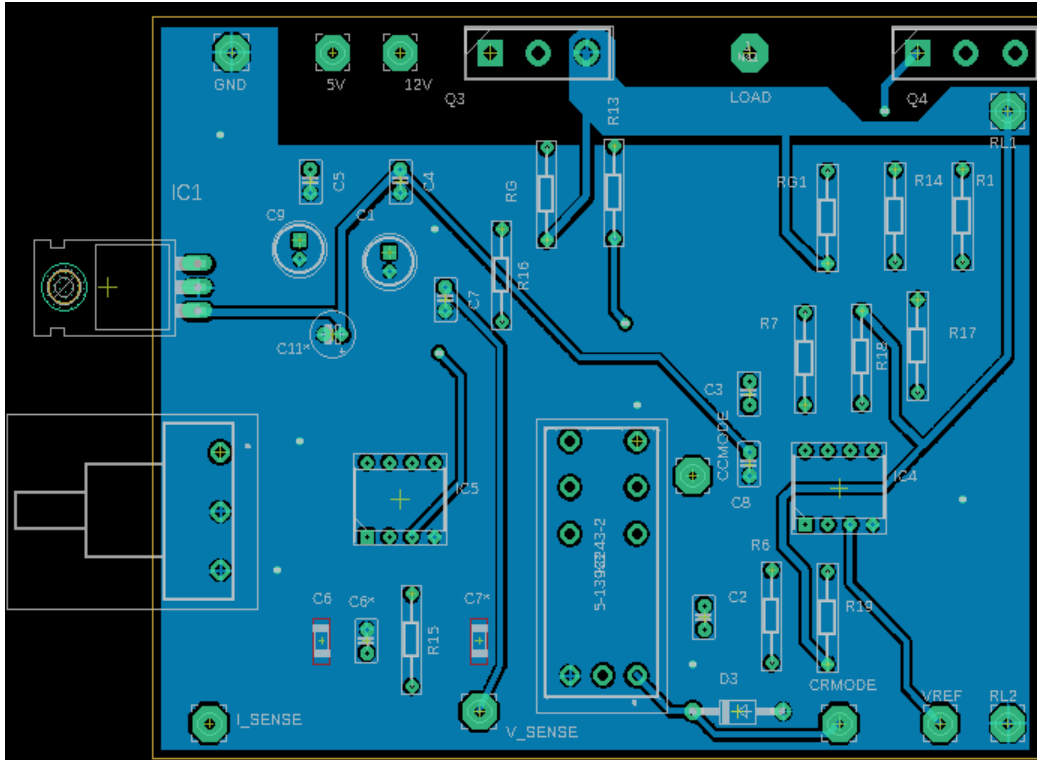
ΜΕΡΟΣ Α



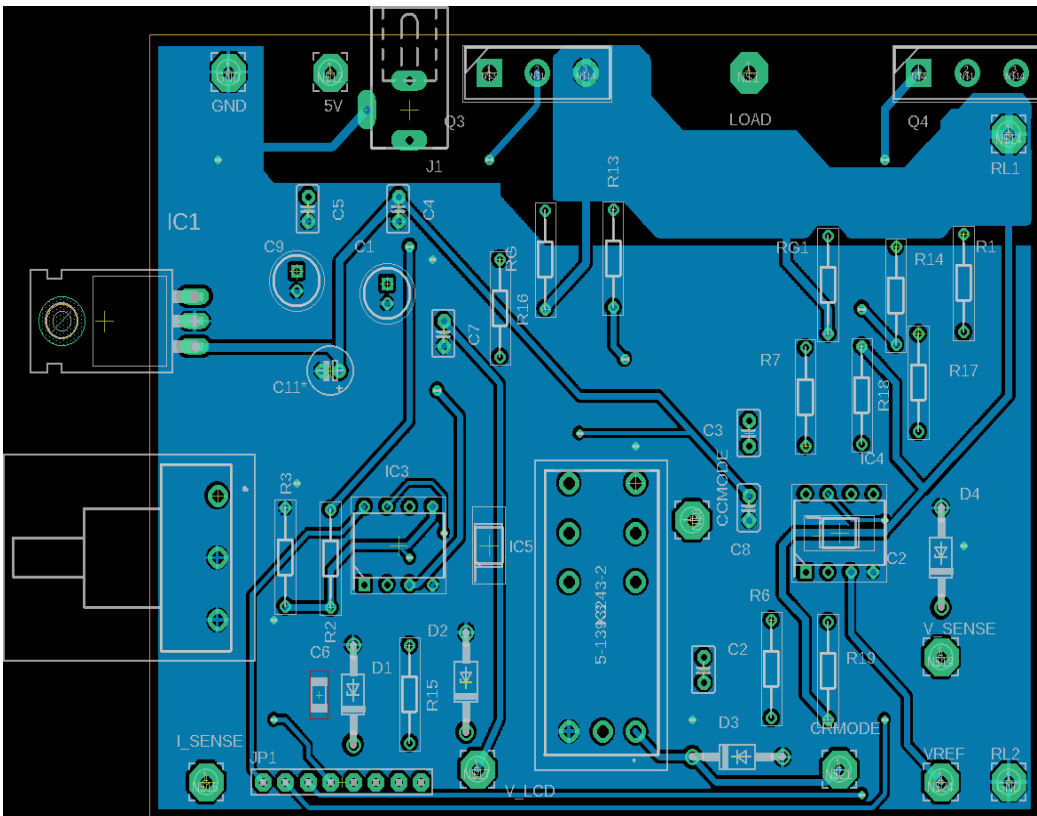
Εικόνα: PCB ισχύος εμπρός όψη



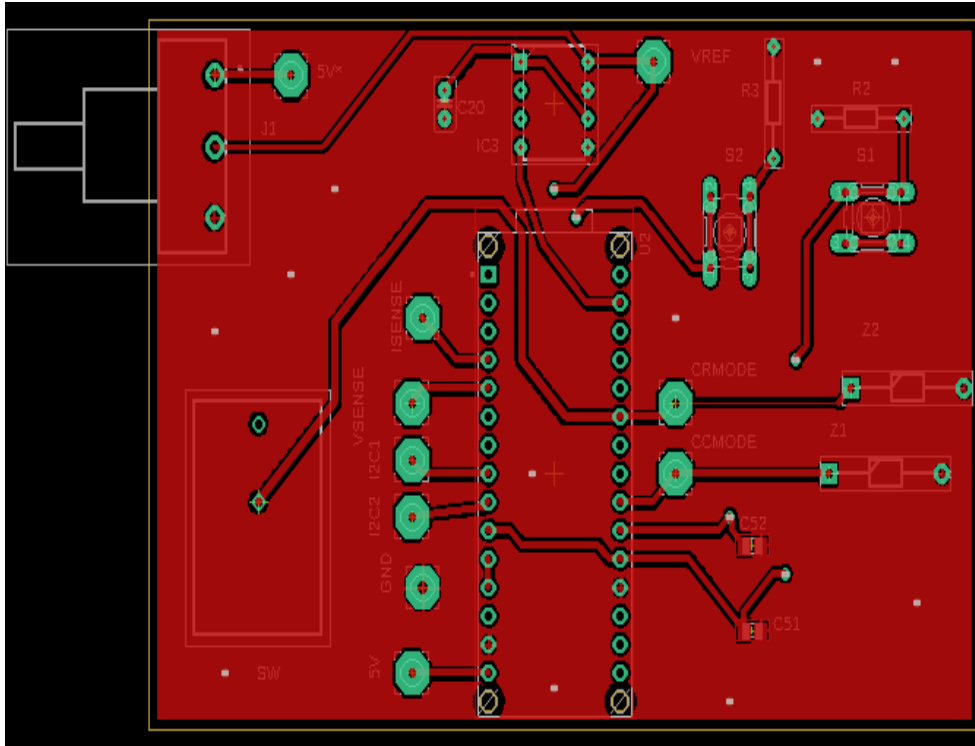
Εικόνα: PCB ισχύος εμπρός όψη τελικά μορφή



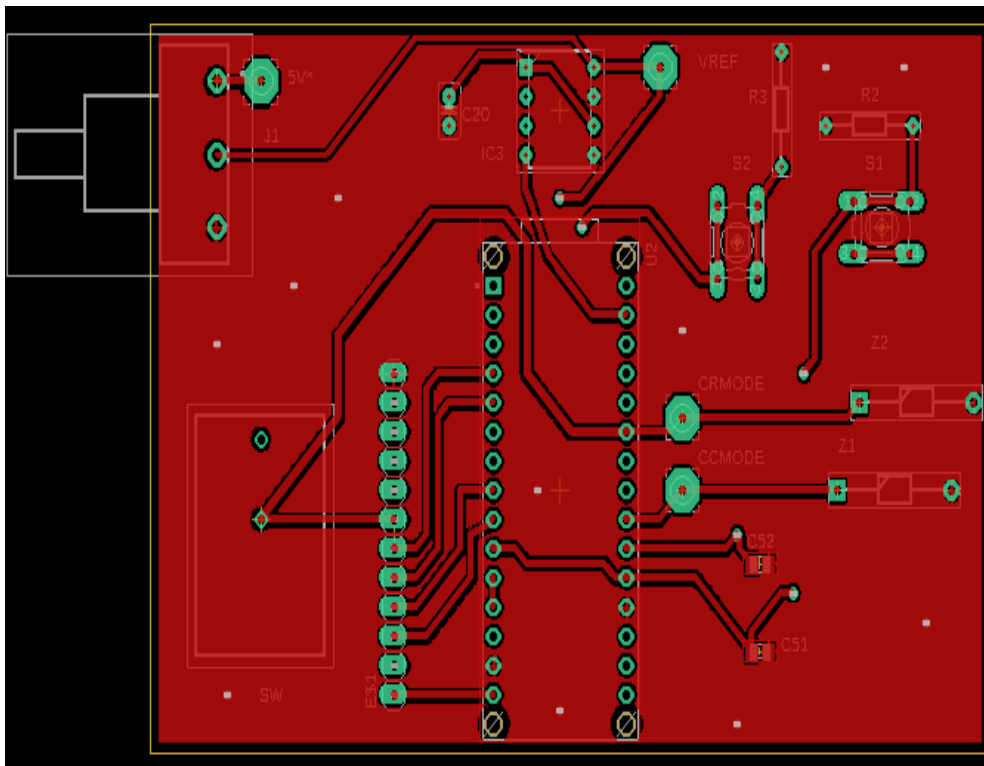
Εικόνα: PCB ισχύος πίσω όψη



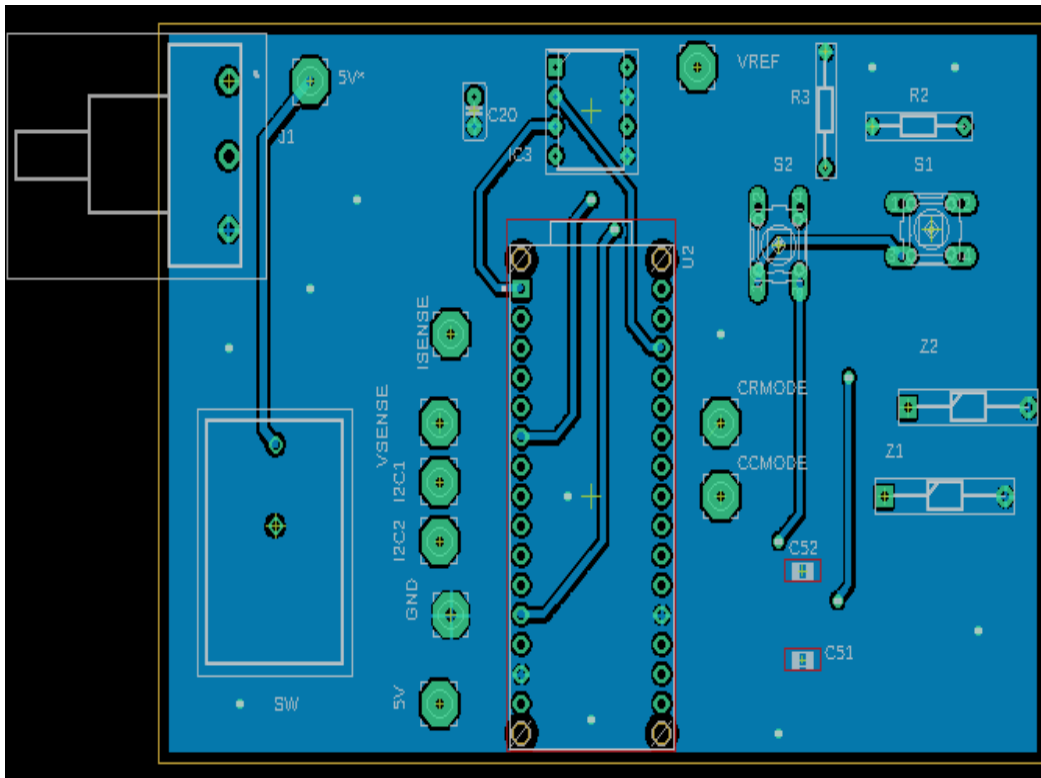
Εικόνα: PCB ισχύος πίσω όψη τελική μορφή



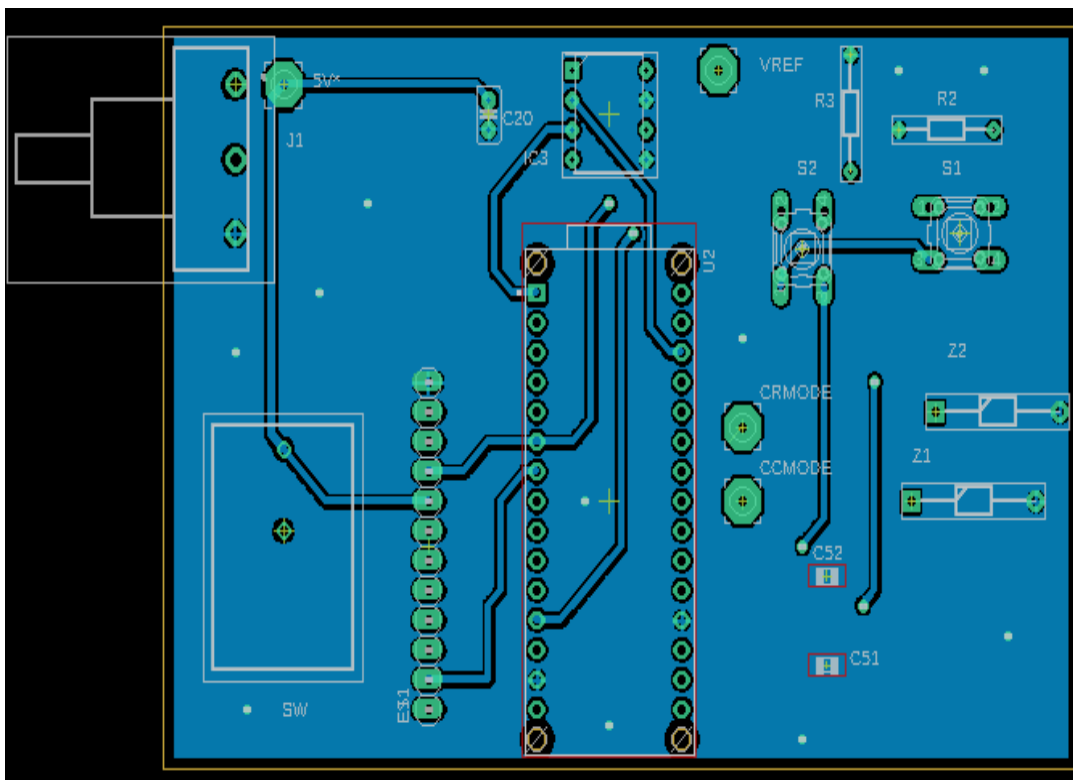
Εικόνα: PCB ελέγχου εμπρόσθια όψη



Εικόνα: PCB ελέγχου εμπρόσθια όψη τελική μορφή



Εικόνα: PCB ελέγχου πίσω όψη



Εικόνα: PCB ελέγχου πίσω όψη τελική μορφή

ΜΕΡΟΣ Β

```
#include <MCP_DAC.h> // Βιβλιοθήκη MCP4XXX
#include <SPI.h> // Βιβλιοθήκη SPI
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Βιβλιοθήκη LCD οθόνης με επικοινωνία I2C
#define MCP_PIN 10 // Σταθερά (pin 10)
MCP4921 ObDAC(11,13); // Pin D11 για το MOSI και pin D13 για το SCLK
int raise_dac = 0; // Αύξηση DAC
int reduce_dac = 0; // Μείωση DAC
int VREF=0; // Αρχικοποίηση της τάσης VREF
int VOLT_VREF=0; //Μεταβλητή μετατροπής του ψηφιακού ποτενσιόμετρου
int voltage_CR_MODE = 0; //Αρχικοποίηση της τάσης CR διαδικασίας
int t1=0; // Χρόνος επιλογής για CC MODE
int t2=0; // Χρόνος επιλογής CR MODE
int VREF_INC = 2; // Digital pin αύξησης της vref εισόδου
int VREF_DEC = 3; // Digital pin μείωσης της vref εισόδου
int CR_MODE = 7; // Digital pin για τον έλεγχο λειτουργίας της σταθερής αντίστασης
int current_pin_input = A0; // Analog pin εισόδου μέτρησης ρεύματος
int voltage_pin_input = A1; // Analog pin εισόδου μέτρησης τάσης
int dac_feedback=A2; // Analog pin ανατροφοδότησεις της τάσεις εξόδου dac
int V_SENSE=A3; // pin ροοστάτη
float volt_VREF = 0; // Μεταβλητή μέτρησης για +0.02 ή -0.02
float VREF1=0.0; // Υπολογισμός εξόδου του dac
float current_output = 0.0; // Μέτρηση ρεύματος
float voltage_output = 0.0; // Μέτρηση τάσης
float IS=0.0; // Μεταβλητή του set ρεύματος
float power =0.0; // Μέτρηση ισχύος
uint16_t LD_LSB=0; // Επιλογή τελευταίου ψηφίου
uint16_t HD_MSB=0; //Επιλογή πρώτου ψηφίου
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // Εντολή προς το arduino nano
void setup() {
  Serial.begin(9600); //Έναρξη σειριακής
  ObDAC.begin(10); //Pin ρύθμισης του DAC
  pinMode(VREF_INC, INPUT); // Pin 2 είσοδος (αύξησης της VREF)
  pinMode(VREF_DEC, INPUT); // Pin 3 είσοδος (μείωσης της VREF)
  pinMode(current_pin_input, INPUT); // Pin 0 είσοδος (αναλογική πόρτα που διαβάζει το ρεύμα)
  pinMode(voltage_pin_input, INPUT); // Pin 1 είσοδος (μείωσης της VREF)
  pinMode(CR_MODE, INPUT); // Ψηφιακή είσοδος της σταθερής αντίστασης
  pinMode(dac_feedback, INPUT); // Pin 2 είσοδος (feedback)
  pinMode(V_SENSE,INPUT); // Είσοδος τιμής ροοστάτη
  SPI.begin(); // Έναρξη SPI
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(" DC ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("ELECTRONIC LOAD");
  delay (5000);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("SELECT MODE ");
  delay (5000);
  lcd.clear(); /*Εντολές εμφάνισης μηνυμάτων*/
}
void loop () {
  current_output = 0; // Θέτω ρεύμα φορτίου ίσο με μηδέν
  current_output += analogRead(current_pin_input); //Η αναλογική είσοδος διαβάζει την τάση στην πόρτα A0
  current_output = ((current_output * 5 ) / 1024)/0.25 ;
  /* Εντολή μετατροπής της τιμής σε γλώσσα κατανοητή προς το arduino,shunt resistor 0.25*/
  voltage_output = 0; // Θέτω τάση φορτίου ίσο με μηδέν
  voltage_output += analogRead(voltage_pin_input ); //Η αναλογική είσοδος διαβάζει την τάση στην πόρτα A1
  voltage_output = ((voltage_output * 5 )/1024)*40 ;
  /*Πολλαπλασιασμός x 40 ώστε να γίνει η απεικόνιση αναλογικά (πχ αντι για 5 που έχουμε είσοδο 200 )*/
  voltage_CR_MODE = digitalRead(CR_MODE ); // Θέτω στην μεταβλητή την τιμή της ψηφιακής πόρτας
  if (digitalRead(CR_MODE) == LOW ) {
    if (t1==0){
      lcd.clear();
      lcd.print("WAIT FOR 5 SEC. ");
    }
  }
}
```

```

delay(5000);
lcd.clear();
lcd.print(" CC MODE ");
delay(5000);
lcd.clear();
lcd.print("ISET=VREF/0.25R "); //Εμφάνιση πράξεως για την VREF
delay(5000);
lcd.clear();
t1=t1+1;
t2=0; }
/* Εάν η ψηφιακή πόρτα ισούται με 0 ( μικρότερη απο 0.5V ) επιλέγεται η λειτουργία CC και μένει σταθερά σε
αυτή την κατάσταση*/
if (t1==1 && t2==1 ){
t1=0;
} /* Εάν έχουν καταλάβος επιλεχθεί και οι δύο λειτουργίες , απενεργοποιείται η CR λειτουργία*/
raise_dac = digitalRead(VREF_INC); // Εκχώρηση της μεταβλητής VREF_INC
reduse_dac = digitalRead(VREF_DEC); // Εκχώρηση της μεταβλητής VREF_DEC
if (digitalRead(VREF_INC)==HIGH ){
delay(50);
raise_dac = digitalRead(VREF_INC);
if (digitalRead(VREF_INC)==HIGH){
volt_VREF += 0.02;
}
} /* Εάν επιλεχθεί το button αύξησης , η τάση εξόδου αυξάνεται κατά 0.02V*/
if (digitalRead(VREF_DEC)==HIGH ){
delay(50);
reduse_dac = digitalRead(VREF_DEC);
if (digitalRead(VREF_DEC)==HIGH){
if (volt_VREF == 0){
volt_VREF = 0;
} /*Εάν επιλεχθεί το button μείωσης , η τάση εξόδου μειώνεται κατά 0.02V*/
else{
volt_VREF -=0.02;
} /* Εάν έχουμε μια ανεπιθύμητη τάση ή 0V , η τάση εξόδου μηδενίζει*/
}
}
power = (float)(voltage_output*current_output);
if (power < 200 ){
VOLT_VREF= volt_VREF / 0.0012210012210012;
VOLT_VREF = VOLT_VREF/256;
LD_LSB = (0x30) | LD_LSB ;
HD_MSB = 0xFF & VOLT_VREF;
digitalWrite (MCP_PIN,LOW);
SPI.transfer (LD_LSB);
SPI.transfer (HD_MSB);
digitalWrite (MCP_PIN,HIGH) ;
/* Εντολές μετατροπής της τάσης αναφοράς σε γλώσσα κατανοητή προς το arduino*/
}
else{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("HIGH POWER ");
delay(5000);
number = 0;
convert_DAC (number); }
} /* Συνθήκη για ισχύ μεγαλύτερη της επιτρεπτής*/
if (digitalRead(CR_MODE) == HIGH ) { // ΕΑΝ η επιλογή CP_mode είναι HIGH
if (t2==0){
lcd.clear();
lcd.print("WAIT FOR 5 SEC. ");
delay(5000);
lcd.clear();
lcd.print(" CR MODE ");
delay(5000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(" ISET");
lcd.setCursor(0,1);

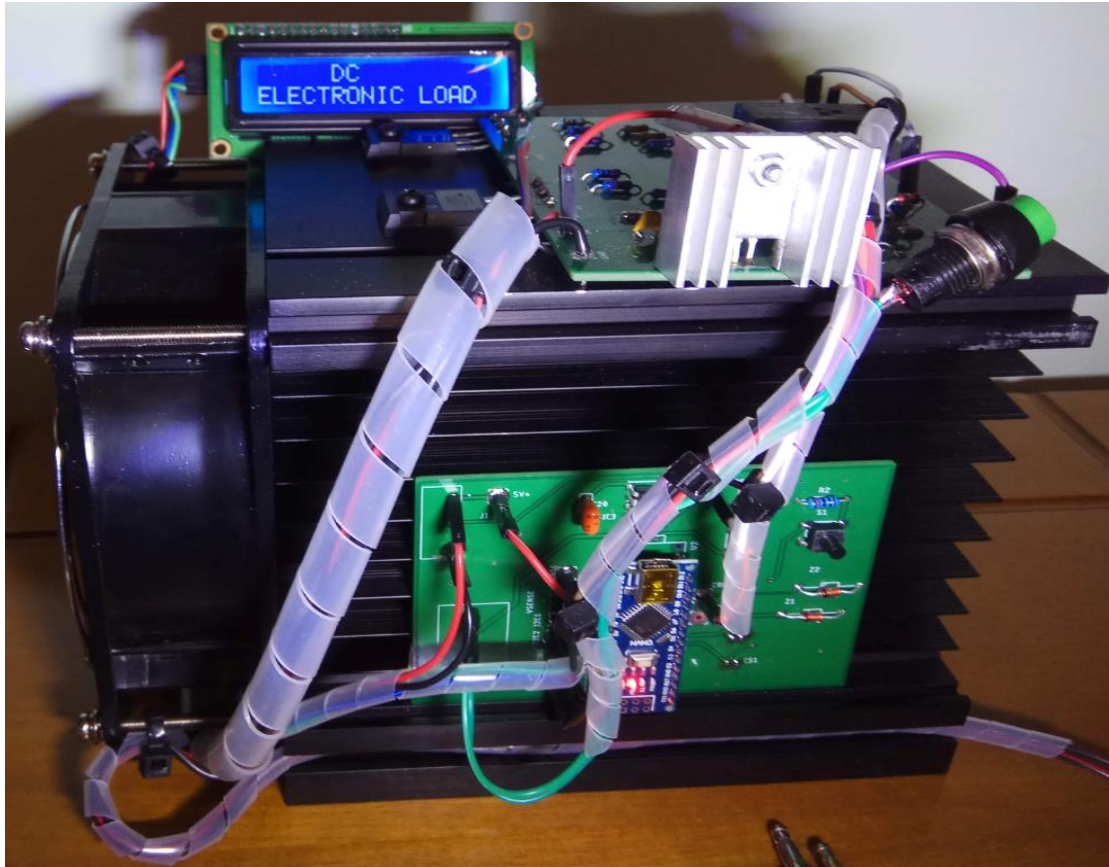
```

```

    lcd.print(" DEACTIVATION");
    delay(5000);/* Μήνυμα εμφάνισης απενεργοποίησης του ISET*/
    lcd.clear();
    t2=t2+1;
    t1=0; } /* Εάν η ψηφιακή πόρτα ισούται με 5V( μεγαλύτερη απο 4 V ) επιλέγεται η λειτουργία CR και μένει
σταθερά σε αυτή την κατάσταση*/
    if (t1==1 && t2==1 ){
        t2=0;
        }/* Εάν έχουν καταλάβος επιλεγθεί και οι δύο λειτουργίες , απενεργοποιείται η CC λειτουργία*/
        power = (float)(voltage_output*current_output);
    if (power < 200 ){
        }
        else{
            lcd.clear();
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("HIGH POWER ");
            delay(5000);
        }
    }
current_output=current_output+0.08; /*Πρόσθεση με 0.04 που κρατάει το MCP στην ενεργοποίηση*/
if(current_output>0.132){
    current_output=current_output-0.04;
    }/* αφαίρεση των επιπρόσθετων αμπερ που θέσαμε λόγω της προσθήκης του MCP.Στην CR λειτουργία είναι
μεγαλύτερη απο αυτήν την τιμή κατά την εναρξη*/
/* if(voltage_output==0 ){
    current_output=0;
    }//Λειτουργία που θέτει το ρεύμα ίσο με μηδεν την στιγμή που δεν έχουμε τάση//
if(voltage_output>0.025 && voltage_output< 1 ){
    voltage_output = 1 ;
    }// Λειτουργία που μας επιτρέπει να απεικονίσουμε την ελάχιστη τάση των 1V//
if(voltage_output>5 ){
    voltage_output =voltage_output+0.5 ;
    }
    if(voltage_output>15 ){
        voltage_output =voltage_output+1 ;
    }
    if(voltage_output>30 ){
        voltage_output =voltage_output+1.75 ;
    }
    } //Κλιμακωτές αυξήσεις τάσης για την αποφυγή αποκλίσεων λόγω input offset//
    if(current_output>2.5){
        current_output=current_output-0.2;
        } //Κλιμακωτή μείωση ρεύματος για την αποφυγή αποκλίσεων λόγω input offset// */
VREF1 += analogRead(dac_feedback);// Εγχώρηση της αναλογικής πόρτας του dac
VREF1 = (VREF1 * 5 )/1024; // Εντολή κατανοητή προς τον μικροελεγκτή
IS=VREF1/0.25; //Υπολογισμός ρεύματος εκροής
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("I=");
lcd.print(current_output);
lcd.print("A ");
lcd.print("V=");
lcd.print(voltage_output);
lcd.print("V");
lcd.setCursor(0, 1);
if (digitalRead(CR_MODE) == LOW ){
    lcd.print("S:" );
    lcd.print( IS );
    lcd.print("A");
}
if (digitalRead(CR_MODE) == HIGH ){
    lcd.print("S:0.00" );
    lcd.print("A");
}
}
lcd.print(" P=");
lcd.print(power);
lcd.print("W");
} /*Εμφάνιση αποτελεσμάτων*/
/*ΤΕΛΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ*

```

ΜΕΡΟΣ Γ



Εικόνα: Αρχική μορφή κατασκευής



Εικόνα: Τελική μορφή κατασκευής