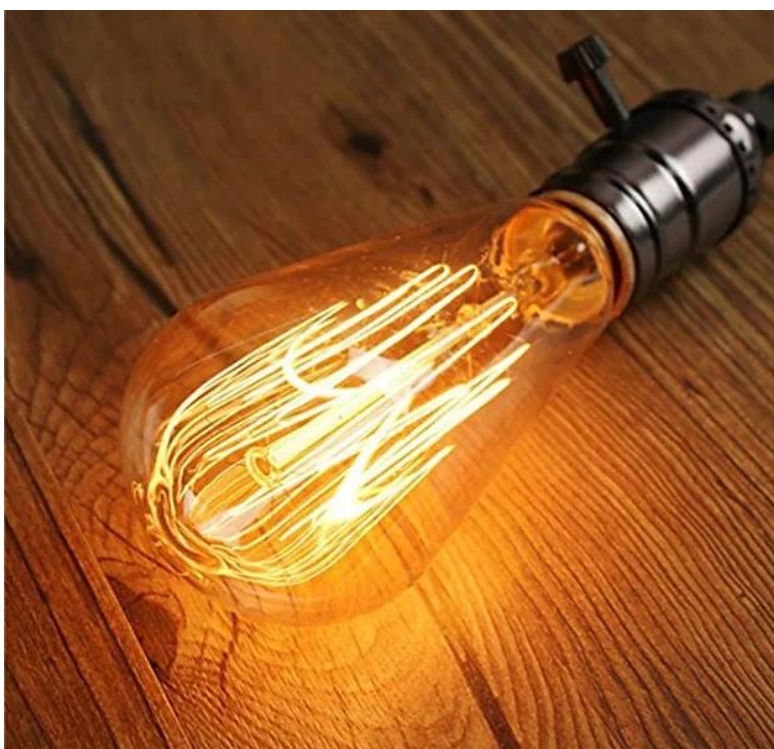


ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΜΣ: «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



«Σχεδιασμός Μελέτη και κατασκευή ρυθμιζόμενου φορτίου»

Αριθμός μητρώου : elem5121m

Κωδικός Εργασίας : 21395

Διπλωματική εργασία

του φοιτητή Αμπατζή Δημητρίου

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη, την προσομοίωση και την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου συστήματος ηλεκτρονικού φορτίου συνεχούς ρεύματος. Η συσκευή χρησιμοποιεί μία παράλληλη διάταξη ημιαγωγών στοιχείων MOSFET ισχύος τα οποία λειτουργούν στην γραμμική περιοχή λειτουργίας και πολώνονται με τάση συνεχούς τιμής χρησιμοποιώντας έναν δικτύωμα που αποτελείται από τελεστικούς ενισχυτές και έναν μικροελεγκτή.

Σκοπός της εργασίας είναι η δημιουργία μίας συσκευής η οποία θα επιτελεί τον έλεγχο τροφοδοτικών σε συνέχεια της επισκευής τους. Επιπλέον, η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει ως ωμική αντίσταση για περιπτώσεις που το επιθυμεί ο χρήστης.

Στην αρχή της εργασίας γίνεται μία εισαγωγή στα ηλεκτρονικά φορτία όπου επεξηγούνται οι λειτουργίες και η χρήση κάθε μίας. Στην συνέχεια, γίνεται θεωρητική εισαγωγή στους ημιαγωγούς ισχύος και στα χαρακτηριστικά τους. Ακολουθεί ο σχεδιασμός του κυκλώματος και αναλύονται όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και όλες οι διατάξεις που επιτελούν τις λειτουργίες του ηλεκτρονικού φορτίου.

Ολοκληρώνοντας το θεωρητικό μέρος, η εργασία μεταβαίνει στην προσομοίωση των κυκλωμάτων που μελετήθηκαν. Εδώ γίνεται η λήψη αποφάσεων για το κύκλωμα που θα προχωρήσει στο επόμενο στάδιο, την κατασκευή. Σε αυτό το σημείο αποκλείονται κυκλώματα που δεν συμβαδίζουν με τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν.

Στην συνέχεια, πραγματοποιείται η πρώτη υλοποίηση του ηλεκτρονικού φορτίου στο ράστερ. Στην συνέχεια γίνεται μετάβαση σε τυπωμένο κύκλωμα και γίνεται μελέτη και χαρακτηρισμός της κατασκευής. Εδώ εντοπίζονται οι περιορισμοί και τα προβλήματα της διάταξης του τυπωμένου κυκλώματος και γίνεται νέα μελέτη για κατασκευή ενός δεύτερου τυπωμένου.

Επόμενο στάδιο, αποτελεί η πρακτική μελέτη και ο χαρακτηρισμός της τελικής διάταξης. Τέλος, γίνεται δοκιμή για την ορθή λειτουργία της συσκευής όπου πραγματοποιείται μία σειρά από πειράματα τα αποτελέσματα των οποίων επιβεβαιώνουν τη θεωρητική ανάλυση και τον σχεδιασμό που πραγματοποιήθηκαν. Στην τελευταία ενότητα παραθέτονται τα αποτελέσματα της διάταξης και συνοψίζονται οι παρατηρήσεις που επήλθαν με το πέρας της κατασκευής.

## Abstract

This thesis deals with the study, simulation and construction of an integrated DC electronic load system. The device uses a parallel array of power MOSFETs that operate in the linear region and are DC-biased using a network consisting of operational amplifiers and a microcontroller.

The purpose of the study is to create a device which will perform the quality check of power supply units following their repair. Additionally, the device can act as a power resistor for cases where the user so desires.

At the beginning of the study, there is an introduction to electronic loads where the functions and use of each one is explained. Then, a theoretical introduction to power semiconductors and their characteristics is given. The design of the circuit follows with an in-depth analysis in all of the parts used and all the devices that perform the functions of the electronic load.

After completing the theoretical part, there are the simulation of the studied circuits. This is where decisions are made for the circuit to proceed to the next stage, manufacturing. At this point, circuits that do not conform to the selected characteristics are excluded.

Next, the first application of electronic load is carried out to raster. Afterwards, the transition is made to a printed circuit which includes the study and characterization of the device. Here the limitations and problems of the printed circuit layout are identified and a new study is made to build a second more reliable printed circuit.

The next stage is the practical study and characterization of the final arrangement. Finally, a test is made for the correct operation of the device where a series of experiments are carried out whose results confirm the theoretical analysis and design carried out. The last section lists the results of the layout and summarizes the observations that came after the construction.

# Περιεχόμενα

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>7</b>
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ.....</b>	<b>7</b>
Λειτουργίες ηλεκτρονικού φορτίου.....	7
<i>Σταθερό ρεύμα</i> .....	7
<i>Σταθερή τάση</i> .....	9
<i>Σταθερή αντίσταση</i> .....	10
<i>Σταθερή ισχύς</i> .....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>	<b>14</b>
<b>ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ.....</b>	<b>14</b>
<b>MOSFET.....</b>	<b>14</b>
<b>Power MOSFET.....</b>	<b>15</b>
<i>Αρχή λειτουργίας</i> .....	15
<i>Περιοχές λειτουργίας</i> .....	16
<i>Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των MOSFET ισχύος</i> .....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>	<b>25</b>
<b>ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>25</b>
Χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού φορτίου.....	25
Επιλογή των στοιχείων του κυκλώματος κατά την σχεδίαση.....	25
<b>MOSFET.....</b>	<b>25</b>
<b>Πόλωση MOSFET.....</b>	<b>26</b>
<b>Μέτρηση ρεύματος και τάσης.....</b>	<b>29</b>
<b>Τελεστικός ενισχυτής.....</b>	<b>30</b>
<b>Μικροελεγκτής.....</b>	<b>31</b>
<b>Είσοδοι.....</b>	<b>33</b>
<b>Έξοδος.....</b>	<b>34</b>
<b>Μέτρηση θερμοκρασίας.....</b>	<b>35</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>38</b>
<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....</b>	<b>38</b>
<b>Σχεδιασμός κυκλώματος προσομοίωσης.....</b>	<b>38</b>

Σύγκριση MOSFET .....	40
Κύκλωμα μέτρησης τάσης .....	41
Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος.....	42
Σχεδίαση τελικού κυκλώματος.....	44
1 <sup>ο</sup> Κύκλωμα ηλεκτρονικού φορτίου .....	44
Συμπεράσματα προσομοίωσης 1 <sup>ου</sup> κυκλώματος.....	46
2 <sup>ο</sup> Κύκλωμα ηλεκτρονικού φορτίου .....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>49</b>
Σχεδιασμός και Κατασκευή διάταξης.....	49
Κατασκευή κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου .....	49
Σχεδιασμός κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου version 2.0.....	50
Ανάλυση υποκυκλωμάτων .....	50
Σχεδιασμός κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου version 3.0.....	54
Πρόγραμμα μικροελεγκτή .....	58
Αποτελέσματα και μετρήσεις της διάταξης.....	61
Όργανα μέτρησης.....	61
Μετρήσεις ορθής λειτουργίας.....	61
Σύγκριση της του υλοποιημένου ηλεκτρονικού φορτίου με την αγορά .....	65
Μελλοντικές εξελίξεις.....	66
Συμπεράσματα.....	66
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>68</b>
<b>ΕΙΚΟΝΕΣ .....</b>	<b>70</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΛΕΚΤΗ.....</b>	<b>73</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΥΠΩΜΕΝΟΥ .....</b>	<b>104</b>

# Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας που βιώνουμε με την πάροδο των χρόνων, έχει επιφέρει μία νέα ηλεκτρονική εποχή. Η τεχνολογία συνδράμει καθοριστικά στην διευκόλυνση και στην αποπεράτωση του μεγαλύτερου μέρους των αναγκών του ανθρώπου, ιδίως την δεκαετία που διανύουμε όπου η καθημερινή ενασχόληση με την τεχνολογία έχει απέλθει σε νέα επίπεδα. Ο υπερκαταναλωτισμός με την υπερπαραγωγή αγαθών, χαρακτηρίζουν πλήρως την άμεση εξάρτηση των ανθρώπων από την τεχνολογία.

Με την δημιουργία μεγάλου όγκου προϊόντων που βασίζονται στην τεχνολογία, δημιουργείται ανάγκη για την επίλυση των προβλημάτων που εμφανίζονται σε αυτά. Όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές εμφανίζουν προβλήματα είτε λόγω γήρανσης των ημιαγωγών είτε λόγω εξωτερικών παραγόντων. Οι βλάβες δημιουργούν την ανάγκη για επίλυση των προβλημάτων καθώς η αντικατάσταση και η αγορά νέων αγαθών δεν είναι πάντοτε η λύση.

Η κινητήρια δύναμη όλων των ηλεκτρονικών είναι η τροφοδοσία τους. Τα τροφοδοτικά εμφανίζουν το μεγαλύτερο ποσοστό βλαβών και ως αποτέλεσμα υπάρχουν στο επίκεντρο των κέντρων επισκευής ηλεκτρονικών. Για την δοκιμή τροφοδοτικών υπάρχουν διατάξεις που ονομάζονται ηλεκτρονικά ή ρυθμιζόμενα φορτία και αναφέρονται σε ηλεκτρονικές διατάξεις οι οποίες δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη με τις ανάλογες τροποποιήσεις να εκλύει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά από ένα τροφοδοτικό.

Δυστυχώς, οι λύσεις ηλεκτρονικών φορτίων που υπάρχουν στο εμπόριο αποτελούν πολύ δαπανηρές επιλογές με πολύ υψηλό κόστος και η αγορά τους αποκλείεται από ένα μεγάλο μέρος των ανθρώπων. Εντούτοις, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις των βασικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μία διάταξη που λειτουργεί με τις ίδιες αρχές λειτουργίας που έχουν τα ηλεκτρονικά φορτία.

Το ηλεκτρονικό φορτίο που θα υλοποιηθεί, χρησιμοποιεί μία διάταξη παράλληλων MOSFET ισχύος, τα οποία οδηγούνται από μερικούς τελεστικούς ενισχυτές και έναν μικροελεγκτή. Περισσότερες διατάξεις τελεστικών ενισχυτών επιτελούν τον έλεγχο του ρεύματος και της τάσης και πραγματοποιείται παραμετροποίηση στο πρόγραμμα του μικροελεγκτή ώστε η διάταξη να λειτουργεί όπως ορίζει ο χρήστης.

Μία διάταξη MOSFET ισχύος, μπορεί με δύο όμοια κυκλώματα ελέγχου να χρησιμοποιεί τα ημιαγωγά στοιχεία του, είτε ως πηγές τάσης ώστε να λειτουργεί ως φορτίο σταθερής τάσης είτε ως απαγωγούς ρεύματος όπου θα λειτουργεί ως φορτίο σταθερού ρεύματος. Ακόμα, με μία παραμετροποίηση στα στοιχεία του ρεύματος και τάσης εισόδου, όπου γίνονται υπολογισμοί μπορεί να λειτουργήσει ως φορτίο σταθερής αντίστασης αλλά και σταθερής ισχύος.

Συνοψίζοντας, το ηλεκτρονικό φορτίο μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε συνδυασμό με πηγές τάσης όσο και με πηγές ρεύματος. Εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συσκευή είναι ο χαρακτηρισμός των προδιαγραφών ενός τροφοδοτικού, ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης και του σημείου μέγιστης ισχύος σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ καθώς και η δοκιμή DC-DC μετατροπέων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Ανάλυση του ηλεκτρονικού φορτίου

Το ηλεκτρονικό ή ρυθμιζόμενο φορτίο αποτελεί μία διάταξη ελέγχου ηλεκτρονικών ισχύος που έχει σχεδιαστεί για τον έλεγχο πηγών τροφοδοσίας. Μία πηγή χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία μιας συσκευής, αντιστοίχως το ηλεκτρονικό φορτίο χρησιμοποιείται για να ελέγξετε την παροχή (ρεύματος, τάσης και ισχύος) προσομοιώνοντας τη συσκευή υπό δοκιμή (DUT). Τα ηλεκτρονικά φορτία είναι συμπληρωματικές μονάδες ελέγχου σε εργαστήρια επισκευής και δοκιμάζουν ηλεκτρονικά κυκλώματα υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Συνήθως χρησιμοποιούνται από σχεδιαστές πηγών ισχύος για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση της γραμμικής κατάστασης καθώς και των χαρακτηριστικών που αναπτύσσονται στα μεταβατικά φαινόμενα [1].

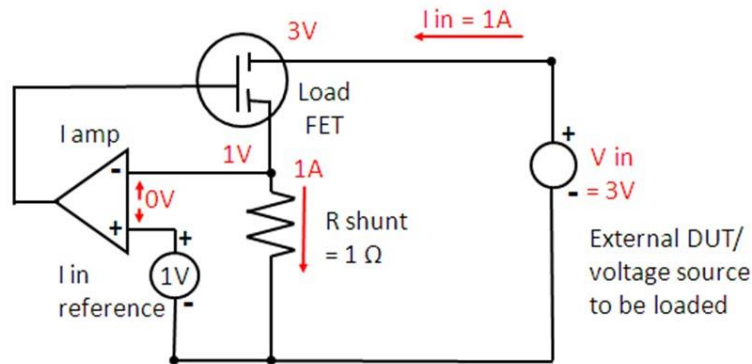
Η βιβλιογραφία των ηλεκτρονικών φορτίων περιορίζεται κυρίως στα στοιχεία και τις προδιαγραφές κατασκευαστών μοντέλων ηλεκτρονικών φορτίων. Διάφοροι κατασκευαστές όπως η Keithley, B&K Precision μεταξύ άλλων διαθέτουν ελεγχόμενες μονάδες φορτίου με ευρεία γκάμα χαρακτηριστικών όπως η συνολική ισχύ, η μέγιστη τάση εφαρμογής, το μέγιστο ρεύμα έκκλησης. Στην πορεία της μελέτης, θα γίνει σύγκριση της διάταξης που κατασκευάστηκε με τις διατάξεις που υπάρχουν στην αγορά.

### Λειτουργίες ηλεκτρονικού φορτίου

Το ηλεκτρονικό φορτίο ελέγχει τις πηγές ή τα μπλοκ τροφοδοσίας κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς. Ένα ηλεκτρονικό φορτίο είναι ένα προγραμματιζόμενο όργανο που προσφέρει στο χρήστη διάφορους τρόπους ελέγχου όπως σταθερή τάση (CV), σταθερό ρεύμα (CC), σταθερή ισχύ (CP) ή σταθερή αντίσταση (CR) [2]. Κάθε λειτουργία χρησιμοποιείται για διαφορετική πηγή και αναλύονται στην συνέχεια.

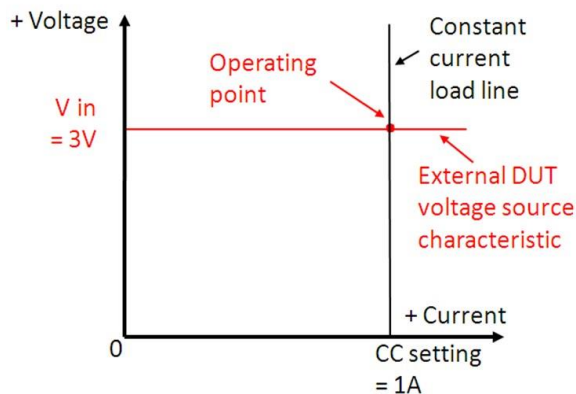
### Σταθερό ρεύμα

Οι πηγές τάσης, οφείλουν το όνομά τους στην ιδιότητά να προσφέρουν σταθερή τιμή τάσης με τιμή ρεύματος η οποία εξαρτάται από το φορτίο που συνδέεται στην έξοδο της πάντοτε με σεβασμό στην μέγιστη ονομαστική τιμή ισχύος της πηγής. Ένα ηλεκτρονικό φορτίο το οποίο χρησιμοποιεί τη λειτουργία σταθερού ρεύματος, μεταβάλλει την αντίσταση του κυκλώματος εξόδου με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει την διέλευση ρεύματος με τιμή η οποία μεταβάλλεται και ελέγχεται από τον χρήστη. Ρυθμίζοντας το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο, η τιμή της τάσης εξόδου της πηγής προς δοκιμή επιβάλλεται να διατηρείται σταθερή. Μία πτώση στην τιμή τάσης με εναλλαγή της τιμής ρεύματος αποδεικνύει πως η πηγή αντιμετωπίζει πρόβλημα και δεν μπορεί να εκλύσει το ζητούμενο ρεύμα.



**Εικόνα 1.1** – Σχηματικό κύκλωμα ηλεκτρονικού φορτίου σε λειτουργία σταθερού ρεύματος (CC).

Στην λειτουργία σταθερού ρεύματος, το ρεύμα που εκλύει το φορτίο ρυθμίζεται από την πόλωση ενός ημιαγωγού με μεταβλητή αντίσταση. Συνήθως τέτοιοι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται είναι MOSFET, BJT ισχύος καθώς και IGBT. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ένα FET, όσο περισσότερο πολώνεται η πύλη του αλλάζει η αγωγιμότητα του και διαρρέεται από περισσότερο ρεύμα. Με λιγότερη πόλωση στην πύλη, μειώνοντας την τάση (VGS) μικραίνει η αγωγιμότητα του με αποτέλεσμα να διαρρέεται από λιγότερο ρεύμα. Η μέτρηση του ρεύματος γίνεται από μία μικρή αντίσταση σε σειρά με το FET ώστε να συγκεντρώνει μικρή ισχύ και συνήθως αναφέρεται ως  $R_{SHUNT}$ . Η πόλωση του FET γίνεται από έναν τελεστικό ενισχυτή, συχνά σε λειτουργία ακολούθου τάσης με μία μεταβλητή πηγή τάσης στην είσοδό του [3].



**Εικόνα 1.2** – Καμπύλη μεταφοράς I/Vστην λειτουργία σταθερού ρεύματος.

Η καμπύλη μεταφοράς στην λειτουργία σταθερού ρεύματος απεικονίζεται στο σχήμα 2. Το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στην τομή της τάσης εξόδου από την πηγή υπό δοκιμή (DUT) με την σταθερή τιμή ρεύματος που διατηρεί το ηλεκτρονικό φορτίο. Η λειτουργία CC, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή πηγών τάσης και τη ρύθμιση φορτίου σε DC τροφοδοτικά. Η ρύθμιση φορτίου είναι η ικανότητα ενός τροφοδοτικού να παρέχει σταθερή τάση εξόδου υπό διακυμάνσεις φορτίου. Καθορίζεται ως ποσοστιαία



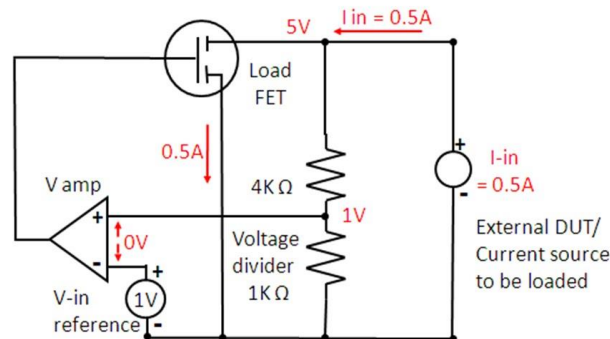
απόκλιση από την κανονική έξοδο σε σταθερή τάση εισόδου και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Ρύθμιση}_{\text{φορτίου}} = \frac{V_{OUT(MAX)} - V_{OUT(MIN)}}{V_{OUTname}} \quad (1.1)$$

## Σταθερή τάσης

Η λειτουργία σταθερής τάσης (CV) είναι πολύ παρόμοια με τη λειτουργία σταθερού ρεύματος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3. Το ηλεκτρονικό φορτίο θέτει μια σταθερή προγραμματιζόμενη τάση στους ακροδέκτες του ανεξάρτητα από το ρεύμα εισόδου. Το ρεύμα ρυθμίζεται από την πηγή ρεύματος που είναι συνδεδεμένη σε αυτό όπως ένα κύκλωμα φόρτισης ρεύματος. Το φορτίο (FET) προσαρμόζει την αντίστασή του δυναμικά για να επιτύχει την προγραμματισμένη τάση σε οποιοδήποτε ρεύμα που καθορίζεται από την υπό δοκιμή πηγή ρεύματος. Το φορτίο παρακολουθεί την τάση εισόδου της πηγής συνήθως διαμέσου ενός διαιρέτη τάσης και την συγκρίνει με μία τάση αναφοράς που εισάγει ο χρήστης. Στην περίπτωση που η μετρούμενη τάση είναι υψηλότερη από την τάση αναφοράς, ο τελεστικός ενισχυτής ενεργοποιεί το FET αναλογικά ώστε η τάση φορτίου να ταιριάζει με την τάση αναφοράς [2].

Η ανάδραση, επιτρέπει στο φορτίο να αλλάζει δυναμικά την αντίστασή του και να διατηρεί την προγραμματισμένη τάση ανεξάρτητα από τη διακύμανση του ρεύματος της συσκευής υπό έλεγχο. Βέβαια, η διακύμανση της τάσης του φορτίου δεν υπερβαίνει την μέγιστη τιμή που μπορεί να τροφοδοτήσει η πηγή.

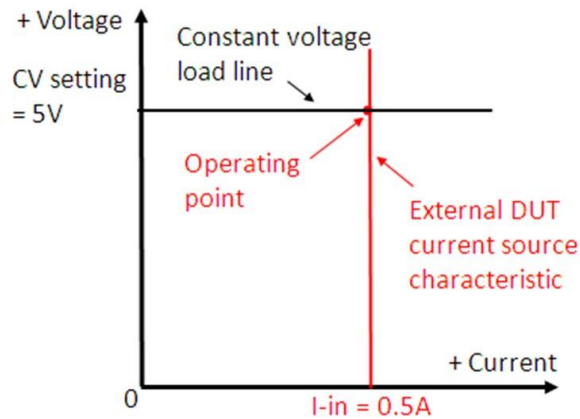


**Εικόνα 1.3** – Σχηματικό κύκλωμα ηλεκτρονικού φορτίου σε λειτουργία σταθερής τάσης (CV).

Η παραπάνω λειτουργία βρίσκει χρησιμότητα στον έλεγχο πηγών ρεύματος καθώς επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή φορτιστών μπαταριών όπου η λειτουργία CV μπορεί να μιμηθεί την τάση ακροδεκτών μίας μπαταρίας. Μία ακόμη συχνή χρήση της λειτουργίας είναι ο έλεγχος των ορίων ρεύματος από τροφοδοτικά σταθερής τάσης.

Η χρήση τέτοιων κυκλωμάτων χρειάζεται συνεχή επίβλεψη και επανέλεγχο της κατάστασης που βρίσκεται το φορτίο. Η απλούστερη μέθοδος ελέγχου επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν μικροελεγκτή. Με ανάδραση της τιμής της τάσης καθώς και του ρεύματος φορτίου, στον αλγόριθμο ελέγχου

χρησιμοποιείται μία μεταβλητή (flag) η οποία υποδεικνύει ότι το ρεύμα εξόδου είναι εντός του ορίου. Όταν το ρεύμα εισόδου φτάσει στο όριο ρεύματος που μπορεί να τροφοδοτήσει, το φορτίο δεν λειτουργεί πλέον σε λειτουργία CV καθώς η τάση εισόδου δεν διατηρείται πλέον σταθερή. Το ηλεκτρονικό φορτίο ρυθμίζει τώρα το ρεύμα εισόδου ώστε η πηγή να μην ξεπερνάει τα όριά της, διατηρώντας την τιμή της τάσης σταθερή. Σε αυτό το σημείο ενεργοποιείται μία μεταβλητή flag που επιδεικνύει την οριοθέτηση του ρεύματος φορτίου. Στην περίπτωση που η ονομαστική τιμή της τάσης ή η ονομαστική τιμή της ισχύος υπερβαίνουν την επιτρεπόμενη τιμή, η προστασία από υπερτάσεις ενεργοποιείται και αποκόπτεται η πηγή από το φορτίο.

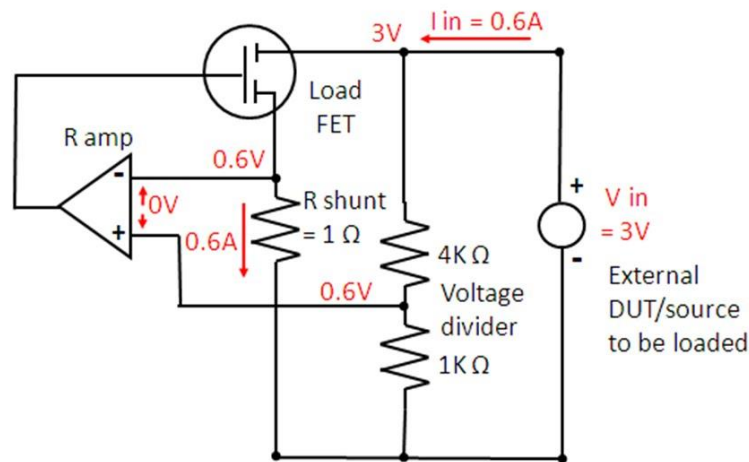


**Εικόνα 1.4** – Χαρακτηριστική καμπύλη I/V σε λειτουργία σταθερής τάσης με παράδειγμα πηγής 5V και ζήτηση ρεύματος 0.5A.

## Σταθερή αντίσταση

Υπάρχει μία λειτουργία ακόμα η οποία χρησιμοποιεί πολύ παρόμοια τοπολογία. Σε αντιπαράθεση με τις λειτουργίες CC και CV οι οποίες συγκρίνουν τιμές ρεύματος και τάσης με την ζητούμενη τιμή, στην λειτουργία σταθερής αντίστασης υπολογίζονται κάθε φορά τα χαρακτηριστικά της πηγής ώστε να αποδίδεται ο λόγος που επιλέγεται σε συμφωνία πάντοτε με τον τύπο του Ωμ. Υπολογίζεται κάθε φορά η τιμή του ρεύματος για τις πηγές τάσης καθώς και η τιμή της τάσης για τις πηγές ρεύματος ώστε ο λόγος τους να συμφωνεί με την ζητούμενη αντίσταση του εισάγει ο χρήστης.

Η λειτουργία σταθερής αντίστασης είναι κατάλληλη για πηγές ισχύος. Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V του ηλεκτρονικού φορτίου στην συγκεκριμένη λειτουργία απεικονίζεται στο σχήμα 5. Στις πηγές τάσης, το σημείο λειτουργίας βρίσκεται εκεί όπου η ονομαστική τάση εξόδου της πηγής προς έλεγχο, τέμνει την ευθεία που αντιπροσωπεύει το χαρακτηριστικό σταθερής αντίστασης. Στις πηγές ρεύματος, το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στην τομή της ονομαστικής τιμής ρεύματος της πηγής με το ρεύμα που υπολογίζεται από το γινόμενο του νόμου του Ωμ σύμφωνα με την επιλεγόμενη τιμή αντίστασης. Για παράδειγμα, για φορτίο με τιμή 5Ω η πηγή τάσης με ονομαστική τιμή 3V θα διαρρέει το κύκλωμα με ρεύμα 0.6A ενώ με πηγή ρεύματος 0.6A, το κύκλωμα θα σταθεροποιηθεί σε άντληση τάσης ίση με 3V.

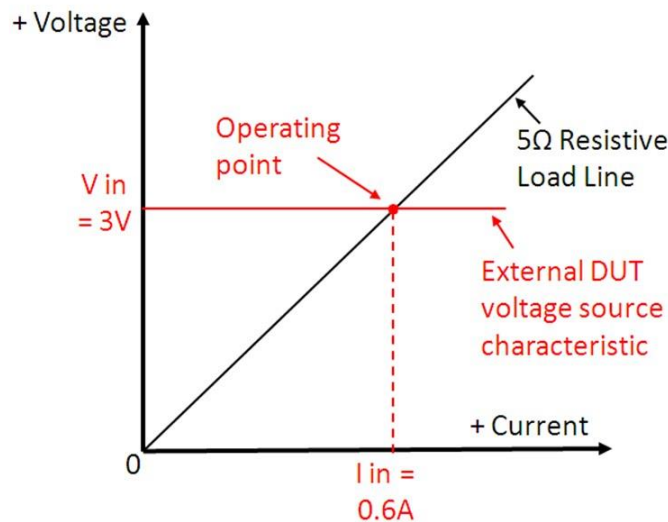


**Εικόνα 1.5** – Σχηματικό κύκλωμα ηλεκτρονικού φορτίου σε λειτουργία σταθερής αντίστασης (CR) για πηγή τάσης 3V με σταθερή αντίσταση 5Ω.

Η εκφόρτιση μιας μπαταρίας με ακριβές ωμικό φορτίο για τη δημιουργία ενός συγκεκριμένου προφίλ μίας μπαταρίας αποτυπώνει την χρήση της λειτουργίας σταθερής αντίστασης (CR). Το φορτίο πρέπει να ελέγχει κάθε φορά την τιμή της τάσης και του ρεύματος ώστε να μετριάξει την αντίσταση του FET. Για παράδειγμα, για να επιτευχθεί προγραμματιζόμενη αντίσταση 5 Ω η αναλογία μεταξύ τάσης και ρεύματος  $V / I$  θα πρέπει να είναι 5. Η τάση συνηθίζεται να υπολογίζεται από έναν διαιρέτη τάσης καθώς το ρεύμα αποτυπώνεται από την πτώση τάσης που εμφανίζεται πάνω σε μία αντίσταση που συνδέεται σε σειρά με το φορτίο (RSHUNT).

Ο τελεστικός ενισχυτής συγκρίνει την τάση εισόδου με την τιμή του ρεύματος εισόδου ώστε να ρυθμίσει σωστά την είσοδο από την πηγή υπό δοκιμή για την επιλεγμένη τιμή αντίστασης. Για ανίχνευση ρεύματος στο 1 A ανά V ( $R_{SHUNT}=1\Omega$ ), και μέτρηση τάσης από τον διαιρέτη ως το 1/5 της ονομαστικής τάσης της πηγής προς έλεγχο, η τιμή της αντίστασης που θέτει το ηλεκτρονικό φορτίο είναι 5Ω. Στην συνολική τιμή αντίστασης του φορτίου συμπεριλαμβάνεται η αντίσταση RSHUNT.

Στην περίπτωση που το ηλεκτρονικό φορτίο χρειάζεται να εξομοιώσει ένα ωμικό φορτίο 10Ω σε μία πηγή τάσης 5V, θα έχει αποτέλεσμα το φορτίο να διαρρέεται από ρεύμα 0.5A. Ο συντελεστής μεταξύ της αντίστασης RSHUNT και του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο είναι 2. Ρυθμίζοντας τον συντελεστή μπορούμε να προσομοιώσουμε οποιαδήποτε ωμική αντίσταση προσαρμόζοντας δυναμικά την πόλωση του FET για οποιαδήποτε τιμή εντός του εύρους του φορτίου.

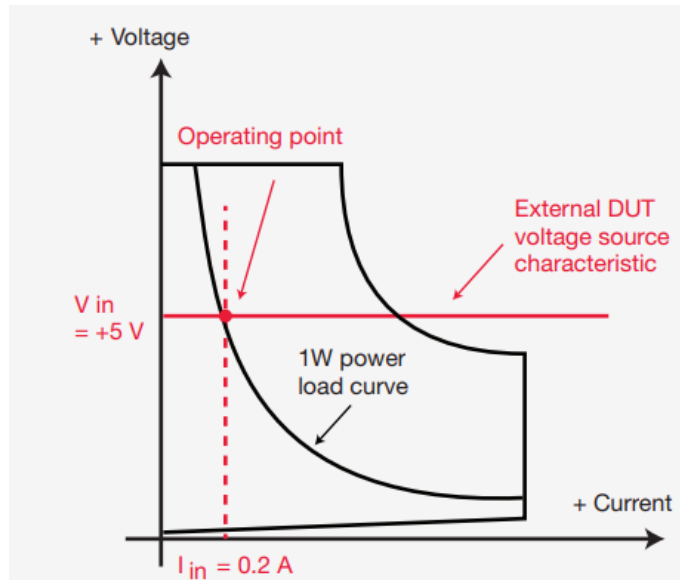


Εικόνα 1.6 - Χαρακτηριστική καμπύλη I/V σε λειτουργία σταθερής τάσης.

## Σταθερή ισχύς

Στη λειτουργία σταθερής ισχύος, το φορτίο απορροφά ισχύ με σταθερό μέτρο από την συσκευή προς έλεγχο. Η ισχύς ρυθμίζεται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της πηγής ελέγχου. Κατά τη δοκιμή μιας πηγής τάσης σε λειτουργία σταθερής ισχύος, το φορτίο ρυθμίζει το ρεύμα που εκλύει από την πηγή ώστε να απορροφήσει το προγραμματισμένο επίπεδο ισχύος. Κατά τη δοκιμή μιας πηγής ρεύματος, το φορτίο ρυθμίζει την τάση της πηγής ώστε το επίπεδο της ισχύος που καταναλίσκεται να αντιπροσωπεύει το προγραμματισμένο επίπεδο ισχύος. Το σχήμα 7 απεικονίζει το διάγραμμα I-V κατά τον έλεγχο μιας πηγής τάσης σε λειτουργία σταθερής ισχύος. Κατά τον έλεγχο μία πηγής τάσης με ονομαστική τιμή 5V σε λειτουργία σταθερής ισχύος 1W, το εκλούμενο ρεύμα από το ηλεκτρονικό φορτίο είναι 0,2A. Η καμπύλη κοντά στους άξονες αντιπροσωπεύει την πηγή ισχύος με τιμή 1W. Η δεύτερη καμπύλη που απέχει από τους άξονες αντιστοιχεί σε πηγή ισχύος με μεγαλύτερη τιμή.

Ο τρόπος λειτουργίας του ηλεκτρονικού φορτίου, ταυτίζεται με την εκφόρτιση μίας μπαταρίας κάτω από συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Μελετώντας τα χαρακτηριστικά, μπορούν να υπολογιστούν παράγοντες όπως ο χρόνος ζωής της μπαταρίας. Το φορτίο εκφορτίζει την μπαταρία με σταθερή ισχύ, προσομοιώνοντας την λειτουργία ενός DC σε DC μετατροπέα. Για παράδειγμα, μία μπαταρία με ονομαστική τάση 5V στην περίπτωση που θέλουμε να την εκφορτίσουμε με σταθερή ισχύ 1W, το ηλεκτρονικό φορτίο ελέγχει την τάση και το ρεύμα που εκλύεται μέσα από το φορτίο, στην συνέχεια ρυθμίζει την αντίσταση του FET ώστε να κρατήσει σταθερά την ισχύ του 1W.



Εικόνα 1.7 - Χαρακτηριστική καμπύλη I/V σε λειτουργία σταθερής ισχύος.

Το ηλεκτρονικό φορτίο διατηρεί την ζητούμενη ισχύ ανεξαρτήτως της διαφοράς στην τάση τροφοδοσίας της πηγής. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να καταναλωθεί από το φορτίο εξαρτάται από την ελάχιστη τάση που μπορεί να τροφοδοτήσει η πηγή καθώς και από την ελάχιστη τιμή αντίστασης βραχυκυκλώματος.

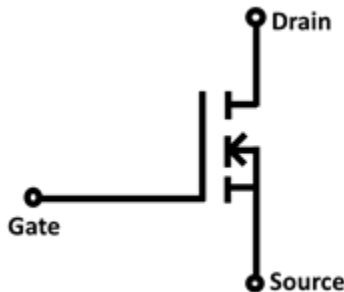
Καθώς εκφορτίζεται η μπαταρία, η τάση που εμφανίζεται στους πόλους της συνηθίζει να ελαττώνεται. Στην λειτουργία σταθερής ισχύος, το φορτίο εξισορροπεί την πτώση τάσης με έκλυση περισσότερου ρεύματος ώστε η ισχύς να παραμένει σταθερή.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Ημιαγωγοί ισχύος

### MOSFET

Μία απλή και οικονομική υλοποίηση του ηλεκτρονικού φορτίου μπορεί να γίνει από ημιαγωγούς που ονομάζονται MOSFET. Το FET ημιαγωγού οξειδίου-μετάλλου ή αλλιώς MOSFET αποτελεί μία διάταξη τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μονωμένης πύλης. Παρόμοια με το FET διαθέτει τρία άκρα, την πηγή, την πύλη και τον απαγωγό. Κύριο χαρακτηριστικό διαφοροποίησης του MOSFET από τους υπόλοιπους ημιαγωγούς διακόπτες είναι το ελάχιστο ρεύμα πόλωσης της πύλης ώστε να γίνεται ηλεκτρικά αγώγιμο. Η αγωγιμότητα του MOSFET ελέγχεται από την διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην πύλη και την πηγή. Η ικανότητα αυτής της εναλλαγής της αγωγιμότητας με την ποσότητα της εφαρμοζόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση ή τη μεταγωγή ηλεκτρικών σημάτων.



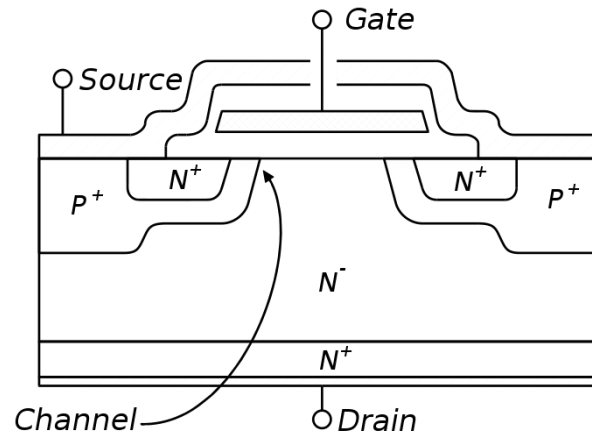
Εικόνα 2.1 – Απεικονιστική διάταξη ενός MOSFET τύπου n

Τα MOSFET εντοπίζουν διαφορές στην υλοποίηση της κατασκευής τους. Η διαφοροποίηση εμφανίζεται στην ικανότητα τους να αλλάζουν την αγωγιμότητά τους με την αλλαγή της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στην πύλη και την πηγή. Με αύξηση της διαφοράς δυναμικού, τα MOSFET που αυξάνουν αγωγιμότητα ονομάζονται enhancement mode καθώς όσα μειώνουν την αγωγιμότητά τους ονομάζονται depletion mode. Με την εμφάνιση θετικής τάσης ανάμεσα στην πύλη και την πηγή και υπάρχει αγωγιμότητα, το MOSFET ονομάζεται καναλιού n καθώς στην αντίθετη περίπτωση που άγει με την εφαρμογή αρνητικής τάσης, παίρνει την ονομασία καναλιού p.

## Power MOSFET

Ένα MOSFET ισχύος είναι ένας συγκεκριμένος τύπος τρανζίστορ πεδίου μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (MOSFET) που έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται σημαντικά επίπεδα ισχύος. Σε σύγκριση με άλλους ημιαγωγούς ισχύος, όπως ένα διπολικό τρανζίστορ με μόνωση πύλης (IGBT) ή ένα θυρίστορ, διαθέτει πλεονεκτήματα όπως η υψηλή ταχύτητα μεταγωγής και η καλή απόδοση σε χαμηλές τάσεις. Όπως και το IGBT, διαθέτει απομόνωση στην πύλη που διευκολύνει την οδήγηση του. Συνήθως οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν MOSFET, υπόκεινται σε επίπεδα τάσης τόσο οδήγησης όσο και ελέγχου σε αντιπαράθεση με τα επίπεδα υψηλού ρεύματος το οποίο είναι το ζητούμενο στην εφαρμογή μας.

Το power MOSFET είναι η πιο κοινή συσκευή ημιαγωγών ισχύος στον κόσμο, λόγω της γρήγορης ταχύτητας μεταγωγής, εύκολης ικανότητας παραλληλισμού πολλαπλών ημιαγωγών, μεγάλου εύρους ζώνης, ανθεκτικότητας, εύκολης οδήγησης, απλής πόλωσης, ευκολία εφαρμογής και ευκολία επισκευής.[4] Συγκεκριμένα, είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος διακόπτης χαμηλής τάσης (λιγότερο από 200 V). Μπορεί να βρεθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως τα περισσότερα τροφοδοτικά, μετατροπείς DC-σε-DC, ελεγκτές κινητήρα χαμηλής τάσης και πολλές άλλες εφαρμογές [5].



Εικόνα 2.2 – Τοπολογία ενός Power MOSFET τύπου

### Αρχή λειτουργίας

Ο έλεγχος των MOSFET, επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας την διαφορά δυναμικού μεταξύ της πύλης και της πηγής ( $V_{GS}$ ). Το ηλεκτρικό πεδίο έλκει ηλεκτρόνια στην περιοχή του σώματος που βρίσκεται κοντά στην πύλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αγωγίμου καναλιού. Προκειμένου το MOSFET να διαρρέεται από ρεύμα, βασική προϋπόθεση είναι η διαφορά δυναμικού  $V_{GS}$  να υπερβαίνει ένα κατώφλι ( $V_{GS_{TH}}$ ). Το κατώφλι είναι διαφορετικό σε κάθε MOSFET και το δίνει ο

κατασκευαστής.

## Περιοχές λειτουργίας

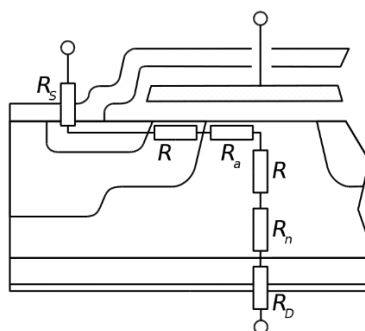
Η αύξηση της τάσης  $V_{GS}$  αλλάζει την αγωγιμότητα του καναλιού επιτρέποντας την διέλευση περισσότερων ηλεκτρονίων. Η συμπεριφορά αυτή είναι παρόμοια με αυτή μιας ωμικής αντίστασης, για τον λόγο αυτό, η περιοχή λειτουργίας ονομάζεται ωμική περιοχή. Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρείται μέχρι ένα σημείο πέρα από το οποίο η βάση αδυνατεί να δώσει περισσότερα ηλεκτρόνια, ο αγωγίμος δρόμος ανάμεσα στον απαγωγό και την πηγή δε δύναται να μεγαλώσει, οπότε κατ' επέκταση το ρεύμα  $I_{DS}$  παραμένει σταθερό και ανεξάρτητο της τάσης  $V_{DS}$ . Με άλλα λόγια, όταν το MOSFET βγαίνει από την ωμική περιοχή, συμπεριφέρεται σαν πηγή ρεύματος, ως προς την έξοδό του, και λειτουργεί πλέον στη γραμμική περιοχή [3].

Στην αποκοπή, το MOSFET είναι σε κατάσταση OFF και δεν υπάρχει καθόλου αγωγιμότητα ανάμεσα στην πηγή και τον απαγωγό. Ωστόσο, πρακτικά υπάρχει ένα μοντέλο που εξετάζει την επίδραση της θερμικής ενέργειας στην κατανομή Fermi-Dirac της ενέργειας που υπάρχει σε κάθε ηλεκτρόνιο στο κέλυφος του ημιαγωγού [6]. Ορισμένα από τα πιο ενεργητικά ηλεκτρόνια μεταπηδούν από την πηγή και εισέρχονται στο κανάλι και μεταβαίνουν στον απαγωγό, ένα φαινόμενο που οδηγεί σε ένα ρεύμα υποκατοφλίου. Ενώ στην αποκοπή, το ρεύμα μεταξύ απαγωγού και πηγής είναι ιδανικά μηδέν, πρακτικά υπάρχει ένα ασθενές και ανάστροφο ρεύμα διαρροής. Μία επίδραση τόσο της ενέργειας των ηλεκτρονίων όσο και της χωρητικότητας που εμφανίζεται σε κάθε ακροδέκτη του MOSFET. Για να αποφευχθεί η οποιαδήποτε ανεπιθύμητη διαρροή ή πόλωση, στην εφαρμογή θα εφαρμοστεί απομόνωση του MOSFET από το φορτίο.

## Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των MOSFET ισχύος

### Αντίσταση λειτουργίας

Μόλις η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην πύλη και την πηγή ξεπεράσει την τάση κατωφλίου  $V_{Gsth}$ , τότε το MOSFET γίνεται ηλεκτρικά αγωγίμο. Μεταξύ της πηγής και του απαγωγού εμφανίζεται μία αντίσταση αντιστρόφως ανάλογη της αγωγιμότητας που εμφανίζει το MOSFET και ονομάζεται  $R_{DS(ON)}$ . Στην αντίσταση που εμφανίζει το MOSFET έχουν συνεισφορά αρκετά στοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.



**Εικόνα 2.3** – Διαδοχικές αντιστάσεις που συνεισφέρουν στην συνολική αντίσταση ενεργής λειτουργίας

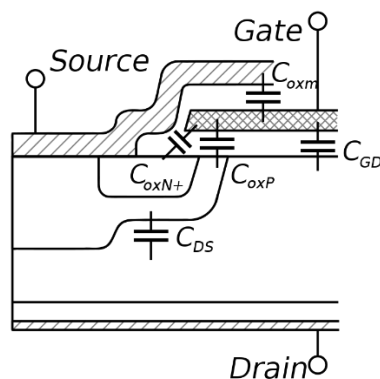


Οι κυριότερες αντιστάσεις που εμφανίζονται είναι οι εξής [4] :

- Η  $R_s$  είναι η αντίσταση που εμφανίζει η πηγή. Αντιπροσωπεύει την συνολική αντίσταση που εμφανίζει ο αγωγός της πηγής έως το κέλυφος του MOSFET. Περιλαμβάνει την αντίσταση που εμφανίζεται από την στιγμή που εισέρχεται το ηλεκτρόνιο έως την εξαγωγή του σε μία οπή στο επόμενο στρώμα.
- Η  $R_{CH}$  είναι η αντίσταση που εμφανίζει το κανάλι. Είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πλάτος του καναλιού καθώς και την πυκνότητα του καναλιού. Η αντίσταση του καναλιού είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που συνεισφέρουν στην  $R_{DSon}$  των MOSFET χαμηλής τάσης και έχει γίνει εντατική μελέτη για τη μείωση του μεγέθους των κυψελών τους προκειμένου να αυξηθεί η πυκνότητα του καναλιού.
- Η  $R_a$  είναι η αντίσταση εισόδου. Αντιπροσωπεύει την αντίσταση της επιτακτικής ζώνης ακριβώς κάτω από τον αγωγό της πύλης.
- Η  $R_{JFET}$  είναι το αποτέλεσμα της σμίκρυνσης των MOSFET που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η εμφύτευση οπών στην περιοχή p, εμφανίζει παρασιτικά JFET τρανζίστορ τα οποία τείνουν να μειώσουν την ροή του ρεύματος.
- Η  $R_n$  είναι η αντίσταση του στρώματος n. Ο ρόλος αυτού του στρώματος είναι να διατηρεί την τάση αποκλεισμού και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ονομαστική τάση του MOSFET. Ένα MOSFET υψηλής τάσης απαιτεί ένα παχύ στρώμα χαμηλής πρόσμειξης που έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη αντίσταση, καθώς οι συσκευές χαμηλής τάσης απαιτεί ένα λεπτό στρώμα με υψηλότερο δείκτη πρόσμειξης το οποίο προσδίδει μεγαλύτερη αγωγιμότητα.
- Η  $R_D$  είναι η αντίστοιχη αντίσταση του στρώματος του επαγωγού. Αντίστοιχα με την  $R_s$ , αντιπροσωπεύει την αντίσταση που εμφανίζει ο αγωγός του επαγωγού σε συνδυασμό με την δυσκολία μεταπήδησης των ηλεκτρονίων από το στρώμα στο επόμενο.

### Παρασιτικές χωρητικότητες

Αρκετά προβλήματα που εμφανίζουν στα MOSFET και η δυσκολία στον χειρισμό τους, οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στις χωρητικότητες που εμφανίζονται ανάμεσα στα διάφορα στρώματα. Αποτελεί και τον λόγο που οι ημιαγωγοί δεν κάνουν μεταγωγή στην κατάσταση OFF. Αυτές οι χωρητικότητες ονομάζονται  $C_{iss}$ ,  $C_{oss}$  και  $C_{rss}$  [6].



Εικόνα 2.4 – Παρασιτικές χωρητικότητες σε ένα MOSFET.

Η  $C_{iss}$  αναφέρεται στην χωρητικότητα εισόδου στην περίπτωση που οι αγωγοί drain & source είναι πρακτικά βραχυκύκλωμα. Η  $C_{oss}$  αναφέρεται στην χωρητικότητα εξόδου, με ουσιαστικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της πύλης και της πηγής. Η  $C_{rss}$  αναφέρεται στην χωρητικότητα ανάστροφης πόλωσης στην περίπτωση που η πηγή συνδέεται στην γείωση. Ο τύπος που συνδέει τις χωρητικότητες με τα στρώματα του MOSFET απεικονίζεται στον τύπο 2.1 .

$$\begin{aligned} C_{iss} &= C_{GS}^1 + C_{GD} \\ C_{oss} &= C_{GD} + C_{DS}^2 \\ C_{rss} &= C_{GD}^3 \end{aligned} \quad (2.1)$$

### Χρόνος έναυσης

Ο κατασκευαστής δίνει ένα στοιχείο που ονομάζεται total gate charge ( $Q_g$ ) και αναφέρεται στο συνολικό αριθμό ηλεκτρονίων που χρειάζεται η πύλη ώστε να μεταβεί ο διακόπτης στην κατάσταση ON. Στο IRFP150N το  $Q_g=110$  nC βέβαια για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά πόλωσης και πηγής ελέγχου. Ο χρόνος που θα χρειαστεί για να μεταβεί από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON ονομάζεται χρόνος έναυσης και τον δίνει ο κατασκευαστής ως  $t_{d(on)} + t_r = 67$  ns. Όπως είναι γνωστό, το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό είναι ανάλογο του πηλίκου των φορτίων με τον χρόνο κατά τον οποίο διαρρέεται οπότε μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα που θα χρειαστεί ώστε να φορτίσει η πύλη του MOSFET και να γίνει ηλεκτρικά αγωγίμο. [5]

$$I = \Delta Q / \Delta t = 110 \text{ nC} / 67 \text{ ns} = 1.64 \text{ A} \quad (2.2)$$

Με την εκκίνηση πόλωσης της πύλης του MOSFET, το απότομο ρεύμα (rush current) που θα προσπαθήσει να τραβήξει η πύλη πρέπει να περιοριστεί. Χρησιμοποιούμε μία αντίσταση σε σειρά ώστε να διατηρηθεί στα επιτρεπτά επίπεδα χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτισης και καταστροφής του MOSFET. Η τάση κατωφλίου που γίνεται αγωγή το MOSFET είναι  $V_{Gsth}=3.5\text{V}$ , οπότε :

$$R_{normal} = \frac{V}{I} = \frac{V_{Gsth}}{I_{rush}} = \frac{3.5}{1.64} = 2.13 \quad (2.3)$$

Επιλέγοντας μία αντίσταση σε σειρά με τιμή  $100\Omega$ , κάνουμε τους υπολογισμούς και προκύπτει :

<sup>1</sup>  $C_{GS}$  = χωρητικότητα μεταξύ της πύλης και της πηγής

<sup>2</sup>  $C_{DS}$  = χωρητικότητα μεταξύ του επαγωγού και της πηγής

<sup>3</sup>  $C_{GD}$  = χωρητικότητα μεταξύ της πύλης και του επαγωγού

$$I = \frac{V}{R_{100}} = \frac{V_{GSth}}{100} = \frac{3.5}{100} = 35mA \quad (2.3)$$

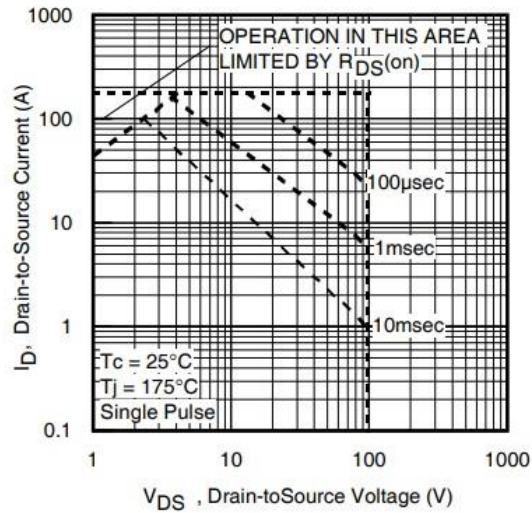
Βλέπουμε πως το ρεύμα που θα εκλυθεί από την πύλη του MOSFET είναι 35mA το οποίο είναι αποδεκτό. Το σύστημά μας μπορεί να δώσει τόσο ρεύμα και δεν θα δημιουργήσει πρόβλημα ούτε στην πύλη του MOSFET ούτε στην έξοδο του συστήματος πόλωσης. Η αντίσταση αυτή έχει διπλό ρόλο. Εκτός από περιοριστής ρεύματος μπορεί να περιορίζει τις ταλαντώσεις που οδηγούνται στην πύλη [7].

Ωστόσο, στην περίπτωση που η οδήγηση του MOSFET διαδραματίζεται από έναν μικροελεγκτή, πρέπει αν συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς το ρεύμα που μπορεί να τροφοδοτήσει ο μικροελεγκτής. Εφόσον δεν συμβαδίζουν το ρεύμα που ζητάει το MOSFET και το ρεύμα που μπορεί να παρέχει το ολοκληρωμένο, πρέπει να μπει μεγαλύτερη αντίσταση περιορισμού ανάμεσά τους. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται ο χρόνος έναυσης του διακόπτη καθώς θα χρειαστεί περισσότερο χρόνο ώστε να τροφοδοτηθεί με τα απαραίτητα φορτία ωστόσο διατηρείται η ασφάλεια της εφαρμογής εξολοθρεύοντας τον κίνδυνο για δημιουργία βλάβης στο MOSFET.

### Περιοχή Ασφαλούς λειτουργίας

Η συνεχής ανάπτυξη των ημιαγωγών στοιχείων και η μελέτη στα MOSFET, έχουν επικεντρωθεί στην δημιουργία στοιχείων που επικεντρώνονται στην υψηλή διακοπτική συχνότητα λειτουργίας καθώς ταυτόχρονα ελαττώνεται η αντίσταση που εμφανίζει μόλις γίνεται ηλεκτρικά αγωγίμο. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα MOSFET τείνουν να διαθέτουν μικρότερες διαστάσεις σε συνδυασμό με χαμηλότερες τιμές  $R_{DS(ON)}$ , μία ιδιότητα που επιδράει στην απαγωγή θερμικής ισχύος [5]. Με την λειτουργία των MOSFET στην γραμμική περιοχή λειτουργίας, η συρρίκνωση αυτή αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα καθώς χρησιμοποιούνται για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Σε τέτοιες εφαρμογές, διαρρέονται από μεγάλα ρεύματα καθώς ταυτόχρονα δέχονται υψηλή τάση για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Προκειμένου λοιπόν να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία των MOSFET ισχύος, πρέπει να ληφθούν υπόψιν, τόσο οι προδιαγραφές ισχύος, όσο και οι προδιαγραφές της ασφαλούς περιοχής λειτουργίας που παρέχει ο κατασκευαστής. Για το MOSFET IRF3710 οι προδιαγραφές που δίνει η International Rectifier για την ασφαλή λειτουργία τόσο για παλμούς όσο και στο DC βρίσκονται στην εικόνα 2.5. Από το γράφημα μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να εκκληθεί καθώς και για τον μέγιστο χρόνο σε θερμοκρασία δωματίου. [8]



**Εικόνα 2.5** – Διάγραμμα ασφαλούς λειτουργίας για το IRF3710.

Μελετώντας το datasheet του κατασκευαστή προκύπτει ότι για θερμοκρασία 100°C το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να εκλυθεί είναι τα 40 A. Στο figure 7, που βρίσκεται στους datasheet φαίνεται πως για πόλωση  $V_{GS} = 4.929V$  το ρεύμα που διαρρέει το κανάλι ισούται με 40A [8]. Βέβαια, τέτοιες τιμές ρεύματος είναι ικανό να εκλυθούν μόνο σε τροφοδοτικά με πολύ μικρή τάση εξόδου. Πρακτικά, το κέλυφος του MOSFET TO-220, συμπεριλαμβάνει περισσότερους περιορισμούς λόγω θερμικού φορτίου. Η ισχύς που καταναλίσκεται στο συγκεκριμένο κέλυφος δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 50W [8]. Για παράδειγμα, από ένα φορτίο με 12V τάση τροφοδοσίας μπορεί να εκλυθεί μόνο 4.16 A ρεύματος σε κάθε MOSFET ενώ αντίστοιχα από ένα φορτίο με 3.3V τροφοδοσίας μπορούν να εκλυθούν 15.1 A ανά MOSFET. Ωστόσο, η μεγάλη ανάγκη για ισχύ στο κύκλωμα σε συνεργασία με την μικρή θερμική αγωγιμότητα του συγκεκριμένου κελύφους και τα ελάχιστα περιθώρια αυξομειώσεως της  $V_{GS}$  η οποία έχει εκθετική μορφή στα μικρά ρεύματα καθιστούν το MOSFET IRF3710 μη πρακτικό για εφαρμογές με μεγάλη συνεχή κατανάλωση.

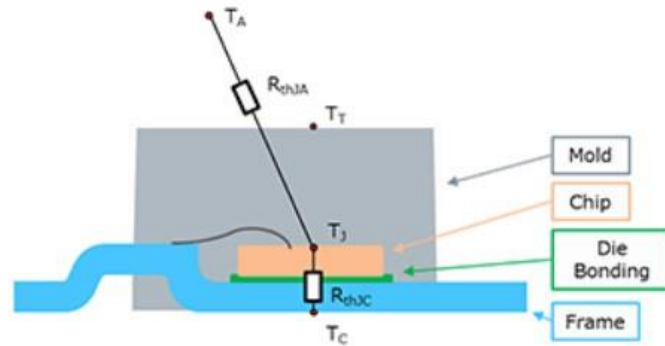
## Ψύξη

Στον σχεδιασμό ενός κυκλώματος, οι θερμικοί υπολογισμοί είναι απαραίτητοι. Ιδιαίτερα όταν πρόκειται για συσκευές ισχύος που διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες ισχύος, είναι εξαιρετικά σημαντικός ο υπολογισμός όχι μόνο για τη διάρκεια ζωής αλλά και για θέματα ασφάλειας. Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει επεξήγηση στην θερμότητα που εμφανίζεται στα MOSFET και στους τρόπους που μπορούμε να την διαχειριστούμε.

Ο διαμοιρασμός της θερμότητας γίνεται με εφαρμογή ενός συστήματος ψύξης. Οι επιλογές ψύξης διακρίνονται ως προς το μέσο που χρησιμοποιείται για τον διαμοιρασμό της θερμότητας προς το περιβάλλον. Αρχικά, ο βασικότερος τρόπος ψύξης που συναντάμε στα ηλεκτρονικά συστήματα ονομάζεται αερόψυξη (air cooler). Στην αερόψυξη, η επιφάνεια που δημιουργεί τα υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας

τοποθετείται σε μία μεγάλη επιφάνεια συνήθως μετάλλου η οποία ουσιαστικά λειτουργεί ως προέκταση της παθητικής ψύξης του υλικού. Στην συνέχεια, η μεταλλική επιφάνεια ψύχεται διαμέσου ροής αέρα που διαρρέεται ανάμεσα από τις μεταλλικές αυλακώσεις. Συνήθως, χρησιμοποιείται ένας ή περισσότεροι ανεμιστήρες οι οποίοι βοηθούν στην αύξηση της ροής αέρα ώστε ο χρόνος επαγωγής της θερμότητας να ελαχιστοποιηθεί. Για την επιλογή του τρόπου ψύξης γίνονται υπολογισμοί ώστε να προκύψουν οι θερμικές απαιτήσεις της εφαρμογής.

Η βασική δομή του κελύφους TO-247 που συναντάται στο MOSFET IRFP250N, απεικονίζεται στην εικόνα 2.6.



**Εικόνα 2.6** – Εσωτερική δομή για το πακέτο TO-247.

Αποτελείται από ένα πλαίσιο μολύβδου (Frame), έναν ευαίσθητο δεσμό (Die Bonding) μεταξύ του ολοκληρωμένου κυκλώματος (chip) και του κελύφους ρητίνης (Mold) που αποτελεί το οπτικό μέσο του πακέτου. Με τον όρο ένωση (junction) αναφερόμαστε στο σημείο σύνδεσης μεταξύ των υλικών P και N εσωτερικά του ολοκληρωμένου ή για απλοποίηση θα αναφερόμαστε στο ίδιο το ολοκληρωμένο [9]. Τα μεγέθη που απευθύνονται στον θερμικό συντελεστή μεταξύ των στοιχείων του αναφέρονται παρακάτω :

$T_A$ : θερμοκρασία περιβάλλοντος (ατμόσφαιρας)

$T_T$ : θερμοκρασία του κορμού του ολοκληρωμένου κυκλώματος (body of chip)

$T_C$ : θερμοκρασία πίσω επιφάνειας (πλαίσιο μολύβδου)

$T_T$ : θερμοκρασία επιφάνειας σώματος κελύφους

$R_{\theta JA}(\theta JA)$ : θερμική αντίσταση μεταξύ ολοκληρωμένου και περιβάλλοντος (Junction - Ambient)

$R_{\theta JC}(\theta JC)$ : θερμική αντίσταση μεταξύ ολοκληρωμένου και σώματος (Junction - Package)

### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	30	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	21	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	120	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	214	W
	Linear Derating Factor	1.4	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy②	315	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current①	30	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy①	21	mJ
$dv/dt$	Peak Diode Recovery $dv/dt$ ③	8.6	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
$T_{STG}$	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case )	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

### Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.7	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	40	

Εικόνα 2.7 – Μέγιστες τιμές χαρακτηριστικών για το IRF250N

Στην συνέχεια θα κάνουμε υπολογισμούς χρησιμοποιώντας τα μέγιστα επιτρεπόμενα χαρακτηριστικά του MOSFET της εφαρμογής. Με τον τύπο 2.4 υπολογίζουμε την μέγιστη ισχύ που μπορεί να εκλυθεί από ένα MOSFET.

$$P_D = \frac{T_J - T_C}{R_{thJC}} = \frac{175 - 25}{0.7} = 214\text{W} \quad (2.4)$$

Η θερμοκρασία  $T_J$  μπορεί να πάρει την μέγιστη τιμή των  $175^\circ\text{C}$ . Η θερμοκρασία διάσπασης είναι τα  $175^\circ\text{C}$  οπότε θέλει πολύ προσοχή. Η αντίσταση  $R_{thJC}$  έχει μέγιστη τιμή  $0.7^\circ\text{C/W}$  και αντικατοπτρίζει την αντίσταση που εμφανίζει στους  $25^\circ\text{C}$ . Η ισχύς που προκύπτει είναι τα  $178\text{W}$  και αποτελεί το μέγιστο όριο. Στην πράξη δεν μπορεί να επιτευχθεί καθώς για να διατηρηθεί η μέγιστη θερμοκρασία του ολοκληρωμένου χρειάζεται εξαιρετικά καλή ψύξη χωρίς να αυξηθεί στο ελάχιστο η θερμοκρασία κάτι που θα επιφέρει την διάσπασή του [10].

Στον υπολογισμό της μέγιστης ισχύς, τα δεδομένα μας είναι πως η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $25^\circ\text{C}$ . Όμως μόλις η θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλάξει, η αντίσταση  $R_{thJC}$  δεν θα έχει τιμή  $0.7^\circ\text{C/W}$ . Σε πραγματικές συνθήκες, η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν θα είναι ποτέ στους  $25^\circ\text{C}$ . Μόλις ξεκινήσει να θερμαίνεται το MOSFET και η ψήκτρα διαχέει την θερμότητα στο περιβάλλον, η θερμοκρασία του χώρου θα αυξηθεί. Με αποτέλεσμα το δεδομένο της μέγιστης ισχύς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καμία εφαρμογή. Για τον προσδιορισμό της αντίστασης  $R_{thJC}$  πρέπει να γίνουν μετρήσεις υπό κανονικές συνθήκες. Ωστόσο, χρειάζεται συγκεκριμένα όργανα μέτρησης και τεχνικές που δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν [7].

Για να υπολογίσουμε την συνολική θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί στο MOSFET, ουσιαστικά χρειάζεται να προσθέσουμε όλες τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μεταξύ των στοιχείων εσωτερικά του. Έχουμε την θερμοκρασία του ολοκληρωμένου με το περίβλημα, την θερμοκρασία που επιφέρει το προστατευτικό

pad σιλικόνης και η πάστα θερμοαπαγωγής καθώς δεν μπορεί να μεταφέρει όλη την θερμοκρασία στην ψήκτρα<sup>4</sup> [11], η θερμοκρασία από την αντίσταση που εφαρμόζεται μεταξύ της ψήκτρας και της πίσω επιφάνειας<sup>5</sup> [12] καθώς και η θερμοκρασία που έχει το περιβάλλον.

Έχουμε :

$$T_{total} = T_{JC} + T_{CHeatSink} + T_{Heat\ sink} + T_A \quad (2.5)$$

Έστω ότι η ισχύς που θα αντλήσει το MOSFET σε μερικές διακριτές τιμές ισχύος, παραθέτονται στην συνέχεια.

Δεδομένα	43W	50W	75W	100W
$T_{JC}=(0.7^{\circ}\text{C}/\text{W})$	30.1 °C	35 °C	52.5 °C	70 °C
$T_{CH}=(0.4^{\circ}\text{C}/\text{W})$	17.2 °C	20 °C	30 °C	40 °C
$T_H=(0.63^{\circ}\text{C}/\text{W})$	27.1 °C	31.5 °C	47.25 °C	63 °C
$T_A=(25^{\circ}\text{C})$	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C
$T_{total}$	99.4 °C	111.5 °C	154.75 °C	198 °C

**Πίνακας 2.1** – Υπολογισμός της θερμοκρασίας που αναπτύσσετε σε κάθε MOSFET

Συμπερασματικά, η θερμοκρασία καταστροφής του IRFP250N σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι 175°C. Για ασφάλεια, η θερμοκρασία που επιλέγετε να διατηρείται σε κάθε MOSFET είναι οι 100°C καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους 100°C μπορεί να γίνει αστραπιαία με αποτέλεσμα την καταστροφή του ημιαγωγού. Στην πράξη, κάθε MOSFET IRFP250N μπορεί να καταναλώσει έως 43W.

### Ανεμιστήρας δύο επαφών

Ένας DC ανεμιστήρας δύο επαφών, έχει δύο περιοχές λειτουργίας και είτε λειτουργεί είτε δεν λειτουργεί. Με εφαρμογή της ονομαστικής του τάσης λειτουργεί στο μέγιστο των στροφών λειτουργίας (rpm) καθώς στην περίπτωση που δεν τροφοδοτείται δεν υπάρχει καθόλου περιστροφή.

### Ανεμιστήρας τριών επαφών

Εκτός από τους απλούς ανεμιστήρες δύο επαφών, υπάρχουν και οι ανεμιστήρες ρυθμιζόμενων στροφών λειτουργίας. Σε έναν ανεμιστήρα με τρεις επαφές, ο έλεγχος των στροφών επιτυγχάνεται με αυξομείωση της τάσης. Συγκεκριμένα, η πρώτη επαφή συνδέεται στην γείωση, η δεύτερη επαφή συνδέεται στην

<sup>4</sup>  $T_{case-heatsink} = 0.40^{\circ}\text{C}/\text{W}$

<sup>5</sup>  $T_{heatsink} = 0.63^{\circ}\text{C}/\text{W}$

ονομαστική θετική τάση και η τρίτη επαφή αντιστοιχεί το σήμα ελέγχου. Η τάση αυξομειώνεται από την μέγιστη τιμή έως και μερικά volt λιγότερο. Το σήμα ελέγχου, αποτελείται από δύο παλμούς σε χρονικό διάστημα μίας περιστροφής, δημιουργείται από τον ανεμιστήρα και τροφοδοτείται πίσω για μέτρηση και απεικόνιση των στροφών.

### **Ανεμιστήρας τεσσάρων επαφών**

Ο έλεγχος των στροφών επιτυγχάνεται με διαφορετικό τρόπο. Οι πρώτες τρεις επαφές είναι τα ίδια σήματα όπως προηγουμένως με την διαφορά ότι υπάρχει και ένα τέταρτο σήμα το οποίο ελέγχει τις στροφές με ρύθμιση του εύρους των παλμών (PWM). Εσωτερικά στον ανεμιστήρα, υπάρχει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιεί PWM σήμα και ελέγχει την ισχύ που τροφοδοτείται στον ανεμιστήρα. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται η ταχύτητα του.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Σχεδιασμός κυκλώματος

### Χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού φορτίου

Για τον σχεδιασμό της διάταξης, πρωταρχικό βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός των ζητούμενων χαρακτηριστικών που επιθυμούμε να έχει το ηλεκτρονικό φορτίο. Τα στοιχεία καθορίστηκαν ως εξής:

- Μέγιστη εκλυόμενη ισχύς ( $P_{LOAD}$ ) : 150W
- Μέγιστη τάση Ακροδεκτών ( $V_{LOAD}$ ) : 100V
- Μέγιστο ρεύμα πόλωσης ( $I_{LOAD}$ ) : 30A

Η ισχύς που καταναλώνει το κύκλωμα, αποδίδεται σε θερμική ισχύ και αποτελεί τον πρώτο και σημαντικότερο χαρακτηριστικό της διάταξης. Η τιμές ρεύματος και τάσης είναι εξαρτημένες από την συνολική ισχύ που αποδίδει το ηλεκτρονικό φορτίο. Η μελέτη έγινε ώστε να υπάρχει η δυνατότητα έκλυσης έως 60A από πηγές τάσης. Αυτό το χαρακτηριστικό επιφέρει μία εκλυόμενη ισχύς η οποία σε πηγές τάσης 5V ανέρχεται σε 300W καθώς πηγές 12V έχουν μεγαλύτερη θερμική ισχύ η οποία όπως θα δούμε στην συνέχεια περιορίζεται από το σύστημα ψύξης και δεν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεγαλύτερης τιμής. Η μέγιστη τιμή τάσης που εισέρχεται στο δικτύωμα περιορίστηκε στην πρώτη κατασκευή στα 80V και στην συνέχεια στην επόμενη στα 100V καθώς οι περισσότερες εμπορικές πηγές τάσης dc δεν υπερβαίνουν τα 50V λόγω ασφαλείας.

### Επιλογή των στοιχείων του κυκλώματος κατά την σχεδίαση

#### MOSFET

Το ημιαγωγό στοιχείο που θα χρησιμοποιηθεί και θα μελετηθεί στο κύκλωμα εξόδου είναι το Power MOSFET. Συγκεκριμένα n-enhancement Power MOSFET καθώς η πόλωση τους επιτυγχάνεται με θετική τάση στην πύλη-πηγή ( $V_{GS}$ ). Τα MOSFET τύπου πύκνωσης (enhancement) διακρίνονται από το απειροελάχιστο ρεύμα διαρροής από την πύλη και προτιμώνται σε ψηφιακά κυκλώματα.

Μελετώντας τα χαρακτηριστικά των MOSFET, το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που θα μας απασχολήσει είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαρρέεται σε συνδυασμό με μια υψηλή αντοχή σε μεγάλες τιμές ισχύος. Το MOSFET που θα επιλεγεί πρέπει να έχει αρκετά υψηλό ρεύμα διαρροής γνωστό και ως ρεύμα βραχυκυκλώματος ( $I_{DSS}$ ) ώστε να μην καταστραφεί στην απαιτητική χρήση που προορίζεται. Ακόμα, η τάση διάσπασης ( $V_{DSS}$ ) χρειάζεται να είναι περισσότερη από την τάση ακροδεκτών που

επιλέξαμε ( $V_{LOAD}$ ). Η θερμική ισχύς ( $P_D$ ) που αναπτύσσεται στο περίβλημα, επιφέρει μείωση στην απόδοση του (Linear Derating Factor) με συνέπεια την μείωση σε μεγάλο βαθμό των υπόλοιπων χαρακτηριστικών του MOSFET. Το περίβλημα που φιλοξενεί τον ημιαγωγό έχει επίπτωση στην θερμική επαγωγή και πρέπει να συμπεριληφθεί. Τέλος, ο παράγοντας του κόστους συνοψίζει τους παράγοντες που συνέβαλαν στην μελέτη επιλογής MOSFET. Στην συνέχεια, παραθέτετε ο πίνακας με τα υποψήφια MOSFET, τα χαρακτηριστικά που διαθέτουν και τους λόγους που έγινε η επιλογή.

MOSFET	$I_D(25^\circ\text{C})$ at 10VGS	$V_{DSS}$	$P_D(25^\circ\text{C})$	$R_{DS(ON)}$	$R_{\theta JC}$	Case	Cost
IRFP250N	30 A	200 V	214 W	0.075 $\Omega$	0.70 $^\circ\text{C/W}$	TO-247	3.4 €
IRF3710	57 A	100 V	200 W	0.023 $\Omega$	0.75 $^\circ\text{C/W}$	TO-220	2.3 €
IXFN140n20p	115 A	200 V	680 W	0.018 $\Omega$	0.40 $^\circ\text{C/W}$	SOT-227	32.5 €
IXTH140N075L2	140 A	75V	540 W	0.011 $\Omega$	0.23 $^\circ\text{C/W}$	TO-247	27 €

**Πίνακας 3.1** – Σύγκριση χαρακτηριστικών MOSFET

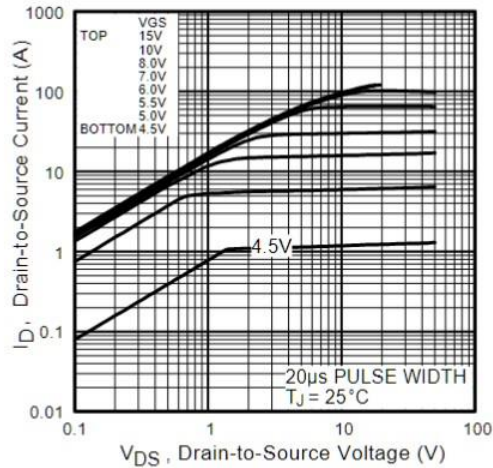
Τα καλύτερα χαρακτηριστικά για την εφαρμογή εμφανίζονται στα δύο MOSFET της IXYS με μεγάλες τιμές έκλυσης ισχύος σε κάθε μονάδα, που συνεπάγεται μεγαλύτερη τιμή ρεύματος εκροής και τάσης στα άκρα τους. Σαφώς υποδεέστερα χαρακτηριστικά διαθέτουν οι οικονομικότερες επιλογές της International Rectifier ωστόσο η τιμή οριοθετεί την επιλογή και επιτρέπει την χρήση περισσότερων από μία μονάδων ώστε να επάγουμε τα ίδια χαρακτηριστικά και σε πολύ καλύτερο κόστος.

Αρχική επιλογή αποτέλεσε το MOSFET IRFP3710 με μοναδικό κριτήριο το ρεύμα βραχυκυκλώματος καθώς διαθέτει πολύ κοντινά επίπεδα θερμικής ανοχής με το IRFP250N. Το φυλλάδιο του κατασκευαστή του IRF3710 το θέτει κατάλληλο για εφαρμογές με πολύ χαμηλή αντίσταση λειτουργίας σε συνδυασμό με switching κυκλώματα με ταχύτατες εναλλαγές ανοίγματος και κλεισίματος [8].

Ο δεύτερος υποψήφιος IRFP250N αποτελεί μία πιο συμβατή επιλογή για την εφαρμογή καθώς είναι χαρακτηρισμένο για εφαρμογές χιονοστιβάδας. Η μεγαλύτερη αντίσταση στην κατάσταση λειτουργίας, αποτελεί προσόν καθώς επιζητούμε θερμική ισχύ οπότε και η μεγαλύτερη τιμή αντίστασης διαθέτει μεγαλύτερη πτώση τάσης συνεπώς μεγαλύτερη ισχύς αναπτύσσεται επάνω στο MOSFET [9]. Η μεγαλύτερη τιμή αντίστασης επηρεάζει και την γραμμικότητα στην μεταβολή της αντίστασης. Η γραμμικότητα είναι πολύ σημαντική καθώς βοηθάει στον έλεγχο του MOSFET.

## Πόλωση MOSFET

Το MOSFET αποτελεί έναν ημιαγωγό ο οποίος μεταβάλλει την αγωγιμότητά του με εφαρμογή κατάλληλης τάσης  $V_{GS}$ . Υπάρχει ένα κατώφλι  $V_{GS(TH)}$  το οποίο αποτυπώνει το κατώτερο όριο κατά το οποίο το MOSFET βρίσκεται στην αποκοπή. Όμως, όσο αυξάνεται η τάση  $V_{GS}$  τόσο περισσότερο ανοίγει το κανάλι μέσα από το οποίο διαρρέουν ηλεκτρόνια από το Drain στο Source. Το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος εμφανίζεται με εφαρμογή μεγάλης τάσης  $V_{GS}$  πολύ κοντά στην τιμή διάσπασης του στρώματος της πύλης. Ας πάρουμε παράδειγμα το IRFP250N, σύμφωνα με το datasheet του κατασκευαστή εφαρμόζοντας τάση  $V_{GS}=15\text{V}$  με μορφή παλμών, το ρεύμα που διαρρέει τον ημιαγωγό μπορεί να φτάσει στην μέγιστη τιμή των 100A ενώ για  $V_{GS}=5\text{V}$  το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαρρέεται από το MOSFET είναι κάτι λιγότερο από 10A.



Εικόνα 3.1 – Χαρακτηριστικές καμπύλες του IRFP250N που απεικονίζουν του ρεύμα εξόδου για διάφορες τάσεις  $V_{GS}$  με χρήση παλμών.

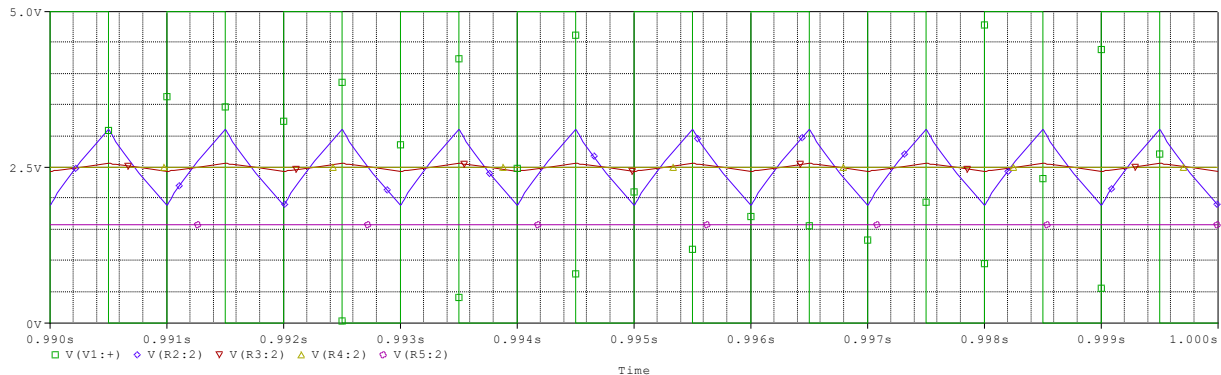
Οι τρόποι πόλωσης διακρίνονται από την ιδιότητα να τροφοδοτούν είτε συνεχόμενα είτε διακεκομμένα. Η συνεχόμενα διακοπτική (switching) λειτουργία χρησιμοποιείται κατά κόρων καθώς επιφέρει υψηλότερες αποδόσεις με καλύτερους συντελεστές (efficiency) στα κυκλώματα καθώς ελαχιστοποιείται η μετατροπή της εκλυόμενης ενέργειας σε θερμική η οποία είναι συνώνυμη της απώλειας. Ένα κύκλωμα που χρησιμοποιεί παλμούς, προσθέτει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην εφαρμογή καθώς πρέπει να υπολογιστούν παράγοντες όπως η ταχύτητα ανοίγματος και κλεισίματος της πύλης, το ρεύμα που χρειάζεται ώστε να ξεκινήσει να άγει το MOSFET ( $Q_g$ ) καθώς και οι παρασιτικές χωρητικότητες που εμφανίζονται σε κάθε αγωγό στις υψηλές συχνότητες. Τέλος, ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα οδήγησης είναι μονόδρομος στην περίπτωση που επιλεγεί η λειτουργία με παλμούς.

Η πόλωση με συνεχή τάση αποτελούν έναν απλούστερο τρόπο όπου γίνεται επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αγωγιμότητα στο MOSFET με αύξηση της τάσης. Οι τρόποι πόλωσης που μελετήθηκαν παραθέτονται παρακάτω.

### ***PWM με ολοκλήρωση***

Μία από τις λειτουργίες που διαθέτουν οι περισσότεροι μικροελεγκτές αποτελεί η δημιουργία παλμών PWM. Σε μία καθορισμένη έξοδο του μικροελεγκτή, δημιουργούνται τετραγωνικοί παλμοί με συγκεκριμένο μήκος και ορισμένη συχνότητας συνήθως στην περιοχή των KHz. Η ιδιότητα των παλμών να μεταβάλλουν το πλάτος τους στην συχνότητα τους καθιστά ένα πολύ εύχρηστο εργαλείο για τον έλεγχο ημιαγωγών. Μεταβάλλοντας το πλάτος του παλμού, καθώς η συχνότητα και το μήκος των παλμών είναι ορισμένο και σταθερό, μεταβάλλεται η ισχύς που καταναλώνεται. Καθώς οι παλμοί έχουν πλάτος με τιμή όση η τάση τροφοδοσίας, με κατάλληλη συνδεσμολογία το MOSFET λειτουργεί ως διακόπτης. Κατά την διάρκεια που ο παλμός έχει θετικό μέτωπο το κύκλωμα είναι κλειστό και διαρρέεται από ρεύμα καθώς την περίοδο που ο παλμός βρίσκεται στο αρνητικό μέτωπο, η τάση  $V_{GS}$  δεν είναι αρκετή ώστε να ξεπεράσει

την τάση κατωφλίου με αποτέλεσμα να μην ρέει ρεύμα από το κύκλωμα. Για την επιλογή των σωστών μονάδων αντίστασης και πυκνωτή, διεξάγει μία προσομοίωση στο πρόγραμμα OrCad PSpice όπου συνδέθηκαν διάφοροι πυκνωτές με διάφορες τιμές αντιστάσεων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στην εικόνα 3.2 όπου αποτυπώνεται η κυμάτωση που εμφανίζεται σε κάθε περίπτωση. Συμπεραίνουμε πως η βέλτιστη τιμή αντίστασης που επιλέχθηκε είναι τα 10kΩ με πυκνωτή 10μf καθώς επιτυγχάνεται η βέλτιστη μετατροπή του τετραγωνικού παλμού σε συνεχές τάση σε έναν χαμηλό χρόνο όπως είναι το ένα δευτερόλεπτο.



**Εικόνα 3.2** – Αποτελέσματα προσομοίωσης για το κύκλωμα ολοκλήρωσης με αντίσταση 10k και διάφορες τιμές πυκνωτών<sup>6</sup>.

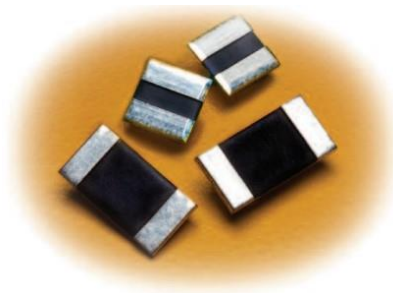
### ***Digital to Analog converter***

Μία διαφορετική υλοποίηση του κυκλώματος πόλωσης με συνεχή στάθμη, χρησιμοποιεί ολοκληρωμένα κυκλώματα μεταγωγής του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC). Το ψηφιακό σήμα παράγεται από έναν μικροελεγκτή και τροφοδοτείται στην είσοδο του ολοκληρωμένου. Η έξοδος του ανέρχεται σε στάθμη ανάλογη με το ψηφιακό σήμα. Το ολοκληρωμένο MCP4725 αποτελεί ένα DAC με διακριτική ικανότητα στα 12-bit. Μεταφράζοντας το νούμερο, σε ένα κύκλωμα που διαθέτει τάσεις από 0V έως 3.3V υπάρχει η δυνατότητα να αναπαραστήσουμε την αναλογική τάση με την τιμή 0 έως 4096 όπου το 4096 αντιστοιχεί στα 3.3V και το 0 αποτυπώνει την τάση 0V. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας I2C αποτελεί τον τρόπο που ανταλλάζει πληροφορίες ο μικροελεγκτής με το ολοκληρωμένο [13]. Ειδικότερα, το πρωτόκολλο I2C αποτελεί έναν σειριακό δίαυλο επικοινωνίας μεταξύ δύο ή και περισσότερων συσκευών οι οποίες συνδέονται με δύο αγωγούς. Υπάρχουν δύο ψηφιακά σήματα, ο αγωγός με την πληροφορία του χρόνου SCL (χρονισμός) και ο αγωγός με τα δεδομένα (SDA). Όλες οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους διαμέσου από την κύρια συσκευή (Master) και ονομάζονται slaves.

<sup>6</sup> Ειδικότερα η αντιστοιχία των κυματομορφών με τα χρώματα είναι πράσινο για την κυμάτωση εξόδου, μπλε για πυκνωτή 100nF, κόκκινο για πυκνωτή 1μF, κίτρινο για πυκνωτή 10μF και μωβ για πυκνωτή 100μF.

## Μέτρηση ρεύματος και τάσης

Ο απλούστερος τρόπος για να μετρήσουμε το ρεύμα που διαρρέει ένα δικτύωμα, χρησιμοποιεί μία αντίσταση διακριτής τιμής σε σειρά με ολόκληρη την διάταξη. Η αντίσταση αναπτύσσει μία πτώση τάσης στα άκρα της ανάλογη με το ρεύμα που την διαρρέει. Χρησιμοποιώντας τον τύπο του Ωμ, υπολογίζουμε το ρεύμα που διαρρέει όλο το δίκτυωμα. Τέτοιες αντιστάσεις εμφανίζονται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα για μία πληθώρα από χρήσεις. Ένας τύπος αντίστασης σε κέλυφος TO-220 αποτελεί η PWR221T-30 σειρά της BOURNS η οποία ενδείκνυται για χρήση που απαιτεί κατανάλωση ισχύος μέχρι 30W. Ένας πιο συνηθισμένος τύπος αντίστασης μέτρησης ρεύματος αποτελούν οι SMD αντιστάσεις ακριβείας (1%) με τιμή ορισμένων mOhms. Μία μικρή αντίσταση, έχει ελάχιστη πτώση τάσης στα άκρα της οπότε δεν υπάρχει κατανάλωση ισχύος συγκρίσιμη της συνολικής και δεν επιφέρει ουσιαστικό σφάλμα στο κύκλωμα.



**Εικόνα 3.3** – Αντίσταση επιφανειακής στήριξης για μέτρηση ρεύματος από την εταιρία KOA.

Η αντίσταση PSIDTEB1L00F αποτελεί μία λύση αντίστασης ακριβείας με ανοχή 1% με αντίσταση 1 mOhm και επίπεδο ισχύος μέχρι 3W. Μεταφράζοντας το τελευταίο στοιχείο, το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαπεράσει την αντίσταση σε θερμοκρασία που δωματίου είναι 54A και υπολογίζεται από τον τύπο 3.1.

$$P = I^2 \times R \Rightarrow$$
$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{3}{0.001}} = 54.77 A \quad (3.1)$$

Ο θερμικός συντελεστής (TCR) που εμφανίζει η συγκεκριμένη αντίσταση είναι τα 50 ppm/°C. Ουσιαστικά, κάθε βαθμό κελσίου η αντίσταση της μεταβάλλεται 50 εκατομμυριοστά. Μεταφράζοντας τον συντελεστή, η τιμή της αντίστασης που μελετούμε δεν θα μεταβληθεί περισσότερο από 0.000050 Ωμ για κάθε Ωμ αντίστασης για κάθε βαθμό κελσίου που αυξάνεται η θερμοκρασία πάνω από τους 25 βαθμούς. Για να κατανοήσουμε καλύτερα αυτή την μεταβολή, υπολογίζουμε την τιμή της αντίστασης σε ορισμένες τιμές θερμοκρασίας. Οπότε έχουμε :

$$R = TCR \times R \times T + R_{25} \Rightarrow$$
$$R_{100C} = 0.000050 \times 0.001 \times 50 + 0.001 = 0.001005 \Omega \mu \quad (3.2)$$

Η διαφορά της αντίστασης στους 100°C με την θερμοκρασία δωματίου είναι  $\frac{0,000005}{0,001} = 0,005$  φορές μεγαλύτερη από την αρχική, ένα μέγεθος που δεν επηρεάζει σε καμία περίπτωση τις μετρήσεις συνεπώς δεν υπάρχει λόγος να συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς.



**Εικόνα 3.4** – Αντίσταση μέτρησης ρεύματος τύπου FL-2.

Για την πρώτη προσπάθεια μέτρησης ρεύματος, χρησιμοποιήθηκε ένας διαφορετικός τύπος αντίστασης μέτρησης ρεύματος που τοποθετείται κυρίως σε ηλεκτρολογικούς πίνακες σε όργανα μέτρησης του ρεύματος και απεικονίζεται στην εικόνα 3.4. Ονομάζεται shunt resistor και αποτελείται από ένα μεταλλικό σώμα το οποίο έχει συγκεκριμένη αντίσταση. Η αντίσταση που αποκτήθηκε για την εφαρμογή μας έχει την ικανότητα να μετρήσει μέχρι 30 Amperes όπου η πτώση τάσης που εμφανίζει στα άκρα της ανέρχεται στα 75 mV. Η διακριτική ικανότητα της εφαρμογής κρίνεται από το ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο πρέπει να ενισχύσει αυτή την απειροελάχιστη διαφορά δυναμικού. Η μέτρηση μεγεθών της τάξης των mV τοποθετεί εμπόδια στην εφαρμογή καθώς είναι συγκρίσιμο μέγεθος με τον θόρυβο. Δεν υπάρχει η δυνατότητα από τον μικροελεγκτή να μετρήσει τόσο μικρά επίπεδα σήματος οπότε και θα χρειαστεί να ενισχυθεί το σήμα ώστε να οδηγηθεί στον μικροελεγκτή.

### Τελεστικός ενισχυτής

Το μικρό σήμα της αντίστασης shunt πρέπει να οδηγηθεί σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο θα επιφέρει ένα ενισχυμένο σήμα αντίστοιχο του αρχικού με όρια που είναι ανιχνεύσιμα από τον μικροελεγκτή του κυκλώματος. Η αρχική σχεδίαση του κυκλώματος, χρησιμοποίησε την απλούστερη μορφή, ένα κοινό Τελεστικό Ενισχυτή. Η πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου που εμφανίζει σε συνδυασμό με την ελάχιστη αντίσταση εξόδου, τον καθιστούν το ιδανικό μέσο. Βέβαια, η επιλογή του κατάλληλου Τ.Ε δεν είναι εύκολη. Αν υπολογίσουμε πως για μέτρηση ρεύματος φορτίου με 1A η shunt resistor θα εμφανίσει διαφορά δυναμικού της τάξης των 2.5mV πρέπει να συμπεριλάβουμε στα μεγέθη την Offset τάση εισόδου του ολοκληρωμένου. Πρακτικά, Τελεστικοί Ενισχυτές με μεγάλη  $V_{OS}$  πάσχουν από σφάλματα στις μετρήσεις μικρών σημάτων. Γενικότερα, ο Τ.Ε. που θα επιλέξουμε πρέπει να είναι Rail-to-rail ώστε να παίρνουμε όλο το εύρος της τάσης τροφοδοσίας στην έξοδο, να διαθέτει μικρό έως μηδαμινό V offset καθώς και το offset voltage drift ως προς τον χρόνο αλλά και την θερμοκρασία να μην επηρεάζει την έξοδο. Ακόμα, η πόλωση στην είσοδο του ολοκληρωμένου θα πρέπει να είναι ελάχιστη ώστε να χρησιμοποιήσουμε μεγάλες αντιστάσεις εισόδου για προστασία από το ρεύμα του φορτίου.

## AD623

Ένα πακέτο ενισχυτή οργανολογίας με τοπολογία τριών T.E. αποτελεί ο AD623. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα της Analog Devices χαρακτηρίζεται από την πολύ καλή επίδοση σε ενίσχυση μικρών σημάτων και έχει πολύ υψηλό και ενδείκνυται για εφαρμογές ιατρικών οργάνων χαμηλής ισχύος, για ενίσχυση σήματος Thermocouple καθώς και για κάθε εφαρμογή που προϋποθέτει υψηλές αποδόσεις. Τροφοδοτείται με μονοπολική ή διπολική τροφοδοσία και μπορεί να αποτυπώσει όλο το εύρος της εισόδου (Rail-to-Rail) από 2.7 έως 12V. Διαθέτει προγραμματιζόμενο κέρδος το οποίο ρυθμίζεται από την επιλογή της τιμής μίας αντίστασης και μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 1000. Η ακρίβεια που παρέχει το ολοκληρωμένο είναι το αποτέλεσμα του πολύ υψηλού λόγου απόρριψης κοινού σήματος (CMRR) που αυξάνεται επιλέγοντας υψηλότερο κέρδος. Αποτέλεσμα του CMRR είναι η απόρριψη αρμονικών με συχνότητα μέχρι 200 Hz. [14]

## INA240

Μία διαφορετική λύση τελεστικού ενισχυτή με χαρακτηρισμό ιδικά για μέτρηση ρεύματος αποτελεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα INA240. Συντελεί μία οικονομική λύση της εταιρίας Texas Instruments και αποτελείται από τέσσερις κωδικούς κάθε ένας με διαφορετικό κέρδος (Gain). Αποτελεί μία συσκευή ενισχυτή μέτρησης ρεύματος με βελτιωμένη απόρριψη σήματος PWM το οποίο λειτουργεί για σήματα ( $V_{CM}$ ) με κοινό σήμα -4 έως 80 V. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει την μέτρηση με ακρίβεια χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις της τάσης εξόδου όπως έχουμε σε μοτέρ καθώς και στα κυκλώματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες (solenoid). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υψηλό καθώς και σε χαμηλό δυναμικό λόγω της απόρριψης κοινού σήματος. Η συσκευή λειτουργεί με μονοπολική τροφοδοσία 2.7 έως 5.5V με μέγιστη κατανάλωση που δεν ξεπερνάει τα 2.5mA. Η αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί διαθέτει χαμηλό επίπεδο offset με zero-drift στην έξοδο του κάτω που επιφέρει χαμηλές τάσεις μέχρι και 10mV. Είναι χαρακτηρισμένο για λειτουργία σε θερμοκρασία -40 έως +125°C και υπάρχει σε πακέτα TSSOP-8 και SOIC-8 [15].

Επιλέχθηκε το INA240A2 το οποίο διαθέτει κέρδος 50 V/V καθώς θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αντίσταση 1mΩ. Με λίγους υπολογισμούς, η περίπτωση που το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα 66A η έξοδος του ολοκληρωμένου φτάνει τα 3.3V που είναι το ανώτερο κατώφλι που μπορεί να δεχτεί ο μικροελεγκτής.

$$V_{OUT} = V_{IN} \times Gain$$

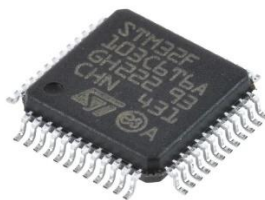
$$V_{OUT} = 66mV \times 50$$

$$V_{OUT} = 3.3V$$

## Μικροελεγκτής

Η μονάδα ελέγχου όλων των περιφερειακών και ο συνδεδετικός κρίκος μεταξύ όλων των υπομονάδων είναι ο μικροελεγκτής. Η επιλογή του μικροελεγκτή βασίζεται στην ποιότητα κατασκευής και στις δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει κάθε συσκευή.

Η πρώτη σκέψη και η πρώτη υλοποίηση του κυκλώματος του ηλεκτρονικού φορτίου, αποτέλεσε ο μικροελεγκτής της STMicroelectronics, STM32F103C8. Αποτελεί μία μονάδα αρχιτεκτονικής ARM 32-bit της σειράς Cortex-M3. Ανήκει στην μεσαία τάξη δυναμικής καθώς παρέχει πολλά από τα χαρακτηριστικά των συσκευών υψηλής απόδοσης. Στα τεχνικά χαρακτηριστικά του, ο παλμός χρονισμού είναι στα 72MHz, η τάση τροφοδοσίας είναι 2.0 έως 3.6V ενώ διαθέτει μέχρι 128Kbyte μνήμη Flash και έως 20 Kbytes μνήμη SRAM. Μερικά ακόμα χαρακτηριστικά που είναι χρήσιμα για την εφαρμογή αποτελούν τα δύο ενσωματωμένα ADC 12-bit, τα 16 external interrupt pins, οι 7 timers μέχρι 16-bit καθώς και hardware interface για πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως τα I2C, USART, SPI, USB. Τέλος, διαθέτει λειτουργία PWM.



**Εικόνα 3.5** – Μικροελεγκτής STM32F103C8

Στην πορεία της εργασίας, προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας μίας εφαρμογής σε κινητό τηλέφωνο όπου ο χρήστης θα μπορεί να διακρίνει τα αποτελέσματα καθώς και θα μπορεί να αλληλοεπιδρά με την συσκευή. Ο μικροελεγκτής STM32F103C8 δεν διαθέτει δίαυλο επικοινωνίας μέσω Bluetooth με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί ένας ακόμα μικροελεγκτής με λειτουργία σύνδεσης μέσω Bluetooth.

Η ολοκληρωμένη μονάδα της ESPRESSIF Systems ο ESP32-WROOM, αποτελείται από έναν διπύρηνο επεξεργαστή τον Tensilica Xtensa. Αυτός έχει δομή 32-bit, χρονίζει μέχρι τα 240 MHz καθώς έχει 448 Kbyte μνήμης ROM για το πρόγραμμα και 520 Kbyte μνήμης SRAM. Διαθέτει τις απαραίτητες συνδεσμολογίες που χρειάζεται η εφαρμογή όπως το SPI, I2C, ένα ενσωματωμένο DAC καθώς και ενσωματωμένο ADC.



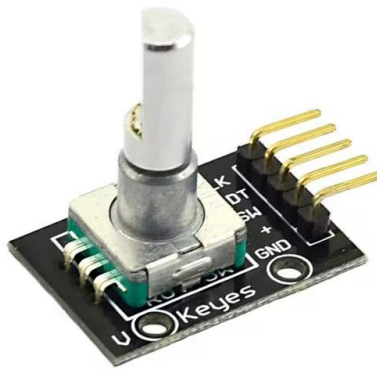
**Εικόνα 3.6** - ESP32-WROOM



## Είσοδοι

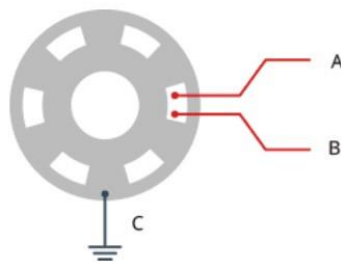
### Rotary Encoder

Με τον όρο rotary encoder αναφερόμαστε σε ένα υλικό περιστροφικού κωδικοποιητή. Ο περιστροφικός κωδικοποιητής είναι ένας αισθητήρας θέσης που μετατρέπει την περιστροφή ενός κουμπιού σε σήμα εξόδου για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης του περιστροφικού μέρους. Υπάρχουν δύο τύποι rotary encoder. Ο absolute (απόλυτος) και ο integral (βηματικός). Ο absolute encoder επιστρέφει την ακριβή θέση που βρίσκεται το κουμπί ενώ ο integral αναφέρει πόσες θέσεις (βήματα) έχει μετακινηθεί ο άξονας. Οι περιστροφικοί κωδικοποιητές συναντιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές στην καθημερινότητα. Το πιο δημοφιλές παράδειγμα είναι το ραδιόφωνο του αυτοκινήτου όπου η ένταση του ήχου ρυθμίζεται με έναν encoder.



Εικόνα 3.7- Integral Rotary encoder

Εσωτερικά από το κέλυφος του encoder, υπάρχει ένας δίσκος με σχισμές όπως φαίνεται στην εικόνα 3.8. Αυτός είναι συνδεδεμένος με το κοινό σήμα γείωσης (pin C). Δύο ακόμα επαφές υπάρχουν εσωτερικά το pin A και το pin B.



Εικόνα 3.8 – Διεπαφές ενός βηματικού rotary encoder

Όσο περιστρέφεται το κινούμενο μέρος, οι επαφές A και B έρχονται σε επαφή με το κοινό σήμα C με την σειρά η οποία εξαρτάται από την μεριά περιστροφής του κινούμενου μέρους. Με δεξιά περιστροφή, το σημείο A θα έρθει πρώτο σε επαφή με την γείωση και στην συνέχεια με μικρή καθυστέρηση θα έρθει και το σημείο B. Με αριστερή περιστροφή, η σειρά των επαφών που έρχονται σε επαφή με την γείωση

αντιστρέφεται. Μόλις ένα από τα δύο σημεία έρθει σε επαφή με την γείωση, δημιουργείται ένας σήμα σε κάθε επαφή. Αυτά τα σήματα έχουν διαφορά φάσης 90° καθώς το ένα προηγείται του άλλου και παρακολουθώντας πιο σήμα έρχεται πρώτο σε επαφή με την γείωση μπορούμε να καθορίσουμε την κατεύθυνση που περιστρέφεται το κινούμενο μέρος.

Η πλακέτα με τον integral encoder που χρησιμοποιήθηκε έχει 5 διεπαφές. Οι δύο είναι για την τροφοδοσία του οι οποίες συνδέονται στα 5V. Οι υπόλοιπες αποτελούν τα δύο σήματα CLK (pin A), DT (pin B) και το κουμπί (SW) καθώς ο encoder πατιέται όπως ένα απλό button.

## Button

Αποτελεί μία είσοδο του συστήματος η οποία αλλάζει κατάσταση με το πάτημά της. Συνδέεται στην είσοδο ενός μικροελεγκτή η οποία οδηγείται σε υψηλό δυναμικό και με το πάτημα του button μεταβαίνει σε χαμηλό δυναμικό. Με τον τρόπο αυτό καταλαβαίνει ο μικροελεγκτής πως μόλις δει 0V, έχει πατηθεί το button.

## Έξοδος

Η επικοινωνία μεταξύ του χρήστη και της συσκευής γίνεται με χρήση μίας οθόνης. Εκεί, γίνεται η αποτύπωση των μετρήσεων καθώς και η ενημέρωση στον χρήστη με την κατάσταση που βρίσκεται το ηλεκτρονικό φορτίο. Στην οθόνη υπάρχουν στοιχεία όπως η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση της εξόδου, η λειτουργία που έχει επιλεγθεί, το όριο της λειτουργίας που επιλέχθηκε καθώς και οι μετρήσεις της θερμοκρασίας, του ρεύματος και της τάσης που πραγματοποιήθηκαν.

Η οθόνη που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μία γραφική οθόνη TFT 480x320 pixel μεγέθους 3.5 ιντσών με ενσωματωμένο αισθητήρα αφής (Touchscreen). Χρησιμοποιεί τον ελεγκτή ILI9488 για την οθόνη και τον FT6236 για την αφή και αποτελεί μία λύση απεικόνισης υψηλών προδιαγραφών. Η επικοινωνία της γίνεται με το πρωτόκολλο SPI χρησιμοποιώντας 6 επαφές.



Εικόνα 3.9 – Οθόνη ILI9488

## Μέτρηση θερμοκρασίας

### Θερμίστορ

Η λέξη θερμίστορ, προκύπτει από την ένωση των αγγλικών λέξεων “thermal” και “resistor” και αποδίδεται στο υλικό που η τιμή της αντίστασής του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία. Αποτελεί έναν αναλογικό αισθητήρα και διαχωρίζεται με βάση το μοντέλο αγωγιμότητάς τους. Το υλικό που έχει αρνητικό συντελεστή αγωγιμότητας παρουσιάζει μείωση στην αντίσταση με αύξηση της θερμοκρασίας και ονομάζεται NTC. Αντίστοιχα, το υλικό που παρουσιάζει αύξηση της αντίστασης όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ονομάζεται PTC.



**Εικόνα 3.10** – Θερμίστορ σε διάφορα κελύφη

Τα θερμίστορ παράγονται χρησιμοποιώντας οξειδία μεταλλών και νεότερων τεχνικών όπου μπορούν να πετύχουν μέτρηση θερμοκρασία με ακρίβεια  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  από  $0$  έως  $70^{\circ}\text{C}$  με αξιόλογη σταθερότητα στον χρόνο. Τα νεότερα υλικά κατασκευής θερμίστορ είναι ικανά να φτάσουν μέτρηση θερμοκρασίας  $-55^{\circ}\text{C}$  έως  $150^{\circ}\text{C}$  ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις που χρησιμοποιείται γυάλινο σώμα και η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει έως  $300^{\circ}\text{C}$ .

Τα θερμίστορ NTC χρησιμοποιούνται κατά κόρων στην βιομηχανία ως αισθητήρες θερμοκρασίας και περιοριστές ρεύματος. Αντίστοιχα τα PTC χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα προστασίας από βραχυκύκλωμα καθώς και αυτορρυθμιζόμενα θερμαντικά στοιχεία. [16]

Ωστόσο, η μεταβολή της αντίστασης του θερμίστορ αποτελεί ένα γραμμικό φαινόμενο μόνο σε ένα πολύ μικρό εύρος τιμών. Στο σύνολο, η γραφική παράσταση που απεικονίζει την αντίσταση σε σχέση με την θερμοκρασία έχει εκθετική μορφή. Για τον υπολογισμό της αντίστασης σε κάθε τιμή θερμοκρασίας χρησιμοποιείται η συνάρτηση Stein-hart. Η συνάρτηση παρέχει την πιο κοντινή προσέγγιση στην πραγματική θερμοκρασία χρησιμοποιώντας δευτερεύουσες εξισώσεις και συντελεστές. Οι συντελεστές αυτοί δημοσιεύονται από τους κατασκευαστές και υπάρχουν στα paper των υλικών. Σε διαφορετική περίπτωση, οι συντελεστές μπορούν να υπολογιστούν. Χρειάζεται τρεις ακριβείς μετρήσεις αντίστασης σε τρεις θερμοκρασίες και στην συνέχεια οι συντελεστές προκύπτουν από την επίλυση της εξίσωσης<sup>7</sup>. [17]

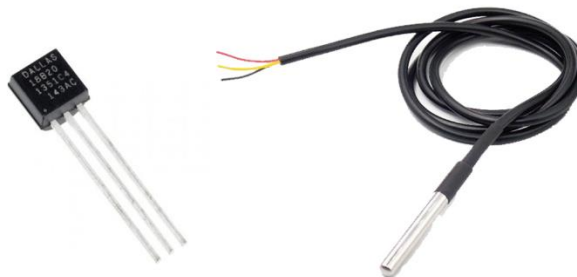
<sup>7</sup> Τα a,b & c ονομάζονται παράμετροι Stein-Hart και σε κάθε θερμίστορ είναι διαφορετικοί. Το T αποτελεί την θερμοκρασία και το R την αντίσταση που εμφανίζει στην παραπάνω θερμοκρασία.

$$\frac{1}{T} = a + b \ln R + c (\ln R)^3 \quad (3.3)$$

## DS18B20

Ένας διαφορετικός αισθητήρας θερμοκρασίας αποτελεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα DS18B20. Αποτελεί έναν ψηφιακό αισθητήρα ο οποίος δημιουργεί ένα ψηφιακό σήμα στην έξοδό του. Διαθέτει μικρό μέγεθος, μεγάλη ακρίβεια και δεν επηρεάζεται από τα επίπεδα θορύβου. Η επικοινωνία του με τον μικροελεγκτή γίνεται με χρήση ενός αγωγού (1-Wire) δίνοντας του μία ευελιξία για την χρήση και την απόσταση από την συσκευή σε διάφορες εφαρμογές.

Το σήμα επικοινωνίας αποτελείται από προγραμματιζόμενη 9 έως 12 bit γραμμής πληροφορίας και η επικοινωνία λαμβάνει 93.75 έως 750 ms αντίστοιχα με το μέγεθος της ακολουθίας. Η ευκρίνεια από το εργοστάσιο είναι 12-bit και αποτυπώνεται σε 0.0625°C. Η ευκρίνεια στα 11-bit, 10-bit και 9-bit είναι 0.125°C, 0.25°C και 0.5°C αντίστοιχα. Οι μετρήσεις είναι αρκετά ακριβείς με ±0.5°C μέγιστη απόκλιση στις θερμοκρασίες -10 έως +85°C. Η συνολική θερμοκρασία που μπορεί να μετρηθεί είναι τα -55 έως +125°C.



**Εικόνα 3.11** – DS18B20 σε κέλυφος TO-92 (αριστερά) και κέλυφος αδιαβροχοποίησης (δεξιά)

Το σήμα που διαβάζει ο αισθητήρας είναι κωδικοποιημένο και έχει μέγεθος 16-bit. Τα πέντε πρώτα bit αποτελούν bit ελέγχου και αποτελούν την ταυτότητα του πρόσημου της μέτρησης. Στην περίπτωση που το string ξεκινάει με 00000 η θερμοκρασία που μετρήθηκε είναι θετική. Σε διαφορετική περίπτωση που η ακολουθία ξεκινάει με 11111, η θερμοκρασία μέτρησης είναι αρνητικός αριθμός. Η μέθοδος μετατροπής της μέτρησης διαφέρει από το πρόσημο της θερμοκρασίας. Η μετατροπή θετικής θερμοκρασίας γίνεται με τον μετασχηματισμό της δεκαεξαδικής ακολουθίας στο δυαδικό σύστημα. Αντιθέτως, η αρνητική θερμοκρασία επιφέρει ένα δεκαεξαδικό αριθμό που η αποκωδικοποίησή του γίνεται με αντιστροφή του, προσθήκη ενός και τέλος μετατροπή στο δυαδικό σύστημα.



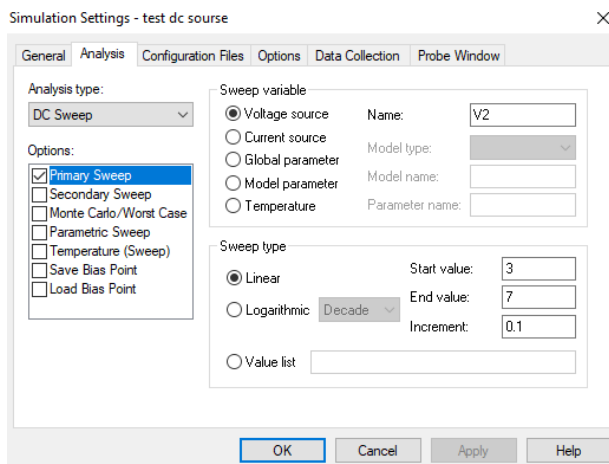
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

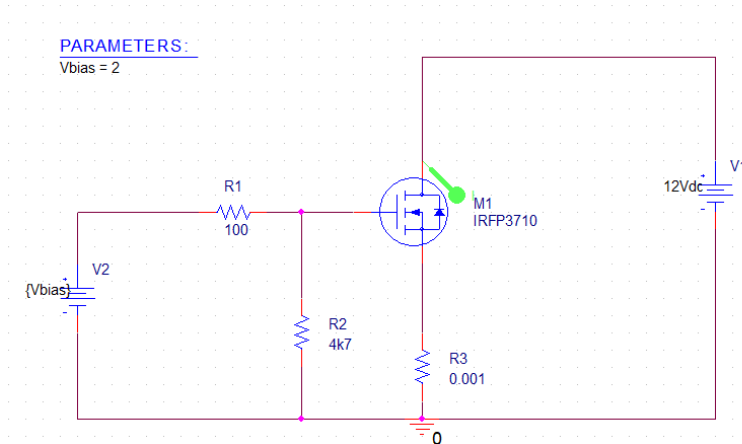
Ένα από τα πρωταρχικά σημεία στην φάση του σχεδιασμού αποτελεί η προσομοίωση κάθε πιθανής υλοποίησης. Πολλά στοιχεία και περιορισμοί εμφανίζονται στην προσομοίωση όπου μπορεί να γίνει διόρθωση χωρίς ιδιαίτερο κόστος για την εφαρμογή. Το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το OrCAD Capture & PSpice version 16.3. Αυτή η έκδοση δεν είναι ενημερωμένη με τα σημερινά δεδομένα με αποτέλεσμα αρκετά υλικά να μην είναι ενσωματωμένα στις βιβλιοθήκες. Ορισμένα στοιχεία δεν υπάρχουν οπότε θα χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα με πολύ κοντινές ιδιότητες.

### Σχεδιασμός κυκλώματος προσομοίωσης

Ξεκινώντας να υλοποιούμε πιθανά κυκλώματα, η πρώτη σχεδίαση αποτελεί την πιο απλοποιημένη μορφή ρυθμιζόμενου φορτίου επάνω στην οποία θα εμβαθύνουμε και θα υπάρχουν τροποποιήσεις με πιο πρακτικούς τρόπους. Στην εικόνα 4.2 παραθέτετε το σχηματικό κύκλωμα ενός ρυθμιζόμενου φορτίου όπου η πηγή προς έλεγχο είναι η V1 με διαφορά δυναμικού 12V. Η πόλωση του MOSFET γίνεται από μία πηγή τάσης DC η οποία μεταβάλλεται από 0 έως 7V. Οι Τάσεις από 0 έως 3V δεν επηρεάζουν στο παραμικρό οπότε και δεν τις υπολογίζουμε. Σε αυτή την διακύμανση της V2 παρατηρείται αυξομείωση στην αγωγιμότητα του MOSFET μέσα από το οποίο διέρχεται ρεύμα όσο αποτυπώνεται στον γράφημα της εικόνα 4.3.

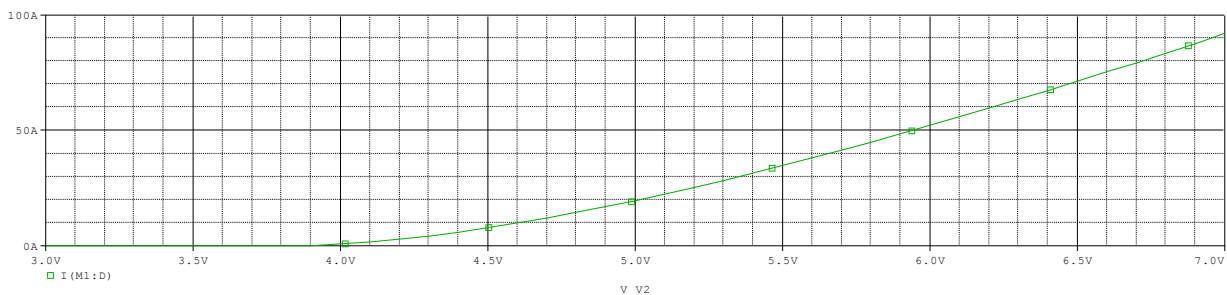


Εικόνα 4.1 – Ρυθμίσεις προσομοίωσης



**Εικόνα 4.2** – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης από ένα απλοποιημένο ρυθμιζόμενο φορτίο.

Η αντίσταση R10 αποτελεί την αντίσταση  $R_{SHUNT}$  η οποία στο πρακτικό μέρος θα μας επιτρέψει τον υπολογισμό του ρεύματος που διαρρέει το MOSFET. Μία ακόμα αντίσταση έχει τοποθετηθεί από την πηγή πόλωσης στο Gate η οποία έχει διπλή λειτουργία. Αρχικά χρησιμοποιείται ως περιοριστής ρεύματος για την πόλωση καθώς μειώνει το ρεύμα που διέρχεται ενώ ταυτόχρονα καταστέλλει τις κορυφές (spikes) που μπορεί να δημιουργηθούν μόλις το MOSFET ανοίξει. Υπάρχει ένα ενδεχόμενο να δημιουργηθεί κάποια τάση στο Gate η οποία είναι απαγορευτική για το υπόλοιπο δικτύωμα. Η αντίσταση R2 αποτελεί μία δίοδο γείωσης της πύλης του MOSFET σε περίπτωση που υπάρχει κάποια μη ελεγχόμενη τάση στην πύλη. Στην περίπτωση που δεν εισάγετε καμία τάση για την πόλωση του MOSFET, η αντίσταση R2 κρατάει πάντοτε την πύλη σε χαμηλό δυναμικό.

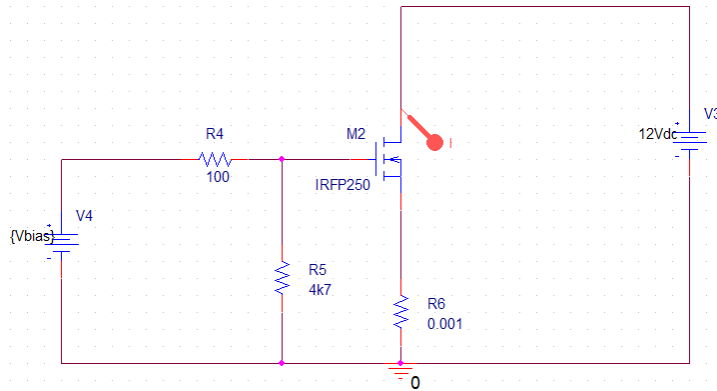


**Εικόνα 4.3** – Χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης πόλωσης  $V_{GS}$  ως προς το ρεύμα  $I_D$ .

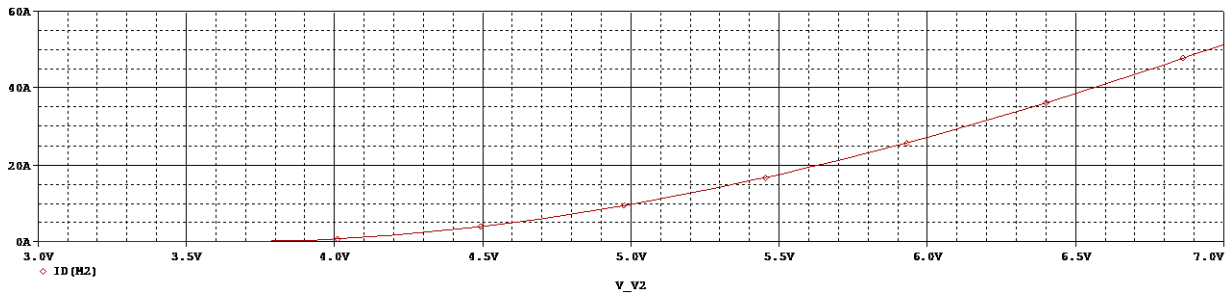
Η γραφική παράσταση απεικονίζει την σχέση μεταξύ του ρεύματος που διαρρέει το MOSFET και της τάσης πόλωσης του. Η σχέση των μεγεθών είναι γραμμική στο μεγαλύτερο μέρος της με μοναδική διαφοροποίηση στην περιοχή που η αντίσταση καναλιού είναι μεγάλη. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση η γραφική παράσταση παρουσιάζει ελάχιστη κλίση. Ένα ακόμα στοιχείο που σημειώνουμε είναι η μέγιστη τάση πόλωσης που οδηγεί το MOSFET στον κόρο. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή το μέγιστο ρεύμα σε συνεχή λειτουργία και θερμοκρασία δωματίου είναι τα 57A ενώ σε θερμοκρασία 100 °C ανέρχεται σε 40A. Από το γράφημα συμπεραίνεται πως η τάση πόλωσης 5.65V έχει αποτέλεσμα ρεύμα  $I_D=40A$  οπότε αυτή η τάση αποτελεί το ανώτατο όριο και πρέπει να συμπεριληφθεί στο σύστημα ελέγχου.

## Σύγκριση MOSFET

Τροποποιώντας το σχηματικό κύκλωμα, αντικαθιστάμε το MOSFET με το IRFP250N για να δούμε τα χαρακτηριστικά του και να γίνει μία σύγκριση ανάμεσα στα δύο. Κάθε FET διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά συνεπώς και η καμπύλη του ρεύματος εξόδου θα διαφέρει ως προς την κλίση αλλά και το σημείο εκκίνησης.



Εικόνα 4.4 – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης από ένα απλοποιημένο ρυθμιζόμενο φορτίο



Εικόνα 4.5 - Χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης πόλωσης  $V_{GS}$  ως προς το ρεύμα  $I_D$ .

Η καμπύλη του ρεύματος εξόδου για το IRFP250N έχει μικρότερη κλίση. Στην πράξη, η αντίσταση που εμφανίζει είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το IRF3710. Αυτή η ιδιότητα το καθιστά πιο διαχειρίσιμο καθώς η έξοδος του δεν μεταβάλλεται με πολύ μικρές προσαυξίσεις στην τάση πόλωσης. Από το datasheet της International Rectifier λαμβάνουμε το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης για το συγκεκριμένο MOSFET το οποίο σε θερμοκρασία δωματίου ανέρχεται στα 30A. Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει την απόδοση των ημιαγωγών. Για θερμοκρασία 100°C ο κατασκευαστής δίνει μέγιστο ρεύμα τα 21A. Οπότε για τους υπολογισμούς και στο πρακτικό κομμάτι θα λάβουμε threshold ασφαλείας τα 21A και αυτό θα αποτελεί το μέγιστο ρεύμα που είναι δυνατόν να αντλήσουμε. Η τάση πόλωσης που εμφανίζει αυτό το ρεύμα είναι τα 5.69V οπότε θα συμπεριληφθεί στο σύστημα ελέγχου. Στην εφαρμογή, έχουμε μεγαλύτερες απαιτήσεις ρεύματος οπότε και θα χρησιμοποιηθεί ένα δικτύωμα από περισσότερα MOSFET σε παράλληλη διάταξη.

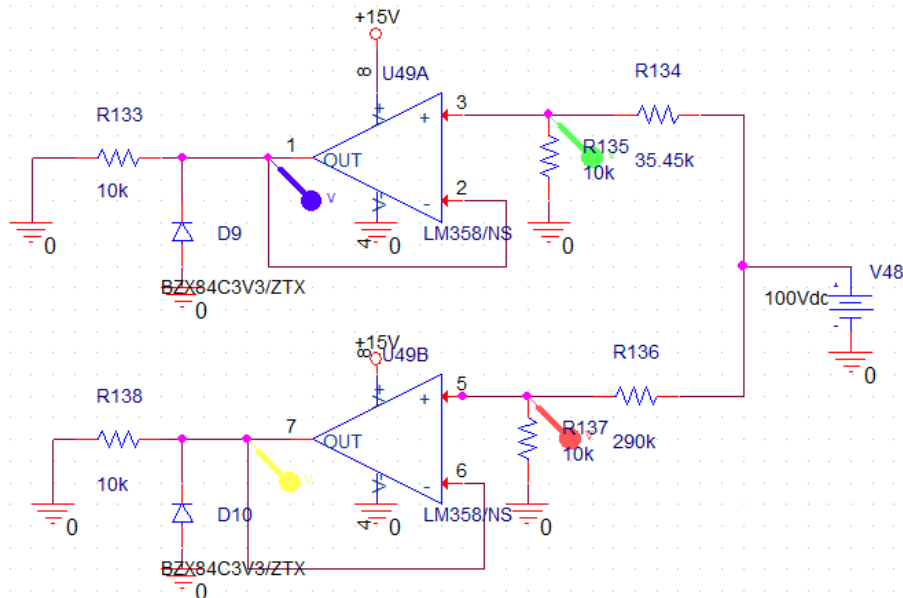


## Κύκλωμα μέτρησης τάσης

Για την μέτρηση της τάσης της πηγής υπο έλεγχο, χρησιμοποιείται μία λειτουργία του μικροελεγκτή που ονομάζεται Analog to Digital converter και αποτελεί την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό για τον έλεγχο από τον μικροελεγκτή. Η πηγή τροφοδοσίας είναι πολύ πιθανό να ξεπερνάει την τάση reference του ADC που συνήθως είναι η τάση τροφοδοσίας του μικροελεγκτή. Για να αποφυγεί ο κίνδυνος βλάβης, χρησιμοποιείται ένα δικτύωμα υποβάθμισης της τάσης ώστε να αποτυποθεί η τάση της πηγής υπο έλεγχο στα όρια της τάσης τροφοδοσίας του μικροελεγκτή. Χρησιμοποιείται ένας T.E. σε λειτουργία follower με έναν διεραϊτή τάσης στην είσοδό του. Ο buffer προσφέρει ασφάλεια και ακρίβεια στο κύκλωμα καθώς εξαλείφει τον θόρυβο που υπάρχει επάνω στους αγωγούς. Ακόμα διαθέτει υψηλή αντίσταση εισόδου η οποία ελαχιστοποιεί τις απώλειες του σήματος εισόδου. Στην εικόνα 4.6 απεικονίζεται το κύκλωμα για μέτρηση της τάσης. Έχουν τοποθετηθεί δύο δικτυώματα όπου το πρώτο μετράει με περισσότερη ευκρίνεια στα μικρά σήματα μέχρι 20V και το δεύτερο σχεδιάστηκε για να μετράει σήματα έως 100V. Περισσότερο από 100Vdc δεν υπάρχει λόγος να μετράμε καθώς οι περισσότερες πηγές τάσης δεν ξεπερνάνε τα 50V. Για τον υπολογισμό των αντιστάσεων για το πρώτο δικτύωμα έχουμε :

$$V_{out} = V_{in} = V_{cc} \frac{R_{135}}{R_{135} + R_{134}} \Rightarrow \quad (4.1)$$

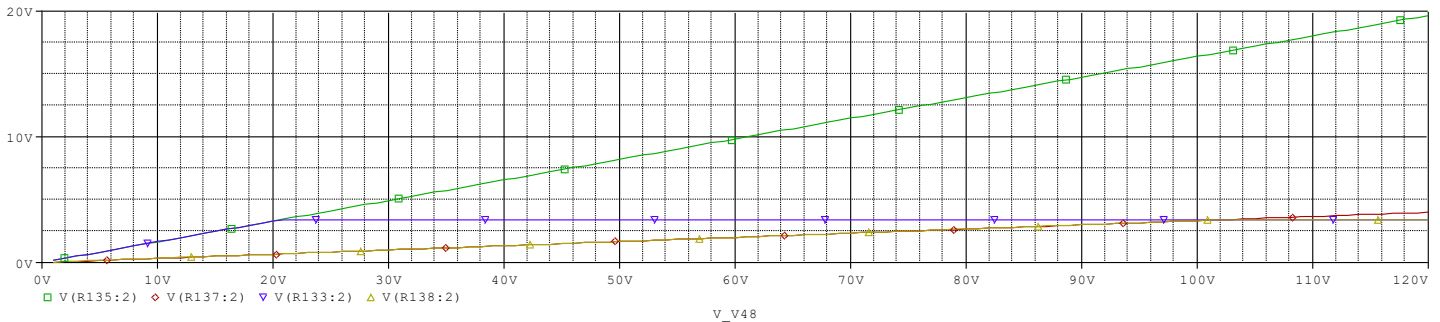
$$R_{134} = \frac{V_{cc} \times R_{135}}{V_{out}} - R_{135} = \frac{20 \times 10k}{3.3V} - 10k = 35.45k$$



**Εικόνα 4.6** – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης του δικτύωματος μέτρησης της τάσης της πηγής υπο δοκιμή.

Στην έξοδο κάθε T.E. έχει τοποθετηθεί μία δίδος ζένερ στα 3.3V η οποία περιορίζει την τάση εξόδου του T.E. σε επίπεδα που επιτρέπει ο μικροελεγκτής. Χωρίς την ζένερ, και τα δύο δικτυώματα θα ανέπτησαν μία τάση μεγαλύτερη από την τάση που μπορεί να δεχθεί ο μικροελεγκτής με αποτέλεσμα την

καταστροφή του ADC ή και όλης της συσκευής. Να αναφερθεί ότι επιλέχθηκε η τροφοδοσία των LM358 στα +15V ώστε η είσοδος τους να μπορεί να δεχθεί τάσεις μέχρι +15V. Στην περίπτωση που η πηγή υπο έλεγχο είναι μία πηγή 100V, η είσοδος του πρώτου ολοκληρωμένου έρχεται σε δυναμικό 16V. Για να αποφευχθεί η πρόκληση βλάβης στην περίπτωση που τοροθετηθεί πηγή με μεγαλύτερη τιμή, θα τοποθετήσουμε δύο ακόμα ζένερ στις εισόδους των Τ.Ε. με τάση ενεργοποίησης τα +15V.



**Εικόνα 4.7** – Αποτελέσματα προσομοίωσης με τις τάσεις εισόδου και εξόδου των τελεστικών εισχυτών. Η τάση εισόδου του 1<sup>ου</sup> Τ.Ε. (πράσινο) και εξόδου του (μπλέ) καθώς και η τάση του 2<sup>ου</sup> Τ.Ε. (κόκκινο) και εξόδου του (κιτρινο).

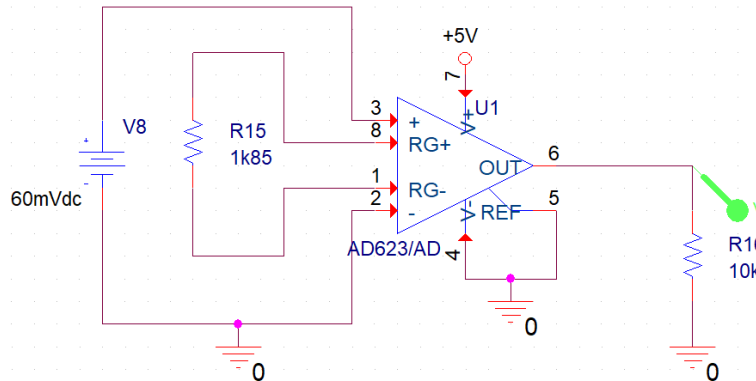
Από την προσομοίωση προκύπτει πως το πρώτο κύκλωμα μεταφράζει τάσεις από 0 έως 20V σε 0 έως 3.3V με μεγαλύτερες τάσεις να περιορίζονται από την ζένερ. Το δεύτερο κύκλωμα μεταφράζει τάσεις 0 έως 100V σε τάσεις 0 έως 3.3V. ο μεγάλος λόγος αντιστάσεων του δεύτερου δικτύωματος του επιτρέπουν να διαχειρίζεται μεγαλύτερες τάσεις όμως σε τάσεις μέχρι και 10V αποτυπώνει ελάχιστη τάση στην έξοδό του. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρώτο δίκτυωμα ώστε ο θόρυβος να μην επιρραεί στις μετρήσεις.

## Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος

Η μέτρηση ρεύματος χρησιμοποιεί την ίδια φιλοσοφία με την μέτρηση της τάσης. Τοποθετείται μία αρκετά μικρή αντίσταση σε σειρά με το υπόλοιπο δίκτυωμα η οποία έχει μια πτώση τάσης στα άκρα της. Στην συνέχεια με σύμφωνα με τον τύπο του Ωμ γίνεται ο μετασχηματισμός στο ζητούμενο ρεύμα. Μία πολύ μικρή αντίσταση, ακολουθείται από μία πολύ μικρή πτώση τάσης. Χρησιμοποιώντας 1mΩm αντίσταση, η πτώση τάσης είναι ανάλογη με το ρεύμα που την διαπερνάει και ισούται με 1mV/A. Τόσο μικρή διαφορά δυναμικού χρίζει ιδιαίτερη προσοχή καθώς αντιμετωπίζουμε σήματα σε επίπεδο θορύβου. Ο ADC που διαθέτει ο μικροελεγκτής δεν έχει την δυνατότητα να μετρήσει σήματα μερικών mV οπότε επιβάλλεται μία ενίσχυση του σήματος προτού δρομολογηθεί στον μικροελεγκτή.

Η μέτρηση μικρών σημάτων, αποκλείει αρκετές συσκευές Τ.Ε. Ιδανική περίπτωση αποτελούν οι instrumentation amplifiers οι οποίοι ενισχύουν την διαφορά μεταξύ των εισόδων τους κέρδος που ρυθμίζεται ανάλογα με την εφαρμογή. Πρώτη επιλογή αποτελεί ο Τ.Ε. της Analog Devices AD623 καθώς αποτελεί μία συσκευή που διαθέτει ενσωματωμένη τοπολογία τριών Τ.Ε. σε ενισχυτή οργανολογίας. Τα χαρακτηριστικά που δίνει η Analog Devices υπερτερούν από την περίπτωση της σχεδίασης της τοπολογίας με διακριτά στοιχεία, ενώ στην σχεδίαση θα χρειαζόταν η χρήση υλικών με μεγάλη ακρίβεια. Ακόμα, ο AD623 αποτελεί μία λύση rail-to-rail με μονοπολική τροφοδοσία, πολύ καλύτερο CMRR από την σχεδίαση με διακριτά στοιχεία και πολύ καλύτερους συντελεστές drift με αύξηση της θερμοκρασίας. Στην εφαρμογή,

η θερμοκρασία που θα αναπτύσσεται από τα MOSFET μπορεί να φτάσει επίπεδα αρκετά πάνω από τους 100°C. Αυτή η θερμοκρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λάβουμε ώστε να μην επηρεάζει τις μετρήσεις.



**Εικόνα 4.8** – Σχηματικό διάγραμμα προσομοίωσης της διάταξης του AD623.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται η πηγή τάσης V8 η οποία προσομοιώνει την πτώση τάσης επάνω στην αντίσταση  $R_{SHUNT}$ . Το μέγιστο ρεύμα που επιθυμούμε να διαρρέει την αντίσταση είναι τα 60A οπότε η μέγιστη τιμή διαφοράς δυναμικού επάνω στην αντίσταση είναι 60mV. Στην γραφική παράσταση του σχήματος 4.11 απεικονίζεται η γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης εισόδου και συνεπώς του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα με την τάση εξόδου του ολοκληρωμένου η οποία παίρνει την μέγιστη τιμή των 3.3V. Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από την προσομοίωση είναι η τάση εξόδου το ολοκληρωμένου η οποία ισούται με 55mV/mV. Καθώς είναι rail-to-rail η έξοδος του μπορεί να κατέβει σε τόσο χαμηλά κατώφλια. Ωστόσο, για μέτρηση ρεύματος μικρότερης του 1A η τάση εξόδου θα είναι ακόμα μικρότερη συνεπώς χρειάζεται το επόμενο δικτύωμα να μπορεί να επεξεργαστεί τόσο χαμηλά επίπεδα.

Στην συνέχεια παραθέτονται οι υπολογισμοί της αντίστασης κέρδους  $R_G$  η οποία θα πάρει τιμή ώστε η είσοδος 60mV να μετατρέπεται σε τάση εξόδου 3.3V. Ο υπολογισμός της αντίστασης κέρδους χρησιμοποιεί τον τύπο που δίνει το datasheet του AD623 [14].

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{100k}{R_G}\right)V_C \quad (4.2)$$

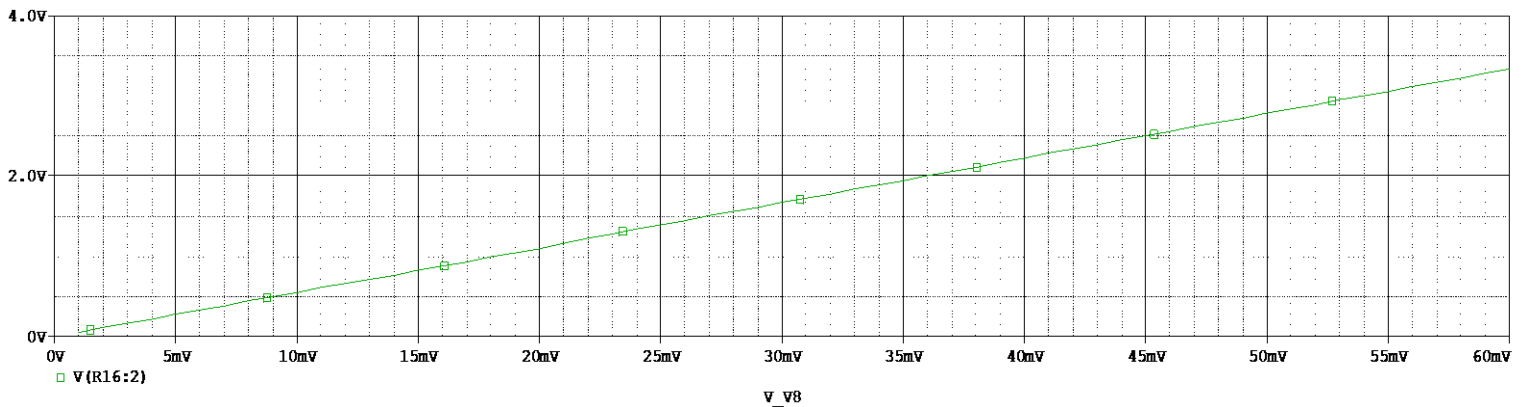
$$R_G = \frac{100k}{G - 1}$$

Το κέρδος ενισχυτή υπολογίζεται με τις μέγιστες τιμές εισόδου και εξόδου

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{3.3V}{60mV} = 55$$

Οπότε προκύπτει

$$R_G = 1.851k\Omega$$

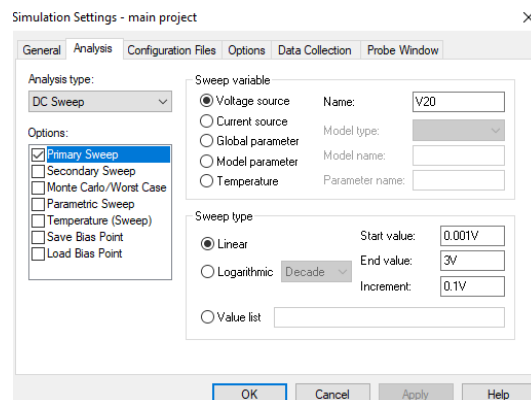


**Εικόνα 4.9** – Αποτελέσματα προσομοίωσης του AD623. Απεικονίζεται η τάση εισόδου ως προς την τάση εξόδου.

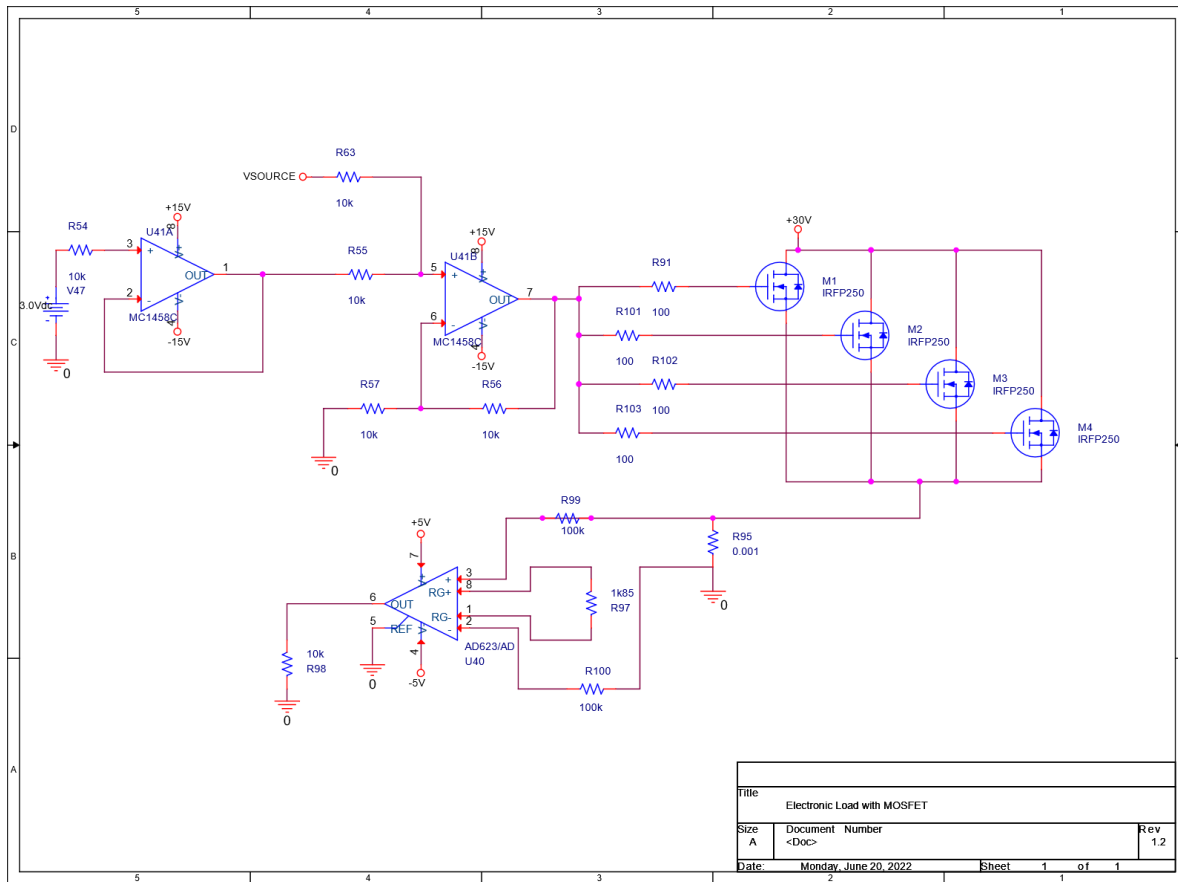
## Σχεδίαση τελικού κυκλώματος

### 1<sup>ο</sup> Κύκλωμα ηλεκτρονικού φορτίου

Συνδυάζοντας τα δικτυώματα που μελετήθηκαν, προκύπτει το τελικό κύκλωμα. Η πόλωση του MOSFET αποτελείται από ένα δικτύωμα δύο Τ.Ε όπου ο πρώτος λειτουργεί ως ακόλουθος τάσης μίας πηγής με τιμή 3V και τροφοδοτεί στην πύλη σταθερή τάση. Καθώς το MOSFET IRFP250N δεν άγει με λιγότερη τάση των 3,5 Volt, η συνεχόμενη πόλωση βοηθάει στην γρήγορη οδήγηση στο σημείο που γίνεται αγωγίμο. Ο δεύτερος Τ.Ε. εισάγει στην τάση αναφοράς και μια δεύτερη τάση η οποία αυξάνεται μέχρι τα 3V και απεικονίζει την τάση που προκύπτει από το DAC. Η τάση εξόδου του δεύτερου Τ.Ε. έχει διακύμανση 3–6.3V και αποτελεί την τάση πόλωσης του MOSFET. Η μέτρηση του ρεύματος  $I_D$  γίνεται από μία αντίσταση με πολύ μικρή τιμή, την R95. Η τιμή της αντίστασης συλλέχθηκε με σκοπό να κάνει μετρήσεις έως 30 A. Στο μέγιστο ρεύμα η πτώση τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα της ανέρχεται στα 75mV.

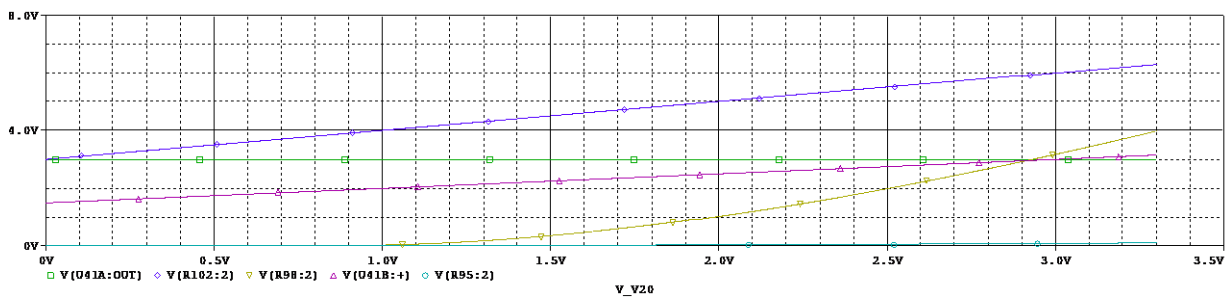


**Εικόνα 4.10** – Ρυθμίσεις προσομοίωσης για το τελικό κύκλωμα.



Εικόνα 4.11 – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης 1<sup>ου</sup> κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου.

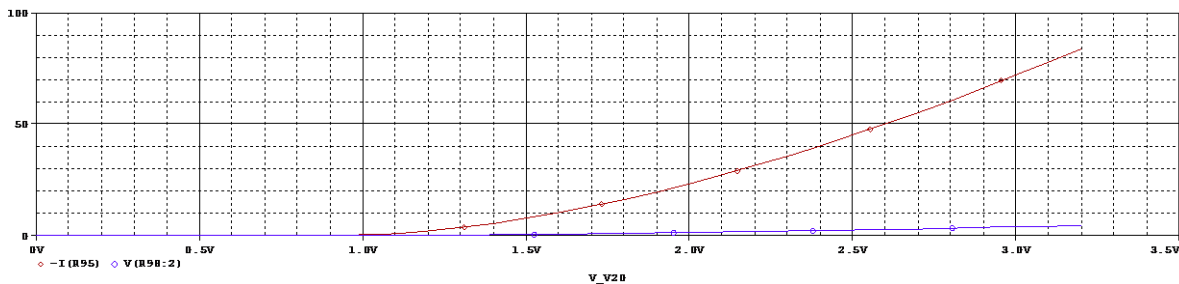
Χρησιμοποιώντας ως μεταβαλλόμενη είσοδο την τάση εξόδου του DAC προκύπτει η γραφική παράσταση του σχήματος 4.12. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με όλες τις τάσεις του κυκλώματος αποτυπώνονται στον πίνακα 2.



Εικόνα 4.12 – Καμπύλη διάφορων τάσεων σε συνάρτηση με την τάση πόλωσης του MOSFET.

Vref	Πράσινο	3.000 V	3.000 V	3.000 V	3.000 V	3.000 V	3.000 V	3.000 V	3.000 V
Vsource	Ροζ	0.500 V	1.000 V	1.500 V	2.000 V	2.500 V	2.788 V	3.000 V	3.290 V
Vbias	Μπλε	3.499 V	3.999 V	4.499 V	4.999 V	5.499 V	5.786 V	5.999 V	6.299 V
VRL	Γαλάζιο	15 nV	291 uV	7.71 mV	23.24 mV	45.06 mV	60.00 mV	71.4 mV	89.8 mV
VOUT	Κίτρινο	1.57 mV	17.4 mV	426 mV	1.28 V	2.48 V	3.30 V	3.96 V	4.90 V

Πίνακας 2 - Αποτελέσματα προσομοίωσης 1<sup>ου</sup> κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου



**Εικόνα 4.13** – Καμπύλη ρεύματος  $I_D$  (κόκκινο) σε συνάρτηση με την τάση πόλωσης του DAC.

Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	2.7881
CURSOR 1,2	-I(R95)	60.024
	V(R98:2)	3.3048

**Εικόνα 4.14** – Το σημείο επάνω στην καμπύλη προσομοίωσης 1<sup>ου</sup> κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου που το φορτίο διαρρέεται από ρεύμα 60A και η έξοδος του ολοκληρωμένου έχει τάση 3.30V με τάση πόλωσης τα 5.788V.

Η προσομοίωση χρησιμοποιείται για να αποσπάσουμε σημαντικές πληροφορίες για το κύκλωμα. Από την καμπύλη εξόδου, προκύπτει το σημείο στο οποίο το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα ίσο με 60A. Η τάση πόλωσης είναι 2.788V πάνω από την τάση μόνιμης πόλωσης των 3V που έχει η πύλη. Παρατηρούμε πως η αντίσταση μέτρησης του ρεύματος τοποθετείται σε χαμηλό δυναμικό (Low side) καθώς η μία άκρη της είναι συνδεδεμένη με την γείωση. Στην προσομοίωση αυτή η επιλογή δεν επιφέρει καμία διαφοροποίηση στο κύκλωμα ωστόσο όπως θα δούμε στην υλοποίηση του κυκλώματος, ο θόρυβος που υπάρχει στον αγωγό της γείωσης αλλάζει στιγμιαία το δυναμικό με αποτέλεσμα η μέτρηση να έχει κάποια απόκλιση από την πραγματικότητα.

## Συμπεράσματα προσομοίωσης 1<sup>ου</sup> κυκλώματος

Η διαφοροποίηση του κυκλώματος έρχεται στο δικτύωμα ισχύος καθώς έχουν χρησιμοποιηθεί τέσσερα MOSFET. Στη προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί όλη η διακύμανση του DAC με αντίσταση φορτίου 1mΩ. Παρατηρούμε το ρεύμα που διαρρέει τα MOSFET στην προσομοίωση πλησιάζει τα 90 Ampere. Βέβαια, για τέτοια τιμή εισόδου, το AD623 θα έχει καταστραφεί λόγω του συντελεστή ενίσχυσης που επιλέξαμε καθώς έχει ήδη φτάσει την μέγιστη τάση θετικού κόρου. Ακόμα, τα MOSFET θα έχουν καταστραφεί καθώς το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{DSS}$  είναι 30A σε θερμοκρασία δωματίου και 21A σε θερμοκρασία 100 βαθμών κελσίου. Συμπερασματικά, χρησιμοποιώντας τέσσερα MOSFET με τις καλύτερες δυνατές συνθήκες μπορούμε να εκλύουμε 120 A ενώ στις χειρότερες δυνατές, κρατώντας την θερμοκρασία στους 100 βαθμούς κελσίου μπορούμε να εκλύουμε 84 A ενώ ταυτόχρονα κανένα MOSFET δεν μπορεί να επάγει την απαιτούμενη θερμοκρασία όταν καταναλώνει 300W θερμικής ενέργειας. Η χρήση τεσσάρων MOSFET πραγματεύεται τον διαμοιρασμό της ενέργειας σε τέσσερις ίσες ποσότητες με σκοπό την σωστή ψύξη των μονάδων.

Συνεχίζοντας την μελέτη, στους υπολογισμούς πρέπει να συμπεριλάβουμε κάποια περιθώρια ασφαλείας καθώς οι ημιαγωγοί δεν προορίζονται για να λειτουργούν στα άκρα της περιοχής λειτουργίας τους. Συνεπώς, επιλέγουμε να λειτουργούμε τα MOSFET τουλάχιστον κάτω από τα  $\frac{3}{4}$  της μέγιστης δυνατής τιμής για λόγους ασφαλείας. Επιλέγετε η συνολική μέγιστη τιμή ρεύματος τα 60 A όπου συνεπάγεται το κάθε MOSFET θα διαρρέεται από 15 A peak.

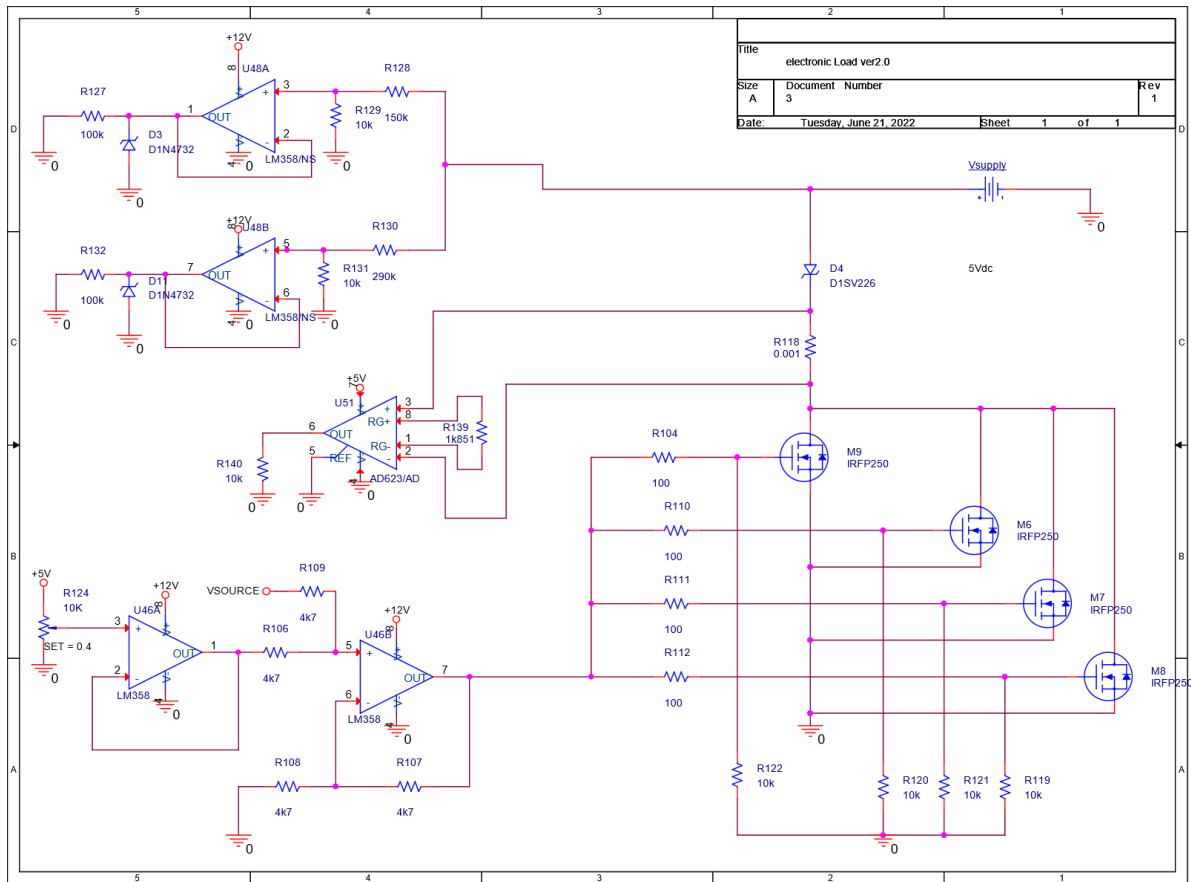
Μελετώντας το γράφημα με τις τάσεις όλου του κυκλώματος, ο έλεγχος των MOSFET επιτυγχάνεται με μείωση της τάσης πόλωσης των MOSFET. Απλοποιώντας την διαδικασία, θα γίνει εισαγωγή στον κώδικα η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και η μέγιστη τιμή εξόδου του DAC η οποία έχει ως αποτέλεσμα τιμή ρεύματος μεγαλύτερο του ορίου. Το σημείο ασφαλείας που δεν πρέπει ποτέ να το ξεπεράσει το DAC είναι τα 2.788V ή ψηφιακά ο αριθμός 3460 σε ανάλυση 12-bit.

## 2<sup>ο</sup> Κύκλωμα ηλεκτρονικού φορτίου

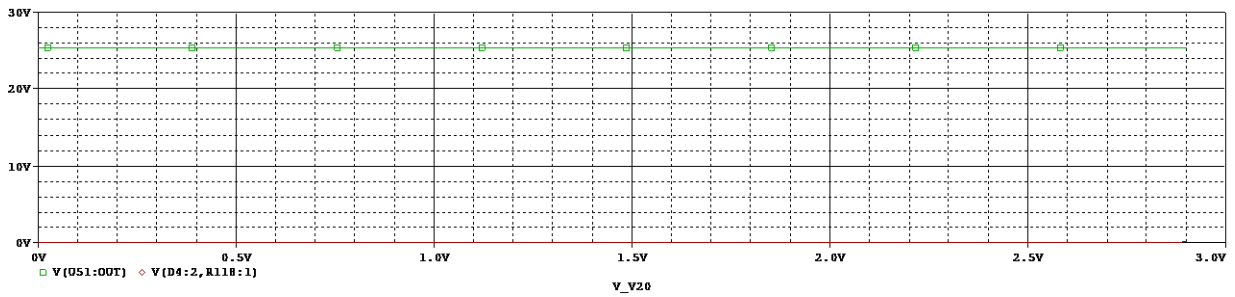
Στην κατασκευή του αρχικού κυκλώματος, εμφανίστηκαν αρκετές αστοχίες και δυσκολίες στην υλοποίησή του. Πραγματοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός από διορθώσεις και μετατροπές στην συσκευή οι οποίες επέφεραν διαφορετικά προβλήματα στο κύκλωμα. Το καινούργιο κύκλωμα που σχεδιάστηκε, χρησιμοποιεί την τεχνογνωσία που αποκτήθηκε από την αρχική σχεδίαση και πλαισιώνει την ιδέα της δημιουργίας ενός σωστού εργαλείου.

Η πρώτη μετατροπή, εντοπίζεται στην αντίσταση μέτρησης του ρεύματος η οποία αρχικά τοποθετήθηκε στην μεριά χαμηλού δυναμικού όπου η γείωση αποτελεί το κοινό σήμα. Το ολοκληρωμένο διαθέτει έναν ισχυρό συντελεστή απόρριψης κοινού σήματος, ωστόσο αυτός δεν χρησιμοποιείται σε τόσο χαμηλό δυναμικό με αποτέλεσμα ο θόρυβος να περνάει και να επηρεάζει τις μετρήσεις. Η αντίσταση  $R_{SHUNT}$  μεταφέρθηκε στο υψηλό δυναμικό της πηγής υπό δοκιμή (D.U.T). Η μετακίνηση της αντίστασης επιφέρει μια σειρά αντιδράσεων καθώς το ολοκληρωμένο AD623 δεν μπορεί να πάρει τάση εισόδου μεγαλύτερη από +5V. Επόμενο βήμα είναι η αλλαγή του ολοκληρωμένου μέτρησης του ρεύματος το οποίο αντικαταστάθηκε από το INA240A2. Η μέτρηση της τάσης και του ρεύματος τώρα γίνεται από ένα εξωτερικό ADC με ευκρίνεια 16-bit σε συνδυασμό με αντιστάσεις ισοστάθμισης των τάσεων πόλωσης του MOSFET καθώς και της τάσης εξόδου του INA240 αυξάνοντας την αξιοπιστία των δεδομένων βελτιώνοντας την λήψη μετρήσεων. Τέλος πραγματοποιήθηκε μία απλοποίηση του κυκλώματος πόλωσης και του κυκλώματος τροφοδοσίας το οποίο χρησιμοποιούσε 7 διαφορετικές τάσεις. Επιλέχθηκαν ολοκληρωμένα κυκλώματα T.E. τα οποία δεν χρειάζονται διαφορετική τάση τροφοδοσίας από τις υπόλοιπες μονάδες. Οι 741 αντικαταστάθηκαν από LM358 τα οποία τροφοδοτούνται με +5V και GND.

Στο σχήμα 4.15 αποτυπώνεται το σχηματικό της υλοποίησης του 2<sup>ου</sup> κυκλώματος. Η βιβλιοθήκη του INA240 δεν υπάρχει στην συγκεκριμένη version του προγράμματος OrCAD Capture οπότε και έμεινε ο AD623 μόνο για την προσομοίωση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παραμένουν ίδια με διαφορά στον AD623 όπου η τάση εξόδου έχει πολύ υψηλή τιμή, κάτι που αποδεικνύει πως στις συγκεκριμένες συνθήκες θα φτάσει στον κόρο και στην συνέχεια θα προκληθεί βλάβη. Οι υπόλοιπες τάσεις έχουν παραμείνει ίδιες με το προηγούμενο κύκλωμα.



Σχήμα 4.15 – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης  $2^{00}$  κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου.



Σχήμα 4.16 – Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τάση εξόδου (πράσινο) του AD623 με την τάση εισόδου του (κόκκινο).



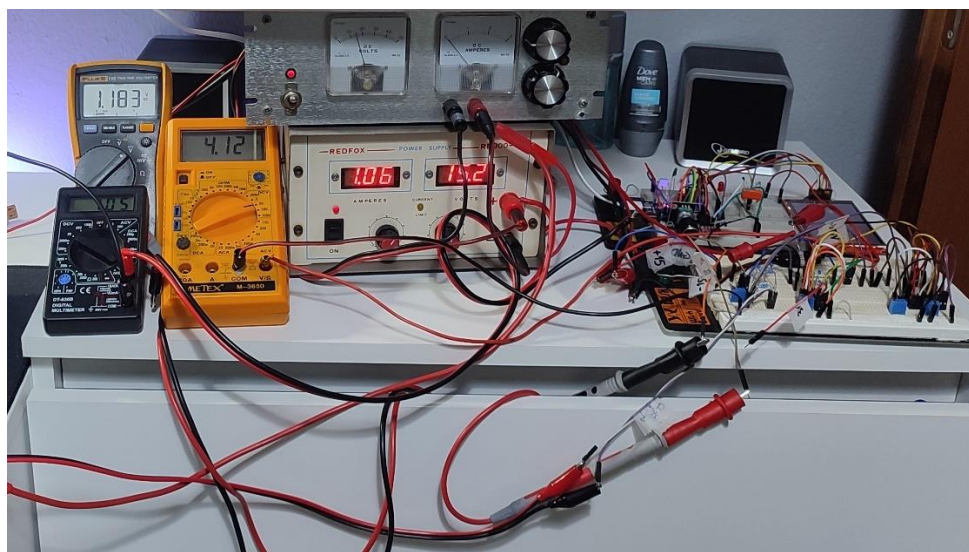
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Σχεδιασμός και Κατασκευή διάταξης

Το μετέπειτα στάδιο της προσομοίωσης, αποτελεί η υλοποίηση και η κατασκευή του κυκλώματος που μελετήθηκε. Στο αρχικό στάδιο της υλοποίησης, αποκτήθηκαν όλα τα υλικά σε διάτρητα στοιχεία (Through Hole) και έγινε η πρώτη τριβή με την εφαρμογή στο raster. Αυτό αποτελεί το προσχέδιο της κατασκευής καθώς υπάρχει η ευελιξία για αλλαγές στο κύκλωμα. Δοκιμάστηκαν διάφορα υλικά τόσο στο κύκλωμα ισχύος όσο και στο κύκλωμα ελέγχου και η πρώτη υλοποίηση που έλαβε μέρος ως ολοκληρωμένο κύκλωμα παραθέτετε στην συνέχεια. Η σχεδίαση των κυκλωμάτων διαχωρίζεται σε περισσότερες κατασκευές. Συνολικά έγιναν τρεις υλοποιήσεις του ηλεκτρονικού φορτίου κάθε μία από τις διορθώνει σφάλματα των προηγούμενων και παραθέτονται με λεπτομέρεια στην ενότητα 5.

### Κατασκευή κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου

Η υλοποίηση των κυκλωμάτων που δοκιμάστηκαν στην προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο raster. Η πρώτη κατασκευή αποτέλεσε την εισαγωγή στα κυκλώματα ελέγχου μεγάλων ρευμάτων και τάσης όπου και έγινε ένας μεγάλος αριθμός από πειράματα και δοκιμές. Δεν θα εμβαθύνουμε στην συγκεκριμένη υλοποίηση καθώς δεν αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση ενός ηλεκτρονικού φορτίου. Παραθέτετε μόνο καθώς αποτελεί την αρχή της κατασκευής και βοήθησε στην αποφυγή λαθών σχεδιασμού στην επόμενη υλοποίηση.

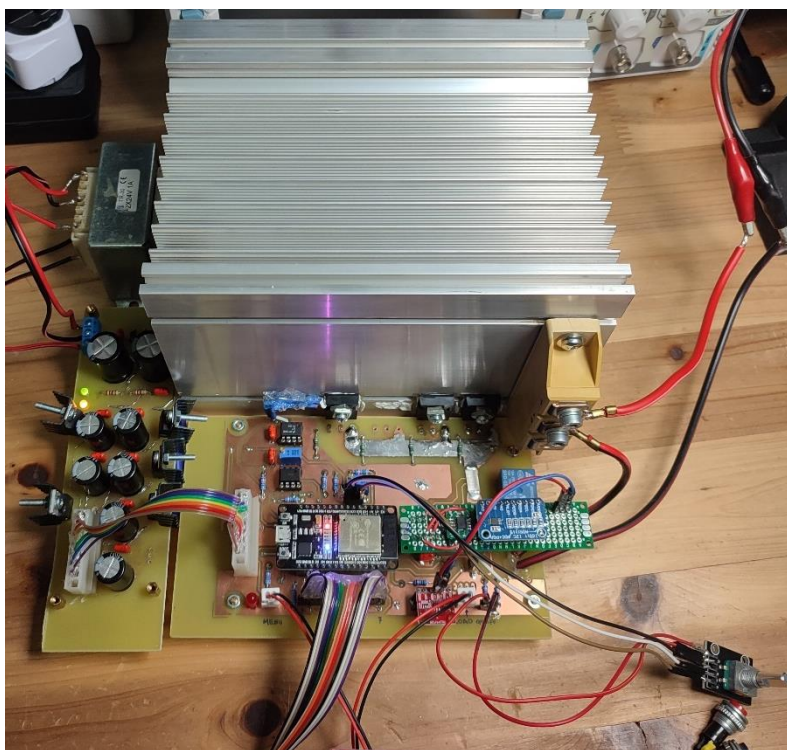


Εικόνα 5.1 – Πρώτη υλοποίηση ηλεκτρονικού φορτίου στο raster

## Σχεδιασμός κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου version 2.0

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων στο raster, έγιναν οι απαραίτητες διορθώσεις και ξεκίνησε η σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος στο σχεδιαστικό πακέτο EAGLE. Το σχηματικό κύκλωμα χωρίζεται σε τρία επιμέρους κυκλώματα. Αρχικά το κύκλωμα ελέγχου που αποτελεί το ψηφιακό μέρος (εικόνα 5.5), το κύκλωμα ισχύος που αποτελεί το αναλογικό μέρος (εικόνα 5.6), και το κύκλωμα τροφοδοσίας (εικόνα 5.7).

Το τυπωμένο κύκλωμα αποτελείται από δύο κατασκευές. Η πρώτη κατασκευή αποτελεί την κύρια πλακέτα. Το τροφοδοτικό δημιουργήθηκε χωριστά από το κυρίως κύκλωμα ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αποσύνδεσης του καθώς στον προγραμματισμό εισάγεται τάση στο κύκλωμα και υπάρχει περίπτωση να υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο τροφοδοσιών το οποίο μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα. Ακόμα, ο όγκος των υλικών Through Hole είναι τέτοιος που δεν επιτρέπει την τοποθέτηση όλων των υλικών σε μία πλακέτα με μέγεθος που υπάρχει στο εμπόριο. Συμπερασματικά, το τροφοδοτικό του κυκλώματος χωρίστηκε από το υπόλοιπο κύκλωμα και αποτέλεσε μία ξεχωριστή κατασκευή. Το σχέδιο του κυρίως τυπωμένου κυκλώματος απεικονίζεται στην εικόνα 5.8 και το τροφοδοτικό στην εικόνα 5.9.

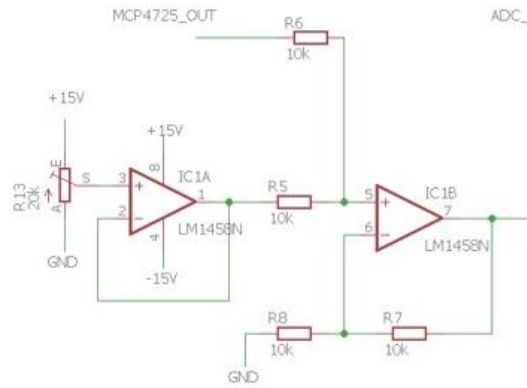


Εικόνα 5.2 – Κατασκευή ηλεκτρονικού φορτίου ver2.0

### Ανάλυση υποκυκλωμάτων

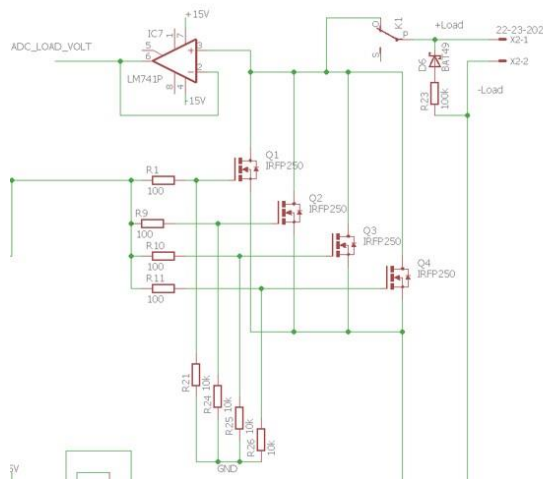
#### Κύκλωμα πόλωσης

Η πόλωση των MOSFET επιτυγχάνεται με την εισαγωγή DC τάσης από το DAC MCP4725. Μελετώντας την γραφική παράσταση της προσομοίωσης του ρεύματος  $I_{DS}$  (εικόνας 4.3) προκύπτει η ελάχιστη τάση που ξεκινάει να διαρρέεται ρεύμα από το κανάλι. Το σημείο αυτό είναι τα 3.55 volt. Με αυτό το δεδομένο, επιλέχθηκε η εισαγωγή της τιμής 3V ως μόνιμη πόλωση στην πύλη των MOSFET ώστε το εύρος των τιμών του DAC από 0 έως 3V να μπορεί να αξιοποιηθεί. Η τάση 3V προκύπτει χρησιμοποιώντας ένα ποτενσιόμετρο και έναν τελεστικό ενισχυτή (IC1A) σε συνδεσμολογία follower.



**Εικόνα 5.3** – Κύκλωμα πόλωσης των MOSFET

Ανάμεσα στα MOSFET και το κύκλωμα οδήγησης, τοποθετήθηκε μία αντίσταση 100Ω με σκοπό τον περιορισμό ρεύματος στην απότομη εκκίνηση τους η οποία μπορεί να οδηγήσει στην ταχύτερη καταστροφή των υλικών της πύλης. Μία ακόμα αντίσταση τοποθετείται στην πύλη των MOSFET ως προς την γείωση με σκοπό να κρατάει την πύλη σε χαμηλό δυναμικό σε κάθε περίπτωση που δεν εφαρμόζεται τάση στην πύλη. Ακόμα, οι δύο αντιστάσεις δημιουργούν έναν διαιρέτη τάσης ο οποίος μας βοηθάει στην πόλωση. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα κάθε MOSFET ίδιου τύπου διαφέρουν στο εύρος της συχνότητας λειτουργίας. Συγκρίνοντας τα MOSFET εμφανίζεται διαφορά στην αντίσταση που παρουσιάζουν στις χαμηλές συχνότητες που χρησιμοποιεί η εφαρμογή, με αποτέλεσμα κάποια να άγουν περισσότερο. Ο διαιρέτης τάσης θα μας βοηθήσει στην συνέχεια να αυξομειώσουμε την πόλωση ώστε να επιτύχουμε κοντινά αποτελέσματα θερμοκρασίας.

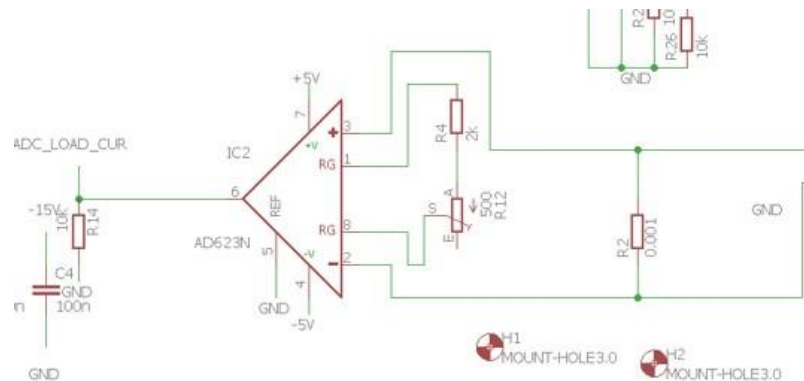


**Εικόνα 5.4** – Κύκλωμα ισχύος

Το υλικό με την ονομασία 22-23-2021 αποτελεί την είσοδο της πηγής υπό δοκιμή. Μεταξύ των εισόδων έχει τοποθετηθεί μία διάοδος για προστασία από ανάποδη πολικότητα. Βέβαια, η συνδεσμολογία δεν είναι σωστή καθώς δεν λειτουργεί ως προστασία στην ανάποδη πολικότητα οπότε και θα διορθωθεί στην επόμενη υλοποίηση. Για μεγαλύτερη ασφάλεια, έχει τοποθετηθεί ένα relay μεταξύ της πηγής υπό δοκιμή και του κυκλώματος ισχύος το οποίο προσφέρει γαλβανική απομόνωση. Η επαφή του relay έχει χαρακτηρισμό για 10 Ampere κάτι που προσθέτει ακόμα έναν περιορισμό στην εφαρμογή. Ένα Relay με μεγαλύτερο rating στο ρεύμα που μπορεί να διέλθει μέσα από την επαφή, αυξάνει κατά πολύ το μέγεθος του. Ακόμα, η αντίσταση της επαφής κυμαίνεται από ορισμένα mΩ έως 1 Ωμ. Αυτό είναι απαγορευτικό για την εφαρμογή καθώς ολόκληρο το δικτύωμα διαθέτει αντίσταση ορισμένων mΩ. Με την χρήση του relay, η επαφή του θα καταναλώνει μεγάλο μέρος την ισχύς του κυκλώματος με αποτέλεσμα να υπερθερμαίνεται και να δημιουργεί πρόβλημα στην εφαρμογή.

### Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος

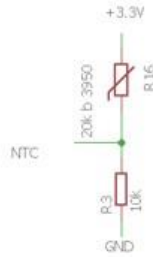
Η μέτρηση της τάσης της πηγής που συνδέεται στο κύκλωμα επιτυγχάνεται με την χρήση ενός T.E. σε συνδεσμολογία follower. Το IC7 αποτελεί έναν ακόλουθο τάσης ο οποίος οδηγείται στον μικροελεγκτή. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε πως η μέγιστη τάση εισόδου του μικροελεγκτή είναι τα 5V οπότε δεν επιτρέπεται να συνδεθεί πηγή μεγαλύτερης τάσης, αποτελώντας ένα σημαντικό φραγμό για την εφαρμογή.



**Εικόνα 5.5** – Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος

Το κύκλωμα μέτρησης του ρεύματος αποτελείται από έναν ενισχυτή οργανολογίας με σχεδόν ιδανικά χαρακτηριστικά, τον AD623 και μία αντίσταση μικρής τιμής, την R2. Η ελάχιστη διακύμανση της τάσης που εφαρμόζεται επάνω στην αντίσταση R2 ενισχύεται και τροφοδοτείται στο εσωτερικό ADC του μικροελεγκτή για να γίνει η μέτρηση. Η αντίσταση κέρδους του ενισχυτή οργανολογίας έχει τιμή 2,32kΩ. Προέκυψε από τον τύπο που δίνει ο κατασκευαστής σύμφωνα με τον οποίο η τιμή που επιλέχθηκε αντιστοιχεί σε διακύμανση εξόδου 0-3.3V για μέτρηση ρεύματος 0-60A.

## Κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας



**Εικόνα 5.6** – Αισθητήριο θερμοκρασίας

Η μέτρηση της θερμοκρασίας αποτελεί ίσως τον σημαντικότερο παράγοντα στην εφαρμογή. Το σύνολο της ισχύος που καταναλώνεται από το ΗΦ μετατρέπεται σε θερμότητα. Όσο μεγαλύτερη ισχύ ζητάει το φορτίο, τόσο αυξάνεται η θερμοκρασία των MOSFET. Το αισθητήριο που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μία μεταβλητή αντίσταση αρνητικού θερμικού συντελεστή (NTC) με τιμή αντίστασης σε θερμοκρασίας δωματίου 20kΩ. Η αποτύπωση της θερμοκρασίας γίνεται με χρήση της συνάρτησης Steinhart η οποία χρησιμοποιεί τρεις συντελεστές που προκύπτουν από το datasheet του κατασκευαστή. Σε γενικές γραμμές, τα NTC δεν αποτελούν μια αξιόπιστη πηγή μέτρησης μεγάλης ακρίβειας. Η κατασκευή του ΗΦ δεν χρειάζεται ακρίβεια δεκαδικού στην μέτρηση της θερμοκρασίας για την λήψη αποφάσεων οπότε αποτελεί μία αποδεκτή λύση.

## Κύκλωμα τροφοδοσίας

Το τροφοδοτικό που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή αποτελεί ένα γραμμικό τροφοδοτικό. Κάθε γραμμή τροφοδοσίας προκύπτει από την ανόρθωση της υποβιβασμένης τάσης δικτύου, μέσα από μια γέφυρα τεσσάρων διόδων, που στη συνέχεια εξομαλύνεται και σταθεροποιείται στην επιθυμητή τάση συνεχούς ρεύματος, με τη χρήση του αντίστοιχου σταθεροποιητικού τάσης. Χρησιμοποιεί έναν διπλό μετασχηματιστή με ονομαστική τιμή 12V<sub>RMS</sub> η οποία μεταφράζεται σε 16.9V<sub>P-P</sub>.

Οι τιμές τάσης που χρησιμοποιεί η εφαρμογή είναι :

- +3.3V για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή και της οθόνης
- +5 & -5V για το ολοκληρωμένο μέτρησης ρεύματος AD623
- +12V για τους ανεμιστήρες του συστήματος ψύξης
- +15 & -15V για την τροφοδοσία των ολοκληρωμένων LM1458

Κάθε γραμμή τροφοδοσίας δεν χρησιμοποιεί ιδιαίτερο ρεύμα. Ο μικροελεγκτής χρησιμοποιεί έως 20mA σε περίοδο λειτουργίας χωρίς WiFi/Bluetooth. Η οθόνη χρησιμοποιεί 15mA για την λειτουργία της και για την χρήση του backlight φωτισμού η κατανάλωση ανέρχεται σε 120mA. Στο σύνολο η κατανάλωση για την γραμμή των 3.3V ανέρχεται σε 155mA.

Η γραμμή των 5V και των -5V έχει κατανάλωση ρεύματος 575μΑ για τον AD623 και 1mV για το MCP4725. Στο σύνολο τα 5V δεν υπερβαίνουν τα 2mA και τα -5V δεν υπερβαίνουν το 1mA.

Η γραμμή των 15V τροφοδοτεί αποκλειστικά τα LM1458. Αυτά διαθέτουν δύο Τ.Ε. σε ένα πακέτο με τοπολογία τρανζίστορ. Η κατανάλωση και για τους δύο ενισχυτές είναι 5.6mA. η έξοδος του ολοκληρωμένου βρίσκεται στα 45mA. Στο σύνολο η γραμμή των +15V έχει ρεύμα έκλυσης 50mA.

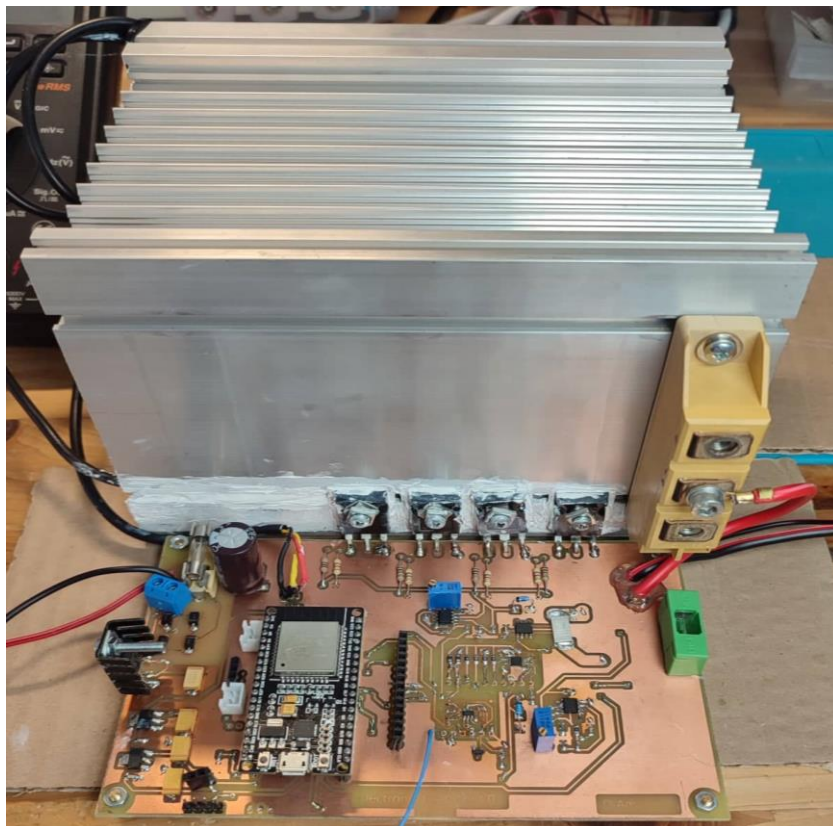
Το υλικό με την μεγαλύτερη κατανάλωση εμφανίζεται στο σύστημα ψύξης και αποτελείται από δύο ανεμιστήρες. Κάθε ανεμιστήρας καταναλώνει 0.15A. Στο σύνολο η γραμμή τροφοδοσίας 12V εμφανίζει κατανάλωση 300mA. Στο σύνολο, η κατανάλωση ρεύματος ανέρχεται σε 515 mA οπότε η τοπολογία που επιλέχθηκε αποτέλεσε η σύνδεση της εξόδου του κάθε σταθεροποιητή με την είσοδο του επόμενου σταθεροποιητή. Το σχηματικό διάγραμμα με την σχεδίαση του τροφοδοτικού έχει τοποθετηθεί στο παράρτημα Β.

### **Συμπεράσματα**

Με την ολοκλήρωση της πρώτης κατασκευής, παρατηρήσαμε πως η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος ηλεκτρονικού φορτίου είναι εφικτή. Στην διάρκεια της κατασκευής, προέκυψα μερικοί περιορισμοί οι οποίοι δεν επιτρέπουν την χρήση του ΗΦ στα πρότυπα που επιλέχθηκαν στην μελέτη. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να εκλυθεί περιορίζεται σε 10A λόγω του relay που χρησιμοποιήθηκε. Η πηγές που συνδέονται στο φορτίο, απαγορεύεται να έχουν τιμή μεγαλύτερη από 5V λόγω του περιορισμού που εμφανίζει ο μικροελεγκτής. Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται εξολοκλήρου από τον κώδικα κάτι που επέφερε λάθος μετρήσεις καθώς τα χαρακτηριστικά του thermistor είχαν μικροδιαφορές με τα χαρακτηριστικά που έδινε ο κατασκευαστής. Ακόμα, το κύκλωμα χρησιμοποιεί 7 διαφορετικές τάσεις, προσθέτοντας πολυπλοκότητα στην εφαρμογή καθώς μεγαλώνει ο κίνδυνος έκλυσης βλάβης παίρνοντας μετρήσεις επάνω στο κύκλωμα. Με όλα τα παραπάνω δεδομένα, πάρθηκε η απόφαση να γίνει μία νέα κατασκευή που να τηρεί τις προδιαγραφές που επιλέχθηκαν.

### **Σχεδιασμός κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου version 3.0**

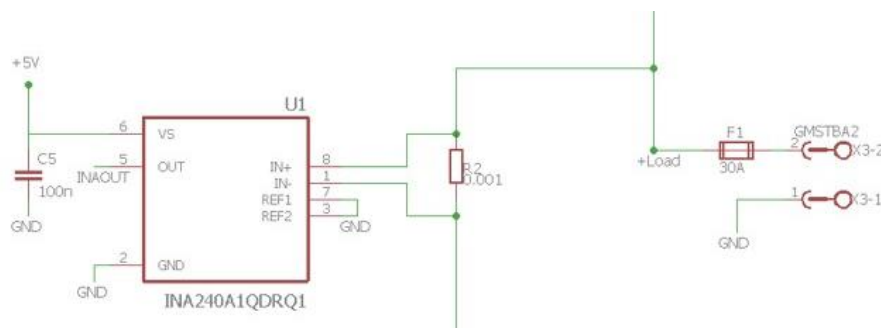
Η δεύτερη υλοποίηση του ηλεκτρονικού φορτίου αποτελεί μία παραλλαγή του αρχικού κυκλώματος. Η βασική ιδέα παραμένει η ίδια και αποτελεί τα θεμέλια της νέας κατασκευής με την διαφοροποίηση στα αισθητήρια και στον τρόπο που γίνονται οι μετρήσεις. Έχουν γίνει αλλαγές στο κύκλωμα μέτρησης του ρεύματος, στο κύκλωμα μέτρησης της τάσης καθώς και στο κύκλωμα μέτρησης της θερμοκρασίας προσφέροντας μεγαλύτερη αξιοπιστία στο σύστημα. Ακόμα, μικρές διαφοροποιήσεις εμφανίζονται και στο κύκλωμα πόλωσης των MOSFET. Η κατασκευή του 2<sup>ου</sup> κυκλώματος αποτελείται μία ολοκληρωμένη κατασκευή η οποία συμπεριλαμβάνει και το τροφοδοτικό των επιμέρους στοιχείων στο ίδιο τυπωμένο κύκλωμα.



**Εικόνα 5.12** – Κατασκευή ηλεκτρονικού φορτίου ver.3.0

Ο σχεδιασμός του σχηματικού διαγράμματος διαρθρώνεται σε πέντε υπό ενότητες, κάθε μία περιέχει ένα υποκύκλωμα ελέγχου και έχει σχεδιαστεί σε διαφορετικό φύλλο εργασίας. Στο πρώτο φύλλο, υπάρχει το κύκλωμα ισχύος με τα αναλογικά κυκλώματα μέτρησης. Στο δεύτερο φύλλο, έχει τοποθετηθεί ο μικροελεγκτής και τα συστήματα επικοινωνίας με τον χρήστη. Το τρίτο, τέταρτο και πέμπτο φύλλο, έχουν τοποθετηθεί με την σειρά τα κυκλώματα του Αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα ADC (εικόνα ), το κύκλωμα ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπέα DAC (εικόνα) και το κύκλωμα τροφοδοσίας (εικόνα).

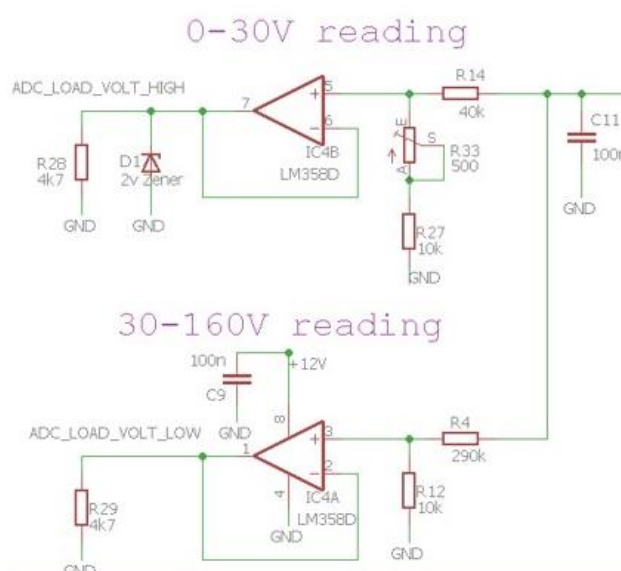
### Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος



**Εικόνα 5.12** – Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος

Η επιλογή του AD623 κατασκευαστικά δεν επέτρεπει την εφαρμογή στην είσοδό του τάσης μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας (5V). Αυτό το πρόβλημα διορθώνεται με την χρήση ενός διαιρέτη τάσης και ενός T.E. σε συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης ο οποίος μπορεί να δώσει εξασθένιση όση επιλέξουμε. Ωστόσο, ο ενισχυτής οργανολογίας έχει κοινό σήμα την γείωση και αυτό δημιουργεί προβλήματα στην εφαρμογή. Η γείωση αποτελεί έναν αγωγό με πολύ μεγάλο μήκος επάνω στον οποίο εμφανίζεται κημάτωση θορήβου. Ο θορήβος είναι συγκρίσιμο μέγεθος με την πτώση τάσης επάνω στην αντίσταση  $R_{SHUNT}$ . Η λύση είναι η μετακίνηση της αντίστασης σε επίπεδο σήματος υψηλού δυναμικού (High Side) όπου το ένα άκρο θα συνδέεται στην πηγή και το άλλο άκρο θα συνδέεται στο Drain των MOSFET. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα INA240A2, αποτελεί ένα πακέτο ενισχυτή μικρών σημάτων με κέρδος 50 και διαφορική τάση εισόδου από -4 έως +80V. Αποτυπώνοντας τα νούμερα στην εφαρμογή, η πηγή υπο έλεγχο μπορεί να πάρει τιμή έως 80V.

### Κύκλωμα μέτρησης τάσης



**Εικόνα 5.13** – Κύκλωμα μέτρησης τάσης

Το κύκλωμα μέτρησης της τάσης χρησιμοποιεί δυο T.E. σε συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης με διαφορετικό λόγο αντιστάσεων στην είσοδό τους. Η έξοδος των T.E. τροφοδοτείται σε ένα προγραμματιζόμενο ADC με μεταβλητό κέρδος το οποίο επικοινωνεί με το πρωτόκολλο I2C με τον μικροελεγκτή. Το resolution που επιλέχθηκε για το ADC είναι τα 2.048V οπότε επιλέχθηκε αντίστοιχος λόγος αντιστάσεων ώστε στην μία περίπτωση, για μικρές τάσεις, ολόκληρη η διακύμανση του ADC να αντιστοιχεί σε τιμές τάσης πηγής 0-30V καθώς στην δεύτερη περίπτωση ολόκληρη η διακύμανση του ADC αντιστοιχεί σε τιμές τάσης έως 160V. Πρακτικά, δεν μπορούσε ένας T.E. να χρησιμοποιηθεί για ολόκληρο το εύρος τιμών καθώς ο LM358 διαθέτει ελάχιστο όριο εξόδου  $V_{OL}=20mV$  με αποτέλεσμα στην περίπτωση που δεν είναι συνδεμένη καμία πηγή, η έξοδος του να έχει τιμή 20mV οπότε η μέτρηση από το ADC να είναι λανθασμένη. Για αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μία τάση reference η οποία να



επιτελεί τον ρόλο του κατώτερου ορίου εξόδου του T.E. και θα αποτυπώνει την τάση εισόδου των 0V. Ωστόσο, κάτι αντίστοιχο έγινε με προγραμματισμό καθώς μετράτε κάθε φορά στην εκκίνηση της συσκευής η τάση που εμφανίζεται στην είσοδο του ADC και αφαιρείται από το συνολική μέτρηση.

### *Κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας*

Η μέτρηση της θερμοκρασίας στο αρχικό κύκλωμα γινόταν με την χρήση ενός θερμίστορ. Καθώς το θερμίστορ δεν είναι γραμμικό και η συνάρτηση Steinhart δεν είχα τα σωστά δεδομένα, δεν λειτουργούσε με ακρίβεια. Την θέση του θερμίστορ πήρε ένα γραμμικό στοιχείο, το αισθητήριο της Dallas DS18B20. Η επικοινωνία με τον μικροελεγκτή γίνεται με έναν αγωγό και τοποθετήθηκε εσωτερικά της ψήκτρας πολύ κοντά στο κέλυφος του πρώτου MOSFET.

### *Πόλωση των MOSFET*

Η πόλωση των MOSFET συνεχίζει να γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Υπάρχει μία μόνιμη τάση 3V στην πύλη και το ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP4725 προσθέτει σύμφωνα με τις ανάγκες την αντίστοιχη τάση. Η διαφοροποίηση στο κύκλωμα πόλωσης έρχεται στην τροφοδοσία του DAC. Έχει χρησιμοποιηθεί ένα voltage reference που μετατρέπει την τάση τροφοδοσίας των 5V σε 4.096V. Αποτέλεσμα του είναι η μετατροπή κάθε βήματος του DAC σε ακριβώς 1mV αναλογικής τάσης. Με τον τρόπο αυτό, τα MOSFET οδηγούνται με ευκρίνεια 1mV και επιτυγχάνεται καλύτερη σταθερότητα στο κύκλωμα.

### *Είσοδοι-έξοδοι*

Όλες οι μετρήσεις και τα δεδομένα του συστήματος αποτυπώνονται σε μία οθόνη. Η οθόνη που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μία γραφική οθόνη 3.5 ιντσών με ανάλυση 480x320. Χρησιμοποιεί τον ελεγκτή ILI9488 και επικοινωνεί με το υπόλοιπο κύκλωμα με την διεπαφή SPI. Διαθέτει και σύστημα αφής το οποίο δεν χρησιμοποιείται στην δεύτερη υλοποίηση του κυκλώματος, ωστόσο υπάρχει πρόβλεψη για μελλοντική χρήση του σε ένα μεταγενέστερο software upgrade.

Τα δεδομένα εισάγονται στο σύστημα με την χρήση ενός encoder. Διαθέτει αρκετές λειτουργίες και διευκολύνει αρκετά την εφαρμογή καθώς αποτελεί ένα ψηφιακό μέσο που επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή και επιτελεί τις αντίστοιχες ενέργειες που ορίζει ο χρήστης. Χρησιμοποιεί τρία σήματα τα οποία καταλαμβάνουν τρεις θέσεις εισόδου στον μικροελεγκτή και πλαισιώνουν την επικοινωνίας τους. Η χρήση του encoder βρίσκει εφαρμογή και νόημα με την ταυτόχρονη χρήση υπομενού. Έχουν δημιουργηθεί MENU στον κώδικα, μέσα από τα οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την λειτουργία που επιθυμεί. Με τον τρόπο αυτό ελάττώνεται η ανάγκη για χρήση περισσότερων συσκευών εισόδου με τον encoder να παίρνει την θέση περισσότερων από μίας επιλογής.

Δύο είσοδοι που δεν θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από τον encoder αποτελούν η διεπαφή για την εμφάνιση του MENU και η επιλογή ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης της εξόδου ανεξάρτητα

από την κατάσταση την παρούσα λειτουργία του συστήματος. Οι δύο λειτουργίες επιτελούνται χρησιμοποιώντας δύο διακόπτες στιγμιαίας επαφής (button) οι οποίοι συνδέονται με εσωτερικά interrupt με τον μικροελεγκτή. Με την αλλαγή της κατάστασης ενός από τους δύο διακόπτες, ο μικροελεγκτής σταματάει κάθε ενέργεια που έκανε μέχρι εκείνη τη στιγμή και μπαίνει στην ρουτίνα του MENU ή της ενεργοποίησης της εξόδου. Εκεί, επιλέγοντας το menu, το σύστημα εισέρχεται στην ρουτίνα MenuServiceInterrupt, το σύστημα μηδενίζει όλες οι μεταβλητές ελέγχου (flag) και εξόδου. Στην συνέχεια οδηγεί τον χρήστη στην επολογή της λειτουργίας που επιθυμεί, με τις αντίστοιχες ενδείξεις στην οθόνη. Στην επιλογή ενεργοποίησης της εξόδου, το πρόγραμμα μπαίνει στην ρουτίνα LoadEnableServiceInterrupt. Ελέγχει την προηγούμενη κατάσταση της εξόδου και γίνεται η μετάβαση με απεικόνιση της νέας κατάστασης στην οθόνη. Στην περίπτωση που η έξοδος απενεργοποιείται, απενεργοποιούνται όλες οι μεταβλητές που επιτελούν στην πόλωση των MOSFET.

```

void IRAM_ATTR LoadEnableServiceInterrupt(){
    currentMillis = millis();
    if (currentMillis - LastTimePressed > 500){
        LoadButton = 1;
        LoadEnable=!LoadEnable;
        Serial.println("Load Enable ISR!! ---> LoadButton is pressed");
        LastTimePressed = millis(); // Save time of last event
    }
    if(!LoadEnable){
        DACOutput = 0;
        ready=0;
        flagCurrentReached = 0;
    }
}

void IRAM_ATTR MenuServiceInterrupt(){
    currentMillis = millis();
    if (currentMillis - LastTimePressed > 100){
        MenuButton = 1;
        choice = 0;
        choiceEnter = 0;
        flagCurrentReached = 0;
        ready = 0;
        cc = 0;
        cv = 0;
        cp = 0;
        cr = 0;
        DACOutput = 0;
        tft.fillRect(TFT_BLACK);
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour
        Serial.println("Menu pressed!!");
        LastTimePressed = millis(); // Save time of last event
    }
}

```

**Εικόνα 5.14** – Ρουτίνες εξυπηρέτησης για την ενεργοποίηση της εξόδου και την ενεργοποίηση του menu

Όλα τα σχηματικά διαγράμματα της κατασκευής έχουν τοποθετηθεί στο παράρτημα β στο τέλος της εργασίας.

## Πρόγραμμα μικροελεγκτή

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιεί ο μικροελεγκτής και επάνω στο οποίο βασίζεται η λειτουργία και η παραμετροποίηση της συσκευής του ηλεκτρονικού φορτίου είναι γραμμένο σε γλώσσα C. Ο κώδικας βασίζεται στην αρχή του δομημένου προγραμματισμού. Συντέθηκε στην σουίτα Arduino IDE και η δομή του βασίζεται σε δύο κύριες συναρτήσεις. Η συνάρτηση “setup” εκτελείτε μόνο μία φορά με την εκκίνηση

του προγράμματος και η συνάρτηση “loop” η οποία εκτελείται συνέχεια και καλεί δευτερεύουσες συναρτήσεις, συναρτήσεις κατώτερης βαθμίδας, που συντελούν την λειτουργία του συστήματος.

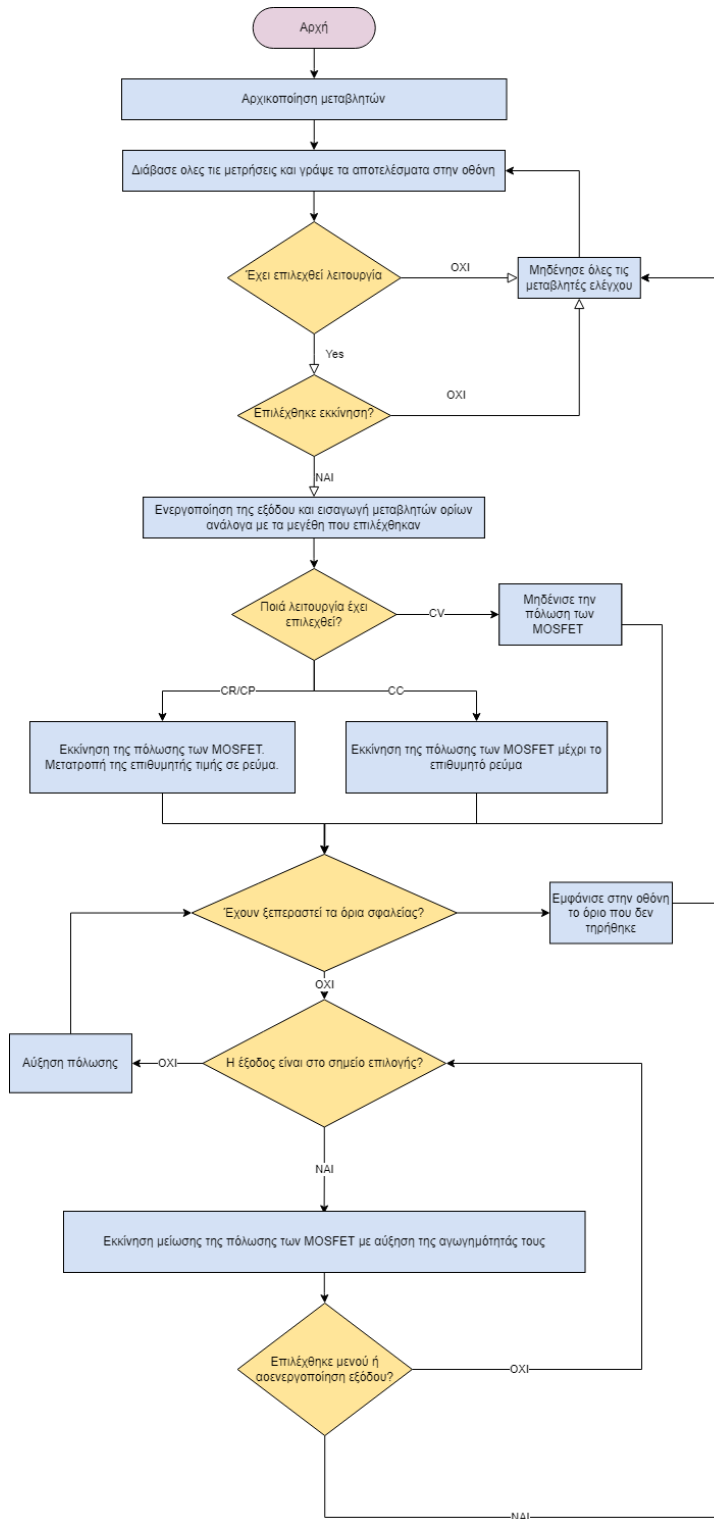
Για να γίνει καλύτερη κατανόηση του κώδικα, θα γίνει μία πιο αναλυτική εισαγωγή στην ροή του. Η συνάρτηση “setup” ορίζει τις εισόδους και τις εξόδους του συστήματος. Στην συνέχεια δίνει το έναυσμα σε όλες τις συναρτήσεις που χρησιμοποιούν κάποια βιβλιοθήκη και αρχικοποιεί όλες τις μεταβλητές ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε κάθε συνάρτηση. Τέλος, γίνεται έλεγχος στην επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και των συστημάτων DAC και ADC ώστε να προχωρήσει χωρίς σφάλματα στο επόμενο στάδιο.

Η συνάρτηση “loop” αποτελεί τον κορμό του προγράμματος. Για όσο χρόνο ο μικροελεγκτής τροφοδοτείται με ρεύμα, εκτελείται συνεχώς. Μέσα στην ρουτίνα loop, η πρώτη ενέργεια που εκτελείται είναι η μέτρηση στην τάση, στο ρεύμα, και στην θερμοκρασία που εφαρμόζονται στο ΗΦ κάθε 200 χιλιοστά του δευτερολέπτου και γίνεται η καταγραφή των μετρήσεων στην οθόνη. Στην συνέχεια, ανάλογα με τα δεδομένα που έχει εισάγει ο χρήστης (cc,cv,cr,cp) το ΗΦ επιτελεί την επιλεγμένη λειτουργία. Ο βασικός αλγόριθμός που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει δύο περιπτώσεις. Αρχικά, με το πάτημα του κουμπιού μενού, καθαρίζονται όλες οι μεταβλητές ελέγχου και το ΗΦ έρχεται σε κατάσταση ηρεμίας. Στην συνέχεια, εμφανίζονται μηνύματα στον χρήστη ώστε να επιλέξει λειτουργία και μονάδες που επιθυμεί. Με το πέρας της εισαγωγής των στοιχείων από τον χρήστη, η συσκευή επανέρχεται σε κατάσταση ηρεμίας και περιμένει από τον χρήστη την εντολή εκκίνησης.

Η έναυση της λειτουργίας γίνεται με το πάτημα του κουμπιού ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της εξόδου. Μόλις πατηθεί το κουμπί εξόδου, γίνεται έλεγχος της προηγούμενης κατάστασης της εξόδου και μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση ενεργοποιώντας τις παρακάτω ρουτίνες. Αρχικά, χρησιμοποιεί την ρουτίνα LoadEnableDisplayFunction η οποία απεικονίζει την κατάσταση εξόδου στην οθόνη. Στην συνέχεια, η ρουτίνα GetCurrentLimits ρυθμίζει τα όρια των μεταβλητών ελέγχου που επιτελούν την πόλωση των MOSFET ανάλογα με το ρεύμα που έχει δηλώσει ο χρήστης. Τέλος, ενεργοποιείται η ρουτίνα EnableOutput όπου το σύστημα ενεργοποιεί το κύκλωμα ισχύος.

Στην ρουτίνα EnableOutput, συνυπάρχουν όλες οι ρουτίνες ελέγχου της εξόδου. Περιληπτικά, ενεργοποιείται η έξοδος και γίνεται εκκίνηση στο σύστημα ομαλής πόλωσης. Για την αποφυγή απότομης πόλωσης και απότομης έκλυσης ρεύματος δημιουργήθηκε μία ρουτίνα για την ομαλή πόλωση τους. Η ρουτίνα αυτή ονομάζεται MosfetBias και αυξάνει την πόλωση των MOSFET με εκθετικό ρυθμό ανάλογα πάντα με τον στόχο και το πόσο απέχουμε από τον στόχο. Τέλος, γίνεται έλεγχος με τα όρια ασφαλείας στο μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα και στην μέγιστη επιτρεπτή ισχύ που υπάρχει περίπτωση να εκλυθεί ώστε στην ακραία περίπτωση που για τον οποιοδήποτε λόγο ξεπεράσει αυτές τις τιμές, το ΗΦ θα μπει σε κατάσταση αποκοπής με το αντίστοιχο μήνυμα στην οθόνη. Τα όρια προλαβαίνουν καταστάσεις όπου μπορεί να δημιουργηθεί βλάβη στην πηγή υπό δοκιμή.

Η ρουτίνα EnableOutput επαναλαμβάνεται συνεχώς. Ο μοναδικός τρόπος που το πρόγραμμα θα βγει από την ρουτίνα είναι οι δύο επιλογές του χρήστη όπου και οι δύο σταματάνε την ρουτίνα και το ΗΦ έρχεται σε κατάσταση ηρεμίας όπου περιμένει από τον χρήστη να δώσει την εντολή. Το διάγραμμα ροής του κώδικα, παραθέτετε στην συνέχεια.



**Εικόνα 5.18** – Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου του προγράμματος του μικροελεγκτή

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Αποτελέσματα και μετρήσεις της διάταξης

### Όργανα μέτρησης

Το τελευταίο στάδιο της κατασκευής αποτελεί η λήψη μετρήσεων και ο έλεγχος ποιότητας της διάταξης. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για μέτρηση της διάταξης αποτελούν αξιόπιστες μονάδες και παρατίθενται παρακάτω.

- RIGOL DS1202-E, 200 MHz ψηφιακός παλμογράφος
- BRYMEN BM 869s, 50.000 counts ψηφιακό πολύμετρο
- Fluke 115, 6.000 counts ψηφιακό πολύμετρο
- Protek 506, 4.000 counts ψηφιακό πολύμετρο
- Ρυθμιζόμενο τροφοδοτικό πάγκου 30V/5A

Ο παλμογράφος και το πολύμετρο της Brymen BM-692 αποτελούν νέες αγορές οπότε έχουν γίνει τα εργοστασιακά calibration και οι μετρήσεις μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες. Το Fluke 115 πέρασε έλεγχο ποιότητας και calibration μέσα στο 2022 από την ALGO Systems. Οι υπόλοιπες μονάδες δεν έχουν περάσει calibration τα τελευταία χρόνια οπότε χρησιμοποιήθηκαν για μετρήσεις χωρίς ιδιαίτερη βαρύτητα.

### Μετρήσεις ορθής λειτουργίας

Η αξιοπιστία της εφαρμογής θα κριθεί από την ικανότητά της να αποτυπώσει σωστά τις μετρούμενες μονάδες. Η απόκλιση κάθε μέτρησης πρέπει να είναι σε πολύ μικρές τιμές ώστε η κατασκευή να γίνει αποδεκτή και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ηλεκτρονικούς μηχανικούς.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιούν το πολύμετρο της Fluke για μέτρηση της τάσης της πηγής το οποίο τοποθετείται παράλληλα στην πηγή τροφοδοσίας στην μεριά του ηλεκτρονικού φορτίου. Το πολύμετρο της Protek συνδέεται σε σειρά ώστε να γίνει ο προσδιορισμός του ρεύματος που διέρχεται προς το κύκλωμα. Η ισχύς υπολογίζεται κάθε φορά χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ωμ. Τελευταία και σημαντικότερη μέτρηση αποτελεί η θερμοκρασία που αναπτύσσει το κύκλωμα ισχύος. Για την ορθή λήψη αποφάσεων μετράτε η θερμοκρασία του πίσω μέρους κάθε MOSFET χωριστά. Όλα τα μεγέθη παραθέτονται στον πίνακα 5.1.

V <sub>DMM</sub> (V)	I <sub>SET</sub>	I <sub>DMM</sub> (A)	I <sub>eLoad</sub> (A)	P <sub>DMM</sub> (W)	I <sub>DIFF</sub> (%)	T <sub>Q1</sub> (°C)	T <sub>Q2</sub> (°C)	T <sub>Q3</sub> (°C)	T <sub>Q4</sub> (°C)	T <sub>hs</sub> (°C)
11.86	1.000A	0.97	0.955	11.50	1.5	38.7	35.6	38.8	40.7	27
11.54	2.000A	2.01	1.977	23.20	3.3	41	37.4	43.3	44.1	29
11.21	3.000A	3.028	3.039	33.94	-1.1	44.7	39.4	48.8	47.9	30
10.89	4.000A	3.997	4.038	43.53	-4.1	47.8	44.9	51.1	50.5	32
10.45	5.000A	4.967	5.014	51.91	-4.7	51.1	48.7	54.4	52.1	35
10.12	6.000A	6.035	5.92	61.07	11.5	56.8	51.1	59.8	55.8	39
28.3	1.000A	1.05	0.998	29.72	5.2	45.3	38.1	47.3	47.9	34
28.22	2.000A	2.12	2.041	59.83	7.9	61.3	51.1	66.4	66	40
28.17	3.000A	3.056	3.039	86.09	1.7	85.9	73.8	88.3	86	46
27.78	4.000A	4.082	4.038	113.40	4.4	106.2	81.2	105.8	138.7	55
5.01	2.000A	-	1.95	9.79	-	-	-	-	-	-
4.60	10.000A	-	10.01	46.06	-	-	-	-	-	-
4.37	15.000A	-	15.04	65.68	-	-	-	-	-	-
4.17	20.000A	-	20.01	83.36	-	-	-	-	-	-
3.93	25.000A	-	25.03	98.42	-	-	-	-	-	-

**Πίνακας 5.1** – Αποτελέσματα μετρήσεων του ηλεκτρονικού φορτίου με τρεις πηγές ρεύματος και ονομαστική τιμή τάσης 5, 12 & 28V.

Συνολικά στο πειραματικό μέρος, χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές πηγές ρεύματος. Η πρώτη πηγή αποτελεί ένα switching τροφοδοτικό υπολογιστή το οποίο έχει κατασκευαστεί πριν από περισσότερο από 20 χρόνια. Η έξοδος που διαθέτει την περισσότερη ισχύ, είναι η γραμμή με τα 12V τα οποία μπορούν να δώσουν μέχρι 21A και χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμή στο ηλεκτρονικό φορτίο. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που υπάρχουν στον πίνακα 5.1, μπορούμε να διακρίνουμε μία σημαντική πτώση στην τάση εξόδου του τροφοδοτικού κατά το διάστημα που προσπαθούσαμε να αντλήσουμε ρεύμα. Ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου το ΗΦ ρυθμίστηκε σε λειτουργία σταθερού ρεύματος με τιμή 6A, η τάση στα άκρα της πηγής έπεσε στα 10.12V. Αυτό αποδεικνύει πως η πηγή γονατίζει μόλις της ζητηθεί μία σημαντική τιμή ρεύματος. Ως αποτέλεσμα, μόλις ζητήθηκε η τιμή των 7A, το τροφοδοτικό έκοψε τελείως την τροφοδοσία και μπήκε σε λειτουργία ύπνου. Η πηγή αποτελεί μία περίπτωση που χρειάζεται επισκευή στα γερασμένα ημιαγωγά στοιχεία της καθώς δεν λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

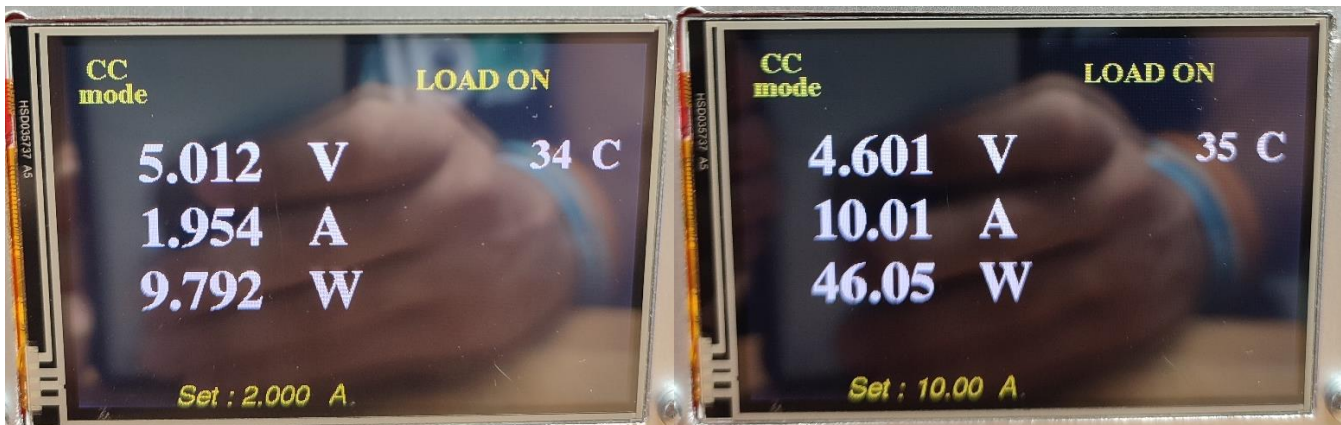
Η δεύτερη πηγή που μελετήθηκε αποτελεί ένα προϊόν επισκευής. Συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στο μοντέλο 3M4C4410K00A της εταιρίας EXCELSYS το οποίο χαρακτηρίζεται με μέγιστη ισχύς εξόδου 600Watt και δύο διαφορετικές εξόδους τάσης. Διαθέτει μία έξοδο με ονομαστική τιμή τάσης 28V η οποία μπορεί να τροφοδοτήσει μέχρι 12A και μία έξοδο 5V η οποία μπορεί να τροφοδοτήσει έως 25A. Το επόμενο σκέλος των μετρήσεων έγινε χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο εξόδους.

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης ισχύος, χρησιμοποιήθηκε η έξοδος των 28V. Μελετώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων, συμπαιρνουμε τα όρια που έχει το ηλεκτρονικό φορτίο. Το δεδομένο είναι η θερμοκρασία των 100°C η οποία δεν πρέπει να εμφανιστεί καθώς η ψυκτική μονάδα φαίνεται πως δεν έχει την θερμοχωρητικότητα για να διαχέει τέτοια επίπεδα θερμότητας. Η μέγιστη ισχύς που αποδόθηκε στο ΗΦ χωρίς να ανεβάσει θερμοκρασία μεγαλύτερη του ορίου είναι τα 100 Watt. Μόλις υπερβεί αυτό το όριο, η θερμοκρασία υπερβαίνει το κατώφλι των 100°C. Στιγμιαία μπορούμε να εκλύσουμε περισσότερο από τα 113W ωστόσο θέλει αρκετή προσοχή.



**Εικόνα 5.1** – Τροφοδοτικό EXCELSYS 3M4C4410K00A

Για τον προσδιορισμό του μέγιστου ρεύματος, χρησιμοποιήθηκε η πηγή των 5V. Σε αυτές τις μετρήσεις, καταφέραμε να πάρουμε τιμές ρευμάτων έως και 25A καθώς το τροφοδοτικό που χρησιμοποιήθηκε έφτασε στα όριά του. Τιμές ρεύματος ακόμα μεγαλύτερων τιμών μπορούν να εκλυθούν αλλά για μικρούς χρόνους όπου η θερμοκρασία των MOSFET δεν θα προλάβει να περάσει το κατόφλι που είδαμε προηγουμένως. Στην συνέχεια, απεικονίζονται μερικές φωτογραφίες από τις μετρήσεις.



**Εικόνα 5.1 & 5.2** – Φωτογραφία με την έξοδο της οθόνης σε διάφορες τιμές μετρήσεων.



Εικόνα 5.3 & 5.4 – Φωτογραφία με την έξοδο της οθόνης σε διάφορες τιμές μετρήσεων.

Το κοστολόγιο της εφαρμογής είναι αρκετά υψηλό όμως κατά πολύ χαμηλότερο από τον ανταγωνισμό. Τα ηλεκτρονικά υλικά της κατασκευής αποτελούν ένα μικρό μέρος του συνολικού κόστους. Το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου καλύπτεται από την ψήκτρα και το κουτί της κατασκευής τα οποία αποτελούνται από μεταλλικά υλικά υψηλής αξίας.

Κόστος ψήκτρας	120€
Κόστος μικροελεγκτή	5.5€
Κόστος οθόνης	16€
Κόστος συσκευών εισόδου	3€
Κόστος ολοκληρωμένων	19€
Κόστος λοιπών υλικών	7€
Κόστος πλακέτας	10€
Κόστος μετασχηματιστή	9€
Κόστος MOSFET	27€
Κόστος Κουτιού	34€
Σύνολο	250.5€

Πίνακας 5.2 – Ενδεικτικό κόστος της κατασκευής



## Σύγκριση της του υλοποιημένου ηλεκτρονικού φορτίου με την αγορά



Dimitris Abatzis eLoadv3, 1025B, 0 → 25 A, 0 → 80 V, 0 → 100 W, 0.2 → 7500Ω

Κωδικός Προϊόντος -

**€ 250,5** Μονάδας ( Με ΦΠΑ)



BK Precision Electronic Load, 8500B, BK8500B, 0 → 30 A, 0 → 150 V, 0 → 300 W, 10 → 7500Ω

Κωδικός Προϊόντος της RS 192-4570

**€ 1.957,16** Μονάδας ( Χωρίς ΦΠΑ)



BK Precision Electronic Load, 8510B, BK8510B, 0 → 120 A, 0 → 120 V, 0 → 600 W, 10 → 7500Ω

Κωδικός Προϊόντος της RS 192-4572

**€ 3.655,06** Μονάδας ( Χωρίς ΦΠΑ)



Keithley Electronic DC Load, 2380, 2380-120-60, 0 → 60 A, 0 → 120 V, 0 → 250 W, 10 → 7500Ω

Κωδικός Προϊόντος της RS 917-6566

**€ 3.889,87** Μονάδας ( Χωρίς ΦΠΑ)



BK Precision Electronic Load, 8514B, BK8514B, 0 → 240 A, 0 → 120 V, 0 → 1500 W, 0.5 → 7500Ω

Κωδικός Προϊόντος της RS 197-8460

**€ 5.171,82** Μονάδας ( Χωρίς ΦΠΑ)

## Μελλοντικές εξελίξεις

Η συσκευή που δημιουργήθηκε αποτελεί τον κορμό ενός ηλεκτρονικού φορτίου που μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικότητα την κατάσταση μίας πηγής υπό έλεγχο. Η παρούσα κατασκευή αφήνει μέρος για προσθήκη περισσότερων στοιχείων που θα αποτελέσουν αναβάθμιση του αρχικού σχεδίου. Οι κύριες μονάδες που αποτελούν στόχο για το μέλλον είναι :

- Γραφήματα των χαρακτηριστικών της πηγής υπό έλεγχο
- Εισαγωγή πληκτρολογίου
- Χρήση της οθόνης αφής
- Αποτύπωση των αποτελεσμάτων στο κινητό τηλέφωνο

Αρχικό μέρος της επόμενης αναβάθμισης θα αποτελέσει η αποτύπωση των χαρακτηριστικών της τάσης και του ρεύματος σε γραφήματα. Αυτό θα βοηθήσει στον προσδιορισμό της πηγής τάσης υπό φορτίο καθώς θα μπορεί να γίνει συσχέτιση με τον χρόνο. Σε πολλές περιπτώσεις, η πηγή σε ηρεμία δεν αποδίδει καμία κυμάτωση στην έξοδό της. Στην περίπτωση που αρχίζει να ρέει ρεύμα και μπαίνει σε λειτουργία, η τάση εξόδου φαίνεται πως αποκτάει κυμάτωση καθώς η πηγή δυσκολεύεται να δώσει το ζητούμενο ρεύμα.

Μία ακόμα αναβάθμιση που θα βελτιώσει την εμπειρία του χρήστη με την συσκευή αποτελεί η προσθήκη πληκτρολογίου και άλλων πηγών εισόδου. Το πληκτρολόγιο αποτελεί την βέλτιστη επιλογή εισαγωγής δεδομένων με το λιγότερο βαθμό δυσκολίας. Ένας ακόμα τρόπος εισαγωγής δεδομένων και εντολών, μπορεί να γίνει με τροποποίηση της σύνδεσης της οθόνης χρησιμοποιώντας την επιλογή της αφής. Επιλέχθηκε να μην χρησιμοποιηθεί καθόλου η αφή για απλοποίηση της εφαρμογής, ωστόσο από την οθόνη αφής μπορεί να γίνει έλεγχος σε αισθητά λιγότερο χρόνο.

Ο κυριότερος λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής, αποτέλεσε η ικανότητά του να συνδέεται ασύρματα με πρωτόκολλα όπως το WiFi και το Bluetooth. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στην εφαρμογή να αποστέλλει τα δεδομένα σε μία εξωτερική πηγή (κινητό τηλέφωνο) όπου μπορεί να γίνει καταγραφή καθώς και απομακρυσμένος έλεγχος.

Συνοψίζοντας, το επόμενο στάδιο του ηλεκτρονικού φορτίου θα φέρει αρκετές τροποποιήσεις. Η χρήση εξωτερικών εργαλείων θα εξαλειφθεί καθώς το ηλεκτρονικό φορτίο ως μονάδα είναι περισσότερο από ικανό για τον ρόλο αυτόν. Οι μελλοντικές εξελίξεις επιφέρουν αλλαγές με κοινό γνώμονα τον βέλτιστο χαρακτηρισμό των πηγών υπό έλεγχο, με την χρήση μόνο μίας συσκευής.

## Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την μελέτη, προκύπτει πως η δημιουργία μίας διάταξης ηλεκτρονικού φορτίου με κοστολόγιο κατά πολύ μικρότερο από τις λύσεις της αγοράς είναι εφικτή. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού φορτίου που δημιουργήθηκε ανταποκρίνονται στις προσδοκίες προσδίδοντας αξιοπιστία στην κατασκευή που πραγματοποιήθηκε.

Η υλοποίηση της μελέτης αποτελεί μία λύση ΗΦ με ισχύ λειτουργίας 100W, μέγιστο ρεύμα στα 25A καθώς η τάση μπορεί να πάρει την ανώτατη τιμή των 80V. Στην περίπτωση που υπάρχει η ανάγκη για περισσότερη ισχύ, το επόμενο στάδιο υλοποίησης επιφέρει βελτίωση στην ικανότητα του ΗΦ να διαχέει την θερμότητα. Είναι αναγκαία η χρήση μίας καλύτερης ψήκτρας η οποία θα μπορεί να κρατήσει τα

MOSFET σε θερμοκρασίες που δεν ξεπερνούν τους 100°C. Ακόμα, καλύτερος έλεγχος και καταγραφή των μεγεθών μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ξεχωριστού κυκλώματος για την διαχείριση κάθε MOSFET με σκοπό να μπορεί να παρακολουθείται μεμονωμένα. Μικρές διαφοροποιήσεις στο κύκλωμα ακόμα και στο πάχος των γραμμών του χαλκού επάνω στο τυπωμένο μπορούν να συνδράμουν σε σημαντική ασυμμετρία μεταξύ των MOSFET. Μελετώντας ξεχωριστά κάθε ημιαγωγό και πολώνοντας τον με την αντίστοιχη τάση που χρειάζεται, λύνεται το πρόβλημα της ασυμμετρίας χαρακτηριστικών μεταξύ των ημιαγωγών.

Συνοψίζοντας, η ενασχόληση με MOSFET χρειάζεται αρκετή μελέτη προτού γίνει η υλοποίηση καθώς συνδυάζονται πολλοί παράγοντες στην λειτουργία του. Το σύστημα ψύξης αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα ο οποίος συνδράμει στην ομαλότερη λειτουργία και δίνει σταθερότητα στο συνολικό σύστημα.

# Βιβλιογραφία

- [1] - E. Durán, J.M. Andújar, F. Segura, A.J. Barragán, “A high-flexibility DC load for fuel cell and solar arrays power sources based on DC–DC converters”, *Applied Energy* (2011), ppt 1690-1702.
- [2] – Keysight technologies, “Electroni Load fundamentals”, White paper, ppt 1-16.
- [3] - Jonathan Dodge, «Power MOSFET Tutorial,» *Advanced Power Technology*, Bend, 2006.
- [4] – Donald P. Leach, Albert Paul Malvino, Goutam Saha, “Digital Principles and applications”, Seventh Edition, New Delhi, 2011.
- [5] - International Rectifier, “100V Single N-Channel Power MOSFET in a TO-247 package”, IRFP150NPbf datasheet, Feb 2004.
- [6] – Taisuke Ozaki , “Continued fraction representation of the Fermi-Dirac function for large-scale electronic structure calculations”, *PHYSICAL REVIEW B* 75,2007
- [7] – Peter B. Green, “Designing with power MOSFETs”, Infineon Application Note, Feb 2022.
- [8] - International Rectifier, “100V Single N-Channel Power MOSFET in a TO-220 package”, IRF3710 datasheet, Jul 2010.
- [9] - International Rectifier, “200V Single N-Channel Power MOSFET in a TO-247 package”, IRFP250NPbf datasheet, Aug 2010.
- [10] – TechWeb, “MOSFET Thermal Resistance and Power Dissipation: Package Capable of Back-Surface Heat Dissipation”, 2020. Available online at : [URL](#)
- [11] – Laird, “Thermally Conductive Insulators” Tgard 5000series datasheet, [URL](#).
- [12] - Wakefield-vette, “Extruded heat sinks for power semiconductors”, 392 series datasheet, [URL](#)
- [13] – Microchip, “12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6”, MCP4725 datasheet, 2009, [URL](#)
- [14] – Analog Devices, “Single and Dual-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier”, AD623 datasheet, 2020, [URL](#)
- [15] – Texas Instruments, “INA240 –4-V to 80-V, Bidirectional, Ultra-Precise Current Sense Amplifier With Enhanced PWM Rejection”, INA240 datasheet, 2016, [URL](#)
- [16] - *EI Sensor Technologies*, “What is a Thermistor? How do thermistors work?”, Online Publication, [URL](#)
- [17] - John S. Steinhart, Stanley R. Hart, “Calibration curves for thermistors”, *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, Elsevier (August 1968), pp. 497-503.
- [18] - Duncan Ben , “High Performance Audio Power Amplifiers”, Elsevier (1996), pp. 178–81.

- [19] - "Power Transistor Market Will Cross \$13.0 Billion in 2011", IC Insights. June 21, 2011.
- [20] – International Rectifier, "Power MOSFET, N-Channel, UniFET™, FRFET®, 500 V, 100 A, 55 mΩ, TO-264", FDL100N50F datasheet, Nov 2013.
- [21] – James B. Forsythe, "Paralleling Of Power MOSFETs For Higher Power Output", International Rectifier, El Segundo, California, Feb 2000.
- [22] - Chong Wang, Zhaoyu Wang, Jianhui Wang and Dongbo Zhao, "SVM-Based Parameter Identification for Composite ZIP and Electronic Load Modeling", IEEE Transactions on power systems, 2018

# Εικόνες

Εικόνα 1.1 – Keysight technologies, “Electronic Load Fundamentals”, white Paper, ppt.3, 2019.

Εικόνα 1.2 – Keysight technologies, “Electronic Load Fundamentals”, white Paper, ppt.4, 2019.

Εικόνα 1.3 – Keysight technologies, “Electronic Load Fundamentals”, white Paper, ppt.5, 2019.

Εικόνα 1.4 – Keysight technologies, “Electronic Load Fundamentals”, white Paper, ppt.6, 2019.

Εικόνα 1.5 – Keysight technologies, “Electronic Load Fundamentals”, white Paper, ppt.6, 2019

Εικόνα 1.6 – Keysight technologies, “Electronic Load Fundamentals”, white Paper, ppt.8, 2019.

Εικόνα 1.7 – Keysight technologies, “Electronic Load Fundamentals”, white Paper, ppt.10, 2019.

Εικόνα 2.1 – Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 2.2 - <https://www.elprocus.com/mosfet-as-a-switch-circuit-diagram-free-circuits/>

Εικόνα 2.3 – Toshiba semiconductors, Basic Knowledge of Discrete Semiconductor Device, Chapter III

Εικόνα 2.4 – Toshiba semiconductors, Basic Knowledge of Discrete Semiconductor Device, Chapter III

Εικόνα 2.5 – International Rectifier, “100V Single N-Channel Power MOSFET in a TO-220 package”, IRF3710 datasheet, Jul 2010.

Εικόνα 2.6 – TechWeb, “MOSFET Thermal Resistance and Power Dissipation: Package Capable of Back-Surface Heat Dissipation”, 2020.

Εικόνα 2.7 - International Rectifier, “200V Single N-Channel Power MOSFET in a TO-247 package”, IRFP250NPbf datasheet, Aug 2010.

Εικόνα 3.1 – International Rectifier, “200V Single N-Channel Power MOSFET in a TO-247 package”, IRFP250NPbf datasheet, Aug 2010.

Εικόνα 3.2 – Αποτελέσματα προσομοίωσης στο PSPICE για το κύκλωμα ολοκλήρωσης.

Εικόνα 3.3 – Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 3.4 – Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 3.5 - Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 3.6 - Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 3.7 - Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 3.8 - Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 3.9 - Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 3.10 - Online Picture at [URL](#)

Εικόνα 3.11 - Online Picture at [URL](#)

**Εικόνα 4.1** – Ρυθμίσεις προσομοίωσης PSprice

**Εικόνα 4.2** – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης από ένα απλοποιημένο ρυθμιζόμενο φορτίο.

**Εικόνα 4.3** – Χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης πόλωσης  $V_{GS}$  ως προς το ρεύμα  $I_D$ .

**Εικόνα 4.4** – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης από ένα απλοποιημένο ρυθμιζόμενο φορτίο

**Εικόνα 4.5** - Χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης πόλωσης  $V_{GS}$  ως προς το ρεύμα  $I_D$ .

**Εικόνα 4.6** – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης του δικτύωματος μέτρησης της τάσης της πηγής υπο δοκιμή.

**Εικόνα 4.7** – Αποτελέσματα προσομοίωσης με τις τάσεις εισόδου και εξόδου των τελεστικών εισχυτών.

**Εικόνα 4.8** – Σχηματικό διάγραμμα προσομοίωσης της διάταξης του AD623.

**Εικόνα 4.9** – Αποτελέσματα προσομοίωσης του AD623. Απεικονίζεται η τάση εισόδου ως προς την τάση εξόδου.

**Εικόνα 4.10** – Ρυθμίσεις προσομοίωσης για το τελικό κύκλωμα.

**Εικόνα 4.11** – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης 1<sup>ου</sup> κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου.

**Εικόνα 4.12** – Καμπύλη διάφορων τάσεων σε συνάρτηση με την τάση πόλωσης του MOSFET.

**Εικόνα 4.13** – Καμπύλη ρεύματος  $I_D$  (κόκκινο) σε συνάρτηση με την τάση πόλωσης του DAC.

**Εικόνα 4.14** – Το σημείο επάνω στην καμπύλη προσομοίωσης 1<sup>ου</sup> κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου που το φορτίο διαρρέεται από ρεύμα 60A και η έξοδος του ολοκληρωμένου έχει τάση 3.30V με τάση πόλωσης τα 5.788V.

**Σχήμα 4.15** – Σχηματικό κύκλωμα προσομοίωσης 2<sup>ου</sup> κυκλώματος ηλεκτρονικού φορτίου.

**Σχήμα 4.16** – Αποτελέσματα προσομοίωσης για την τάση εξόδου του AD623 με την τάση εισόδου του.

**Εικόνα 5.1** – Φωτογραφία της πρώτης υλοποίησης ηλεκτρονικού φορτίου στο ράστερ

**Εικόνα 5.2** – Φωτογραφία της κατασκευής ηλεκτρονικού φορτίου ver2.0

**Εικόνα 5.3** – Κύκλωμα πόλωσης των MOSFET από το σχηματικό κύκλωμα στο Eagle

**Εικόνα 5.4** – Κύκλωμα ισχύος από το σχηματικό κύκλωμα στο Eagle

**Εικόνα 5.5** – Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος από το σχηματικό κύκλωμα στο Eagle

**Εικόνα 5.6** – Αισθητήριο θερμοκρασίας από το σχηματικό κύκλωμα στο Eagle

**Εικόνα 5.12** – Φωτογραφία με την κατασκευή ηλεκτρονικού φορτίου ver.3.0

**Εικόνα 5.12** – Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος

**Εικόνα 5.13** – Κύκλωμα μέτρησης τάσης

**Εικόνα 5.14** – Ρουτίνες εξυπηρέτησης για την ενεργοποίηση της εξόδου και την ενεργοποίηση του menu

**Εικόνα 5.18** – Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου του προγράμματος του μικροελεγκτή

**Εικόνα 5.1** – Φωτογραφία με το τροφοδοτικό EXCELSYS 3M4C4410K00A

**Εικόνα 5.1** – Φωτογραφία με την έξοδο της οθόνης σε διάφορες τιμές μετρήσεων

**Εικόνα 5.2** – Φωτογραφία με την έξοδο της οθόνης σε διάφορες τιμές μετρήσεων

**Εικόνα 5.3** – Φωτογραφία με την έξοδο της οθόνης σε διάφορες τιμές μετρήσεων

**Εικόνα 5.4** – Φωτογραφία με την έξοδο της οθόνης σε διάφορες τιμές μετρήσεων



# Παράρτημα Α - Πρόγραμμα του μικροελεγκτή

```
////////////////////////////////////
//
//          electronic Load          //
//          ver 3.5                    //
//
////////////////////////////////////
//          by D.Ampatzis            //
////////////////////////////////////
//
//          ver2.0                    //
// - upgrade lcd2x16 into ILI9388    //
// - insert menu button, load onoff  //
// switch                             //
//
//          ver2.1                    //
// - insert fan controll in heatsink //
// - changes in NTC temperature      //
//
//          ver3.1                    //
// - Routine for menu changed        //
// - Frequency for each measurement //
// changed                             //
// - Fuse 10A instead of relay       //
//
//          ver3.2                    //
// - Changes in LoadEnable function //
// for quicker Load cutoff           //
//
//          ver3.3                    //
// - Changed PCB and make incode     //
// calibration                         //
// - changes caused in current and   //
// Voltage measurements              //
// - Calibration in code for output  //
// resistance                         //
// - Changes in EnableOutput         //
// function                           //
//
//          ver3.4                    //
// - Changes in LoadEnable function //
// for cr and cp                     //
//
//          ver3.5                    //
// - Changes in LoadEnable function //
// for smooth output                 //
//
////////////////////////////////////

// Included Libraries
#include <Wire.h>           // include I2C library
#include <SPI.h>           // include SPI library
#include <OneButton.h>     // include multiple press button
library
#include <OneWire.h>       // include library for DS18B20
#include <DallasTemperature.h> // include library for DS18B20
#include <Adafruit_MCP4725.h> // Adafruit DAC library
#include <Adafruit_ADS1X15.h> // Adafruit ADC library
#include <TFT_eSPI.h>      // ILI9388 Hardware-specific library
#include "Free_Fonts.h"   // ILI9388 premade fonts, Include the
header file attached to this sketch
```

```

//Constant Pins IO
//#define ledSupplyPin 3 // Output LED pin, led BUILDIN
#define Clock 35 // Clock pin connected to D35
#define Data 32 // Data pin connected to D22
#define Push 33 // Push button pin connected to D21
#define MCPSc1Pin 22 // Reserved pin for i2c clock for
(esp32)
#define MCPScdaPin 21 // Reserved pin for i2c data (esp32)
#define TFT_MISO 19 // LCD SPI Pins
#define TFT_MOSI 23 // LCD SPI Pin assignment
#define TFT_SCLK 18 // LCD SPI Pin assignment
#define TFT_CS 15 // LCD SPI Chip select control pin
#define TFT_DC 2 // LCD SPI Data Command control pin
#define TFT_RST 4 // LCD SPI Reset pin (could connect
to RST pin)
#define VoltageLowReadPin 26 // Analog read for voltage
measurement pin connected to D3
#define VoltageHighReadPin 34 // Analog read for voltage
measurement pin connected to D1
#define FanPin 16 // Fan PWM Pin
#define PWMFanPin
#define MenuPin 27 // Menu push button Pin
#define LoadEnableSWPin 17 // Button for Load enable and disable
#define ONE_WIRE_BUS 14 // The data wire of DS18B20
#define LoadOnOffLed 1 // LED indicator for Load enable
#define max_pwmvalue 65536 // maximum pulse width for pwm signal
#define NUMSAMPLES 10 // the number of samples for NTC
reading
#define R1 10000 // Resistor in series with thermistor
#define ADS1X15_ADDRESS (0x48) // I2C address for ADS1115
#define TFT_GREY 0x5AEB // ILI9488
#define LOOP_PERIOD 35 // Display updates in LCD every 35 ms

// Constructors for libraries
Adafruit_ADS1115 ads; // Adafruit ADC information for the
library
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // Setup OneWire instance to
communicate with any OneWire devices (not only Maxim/Dallas)
DallasTemperature sensors(&oneWire); // Pass our oneWire reference to
Dallas Temperature.
Adafruit_MCP4725 dac; // Adafruit DAC constructor
TFT_eSPI tft = TFT_eSPI(); // Invoke custom library

// Rotary Encoder variables
unsigned long encoderPosition = 0; //Use this variable to store
"steps"
int currentStateClock; //Store the status of the clock pin
(HIGH or LOW)
int lastStateClock; //Store the PREVIOUS status of the
clock pin (HIGH or LOW)
String currentDir = ""; //Use this to print text
unsigned long lastButtonPress = 0; //Use this to store if the push
button was pressed or not

```

```

boolean buttonpressed = 0, buttonright = 0, buttonleft = 0, rotaryencoder=0;
// encoder flags for all turns

// ILI9488 variables
int xpos = 0; // 480 max
int ypos = 0; // 320 max
int padding = 0; // 0 equals to no padding
byte decimal_places = 3; // number of decimal digits used to
display float numbers

//Global variables for user
int period = 2000; // variable used for period value of
pwm signal
int pulsewidth = 0; // variable used for pulsewidth value
of pwm signal
int lastButtonEnablePress = 0; // variable used for encoder memory
int lastEncoderPosition = 0; // variable used for encoder memory
unsigned long LastTimePressed = 0; // variable used for encoder memory
float tempC = 0; // variable for temperaturefloat
supply = 0; // variable used for power rail ADC
measurement
unsigned long time_now = 0; // variable used for timer
interruption
int DACOutput = 200; // variable used for DAC output
int step = 100; // variable for Encoder multiply
(push)
int ledState = LOW; // variable used to set the LED
unsigned long previousMillis = 0; // variable used to store last time
LED was updated
unsigned long readingMillis = 0; // variable used to store last time
made reading measurements
unsigned long currentMillis = 0; // variable used to store the time
the interruption took place
const long interval = 500; // variable used to Blink the LED in
milliseconds
boolean cc = 0, cv = 0, cp = 0, cr = 0; // variables used as flags for all
electronic Load functions
volatile boolean MenuButton = 0; // variable used as flag for menu
button trigger
volatile boolean LoadButton = 0; // variable used as flag for load
on/off button trigger
boolean LoadEnable = 0; // variable used as flag for load
on/off
boolean choiceEnter = 0; // variable used for menu display and
stay inside menu
boolean ready = 0; // variable used to stay inside
choice loop
boolean flagCurrentReached = 0; // variable used as flag for load
control
int choice = 0; // variable to determin menu choice
made by user
float measurement = 100; // variable to determin the mili or
Amps,Volts,Watts,Ohms

char setCurrentState;
int Cutoff10 = 0;
int Cutoff20 = 0;

```

```

int Cutoff30 = 0;
int Cutoff40 = 0;
int Cutoff50 = 0;
int Cutoff100 = 0;
int Cutoff150 = 0;
int Cutoff200 = 0;
int Cutoff300 = 0;
int Cutoff500 = 0;
int Cutoff1000 = 0;
int Cutoff2000 = 0;
int Cutoff5000 = 0;
int Cutoff10000 = 0; // Leads on,
-0.006 A and -2.6 mV on fluke, on Lcd -2mV and -13 mA
// Leads off, 0.000 A and -3.6
mV on fluke, on Lcd -3mV and -20 mA
float setCurrentCalibratorFactor = 1.144; // Used to calibrate the excess
current
float setCurrentOffsetFactor = 0.000; // Used to calibrate the
offset/leakage current when the load is turned off
float setVoltageCalibratorFactor = 1.000; // Leads on, -0.006 A on fluke
float setVoltageOffsetFactor = 0.000; // Used to calibrate the
offset/leakage current when the load is turned off (mV)

int setCurrent = 0; // Programmed value for load current in
CC mode
float setVoltage = 0; // Programmed value for load voltage
in CV mode
float setPower = 0; // Programmed value for load Power in
CP mode
float setResistance = 0; // Programmed value for eload
Resistance in CR mode

float voltageOffset = 0; // variable to store voltage reading
zero offset arjustment at switch on
float currentOffset = 0; // variable to store current reading
zero offset arjustment at switch on

float ActualLoadVoltage = 0; // Measurement for load Voltage
float ActualRailVoltage = 0; // Measurement for Rail voltage
float ActualLoadCurrent = 0; // Measurement for load Current
float ActualLoadPower = 0; // Measurement for load power

float PowerCutOff = 200000; // Variable for software safety in
power limit in Watt 50W for test
float CurrentCutOff = 20000; // Variable for software safety in
current limit in Ampere 5A for test (mA)
float DACOutputCutOff = 2800; // variable used to Limit DAC output
*0.8 equals the real voltage

void IRAM_ATTR LoadEnableServiceInterrupt(){
currentMillis = millis();
if (currentMillis - LastTimePressed > 500){
LoadButton = 1;
LoadEnable=!LoadEnable;
Serial.println("Load Enable ISR!! ---> LoadButton is pressed");
}
}

```

```

        LastTimePressed = millis();           // Save time of last event
    }
    if(!LoadEnable){
        DACOutput = 0;
        ready=0;
        flagCurrentReached = 0;
    }
}

void IRAM_ATTR MenuServiceInterrupt(){

    currentMillis = millis();
    if (currentMillis - LastTimePressed > 100){
        MenuButton = 1;
        choice = 0;
        choiceEnter = 0;
        flagCurrentReached = 0;
        ready = 0;
        cc = 0;
        cv = 0;
        cp = 0;
        cr = 0;
        DACOutput = 0;
        tft.fillScreen(TFT_BLACK);
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);    // Set the font colour to
be white with a black background
        Serial.println("Menu pressed!!");
        LastTimePressed = millis();           // Save time of last event
    }
}

void setup() {

    pinMode(Clock,INPUT_PULLUP);               // initialization for encoder
Clock Pin
    pinMode(Data,INPUT_PULLUP);               // initialization for encoder
Data Pin
    pinMode(Push, INPUT_PULLUP);             // initialization for encoder
Push Pin
    pinMode(LoadEnableSWPin, INPUT_PULLUP);   // initialization for Load
enable and disable button
    pinMode(MenuPin, INPUT);                 // initialization for MENU
button
    pinMode(VoltageLowReadPin, INPUT);        // initialization for DUT
voltage reading
    pinMode(VoltageHighReadPin, INPUT);      // initialization for DUT
voltage reading
    pinMode(FanPin,OUTPUT);                  // initialization for PWM
signal for Fan
    pinMode(LoadOnOffLed,OUTPUT);            // initialization for Load
enable and disable LED
    attachInterrupt(MenuPin, MenuServiceInterrupt , FALLING);
    attachInterrupt(LoadEnableSWPin, LoadEnableServiceInterrupt , CHANGE);
    byte font = 8;                           // how big the numbers will
be

```

```

    Serial.begin(9600); // initialization for
searial communication with baud rate 9600
    dac.begin(0x60); // I2C Address for DAC
MSP4725
    ads.begin(); // I2C Address for ADC
ADS1115
    tft.begin(); // initialization for lcd
    tft.setRotation(3); // orientation with pinhead
at left
    tft.fillScreen(TFT_BLACK); // Clear screen to navy
background
    tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
    tft.setTextDatum(TC_DATUM); // Centre text on x,y
position
    xpos = 231; // Half the screen width
    ypos = 140; // Half the screen width
    tft.setFreeFont(FSB24); // Change Font size
    tft.drawString("Welcome", xpos, ypos, GFXFF); // Write message in lcd
    delay(500); // stop for 2 seconds
    tft.fillScreen(TFT_BLACK); // Clear screen to black
background
    tft.setFreeFont(FSB18); // Change Font size
    tft.drawString("Loading eLoad", xpos, ypos, GFXFF); // Write message in lcd
    ypos += tft.fontHeight(GFXFF); // Go to next Line
    tft.drawString("ver3.5", xpos, ypos, GFXFF); // Write message in lcd
    delay(500); // Stop for 2 seconds
    tft.fillScreen(TFT_BLACK); // Clear screen to black
background

    DACOutput = 0; // clear variable for program
start
    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
    tft.setTextDatum(TC_DATUM);
    WriteLcd();
    cc = 1; // na figei!!! mono gia
dokimi
    setCurrent = 1000;

    if (!ads.begin()) { // in case ads1115 dont
initialize, write a serial message
        Serial.println("Failed to initialize ADS.");
        tft.fillScreen(TFT_BLACK);
        tft.setFreeFont(FSB18); // Change Font size
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to
be white with a black background
        tft.setTextDatum(TC_DATUM); // Centre text on x,y
position
        tft.drawString("Failed to initialize ADS", 240, 200, GFXFF);
        while (1);
    }

    if(!dac.begin(0x60)){
        Serial.println("Failed to initialize DAC.");
        tft.fillScreen(TFT_BLACK);
        tft.setFreeFont(FSB18); // Change Font size

```

```

    tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);           // Set the font colour to
be white with a black background
    tft.setTextDatum(TC_DATUM);                       // Centre text on x,y
position
    tft.drawString("Failed to initialize DAC", 240, 200, GFXFF);
    while (1);
}

}

void loop() {

    currentMillis = millis();                         // save current time
    if (currentMillis - time_now >= 200) {           // every 1 second
        time_now = currentMillis;                   // store time for next
count
        ReadMeasurements();                         // function for reading of
all measurements
        WriteMeasurements();                       // function for displaying
all measurements
        WriteLcd();                                // function displaying values
of user
    }
    /* if(currentMillis - previousMillis >=1000) { // every 1000 ms update
monitor
        WriteMeasurements();                       // function for displaying
all measurements
        WriteLcd();                                // function displaying
values of user
        previousMillis = currentMillis;
    }
*/
    if(LoadButton){                                 // when Button ON/OFF is
pressed display Load OFF in screen
        if(LoadEnable){                             // when Load is enable
            LoadButton = 0;                         // clear flag indicator of
ButtonEnable
            ready = 1;                              // set flag for start routine
of enabling output
            LoadEnableDisplayFunction();           // Function displaying Load
ON/OFF changes
            GetCurrentLimits();                    // Change limits used to bias the
mosfets
            EnableOutput();                         // Function enabling eLoad
        }
    }

    if(!LoadEnable){                                // when the load is OFF
        ready = 0;                                  // null everything
        DACOutput = 0;
        flagCurrentReached = 0;
        dac.setVoltage(0, true);
    }

    if (MenuButton){                                // when menu button flag
        MenuButton = 0;                             // clear flags of previous
insert

```

```

        choiceEnter = 0;
        ModeSelection(); // function for user
selection
        InsertValues(); // function for user
selection
        WriteLcd(); // function displaying values
of user
        ReadMeasurements(); // function for reading of
all measurements
        WriteMeasurements(); // function for displaying
all measurements
        LoadEnableDisplayFunction(); // function for displaying
load enable/disable
    }
}

void EnableOutput(void){

    WriteLcd();
    DACOutput=1300; // Bias point of
MOSFET
    dac.setVoltage(DACOutput,true);
        while(ready){

            currentMillis = millis();
            dac.setVoltage(DACOutput,true);

            if (currentMillis - readingMillis >=100){
                ReadMeasurements();
                // read_encoder(); // NA FIGEI apo
edo -->
                MosfetBias();
                WriteMeasurements(); // Write everything
to lcd
                readingMillis = currentMillis;

            }
            if (currentMillis - time_now >= 2000) { // every one second
do this routine
                WriteMeasurements(); // Write everything
to lcd
                time_now = currentMillis; // save current time
            }

////////////////////////////////////
////////// Safety Regulations //////////
////////////////////////////////////

            if(CurrentCutOff<ActualLoadCurrent ||
PowerCutOff<ActualLoadPower || DACOutput>DACOutputCutOff){
                ready=0;
                LoadEnable=0;
                DACOutput = 0;
                dac.setVoltage(0,true);
                byte font = GFXFF; // Set font
library

```



```

        tft.setFreeFont(FSB18); // Write
temperature reading
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font
colour to be white with a black background
        tft.fillScreen(TFT_BLACK);
        if(PowerCutOff<ActualLoadPower){
            tft.setTextDatum(TC_DATUM); // Top Left
Orientation
            tft.drawString("Reached Power Limit", 240, 120, GFXFF);
            delay(500);
            tft.fillScreen(TFT_BLACK);
            tft.drawString("Resetting", 240, 120, GFXFF);
            delay(200);
            tft.fillScreen(TFT_BLACK);
            WriteLcd();
            WriteMeasurements();
        }
        else if(CurrentCutOff<ActualLoadCurrent){
            tft.setTextDatum(TC_DATUM); // Top Left
Orientation
            tft.drawString("Reached Current Limit", 240, 120,
GFXFF);
            delay(500);
            tft.fillScreen(TFT_BLACK);
            tft.drawString("Resetting", 240, 120, GFXFF);
            delay(200);
            tft.fillScreen(TFT_BLACK);
            WriteLcd();
            WriteMeasurements();
        }
        else if(DACOutput>DACOutputCutOff){
            tft.setTextDatum(TC_DATUM); // Top
Left Orientation
            tft.drawString("Reached DAC Limit", 240, 120,
GFXFF);
            delay(500);
            tft.fillScreen(TFT_BLACK);
            tft.drawString("Resetting", 240, 120, GFXFF);
            delay(200);
            tft.fillScreen(TFT_BLACK);
            WriteLcd();
            WriteMeasurements();
        }
    }

    }
    Serial.println("Not ready..");
    digitalWrite(LoadOnOffLed,LOW);
}

void GetCurrentLimits(void){
    if(0<setCurrent<=1000){
        setCurrentState = 'A';
    }
    else if(1000<setCurrent<=2000){

```

```

setCurrentState = 'B';
}
else if(2000<setCurrent<=3000){
    setCurrentState = 'C';
}
else if(3000<setCurrent<=4000){
    setCurrentState = 'D';
}
else if(4000<setCurrent<=5000){
    setCurrentState = 'E';
}
else if(5000<setCurrent<=30000){
    setCurrentState = 'F';
}

switch (setCurrentState) {

case 'A' : // 1480 mvolt equal to 1A
    Cutoff10 = 10;
    Cutoff20 = 40;
    Cutoff30 = 50;
    Cutoff40 = 60;
    Cutoff50 = 80;
    Cutoff100 = 200;
    Cutoff150 = 400;
    Cutoff200 = 500;
    Cutoff300 = 500;
    Cutoff500 = 500;
    Cutoff1000 = 600;

case 'B' : // 1650 mVolt equal to 2A
    Cutoff10 = 5;
    Cutoff20 = 10;
    Cutoff30 = 15;
    Cutoff40 = 20;
    Cutoff50 = 25;
    Cutoff100 = 50;
    Cutoff150 = 75;
    Cutoff200 = 100;
    Cutoff300 = 150;
    Cutoff500 = 200;
    Cutoff1000 = 400;
    Cutoff2000 = 500;

case 'C' : // 1740 mVolt equal to 3A
    Cutoff10 = 0;
    Cutoff20 = 1;
    Cutoff30 = 2;
    Cutoff40 = 3;
    Cutoff50 = 4;
    Cutoff100 = 5;
    Cutoff150 = 6;
    Cutoff200 = 8;
    Cutoff300 = 10;
    Cutoff500 = 20;
    Cutoff1000 = 100;

```

```

Cutoff2000 = 150;

case 'D' : // 1780 mVolt equal to 4A
  Cutoff10 = 0;
  Cutoff20 = 1;
  Cutoff30 = 1;
  Cutoff40 = 1;
  Cutoff50 = 1;
  Cutoff100 = 2;
  Cutoff150 = 4;
  Cutoff200 = 5;
  Cutoff300 = 10;
  Cutoff500 = 20;
  Cutoff1000 = 80;
  Cutoff2000 = 200;

case 'E' :
  Cutoff10 = 0;
  Cutoff20 = 1;
  Cutoff30 = 1;
  Cutoff40 = 2;
  Cutoff50 = 2;
  Cutoff100 = 5;
  Cutoff150 = 6;
  Cutoff200 = 8;
  Cutoff300 = 20;
  Cutoff500 = 30;
  Cutoff1000 = 50;
  Cutoff2000 = 100;
  Cutoff5000 = 150;
  Cutoff10000 = 200;

case 'F' :
  Cutoff10 = 0;
  Cutoff20 = 1;
  Cutoff30 = 1;
  Cutoff40 = 1;
  Cutoff50 = 1;
  Cutoff100 = 2;
  Cutoff150 = 3;
  Cutoff200 = 4;
  Cutoff300 = 10;
  Cutoff500 = 15;
  Cutoff1000 = 30;
  Cutoff2000 = 80;
  Cutoff5000 = 100;
  Cutoff10000 = 200;
}
}

void MosfetBias (void){

if(cc || cr || cp){

  if(cp){
    setCurrent = setPower/ActualLoadVoltage;

```

```

    }
    if(cr){
        setCurrent = ActualLoadVoltage*setResistance;
    }

if(ActualLoadCurrent>setCurrent){
    flagCurrentReached=1;
}
    if(flagCurrentReached){
        if(ActualLoadCurrent-setCurrent>600){
            DACOutput=0;
        }
        else if(ActualLoadCurrent-setCurrent>400){
            DACOutput-=Cutoff2000;
        }
        else if(ActualLoadCurrent-setCurrent>200){
            DACOutput-=Cutoff200;
        }
        else if(ActualLoadCurrent-setCurrent>100){
            DACOutput-=Cutoff100;
        }
        else if(ActualLoadCurrent-setCurrent>50){
            DACOutput-=Cutoff50;
        }
        else if(ActualLoadCurrent-setCurrent>10){
            DACOutput-=Cutoff10;
        }
        if(setCurrent-ActualLoadCurrent>80){
            DACOutput+=4;}
    }

if(setCurrent>ActualLoadCurrent && (ActualLoadCurrent < CurrentCutOff) &&
!flagCurrentReached){
    if(setCurrent-ActualLoadCurrent>50){
        if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>10000){
            DACOutput+=Cutoff10000;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>5000){
            DACOutput+=Cutoff5000;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>2000){
            DACOutput+=Cutoff2000;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>1000){
            DACOutput+=Cutoff1000;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>500){
            DACOutput+=Cutoff500;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>300){
            DACOutput+=Cutoff300;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>200){
            DACOutput+=Cutoff200;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>150){
            DACOutput+=Cutoff150;
        }
    }
}

```

```

        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>100){
        DACOutput+=Cutoff100;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>50){
        DACOutput+=Cutoff50;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>40){
        DACOutput+=Cutoff40;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>30){
        DACOutput+=Cutoff30;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>20){
        DACOutput+=Cutoff20;
        }
        else if((setCurrent - ActualLoadCurrent)>10){
        DACOutput+=Cutoff10;
        }
    }
}

if(cv){
    DACOutput = 1500;
    dac.setVoltage(DACOutput, true);
    if(ActualLoadCurrent>1000){
        DACOutput--;
    }
}

}

void LoadEnableDisplayFunction (void){

tft.setTextDatum(TR_DATUM);

    for(int q=0; q<1; q++){

        if(!LoadEnable){
            //tft.fillScreen(TFT_BLACK);
            tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK); // Set the font colour
to be white with a black background
            tft.setFont(FSB12);
            padding = tft.textWidth("Load is OFF", GFXFF); // get the width of
the text in pixels
            tft.setTextPadding(padding);
            tft.drawString("LOAD OFF ", 400, 20, GFXFF);
            Serial.println("Load is OFF ");
            choiceEnter = 0;
            ready = 0;
/*    cc = 0;
    cv = 0;
    cr = 0;
    cp = 0;
*/
        }
    }
}

```

```

    }
    else if(LoadEnable){
        //WriteLcd();
        tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK); // Set the font
colour to be white with a black background
        tft.setFreeFont(FSB12);
        padding = tft.textWidth("Load is OFF", GFXFF); // get the width of
the text in pixels
        tft.setTextPadding(padding);
        tft.drawString("LOAD ON ", 400, 20, GFXFF);
        Serial.println("Load is ON");
    }
}

void ModeSelection (void){

byte font = GFXFF;

    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
    padding = tft.textWidth("CC", font); // get the width of the text
in pixels
    tft.setTextPadding(padding); // Display Load Current
measurement
    tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);
    tft.setFreeFont(FSB24); // Change Font size between
9,12,18,24
    tft.setTextDatum(TC_DATUM); // Centre text on x,y
position
    tft.drawString("Mode", 250, 80, GFXFF);
    tft.drawString("CC", 100, 200, GFXFF);
    tft.drawString("CV", 195, 200, GFXFF);
    tft.drawString("CP", 290, 200, GFXFF);
    tft.drawString("CR", 385, 200, GFXFF);
    delay(1000);

    while(!choiceEnter){
        read_encoder();

        if (buttonright || buttonleft) {
            if(buttonright){
                buttonright = 0;
                choice++;
                if(choice>4){
                    choice = 4;
                }
            }
            else if(buttonleft){
                buttonleft = 0;
                choice--;
                if(choice<1){
                    choice = 1;
                }
            }
        }

        switch (choice){

```

```

    case 1 :
        tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK);           // Set the font colour to
be white with a black background
        tft.drawString("CC", 100, 200, GFXFF);
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);           // Set the font colour to
be white with a black background
        tft.drawString("CV", 195, 200, GFXFF);
        break;

    case 2 :
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);           // Set the font colour to
be white with a black background
        tft.drawString("CC", 100, 200, GFXFF);
        tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK);
        tft.drawString("CV", 195, 200, GFXFF);
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);           // Set the font colour to
be white with a black background
        tft.drawString("CP", 290, 200, GFXFF);
        break;

    case 3 :
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);           // Set the font colour to
be white with a black background
        tft.drawString("CV", 195, 200, GFXFF);
        tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK);
        tft.drawString("CP", 290, 200, GFXFF);
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);           // Set the font colour to
be white with a black background
        tft.drawString("CR", 385, 200, GFXFF);
        break;

    case 4 :
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);           // Set the font colour to
be white with a black background
        tft.drawString("CP", 290, 200, GFXFF);
        tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK);
        tft.drawString("CR", 385, 200, GFXFF);
        break;
    }
}

else if(buttonpressed){
    buttonpressed = 0;
    choiceEnter = 1;                                     // Load is Online
with flag choiceEnter

    switch(choice) {

        case 1 :                                         //CC Mode
            cc = 1;
            cv = 0;
            cp = 0;
            cr = 0;
            break;

```

```

        case 2 :                               //CV Mode
            cv = 1;
            cc = 0;
            cp = 0;
            cr = 0;
            break;

        case 3 :                               //CP Mode
            cp = 1;
            cc = 0;
            cv = 0;
            cr = 0;
            break;

        case 4 :                               //CR Mode
            cr = 1;
            cc = 0;
            cv = 0;
            cp = 0;
            break;
    } // End Switch
} // End button pressed
} // End while !choiceEnter
} // End function

void InsertValues(void){
    byte font = GFXFF;

    if(cc){

        tft.fillScreen(TFT_BLACK);
        tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); //
        (text color, background color)
        tft.setFreeFont(FSB24);
        tft.setTextDatum(TC_DATUM);
        xpos = 228; ypos = 140;
        tft.drawCentreString("You are in CC mode", xpos, ypos, GFXFF);
        delay(1000);
        tft.drawCentreString("Please select mA or A", xpos, ypos, GFXFF);
        ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
        while(!ready){
            read_encoder();

            if(buttonright || buttonleft){
                if(buttonright){
                    padding = tft.textWidth(" mA ", font); // get the width of the text
in pixels
                    tft.setTextPadding(padding);
                    tft.drawString("A", xpos, ypos, GFXFF);
                    measurement = 1000;
                    buttonright = 0;
                }
                else if(buttonleft){
                    tft.setTextPadding(padding);
                    tft.drawString("mA", xpos, ypos, GFXFF);
                    measurement = 100;
                    buttonleft = 0;
                }
            }
        }
    }
}

```



```

    }
}

if(buttonpressed){
  tft.fillScreen(TFT_BLACK);
  tft.drawCentreString("Please insert Current", 228, 140, GFXFF);
  encoderPosition = 0;
  buttonpressed = 0;

  while(!buttonpressed){
    read_encoder();
    if(buttonright || buttonleft){
      setCurrent = encoderPosition * measurement;

      if(setCurrent>=1000){
        decimal_places=1;xpos=228;ypos=240;
        padding = tft.textWidth("99.999", font); // get the
width of the text in pixels
        tft.setTextPadding(padding);
        yield();tft.drawFloat(setCurrent/1000.0,
decimal_places, xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
        tft.drawString("A", xpos+122, ypos, font);
      }
      else{
        decimal_places=1;xpos=228;ypos=240;
        tft.drawNumber(setCurrent, xpos, ypos, font);
        tft.drawString("mA", xpos+122, ypos, font);
      }
      buttonright = 0;
      buttonleft = 0;
    }
  }
  buttonpressed = 0;
  ready = 1;
  tft.fillScreen(TFT_BLACK);
}
}

if(cv){
  tft.fillScreen(TFT_BLACK);
  tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); //
(text color, background color)
  tft.setFreeFont(FSB24);
  tft.setTextDatum(TC_DATUM);
  xpos = 228; ypos = 140;
  tft.drawCentreString("You are in CV mode", xpos, ypos, GFXFF);
  delay(1000);
  tft.drawCentreString("Please select mV or V", xpos, ypos, GFXFF);
  ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
  while(!ready){
    read_encoder();

    if(buttonright || buttonleft){
      if(buttonright){
        padding = tft.textWidth(" mV ", font); // get the width of the
text in pixels

```

```

tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("V", xpos, ypos, GFXFF);
measurement = 1000;
buttonright = 0;
}
else if(buttonleft){
    tft.setTextPadding(padding);
    tft.drawString("mV", xpos, ypos, GFXFF);
    measurement = 100;
    buttonleft = 0;
}
}
if(buttonpressed){
    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
    tft.drawCentreString("Please insert Voltage", 228, 140, GFXFF);
    encoderPosition = 0;
    buttonpressed = 0;

    while(!buttonpressed){
        read_encoder();
        if(buttonright || buttonleft){
            setVoltage = encoderPosition * measurement;

            if(setVoltage>=1000){
                decimal_places=1;xpos=228;ypos=240;
                padding = tft.textWidth("99.999", font); // get the
width of the text in pixels
                tft.setTextPadding(padding);
                yield();tft.drawFloat(setVoltage/1000.0,
decimal_places, xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
                tft.drawString("V", xpos+122, ypos, font);
            }
            else{
                decimal_places=1;xpos=228;ypos=240;
                tft.drawNumber(setVoltage, xpos, ypos, font);
                tft.drawString("mV", xpos+122, ypos, font);
            }
            buttonright = 0;
            buttonleft = 0;
        }
    }
    buttonpressed = 0;
    ready = 1;
    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
}
}

if(cp){

    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
    tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); //
(text color, background color)
    tft.setFreeFont(FSB24);
    tft.setTextDatum(TC_DATUM);
    xpos = 228; ypos = 140;

```

```

tft.drawCentreString("You are in CP mode", xpos, ypos, GFXFF);
delay(1000);
tft.drawCentreString("Please select mW or W", xpos, ypos, GFXFF);
ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
while(!ready){
  read_encoder();

  if(buttonright || buttonleft){
    if(buttonright){
      padding = tft.textWidth(" mW ", font); // get the width of the text
in pixels
      tft.setTextPadding(padding);
      tft.drawString("W", xpos, ypos, GFXFF);
      measurement = 1000;
      buttonright = 0;
    }
    else if(buttonleft){
      tft.setTextPadding(padding);
      tft.drawString("mW", xpos, ypos, GFXFF);
      measurement = 100;
      buttonleft = 0;
    }
  }
  if(buttonpressed){
    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
    tft.drawCentreString("Please insert Power", 228, 140, GFXFF);
    encoderPosition = 0;
    buttonpressed = 0;

    while(!buttonpressed){
      read_encoder();
      if(buttonright || buttonleft){
        setPower = encoderPosition * measurement;

        if(setCurrent>=1000){
          decimal_places=1;xpos=228;ypos=240;
          padding = tft.textWidth("99.999", font); // get the
width of the text in pixels
          tft.setTextPadding(padding);
          yield();tft.drawFloat(setPower/1000.0,
decimal_places, xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
          tft.drawString("W", xpos+122, ypos, font);
        }
        else{
          decimal_places=1;xpos=228;ypos=240;
          tft.drawNumber(setCurrent, xpos, ypos, font);
          tft.drawString("mW", xpos+122, ypos, font);
        }
        buttonright = 0;
        buttonleft = 0;
      }
    }
    buttonpressed = 0;
    ready = 1;
    tft.fillScreen(TFT_BLACK);
  }
}

```

```

    }
}

if(cr){

tft.fillScreen(TFT_BLACK);
tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); //
(text color, background color)
tft.setFreeFont(FSB24);
tft.setTextDatum(TC_DATUM);
xpos = 228; ypos = 140;
tft.drawCentreString("You are in CR mode", xpos, ypos, GFXFF);
delay(1000);
tft.drawCentreString("Please select mΩ or Ω", xpos, ypos, GFXFF);
ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
while(!ready){
read_encoder();

if(buttonright || buttonleft){
if(buttonright){
padding = tft.textWidth(" mΩ ", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("Ω", xpos, ypos, GFXFF);
measurement = 1000;
buttonright = 0;
}
else if(buttonleft){
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("mΩ", xpos, ypos, GFXFF);
measurement = 100;
buttonleft = 0;
}
}

if(buttonpressed){
tft.fillScreen(TFT_BLACK);
tft.drawCentreString("Please insert Resistance", 228, 140,
GFXFF);

encoderPosition = 0;
buttonpressed = 0;

while(!buttonpressed){
read_encoder();
if(buttonright || buttonleft){
setResistance = encoderPosition * measurement;

if(setCurrent>=1000){
decimal_places=1;xpos=228;ypos=240;
padding = tft.textWidth("99.999", font); // get the
width of the text in pixels
tft.setTextPadding(padding);
yield();tft.drawFloat(setResistance/1000.0,
decimal_places, xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
tft.drawString("Ω", xpos+122, ypos, font);
}
else{
decimal_places=1;xpos=228;ypos=240;

```



```

    }
    else{
padding = tft.textWidth("999", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawNumber(setCurrent, 160, ypos, font);
padding = tft.textWidth("mA", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("mA", xpos+45, ypos, font);
    }
    delay(20);
}
if(cv){
tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
tft.setFreeFont(FSB12);
tft.setTextDatum(TC_DATUM);
tft.drawString("CV", 35, 10, GFXFF);
tft.drawString("mode", 40, 30, GFXFF);
tft.setFreeFont(FSS012);
tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
xpos=165;ypos=300;decimal_places=3;
tft.drawString("Set :", 110, ypos, GFXFF);
// tft.setTextDatum(TR_DATUM); // Set center text
alignment
if(setVoltage>=1000){
if(setVoltage>=10000){
decimal_places=2;
padding = tft.textWidth("99", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawFloat(setVoltage/1000.0, decimal_places, xpos, ypos, font);
// Use 1 decimal place
padding = tft.textWidth("mV", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("V", xpos+80, ypos, font);
}
else{
padding = tft.textWidth("99.9", font); // get the width of the
text in pixels
tft.setTextPadding(padding);
yield();tft.drawFloat(setVoltage/1000.0, decimal_places, xpos+34,
ypos, font); // Use 1 decimal place
padding = tft.textWidth("V", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("V", xpos+80, ypos, font);
}
}
else{
padding = tft.textWidth("999", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawNumber(setVoltage, xpos+4, ypos, font);

```

```

padding = tft.textWidth("mV", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("mV", xpos+50, ypos, font);
}
delay(20);
}

if(cp){
tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
tft.setFreeFont(FSB12);
tft.drawString("CP", 35, 10, GFXFF);
tft.drawString("mode", 40, 30, GFXFF);
tft.setFreeFont(FSS012);
xpos=165;ypos=300;decimal_places=3;
tft.drawString("Set :", 110, ypos, GFXFF);
if(setPower>=1000){
if(setPower>=10000){
decimal_places=2;
padding = tft.textWidth("99", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawFloat(setPower/1000, decimal_places, xpos+7, ypos, font);
// Use 1 decimal place
padding = tft.textWidth("mW", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("W", xpos+60, ypos, font);
}
else{
padding = tft.textWidth("99.9", font); // get the width of the
text in pixels
tft.setTextPadding(padding);
yield();tft.drawFloat(setPower/1000.0, decimal_places, 170, ypos,
font); // Use 1 decimal place
padding = tft.textWidth("mW", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("W", xpos+60, ypos, font);
}
}
else{
padding = tft.textWidth("999", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawNumber(setPower, 160, ypos, font);
padding = tft.textWidth("mW", font); // get the width of the text
in pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("mW", xpos+45, ypos, font);
}
delay(20);
}
if(cr){
tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background

```

```

tft.setFreeFont(FSB12);
tft.setTextDatum(TC_DATUM);
tft.drawString("CR", 35, 10, GFXFF);
tft.drawString("mode", 40, 30, GFXFF);
tft.setFreeFont(FSS012);
tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
xpos=165;ypos=300;decimal_places=3;
tft.drawString("Set :", 110, ypos, GFXFF);
  if(setResistance>=1000){
    if(setResistance>=10000){
      decimal_places=2;
padding = tft.textWidth("99", font); // get the width of the text
in pixels
      tft.setTextPadding(padding);
      tft.drawFloat(setResistance/1000.0, decimal_places, xpos, ypos,
font); // Use 1 decimal place
padding = tft.textWidth("mΩ", font); // get the width of the text
in pixels
      tft.setTextPadding(padding);
      tft.drawString("Ω", xpos+80, ypos, font);
    }
    else{
padding = tft.textWidth("99.9", font); // get the width of the
text in pixels
      tft.setTextPadding(padding);
      yield();tft.drawFloat(setResistance/1000.0, decimal_places,
xpos+34, ypos, font); // Use 1 decimal place
padding = tft.textWidth("Ω", font); // get the width of the text
in pixels
      tft.setTextPadding(padding);
      tft.drawString("Ω", xpos+80, ypos, font);
    }
  }
  else{
padding = tft.textWidth("999", font); // get the width of the text
in pixels
      tft.setTextPadding(padding);
      tft.drawNumber(setResistance, xpos+4, ypos, font);
padding = tft.textWidth("mΩ", font); // get the width of the text
in pixels
      tft.setTextPadding(padding);
      tft.drawString("mΩ", xpos+50, ypos, font);
    }
  }
  delay(20);
}

// Write temperature
tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
tft.setFreeFont(FSB18);
xpos=390;ypos=80;
padding = tft.textWidth("C", font); // get the width of the text in
pixels
tft.setTextPadding(padding);
tft.drawString("C", xpos+60, ypos, font);
delay(20);

// write Load On or OFF

```



```

tft.setTextDatum(TR_DATUM);

    if(!LoadEnable){
        tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK);           // Set the font colour
to be white with a black background
        tft.setFreeFont(FSB12);
        padding = tft.textWidth("Load is OFF", GFXFF); // get the width of
the text in pixels
        tft.setTextPadding(padding);
        tft.drawString("LOAD OFF ", 400, 20, GFXFF);
        Serial.println("Load is OFF ");
    }
    else if(LoadEnable){
        tft.setTextColor(TFT_YELLOW, TFT_BLACK);           // Set the font
colour to be white with a black background
        tft.setFreeFont(FSB12);
        padding = tft.textWidth("Load is OFF", GFXFF); // get the width of
the text in pixels
        tft.setTextPadding(padding);
        tft.drawString("LOAD ON ", 400, 20, GFXFF);
        Serial.println("Load is ON");
    }
}

void ReadMeasurements(void){

    ReadTemp();
    ReadexternalADC();
}

void ReadexternalADC (){                                     // function for ads1115 reading

    int16_t results,Rshuntvoltage;
    float LoadVoltHigh = 0;
    float LoadVoltLow = 0;
    float vmultiplier = 0.0625;
    float imultiplier = 0.0625;
    float Rshunt = 0.0527;                                   // metrimeno me apotelesmata otan
sindethike to kikloma. Na metrhthei sthn epomeni plaketa!!!!!!!!!!

    // The ADC input range (or gain) can be changed via the following
    // functions, but be careful never to exceed VDD +0.3V max, or to
    // exceed the upper and lower limits if you adjust the input range!
    // Setting these values incorrectly may destroy your ADC!
    //                                                                 ADS1015
ADS1115
    //                                                                 -----
-----
    // ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); // 2/3x gain +/- 6.144V  1 bit = 3mV
0.1875mV (default)
    // ads.setGain(GAIN_ONE);       // 1x gain   +/- 4.096V  1 bit = 2mV
0.125mV
    // ads.setGain(GAIN_TWO);       // 2x gain   +/- 2.048V  1 bit = 1mV
0.0625mV
    // ads.setGain(GAIN_FOUR);      // 4x gain   +/- 1.024V  1 bit = 0.5mV
0.03125mV

```

```

    // ads.setGain(GAIN_EIGHT);      // 8x gain  +/- 0.512V  1 bit = 0.25mV
0.015625mV
    // ads.setGain(GAIN_SIXTEEN);    // 16x gain +/- 0.256V  1 bit = 0.125mV
0.0078125mV

                                     // Read INA240 Vout up to 30Ampere = 30mV*50 =
1.5V

ads.setGain(GAIN_TWO);      // 2x gain  +/- 2.048V  1 bit = 0.0625mV
results = ads.readADC_Differential_0_1();

    if(results<1){
        results = 0;
    }

    Rshuntvoltage =
((results*vmultiplier)*setVoltageCalibratorFactor)+setVoltageOffsetFactor;
// voltage read by esp
    ActualLoadCurrent =
((Rshuntvoltage/Rshunt)*setCurrentCalibratorFactor)+setCurrentOffsetFactor;
//ActualLoadCurrent = (Rshuntvoltage/Rshunt); in mA

    delay(20);
    //ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);    // 2/3x gain +/- 6.144V  1 bit =
0.1875mV (default)
    LoadVoltLow = ads.readADC_SingleEnded(3);
    LoadVoltLow = LoadVoltLow*imultiplier*13.59;
    //LoadVoltLow = ads.computeVolts(LoadVoltLow);
    //LoadVoltLow = LoadVoltLow*14;      //LoadVoltLow = LoadVoltLow*10;
R14=90k

    LoadVoltHigh = ads.readADC_SingleEnded(2);
    LoadVoltHigh = LoadVoltHigh*vmultiplier*30;
    //LoadVoltHigh = ads.computeVolts(LoadVoltHigh);
    //LoadVoltHigh = LoadVoltHigh*30;

    if(LoadVoltHigh<1){
        LoadVoltHigh = 0;
    }
    if(LoadVoltLow<1){
        LoadVoltLow = 0;
    }

    if(LoadVoltLow<30){
        ActualLoadVoltage = LoadVoltLow;
        delay(20);
    }
    else{
        ActualLoadVoltage = LoadVoltHigh;
        delay(20);
    }
}

void WriteMeasurements(void){

```

```

byte font = GFXFF; // Set font library
tft.setTextDatum(TC_DATUM); // Set orientation in line
tft.setFreeFont(FSB18); // Write temperature reading
xpos=390;ypos=80; // In given pixel coordinates
tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
padding = tft.textWidth("20.0", font); // Get the width of the text in
pixels
tft.setTextPadding(padding); // Clear the selected pixels in
lcd
tft.drawNumber(tempC, xpos+14, ypos, font); // Write in selected pixels
in lcd
delay(10);

tft.setFreeFont(FSB24); // Set font format and size
tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
decimal_places=2;xpos=110;ypos=80;
ActualLoadPower = ActualLoadCurrent*ActualLoadVoltage/1000;

if(ActualLoadVoltage>=1000){ // Display Load Voltage
measurement
    if(ActualLoadVoltage>=10000){ // when 10.99 V
padding = tft.textWidth("99.999", font); // get the width of the
text in pixels
tft.setTextPadding(padding); // Clear the selected pixels in
lcd
yield();tft.drawFloat(ActualLoadVoltage/1000.0, decimal_places,
xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
    }
    else{ // when 5.999 V
decimal_places=3; // Select decimal places for
text
padding = tft.textWidth("9.999", font); // get the width of the
text in pixels
tft.setTextPadding(padding); // Clear the selected pixels in
lcd
yield();tft.drawFloat(ActualLoadVoltage/1000.0, decimal_places,
xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
    }
}
else{ // when 500 mV
padding = tft.textWidth("999999", font); // get the width of the
text in pixels
tft.setTextPadding(padding); // Display Load Current
measurement
tft.drawNumber(ActualLoadVoltage, xpos+14, ypos, font);
}

if(ActualLoadCurrent>=1000){ // Display Load Current
measurement
decimal_places=2;xpos=110;ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
if(ActualLoadCurrent>=10000){ // when 15.99 A
padding = tft.textWidth("99.999", font); // get the width of the
text in pixels
tft.setTextPadding(padding);
}
}

```

```

        yield();tft.drawFloat(ActualLoadCurrent/1000.0, decimal_places,
xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
    }
    else{ // when 5.999 A
        decimal_places=3;
        padding = tft.textWidth("9.9999", font); // get the width of the
text in pixels
        tft.setTextPadding(padding);
        yield();tft.drawFloat(ActualLoadCurrent/1000.0, decimal_places,
xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
    }
}
else{ // when 500 mA
    decimal_places=2;xpos=110;ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
    padding = tft.textWidth("999999", font); // get the width of the
text in pixels
    tft.setTextPadding(padding);
    tft.drawNumber(ActualLoadCurrent, xpos+14, ypos, font);
}
if(ActualLoadPower>=1000){
    decimal_places=2;xpos=110;ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
    if(ActualLoadPower>=10000){ // when 15.99 A
        padding = tft.textWidth("99.99999", font); // get the width of
the text in pixels
        tft.setTextPadding(padding);
        yield();tft.drawFloat(ActualLoadPower/1000.0, decimal_places, xpos,
ypos, font); // Use 1 decimal place
    }
    else{ // when 5.999 A
        decimal_places=3;
        padding = tft.textWidth("9.99999", font); // get the width of the
text in pixels
        tft.setTextPadding(padding);
        yield();tft.drawFloat(ActualLoadPower/1000.0, decimal_places,
xpos, ypos, font); // Use 1 decimal place
    }
}
else{ // when 500 mA
    decimal_places=2;xpos=110;ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
    padding = tft.textWidth("999999", font); // get the width of the
text in pixels
    tft.setTextPadding(padding);
    tft.drawNumber(ActualLoadPower, xpos+14, ypos, font);
}

tft.setFreeFont(FSB24);
tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to
be white with a black background
tft.setTextDatum(TL_DATUM);
decimal_places=2;xpos=200;ypos=80; // Set start position
// Display Load Voltage
measurement
if(ActualLoadVoltage>=1000){ // Volts division
    padding = tft.textWidth("mV ", font); // get the width of the
previous text in pixels

```

```

        tft.setTextPadding(padding);           // Set center text
alignment
        tft.drawString("V ", xpos, ypos, font);
    }
    else if(ActualLoadVoltage<1000){
// when 500 mV
        padding = tft.textWidth("mV ", font); // get the width of the
text in pixels
        tft.setTextPadding(padding);
        tft.drawString("mV ", xpos, ypos, font);
    }

// Display Load

Current measurement
if(ActualLoadCurrent>=1000){
    ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
    padding = tft.textWidth("mA ", font); // get the width of the
previous text in pixels
    tft.setTextPadding(padding);
    tft.drawString("A ", xpos, ypos, font);
}
else{ // when 500 mA
    ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
    padding = tft.textWidth("mV", font); // get the width of the
text in pixels
    tft.setTextPadding(padding);
    tft.drawString("mA", xpos, ypos, font);
}
if(ActualLoadPower>=1000){
    ypos += tft.fontHeight(GFXFF); // when 15.99 A
    padding = tft.textWidth("mW", font); // get the width of the
previous text in pixels
    tft.setTextPadding(padding);
    tft.drawString("W", xpos, ypos, font);
}
else{ // when 500 mW
    ypos += tft.fontHeight(GFXFF);
    padding = tft.textWidth("mW", font); // get the width of the
text in pixels
    tft.setTextPadding(padding);
    tft.drawString("mW", xpos, ypos, font);
}
}

void ReadTemp (void){ // function that read MOSFET
temperature

    Serial.print("Requesting temperatures...");
    sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get
temperatures, this function issue a global temperature request to all devices
on the bus
    Serial.println("DONE");
    tempC = sensors.getTempCByIndex(0); // The function ByIndex, get the
temperature from the first sensor only.

    if(tempC != DEVICE_DISCONNECTED_C) // Check if reading was
successful
    {

```

```

    Serial.print("Temperature for the device 1 (index 0) is: ");
    Serial.println(tempC);
}
else
{
    Serial.println("Error: Could not read temperature data");
    byte font = GFXFF; // Set font library
    tft.setTextDatum(TR_DATUM);
    tft.setFreeFont(FSB18); // Write temperature reading
    xpos=390;ypos=280; // In given pixel coordinates
    tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK); // Set the font colour to be
white with a black background
    padding = tft.textWidth("20.0 ", font); // Get the width of the text in
pixels
    tft.setTextPadding(padding); // Clear the selected pixels in
lcd
    tft.drawString("error", xpos+40, ypos, GFXFF);
    delay(1);
}
}

void read_encoder (void){

currentStateClock = digitalRead(Clock); // Read the current state of
CLK

// If the Data state is different than the Clock state then the encoder
is rotating "CW" so we increment

if (currentStateClock != lastStateClock && currentStateClock == 1){

    if (digitalRead(Data) != currentStateClock) {
        encoderPosition ++;
        buttonright=1;
        currentDir ="Clockwise";
    }
    else {
        if(encoderPosition>0){
            encoderPosition --;
        }
        buttonleft=1;
        currentDir ="CClockwise";
    }

    Serial.print("Direction: ");
    Serial.print(currentDir);
    Serial.print(" | encoderPosition: ");
    Serial.println(encoderPosition);

}

lastStateClock = currentStateClock; // We save last Clock state for
next loop
int btnState = digitalRead(Push); // Read the button state

if (btnState == LOW) { //If we detect LOW signal,
button is pressed

```

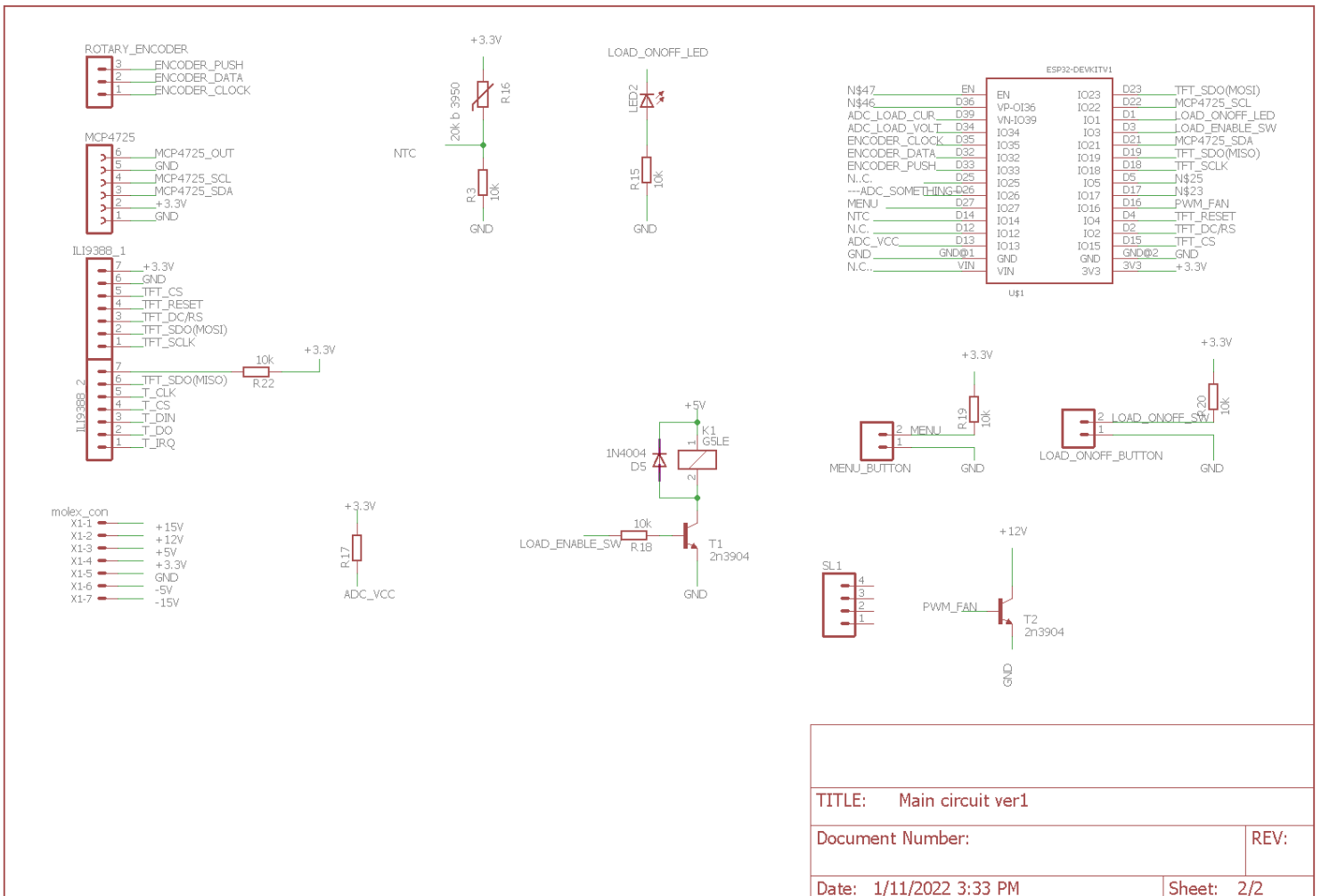
```

    buttonpressed=1; //if 50ms have passed since
last LOW pulse, it means that the
    delay(100);
    if (millis() - lastButtonPress > 50) { //button has been pressed,
released and pressed again
        Serial.println("Button pressed!");
        delay(100);
    }
    lastButtonPress = millis(); // Remember last button press
event
}
    delay(1); // Put in a slight delay to
help debounce the reading
}

```

# Παράρτημα Β – Σχεδίαση κυκλώματος τυπωμένου

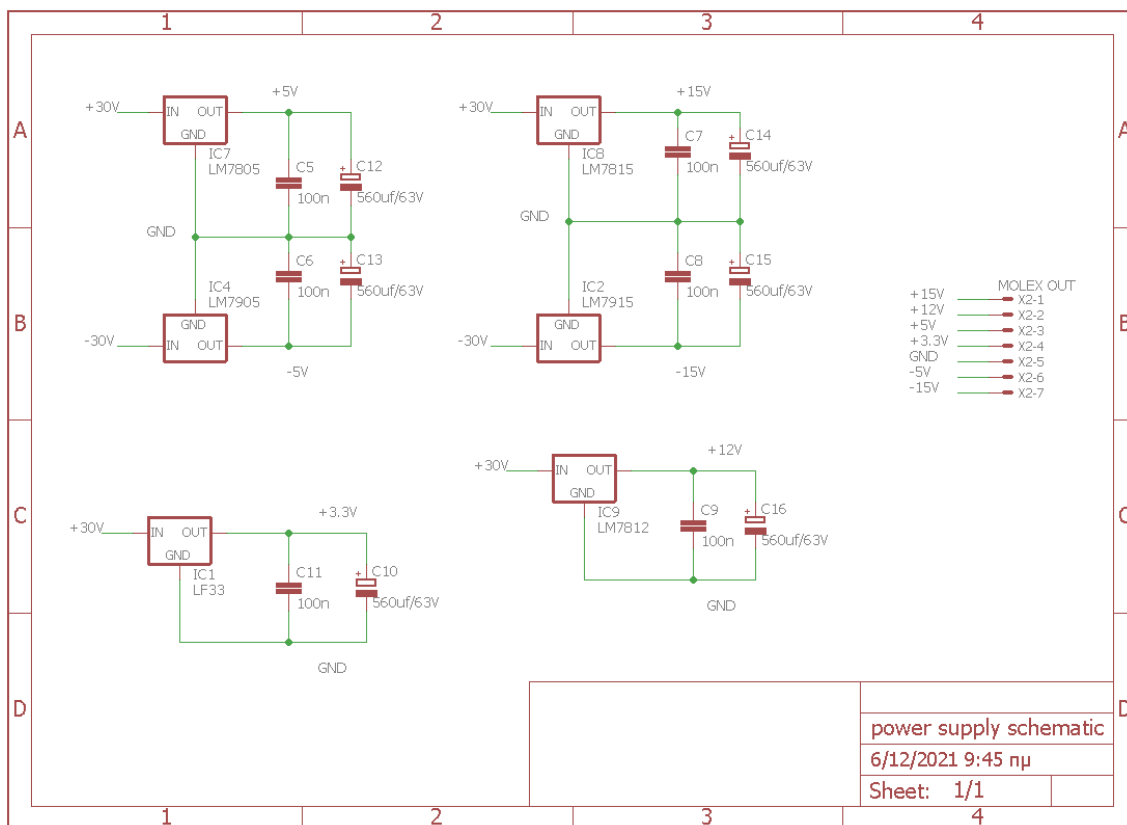
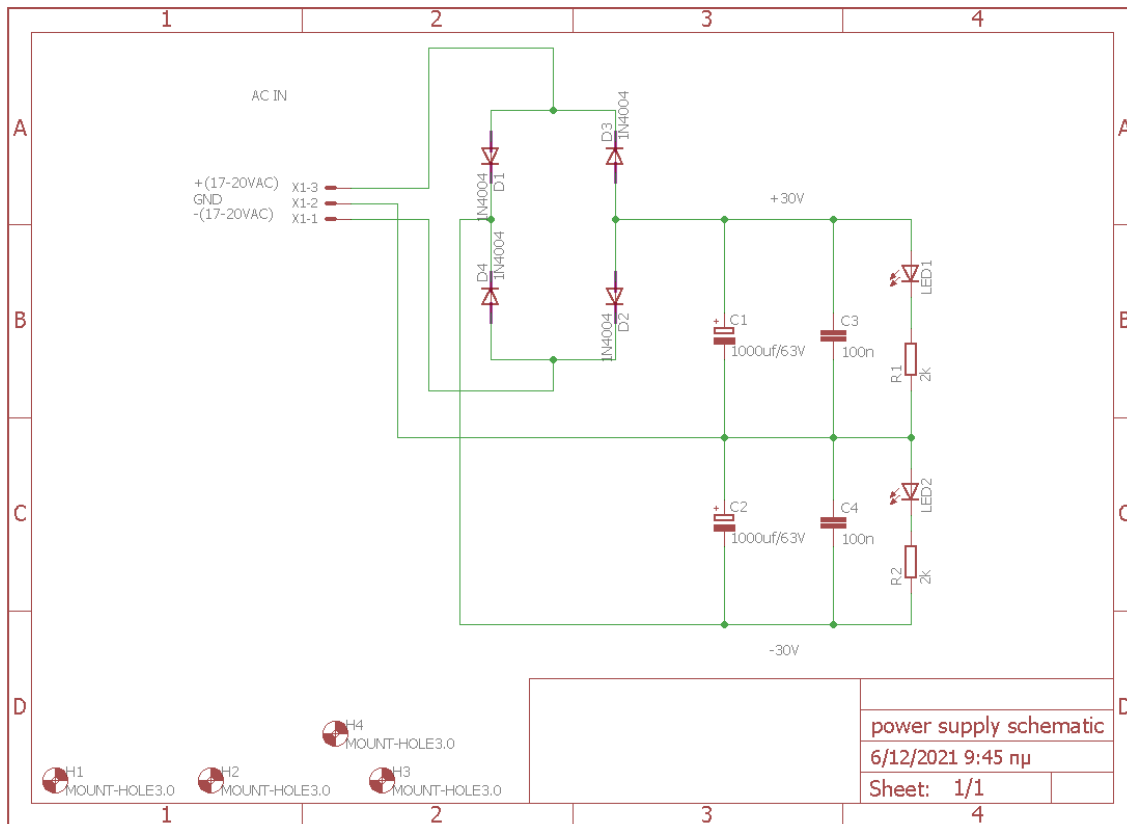
## Σχεδίαση τυπωμένου κυκλώματος ver2.0



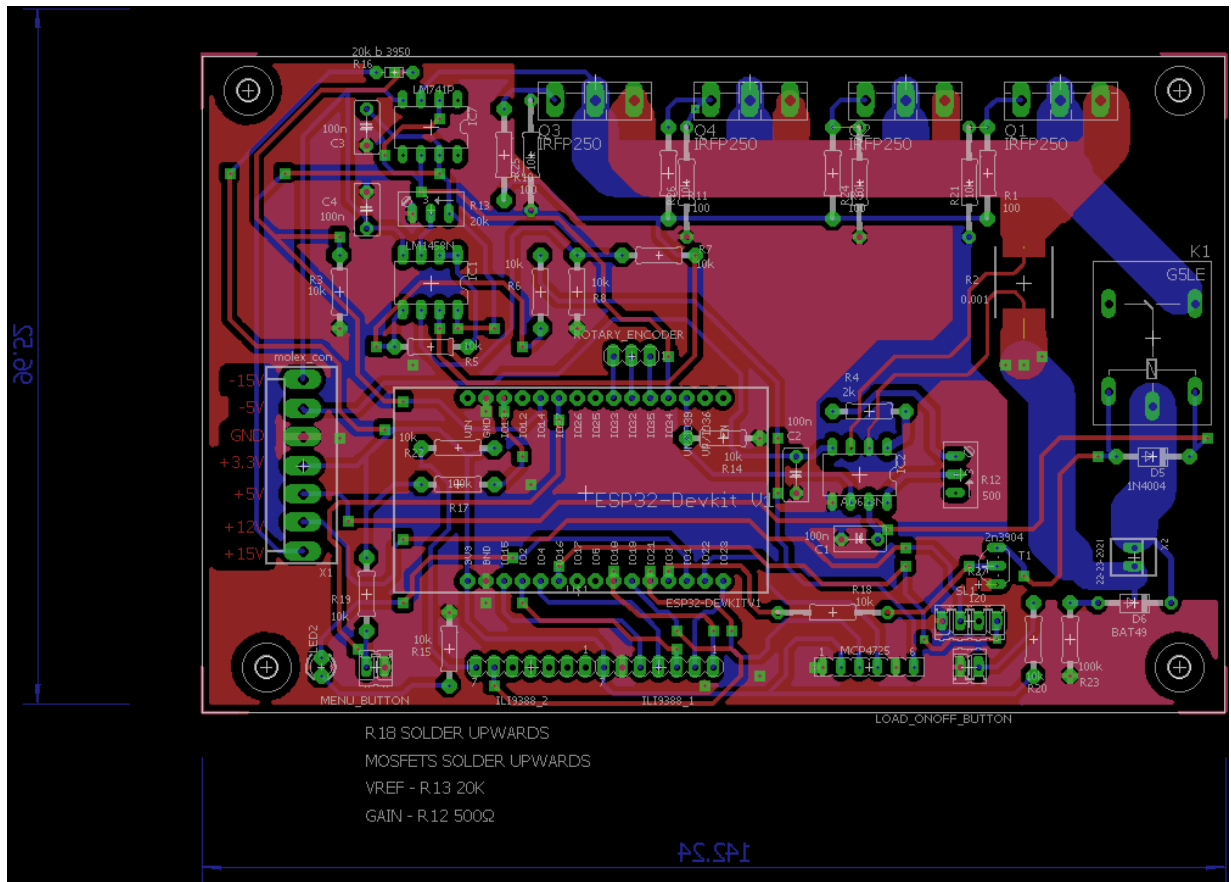
Εικόνα Β.1 - Σχηματικό διάγραμμα σχεδίασης της πλακέτας του 1<sup>ου</sup> κυκλώματος με το ψηφιακό κύκλωμα και τα υλικά εισόδου/εξόδου (2/2).



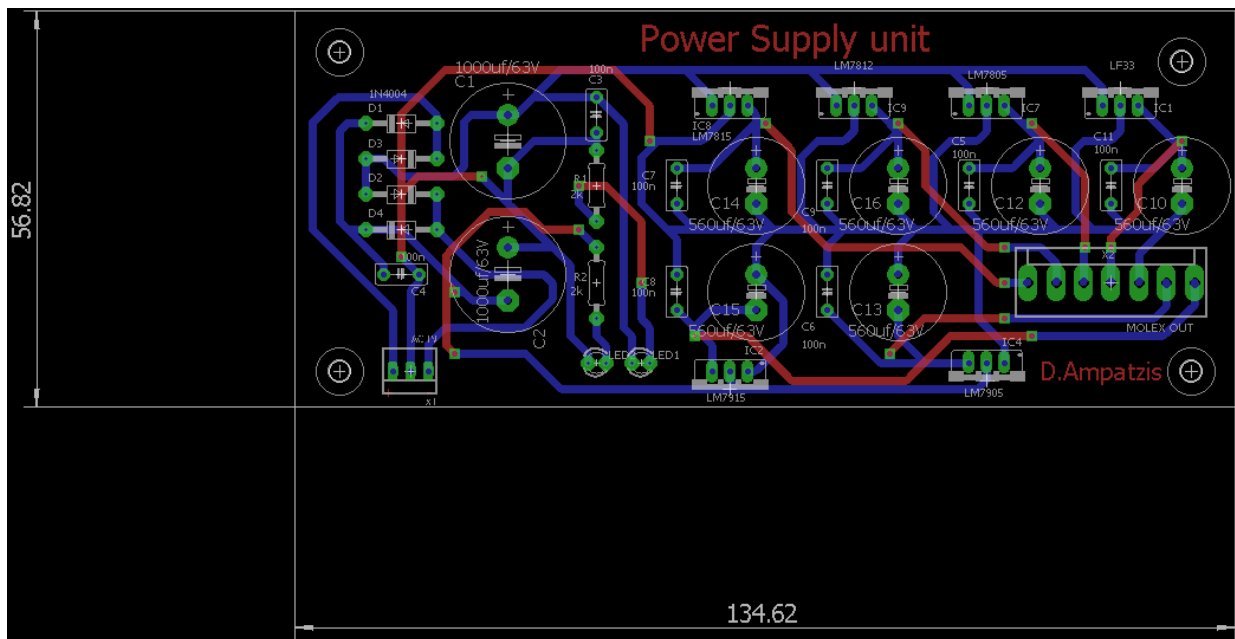




Εικόνα Β.3 – Σχηματικό διάγραμμα τροφοδοσίας του 1<sup>ου</sup> κυκλώματος.

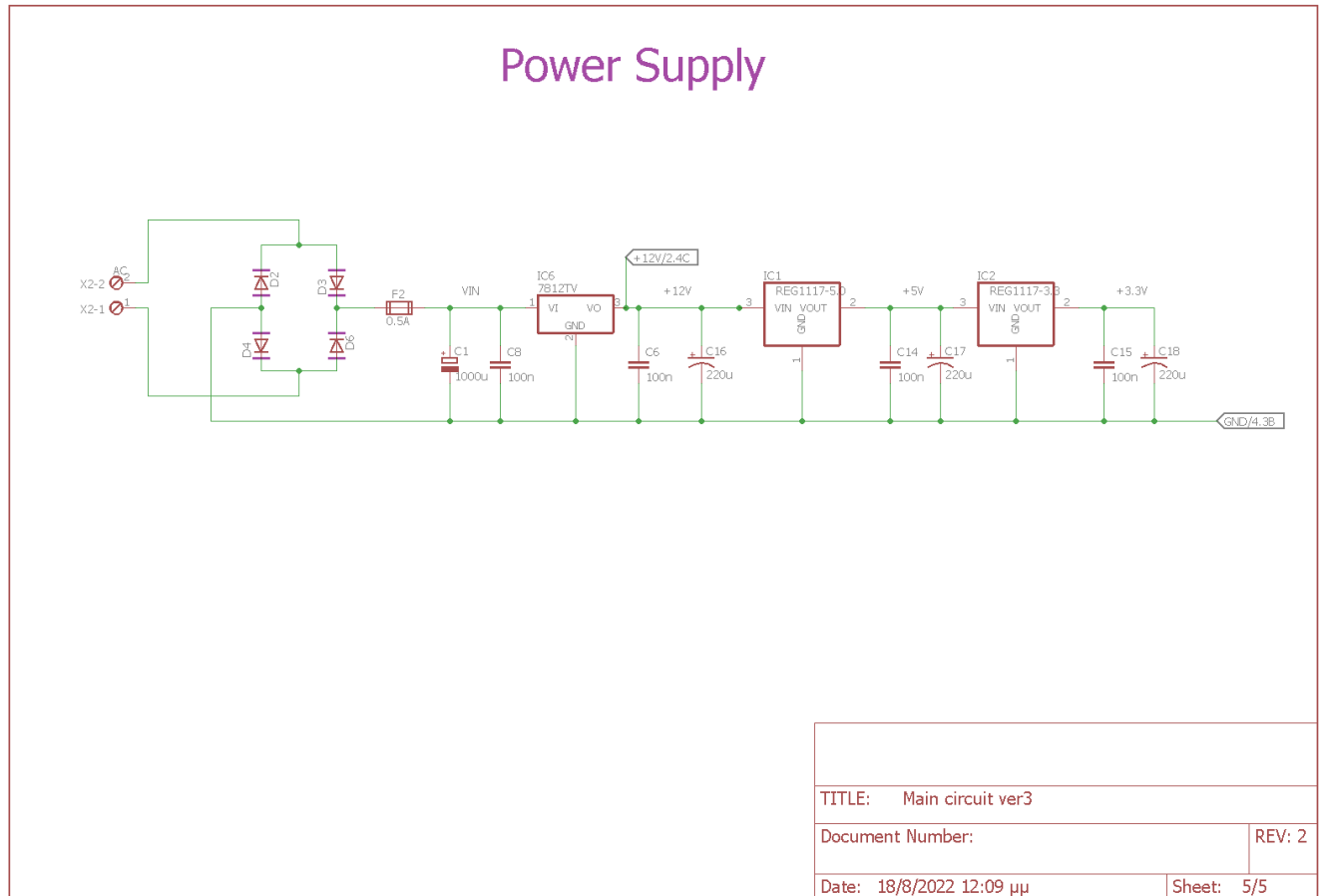


Εικόνα Β.4 – Τυπωμένο κύκλωμα δύο όψεων του 1<sup>ου</sup> κυκλώματος της βασικής πλακέτας ελέγχου. Η πάνω όψη (κόκκινο) και η κάτω όψη (μπλε).

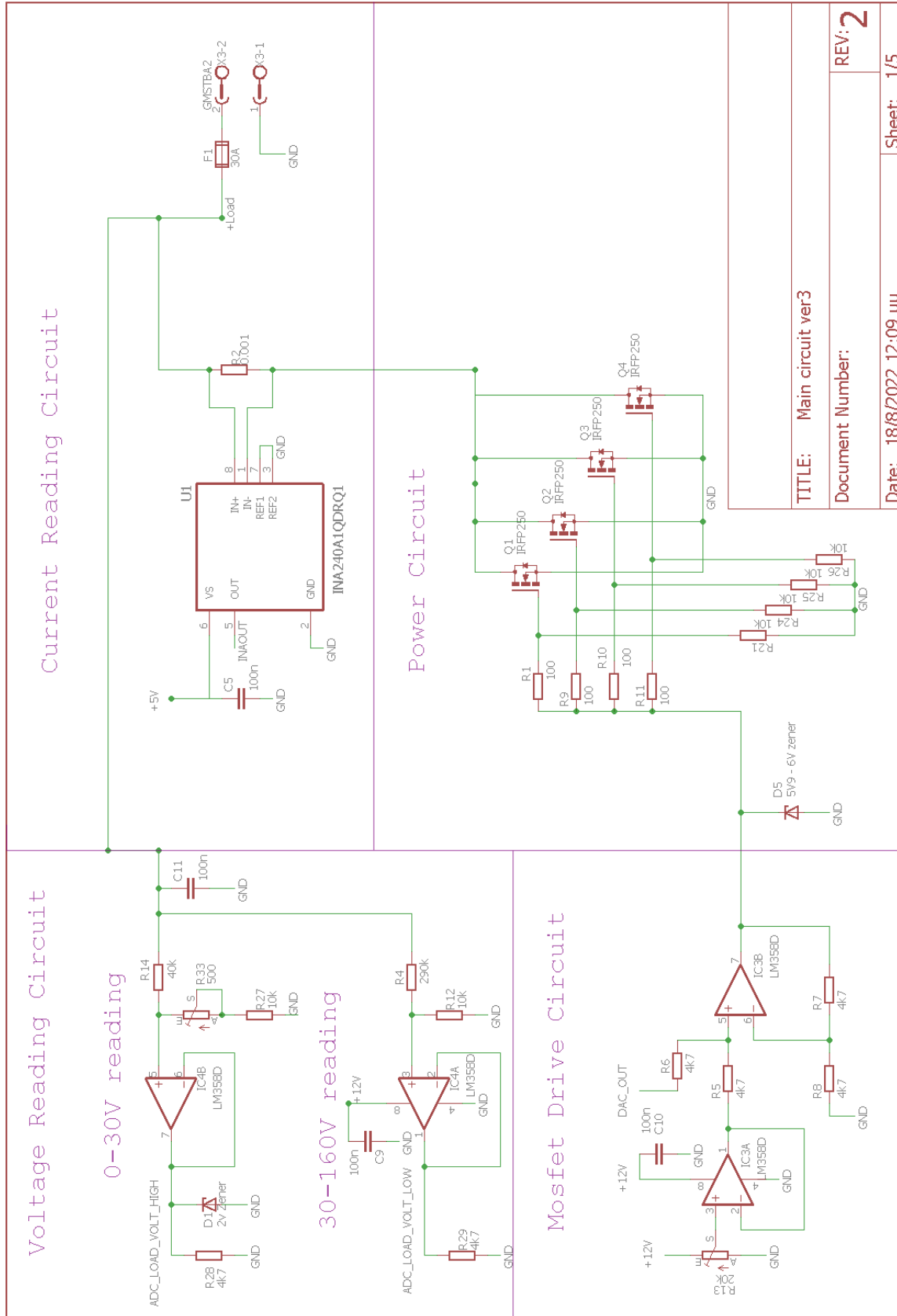


Εικόνα Β.5 – Τυπωμένο κύκλωμα δύο όψεων του 1<sup>ου</sup> κυκλώματος για την τροφοδοσία. Η πάνω όψη (κόκκινο) και η κάτω όψη (μπλε).

## Σχεδίαση τυπωμένου κυκλώματος ver3.0

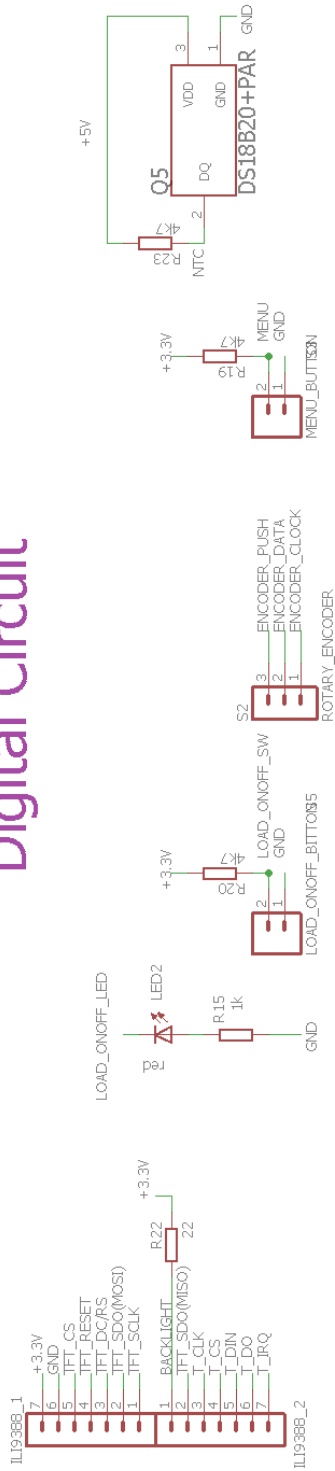


Εικόνα Β.6 - Σχηματικό διάγραμμα σχεδίασης της πλακέτας του 2<sup>ου</sup> κυκλώματος (5/5).

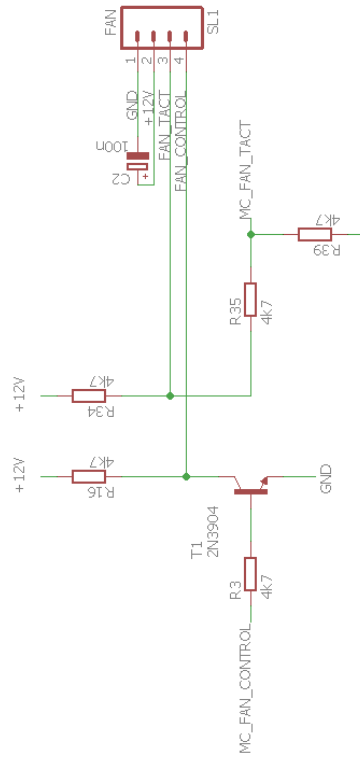
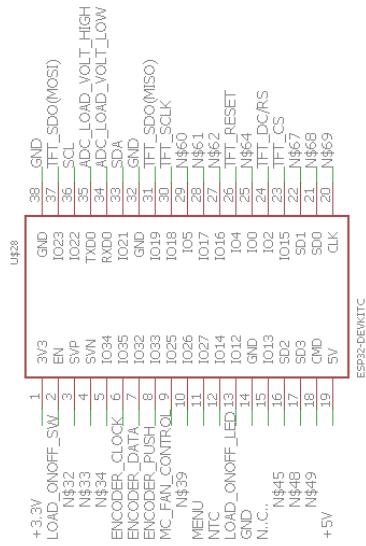


Εικόνα Β.7 – Σχηματικό διάγραμμα σχεδίασης της πλακέτας του 2<sup>ου</sup> κυκλώματος (1/5).

## Digital Circuit



## Microcontroller



TITLE: Main circuit ver3

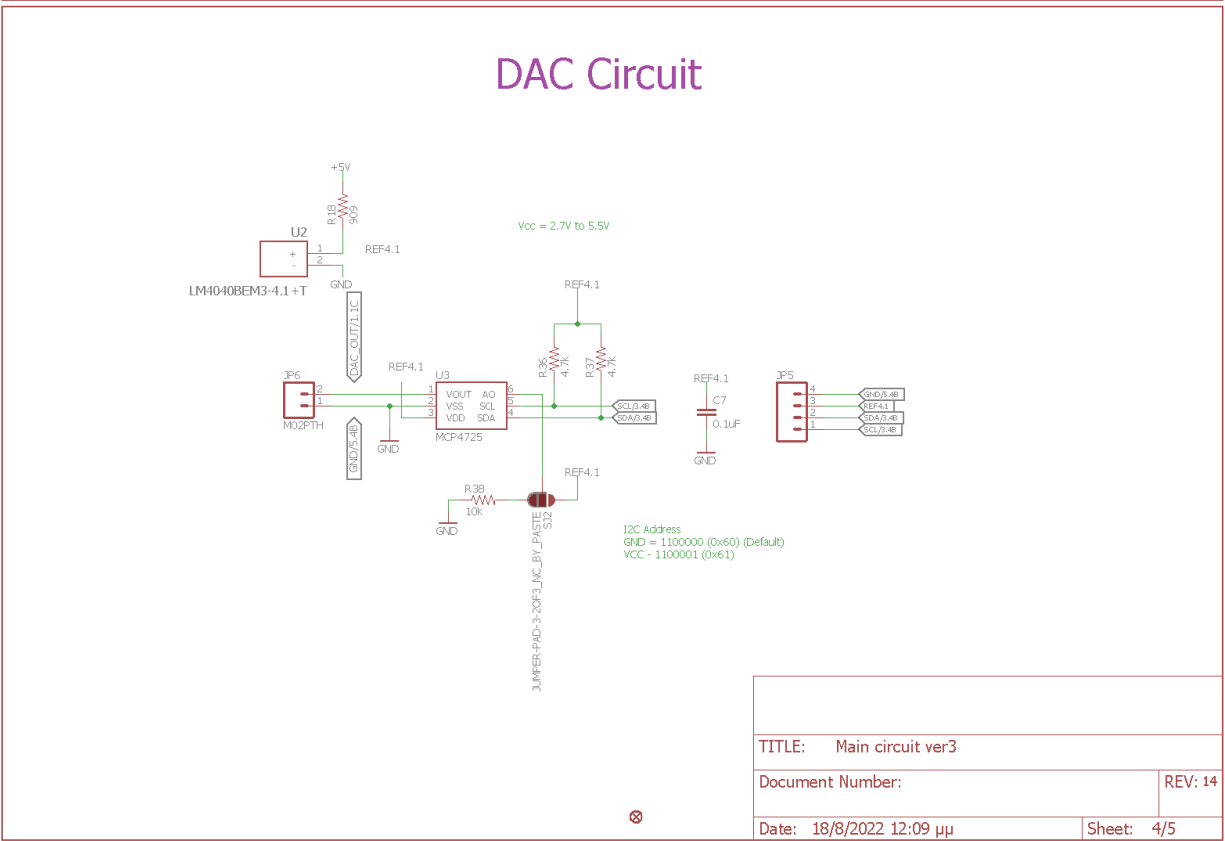
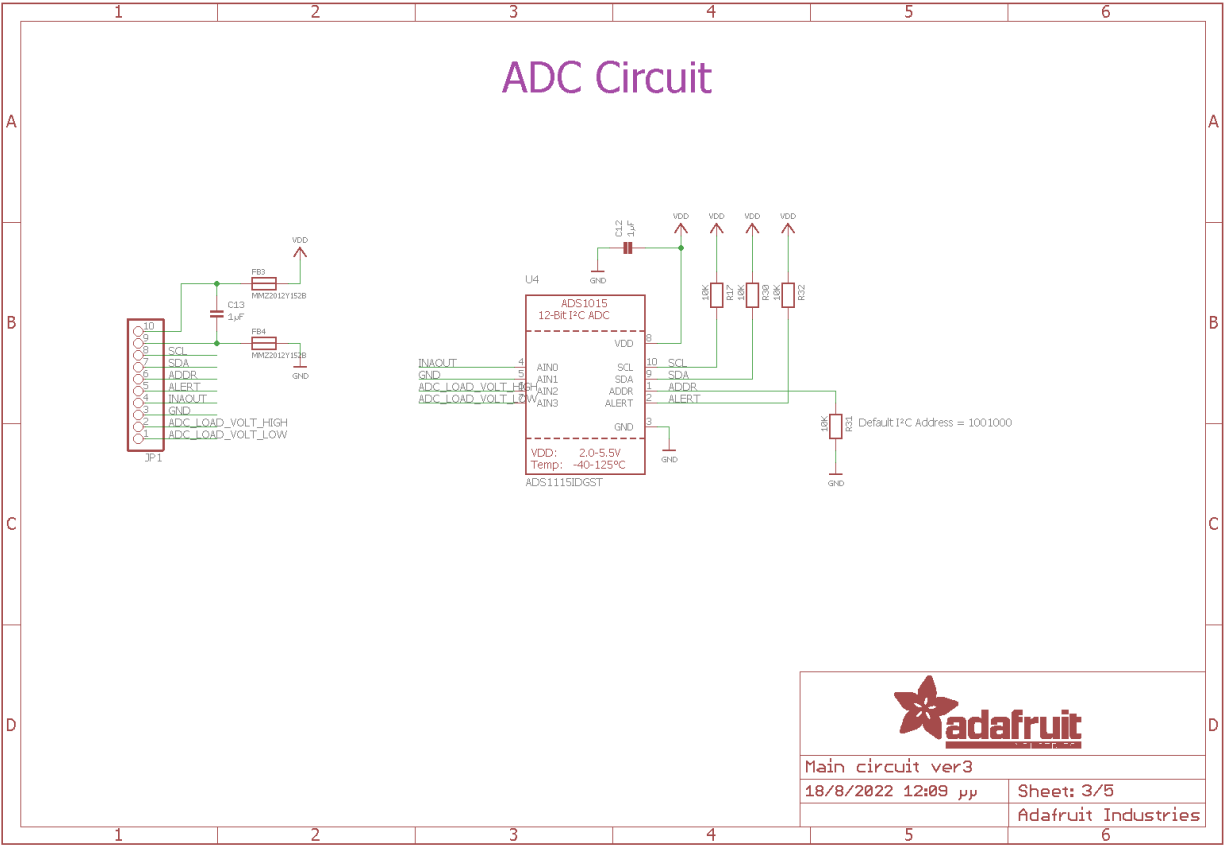
Document Number:

REV: 2

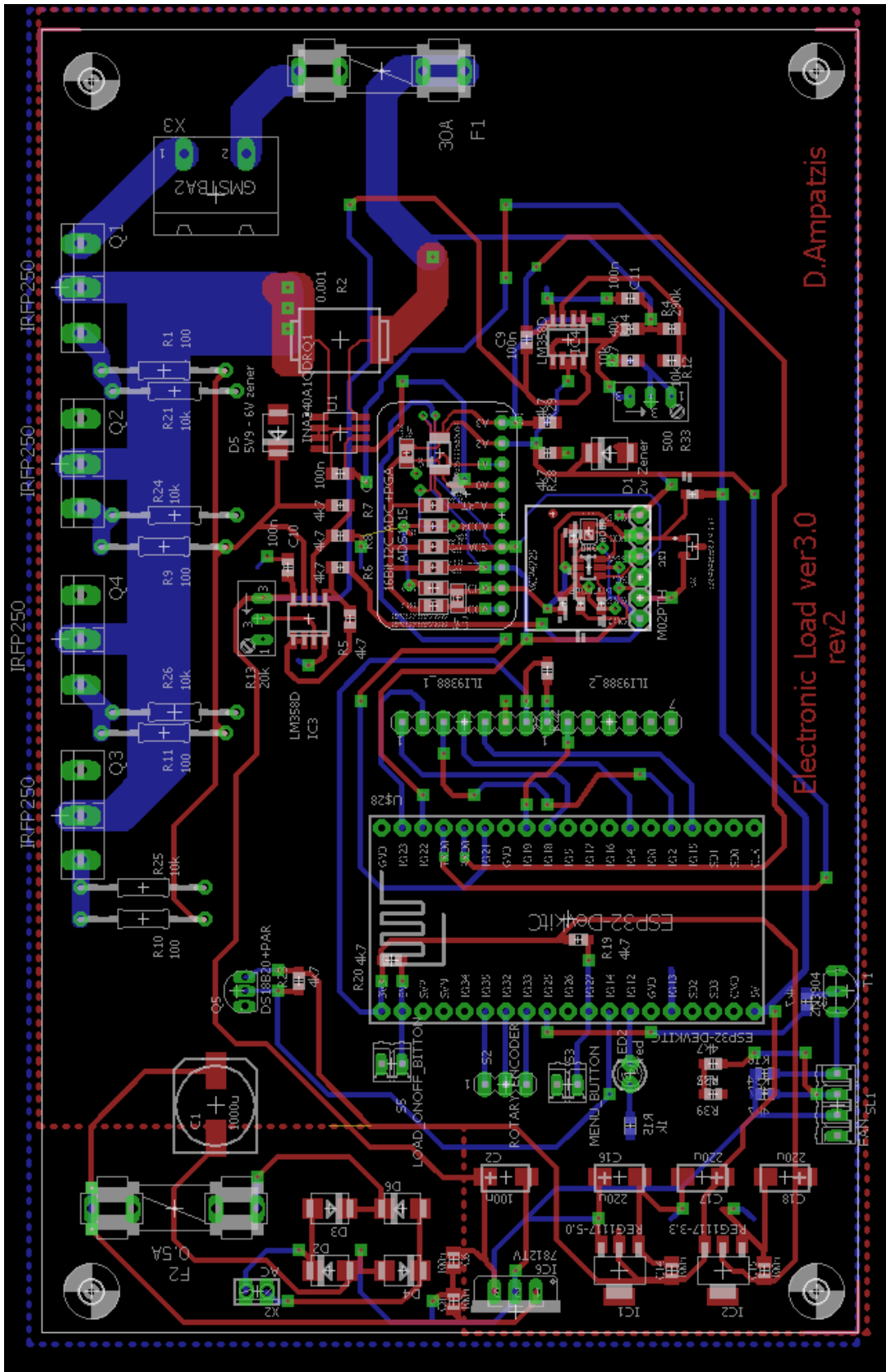
Date: 18/8/2022 12:09 μμ

Sheet: 2/5

Εικόνα Β.8 - Σχηματικό διάγραμμα σχεδίασης της πλακέτας του 2<sup>ου</sup> κυκλώματος (2/5)



Εικόνα Β.9 - Σχηματικό διάγραμμα σχεδίασης της πλακέτας του 2<sup>ου</sup> κυκλώματος (3/5 & 4/5).



Εικόνα Β.10 – Τυπωμένο κύκλωμα 2<sup>ου</sup> κυκλώματος.