

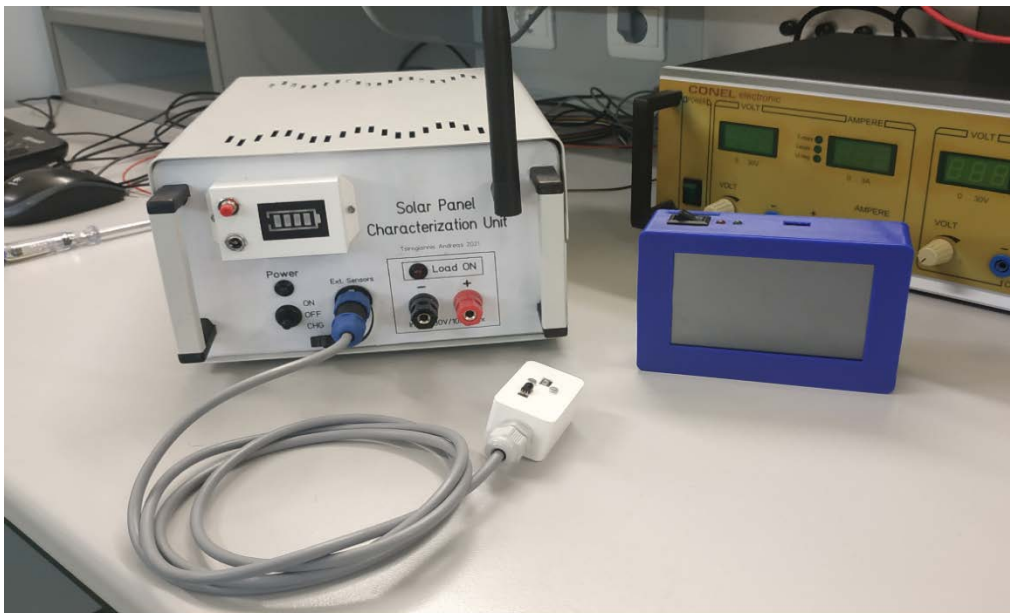
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδίαση και υλοποίηση ολοκληρωμένου
συστήματος αξιολόγησης φωτοβολταϊκών μονάδων»



Του φοιτητή
Τσιρογιάννη Ανδρέα
Αρ. Μητρώου:
51920Μ

Επιβλέπων
Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Οκτώβριος
2021

Σχεδίαση και υλοποίηση ολοκληρωμένου συστήματος αξιολόγησης φωτοβολταϊκών μονάδων
Κωδικός Δ.Ε. 21337

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Τσιρογιάννης Ανδρέας

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 3/9/2020

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 17/10/2021

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

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

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

*«Στην οικογένεια μου,
για την αμέριστη στήριξη και υπομονή που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου»*

Πρόλογος

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μία ολοένα και μεγαλύτερη ανάπτυξη συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γεγονός στο οποίο έχει βοηθήσει τόσο η ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας, όσο και οι αυξήσεις των τιμών του πετρελαίου, η εξάντληση των ορυκτών αποθεμάτων αλλά και η αύξηση της περιβαλλοντικής συνείδησης των πολιτών. Ένα από τα κυριότερα και πιο ευρέως γνωστά συστήματα αυτού του τύπου που χρησιμοποιείται ανά τον κόσμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι και τα φωτοβολταϊκά. Η ραγδαία αύξηση στις εγκαταστάσεις μικρών και μεγάλων φωτοβολταϊκών συστοιχιών που εξυπηρετούν το σκοπό αυτό, οδηγεί στην ανάγκη για δημιουργία φθηνών, αλλά συνάμα αξιόπιστων εργαλείων και μετρητικών διατάξεων που εξυπηρετούν σκοπούς ανάλυσης της συμπεριφοράς φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς και τη διάγνωση τυχών εσωτερικών βλαβών στα πλαίσια αυτά, κάτι που καθίσταται σχεδόν αδύνατο να γίνει με άλλα μέσα. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να λύσει ένα από τα προβλήματα αυτά, προτείνοντας τη μελέτη και κατασκευή ενός ολοκληρωμένου συστήματος χαρακτηρισμού φωτοβολταϊκών μονάδων.

Περίληψη

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου φορητού συστήματος αξιολόγησης φωτοβολταϊκών μονάδων. Τέτοιου είδους μετρητικές διατάξεις παρότι υπάρχουν στην αγορά, κοστίζουν από μερικές εκατοντάδες έως και χιλιάδες ευρώ, γεγονός που καθιστά την απόκτησή τους εξαιρετικά δύσκολη. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος, αρκετά ευέλικτου, κρατώντας το κόστος χαμηλό. Έγινε μελέτη, σχεδίαση και δοκιμή του συστήματος, καθώς και χαρακτηρισμός των δυνατοτήτων και περιορισμών του. Το μεγαλύτερο όφελος χρήσης ενός τέτοιου συστήματος εντοπίζεται στις εργατοώρες που μπορεί να εξοικονομήσει ένας μηχανικός εντοπίζοντας τυχόν εσωτερικές βλάβες σε συστοιχίες φωτοβολταϊκών μονάδων, οι οποίες κρίνεται πρακτικά σχεδόν αδύνατο να εντοπιστούν με άλλα μέσα, καθώς και ο γενικός χαρακτηρισμός φωτοβολταϊκών μονάδων για ακαδημαϊκούς λόγους. Τα εξαγόμενα από το σύστημα αποτελέσματα είναι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος της μονάδας προς μέτρηση, καθώς και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες ελήφθησαν οι μετρήσεις αυτές, οι οποίες περιλαμβάνουν την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασία κατά τον κύκλο μετρήσεων.

«Complete solution for solar panel characterization applications»

«Tsirogiannis Andreas»

Abstract

The present assignment's goal is the creation of a complete mobile solar panel characterization system. Despite the abundance of measuring equipment of this kind that are readily available on the market, the sheer cost of them ranging from hundreds to a couple of thousand euros, makes buying or owning equipment like this almost prohibitive for the average user. This assignment presents the creation of such a system featuring high flexibility, all while keeping the total cost low. Study, design and testing of the system have taken place, as well as the characterization of its features and shortcomings. The biggest advantage of using such a system lies primarily in the significantly reduced work hours a technician has to spend troubleshooting internal solar panel problems, which are otherwise extremely hard to detect using conventional means, as well as for academic research purposes. The system's exported data consist of graphical characteristic I-V curves of the solar panel under test, accompanied by data describing the conditions under which the said curves were taken. This data consist of solar irradiance measurements, as well as the outside ambient temperature.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και να εκφράσω την εκτίμησή μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κιοσκερίδη Ιορδάνη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ και να μελετήσω αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα. Για τη βοήθεια, και τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε, όπως και για τον χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής αλλά και κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος	v
Περίληψη	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Κατάλογος Σχημάτων	3
Κατάλογος Πινάκων	4
Συντομογραφίες	5
Κεφάλαιο 1ο: Διακρίβωση φωτοβολταϊκών μονάδων	6
1.1 Εισαγωγή	6
1.2 Σκοπός.....	6
1.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης - ρεύματος	6
1.4 Παρόμοια συστήματα – αρχιτεκτονικές κατασκευής.....	8
Κεφάλαιο 2ο: Δομή του συστήματος.....	11
2.1 Γενική περιγραφή του κυκλώματος – αρχή λειτουργίας	11
2.2 Ασύρματη ζεύξη επικοινωνίας των δύο συσκευών	12
Κεφάλαιο 3ο: Τοπική συσκευή – ηλεκτρονικό φορτίο	13
3.1 Δυνατότητες της συσκευής.....	14
3.2 Εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν	14
3.2.1 Κεντρικός μικροελεγκτής ESP32.....	14
3.2.2 Μέτρηση ρεύματος	15
3.2.3 Μέτρηση τάσης.....	17
3.2.4 Μέτρηση θερμοκρασίας.....	18
3.2.5 Μέτρηση έντασης ηλιακής ακτινοβολίας	18
3.2.6 Μετατροπέας DAC	19
3.2.7 Mosfet ισχύος.....	19
3.3 Σχηματικό διάγραμμα τοπικής συσκευής	19
3.4 Ανάλυση σχηματικού διαγράμματος	24
3.4.1 Οδήγηση Mosfet φορτίου	24
3.4.2 Μέτρηση τάσης.....	27
3.4.3 Μέτρηση ρεύματος	27

3.4.4	Μέτρηση θερμοκρασίας φορτίου.....	27
3.4.5	Τροφοδοσία.....	27
3.4.6	Διόρθωση αστάθειας σταδίου ισχύος.....	28
3.4.7	Κύκλωμα μπαταριών	30
3.4.8	Προστασίες υλικού	31
3.5	Λειτουργία του κυκλώματος.....	32
Κεφάλαιο 4ο: Απομακρυσμένη συσκευή διεπαφής χρήστη		35
4.1	Εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν	35
4.1.1	Οθόνη γραφικών	35
4.1.2	Κεντρικός μικροελεγκτής ESP32.....	36
4.1.3	Ρολόι πραγματικού χρόνου RTC	37
4.1.4	Πλακέτα ανάγνωσης και εγγραφής αφαιρούμενου αποθηκευτικού μέσου SD	37
4.1.5	Τροφοδοσία.....	38
4.1.6	Κυτίο κατασκευής.....	39
4.2	Λειτουργία της κατασκευής.....	40
Κεφάλαιο 5ο: Μετρήσεις		44
5.1	Μετρήσεις ενός πλαισίου – χωρίς σκίαση	46
5.2	Μετρήσεις ενός πλαισίου – συνθήκες μερικής σκίασης.....	48
5.3	Μετρήσεις δύο πλαισίων σε σειρά – χωρίς σκίαση	51
5.4	Μετρήσεις δύο πλαισίων σε σειρά – συνθήκες μερικής σκίασης.....	53
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα		56
Κεφάλαιο 7ο: Μελλοντικές επεκτάσεις		57
Βιβλιογραφία		58
Παράρτημα Α: Κώδικας ESP32 τοπικής συσκευής.....		60
Παράρτημα Β: Κώδικας ESP32 απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη		67

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκής κυψέλης (Πηγή: Researchgate.net)	6
Σχήμα 1.2: Γενική μορφή μετρητικής διάταξης I-V (Πηγή: https://tinyurl.com/xuujyd6w)	7
Σχήμα 1.3: Υπόδειγμα χαρακτηριστικής καμπύλης I-V και P-V (Πηγή: Researchgate.net)	8
Σχήμα 1.4: Διάγραμμα λειτουργίας διακοπτικού πυκνωτικού φορτίου (Πηγή: Researchgate.net)	9
Σχήμα 1.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά οργάνου Benning PV1-1 (Πηγή: https://tinyurl.com/4xc8fbjt)	9
Σχήμα 1.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά οργάνου Benning PV3 (Πηγή: https://tinyurl.com/ysvfv54z)	10
Σχήμα 2.1: Μπλοκ διάγραμμα ολοκληρωμένου συστήματος	11
Σχήμα 3.1: Μπλοκ διάγραμμα τοπικής συσκευής	13
Σχήμα 3.2: Μικροελεγκτής ESP32 (Πηγή: https://tinyurl.com/684fat2e)	15
Σχήμα 3.3: Καμπύλη γραμμικοποίησης αντίστασης μέτρησης ρεύματος	16
Σχήμα 3.4: Πλακέτα INA219	17
Σχήμα 3.5: Ενδεικτική φωτογραφία τύπου αντίστασης Shunt (Πηγη: Datasheet κατασκευαστή)	17
Σχήμα 3.6: Module ADS1115	17
Σχήμα 3.7: Αισθητήρας DS18B20	18
Σχήμα 3.8: Φασματική κατανομή ευαισθησίας VEML7700	18
Σχήμα 3.9: Module VEML7700	18
Σχήμα 3.10: Module MCP4725	19
Σχήμα 3.11α: Σχηματικό διάγραμμα αναλογικού μέρους του κυκλώματος	20
Σχήμα 3.11β: Σχηματικό διάγραμμα ψηφιακού μέρους του κυκλώματος	21
Σχήμα 3.12: Πλακέτα ηλεκτρονικού φορτίου - όψη εξαρτημάτων	22
Σχήμα 3.13: Πλακέτα ηλεκτρονικού φορτίου - πάνω και κάτω όψη χαλκού	22
Σχήμα 3.14: Τρισδιάστατη αναπαράσταση όψης τυπωμένης πλακέτας φορτίου	23
Σχήμα 3.15: Εμπρός όψη πλακέτας τοπικής συσκευής	23
Σχήμα 3.16: Πίσω όψη πλακέτας τοπικής συσκευής	24
Σχήμα 3.17: Μεταβολή της τάσης εξόδου DAC κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μετρήσεων	25
Σχήμα 3.18: Τάση Vgs των Mosfet φορτίου ως προς το χρόνο, 1 ^ο πείραμα	26
Σχήμα 3.19: Τάση Vgs των Mosfet φορτίου ως προς το χρόνο, 2 ^ο πείραμα	26
Σχήμα 3.20: Μεταβολή Vgs(th) και RDS(on) σε σχέση με τη θερμοκρασία (Πηγή: Datasheet κατασκευαστή)	28
Σχήμα 3.21: Απόσπασμα σχηματικού κυκλώματος σταδίου ισχύος του φορτίου	28
Σχήμα 3.22: Mosfet φορτίου πριν τη χρήση κυκλώματος εξισορρόπησης	29
Σχήμα 3.23: Mosfet φορτίου μετά τη χρήση κυκλώματος εξισορρόπησης	30
Σχήμα 3.24: Μπλοκ διάγραμμα τροφοδοσίας τοπικής συσκευής	31
Σχήμα 3.25: Διάγραμμα ροής κώδικα τοπικής συσκευής	33
Σχήμα 3.26: Εσωτερικό τοπικής συσκευής	34
Σχήμα 3.27: Πρόσοψη της τοπικής συσκευής	34
Σχήμα 4.1: Στιγμιότυπο οθόνης ρυθμίσεων από Nextion Editor	36
Σχήμα 4.2: Στιγμιότυπο οθόνης μετρήσεων από Nextion Editor	36
Σχήμα 4.3: Πλακέτα ρολογιού πραγματικού χρόνου	37
Σχήμα 4.4: Πλακέτα ανάγνωσης/εγγραφής αφαιρούμενου αποθηκευτικού μέσου SD	37
Σχήμα 4.5: DC-DC Μετατροπέας ανύψωσης τάσης	38
Σχήμα 4.6: Πλακέτα φόρτισης και προστασίας μπαταρίας ιόντων λιθίου	38
Σχήμα 4.7: Μπλοκ διάγραμμα τροφοδοσίας απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη	39
Σχήμα 4.8: CAD Μοντέλο κυτίου απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη	39
Σχήμα 4.9: Στιγμιότυπο της ολοκληρωμένης απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη	40

Σχήμα 4.10: Στιγμιότυπο κατασκευής κυτίου απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη	40
Σχήμα 4.11: Οθόνη ρύθμισης παραμέτρων απομακρυσμένης συσκευής.....	41
Σχήμα 4.12: Εικονικό πληκτρολόγιο ρύθμισης παραμέτρων απομακρυσμένης συσκευής.....	41
Σχήμα 4.13: Οθόνη εκτέλεσης μετρήσεων απομακρυσμένης συσκευής - ζωντανή απεικόνιση δεδομένων	42
Σχήμα 4.14: Οθόνη εκτέλεσης μετρήσεων απομακρυσμένης συσκευής - απεικόνιση δεδομένων μέγιστης ισχύος	42
Σχήμα 4.15: Στιγμιότυπο εξαγόμενου αρχείου δεδομένων	43
Σχήμα 5.1: Πολύμετρο Brymen BM235	44
Σχήμα 5.2: Πολύμετρο Fluke 175	44
Σχήμα 5.3: Στιγμιότυπο σύγκρισης μετρούμενης τιμής τάσης Voc με βαθμονομημένο όργανο.....	45
Σχήμα 5.4: Πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις.....	46
Σχήμα 5.5: Καμπύλες τάσης και ρεύματος μονού πλαισίου χωρίς σκίαση.....	46
Σχήμα 5.6: Καμπύλες I-V και P-V μονού πλαισίου χωρίς σκίαση	47
Σχήμα 5.8: Θερμοκρασία μονού πλαισίου χωρίς σκίαση.....	47
Σχήμα 5.7: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μονού πλαισίου χωρίς σκίαση	47
Σχήμα 5.9: Μερικώς σκιασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο	48
Σχήμα 5.10: Καμπύλες τάσης και ρεύματος μονού πλαισίου σε μερική σκίαση	49
Σχήμα 5.11: Καμπύλες I-V και P-V μονού πλαισίου σε μερική σκίαση.....	49
Σχήμα 5.12: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μονού πλαισίου σε μερική σκίαση	50
Σχήμα 5.13: Θερμοκρασία μονού πλαισίου σε μερική σκίαση.....	50
Σχήμα 5.14: Καμπύλες τάσης και ρεύματος δύο πλαισίων σε σειρά χωρίς σκίαση.....	51
Σχήμα 5.15: Καμπύλες I-V και P-V δύο πλαισίων σε σειρά χωρίς σκίαση	51
Σχήμα 5.16: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας δύο πλαισίων σε σειρά χωρίς σκίαση	52
Σχήμα 5.17: Θερμοκρασία δύο πλαισίων σε σειρά χωρίς σκίαση	52
Σχήμα 5.18 Φωτογραφία των δύο πλαισίων υπό καθεστώς μερικής σκίασης	53
Σχήμα 5.19: Καμπύλες τάσης και ρεύματος δύο πλαισίων σε σειρά με μερική σκίαση.....	53
Σχήμα 5.20: Καμπύλες I-V και P-V δύο πλαισίων σε σειρά σε μερική σκίαση	54
Σχήμα 5.21: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας δύο πλαισίων σε σειρά σε μερική σκίαση	54
Σχήμα 5.22: Θερμοκρασία δύο πλαισίων σε σειρά σε μερική σκίαση.....	55

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Προδιαγραφές – όρια υλικού	14
Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίου Conergy Q 80 MI	45

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
STC	Standard test conditions – κανονικές συνθήκες δοκιμών
V_{oc}	Τάση ανοιχτού κυκλώματος
I_{sc}	Ρεύμα βραχυκύκλωσης
MPP	Maximum Power Point – σημείο μέγιστης ισχύος
V_{gs}	Τάση πύλης
$V_{gs(th)}$	Τάση κατωφλίου πύλης
Mosfet	Metal oxide semiconductor field effect transistor – Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου οξειδίου μετάλλου
DAC	Digital to analog converter – Μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα
ADC	analog to digital converter – Μετατροπέας από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα
HMI	Human – machine interface – Διεπαφή ανθρώπου – μηχανής

Κεφάλαιο 1ο: Διακρίβωση φωτοβολταϊκών μονάδων

1.1 Εισαγωγή

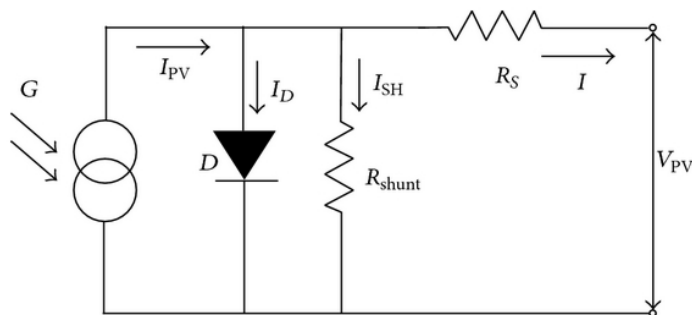
Τα τελευταία χρόνια το τεράστιο πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος έχει οδηγήσει την παγκόσμια αγορά στην ανάγκη για ριζικές αλλαγές στους τρόπους παραγωγής ενέργειας. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε ραγδαία αύξηση της ανάπτυξης και εγκατάστασης συστημάτων παραγωγής βασισμένα σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) τα οποία έχουν πολύ μικρό έως μηδενικό αντίκτυπο στη ρύπανση του περιβάλλοντος. Μια από τις κύριες μορφές χρήσης των ΑΠΕ, είναι και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση φωτοβολταϊκών διατάξεων. Οι εγκαταστάσεις τέτοιου τύπου είναι σε θέση να παράγουν «καθαρή» ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να χρειάζονται συχνή συντήρηση, κάτι που τις καθιστά αρκετά αξιόπιστες στο πέρασμα του χρόνου. Παρόλα αυτά, λόγω της μεγάλης αύξησης του αριθμού των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για τη δημιουργία εργαλείων και μετρητικών διατάξεων για τη διάγνωση τυχών αστοχιών ή και βλαβών στα συστήματα αυτά.

1.2 Σκοπός

Η εργασία αυτή έχει εφαρμοσμένο χαρακτήρα και ο σκοπός της είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος χαρακτηρισμού φωτοβολταϊκών μονάδων. Ένα από τα κυριότερα μεγέθη που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της απόδοσης καθώς και της εύρυθμης λειτουργίας μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, είναι οι χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος. Οι καμπύλες αυτές είναι σε θέση να χαρακτηρίσουν τη συμπεριφορά οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού πλαισίου, κάτω από συνθήκες μεταβλητού φορτίου. Η εξαγωγή και μελέτη αυτών των καμπυλών από οποιοδήποτε φωτοβολταϊκό πλαίσιο, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στη γρήγορη διάγνωση τυχών δυσλειτουργιών ή και βλαβών στα πλαίσια αυτά, κάτι το οποίο καθίσταται αρκετές φορές πρακτικά αδύνατο με τη χρήση άλλων μέσων.

1.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης - ρεύματος

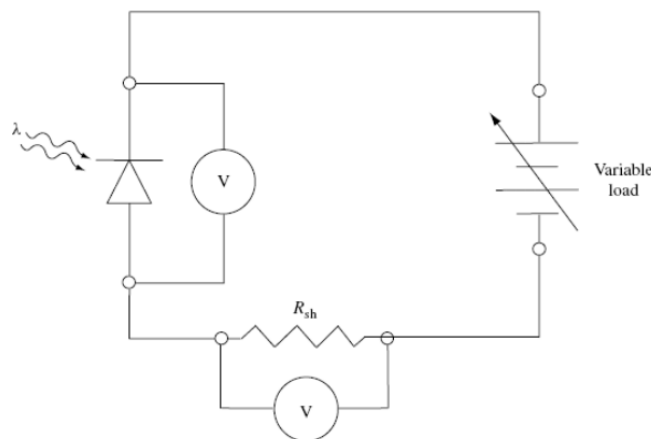
Μια φωτοβολταϊκή κυψέλη μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια δίοδος παράλληλα με μια πηγή ρεύματος, ενώ ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από ένα σύνολο παράλληλων και σε σειρά κυψελών. Μετρήσεις της συμπεριφοράς V-I της κυψέλης ή του πλαισίου, επιτρέπουν τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της δίοδου παράλληλα με άλλες σημαντικές παραμέτρους όπως το σημείο μέγιστης ισχύος P_{mpp} [4].



Σχήμα 1.1: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκής κυψέλης (Πηγή: Researchgate.net)

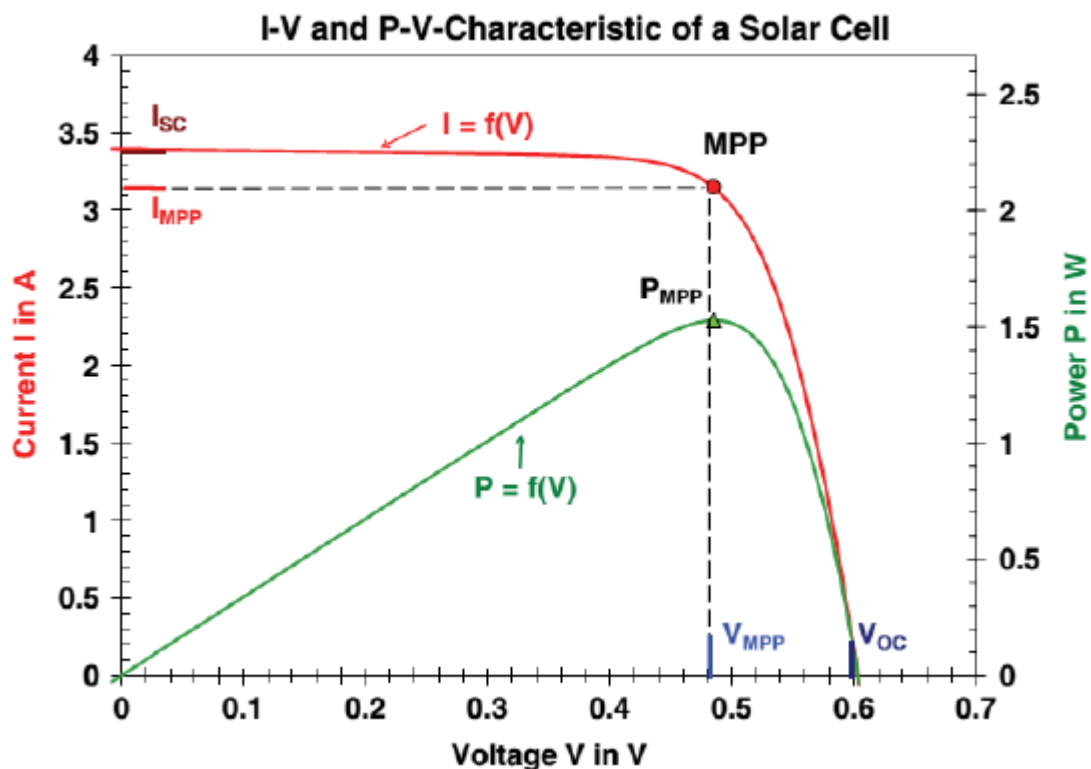
Ένα τυπικό σύστημα μετρήσεων αποτελείται από μια φυσική ή τεχνητή πηγή φωτός, ένα υπόστρωμα στο οποίο θα εναποτίθεται η προς μέτρηση κυψέλη ή πλαίσιο, ελεγχόμενη θερμοκρασία και σύστημα συλλογής δεδομένων που θα μετρά την τάση και το ρεύμα καθώς αυτά μεταβάλλονται στα άκρα της κυψέλης με την μεταβολή του εξωτερικού φορτίου. Η παρούσα κατασκευή επικεντρώνεται στη διαδικασία λήψης μετρήσεων και εξαγωγής των χαρακτηριστικών καμπυλών τάσης – ρεύματος τέτοιου τύπου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας με τα προς μέτρηση φωτοβολταϊκά πλαίσια να βρίσκονται ήδη εγκατεστημένα στο πεδίο. Αυτό έχει σαν μειονέκτημα το γεγονός πως οι εξαγόμενες από το σύστημα μετρήσεις τις περισσότερες φορές δεν αναμένεται να αντικατοπτρίζουν τις αντίστοιχες του κατασκευαστή οι οποίες ελήφθησαν σε συνθήκες εργαστηρίου (STC συνθήκες), είναι όμως σε θέση να δώσουν μια πολύ καλή εικόνα για την απόδοση ενός εγκατεστημένου συστήματος φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και για τη διάγνωση εσωτερικών στα πλαίσια βλαβών. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαίο το προτεινόμενο σύστημα εκτός από τις εξαγόμενες χαρακτηριστικές καμπύλες I-V, να κρατά και στοιχεία για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις αυτές. Οι συνθήκες αυτές περιλαμβάνουν την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία.

Μια μεγάλη ποικιλία από I-V μετρητικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί για να μετρούν την απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών, από $0,01\text{cm}^2$ εμβαδό κυψέλης μέχρι συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων πολλών kW. Ένα γενικό μετρητικό σύστημα I-V φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η τάση στα άκρα της φωτοβολταϊκής κυψέλης (από μια κυψέλη έως μια συστοιχία) πολώνεται με ένα μεταβαλλόμενο φορτίο και το ρεύμα ανιχνεύεται από μια shunt αντίσταση ακριβείας τεσσάρων ακροδεκτών ή ένα μαγνητικό μετατροπέα (current clamp). Το ρεύμα μέσα από μια φωτοβολταϊκή κυψέλη δεν θα πρέπει ποτέ να μετριέται με ένα απλό αμπερόμετρο σε σειρά, διότι σε περιπτώσεις που η τάση πόλωσης που αναπτύσσεται στα άκρα του αμπερομέτρου (Burden Voltage) είναι μεγάλη, θα αλλάξει το σημείο λειτουργίας της κυψέλης.



Σχήμα 1.2: Γενική μορφή μετρητικής διάταξης I-V (Πηγή: <https://tinyurl.com/xuujydw>)

Εγχώρια και διεθνή στάνταρ έχουν αναπτυχθεί για τα ελάχιστα χαρακτηριστικά των τυπικών I-V συστημάτων μέτρησης (πρότυπο EN 60904-1 [2]). Οι κρίσιμες παράμετροι στην I-V καμπύλη είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}), το ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{sc}) και το σημείο μέγιστης ισχύος (P_{mpp}). Σημαντικό ρόλο επίσης για τη διακρίβωση της εύρυθμης λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, παίζει και το σχήμα της εξαγόμενης I-V καμπύλης [4]. Σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας χωρίς σκιάσεις, η χαρακτηριστική καμπύλη έχει τη μορφή του σχήματος που ακολουθεί.



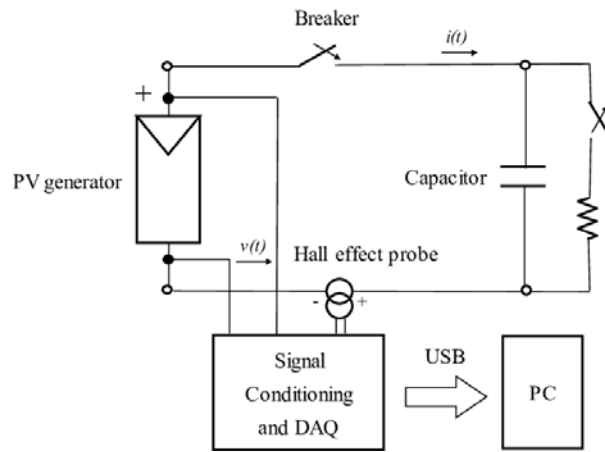
Σχήμα 1.3: Υπόδειγμα χαρακτηριστικής καμπύλης I-V και P-V (Πηγή: Researchgate.net)

1.4 Παρόμοια συστήματα – αρχιτεκτονικές κατασκευής

Συστήματα όπως το προτεινόμενο από αυτή την εργασία, αν και υπάρχουν στην αγορά, κοστίζουν από μερικές εκατοντάδες, έως και χιλιάδες ευρώ, κόστος που κάνει την απόκτησή τους ιδιαίτερα δύσκολη. Τα συστήματα τέτοιου τύπου χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες – αρχιτεκτονικές υλοποίησης, αυτά που χρησιμοποιούν διακοπτικές διατάξεις φορτίου και τα αντίστοιχα γραμμικά.

Τα περισσότερα μοντέλα τέτοιου είδους μετρητικών διατάξεων που πωλούνται στο εμπόριο, βασίζονται στην αρχιτεκτονική υλοποίησης με διακοπτική λειτουργία φορτίου (switching load) [4] [15]. Κατά την αρχιτεκτονική αυτή, μέσω κατάλληλης ηλεκτρονικά ελεγχόμενης διακοπτικής διάταξης χαμηλών απωλειών, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδέεται σε πυκνωτή γνωστής χωρητικότητας και προδιαγραφών για συγκεκριμένο και μεταβαλλόμενο από το σύστημα χρόνο, φορτίζοντάς τον έτσι μερικώς. Το σύστημα έπειτα αποκόπτει τον πυκνωτή, μετρά την τάση που αναπτύχθηκε στα άκρα του και στη συνέχεια μέσω δεύτερης διακοπτικής διάταξης τον εκφορτίζει πλήρως σε γνωστό φορτίο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για διάφορους χρόνους φόρτισης – εκφόρτισης, και εξάγεται από το σύστημα η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος.

Διακρίβωση φωτοβολταϊκών μονάδων



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα λειτουργίας διακοπτικού πυκνωτικού φορτίου (Πηγή: Researchgate.net)

Ενδεικτικά μερικά από τα όργανα τέτοιου τύπου του εμπορίου μαζί με τα χαρακτηριστικά τους, φαίνονται παρακάτω [13] [14].

	BENNING PV 1-1
indication	graphic display
protective conductor resistance	0.05 Ω – 199 Ω
testing current	± 200 mA DC
open circuit voltage	5 V – 1000 V DC
short-circuit current	0.5 A – 14.99 A DC
insulation resistance	0.2 MΩ – 199 MΩ
testing voltage	250 V, 500 V, 1000 V DC
load current	0.1 A – 40 A AC/DC (by means of clamp)
measured value memory	200 data record
interface	USB
scope of delivery	carrying case, measuring leads, crocodile clips, MC4 measuring leads, sunclix measuring leads, batteries

Σχήμα 1.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά όργανου Benning PVI-1 (Πηγή: <https://tinyurl.com/4xc8fbjt>)



	BENNING PV 3
display	graphic display (illuminated)
polarity test	automatic
open-circuit voltage (U_{oc})	5.0 V - 1500 V
resolution/accuracy	max. 0.1 V/ \pm (0.5 % + 2 digits)
short-circuit current (I_{sc})	0.5 A - 40 A (max. 45 kW)
resolution/accuracy	0.01 A/ \pm (1 % + 2 digits)
with wireless connection BENNING SUN 2	
· insolation	100 W/m ² - 1250 W/m ²
· PV module/ambient temperature	-30 °C - 125 °C
measured value memory interface	999 display indications/PV strings
interface	USB type B
PC software/data format	BENNING Solar Datalogger/CSV
wireless connection BENNING SUN 2	433 MHz
batteries	3 x 3.7 V 18650 lithium-ion batteries
dimensions/weight	340 x 300 x 152 mm/5.0 kg
protection class	IP 40 (open), IP 64 (closed)
scope of delivery	PV tester in robust protective case (IP 64), set of PV measuring leads (MC4), set of measuring leads with probe tip and alligator clips, charger with 3 pieces 3.7 V lithium-ion batteries
item no.	050428

Σχήμα 1.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά οργάνου Benning PV3 (Πηγή: <https://tinyurl.com/ysvuf54z>)

Το προτεινόμενο σε αυτή την εργασία σύστημα βασίζεται στη δεύτερη αρχιτεκτονική υλοποίηση, αυτή του γραμμικά μεταβαλλόμενου φορτίου (linear load) [4] [5]. Κατά την αρχιτεκτονική αυτή, συστοιχία ημιαγωγών ισχύος συμπεριφέρεται ως μεταβλητή αντίσταση ελεγχόμενη πλήρως από το σύστημα. Η λειτουργία του συστήματος αναλυτικά περιγράφεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Η κάθε μια από αυτές τις αρχιτεκτονικές υλοποίησης έχει και τα αντίστοιχα θετικά και αρνητικά στοιχεία που τη χαρακτηρίζουν. Οι διακοπτικές διατάξεις κρίνονται αρκετά πιο ελαφριές και λιγότερο ογκώδεις από τις αντίστοιχες γραμμικές, καθώς για την εξαγωγή ίδιων μετρήσεων οι γραμμικές διατάξεις παράγουν αρκετά μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας κατά τη λειτουργία τους λόγω της φύσης της διάταξης του φορτίου η οποία πρέπει με τις κατάλληλες διατάξεις απαγωγής θερμότητας να διοχετευτεί στο περιβάλλον, κάτι που αποτελεί τον κυριότερο λόγο χρήσης αυτής της αρχιτεκτονικής σε συσκευές του εμπορίου. Από την άλλη μεριά, οι συσκευές με γραμμικό φορτίο είναι αρκετά απλούστερες στην κατανόηση της λειτουργίας τους κάτι που τις κάνει ιδιαίτερα ελκυστικές για χρήση σε ακαδημαϊκό περιβάλλον και μπορούν πολύ εύκολα να αναβαθμιστούν για τη διαχείριση μεγαλύτερων φορτίων με την απλή προσθήκη περισσότερων ημιαγωγών ισχύος χωρίς σημαντικές αλλαγές στο κύκλωμά τους.

Συνοψίζοντας, στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία ενός αυτοματοποιημένου φορητού συστήματος, το οποίο θα δίνει τη δυνατότητα για εύκολη και γρήγορη εξαγωγή μετρήσεων από εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πλαίσια, κρατώντας το κόστος της κατασκευής αρκετά μικρό.

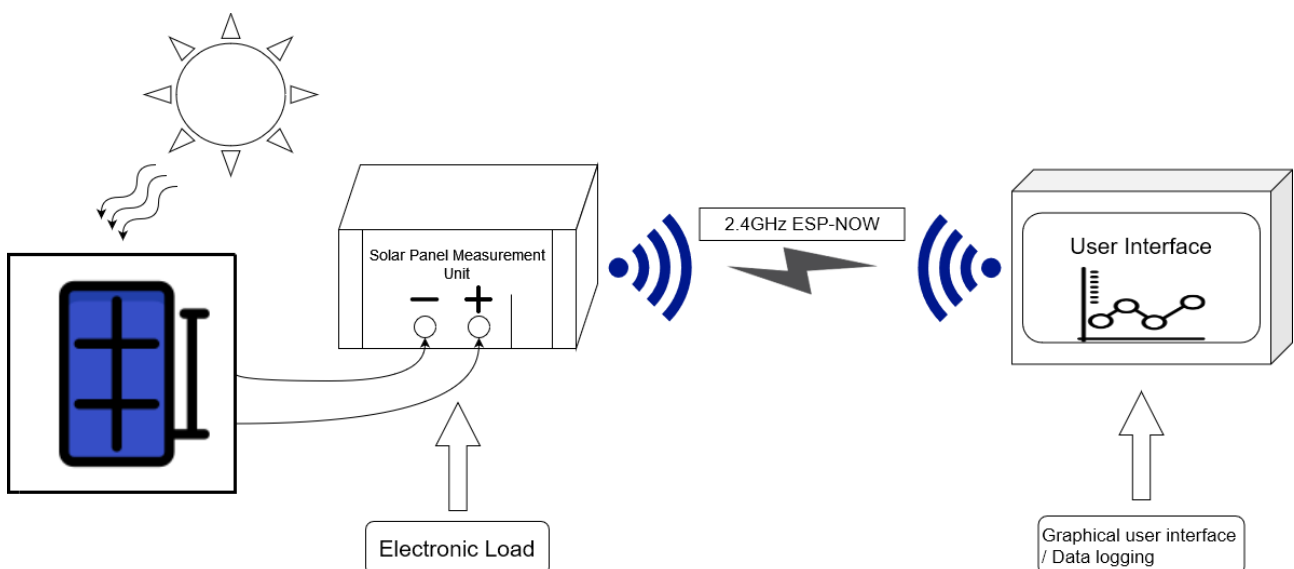
Κεφάλαιο 2ο: Δομή του συστήματος

2.1 Γενική περιγραφή του κυκλώματος – αρχή λειτουργίας

Το σύστημα που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία απαρτίζεται από ένα ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενο γραμμικό φορτίο ελεγχόμενο από μικροελεγκτή, με παράλληλη απεικόνιση και αποθήκευση των μετρήσεων τάσης -ρεύματος το οποίο χωρίζεται σε 2 επιμέρους κατασκευές.

- Η πρώτη κατασκευή αφορά την «τοπική» συσκευή μετρήσεων, η οποία τοποθετείται πλησίον του προς μέτρηση φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην καρδιά του κυκλώματος αυτής βρίσκεται το ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενο φορτίο. Μεταβάλλοντας γραμμικά το φορτίο αυτό και λαμβάνοντας παράλληλα διαδοχικές μετρήσεις ρεύματος και τάσης για κάθε αλλαγή του φορτίου, η κατασκευή είναι σε θέση να συλλέξει ένα πλήθος δεδομένων, τα οποία απαρτίζουν εν τέλει τη ζητούμενη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του πλαισίου αυτού. Η συσκευή παρέχει ακόμα τη δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικών αισθητήρων μέτρησης θερμοκρασίας και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, χαρακτηρίζοντας έτσι όλες οι παραγόμενες μετρήσεις με βάση τις κλιματικές συνθήκες στις οποίες ελήφθησαν, κάτι το οποίο είναι αρκετά σημαντικό για την εγκυρότητά τους.
- Η δεύτερη κατασκευή αφορά την «απομακρυσμένη» συσκευή, η οποία ευθύνεται για την απεικόνιση των μετρήσεων και την αποθήκευση των παραγόμενων αποτελεσμάτων σε αφαιρούμενο αποθηκευτικό μέσο. Η συσκευή αυτή φέρει μια έγχρωμη οθόνη αφής 4,3 ιντσών, μέσω της οποίας ο χρήστης είναι σε θέση να παραμετροποιεί τη λειτουργία του συστήματος στο σύνολό του, να επιβλέπει σε πραγματικό χρόνο τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων, καθώς και να ενημερώνεται για τυχόν παραγόμενους από το σύστημα συναγερμούς.

Το μπλοκ διάγραμμα του ολοκληρωμένου συστήματος εμφανίζεται παρακάτω.



Σχήμα 2.1: Μπλοκ διάγραμμα ολοκληρωμένου συστήματος

2.2 Ασύρματη ζεύξη επικοινωνίας των δύο συσκευών

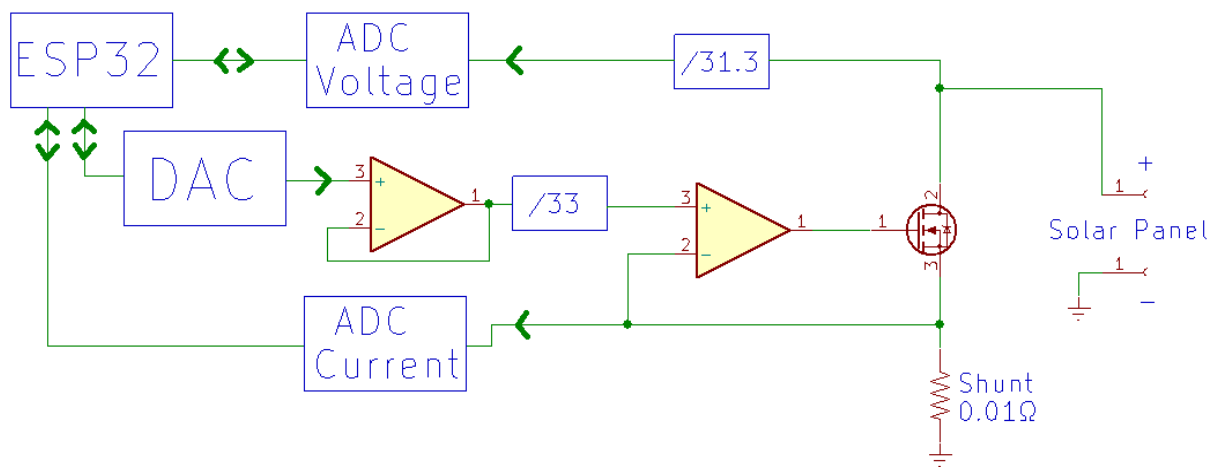
Και οι δύο παραπάνω συσκευές φέρουν ασύρματες ζεύξεις, κάτι το οποίο επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους για ανταλλαγή εντολών και δεδομένων. Το πλεονέκτημα της χρήσης ασύρματης ζεύξης ανάμεσα στις δύο συσκευές είναι πως ο χρήστης δεν είναι απαραίτητο να βρίσκεται ακριβώς δίπλα στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο κατά τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων, κάτι που θα μπορούσε να δημιουργήσει ακούσιες σκιάσεις στην επιφάνειά του και να διαστρεβλώσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών. Ακόμα, οι συσκευές αυτές μπορούν να τροφοδοτηθούν είτε από το δίκτυο μέσω κατάλληλου εξωτερικού τροφοδοτικού, είτε από τις ενσωματωμένες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου που περιέχουν, κάνοντας έτσι το σύστημα φορητό και αρκετά ευέλικτο για τη χρήση του σε απομακρυσμένες Φ/Β εγκαταστάσεις.

Κεφάλαιο 3ο: Τοπική συσκευή – ηλεκτρονικό φορτίο

Όπως προαναφέρθηκε, η συσκευή αυτή αποτελεί την «καρδιά» του συστήματος, καθώς είναι υπεύθυνη για τη λήψη των μετρήσεων τάσης και ρεύματος, καθώς και για τη μεταβολή του φορτίου.

Στο κέντρο του κυκλώματος αυτής βρίσκεται μια συστοιχία από N-Channel Mosfet ισχύος τα οποία λειτουργούν στη γραμμική τους περιοχή κατά την εκτέλεση του κύκλου λήψης μετρήσεων και υλοποιούν στην πραγματικότητα ένα ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενο φορτίο βύθισης σταθερού ρεύματος (Constant Current sink load). Τα Mosfet αυτά συμπεριφέρονται ως μεταβλητές αντιστάσεις, αλλάζοντας έτσι το φορτίο στα άκρα του συνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η αντίσταση που παρουσιάζει η εν λόγω συστοιχία εξαρτάται άμεσα από την τάση V_{gs} που εφαρμόζεται στην πύλη των Mosfet αυτών. Λόγω της μη γραμμικότητας στη σχέση μεταβολής της τάσης V_{gs} σε σχέση με το ρεύμα απορροής I_D , η τάση αυτή παράγεται από έναν τελεστικό ενισχυτή συνδεδεμένο σε βρόγχο αρνητικής ανάδρασης. Ο ενισχυτής αυτός στην αναστρέφουσα είσοδό του δέχεται μια τάση η οποία αναπτύσσεται στα άκρα της αντίστασης Shunt του κυκλώματος και είναι ευθέως ανάλογη του ρεύματος που διαρρέει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στη μη αναστρέφουσα είσοδο εφαρμόζεται μετά από κατάλληλη προσαρμογή εύρους μια ηλεκτρονικά μεταβλητή τάση αναφοράς από το κύκλωμα του DAC. Ο DAC δέχεται ψηφιακά εντολές από τον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 και είναι υπεύθυνος για τον ορισμό του επιθυμητού ρεύματος φορτίου. Ο κεντρικός μικροελεγκτής ESP32 κατά τη διάρκεια εκτέλεσης ενός κύκλου μετρήσεων μεταβάλλει γραμμικά την τάση αναφοράς αυτή σε μικρά διακριτά βήματα, ρυθμίζοντας έτσι την απαίτηση του μεταβλητού φορτίου σε ρεύμα. Για κάθε μεταβολή του φορτίου, ο μικροελεγκτής συλλέγει τις αντίστοιχες τιμές τάσεως και ρεύματος του φωτοβολταϊκού πάνελ μέσω των αντίστοιχων μετατροπέων ADC που διαθέτει και αφότου ελέγξει τα δεδομένα για τυχόν καταστάσεις σφάλματος, τα στέλνει στην μονάδα απομακρυσμένου ελέγχου και καταγραφής η οποία μέσω της ενσωματωμένης διεπαφής χρήστη αναλαμβάνει να απεικονίσει και να αποθηκεύσει τα παραγόμενα δεδομένα. Το μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας της τοπικής συσκευής εμφανίζεται παρακάτω (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 3.1: Μπλοκ διάγραμμα τοπικής συσκευής

3.1 Δυνατότητες της συσκευής

Η συσκευή αυτή σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να αντέχει με ασφάλεια ένταση ρεύματος εισόδου μέχρι 8A και τάση εισόδου μέχρι 80V, με τη συνολική καταναλισκόμενη ισχύ επάνω στη συσκευή να μην ξεπερνάει τα 280W. Οι μέγιστες αυτές τιμές δεν αποτελούν όρια του υλικού, αλλά είναι ορισμένες στο λογισμικό του μικροελεγκτή ως τα όρια εισόδου και κρίνονται επαρκείς για τις περισσότερες εφαρμογές μικρών φωτοβολταϊκών συστοιχιών καθώς και όλων των αυτοτελών φωτοβολταϊκών πλαισίων που κυκλοφορούν στην αγορά τη στιγμή της συγγραφής του παρόντος κειμένου.

Όλα τα εξαρτήματα που απαρτίζουν τη συσκευή μετρήσεων επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να υπερκαλύπτουν τις παραπάνω προδιαγραφές του τέθηκαν για τα όρια αντοχής της σε καταστάσεις κανονικής λειτουργίας και σφάλματος, παρέχοντας και ένα όριο ασφαλείας της τάξης του 20% όσο αφορά το όριο ανοχής στη μέγιστη τάση και 80% όσο αφορά το όριο ανοχής στο μέγιστο ρεύμα εισόδου. Εκτός από την επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων, η σχεδίαση του συστήματος περιλαμβάνει επιπλέον ενεργές προστασίες από υπέρταση (Overvoltage protection), υπερένταση (Overcurrent protection), υπέρβαση του ορίου ισχύος (Overpower protection), ανάποδη πολικότητα στην είσοδο (Reverse polarity protection) καθώς και προστασία από υπερθέρμανση του σταδίου ισχύος (Overtemperature protection). Όλα τα παραπάνω καθιστούν πολύ δύσκολη την καταστροφή της συσκευής από καταστάσεις σφάλματος, ή ακόμα και λάθος χειρισμό από το χρήστη, κάτι το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό για συσκευές που χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές.

Πίνακας 3.1: Προδιαγραφές – όρια υλικού

	Μέγιστη τιμή ασφαλούς λειτουργίας / όριο προστασίας	Μέγιστο θεωρητικό όριο αντοχής υλικού
Τάση εισόδου:	80V	100V
Ρεύμα εισόδου:	8A	80A
Ισχύς εισόδου:	280W	300W
Θερμοκρασία σταδίου ισχύος:	80°C	125°C

3.2 Εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν

Παρακάτω εμφανίζονται κάποια από τα κυριότερα μέρη της συσκευής, καθώς και τα εξαρτήματα που την απαρτίζουν μαζί με τα χαρακτηριστικά τους.

3.2.1 Κεντρικός μικροελεγκτής ESP32

Ο κεντρικός μικροελεγκτής που επελέγη για την υλοποίηση της κατασκευής είναι ο ESP32 της εταιρίας Espressif. Ο μικροελεγκτής αυτός επελέγη λόγω της μεγάλης του επεξεργαστικής ισχύος, του χαμηλού του

κόστους και της πληθώρας περιφερειακών που διαθέτει. Μερικά από αυτά τα περιφερειακά είναι:

- 18 κανάλια 12-bit [SAR ADC](#)
- 2 κανάλια 8-bit [DACs](#)
- 10 κανάλια αισθητήρων αφής ([capacitive sensing](#) GPIOs)
- 4 διαύλους [SPI](#)
- 2 διαύλους [I^S](#)
- 2 διαύλους [I^C](#)
- 3 διαύλους [UART](#)
- Ενσωματωμένο αισθητήρα [Hall effect](#)
- Διεπαφή Wi-Fi / 2,4GHz
- Διεπαφή Bluetooth

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε χρήση της ασύρματης διεπαφής στα 2,4GHz με χρήση του πρωτοκόλλου ESPNOW της Espressif για τη μεταφορά των δεδομένων από και προς την απομακρυσμένη συσκευή διεπαφής χρήστη, ενός διαύλου I^C για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον DAC, τον ADC και τον εξωτερικό αισθητήρα μέτρησης της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και κάποιοι ακροδέκτες GPIO. Οι ακροδέκτες αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για τη διαχείριση των ηλεκτρονόμων αποκοπής φορτίου και ανεμιστήρων ψύξης του συστήματος, του πρωτοκόλλου 1Wire για τη λήψη μετρήσεων από τον απομακρυσμένο αισθητήρα θερμοκρασίας, καθώς και διαφόρων περιφερειακών όπως ενδεικτικά LED.



Σχήμα 3.2: Μικροελεγκτής ESP32 (Πηγή: <https://tinyurl.com/684fat2e>)

3.2.2 Μέτρηση ρεύματος

Για τη μέτρηση του ρεύματος του φωτοβολταϊκού πάνελ επιλέχθηκε ένα module βασισμένο στο ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης ρεύματος INA219. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιώντας μία εξωτερική αντίσταση shunt και μετρώντας την πτώση τάσης στα άκρα της είναι σε θέση να ανάγει το ρεύμα που τη διαρρέει. Η αντίσταση shunt που επελέγη για τη συγκεκριμένη κατασκευή είναι σχεδιασμένη για εφαρμογές current sensing, τύπου μεταλλικού στοιχείου, αντίστασης 10mΩ και ακρίβειας 1% με πολύ χαμηλό συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής, κάτι που επιτρέπει τη μέτρηση ρεύματος με θεωρητική τιμή έως 10A από το σύστημα, το οποίο υπερκαλύπτει τις ανάγκες της παρούσας κατασκευής. Ο υπολογισμός της μέγιστης αυτής τιμής ρεύματος φαίνεται στην παρακάτω σχέση.

$$I_{load(max)} = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} = \frac{0,1V}{0,01\Omega} = 10A \quad (3.1)$$

Κεφάλαιο 3^ο

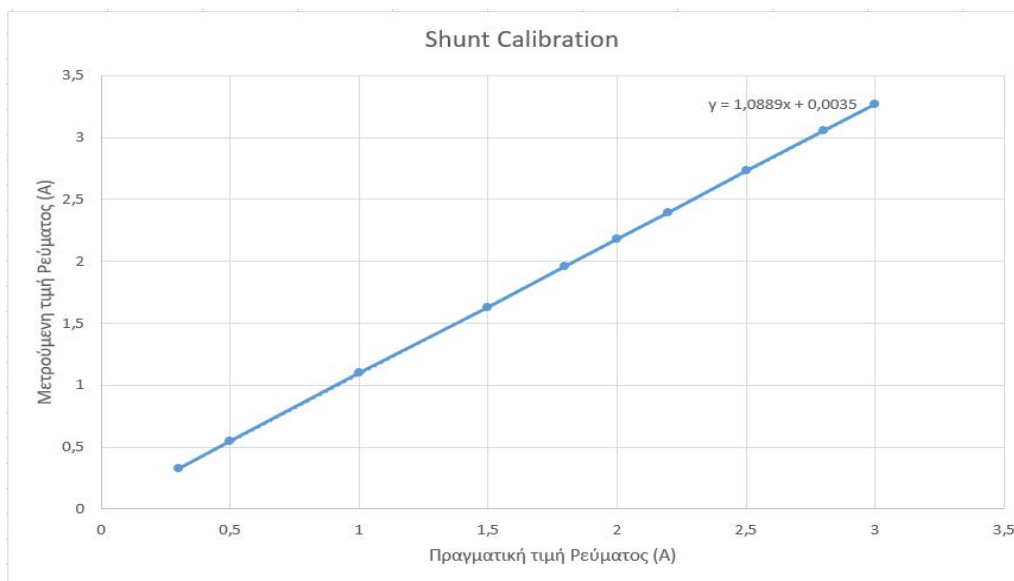
Όπου V_{shunt} η μέγιστη πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης αυτής (0,1V) Και R_{shunt} η τιμή της αντίστασης (10mΩ).

Ο υπολογισμός της μέγιστης ισχύος επάνω στην αντίσταση αυτή για την ακραία περίπτωση όπου διαρρέεται από ρεύμα 10A εμφανίζεται παρακάτω.

$$P_{shunt(max)} = \frac{V_{shunt}^2}{R_{shunt}} = \frac{0,1^2 V}{0,01 \Omega} = 1 W \quad (3.2)$$

Λόγω του εσωτερικού 12bit ADC που περιέχει το ολοκληρωμένο INA219, η ακρίβεια των μετρήσεων ανέρχεται στα $\pm 8mA$ και το αποτέλεσμα της μέτρησης επιστρέφεται στον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 μέσω διαύλου PC.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων του κυκλώματος, παρατηρήθηκε πως οι μετρούμενες τιμές ρεύματος από το σύστημα απέκλιναν από τις πραγματικές. Μετά από ανάλυση του σφάλματος των μετρήσεων, εξήχθη το συμπέρασμα πως το σφάλμα αυτό ήταν γραμμικό και οφειλόταν στη σταθερή παρασιτική αντίσταση των αγωγών της πλακέτας ανάμεσα στην αντίσταση shunt και το INA219, που προστίθενται στη συνολική τιμή της αντίστασης. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η βαθμονόμηση της μέτρησης αυτής, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν. Τα πειραματικά δεδομένα βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκαν εμφανίζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3.3: Καμπύλη γραμμικοποίησης αντίστασης μέτρησης ρεύματος

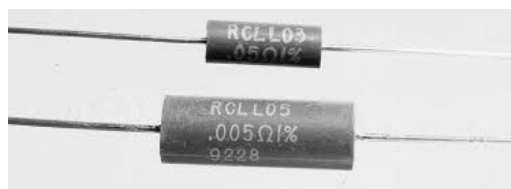
Η μετατροπή της μετρούμενης τιμής ρεύματος σε πραγματική στον κώδικα της κατασκευής δίνεται από τη σχέση:

$$I_{real} = 1,0889 * I_{meas} + 0,0035 \quad (3.3)$$

Όπου I_{real} η πραγματική κανονικοποιημένη τιμή του ρεύματος και I_{meas} η μετρούμενη από το σύστημα τιμή ρεύματος.



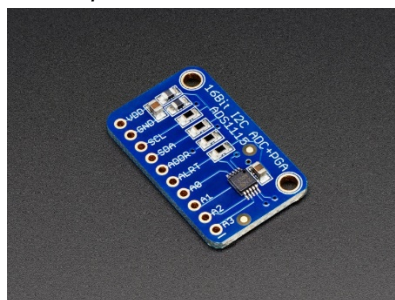
Σχήμα 3.4: Πλακέτα INA219



Σχήμα 3.5: Ενδεικτική φωτογραφία τύπου αντίστασης Shunt (Πηγή: Datasheet κατασκευαστή)

3.2.3 Μέτρηση τάσης

Η μέτρηση της τάσης στα άκρα του φωτοβολταϊκού πλαισίου επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός εξωτερικού 16bit Delta Sigma ADC module, καθώς έπειτα από πειραματισμούς παρατηρήθηκε ότι ο εσωτερικός ADC του μικροελεγκτή ESP32 δεν παρείχε την επιθυμητή ακρίβεια μετρήσεων για την παρούσα εφαρμογή. Το module αυτό βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα ADS1115, το οποίο διαθέτει 4 κανάλια μέτρησης αναλογικής τάσης, εσωτερική ψηφιακά ελεγχόμενη τάση αναφοράς και ψηφιακά ελεγχόμενη ενισχυτική διάταξη στις εισόδους, για μεγιστοποίηση της αναλυτικής ικανότητας στο ωφέλιμο εύρος μετρήσεων. Για τη συγκεκριμένη κατασκευή και για τάση τροφοδοσίας 3,3V, το κύκλωμα αυτό ρυθμίστηκε να δέχεται στις εισόδους του αναλογική τάση έως 3,3V με τάση αναφοράς 4,096V και ανάλυση 0,125mV. Επειδή η τάση του πάνελ είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μέγιστη τάση μέτρησης του ADC, χρησιμοποιήθηκε ένας διαιρέτης τάσης και ένας τελεστικός ενισχυτής συνδεδεμένος ως ακόλουθος τάσης για την προσαρμογή του εύρους της προς μέτρηση τάσης εισόδου της συσκευής σε αυτό του ADC. Οι τιμές των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν επιτρέπουν τη μέτρηση τάσεων εισόδου έως 103V με ακρίβεια $\pm 200\text{mV}$. Οι μετρήσεις του ADC ψηφιοποιούνται εσωτερικά και αποστέλλονται στον ESP32 μέσω του διαύλου I²C.



Σχήμα 3.6: Module ADS1115

3.2.4 Μέτρηση θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε το αισθητήριο DS18B20 της Maxim Integrated. Το αισθητήριο αυτό μπορεί να καλύψει ένα θερμοκρασιακό εύρος από -55°C έως $+125^{\circ}\text{C}$, και στο εύρος -10°C έως $+85^{\circ}\text{C}$ προσφέρει ακρίβεια $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ στις μετρήσεις του, κάτι που υπερκαλύπτει τις ανάγκες της παρούσας κατασκευής. Το αισθητήριο αυτό επελέγη με βάση το χαμηλό του κόστος και την άμεση διαθεσιμότητά του στο εμπόριο. Τα δεδομένα θερμοκρασίας από αυτό το αισθητήριο μεταφέρονται στον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 μέσω του πρωτοκόλλου 1Wire στον αντίστοιχο ακροδέκτη.



Σχήμα 3.7: Αισθητήρας DS18B20

3.2.5 Μέτρηση έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

Για τη μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας επελέγη ένα module βασισμένο στον αισθητήρα VEML7700 της Vishay. Ο αισθητήρας αυτός χαρακτηρίζεται από το χαμηλό του κόστος σε σύγκριση με αντίστοιχους της αγοράς, είναι βαθμονομημένος από το εργοστάσιο για απόκριση σε αρκετά μεγάλο εύρος μήκους κύματος ($\sim 500\text{nm} - 900\text{nm}$), μπορεί να μετρήσει ένταση φωτός μέχρι 120000Lux με 16bit ανάλυση τα οποία αντιστοιχούν περίπου σε $950\text{W}/\text{m}^2$ ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\text{W}/\text{m}^2 = A_{\text{LUX}} \times 0.0079 \quad (3.4)$$

Η σχέση αυτή είναι αρκετά ακριβής μόνο στο φάσμα φωτός κοντά στην περιοχή των 550nm , όπου και το αισθητήριο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, καθώς η μετατροπή της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας από Lux σε W/m^2 είναι μία πολύπλοκη διαδικασία, της οποίας η σχέση μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος κύματος του φωτός που μετριέται. Για πραγματική μέτρηση της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται διαφόρων τύπων όργανα που ονομάζονται πυρανόμετρα, των οποίων όμως το κόστος καθίσταται απαγορευτικό για χρήση στην παρούσα εφαρμογή. Ο προτεινόμενος αισθητήρας κρίθηκε πως καλύπτει τις απαιτήσεις του συστήματος για μετρήσεις στην Ελλάδα. Τα δεδομένα του αισθητήρα αυτού επιστρέφονται ψηφιακά στον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 μέσω του διαύλου I²C.

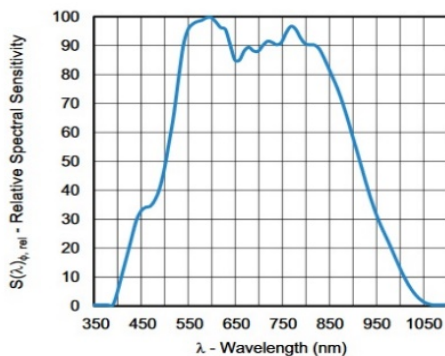
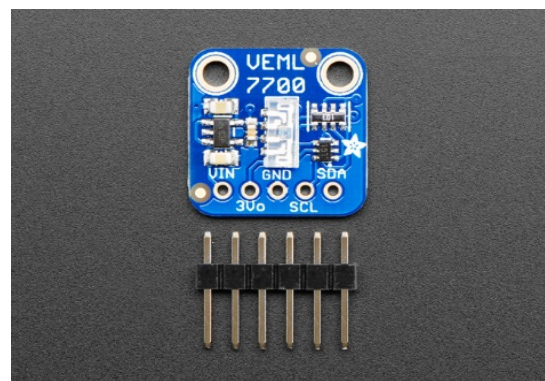


Fig. 3 - White Channel Sensitivity Spectrum

Σχήμα 3.8: Φασματική κατανομή ευαισθησίας VEML7700



Σχήμα 3.9: Module VEML7700

3.2.6 Μετατροπέας DAC

Ο μετατροπέας DAC είναι υπεύθυνος να παρέχει την κατάλληλη σε κάθε περίπτωση τάση αναφοράς για την οδήγηση των πυλών των Mosfet ισχύος του φορτίου. Η παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιεί για αυτό το σκοπό ένα module βασισμένο στο ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP4725 της Microchip. Το ολοκληρωμένο αυτό κύκλωμα έχει ανάλυση 12bit, δέχεται εντολές ψηφιακά από τον ESP32 μέσω του διαύλου I²C και μπορεί να δίνει αναλογική τάση εξόδου από 0V έως 3.3V με βήμα 0.8mV (4096 διακριτές τιμές). Η τάση αυτή μέσω του αναλογικού κυκλώματος με τελεστικούς ενισχυτές που ακολουθεί, καταλήγει στις πύλες των Mosfet ισχύος και αποτελεί στην πραγματικότητα το setpoint του ρεύματος φορτίου προς βύθιση που απαιτεί την εκάστοτε χρονική στιγμή ο κεντρικός μικροελεγκτής.



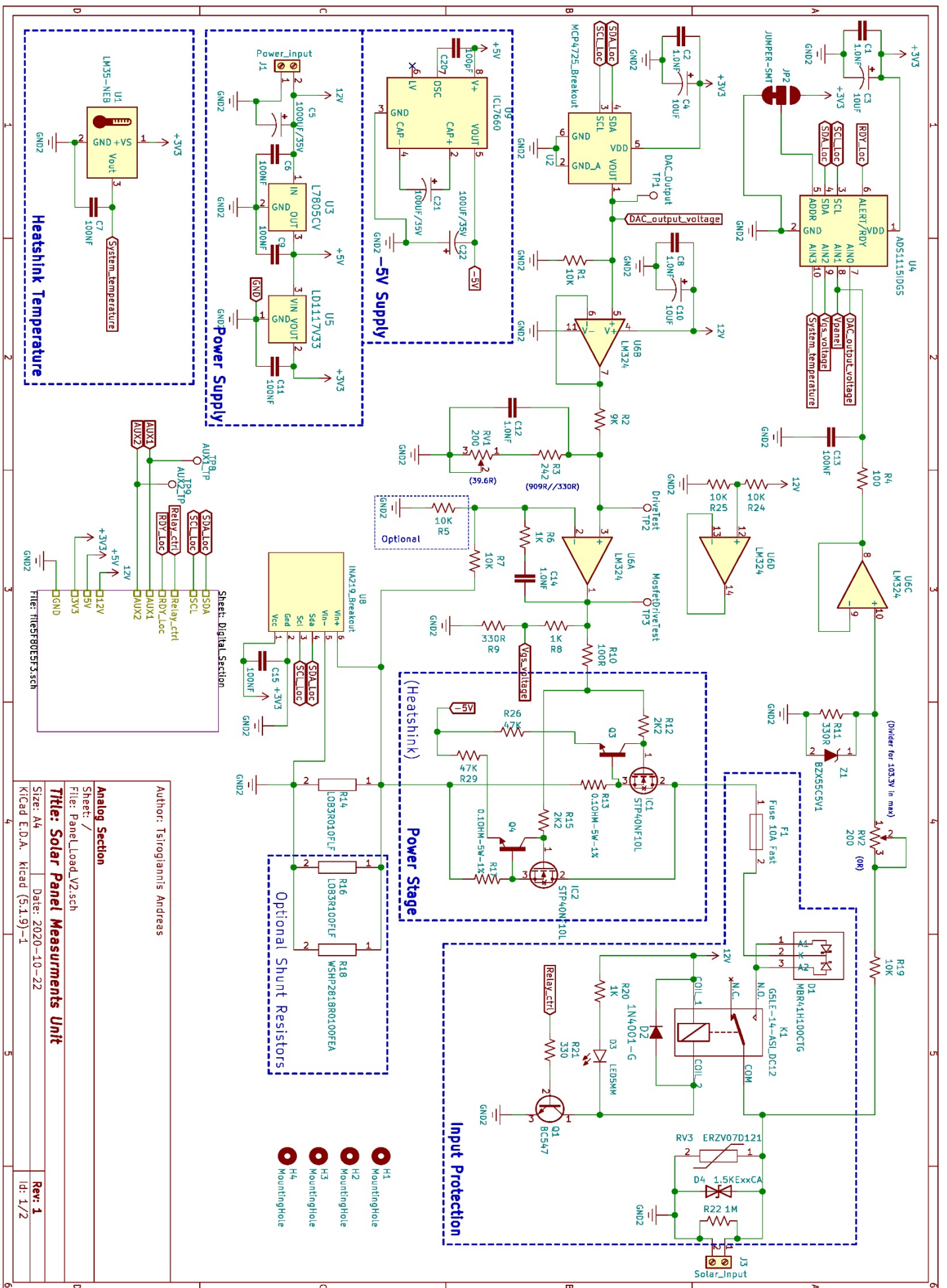
Σχήμα 3.10: Module MCP4725

3.2.7 Mosfet ισχύος

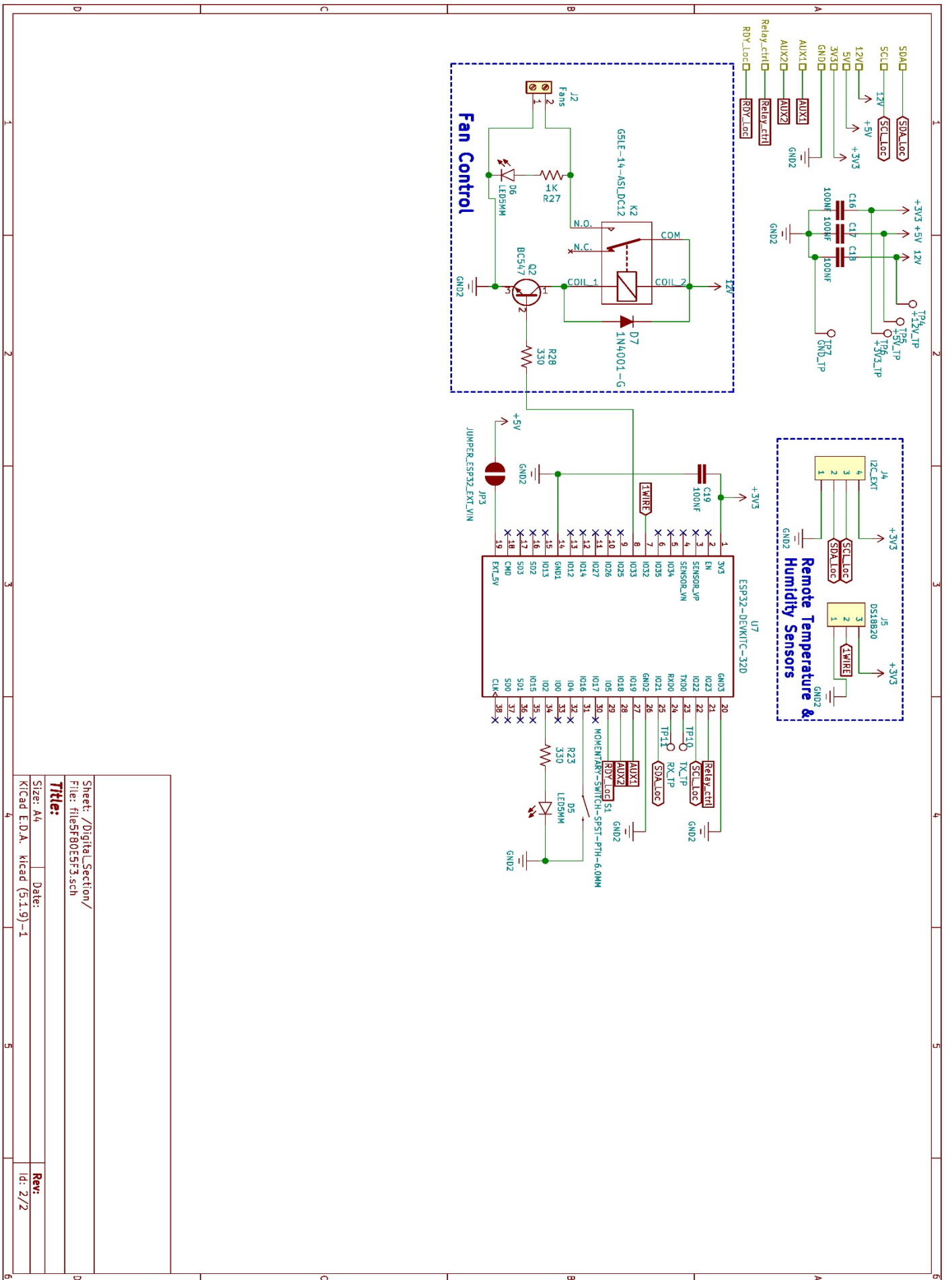
Στο κέντρο της βαθμίδας ισχύος του κυκλώματος, βρίσκονται δύο enhancement N-Channel Power Mosfet STP40NF10L της STMicroelectronics [7]. Τα Mosfet αυτά σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων κατασκευαστή [7] μπορούν να αντέξουν τάση εκροής-πηγής V_{ds} 100V, ρεύμα εκροής I_d 40A και ισχύ P_d 150W το καθένα. Η πύλη τους έχει την ικανότητα να ενεργοποιείται από την αρκετά χαμηλή τάση (Λογικού επιπέδου, με $V_{gs_{th}}$ 1V) και παρουσιάζουν αντίσταση $R_{ds_{on}}$ 33mΩ σε κατάσταση πλήρους αγωγιμότητας, κάτι που πρακτικά στην εφαρμογή αυτή τα κάνει να συμπεριφέρονται ως βραχυκύκλωμα, και επιτρέπει τη μέτρηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή τα δύο αυτά Mosfet συνδέονται παράλληλα για διαμοιρασμό του θερμικού φορτίου, καθώς λόγω της αρχής λειτουργίας του κυκλώματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δουλεύουν στη γραμμική τους περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δέχονται αρκετά μεγάλη θερμική καταπόνηση. Για την αποφυγή της υπερθέρμανσης και καταστροφής τους, τα Mosfet ισχύος είναι βιδωμένα και με τη χρήση θερμοαγώγιμης πάστας πάνω σε ψύκτρα αρκετά μεγάλης θερμικής μάζας, από την οποία το θερμικό φορτίο απάγεται με τη χρήση δύο ανεμιστήρων των 80mm.

3.3 Σχηματικό διάγραμμα τοπικής συσκευής

Παρακάτω ακολουθεί το σχηματικό διάγραμμα της τοπικής συσκευής, όπως αυτό υλοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα KiCAD.



Σχήμα 3.11α: Σχηματικό διάγραμμα αναλογικού μέρους του κυκλώματος

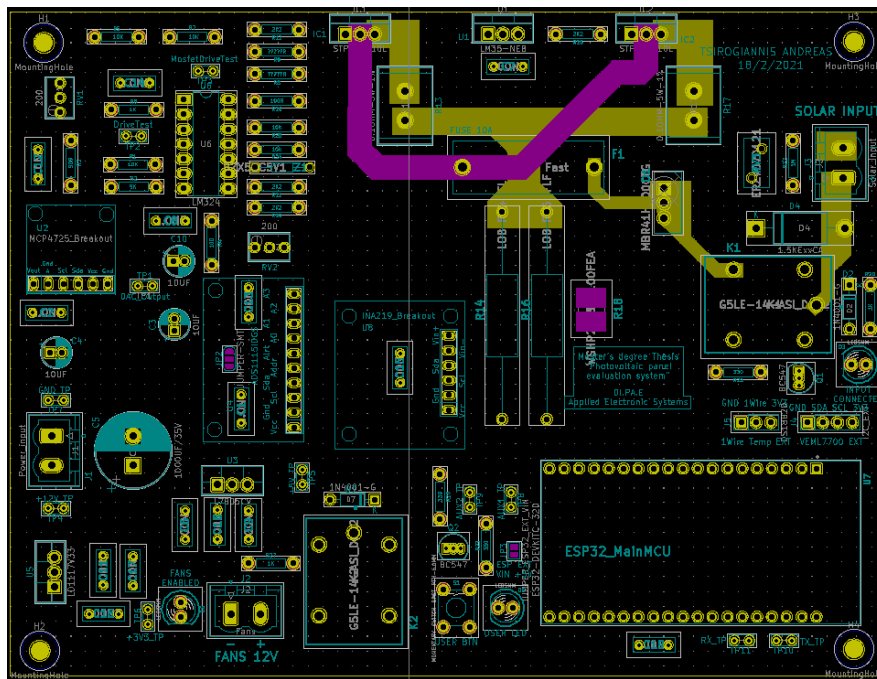


Σχήμα 3.11β: Σχηματικό διάγραμμα ψηφιακού μέρους του κυκλώματος

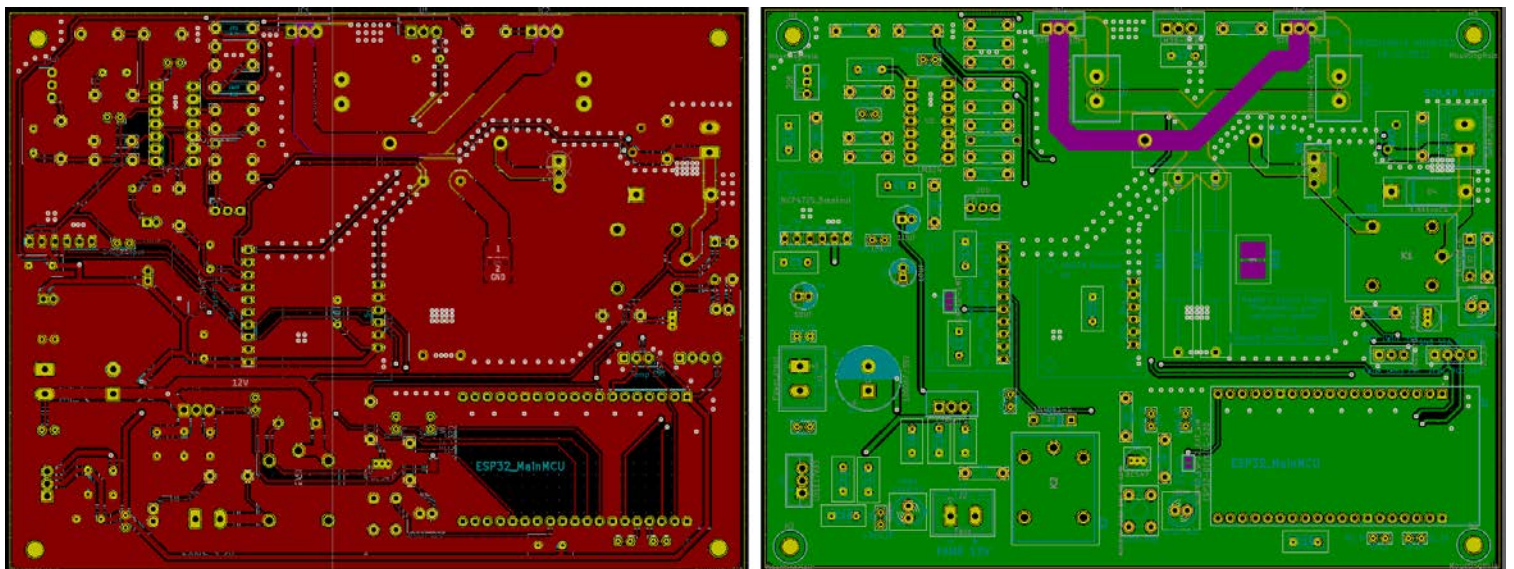
Κεφάλαιο 3°

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχηματικά διαγράμματα, το κύκλωμα έχει χωριστεί σε δύο διακριτά μέρη, το αναλογικό και το ψηφιακό μέρος, για ευκολία στο σχεδιασμό και περιέχει αρκετά σημεία δοκιμών (test points) για ευκολία στην εύρεση σφαλμάτων. Στο αναλογικό μέρος το οποίο αποτελεί και το μεγαλύτερο κομμάτι του σχηματικού διαγράμματος, επισημαίνονται με μπλε χρώμα διακριτές περιοχές όπως το τμήμα της τροφοδοσίας του κυκλώματος, το τμήμα ισχύος καθώς και το τμήμα που αφορά τις προστασίες στην είσοδο της συσκευής.

Τα παραπάνω σχηματικά διαγράμματα στη συνέχεια μετατράπηκαν στο αντίστοιχο Layout στο ίδιο σχεδιαστικό πρόγραμμα, με σκοπό την εκτύπωση πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος PCB. Στιγμιότυπα της διαδικασίας αυτής εμφανίζονται στη συνέχεια.

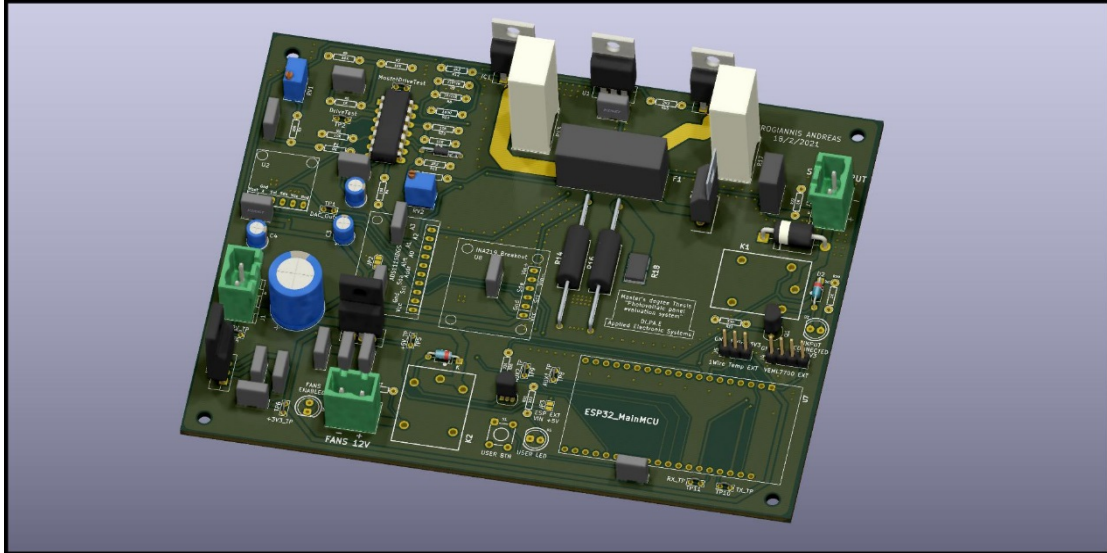


Σχήμα 3.12: Πλακέτα ηλεκτρονικού φορτίου - όψη εξαρτημάτων

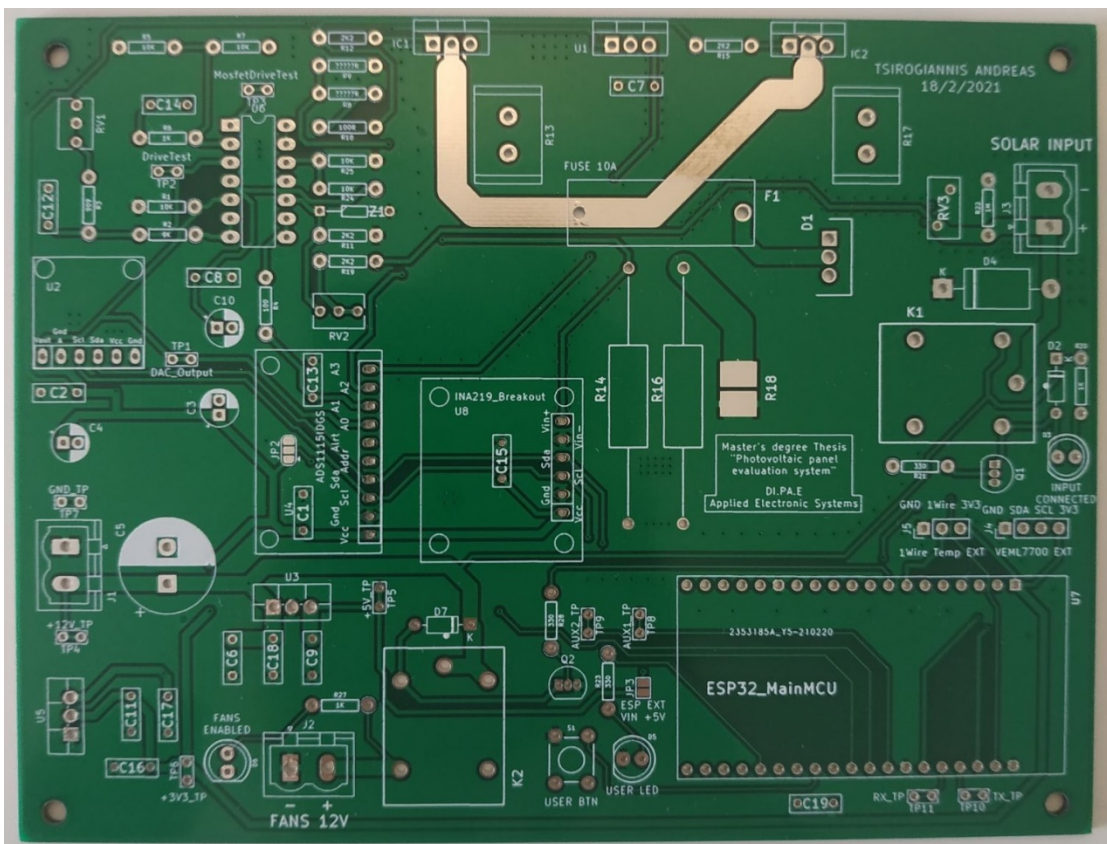


Σχήμα 3.13: Πλακέτα ηλεκτρονικού φορτίου - πάνω και κάτω όψη χαλκού

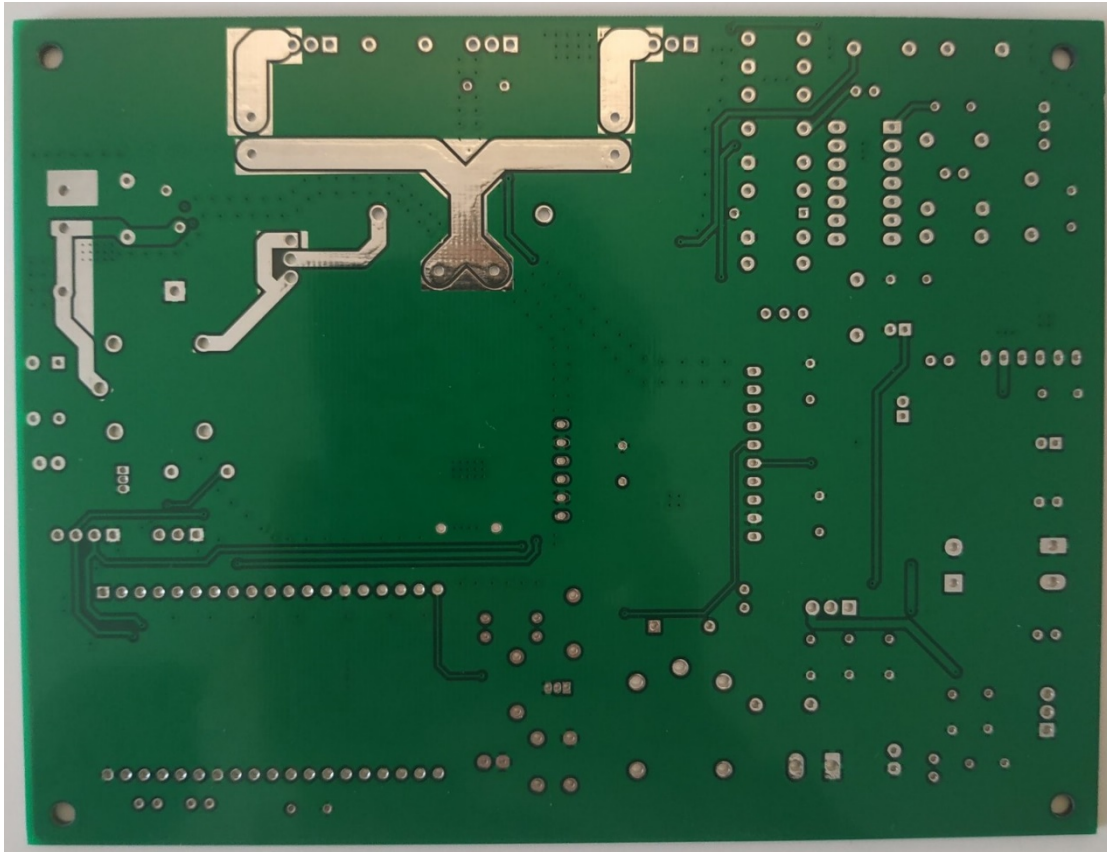
Η τυπωμένη πλακέτα PCB που προέκυψε έχει διαστάσεις 150mm x 115mm, βάρος χαλκού 1oz και το υπόστρωμά της απαρτίζεται από υλικό FR4. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 3.14: Τρισδιάστατη αναπαράσταση όψης τυπωμένης πλακέτας φορτίου



Σχήμα 3.15: Εμπρός όψη πλακέτας τοπικής συσκευής



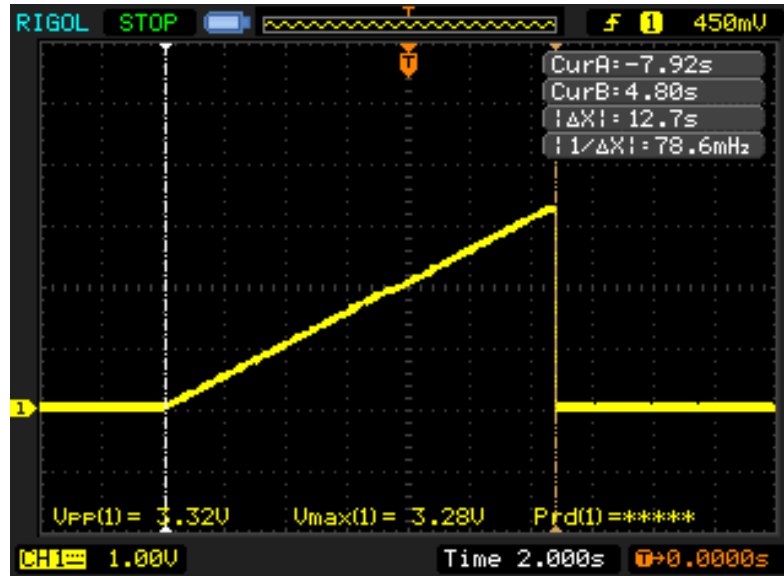
Σχήμα 3.16: Πίσω όψη πλακέτας τοπικής συσκευής

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως δόθηκε μεγάλη προσοχή στη σχεδίαση του πλάτους των αγωγών ισχύος της πλακέτας αυτής, ώστε οι τελευταίοι να έχουν την ικανότητα μεταφοράς των υψηλών ρευμάτων φορτίου με ελάχιστες απώλειες ισχύος και πτώσης τάσης στα άκρα τους, κάτι που θα διαστρέβλωνε τις μετρήσεις.

3.4 Ανάλυση σχηματικού διαγράμματος

3.4.1 Οδήγηση Mosfet φορτίου

Αρχικά μέσω του ψηφιακά ελεγχόμενου DAC (U2) παράγεται μία αναλογική τάση αναφοράς 0-3,3V η οποία είναι ευθέως ανάλογη του ζητούμενου ρεύματος που καλείται να βυθίσει το φορτίο και αντιστοιχεί σε εύρος 0-10A. Η τάση αυτή είναι διαθέσιμη προς μέτρηση στο σημείο δοκιμής DAC_Output (TP1) και μπορεί να διαβαστεί και ψηφιακά από το ίδιο το κύκλωμα στην αναλογική είσοδο AIN0 του ADC ADS1115 (U4) για αυτοδιαγνωστικούς λόγους. Στιγμιότυπο της μεταβολής της τάσης αυτής σε συνάρτηση με το χρόνο εκτέλεσης ενός κύκλου μετρήσεων εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.17: Μεταβολή της τάσης εξόδου DAC κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μετρήσεων

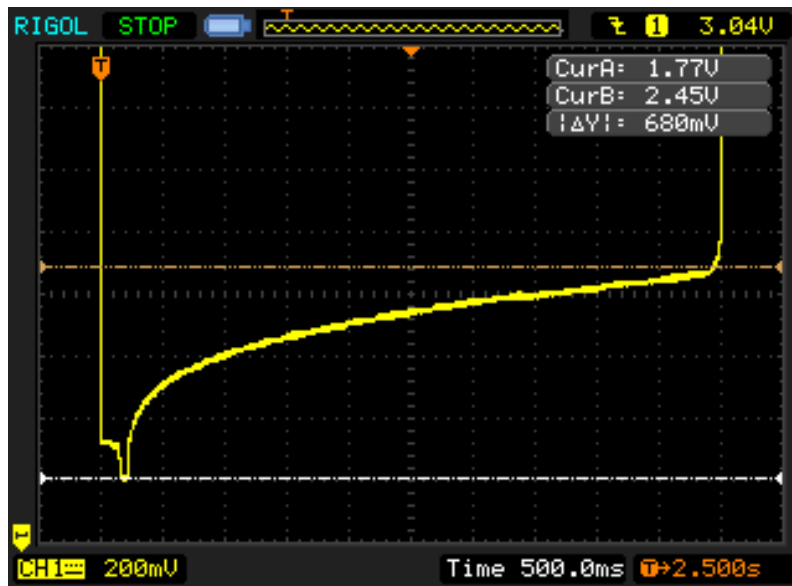
Στη συνέχεια η τάση αυτή οδηγείται στον τελεστικό ενισχυτή LM324 (U6B) [6] σε τοπολογία ακόλουθου τάσης για προσαρμογή της αντίστασης εξόδου της βαθμίδας και απομόνωση από το υπόλοιπο κύκλωμα και μετέπειτα μετατρέπεται από τον διαιρέτη τάσης (R2 – R3 – RV1) σε εύρος 0V-100mV σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$V_{TP2} = V_{TP1} \frac{R3+Rv1}{R2+R3+Rv1} \quad (3.5)$$

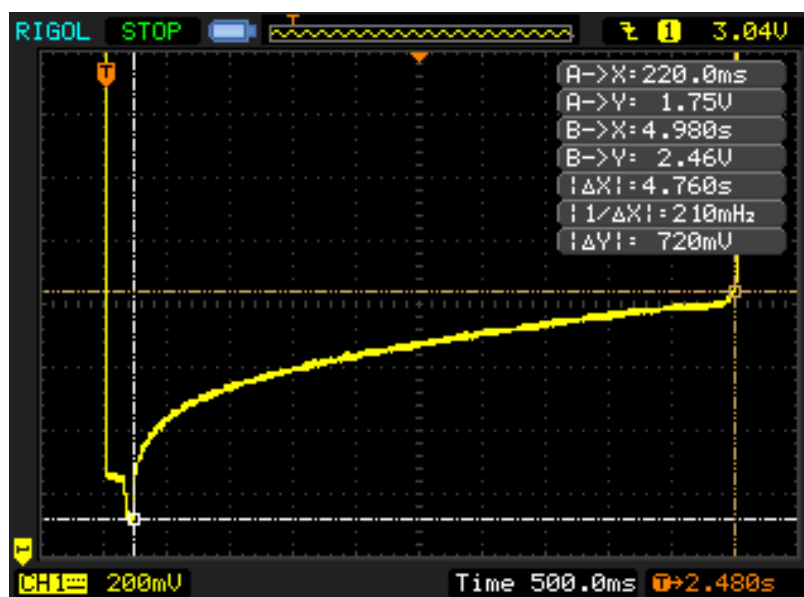
Όπου TP1 η τάση εξόδου του DAC και TP2 η τάση εξόδου του διαιρέτη.

Η τάση αυτή ακολούθως καταλήγει στη μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή LM324 (U6A). Η αναστρέφουσα είσοδος του τελεστικού ενισχυτή συνδέεται μέσω της αντίστασης προστασίας (R7) στο επάνω άκρο της αντίστασης Shunt των 10mΩ (R14) και η έξοδος του ενισχυτή αυτού οδηγεί τις πύλες των Mosfet του φορτίου, δημιουργώντας έτσι έναν κλειστό βρόγχο ανάδρασης ο οποίος κρατά το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο σταθερό. Η τάση οδήγησης πύλης των Mosfet προσφέρεται προς μέτρηση και στο σημείο ελέγχου Mosfet Drive Test (TP3) και μέσω του διαιρέτη τάσης R8- R9 που κάνει την κατάλληλη προσαρμογή εύρους, είναι διαθέσιμη προς μέτρηση και στην αναλογική είσοδο AIN2 του ADC (U4) για αυτοδιαγνωστικούς λόγους.

Ενδεικτικά η τάση πύλης των Mosfet κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μετρήσεων (σημείο TP3), εμφανίζεται στα παρακάτω σχήματα. Η πηγή που προσομοιώνει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε αυτή την περίπτωση, είναι ένα εργαστηριακό τροφοδοτικό, με ρύθμιση περιορισμού ρεύματος εξόδου στα 3A περίπου.



Σχήμα 3.18: Τάση V_{gs} των Mosfet φορτίου ως προς το χρόνο, 1° πείραμα



Σχήμα 3.19: Τάση V_{gs} των Mosfet φορτίου ως προς το χρόνο, 2° πείραμα

Από το σχήμα διακρίνεται ότι για πολύ μικρές αλλαγές στην τάση πύλης (V_{gs}) των Mosfet φορτίου, δημιουργείται σημαντική μεταβολή στο ρεύμα που αφήνουν να διαρρέυσει στο κυρίως κανάλι τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μια μεταβολή της τάξεως των 700mV περίπου στις πύλες των Mosfet, προκαλεί μεταβολή μεγέθους 3A στο ρεύμα φορτίου. Όταν το ρεύμα της πηγής πάψει να επαρκεί σε σχέση με τη ζήτηση σε ρεύμα από το ηλεκτρονικό φορτίο, η τάση πύλης των Mosfet παίρνει τη μέγιστη τιμή τροφοδοσίας από το βρόγχο ανάδρασης, το φορτίο παύει να δουλεύει στη γραμμική του περιοχή και συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα.

3.4.2 Μέτρηση τάσης

Η μέτρηση της τάσης του φορτίου επιτυγχάνεται μέσω του δικτύωματος διαιρέτη R19 – RV2 – R11 το οποίο αναλαμβάνει να μετατρέψει το εύρος τάσης εισόδου 0-103V σε 0-3,3V σύμφωνα με τη σχέση που ακολουθεί.

$$V_{AIN1} = V_{DUT} \frac{R_{11}}{R_{19}+R_{V2}+R_{11}} \Leftrightarrow V_{DUT} = V_{AIN1} \frac{R_{19}+R_{V2}+R_{11}}{R_{11}} =$$

$$= 3,3 \frac{10000+0+330}{330} = 103,3V \quad (3.6)$$

Όπου V_{AIN1} η τάση στην έξοδο του διαιρέτη και V_{DUT} η τάση στην είσοδο προς μέτρηση.

Η τάση εξόδου του διαιρέτη αφού περάσει από τον τελεστικό ενισχυτή LM324 (U6C) σε τοπολογία ακόλουθου τάσης για προσαρμογή της αντίστασης ανάμεσα στις βαθμίδες, καταλήγει στην αναλογική είσοδο AIN1 του ADC (U4) όπου και μετριέται.

3.4.3 Μέτρηση ρεύματος

Η μέτρηση του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο γίνεται μέσω του ολοκληρωμένου INA219 (U8), το οποίο χρησιμοποιεί την προαναφερθείσα πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης Shunt των 10mΩ (R14) [8]. Η μέτρηση αυτή είναι μέτρηση τεσσάρων ακροδεκτών, και χρησιμοποιεί διαφορετικούς αγωγούς για τη μέτρηση της τάσης αυτής, από αυτούς που διαρρέονται από το κύριο ρεύμα του φορτίου.

3.4.4 Μέτρηση θερμοκρασίας φορτίου

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του σταδίου ισχύος πραγματοποιείται από έναν αισθητήρα LM35DT (U1), ο οποίος βρίσκεται βιδωμένος επάνω στην ψύκτρα του φορτίου πολύ κοντά στα Mosfet του τελικού σταδίου ισχύος. ο αισθητήρας αυτός δίνει σαν έξοδο μια αναλογική τάση ανάλογη της μετρούμενης θερμοκρασίας, η οποία μετριέται στην αναλογική είσοδο AIN3 του ADC (U4) και μετατρέπεται από τον κώδικα του κεντρικού μικροελεγκτή σε τιμή βαθμών Κελσίου °C.

3.4.5 Τροφοδοσία

Για την θετική τροφοδοσία του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκαν οι γραμμικοί σταθεροποιητές τάσης LM7805 για τη γραμμή των +5V και LM1117(3.3) για τη γραμμή των +3,3V. Η επιλογή γραμμικών σταθεροποιητών σε αυτό το σημείο κρίθηκε αναγκαία, καθώς η ύπαρξη τυχών υψηλών θορύβων ή κυμάτωσης στην γραμμή τροφοδοσίας των +3,3V θα προξενούσε σοβαρά σφάλματα στις μετρήσεις, καθώς το ολοκληρωμένο κύκλωμα του DAC MCP4725 (U2) χρησιμοποιεί τον ακροδέκτη τροφοδοσίας του ως τάση αναφοράς. Εκτός από τους σταθεροποιητές θετικής τάσης τροφοδοσίας, χρησιμοποιήθηκε και το ολοκληρωμένο κύκλωμα ICL7660 (U9) για παραγωγή της γραμμής των -5V, η οποία χρησιμοποιείται αποκλειστικά από το στάδιο ισχύος. Η χρήση της περιγράφεται παρακάτω.

3.4.6 Διόρθωση αστάθειας σταδίου ισχύος

Λόγω της θερμοκρασιακής αστάθειας που παρατηρήθηκε ανάμεσα στα δύο Mosfet του τελικού σταδίου ισχύος της συσκευής, κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη μιας ενεργής διάταξης διαμοιρασμού του φορτίου στα Mosfet αυτά. Παρότι που η αντίσταση $R_{ds(on)}$ του καναλιού απορροής – πηγής (Drain – Source) των N-Channel Mosfet αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, κάτι το οποίο θα έπρεπε ισορροπεί το ρεύμα εκροής I_d στα δύο Mosfet, μετά από δοκιμές παρατηρήθηκε πως σε κάθε κύκλο μετρήσεων ένα από τα δύο Mosfet αυτά ζεσταινόταν αρκετά πιο γρήγορα από το άλλο, κάτι το οποίο δημιουργούσε μια κατάσταση θερμικής διαφυγής (Thermal Runaway), με κίνδυνο την καταστροφή του τελικού σταδίου ισχύος.

Figure 9. Normalized gate threshold voltage vs. temperature

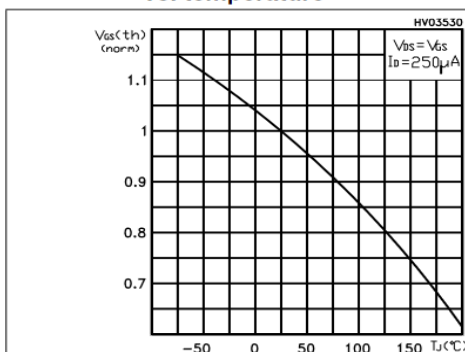
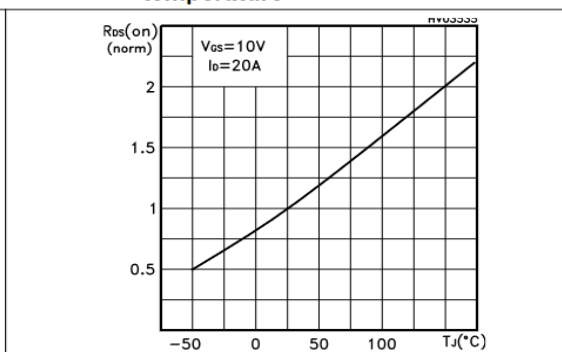
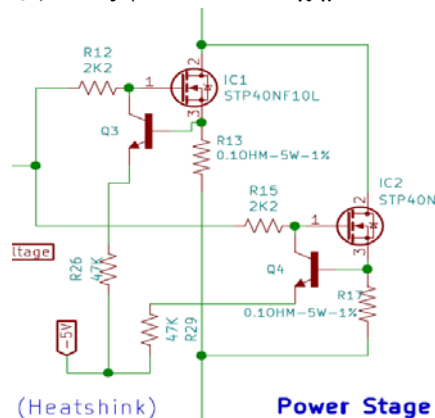


Figure 10. Normalized on resistance vs. temperature



Σχήμα 3.20: Μεταβολή $V_{gs(th)}$ και $R_{DS(on)}$ σε σχέση με τη θερμοκρασία (Πηγή: Datasheet κατασκευαστή)

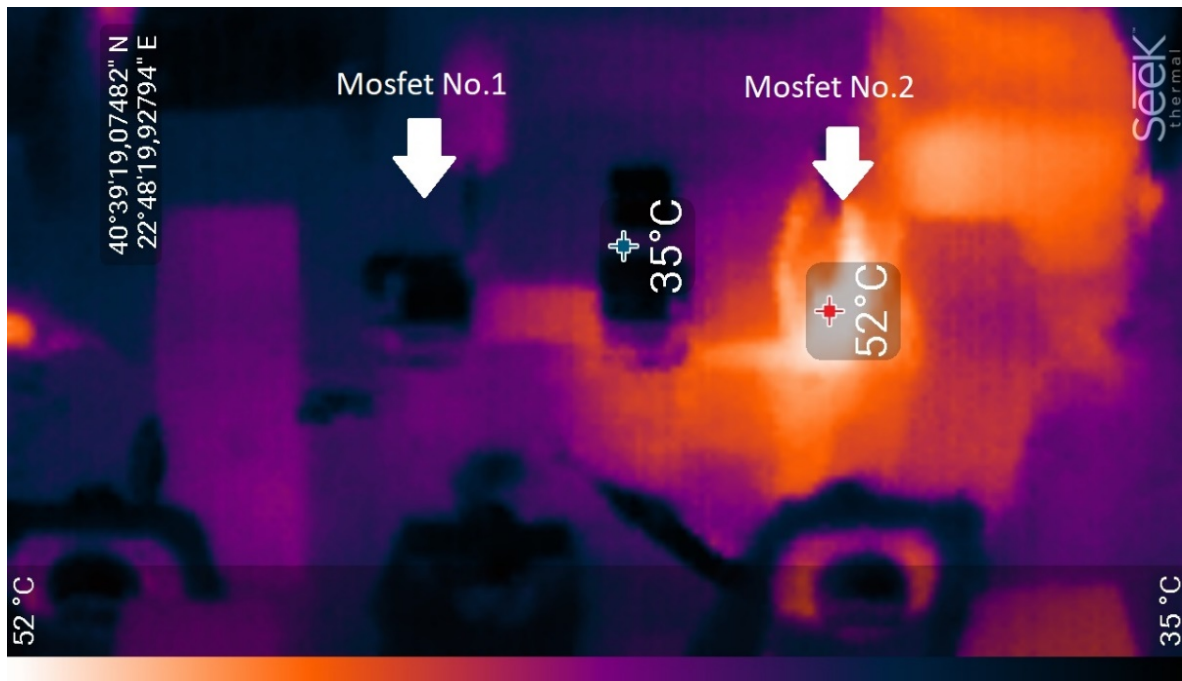
Μετά από μελέτη και μετρήσεις του σταδίου με θερμική κάμερα, διαπιστώθηκε πως ο αρνητικός θερμοκρασιακός συντελεστής της ελάχιστης τάσης πύλης $V_{gs(Th)}$ επηρέαζε την αντίσταση του καναλιού απορροής – πηγής (Drain – Source) διαφορετικά σε κάθε Mosfet, καθώς οι πύλες και των δύο οδηγούνται από κοινό τελεστικό ενισχυτή με ίδια τάση, πράγμα που προκαλούσε την προαναφερθείσα αστάθεια. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με τη διάταξη των τρανζίστορ 2N3904 (Q3 και Q4) όπως φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα.



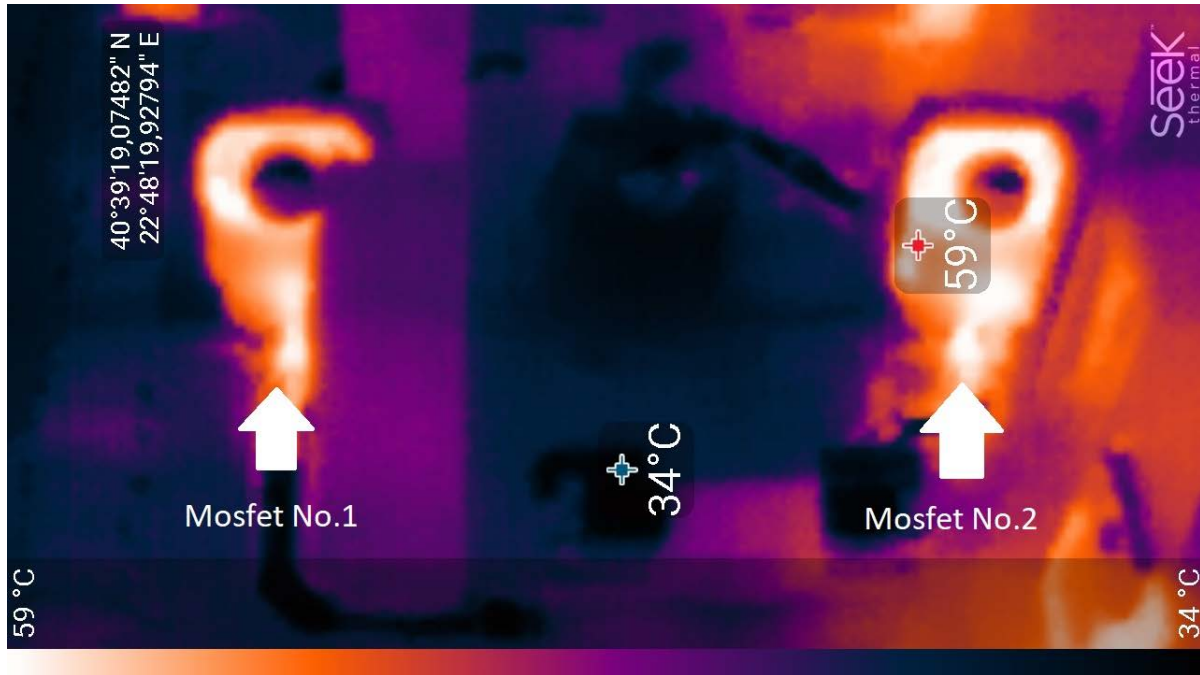
Σχήμα 3.21: Απόσπασμα σχηματικού κυκλώματος σταδίου ισχύος του φορτίου

Σε κάθε περίπτωση που κάποιο από τα 2 Mosfet ισχύος αρχίζει λόγω αύξησης της θερμοκρασίας να άγει περισσότερο από το άλλο, το ρεύμα εκροής του I_d αυξάνεται, κάτι που προκαλεί την αύξηση της πτώσης τάσης στις αντίστοιχες αντιστάσεις εκροής (R13 και R17).

Σε αυτή την περίπτωση το αντίστοιχο τρανζίστορ Q3 ή Q4 άγει περισσότερο από το άλλο, «τραβώντας» έτσι την τάση πύλης του εκάστοτε Mosfet προς την αρνητική τροφοδοσία των -5V μέσω των αντιστάσεων περιορισμού των 47KΩ (R26 και R29). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης πύλης (V_{gs}) του, και κατά συνέπεια τη μείωση του ρεύματος εκροής I_d , φέρνοντας έτσι το σύστημα σε ισορροπία. Οι αντιστάσεις R12 και R15 διασφαλίζουν πως η ενεργοποίηση ενός εκ των δύο τρανζίστορ σταθεροποίησης δεν θα επηρεάσει την τάση πύλης V_{gs} του άλλου Mosfet. Η λειτουργία του κυκλώματος σταθεροποίησης επαληθεύτηκε με χρήση θερμικής κάμερας, εικόνες της οποίας εμφανίζονται παρακάτω.



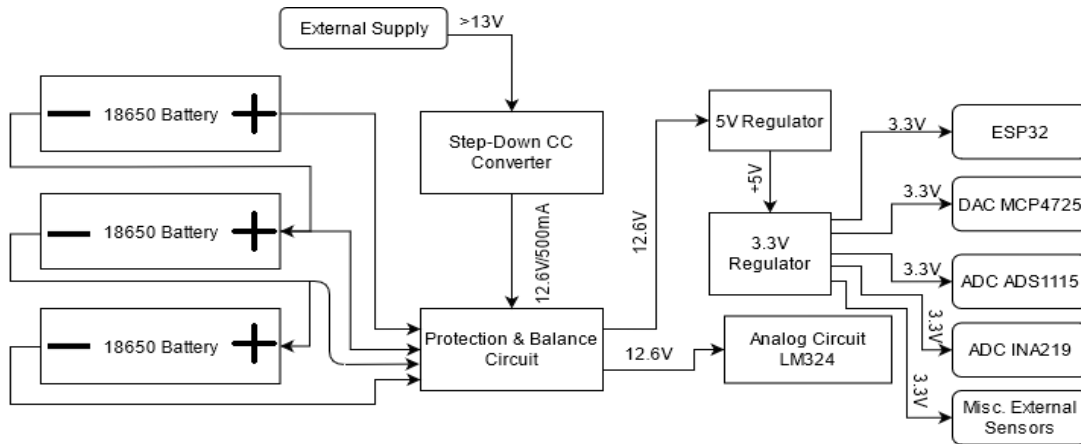
Σχήμα 3.22: Mosfet φορτίου πριν τη χρήση κυκλώματος εξισορρόπησης



Σχήμα 3.23: Mosfet φορτίου μετά τη χρήση κυκλώματος εξισορρόπησης

3.4.7 Κύκλωμα μπαταριών

Όπως προαναφέρθηκε, η τοπική συσκευή σχεδιάστηκε να είναι φορητή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία τριών μπαταριών τύπου ιόντων λιθίου 18650, με χωρητικότητα 2200mAh και ονομαστική τάση 3,7V. Οι μπαταρίες αυτές τοποθετήθηκαν σε σειρά ώστε να δώσουν την απαιτούμενη τάση των 12V για τη λειτουργία του αναλογικού μέρους του κυκλώματος (τροφοδοσία τελεστικού ενισχυτή LM324, τάση οδήγησης των πυλών των Mosfet). Λόγω της σε σειρά σύνδεσης των μπαταριών αυτών, κρίθηκε αναγκαία η χρήση ενός κυκλώματος εξισορρόπησης τους και προστασίας τους από συνθήκες υπερφόρτισης (Overcharge), υποφόρτισης (Undercharge) και βραχυκυκλώματος. Για τη φόρτισή τους η συσκευή παρέχει έναν εσωτερικό μετατροπέα υποβιβασμού σταθερού ρεύματος (DC-DC Constant Current Buck Converter) ρυθμισμένο για ρεύμα εξόδου 500mA και μέγιστη τάση εξόδου 12,6V. Επιτρέπεται έτσι η φόρτιση της συσκευής από οποιοδήποτε εξωτερικό DC τροφοδοτικό με τάση εξόδου >13V μέσω του κατάλληλου συνδέσμου που παρέχεται. Για τον έλεγχο της στάθμης των μπαταριών αυτών η συσκευή διαθέτει ειδικό όργανο στην πρόσοψή της. Το μπλόκ διάγραμμα του κυκλώματος τροφοδοσίας της τοπικής συσκευής εμφανίζεται παρακάτω.



Σχήμα 3.24: Μπλοκ διάγραμμα τροφοδοσίας τοπικής συσκευής

3.4.8 Προστασίες υλικού

Όσο αφορά τα κυκλώματα προστασίας, εκτός από τα όρια προστασίας από υπέρταση, υπερένταση, υπέρβαση του μέγιστου ορίου ισχύος και υπερθέρμανσης που ορίζονται μέσω κώδικα στο μικροελεγκτή ESP32, στο σύστημα παρέχεται και προστασία από ανάποδη πολικότητα και κρουστικές υπερτάσεις στην είσοδο, η οποία υλοποιείται σε επίπεδο υλικού.

Αρχικά στην είσοδο της συσκευής, και πολύ κοντά στους ακροδέκτες σύνδεσης του προς μέτρηση φωτοβολταϊκού πλαισίου, χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη από ένα βαρίστορ (RV3) καθώς και μία αμφίδρομη διάοδο TVS (D4). Το βαρίστορ που χρησιμοποιήθηκε είναι το ERZ-V07D121 της Panasonic [11], το οποίο αρχίζει να άγει σε τάση 120V. Το βαρίστορ αυτό μαζί με την TVS διάοδο 1.5KE100CA-TP της εταιρίας Micro Commercial Components [10], το οποίο έχει τη δυνατότητα να απορροφά στιγμιαίες κρουστικές υπερτάσεις οι οποίες ξεπερνούν τα 95V, αποτελούν την προστασία της εισόδου από υπερτάσεις σε επίπεδο υλικού.

Το ρεύμα στην είσοδο της συσκευής έπειτα περνά από τον ηλεκτρονόμο γαλβανικής αποκοπής φορτίου. Ο ηλεκτρονόμος (K1) που χρησιμοποιήθηκε είναι ο G5LE-14-ASI DC12 της Omron Electronics [12] και παρέχει τη δυνατότητα διέλευσης ρεύματος 10A από τις επαφές του. Παρόλα αυτά λόγω της ηλεκτρομηχανικής φύσης του εξαρτήματος αυτού και για επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των επαφών του, εντολές για αλλαγή στην κατάσταση του δίνονται από τον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 μόνο όταν τα Mosfet του φορτίου βρίσκονται σε αποκοπή, υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Αμέσως μετά τον ηλεκτρονόμο, το ρεύμα της εισόδου διέρχεται από τη διπλή διάοδο (D1) MBR41H100CTG της OnSemi [9]. Η διάοδος αυτή είναι τύπου schottky, αντέχει ρεύμα ορθής πόλωσης 20A, τάση ανάποδης πόλωσης 100V και αποτελεί την προστασία ανάποδης πολικότητας. Τέλος, πριν το ρεύμα εισέλθει στο φορτίο, περνά από την υπερταχεία ασφάλεια τήξεως (F1) των 10A. Η ασφάλεια αυτή παρέχεται ως το τελευταίο μέτρο προστασίας από υπερένταση στην περίπτωση καταστροφής των Mosfet ισχύος, καθώς η συνήθης κατάσταση σφάλματος - καταστροφής τέτοιου τύπου Mosfet είναι συνήθως με βραχυκυκλωμένους τους ακροδέκτες απορροής – πηγής (Drain – Source short), κάτι το οποίο δύναται να προκαλέσει τη διέλευση μεγάλων ρευμάτων σφάλματος από τους αγωγούς της πλακέτας.

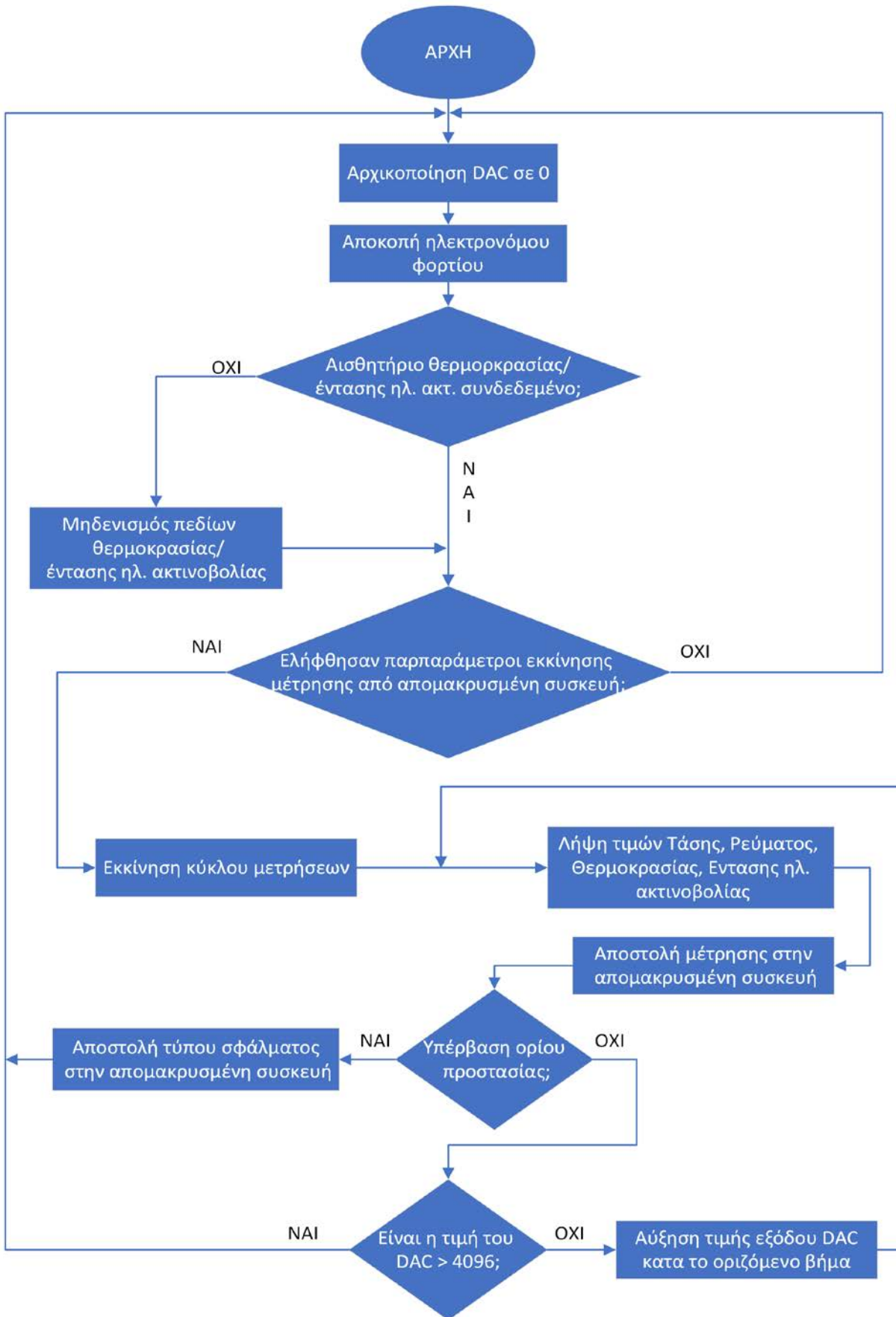
3.5 Λειτουργία του κυκλώματος

Κατά την εκκίνηση της συσκευής, ο κεντρικός μικροελεγκτής ESP32 ελέγχει για την ύπαρξη ή όχι σύνδεσης με την εξωτερική περιφερειακή συσκευή που περιέχει τα αισθητήρια μέτρησης θερμοκρασίας και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να ληφθούν εάν είναι συνδεδεμένα υπόψιν στις μετρήσεις και θέτει τον ηλεκτρονόμο γαλβανικής αποκοπής του φορτίου K1 στη θέση αποκοπής (OFF). Έπειτα ελέγχεται εάν η τάση στην είσοδο της συσκευής και η θερμοκρασία της ψύκτρας του φορτίου είναι εντός επιτρεπτών ορίων. Εάν αυτές οι τιμές κυμαίνονται εντός των ορίων αυτών, επιτρέπεται η εκκίνηση νέου κύκλου μετρήσεων από τη συσκευή. Σε διαφορετική περίπτωση ενεργοποιείται ο αντίστοιχος συναγερμός και η λειτουργία της συσκευής σταματά αυτόματα.

Αμέσως μετά η συσκευή τίθεται σε κατάσταση αναμονής αναμένοντας τη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας από την απομακρυσμένη μονάδα διεπαφής χρήστη. Ο χρήστης ορίζει τις παραμέτρους εκτέλεσης του κύκλου μετρήσεων, και η διαδικασία μέτρησης ξεκινά. Ο ηλεκτρονόμος αποκοπής φορτίου ενεργοποιείται συνδέοντας έτσι το τεχνητό φορτίο με την προς μέτρηση συσκευή, η τάση εξόδου του DAC ορίζεται σε 0V, κάτι που κάνει τα Mosfet ισχύος να βρίσκονται σε πλήρη αποκοπή και λαμβάνεται η μέτρηση τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Αμέσως μετά η τάση εξόδου του DAC αυξάνεται κατά το προκαθορισμένο από το χρήστη βήμα, κάνοντας έτσι τα Mosfet του φορτίου να αρχίσουν να άγουν στη γραμμική τους περιοχή και ταυτόχρονα λαμβάνονται από τους ADC διαδοχικά οι αντίστοιχες τιμές τάσεως και ρεύματος του φορτίου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου η παραγόμενη τάση στην έξοδο του DAC φτάσει τα 3,3V, το οποίο αντιστοιχεί σε ρεύμα 10A στο φορτίο, όπου και ο κύκλος μετρήσεων τελειώνει, και ο ηλεκτρονόμος αποκοπής φορτίου επαναφέρεται στη θέση αποκοπής (OFF).

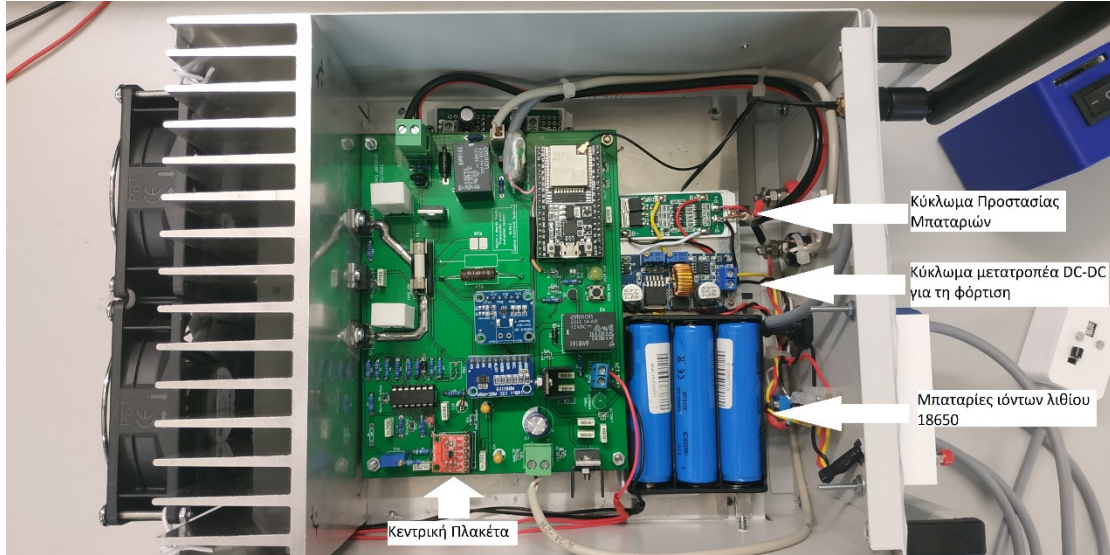
Η μέγιστη τιμή ρεύματος που καταγράφηκε από το σύστημα, είναι και η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} του φωτοβολταϊκού. Σε κάθε περίπτωση, εάν υπάρξει κατάσταση υπέρτασης στην είσοδο (τάση $>80V$), υπερέντασης στο φορτίο (ρεύμα $>8A$) ή υπερθέρμανσης του σταδίου ισχύος του φορτίου (θερμοκρασία $>80^{\circ}C$), η διαδικασία λήψης μετρήσεων σταματά αυτόματα με το μικροελεγκτή να ορίζει την τάση εξόδου στο DAC στα 0V, τον ηλεκτρονόμο αποκοπής φορτίου να επιστρέφει στη θέση αποκοπής (OFF) και το αντίστοιχο μήνυμα να εμφανίζεται στην απομακρυσμένη συσκευή διεπαφής χρήστη, πληροφωρώντας τον για την κατάσταση σφάλματος. Μετά το πέρας των μετρήσεων, η συσκευή επιστρέφει και μεμονωμένα την τιμή τάσης, ένταση ρεύματος και ισχύος του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) που μετρήθηκε.

Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας αυτού του συστήματος, εμφανίζεται στην ακόλουθη εικόνα.

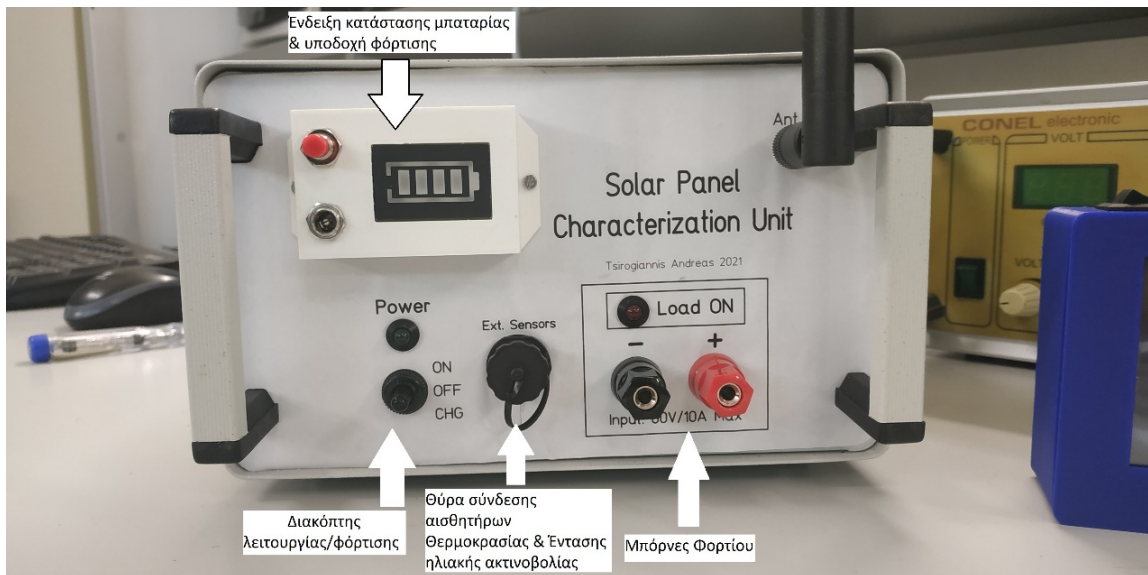


Σχήμα 3.25: Διάγραμμα ροής κώδικα τοπικής συσκευής

Το τελικό αποτέλεσμα της κατασκευής της τοπικής συσκευής εμφανίζεται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 3.26: Εσωτερικό τοπικής συσκευής



Σχήμα 3.27: Πρόσωση της τοπικής συσκευής

Κεφάλαιο 4ο: Απομακρυσμένη συσκευή διεπαφής χρήστη

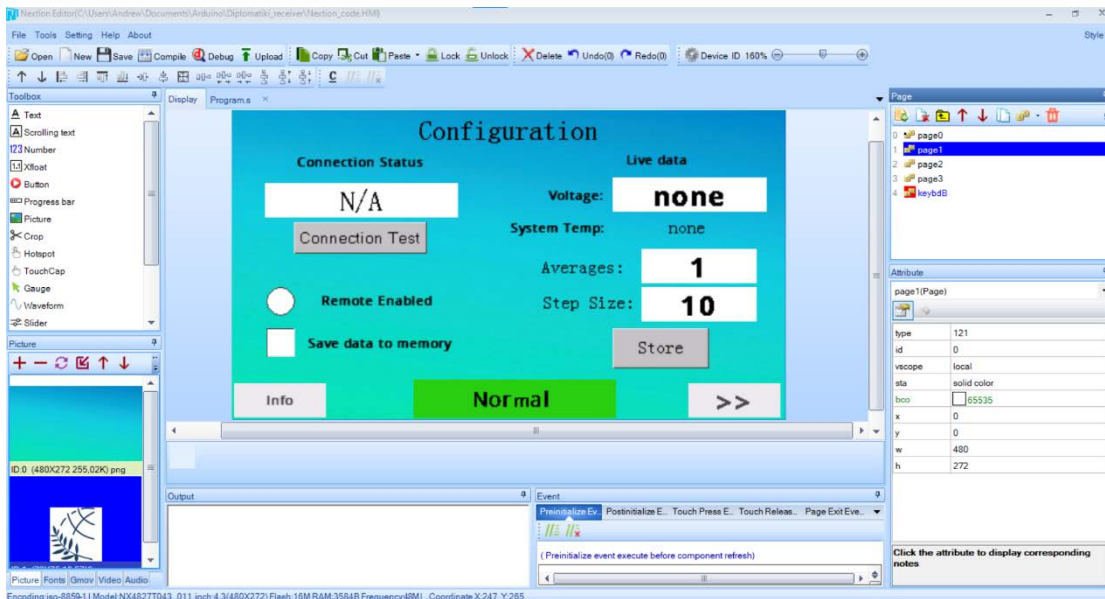
Σκοπός αυτής της συσκευής είναι η ασύρματη λήψη των μετρήσεων από το ηλεκτρονικό φορτίο και η αποθήκευση αυτών σε αφαιρούμενο μέσο αποθήκευσης, καθώς και ο απομακρυσμένος χειρισμός ολόκληρου του συστήματος από το χρήστη μέσα από ένα φιλικό προς αυτόν γραφικό περιβάλλον με ταυτόχρονη ζωντανή απεικόνιση της εξέλιξης των μετρήσεων. Η συσκευή αυτή διαθέτει γι' αυτό το λόγο μία έγχρωμη οθόνη αφής 4,3 ιντσών η οποία αποτελεί τη διεπαφή χρήστη, έναν κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 και ένα module ανάγνωσης και εγγραφής καρτών μνήμης SD. Επίσης διαθέτει ρολόι πραγματικού χρόνου για την επισήμανση των παραγόμενων αρχείων με τα στοιχεία ημέρας και ώρας στην οποία λήφθηκαν, καθώς και το ανάλογο κύκλωμα τροφοδοσίας με μπαταρία ιόντων λιθίου και κύκλωμα φόρτισης αυτής. Το κούτιο της συσκευής σχεδιάστηκε σε σχεδιαστικό πρόγραμμα 3D modeling και εκτυπώθηκε με τη βοήθεια 3D εκτυπωτή.

4.1 Εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν

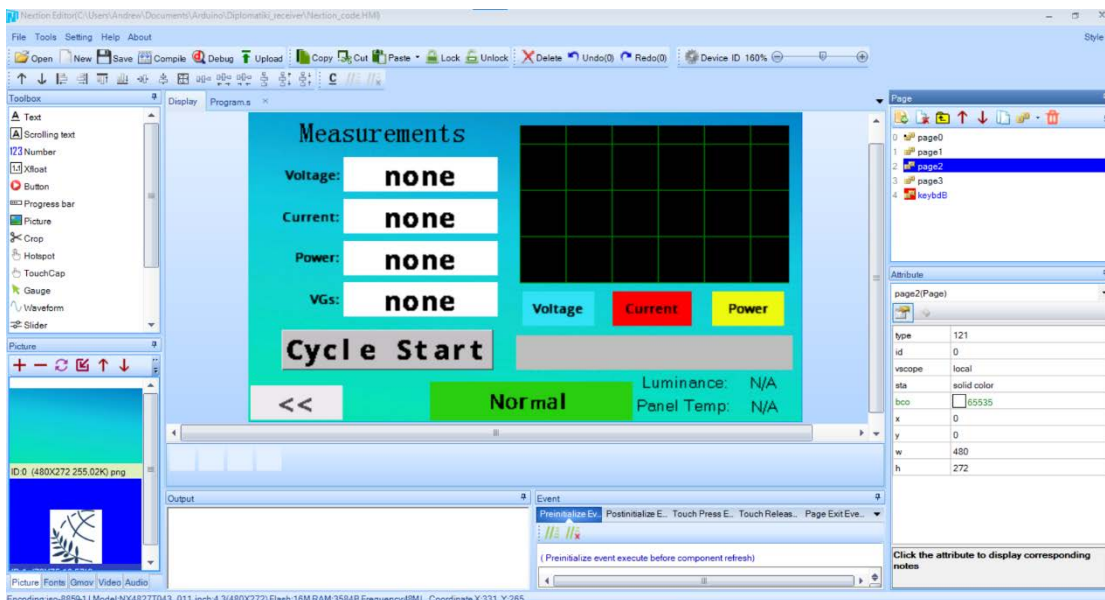
Αναλυτικότερα τα μέρη που απαρτίζουν τη συσκευή αυτή με τις δυνατότητές τους φαίνονται παρακάτω.

4.1.1 Οθόνη γραφικών

Η οθόνη που επελέγη για την υλοποίηση της διεπαφής χρήστη είναι η NX4827T043 της εταιρίας Nextion HMI Solutions. Η οθόνη αυτή είναι έγχρωμη αφής τεχνολογίας LCD, έχει μέγεθος 4,3 ιντσών, ανάλυση 480x272 pixels και αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση για χρήση σε συστήματα διεπαφής χρήστη HMI, καθώς προσφέρει ενσωματωμένο ελεγκτή και όλα απαραίτητα κυκλώματα οδήγησής της, κάτι που απαλλάσσει τον κεντρικό μικροελεγκτή της κατασκευής από το αρκετά δύσκολο έργο της διαχείρισης γραφικών στοιχείων. Όλα τα στοιχεία αυτά δημιουργούνται σε Η/Υ στο αντίστοιχο σχεδιαστικό πρόγραμμα Nextion Editor που προσφέρει η εταιρία και αποθηκεύονται στη συνέχεια στην εσωτερική μνήμη γραφικών της οθόνης. Η επικοινωνία της με τον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 της συσκευής γίνεται μέσω ενός σειριακού διαύλου UART, με χρήση του κατάλληλου κώδικα και στις δύο μεριές της ζεύξης και τροφοδοτείται από τάση +5V. Παρακάτω παρουσιάζονται στιγμιότυπα από το σχεδιασμό του γραφικού περιβάλλοντος στο Nextion Editor.



Σχήμα 4.1: Στιγμιότυπο οθόνης ρυθμίσεων από Nextion Editor



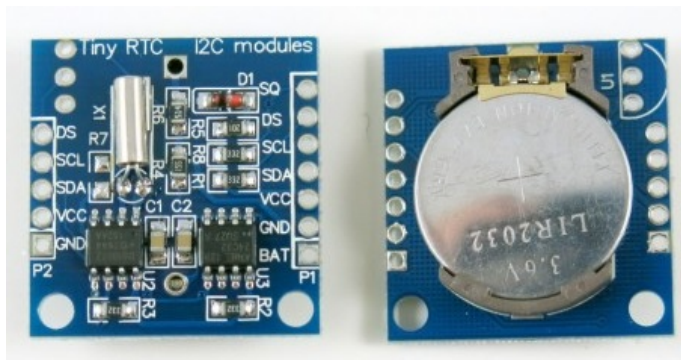
Σχήμα 4.2: Στιγμιότυπο οθόνης μετρήσεων από Nextion Editor

4.1.2 Κεντρικός μικροελεγκτής ESP32

Ο κεντρικός μικροελεγκτής του συστήματος αυτού είναι ο ESP32, του οποίου οι δυνατότητες περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην παρούσα κατασκευή χρησιμοποιείται η διεπαφή στα 2,4GHz για την ασύρματη επικοινωνία με την τοπική συσκευή του ηλεκτρονικού φορτίου μέσω του πρωτοκόλλου ESPNow της Espressif, καθώς και τα πρωτόκολλα SPI για ανάγνωση και εγγραφή στην αφαιρούμενη κάρτα SD και I²C για την ανάγνωση της τρέχουσας ημερομηνίας και ώρας από το ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC). Τέλος, χρησιμοποιείται και η σειριακή διεπαφή UART για επικοινωνία με την οθόνη του συστήματος, όπως αναφέρεται παραπάνω.

4.1.3 Ρολόι πραγματικού χρόνου RTC

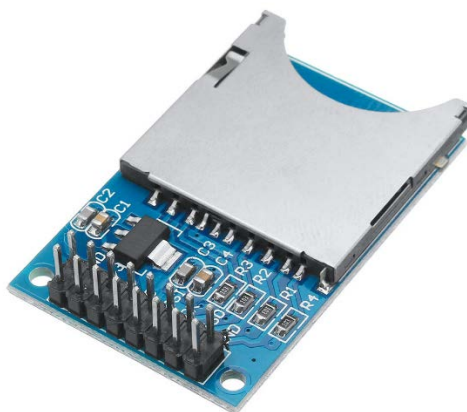
Το module αυτό βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα DS1307 της Maxim και είναι υπεύθυνο στο να κρατά την ακριβή τρέχουσα ώρα και ημερομηνία όταν η συσκευή απομακρυσμένης διεπαφής χρήστη είναι απενεργοποιημένη. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωματωμένη μπαταρία ιόντων λιθίου CR2032 που διαθέτει, κάτι το οποίο επιτρέπει την αδιάκοπη λειτουργία του εσωτερικού του ρολογιού, ακόμα και στις καταστάσεις έλλειψης της κύριας τροφοδοσίας των 3,3V του συστήματος. Η επικοινωνία του module αυτού με τον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου I²C.



Σχήμα 4.3: Πλακέτα ρολογιού πραγματικού χρόνου

4.1.4 Πλακέτα ανάγνωσης και εγγραφής αφαιρούμενου αποθηκευτικού μέσου SD

Η πλακέτα αυτή προσφέρει μια εύκολη και αξιόπιστη λύση για την ανάγνωση και εγγραφή σε αφαιρούμενα αποθηκευτικά μέσα, καθώς είναι εξοπλισμένη με την αντίστοιχη υποδοχή για κάρτες SD και φέρει κατάλληλο τοπικό σταθεροποιητή τάσης στα 3,3V για την τροφοδοσία της κάρτας, καθώς και κυκλώματα απόζευξης (decoupling) για τη διασφάλιση της σταθερότητας του συστήματος κατά τη διαδικασία ανάγνωσης και εγγραφής, μιας και οι κάρτες μνήμης αυτού του τύπου είναι αρκετά ευαίσθητες σε αυξομειώσεις της τάσης τροφοδοσίας τους. Η επικοινωνία της πλακέτας αυτής με τον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32 γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου SPI, το οποίο τα αποθηκευτικά μέσα αυτού του τύπου υποστηρίζουν από κατασκευής.



Σχήμα 4.4: Πλακέτα ανάγνωσης/εγγραφής αφαιρούμενου αποθηκευτικού μέσου SD

4.1.5 Τροφοδοσία

Η τροφοδοσία της απομακρυσμένης διεπαφής χρήστη γίνεται με τη χρήση μιας εσωτερικής επαναφορτιζόμενης μπαταρίας ιόντων λιθίου τύπου 18650 με ονομαστική τάση 3,7V και χωρητικότητα 2200mAh, κάτι που δίνει μια αυτονομία στη λειτουργία της συσκευής περίπου μια ώρα. Λόγω της ανάγκης για ύπαρξη γραμμής τροφοδοσίας +5V από το σύστημα για τη λειτουργία της οθόνης, χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης (DC-DC step-up converter) ο οποίος βασίζεται στο ολοκληρωμένο MT3608 της Arosemi. Όλα τα υπόλοιπα περιφερειακά μέρη της συσκευής τροφοδοτούνται από τον ενσωματωμένο γραμμικό σταθεροποιητή τάσης του module του κεντρικού μικροελεγκτή ESP32 με 3,3V. Για τη φόρτιση της μπαταρίας, καθώς και για την προστασία της από καταστάσεις υπερφόρτισης (overcharge), υποφόρτισης (undercharge) ή βραχυκυκλώματος (short circuit), χρησιμοποιήθηκε ένα module βασισμένο στα ολοκληρωμένα TP4056 για τη φόρτιση και DW01 για την προστασία.

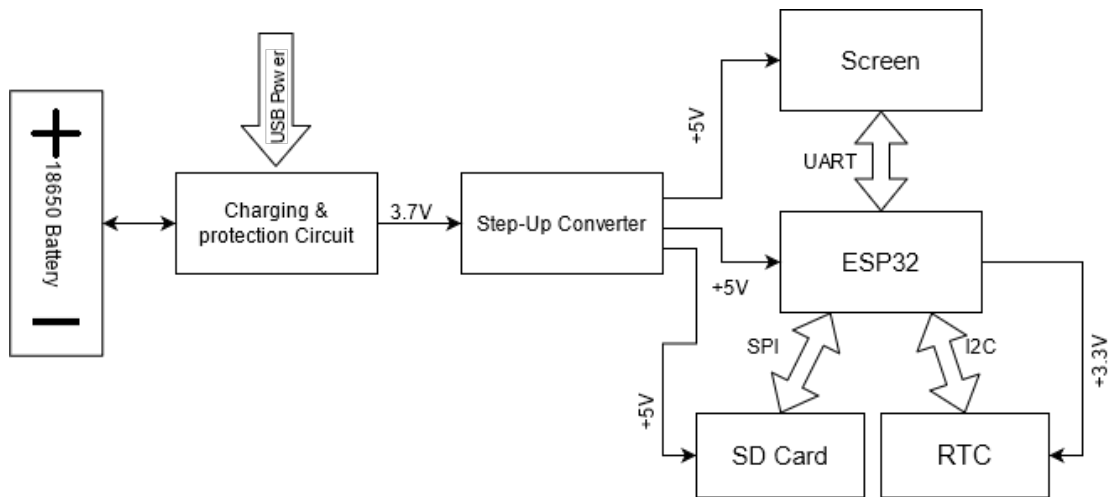


Σχήμα 4.5: DC-DC Μετατροπέας ανύψωσης τάσης



Σχήμα 4.6: Πλακέτα φόρτισης και προστασίας μπαταρίας ιόντων λιθίου

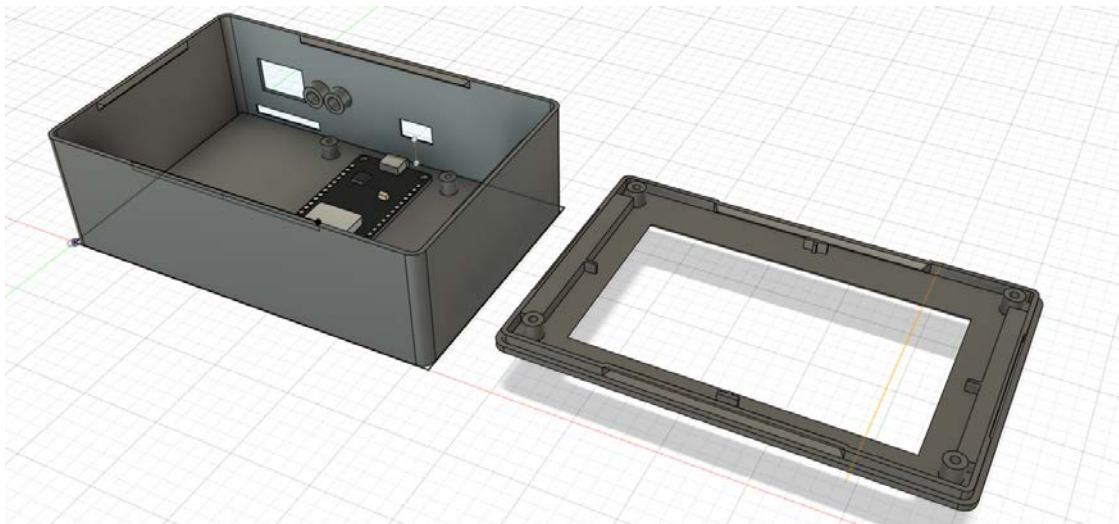
Όλα τα παραπάνω υποσυστήματα συνδέθηκαν μεταξύ τους σε πλακέτα γενική χρήσης (proto-board), και αφότου επαληθεύτηκε η σωστή λειτουργία του κυκλώματος, σχεδιάστηκε το κατάλληλο κωτίο για την τοποθέτηση αυτών.



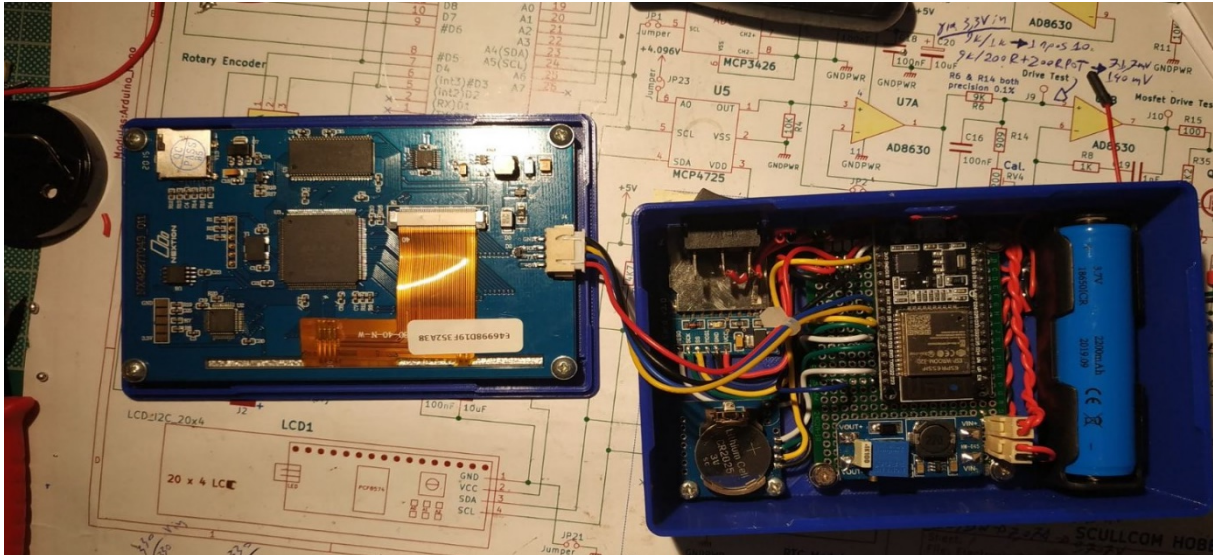
Σχήμα 4.7: Μπλοκ διάγραμμα τροφοδοσίας απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη

4.1.6 Κυτίο κατασκευής

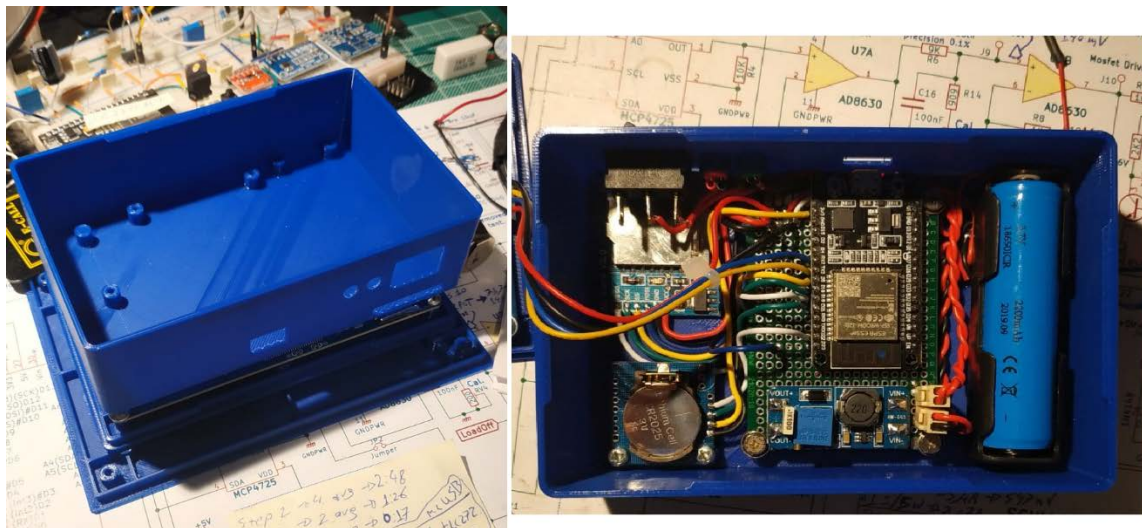
Το κυτίο της απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη σχεδιάστηκε από την αρχή στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Fusion360 της Autodesk, έτσι ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει την οθόνη και όλα τα προηγούμενα συστήματα με αποδοτική χρήση του προσφερόμενου χώρου, κρατώντας το σύστημα μικρό σε διαστάσεις, εύκολα φορητό και εργονομικό στη χρήση. Το καπάκι του κυτίου αυτού είναι σε θέση να αποσπάται μαζί με την οθόνη δίνοντας έτσι εύκολη πρόσβαση στο σύστημα για διορθώσεις. Το σχέδιο αυτό στη συνέχεια εκτυπώθηκε με πλαστικό υλικό PLA με τη βοήθεια τρισδιάστατου (3D) εκτυπωτή. Εικόνες από τη διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 4.8: CAD Μοντέλο κυτίου απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη



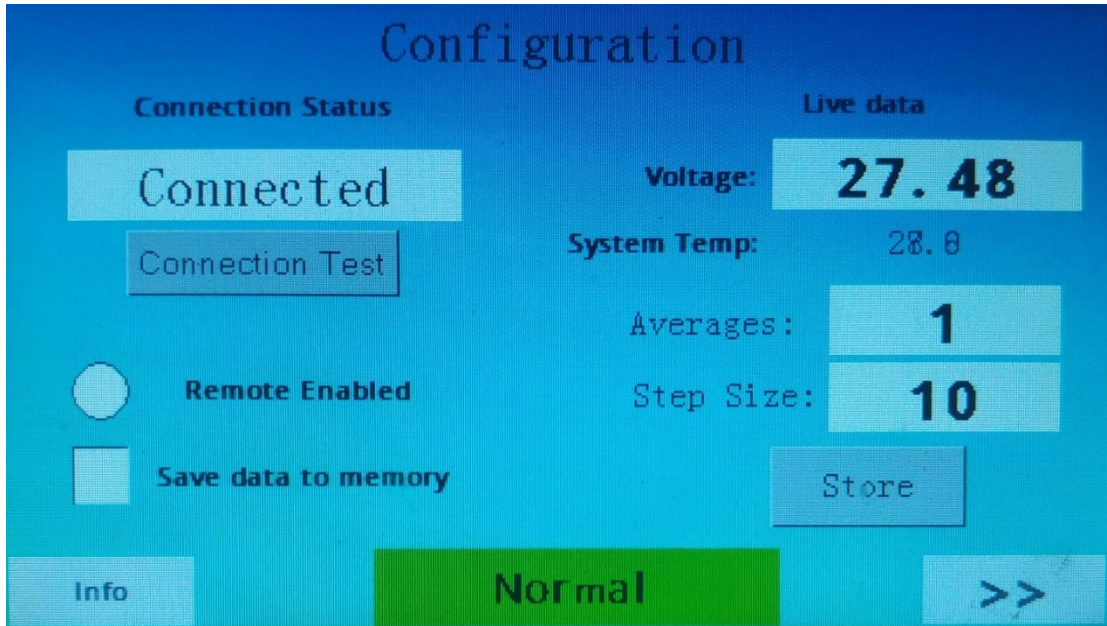
Σχήμα 4.9: Στιγμιότυπο της ολοκληρωμένης απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη



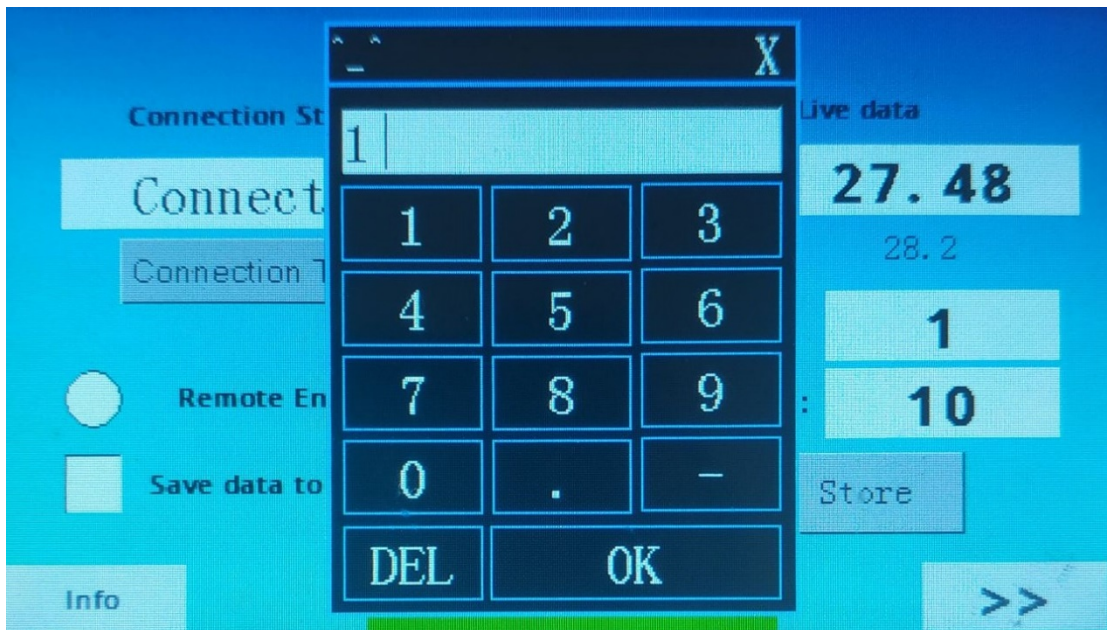
Σχήμα 4.10: Στιγμιότυπο κατασκευής κτιού απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη

4.2 Λειτουργία της κατασκευής

Κατά την εκκίνηση της απομακρυσμένης συσκευής, αρχικά εμφανίζεται στην οθόνη ο τίτλος της παρούσας εργασίας και έπειτα η συσκευή εισέρχεται στο μενού “Configuration” ρύθμισης παραμέτρων των μετρήσεων. Σε αυτό το μενού ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ελέγξει την κατάσταση της ασύρματης σύνδεσης της απομακρυσμένης συσκευής με την τοπική μονάδα μετρήσεων, να ορίσει το βήμα (step) του DAC, καθώς και τον αριθμό των δειγμάτων των οποίων η μέση τιμή θα αποτελεί το κάθε σημείο μέτρησης. Κατά αυτό τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να μεταβάλλει την ισορροπία ταχύτητας / αναλυτικής ικανότητας κατά τον κύκλο μετρήσεων. Σε περιπτώσεις που η ισχύς του συνδεδεμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι μικρή, υπάρχει η δυνατότητα λήψης περισσότερων δειγμάτων και η εξαγωγή μέσου όρου από πολλαπλές μετρήσεις για το κάθε δείγμα, κάτι που παράγει ένα αρκετά μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην οθόνη αυτή επίσης υπάρχει ζωντανή ένδειξη της τάσης εισόδου της τοπικής συσκευής, καθώς και εικονικός διακόπτης που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την αποθήκευση των παραγόμενων μετρήσεων στο αφαιρούμενο αποθηκευτικό μέσο.



Σχήμα 4.11: Οθόνη ρύθμισης παραμέτρων απομακρυσμένης συσκευής

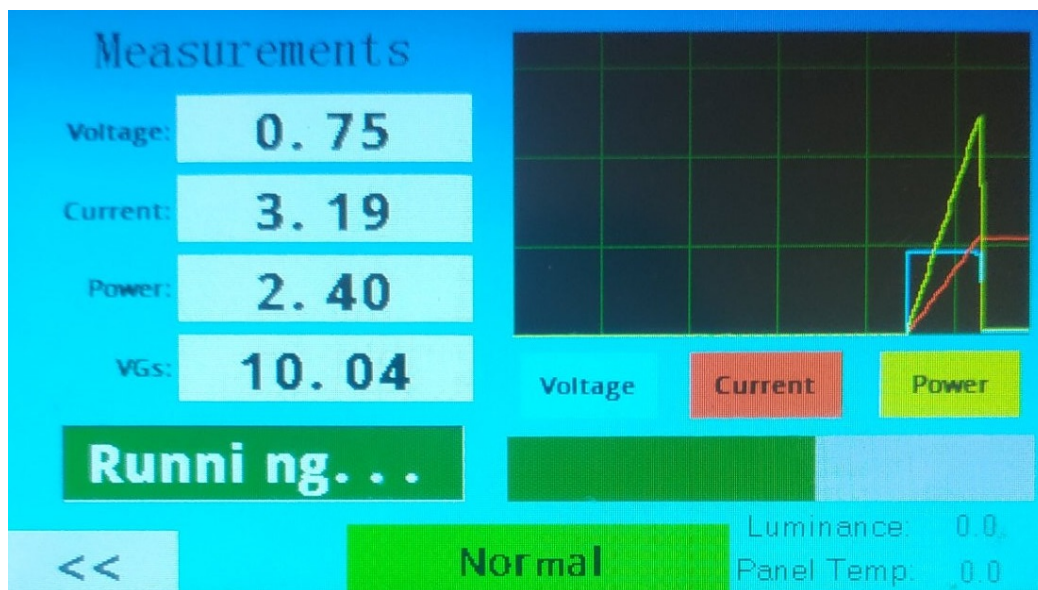


Σχήμα 4.12: Εικονικό πληκτρολόγιο ρύθμισης παραμέτρων απομακρυσμένης συσκευής

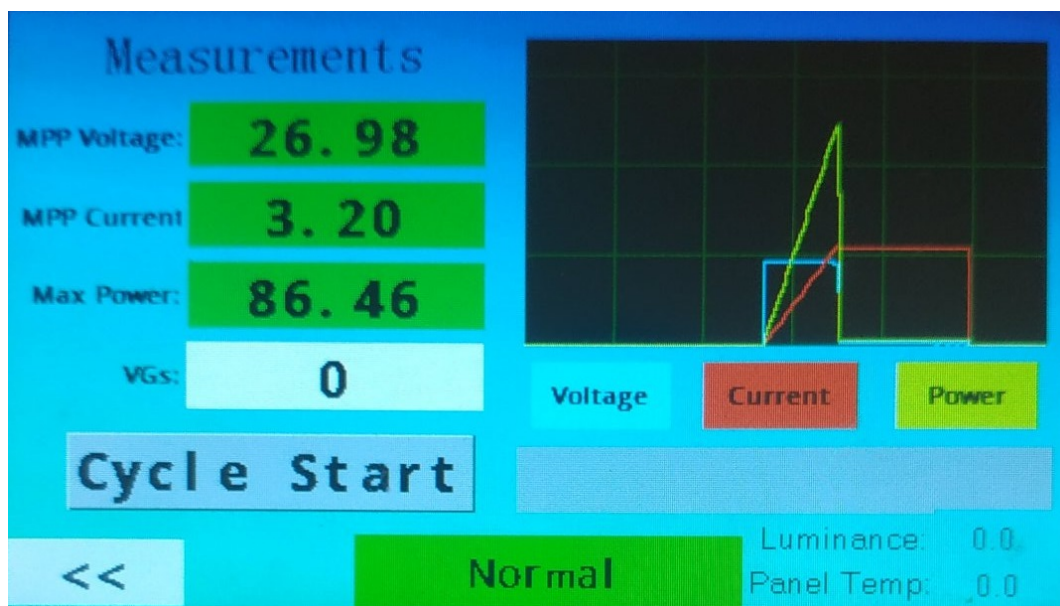
Αφότου οριστούν οι παράμετροι, γίνεται αποστολή τους στην τοπική συσκευή με τη χρήση του εικονικού πλήκτρου “Store”, και στη συνέχεια παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να πλοηγηθεί στην επόμενη οθόνη του μενού, η οποία αφορά την εκκίνηση του κύκλου μετρήσεων. Στην οθόνη αυτή, απεικονίζονται σε πραγματικό χρόνο η τάση και το ρεύμα του φορτίου, η στιγμιαία ισχύς, η τάση πύλης (V_{gs}) των Mosfet του φορτίου, καθώς και οι τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ακόμα, οι τιμές τάσης, ρεύματος και ισχύος απεικονίζονται στο αντίστοιχο κυλιόμενο γράφημα, για γρήγορη εξαγωγή συμπερασμάτων και ανάλυση προβλημάτων στο συνδεδεμένο στη συσκευή φωτοβολταϊκό

πλαίσιο. Τέλος, η οθόνη αυτή περιέχει το εικονικό πλήκτρο εκκίνησης/ διακοπής του κύκλου μετρήσεων. Στο κάτω μέρος όλων των οθονών μενού εμφανίζεται η κατάσταση της συσκευής. Αυτή μπορεί να εμφανίζεται με πράσινο χρώμα με την ένδειξη “Normal” όταν η συσκευή είναι εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας ή με κόκκινο χρώμα για τις καταστάσεις συναγερμού με τις ενδείξεις “Overvoltage”, “Overcurrent”, “Overpower” ή “Overtemp” για τις αντίστοιχες καταστάσεις σφάλματος από υπέρταση, υπερένταση, υπέρβαση του μέγιστου ορίου ισχύος ή υπερθέρμανση αντίστοιχα. Με την πίεση του πλήκτρου αυτού γίνεται καθαρισμός του συναγερμού και η συσκευή επανέρχεται σε κανονική λειτουργία.

Κατά το τέλος κάθε κύκλου μετρήσεων, τα πεδία απεικόνισης τάσης, έντασης και ισχύος, εμφανίζουν τις τιμές που προέκυψαν για το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) του κύκλου αυτού.



Σχήμα 4.13: Οθόνη εκτέλεσης μετρήσεων απομακρυσμένης συσκευής - ζωντανή απεικόνιση δεδομένων



Σχήμα 4.14: Οθόνη εκτέλεσης μετρήσεων απομακρυσμένης συσκευής - απεικόνιση δεδομένων μέγιστης ισχύος

Στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει την αποθήκευση αποτελεσμάτων των μετρήσεων στο αφαιρούμενο αποθηκευτικό μέσο (Micro SD Card), τα αποτελέσματα αυτά στο τέλος κάθε έγκυρου κύκλου μετρήσεων αποθηκεύονται σε μορφή αρχείου .csv με το όνομα του αρχείου αυτού να είναι η ημερομηνία και η ώρα της λήψης της μέτρησης. Η κάθε γραμμή του, αφορά ένα σημείο μέτρησης και αποτελείται από τις τιμές τάσης, έντασης ρεύματος, ισχύος, έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος χωρισμένες με κόμμα, κάτι το οποίο κάνει αρκετά εύκολη την εισαγωγή τους σε προγράμματα λογιστικών φύλλων για περαιτέρω ανάλυση. Ένα δείγμα εξαγόμενου αρχείου φαίνεται παρακάτω.

```

8-7-21 12_57_12.csv - Σημειωματάριο
Αρχείο Επεξεργασία Μορφή Προβολή Βοήθεια
Voltage,Current,Power,Luminance,Temperature
37.63,0.00,0.10,1.49,32.50
37.56,0.00,0.14,1.58,32.50
37.56,0.04,1.62,1.51,32.50
37.50,0.07,2.45,1.56,32.50
37.50,0.09,3.27,1.49,32.50
37.44,0.11,4.06,1.49,32.50
37.44,0.13,4.85,1.52,32.50
37.38,0.15,5.66,1.49,32.50
37.31,0.18,6.54,1.54,32.50
37.31,0.20,7.33,1.45,32.50
37.25,0.22,8.14,1.54,32.50

```

Σχήμα 4.15: Στιγμιότυπο εξαγόμενου αρχείου δεδομένων

Κεφάλαιο 5ο: Μετρήσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η απεικόνιση και ανάλυση ενδεικτικών μετρήσεων που πάρθηκαν με τη χρήση του ολοκληρωμένου συστήματος αξιολόγησης φωτοβολταϊκών μονάδων. Η διαδικασία λήψης και αξιολόγησης των μετρήσεων αυτών κρίνεται αναγκαία για τη διακρίβωση της εύρυθμης λειτουργίας του συστήματος, καθώς και της ακρίβειας των μετρήσεων, μιας και πρόκειται για ένα σύστημα – μετρητική διάταξη. Για το λόγο αυτό σε αρκετά από τα στάδια δοκιμών σε πραγματικές συνθήκες με πραγματικά φωτοβολταϊκά πλαίσια και σε συνθήκες εργαστηρίου, επιλέχθηκε η διασταύρωση των μετρούμενων τιμών τάσης και ρεύματος με τις αντίστοιχες μετρήσεις διακριβωμένων εξωτερικών οργάνων.

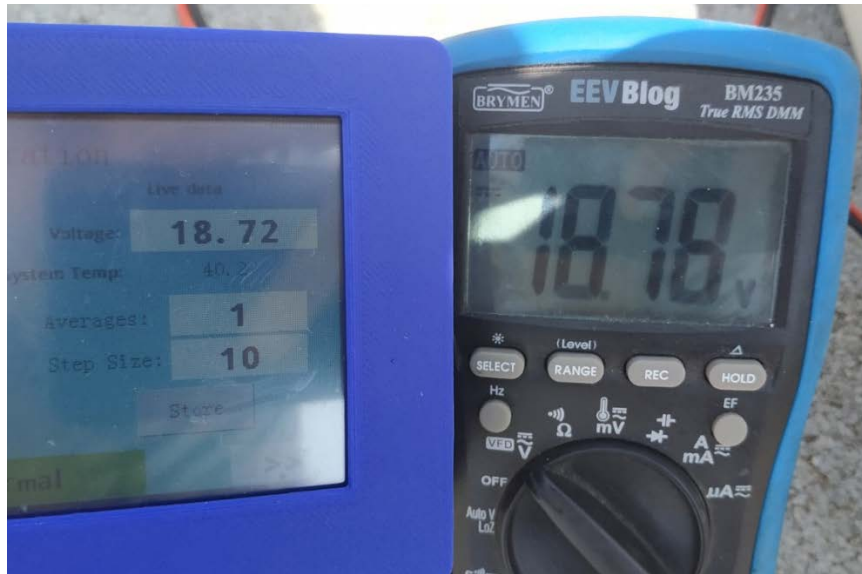
Τα βαθμονομημένα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό είναι ένα πολύμετρο Fluke 175 σε ρόλο αμπερομέτρου, το οποίο έχει τη δυνατότητα απεικόνισης τριών δεκαδικών ψηφίων στην κλίμακα μέτρησης έως 10A, καθώς και ένα πολύμετρο Brymen BM235 σε ρόλο βολτόμετρου, με δυνατότητα απεικόνισης δύο δεκαδικών ψηφίων στην κλίμακα τάσης έως 99V. Και τα δύο όργανα, προσφέρουν ακρίβεια της τάξης του 0,15% στις μετρήσεις τους σύμφωνα με τα αντίστοιχα φύλλα δεδομένων των κατασκευαστών.



Σχήμα 5.1: Πολύμετρο Brymen BM235



Σχήμα 5.2: Πολύμετρο Fluke 175



Σχήμα 5.3: Στιγμιότυπο σύγκρισης μετρούμενης τιμής τάσης V_{oc} με βαθμονομημένο όργανο

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες βρίσκεται εγκατεστημένη στην οροφή του κτηρίου του τμήματος μηχανικών πληροφορικής και ηλεκτρονικών συστημάτων, και απαρτίζεται από δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου Conergy Q 80 MI. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν μετρήσεις που ελήφθησαν από μεμονωμένο πλαίσιο καθώς και συστοιχία δύο τέτοιων πλαισίων σε σειρά. Τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου αυτού για συνθήκες STC, δηλαδή πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $G=1000 \text{ Watt/m}^2$, θερμοκρασία κυττάρου $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ και φασματική κατανομή $AM=1,5$ εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β πλαισίου Conergy Q 80 MI

ΜΕΓΕΘΗ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΤΙΜΗ
Τάση ανοικτοκυκλώματος	V_{oc}	21,9 V
Ρεύμα βραχυκυκλώματος	I_{sc}	4,95 A
Τάση σημείου μέγιστης ισχύος	V_{mpp}	17,5 V
Ρεύμα σημείου μέγιστης ισχύος	I_{mpp}	4,58 A
Μέγιστη Ισχύς	P_{mpp}	80 W
Απόδοση κυττάρων	η_c	14%
Απόδοση πλαισίου	η_m	12,60%
Επιφάνεια πλαισίου		1,195m x 0,541m

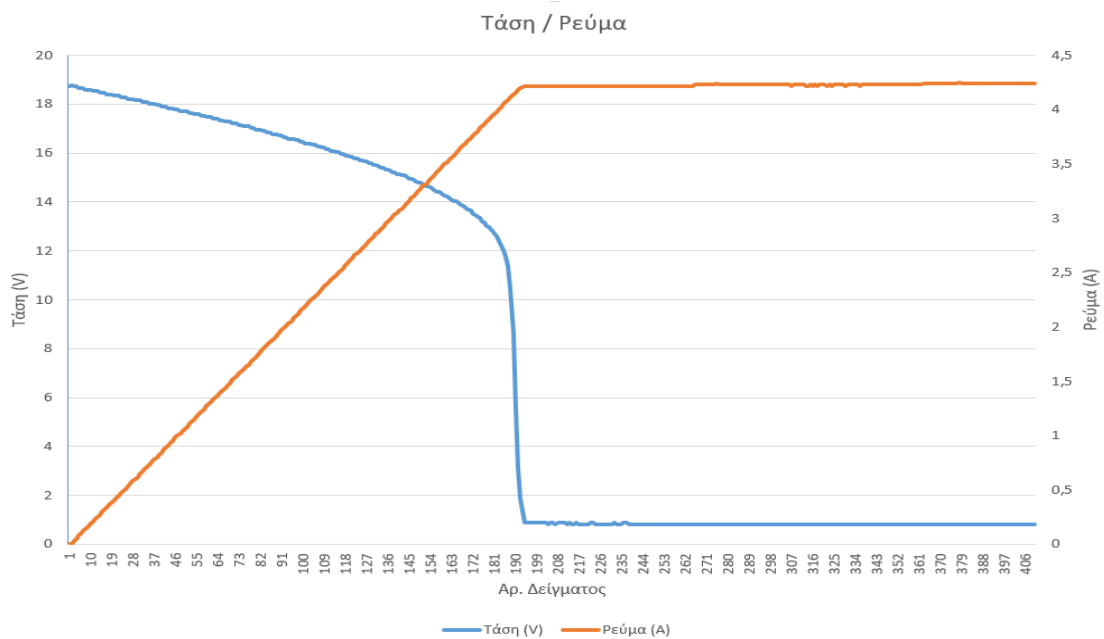
Μια πραγματική φωτογραφία των προαναφερθέντων εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις ακολουθεί.



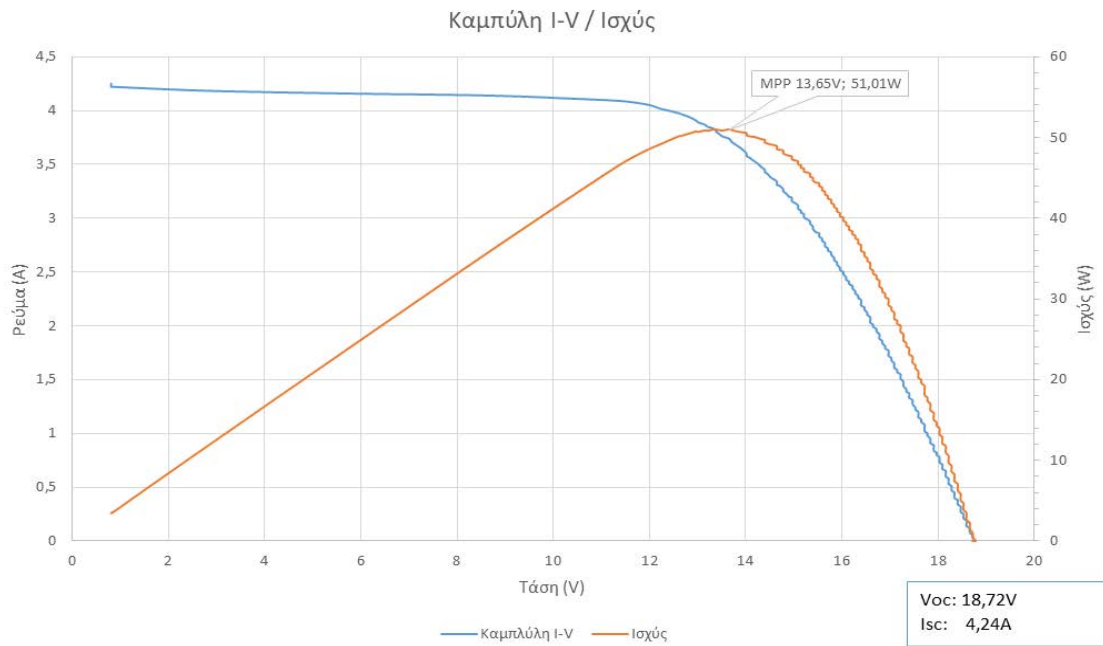
Σχήμα 5.4: Πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις

5.1 Μετρήσεις ενός πλαισίου – χωρίς σκίαση

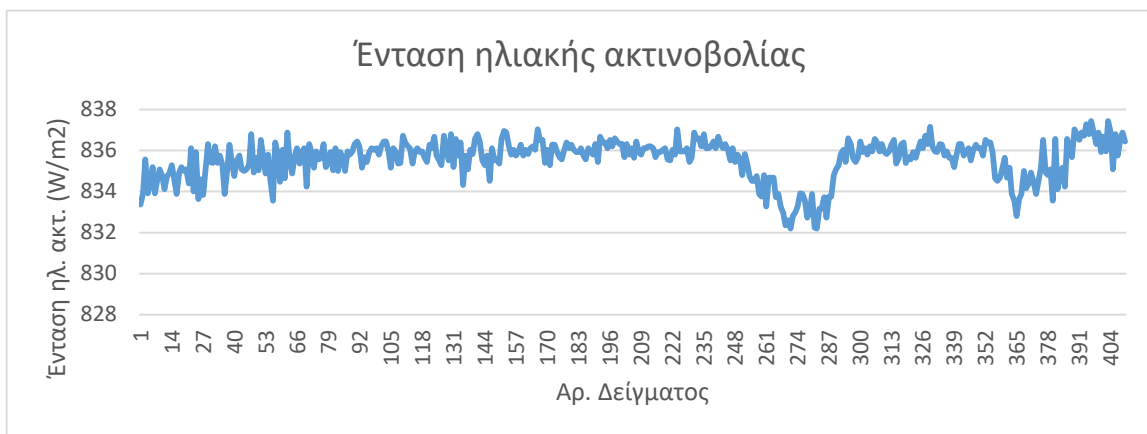
Αρχικά στη συσκευή συνδέθηκε το ένα από τα δύο πλαίσια αυτά και ελήφθησαν οι αντίστοιχες μετρήσεις υπό κανονικές συνθήκες (φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωρίς σκίαση, ηλιόλουστη μέρα). Τα εξαγόμενα δεδομένα εισήχθησαν σε πρόγραμμα λογιστικών φύλλων για περαιτέρω ανάλυση, όπου παρήχθησαν οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες. Οι καμπύλες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.



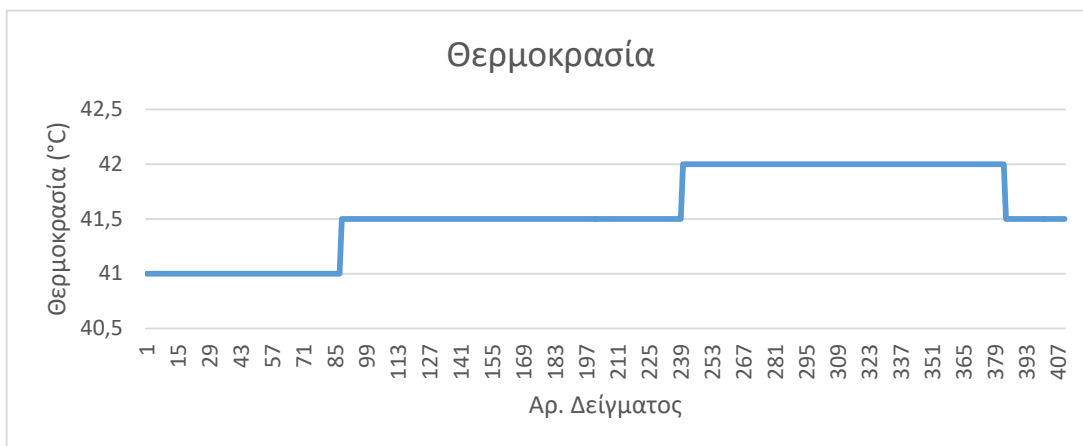
Σχήμα 5.5: Καμπύλες τάσης και ρεύματος μονού πλαισίου χωρίς σκίαση



Σχήμα 5.6: Καμπύλες I-V και P-V μονού πλαισίου χωρίς σκίαση



Σχήμα 5.7: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μονού πλαισίου χωρίς σκίαση

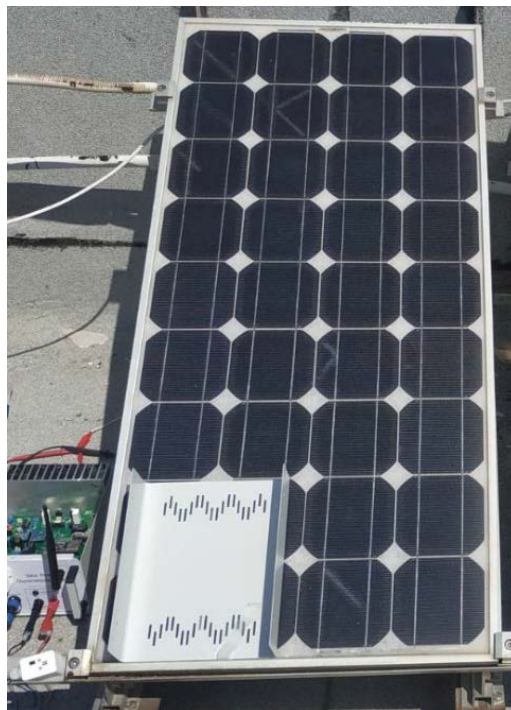


Σχήμα 5.8: Θερμοκρασία μονού πλαισίου χωρίς σκίαση

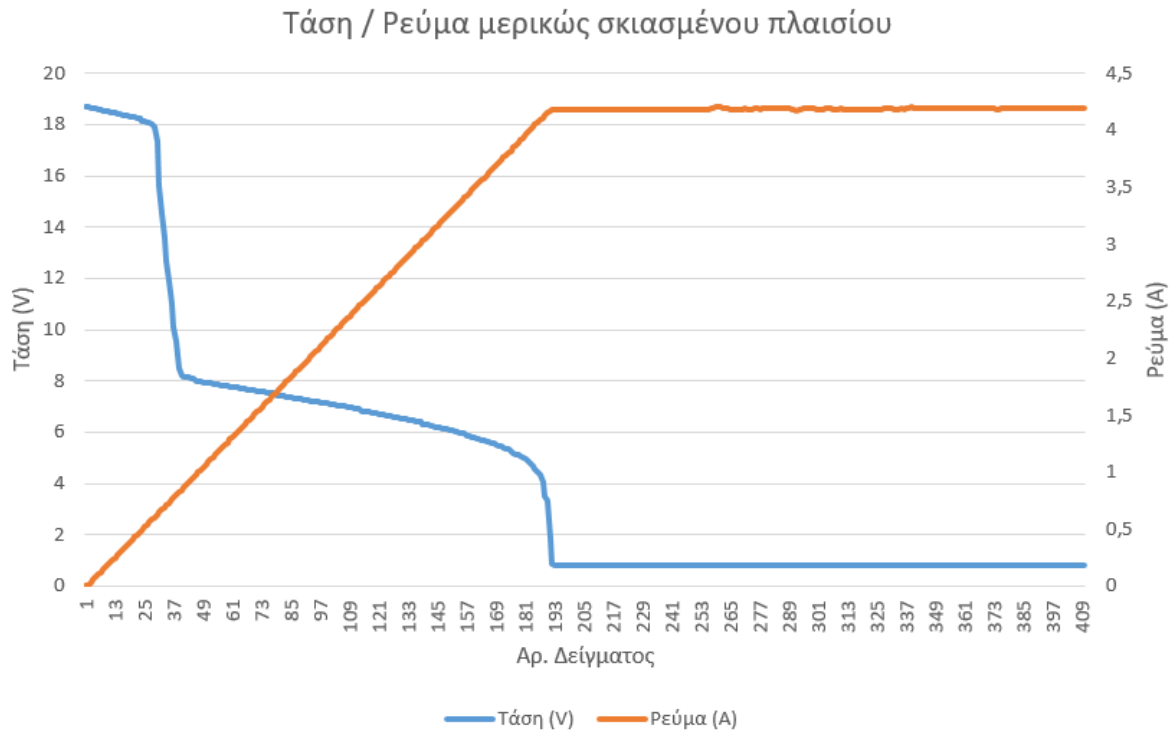
Από τις παραπάνω μετρήσεις μπορεί εύκολα να βγει εύκολα το συμπέρασμα πως το μετρούμενο φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν αντιμετωπίζει κάποιο εσωτερικό πρόβλημα και η ισχύς εξόδου του στο σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (P_{MPP}) είναι αποδεκτή για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (P_{MPP} μετρούμενη = 51,01W σε σχέση με P_{MPP} κατασκευαστή = 80W). Παρόλα αυτά, παρατηρείται σημαντική μείωση της μετρούμενης τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε σχέση με την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής (V_{oc} μετρούμενη = 18,72V, V_{oc} κατασκευαστή = 21,9V), κάτι το οποίο δικαιολογείται, λόγω της αρκετά μεγαλύτερης θερμοκρασίας του πλαισίου κατά τον κύκλο μετρήσεων σε πραγματικές συνθήκες σε σχέση με τις αντίστοιχες συνθήκες χαρακτηρισμού του πλαισίου από τον κατασκευαστή σε εργαστήριο (41,5°C μετρούμενη, 25°C κατασκευαστή).

5.2 Μετρήσεις ενός πλαισίου – συνθήκες μερικής σκίασης

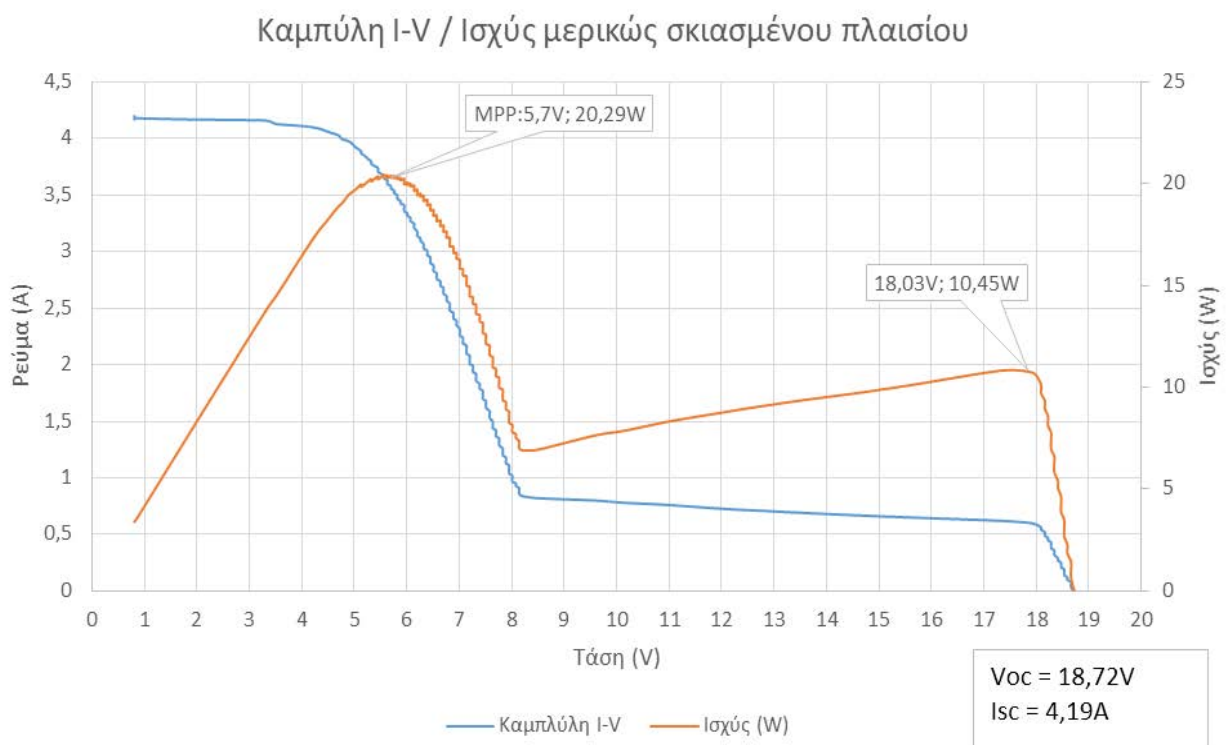
Αμέσως μετά ακολούθησε ένας κύκλος μετρήσεων χρησιμοποιώντας το ίδιο ακριβώς φωτοβολταϊκό πλαίσιο στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, με τη διαφορά πως αυτή τη φορά δημιουργήθηκε τεχνητά μερική σκίαση του πλαισίου αυτού, καλύπτοντας με αδιαφανές αντικείμενο ένα μέρος από τα κελιά του, ούτως ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του πλαισίου σε αυτές τις συνθήκες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται στα γραφήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 5.9: Μερικώς σκιασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο



Σχήμα 5.10: Καμπύλες τάσης και ρεύματος μονού πλαισίου σε μερική σκίαση



Σχήμα 5.11: Καμπύλες I-V και P-V μονού πλαισίου σε μερική σκίαση



Σχήμα 5.12: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μονού πλαισίου σε μερική σκίαση

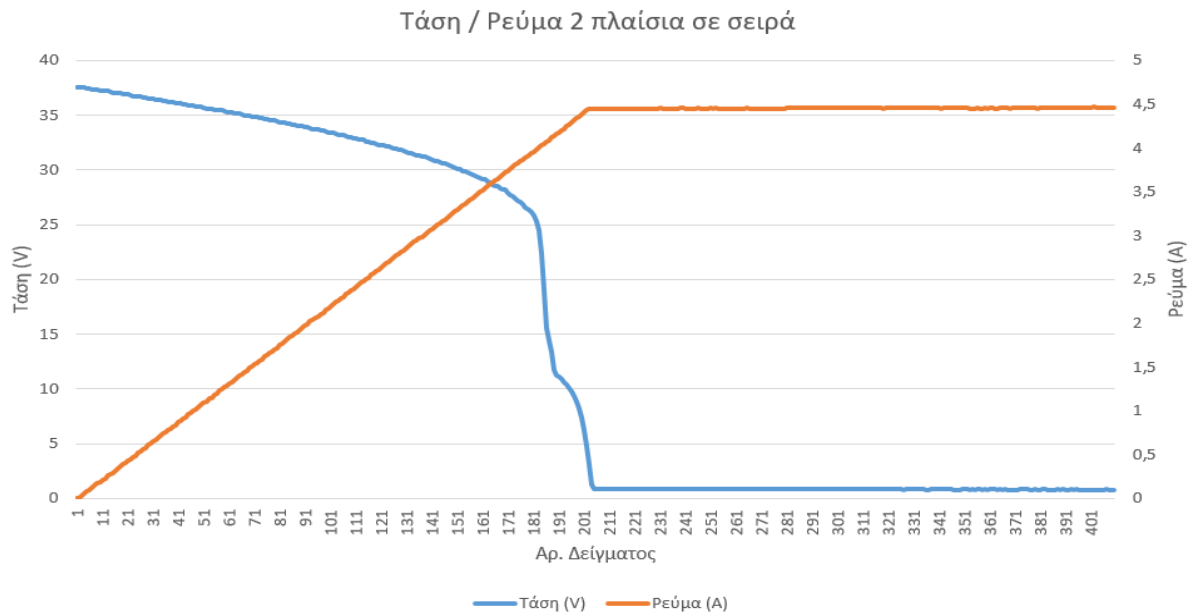


Σχήμα 5.13: Θερμοκρασία μονού πλαισίου σε μερική σκίαση

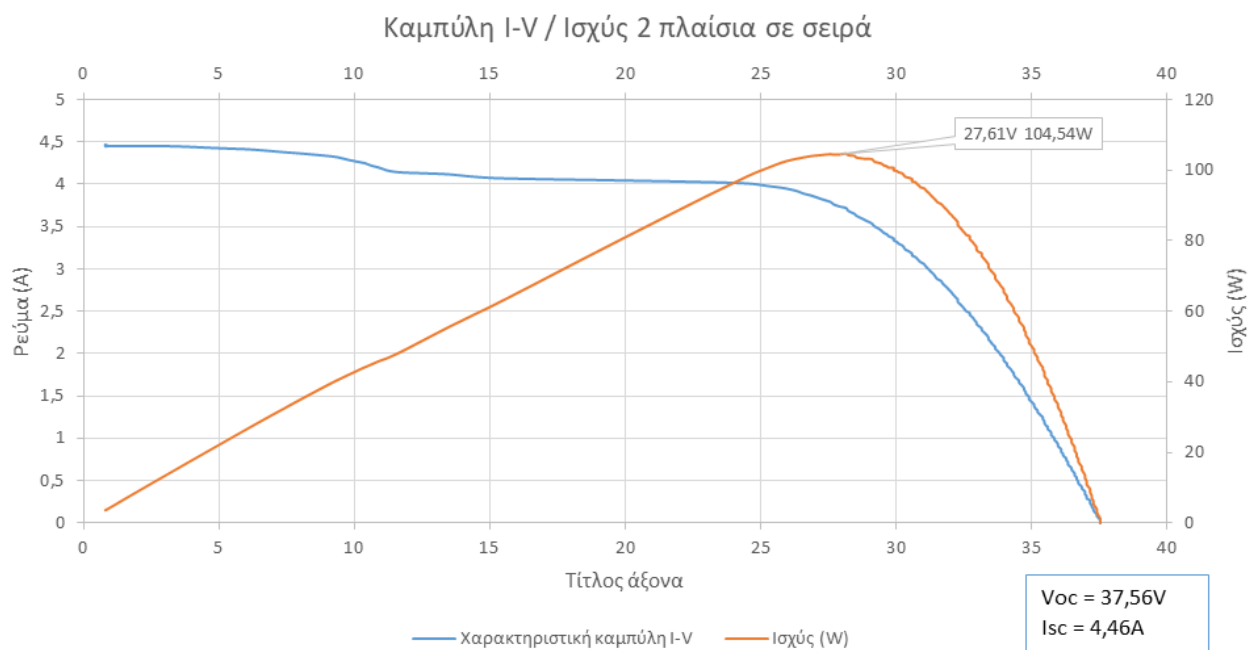
Κατά τις μετρήσεις αυτές παρατηρείται πως η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} του πλαισίου δεν μεταβάλλονται σημαντικά, κάτι το οποίο όμως δεν ισχύει για τη χαρακτηριστική καμπύλη I-V και το σημείο μέγιστης ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση η χαρακτηριστική καμπύλη I-V παρουσιάζει δύο «γόνατα», τα οποία αντικατοπτρίζουν την κατάσταση μερικής σκίασης του πλαισίου. Το σημείο μέγιστης ισχύος σε αυτή την περίπτωση εντοπίζεται σε τάση $V = 5,7V$ και αντιστοιχεί σε $20,29W$.

5.3 Μετρήσεις δύο πλαισίων σε σειρά – χωρίς σκίαση

Στη συνέχεια τα δύο διαθέσιμα φωτοβολταϊκά πλαίσια Conergy Q 80 ΜΙ συνδέθηκαν σε σειρά, αφαιρέθηκε το αντικείμενο που προκαλούσε τη σκίαση και επαναλήφθηκε ο κύκλος μετρήσεων με τις ίδιες παραμέτρους (φωτοβολταϊκά πλαίσια χωρίς σκίαση, ηλιόλουστη μέρα). Η θεωρητική τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} αναμένεται σε αυτή την περίπτωση να είναι η διπλάσια στα 43,8V, με το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} να μένει ίδιο στα 4,95A σε συνθήκες STC. Τα αποτελέσματα από αυτό τον κύκλο μετρήσεων εμφανίζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.14: Καμπύλες τάσης και ρεύματος δύο πλαισίων σε σειρά χωρίς σκίαση



Σχήμα 5.15: Καμπύλες I-V και P-V δύο πλαισίων σε σειρά χωρίς σκίαση



Σχήμα 5.16: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας δύο πλαισίων σε σειρά χωρίς σκίαση



Σχήμα 5.17: Θερμοκρασία δύο πλαισίων σε σειρά χωρίς σκίαση

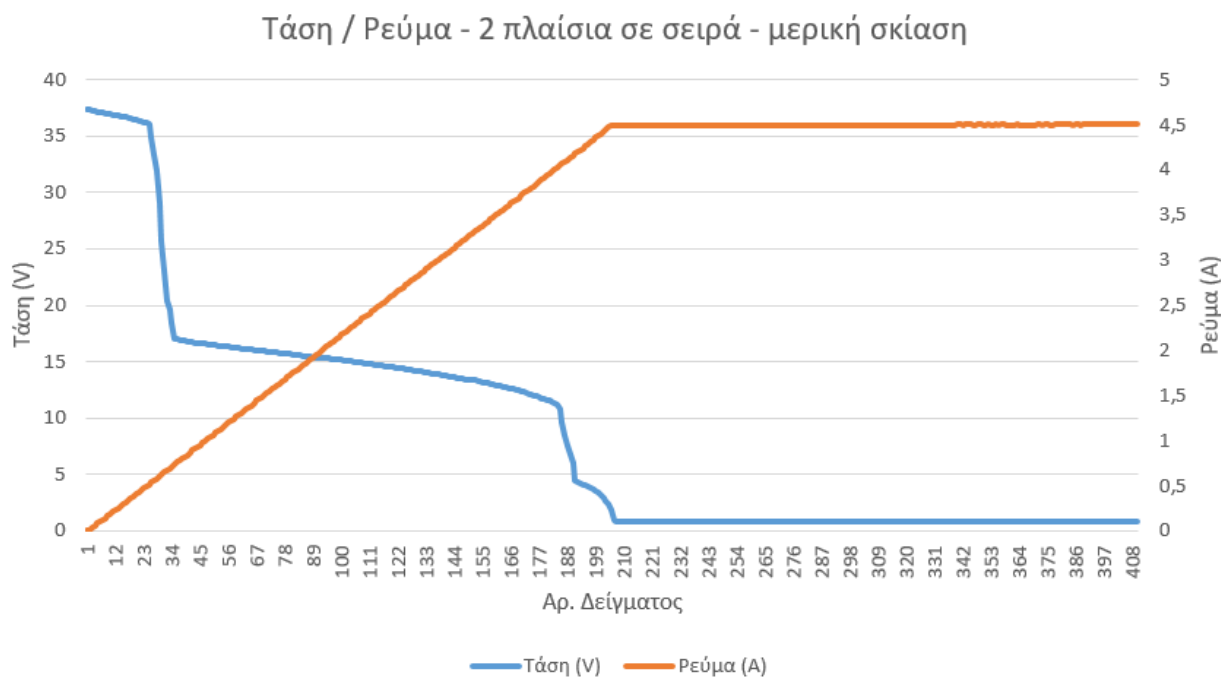
Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται αποτελέσματα σχεδόν όμοια με αυτά των μετρήσεων ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε συνθήκες χωρίς σκίαση, με τη διαφορά πως η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} αυτή τη φορά ανέρχεται στα 37,56V, τιμή διπλάσια από την προηγούμενη και με το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} να παραμένει πρακτικά το ίδιο στα 4,46A. Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V της συστοιχίας αυτής παρουσιάζει «γόνατο»-σημείο μέγιστης ισχύος σε τάση 27,61V με την ισχύ στο σημείο αυτό να κυμαίνεται στα 104,54W. Στην καμπύλη μεταβολής της τάσης σε σχέση με τον αριθμό των δειγμάτων του ελήφθησαν παρατηρείται μία μικρή σημειακή ανωμαλία για τάση 12V και ρεύμα 4,2A περίπου, κάτι το οποίο όμως οφείλεται στις μικρές διαφορές στα χαρακτηριστικά μεταξύ των δύο πλαισίων και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

5.4 Μετρήσεις δύο πλαισίων σε σειρά – συνθήκες μερικής σκίασης

Τέλος, δημιουργήθηκαν συνθήκες μερικής σκίασης στο ένα από τα δύο πλαίσια με τη χρήση του προαναφερθέντος αδιαφανούς αντικειμένου, καλύπτοντας με αυτό μέρος των κελιών του, ούτως ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά της συστοιχίας υπό τις συνθήκες αυτές. Φωτογραφία της διάταξης αυτής, καθώς και τα εξαγόμενα αποτελέσματα, παρουσιάζονται παρακάτω.

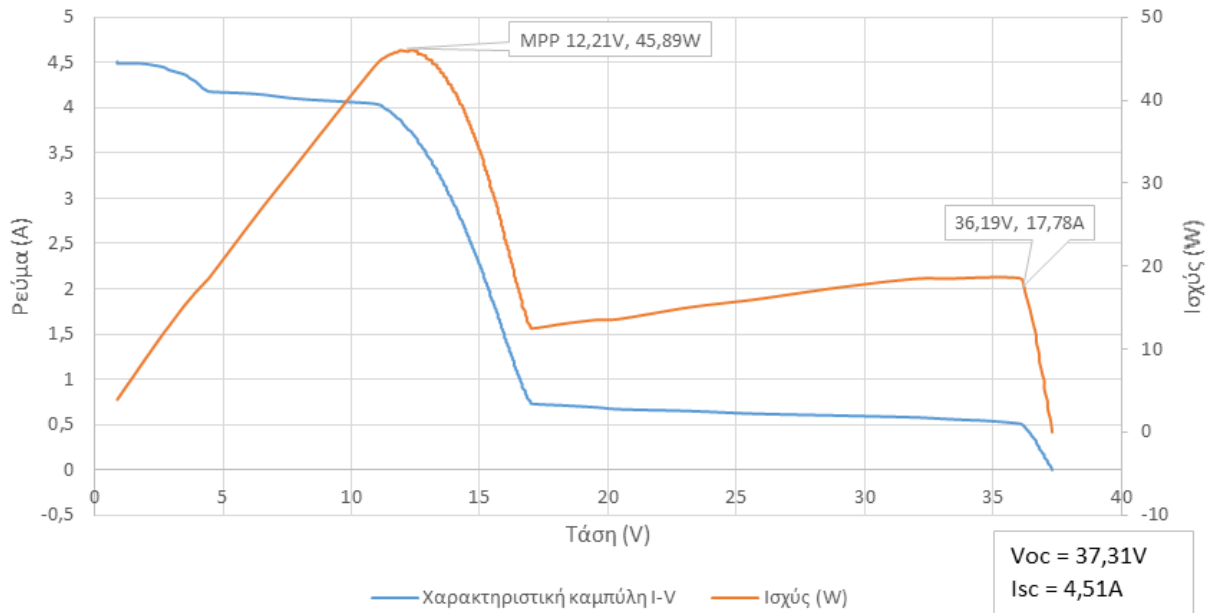


Σχήμα 5.18 Φωτογραφία των δύο πλαισίων υπό καθεστώς μερικής σκίασης



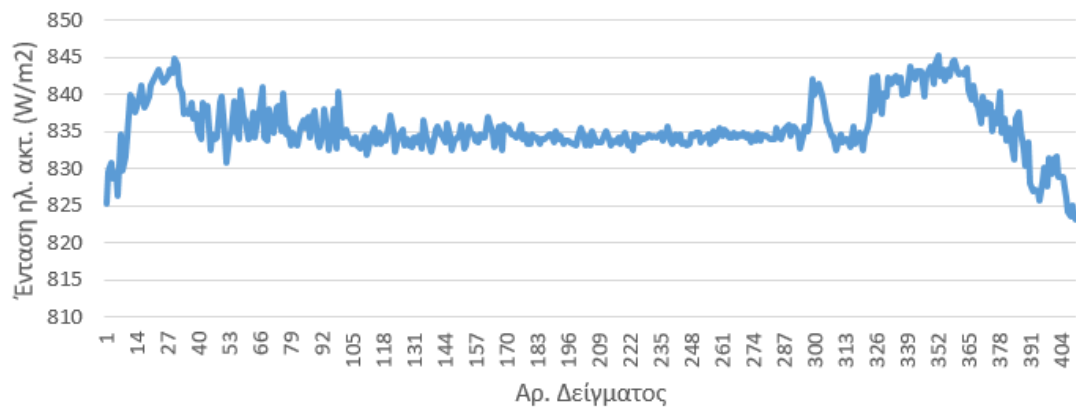
Σχήμα 5.19: Καμπύλες τάσης και ρεύματος δύο πλαισίων σε σειρά με μερική σκίαση

Καμπύλη I-V / Ισχύς - 2 πλαίσια σε σειρά - μερική σκίαση

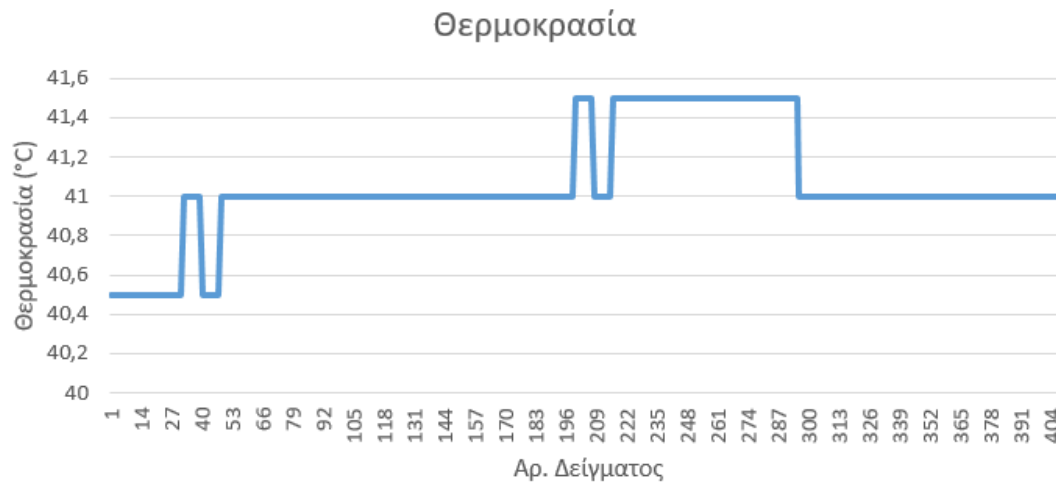


Σχήμα 5.20: Καμπύλες I-V και P-V δύο πλαισίων σε σειρά σε μερική σκίαση

Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας



Σχήμα 5.21: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας δύο πλαισίων σε σειρά σε μερική σκίαση



Σχήμα 5.22: Θερμοκρασία δύο πλαισίων σε σειρά σε μερική σκίαση

Κατά τη μέτρηση των χαρακτηριστικών της συστοιχίας υπό καθεστώς μερικής σκίασης σε ένα από τα δύο πλαίσια που την αποτελούν, παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζει και σε αυτή την περίπτωση δύο «γόνατα» με το υψηλότερο να αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος MPP. Το σημείο αυτό παρατηρείται σε τάση 12,21V με την ισχύ να βρίσκεται στα 45,89W.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις που έγιναν με το σύστημα και μετά από σύγκριση των μετρούμενων τιμών με αυτές των βαθμονομημένων οργάνων, παρατηρήθηκε ακρίβεια της τάξης των $\pm 60\text{mV}$ στην κλίμακα της τάσης και $\pm 15\text{mA}$ στην κλίμακα του ρεύματος, μεγέθη που κρίνονται αποδεκτά για το εύρος μέτρησης 0-80V και 0-8A της συσκευής. Τα σφάλματα αυτά κρίθηκε πως δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των εξαγόμενων μετρήσεων του συστήματος, και μπορούν στην παρούσα εφαρμογή να θεωρηθούν αμελητέα.

Η μέτρηση θερμοκρασίας έδειξε να συμφωνεί απόλυτα με αυτή του διακριβωμένου οργάνου μέτρησης θερμοκρασίας (πολύμετρο Brymen BM235 σε ρόλο θερμομέτρου με εξωτερική σύνδεση θερμοζεύγους).

Ακόμα, η ακρίβεια του αισθητήρα μέτρησης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας αν και εμπειρικά φαίνεται να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί λόγω έλλειψης αντίστοιχου βαθμονομημένου οργάνου για σύγκριση των μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, η ακρίβεια των τιμών μέτρησης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που εξάγονται από το σύστημα δεν μπορεί να πιστοποιηθεί έως ότου γίνει ο απαραίτητος έλεγχος, και οι μετρήσεις που παρέχονται, μπορούν να θεωρηθούν σχετικές αλλά όχι απόλυτες.

Τέλος, ο χρόνος αυτονομίας του συστήματος κρίθηκε πως μπορεί να υπερκαλύψει τις ανάγκες για μετρήσεις σε παραπάνω από μία φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας χωρίς την ανάγκη για ενδιάμεση φόρτιση, καθώς με κάθε φόρτιση μπορούν να πραγματοποιηθούν αρκετές δεκάδες κύκλοι μετρήσεων.

Κεφάλαιο 7ο: Μελλοντικές επεκτάσεις

Αν και η απόδοση του συστήματος κρίθηκε ικανοποιητική με βάση τις προδιαγραφές που τέθηκαν, αρκετά πράγματα θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν μελλοντικά για τη βελτιστοποίηση του συστήματος.

- Αρχικά, μετά τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν, διαπιστώθηκε πως η επιφάνεια της ψύκτρας που χρησιμοποιήθηκε για της ανάγκες απαγωγής της θερμότητας από τα Mosfet φορτίου μπορεί να μειωθεί σημαντικά χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα υπερθέρμανσης του σταδίου ισχύος, κάτι που θα οδηγούσε στη δραματική μείωση του βάρους καθώς και του όγκου της τοπικής συσκευής, καθιστώντας την έτσι αρκετά πιο εύκολη στη μεταφορά.
- Ακόμα, θα πρέπει να γίνει επαλήθευση της απόδοσης του αισθητήρα μέτρησης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς αυτό δεν κρίθηκε δυνατό στην παρούσα εργασία, και στην περίπτωση που κριθεί ανεπαρκής να καλύψει τις προδιαγραφές του συστήματος, να γίνει αντικατάστασή του με βαθμονομημένο πυρανόμετρο του εμπορίου.
- Μία ακόμα μελλοντική επέκταση είναι η δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος σε Η/Υ όμοιου με αυτό της φορητής συσκευής, για ζωντανή απεικόνιση και επεξεργασία των μετρήσεων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος, καθώς ήδη η απομακρυσμένη συσκευή διεπαφής χρήστη κάνει τα δεδομένα αυτά διαθέσιμα στην ενσωματωμένη σειριακή θύρα που παρέχει, μέσω διασύνδεσης USB.
- Επίσης, θα μπορούσε να γίνει αντικατάσταση των Mosfet του φορτίου με αντίστοιχα γραμμικού τύπου (Linear rated Mosfets), κάτι που αν και θα ανέβαζε το κόστος, θα έδινε τη δυνατότητα στο σύστημα να διαχειριστεί σημαντικά μεγαλύτερη εισερχόμενη ισχύ, καθώς τα Mosfet τέτοιου τύπου είναι σχεδιασμένα για λειτουργία στη γραμμική τους περιοχή και είναι σε θέση να δέχονται σημαντικά θερμικά φορτία για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα, χωρίς να κινδυνεύουν να καταστραφούν.
- Ακόμα θα μπορούσε να βελτιωθεί η ακρίβεια μέτρησης της τάσης από το σύστημα, με χρήση ξεχωριστών ακροδεκτών απομακρυσμένης μέτρησης της τάσης απευθείας στα άκρα του φωτοβολταϊκού πλαισίου (4-wire measurement / remote voltage sensing) [15] με τη χρήση μίας επιπλέον βαθμίδας διαφορικού ενισχυτή στην είσοδο της συσκευής. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να εξαλείψει το σφάλμα μέτρησης λόγω της πτώσης τάσης στους αγωγούς σύνδεσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την τοπική συσκευή, ειδικά για μεγάλα ρεύματα φορτίου, καθώς και μεγάλα μήκη αγωγών.
- Τέλος, οι εξαγόμενες μετρήσεις από το σύστημα θα μπορούσαν να αναχθούν σε STC συνθήκες με τη χρήση κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων που περιγράφονται στο πρότυπο IEC 61829:2015 [1], κάτι το οποίο θα έδινε τη δυνατότητα για απευθείας σύγκριση των εξαγόμενων από το σύστημα I-V καμπυλών με τις αντίστοιχες του εκάστοτε κατασκευαστή. Επίσης θα μπορούσε εύκολα από το υπάρχον σύστημα να εξαχθεί ο συντελεστής πλήρωσης ff (Fill Factor) για τον πιο ακριβή χαρακτηρισμό του προς μέτρηση πλαισίου.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

- [1] International Standard IEC 61829:2015 “Photovoltaic (PV) array - On-site measurement of current-voltage characteristics,” *International Electrotechnical Commission*. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/23561>.
- [2] International Standard IEC 60904-1:2020 “Photovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics,” *International Electrotechnical Commission*. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/32004>.
- [3] International Standard IEC 62446-2:2020 “Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 2: Grid connected systems - Maintenance of PV systems,” *International Electrotechnical Commission*. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/27382>.

Application Note

- [4] Analog Devices, “Precise Photovoltaic I-V Characterization” Design. Note [Online] Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/Precise-Photovoltaic-I-V-Characterization.pdf>.
- [5] Keysight Technologies, “Electronic Load Fundamentals”, White Paper [Online] Available: https://www.altoo.dk/files/keysight/Electronic_Load_Fundamentals.pdf.

Data Sheet

- [6] Texas Instruments, “LMx24, LMx24x, LMx24xx, LM2902, LM2902x, LM2902xx, LM2902xxx Quadruple Operational Amplifiers” datasheet, Mar. 2015.
- [7] ST Microelectronics, “STP40NF10L N-channel 100V - 0.028Ω - 40A TO-220 Low gate charge STripFET™ Power MOSFET” datasheet, Jan. 2007.
- [8] IRC/TT electronics, “LOB3R010FLF Current Sense Resistors - Through Hole .01 OHM 1% 3W” datasheet, Jun. 2018.
- [9] ONsemi, “MBR41H100CTG Schottky Diodes & Rectifiers 40A 100V H-Series” datasheet, Oct. 2020.
- [10] Micro Commercial Components (MCC), “1.5KE100CA-TP ESD Suppressors / TVS Diodes BI-DIR 1500W 11.1A” datasheet, Jan. 2020.
- [11] Panasonic, “ERZ-V07D121 Varistors ZNR Transient/Surge Absorbers Type D” datasheet, Dec. 2020.
- [12] Omron electronics, “G5LE-14-ASI DC12 General Purpose Relays Power PCB Relay” datasheet.

Internet Site

- [13] “Photovoltaic Installation Tester BENNING PV 1-1,” *Benning Inc.* [Online]. Available: <https://www.benning.de/products-en/testing-measuring-and-safety-equipment/measuring-devices-for-photovoltaic/pv-installation-tester-pv-1-1.html>.
- [14] “I-V500w 1500V 15A I-V Curve Tracer compatible with htanalysis™,” *HT Instruments Inc.* [Online]. Available: <https://www.ht-instruments.com/en/products/photovoltaic-testers/i-v-curve-tracers/i-v500w/#>.

- [15] "I-V characterization of solar cells and panels using a source-measure unit," [Online]. Available <https://www.evaluationengineering.com/instrumentation/components/article/13015152/iv-characterization-of-solar-cells-and-panels-using-a-sourcemeasure-unit>.

Paper in Conference Proceedings

- [16] J. Montes-Romero, M. Torres-Ramírez, J. de la Casa, A. Firman and M. Cáceres, "Software tool for the extrapolation to Standard Test Conditions (STC) from experimental curves of photovoltaic modules," 2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAE), 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/TAE.2016.7528252.
- [17] L. G. Monteiro et al., "Field I-V Curve Measurements Methodology at String Level to Monitor Failures and the Degradation Process: A Case Study of a 1.42 MWp PV Power Plant," in IEEE Access, vol. 8, pp. 226845-226865, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044832.

Journal Articles

- [18] G. Blaesser, E. Rossi, "Extrapolation of outdoor measurements of PV array I-V characteristics to standard test conditions," *Solar Cells*, vol. 25, no. 2, pp. 91-96, Nov. 1988.
- [19] Omar HENNI, Mustapha BELARBI, Kamel HADDOUCHE El-Habib BELARBI, "Design and Implementation of a Low-Cost Characterization System for Photovoltaic Solar Panels," in International Journal of Renewable Energy Research-IJRER, O. HENNI et al. ,Vol.7, No.4, 2017.

Παράρτημα Α: Κώδικας ESP32 τοπικής συσκευής

```
#include <Arduino.h>
#include "Adafruit_VEML7700.h"
#include <Adafruit_INA219.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 32
Adafruit_MCP4725 dac;
Adafruit_INA219 ina219(0x40);
Adafruit_ADS1115 ads1(0x48);
//Adafruit_BMP280 bmp;
Adafruit_VEML7700 veml = Adafruit_VEML7700();
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// REPLACE WITH YOUR RECEIVER MAC Address
uint8_t broadcastAddress[] = {0x30, 0xAE, 0xA4, 0x97, 0x48, 0x4C};

float current_mA = 0;
float current_A = 0;
float shuntvoltage = 0;
float busvoltage = 0;
float T;
float ADC_VALUE1 = 0;
float ADC_VALUE2 = 0;
float ADC_VALUE3 = 0;
//int16_t ADC_VALUE = 0;
float Watt_m2;
float voltage_value = 0;
float power_value = 0;
float Lux;
char input, input1;
int i = 0;
int j = 0;
int dac_setpoint;
float expected_DAC_OUTPUT_value = 0;
float actual_DAC_OUTPUT_value = 0;
float gate_voltage = 0;
int dac_max_value = 4095;
int dac_step = 10;
int adc_averages = 1;
int flag = 0;
float sys_temp = 0;
float panel_temp = 0;
int sensors_connected = 0;

float voltage_max_limit = 80;
float current_max_limit = 8;
```

```

float power_max_limit = 280;
float temp_max_limit = 80;

// Define variables to store incoming readings
float incomingStatus;

// Structure example to send data
// Must match the receiver structure
typedef struct struct_message {
    float a; //Voltage
    float b; //Current
    float c; //Power
    float d; //GateV
    float e; //SysTemp
    int f; //Status
    int g; //DAC Setpoint
    float h; //Luminance
    float i; //PanelTemp
} struct_message;

typedef struct struct_message1 {
    int state;
    unsigned int steps;
    unsigned int averages;
} struct_message1;

// Create a struct_message called myData
struct_message myData;
struct_message1 receiveddata;

//----- On Data Sent Callback -----
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    //Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
    //Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" :
"Delivery Fail");
}

//----- On Receive Callback -----
void OnDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingData, int
len) {
    memcpy(&receiveddata, incomingData, sizeof(receiveddata));
    if (receiveddata.state == 1 ) {
        flag = 1;
        //digitalWrite(2, flag);
        Serial.print("received steps: ");
        Serial.print(receiveddata.steps);
        Serial.print("\treceived averages: ");
        Serial.println(receiveddata.averages);
        Serial.println();
        Serial.println();
        dac_step = receiveddata.steps;
        adc_averages = receiveddata.averages;
    }
    else {
        flag = 0;
        //digitalWrite(2, flag);
    }
}

```

```

}

void setup()
{
  pinMode(16, INPUT_PULLUP); //button
  pinMode(2, OUTPUT); //user led
  pinMode(23, OUTPUT); //load Relay
  pinMode(33, OUTPUT); //Fan Relay
  //pinMode(32, INPUT); //1 Wire Bus
  pinMode(19, INPUT_PULLUP); //Ext_Sensors Plug Detect
  digitalWrite(2, LOW);
  digitalWrite(23, LOW);
  digitalWrite(33, LOW);
  Serial.begin(115200);
  WiFi.mode(WIFI_MODE_STA);
  Serial.println(WiFi.macAddress());

  if (digitalRead(19) == 0) {
    digitalWrite(2, HIGH);
    sensors_connected = 1;
  }
  else {
    digitalWrite(2, LOW);
    sensors_connected = 0;
  }

  Wire.begin();
  dac.begin(0x60);
  if (! ina219.begin()) {
    Serial.println("Failed to find INA219 chip");
    while (1) {
      delay(10);
    }
  }
  //ina219.begin();

  if (sensors_connected == 1) {
    veml.begin();
    veml.setGain(VEML7700_GAIN_1_8);
    veml.setIntegrationTime(VEML7700_IT_25MS);
    veml.setLowThreshold(10000);
    veml.setHighThreshold(20000);
    veml.interruptEnable(true);
    sensors.setWaitForConversion(false); // makes it async
    sensors.requestTemperatures();
  }

  ads1.setGain(GAIN_ONE); // ads.setGain(GAIN_ONE); // 1x
  gain +/- 4.096V 1 bit = 2mV 0.125mV
  ads1.begin();

  // Set device as a Wi-Fi Station
  WiFi.mode(WIFI_STA);

  // Init ESP-NOW
  if (esp_now_init() != ESP_OK) {
    Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
    return;
  }
}

```

```

// Once ESPNow is successfully Init, we will register for Send CB to
// get the status of Trasnmitted packet
esp_now_register_send_cb(OnDataSent);
esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);

// Register peer
esp_now_peer_info_t peerInfo;
memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
peerInfo.channel = 0;
peerInfo.encrypt = false;

// Add peer
if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
    Serial.println("Failed to add peer");
    return;
}
}

void loop()
{
    i = 0;
    dac.setVoltage(0, false);

    delay(100);

    if (flag == 1) { // -----Entoli gia ekkiniisi aptin othoni -----
    ----

        if (sensors_connected == 1) {
            sensors.requestTemperatures();
        }

        digitalWrite(23, HIGH); //load relay
        delay(100);
        digitalWrite(33, HIGH); //fan relay
        delay(100);
        if (dac_step == 0) { //arxikopoiisi step kai average an den oristei
            timi
                dac_step = 10;
            }
            if (adc_averages == 0) {
                adc_averages = 1;
            }
            Serial.print("DAC steps: ");
            Serial.print(dac_step);
            Serial.print("\tADC averages: ");
            Serial.println(adc_averages);
            Serial.println();

            while (i <= dac_max_value && flag != 0)
            {
                if (sensors_connected == 1) {
                    sensors.requestTemperatures();
                }

                dac_setpoint = i;
                dac.setVoltage(dac_setpoint, false);

                //         current_mA = ina219.getCurrent_mA();
                //         //current_mA = ina219.getShuntVoltage_mV();
                //         current_A = current_mA / 1000;
            }
        }
    }
}

```

```

//      if (current_A <= 0) {
//          current_A = 0;
//      }

//Lux = veml.readLux();
// Watt_m2 = Lux * 0.0079;

for (j = 0; j < adc_averages; j++) {
    //ADC_VALUE1 += ads1.readADC_SingleEnded(0); //Channel 0 --> Dac
output V
    ADC_VALUE2 += ads1.readADC_SingleEnded(1); //Channel 1 -->
Vpanel
    ADC_VALUE3 += ads1.readADC_SingleEnded(2); //Channel 2 --> Vgs
    current_mA += ina219.getCurrent_mA();
}
//actual_DAC_OUTPUT_value = ((ADC_VALUE1 * 0.125) / 1000) / j;
voltage_value = ((ADC_VALUE2 * 0.125) / 1000 / 0.0319457) / j;
//divider 10K / 330R for 103V input
current_A = current_mA / 100 / j / 1.0889; // correction factor
gia Shunt 0.01ohm
    if (voltage_value <= 0) {
        voltage_value = 0;
    }
    if (current_A <= 0) {
        current_A = 0;
    }
    gate_voltage = ((ADC_VALUE3 * 0.125) / 1000) / 0.2481203 / j;
//divider 1K / 330R for 13.3V input

    sys_temp = (ads1.readADC_SingleEnded(3) * 0.125) * 0.1; //Channel
3 --> System Temperature
    ADC_VALUE1 = 0;
    ADC_VALUE2 = 0;
    ADC_VALUE3 = 0;
    current_mA = 0;

    power_value = voltage_value * current_A;

    //expected_DAC_OUTPUT_value = dac_setpoint * 0.000805;

    if (sensors_connected == 1) {
        panel_temp = sensors.getTempCByIndex(0);
        Lux = veml.readLux();
        Watt_m2 = Lux * 0.0079;
    }

    Serial.print(voltage_value, 3);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(current_A, 3);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(power_value, 1);
    Serial.print("\t\t");
    //Serial.print(expected_DAC_OUTPUT_value, 3);
    //Serial.print("\t");
    //Serial.print(actual_DAC_OUTPUT_value, 3);
    //Serial.print("\t");
    Serial.print(gate_voltage, 3);
    Serial.print("\t\t");
    Serial.print(sys_temp, 1);
    Serial.print("\t");

```

```

Serial.println(dac_setpoint);
Serial.print("\t");
Serial.println(Watt_m2, 1);
Serial.print("\t");
Serial.println(panel_temp, 1);

i = i + dac_step;
//delay(2);

// Set values to send
myData.a = voltage_value;
myData.b = current_A;
myData.c = power_value;
myData.d = gate_voltage;
//myData.e = dac_setpoint;
myData.e = sys_temp;
myData.g = dac_setpoint;
myData.h = Watt_m2;
myData.i = panel_temp;

if (i <= dac_max_value) { //Normal
  myData.f = 1;
}
else {
  //myData.f = 0;
}

if (voltage_value >= voltage_max_limit) { // Overvoltage
  myData.f = 3;
  flag = 0;
  //digitalWrite(2, flag);
  digitalWrite(23, LOW);
  digitalWrite(33, LOW);
}
if (current_A >= current_max_limit) { // Overcurrent
  myData.f = 2;
  flag = 0;
  //digitalWrite(2, flag);
  digitalWrite(23, LOW);
  digitalWrite(33, LOW);
}
if (power_value >= power_max_limit) { // Overpower
  myData.f = 5;
  flag = 0;
  //digitalWrite(2, flag);
  digitalWrite(23, LOW);
  digitalWrite(33, LOW);
}
if (sys_temp >= temp_max_limit) { // Overtemp
  myData.f = 4;
  flag = 0;
  //digitalWrite(2, flag);
  digitalWrite(23, LOW);
  digitalWrite(33, LOW);
}

// Send message via ESP-NOW
esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *)
&myData, sizeof(myData));
if (result == ESP_OK) {

```

```

        Serial.println("Sent with success");
    }
    else {
        Serial.println("Error sending the data");
    }
}

flag = 0;
//digitalWrite(2, flag);
digitalWrite(23, LOW);
digitalWrite(33, LOW);
myData.f = 0;
esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));
}
// -----Live Readings -----
delay(20);
//voltage_value = ads1.readADC_SingleEnded(1);
voltage_value = ((ads1.readADC_SingleEnded(1) * 0.125) / 1000 /
0.0319457); //divider 10K / 330R for 103V input
if (voltage_value <= 0) {
    voltage_value = 0;
}
myData.a = voltage_value;
sys_temp = (ads1.readADC_SingleEnded(3) * 0.125) * 0.1; //Channel 3 --
> System Temperature
myData.e = sys_temp;

if (sensors_connected == 1) {
    sensors.requestTemperatures();
    panel_temp = sensors.getTempCByIndex(0);
    Lux = veml.readLux();
    Watt_m2 = Lux * 0.0079;
}
myData.h = Watt_m2;
myData.i = panel_temp;
myData.f = 6; //Live Readings Mode

esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));
}

```

Παράρτημα Β: Κώδικας ESP32 απομακρυσμένης συσκευής διεπαφής χρήστη

```
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include "EasyNextionLibrary.h" // Include EasyNextionLibrary
#include "SPI.h"
#include "SD.h"
#include "FS.h"
#include "uRTCLib.h"

// uRTCLib rtc;
uRTCLib rtc(0x68);

EasyNex myNex(Serial2); // Create an object of EasyNex class with the
name < myNex >
// Set as parameter the Serial you are going to use

const int REFRESH_TIME = 100; // time to refresh the Nextion
page every 100 ms
unsigned long refresh_timer = millis(); // timer for refreshing
Nextion's page

// REPLACE WITH THE MAC Address of your receiver
uint8_t broadcastAddress[] = {0x24, 0x0A, 0xC4, 0xED, 0x36, 0xB8};
//7C:9E:BD:F8:F0:D0
//24:0A:C4:ED:36:B8

// Variable to store if sending data was successful
String success;

// Structure example to receive data
// Must match the sender structure
typedef struct struct_message {
    float a; //Voltage
    float b; //Current
    float c; //Power
    float d; //VGs
    float e; //SysTemp
    int f; //Message type
    int g; //DAC setpoint
    float h; //Luminance
    float i; //PanelTemp
} struct_message;

//Structure example to send data
//Must match the receiver structure
typedef struct struct_message1 {
    int state;
    unsigned int steps;
    unsigned int averages;
} struct_message1;

int voltageval = 0;
int currentval = 0;
int powerval = 0;
float max_power = 0;
float mpp_voltage = 0;
float mpp_current = 0;
```

```

unsigned int y = 1;
unsigned int z = 10;
const int chipSelect = 5;
String dataString = "";
int save_to_sd = 0;
//unsigned long previous_millis = millis();

// Create a struct_message called myData
struct_message myData;
struct_message1 datatosend;

void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("\r\nLast Packet Send Status:\t");
    //Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "Delivery Success" :
"Delivery Fail");
    if (status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS) {
        Serial.println("Delivery Success");
        myNex.writeStr("constatbox.txt", "Connected");
    }
    else {
        Serial.println("Delivery Fail");
        myNex.writeStr("constatbox.txt", "Disconnected");
    }
}

// callback function that will be executed when data is received
void OnDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingData, int
len) {
    memcpy(&myData, incomingData, sizeof(myData));
    Serial.print("Bytes received: ");
    Serial.print(len);
    Serial.print("\tVoltage: ");
    Serial.print(myData.a, 3);
    Serial.print("\tCurrent: ");
    Serial.print(myData.b, 3);
    Serial.print("\tPower: ");
    Serial.print(myData.c, 3);
    Serial.print("\tVGs: ");
    Serial.print(myData.d);
    Serial.print("\tSysTemp: ");
    Serial.print(myData.e);
    Serial.print("\tDAC Setpoint: ");
    Serial.print(myData.g);
    Serial.print("\tLuminance: ");
    Serial.print(myData.h);
    Serial.print("\tPanelTemp: ");
    Serial.print(myData.i);
    Serial.print("\tStatus: ");
    Serial.println(myData.f);

    if (myData.f == 1) { //----- Measurements Running -----
        if (myData.a <= 0) {
            myData.a = 0;
        }
        if (myData.b <= 0) {
            myData.b = 0;
        }
        if (myData.c > max_power) { // Find the MPP and keep the MPP Voltage
            max_power = myData.c;
        }
    }
}

```

```

    mpp_voltage = myData.a;
    mpp_current = myData.b;
}

//unsigned int y = myNex.readNumber("t6.bco"); // Read if power box
is green
//if (y == 24265) {
myNex.writeStr("t1.txt", "Voltage:"); // Set power text to "Power"
myNex.writeNum("t4.bco", 65535); // Set power box background to
white
myNex.writeStr("t3.txt", "Power:"); // Set power text to "Power"
myNex.writeNum("t6.bco", 65535); // Set power box background to
white
myNex.writeStr("t2.txt", "Current:"); // Set power text to "Current"
myNex.writeNum("t5.bco", 65535); // Set power box background to
white
//}

String tempString = String(myData.a, 2); // Voltage box
myNex.writeStr("t4.txt", tempString);

String tempString1 = String(myData.b, 2); // Current box
myNex.writeStr("t5.txt", tempString1);

String tempString2 = String(myData.c, 2); // Power box
myNex.writeStr("t6.txt", tempString2);

String tempString3 = String(myData.d, 2); // Vgs box
myNex.writeStr("t11.txt", tempString3);

String tempString4 = String(myData.i, 1); // Panel Temperture box
myNex.writeStr("t14.txt", tempString4);

String tempString5 = String(myData.h, 1); // Luminance box
myNex.writeStr("t7.txt", tempString5);

if ((millis() - refresh_timer) > REFRESH_TIME) {
    voltageval = myData.a * 137 / 100; //30
    currentval = myData.b * 137 / 10; //3.5
    powerval = myData.c * 137 / 120; //100
    myNex.writeNum("NvoltageGraph.val", voltageval);
    myNex.writeNum("NcurrentGraph.val", currentval);
    myNex.writeNum("NpowerGraph.val", powerval); // NvoltageGraph.val
is a variable that we have create on Nextion.
    myNex.writeNum("progress.val", (myData.g / 4095.0) * 100.0);
    refresh_timer = millis();
}

dataString += String(myData.a);
dataString += ",";
dataString += String(myData.b);
dataString += ",";
dataString += String(myData.c);
dataString += ",";
dataString += String(myData.h);
dataString += ",";
dataString += String(myData.i);
dataString += "\r\n";
}

```

```

else if (myData.f == 0) //----- Measurements Finished -----
{
  myNex.writeStr("t1.txt", " MPP Voltage:");
  myNex.writeNum("t4.bco", 24265);
  String tempString6 = String(mpp_voltage, 2); // MPP Voltage
  myNex.writeStr("t4.txt", tempString6);

  myNex.writeStr("t2.txt", " MPP Current:");
  myNex.writeNum("t5.bco", 24265);
  String tempString7 = String(mpp_current, 2); // MPP Current
  myNex.writeStr("t5.txt", tempString7);

  myNex.writeStr("t3.txt", " Max Power:");
  myNex.writeNum("t6.bco", 24265);
  String tempString8 = String(max_power, 2); // MPP Power
  myNex.writeStr("t6.txt", tempString8);

  myNex.writeStr("t11.txt", "0");

  myNex.writeNum("NvoltageGraph.val", 0);
  myNex.writeNum("NcurrentGraph.val", 0);
  myNex.writeNum("NpowerGraph.val", 0);
  myNex.writeNum("bt0.val", 0);
  myNex.writeStr("bt0.txt", "Cycle Start");
  myNex.writeNum("bt0.bco", 50712);

  if (save_to_sd == 1) {
    Serial.print("Saving to Sd... ");
    rtc.refresh();
    String filename = "";
    filename += "/";
    filename += String(rtc.day());
    filename += "-";
    filename += String(rtc.month());
    filename += "-";
    filename += String(rtc.year());
    filename += " ";
    filename += String(rtc.hour());
    filename += "_";
    filename += String(rtc.minute());
    filename += "_";
    filename += String(rtc.second());
    filename += ".txt";

    for (int try_count = 0 ; try_count < 20 ; try_count++) {
      Serial.print("Mount TRY: ");
      Serial.println(try_count);
      if (SD.begin(chipSelect)) {
        Serial.println("Card Mount SUCCESS");
        break;
      }
      else {
        Serial.println("Card Mount Failed");
      }
    }
    //      if (!SD.begin(chipSelect)) {
    //        Serial.println("Card Mount Failed");
    //      }
    writeFile(SD, filename.c_str(), dataString.c_str());
    Serial.println(" Done.");
  }
}

```

```

    }
    myNex.writeNum("progress.val", 0);
    dataString = "";
    mpp_voltage = 0;
    mpp_current = 0;
    max_power = 0;
}

else if (myData.f == 2) //----- Overcurrent protection --
-----
{
    myNex.writeStr("status.txt", "Overcurrent");
    myNex.writeNum("status.bco", 63488); //red
}

else if (myData.f == 3) //----- Overvoltage protection --
-----
{
    myNex.writeStr("status.txt", "Overvoltage");
    myNex.writeNum("status.bco", 63488); //red
}

else if (myData.f == 4) //----- Overtemp protection ----
-----
{
    myNex.writeStr("status.txt", "Overtemp");
    myNex.writeNum("status.bco", 63488); //red
}

else if (myData.f == 5) //----- Overpower protection ----
-----
{
    myNex.writeStr("status.txt", "Overpower");
    myNex.writeNum("status.bco", 63488); //red
}

else if (myData.f == 6) //----- LIVE DATA / Measurment
not running -----
{
    String tempString9 = String(myData.a, 2); // Convert the float value
to String, with 1 decimal place
    myNex.writeStr("voltlivevalue.txt", tempString9); // Write the
String value to t0 Textbox component
    if (myData.a >= 75) {
        myNex.writeNum("voltlivevalue.bco", 63488);
        myNex.writeNum("voltlivevalue.pco", 65535);
    }
    else if (myData.a >= 50 && myData.a < 75) {
        myNex.writeNum("voltlivevalue.bco", 61378);
        myNex.writeNum("voltlivevalue.pco", 0);
    }
    else {
        myNex.writeNum("voltlivevalue.bco", 65535);
        myNex.writeNum("voltlivevalue.pco", 0);
    }
    String tempString10 = String(myData.e, 1); // Convert the float
value to String, with 1 decimal place
    myNex.writeStr("systempval.txt", tempString10);
}

```

```

    String tempString11 = String(myData.h, 1); // Convert the float
value to String, with 1 decimal place
    myNex.writeStr("t7.txt", tempString11);

    String tempString12 = String(myData.i, 1); // Convert the float
value to String, with 1 decimal place
    myNex.writeStr("t14.txt", tempString12);
}
}

void trigger1() {
    datatosend.state = 1;
    esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &datatosend,
sizeof(datatosend));
}

void trigger2() {
    datatosend.state = 0;
    esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &datatosend,
sizeof(datatosend));
}

void trigger3() { //----- Store averages and Step size values -----
-----
    y = myNex.readNumber("averagesval.val"); // Store to y the color
number of the background of button b0
    datatosend.averages = y;
    z = myNex.readNumber("stepsizeval.val"); // Store to y the color
number of the background of button b0
    datatosend.steps = z;
    datatosend.state = 0; //Stop the Cycle
    esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &datatosend,
sizeof(datatosend));
}

void trigger4() { // ----- Reset Alarm -----
    myNex.writeStr("status.txt", "Normal");
    myNex.writeNum("status.bco", 11874); //green
}

void trigger5() { // ----- Save to SD checkbox -----
    save_to_sd = myNex.readNumber("c0.val");
}

void trigger6() { // ----- Test Connection -----
    datatosend.state = 0; //Stop the Cycle
    esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &datatosend,
sizeof(datatosend));
}

void writeFile(fs::FS & fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Writing file: %s\n", path);

    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if (!file) {
        Serial.println("Failed to open file for writing");
        return;
    }
    if (file.print(message)) {
        Serial.println("File written");
    }
}

```

```

    } else {
        Serial.println("Write failed");
    }
    file.close();
}

void setup() {
    // Initialize Serial Monitor
    Serial.begin(115200);
    myNex.begin(115200);
    // pinMode(35, INPUT);
    // analogSetCycles(128);
    // analogSetSamples(10);

    URTCLIB_WIRE.begin(); //RTC library

    // Set device as a Wi-Fi Station
    WiFi.mode(WIFI_STA);

    // Init ESP-NOW
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        //Serial.println("Error initializing ESP-NOW");
        return;
    }

    // Once ESPNow is successfully Init, we will register for recv CB to
    // get recv packer info
    esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

    // Register peer
    esp_now_peer_info_t peerInfo;
    memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
    peerInfo.channel = 0;
    peerInfo.encrypt = false;

    // Add peer
    if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
        //myNex.writeStr("constatbox.txt", "Disconnected");
        //return;
    }
    else {
        //myNex.writeStr("constatbox.txt", "Connected");
    }

    // if (!SD.begin(chipSelect)) {
    //     //Serial.println("Initialization failed!");
    //     //while (1);
    // }
}

void loop() {
    myNex.NextionListen();
    //Serial.println(readBattery());
    delay(100);
}

```