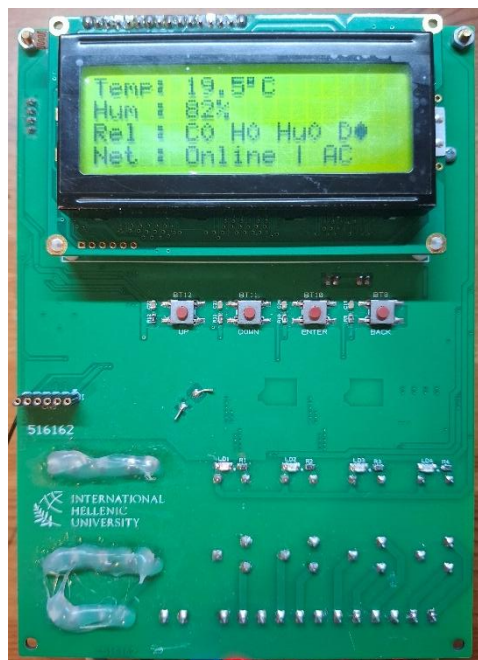


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδίαση και ανάπτυξη έξυπνου συστήματος ελέγχου
συνθηκών αποθήκευσης κρασιού με χρήση ESP32»



Του φοιτητή
Αλέξανδρου Χρήστου
Αρ. Μητρώου: 516162

Επιβλέπουσα
Μαρία Παπαδοπούλου
Επίκουρη Καθηγήτρια

Ημερομηνία 31-05-2026

Τίτλος Δ.Ε. Σχεδίαση και ανάπτυξη έξυπνου συστήματος ελέγχου συνθηκών αποθήκευσης κρασιού
με χρήση ESP32

Κωδικός Δ.Ε. 25179

Ονοματεπώνυμο φοιτητή Αλέξανδρος Χρήστου

Ονοματεπώνυμο εισηγητή Μαρία Παπαδοπούλου

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε 13-03-2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε 31-05-2026

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

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

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

Πρόλογος

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος προέκυψε από το ενδιαφέρον μου για τα ενσωματωμένα συστήματα, τα ηλεκτρονικά κυκλώματα και τις εφαρμογές αυτοματισμού σε πραγματικά περιβάλλοντα. Μέσα από την εκπόνηση της εργασίας είχα την ευκαιρία να ασχοληθώ με τον σχεδιασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, την ανάπτυξη λογισμικού για μικροελεγκτή, καθώς και τη δοκιμή και αξιολόγηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος.

Η διαδικασία υλοποίησης της εργασίας συνέβαλε σημαντικά στην εμβάθυνση των γνώσεων μου στους τομείς των ενσωματωμένων συστημάτων. Παράλληλα, μου έδωσε την ευκαιρία να εφαρμόσω στην πράξη γνώσεις που αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η διατήρηση κατάλληλων περιβαλλοντικών συνθηκών αποτελεί βασικό παράγοντα για τη διασφάλιση της ποιότητας του κρασιού κατά τη διάρκεια της αποθήκευσής του. Παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και ο φωτισμός μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητά του και να οδηγήσουν σε ποιοτική υποβάθμιση όταν δεν διατηρούνται εντός επιτρεπτών ορίων.

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός ενσωματωμένου συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου των περιβαλλοντικών συνθηκών σε χώρους αποθήκευσης κρασιού. Το σύστημα βασίζεται σε μικροελεγκτή ESP32 και χρησιμοποιεί αισθητήρες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της φωτεινότητας του χώρου. Τα δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται σε πραγματικό χρόνο, ενώ ανάλογα με τις τιμές των μετρήσεων ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται κατάλληλες έξοδοι ελέγχου, μέσω ρελέ, για τη ρύθμιση των συνθηκών του χώρου.

Επιπλέον, το σύστημα διαθέτει οθόνη LCD για την τοπική απεικόνιση των μετρήσεων και των πληροφοριών λειτουργίας, καθώς και δυνατότητα επεξεργασίας των κατωφλίων ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των ρελέ. Παράλληλα, μέσω σύνδεσης Wi-Fi οι μετρήσεις αποστέλλονται σε διαδικτυακή πλατφόρμα, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση καθώς και την καταγραφή τους σε μορφή διαγραμμάτων.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές για την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος, επιβεβαιώνοντας την ορθή λειτουργία των επιμέρους υποσυστημάτων καθώς και την αξιοπιστία των μετρήσεων.

«Design and Implementation of a Smart Wine Storage Condition Monitoring and Control System Using ESP32»

«ALEXANDROS CHRISTOU»

Abstract

Maintaining appropriate environmental conditions is a key factor in ensuring the quality of wine during storage. Parameters such as temperature, relative humidity, and light exposure can significantly affect wine and may lead to quality degradation when they are not maintained within acceptable limits.

The objective of this thesis is the design and implementation of an embedded system for monitoring and controlling environmental conditions in wine storage areas. The system is based on an ESP32 microcontroller and utilizes sensors to measure temperature, relative humidity, and light levels in the storage environment. The collected data are processed in real time, and depending on the measured values, appropriate control outputs are activated or deactivated through relays to regulate the environmental conditions of the storage space.

Additionally, the system includes an LCD display for the local visualization of measurements and operational information, as well as the capability for the user to configure the activation and deactivation thresholds of the relays. Furthermore, a Wi-Fi connection was used to transmit the measurements to an online platform, enabling remote monitoring and recording of environmental data in the form of graphical representations.

Finally, experimental tests were conducted to evaluate the performance of the system, confirming the correct operation of the individual subsystems and the reliability of the measurements.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και τους συναδέλφους μου για τη βοήθεια και τη συμπαράστασή τους σε όλη αυτή την προσπάθεια.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	1
Περίληψη.....	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Σχημάτων	8
Κατάλογος Πινάκων.....	9
Συντομογραφίες.....	9
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες αποθήκευσης κρασιού	1
1.3 Προβλήματα παραδοσιακής αποθήκευσης κρασιού	2
1.4 Ρόλος αυτοματισμών & IoT στη διαχείριση αποθήκευσης.....	2
1.5 Στόχος της παρούσας εργασίας	3
1.6 Δομή της εργασίας	3
2 Κεφάλαιο 2ο: Σχεδιασμός Υλικού Συστήματος.....	4
2.1 Εισαγωγή	4
2.2 Μικροελεγκτής ESP32	4
2.2.1 Εισαγωγή	4
2.2.2 Αρχιτεκτονική του ESP32	5
2.2.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά.....	6
2.2.4 Ρόλος του ESP32 στο παρόν σύστημα	6
2.3 Τροφοδοσία Συστήματος	7
2.3.1 Πηγή τροφοδοσίας.....	7
2.3.2 Μετατροπή Εναλλασσόμενης σε Συνεχή Τάση	7
2.3.3 Σταθεροποίηση Τάσης.....	9
2.3.4 Μπαταρίες Ni-MH.....	13
2.3.5 Κύκλωμα Φόρτισης Μπαταρίας.....	13
2.4 Υποσύστημα Αισθητήρων.....	15
2.4.1 Αισθητήρας Θερμοκρασίας / Υγρασίας	16
2.4.2 Αισθητήρας Φωτεινότητας	17
2.5 Υποσύστημα Εξόδων	18

2.5.1	Ρελέ.....	18
2.5.2	ULN2003A.....	19
2.6	Υποσύστημα Διεπαφής Χρήστη.....	21
2.6.1	Οθόνη LCD	21
2.6.2	Μηχανικά πλήκτρα.....	23
2.6.3	Βομβητής.....	23
2.7	Σχεδίαση Πλακέτας.....	24
2.7.1	Γενικά χαρακτηριστικά πλακέτας.....	24
2.7.2	Τοποθέτηση υποσυστημάτων	24
2.7.3	Δρομολόγηση αγωγίμων διαδρομών (Routing).....	25
2.7.4	Σχεδιαστικές απαιτήσεις layout για τους μετατροπείς buck.....	25
3	Κεφάλαιο 3 ^ο : Λογισμικό Συστήματος.....	30
3.1	Εισαγωγή.....	30
3.2	Ροή λειτουργίας και χρονισμός λογισμικού	30
3.3	Υποσύστημα Αισθητήρων.....	34
3.3.1	Αισθητήρας DHT22	34
3.3.2	Ανίχνευση φωτισμού	36
3.3.3	Καταγραφή ημερήσιας διάρκειας φωτισμού.....	36
3.3.4	Ανίχνευση κατάστασης τροφοδοσίας.....	37
3.4	Υποσύστημα ελέγχου	38
3.4.1	Έλεγχος υγρασίας και θερμοκρασίας.....	38
3.4.2	Εφαρμογή εξόδων.....	40
3.5	Υποσύστημα διεπαφής χρήστη (LCD & Πλήκτρα)	41
3.5.1	Ανάγνωση πλήκτρων και αποθορυβοποίηση	41
3.5.2	Μηχανή καταστάσεων οθονών (Screen state machine)	42
3.5.3	Απεικόνιση στην LCD (Home screen)	43
3.6	Διαχείριση παραμέτρων και περιορισμοί ασφαλείας	45
3.7	Δικτύωση και αποστολή δεδομένων (IoT).....	45
3.7.1	Διαχείριση Wi-Fi σύνδεσης.....	45
3.7.2	Συγχρονισμός ώρας (NTP)	46
3.7.3	Αποθήκευση δειγμάτων σε buffer (offline λειτουργία).....	47
3.7.4	Αποστολή στο ThingSpeak και catch-up.....	48
3.8	Σύνοψη	49
4	Κεφάλαιο 4 ^ο : Πειραματική αξιολόγηση.....	51
4.1	Εισαγωγή.....	51

4.1.1	Πλακέτα επαλήθευσης εξόδων	51
4.2	Έλεγχος τροφοδοσίας.....	53
4.2.1	Μετά τον μετασχηματιστή (AC)	53
4.2.2	Μετά την ανόρθωση και εξομάλυνση	54
4.2.3	Buck converter.....	54
4.2.4	Ρεύμα φόρτισης μπαταρίας.....	55
4.2.5	Θερμική συμπεριφορά συστήματος.....	57
4.2.6	Μέτρηση κατανάλωσης ρεύματος.....	58
4.3	Έλεγχος Αισθητήρων	59
4.4	Απόκριση Συστήματος	61
4.5	Κατάσταση λειτουργίας (Network + Power)	63
4.6	Έλεγχος αποστολής δεδομένων στο ThingSpeak.....	65
4.6.1	Κανονική λειτουργία αποστολής.....	65
4.6.2	Λειτουργία επανασύνδεσης	66
4.6.3	Δοκιμή λειτουργίας απομακρυσμένης καταγραφής σε πραγματικές συνθήκες	67
4.7	Συνολική αξιολόγηση λειτουργίας συστήματος.....	69
5	Κεφάλαιο 5 ^ο : Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές	70
5.1	Συμπεράσματα.....	70
5.2	Περιορισμοί συστήματος	70
5.3	Μελλοντικές επεκτάσεις.....	71
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72
	Παράρτημα Α: Σχηματικό Διάγραμμα	73
	Παράρτημα Β : Εγχειρίδιο Χρήσης Συσκευής.....	76

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 2.1 – Module ESP32-WROOM-32UE	4
Εικόνα 2.2 – block diagram ESP32-WROOM-32UE	5
Εικόνα 2.3 – Μετατροπή εναλλασσόμενης σε συνεχή τάση.....	8
Εικόνα 2.4 – Διακοπτικός μετατροπέας buck για παραγωγή τάσης 3.3 V.....	9
Εικόνα 2.5 – Διακοπτικός μετατροπέας buck για παραγωγή τάσης 5 V.....	10
Εικόνα 2.6 – Συστοιχία επαναφορτιζόμενων μπαταριών Ni-MH.....	13
Εικόνα 2.7 – Κύκλωμα φόρτισης Ni-MH	14
Εικόνα 2.8 – Αποτελέσματα προσομοίωσης SPICE του κυκλώματος φόρτισης.....	15
Εικόνα 2.9 – Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22.	16
Εικόνα 2.10 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του αισθητήρα DHT22.	17
Εικόνα 2.11 – Αισθητήρας Φωτεινότητας	17
Εικόνα 2.12 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του αισθητήρα LC5527.	18
Εικόνα 2.13 – Pinout του ολοκληρωμένου κυκλώματος ULN2003A (top view).	19
Εικόνα 2.14 – Εσωτερική δομή ενός καναλιού του ULN2003A	19
Εικόνα 2.15 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του ULN2003A.	20
Εικόνα 2.16 – Οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) τύπου 20×4.	21
Εικόνα 2.17 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του LCD.	22
Εικόνα 2.18 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης των μπουτόν.	23
Εικόνα 2.19 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του βομβητή.	24
Εικόνα 2.20 – Layout της πλακέτας PCB: (α) Top layer, (β) Bottom layer.....	27
Εικόνα 2.21 – Κατασκευασμένη πλακέτα PCB χωρίς εξαρτήματα: (α) επάνω όψη και (β) κάτω όψη.	28
Εικόνα 2.22 – Κατασκευασμένη πλακέτα PCB με εξαρτήματα: (α) επάνω όψη και (β) κάτω όψη.	29
Εικόνα 3.1 – Διάγραμμα ροής κύριας λειτουργίας του συστήματος.....	32
Εικόνα 4.1 – Σχηματικό βοηθητικής πλακέτας ενδείξεων	50
Εικόνα 4.2 – Υλοποίηση PCB βοηθητικής πλακέτας ενδείξεων	51
Εικόνα 4.3 – Υλοποίηση PCB βοηθητικής πλακέτας ενδείξεων(BOTTOM).....	51
Εικόνα 4.4 – βοηθητικής πλακέτας ενδείξεων (TOP).....	52
Εικόνα 4.5 – Κυματομορφή τάσης στην έξοδο του μετασχηματιστή	52
Εικόνα 4.6 – Τάση μετά τη γέφυρα ανόρθωσης και το στάδιο εξομάλυνση	53
Εικόνα 4.7 – Μετρήσεις τάσης εξόδου των μετατροπέων 5 V και 3.3 V	54
Εικόνα 4.8 – Μέτρηση ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας.....	55
Εικόνα 4.9 – Μέτρηση τάσης μπαταρίας (α) πριν τη φόρτιση και (β) μετά από 8 ώρες λειτουργίας του συστήματος με ενεργό το κύκλωμα φόρτισης.....	56
Εικόνα 4.10 – Θερμικές εικόνες βασικών εξαρτημάτων της πλακέτας	57
Εικόνα 4.11 – Μέτρηση ρεύματος κατανάλωσης του συστήματος: (α) λειτουργία με κύρια τροφοδοσία AC και (β) λειτουργία με εφεδρική μπαταρία.....	58
Εικόνα 4.12 – Σύγκριση μετρήσεων θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήρα DHT22 και του οργάνου αναφοράς για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας	59
Εικόνα 4.13 – Σύγκριση μετρήσεων σχετικής υγρασίας μεταξύ του αισθητήρα DHT22 και του οργάνου αναφοράς για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας.	59
Εικόνα 4.14 – Μεταβολή ένδειξης φωτεινότητας κατά τη μεταβολή των συνθηκών φωτισμού.....	60
Εικόνα 4.15 – Ρυθμίσεις των κατωφλίων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας	61
Εικόνα 4.16 – Ενεργοποίηση εξόδου ψύξης και θέρμανσης.....	61
Εικόνα 4.17 – Ενεργοποίηση εξόδου υγραντήρα και αφυγραντήρα.....	62

Εικόνα 4.18 – Ένδειξη λειτουργίας συστήματος με κύρια τροφοδοσία (AC)	63
Εικόνα 4.19 – Ένδειξη λειτουργίας συστήματος με εφεδρική τροφοδοσία (Bat).....	63
Εικόνα 4.20 – Ένδειξη κατάστασης δικτύου με συνδεδεμένη κεραία (Online).....	63
Εικόνα 4.21 – Ένδειξη κατάστασης δικτύου χωρίς συνδεδεμένη κεραία (Offline).....	64
Εικόνα 4.22 – Ένδειξη μη έγκυρης μέτρησης αισθητήρα στην LCD	64
Εικόνα 4.23 – Κανονικός ρυθμός αποστολής	65
Εικόνα 4.24 – Αυξημένος ρυθμός αποστολής δεδομένων	66
Εικόνα 4.25 – Μεταβολή θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια 24 ωρών	67
Εικόνα 4.26 – Μεταβολή σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια 24 ωρών.....	67
Εικόνα 4.27 – Ημερήσια διάρκεια λειτουργίας φωτισμού	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 – Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή ESP32	6
Πίνακας 2.2 – Ακροδέκτες GPIO του ESP32 που χρησιμοποιούνται στο σύστημα.....	6
Πίνακας 2.3 – Αντιστοίχιση ακροδεκτών του αισθητήρα DHT22 με το σύστημα	16

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
AC	Alternating Current (Εναλλασσόμενο Ρεύμα)
DC	Direct Current (Συνεχές Ρεύμα)
PCB	Printed Circuit Board (Πλακέτα Τυπωμένου Κυκλώματος)
GPIO	General Purpose Input/Output
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
ESR	Equivalent Series Resistance (Ισοδύναμη Σειριακή Αντίσταση)
RMS	Root Mean Square (Ενεργός τιμή)
VA	Volt-Ampere
FB	Feedback (Ανάδραση)
Ni-MH	Nickel Metal Hydride
IoT	Internet of Things
Wi-Fi	Wireless Fidelity
NTP	Network Time Protocol

UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
I ² C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
LCD	Liquid Crystal Display
LDR	Light Dependent Resistor
API	Application Programming Interface

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Το κρασί αποτελεί ένα αγροδιατροφικό προϊόν του οποίου η ποιότητα δεν παραμένει σταθερή μετά την εμφιάλωση, αλλά ενδέχεται να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της αποθήκευσής του [1]. Πρόκειται για ένα χημικά ενεργό προϊόν, του οποίου τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, όπως το άρωμα, το χρώμα και η γεύση, επηρεάζονται άμεσα από τις συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αποθηκεύεται [1], [2]. Ανάλογα με τον τύπο του κρασιού, ο στόχος της αποθήκευσης μπορεί να είναι είτε η ελεγχόμενη ωρίμανσή του είτε η διατήρηση της αρχικής του ποιότητας έως την κατανάλωση. Σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες φύλαξης δεν είναι οι βέλτιστες, ενδέχεται να παρατηρηθεί ποιοτική υποβάθμιση του προϊόντος [2].

Οι συνθήκες αποθήκευσης, επομένως, κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικές για τη διατήρηση της ποιότητας του κρασιού. Παράγοντες του περιβάλλοντος μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη σταθερότητα του προϊόντος και να μεταβάλουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του, ιδιαίτερα όταν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις από τα συνιστώμενα επίπεδα [2], [3]. Για τον λόγο αυτό, η σωστή διαχείριση των περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες φυλάσσεται το κρασί κρίνεται απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητάς του.

Στην επόμενη ενότητα αναλύονται οι βασικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του κρασιού κατά την αποθήκευση.

1.2 Περιβαλλοντικοί παράγοντες αποθήκευσης κρασιού

Οι πιο κρίσιμοι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του κρασιού κατά την αποθήκευση είναι η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και ο φωτισμός [1], [2]. Η θερμοκρασία μεταβάλλει τον ρυθμό των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του κρασιού, επηρεάζοντας την εξέλιξη και τη σταθερότητά του [1]. Η σχετική υγρασία μπορεί να επηρεάσει την κατάσταση του πώματος και τη στεγανότητα της φιάλης, ενώ ο φωτισμός επηρεάζει τα αρωματικά χαρακτηριστικά του κρασιού, κυρίως λόγω της πρόκλησης φωτοχημικών αλλοιώσεων [2].

Επομένως, η ανάγκη διατήρησης σταθερών και ελεγχόμενων τιμών των παραπάνω παραμέτρων κρίνεται απαραίτητη για τη διατήρηση της ποιότητας του κρασιού. Στις επόμενες υποενότητες αναλύεται η επίδραση καθεμίας από τις παραμέτρους αυτές, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ποιοτική υποβάθμιση του κρασιού όταν δεν διατηρούνται εντός των επιθυμητών ορίων.

Θερμοκρασία

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του κρασιού κατά την αποθήκευση είναι η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, όταν το κρασί εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες, οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό της φιάλης επιταχύνονται, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ποιότητας του. Αντίθετα, σε περιπτώσεις πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, οι χημικές διεργασίες πραγματοποιούνται με βραδύτερο ρυθμό, με αποτέλεσμα την επιβράδυνση της εξέλιξης και της ωρίμανσης του κρασιού. Για τον λόγο αυτό, αναφέρεται ότι το ιδανικό εύρος θερμοκρασίας αποθήκευσης κυμαίνεται περίπου μεταξύ 15 και 20 °C [1].

Εκτός από την απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας, ιδιαίτερη σημασία έχει και η σταθερότητά της. Οι συχνές και έντονες θερμικές μεταβολές μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη χημική σταθερότητα του κρασιού, συμβάλλοντας στην εμφάνιση ανεπιθύμητων αλλοιώσεων της ποιότητάς του. Επομένως, η

διατήρηση ενός σταθερού και ελεγχόμενου θερμικού περιβάλλοντος αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση της ποιότητας του κρασιού κατά την αποθήκευση [2].

Υγρασία

Η τιμή της σχετικής υγρασίας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ποιότητας του κρασιού κατά την αποθήκευση. Αρχικά, η έκθεση του προϊόντος σε περιβάλλον χαμηλής υγρασίας μπορεί να προκαλέσει ξήρανση του φελλού, η οποία οδηγεί σε συρρίκνωση ή στη δημιουργία ρωγμών. Η φθορά του πώματος επιτρέπει την είσοδο οξυγόνου στη φιάλη από το περιβάλλον αποθήκευσης, γεγονός που επιταχύνει τις οξειδωτικές αλλοιώσεις του κρασιού. Αντίθετα, η αποθήκευση του κρασιού σε χώρο με υψηλή σχετική υγρασία ενδέχεται να οδηγήσει στην ανάπτυξη μούχλας στον φελλό ή στην ετικέτα, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την εμφάνιση και τη γενική κατάσταση της φιάλης κατά την αποθήκευση [2].

Φωτεινότητα

Η φωτεινότητα αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα του κρασιού κατά την αποθήκευση. Η έκθεση του κρασιού στο φως προκαλεί την εμφάνιση ανεπιθύμητων οσμών και την αλλοίωση των αρωματικών του χαρακτηριστικών, ιδιαίτερα στην περίπτωση των λευκών κρασιών, ως αποτέλεσμα φωτοχημικών αντιδράσεων που προκαλούνται από το φως. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως lightstruck flavour [1], [2]. Επομένως, κρίνεται αναγκαίος ο περιορισμός της έκθεσης του κρασιού στο φως κατά την αποθήκευσή του για τη διατήρηση της ποιότητάς του.

1.3 Προβλήματα παραδοσιακής αποθήκευσης κρασιού

Το κελάρι αποθήκευσης κρασιού (wine cellar) αποτελεί ειδικά διαμορφωμένο χώρο που προορίζεται για τη διατήρηση φιαλών ή βαρελιών κρασιού υπό κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι χώροι αυτοί διακρίνονται σε ενεργούς (active) και παθητικούς (passive), ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης των συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας. Στους ενεργούς χώρους, οι περιβαλλοντικές παράμετροι ρυθμίζονται μέσω συστημάτων ελέγχου κλίματος, ενώ στους παθητικούς η σταθερότητα βασίζεται κυρίως στα φυσικά χαρακτηριστικά του χώρου, χωρίς την ύπαρξη συστήματος ελέγχου κλίματος [4].

Η απουσία συστήματος ρύθμισης των περιβαλλοντικών συνθηκών σημαίνει ότι, σε περίπτωση απόκλισης των κρίσιμων παραμέτρων αποθήκευσης, δεν υπάρχει άμεσος μηχανισμός αποκατάστασης των επιθυμητών τιμών, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα του κρασιού. Επιπλέον, στους χώρους αυτούς συνήθως δεν υφίσταται ολοκληρωμένο σύστημα καταγραφής των συνθηκών περιβάλλοντος. Ως αποτέλεσμα, η αξιολόγηση της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και του φωτισμού βασίζεται κυρίως στην ανθρώπινη παρέμβαση και δεν πραγματοποιείται σε συνεχή βάση. Η απουσία αυτοματοποιημένης παρακολούθησης μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερημένη ανίχνευση αποκλίσεων από τα επιθυμητά επίπεδα και δεν επιτρέπει την ανάλυση των διακυμάνσεων σε βάθος χρόνου ούτε την αξιόπιστη αξιολόγηση των συνθηκών αποθήκευσης.

1.4 Ρόλος αυτοματισμών & IoT στη διαχείριση αποθήκευσης

Αυτοματισμό ονομάζουμε το σύνολο των τεχνολογιών που επιτρέπουν τη λειτουργία μηχανών ή συστημάτων με ελάχιστη ή χωρίς άμεση ανθρώπινη παρέμβαση, συμβάλλοντας στη βελτίωση της αξιοπιστίας, της ακρίβειας και της αποδοτικότητας των διεργασιών [5]. Στην αποθήκευση ευαίσθητων προϊόντων, όπως το κρασί, η αξιοποίηση αυτοματοποιημένων συστημάτων καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει τη διατήρηση σταθερών και ελεγχόμενων συνθηκών.

Η υλοποίηση ενός τέτοιου αυτοματοποιημένου συστήματος βασίζεται συνήθως σε ενσωματωμένες ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες επιτρέπουν τη συνεχή μέτρηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων μέσω αισθητήρων και την επεξεργασία των δεδομένων από μονάδες ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό, σε περίπτωση απόκλισης από τις επιθυμητές τιμές, το σύστημα μπορεί να ενεργοποιεί κατάλληλους μηχανισμούς ρύθμισης. Επιπλέον, η χρήση τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) επιτρέπει τη διασύνδεση του συστήματος με διαδικτυακές πλατφόρμες, καθιστώντας δυνατή την αποθήκευση ιστορικών δεδομένων και την απομακρυσμένη παρακολούθηση της διακύμανσης των τιμών. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει τη διαφάνεια και την αξιοπιστία της διαδικασίας ελέγχου, καθώς ο χρήστης μπορεί να ενημερώνεται άμεσα σε περίπτωση απόκλισης από τα επιθυμητά επίπεδα.

1.5 Στόχος της παρούσας εργασίας

Ο στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου περιβαλλοντικών συνθηκών για χώρους φύλαξης κρασιών, με σκοπό την διατήρηση της ποιότητας του κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο ενσωματωμένο σύστημα, το οποίο συλλέγει δεδομένα από το περιβάλλον μέσω κατάλληλων αισθητήρων και τα επεξεργάζεται σε πραγματικό χρόνο. Με βάση τις μετρήσεις αυτές, το σύστημα είναι σε θέση να ενεργοποιεί ή να απενεργοποιεί εξόδους ελέγχου, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στη διατήρηση των επιθυμητών περιβαλλοντικών συνθηκών.

Επιπλέον, στο σύστημα περιλαμβάνεται οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) για την απεικόνιση των μετρήσεων και λοιπών χρήσιμων πληροφοριών. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης μπορεί να έχει άμεση εικόνα των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στον χώρο αποθήκευσης, καθώς και άλλων σημαντικών παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος.

Τέλος, το σύστημα διαθέτει τη δυνατότητα μετάδοσης των περιβαλλοντικών μετρήσεων σε διαδικτυακή βάση δεδομένων, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση της διακύμανσης των τιμών σε μορφή διαγραμμάτων.

1.6 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας, με έμφαση στη σημασία των συνθηκών αποθήκευσης του κρασιού, στους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητά του και στη γενική φιλοσοφία των αυτοματοποιημένων συστημάτων παρακολούθησης.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται ο σχεδιασμός του υλικού του συστήματος, περιλαμβάνοντας την αρχιτεκτονική του, τα επιμέρους υποσυστήματα και τα βασικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η υλοποίηση του λογισμικού, η λειτουργία του συστήματος ελέγχου, η επεξεργασία των μετρήσεων και οι μηχανισμοί απεικόνισης και επικοινωνίας.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι δοκιμές και τα πειραματικά αποτελέσματα του συστήματος, με στόχο την αξιολόγηση της λειτουργίας του και την επαλήθευση της αξιοπιστίας των μετρήσεων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις του συστήματος.

Κεφάλαιο 2^ο: Σχεδιασμός Υλικού Συστήματος

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σχεδίαση του υλικού του συστήματος και αναλύονται τα βασικά υποσυστήματα από τα οποία αυτό αποτελείται. Το υλικό μέρος της συσκευής περιλαμβάνει όλα τα ηλεκτρονικά κυκλώματα και τα επιμέρους εξαρτήματα που απαιτούνται για την τροφοδοσία, τη συλλογή των περιβαλλοντικών μετρήσεων, την επεξεργασία των δεδομένων και τον έλεγχο των αντίστοιχων εξόδων.

Αρχικά, παρουσιάζεται ο μικροελεγκτής ESP32, ο οποίος αποτελεί την κεντρική μονάδα ελέγχου της συσκευής. Στη συνέχεια αναλύεται το υποσύστημα τροφοδοσίας, το οποίο περιλαμβάνει τα στάδια μετατροπής και σταθεροποίησης της τάσης, καθώς και το κύκλωμα φόρτισης και την εφεδρική τροφοδοσία με μπαταρίες. Έπειτα, περιγράφονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της φωτεινότητας, καθώς και το υποσύστημα εξόδων που επιτρέπει τον έλεγχο των εξωτερικών φορτίων μέσω ρελέ.

Τέλος, παρουσιάζεται το υποσύστημα διεπαφής χρήστη, το οποίο περιλαμβάνει την οθόνη LCD, τα πλήκτρα χειρισμού και τον βομβητή, καθώς και η σχεδίαση της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος, μέσα από την οποία υλοποιήθηκαν και διασυνδέθηκαν όλα τα επιμέρους υποσυστήματα του συστήματος.

2.2 Μικροελεγκτής ESP32

2.2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν σύστημα χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής ESP32 της εταιρείας Espressif Systems, ένας ισχυρός και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικός μικροελεγκτής, ο οποίος έχει ευρεία εφαρμογή σε ενσωματωμένα συστήματα, κυρίως σε εφαρμογές που σχετίζονται με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του αποτελεί η ενσωμάτωση ασύρματης επικοινωνίας Wi-Fi και Bluetooth στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα [6].

Για την υλοποίηση του συστήματος επιλέχθηκε το module ESP32-WROOM-32UE, το οποίο βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα ESP32-D0WD-V3. Το module αυτό ενσωματώνει, εκτός από τον ίδιο τον μικροελεγκτή, πρόσθετα στοιχεία όπως κρυσταλλικό ταλαντωτή, μνήμη Flash και κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας Wi-Fi και Bluetooth, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα της σχεδίασης και διευκολύνοντας την αξιόπιστη υλοποίηση του συστήματος [6]. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται η αρχιτεκτονική του ESP32, τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του και ο ρόλος του στο παρόν σύστημα.



Εικόνα 2.1 – Module ESP32-WROOM-32UE [6]

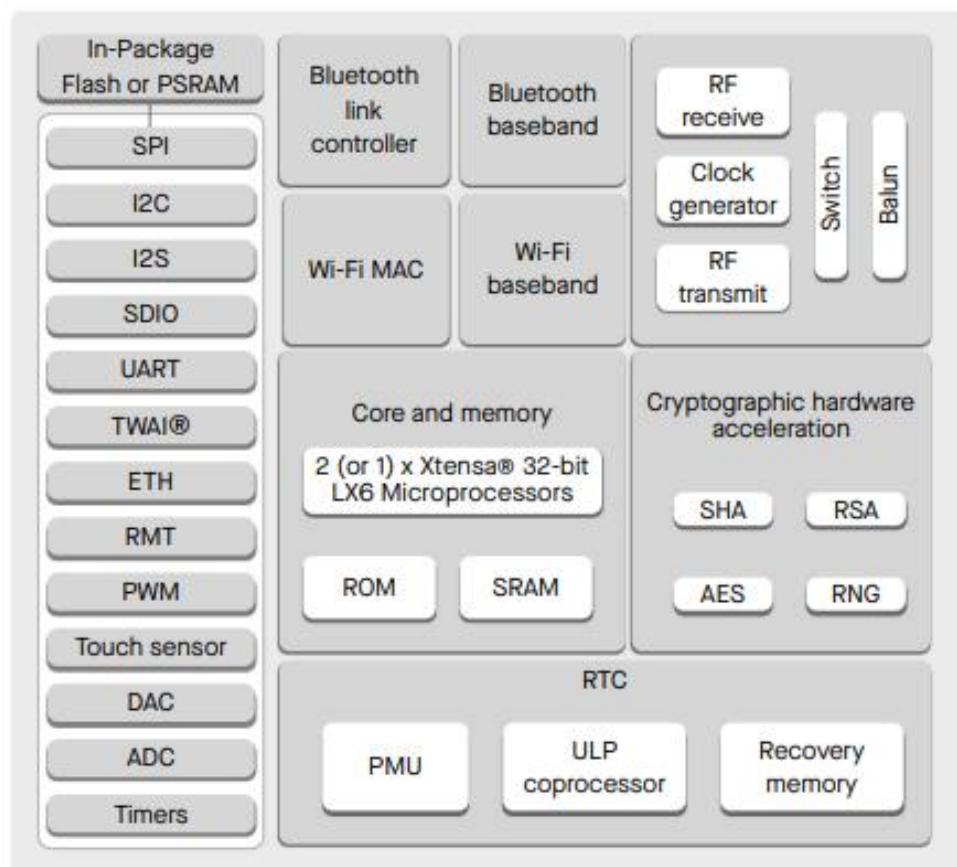
2.2.2 Αρχιτεκτονική του ESP32

Ο μικροελεγκτής διαθέτει δύο επεξεργαστικούς πυρήνες Xtensa LX6 αρχιτεκτονικής 32-bit. Οι επεξεργαστές είναι ίδιας δομής και δυνατοτήτων και μπορούν να εκτελούν διεργασίες παράλληλα, επιτρέποντας την αποδοτικότερη διαχείριση των λειτουργιών του συστήματος [6].

Σε επίπεδο μνήμης, ο ESP32 διαθέτει εσωτερική μνήμη ROM, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως κατά τη διαδικασία εκκίνησης του μικροελεγκτή καθώς και μνήμη SRAM για την εκτέλεση τμημάτων του προγράμματος και την αποθήκευση δεδομένων. Επιπλέον ESP32 διαθέτει μια ειδική μνήμη τύπου RTC SRAM η οποία χρησιμοποιείται για την διατήρηση δεδομένων όταν ο μικροελεγκτής λειτουργεί σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας [6].

Ο μικροελεγκτής διαθέτει ψηφιακές και αναλογικές εισόδους-εξόδους, καθώς και βασικές σειριακές διεπαφές επικοινωνίας, όπως I²C, UART και SPI. Μέσω των διεπαφών αυτών καθίσταται δυνατή η επικοινωνία με εξωτερικά κυκλώματα, όπως οθόνες και αισθητήρες που λειτουργούν με σειριακή επικοινωνία [6].

Ο ESP32 ενσωματώνει δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας Wi-Fi και Bluetooth, χωρίς να απαιτείται πρόσθετο εξωτερικό κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του μικροελεγκτή και τον καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) [6].



ESP32 Functional Block Diagram

Εικόνα 2.2 – block diagram ESP32-WROOM-32UE [6]

2.2.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Πίνακας 2.1 – Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή ESP32 [6]

Επεξεργαστής	Dual-Core επεξεργαστής Xtensa LX6 αρχιτεκτονικής 32-bit
Συχνότητα λειτουργίας	έως 240 MHz
Μνήμη ROM	448 KB
Μνήμη SRAM	520 KB
Μνήμη RTC SRAM	16 KB
Ασύρματη επικοινωνία	Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n και Bluetooth v4.2
Ψηφιακές εισόδου-εξόδου	Έως 34 ακροδέκτες GPIO
Αναλογικές μονάδες	ADC 12-bit, DAC 8-bit (2 κανάλια)
Τάση λειτουργίας	3.0V – 3.6V

2.2.4 Ρόλος του ESP32 στο παρόν σύστημα

Ο μικροελεγκτής αποτελεί το κεντρικό στοιχείο της συσκευής ελέγχου. Συλλέγει δεδομένα από τους αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτεινότητας, τα επεξεργάζεται και, ανάλογα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις που έχει ορίσει ο χρήστης, ελέγχει τα υποσυστήματα εξόδου. Παράλληλα, διαχειρίζεται τη διεπαφή χρήστη μέσω της οθόνης, των πλήκτρων και του βομβητή. Τέλος, αξιοποιεί τις δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας για τη μετάδοση δεδομένων σε διαδικτυακή βάση δεδομένων, ώστε ο χρήστης να μπορεί να παρακολουθεί τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο αποθήκευσης του κρασιού.

Παρότι ο μικροελεγκτής διαθέτει μεγάλο αριθμό ακροδεκτών εισόδου-εξόδου, στο σύστημα χρησιμοποιείται συγκεκριμένο σύνολο GPIO. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ακροδέκτες αυτοί και η αντιστοίχισή τους με τις λειτουργίες του συστήματος.

Πίνακας 2.2 – Ακροδέκτες GPIO του ESP32 που χρησιμοποιούνται στο σύστημα

GPIO	Λειτουργία	Ρόλος στο σύστημα
GND	--	Γείωση
3.3V	--	Τροφοδοσία 3.3V
EN	Είσοδος	Επαναφορά μικροελεγκτή
IO36	Είσοδος	Κουμπί DOWN
IO39	Αναλογική είσοδος	Μέτρηση τάσης μπαταρίας
IO34	Αναλογική είσοδος	Έλεγχος φωτεινότητας
IO35	Είσοδος	Κουμπί UP
IO32	Έξοδος	Enable LCD
IO33	Έξοδος	RS LCD

IO25	Έξοδος	Δεδομένα LCD (D4)
IO26	Είσοδος	Έλεγχος τάσης εισόδου
IO27	Έξοδος	Δεδομένα LCD (D5)
IO14	Έξοδος	Δεδομένα LCD (D6)
IO13	Έξοδος	Δεδομένα LCD (D7)
IO2	Έξοδος	Έλεγχος backlight
IO4	Έξοδος	Ρελέ 4(uIn2003A)
IO16	Έξοδος	Ρελέ 3(uIn2003A)
IO17	Έξοδος	Ρελέ 2(uIn2003A)
IO18	Έξοδος	Ρελέ 1(uIn2003A)
IO19	Έξοδος	Βομβητής
IO21	Είσοδος	Κουμπί BACK
IO22	Είσοδος	Κουμπί ENTER
IO23	Είσοδος	Αισθητήρας DHT22
IO1	Έξοδος	UART TX / προγραμματισμός
IO3	Είσοδος	UART RX / προγραμματισμός
IO0	Είσοδος	Επιλογή λειτουργίας εκκίνησης / προγραμματισμός

2.3 Τροφοδοσία Συστήματος

2.3.1 Πηγή τροφοδοσίας

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα τροφοδοτείται κυρίως από εναλλασσόμενη τάση 230 V στα 50 Hz, η οποία παρέχεται από το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, το σύστημα διαθέτει και εφεδρική τροφοδοσία από μπαταρία, ώστε να διατηρείται η λειτουργία του σε περίπτωση διακοπής της κύριας παροχής. Η τάση του δικτύου δεν μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα του συστήματος· για τον λόγο αυτό παρεμβάλλεται κύκλωμα μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του συστήματος.

2.3.2 Μετατροπή Εναλλασσόμενης σε Συνεχή Τάση

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται το στάδιο μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου σε συνεχή τάση, το οποίο αποτελεί το πρώτο στάδιο επεξεργασίας της ισχύος στο σύστημα τροφοδοσίας. Το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει ασφάλεια προστασίας (fuse), μετασχηματιστή, ανορθωτή γέφυρας και πυκνωτή εξομάλυνσης.

Μετασχηματιστής

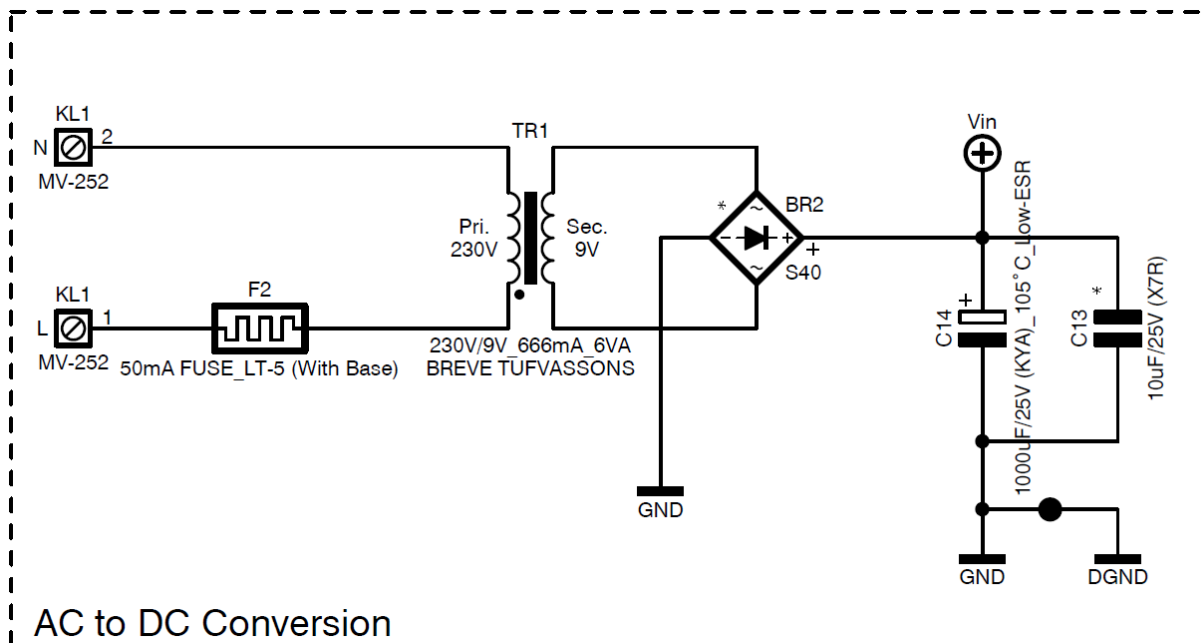
Η μείωση της εναλλασσόμενης τάσης στην είσοδο του κυκλώματος επιτυγχάνεται με τη χρήση του μετασχηματιστή τύπου EI, μοντέλου BREVE TEZ 6,0/D, ονομαστική τάση εισόδου 230V AC και τάσης εξόδου 9V AC, με ισχύ 6 VA. Ο μετασχηματιστής παρέχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ του ηλεκτρικού δικτύου και του κυκλώματος εξασφαλίζοντας την ασφαλή λειτουργία της συσκευής.

Η επιλογή δευτερεύουσας τάσης 9 V AC κρίθηκε κατάλληλη, καθώς μετά την ανόρθωση και την εξομάλυνση προκύπτει συνεχής τάση για την ασφαλή λειτουργία των ρελέ του συστήματος.

$$VDC \approx VAC * \sqrt{2} = 9V * \sqrt{2} \approx 12.7V$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις της τάσης λόγω της κυμάτωσης, καθώς και την πτώση τάσης στις διόδους της γέφυρας ανόρθωσης, η οποία είναι περίπου 1.9V [8] συνολικά, η διαθέσιμη τάση στην έξοδο παραμένει μεγαλύτερη από 9 V, εξασφαλίζοντας τη σωστή λειτουργία των ρελέ, δεδομένου ότι η ελάχιστη απαιτούμενη τάση ενεργοποίησής τους είναι 8.4 V [7].

Επιπλέον, η φαινόμενη ισχύς των 6 VA κρίνεται επαρκής για την κάλυψη των απαιτήσεων ισχύος του κυκλώματος, καθώς για δευτερεύουσα τάση 9 V AC αντιστοιχεί σε ονομαστικό ρεύμα περίπου 0.67 A στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, τιμή που θεωρείται ικανή να καλύψει τις ανάγκες τροφοδοσίας του συστήματος.



Εικόνα 2.3 – Μετατροπή εναλλασσόμενης σε συνεχή τάση

Γέφυρα ανόρθωσης

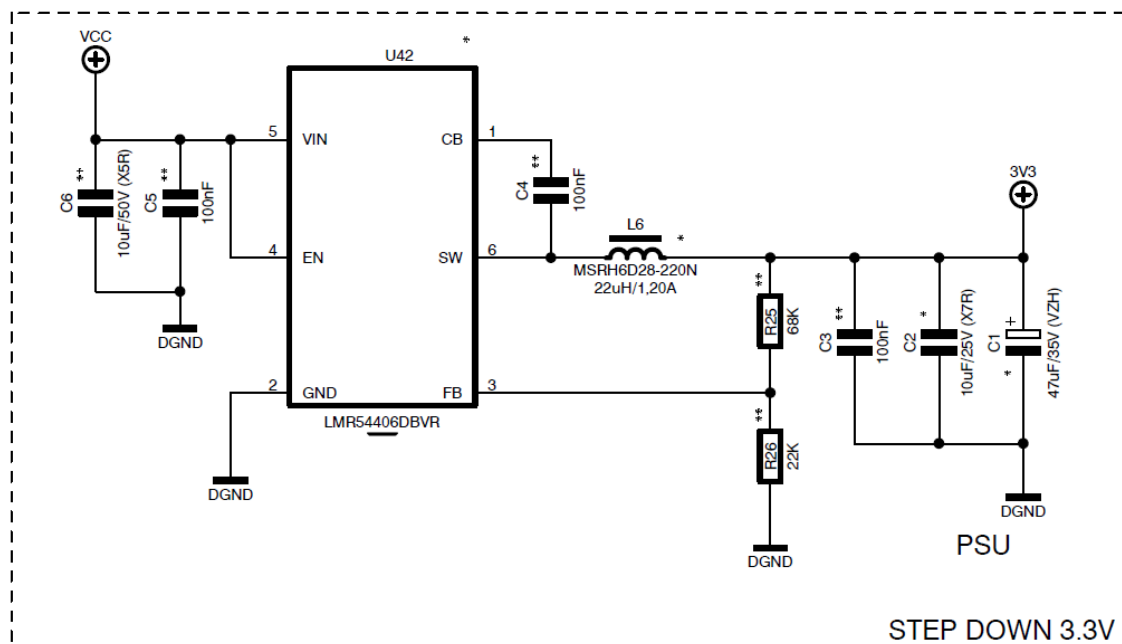
Για την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιήθηκε ενσωματωμένη γέφυρα ανόρθωσης τύπου S40 της εταιρείας Diotec Semiconductor. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από τέσσερις διόδους σε συνδεσμολογία γέφυρας πλήρους ανόρθωσης. Η επιλογή της βασίστηκε στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της, καθώς σύμφωνα με το datasheet υποστηρίζει μέγιστη εναλλασσόμενη τάση εισόδου 40V RMS και μέγιστο ανορθωμένο ρεύμα εξόδου 0.8A, τιμές που είναι συμβατές με τις απαιτήσεις της συσκευής. Επιπλέον, η χρήση ενσωματωμένης γέφυρας ανόρθωσης απλοποιεί τη σχεδίαση του κυκλώματος και συμβάλλει στην αξιόπιστη λειτουργία του σταδίου ανόρθωσης [8].

Πυκνωτής εξομάλυνσης

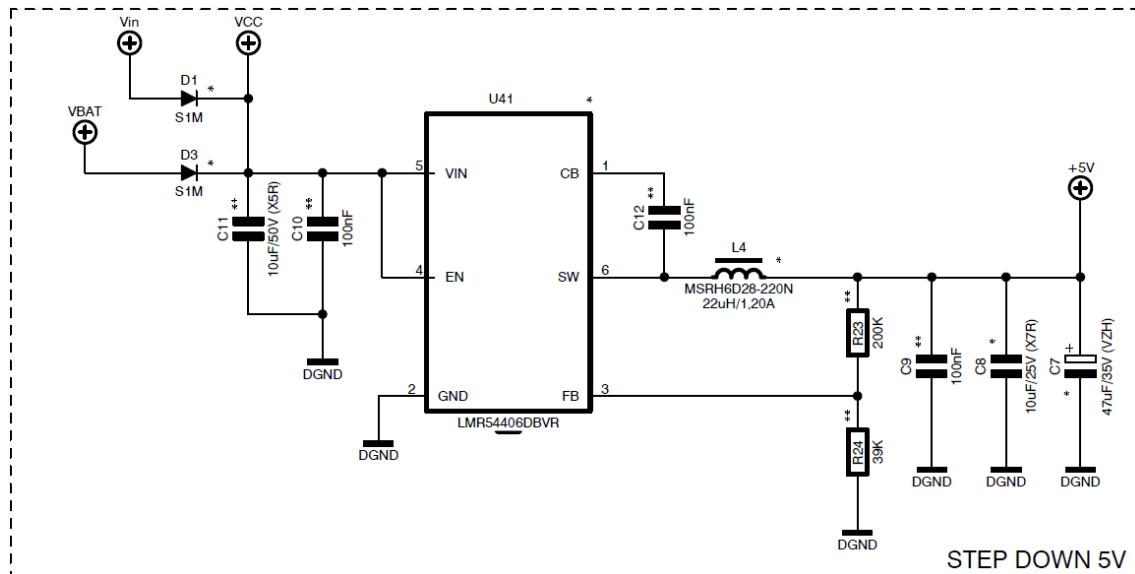
Μετά την πλήρη ανόρθωση, η τάση στην έξοδο της γέφυρας ανόρθωσης δεν είναι απόλυτα σταθερή, αλλά παρουσιάζει κυμάτωση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται πυκνωτής εξομάλυνσης, ο οποίος φορτίζεται όταν η ανορθωμένη τάση αυξάνεται και εκφορτίζεται όταν αυτή μειώνεται, συμβάλλοντας έτσι στην εξομάλυνση της τάσης εξόδου. Στο παρόν κύκλωμα επιλέχθηκε πυκνωτής χωρητικότητας 1000μF, ώστε η τάση στην έξοδο του ανορθωτή να είναι πιο ομαλή και κατάλληλη για τη λειτουργία του κυκλώματος.

2.3.3 Σταθεροποίηση Τάσης

Η συνεχής τάση που προκύπτει μετά το στάδιο ανόρθωσης και εξομάλυνσης δεν είναι κατάλληλη για την απευθείας τροφοδοσία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων της πλακέτας. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η μείωση της τάσης αυτής και η σταθεροποίησή της. Στο παρόν σύστημα χρησιμοποιούνται δύο διακοπτικοί σταθεροποιητές τάσης τύπου DC-DC μοντέλου LMR54406 της εταιρείας Texas Instruments, οι οποίοι υποβιβάζουν και σταθεροποιούν την τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα σχηματικά των δύο διακοπτικών μετατροπέων του συστήματος, ενός για τάση εξόδου 3.3V και ενός για τάση εξόδου 5V.



Εικόνα 2.4 – Διακοπτικός μετατροπέας buck για παραγωγή τάσης 3.3 V



Εικόνα 2.5 – Διακοπτικός μετατροπέας buck για παραγωγή τάσης 5 V

Οι δύο διακοπτικοί σταθεροποιητές τάσης επιλέχθηκαν λόγω της υψηλής ενεργειακής τους απόδοσης, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική σε συνθήκες λειτουργίας με τροφοδοσία από μπαταρία. Σύμφωνα με τις τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες του κατασκευαστή, για ρεύμα φορτίου 100mA η απόδοση του μετατροπέα για τάση εξόδου 3.3V εκτιμάται προσεγγιστικά κοντά στο 85%, ενώ για τάση εξόδου 5V και τάση εισόδου 12V προσεγγίζει το 90% [9].

Επιπλέον, ο σταθεροποιητής LMR54406 επιλέχθηκε καθώς μπορεί να παρέχει συνεχές ρεύμα φορτίου έως 0.6A, τιμή η οποία είναι επαρκής για την τροφοδοσία των αντίστοιχων κυκλωμάτων του συστήματος. Παράλληλα, διαθέτει ευρύ εύρος τάσης εισόδου από 4V έως 36V, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές τροφοδοσίας από μη σταθεροποιημένη πηγή.[9]

Κάθε σταθεροποιητής τάσης χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία συγκεκριμένων υποσυστημάτων της πλακέτας, ανάλογα με τις απαιτήσεις λειτουργίας τους. Ο πρώτος σταθεροποιητής χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία της οθόνης LCD και του βομβητή. Ο δεύτερος σταθεροποιητής χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των πλήκτρων, του μικροελεγκτή ESP32, του αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22, καθώς και της φωτοαντίστασης τύπου LDR.

Πηνίο

Το πηνίο αποτελεί βασικό στοιχείο του διακοπτικού μετατροπέα και χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας προς το φορτίο. Κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης του μετατροπέα είναι κλειστός, το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται, ενώ κατά τη διάρκεια που είναι ανοιχτός μειώνεται, διατηρώντας τη ροή ενέργειας προς την έξοδο.

Η τιμή του πηνίου καθορίζει τον κυματισμό του ρεύματος του πηνίου, ο οποίος επηρεάζει άμεσα την κυμάτωση της τάσης εξόδου. Στους δύο μετατροπείς επιλέχθηκε τιμή πηνίου 22 μ H.

Ο κυματισμός του ρεύματος του πηνίου δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta iL = \frac{V_{out} * (V_{in_{max}} - V_{out})}{V_{in_{max}} * L * F_{sw}} \quad (1)$$

Για τον μετατροπέα των 5V:

$$\Delta iL = \frac{5V * (13.3 - 5)}{13.3 * 22 * 10^{-6} * 1.1 * 10^6} \approx 0.129A$$

Για τον μετατροπέα των 3.3 V:

$$\Delta iL = \frac{3.3V * (13.3 - 3.3)}{13.3 * 22 * 10^{-6} * 1.1 * 10^6} \approx 0.103A$$

Πυκνωτές εξόδου

Οι πυκνωτές εξόδου χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου του μετατροπέα και τη μείωση των διακυμάνσεων που προκύπτουν από τη διακοπτική λειτουργία του.

Η κυμάτωση της τάσης εξόδου ενός διακοπτικού μετατροπέα οφείλεται σε δύο βασικούς παράγοντες: Τη φόρτιση και εκφόρτιση των πυκνωτών εξόδου και την πτώση τάσης που προκαλείται από την ισοδύναμη σειριακή αντίσταση (ESR) των πυκνωτών

Η κυμάτωση λόγω της χωρητικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{out, C} = \frac{\Delta iL}{8 * F_{sw} * C_{out}} \quad (2)$$

Για τον μετατροπέα των 5V:

$$\Delta V_{out} = \frac{0,129}{8 * 1,1 * 10^6 * 57.1 * 10^{-6}} \approx 0.257mV$$

Για τον μετατροπέα των 3.3V:

$$iL = \frac{0,1025}{8 * 1,1 * 10^6 * 57.1 * 10^{-6}} \approx 0.204mV$$

Η κυμάτωση λόγω της ισοδύναμη σειριακής αντίστασης (ESR) δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{out_{ESR}} = \Delta iL * ESR \quad (3)$$

Κεφάλαιο 2

Στο κύκλωμα εξόδου και των δύο μετατροπέων χρησιμοποιούνται παράλληλα ηλεκτρολυτικός και κεραμικοί πυκνωτές. Ο ηλεκτρολυτικός παρουσιάζει ESR με τιμή 680 mΩ [10], ενώ οι κεραμικοί, στην συχνότητα 1.1 MHz εμφανίζουν ESR περίπου 4.8 mΩ (10μF) και 34mΩ (100nF) [11].

Συνεπώς, το ισοδύναμο ESR της εξόδου εκτιμάται περίπου στα 4 mΩ

Για τον μετατροπέα των 5V:

$$\Delta V_{out,ESR} = 0.129 * 0.004 \approx 0.52mV$$

Για τον μετατροπέα των 3.3V:

$$\Delta V_{out,ESR} = 0.1025 * 0,004 \approx 0.41mV$$

Επομένως, η συνολική θεωρητική κυμάτωση της τάσης εξόδου δίνεται από:

$$\Delta V_{out,total} = \Delta V_{out,ESR} + \Delta V_{out,C} \quad (4)$$

Για τον μετατροπέα των 3.3V:

$$\Delta V_{out,total_3v3} = 0.204mV + 0,41mV = 0.614mV$$

Για τον μετατροπέα των 5V:

$$\Delta V_{out,total_5v} = 0.257mV + 0,52mV = 0.777mV$$

Αντιστάσεις ανάδρασης

Η τάση εξόδου του μετατροπέα καθορίζεται μέσω του ακροδέκτη ανάδρασης (Feedback – FB), στον οποίο εφαρμόζεται μέρος της τάσης εξόδου μέσω διαιρέτη τάσης. Με κατάλληλη επιλογή των τιμών των αντιστάσεων επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση εξόδου. Με βάση το datasheet, ο κατασκευαστής προτείνει να πραγματοποιείται πρώτα η επιλογή της «κάτω»σταθερής αντίστασης και με δεδομένη την τιμή της να υπολογίζεται η άλλη:

$$R_{FBT} \frac{V_{out}-V_{REF}}{V_{ref}} * R_{FBB} \quad (5)$$

όπου $V_{ref} = 0.8V$.

Για τον μετατροπέα των 5V:

$$R_{FBT} = \frac{5-0.8}{0.8} * 39K \approx 204.75K$$

Για την υλοποίηση επιλέχθηκε η πλησιέστερη τυποποιημένη τιμή 200K

Για τον μετατροπέα των 3.3V:

$$R_{FBT} = \frac{3.3V - 0.8}{0.8} * 22K \approx 68,75K$$

Για την υλοποίηση επιλέχθηκε η πλησιέστερη τυποποιημένη τιμή 68 kΩ.

Πυκνωτής bootstrap (CBOOT)

Ο πυκνωτής bootstrap χρησιμοποιείται για την οδήγηση του high side MOSFET του μετατροπέα, επιτρέποντας τη σωστή λειτουργία του κατά τη διακοπτική διαδικασία. Η τιμή του επιλέχθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή και είναι 0,1μF [9].

Πυκνωτές εισόδου

Οι πυκνωτές εισόδου χρησιμοποιούνται για την αποσύζευξη της τάσης εισόδου και τη μείωση των διακυμάνσεων υψηλής συχνότητας που προκαλούνται από τη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα. χρησιμοποιήθηκαν κεραμικός πυκνωτής 10μF, καθώς και πυκνωτής 100nF, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή [9].

2.3.4 Μπαταρίες Ni-MH



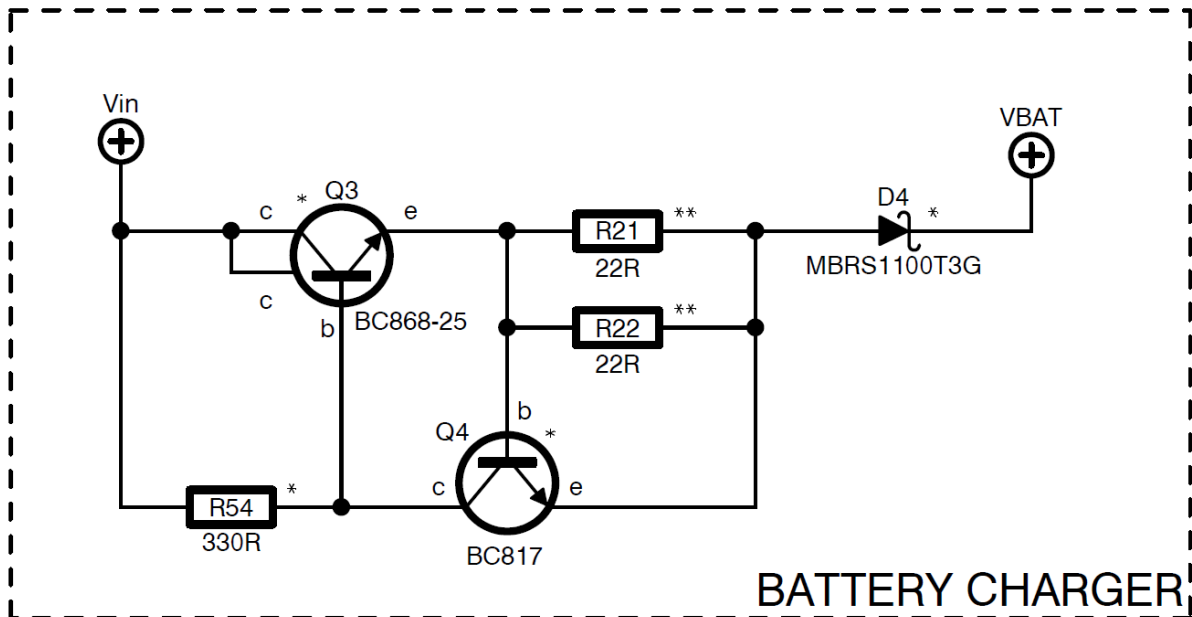
Εικόνα 2.6 – Συστοιχία επαναφορτιζόμενων μπαταριών Ni-MH

Στο κύκλωμα χρησιμοποιούνται δύο συστοιχίες μπαταριών τεχνολογίας Ni-MH ως εφεδρική τροφοδοσία. Καθεμία από αυτές αποτελείται από τρεις μπαταρίες τύπου AA των 1,2 V συνδεδεμένες σε σειρά, με ονομαστική τάση 3,6 V και χωρητικότητα 1500 mAh. Οι δύο συστοιχίες συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά, παρέχοντας συνολική ονομαστική τάση 7,2 V, η οποία χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του συστήματος, εξασφαλίζοντας τη συνεχή λειτουργία της συσκευής ακόμη και σε περίπτωση διακοπής της εξωτερικής τροφοδοσίας. Η συγκεκριμένη επιλογή μπαταριών κρίθηκε κατάλληλη για το σύστημα, καθώς παρέχει επαρκή χωρητικότητα για τις ανάγκες της συσκευής, επιτρέπει την διαρκή φόρτιση με χαμηλό συνεχές ρεύμα και παρουσιάζει αυξημένη ασφάλεια κατά την χρήση.

2.3.5 Κύκλωμα Φόρτισης Μπαταρίας

Για τη φόρτιση των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα, απαιτείται η ύπαρξη κατάλληλου κυκλώματος φόρτισης, το οποίο επιτρέπει την ελεγχόμενη επαναφόρτισή τους όταν είναι διαθέσιμη η

εξωτερική τροφοδοσία. Το κύκλωμα φόρτισης αποτελείται από δύο τρανζίστορ και δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα. Μέσω του τρανζίστορ τρανζίστορ Q3 διέρχεται το ρεύμα φόρτισης προς την μπαταρία, ενώ οι αντιστάσεις R30 και R31 καθορίζουν το ρεύμα φόρτισης.



Εικόνα 2.7 – Κύκλωμα φόρτισης Ni-MH

Στην περίπτωση που το ρεύμα φόρτισης αυξηθεί, αυξάνεται και η πτώση τάσης στα άκρα των αντιστάσεων. Η αύξηση αυτή οδηγεί σε αύξηση της τάσης βάσης-εκπομπού του τρανζίστορ Q4, το οποίο αρχίζει να άγει περισσότερο και να απορροφά ρεύμα από τη βάση του τρανζίστορ Q3. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η αγωγιμότητα του Q3 και περιορίζεται το ρεύμα που κατευθύνεται προς τη μπαταρία. Αντίθετα σε περίπτωση που το ρεύμα φόρτισης μειωθεί, η πτώση τάσης στα άκρα των αντιστάσεων θα μειωθεί αντίστοιχα. Ως αποτέλεσμα, το τρανζίστορ Q4 θα αρχίσει να άγει λιγότερο και να απορροφά λιγότερο ρεύμα από την βάση του τρανζίστορ Q3 επιτρέποντας του να άγει περισσότερο. Μέσω της αρνητικής ανάδρασης που περιγράφηκε παραπάνω το κύκλωμα καταλήγει σε κατάσταση ισορροπίας κατά την οποία το ρεύμα φόρτισης παραμένει σχεδόν σταθερό χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά από μεταβολές της τάσης τροφοδοσίας ή από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Η τιμή του ρεύματος φόρτισης εξαρτάται κυρίως από την τιμή των αντιστάσεων μέτρησης, όπως προκύπτει από τη γενική σχέση:

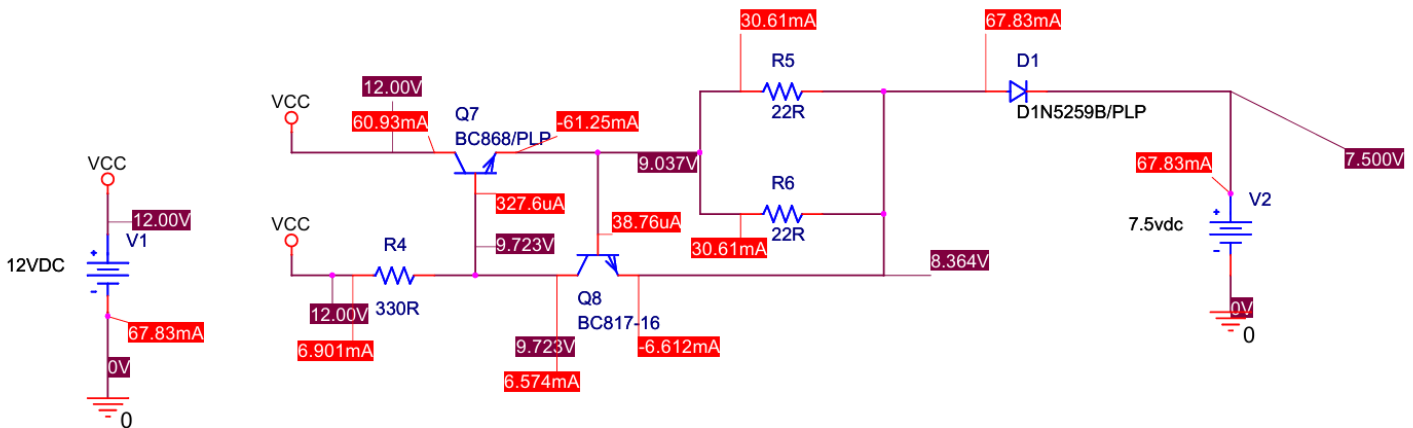
$$I_{charge} \approx \frac{V_{BE}}{R_{sense}}$$

όπου V_{BE} είναι η τάση βάσης-εκπομπού του τρανζίστορ Q4 και R_{sense} η ισοδύναμη αντίσταση των αντιστάσεων R30 και R31.

Οπότε το θεωρητικό ρεύμα φόρτισης προκύπτει :

$$I_{charge} \approx \frac{0.7V}{11\Omega} = 63,6mA$$

Για την επαλήθευση της λειτουργίας του κυκλώματος φόρτισης πραγματοποιήθηκε προσομοίωση SPICE με τάση εισόδου $V_{in} = 12V$ και τάση μπαταρίας $V_{bat} = 7.5V$. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το ρεύμα προς τη μπαταρία είναι περίπου 67.8mA, ενώ το ρεύμα που διαρρέει τις αντιστάσεις μέτρησης R30 και R31 είναι περίπου 30.6mA. Η μικρή διαφορά μεταξύ του ρεύματος προς τη μπαταρία και του ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις μέτρησης οφείλεται στο ρεύμα που διέρχεται το τρανζίστορ Q4, το οποίο στην προσομοίωση είναι περίπου 6–7mA. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει τη λειτουργία του κυκλώματος ως ρυθμιστή ρεύματος, καθώς το ρεύμα φόρτισης καθορίζεται κυρίως από την πτώση τάσης στην ισοδύναμη αντίσταση μέτρησης.



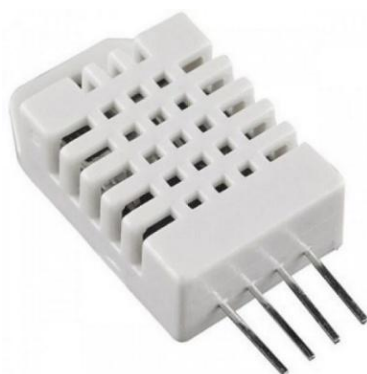
Εικόνα 2.8 – Αποτελέσματα προσομοίωσης SPICE του κυκλώματος φόρτισης

Κατά τον σχεδιασμό του κυκλώματος φόρτισης ελήφθησαν υπόψη παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητα της λειτουργίας του, όπως η θερμική καταπόνηση των στοιχείων. Συγκεκριμένα, το τρανζίστορ διέλευσης Q3 (Q7 στο μοντέλο προσομοίωσης) επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπόψη ότι σε συνθήκες χαμηλής τάσης μπαταρίας η πτώση τάσης στα άκρα του αυξάνεται, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ισχύ απωλειών. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε το τρανζίστορ BC868-25 σε πακέτο SOT-89, το οποίο διαθέτει αυξημένη δυνατότητα θερμικής διάχυσης και μπορεί να λειτουργήσει χωρίς πρόσθετη ψύξη σε επίπεδα ισχύος έως περίπου 0.5W [12]. Η εκτιμώμενη μέγιστη ισχύς διάχυσης υπό αυτές τις συνθήκες υπολογίστηκε περίπου στα 0.34W, τιμή που βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων λειτουργίας. Τέλος, τοποθετήθηκαν δύο αντιστάσεις των 22Ω σε παράλληλη σύνδεση, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ισοδύναμη αντίσταση και παράλληλα να καταναμεηθεί η θερμική καταπόνηση μεταξύ των δύο στοιχείων.

2.4 Υποσύστημα Αισθητήρων

Η παρούσα συσκευή συλλέγει περιβαλλοντικά δεδομένα από τον χώρο αποθήκευσης των κρασιών. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο για τον έλεγχο των ρελέ του συστήματος όσο και για την καταγραφή των συνθηκών που επικρατούν στον χώρο. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το περιβάλλον είναι η θερμοκρασία και η υγρασία μέσω του αισθητήρα DHT22 καθώς και η φωτεινότητα μέσω της φωτοαντίστασης LC5527.

2.4.1 Αισθητήρας Θερμοκρασίας / Υγρασίας



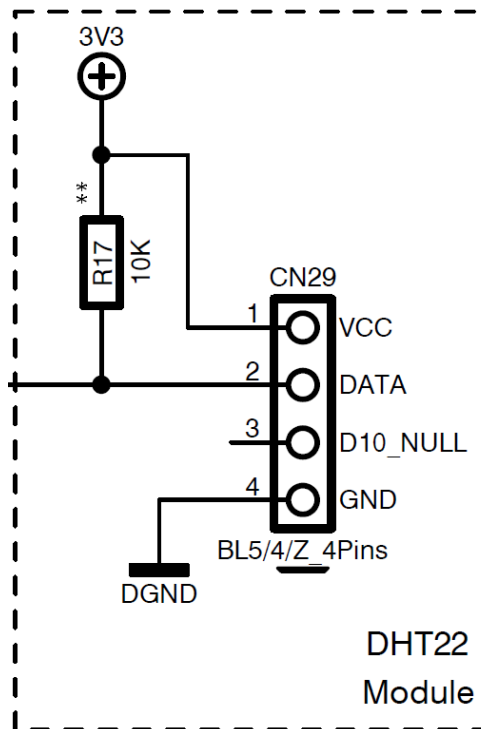
Εικόνα 2.6 – Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22.

Ο αισθητήρας DHT22 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών στον χώρο αποθήκευσης του κρασιού. Η μέτρηση της θερμοκρασίας βασίζεται σε θερμίστορ τύπου NTC, του οποίου η αντίσταση μεταβάλλεται αντίστροφα με τη θερμοκρασία, ενώ η μέτρηση της υγρασίας πραγματοποιείται μέσω χωρητικού αισθητήρα, του οποίου η χωρητικότητα μεταβάλλεται ανάλογα με την περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς.

Η επιλογή του συγκεκριμένου αισθητήρα κρίθηκε κατάλληλη, καθώς πρόκειται για έναν οικονομικό αισθητήρα που συνδυάζει τη μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας σε ένα module. Επιπλέον, η επικοινωνία πραγματοποιείται σε ψηφιακή μορφή, διευκολύνοντας τη διασύνδεσή του με τον μικροελεγκτή.

Πίνακας 2.3 – Αντιστοίχιση ακροδεκτών του αισθητήρα DHT22 με το σύστημα

DHT22	Σύνδεση στο σύστημα	Περιγραφή
VCC	3.3V	Τροφοδοσία αισθητήρα
DATA	GPIO23	Ψηφιακή γραμμή δεδομένων
D10_null	Not connected	-
GND	GND	Γείωση



Εικόνα 2.7 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του αισθητήρα DHT22

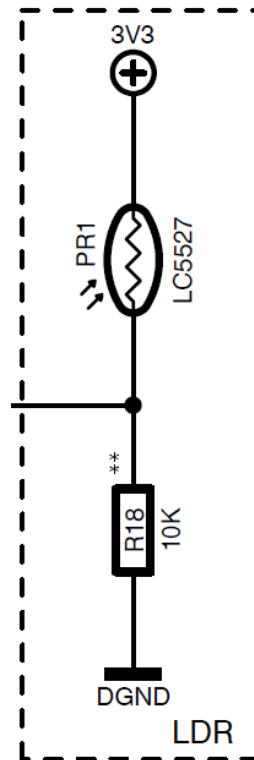
2.4.2 Αισθητήρας Φωτεινότητας

Ο αισθητήρας φωτεινότητας LC5527 είναι μια φωτοαντίσταση (LDR) της οποίας η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του φωτισμού στον χώρο. Όταν η ένταση της φωτεινότητας που πέφτει πάνω στον αισθητήρα είναι υψηλή, η αντίσταση της φωτοαντίστασης μειώνεται, ενώ σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού η αντίσταση αυξάνεται.



Εικόνα 2.8 – Αισθητήρας Φωτεινότητας

Η φωτοαντίσταση είναι συνδεδεμένη σε διάταξη διαιρέτη τάσης έτσι ώστε να μετατρέπεται η μεταβολή της αντίστασης σε μεταβολή τάσης. Η τάση αυτή συνδέεται σε μια αναλογική είσοδο του μικροελεκτή καθιστώντας δυνατή την εκτίμηση του επιπέδου φωτεινότητας στον χώρο αποθήκευσης. Στο παρόν σύστημα η φωτοαντίσταση χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της παρουσίας ή απουσίας φωτισμού, χωρίς να απαιτείται ακριβής ποσοτική μέτρηση της φωτεινότητας.



Εικόνα 2.9 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του αισθητήρα LC5527.

2.5 Υποσύστημα Εξόδων

Το υποσύστημα εξόδων είναι υπεύθυνο για την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση των εξωτερικών συσκευών του συστήματος, όπως τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, ύγρανσης και αφύγρανσης του χώρου αποθήκευσης των κρασιών. Το υποσύστημά αυτό αποτελείται από το ολοκληρωμένο κύκλωμα οδήγησης τρανζίστορ ULN2003A και από τα ρελέ ελέγχου RT114012.

2.5.1 Ρελέ

Ρελέ ή ηλεκτρονόμο ονομάζουμε έναν ηλεκτρομηχανικό διακόπτη ο οποίος επιτρέπει τον έλεγχο φορτίων υψηλότερης ισχύος μέσω ενός κυκλώματος χαμηλότερης ισχύος. Όταν το πηνίο του ρελέ διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που προκαλεί τη μετακίνηση του οπλισμού. Η μετακίνηση αυτή μεταβάλλει την κατάσταση στις επαφές του ρελέ, δηλαδή οδηγεί στο άνοιγμα ή το κλείσιμο του ελεγχόμενου κυκλώματος.

Το ρελέ διαθέτει τρεις βασικές επαφές: την κανονικά ανοικτή επαφή (NO), την κανονικά κλειστή επαφή (NC) και την κοινή επαφή (COM). Όταν το ρελέ βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, δηλαδή όταν το πηνίο του δεν τροφοδοτείται με αρκετή τάση, η επαφή COM είναι συνδεδεμένη με την κανονικά κλειστή επαφή (NC).

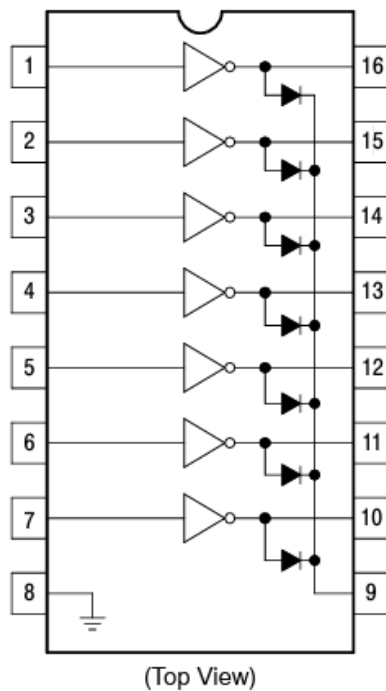
Όταν εφαρμοστεί αρκετή τάση στα άκρα του πηνίου του ρελέ, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο, το οποίο μετακινεί τον οπλισμό του. Ως αποτέλεσμα, η επαφή COM αποσυνδέεται από την NC και συνδέεται με την κανονικά ανοικτή επαφή (NO), κλείνοντας το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα.

Στο ρελέ RT114012 η ονομαστική τάση ενεργοποίησης είναι 12 V, ενώ μπορεί να λειτουργεί αξιόπιστα σε τάσεις έως και 8,4 V [7].

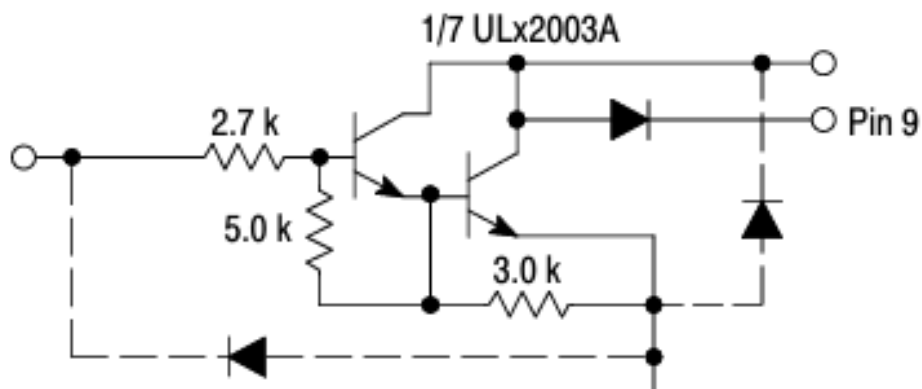
Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των ηλεκτρονόμενων είναι η ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ του κυκλώματος ελέγχου και του κυκλώματος του φορτίου. Η απομόνωση αυτή εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχει άμεση ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ των δύο κυκλωμάτων, γεγονός που αυξάνει την ασφάλεια της συσκευής και προστατεύει τα ηλεκτρονικά χαμηλής ισχύος από υπερτάσεις στο κύκλωμα του φορτίου.

2.5.2 ULN2003A

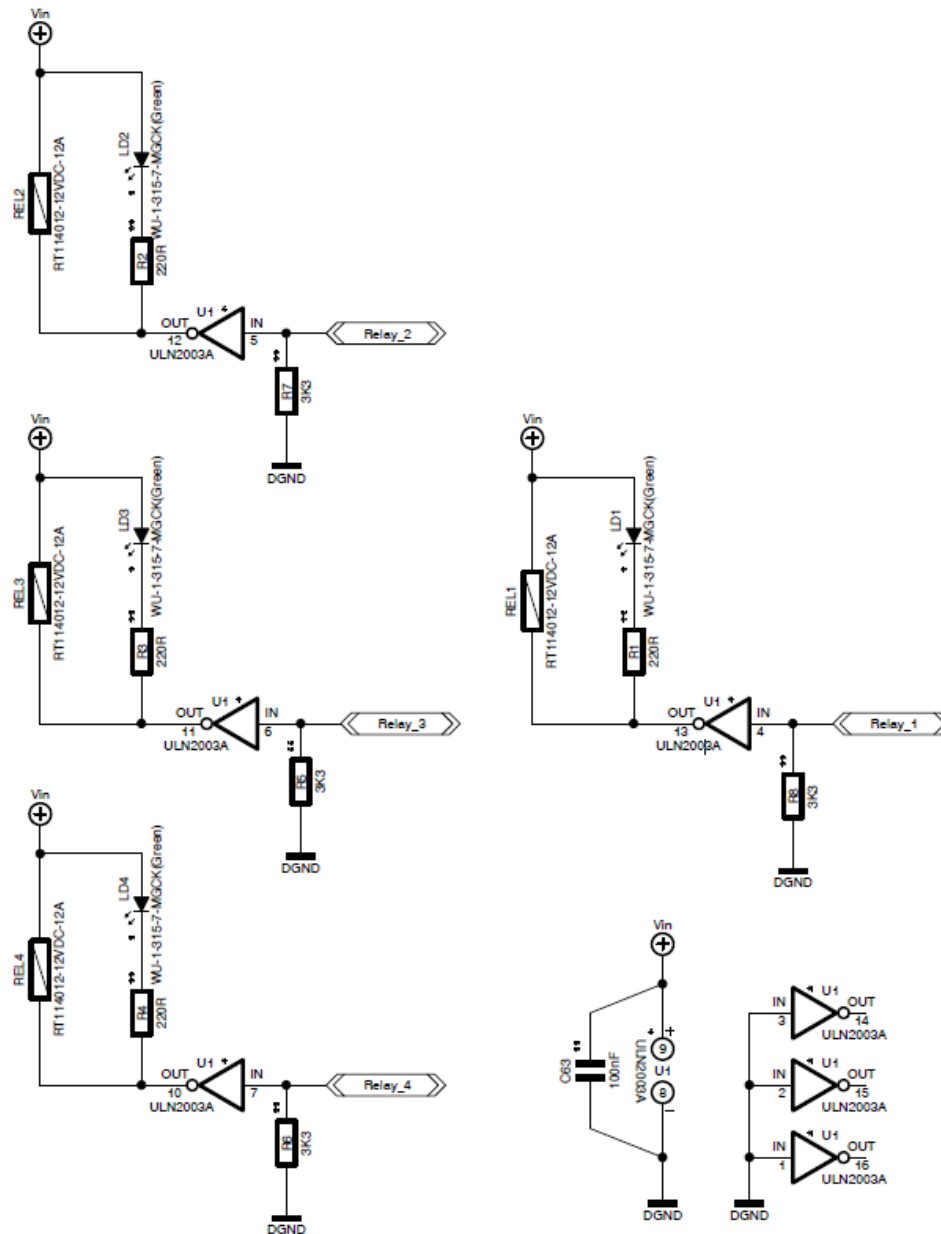
Ο μικροελεγκτής δεν έχει τη δυνατότητα να οδηγήσει απευθείας το πηνίο ενός ρελέ, καθώς οι ψηφιακές του έξοδοι δεν μπορούν να παρέχουν το απαιτούμενο ρεύμα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο κύκλωμα ULN2003A, το οποίο λειτουργεί ως ενδιάμεσο στάδιο οδήγησης. Το ULN2003A αποτελείται από επτά ζεύγη τρανζίστορ τυπου Darlington σε διάταξη ανοικτού συλλέκτη. Με τον τρόπο αυτό, ο ESP32 μπορεί να ελέγχει φορτία που απαιτούν υψηλότερα ρεύματα από αυτά που μπορούν να παρέχουν οι ψηφιακές του έξοδοι [14].



Εικόνα 2.10 – Pinout του ολοκληρωμένου κυκλώματος ULN2003A (top view).[14]



Εικόνα 2.11 – Εσωτερική δομή ενός καναλιού του ULN2003A[14]



Εικόνα 2.12 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του ULN2003A.

Οι ψηφιακές εξόδους του μικροελεγκτή συνδέονται στις εισόδους του ULN2003A και ελέγχουν τα εσωτερικά τρανζίστορ του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Όταν μία έξοδος του μικροελεγκτή οδηγηθεί σε λογικό υψηλό επίπεδο, το αντίστοιχο τρανζίστορ του ULN2003A τίθεται σε αγωγή και συνδέει το πηνίο του ρελέ προς τη γείωση. Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνεται το κύκλωμα του πηνίου και το ρελέ ενεργοποιείται.

Ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα του ULN2003A είναι η ενσωμάτωση διόδων καταστολής υπερτάσεων (flyback diodes) στην έξοδο του ολοκληρωμένου. Οι διόδοι αυτές επιτρέπουν την ασφαλή εκφόρτιση του πηνίου του ρελέ, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Κατά τη διακοπή της ροής του ρεύματος στο πηνίο, η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια καταρρέει και μετατρέπεται σε ηλεκτρική τάση αντίθετης πολικότητας. Χωρίς την ύπαρξη κατάλληλης προστασίας, η υπέρταση αυτή θα μπορούσε να προκαλέσει ζημία στο ULN2003A ή ακόμη και στον

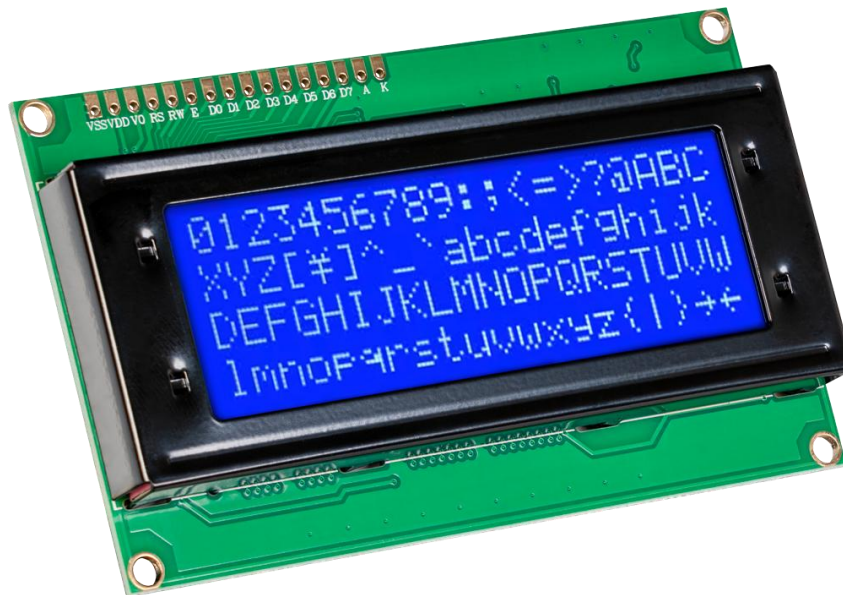
μικροελεγκτή. Με την παρουσία των ενσωματωμένων διόδων, η υπερβολική τάση μεταφέρεται με ασφάλεια προς την τροφοδοσία του πηνίου, επιτρέποντας την ομαλή εκφόρτιση του και εξασφαλίζοντας την αξιόπιστη λειτουργία του κυκλώματος εξόδου.

Επιπλέον, έχει τοποθετηθεί παράλληλα από το πηνίο του ρελέ φωτεινή ένδειξη τύπου LED. Όταν το αντίστοιχο κανάλι του ολοκληρωμένου ULN2003A τίθεται σε αγωγή, ρέει ρεύμα τόσο από το πηνίο του ρελέ όσο και από το LED, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της φωτεινής ένδειξης του καναλιού. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης θα μπορεί να αναγνωρίσει ποιο ρελέ βρίσκεται σε λειτουργία κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας.

2.6 Υποσύστημα Διεπαφής Χρήστη

Το υποσύστημα διεπαφής χρήστη είναι υπεύθυνο για την παρουσίαση των πληροφοριών λειτουργίας της συσκευής και για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα. Στο παρόν υποσύστημα περιλαμβάνονται η οθόνη LCD, τα μηχανικά πλήκτρα και ο βομβητής.

2.6.1 Οθόνη LCD



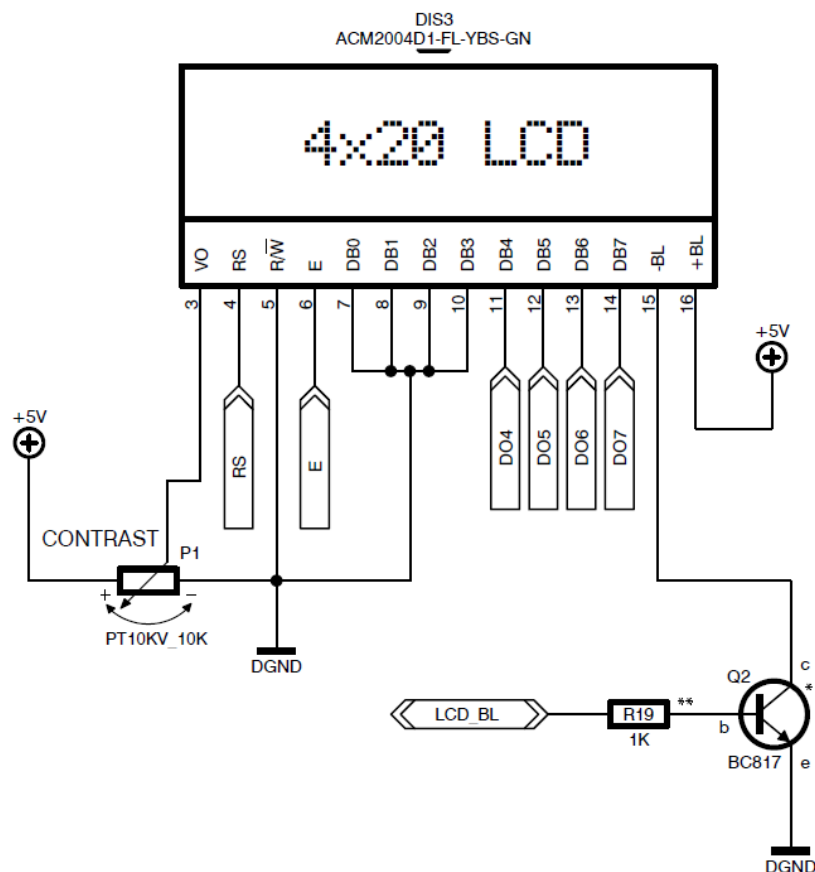
Εικόνα 2.13 – Οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) τύπου 20×4.

Στην παρούσα συσκευή χρησιμοποιείται οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) τύπου 20×4, στην οποία προβάλλονται σε πραγματικό χρόνο οι μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και η κατάσταση λειτουργίας των ρελέ του συστήματος. Επιπλέον, στην οθόνη εμφανίζονται χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία της συσκευής, όπως η κατάσταση σύνδεσης στο διαδίκτυο και η πηγή παροχής ενέργειας. Μέσω της οθόνης παρέχεται επίσης η δυνατότητα προβολής και ρύθμισης των κατωφλίων θερμοκρασίας και υγρασίας, επιτρέποντας την παραμετροποίηση της λειτουργίας της συσκευής. Το module της οθόνης ACM2004D1-FL ενσωματώνει τον ελεγκτή ST7066U το οποίο είναι συμβατό με το πρότυπο HD44780 [15]. Ο ελεγκτής αυτός λαμβάνει δεδομένα από τον μικροελεγκτή και αναλαμβάνει την οδήγηση του κρυστάλλου.

Η LCD οθόνη υποστηρίζει παράλληλη επικοινωνία είτε σε λειτουργία 8-bit (DB0-DB7) όπου σε κάθε παλμό του σήματος Enable μεταδίδεται ένα byte δεδομένων, είτε σε λειτουργία 4-bit (DB4-DB7) κατά την οποία η μετάδοση ενός byte πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικούς παλμούς Enable. Στο παρόν κύκλωμα επιλέχθηκε η λειτουργία 4-bit με σκοπό τη μείωση του αριθμού των απαιτούμενων ακροδεκτών.

Η αντίθεση της οθόνης ρυθμίζεται μέσω του ακροδέκτη VO, ο οποίος συνδέεται σε ποτενσιόμετρο τιμής 10 kΩ. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα προσαρμογής της αντίθεσης ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού του περιβάλλοντος.

Από τους ακροδέκτες BL+ και BL- τροφοδοτείται και ελέγχεται ο οπίσθιος φωτισμός (backlight) της LCD οθόνης. Κατά τη λειτουργία της συσκευής με εφεδρική τροφοδοσία από μπαταρία, κρίνεται σκόπιμος ο περιορισμός της κατανάλωσης ρεύματος. Για τον λόγο αυτό, στον ακροδέκτη BL- έχει τοποθετηθεί τρανζίστορ, το οποίο χρησιμοποιείται ως διακόπτης για τον έλεγχο του backlight. Σε περίπτωση διακοπής της κύριας τροφοδοσίας, το τρανζίστορ παύει να άγει, διακόπτοντας το κύκλωμα του οπίσθιου φωτισμού και απενεργοποιώντας το backlight, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.



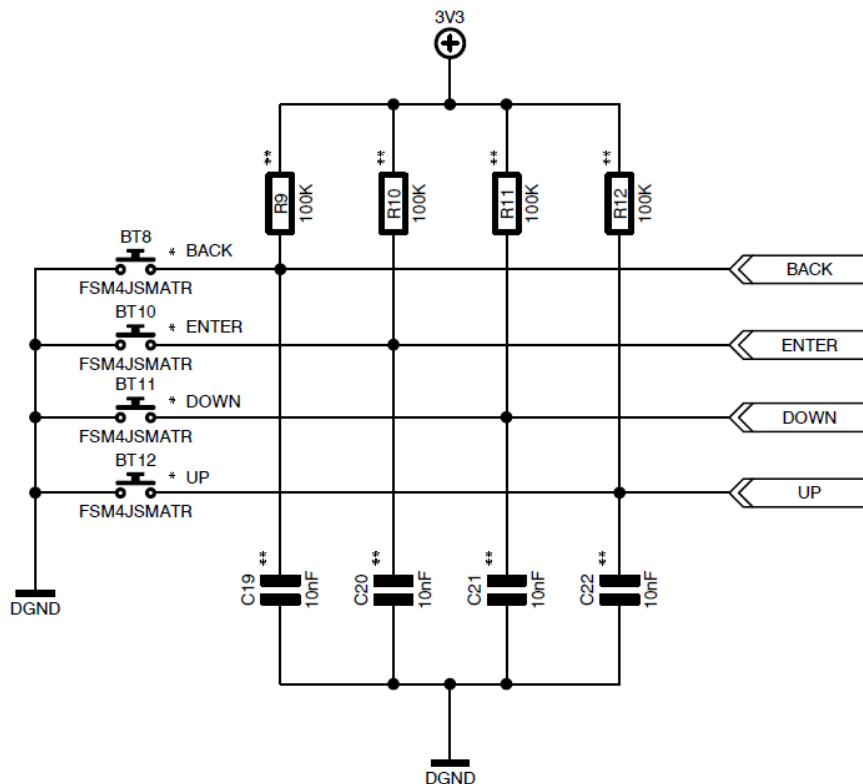
Εικόνα 2.14 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του LCD.

2.6.2 Μηχανικά πλήκτρα

Στο σύστημα παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη να προσαρμόζει τα κατώφλια υγρασίας και θερμοκρασίας, ώστε οι συνδεδεμένες συσκευές να λειτουργούν εντός του κατάλληλου εύρους τιμών. Η αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα γίνεται μέσω μηχανικών πλήκτρων.

Ένα σημαντικό ζήτημα κατά τη χρήση των μηχανικών πλήκτρων είναι το φαινόμενο της αναπήδησης των επαφών (contact bounce), δηλαδή το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το μπουτόν δεν παρουσιάζει σταθερή λογική κατάσταση και μεταβάλλονται με μεγάλη ταχύτητα μεταξύ λογικού 0 και 1. Κατά την διάρκεια της περιόδου αυτού ο μικροελεγκτής μπορεί να ανιχνεύει στην ψηφιακή του είσοδο πολλαπλά λανθασμένα πατήματα.

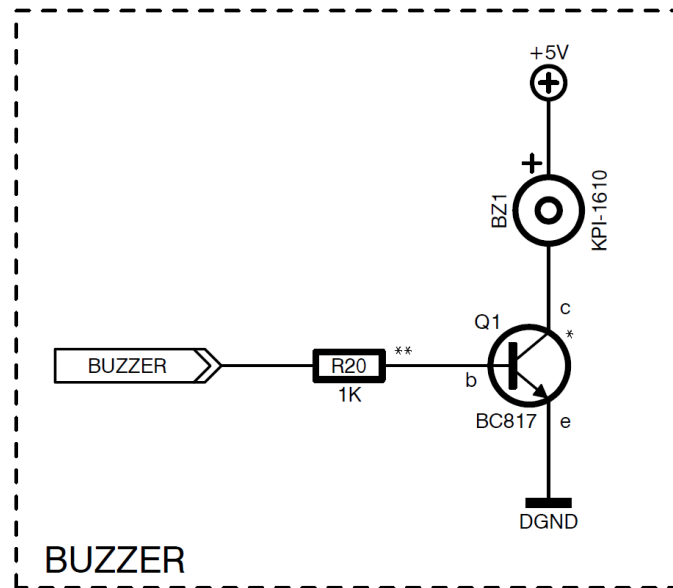
Για τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος που λαμβάνει ο μικροελεγκτής, χρησιμοποιείται κύκλωμα RC στην είσοδο των πλήκτρων, το οποίο λειτουργεί ως χαμηλοπερατό φίλτρο με σκοπό την απόσβεση των γρήγορων μεταβατικών φαινομένων (spikes). Παρότι το φίλτρο RC δεν επαρκεί από μόνο του για την πλήρη εξάλειψη του φαινομένου αναπήδησης των μηχανικών επαφών, συμβάλλει στη σταθεροποίηση του σήματος πριν από την ψηφιακή επεξεργασία. Η τελική αναγνώριση του πατήματος πραγματοποιείται σε επίπεδο λογισμικού.



Εικόνα 2.15 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης των πλήκτρων.

2.6.3 Βομβητής

Στο σύστημα χρησιμοποιείται πιεζοηλεκτρικός βομβητής (piezo buzzer) τύπου KPI-1610, ο οποίος λειτουργεί ως ακουστική ειδοποίηση για τον χρήστη. Η ενεργοποίηση του βομβητή πραγματοποιείται από ψηφιακή έξοδο του μικροελεγκτή μέσω κατάλληλου κυκλώματος οδήγησης, επιτρέποντας τον αξιόπιστο έλεγχο της λειτουργίας του.



Εικόνα 2.16 – Σχηματικό διάγραμμα σύνδεσης του βομβητή.

2.7 Σχεδίαση Πλακέτας

Η σχεδίαση της πλακέτας αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο της υλοποίησης του συστήματος, καθώς επηρεάζει άμεσα τη λειτουργικότητα, την αξιοπιστία και τη μετρητική ακρίβεια των υποσυστημάτων. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά της πλακέτας, οι βασικές σχεδιαστικές επιλογές που αφορούν την τοποθέτηση των υποσυστημάτων, καθώς και η δρομολόγηση των αγωγικών διαδρομών.

2.7.1 Γενικά χαρακτηριστικά πλακέτας

Η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος σχεδιάστηκε ως διπλής όψης, επιτρέποντας τη δρομολόγηση αγωγικών διαδρομών όσο και την τοποθέτηση εξαρτημάτων τόσο στην άνω όσο και στην κάτω όψη της πλακέτας. Η σχεδίαση της πλακέτας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Pulsonix, όπου αρχικά δημιουργήθηκε το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος και στη συνέχεια σχεδιάστηκε το layout της πλακέτας. Η κατασκευή της πλακέτας πραγματοποιήθηκε μέσω της διαδικτυακής υπηρεσίας κατασκευής τυπωμένων κυκλωμάτων JLCPCB.

2.7.2 Τοποθέτηση υποσυστημάτων

Κατά τη σχεδίαση της πλακέτας, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα τοποθετήθηκαν ομαδοποιημένα ανά υποσύστημα (τροφοδοσία, μικροελεκτήρες, αισθητήρες, κύκλωμα φόρτισης και υποσύστημα εξόδων) προκειμένου να είναι εύκολα αναγνωρίσιμα και για να υπάρξει μείωση ηλεκτρικών παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών κυκλωμάτων.

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας τοποθετήθηκε στην επάνω δεξιά περιοχή της πλακέτας στην πίσω όψη, σε θέση απομακρυσμένη από εξαρτήματα που αναπτύσσουν θερμότητα κατά τη λειτουργία τους, όπως ο μετασχηματιστής και η γέφυρα ανόρθωσης. Η συγκεκριμένη επιλογή αποσκοπεί στη μείωση της θερμικής επίδρασης των υποσυστημάτων ισχύος στις μετρήσεις, ώστε ο αισθητήρας να καταγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η τοποθέτησή του κοντά στο άκρο

της πλακέτας επιτρέπει, σε περίπτωση τοποθέτησης της συσκευής σε πλαστικό περίβλημα την σωστή μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Ο αισθητήρας φωτεινότητας τοποθετήθηκε στην μπροστινή όψη της πλακέτας, δηλαδή στην πλευρά που περιλαμβάνει τη διεπαφή χρήστη (LCD και πλήκτρα). Η συγκεκριμένη επιλογή πραγματοποιήθηκε ώστε ο αισθητήρας να είναι στραμμένος προς τον χώρο και να έχει άμεση έκθεση στη φωτεινότητα του δωματίου, εξασφαλίζοντας έτσι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστες μετρήσεις.

Ο μικροελεγκτής τοποθετήθηκε κεντρικά στην πλακέτα, προκειμένου τα σήματα να διανύουν τη μικρότερη δυνατή απόσταση. Επιπλέον, ο μικροελεγκτής τοποθετήθηκε κοντά στο μπροστινό δεξί άκρο της πλακέτας, ώστε η εξωτερική κεραία που ενσωματώνεται στο module να μπορεί να εκτείνεται εκτός της πλακέτας, εξασφαλίζοντας καλύτερη εκπομπή του ασύρματου σήματος.

2.7.3 Δρομολόγηση αγωγίων διαδρομών (Routing)

Στη συγκεκριμένη σχεδίαση, τα σήματα που ξεκινούν από τον μικροελεγκτή προς τα επιμέρους υποσυστήματα υλοποιήθηκαν με αγωγίμες διαδρομές πλάτους 0,5 mm, επιλογή που έγινε με στόχο τη μείωση της ευαισθησίας των σημάτων σε ηλεκτρικό θόρυβο και τη βελτίωση της σταθερότητας της λειτουργίας του συστήματος.

Οι αγωγίμες διαδρομές τροφοδοσίας υλοποιήθηκαν με αυξημένο πλάτος, από 1mm έως 1,5mm, ώστε να μειωθεί η αντίσταση των γραμμών και συνεπώς η πτώση τάσης κατά μήκος τους, διασφαλίζοντας πιο σταθερή και αξιόπιστη τροφοδοσία των υποσυστημάτων.

Τέλος, οι αγωγίμες διαδρομές υψηλής τάσης που προέρχονται από το ηλεκτρικό δίκτυο υλοποιήθηκαν με ακόμη μεγαλύτερο πλάτος (περίπου 2mm), με στόχο τη διασφάλιση της ηλεκτρικής ασφάλειας και της αξιόπιστης λειτουργίας του κυκλώματος τροφοδοσίας.

Κατά τη δρομολόγηση των αγωγίων διαδρομών τηρήθηκαν επαρκείς αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ των αγωγών, τόσο για κυκλώματα χαμηλής όσο και υψηλής τάσης, ώστε να διασφαλιστεί η ηλεκτρική ασφάλεια και η αξιόπιστη λειτουργία της πλακέτας.

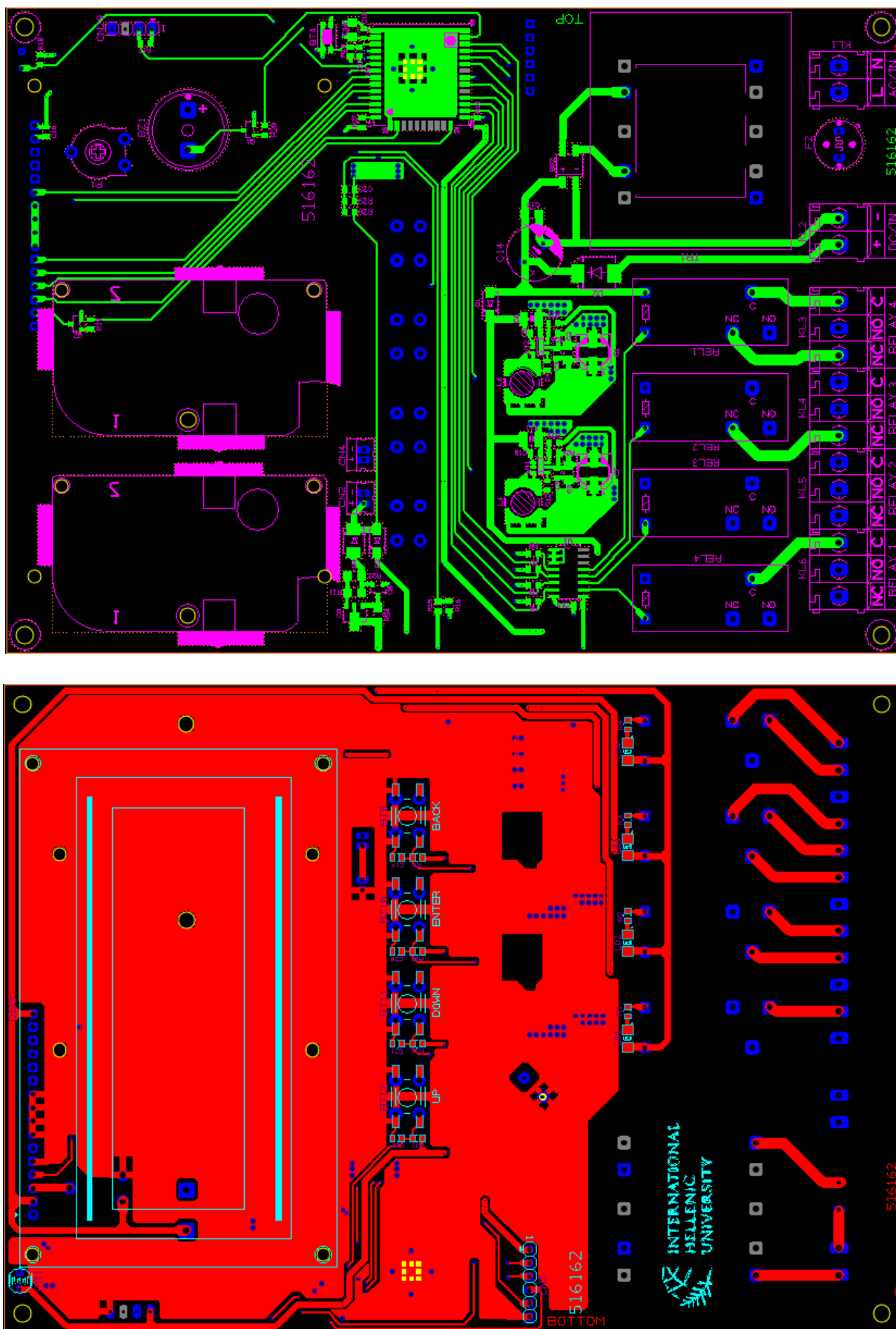
2.7.4 Σχεδιαστικές απαιτήσεις layout για τους μετατροπείς buck.

Η σχεδίαση του layout της πλακέτας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ορθή λειτουργία ενός διακοπτικού μετατροπέα τάσης. Η δρομολόγηση των αγωγών στο PCB επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ενεργειακή απόδοση του μετατροπέα, τη θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, καθώς και το επίπεδο των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που μπορεί να δημιουργηθούν κατά τη λειτουργία του κυκλώματος. Για τον λόγο αυτό, κατά τη σχεδίαση του υποσυστήματος τροφοδοσίας δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη δρομολόγηση των αγωγών των μετατροπέων buck σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

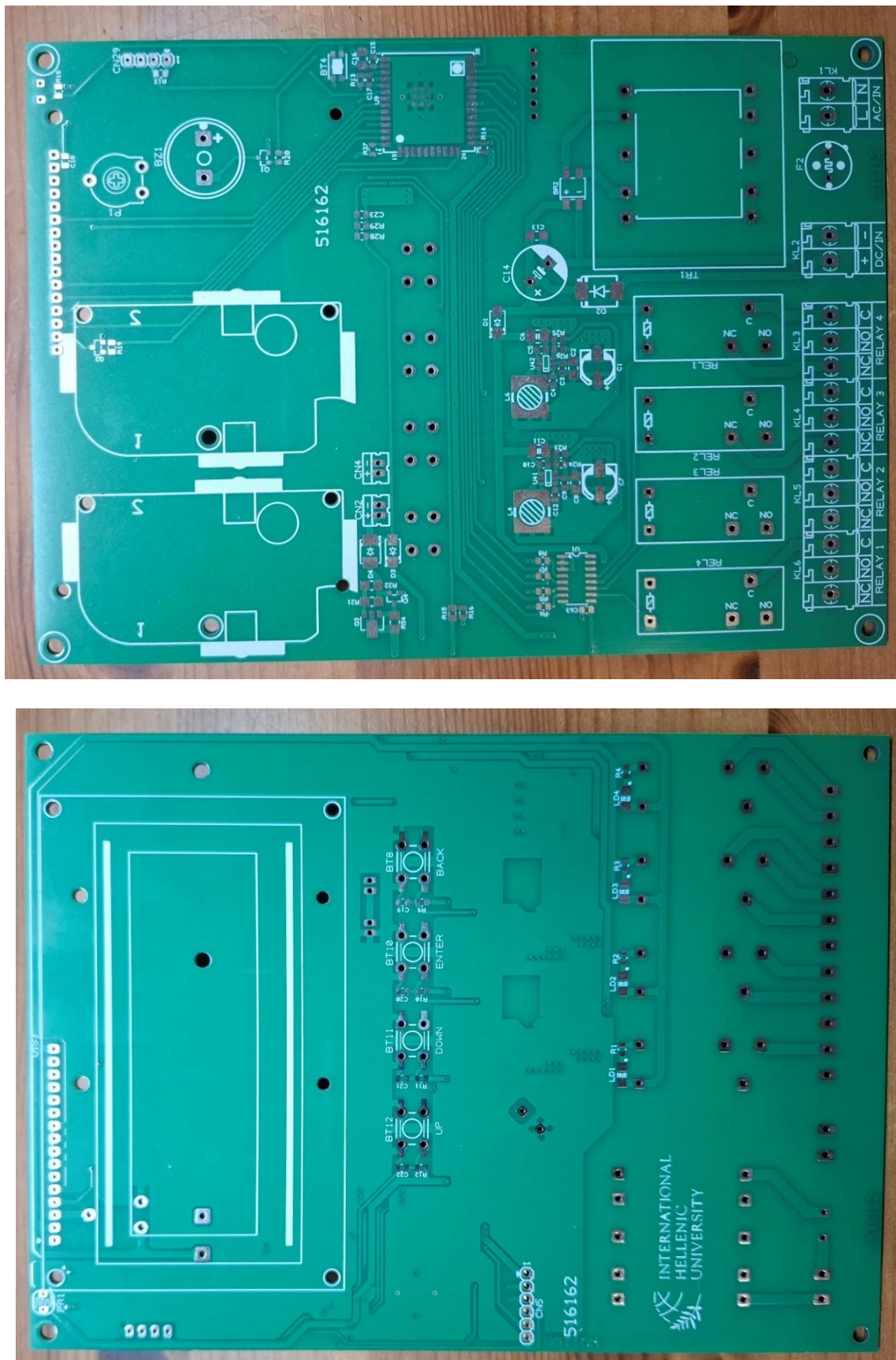
Σύμφωνα με τις οδηγίες σχεδίασης που παρέχονται στο datasheet του μετατροπέα LMR54406 της εταιρείας Texas Instruments, ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή τοποθέτηση των παθητικών στοιχείων γύρω από το ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ο πυκνωτής παράκαμψης εισόδου (CIN) θα πρέπει να τοποθετείται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στους ακροδέκτες VIN και GND, ώστε να περιορίζεται το μήκος των διαδρομών υψηλού ρεύματος και να εξασφαλίζεται η άμεση παροχή στιγμιαίου ρεύματος προς το ολοκληρωμένο κύκλωμα κατά τη διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα. Παράλληλα, οι πυκνωτές εισόδου και εξόδου πρέπει να συνδέονται σε τοπική επιφάνεια γείωσης στην επάνω πλευρά της πλακέτας.

Επιπλέον, οι διαδρομές του σήματος ανάδρασης (feedback) θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν συντομότερες και να δρομολογούνται μακριά από θορυβώδεις κόμβους του κυκλώματος. Επίσης, οι αγώγιμες διαδρομές των γραμμών VIN, VOUT και GND προτείνεται να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο πλάτος, ώστε να μειώνονται οι πτώσεις τάσης και να βελτιώνεται η απόδοση του μετατροπέα.

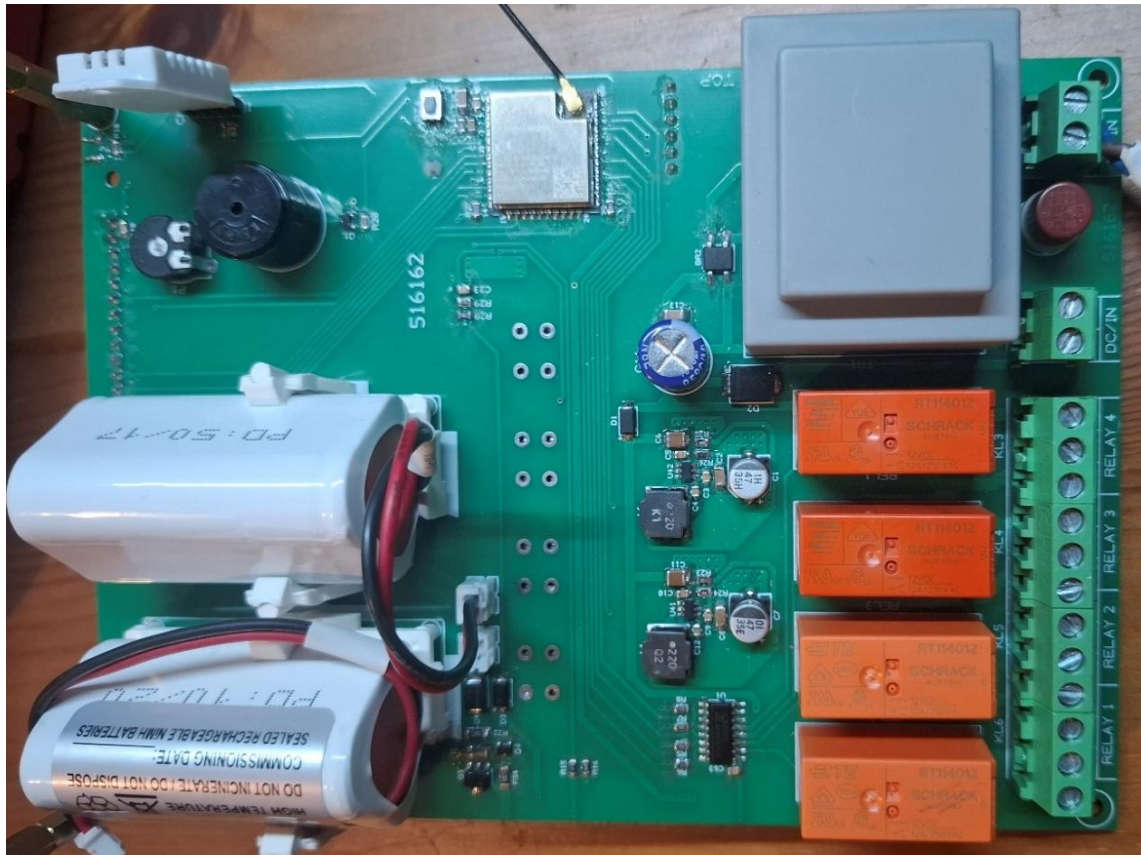
Τέλος, για τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κυκλώματος προτείνεται η χρήση επαρκούς επιφάνειας χαλκού για την απαγωγή θερμότητας, καθώς και η χρήση θερμικών νίας που συνδέουν τα επίπεδα γείωσης των διαφορετικών στρωμάτων της πλακέτας [9].



Εικόνα 217 – Layout της πλακέτας PCB: (α) Top layer, (β) Bottom layer.



Εικόνα 2.18 – Κατασκευασμένη πλακέτα PCB χωρίς εξαρτήματα: (α) επάνω όψη και (β) κάτω όψη.



Εικόνα 2.19 – Κατασκευασμένη πλακέτα PCB με εξαρτήματα: (α) επάνω όψη και (β) κάτω όψη.

Κεφάλαιο 3^ο: Λογισμικό Συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τη λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου των συνθηκών στον χώρο αποθήκευσης κρασιών. Το λογισμικό του συστήματος υλοποιήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C/C++ χρησιμοποιώντας το προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino IDE, το οποίο παρέχει υποστήριξη για τον μικροελεγκτή ESP32 μέσω της αντίστοιχης βιβλιοθήκης ανάπτυξης. Το λογισμικό είναι υπεύθυνο για τον συντονισμό των επιμέρους υποσυστημάτων της συσκευής, τη συλλογή των περιβαλλοντικών μετρήσεων του χώρου αποθήκευσης, τον έλεγχο των ρελέ, καθώς και τη μετάδοση των μετρήσεων σε απομακρυσμένο διακομιστή για την ενημέρωση του χρήστη.

Η εκτέλεση του λογισμικού πραγματοποιείται στον μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος αποτελεί την κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος. Το λογισμικό του συστήματος διαβάσει τις μετρήσεις από τους αισθητήρες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και φωτισμού και επεξεργάζεται τα δεδομένα που συλλέγονται από αυτούς. Επιπλέον, το σύστημα παρέχει τοπική ενημέρωση στον χρήστη μέσω της οθόνης LCD σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας.

Το λογισμικό λειτουργεί ως σύστημα ελέγχου, λαμβάνοντας αποφάσεις με βάση τις μετρούμενες τιμές και τα προκαθορισμένα κατώφλια λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα αξιολογεί συνεχώς τις περιβαλλοντικές συνθήκες του χώρου και στην περίπτωση που κριθεί αναγκαίο ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τις συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Κατά τον σχεδιασμό του λογισμικού δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, καθώς και στην αποφυγή μπλοκαρισμάτων κατά την εκτέλεση. Το λογισμικό έχει αναπτυχθεί με τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται άμεσα στις ενέργειες του χρήστη και στις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών, εξασφαλίζοντας ομαλή και συνεχή λειτουργία σε πραγματικό χρόνο.

Το σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί αξιόπιστα τόσο με ενεργή σύνδεση στο διαδίκτυο όσο και σε περιπτώσεις απώλειας συνδεσιμότητας. Σε περίπτωση διακοπής του δικτύου, οι μετρήσεις συνεχίζουν να καταγράφονται τοπικά στη συσκευή και αποστέλλονται στην πλατφόρμα ThingSpeak όταν αποκατασταθεί η σύνδεση. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η συνεχής λειτουργία και καταγραφή των δεδομένων.

3.2 Ροή λειτουργίας και χρονισμός λογισμικού

Η λειτουργία του λογισμικού βασίζεται στο μοντέλο εκτέλεσης που χρησιμοποιείται στο περιβάλλον ανάπτυξης Arduino, το οποίο αποτελείται από τις συναρτήσεις `setup()` και `loop()`. Η συνάρτηση `setup()` εκτελείται μία φορά κατά την εκκίνηση του μικροελεγκτή και χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση των υποσυστημάτων του συστήματος. Αντίθετα, η συνάρτηση `loop()` εκτελείται συνεχώς σε έναν επαναληπτικό κύκλο και περιλαμβάνει την κύρια λειτουργία του προγράμματος, όπως την ανάγνωση των αισθητήρων, τον έλεγχο των εξόδων και τη διαχείριση της επικοινωνίας με το δίκτυο.

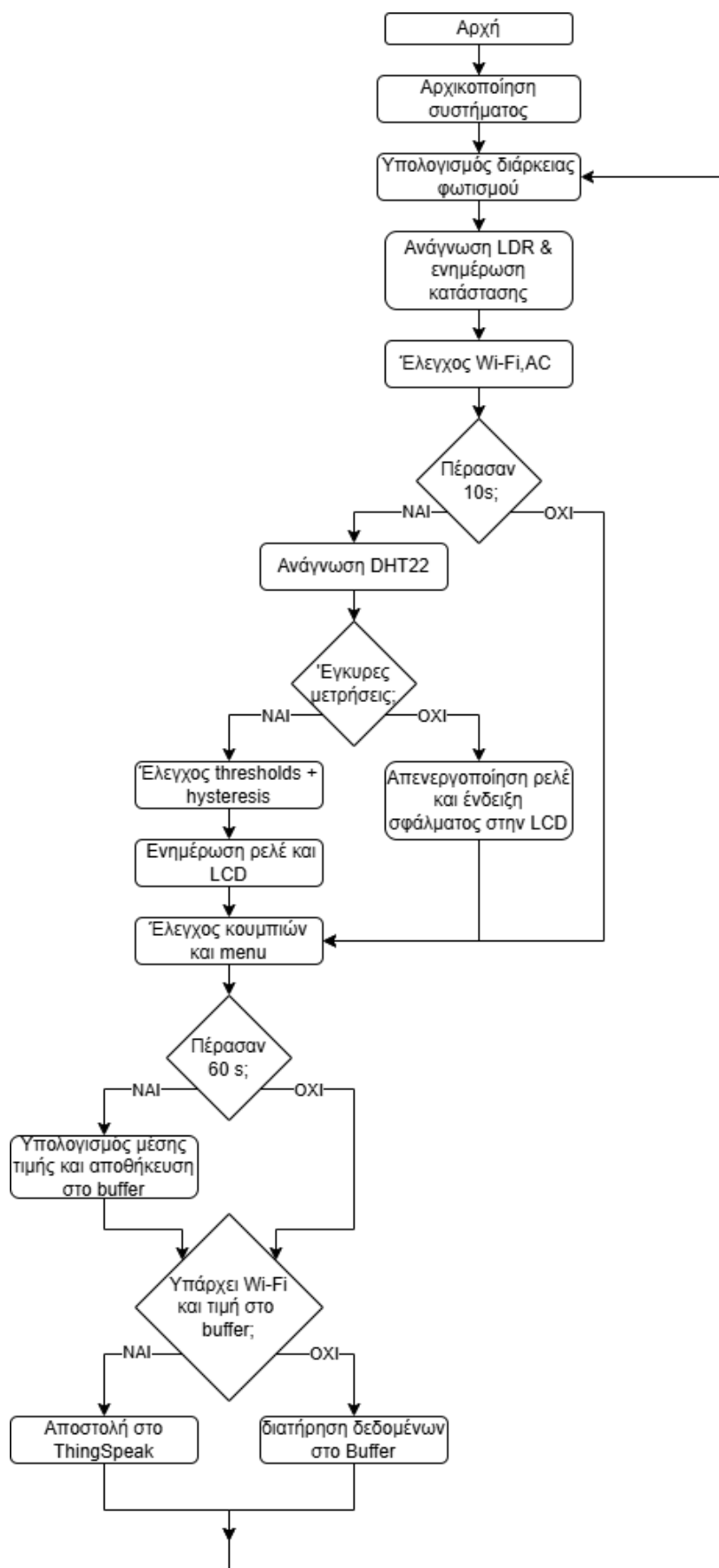
Κατά την εκκίνηση του μικροελεγκτή πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των ψηφιακών και αναλογικών εισόδων και εξόδων, η αρχικοποίηση της οθόνης LCD και των μηχανισμών διεπαφής χρήστη (πλήκτρα και βομβητής), καθώς και η προετοιμασία των υποσυστημάτων αισθητήρων και δικτυακής επικοινωνίας. Παράλληλα, το σύστημα επιχειρεί σύνδεση στο διαδίκτυο για προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, συγκεκριμένα κατά τα πρώτα έξι δευτερόλεπτα από την ενεργοποίησή του, ώστε να

αποφεύγεται η καθυστέρηση της εκκίνησης σε περίπτωση απουσίας σύνδεσης. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αρχικοποίησης πραγματοποιείται αρχική ανάγνωση των περιβαλλοντικών μετρήσεων και οι αντίστοιχες τιμές προβάλλονται στην οθόνη LCD.

Η κύρια λειτουργία του συστήματος υλοποιείται εντός της επαναληπτικής συνάρτησης `loop()`, η οποία εκτελείται διαρκώς κατά τη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής. Σε κάθε κύκλο εκτέλεσης πραγματοποιούνται έλεγχοι που αφορούν την κατάσταση της δικτυακής σύνδεσης, την κατάσταση τροφοδοσίας, την ανάγνωση των αισθητήρων, την επεξεργασία της εισόδου από τα μηχανικά κουμπιά, τον υπολογισμό του χρόνου φωτισμού στον χώρο αποθήκευσης και την αξιολόγηση των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος. Η σειρά εκτέλεσης έχει επιλεγεί έτσι ώστε να διασφαλίζεται η έγκαιρη ενημέρωση της κατάστασης του συστήματος πριν από τη λήψη αποφάσεων που αφορούν την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των ρελέ ελέγχου.

Για την ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, οι επιμέρους λειτουργίες δεν εκτελούνται σε κάθε κύκλο με την ίδια συχνότητα. Αντίθετα, χρησιμοποιούνται ανεξάρτητοι μηχανισμοί χρονισμού, οι οποίοι καθορίζουν πότε θα εκτελεστεί κάθε λειτουργία. Με τον τρόπο αυτό, η ανάγνωση των αισθητήρων, ο έλεγχος της συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο, η αποθήκευση μετρήσεων και η αποστολή δεδομένων πραγματοποιούνται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, χωρίς να δημιουργούνται καθυστερήσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την απόκριση του συστήματος.

Η υλοποίηση της ροής λειτουργίας χωρίς τη χρήση μπλοκαριστικών καθυστερήσεων επιτρέπει στο σύστημα να ανταποκρίνεται άμεσα στις ενέργειες του χρήστη και στις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών. Παράλληλα, διασφαλίζεται η σταθερή καταγραφή και αποστολή δεδομένων, καθώς και η ομαλή λειτουργία της διεπαφής χρήστη. Με τον τρόπο αυτό το λογισμικό παραμένει ευέλικτο, επιτρέποντας την εύκολη προσθήκη νέων λειτουργιών χωρίς σημαντικές αλλαγές στη βασική δομή του προγράμματος. Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζεται η κύρια ροή λειτουργίας του συστήματος, όπως υλοποιείται στη συνάρτηση `loop()`.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ροής κύριας λειτουργίας του συστήματος

```
void loop() {
    uint32_t now = millis();
    uint32_t delta = now - lastLightTime;

    if (lightIsOn) {
        lightOnMs += delta;
    }

    lastLightTime = now;

    checkDayChange();

    pollWiFi();
    pollAC();
    pollLDR();

    if (now - tLastDHT >= 10000) {
        tLastDHT = now;
        pollDHT();
    }

    setButtonFlags();

    if (screen == HOME) {
        handleHomeButtons();
    } else if (screen == THRESHOLDS_MENU) {
        handleThresholdButtons();
    }

    if (now - lastStoreTime >= STORE_INTERVAL) {
        lastStoreTime = now;

        if (!isnan(tempC) && humPct >= 0) {
            float avgTemp = AvgTemp();
            int avgHum = AvgHum();
        }
    }
}
```

```

        enqueueSample(avgTemp, avgHum, lightIsOn);
    }
}

sendToThingSpeak();
}

```

3.3 Υποσύστημα Αισθητήρων

3.3.1 Αισθητήρας DHT22

Στο παρόν σύστημα, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του χώρου, χρησιμοποιείται ο ψηφιακός αισθητήρας DHT22 [16]. Ο μικροελεγκτής συλλέγει τα περιβαλλοντικά δεδομένα από τον αισθητήρα και, στη συνέχεια, τα αξιοποιεί τόσο για τον έλεγχο των ρελέ του συστήματος όσο και για την προβολή των αντίστοιχων τιμών στην οθόνη LCD.

Η λήψη των μετρήσεων από τον αισθητήρα πραγματοποιείται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική φόρτωση του μικροελεγκτή και η επαναλαμβανόμενη ανάγνωση ίδιων δεδομένων. Επιπλέον, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αισθητήρα DHT22, το ελάχιστο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων είναι περίπου δύο δευτερόλεπτα, γεγονός που λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό του λογισμικού. Η ανάγνωση του αισθητήρα στο σύστημα πραγματοποιείται ανά περίπου 10 δευτερόλεπτα, με τη βοήθεια ενός εσωτερικού μηχανισμού μέτρησης χρόνου του μικροελεγκτή.

Μετά τη λήψη των μετρήσεων θερμοκρασίας και υγρασίας, ο μικροελεγκτής ελέγχει την εγκυρότητα των δεδομένων που λαμβάνονται από τον αισθητήρα. Σε περίπτωση μη έγκυρης μέτρησης, το σύστημα αναγνωρίζει την κατάσταση αυτή και χαρακτηρίζει τη μέτρηση ως μη έγκυρη, ώστε να μην ληφθεί υπόψη κατά τη λειτουργία του.

Επιπλέον, στο σύστημα εφαρμόζεται μηχανισμός ελέγχου της μεταβολής των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, η τιμή της θερμοκρασίας ενημερώνεται μόνο όταν παρατηρηθεί μεταβολή μεγαλύτερη από 0,1 °C, ενώ αντίστοιχα η τιμή της υγρασίας ενημερώνεται μόνο όταν μεταβληθεί κατά τουλάχιστον μία ποσοστιαία μονάδα. Η ύπαρξη του μηχανισμού αυτού βοηθάει στην αποφυγή συνεχών ανανεώσεων της οθόνης LCD, καθώς και στη μείωση άσκοπων ελέγχων των ρελέ του συστήματος.

Σε περίπτωση που διαπιστωθεί μεταβολή στις μετρήσεις, ενημερώνεται η απεικόνιση των τιμών στην οθόνη LCD και επανεκτελείται ο έλεγχος των ρελέ του συστήματος.

```

void pollDHT() {

    float t = dht.readTemperature();
    float h = dht.readHumidity();

    bool changed = false;

```

```
if (!isnan(t)) {
    addTempSample(t);

    if (fabs(t - lastTemp) >= 0.1) {
        tempC = t;
        lastTemp = t;
        changed = true;
    }

} else {
    if (!isnan(tempC)) {
        tempC = NAN;
        changed = true;
    }
}

if (!isnan(h)) {
    int hInt = (int)round(h);
    addHumSample(hInt);
    if (abs(hInt - lastHumid) >= 1) {
        humPct = hInt;
        lastHumid = hInt;
        changed = true;
    }

} else {
    if (humPct >= 0) {
        humPct = -1;
        changed = true;
    }
}

if (changed) {
    updateRelays();

    if (screen == HOME)
        renderHome();
}
}
```

3.3.2 Ανίχνευση φωτισμού

Η ανίχνευση της φωτεινότητας στο σύστημα πραγματοποιείται με τη χρήση της φωτοαντίστασης LC5527, η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της παρουσίας ή απουσίας φωτισμού στον χώρο. Ο μικροελεγκτής λαμβάνει από τον αισθητήρα αναλογικές μετρήσεις, τις οποίες επεξεργάζεται ώστε να καθορίσει την κατάσταση φωτισμού του περιβάλλοντος.

Η ανάγνωση των τιμών πραγματοποιείται μέσω μιας αναλογικής εισόδου του μικροελεγκτή και οι μετρήσεις συγκρίνονται με προκαθορισμένα κατώφλια, τα οποία έχουν επιλεγεί κατάλληλα για την αξιολόγηση της φωτεινότητας του χώρου. Για την αποφυγή συχνών και ανεπιθύμητων εναλλαγών της κατάστασης φωτισμού έχουν οριστεί δύο διαφορετικά κατώφλια.

Συγκεκριμένα, όταν η τιμή της μέτρησης υπερβεί το ανώτερο κατώφλι ενεργοποιείται η ένδειξη φωτισμού, ενώ όταν η τιμή μειωθεί κάτω από το κατώτερο κατώφλι η ένδειξη απενεργοποιείται. Στην ενδιάμεση περιοχή τιμών διατηρείται η προηγούμενη κατάσταση φωτισμού.

```
void pollLDR() {
    int raw = analogRead(PIN_LDR);

    if (!lightIsOn && raw > lightOnThr) {
        lightIsOn = true;
    } else if (lightIsOn && raw < lightOffThr) {
        lightIsOn = false;
    }
}
```

3.3.3 Καταγραφή ημερήσιας διάρκειας φωτισμού

Κατά τη λειτουργία του συστήματος καταγράφεται η συνολική διάρκεια φωτισμού που επικρατεί στον χώρο αποθήκευσης των κρασιών σε ημερήσια βάση. Ειδικότερα, η χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών ελέγχων της κατάστασης φωτισμού υπολογίζεται και στη συνέχεια εξετάζεται αν η ένδειξη φωτεινότητας ήταν ενεργή κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Στην περίπτωση που υπήρχε φωτισμός, η χρονική διαφορά προστίθεται στη συνολική διάρκεια φωτισμού. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η συνολική χρονική περίοδος κατά την οποία ο χώρος παρέμεινε φωτισμένος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε περίπτωση αλλαγής της ημερολογιακής ημέρας, η συνολική διάρκεια φωτισμού μηδενίζεται και ξεκινά νέα καταγραφή για την επόμενη ημέρα.

```
uint32_t now = millis();
uint32_t delta = now - lastLightTime;
if (lightIsOn) {
    lightOnMs += delta;
}
lastLightTime = now;

checkDayChange();
```

3.3.4 Ανίχνευση κατάστασης τροφοδοσίας

Ο μικροελεγκτής είναι σε θέση να ανιχνεύει αν το σύστημα τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή ενέργειας ή από την εφεδρική μπαταρία. Μια ψηφιακή είσοδος του μικροελεγκτή συνδέεται με την τάση τροφοδοσίας της συσκευής μέσω κατάλληλου διαιρέτη τάσης. Όταν υπάρχει τάση από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας, ο μικροελεγκτής ανιχνεύει λογικό επίπεδο υψηλής τάσης (λογικό 1), ενώ στην περίπτωση απουσίας της εξωτερικής τάσης ανιχνεύεται λογικό επίπεδο χαμηλής τάσης (λογικό 0). Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται αν το σύστημα λειτουργεί μέσω εξωτερικής τροφοδοσίας ή μέσω της εφεδρικής μπαταρίας.

Σε περίπτωση αλλαγής της λογικής κατάστασης στον ακροδέκτη του μικροελεγκτή, η οθόνη LCD ενημερώνεται με τη νέα κατάσταση, ειδοποιώντας τον χρήστη για την ενεργή πηγή ενέργειας. Όταν το σύστημα λειτουργεί μέσω της εφεδρικής μπαταρίας, ο μικροελεγκτής απενεργοποιεί τον οπίσθιο φωτισμό (backlight) της οθόνης LCD με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της αυτονομίας του συστήματος.

```
void pollAC() {
    int raw = digitalRead(PIN_AC_SENSE);

    bool currentAc;
    if (raw == HIGH)
        currentAc = true;
    else
        currentAc = false;

    if (currentAc == lastAcState)
        return;

    lastAcState = currentAc;
    acMains = currentAc;

    if (acMains == true) {
        digitalWrite(PIN_LCD_BL, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(PIN_LCD_BL, LOW);
    }
    updateRelays();

    if (screen == HOME)
        renderHome();
}
```

}

3.4 Υποσύστημα ελέγχου

3.4.1 Έλεγχος υγρασίας και θερμοκρασίας

Στο παρόν σύστημα, οι μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας συγκρίνονται με προκαθορισμένα κατώφλια, τα οποία ορίζονται από τον χρήστη μέσω της διεπαφής χρήστη. Όταν μία από τις μετρήσεις αποκλίνει από το επιθυμητό εύρος τιμών, ενεργοποιείται η αντίστοιχη έξοδος του συστήματος, η οποία ελέγχει τη συσκευή ψύξης, θέρμανσης, ύγρανσης ή αφύγρανσης με σκοπό την επαναφορά της τιμής εντός των επιτρεπτών ορίων. Όταν η μετρούμενη τιμή επανέλθει εντός του προκαθορισμένου εύρους, η αντίστοιχη έξοδος απενεργοποιείται, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό τη διατήρηση ελεγχόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών στον χώρο αποθήκευσης των κρασιών.

Για την αποφυγή της συνεχούς ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των συσκευών εφαρμόζεται μηχανισμός υστέρησης. Συγκεκριμένα, στα κατώφλια ελέγχου εισάγεται ένα μικρό περιθώριο ασφαλείας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι συχνές εναλλαγές κατάστασης των συσκευών όταν οι μετρούμενες τιμές βρίσκονται κοντά στα όρια.

Τέλος, σε περίπτωση που η μέτρηση που λαμβάνεται από τον αισθητήρα δεν είναι έγκυρη, όλες οι έξοδοι του συστήματος απενεργοποιούνται μέχρι την λήψη έγκυρων δεδομένων διασφαλίζοντας τη σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

```
void updateRelays() {

    if (!acMains) {
        relayCooling      = false;
        relayHeating       = false;
        relayHumidifier    = false;
        relayDehumidifier  = false;

        digitalWrite(PIN_RELAY_COOL, LOW);
        digitalWrite(PIN_RELAY_HEAT, LOW);
        digitalWrite(PIN_RELAY_HUM,  LOW);
        digitalWrite(PIN_RELAY_DEH,  LOW);
        return;
    }

    if (!isnan(tempC)) {

        if (relayCooling == false) {
            if (tempC >= tempHigh) {
                relayCooling = true;
                relayHeating = false;
            }
        } else {
            if (tempC <= (tempHigh - TEMP_HYST)) {
                relayCooling = false;
            }
        }
    }
}
```

```
    }  
}  
  
if (relayHeating == false) {  
    if (tempC <= tempLow) {  
        relayHeating = true;  
        relayCooling = false;  
    }  
} else {  
    if (tempC >= (tempLow + TEMP_HYST)) {  
        relayHeating = false;  
    }  
}  
  
} else {  
  
    relayHeating = false;  
    relayCooling = false;  
}  
  
if (humPct >= 0) {  
  
    if (relayDehumidifier == false) {  
        if (humPct >= humHigh) {  
            relayDehumidifier = true;  
            relayHumidifier = false;  
        }  
    } else {  
        if (humPct <= (humHigh - HUM_HYST)) {  
            relayDehumidifier = false;  
        }  
    }  
  
    if (relayHumidifier == false) {  
        if (humPct <= humLow) {  
            relayHumidifier = true;  
            relayDehumidifier = false;  
        }  
    } else {  
        if (humPct >= (humLow + HUM_HYST)) {  
            relayHumidifier = false;  
        }  
    }  
  
} else {  
    relayHumidifier = false;  
    relayDehumidifier = false;  
}  
}
```

3.4.2 Εφαρμογή εξόδων

Οι αποφάσεις που λαμβάνονται από τον μικροελεγκτή, με βάση τα προκαθορισμένα κατώφλια, οδηγούν στην ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των ψηφιακών εξόδων του συστήματος. Οι εξοδοί αυτές οδηγούν τα αντίστοιχα ρελέ, μέσω των οποίων πραγματοποιείται ο έλεγχος των εξωτερικών συσκευών. Για κάθε ελεγχόμενη λειτουργία (ψύξη, θέρμανση, ύγρανση και αφύγρανση) αντιστοιχεί μία ξεχωριστή ψηφιακή έξοδος.

Όταν ο μικροελεγκτής διαπιστώσει ότι απαιτείται η ενεργοποίηση κάποιας λειτουργίας, η αντίστοιχη ψηφιακή έξοδος τίθεται σε λογικό επίπεδο υψηλής τάσης (λογικό 1), ενεργοποιώντας το αντίστοιχο ρελέ και τη συνδεδεμένη συσκευή. Όταν οι συνθήκες επανέλθουν εντός των προκαθορισμένων ορίων, η έξοδος επανέρχεται σε λογικό επίπεδο χαμηλής τάσης (λογικό 0), με αποτέλεσμα την απενεργοποίηση του ρελέ και της συσκευής.

```
if (relayCooling) {  
    digitalWrite(PIN_RELAY_COOL, HIGH);  
} else {  
    digitalWrite(PIN_RELAY_COOL, LOW);  
}  
  
if (relayHeating) {  
    digitalWrite(PIN_RELAY_HEAT, HIGH);  
} else {  
    digitalWrite(PIN_RELAY_HEAT, LOW);  
}  
  
if (relayHumidifier) {  
    digitalWrite(PIN_RELAY_HUM, HIGH);  
} else {  
    digitalWrite(PIN_RELAY_HUM, LOW);  
}  
  
if (relayDehumidifier) {  
    digitalWrite(PIN_RELAY_DEH, HIGH);  
} else {  
    digitalWrite(PIN_RELAY_DEH, LOW);  
}
```

3.5 Υποσύστημα διεπαφής χρήστη (LCD & Πλήκτρα)

3.5.1 Ανάγνωση πλήκτρων και αποθορυβοποίηση

Στο παρόν σύστημα χρησιμοποιούνται τέσσερα μηχανικά πλήκτρα για την αλληλεπίδραση του χρήστη με τη διεπαφή της συσκευής. Τα πλήκτρα αυτά είναι συνδεδεμένα σε ψηφιακές εισόδους του μικροελεγκτή και χρησιμοποιούνται για τη μετάβαση μεταξύ των οθονών της διεπαφής και την τροποποίηση των κατωφλίων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Η χρήση μηχανικών πλήκτρων, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, συνοδεύεται από το φαινόμενο της αναπήδησης επαφών (debounce). Κατά τη διάρκεια ενός σύντομου χρονικού διαστήματος μετά το πάτημα ή την απελευθέρωση ενός πλήκτρου, η λογική του κατάστασης δεν είναι σταθερή και εναλλάσσεται μεταξύ λογικού 0 και λογικού 1, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην ανίχνευση λανθασμένων ή πολλαπλών πατημάτων. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, στο λογισμικό του συστήματος εφαρμόζεται αλγόριθμος αποθορυβοποίησης (debounce), ο οποίος αγνοεί τις στιγμιαίες και ασταθείς μεταβολές της κατάστασης του πλήκτρου και καταγράφει μόνο την τελική, ενέργεια του χρήστη. Τη στιγμή που ανιχνευθεί ένα έγκυρο πάτημα από τον χρήστη, ενεργοποιείται η αντίστοιχη σημαία πατήματος του πλήκτρου, αντί της συνεχούς παρακολούθησης και επεξεργασίας της κατάστασης των πλήκτρων. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται η μόνιμη παρακολούθηση των εισόδων.

Η διάρκεια του φαινομένου της αναπήδησης επαφών στα μηχανικά πλήκτρα είναι συνήθως μικρότερη από 10 ms [13]. Για τον λόγο αυτό, στο λογισμικό του συστήματος επιλέχθηκε στο χρόνο 50 ms, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιόπιστη ανίχνευση των πατημάτων των πλήκτρων.

```
void setButtonFlags() {
    for (int i = 0; i < NUM_BUTTONS; i++) {
        int reading = digitalRead(buttonPins[i]);
        if (reading != lastButtonState[i]) {
            lastDebounceTime[i] = millis();
        }
        if ((millis() - lastDebounceTime[i]) > debounceDelay) {
            if (reading != buttonState[i]) {
                buttonState[i] = reading;
                if (buttonState[i] == LOW) {
                    buttonFlags[i] = HIGH;
                }
            }
        }
        lastButtonState[i] = reading;
    }
}
```

3.5.2 Μηχανή καταστάσεων οθονών (Screen state machine)

Στο λογισμικό του συστήματος, η διεπαφή της οθόνης LCD υλοποιείται με τη μορφή μηχανής καταστάσεων, όπου κάθε οθόνη αντιστοιχεί σε μία διακριτή κατάσταση λειτουργίας. Στην παρούσα υλοποίηση έχουν οριστεί δύο βασικές καταστάσεις οθόνης: η HOME, η οποία αποτελεί την αρχική οθόνη προβολής των μετρήσεων και των ενδείξεων λειτουργίας του συστήματος, και η THRESHOLDS, στην οποία ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει και να ρυθμίσει τα κατώφλια λειτουργίας.

Η μετάβαση μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων πραγματοποιείται μέσω των μηχανικών πλήκτρων ENTER και BACK. Συγκεκριμένα, με το πάτημα του πλήκτρου ENTER ο χρήστης μεταβαίνει από την αρχική οθόνη HOME στο μενού ρυθμίσεων κατωφλίων, ενώ με το πάτημα του πλήκτρου BACK, κατά τη διάρκεια παραμονής στο μενού ρυθμίσεων, επιστρέφει στην αρχική οθόνη HOME.

Στο μενού THRESHOLDS χρησιμοποιείται δείκτης επιλογής (thrIndex), ο οποίος προσδιορίζει ποια παράμετρος είναι επιλεγμένη σε κάθε χρονική στιγμή. Ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τη θέση του δείκτη αυτού μέσω των πλήκτρων UP και DOWN, επιλέγοντας την επιθυμητή παράμετρο.

Επιπλέον, στο σύστημα υλοποιείται λειτουργία επεξεργασίας τιμών (thrEdit), η οποία ενεργοποιείται με το πάτημα του πλήκτρου ENTER. Όταν η λειτουργία επεξεργασίας είναι ενεργή, τα πλήκτρα UP και DOWN δεν μεταβάλλουν την επιλεγμένη παράμετρο, αλλά χρησιμοποιούνται για την αύξηση ή τη μείωση της τιμής του αντίστοιχου κατωφλίου. Η μεταβολή των κατωφλίων πραγματοποιείται με προκαθορισμένα βήματα, συγκεκριμένα 0,5 °C για τη θερμοκρασία και 1 % για τη σχετική υγρασία, ώστε να εξασφαλίζεται ελεγχόμενη και ακριβής ρύθμιση των παραμέτρων. Η έξοδος από τη λειτουργία επεξεργασίας πραγματοποιείται με το πάτημα του πλήκτρου BACK, επαναφέροντας το σύστημα στη λειτουργία πλοήγησης.

Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται σαφής και προβλέψιμη αλληλεπίδραση με τον χρήστη, ενώ η υλοποίηση της διεπαφής παραμένει εύκολα επεκτάσιμη για μελλοντική προσθήκη νέων οθονών ή λειτουργιών.

```
void handleHomeButtons() {
    if (buttonFlags[BTN_ENTER]) {
        buttonFlags[BTN_ENTER] = LOW;
        screen = THRESHOLDS_MENU;
        renderThresholdsMenu();
    }
}
```

```
void handleThresholdButtons() {

    if (!thrEdit) {

        if (buttonFlags[BTN_UP]) {
            buttonFlags[BTN_UP] = LOW;
            if (thrIndex > 0)
                thrIndex--;
        }
    }
}
```

```

        renderThresholdsMenu();
    }
    if (buttonFlags[BTN_DOWN]) {
        buttonFlags[BTN_DOWN] = LOW;
        if (thrIndex < 3)
            thrIndex++;
        renderThresholdsMenu();
    }

    if (buttonFlags[BTN_ENTER]) {
        buttonFlags[BTN_ENTER] = LOW;
        thrEdit = true;
        renderThresholdsMenu();
    }

    if (buttonFlags[BTN_BACK]) {
        buttonFlags[BTN_BACK] = LOW;
        screen = HOME;
        renderHome();
    }

    return;

```

3.5.3 Απεικόνιση στην LCD (Home screen)

Η αρχική οθόνη (HOME) του συστήματος χρησιμοποιείται για την άμεση ενημέρωση του χρήστη σχετικά με τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος. Συγκεκριμένα, στην οθόνη προβάλλονται σε πραγματικό χρόνο η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του χώρου φύλαξης των κρασιών, καθώς και γενικότερες πληροφορίες που αφορούν την κατάσταση τροφοδοσίας, τη λειτουργία των ρελέ και τη συνδεσιμότητα του συστήματος.

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία εμφανίζονται στην οθόνη LCD σε αριθμητική μορφή. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν έγκυρες μετρήσεις από τον αισθητήρα, το σύστημα προβάλλει ειδική ένδειξη, ώστε ο χρήστης να ενημερώνεται ότι τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα και να αποφεύγεται η προβολή λανθασμένων τιμών.

Επιπλέον, στην αρχική οθόνη απεικονίζονται οι καταστάσεις λειτουργίας των ρελέ ελέγχου (ψύξη, θέρμανση, ύγρανση και αφύγρανση). Για την καλύτερη απεικόνιση της κατάστασης λειτουργίας των ρελέ έχουν δημιουργηθεί ειδικοί (custom) χαρακτήρες στην οθόνη LCD, μέσω των οποίων γίνεται σαφής η διάκριση μεταξύ ενεργοποιημένης και απενεργοποιημένης κατάστασης. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης μπορεί να αναγνωρίζει άμεσα την κατάσταση λειτουργίας των αντίστοιχων συσκευών. Τέλος, στην οθόνη προβάλλεται η κατάσταση σύνδεσης του συστήματος στο διαδίκτυο, καθώς και η τρέχουσα κατάσταση τροφοδοσίας, ενημερώνοντας τον χρήστη αν η συσκευή λειτουργεί με εξωτερική

τροφοδοσία ή με την εφεδρική μπαταρία. Με τον τρόπο αυτό προβάλλονται στον χρήστη σημαντικές πληροφορίες λειτουργίας, παρέχοντάς του πλήρη εικόνα και έλεγχο της κατάστασης του αυτοματισμού.

```
void renderHome() {
    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Temp: ");
    printFixedTemp(tempC);

    // Line 2
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Hum : ");
    if (humPct < 0) {
        lcd.print("--");
    } else {
        lcd.print(humPct);
    }
    lcd.print("%");
    // Line 3
    lcd.setCursor(0, 2);
    printRelayRow();

    // Line 4
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("Net : ");

    if (netOnline) {
        lcd.print("Online");
    } else {
        lcd.print("Offline");
    }

    lcd.print(" | ");

    if (acMains) {
        lcd.print("AC");
    } else {
        lcd.print("Bat");
    }
}
```

```
}  
}
```

3.6 Διαχείριση παραμέτρων και περιορισμοί ασφαλείας

Για τη σωστή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή περιορισμών ασφαλείας στις παραμέτρους που ορίζονται από τον χρήστη. Οι περιορισμοί αυτοί αποτρέπουν την εισαγωγή μη ρεαλιστικών ή αντιφατικών τιμών, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε λανθασμένη ή ασταθή λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα, τα κατώφλια θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας περιορίζονται εντός προκαθορισμένων λογικών ορίων. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η ρύθμιση τιμών εκτός του επιτρεπτού εύρους λειτουργίας του συστήματος ή των ελεγχόμενων συσκευών.

Επιπλέον, εφαρμόζεται ελάχιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των δύο κατωφλίων χαμηλής και υψηλής τιμής. Ο περιορισμός αυτός αποτρέπει τη δημιουργία αντιφατικών ρυθμίσεων, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν συνεχείς εναλλαγές κατάστασης των ρελέ ελέγχου.

Η λειτουργία των παραπάνω περιορισμών συμβάλλει στη σταθερότητα της λειτουργίας του συστήματος, εξασφαλίζοντας ότι οι ρυθμίσεις που εφαρμόζονται είναι πάντοτε ασφαλείς και λειτουργικά αποδεκτές.

3.7 Δικτύωση και αποστολή δεδομένων (IoT)

3.7.1 Διαχείριση Wi-Fi σύνδεσης

Για την αποστολή των δεδομένων που συλλέγονται από το σύστημα σε διαδικτυακή βάση δεδομένων μέσω ασύρματης επικοινωνίας, απαιτείται η σύνδεση της συσκευής στο διαδίκτυο. Η σύνδεση αυτή επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Για τη διασφάλιση της πρόσβασης στο διαδίκτυο, η συσκευή ελέγχει σε τακτά χρονικά διαστήματα την κατάσταση της συνδεσιμότητας, με τη βοήθεια εσωτερικού μηχανισμού μέτρησης χρόνου. Σε περίπτωση που εντοπιστεί απώλεια της σύνδεσης, ο μικροελεγκτής επιχειρεί αυτόματα την επανασύνδεση στο διαδίκτυο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί επιτυχής σύνδεση, χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση του χρήστη. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η συνεχής και αξιόπιστη λειτουργία της δικτυακής επικοινωνίας του συστήματος.

Όταν η συσκευή βρίσκεται εκτός σύνδεσης, στην οθόνη LCD προβάλλεται σχετική ένδειξη απουσίας συνδεσιμότητας (offline). Αντίθετα, όταν η συσκευή είναι συνδεδεμένη, εμφανίζεται αντίστοιχη ένδειξη ενεργής σύνδεσης(online), παρέχοντας στον χρήστη άμεση πληροφόρηση για την κατάσταση της δικτυακής επικοινωνίας.

```
void pollWiFi() {  
  
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {  
        if (!netOnline) {  
            initTime();  
            netOnline = true;  
        }  
    }  
}
```

```

        if (screen == HOME)
            renderHome();
    }
    return;
}

if (netOnline) {
    netOnline = false;
    if (screen == HOME)
        renderHome();
}
WiFi.reconnect();
}

```

3.7.2 Συγχρονισμός ώρας (NTP)

Για τον υπολογισμό της ημερήσιας διάρκειας φωτισμού κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ακριβούς ημερομηνίας και ώρας, πληροφορία την οποία ο μικροελεγκτής δεν μπορεί να παρέχει αυτόνομα. Για τον λόγο αυτό αξιοποιείται το πρωτόκολλο Network Time Protocol (NTP), το οποίο επιτρέπει τον συγχρονισμό της εσωτερικής ώρας του συστήματος μέσω του διαδικτύου.

Κατά την αρχική σύνδεση στο διαδίκτυο, ο μικροελεγκτής λαμβάνει την ακριβή ώρα και ημερομηνία μέσω του πρωτοκόλλου NTP. Η χρονική πληροφορία αποθηκεύεται και διατηρείται εσωτερικά στο ρολόι του μικροελεγκτή. Σε περίπτωση μεταβολής της κατάστασης σύνδεσης από offline σε online, πραγματοποιείται εκ νέου συγχρονισμός μέσω του πρωτοκόλλου NTP, ώστε να διορθώνονται πιθανές αποκλίσεις και να διασφαλίζεται η ακρίβεια της χρονικής πληροφορίας.

```

void checkDayChange() {
    if (!netOnline && currentDay == -1) {
        return;
    }

    struct tm timeinfo;

    if (!getLocalTime(&timeinfo, 50)) {
        return;
    }

    int day = timeinfo.tm_yday;

    if (currentDay == -1) {
        currentDay = day;
    }
}

```

```

    return;
}

if (day != currentDay) {
    currentDay = day;
    lightOnMs = 0;
}
}

```

3.7.3 Αποθήκευση δειγμάτων σε buffer (offline λειτουργία)

Κατά τη διάρκεια που η συσκευή δεν είναι συνδεδεμένη στο διαδίκτυο, ο μικροελεγκτής δεν έχει τη δυνατότητα να αποστείλει τις μετρήσεις στη διαδικτυακή βάση δεδομένων. Προκειμένου να μην χαθούν τα δεδομένα αυτά, οι μετρήσεις αποθηκεύονται προσωρινά σε ενδιάμεση μνήμη (buffer). Το μέγεθος της μνήμης που δεσμεύθηκε στην SRAM για την αποθήκευση αυτή είναι 24 KByte, το οποίο θεωρήθηκε επαρκές για την προσωρινή αποθήκευση σημαντικού αριθμού μετρήσεων. Μετά την αποκατάσταση της σύνδεσης στο διαδίκτυο, τα αποθηκευμένα δεδομένα αποστέλλονται σταδιακά στη βάση δεδομένων, διασφαλίζοντας την συνεχή καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών στον χώρο αποθήκευσης των κρασιών.

Τα δεδομένα αποθηκεύονται και αποστέλλονται με τη μορφή δομής δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τις μετρήσεις της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της φωτεινότητας. Η ομαδοποίηση των τιμών σε ένα ενιαίο πακέτο δείγματος διευκολύνει τη διαδικασία αποστολής, καθώς κάθε εγγραφή αντιστοιχεί σε ένα ολοκληρωμένο σύνολο μετρήσεων. Παράλληλα, η αποστολή προς τη διαδικτυακή βάση δεδομένων πραγματοποιείται σε μία ενιαία αποστολή, μειώνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων μεταδόσεων.

Η μνήμη προσωρινής αποθήκευσης των δειγμάτων υλοποιείται με τη μορφή κυκλικού buffer, ο οποίος επιτρέπει την εισαγωγή νέων δεδομένων χωρίς να απαιτείται η μετακίνηση των ήδη αποθηκευμένων μετρήσεων.

Σε περίπτωση που η ενδιάμεση μνήμη γεμίσει πλήρως, απορρίπτονται οι παλαιότερες μετρήσεις, ώστε να δημιουργηθεί χώρος για την αποθήκευση νεότερων δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα διατηρεί τα πιο πρόσφατα δεδομένα ακόμη και σε περιόδους μεγάλης διάρκειας χωρίς σύνδεση στο διαδίκτυο.

```

void enqueueSample(float t, int h, bool light) {
    if (qCount == SAMPLE_BUFFER_SIZE) {
        qHead = (qHead + 1) % SAMPLE_BUFFER_SIZE
        qCount--;
    }
    sampleBuffer[qTail].temp = t;
    sampleBuffer[qTail].hum = h;
    sampleBuffer[qTail].light = light;
}

```

```

qTail = (qTail + 1) % SAMPLE_BUFFER_SIZE
qCount++;
}

```

3.7.4 Αποστολή στο ThingSpeak και catch-up

Πριν την αποστολή των δεδομένων στην πλατφόρμα ThingSpeak εφαρμόζεται διαδικασία εξομάλυνσης των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, ο μικροελεγκτής συλλέγει έξι διαδοχικές μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε χρονικά διαστήματα 10 δευτερολέπτων. Από το σύνολο των μετρήσεων απορρίπτονται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή, ενώ ο τελικός μέσος όρος υπολογίζεται από τις τέσσερις εναπομένουσες τιμές.

Στη συνέχεια, οι επεξεργασμένες μετρήσεις αποθηκεύονται στην προσωρινή μνήμη και ακολουθεί η αποστολή τους στη διαδικτυακή πλατφόρμα ThingSpeak, η οποία χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και την απεικόνιση των περιβαλλοντικών δεδομένων σε μορφή διαγραμμάτων. Μέσω της πλατφόρμας αυτής καθίσταται δυνατή η απομακρυσμένη παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της φωτεινότητας, παρέχοντας στον χρήστη άμεση εικόνα των συνθηκών που επικρατούν στον χώρο αποθήκευσης των κρασιών.

Η αποστολή των δεδομένων πραγματοποιείται μόνο όταν ο μικροελεγκτής διαθέτει ενεργή σύνδεση στο διαδίκτυο και υπάρχουν αποθηκευμένα δείγματα στην προσωρινή μνήμη προς αποστολή. Με τον τρόπο αυτό αποτρέπονται οι άσκοπες προσπάθειες μετάδοσης και διασφαλίζεται η ομαλή και αποδοτική λειτουργία του συστήματος.

Σε περιπτώσεις όπου το σύστημα έχει παραμείνει εκτός σύνδεσης στο διαδίκτυο και έχει συσσωρευτεί μεγάλος αριθμός δειγμάτων στην προσωρινή μνήμη, ενεργοποιείται μηχανισμός λειτουργίας catch-up. Συγκεκριμένα, μόλις αποκατασταθεί η σύνδεση στο διαδίκτυο, ο μικροελεγκτής ξεκινά την αποστολή των αποθηκευμένων δεδομένων με αυξημένη συχνότητα, ώστε να καλυφθεί το χρονικό διάστημα κατά το οποίο δεν ήταν δυνατή η αποστολή μετρήσεων.

Όταν ο αριθμός των αποθηκευμένων δειγμάτων στην προσωρινή μνήμη μειωθεί σε ένα ή κανένα δείγμα, τότε ο μικροελεγκτής επιστρέφει στην κανονική λειτουργία στην οποία η αποστολή των δεδομένων πραγματοποιείται με τον κανονικό ρυθμό αποστολής.

Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι τα παλαιότερα αποθηκευμένα δεδομένα αποστέλλονται στη διαδικτυακή βάση δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα ο ρυθμός αποστολής προσαρμόζεται έτσι ώστε το σύστημα να επανέλθει σε κανονική λειτουργία αποστολής σε πραγματικό χρόνο.

Η αφαίρεση ενός δείγματος από την προσωρινή μνήμη πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση που η αποστολή προς τη διαδικτυακή πλατφόρμα ThingSpeak ολοκληρωθεί με επιτυχία. Η επιτυχής αποστολή επιβεβαιώνεται από την απάντηση του διακομιστή, γεγονός που διασφαλίζει ότι τα δεδομένα έχουν καταγραφεί σωστά στη βάση δεδομένων.

Σε περίπτωση αποτυχίας της αποστολής, το δείγμα διατηρείται στην προσωρινή μνήμη και επιχειρείται εκ νέου η αποστολή του στον επόμενο χρονικό διάστημα. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η απώλεια μετρήσεων και ενισχύεται η αξιοπιστία της διαδικασίας καταγραφής.

```

void sendToThingSpeak() {

```

```

    if (!netOnline) return;

    if (qCount == 0) return;

    uint32_t now = millis();
    uint32_t interval;

    if (qCount > 1) {
        interval = TS_INTERVAL_FAST;
    } else {
        interval = TS_INTERVAL_LIVE;
    }

    if (now - lastTsSend < interval) return;

    Sample s;
    if (!peekSample(s)) return;

    float lightMinutes = lightOnMs / 60000.0f;

    if (!isnan(s.temp)) {
        ThingSpeak.setField(1, s.temp);
    }

    if (s.hum >= 0) {
        ThingSpeak.setField(2, s.hum);
    }

    if (s.light) {
        ThingSpeak.setField(3, 1);
    } else {
        ThingSpeak.setField(3, 0);
    }

    int httpCode = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);

    if (httpCode == 200) {
        lastTsSend = now;
        popSample();
    }
}

```

3.8 Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το λογισμικό του συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου των συνθηκών στον χώρο αποθήκευσης κρασιών. Αρχικά περιεγράφηκε η συνολική δομή του προγράμματος και η ροή λειτουργίας του, με έμφαση στον χρονισμό των επιμέρους διεργασιών χωρίς τη χρήση μπλοκαριστικών καθυστερήσεων. Στη συνέχεια αναλύθηκαν οι βασικές λειτουργικές ενότητες του λογισμικού, όπως η λήψη και επεξεργασία μετρήσεων από τους αισθητήρες, ο έλεγχος των εξόδων (ρελέ) με βάση τα προκαθορισμένα κατώφλια, καθώς και η υλοποίηση της διεπαφής χρήστη μέσω οθόνης LCD και μηχανικών πλήκτρων.

Επιπλέον, παρουσιάστηκε η δικτυακή λειτουργία της συσκευής και η αποστολή δεδομένων σε απομακρυσμένη πλατφόρμα, με μέριμνα για αξιόπιστη λειτουργία ακόμη και σε περιπτώσεις απώλειας σύνδεσης, μέσω προσωρινής αποθήκευσης μετρήσεων και μηχανισμού επαναποστολής. Τέλος, στο

Κεφάλαιο 3

πλαίσιο ολοκλήρωσης της τεκμηρίωσης του λογισμικού, παρατίθενται ενδεικτικά αποσπάσματα κώδικα για την υποστήριξη των παραπάνω λειτουργιών, με σκοπό την αποσαφήνιση της υλοποίησης και τη συσχέτισή της με τις αντίστοιχες λειτουργικές ενότητες.

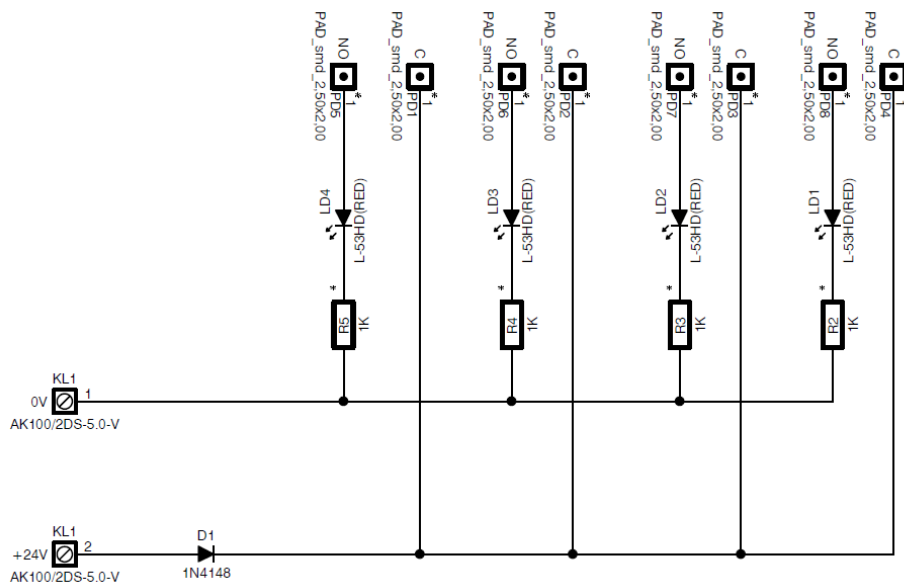
Κεφάλαιο 4^ο: Πειραματική αξιολόγηση

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος. Οι δοκιμές επικεντρώθηκαν στον έλεγχο της τροφοδοσίας, των αισθητήρων, της απόκρισης των εξόδων, της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος και της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας τόσο σε κανονική λειτουργία όσο και σε λειτουργία εφεδρικής μπαταρίας, καθώς και της απομακρυσμένης καταγραφής δεδομένων μέσω της πλατφόρμας ThingSpeak. Μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν επιβεβαιώθηκε η ομαλή λειτουργία του συστήματος τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και κατά την απομακρυσμένη παρακολούθηση.

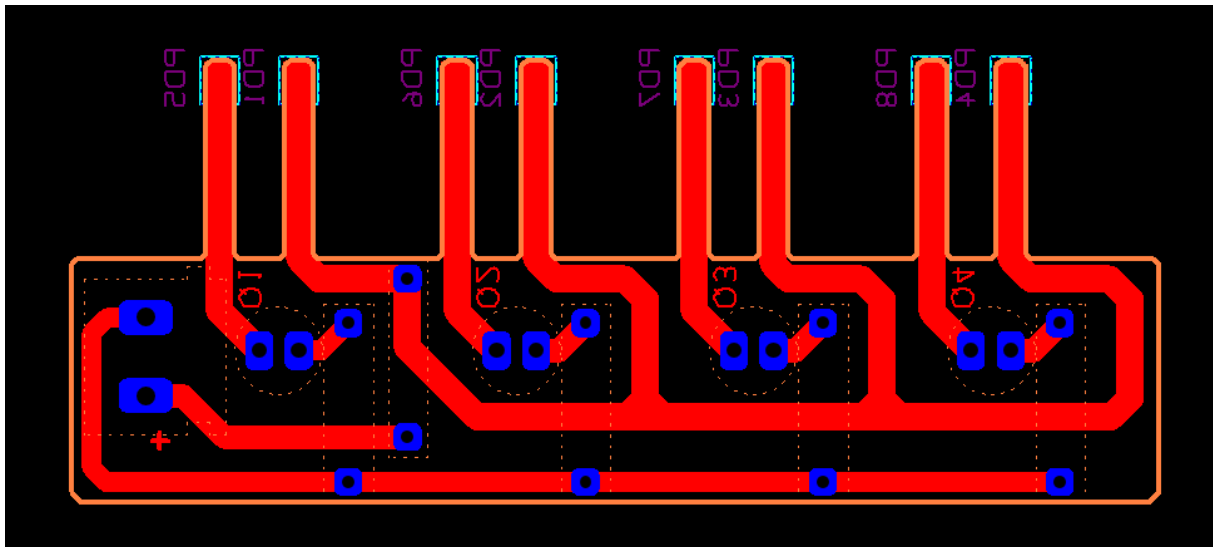
4.1.1 Πλακέτα επαλήθευσης εξόδων

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ειδική βοηθητική πλακέτα ενδείξεων, η οποία συνδέθηκε στις επαφές των ρελέ. Η πλακέτα αυτή τροφοδοτείται με τάση 24V και περιλαμβάνει ενδεικτικά LED, τα οποία ενεργοποιούνται όταν κλείνει η επαφή μεταξύ των ακροδεκτών NO–COM του ρελέ. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο άμεσος έλεγχος της κατάστασης κάθε εξόδου, επιβεβαιώνοντας ότι πραγματοποιείται πραγματική αλλαγή της επαφής του ρελέ.

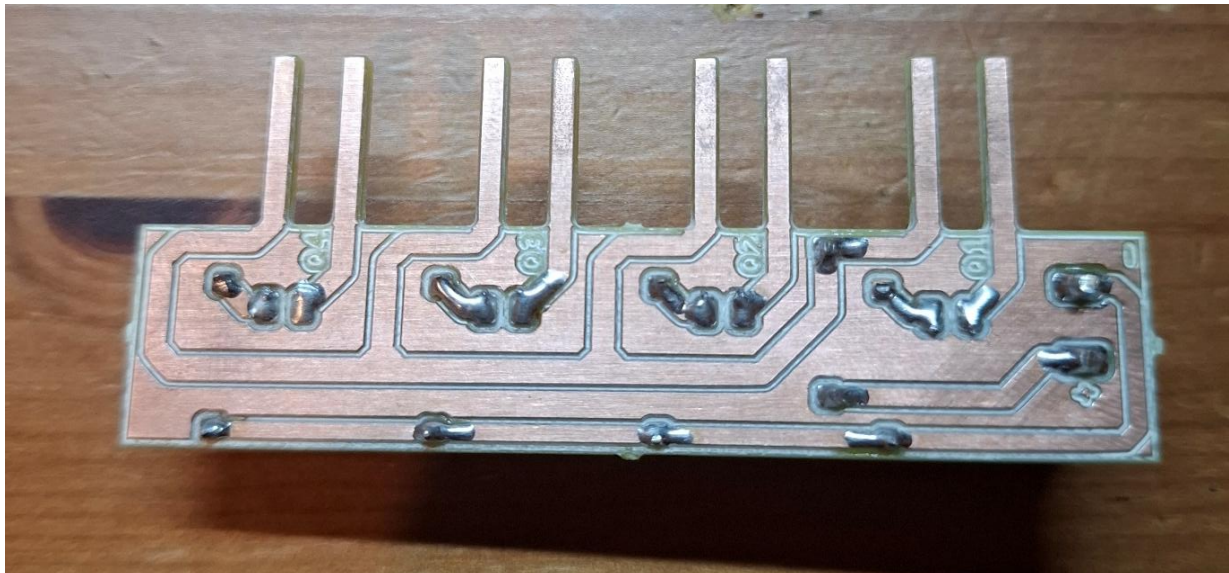


Εικόνα 4.1 – Σχηματικό βοηθητικής πλακέτας ενδείξεων

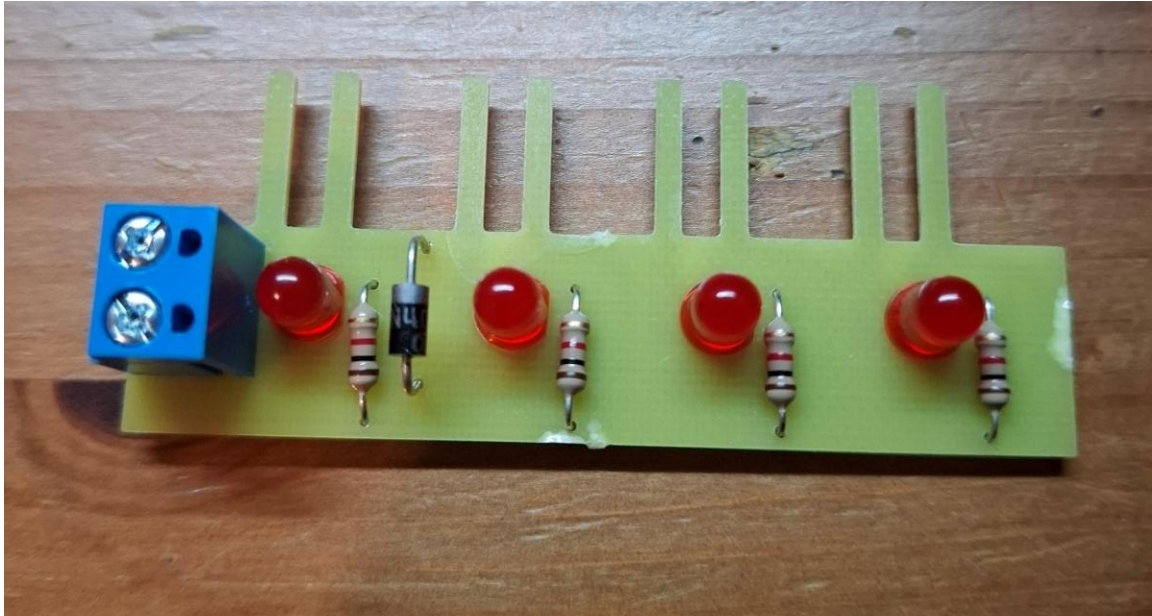
Το σχηματικό διάγραμμα της βοηθητικής πλακέτας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Η πλακέτα τροφοδοτείται με τάση 24V και περιλαμβάνει τέσσερα ανεξάρτητα κυκλώματα ένδειξης, τα οποία συνδέονται στις επαφές των ρελέ. Κάθε ένα από τα κυκλώματα αυτά αποτελείται από ένα LED και μία αντίσταση 1 k Ω / 0.25 W για τον περιορισμό του ρεύματος. Στην περίπτωση που κλείσει η επαφή του ρελέ, ολοκληρώνεται το κύκλωμα και ενεργοποιείται η φωτεινή ένδειξη, επιτρέποντας την αναγνώριση της κατάστασης της αντίστοιχης εξόδου. Επιπλέον, έχει τοποθετηθεί η διόδος D1 στην είσοδο της τροφοδοσίας της βοηθητικής πλακέτας, ώστε σε περίπτωση λανθασμένης σύνδεσης να αποτρέπεται η καταστροφή των εξαρτημάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η υλοποίηση του τυπωμένου κυκλώματος (PCB) της βοηθητικής πλακέτας, καθώς και φωτογραφίες της πλακέτας από την άνω και την κάτω πλευρά.



Εικόνα 4.2 – Υλοποίηση PCB βοηθητικής πλακέτας ενδείξεων



Εικόνα 4.3 – Υλοποίηση PCB βοηθητικής πλακέτας ενδείξεων(BOTTOM)

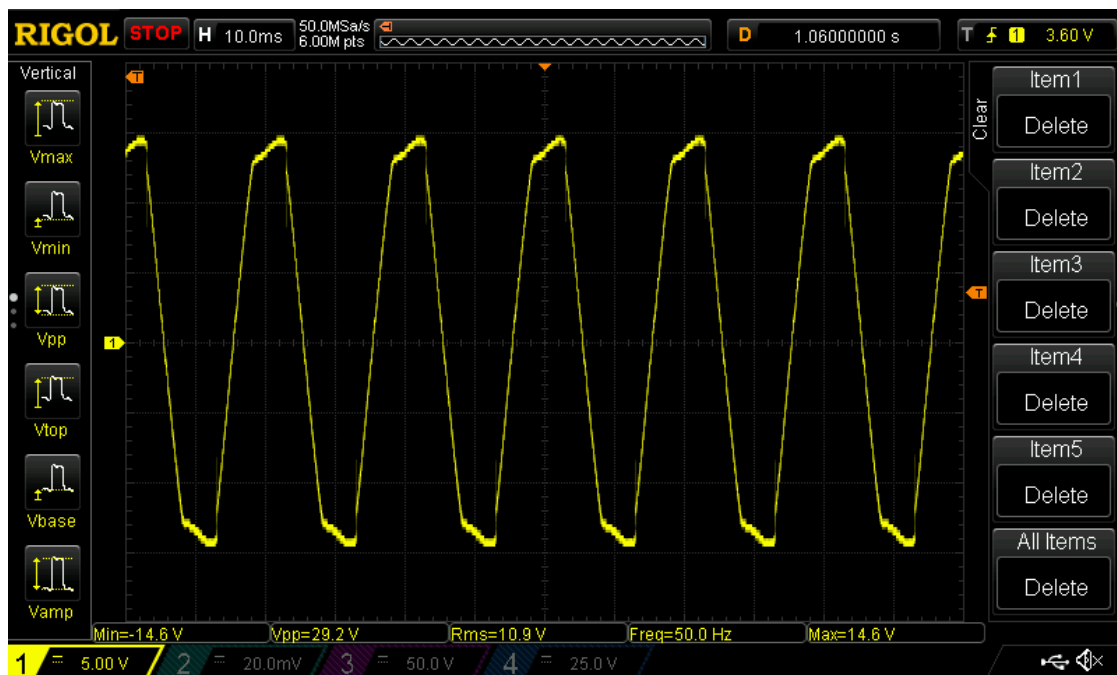


Εικόνα 4.4 – βοηθητικής πλακέτας ενδείξεων (TOP)

4.2 Έλεγχος τροφοδοσίας

4.2.1 Μετά τον μετασχηματιστή (AC)

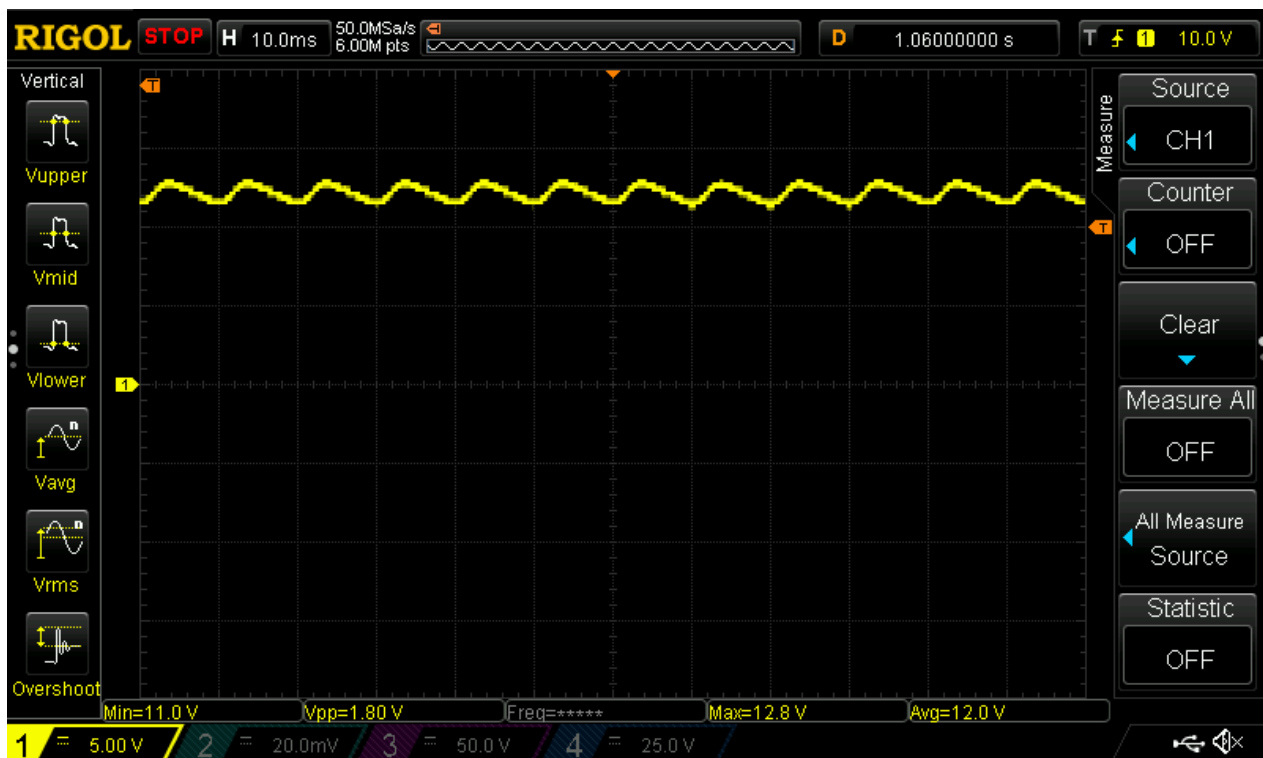
Πραγματοποιήθηκε μέτρηση της τάσης στην έξοδο του μετασχηματιστή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, η κυματομορφή είναι ημιτονοειδής με συχνότητα 50Hz και τιμή ενεργού τάσης περίπου 10.9Vrms. Η μέγιστη τιμή της τάσης είναι περίπου $\pm 14.6\text{V}$, ενώ η τάση κορυφής προς κορυφή είναι περίπου 29V. Η μέτρηση επιβεβαιώνει τη σωστή λειτουργία του σταδίου μετασχηματισμού πριν από τη γέφυρα ανόρθωσης.



Εικόνα 4.5 – Κυματομορφή τάσης στην έξοδο του μετασχηματιστή

4.2.2 Μετά την ανόρθωση και εξομάλυνση

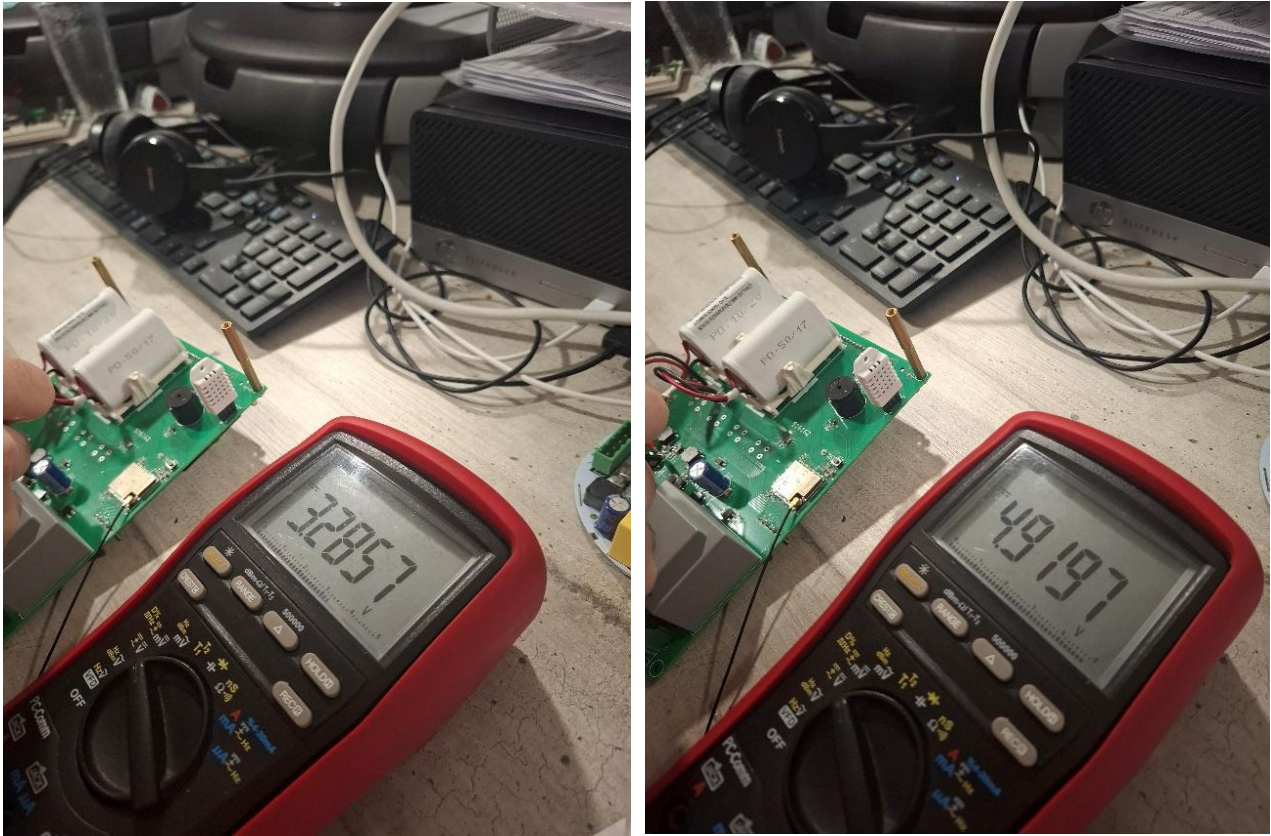
Στη συνέχεια μετρήθηκε η τάση μετά τη γέφυρα ανόρθωσης και το στάδιο εξομάλυνσης. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6, η μέση τιμή της τάσης είναι περίπου 12V, ενώ παρατηρείται κυμάτωση (ripple) περίπου 1.8Vpp (12.8V μέγιστη και 11V ελάχιστη τιμή). Η κυμάτωση αυτή είναι αναμενόμενη σε ανορθωμένο σήμα με φορτίο και εξομαλύνεται περαιτέρω από τα επόμενα στάδια σταθεροποίησης (buck converters). Από την τάση αυτή τροφοδοτούνται τα πηνία των ρελέ του συστήματος. Δεδομένου ότι η ελάχιστη απαιτούμενη τάση ενεργοποίησης του πηνίου είναι περίπου 8.4V[7], προκύπτει ότι ακόμη και στην ελάχιστη τιμή της μετρούμενης τάσης (11.0V) η τροφοδοσία παραμένει επαρκής για την αξιόπιστη λειτουργία των ρελέ.



Εικόνα 4.6 – Τάση μετά τη γέφυρα ανόρθωσης και το στάδιο εξομάλυνση

4.2.3 Buck converter

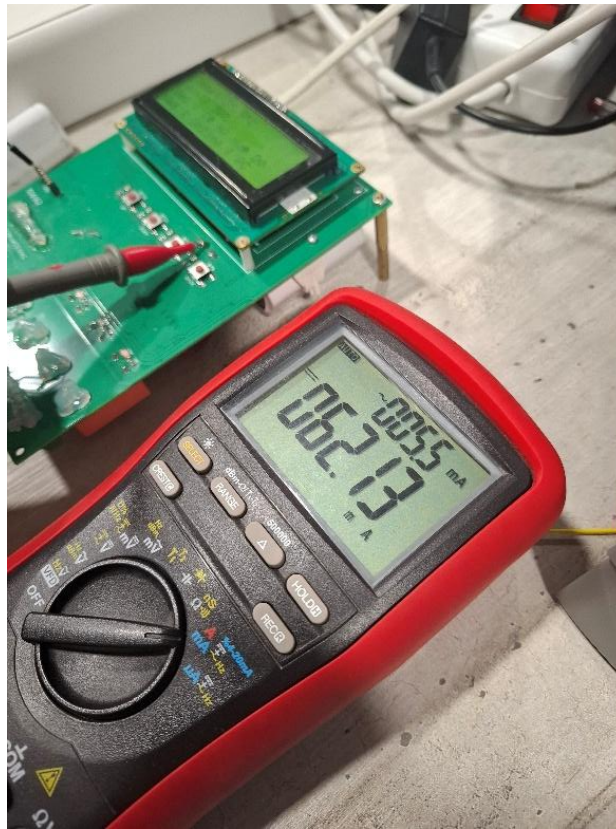
Πραγματοποιήθηκε μέτρηση των δύο διακοπτικών μετατροπέων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, η τάση εξόδου μετρήθηκε περίπου στα 4.92 V για τον μετατροπέα των 5 V και στα 3.28 V για τον μετατροπέα των 3.3 V. Η μικρή απόκλιση που παρατηρείται στον μετατροπέα των 5 V οφείλεται στην επιλογή των αντιστάσεων ανάδρασης, καθώς χρησιμοποιήθηκε τυποποιημένη τιμή 200 kΩ αντί της θεωρητικά υπολογισμένης τιμής των 205 kΩ.



Εικόνα 4.7 – Μετρήσεις τάσης εξόδου των μετατροπέων 5 V και 3.3 V

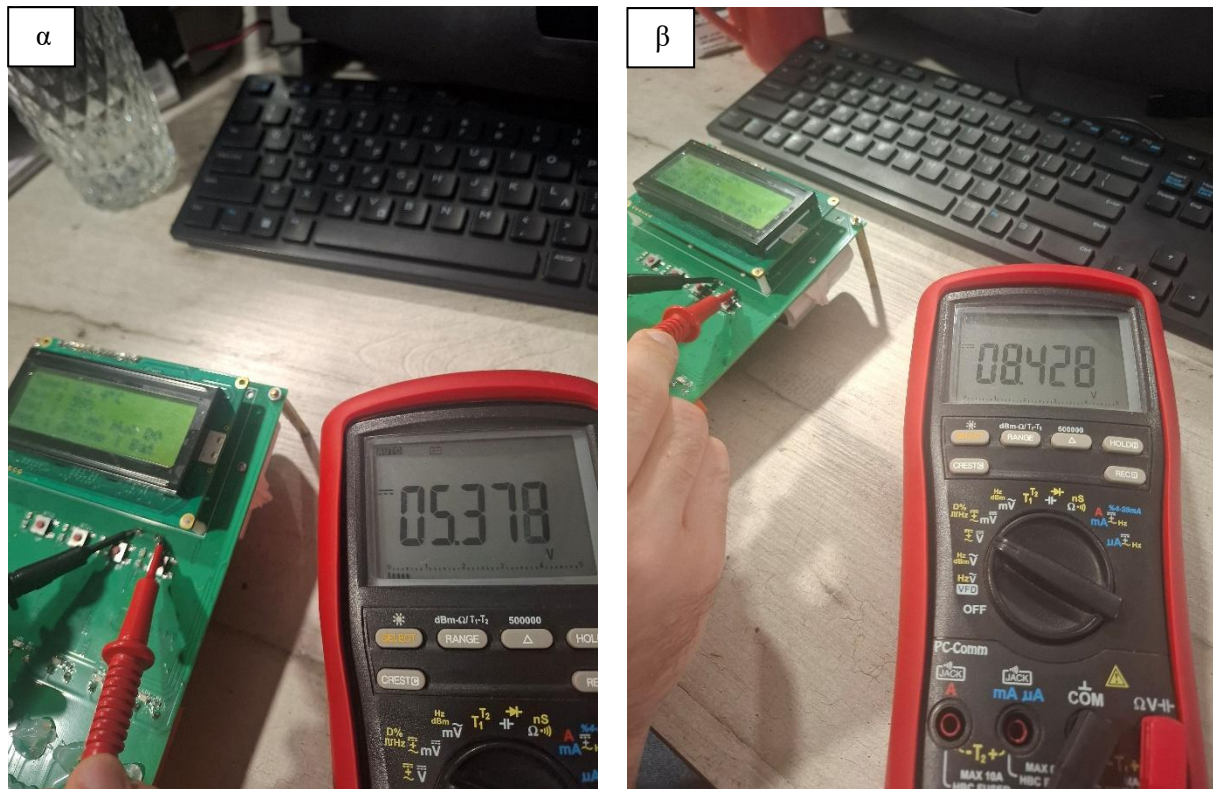
4.2.4 Ρεύμα φόρτισης μπαταρίας

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας προκειμένου να επαληθευτεί η λειτουργία του κυκλώματος φόρτισης. Η μετρούμενη τιμή ήταν περίπου 62mA, ενώ από την προσομοίωση SPICE είχε υπολογιστεί ρεύμα περίπου 69mA. Η μικρή αυτή απόκλιση θεωρείται αναμενόμενη λόγω ανοχών των εξαρτημάτων και διαφορών μεταξύ πραγματικής λειτουργίας και προσομοίωσης.



Εικόνα 4.8 – Μέτρηση ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας

Πέρα από τη μέτρηση του ρεύματος φόρτισης, πραγματοποιήθηκε και έλεγχος της μεταβολής της τάσης της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μέτρηση της τάσης της μπαταρίας, η οποία σε πλήρως εκφορτισμένη κατάσταση ήταν περίπου 5.37V. Στη συνέχεια το σύστημα παρέμεινε συνδεδεμένο στην κύρια τροφοδοσία AC για χρονικό διάστημα περίπου 8 ωρών, κατά το οποίο το κύκλωμα φόρτισης της μπαταρίας λειτουργούσε κανονικά. Μετά το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος πραγματοποιήθηκε νέα μέτρηση της τάσης της μπαταρίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, η τάση της μπαταρίας αυξήθηκε σε περίπου 8.42V, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος φόρτισης.



Εικόνα 4.9 – Μέτρηση τάσης μπαταρίας (α) πριν τη φόρτιση και (β) μετά από 8 ώρες λειτουργίας του συστήματος με ενεργό το κύκλωμα φόρτισης

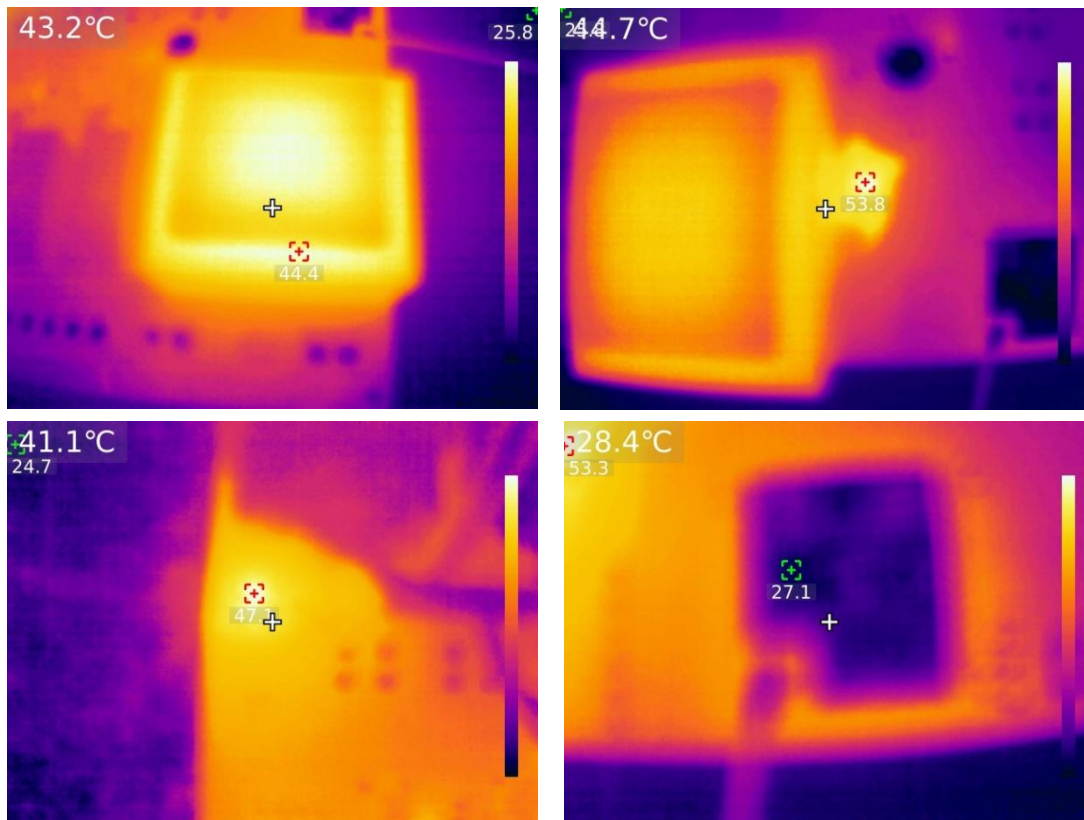
4.2.5 Θερμική συμπεριφορά συστήματος

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης της λειτουργίας του συστήματος πραγματοποιήθηκε έλεγχος της θερμικής συμπεριφοράς της πλακέτας κατά τη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας. Η αξιολόγηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε θερμική κάμερα, μέσω της οποίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας σε επιλεγμένα σημεία της πλακέτας μετά από συνεχή λειτουργία διάρκειας περίπου 8 ωρών. Οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν σε βασικά στοιχεία του συστήματος και ιδιαίτερα σε σημεία όπου αναμένεται αυξημένη θερμική καταπόνηση, όπως:

- στον μικροελεγκτή του συστήματος
- στη γέφυρα ανόρθωσης
- στον μετασχηματιστή τροφοδοσίας
- στο τρανζίστορ του κυκλώματος φόρτισης της μπαταρίας

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας του συστήματος και με τροφοδοσία από το δίκτυο.



Εικόνα 4.10 – Θερμικές εικόνες βασικών εξαρτημάτων της πλακέτας

Η μεγαλύτερη θερμοκρασία καταγράφηκε στη γέφυρα ανόρθωσης, η οποία έφτασε τους 52.8°C. Η αύξηση της θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο στοιχείο είναι αναμενόμενη, καθώς κατά τη λειτουργία του κυκλώματος το ρεύμα τροφοδοσίας διέρχεται από τις διόδους της γέφυρας, στις οποίες εμφανίζονται απώλειες ισχύος κατά τη διαδικασία ανόρθωσης.

Ο μετασχηματιστής παρουσίασε θερμοκρασία 44.4°C, τιμή που θεωρείται απολύτως αποδεκτή για μετασχηματιστές μικρής ισχύος σε συνθήκες συνεχούς λειτουργίας.

Το τρανζίστορ του κυκλώματος φόρτισης της μπαταρίας εμφάνισε θερμοκρασία 47.1°C, η οποία οφείλεται στις απώλειες ισχύος κατά τη διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας.

Τέλος, ο μικροελεγκτής του συστήματος εμφάνισε θερμοκρασία 27.1°C, γεγονός που υποδηλώνει ιδιαίτερα χαμηλή θερμική επιβάρυνση κατά τη λειτουργία του.

4.2.6 Μέτρηση κατανάλωσης ρεύματος

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ρεύματος κατανάλωσης του συστήματος σε δύο διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας: κατά τη λειτουργία με κύρια τροφοδοσία AC και κατά τη λειτουργία μέσω της εφεδρικής μπαταρίας.

Κατά τη λειτουργία με κύρια τροφοδοσία AC μετρήθηκε ρεύμα περίπου 213 mA. Αντίστοιχα, κατά τη λειτουργία μέσω της εφεδρικής μπαταρίας το ρεύμα κατανάλωσης ήταν περίπου 62.6 mA.

Η σημαντική μείωση της κατανάλωσης σε λειτουργία μπαταρίας οφείλεται στην απενεργοποίηση των εξόδων των ρελέ και του οπίσθιου φωτισμού της οθόνης LCD, με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.



Εικόνα 4.11 – Μέτρηση ρεύματος κατανάλωσης του συστήματος: (α) λειτουργία με κύρια τροφοδοσία AC και (β) λειτουργία με εφεδρική μπαταρία

4.3 Έλεγχος Αισθητήρων

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ως όργανο αναφοράς το ψηφιακό θερμόμετρο-υγρόμετρο Xiaomi Mi Temperature and Humidity Monitor 2, το οποίο παρέχει μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας σε πραγματικό χρόνο. Στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας λήφθηκαν πέντε μετρήσεις σε διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας, οι οποίες συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που κατέγραψε ο αισθητήρας DHT22, με στόχο την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Θερμοκρασία

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12, οι μετρήσεις θερμοκρασίας που καταγράφηκαν από τον αισθητήρα DHT22 παρουσιάζουν πολύ μικρή απόκλιση σε σχέση με το όργανο αναφοράς. Οι δύο καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ταυτόσημη πορεία σε όλο το εύρος των μετρήσεων, ενώ η απόκλιση κυμαίνεται περίπου από 0.2°C έως 0.5°C . Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει καλή ακρίβεια του αισθητήρα θερμοκρασίας και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

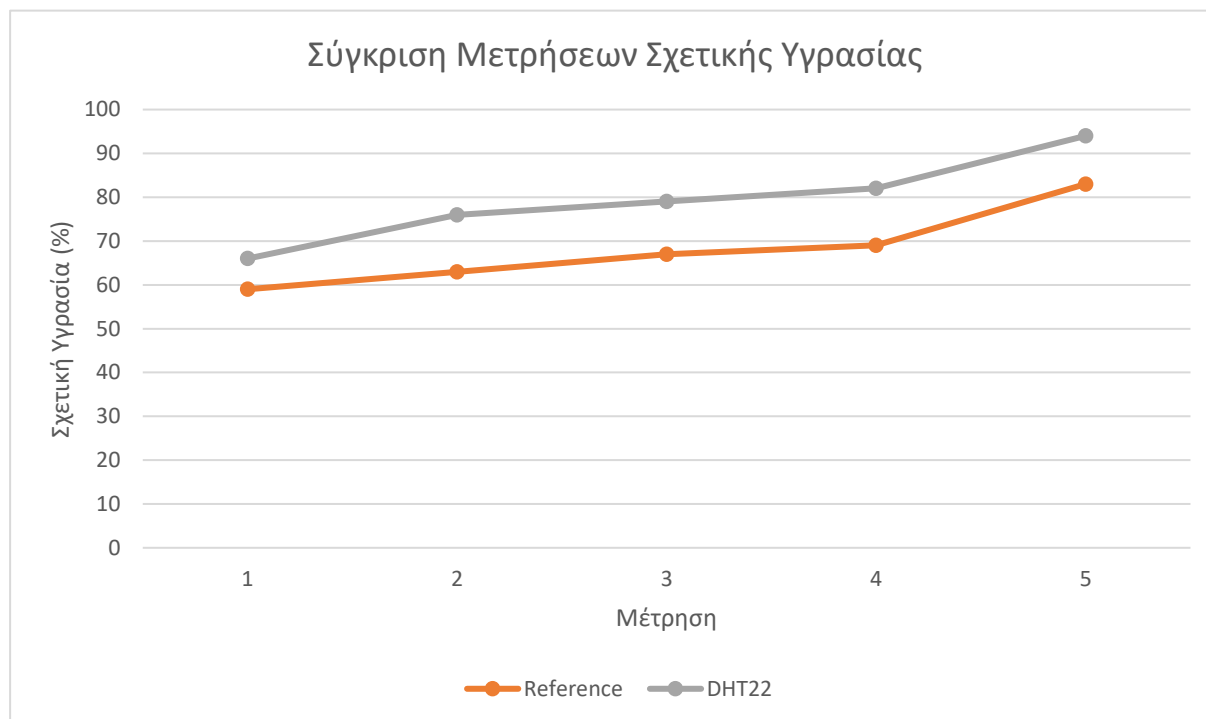
Υγρασία

Αντίστοιχη σύγκριση πραγματοποιήθηκε και για τη σχετική υγρασία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13, ο αισθητήρας DHT22 παρουσιάζει συστηματικά υψηλότερες τιμές σε σχέση με το όργανο αναφοράς. Η απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων κυμαίνεται περίπου από 7% έως 12% RH και παραμένει σχετικά σταθερή σε όλο το εύρος τιμών. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει την ύπαρξη συστηματικού σφάλματος (offset) στις μετρήσεις υγρασίας. Η απόκλιση θεωρείται αναμενόμενη, καθώς σύμφωνα με

τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα DHT22 η ακρίβεια μέτρησης της σχετικής υγρασίας μπορεί να φτάσει έως $\pm 5\%$ RH [16], ενώ και το όργανο αναφοράς ενδέχεται να παρουσιάζει δικό του σφάλμα μέτρησης.



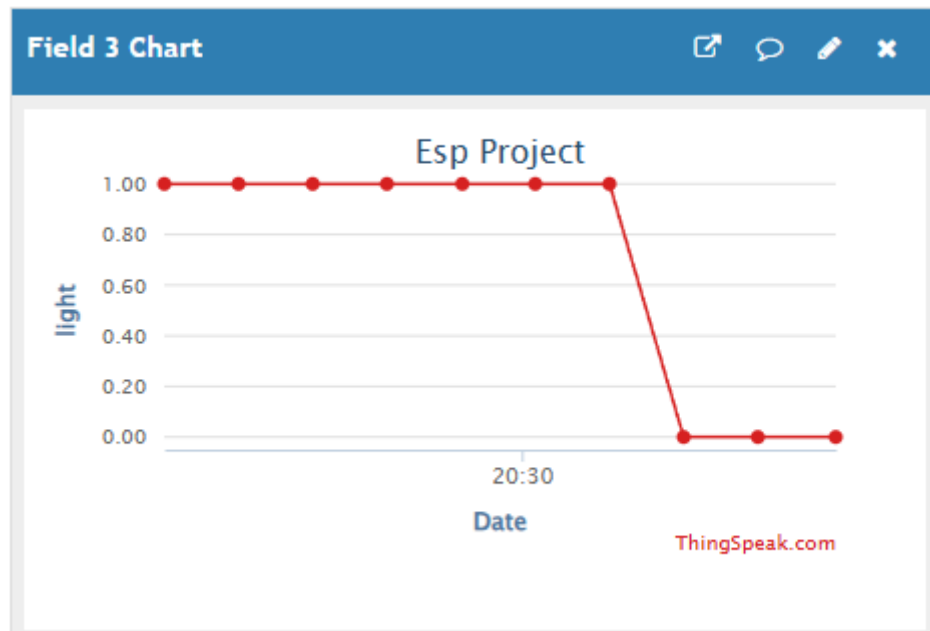
Εικόνα 4.12 – Σύγκριση μετρήσεων θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήρα DHT22 και του οργάνου αναφοράς για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας.



Εικόνα 4.13 – Σύγκριση μετρήσεων σχετικής υγρασίας μεταξύ του αισθητήρα DHT22 και του οργάνου αναφοράς για διαφορετικά επίπεδα υγρασίας.

Φωτεινότητα

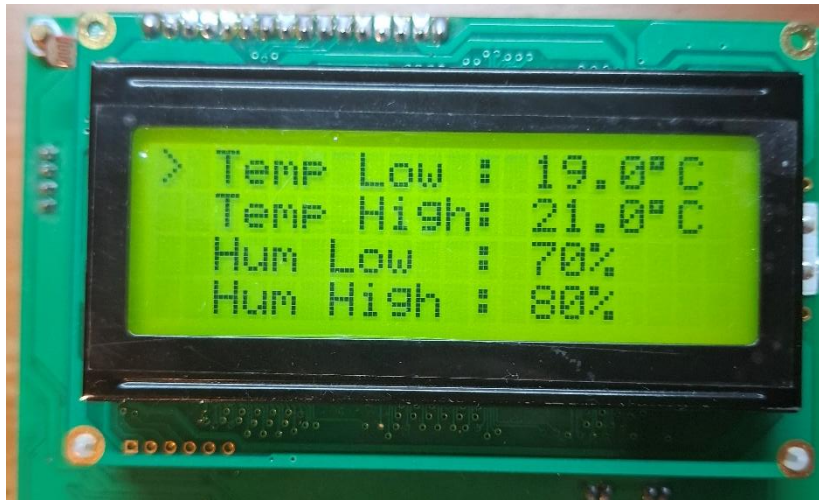
την αξιολόγηση της λειτουργίας του αισθητήρα φωτεινότητας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μεταβολής των συνθηκών φωτισμού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4,14 κατά την έκθεση του αισθητήρα σε φωτισμό η ένδειξη παρέμεινε ενεργή (1), ενώ με τη μείωση του φωτισμού η ένδειξη μεταβλήθηκε σε ανενεργή (0). Η μεταβολή αυτή επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του αισθητήρα.



Εικόνα 4.14 – Μεταβολή ένδειξης φωτεινότητας κατά τη μεταβολή των συνθηκών φωτισμού

4.4 Απόκριση Συστήματος

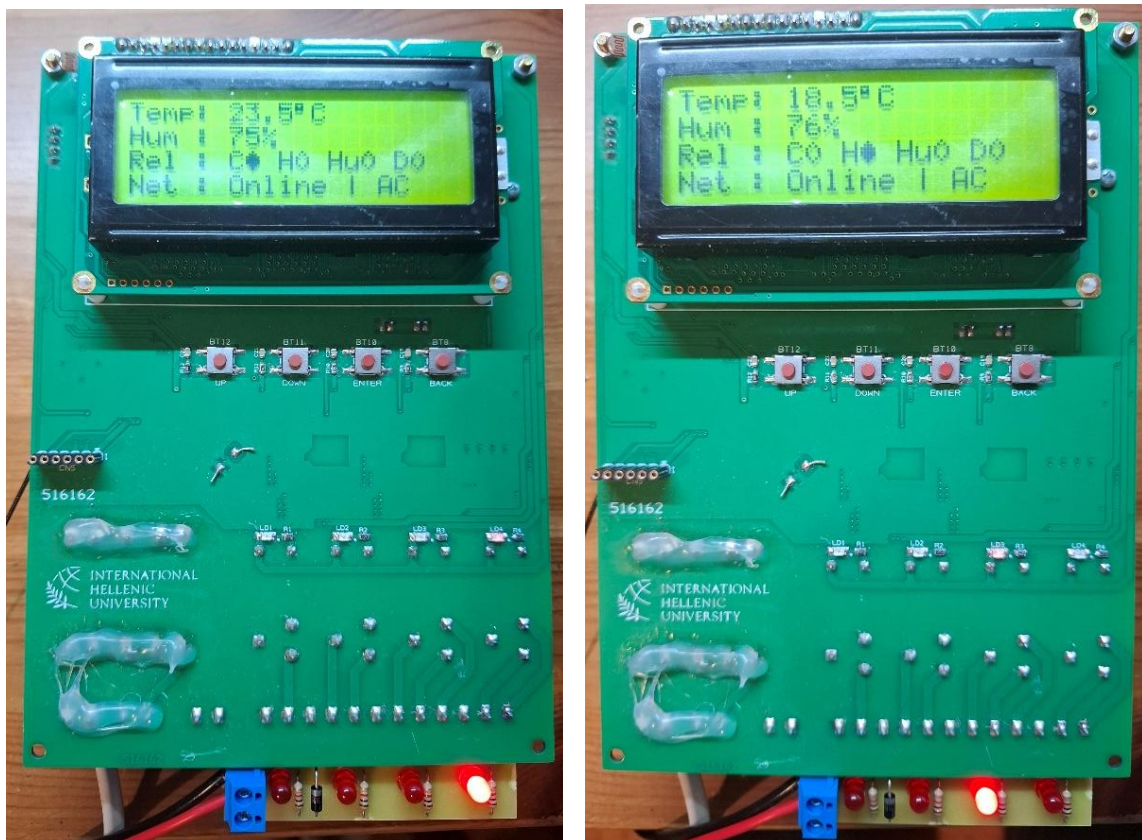
Στην ενότητα αυτή αξιολογήθηκε η απόκριση του συστήματος στις μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Στόχος ήταν να επιβεβαιωθεί ότι οι προκαθορισμένες τιμές κατωφλίων, όπως έχουν οριστεί από τον χρήστη, οδηγούν στην ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των αντίστοιχων εξόδων. Για την ευκολότερη διεξαγωγή των πειραμάτων επιλέχθηκαν τιμές κατωφλίων κοντά στις συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου και με μικρή μεταξύ τους διαφορά, ώστε να είναι δυνατή η ταχύτερη ενεργοποίηση των εξόδων και η αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος.



Εικόνα 4.15 – Ρυθμίσεις των κατωφλίων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

Θερμοκρασία

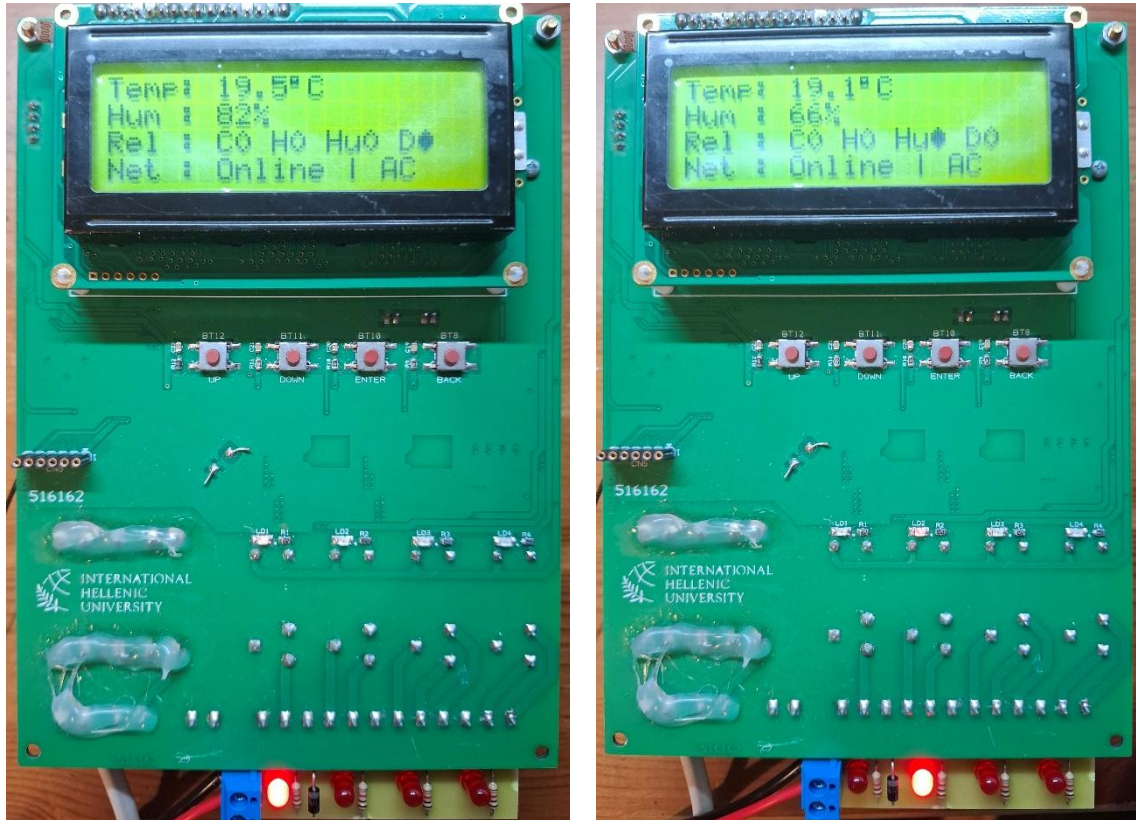
Κατά την αύξηση της θερμοκρασίας πέραν του ανώτερου ορίου ενεργοποιήθηκε η έξοδος ψύξης, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την ενεργοποίηση του LED στη βοηθητική πλακέτα. Κατά τη μείωση της θερμοκρασίας κάτω από το κατώτερο όριο ενεργοποιήθηκε η έξοδος θέρμανσης, όπως φάνηκε από την ενεργοποίηση του LED.



Εικόνα 4.16 – Ενεργοποίηση εξόδου ψύξης και θέρμανσης

Υγρασία

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και για τη σχετική υγρασία. Όταν η υγρασία μειώθηκε κάτω από το προκαθορισμένο όριο ενεργοποιήθηκε η έξοδος του υγραντήρα, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την ενεργοποίηση του LED στη βοηθητική πλακέτα. Όταν η υγρασία ξεπέρασε το ανώτερο όριο ενεργοποιήθηκε η έξοδος του αφυγραντήρα, όπως φάνηκε από την ενεργοποίηση του LED.



Εικόνα 4.17 – Ενεργοποίηση εξόδου υγραντήρα και αφυγραντήρα

4.5 Κατάσταση λειτουργίας (Network + Power)

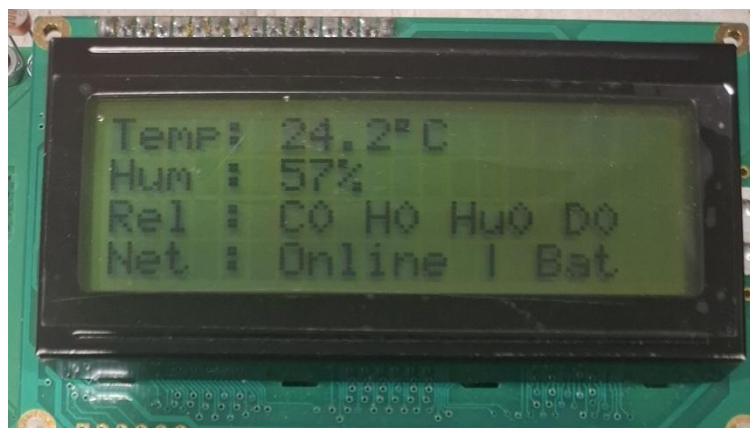
Πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ένδειξης κατάστασης τροφοδοσίας του συστήματος μέσω της οθόνης LCD. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.18 και 4.19, το σύστημα εμφανίζει την ένδειξη AC όταν τροφοδοτείται από την κύρια παροχή, ενώ σε περίπτωση διακοπής της εμφανίζεται η ένδειξη Bat, υποδεικνύοντας τη λειτουργία μέσω της εφεδρικής τροφοδοσίας.

Παρατηρήθηκε επίσης η συμπεριφορά του συστήματος κατά τη μετάβαση από την κύρια τροφοδοσία στην εφεδρική μπαταρία. Συγκεκριμένα, μόλις ανιχνευθεί η αλλαγή της πηγής ενέργειας, απενεργοποιείται ο οπίσθιος φωτισμός της οθόνης με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ με την αποκατάσταση της κύριας τροφοδοσίας ο οπίσθιος φωτισμός ενεργοποιείται ξανά.

Επιπλέον, κατά τη λειτουργία μέσω εφεδρικής τροφοδοσίας οι εξοδοί των ρελέ τίθενται σε κατάσταση OFF, ώστε να περιορίζεται η κατανάλωση και να διατηρείται ασφαλής λειτουργία.



Εικόνα 4.18 – Ένδειξη λειτουργίας συστήματος με κύρια τροφοδοσία (AC)

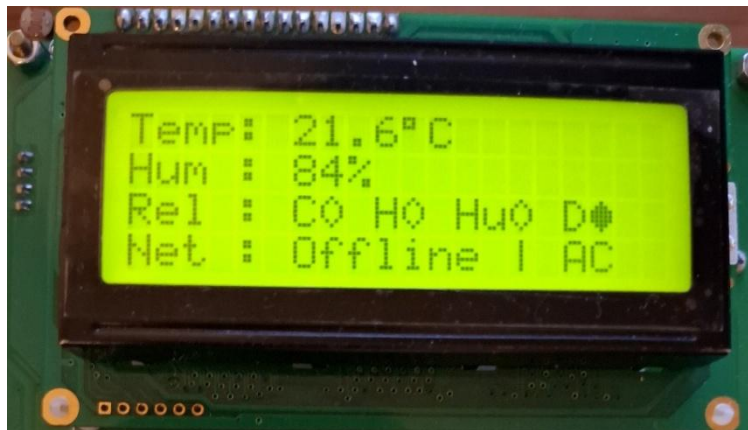


Εικόνα 4.19 – Ένδειξη λειτουργίας συστήματος με εφεδρική τροφοδοσία (Bat)

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ένδειξης κατάστασης σύνδεσης του συστήματος στο διαδίκτυο μέσω της οθόνης LCD. Συγκεκριμένα, η σύνδεση διακόπηκε με αποσύνδεση της εξωτερικής κεραίας του συστήματος. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.20 και 4.21, το σύστημα εμφανίζει την ένδειξη Online όταν υπάρχει ενεργή σύνδεση στο διαδίκτυο, ενώ σε περίπτωση απώλειας της σύνδεσης εμφανίζεται η ένδειξη Offline



Εικόνα 4.20 – Ένδειξη κατάστασης δικτύου με συνδεδεμένη κεραία (Online)



Εικόνα 4.21 – Ένδειξη κατάστασης δικτύου χωρίς συνδεδεμένη κεραία (Offline)

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος της συμπεριφοράς του συστήματος σε περίπτωση μη έγκυρης μέτρησης από τον αισθητήρα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.22, όταν δεν είναι διαθέσιμη έγκυρη τιμή θερμοκρασίας ή σχετικής υγρασίας, το σύστημα δεν εμφανίζει αυθαίρετη ένδειξη αλλά χρησιμοποιεί την ένδειξη "--.-", υποδηλώνοντας ότι η μέτρηση δεν είναι διαθέσιμη.

Επιπλέον, σε περίπτωση μη έγκυρης μέτρησης, το σύστημα για λόγους ασφαλείας απενεργοποιεί όλες τις εξόδους ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό αποτρέπεται η ενεργοποίηση των συνδεδεμένων συσκευών με βάση εσφαλμένα δεδομένα μέτρησης



Εικόνα 4.22 – Ένδειξη μη έγκυρης μέτρησης αισθητήρα στην LCD

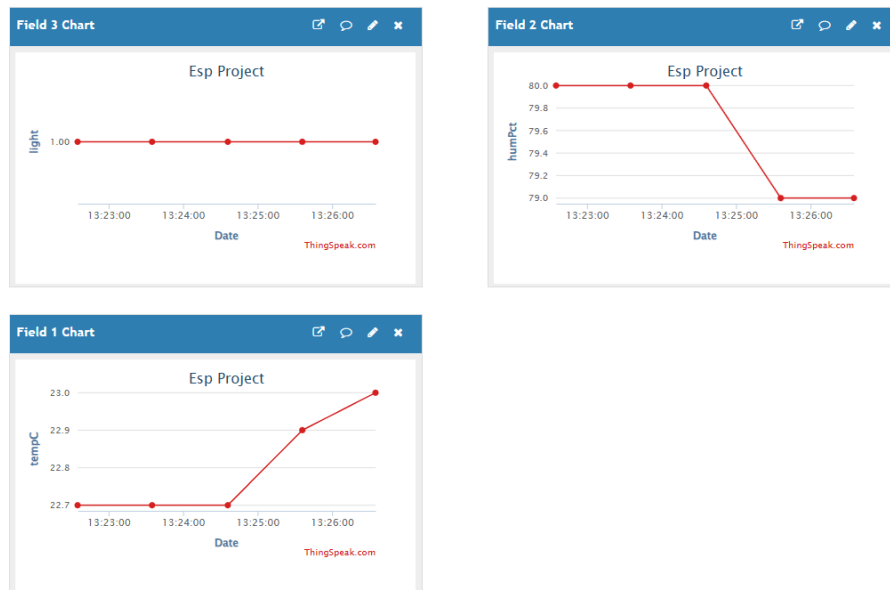
4.6 Έλεγχος αποστολής δεδομένων στο ThingSpeak

4.6.1 Κανονική λειτουργία αποστολής

Κατά τη φυσιολογική λειτουργία του συστήματος πραγματοποιείται συνεχής αποστολή των μετρήσεων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και φωτεινότητας στη διαδικτυακή πλατφόρμα ThingSpeak.

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.23, το σύστημα αποστέλλει και τις τρεις μετρήσεις σε χρονικά διαστήματα περίπου ενός λεπτού όταν βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας. Η περιοδική

αυτή αποστολή επιτρέπει τη συνεχή ενημέρωση της πλατφόρμας και την απομακρυσμένη παρακολούθηση των συνθηκών του χώρου σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 4.23 – Κανονικός ρυθμός αποστολής

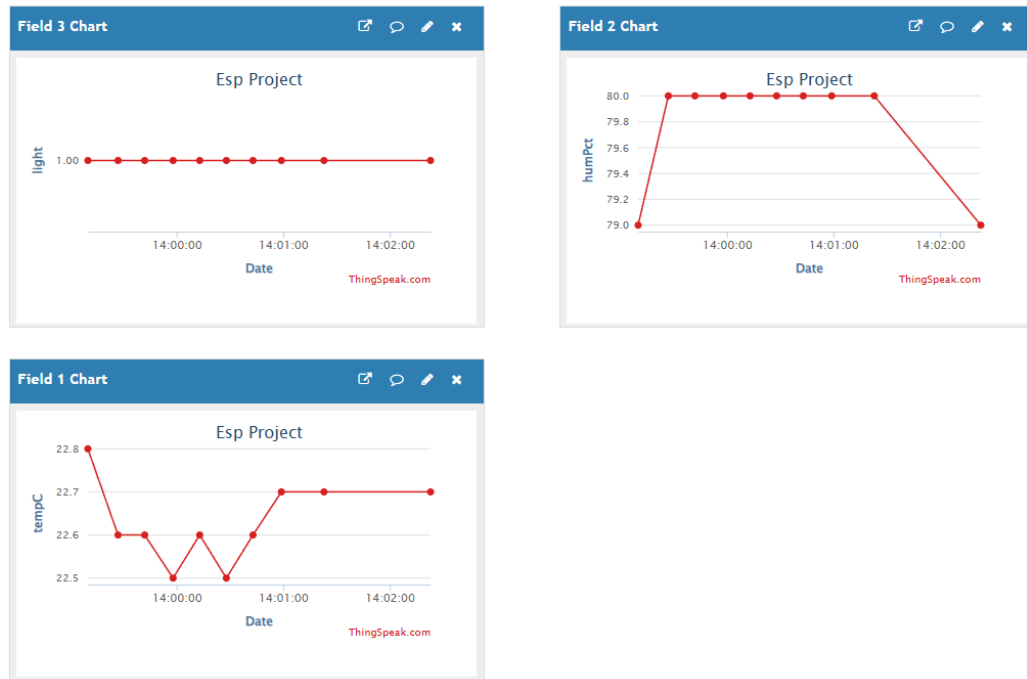
4.6.2 Λειτουργία επανασύνδεσης

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος της λειτουργίας του συστήματος μετά από προσωρινή διακοπή της σύνδεσης στο διαδίκτυο. Συγκεκριμένα, η συσκευή αποσυνδέθηκε από το διαδίκτυο προκειμένου να ελεγχθεί η λειτουργία του μηχανισμού προσωρινής αποθήκευσης των μετρήσεων που δεν κατέστη δυνατό να μεταδοθούν κατά το διάστημα απώλειας της σύνδεσης. Μετά την επανασύνδεση, οι μετρήσεις αυτές αποστέλλονται ανά 15 δευτερόλεπτα, με σκοπό τη μεταφορά των δεδομένων που είχαν καταγραφεί κατά τη διάρκεια της διακοπής.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.24, η καταγραφή εμφανίζεται με μικρότερα χρονικά διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων, γεγονός που υποδηλώνει τη λειτουργία του μηχανισμού γρήγορης αποστολής δεδομένων που υλοποιείται στον μικροελεγκτή.

Στο τέλος της διαδικασίας παρατηρείται ότι το σύστημα επανέρχεται στην κανονική του κατάσταση και συνεχίζει την αποστολή των δεδομένων σε χρονικά διαστήματα περίπου ενός λεπτού. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι έχουν μεταφερθεί όλα τα δεδομένα που είχαν προσωρινά αποθηκευτεί στον μικροελεγκτή.

Η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει ότι το σύστημα είναι σε θέση να συνεχίζει την καταγραφή δεδομένων κατά τη διάρκεια διακοπής επικοινωνίας και να τα αποστέλλει μετά την επανασύνδεση.

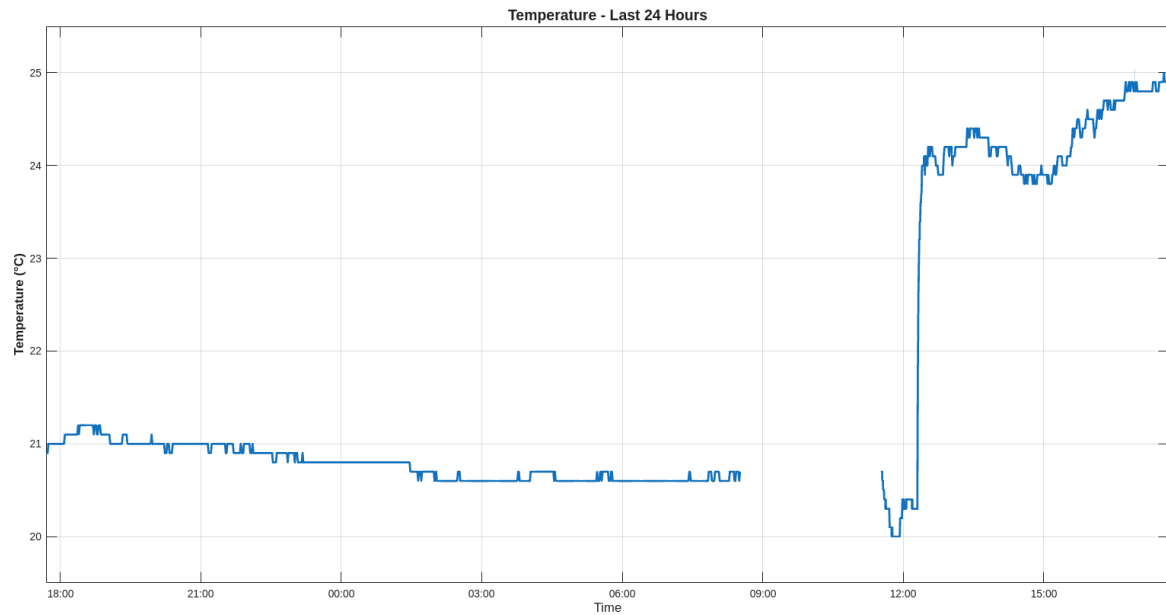


Εικόνα 4.24 – Αυξημένος ρυθμός αποστολής δεδομένων

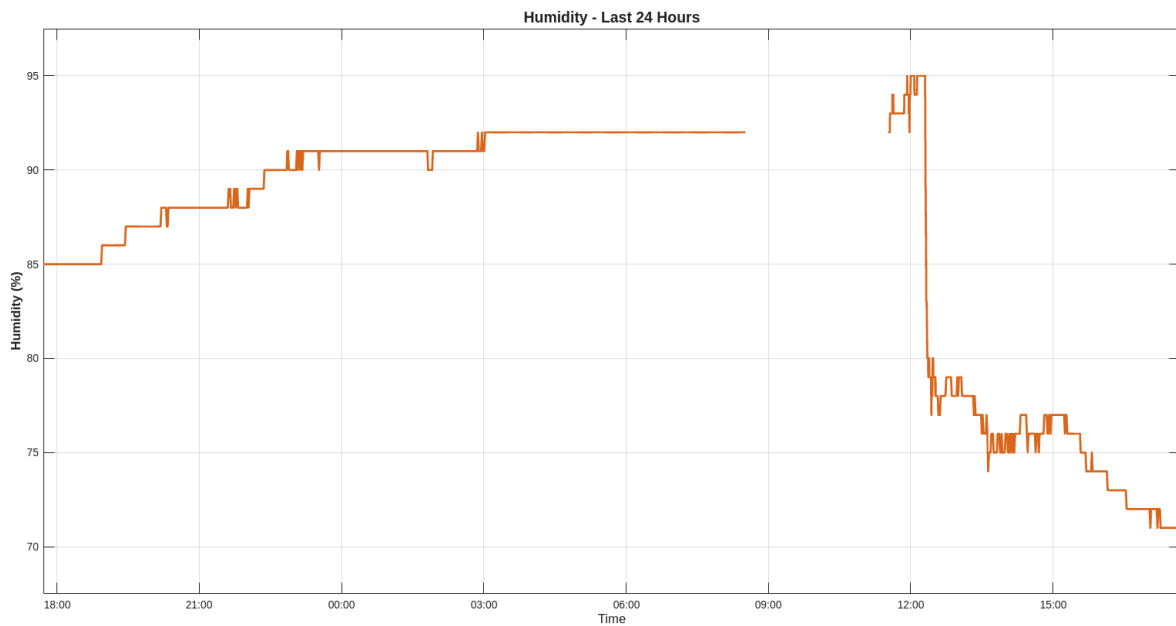
4.6.3 Δοκιμή λειτουργίας απομακρυσμένης καταγραφής σε πραγματικές συνθήκες

Προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία της λειτουργίας και της αποστολής δεδομένων στην διαδικτυακή πλατφόρμα ThingSpeak, πραγματοποιήθηκε δοκιμή συνεχούς λειτουργίας διάρκειας 24 ωρών. Συγκεκριμένα, η συσκευή τέθηκε σε λειτουργία στις 17:40 και λειτούργησε έως την ίδια ώρα της επόμενης ημέρας. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής πραγματοποιήθηκε προσομοίωση απώλειας σύνδεσης στο διαδίκτυο περίπου στις 08:30, για χρονικό διάστημα περίπου τριών ωρών. Μετά την αποκατάσταση της σύνδεσης, το σύστημα για χρονικό διάστημα περίπου μίας ώρας απέστειλε τις μετρήσεις που είχαν καταγραφεί κατά τη διάρκεια της διακοπής, λειτουργώντας με αυξημένο ρυθμό αποστολής. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας μεταφοράς των αποθηκευμένων δεδομένων, το σύστημα επανήλθε σε κανονική λειτουργία περίπου στις 12:35. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αποτυπώνονται στα ακόλουθα διαγράμματα 24ώρου.

Κεφάλαιο 4



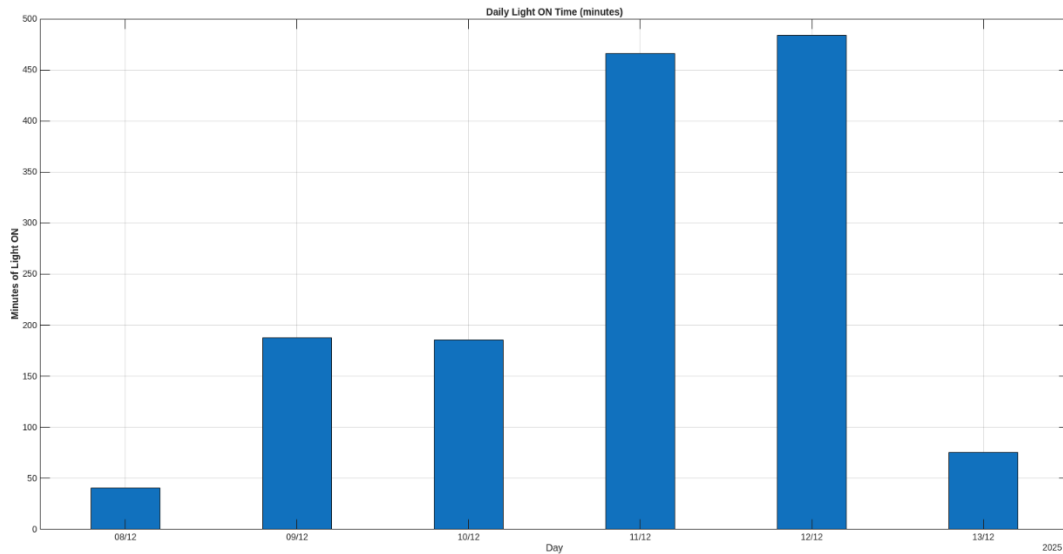
Εικόνα 4.25 – Μεταβολή θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια 24 ωρών



Εικόνα 4.26 – Μεταβολή σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια 24 ωρών

Στα διαγράμματα απεικονίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Πέρα από την καταγραφή των περιβαλλοντικών μετρήσεων, το σύστημα υπολογίζει και αποστέλλει στην πλατφόρμα ThingSpeak τον συνολικό ημερήσιο χρόνο λειτουργίας του φωτισμού. Στο Σχήμα 4.27 εμφανίζεται η ημερήσια διάρκεια λειτουργίας του φωτισμού, όπως αυτή καταγράφηκε από το σύστημα σε διαδοχικές ημέρες. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στον συνολικό χρόνο κατά τον οποίο ο φωτισμός ανιχνεύτηκε ενεργός κατά τη διάρκεια κάθε ημέρας.



Εικόνα 4.27 – Ημερήσια διάρκεια λειτουργίας φωτισμού

4.7 Συνολική αξιολόγηση λειτουργίας συστήματος

Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, προκύπτει ότι το σύστημα λειτουργεί αξιόπιστα τόσο σε τοπικό όσο και σε απομακρυσμένο επίπεδο. Οι μετρήσεις των αισθητήρων καταγράφονται με μεγάλη ακρίβεια, ενώ το σύστημα ανταποκρίνεται στις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών ενεργοποιώντας τις αντίστοιχες εξόδους ελέγχου. Παράλληλα, επαληθεύτηκε η σωστή λειτουργία της τροφοδοσίας, των μηχανισμών ασφαλείας σε περίπτωση μη έγκυρης μέτρησης, καθώς και του κυκλώματος φόρτισης της μπαταρίας. Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε η αξιόπιστη αποστολή δεδομένων στην διαδικτυακή πλατφόρμα ThingSpeak. Ακόμη και κατά τη διάρκεια προσωρινής απώλειας σύνδεσης, το σύστημα ήταν σε θέση να αποθηκεύει τις μετρήσεις και να τις αποστέλλει μετά την επανασύνδεση. Τέλος, μέσω της πλατφόρμας ThingSpeak κατέστη δυνατή η απομακρυσμένη παρακολούθηση τόσο των περιβαλλοντικών παραμέτρων όσο και λειτουργικών χαρακτηριστικών του συστήματος, όπως η ημερήσια διάρκεια λειτουργίας του φωτισμού.

Κεφάλαιο 5^ο: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός συστήματος για τη διατήρηση κατάλληλων περιβαλλοντικών συνθηκών σε χώρους αποθήκευσης κρασιού. Η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η έκθεση στο φως αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα και την εξέλιξη του οίνου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσής του.

Μέσω της υλοποίησης του συστήματος παρέχεται η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης και ελέγχου των συνθηκών αυτών, με στόχο τη διατήρηση τους εντός των επιθυμητών ορίων που έχουν οριστεί από τον χρήστη. Παράλληλα, η δυνατότητα απομακρυσμένης πρόσβασης επιτρέπει την εποπτεία του χώρου χωρίς την ανάγκη φυσικής παρουσίας, διευκολύνοντας τη διαχείριση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, η καταγραφή των μετρήσεων σε διαδικτυακή πλατφόρμα καθιστά δυνατή την ανάλυση της διακύμανσης των περιβαλλοντικών παραμέτρων σε βάθος χρόνου, συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του χώρου αποθήκευσης. Συνεπώς, το σύστημα μπορεί να αποτελέσει μία αξιόπιστη και χαμηλού κόστους λύση για τη διατήρηση σταθερών συνθηκών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την προστασία και τη διασφάλιση της ποιότητας του οίνου.

5.2 Περιορισμοί συστήματος

Παρότι το σύστημα μπορεί να συμβάλει στη διατήρηση κατάλληλων συνθηκών αποθήκευσης, παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε.

Αρχικά, η ακρίβεια των μετρήσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εξαρτάται από τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται. Δεδομένου ότι πρόκειται για αισθητήρα γενικής χρήσης και όχι υψηλής ακρίβειας, οι μετρήσεις ενδέχεται να παρουσιάζουν αποκλίσεις.

Επιπλέον, το σύστημα λειτουργεί ως μονάδα ελέγχου και όχι ως διάταξη ισχύος. Για τον λόγο αυτό, η σύνδεση και λειτουργία εξωτερικών φορτίων απαιτεί τη χρήση κατάλληλων στοιχείων ισχύος, όπως ρελέ ή άλλες διατάξεις διακοπής.

Το κύκλωμα δεν περιλαμβάνει ειδική διάταξη προστασίας από βαθιά εκφόρτιση της εφεδρικής μπαταρίας, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής της σε περίπτωση παρατεταμένης λειτουργίας χωρίς κύρια τροφοδοσία.

Τέλος, σε περίπτωση πλήρους εκφόρτισης της μπαταρίας και απενεργοποίησης της συσκευής, τα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί στη μνήμη SRAM δεν διατηρούνται, καθώς πρόκειται για πτητική μνήμη, με αποτέλεσμα να χάνονται.

5.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Παρότι το σύστημα ανταποκρίνεται στις βασικές απαιτήσεις λειτουργίας, υπάρχουν δυνατότητες περαιτέρω βελτίωσης και επέκτασης που θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία του.

Στο μέλλον θα μπορούσε να αναπτυχθεί ιδιωτική υποδομή αποθήκευσης δεδομένων (server), ώστε κάθε μέτρηση να συνοδεύεται από την πραγματική χρονική σήμανση (timestamp) της στιγμής λήψης της. Με τον τρόπο αυτό, σε περιπτώσεις προσωρινής απώλειας σύνδεσης και μεταγενέστερης αποστολής (catch-up), τα δεδομένα θα εμφανίζονται με την πραγματική χρονική τους αντιστοίχιση και όχι με τον χρόνο παραλαβής τους από την πλατφόρμα.

Η ενσωμάτωση μονάδας πραγματικού χρόνου (RTC) θα μπορούσε να επιτρέψει τη διατήρηση ακριβούς χρονικής πληροφορίας ακόμη και χωρίς σύνδεση στο διαδίκτυο, μειώνοντας την εξάρτηση από τον συγχρονισμό μέσω του πρωτοκόλλου NTP.

Μελλοντικά θα μπορούσε να ενσωματωθεί κύκλωμα προστασίας από βαθιά εκφόρτιση της εφεδρικής μπαταρίας, ώστε να αποφεύγεται η λειτουργία της κάτω από επιτρεπτά όρια τάσης.

Επιπλέον, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ο υπάρχων διαιρέτης τάσης για την εκτίμηση της στάθμης της μπαταρίας και την εμφάνισή της μέσω του μενού της συσκευής, ενώ θα μπορούσε να προστεθεί και ηχητική ειδοποίηση μέσω βομβητή όταν η στάθμη της πέφτει κάτω από προκαθορισμένο όριο.

Η ανάπτυξη μηχανισμού αποστολής ειδοποιήσεων μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου θα μπορούσε να επιτρέψει την άμεση ενημέρωση του χρήστη σε περιπτώσεις παρατεταμένης απόκλισης των περιβαλλοντικών συνθηκών από τα επιθυμητά όρια.

Επιπλέον, θα μπορούσε να προστεθεί επιπλέον ρελέ για τον έλεγχο του φωτισμού, ώστε να ενεργοποιείται ή να απενεργοποιείται αυτόματα ανάλογα με τις συνθήκες.

Η ανάπτυξη κατάλληλου περιβλήματος θα μπορούσε να προστατεύσει τη συσκευή από το περιβάλλον, επιτρέποντας παράλληλα τη σωστή λειτουργία των αισθητήρων μέσω ειδικά διαμορφωμένων ανοιγμάτων.

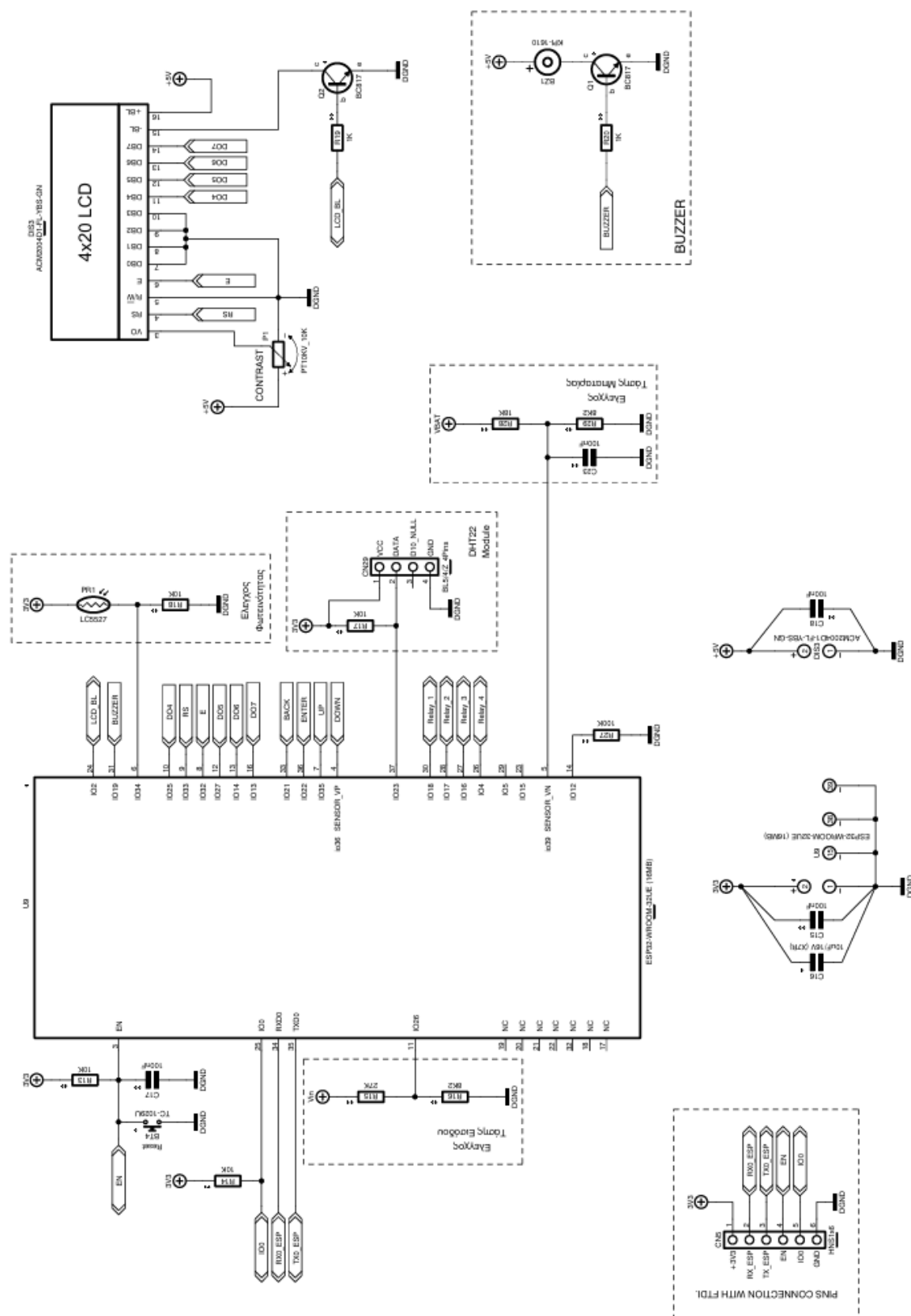
Τέλος, η προσθήκη διατάξεων προστασίας από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (ESD) θα μπορούσε να ενισχύσει την αξιοπιστία της συσκευής σε πραγματικές συνθήκες χρήσης.

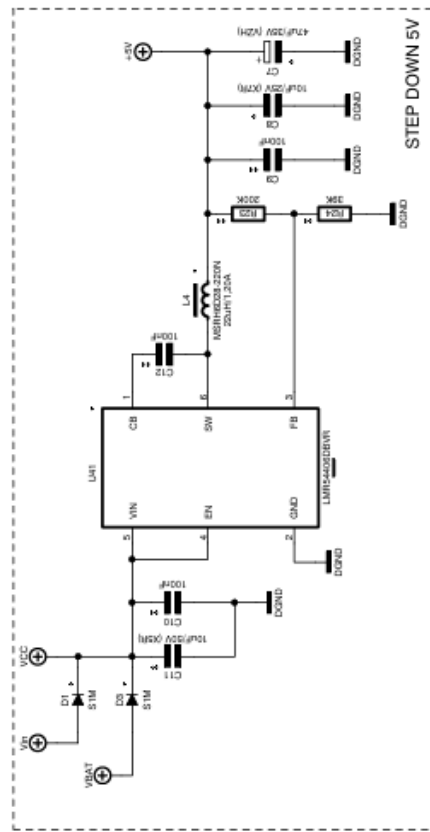
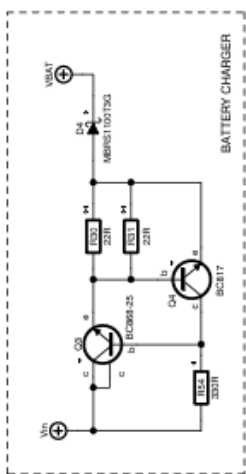
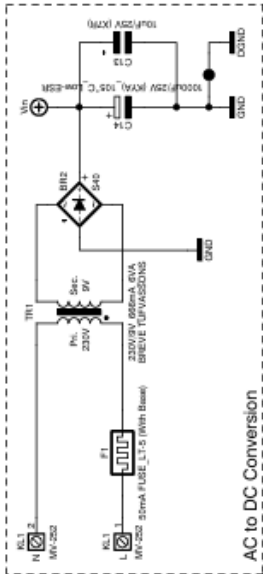
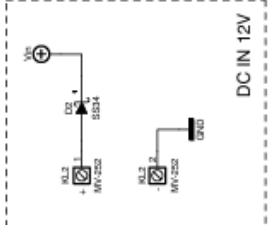
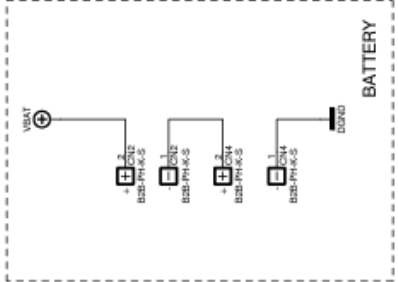
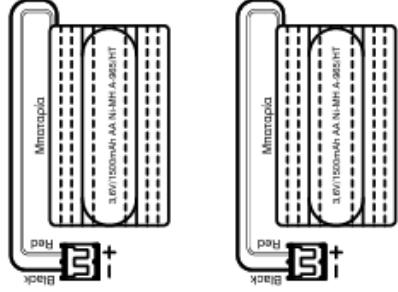
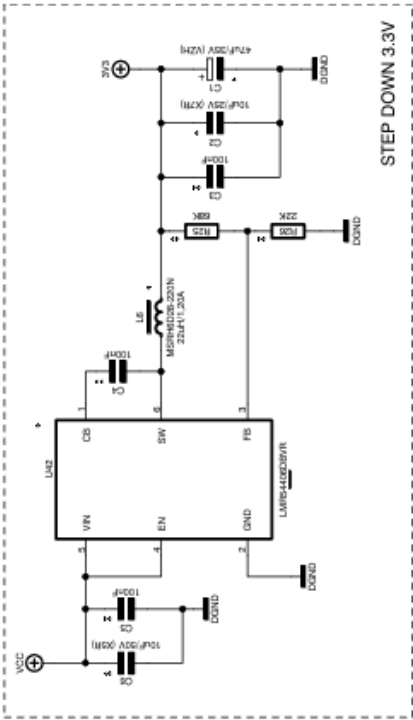
Συνολικά, οι προτεινόμενες επεκτάσεις θα μπορούσαν να ενισχύσουν περαιτέρω τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος, καθιστώντας το καταλληλότερο για εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες αποθήκευσης.

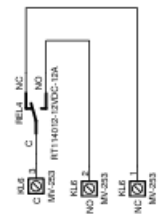
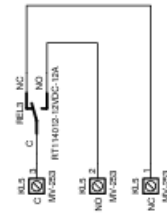
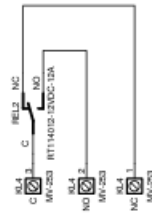
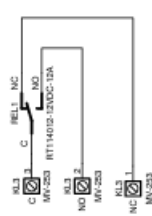
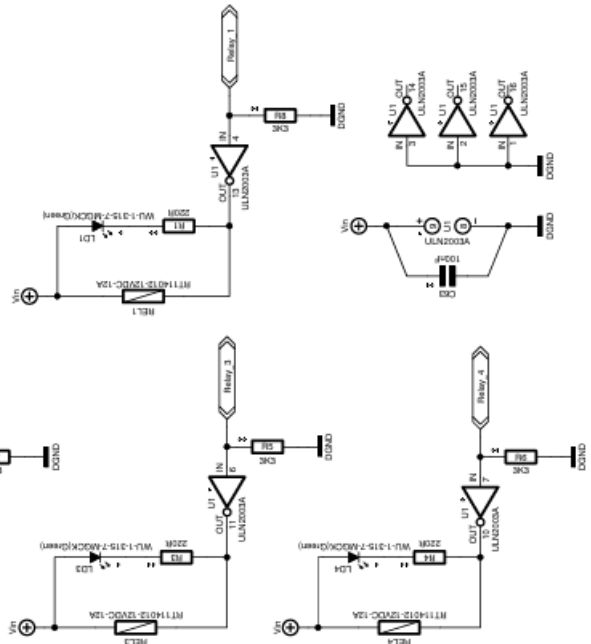
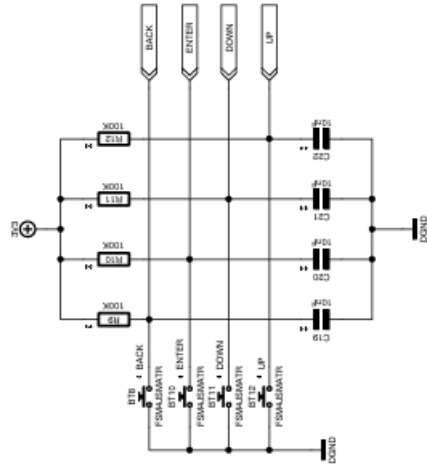
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Echave et al., “Bottle Aging and Storage of Wines: A Review,” *Molecules*, 2021.
- [2] S. Agriopoulou and E. Stamatelopoulou, “Influence of Storage Conditions on the Quality Characteristics of Wines,” *EC Nutrition*, 2017.
- [3] Technical Note TN09 – The Effects of Heat and Light on Wine during Storage
- [4] C. Dey and S. K. Sen, *Industrial Automation Technologies*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020.
- [5] “Wine cellar,” Wikipedia, The Free Encyclopedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Wine_cellar.
- [6] Espressif Systems, *ESP32-WROOM-32E & ESP32-WROOM-32UE Datasheet*, version 2.0, Espressif Systems.
- [7] TE Connectivity, *Power PCB Relay RT1: General Purpose Relays PCB Relays*, Datasheet, Jun. 2025.
- [8] Diotec Semiconductor AG, *S40 ... S500 – SMD Single Phase Diode Bridge Rectifier*, Datasheet, Dec. 2025.
- [9] Texas Instruments, *LMR54410, LMR54406 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 4V to 45V, 0.6A/1A Buck Converter in a SOT-23 Package*, datasheet, Oct. 2021, revised Jan. 2026.
- [10] KYOCERA AVX, *AEK Series SMD Aluminum Electrolytic Capacitors Datasheet*, Rev. 10.
- [11] KEMET, *K-Sim Capacitor Simulation Tool*, [Online]. Available: <https://ksim.kemet.com>
- [12] Nexperia, *BC868 Series: 20 V, 2 A NPN Medium Power Transistors Datasheet*, Rev. 9, Jul. 2023
- [13] M. Jiménez, R. Palomera, and I. Couvertier, *Introduction to Embedded Systems: Using Microcontrollers and the MSP430*. New York, NY, USA: Springer, 2014
- [14] STMicroelectronics, *ULN2001, ULN2002, ULN2003, ULN2004 Seven Darlington Arrays Datasheet*, Nov. 2021
- [15] AZ Displays, *ACM2004D-RN-GBH-D Character LCD Module Datasheet*, Ver. 1.0, Aug. 2011.
- [16] Aosong Electronics Co., Ltd, *DHT22 (AM2302) Digital-Output Relative Humidity & Temperature Sensor Datasheet*.

Παράρτημα Α: Σχηματικό Διάγραμμα







Παράρτημα Β : Εγχειρίδιο Χρήσης Συσκευής

B.1 Περιγραφή Συσκευής

Η συσκευή χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας και της υγρασίας σε χώρο αποθήκευσης οίνου. Παρακολουθεί συνεχώς τις περιβαλλοντικές συνθήκες και ενεργοποιεί αυτόματα τα κατάλληλα συστήματα (ψύξη, θέρμανση, ύγρανση, αφύγρανση), ώστε να διατηρούνται οι επιθυμητές τιμές.

B.2 Εμφάνιση Οθόνης

Στην αρχική οθόνη εμφανίζονται οι βασικές πληροφορίες λειτουργίας της συσκευής:

- Θερμοκρασία (°C)
- Σχετική υγρασία (%)
- Κατάσταση ρελέ
- Κατάσταση δικτύου (Online / Offline)
- Κατάσταση τροφοδοσίας (AC / Battery)

Οι ενδείξεις των ρελέ εμφανίζονται με σύμβολα:

- ● : ενεργό
- ○ : ανενεργό

Η οθόνη ενημερώνεται συνεχώς ανάλογα με τις μετρήσεις και την κατάσταση του συστήματος.

B.3 Χειρισμός Κουμπιών

Η συσκευή διαθέτει τέσσερα κουμπιά:

- **ENTER**: Είσοδος στο μενού ρυθμίσεων και επιλογή επεξεργασίας τιμής
- **UP**: αύξηση τιμής
- **DOWN**: μείωση τιμής
- **BACK**: Επιστροφή στο προηγούμενο μενού ή έξοδος από την επεξεργασία τιμής

B.4 Μενού Ρυθμίσεων

Με το πάτημα του πλήκτρου ENTER, ο χρήστης εισέρχεται στο μενού ρυθμίσεων, όπου μπορεί να τροποποιήσει:

- Ελάχιστη θερμοκρασία (Temp Low)
- Μέγιστη θερμοκρασία (Temp High)
- Ελάχιστη υγρασία (Hum Low)
- Μέγιστη υγρασία (Hum High)

Με τον τρόπο αυτό μπορεί ο χρήστης να ρυθμίσει τις επιθυμητές συνθήκες για τη φύλαξη του κρασιού.

B.5 Αποστολή Δεδομένων

Δεδομένα όπως η ημερήσια φωτεινότητα και ο μέσος όρος της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας αποστέλλονται περιοδικά στη διαδικτυακή πλατφόρμα ThingSpeak, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση των συνθηκών.

Σε περίπτωση απώλειας σύνδεσης, τα δεδομένα αποθηκεύονται και αποστέλλονται όταν αποκατασταθεί η σύνδεση.

B.6 Λειτουργία σε Διακοπή Ρεύματος

Σε περίπτωση διακοπής τροφοδοσίας, η συσκευή απενεργοποιεί τα ρελέ και συνεχίζει τη λειτουργία της με περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας.