

Περίληψη

Η παρούσα εργασία είχε ως σκοπό την μελέτη και την ανάπτυξη πυρομετρικής συσκευής, δηλαδή μιας συσκευής που θα μπορεί εξ 'αποστάσεως να λαμβάνει μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας ενός αντικειμένου ή κάποιου σώματος με το πάτημα ενός κουμπιού. Ακόμα στόχος της ήταν να έχει πρόσβαση ο χρήστης στις μετρήσεις μέσω οθόνης αλλά και από την άνεση του κινητού μέσω διαδικτύου. Επομένως αναπτύχθηκαν οι ανάλογες πλακέτες βασισμένες στον μικροελεγκτή ESP32 και στον αισθητήρα MLX90640. Ακόμα αναπτύχθηκε το firmware με δυνατότητες τηλεμετρίας και απομακρυσμένου ελέγχου, λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και δυνατότητες αυτόματης λήψης μετρήσεων. Παράλληλα αναπτύχθηκε και μία ιστοσελίδα για να υπάρχει εύκολη πρόσβαση στους χρήστες που θέλουν να παρακολουθούν τις μετρήσεις από οποιαδήποτε συσκευή και να έχουν εύκολο έλεγχο της συσκευής.

Abstract

The aim of this bachelors' thesis was to study and develop a pyrometric device, ie a device that can remotely take measurements of the surface temperature of an object or a body by pressing a button. Another aim was for the user to have access to the measurements via screen but also from the comfort of a mobile phone through the internet. Therefore, the corresponding printed circuit boards based on the ESP32 microcontroller and the MLX90640 sensor were developed. The firmware was developed with telemetry and remote control capabilities, low power consumption functions and automatic measurement capabilities. At the same time, a website was developed to make it easy for users who want to monitor measurements from any device and have easy control of the device.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Τι είναι η θερμοκρασία.....	5
1.1 Ιστορική εξέλιξη συστημάτων μέτρησης θερμοκρασίας.....	5
1.2 Ακτινοβολία θερμοκρασίας	10
1.3 Βασική αρχή λειτουργίας Thermocouple – Thermopile	12
1.4 Αισθητήρας thermopile MLX90640.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δομή και ανάπτυξη του συστήματος	16
2.1 Βασική δομή hardware του συστήματος	17
2.2 Τροφοδοσία πλακέτας	19
2.2.1 Σύστημα φόρτισης μπαταρίας	20
2.2.2 Πολυπλέκτης ισχύος και ρυθμιστής τάσης	22
2.3 Κύκλωμα μέτρησης μπαταρίας.....	26
2.4 Επικοινωνία USB και προγραμματισμός μικροελεγκτή.....	28
2.5 Πλακέτα ανίχνευσης θερμοκρασίας.....	32
2.6 Οθόνη OLED	35
2.7 Κύκλωμα ESP και κανονική λειτουργία.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Firmware & λειτουργία συσκευής.....	39
3.1 Δομή και Δυνατότητες του Firmware	40
3.2 Εκκίνηση συσκευής	42
3.3 Ρύθμιση της συσκευής.....	43
3.4 Χειροκίνητη λειτουργία.....	45
3.5 Τηλεμετρία & απομακρυσμένος έλεγχος	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Δομή cloud & MQTT	47
4.1 Webserver & Ιστοσελίδα.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα	55
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: JavaScript που εκτελείται στην ιστοσελίδα του πυρόμετρου	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: Shellshort & Median.....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Κανονική κατανομή.....	59
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	61

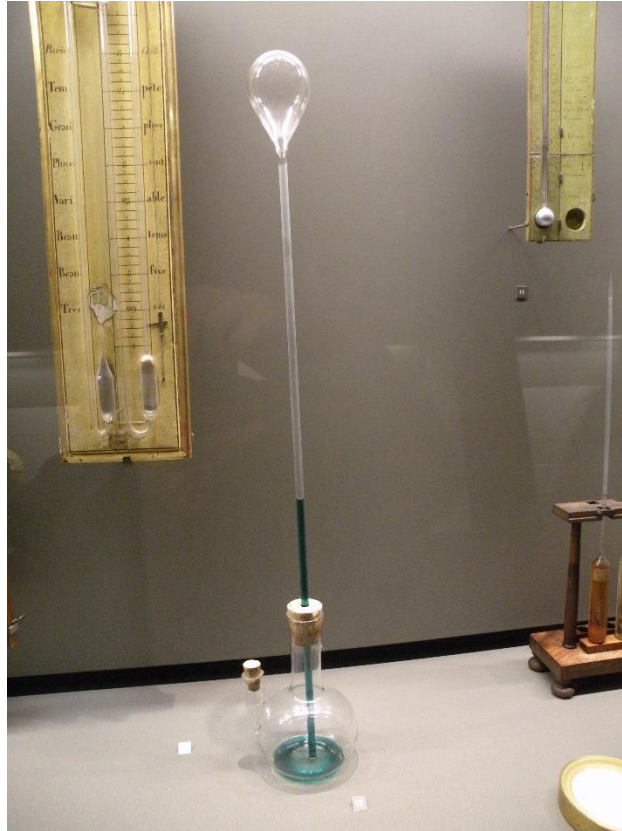
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Τι είναι η θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι η φυσική ποσότητα που εκφράζει πόσο ζεστό ή πόσο κρύο είναι ένα σώμα με αναφορά κάποιο άλλο φαινόμενο. Η πιο διαδεδομένη κλίμακα θερμοκρασίας είναι η κλίμακα Κελσίου, η οποία εκφράζει πόσο πιο ζεστό είναι ένα αντικείμενο από τους 0 βαθμούς Κελσίου όπου το νερό παγώνει σε πίεση μιας ατμοσφαιράς. Όπως γίνεται εμφανές η θερμοκρασία όπως και η τάση είναι μέγεθος που μετριέται με βάση αναφοράς κάποιο άλλο μέγεθος, ή σημείο αναφοράς όπως ένα φυσικό φαινόμενο. Οι επιστήμονες κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούν την κλίμακα Κέλβιν όπου το 0 αντιπροσωπεύει ένα σύστημα στο οποίο η κίνηση της ύλης σταματάει και εξαφανίζεται ακόμα και η θερμική κίνηση. Επομένως είναι το σημείο στο οποίο όλες οι κινήσεις που οφείλονται σε θερμική ενέργεια σταματάνε και έχουμε ένα απόλυτα ακίνητο και ψυχρό σύστημα [1]. Η θερμοκρασία σαν φυσικό μέγεθος έχει μεγάλο ενδιαφέρον σε πολλούς κλάδους όπως η Ιατρική, όπου μας ενδιαφέρει να παρακολουθούμε με ακρίβεια τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας του ασθενή, στην φυσική σε διάφορα πειράματα όπως αυτά με ημιαγωγούς και laser, στον κλάδο των επιχειρήσεων κατά την δημιουργία προϊόντων, τις συνθήκες μεταφοράς τους και την διαχείριση κατανάλωσης ενέργειας στην θέρμανση ή ψύξη χώρων επιχειρηματικής δραστηριότητας αλλά και τέλος στην χημεία όπου η ταχύτητα ή η ποιότητα χημικών αντιδράσεων εξαρτώνται άμεσα από την θερμοκρασία.

Όπως γίνεται εμφανές υπάρχει μεγάλη ανάγκη σε πάρα πολλά συστήματα η καταγραφή, επεξεργασία και ένδειξη της θερμοκρασίας για την βελτιστοποίηση διεργασιών ή την αποφυγή προβλημάτων. Επομένως είναι ενδιαφέρον να εξετάσουμε την εξέλιξη των μετρητικών μεθόδων θερμοκρασίας κατά την πάροδο του χρόνου.

1.1 Ιστορική εξέλιξη συστημάτων μέτρησης θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας συστημάτων, αντικειμένων ή κατά κύριο λόγο έμβιων όντων κατά την ιστορία αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι που βασίζονταν σε συγκεκριμένα φυσικά φαινόμενα.

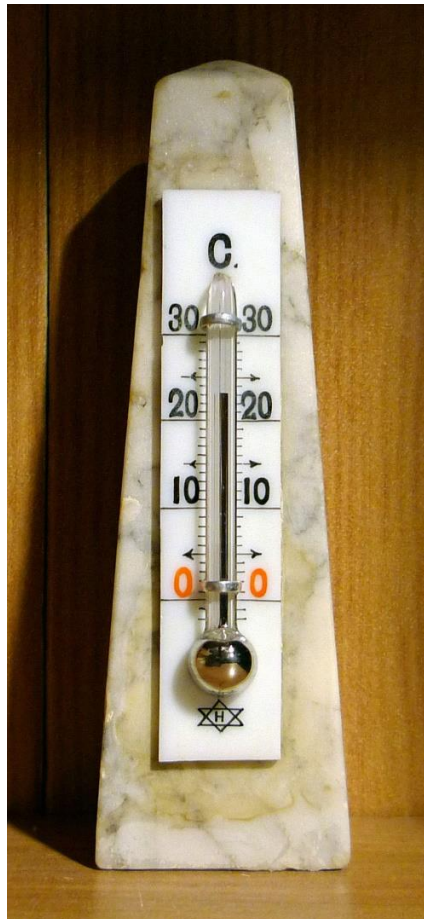


Εικόνα 1. 1 Θερμοσκόπιο του Γαλιλαίου

Ένα από τα πρώτα θερμοσκόπια ήταν κατασκευασμένο το 1592 από τον γνωστό Ιταλό φυσικό Γαλιλαίο Γαλιλέι. Η συσκευή αποτελούνταν από έναν μακρόστενο σωλήνα ο οποίος στην κορυφή είχε μια φούσκα η οποία περιείχε αέρα και στην άκρη του συνδεόταν με ένα δοχείο το οποίο ήταν σφραγισμένο και περιείχε χρωματισμένο υγρό. Όταν η θερμοκρασία του χώρου ανέβαινε, η πίεση του αέρα μέσα στον σωλήνα αυξάνονταν και επομένως η στάθμη του υγρού που περιείχε ο σωλήνας κατέβαινε λόγω της πίεσης του αέρα. Αντιθέτως όταν η θερμοκρασία του χώρου ήταν χαμηλή, η πίεση του αέρα γίνονταν χαμηλότερη και επομένως η στάθμη του υγρού ανέβαινε στον σωλήνα για να καλύψει την διαφορά της πίεσης. Η συσκευή του Γαλιλαίου δεν είχε ως σκοπό την ένδειξη της θερμοκρασίας αλλά αποσκοπούσε στην ένδειξη πως υπήρξε άνοδος ή κάθοδος στην θερμοκρασία σε σχέση με κάποια άλλη χρονική στιγμή.

Το θερμοσκόπιο του Γαλιλαίου έδειχνε την θερμοκρασία μόνο κατά προσέγγιση και δεν ήταν πρακτικό για μετρήσεις ακριβείας. Επομένως για το πρώτο θερμόμετρο μεγαλύτερης ακριβείας μπορούμε να απονέμουμε τα εύσημα στον Daniel Gabriel Fahrenheit ο οποίος το 1714 πειραματιζόμενος με τον υδράργυρο τον τοποθέτησε σε στενό γυάλινο σωλήνα για να φτιάξει την δικιά του έκδοση του θερμόμετρου του Olaus Roemer το οποίο βασιζόταν σε υγρό αλκοόλ και θεωρούνταν από τα πρώτα θερμόμετρα ακριβείας. Η κατασκευή του βασίζεται στο γεγονός ότι λόγω του φαινομένου της διαστολής των υγρών σε διαφορετικές θερμοκρασίες, ο υδράργυρος «ανεβαίνει»

κατά μήκος του σωλήνα και επομένως, μπορούμε να ξέρουμε με ικανοποιητική ακρίβεια την θερμοκρασία ενός χώρου στην κλίμακα Φάρεναϊτ αν το βαθμονομήσουμε με δυο γνωστά σημεία όπου οι 32 βαθμοί Φαρενάϊτ είναι το ύψος που έχει ο υδράργυρος στον σωλήνα σε θερμοκρασία που το πάγος λιώνει ενώ το 212 είναι το ύψος που έχει ο υδράργυρος όταν το νερό βράζει [2]. Αξίζει να σημειώσουμε ότι μερικά θερμόμετρα υδραργύρου μπορούν να έχουν υπερ-υψηλή ακρίβεια μέχρι και 0.1F ή περίπου 0.05C [3].



Εικόνα 1. 2 Θερμόμετρο υδραργύρου που φτάνει από τους 0 έως τους 30 βαθμούς Κελσίου

Αρκετά χρόνια αργότερα το 1742 ο Σουηδός Andres Celcius ο οποίος ασχολούμενος με μετεωρολογικές παρατηρήσεις και γεωγραφικές μετρήσεις δημιούργησε την γνωστή κλίμακα Κελσίου η οποία ως 0 είχε το σημείο βρασμού του νερού και ως 100 το σημείο ψύξης του. Μετά τον θάνατό του το 1744 η κλίμακα αντιστράφηκε και παραμένει έτσι ως σήμερα. Αργότερα το 1821 ο Γερμανός φυσικός Thomas Johann Seebeck κάνοντας πειράματα παρατήρησε ότι όταν ενώσουμε δυο διαφορετικά μέταλλα μεταξύ τους, και τα εκθέσουμε σε αυξομειώσεις θερμοκρασίας, προκαλούν την μεταβολή της μαγνητικής πυξίδας. Στην αρχή υπέθεσε πως αυτό οφείλονταν στα άκρα των μετάλλων καθώς αυτά δημιουργούσαν μαγνητικό πεδίο που ίσως είχε κάποια σχέση με αυτό της γης αλλά σύντομα αντιλήφθηκε ότι τα μέταλλα παρήγαγαν ρεύμα τα οποία σύμφωνα με τον νόμο του Αμπέρ

δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο στρέφει με την σειρά του την πυξίδα. Την σχέση μεταξύ του θερμικού και μαγνητικού φαινομένου την ονόμασε θερμοηλεκτρική δύναμη και πλέον αισθητήρες θερμοκρασίας γνωστοί ως θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές συσκευές όπου απαιτούνται θερμομέτρα για μετρήσεις πολύ υψηλών η χαμηλών θερμοκρασιών αλλά και σε οικιακές συσκευές. Τα θερμοζεύγη βασίζονται στις παρατηρήσεις που περιέγραψε ο φυσικός και είναι γνωστό ως φαινόμενο Seebeck και ήταν από τα πρώτα θερμομέτρα που βασίζονταν σε ηλεκτρικά φαινόμενα [4].



Εικόνα 1. 3 Θερμοζεύγος τύπου K για μετρήσεις θερμοκρασίας επιφάνειας. Το κίτρινο ακρο είναι μέταλλο Νικελίου-Χρωμίου και το κόκκινο άκρο Νικελίου-Αλουμινίου.

Μεταγενέστερα ο Βρετανός φυσικός και μηχανικός William Thomson η γνωστός ως λόρδος Κέλβιν, έχοντας παρατηρήσει όλες τις κλίμακες που δημιούργησαν οι προκάτοχοι του, ενδιαφέρθηκε ιδιαίτερα πολύ στην ιδέα της «απόλυτα μηδενικής θερμοκρασίας» και έκανε αρκετές απόπειρες να την ορίσει και να την υπολογίσει. Κατά το 1848 έκανε δημοσίευση ένα έγγραφο με τίτλο “On an Absolute Thermometric Scale founded on Carnot’s Theory of the Motive Power of Heat and calculated from Regnault’s Observations” [5] στο οποίο υποστήριξε ότι η θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός είναι οι -273.15°C καθώς αυτό είναι το σημείο στο οποίο όλες οι θερμικές κινήσεις σταματούν. Η κλίμακα Κέλβιν αποτελεί μέχρι και σήμερα την θεμελιώδη μονάδα μέτρησης θερμοκρασίας στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) από την οποία μπορούν να οριστούν και οι υπόλοιπες [6]. Το 1864 ο Henri Becquerel παρουσιάζει στην επιστημονική κοινότητα την ιδέα του για ένα οπτικό πυρόμετρο καθώς πειραματιζόταν με ραδιενεργά υλικά και αργότερα ο ίδιος μαζί με την Marie Curie και τον άντρα της Pierre Curie κέρδισαν το Νόμπελ φυσικής το 1903 για την ανακάλυψη της ραδιενέργειας.

Όμως το πρώτο πρακτικό οπτικό πυρόμετρο κατασκευάστηκε από τον Γάλλο χημικό Henri-Louis Le Chatelier το 1892. Ο Callendar-Van Dusen το 1885 εφηύρε έναν άλλο σπουδαίο αισθητήρα θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα, την αντίσταση πλατίνας (Platinum RTD) η οποία αλλάζει την αντίσταση της σε συνάρτησή με τις μεταβολές της θερμοκρασίας και ο ίδιος μας παρουσίασε την συνάρτηση Callendar-Van Dusen [7] η οποία περιγράφει την σχέση Θερμοκρασίας-Αντίστασης για τις αντίστοιχες συσκευές πλατίνας. Τον προηγούμενο αιώνα, το 1906 ο Γερμανός φυσικός Marcello Stefano Pirani εφηύρε τον μετρητή Pirani η οποία είναι συσκευή που βασίζεται στο φαινόμενο της θερμικής αγωγιμότητας για να μετρήσει την πίεση σε συστήματα όπου απαιτείται να υπάρχει κενό αέρα, δηλαδή η χαμηλότερη δυνατή πίεση.



Εικόνα 1. 4 Συσκευή μέτρησης πίεσης Pirani

Συγκεκριμένα η συσκευή θερμαίνει μία συσκευή RTD πλατίνας, η οποία είναι συνδεδεμένη σε μία γέφυρα Wheatstone δύο τετάρτων. Όταν το RTD εκτεθεί σε περιβάλλον όπου υπάρχει αέρας, θα μεταφερθεί η θερμότητα του στον αέρα του θαλάμου και επομένως θα αλλάξει η τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone καθώς θα μεταβληθεί η αντίσταση του RTD. Μετρώντας την αλλαγή της τάσης εξόδου της γέφυρας, καταφέρνουμε να μετρήσουμε την απώλεια θερμότητας στον θάλαμο άρα μπορούμε να εξάγουμε την πίεση του θαλάμου καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση τόσο περισσότερη θερμότητα χάνει η αντίσταση στο περιβάλλον [8]. Ακόμα πιο πρόσφατα την δεκαετία του 1930 ο Αμερικανός εφευρέτης και ιδρυτής της εταιρείας μπαταριών Duracell, Samuel Ruben έκανε εύκολη την μαζική κατασκευή των θερμίστορ που είχε ανακαλύψει το 1833 ο Michael Faraday. Τα θερμίστορ είναι συσκευές από συγκολλημένους ημιαγωγούς και παρουσιάζουν αντίσταση η οποία έχει μεγάλη ευαισθησία σε μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα η αντίσταση τους ανεβαίνει ή κατεβαίνει εκθετικά ανάλογα αν είναι θετικού θερμοκρασιακού συντελεστή (PTC) ή αρνητικού θερμοκρασιακού συντελεστή (NTC). Δεδομένου ότι τα θερμίστορ έχουν γρήγορη απόκριση στις αλλαγές θερμοκρασίας, χρησιμοποιούνται σε συστήματα όπου η ταχύτητα και η ευαισθησία στις αλλαγές τις θερμοκρασίας παίζουν κρίσιμο ρόλο, αλλά η ακρίβεια της μέτρησης δεν έχει κρίσιμη σημασία όπως σε συστήματα πυρανίχνευσης.

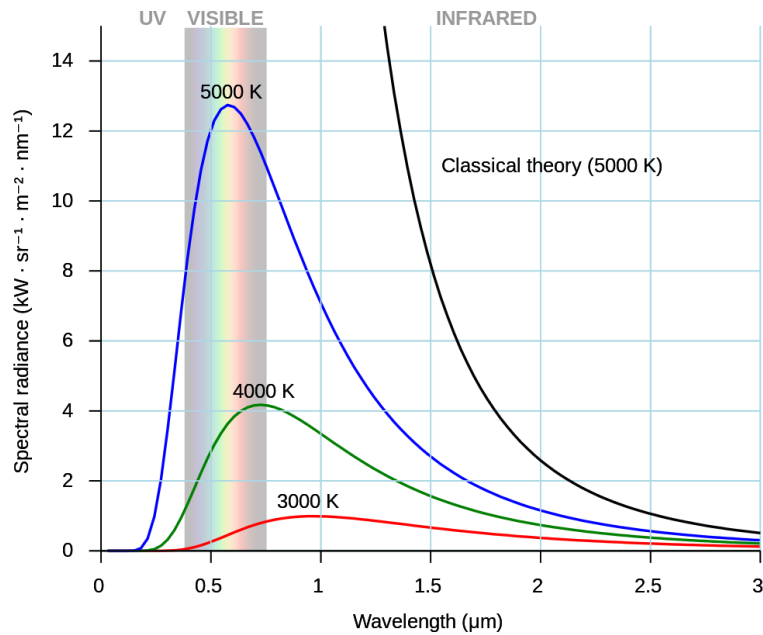
Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επιτρέψει ακόμα και την χρήση οπτικών ινών ως αισθητήριο όργανο για ανίχνευση θερμοκρασίας σε δύσκολες συνθήκες όπως κατά μήκος ηλεκτρικών καλωδίων σε μεγάλες εγκαταστάσεις, ή σε αγωγούς πετρελαίου όπου η χρήση ηλεκτρικών αισθητήρων αποτελεί κίνδυνο καταστροφικής ζημιάς. Ο τρόπος που εντοπίζουν την θερμοκρασία κατά μήκος ενός οπτικού καλωδίου βασίζεται στο φαινόμενο της διασποράς Raman και στην χρήση συστημάτων που μετράνε την οπτική αντανakλαστικότητα της ίνας κατά την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα αποστέλλεται ένας παλμός laser κατά μήκος της ίνας και λόγω ανομοιομορφιών στην πυκνότητα, την σύνθεση αλλά και των ταλαντώσεων της ίνας μερικά φωτόνια επιστρέφουν πίσω στον πομπό λόγω οπισθοσκεδάσεων Rayleigh, Brillouin και Raman.

Επειδή οι οπισθοσκεδάσεις λόγω φαινομένου Raman εξαρτώνται από την θερμοκρασία, αν αναλύσουμε το φάσμα του φωτός που επιστρέφει και εξάγουμε την ένταση του θορύβου που οφείλεται στο φαινόμενο Raman μπορούμε να έχουμε μια εικόνα της θερμοκρασίας κατά μήκος της ίνας [9]

1.2 Ακτινοβολία θερμοκρασίας

Το 1800 ο αστρονόμος William Herschel ανακάλυψε την υπέρυθη ακτινοβολία, δηλαδή την ακτινοβολία με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 700nm έως 1mm, παρατηρώντας την επίδραση της ακτινοβολίας σε ένα θερμόμετρο. Ουσιαστικά η υπέρυθη ακτινοβολία αποτελεί φως το οποίο τα ανθρώπινα μάτια δεν έχουν την δυνατότητα να το αντιληφθούν διότι οι κώνοι των ματιών που είναι τα αισθητήρια κύτταρα χρώματος είναι ευαίσθητοι σε ένα περιορισμένο μήκος κύματος από ~700nm το οποίο αντιλαμβανόμαστε ως κόκκινο έως ~400nm το οποίο αντιλαμβανόμαστε ως μωβ. Υπάρχουν ζώα όπως η γαρίδα Mantis η οποία έχει ευαισθησία σε ακόμα μεγαλύτερο μέρος του οπτικού φάσματος ακόμα και μέχρι το υπέρυθρο το οποίο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην σύγχρονη οπτική θερμομετρία.

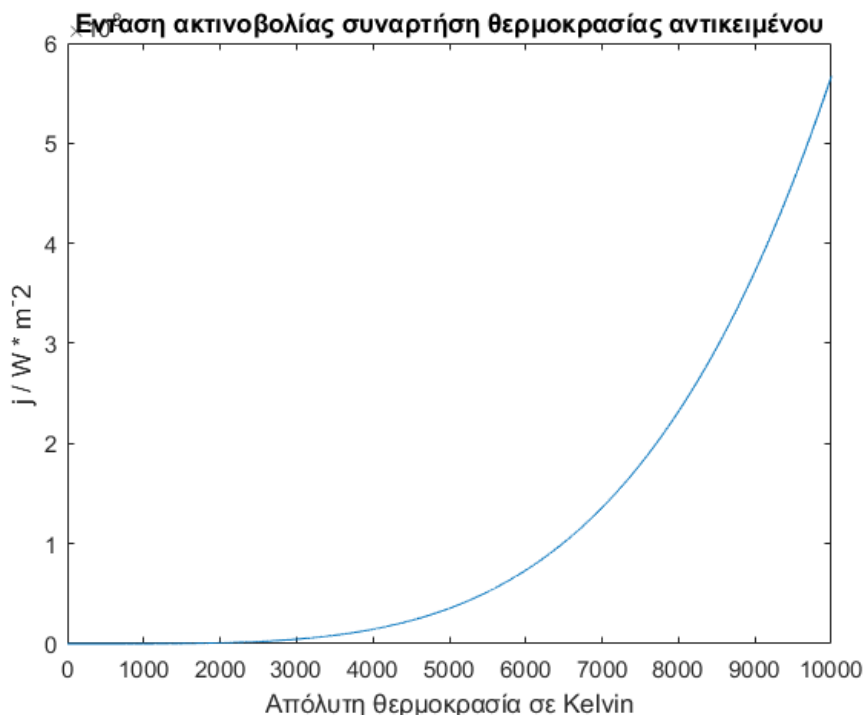
Η οπτική θερμομετρία βασίζεται στο γεγονός ότι όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός ακτινοβολούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα (φως). Το φως που οφείλεται σε θερμική ακτινοβολία είναι στο υπέρυθρο φάσμα. Ένα ιδανικό αντικείμενο το οποίο δεν αντανakλά φως και ακτινοβολεί μόνο στο υπέρυθρο φάσμα ανάλογα με την θερμοκρασία του, ονομάζεται στην φυσική μαύρο σώμα (black body) και έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς συνδέει την θερμοκρασία του αντικειμένου με την ένταση ακτινοβολίας και με το μήκος κύματος το οποίο ακτινοβολεί [10].



Εικόνα 1. 5 Ακτινοβολία ιδανικού μαύρου σώματος. Στο οριζόντιο άξονα φαίνεται το μήκος κύματος ακτινοβολίας, στον κάθετο η ένταση ακτινοβολίας ανα μονάδα επιφάνειας και οι γραμμές δείχνουν την θερμοκρασία του ιδανικού σώματος.

Ο νόμος που περιγράφει τα παραπάνω γραφήματα ονομάζεται νόμος μετατόπισης του Wien και ορίζει ότι η κορυφή της έντασης ακτινοβολίας για ένα σώμα συγκεκριμένης θερμοκρασίας βρίσκεται από την σχέση $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$ [11] όπου λ_{max} είναι το μήκος κύματος για το οποίο έχουμε μέγιστη ακτινοβολία ισχύος, το b είναι η σταθερά μετατόπισης του Wien και T η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin. Όπως γίνεται εμφανές όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του σώματος τόσο μικραίνει το λ_{max} άρα τα θερμά σώματα εκπέμπουν σε μικρά μήκη κύματος ενώ τα ψυχρότερα σε μεγάλα μήκη κύματος που εκτείνονται προς το υπέρυθρο φάσμα. Ο άλλος νόμος που έχει ενδιαφέρον για την οπτική πυρομετρία ονομάζεται νόμος του Stefan-Boltzmann και περιγράφει την ένταση της ισχύος που εκπέμπεται από ένα μαύρο σώμα σε σχέση με την θερμοκρασία του. Ορίζεται ως $P_{ακ} = \sigma T^4$ όπου $P_{ακ}$ είναι η ακτινοβολούμενη ενέργεια από ένα τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας του μαύρου σώματος, σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος σε βαθμούς Kelvin.

Αν χρησιμοποιήσουμε το MATLAB για να απεικονίσουμε σε μία γραφική παράσταση την ένταση της ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την απόλυτη θερμοκρασία του ιδανικού αντικειμένου θα έχουμε το παρακάτω γράφημα



Εικόνα 1. 6 Ο οριζόντιος άξονας είναι η θερμοκρασία του σώματος σε Kelvin, και ο κατακόρυφος άξονας η ακτινοβολία του σώματος

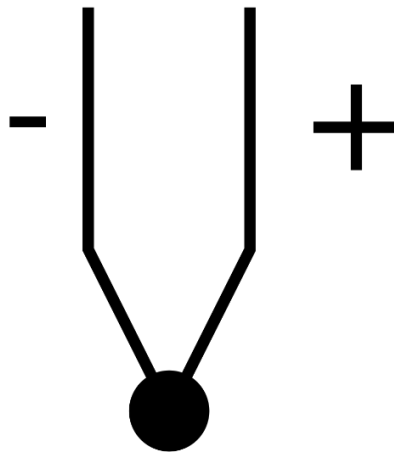
Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία ενός σώματος τόσο περισσότερο αυξάνεται η ένταση της ακτινοβολίας του ανα μονάδα επιφάνειας και από τον νόμο Wien μικραίνει το μήκος κύματος στο οποίο έχουμε την κορυφή της έντασης ακτινοβολίας. Άρα είναι χρήσιμο να θυμόμαστε πως τα ζεστά σώματα ακτινοβολούν σε μικρά μήκη κύματος και έχουν μεγάλη ένταση ακτινοβολίας, ενώ τα ψυχρότερα εκπέμπουν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και έχουν πολύ μικρότερη ένταση ακτινοβολίας.

1.3 Βασική αρχή λειτουργίας Thermocouple – Thermopile

Προηγουμένως αναφέραμε την ανακάλυψη του θερμοηλεκτρικού φαινομένου κατά το οποίο οι μεταβολές στην θερμοκρασία προκαλούν μεταβολές στην τάση αισθητήρων θερμοκρασίας. Ένας τέτοιος μεταλλάκτης θερμοκρασίας είναι το θερμοζεύγος (Thermocouple). Τα θερμοζεύγη αποτελούνται από την ένωση δύο διαφορετικών μετάλλων ή κραμάτων μετάλλων και χρησιμοποιούνται έντονα σε βιομηχανικά ή επιστημονικά περιβάλλοντα όπου ο αισθητήρας θερμοκρασίας πρέπει να λειτουργεί κάτω από αντίξοες συνθήκες όπως πολύ υψηλή ή πολύ χαμηλή θερμοκρασία¹, χημικά όξινο ή πολύ βασικό περιβάλλον, και σε συνθήκες που μας ενδιαφέρει η ταχύτητα απόκρισης του αισθητήρα [12] [13]. Το φαινόμενο στο οποίο βασίζονται τα θερμοζεύγη

¹ Θερμοζεύγη τύπου Β λειτουργούν ως τους 1700C ενώ τα τύπου Ε ως τους -270C

ονομάζεται φαινόμενο Seebeck και πήρε το όνομα του από τον προαναφερθέντα φυσικό Thomas Johann Seebeck.

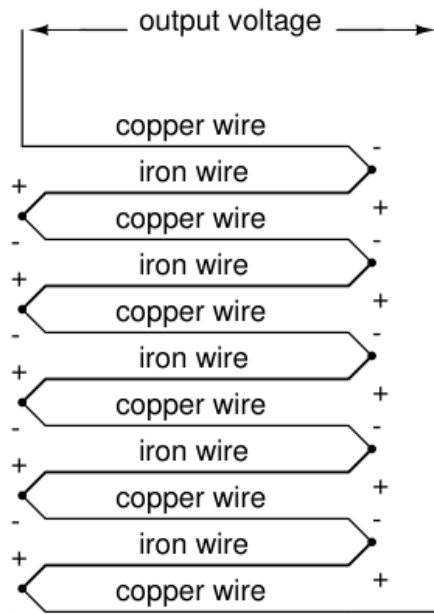


Εικόνα 1. 7 Ηλεκτρολογικό σύμβολο θερμοζεύγους όπου φαίνεται η πολικότητα του αισθητήρα καθώς και το σημείο ένωσης των δύο μετάλλων το οποίο εκτίθεται στο περιβάλλον του οποίου μετράμε την θερμοκρασία

Κατά το φαινόμενο Seebeck όταν έχουμε δύο διαφορετικά μέταλλα, τα ενώσουμε σε ένα κοινό σημείο και το θερμάνουμε θα παρατηρήσουμε ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται από την ψυχρή πλευρά στην θερμή πλευρά όπου υπάρχουν οπές, δηλαδή «κενά» στα οποία μπορούν να μεταπηδήσουν τα ηλεκτρόνια.

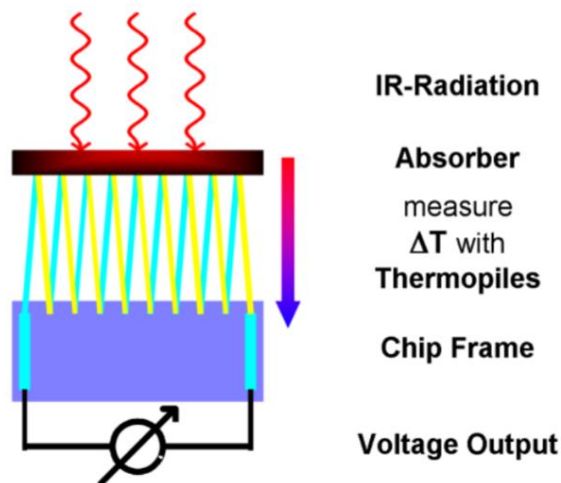
Αυτή η κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο άκρων του αισθητήρα η οποία έχει μέγεθος ίσο με $\Delta V = S * \Delta T$ όπου ΔV είναι το διαφορικό δυναμικό στα άκρα του θερμοζεύγους, S είναι ο συντελεστής Seebeck και ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα των δύο μετάλλων [14].

Το μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα thermocouple είναι ότι δεν αλλάζει γραμμικά η τάση εξόδου τους σε σχέση με την θερμοκρασία αλλά και το γεγονός ότι έχουν πολύ μικρή τάση εξόδου της τάξης των μV , εξαρτώμενη από τα μέταλλα που το απαρτίζουν. Το παραπάνω αποτελεί πρόβλημα στα συστήματα ανάκτησης και επεξεργασίας σημάτων (Data Acquisition Systems, DAS) καθώς το σήμα του αισθητήρα είναι αρκετά πιο κάτω από την στάθμη του θορύβου (όπως ο θερμικός θόρυβος, ο θόρυβος που επάγεται από τις γραμμές του δικτύου, και ο θόρυβος ραδιοσυχνότητων). Ως λύση στην μικρή τάση εξόδου μπορούμε να συνδέσουμε πολλά thermocouple σε σειρά, δημιουργώντας μία στοίβα (pile) από θερμοζεύγη και μπορούμε να δημιουργήσουμε μια συσκευή γνωστή ως thermopile. Τα thermopile κάνουν ευκολότερη την μέτρηση της θερμοκρασίας καθώς έχουν αρκετές φορές μεγαλύτερη απόκριση από τα thermocouple.



Εικόνα 1. 8 Η κατασκευή ενός *thermopile* είναι μια στοίβα από *thermocouple* τα οποία είναι τοποθετημένα σε σειρά.

Επομένως ο ηλεκτρικός περιβαλλοντικός θόρυβος που υπάρχει σε όλες τις συσκευές γίνεται μικρότερο πρόβλημα, αλλά ο χρόνος απόκρισης των *thermopile* τείνει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν ενός *thermocouple* όπως είναι αναμενόμενο. Η βασική αρχή λειτουργίας των *thermopile* φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



Εικόνα 1. 9 Τα θερμοζεύγη θερμαίνονται απορροφώντας ακτινοβολία *Infrared* η οποία αλλάζει την τάση εξόδου τους

1.4 Αισθητήρας *thermopile* MLX90640

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται στην εργασία για την μέτρηση θερμοκρασίας είναι ο MLX90640 της Melexis και αποτελεί μια διάταξη 32x24 από *thermopile* ευαίσθητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία

την οποία εκπέμπουν τα θερμά σώματα. Η γενική κατασκευή ενός αισθητήρα thermopile είναι όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.

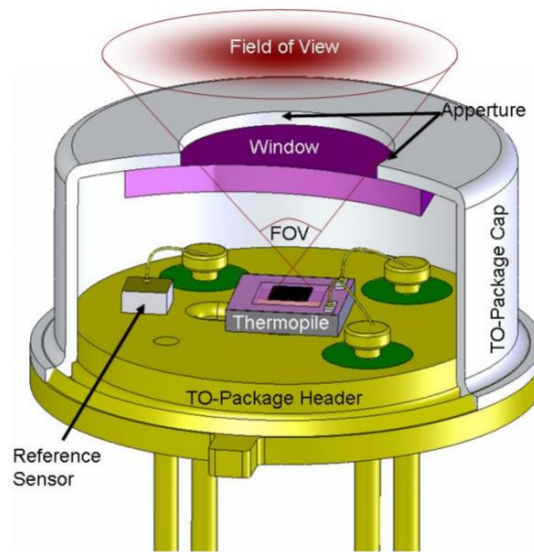


Figure 2: Cross section through a thermopile sensor showing all relevant parts

Εικόνα 1. 10 Κατασκευή infrared thermopile, TE Connectivity Ltd

Ο αισθητήρας απαρτίζεται από το thermopile στο κέντρο της κατασκευής το οποίο έχει μπροστά του ένα παράθυρο (Window) το οποίο μπορεί να είναι φίλτρο ή/και φακός και καθορίζει το πεδίο οράσεως ή οπτικό πεδίο (FOV) του φακού [15]. Ο φακός που φέρει το MLX90640ESF-BAB έχει οπτικό πεδίο $55^{\circ} \times 35^{\circ}$ (οριζόντια και κατακόρυφα)

Αντίστοιχα η συνολική δομή του αισθητήρα είναι όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα

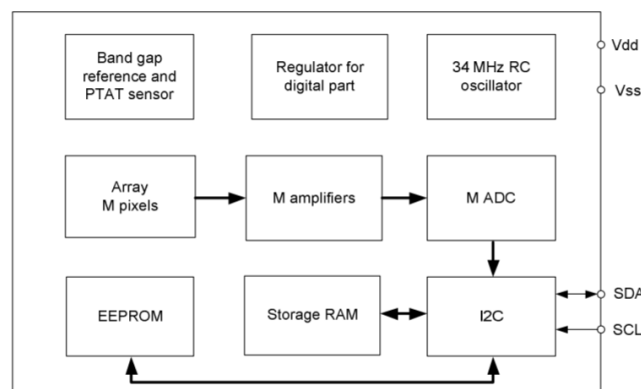


Figure 1 Block diagram

Εικόνα 1. 11 Μπλόκ διαγραμμα δομής του αισθητήρα MLX90640 της melexis

Όπως φαίνεται ο αισθητήρας έχει την συστοιχία από συνολικά 768 θερμοζεύγη (32 γραμμές επί 24 στήλες) το σήμα των οποίων ενισχύεται από M ενισχυτές, η έξοδος των οποίων καταλήγει σε M ADC.

Όπως επίσης φαίνεται ο αισθητήρας έχει επίσης EEPROM η οποία χρησιμεύει για να ξέρουμε τις σταθερές βαθμονόμησης όπως τις παρέχει ο κατασκευαστής έτσι ώστε να μπορέσουμε βάση αλγορίθμου να υπολογίσουμε την θερμοκρασία του αντικειμένου που στοχεύει ο αισθητήρας.

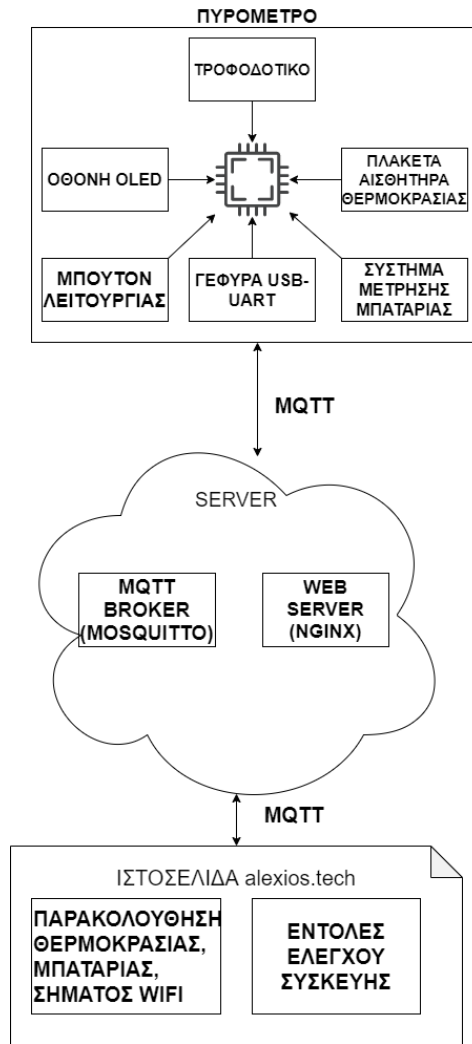
Στο διάγραμμα ακόμα φαίνεται ότι ο αισθητήρας επικοινωνεί με άλλα περιφερειακά όπως ο μικροελεγκτής διαμέσου του πρωτοκόλλου Inter IC (I2C) το οποίο αναπτύχθηκε από την Philips στην δεκαετία του 1980 και χρειάζεται δύο pin για επικοινωνία, το SDA (Serial Data) και το SCL (Serial Clock). Για την δημιουργία του ρολογιού για το I2C χρειαζόμαστε τον ταλαντωτή 34MHz ο οποίος μας επιτρέπει να έχουμε επικοινωνίες συχνότητα ρολογιού I2C από 0.4KHz έως 1MHz το οποίο αντιστοιχεί σε μέγιστη μεταφορά δεδομένων από 100Kbit/s έως 400Kbit/s.

Σαφώς εσωτερικά υπάρχει επίσης ένας σταθεροποιητής τάσης για τα ψηφιακά κυκλώματα αλλά και ένας band gap voltage reference ο οποίος χρησιμοποιείται για το ADC ώστε να παρέχει μεγάλη ακρίβεια τάσης αναφοράς, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας [16]

Ακόμα βλέπουμε πως εμπεριέχει έναν αισθητήρα θερμοκρασίας PTAT (proportional to absolute temperature) ο οποίος βασίζεται στο γεγονός ότι δυο διπολικά στοιχεία τα οποία διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα αλλά έχουν διαφορετική πυκνότητα ρεύματος (A/m^2) έχουν διαφορά τάσης ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία [17] και επομένως αποτελεί κατάλληλος αισθητήρας για την εξαγωγή της θερμοκρασίας του συνολικού πακέτου του αισθητήρα το οποίο αξιοποιείται από τον αλγόριθμο που εξάγει την θερμοκρασία του αντικειμένου που στοχεύει ο αισθητήρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δομή και ανάπτυξη του συστήματος

Οι κύριες απαιτήσεις για την ανάπτυξη του συστήματος ήταν να είναι ένα φορητό πυρόμετρο με ένδειξη της θερμοκρασίας σε μία οθόνη και την μετάδοση των μετρήσεων μέσω διαδικτύου σε άλλες σταθερές ή φορητές συσκευές. Επομένως χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής ESP32 που έχει δυνατότητα σύνδεσης σε WiFi. Το σύστημα τροφοδοτείται με μπαταρία ή με τροφοδοσία USB ανάλογα το τι θα επιλέξει ο χρήστης και οι πληροφορίες του συστήματος είναι προσβάσιμες στο διαδίκτυο μέσω ιστοσελίδας αλλά και μέσα από μία μικρής χαμηλής κατανάλωσης οθόνη OLED. Το μπλοκ διάγραμμα της ολικής δομής του συστήματος απεικονίζεται παρακάτω.

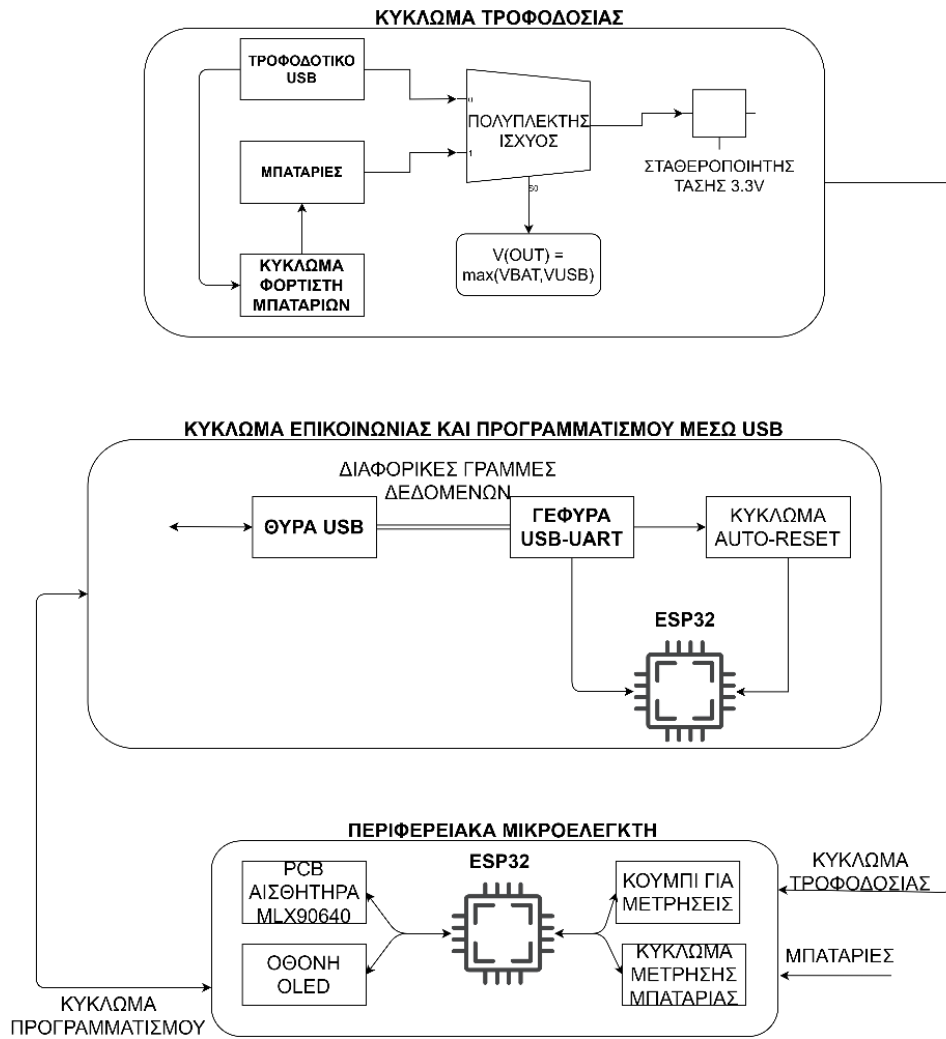


Εικόνα 2. 1 Διάγραμμα ολικού συστήματος

Όπως φαίνεται το «έξυπνο» μετρητικό σύστημα βασίζεται στην μελέτη και κατασκευή της συσκευής που θα μετράει την θερμοκρασία και θα την εμφανίζει σε οθόνη, την ρύθμιση και αξιοποίηση ενός server στον οποίο θα επικοινωνεί η συσκευή μέσω πρωτοκόλλου MQTT, καθώς και την ανάπτυξη μιας ιστοσελίδας στην οποία ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί την θερμοκρασία που καταγράφει το θερμόμετρο αλλά παράλληλα θα μπορεί να ελέγχει την συσκευή στέλνοντας της εντολές όπως η επανεκκίνηση, η μέτρησης τάσης της μπαταρίας και άλλες λειτουργίες που θα αναλυθούν αργότερα. Σε αυτήν την ενότητα θα εστιάσουμε στην ανάπτυξη του κατάλληλου hardware για το πυρόμετρο.

2.1 Βασική δομή hardware του συστήματος

Η δομή του υλικού μέρους του συστήματος έχει όπως φαίνεται στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα



Εικόνα 2. 2 Μπλοκ διάγραμμα της δομής του πυρόμετρου

Το υλικό κομμάτι του συστήματος αναπτύχθηκε ως τρία δομικά κομμάτια σε δύο ξεχωριστές πλακέτες. Η μία κεντρική πλακέτα με όνομα “control board” εμπεριέχει το κύκλωμα τροφοδοσίας του μικροελεγκτή, τον μικροελεγκτή με μερικά περιφερειακά καθώς και το κύκλωμα επικοινωνίας του μικροελεγκτή με τον υπολογιστή.



Εικόνα 5. 1 Η κεντρική πλακέτα "control board" συνδεδεμένη στον υπολογιστή. Απο δίπλα οι μπαταρίες με τον φορτιστή

Η δεύτερη πλακέτα περιέχει τον αισθητήρα ανίχνευσης θερμοκρασίας MLX90640 καθώς και ένα μικρό laser (VCSEL) το οποίο μας επιτρέπει να ανιχνεύουμε την απόσταση από την οποία γίνονται οι μετρήσεις θερμοκρασίας.

2.2 Τροφοδοσία πλακέτας

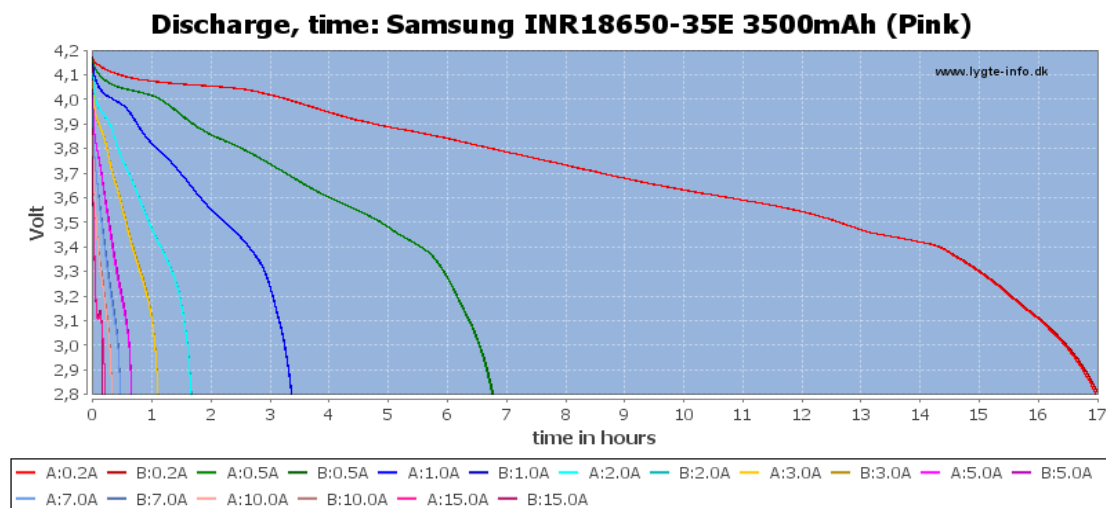
Το πυρόμετρο θα πρέπει να είναι φορητό άρα να τροφοδοτείται από μπαταρίες αλλά ταυτόχρονα να μπορεί να λειτουργεί και σε συνθήκες όπου τροφοδοτείται από την στάνταρ θύρα USB που βρίσκουμε πλέον σε πολλές οικιακές συσκευές η οποία ταυτόχρονα μας επιτρέπει να επικοινωνούμε και με τον υπολογιστή.

Επομένως ήταν αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ένα κύκλωμα το οποίο θα επιλέγει αυτόματα την κατάλληλη πηγή τάσης για να τροφοδοτήσει το σύστημα και θα επιτρέπει παράλληλα στις μπαταρίες να μπορούν να φορτίσουν ενώ η κανονική τάση λειτουργίας του συστήματος είναι τα 3.3V με μέγιστη έως 3.6V. Αρχικά όμως ας αναλύσουμε το κύκλωμα φόρτισης μπαταριών.

2.2.1 Σύστημα φόρτισης μπαταρίας

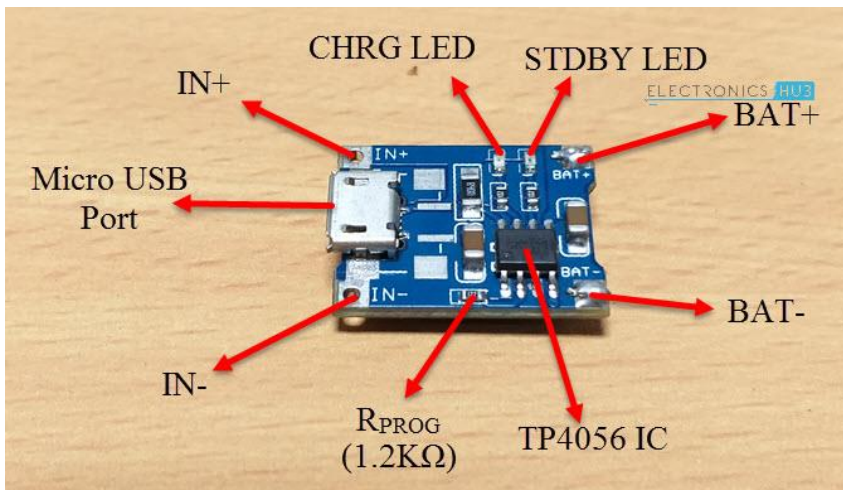
Η μπαταρία που χρησιμοποιείται στο πυρόμετρο είναι η Samsung INR18650-35E, η οποία σύμφωνα με το datasheet [18] αποτελεί μπαταρία ιόντων λιθίου, έχει ονομαστική χωρητικότητα ίση η μεγαλύτερη των 3350mAh για ρεύμα εκφόρτωσης ίσο με 0.2C δηλαδή $3350mAh * 0.2 = 670mA$ το οποίο είναι επαρκές καθώς από πειραματικές μετρήσεις βρέθηκε η σταθερή κατανάλωση του συστήματος να κυμαίνεται από 100 έως 150mA. Η κανονική τάση της μπαταρίας κυμαίνεται από 3.6~3.7V το οποίο είναι ικανοποιητικό καθώς το πυρόμετρο λειτουργεί με 3.3V. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο τέτοιες μπαταρίες, συνδεδεμένες παράλληλα για να παρέχουν μεγαλύτερη διάρκεια φορητής χρήσης του πυρόμετρου.

Όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα η διάρκεια της μπαταρίας είναι βαριά εξαρτώμενη από το ρεύμα εκφόρτωσης της μπαταρίας και επομένως αν θέλουμε την μεγάλη δυνατή διάρκεια θα πρέπει να φροντίσουμε το σύστημα να καταναλώνει το δυνατόν λιγότερο ρεύμα όποτε αυτό είναι δυνατόν.



Εικόνα 2. 3 Όσο περισσότερο ρεύμα καταναλώνουμε τόσο λιγότερο διαρκεί η μπαταρία πριν φτάσει στο τελικό σημείο αποφόρτισης. Το διάγραμμα απεικονίζει τον χρόνο εκφόρτωσης σε σχέση με το καταναλισκόμενο ρεύμα

Για την φόρτιση της μπαταρίας έχει επιλεχθεί ένα module που περιέχει chip TP4056.



Εικόνα 2. 4 Module TP4056 με την δομή του αναλυτικά

Το module έχει ενδεικτικό LED για την φόρτιση του συστήματος (CHRG LED) και ενδεικτικό stand-by led. Δέχεται τροφοδοσία από 4.5~5.5V από τα pad IN+, IN- ενώ υπάρχει δυνατότητα τροφοδοσίας και από την θύρα Micro USB. Ο θετικός ακροδέκτης της συστοιχίας μπαταριών ενώνεται στο BAT+ ενώ ο αρνητικός ακροδέκτης συνδέεται στο BAT-.

Για να επιλέξουμε το ρεύμα φόρτισης συνδέουμε την ανάλογη αντίσταση επιλογής ρεύματος R_{prog} .

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα μια αντίσταση 1.2kΩ έχει ως αποτέλεσμα η μπαταρία να φορτίζεται με μέγιστο ρεύμα ως και 1000mA και επομένως έχουμε γρηγορότερη φόρτιση αλλά και μεγαλύτερη θέρμανση του TP4056 λόγω απωλειών ισχύος.

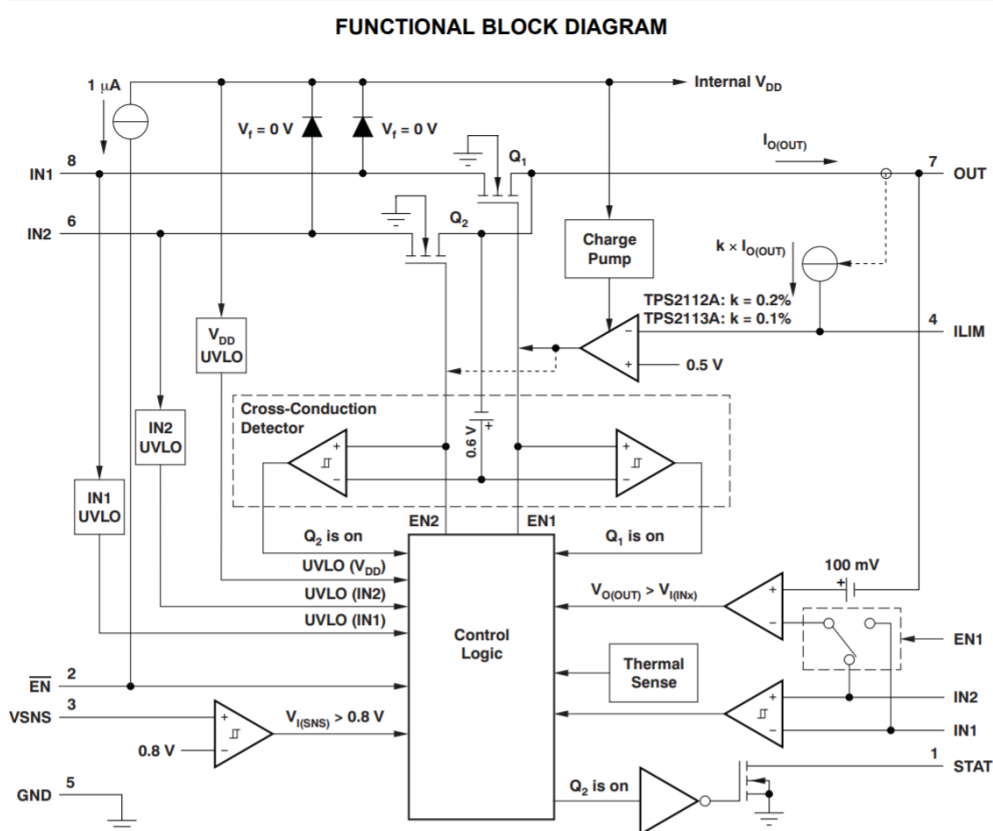
Εικόνα 2. 5 Ρεύμα φόρτισης μπαταριών συναρτήση της αντίστασης προγραμματισμού

R TOTAL VALUE in KΩ	CHARGING CURRENT in mA
6.2	200
5	250
4	300
3	400
2	580
1.5	780
1.3	900
1.2	1000

Επομένως για να φορτίσει μια μπαταρία INR18650 ως τα 4.2V θα χρειαστεί κατ' ελάχιστο $t_{charge} = 1.75h$ όπως αναφέρει το data sheet [19] διότι μέχρι την τάση των 4V φορτίζεται από σταθερό ρεύμα 1000mA και έπειτα μέχρι τα 4.2V με αυξανόμενο ρεύμα έως 1200mA. Επομένως η συστοιχία δύο μπαταριών χρειάζεται περίπου 3.5 με 4 ώρες για να φορτιστεί πλήρως.

2.2.2 Πολυπλέκτης ισχύος και ρυθμιστής τάσης

Η επιλογή της πηγής τροφοδοσίας της πλακέτας γίνεται αυτόματα με την χρήση ενός πολυπλέκτη ισχύος. Ο πολυπλέκτης είναι μια λογική πύλη που μας επιτρέπει να της συνδέσουμε δύο ή παραπάνω εισόδους και να επιλέξουμε ποια είσοδος θα αποτελέσει έξοδο της συσκευής. Στην κεντρική πλακέτα χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο TPS2113APWR το οποίο έχει την δυνατότητα να παρέχει ρεύμα εξόδου έως $I_{MUX} = 1.25A$ υπό κανονικές συνθήκες. Παρακάτω απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα του πολυπλέκτη.

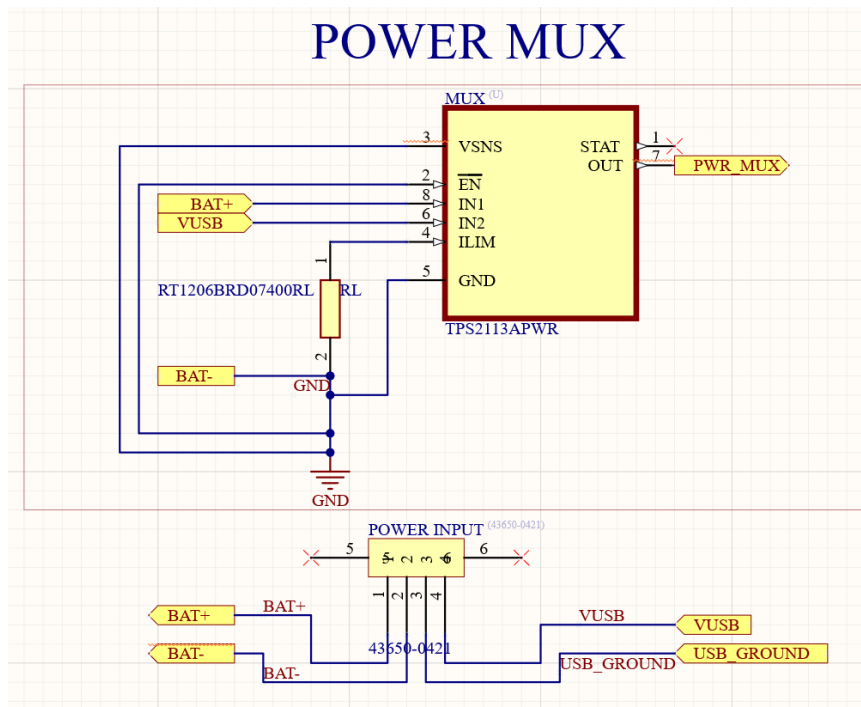


Εικόνα 2. 6 Λειτουργικό διάγραμμα του TPS2113

Οι εισοδοί του ολοκληρωμένου οδηγούνται όπως φαίνεται σε n-channel mosfet ισχύος τα οποία έχουν μέγιστο $rds_{on} = 110m\Omega$. Γνωρίζοντας το rds_{on} μπορούμε να εξάγουμε ότι η ενέργεια που χάνεται πάνω στο ολοκληρωμένο.

Στην χειρότερη περίπτωση όπου κύκλωμα καταναλώνει $I_L = 200mA$ η απώλεια ισχύος θα είναι $P_{mux_{dis}} = I_L^2 * rds_{on} = 0.2^2 * 110e - 3 = 4.4mW$ το οποίο είναι αμελητέο καθώς ο πολυπλέκτης μπορεί να «αντέξει» μέχρι και 155mW στους 85C σύμφωνα με το datasheet [20].

Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε στην πλακέτα είναι το παρακάτω και όπως φαίνεται στις εισόδους IN1 και IN2 συνδέονται η μπαταρία και το USB αντίστοιχα ενώ στην είσοδο ILIM συνδέεται μια αντίσταση RL της οποίας η τιμή εξαρτάται από τον περιορισμό ρεύματος που θέλουμε να έχουμε στην έξοδο του TPS. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μια αντίσταση 400Ω που μας οδηγεί σε περιορισμό ρεύματος $I_{LIM} = \frac{500}{RL} = \frac{500}{400} = 1.25A$. Η αντίσταση των 400Ω θα πρέπει να είναι κατάλληλη για ισχύ ίση με



Εικόνα 2. 7 Κύκλωμα του μίκτη ισχύος. Απο κάτω φαίνεται ο κονέκτορας στον οποίο συνδέεται ο φορτιστής της μπαταρίας και η έξοδος τάσης της μπαταρίας

Βλέπουμε ακόμα ότι τα pin EN και VSNS είναι συνδεδεμένα στην γείωση ενώ το pin STAT δεν έχει συνδεθεί πουθενά.

Το pin EN αποτελεί λογική είσοδο για το εσωτερικό κύκλωμα ελέγχου του ολοκληρωμένου και όταν συνδεθεί στην γείωση ενεργοποιείται το ολοκληρωμένο, ειδάλλως αν είναι σε κάποια υψηλή τάση, ο πολυπλέκτης παραμένει ανενεργός.

Συγκεκριμένα η λογική του πολυπλέκτη φαίνεται στον παρακάτω πίνακα αλήθειας

Εικόνα 2. 8 Πίνακας αλήθειας του πολυπλέκτη

DEVICE INFORMATION

TRUTH TABLE

EN	$V_{I(VSNS)} > 0.8 V^{(1)}$	$V_{I(IN2)} > V_{I(IN1)}$	STAT	OUT ⁽²⁾
0	Yes	X	0	IN1
0	No	No	0	IN1
0	No	Yes	Hi-Z	IN2
1	X	X	0	Hi-Z

(1) X = Don't care.

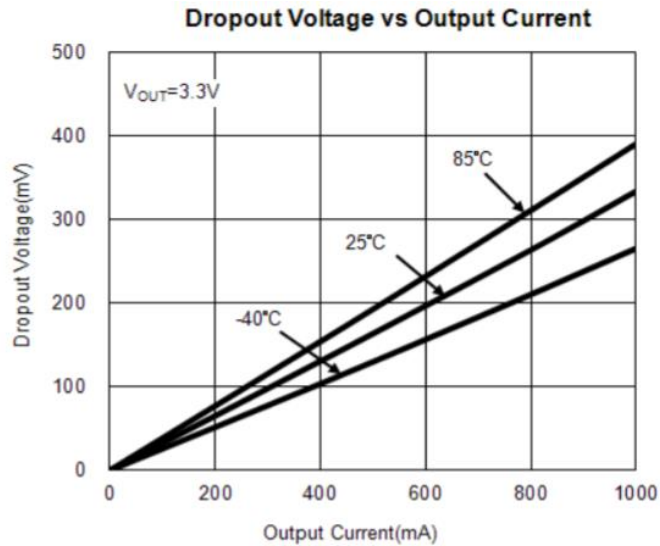
(2) The undervoltage lockout circuit causes the output (OUT) to go Hi-Z if the selected power supply does not exceed the IN1/IN2 UVLO, or if neither of the supplies exceeds the internal V_{DD} UVLO.

Η περίπτωση που ακολουθεί το υλοποιημένο κύκλωμα είναι η δεύτερη ή τρίτη. Δηλαδή εφόσον το VSNS είναι γειωμένο, η έξοδος του ολοκληρωμένου θα είναι η μεγαλύτερη μεταξύ των δύο εισόδων.

Αφότου γίνει η επιλογή της πηγής τάσεως η οποία μπορεί να έχει τιμή οπουδήποτε από 3.6 έως 5V θα πρέπει να την ρυθμίσουμε για να την φέρουμε στα επιθυμητά επίπεδα.

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιούμε καθώς και τα περισσότερα περιφερειακά εξαρτήματα απαιτούν μια σταθερή τάση τροφοδοσίας στα 3.3V. Δεδομένου ότι η τάση της συστοιχίας μπαταριών κατά την φόρτιση και την εκφόρτωση αλλάζει συναρτήσει του ρεύματος φόρτισης / εκφόρτωση και της χωρητικότητας της συστοιχίας, είναι αδύνατο να τροφοδοτήσουμε το σύστημα άμεσα από την μπαταρία διαμέσου κάποιου απλού παθητικού κυκλώματος. Επομένως πρέπει να επιλέξουμε κάποιον σταθεροποιητή τάσης στα 3.3V ο οποίος θα είναι κατάλληλος να τροφοδοτήσει τον μικροελεγκτή και τα περιφερειακά καθώς ο μικροελεγκτής ανάλογα το αν μεταδίδει δεδομένα ή όχι αλλάζει απότομα την κατανάλωση ρεύματος του το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε ξαφνική πτώση τάσης και έπειτα απότομη επάνοδο και επομένως δημιουργεί αναπάντεχες συμπεριφορές του κυκλώματος.

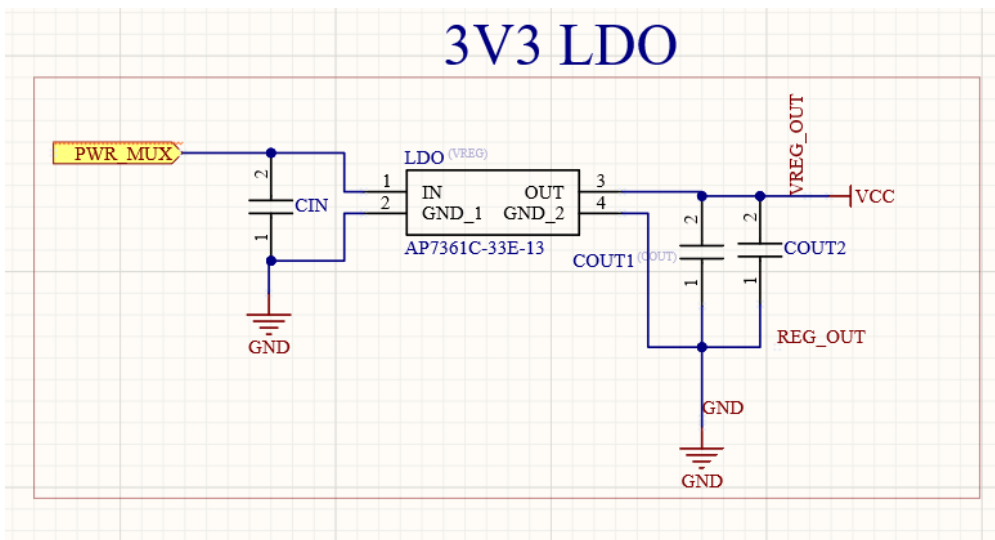
Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψιν είναι χρήσιμος ένας γραμμικός ρυθμιστής τάσης κατάλληλος για τροφοδοσία από χαμηλές τάσεις όπως αυτές της μπαταρίας. Άρα είναι αναγκαία η χαμηλή πτώση τάσης όταν έχουμε το μέγιστο φορτίο στην έξοδο του και γρήγορη απόκριση στις αλλαγές του ρεύματος. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε ο AP7361C του οποίου η πτώση τάσης συναρτήσει του ρεύματος εξόδου είναι όπως φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 2. 9 Πτώση τάσης εξόδου συναρτήση του ρεύματος εξόδου του AP7316C

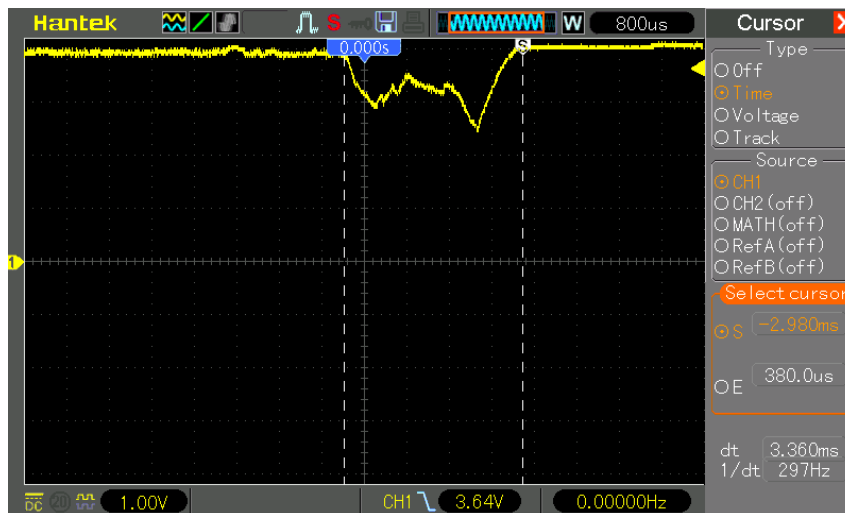
Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι για μέγιστο φορτίο 1A και τάση εξόδου 3.3V η μέγιστη πτώση τάσης θα είναι περίπου 400mV [21]. Στην περίπτωση του κυκλώματος μας το αναμενόμενο μέγιστο καταναλισκόμενο ρεύμα εκτιμάται πως κυμαίνεται κοντά στα 150-200mA επομένως η μέγιστη αναμενόμενη πτώση τάσης ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 85C θα είναι λιγότερη 100mV. Αυτό σημαίνει ότι το πυρόμετρο μπορεί να λειτουργεί κανονικά ακόμα και όταν οι μπαταρίες φτάσουν να έχουν τάση ~3.4V

Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα για το AP7361C είναι όπως φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 2. 10 Κύκλωμα ρυθμιστή τάσης στα 3.3V

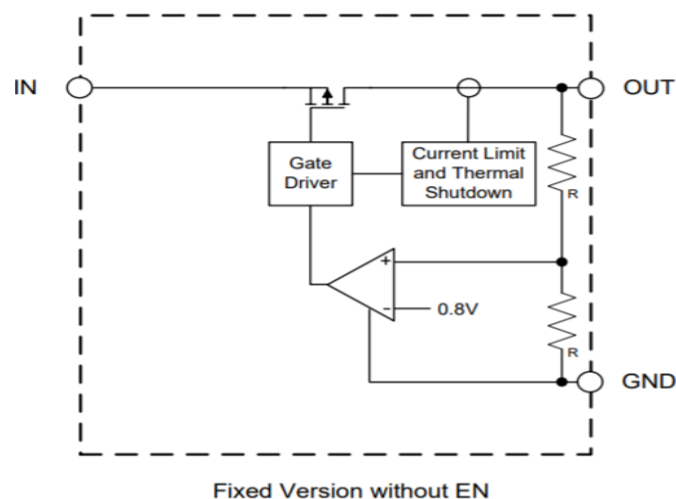
Όπου CIN είναι ο “hold-up” πυκνωτής που φροντίζει παρέχει πολύ ενέργεια σε σύντομο χρονικό διάστημα χωρίς να έχουμε ξαφνικές πτώσεις τάσης μικρής διάρκειας όπως αυτή που καταγράφηκε στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2. 11 Ξαφνική πτώση τάσης στα 2.4V για διάρκεια 3.4ms στην τροφοδοσία του ESP. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται brownout

Η τιμή του είναι 470µF και COUT1= 4,7µF παράλληλα με 100nF για να πετύχουμε μικρότερο ESR και να έχουμε γρηγορότερη απόκριση σε αλλαγές του ρεύματος εξόδου και καλύτερη σταθερότητα της τάσης εξόδου. Όπως φαίνεται η μπαταρία συνδέεται διαμέσου ακροδεκτών στην είσοδο του σταθεροποιητή καθώς και στην κοινή γείωση.

Η εσωτερική δομή του σταθεροποιητή είναι η παρακάτω



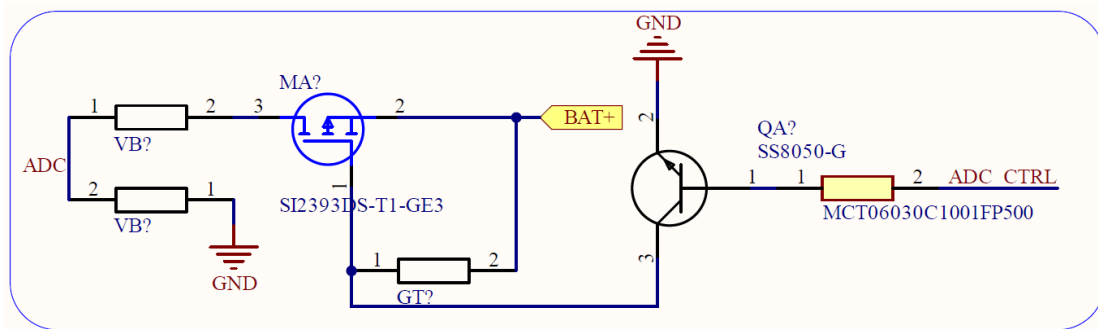
Εικόνα 2. 12 Λειτουργικό διάγραμμα του AP7361C

Όπου γίνεται εμφανές ότι υπάρχει προστασία από υπερθέρμανση όπως και περιορισμός ρεύματος.

2.3 Κύκλωμα μέτρησης μπαταρίας

Για να μετρηθεί η τάση μπαταρίας, δεδομένου ότι το σύστημα είναι φορητό, χρησιμοποιείται ο μετατροπέας A-D του ESP32 και ένα κύκλωμα μέτρησης το οποίο υποβιβάζει την τάση διότι το ADC

δεν αντέχει τάση παραπάνω από $V_{CC}+0.2V$ οπότε το V_{CC} είναι η τάση τροφοδοσίας $3.3V$. Το κύκλωμα μέτρησης της μπαταρίας είναι ένας διαιρέτης τάσης με αντιστάσεις ακριβείας $10K\Omega$, έναν πυκνωτή $0.1\mu F$ ο οποίος συνδέεται δίπλα στο A-D και χρησιμοποιείται για να αποζεύξει τους θορύβους και ένας διακόπτης με MOSFET καναλιού P όπως φαίνεται στην παρακάτω διάταξη



Εικόνα 2. 13 Κύκλωμα "ενεργού" διαιρέτη τάσης

Το MOSFET που συμβολίζεται ως MA έχει $V_{gs(th)} = -2.2V$ και παραμένει σε κατάσταση "off" καθώς συνδέεται μεταξύ Gate-Source μια αντίσταση (GT) των $10K\Omega$ η οποία είναι συνδεδεμένη και στον θετικό πόλο της μπαταρίας. Αν θέλουμε να ενεργοποιήσουμε το κύκλωμα τότε στέλνουμε ένα λογικό 1 ($3.3V$) από το pin ADC_CTRL του ESP και αυτό με την σειρά του κάνει το QA τρανζίστορ να άγει διότι το $V_{BE} > 0.7V$ που απαιτούνται για να ενεργοποιηθεί το transistor και το μέγιστο ρεύμα που άγει είναι $I_C = I_B * h_{FE}$ όπου του $h_{FE} = 200$ [22] και $I_B = \frac{3.3V}{1K\Omega} = 3.3mA$ επομένως $I_C = 660mA$. Τα MOSFET λόγω κατασκευής δεν χρειάζονται ρεύμα για να άγουν εκτός από την μεταβατική κατάσταση στην οποία χρειάζονται στιγμιαία αρκετό ρεύμα. Η τάση V_{gs} του MOSFET θα είναι $V_{gs} \cong -(V_{bat} - V_{CE(sat)}) \cong -4.1V$ το οποίο είναι μεγαλύτερο της τάσης κατωφλιού για να θέσουμε το MOSFET σε κατάσταση αγωγής. Φυσικά το MOSFET έχει μια ελάχιστη πτώση ίση με $V_{drop} = r_{DS(ON)} * I_{divider} = 0.19 * V_{bat}/20K\Omega$. Ξέρουμε ότι ιδανικά χωρίς το MOSFET η έξοδος του διαιρέτη τάσης θα ήταν $V_{divider} = \frac{V_{bat}}{2}$. Με το MOSFET ο διαιρέτης τάσης θα έχει έξοδο $V_{divider(controlled)} = \frac{V_{bat}}{2} - 0.19 * \frac{V_{bat}}{20K\Omega} = 0.4999905V_{bat}$. Άρα το σφάλμα λόγω της αντίστασης του MOSFET θα είναι $\frac{V_{divider} - V_{divider(controlled)}}{V_{divider}} * 100 = 0.0019\%$ το οποίο σαφώς είναι αμελητέο. Η διαφορά κατανάλωσης μεταξύ παθητικού και ενεργού διαιρέτη τάσης είναι περίπου 97% και αυτός είναι ο λόγος που υλοποιήθηκε το κύκλωμα, καθώς τα μόνα ρεύματα που καταναλώνονται όταν οι διακόπτες του ενεργού διαιρέτη τάσης είναι κλειστοί είναι τα ρεύματα διαρροής τα οποία σαφώς είναι συνολικά περίπου της τάξης των $200nA$ [22] [23].

Προκειμένου να διαβαστούν αξιόπιστα τα δεδομένα της τάσης της μπαταρίας χωρίς να επηρεάζονται από ξαφνικούς θορύβους ο μικροελεγκτής εφαρμόζει το φίλτρο του μέσου όπου διαβάζει επτά φορές την τάση της μπαταρίας σε σύντομο χρονικό διάστημα και ταξινομεί τα δεδομένα σε έναν πίνακα

από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο. Έπειτα διαλέγει την μεσαία τιμή του πίνακα (ώστε να αποφύγουμε ακραία μεγάλες τιμές που προξενούν ορισμένες φορές οι περιβαλλοντικοί θόρυβοι) και στην συνέχεια την αθροίζει με την αμέσως επόμενη τιμή και την αμέσως προηγούμενη τιμή του πίνακα και εξάγει τον μέσο όρο της τάσης της μπαταρίας όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Ελάχιστο	Τιμή 2	Τιμή 3	Τιμή 4	Τιμή 5	Τιμή 6	Μέγιστο
----------	--------	--------	--------	--------	--------	---------

Ο κώδικας παρουσιάζεται στο παράρτημα 2.

2.4 Επικοινωνία USB και προγραμματισμός μικροελεγκτή

Προκειμένου να προγραμματίσουμε το ESP32 θα πρέπει να συνδεθούμε σε αυτό μέσω σειριακών επικοινωνιών όπως το USB που υποστηρίζει κάθε υπολογιστής.

Σε αντίθεση με ορισμένους μικροελεγκτές το ESP32 δεν έχει την δυνατότητα να διαχειριστεί άμεσα το πρωτόκολλο USB αλλά υποστηρίζει επικοινωνίες μέσω UART όπως φαίνεται στο λειτουργικό του διάγραμμα.

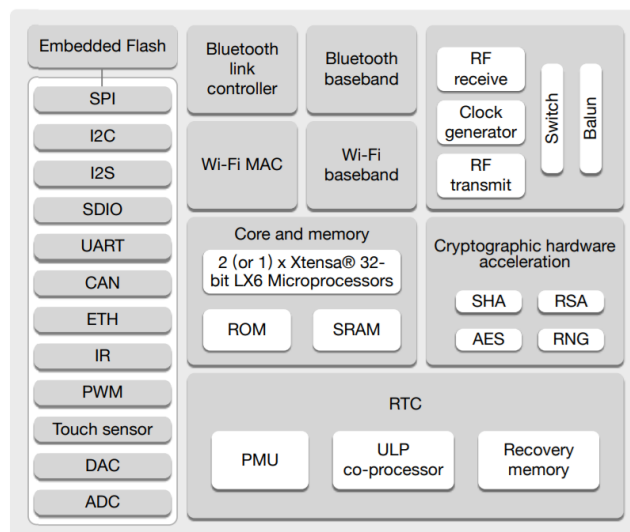
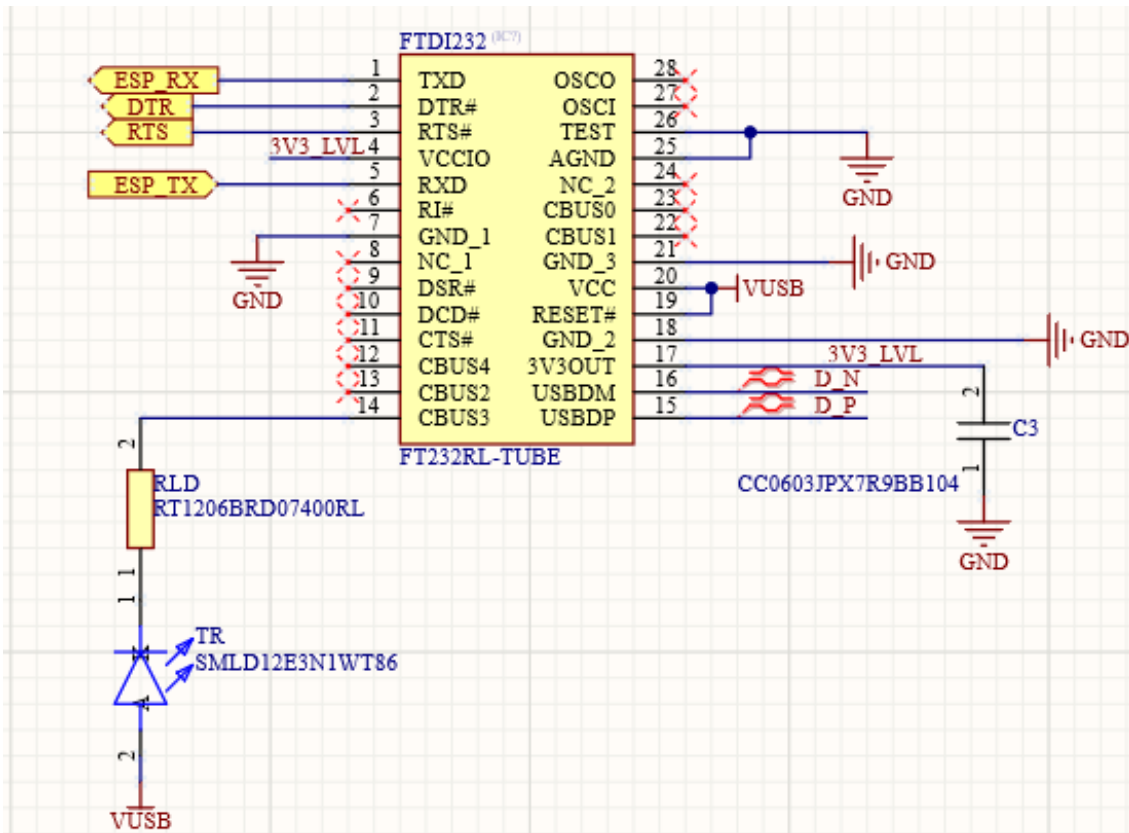


Figure 1: Functional Block Diagram

Εικόνα 2. 14 Δομή του μικροελεγκτή ESP32

Επομένως χρειαζόμαστε μία συσκευή γνωστή και ως «γέφυρα» η οποία θα μεταφράσει τα μηνύματα που λαμβάνει από το πρωτόκολλο USB σε UART. Για την λειτουργία αυτή επιλέχθηκε το

ολοκληρωμένο FT232R το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία με το ESP αλλά και τον προγραμματισμό του. Το ολοκληρωμένο χρησιμοποιήθηκε στο πυρόμετρο όπως φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 2. 15 Κύκλωμα γέφυρας FTDI232

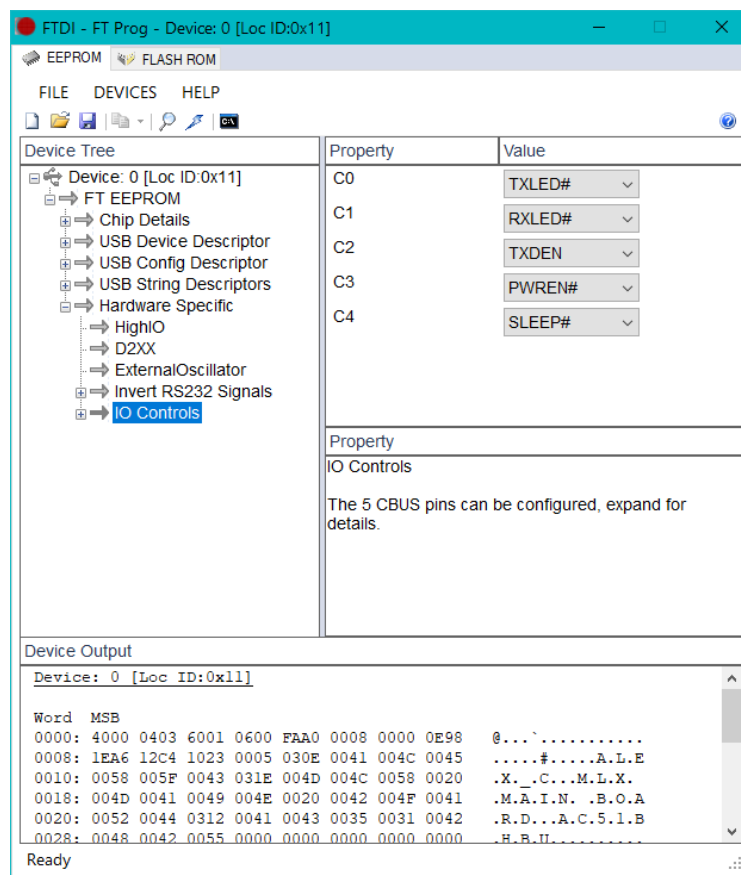
Το πρωτόκολλο USB αποστέλλει δεδομένα με την χρήση ενός διαφορικού ζευγαριού τα οποία συνδέονται στο FTDI στις θύρες USBDM και USBDP οι οποίες δέχονται τα σήματα DATA+ και DATA- αντίστοιχα. Με την σειρά της η γέφυρα αποθηκεύει προσωρινά τα δεδομένα σε buffer και έπειτα τα αποστέλλει στο ESP σειριακά από την θύρα TXD που συνδέεται στην θύρα RX του ESP και από την θύρα RXD στην θύρα TX του ESP. Η θύρες RX είναι για την λήψη δεδομένων ενώ η θύρες TX είναι για την αποστολή δεδομένων. Η ταχύτητα αυτών των θυρών δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη καθώς δεν έχει σχεδιαστεί για την αποστολή μεγάλου όγκου δεδομένων σε μικρό χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα ο ρυθμός με τον οποίο αποστέλουμε συμβολα (baud rate) στην συγκεκριμένη κατασκευή είναι 115200 το οποίο μέσα από δοκιμές φάνηκε να παρουσιάζει τα λιγότερα λάθος bit ενώ έχει επαρκώς υψηλή ταχύτητα.

Το FTDI εσωτερικά περιέχει δικό του ρυθμιστή τάσης στα 3.3V ο οποίος μπορεί να παρέχει ρεύμα μέχρι και 50mA [24] σε εξωτερικά λογικά κυκλώματα από το pin 3V3OUT και στο σχηματικό μας αξιοποιείται για να παρέχει τάση στο VCCIO. TVCCIO με την σειρά του καθορίζει την τάση των λογικών εξόδων. Συγκεκριμένα το λογικό 1 θα έχει τάση κοντά στα 3.3V ενώ το 0 θα κυμαίνεται κοντά στα 0V.

Τα CBUS ή Control Bus είναι προγραμματιζόμενα pin τα οποία μπορούν να έχουν οποιαδήποτε από τις παρακάτω λειτουργίες.

1. **TXDEN** - transmit enable for RS485 designs.
2. **PWREN#** - Power control for high power, bus powered designs.
3. **TXLED#** - for pulsing an LED upon transmission of data.
4. **RXLED#** - for pulsing an LED upon receiving data.
5. **TX&RXLED#** - which will pulse an LED upon transmission OR reception of data.
6. **SLEEP#** - indicates that the device going into USB suspend mode.
7. **CLK48 / CLK24 / CLK12 / CLK6** - 48MHz, 24MHz, 12MHz, and 6MHz clock output signal options.
8. **BitBangWRn / BitBangRDn** - Synchronous and asynchronous bit bang mode WR# / RD# strobe outputs

Η ρύθμιση τους γίνεται μέσα από τον προγραμματισμό μιας μικρής EEPROM που περιέχει το FTDI. Οι εργοστασιακές ρυθμίσεις που φαίνονται στην παρακάτω στιγμιότυπο οθόνης

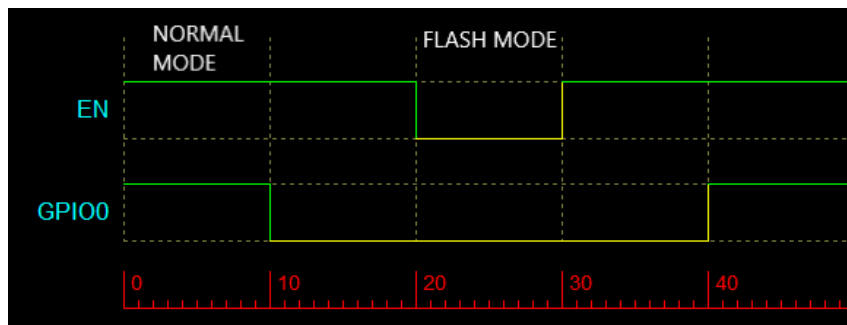


Εικόνα 2. 16 Πρόγραμμα “FT Prog” για τον προγραμματισμό του FTDI

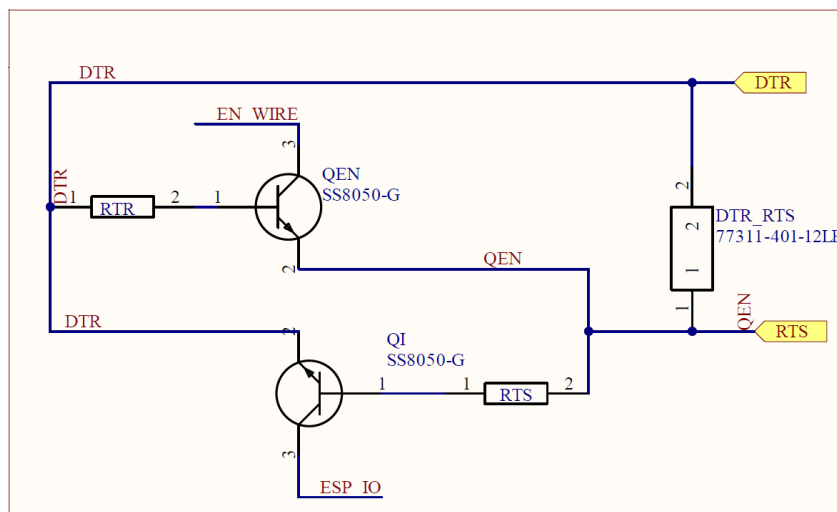
μας επιτρέπουν να συνδέσουμε ένα led στο pin CBUS 3 για να ξέρουμε αν το FTDI είναι καλά συνδεδεμένο στον υπολογιστή για να μπορέσουμε να πάρουμε και να αποστείλουμε δεδομένα στο ESP.

Για να προγραμματίσουμε το ESP χρειάζεται να συνδεθούμε στην μνήμη ROM μέσω υπολογιστή, αλλά πρώτα θα πρέπει να θέσουμε το ESP σε κατάσταση αναμονής για προγραμματισμό και έπειτα να προγραμματίσουμε την μνήμη του μικροελεγκτή. Σε αυτό χρησιμεύουν τα pin EN(Enable) και GPIO0.

Για να θέσουμε το ESP σε κατάσταση προγραμματισμού πρέπει να έχουμε την παρακάτω ακολουθία στα προαναφερθέντα pin.



Εικόνα 2. 17 Ακολουθία για προγραμματισμό του ESP32. Η κλίμακα χρόνου είναι απλά για αναφορά. Επομένως αξιοποιούμε το παρακάτω κύκλωμα αυτόματου reset και προγραμματισμού παρόμοιο με αυτό που προτείνει και η espressif



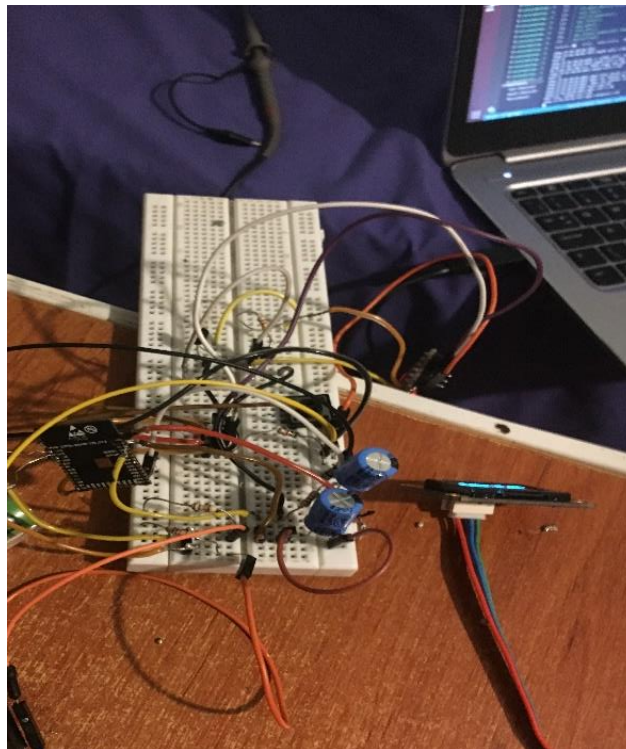
Εικόνα 2. 18 Κύκλωμα auto-reset του esp

το οποίο δέχεται στην βάση των transistor τα σήματα RTS (Request to Send) και το DTR (Data Terminal Ready) που αποτελούν σήματα ελέγχου περιγραφόμενα στο πρωτόκολλο RS-232 [25] καθώς και το UART. Η ανάλυση του κυκλώματος έχει ως εξής:

Αν το DTR είναι 3.3V (λογικό 1) και το RTS 0V τότε το QEN έχει $V_{BE} > 0.7V$ οπότε το QEN πάει στον κόρο και άγει ενώ το QI παραμένει σε αποκοπή. Αντίστοιχα όταν το RTS είναι 3.3V και το DTR είναι 0V το QI πάει στον κόρο και το QEN παραμένει σε αποκοπή. Τέλος αν τα σήματα DTR και RTS είναι ταυτόχρονα στην ίδια κατάσταση κανένα από τα δυο τρανζίστορ δεν άγει.

Ο πίνακας που περιγράφει την λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής

RTS	DTR	EN	GPIO0
1	1	1	1
0	0	1	1
0	1	0	1
1	0	1	0

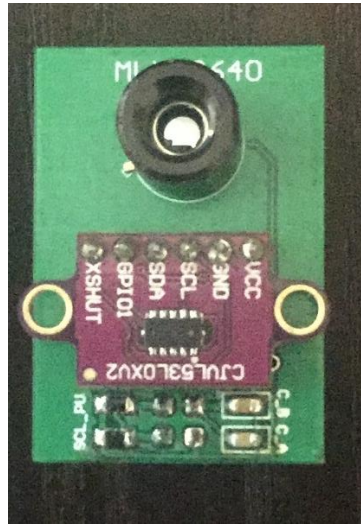


Εικόνα 2. 19 Δοκιμή του πρωτότυπου κυκλώματος προγραμματισμού

2.5 Πλακέτα ανίχνευσης Θερμοκρασίας

Η πλακέτα που αναπτύχθηκε φέρει πάνω της τον αισθητήρα MLX90640 καθώς και αντιστάσεις SDA_PU και SCL_PU με τιμή 2.2kΩ και δυο πυκνωτές αποσύζευξης C_B και C_A με τιμές 1μF και 1nF αντίστοιχα. Παράλληλα συνδέεται ένας αισθητήρας Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) το οποίο λειτουργεί ως laser συνδεδεμένο παράλληλα με ένα Single Photon Avalanche Diode (SPAD) το οποίο λαμβάνει τους παλμούς. Το VCSEL στέλνει παλμούς για 20ms και έπειτα γνωστοποιεί στον

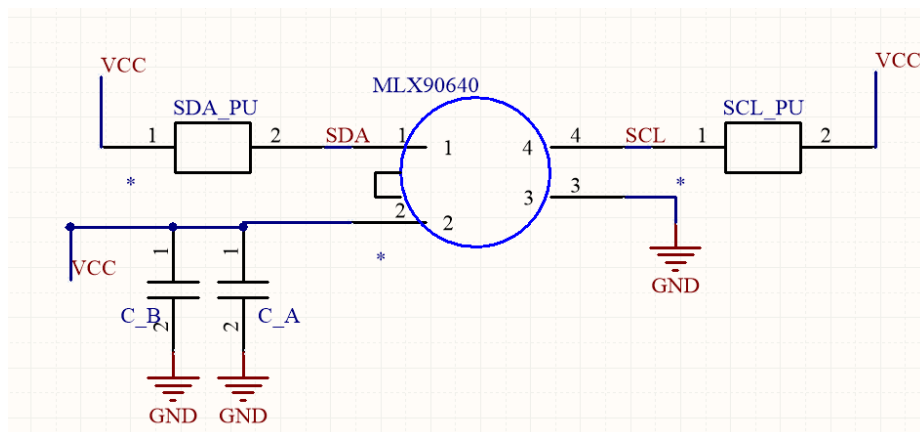
μικροελεγκτή την μέση απόσταση. Επομένως μας επιτρέπει να ανιχνεύσουμε την απόσταση του αντικειμένου του οποίου μετράμε την θερμοκρασία.



Εικόνα 2. 20 Πλακέτα με τον αισθητήρα MLX90640 με το VCSEL VL53L0X

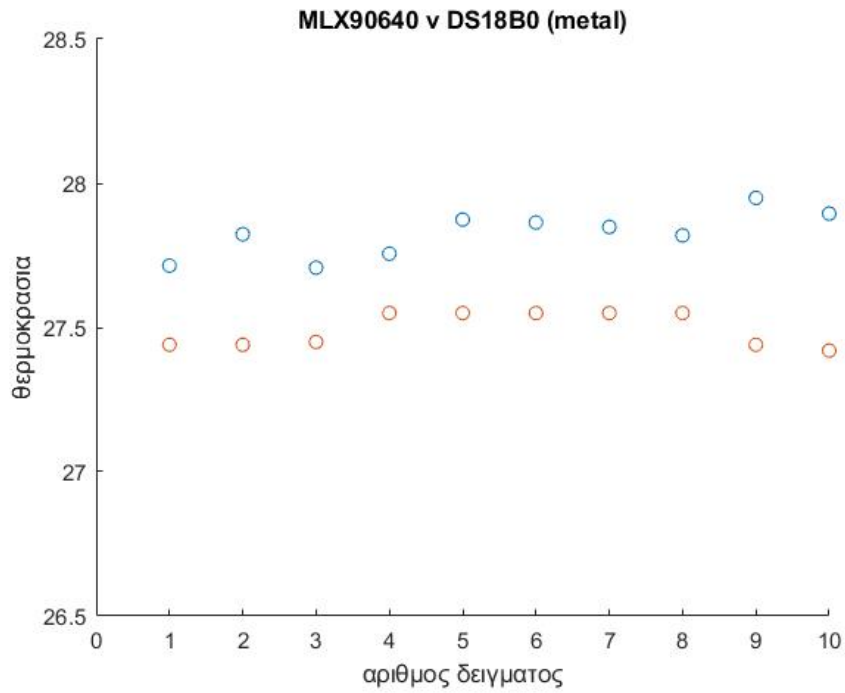
Οι αντιστάσεις pull-up είναι αναγκαίες για την επικοινωνία διαμέσου του πρωτοκόλλου I2C διότι οι πόρτες SCL, SDA αποτελούνται δομικά από FET ή BJT ανοιχτής διαρροής (ή ανοιχτού συλλέκτη αντίστοιχα) [26] που σημαίνει πως οδηγούν τις γραμμές I2C προς την γείωση για να έχουμε εναλλαγές μεταξύ των λογικών καταστάσεων 0 με το λογικό 1. Συνεπώς είναι αναγκαίο οι γραμμές SCL και SDA να παραμένουν σε υψηλό δυναμικό διαμέσου αντιστάσεων pull-up.

Το κύκλωμα της πλακέτας έχει όπως φαίνεται παρακάτω στο σχηματικό

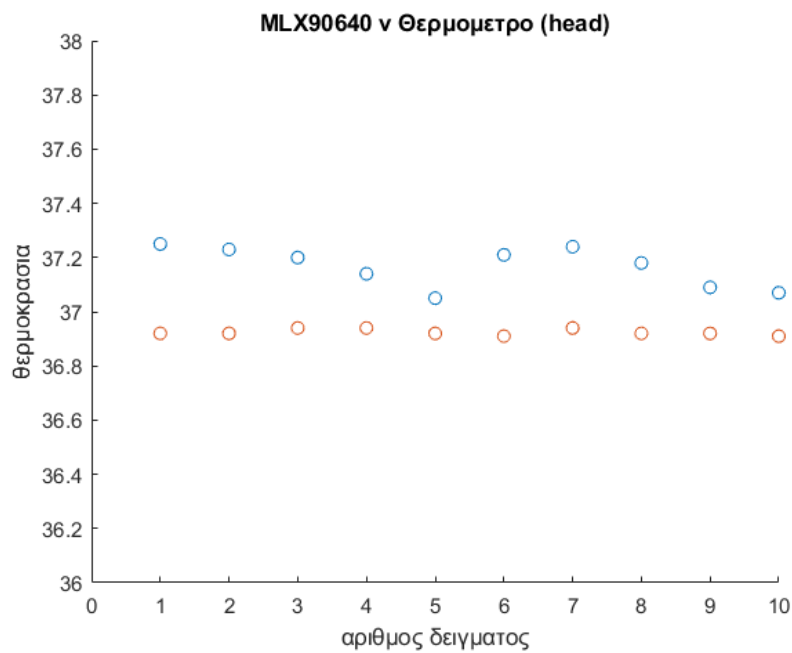


Εικόνα 2. 21 Ηλεκτρονικό κύκλωμα της πλακέτας ανίχνευσης θερμοκρασίας. Δεν εικονίζεται το VCSEL

Πειραματικά βρέθηκαν οι παρακάτω αποκλίσεις θερμοκρασιών συναρτήσει της απόστασης του στόχου περίπου στα 100mm .



Εικόνα 2. 22 Μπλε είναι οι μετρήσεις του MLX και κόκκινες οι μετρήσεις του DS18B20 ως αισθητήρας αναφοράς



Εικόνα 2. 23 Με μπλε είναι οι μετρήσεις του MLX και κόκκινες είναι οι μετρήσεις του θερμόμετρου.

Όπως φαίνεται ανάλογα την απόσταση, το είδος της επιφάνειας, την θερμική ομοιομορφία της επιφάνειας και τον συντελεστή εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας ε όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 1.2, οι θερμοκρασίες έχουν τις ανάλογες αποκλίσεις. Δεδομένης και της ικανότητας του αισθητήρα να μετράει θερμοκρασίες μέχρι και 350C είναι κατάλληλος για ενδεικτικές θερμοκρασίες μετάλλων όπως αυτών πάνω σε κινητήρες, HVAC, ή για ενδεικτικές μετρήσεις της θερμοκρασίας του σώματος από το μέτωπο με σχετική ακρίβεια συνήθως έως 0.3C. Οι μετρήσεις έχουν μια κατανομή σαν σίγμα καθώς ο αισθητήρας είναι αρκετά ευαίσθητος στις κινήσεις και την σε θόρυβο από το περιβάλλον, καθώς και στις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας (θερμοκρασιακό σοκ), το οποίο σημαίνει πως συνεχώς ο αισθητήρας πρέπει εσωτερικά να καλιμπράρεται.

Για να εξαχθούν οι παραπάνω μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο κατανομής Gauss καθώς ο αισθητήρας είναι επιρρεπής σε θερμικό θόρυβο ή γνωστό και ως λευκό θόρυβο. Το φίλτρο λαμβάνει επτά θερμικές μετρήσεις του ίδιου σημείου τις οποίες αποθηκεύει σε έναν πίνακα. Έπειτα ταξινομεί τον πίνακα από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο και εξάγει τον μέσο όρο μ των θερμοκρασιών του πίνακα. Αφότου εξάγουμε τον μέσο όρο υπολογίζουμε την στάνταρ απόκλιση σ που έχουν οι τιμές μεταξύ τους. Έπειτα υπολογίζουμε τον μέσο όρο της θερμοκρασίας αξιοποιώντας κάθε στοιχείο i του πίνακα μεγέθους n βάση της παρακάτω διαδικασίας. $M.O = \sum_{i=1}^{n-1} temp_i \forall temp_i \in (-2\sigma < temp_i < 2\sigma)$ και έπειτα διαιρούμε το άθροισμα με τον αριθμό των στοιχείων που ανήκουν στα όρια όπως περιεγράφηκαν παραπάνω. Στατιστικά μέσα στα όρια των 2σ θα ανήκουν περίπου το 95% των τιμών του πίνακα και επομένως το φίλτρο που χρησιμοποιούμε θα αξιοποιήσει τις περισσότερες τιμές αλλά θα αποκλείσει τις ακραίες τιμές οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε ξαφνικούς απότομους θορύβους με τους οποίους έγινε συνέλιξη το αρχικό σήμα. Ο κώδικας του φίλτρου υπάρχει στο παράρτημα 3.

2.6 Οθόνη OLED

Η οθόνη που απεικονίζει τα δεδομένα πρέπει να είναι χαμηλής κατανάλωσης διότι η συσκευή λειτουργεί με μπαταρίες και θα πρέπει να γίνει το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Επομένως επιλέχθηκε μια μπλε χρώματος οθόνη OLED με ανάλυση 128x64 με διάμετρο μιας ίντσας

Στη οθόνη εμφανίζεται η απόσταση του αισθητήρα από τον σώμα που στοχεύει με την ένδειξη D και από δίπλα μία ένδειξη που μπορεί να είναι CLOSE,FAR,OK οι οποίες ενημερώνουν τον χρήστη αν η απόσταση από τον στόχο είναι καλή ή όχι. Επίσης εμφανίζει την θερμοκρασία που καταγράφει ο αισθητήρας καθώς και η τάση της μπαταρίας εφόσον αυτή είναι συνδεδεμένη. Σε περίπτωση που δεν είναι συνδεδεμένη, όπου συνδεδεμένη θεωρείται όταν μετράμε τάση άνω των 2V, θα εμφανιστεί το

μήνυμα NC που σημαίνει Not Connected, δηλαδή η μπαταρία είναι ασύνδετη. Σε περίπτωση που η σύνδεση στο διαδίκτυο δεν είναι εφικτή είτε επειδή ο χρήστης δεν έχει ορίσει τα στοιχεία του δικτύου WiFi είτε επειδή είμαστε πολύ μακριά από το ρούτερ εμφανίζεται πάνω δεξιά στην οθόνη μια κουκίδα όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία, η οποία αναβοσβήνει για την διάρκεια που δεν υπάρχει σύνδεση στο διαδίκτυο.



Εικόνα 2. 24 Οθόνη oled που μας δείχνει ότι ο στόχος είναι μακριά και δεν είμαστε συνδεδεμένοι σε WiFi

Αν όμως συνδεθεί στο ίντερνετ εμφανίζονται κάποιες μπάρες σήματος ανάλογα το RSSI που λαμβάνει η συσκευή.



Εικόνα 2. 25 Οι μπάρες που εμφανίζονται πάνω δεξιά της οθόνης ως δείκτες σήματος

Συγκεκριμένα οι μπάρες που εμφανίζονται είναι όπως φαίνεται στον πίνακα παρακάτω.

RSSI	ΜΠΑΡΕΣ
0	Κουκίδα
[-1 -55]	3
[-56 -70]	2
[-71 και λιγότερο]	1

Η συγκεκριμένη οθόνη υποστηρίζει τάσεις λειτουργίας από 3.3 έως 5V και έχει τυπική φωτεινότητα 60 Cd / m² [27]. Το μεγάλο πλεονέκτημα της οθόνης είναι το γεγονός ότι οδηγείται από το ολοκληρωμένο SSD1306 το οποίο επιτρέπει τον μικροελεγκτή να επικοινωνήσει με αυτήν διαμέσου του πρωτοκόλλου I2C και επομένως η οθόνη χρειάζεται μόλις τέσσερα καλώδια για να ορθή λειτουργεί. Τα SDA,SCL που αφορούν τις επικοινωνίες και την τάση τροφοδοσίας μαζί με την γείωση.

Ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο μπορούμε να ανανεώσουμε την οθόνη είναι 60FPS και ελέγχοντας με το πολύμετρο την κατανάλωση ρεύματος σε αυτόν τον ρυθμό ανανέωσης με περίπου το 50% της οθόνης αναμμένης βλέπουμε ότι καταναλώνονται μόλις 6mA στα 3.3V, δηλαδή $P_{screen} = 3.3V * 6mA = 19.8mW$. Όπως αντιλαμβανόμαστε η κατανάλωση της οθόνης είναι αμελείται και κατάλληλη

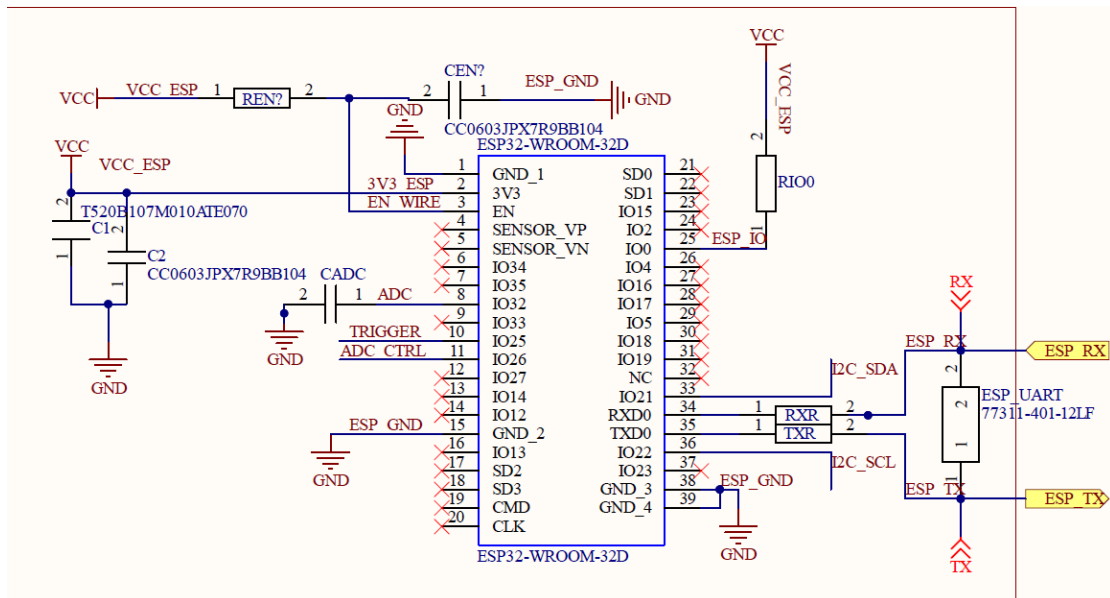
για ένα σύστημα χαμηλής ισχύος. Ενδεχομένως να μπορούσαμε να βάλουμε και μια μεγαλύτερη οθόνη.



Εικόνα 2. 26 Κατανάλωση οθόνης, με περίπου το 50% της οθόνης αναμμένη

2.7 Κύκλωμα ESP και κανονική λειτουργία

Αφότου προγραμματιστεί το ESP θα πρέπει τα pin EN και GPIO0 να είναι σε υψηλή τάση προκειμένου να «τρέξει» ο μικροελεγκτής το πρόγραμμα αποθηκευμένο στην μνήμη. Επομένως χρησιμοποιούμε αντιστάσεις pull up όπως φαίνεται στο παρακάτω κύκλωμα.



Εικόνα 2. 27 Κύκλωμα προγραμματισμού, λειτουργίας και επικοινωνιών του ESP

Οι δυο πυκνωτές που παραλληλίζονται στην είσοδο του “3V3” του ESP έχουν χωρητικότητα 100μF και 1μF αντίστοιχα και παρέχουν το απαραίτητο απότομο ρεύμα όταν ο μικροελεγκτής μεταδίδει δεδομένα μέσω WiFi ή ξυπνάει από λειτουργία ύπνου.

Επίσης υπάρχει το GPIO25 το οποίο είναι συνδεδεμένο σε ένα μπουτον / διακόπτη το οποίο όταν πατιέται από τον χρήστη, γειώνει την εσωτερική pull up αντίσταση του GPIO25 και δημιουργείται ένα interrupt, επομένως το ESP αντιλαμβάνεται ότι θα πρέπει να ξεκινήσει μια διαδικασία μέτρησης της θερμοκρασίας της επιφάνειας που στοχεύει ο αισθητήρας.

Ακόμα υπάρχει το GPIO26 από το οποίο ελέγχουμε το κύκλωμα μέτρησης της μπαταρίας που προαναφέρθηκε στην ενότητα 2.3. Όταν το GPIO είναι σε κατάσταση HIGH, ενεργοποιείται ένα τρανζίστορ η καναλιού το οποίο με την σειρά του ενεργοποιεί ένα MOSFET η καναλιού το οποίο επιτρέπει την λειτουργία ενός διαιρέτη τάσης ο οποίος συνδέεται στο ADC του μικροελεγκτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Firmware & λειτουργία συσκευής

Πέραν του αναγκαίου ηλεκτρονικού κυκλώματος αναπτύχθηκε και το κατάλληλο υλικολογισμικό (firmware) το οποίο τρέχει στον μικροεπεξεργαστή και είναι υπεύθυνο για όλες τις επικοινωνίες, επεξεργασίες δεδομένων, και την γενική συμπεριφορά του συστήματος μέτρησης.

Προκειμένου να αναπτυχθούν διάφορες λειτουργίες όπως σύνδεση της συσκευής στο internet, αποστολή δεδομένων μέσω MQTT, επικοινωνίες με περιφερειακές συσκευές καθώς και διαχείριση συμβάντων (όπως η σύνδεση ή επανασύνδεση σε δίκτυο που είχε πέσει) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητες βιβλιοθήκες κώδικα μαζί με το Ενσωματωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης (IDF) που παρέχει η espressif [28] ή ένα Λειτουργικό Σύστημα Πραγματικού Χρόνου (RTOS) το οποίο βοηθάει στην καλύτερη λειτουργία του firmware ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας

Τα ενσωματωμένα λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου αναλαμβάνουν να ανταποκριθούν σε ερεθίσματα που φτάνουν στον μικροελεγκτή όπως το πάτημα ενός κουμπιού, καταγραφή και αποθήκευση πληροφοριών στην μνήμη όταν έχουμε ξαφνικές πτώσεις τάσης του κυκλώματος (brownout).

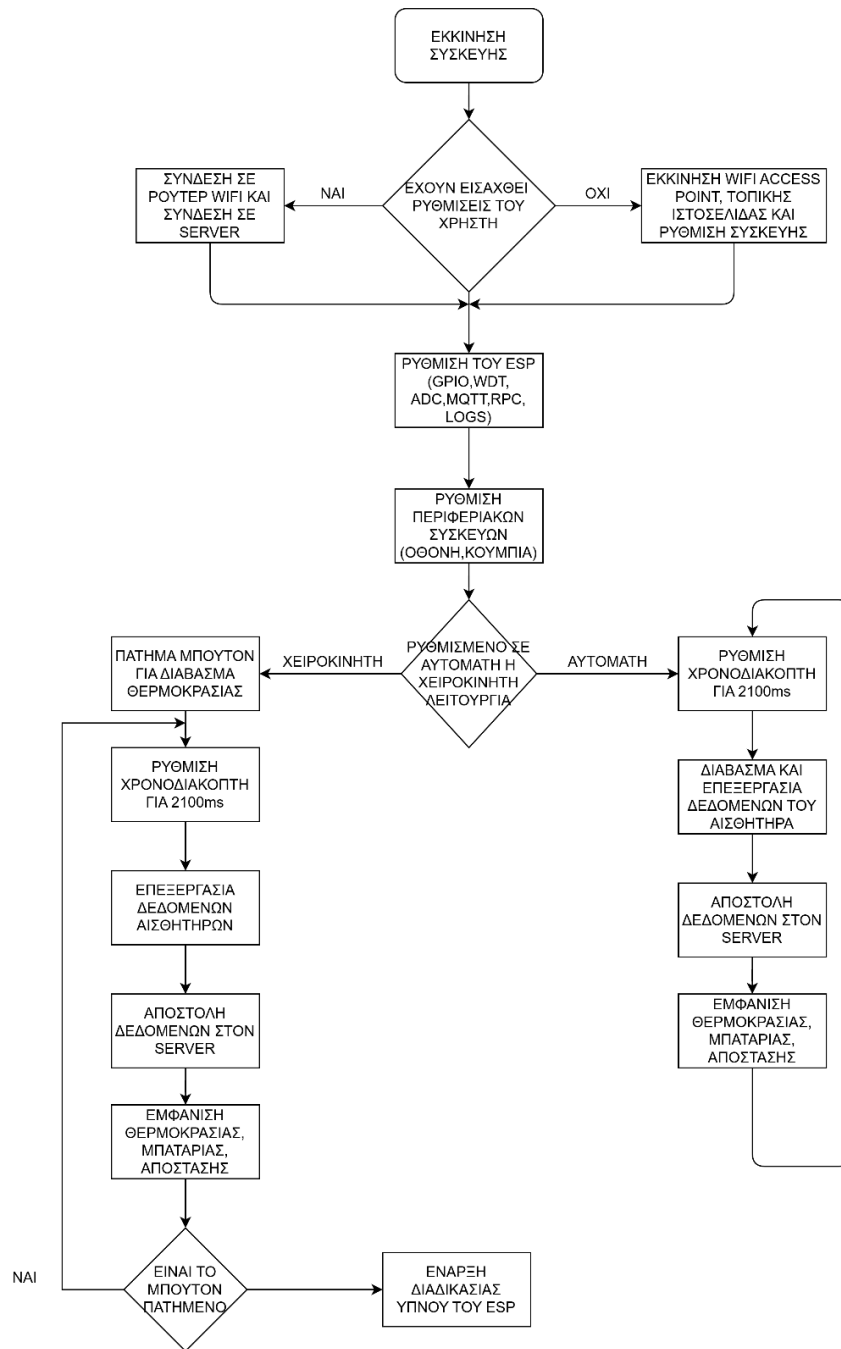
Πέραν της απόκρισης σε ερεθίσματα, το RTOS έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει αρχεία στην εσωτερική μνήμη του ESP όπως επίσης αναλαμβάνει την διαδικασία εκκίνησης του μικροελεγκτή (ρύθμιση των GPIO, ρυθμίσεις εσωτερικού ADC, ρυθμίσεις WiFi και interrupt καθώς και άλλα) [29] προτού προχωρήσει στην εκτέλεση του κώδικα που έχουμε γράψει.

3.1 Δομή και Δυνατότητες του Firmware

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την ανάπτυξη του firmware χρησιμοποιήθηκε το Mongoose RTOS λόγο των πολλών δυνατοτήτων του αλλά και επειδή αναλαμβάνει αυτόματα το πρόγραμμα του bootloader της συσκευής που προσαρμόζει την ταχύτητα του μικροελεγκτή καθώς και άλλες βασικές λειτουργίες όπως η ρύθμιση των timer. Ο σκοπός του προγράμματος που αναπτύχθηκε είναι να καταστήσει το πυρόμετρο ως «έξυπνη συσκευή» η οποία θα έχει όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση αλλά και θα παρέχει προηγμένες δυνατότητες στον χρήστη όπως η ασύρματη σύνδεση στο διαδίκτυο με σκοπό ο χρήστης να έχει πρόσβαση στις μετρήσεις από οποιαδήποτε συσκευή (όπως έξυπνο κινητό και υπολογιστής) αλλά και να μπορεί να ελέγχει την συσκευή απομακρυσμένα. Επίσης ο χρήστης θέλουμε να έχει πρόσβαση σε πολύ βασικές πληροφορίες όπως η τάση της μπαταρίας για να είναι ενήμερος όταν χρειάζεται επαναφόρτιση της συσκευής. Ταυτόχρονα το firmware επιτρέπει την χρήση της συσκευής σε δύο λειτουργίες.

Μία αυτόματη για καταγραφές της θερμοκρασίας χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε ενέργεια από τον χρήστη σε περιπτώσεις που το αντικείμενο του οποίου η θερμοκρασία μας ενδιαφέρει βρίσκεται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες ή δεν είναι εύκολη η πρόσβαση του όπως ένας ευαίσθητος κινητήρας, ή κάποιος ασθενής σε νοσοκομείο όπου θέλουμε ανα τακτά χρονικά διαστήματα να γνωρίζουμε την θερμοκρασία του χωρίς να πατάμε κάποιο κουμπί. Εναλλακτικά η άλλη λειτουργία αποστέλλει δεδομένα στο internet και τα εμφανίζει στην οθόνη μόνον όταν ο χρήστης πατάει το εξωτερικά συνδεδεμένο μπουτόν. Φυσικά είναι απαραίτητο να εισαχθούν αρκετές ρυθμίσεις στην συσκευή και επομένως αναπτύχθηκε και ένας εύκολος τρόπος για γρήγορη ρύθμιση του πυρόμετρου από οποιαδήποτε συσκευή που υποστηρίζει web browser όπως τα κινητά τηλέφωνα. Παρακάτω θα αναλυθούν οι προαναφερόμενες δυνατότητες.

Η βασική δομή του firmware έχει όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα με τα μπλοκ λειτουργίας.



Εικόνα 3. 1 Διάγραμμα ροής του firmware

3.2 Εκκίνηση συσκευής

Κατά την εκκίνηση της συσκευής ρυθμίζονται βασικά πράγματα που έχουν καθοριστεί από τον bootloader που παρέχει η espressif [30] ο οποίος έχει δύο στάδια. Ο bootloader του πρώτου σταδίου εκκινεί από τον πυρήνα 0, γνωστό και ως PRO CPU και τρέχει τον κώδικα που βρίσκεται στην θέση 0x40000400 της ROM. Κατά το πρώτο στάδιο ελέγχεται ο καταχωρητής GPIO_STRAP_REG και

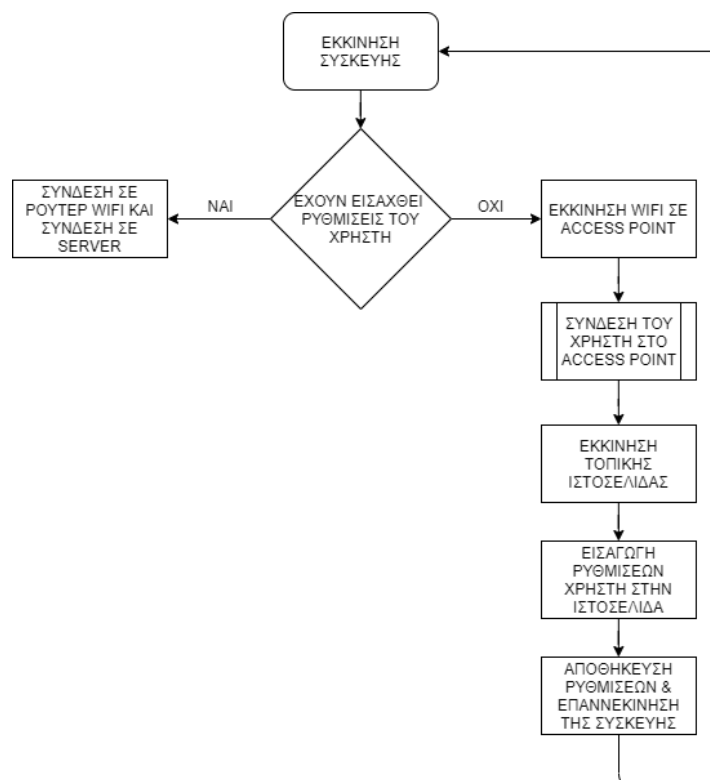
καθορίζεται αν το ESP θα πάει σε κατάσταση αναμονής προγραμματισμού ή αν θα τρέξει τον κώδικα του χρήστη ανάλογα τον λόγο εκκίνησης / επανεκκίνησης της συσκευής.

Ο bootloader δευτέρου σταδίου εκκινεί αμέσως μετά τον πρώτο bootloader και χωρίζει την μνήμη flash σε διαμερίσματα για εύκολη διαχείριση της μνήμης καθώς και καθιστά δυνατή την αναβάθμιση του firmware ασύρματα διαμέσου της διαδικασίας over-the-air (OTA) update κατά την οποία κατεβαίνει το νέο firmware σε μια θέση στην μνήμη και έπειτα εγκαθίσταται στην μνήμη.

Αφότου ολοκληρωθεί και το δεύτερο στάδιο του bootloader ο πυρήνας 1 γνωστός και ως APP CPU αναλαμβάνει να εκτελέσει το πρόγραμμα που έχει προγραμματίσει ο χρήστης. [31]

3.3 Ρύθμιση της συσκευής

Για την σωστή και πλήρη αξιοποίηση του firmware θα πρέπει ο χρήστης να εισάγει πληροφορίες όπως το όνομα του server στον οποίο θέλουμε να στείλουμε δεδομένα, η επιλογή τρόπου λειτουργίας καθώς και άλλες ρυθμίσεις. Με σκοπό την διευκόλυνση του χρήστη και την εύκολη πρόσβαση από κάθε συσκευή αναπτύχθηκε η παρακάτω εικονιζόμενη διαδικασία.

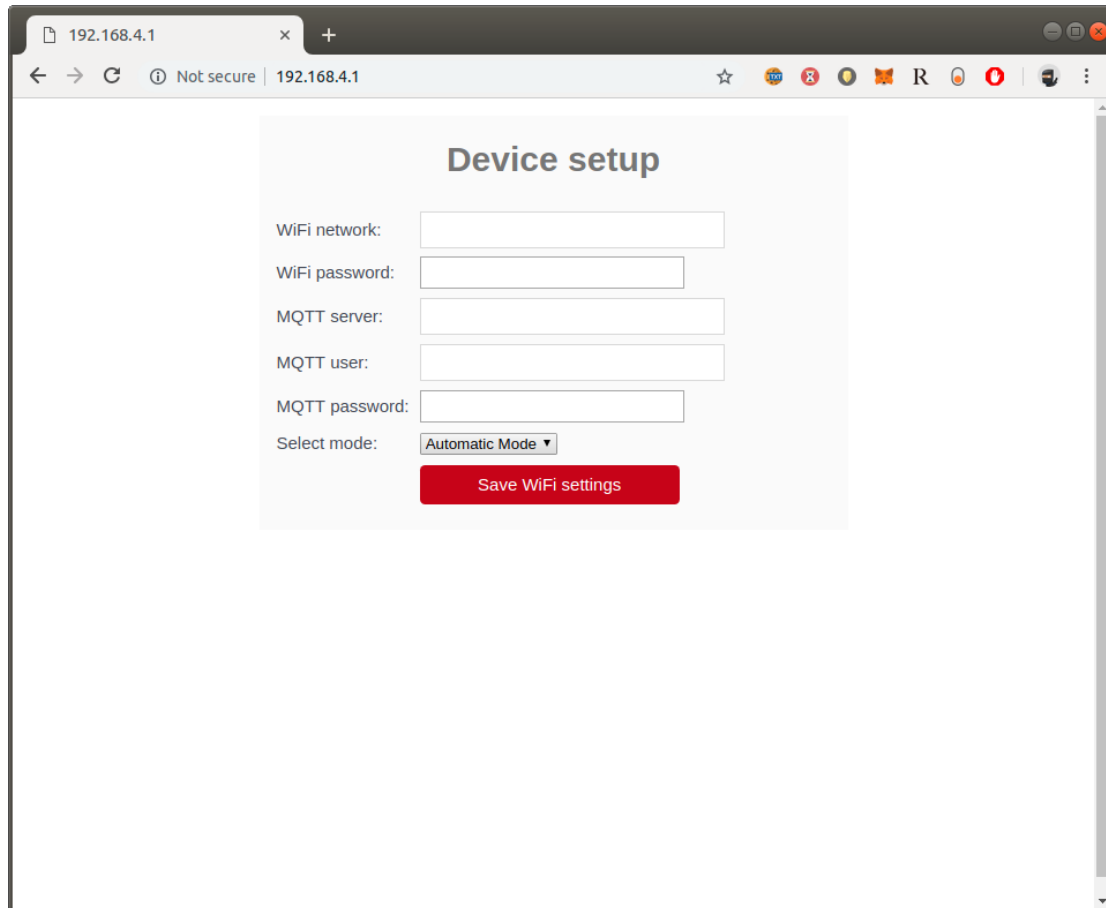


Εικόνα 3. 2 Διαδικασία εισαγωγής ρυθμίσεων στο firmware

Αρχικά κατά την εκκίνηση η συσκευή ελέγχει αν έχουν εισαχθεί οι ρυθμίσεις του χρήστη ή αν δεν υπάρχει καμία ρύθμιση. Στην περίπτωση που δεν έχουν εισαχθεί οι ρυθμίσεις του χρήστη το ESP

πηγαίνει σε WiFi AP (Access Point) mode δηλαδή σε παρόμοια λειτουργία με τα ρούτερ τα οποία δέχονται συνδέσεις από ασύρματες συσκευές (clients).

Σε αυτήν την λειτουργία το ESP εκκινεί την τοπική ιστοσελίδα που φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 3. 3 Ιστοσελίδα που "τρέχει" στο ESP για να εισάγουμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις

Όπου ο χρήστης εισάγει το όνομα του WiFi δικτύου στο οποίο θα συνδεθεί η συσκευή, ο κωδικός του WiFi δικτύου, το όνομα τομέα (domain name) του MQTT broker το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι www.alexios.tech το οποίο διαμέσου ενός DNS [32] μεταφράζεται στην διεύθυνση 185.244.39.150 αλλά θα μπορούσε να είναι και οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση server. Μπορούμε να βρούμε σε ποια διεύθυνση IP αντιστοιχεί το domain name εκτελώντας την εντολή "ping alexios.tech" στην γραμμή εντολών, η οποία θα έχει το παρακάτω αποτέλεσμα

```
Pinging www.alexios.tech [185.244.39.150] with 32 bytes of data:
```

Εικόνα 3. 4 Το αποτέλεσμα της εντολής ping μας δείχνει άμεσα την IP του domain "alexios.tech"

Απαραίτητο επίσης είναι ο χρήστης να εισάγει τα διαπιστευτήρια του για τον server τηλεμετρίας, όπως το όνομα χρήστη (MQTT user) και τον κωδικό πρόσβασης (MQTT password) τα οποία

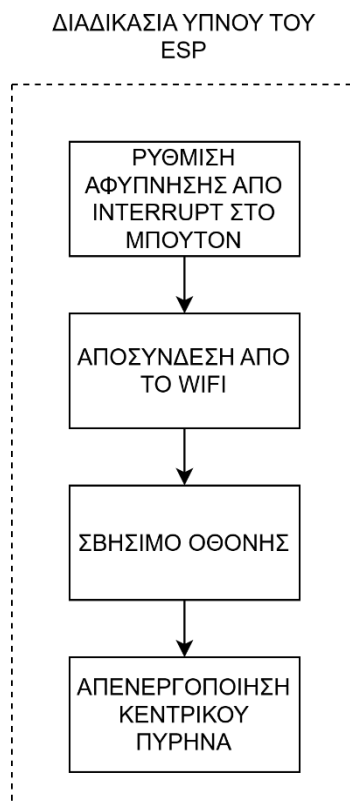
αποστέλλονται και ταυτοποιούνται από τον σέρβερ αφότου ο χρήστης πατήσει το κουμπί “Save WiFi settings” καθώς τότε εκτελείται ο κώδικας javascript που εμφανίζεται στο παράρτημα 1

το οποίο παίρνει όλες τις μεταβλητές που εισάγει ο χρήστης καθώς και αν η συσκευή θα λειτουργεί σε αυτόματη η χειροκίνητη λειτουργία, τις αποθηκεύει και επανεκκινεί την συσκευή με τις ρυθμίσεις που επιλέχθηκαν.

3.4 Χειροκίνητη λειτουργία

Όπως αναφέραμε η συσκευή έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος κάνει την συσκευή να λειτουργεί ως αυτόματο πυρόμετρο όπου καταγράφει τις θερμοκρασίες στην οθόνη χωρίς ενέργεια από τον χρήστη.

Ο δεύτερος κάνει την συσκευή να λειτουργεί ως ένα κλασικό πυρόμετρο. Όταν ο χρήστης πατάει το κουμπί βλέπει την ένδειξη θερμοκρασίας του αντικειμένου στην οθόνη και τα δεδομένα αποστέλλονται στον σέρβερ. Όταν σταματήσει να πατάει το κουμπί η συσκευή πηγαίνει σε κατάσταση βαθύ ύπνου βάση της παρακάτω διαδικασίας.



Εικόνα 3. 5 Διαδικασία κατά την οποία το ESP πηγαίνει σε κατάσταση ύπνου

Σε κανονική λειτουργία το κύκλωμα καταναλώνει κατά μέσο όρο 120mA με μέγιστες τιμές έως 150mA το οποίο εξαρτάται κυρίως από το ESP. Όταν θέσουμε το ESP σε κατάσταση ύπνου, το ESP καταναλώνει μόλις 7.03mA επομένως έχουμε συνολική εξοικονόμηση ενέργειας κατά 94.15% το οποίο καθιστά κατάλληλη αυτήν την κατάσταση.

3.5 Τηλεμετρία & απομακρυσμένος έλεγχος

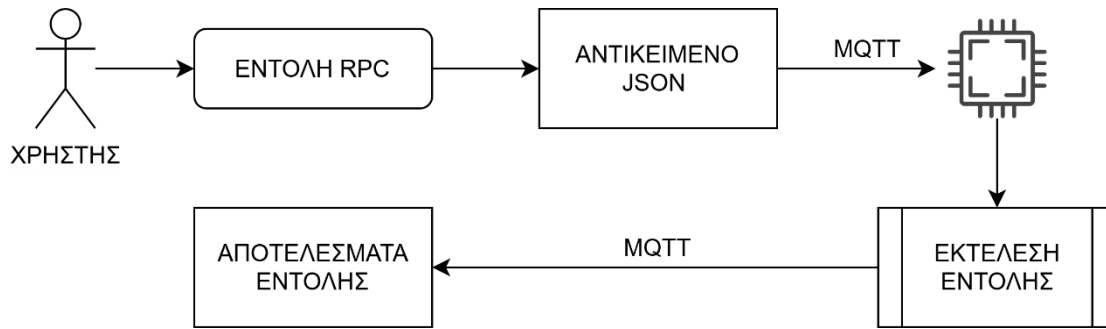
Δεδομένου ότι ο χρήστης του πυρομέτρου μπορεί να το τοποθετήσει κοντά σε θερμά αντικείμενα όπως κινητήρες για να μπορεί να παρακολουθεί την θερμοκρασία του αυτόματα και απομακρυσμένα, προγραμματίστηκαν δυνατότητες τηλεμετρίας στην συσκευή. Το ESP στέλνει αυτόματα στον server που ρυθμίσαμε, την θερμοκρασία που καταγράφει το thermopile χάρη μιας τεχνικής που ονομάζεται Remote Procedure Call (RPC).

Η τεχνική αυτή επιτρέπει ένα απομακρυσμένο πρόγραμμα που εκτελείτε σε οποιονδήποτε απομακρυσμένο υπολογιστή (A) να καλέσει μια συνάρτηση κάποιου προγράμματος που εκτελείται σε κάποιον άλλον υπολογιστή (B) [33] και ενδεχομένως να πάρει το αποτέλεσμα της συνάρτησης ως απάντηση.

Το RTOS που χρησιμοποιούμε μας επιτρέπει να καλέσουμε απομακρυσμένα συναρτήσεις με την χρήση αντικειμένων JSON. Τα αντικείμενα JSON έχουν την μορφή κλειδί:αξία που στην περίπτωση του RTOS μεταφράζονται ως συνάρτηση:μεταβλητές όπως το παρακάτω παράδειγμα το οποίο ζητάει από το πυρόμετρο να αποστείλει την τάση της μπαταρίας. Συγκεκριμένα το κλειδί “methods” με αξία “battery_voltage” καλεί την συνάρτηση που διαβάζει την τάση της μπαταρίας ενώ το κλειδί “args” με αξία “a”:0 είναι η μεταβλητή που περνάμε στην συνάρτηση “battery_voltage” αν και στην συγκεκριμένη περίπτωση η συνάρτηση δεν χρειάζεται μεταβλητή, οπότε το πρόγραμμα αγνοεί την μεταβλητή.

```
'{"src":"ir-iot","id":1,"method":"battery_voltage","args":{"a":0}}'
```

Η διαδικασία RPC εικονίζεται παρακάτω



Εικόνα 3. 6 Διαδικασία λήψης και αποστολής πληροφοριών μέσω RPC

Πέραν των δυνατοτήτων τηλεμετρίας, με την ίδια τεχνική μπορούμε να ελέγξουμε την συσκευή.

Οι απομακρυσμένες δυνατότητες της συσκευής είναι οι παρακάτω:

- Διάβασμα τάσης μπαταρίας
- Επανεκκίνηση της συσκευής
- Αλλαγή του τρόπου λειτουργίας της συσκευής (αυτόματη <->χειροκίνητη)
- Διάβασμα του RSSI του WiFi
- Αποστολή του λόγου που η συσκευή έκανε restart (για σκοπούς debugging)

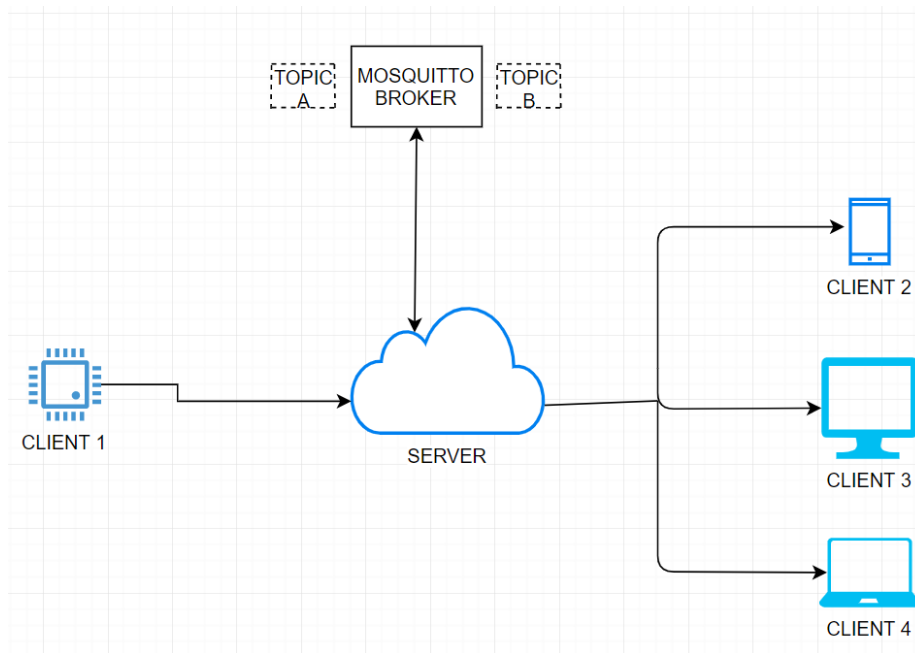
Για όλες τις παραπάνω λειτουργίες θα πρέπει η συσκευή να είναι συνδεδεμένη σε σέρβερ στο διαδίκτυο ο οποίος υποστηρίζει το πρωτόκολλο MQTT. Γι'αυτό στην επόμενη ενότητα θα αναλύσουμε τον σερβερ και το πρωτόκολλο MQTT.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Δομή cloud & MQTT

Αρχικά είναι αναγκαίο να καταλάβουμε τι είναι το πρωτόκολλο MQTT και πώς μας βοηθάει στην απομακρυσμένη τηλεμετρία.

Το MQTT σημαίνει MQ Telemetry Transport και είναι ένα πρωτόκολλο που δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις μνήμης και επεξεργαστικής ισχύος, χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδανικό για μικροελεγκτές και χρησιμοποιήθηκε για την επικοινωνία του ESP32 με άλλες συσκευές. Οι βασικές έννοιες αναγκαίες για την κατανόηση του πρωτοκόλλου είναι οι παρακάτω [34]:

1. **Πελάτης (Client)** ονομάζουμε οποιοδήποτε συσκευή χρησιμοποιεί το MQTT για συνδεθεί σε κάποιον διακομιστή (Server) για να αποστείλει ή να παραλάβει δεδομένα από ένα θέμα (topic) το οποίο βρίσκεται στον διακομιστή. Για να παραλάβει πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο θέμα, ο πελάτης πρέπει να κάνει συνδρομή (Subscription) στο θέμα, και ο διακομιστής θα του αποστείλει τις πιο πρόσφατες πληροφορίες που έχει λάβει. Αντίστοιχα για να σταλθούν πληροφορίες πρέπει γίνει δημοσίευση (Publish) σε ένα θέμα. Ανάλογα το επίπεδο ασφάλειας στο οποίο έχει ρυθμιστεί ο διακομιστής ο πελάτης έχει την δυνατότητα να στέλνει πληροφορίες ανώνυμα, ή με πιστοποίηση των στοιχείων του με όνομα χρήστη και κωδικό.
2. **Θέμα (Topic)** είναι το αντίστοιχο με μία ταχυδρομική θυρίδα. Για τον υπολογιστή αποτελεί έναν φάκελο με συγκεκριμένο όνομα ο οποίος εσωτερικά μπορεί να έχει και υποφακέλους. Ένα παράδειγμα θέματος είναι το “sensor/temperature” ή “sensor/voltage” όπου το “sensor” αποτελεί τον κύριο φάκελο, ενώ το “temperature” αποτελεί υποφάκελο. Ένας πελάτης μπορεί να στείλει και να διαβάσει δεδομένα από έναν φάκελο και από τους υποφακέλους του τα οποία μπορεί να είναι εντολές, δεδομένα θερμοκρασίας ή απλά γραπτά μηνύματα πάσης φύσεως.
3. **Διακομιστή (Server)** ονομάζουμε τον υπολογιστή ο οποίος λειτουργεί ως μεσάζοντας ανάμεσα στους πελάτες και τρέχει ένα πρόγραμμα-μεσίτη που διαχειρίζεται τις συνδέσεις MQTT.
4. Ο **μεσίτης (Broker)** είναι το υπεύθυνο πρόγραμμα για να «ακούει» στις θύρες τις οποίες λειτουργεί το MQTT και να κρατάει τις πληροφορίες που στέλνει ένας πελάτης σε ένα συγκεκριμένο θέμα, ώστε κάποιος άλλος πελάτης να μπορεί να τις διαβάσει. Ο μεσίτης δύναται να επιτρέπει ανώνυμες συνδέσεις στα θέματα αλλά είναι ασφαλέστερο να επαληθεύονται τα στοιχεία των πελατών με όνομα χρήστη και κωδικό, αν θέλουμε μόνο εγκεκριμένοι χρήστες ή συσκευές να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα.



Εικόνα 4.1 Τυπική διάταξη server με μεσίτη MQTT και πελάτες

Κατά την σύνδεση του πελάτη σε ένα «θέμα» ο πελάτης καθορίζει την ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) της σύνδεσης αλλάζοντας τα flag bit 2-1 του πρώτου byte κατά την αποστολή του “PUBLISH” πακέτου ελέγχου (control packet). Η ποιότητα της σύνδεσης καθορίζει τις δράσεις που θα λάβει ο διακομιστής που λειτουργεί ως μεσίτης.

Τα τρία επίπεδα ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS) είναι τα παρακάτω:

1. Η ποιότητα εξυπηρέτησης 0 (QoS 0) χαρακτηρίζεται και ως «παραλαβή το πολύ μία φορά» δηλαδή ο πελάτης που στέλνει το μήνυμα (publisher) σε κάποιο θέμα στον server δεν περιμένει απάντηση (ACK) αν λήφθηκε η όχι το μήνυμα και δεν προχωράει σε επαναποστολή του μηνύματος. Οι συσκευές με QoS 0 διαγράφουν το μήνυμα μετά την αποστολή του και επομένως δεν παραμένει δεσμευμένη η μνήμη της συσκευής.
2. Η ποιότητα εξυπηρέτησης 1 (QoS 1) που χαρακτηρίζεται και ως «παραλαβή τουλάχιστον μια φορά» σημαίνει ότι ο αποστολέας (publisher) δημιουργεί αναγνωριστικό για κάθε μήνυμα που αποστέλλεται και το μεταχειρίζεται ως «μη παραληφθέν» έως ότου λάβει ένα πακέτο “PUBACK” από τον παραλήπτη και έπειτα διαγράφεται το μήνυμα από την μνήμη του αποστολέα (συσκευής). Το ίδιο αναγνωριστικό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για να στείλει ένα διαφορετικό μήνυμα αφότου το προηγούμενο μήνυμα έχει παραληφθεί από τον δέκτη και επομένως κάθε μήνυμα δεν έχει μοναδικό αναγνωριστικό άρα μπορεί να επαναληφθεί το μήνυμα πολλαπλές φορές, χωρίς να έχουμε την δυνατότητα να το αντιληφθούμε.
3. Η ποιότητα εξυπηρέτησης 2 (QoS) είναι το υψηλότερο επίπεδο ποιότητας μιας σύνδεσης MQTT και χαρακτηρίζεται ως «παραλαβή ακριβώς μια φορά» κατά το οποίο ο αποστολέας δημιουργεί ένα

μοναδικό αναγνωριστικό για κάθε μήνυμα που αποστέλλει και μεταχειρίζεται το μήνυμα ως «μη παραληφθέν» έως ότου παραλάβει το πακέτο “PUBREC”. Όταν παραλάβει το PUBREC αποθηκεύει το μοναδικό αναγνωριστικό του μηνύματος, διαγράφει το μήνυμα από την μνήμη και αποστέλλει πακέτο PUBREL και περιμένει να λάβει το πακέτο PUBCOMP από τον δέκτη για να λήξει η αποστολή του μηνύματος ή αναμένει κάποια άλλη εντολή. Αφότου λήξει η αποστολή μηνυμάτων ο αποστολέας και ο δέκτης διαγράφουν τα μοναδικά αναγνωριστικά των μηνυμάτων.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό της συνεδρίας είναι ότι υπάρχουν δυο είδη:

- Η επίμονη (persistent session) κατά την οποία τα μηνύματα του πελάτη αποθηκεύονται μέχρι να τα παραλάβει ο παραλήπτης
- Η καινούργια συνεδρία (Clean session) όπου κανένα μήνυμα του αποστολέα δεν αποθηκεύεται στον server.

Στην περίπτωση συσκευών όπως το πυρόμετρο, δεν είναι απαραίτητες οι επίμονες συνεδρίες και το QoS 0 επαρκεί για τις ανάγκες λειτουργίας και διαχείρισης της συσκευής καθώς λειτουργεί κυρίως ως publisher.

Για την έναρξη συνεδρίας MQTT ο μεσάζοντας στον server θα πρέπει να παραλάβει τον όνομα χρήστη και τον κωδικό πρόσβασης της συσκευής και να τα αντιπαραβάλει με τα αποθηκευμένα στοιχεία που υπάρχουν κρυπτογραφημένα σε έναν φάκελο στον σέρβερ

```
esp:$6$goT3WNZq0UdsKQGZ$A9GpmMHQTbPuS7EG8fNDvZ9SVFpWBauv9htd61tUn/CIC1ieSsgXwY+LSDMD9tPmC+DBRVtv+LqdpUhpSEJ7jw==  
user@alexios:/etc/mosquitto$ █
```

Εικόνα 4. 2 Αποθηκευμένο username:password σε κρυπτογραφημένη μορφή

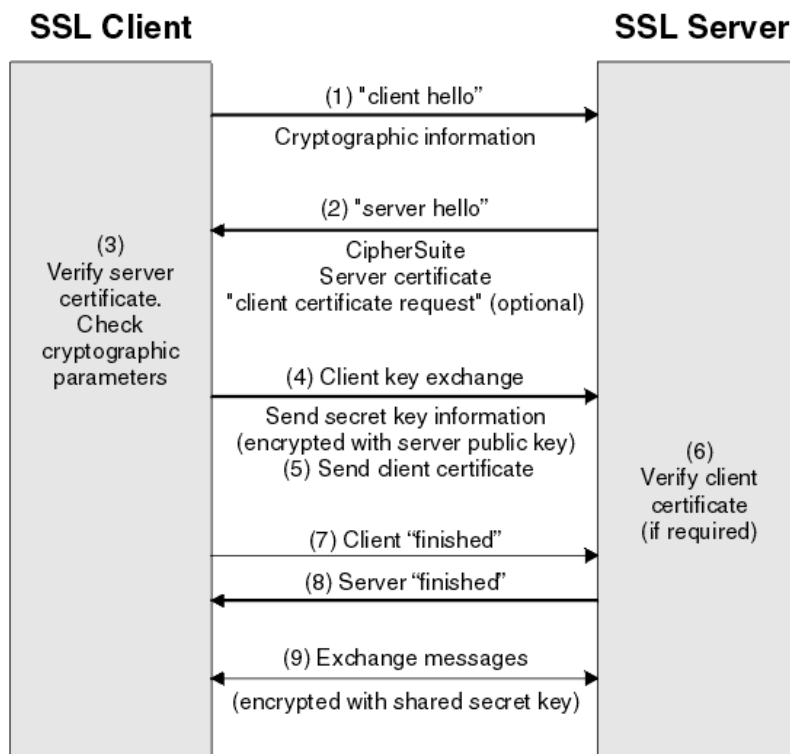
Για να προστεθεί ένας νέος χρήστης στον μεσίτη, θα πρέπει να εκτελέσουμε την εντολή “sudo mosquito_passwd -b /etc/mosquito/passwd new_user password123” το οποίο λέει στο εργαλείο mosquito_passwd [35] το οποίο είναι υπεύθυνο για να διαχειρίζεται τους κωδικούς του μεσίτη (mosquito) , να προσθέσει στο αρχείο passwd το οποίο βρίσκεται στον φάκελο /etc/mosquito τον χρήστη “new_user” με κωδικό πρόσβασης password123. Η εντολή sudo χρησιμοποιείται για να δώσει τα κατάλληλα δικαιώματα “super user” στον χρήστη ώστε να μπορεί να εκτελέσει την εντολή. Είναι το αντίστοιχο του «τρέξτε ως διαχειριστής» των windows με μικρές διαφορές όσον αφορά τα πλήρη δικαιώματα του χρήστη.

```
user@alexios:/etc/mosquitto$ sudo mosquito_passwd -b /etc/mosquitto/passwd new_user password123  
user@alexios:/etc/mosquitto$ █
```

Εικόνα 4. 3 Προσθήκη νέου χρήστη στο πρόγραμμα-μεσίτη mosquitto

Κατά την σύνδεση στον server υπάρχει το ενδεχόμενο να υποκλαπούν τα δεδομένα που στέλνει η συσκευή ή να αποκτήσει έλεγχο της συσκευής κάποιος κακόβουλος χρήστης μέσω διαφόρων μεθόδων όπως οι επιθέσεις Man-in-the-Middle [36] οι οποίες αποτελούν κίνδυνο για συσκευές που δεν χρησιμοποιούν κρυπτογράφηση κατά την επικοινωνία τους με κάποιον server. Επομένως ρυθμίστηκε το RTOS να χρησιμοποιεί το Transport Layer Security (TLS) πρωτόκολλο κρυπτογράφησης ώστε κάθε μήνυμα που λαμβάνεται από ή στέλνεται προς τον server να είναι κρυπτογραφημένο.

Η διαδικασία έναρξης ασφαλών επικοινωνιών έχει ως εξής. Το πυρόμετρο στέλνει έναν «χαιρετισμό» στον server όπου του προτείνει να συνδεθεί με την 1.3 έκδοση του TLS και ο server απαντάει με έναν «χαιρετισμό» όπου επιβεβαιώνει ότι χρησιμοποιεί την παραπάνω έκδοση TLS και ένα ψηφιακό πιστοποιητικό. Το πυρόμετρο επιβεβαιώνει την εγκυρότητα του πιστοποιητικού, και εν συνεχεία με λίγα παραπάνω βήματα ξεκινάει η κρυπτογραφημένη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευής και server όπως φαίνεται στην παρακάτω απεικόνιση της διαδικασίας



Εικόνα 3. 7 Διαδικασία δημιουργίας κρυπτογραφημένης σύνδεσης με τον server

Στα δεδομένα που αποστέλλει η συσκευή μπορεί να έχει πρόσβαση οποιοσδήποτε έχει έναν πελάτη MQTT ο οποίος έχει κάνει συνδρομή στα θέματα στα οποία αποστέλλει πληροφορίες η συσκευή. Όμως χρειάζεται χρόνο, εγκατάσταση προγραμμάτων και τεχνικές δεξιότητες για να συνδεθεί κάποιος σε ένα θέμα μέσω μίας κονσόλας.

```
root@www: ~  
root@www:~# mosquitto_sub -h alexios.tech -t 'temp'  
22.2  
24.7  
23.5  
23.3  
23.2  
23.6  
23.5  
23.4
```

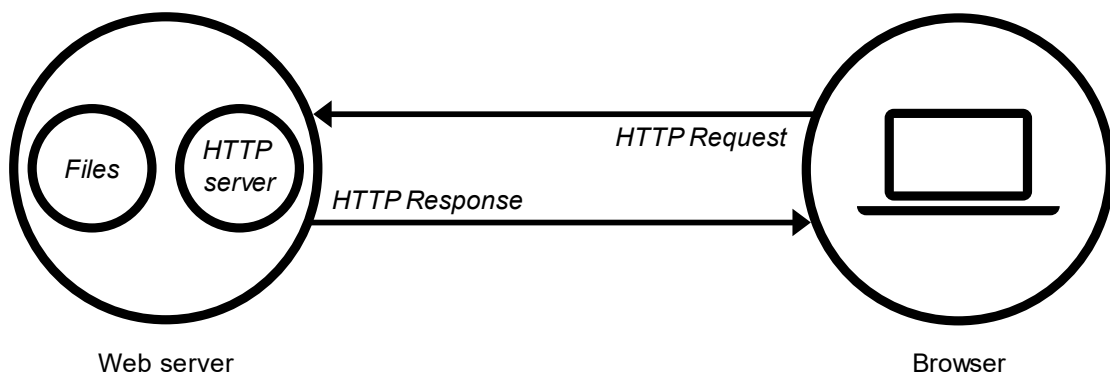
Εικόνα 3. 8 Τερματικό MQTT που "ακούει" στο θέμα "temp" όπου αποστέλλονται οι θερμοκρασίες του πυρομέτρου

Επομένως για ευκολία, την οικονομία χρόνου για τον χρήστη και την αποφυγή εγκατάστασης επιπλέον προγραμμάτων, αναπτύχθηκε μια ιστοσελίδα με την χρήση ενός web server όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο.

4.1 Webservice & Ιστοσελίδα

Αξίζει περιληπτικά να αναφέρουμε ότι σερβερ ονομάζουμε έναν υπολογιστή ή ένα δίκτυο υπολογιστών που εκτελεί προγράμματα ή αποθηκεύει αρχεία ή συνδυασμό των προηγουμένων, προκειμένου να παρέχει υπηρεσία σε κάποιον πελάτη. Ανάλογα τις υπηρεσίες που παρέχει ο σερβερ τον ονομάζουμε website host, file server, database, email server ή οτιδήποτε άλλο συναφές.

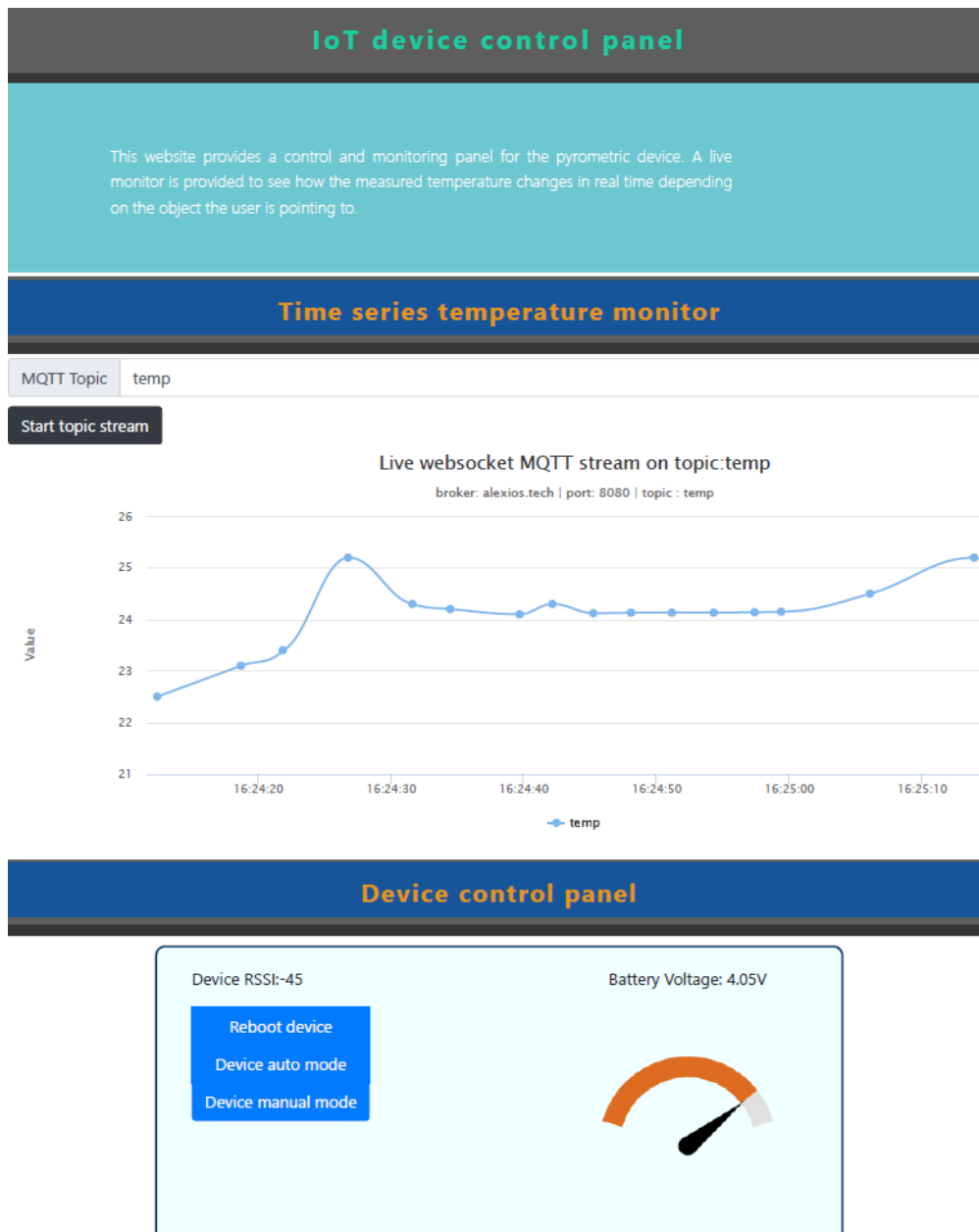
Η δομή της ιστοσελίδας που έχουμε αποθηκευμένη στον server δεν είναι τίποτα άλλο παρά εικόνες και αρχεία γραμμένα σε HTML, JavaScript και CSS. Ο χρήστης για να αποκτήσει πρόσβαση πρέπει να ξέρει το domain name, δηλαδή το όνομα της ιστοσελίδας η οποία είναι ρυθμισμένη στον server, και να μπορεί μέσα από τον φυλλομετρητή του να περιηγηθεί στην ιστοσελίδα. Για να περιηγηθεί στην ιστοσελίδα στέλνει «αιτήσεις» με το πρωτόκολλο HTTPS και ένα πρόγραμμα που εκτελείται στον σέρβερ «ακούει» για αυτές τις αιτήσεις και απαντάει με το περιεχόμενο των αρχείων του σερβερ [37].



Εικόνα 3. 9 Επικοινωνία φυλλομετρητή με web server. Απεικόνιση από την Mozilla

Στην εργασία, το πρόγραμμα υπεύθυνο για να απαντάει στις αιτήσεις HTTPS (web server) είναι το NGINX που το οποίο έχει ρυθμιστεί να παρέχει πρόσβαση μόνο στον φάκελο “html” που βρίσκεται στον σέρβερ. Επίσης κάθε φορά που ο χρήστης ζητάει πρόσβαση στην ιστοσελίδα με το πρωτόκολλο HTTP (Hyper Text Transfer Protocol), το οποίο δεν είναι ασφαλές, το NGINX τον ανακατευθύνει σε χρήση του πρωτοκόλλου HTTPS που κρυπτογραφεί την σύνδεση μεταξύ πελάτη και σέρβερ.

Η ιστοσελίδα που φιλοξενεί ο server είναι στο domain “alexios.tech” και αποτελεί την πλατφόρμα ελέγχου της συσκευής.



Εικόνα 3. 10 Ιστοσελίδα alexios.tech που χρησιμεύει για σκοπούς τηλεμετρίας και απομακρυσμένου ελέγχου

Η δομή της ιστοσελίδας έχει δύο βασικά κομμάτια:

1. Παρακολούθηση της θερμοκρασίας που καταγράφει το πυρόμετρο:

Ο χρήστης στο πεδίο MQTT Topic πληκτρολογεί το «θέμα» στο οποίο στέλνει πληροφορίες η συσκευή το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι το “temp” και έπειτα πατάει το κουμπί Start topic stream. Μόλις το πατήσει εμφανίζεται μια χρονική σειρά με τις θερμοκρασίες την στιγμή που παραλαμβάνονται. Το διάγραμμα προσαρμόζει αυτόματα τον κατακόρυφο άξονα των θερμοκρασιών για να είναι εμφανές το μέγεθος αλλαγής της θερμοκρασίας ενώ και στον οριζόντιο άξονα του χρόνου δεν εμφανίζονται πάνω από ~ 20 μετρήσεις για να πιο ευδιάκριτες οι πληροφορίες.

2. Πίνακας Ελέγχου της συσκευής:

Ο πίνακας ελέγχου της συσκευής έχει σκοπό να κάνει εύκολο τον απομακρυσμένο έλεγχο της συσκευής. Αριστερά φαίνεται η τάση της μπαταρίας μαζί με τον δείκτη του πόσο φορτισμένη είναι η μπαταρία.

Δεξιά υπάρχει η ένταση του σήματος WiFi που λαμβάνει η συσκευή και εμφανίζεται ως “Device RSSI” για να ξέρει ο χρήστης αν τοποθετήθηκε σε καλή τοποθεσία η συσκευή. Επίσης κάτω από το RSSI υπάρχουν τρία κουμπιά τα οποία μας επιτρέπουν να κάνουμε επανεκκίνηση την συσκευή, να θέσουμε την συσκευή σε αυτόματη λειτουργία και να θέσουμε την συσκευή σε χειροκίνητη λειτουργία.

Το κάθε κουμπί, όταν εκτελεστεί σωστά η εντολή γίνεται πράσινο και μετά από λίγο χρόνο ξανά μπλε αφότου η συσκευή έχει έρθει σε σταθερή κατάσταση και συνεχίσει να στέλνει ενδείξεις θερμοκρασίας.

Η ιστοσελίδα καταφέρνει να επικοινωνήσει με την συσκευή στέλνοντας εντολές μέσω MQTT. Οι δείκτες RSSI και η τάση της μπαταρίας ανανεώνονται αυτόματα κάθε φορά που η συσκευή στέλνει πληροφορίες για την θερμοκρασία, καθώς τότε ενεργοποιείται στην ιστοσελίδα μια συνάρτηση που ζητάει από την συσκευή τις παραπάνω πληροφορίες.

Σαφώς η ιστοσελίδα προσαρμόστηκε ώστε για να είναι λειτουργική και στα κινητά τηλέφωνα για την μεγαλύτερη ευκολία του χρήστη.

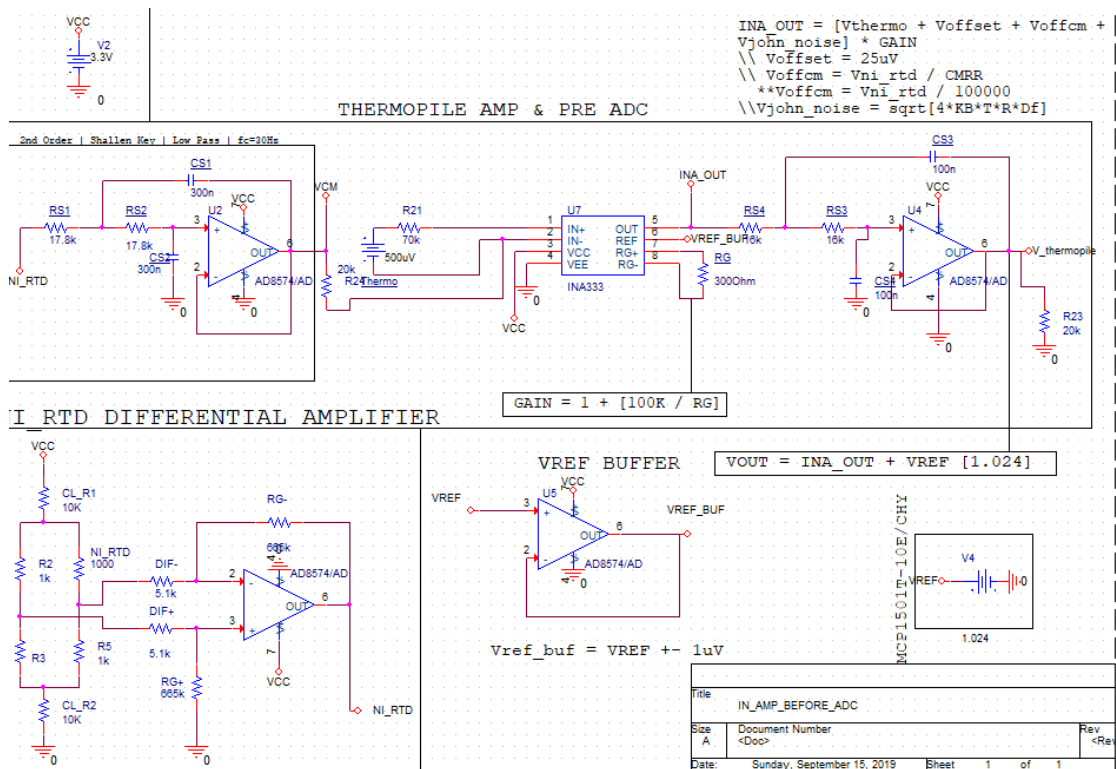
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα



Εικόνα 5. 2 Μπροστινή πλευρά του πυρόμετρου. Στην πίσω μεριά υπάρχει η οθόνη OLED

Η παρούσα εργασία ανέπτυξε το θέμα της θερμομέτρησης με την χρήση οπτικού αισθητήρα ευαίσθητου στις αλλαγές της εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας στο φάσμα του υπέρυθρου φωτός με την χρήση συστοιχίας θερμοζευγών και στα πλαίσια της αναπτύξαμε ένα φορητό πυρόμετρο.

Πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις του πυρόμετρου θα ήταν η χρήση αναλογικού θερμοζεύγους και του αντίστοιχου κυκλώματος για την μείωση του κόστους της συσκευής



Εικόνα 5. 3 Κύκλωμα ανίχνευσης θερμοκρασίας με αναλογικό thermopile

Το παραπάνω κύκλωμα αποτελεί ένα μέρος κυκλώματος ενίσχυσης αναλογικού θερμοζευγους που μελετήθηκε στο τέλος της εργασίας ως εναλλακτικό αναλογικό κύκλωμα. Αποτελείται από το αναλογικό αισθητήρα και κυκλώματα που μας βοήθησε να φιλτράρουμε, να ανυψώσουμε και να ενισχύσουμε την τάση εξόδου του μέχρι να οδηγηθεί στο ADC.

Άλλες πιθανές βελτιώσεις θα ήταν η σμίκρυνση του μεγέθους της πλακέτας καθώς και η χρήση λίγο φθηνότερων παθητικών εξαρτημάτων (αντιστάσεις, πυκνωτές) καθώς τα περισσότερα εξαρτήματα έχουν ακρίβεια 1% και έχουν επιλεγεί για το χαμηλό ESR τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: JavaScript που εκτελείται στην ιστοσελίδα του πυρόμετρου

```
<script>
    var saveButton = document.getElementById('save');
    var spinnerSpan = document.getElementById('spinner');
    saveButton.onclick = function() {
        spinnerSpan.className = 'spin';
        var ssid = document.getElementById('ssid').value || '';
        var pass = document.getElementById('pass').value || '';
        var mqtt_server = document.getElementById('mserver').value || '';
        var mqtt_user = document.getElementById('muser').value || '';
        var mqtt_password = document.getElementById('mpass').value || '';
        var mode = document.getElementById('dropdown-list').value;
        if (mode === '1'){
            mode = 1;
        } else if (mode === '2') {
            mode = 2;
        }
        //In case the user doesn't select anything, default mode is 1
        else {
            mode = 1;
        }
        var data = {
            config: {
                wifi: {
                    sta: { enable: true, ssid: ssid, pass: pass},
                    ap: { enable: false }
                },
                mqtt: { clean_session: true, client_id: 'ir-iot', enable: true,
                    keep_alive: 80, server: mqtt_server, user: mqtt_user, pass: mqtt_password,
                    will_message: 'ir_temp_sensor_disconnected', will_topic: 'test',
                    ssl_ca_cert: 'ca.pem'},
                pyrometer: {mode: mode}
            }
        };
        axios.post('/rpc/Config.Set', data).then(function(res) {
```

```

        return axios.post('/rpc/Config.Save', {reboot: true});
    }).catch(function(err) {
        alert(err);
    }).then(function() {
        spinnerSpan.className = '';
    });
};
</script>

```

ΠΑΡΑΤΗΜΑ 2: Shellshort & Median

```

float adc_median_mv(int adc_pin) {
    mgos_gpio_write(ADC_ENABLE_PIN,1);
    mgos_msleep(50);
    int adc_buf[ESP_ADC_BUF_SIZE] = {
        0
    };
    //Sample & hold in buffer.
    for (int i = 0; i < ESP_ADC_BUF_SIZE; i++) {
        adc_buf[i] = mgos_adc_read_voltage(adc_pin);
    }
    //ShellShort the data. Code adapted from geeksforgeeks.org/shellshort
    for (int gap = ESP_ADC_BUF_SIZE / 2; gap > 0; gap /= 2) {
        for (int i = gap; i < ESP_ADC_BUF_SIZE; i += 1) {
            int temp = adc_buf[i];
            int j;
            for (int j = i; j >= gap && adc_buf[j - gap] > temp; j -= gap) {
                adc_buf[j] = adc_buf[j - gap];
            }
            adc_buf[j] = temp;
        }
    }
    //Return median mv
    LOG(LL_DEBUG, ("adc_median_mv EXECUTED"));
    float returns = (adc_buf[((ESP_ADC_BUF_SIZE - 1) / 2) - 1] +
    adc_buf[((ESP_ADC_BUF_SIZE - 1) / 2) + 1] + adc_buf[((ESP_ADC_BUF_SIZE - 1)
    / 2)]) / 3;
    return returns;
}

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: Κανονική κατανομή

```
float gaussian_filter_mlx(){
//adc_size is equal to 7 which is how many measurements will be taken
//gaussian_filter is equal to two and it represents how many standard deviations are to be taken into
account while calculating the average temperature
//Record the data
float mlx_buf[mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size()]= {0};
for(int i=0;i<mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size();i++){
    float *temp = getMLX90640FramePtr();
    mlx_buf[i] = *(temp + 191);
}
//Shellshort them
for(int gap = mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size() / 2; gap > 0; gap /= 2) {
    for (int i = gap; i < mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size(); i += 1) {
        float temp = mlx_buf[i];
        int j;
        for (j = i; j >= gap && mlx_buf[j - gap] > temp; j -= gap) {
            mlx_buf[j] = mlx_buf[j - gap];
        }
        mlx_buf[j] = temp;
    }
};
//Calculate mean
float mean=0;
for(int i=0;i<mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size();i++){
    mean +=mlx_buf[i];
};
mean = mean/mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size();
//Calculate sum of squares
float temp =0;
for(int i=0;i<mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size();i++){
    temp+=pow((mlx_buf[i]-mean),2);
};
```

```

//Calculate variance
float variance = temp/(mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size()-1);
//Calculate standard deviation
float std_deviation = sqrt(variance);
//Average filter. Max is the maximum value that can be taken into account while calculating average
temperature while and min is the minimum value for the same purpose
float max = mean+(std_deviation*mgos_sys_config_get_pyrometer_gaussian_filter());
float min = mean-(std_deviation*mgos_sys_config_get_pyrometer_gaussian_filter());
temp = 0;
int count=0;
for(int i=1;i<(mgos_sys_config_get_pyrometer_adc_size()-1);i++){
    if (!(mlx_buf[i]> max) || (mlx_buf[i]<min)){
        temp +=mlx_buf[i];
        count++;
    }
};
return (temp/count);
}

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Temperature>.
- [2] Kim Ann Zimmermann, «Live Science,» February 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.livescience.com/39916-fahrenheit.html>.
- [3] A. Jain, «Engineers Garage,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.engineersgarage.com/insight/how-mercury-thermometer-works>. [Πρόσβαση February 2019].
- [4] Caltech University, «Thermoelectrics.caltech.edu,» 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>.
- [5] W. Thomson. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://zapatopi.net/kelvin/papers/on_an_absolute_thermometric_scale.html.
- [6] NIST, «National Institute of Standards and Technology,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nist.gov/pml/weights-and-measures/si-units-temperature>. [Πρόσβαση Μάρτιος 2019].
- [7] «Instrumentation Toolbox,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.instrumentationtoolbox.com/2016/08/the-calendar-van-dusen-equation-for.html>. [Πρόσβαση Μάρτιος 2019].
- [8] Pnp Transistor, «pnptransistor.com,» Απρίλιος 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://pnptransistor.com/pirani-gauge-application-advantages-working-principle/>.
- [9] A. G. E. H. K. A. T. St. Großwig, «DISTRIBUTED FIBRE OPTICAL TEMPERATURE SENSING TECHNIQUE – A VARIABLE TOOL FOR MONITORING TASKS,» Jena, Germany, 2001.

- [10] M. Fowler, «galileo.phys.virginia.edu,» University of Virginia, [Ηλεκτρονικό]. Available: http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/black_body_radiation.html. [Πρόσβαση Μάρτιος 2019].
- [11] «Hyperphysics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/wien.html>. [Πρόσβαση Μάρτιος 2019].
- [12] Omega, «omega.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.omega.com/en-us/resources/selecting-a-thermocouple>. [Πρόσβαση Απρίλιος 2019].
- [13] Omega, «omega.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.omega.ca/en/resources/thermocouple-types>. [Πρόσβαση Απρίλιος 2019].
- [14] University of Mississippi, «olemis.edu,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.phy.olemiss.edu/~cremaldi/PHYS417/Seebeck%20and%20Peltier%20Effects.pdf>. [Πρόσβαση Απρίλιος 2019].
- [15] TE Connectivity, «te.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/sensors/global/analog-digital-thermopile-application-note.pdf>. [Πρόσβαση Μάρτιος 2019].
- [16] D.-G. C. Y.-J. Y. P. L. Y.-K. Q. X. & L. Z.-K. Li, «The Design of Low Temperature Coefficient Band-Gap Reference,» σε *2018 IEEE 3rd International Conference on Integrated Circuits and Microsystems*, 2018.
- [17] A. & K. A. Golda, «Parameters Identification of Embedded PTAT Temperature Sensors for CMOS Circuits,» σε *14th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, Ciechocinek, Poland, 2007.
- [18] Samsung, «orbtronic,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.orbtronic.com/content/samsung-35e-datasheet-inr18650-35e.pdf>. [Πρόσβαση 2019].
- [19] NanJing Top Power ASIC Corp, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>. [Πρόσβαση 2020].
- [20] Texas Instruments, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2113a.pdf?ts=1589816018476>. [Πρόσβαση 2020].
- [21] D. Incorporated, «<https://gr.mouser.com/datasheet/2/115/AP7361C-775034.pdf>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://gr.mouser.com/datasheet/2/115/AP7361C-775034.pdf>. [Πρόσβαση 2019].
- [22] Comchip Technology, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://gr.mouser.com/datasheet/2/80/SS8050-G_RevA181526-1481562.pdf. [Πρόσβαση 2020].
- [23] Vishay, Vishay Siliconix, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vishay.com/docs/70132/si2393ds.pdf>.

- [24] FTDI, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf.
- [25] «Napier,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.soc.napier.ac.uk/~bill/pdf/P_ch16.pdf. [Πρόσβαση 2019].
- [26] i2c-bus.org, «i2c-bus.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.i2c-bus.org/i2c-primer/how-i2c-hardware-works/>. [Πρόσβαση 12 Αύγουστος 2019].
- [27] DFRobot, «DFrobot,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Gravity_I2C_OLED-2864_Display. [Πρόσβαση 08 2019].
- [28] Espressif, «docs.espressif.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/get-started/>. [Πρόσβαση 07 2019].
- [29] Mongoose. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://mongoose-os.com/docs/mongoose-os/userguide/intro.md>. [Πρόσβαση 09 2019].
- [30] «docs.espressif.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/api-guides/bootloader.html>. [Πρόσβαση 11 2019].
- [31] «docs.espressif.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/api-guides/general-notes.html>. [Πρόσβαση 10 2019].
- [32] «top.host,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://top.host/support/knowledge-base/ti-ine-enas-domain-name-server/>. [Πρόσβαση 11 2019].
- [33] B. J. Nelson, «archive.org,» 1981. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.mirrorservice.org/sites/www.bitsavers.org/pdf/xerox/parc/techReports/CSL-81-9_Remote_Procedure_Call.pdf. [Πρόσβαση 2020].
- [34] O. Committee, «docs.oasis-open.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/csprd02/mqtt-v3.1.1-csprd02.html>. [Πρόσβαση 10 2019].
- [35] «mosquitto.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://mosquitto.org/man/mosquitto_passwd-1.html. [Πρόσβαση 10 2019].
- [36] «hackerspace.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://hackerspace.kinja.com/how-to-defend-yourself-against-mitm-or-man-in-the-middle-1461796382>. [Πρόσβαση 12 2019].
- [37] Mozilla , «developer.mozilla.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Common_questions/What_is_a_web_server.
- [38] Wikipedia, XX XX 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_thermometer. [Πρόσβαση 2019].
- [39] [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.astro.uu.se/history/celsius_scale.html.
- [40] Thermometrics Corp, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thermometriccorp.com/thertypk.html>. [Πρόσβαση March 2019].

- [41] Espressif, «Espressif.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf. [Πρόσβαση 08 2019].
- [42] «Mongoose-os,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://mongoose-os.com/mos.html>. [Πρόσβαση 10 2019].