

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή **στα Πληροφοριακά και Επικοινωνιακά Συστήματα**



**Διασύνδεση Αισθητήρα Θερμοκρασίας σε Ασύρματο Κόμβο για
Ακριβή Μέτρηση Θερμοκρασίας**

Νικόλαος Κολοβός

Επιβλέπων Καθηγητής
Χρήστος Γκουμόπουλος

Αύγουστος 2015

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

**Διασύνδεση Αισθητήρα Θερμοκρασίας σε Ασύρματο Κόμβο για
Ακριβή Μέτρηση Θερμοκρασίας**

Νικόλαος Κολοβός

**Επιβλέπων Καθηγητής
Χρήστος Γκουμόπουλος**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Πληροφοριακά Συστήματα

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Αύγουστος 2015

Περίληψη

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων χρησιμοποιούνται σήμερα σε αρκετές εφαρμογές και είναι ένα πεδίο έρευνας που συνεχώς αναπτύσσεται. Εξ' αιτίας της ιδιαιτερότητάς τους όμως, συναντούν περιορισμούς σε υπολογιστική ισχύ, αποθήκευση δεδομένων και κατανάλωση ενέργειας, που θέτουν όρια στις δυνατότητές τους. Στόχος της μεταπτυχιακής διατριβής, είναι η ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας από έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων για εύρος από 0 έως 50°C.

Για την επίτευξη του στόχου, υλοποιήθηκε ένα ασύρματο δίκτυο αποτελούμενο από έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων, τον κόμβο συντονισμού και το περιβάλλον διαχείρισης χρήστη. Για να κρατηθεί χαμηλά το κόστος, οι ασύρματοι κόμβοι βασίστηκαν στην πλατφόρμα ανάπτυξης Arduino και την μονάδα ασύρματης επικοινωνίας nRF24L01+.

Η χρήση αισθητήρων NTC θερμίστορ και υψηλής ανάλυσης μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC), έδωσαν τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων μεγάλης ανάλυσης από τον ασύρματο κόμβο. Επίσης για τη μείωση του φαινομένου της αυτό-θέρμανσης του θερμίστορ, εφαρμόστηκε το ελάχιστο δυνατό ρεύμα διέγερσης και μόνο για το χρονικό διάστημα που είναι απαραίτητο να ληφθεί μια μέτρηση.

Η διαβάθμιση του συστήματος έγινε χωρίζοντας το εύρος μέτρησης σε πέντε τμήματα και λαμβάνοντας δέκα δείγματα από κάθε τμήμα. Από τα δείγματα αυτά, υπολογίστηκαν οι σταθερές τιμές της συνάρτησης που μοντελοποιεί το κύκλωμα λήψης των μετρήσεων.

Στην αποτίμηση του συστήματος η οποία έγινε με θερμοκρασίες αναφοράς από θερμίστορ υψηλής ακρίβειας, διαπιστώθηκε ότι το βαθμονομημένο κύκλωμα του ασύρματου κόμβου μπορεί να ακολουθήσει τις θερμοκρασίες αναφοράς με σφάλμα μικρότερο των $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ και ότι υπό τις κατάλληλες συνθήκες, το σφάλμα αυτό μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο.

Summary

Wireless Sensor Networks are now used in many applications and is a research field that is constantly growing. Due to their specificity, however, one can encounter limitations in computing power, data storage and power consumption, which set limits to their capacities. The purpose of this Master's thesis is the precise measurement of the temperature by a wireless sensor node ranging from 0 to 50°C.

To achieve the target, a wireless network was implemented consisting of a wireless sensor node, a coordinating node and a user management environment. To keep costs low, the wireless nodes based on the development platform Arduino and wireless communication module nRF24L01 +.

High-resolution measurements from the wireless node were achieved as a result of the use of sensors NTC thermistor and a high resolution Analog to Digital Converter (ADC).

Using sensors NTC thermistor and high resolution Analog to Digital Converter (ADC), enabled making high-resolution measurements from the wireless node. Furthermore to reduce the phenomenon of thermistor self-heating, the minimum trip current was applied and only for such time as is necessary to take a measurement.

The calibration of the system was done by dividing the measuring range into five sections and taking ten samples from each one. From these samples were computed the fixed values of the function which models the measurement circuitry.

In the evaluation of the system which was done by reference temperatures of high precision thermistor, it was found that the calibrated circuit of the wireless node can follow the reference temperatures with error less than ± 0.05 ° C and under appropriate circumstances, this error can be reduced even more.

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χρήστο Γκουμόπουλο, για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη αλλά και υπομονή που έδειξε κατά τη διάρκεια όλης αυτής της προσπάθειας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και όλους τους αγαπημένους μου φίλους, που μου έδειξαν κατανόηση και μου συμπαραστάθηκαν, παρ' όλο που τους αμέλησα για αρκετό χρονικό διάστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μεταπτυχιακή Διατριβή στα Πληροφοριακά και Επικοινωνιακά Συστήματα.....	i
Περίληψη.....	ii
Summary	iii
Ευχαριστίες.....	iv
Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός Μεταπτυχιακής Διατριβής.....	2
1.2 Βασικά Ερευνητικά Ερωτήματα.....	2
1.3 Ανασκόπηση Ερευνητικού Πεδίου	3
1.4 Δομή Διατριβής	7
Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων.....	8
2.1 Δομή Ασύρματων Κόμβων Αισθητήρων	10
2.1.1 Μονάδα Ανίχνευσης.....	10
2.1.2 Μονάδα Επεξεργασίας	12
2.1.3 Μονάδα Ασύρματης Επικοινωνίας	14
2.1.4 Μονάδα Τροφοδοσίας.....	15
2.1.5 Διασύνδεση Υπομονάδων Ασύρματων Κόμβων	16
2.1.6 Πρότυποι Κόμβοι Αισθητήρων	19
2.2 Ασύρματη Σύνδεση Κόμβων	22
2.2.1 Κανάλια Συχνότητων και Διεθνείς Κανονισμοί.....	22
2.2.2 Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	23
2.2.3 Στοιβή Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....	26
2.2.4 Πρότυπα και Τεχνολογίες Ασύρματης Σύνδεσης Κόμβων	28
2.3 Λειτουργικά Συστήματα Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	35
2.3.1 TinyOS	36
2.3.2 LiteOS.....	36
2.3.3 Contiki.....	37
Θερμομετρία.....	38
3.1 Θερμοκρασία και Κλίμακες Μέτρησης	38
3.1.1 Κλίμακα Κελσίου.....	39
3.1.2 Kelvin, Απόλυτη ή Θερμοδυναμική Κλίμακα.....	39
3.1.3 Διεθνής Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασίας (IPTS-68).....	40
3.1.4 Κλίμακες Θερμοκρασίας Fahrenheit και Rankine.....	43

3.2	Τεχνικές Μέτρησης Θερμοκρασίας.....	43
	Αισθητήρες Θερμοκρασίας.....	45
4.1	Θερμοστοιχείο (Thermocouple)	48
4.1.1	Ανάλυση Σφάλματος Θερμοστοιχείου	52
4.2	Διάταξη Αντίστασης Μετάλλου (Resistive Temperature Device - RTD).....	53
4.2.1	Ανάλυση Σφάλματος RTD	57
4.3	Θερμίστορ (Thermistor)	59
4.3.1	Θερμίστορ PTC	60
4.3.2	Θερμίστορ NTC	61
4.3.3	Λογισμική Γραμμικοποίηση Θερμίστορ	63
4.3.4	Υλική Γραμμικοποίηση Θερμίστορ.....	65
4.3.5	Ενίσχυση Σήματος.....	71
4.3.6	Ανάλυση Σφάλματος Θερμίστορ	73
4.4	Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Πυριτίου (Integrated Silicon Based Sensor)	76
	Σχεδιασμός του Ασύρματου Συστήματος Μέτρησης.....	81
5.1	Προδιαγραφές Συστήματος.....	83
5.1.1	Προδιαγραφές Κόμβου Αισθητήρων	83
5.1.2	Προδιαγραφές Κόμβου Συντονισμού	84
5.1.3	Προδιαγραφές Περιβάλλοντος Διασύνδεσης Χρήστη	84
5.2	Επιλογή Υλικών	85
5.2.1	Πλατφόρμες Ανάπτυξης.....	85
5.2.2	Αισθητήρες	89
5.2.3	Κύκλωμα Διασύνδεσης Αναλογικού Αισθητήρα.....	91
5.2.4	Μονάδα Ασύρματης Επικοινωνίας	94
	Υλοποίηση του Ασύρματου Συστήματος Μέτρησης.....	98
6.1	Κύκλωμα Διασύνδεσης Αισθητήρα.....	98
6.1.1	Κύκλωμα Μέτρησης Αντίστασης	99
6.1.2	Επέκταση Κυκλώματος για Χρήση Θερμίστορ.....	101
6.2	Διασύνδεση Ασύρματων Μονάδων.....	104
6.3	Λογισμικό Μικροελεγκτή Κόμβου Αισθητήρων.....	107
6.3.1	Λήψη Μετρήσεων από τον Αισθητήρα	107
6.3.2	Διαβάθμιση Κυκλώματος Διασύνδεσης	110
6.3.3	Ενσύρματη και Ασύρματη Επικοινωνία.....	113
6.4	Λογισμικό Μικροελεγκτή Κόμβου Συντονισμού	115

6.5	Λογισμικό Περιβάλλοντος Διαχείρισης Χρήστη	115
	Αποτίμηση Λειτουργίας του Ασύρματου Συστήματος Μέτρησης.....	120
7.1	Διαβάθμιση σε Νερό	121
7.2	Διαβάθμιση με Μεταλλικό Αντικείμενο.....	128
7.3	Συμπεράσματα από τη Διαβάθμιση	132
	Επίλογος	133
8.1	Γενικά Συμπεράσματα.....	133
8.2	Μελλοντική Εργασία και Επεκτάσεις.....	134
	Βιβλιογραφία	136
	Ηλεκτρονικά Σχέδια Κόμβων	1
A.1	Ηλεκτρονικό Σχέδιο Κόμβου Συντονισμού	1
A.2	Ηλεκτρονικό Σχέδιο Κόμβου Αισθητήρων.....	2

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Α.Δ.Α., Wireless Sensor Networks –WSN) είναι ένα σχετικά νέο πεδίο έρευνας που συνεχώς αναπτύσσεται. Ήδη χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές όπως στρατιωτικές, εμπορικές, ανθρωποκεντρικές και παρακολούθησης περιβάλλοντος [01]. Οι ειδικές ανάγκες των εφαρμογών αυτών, πολλές φορές καθορίζουν τις προδιαγραφές των Α.Δ.Α. και θέτουν τις κατευθύνσεις για την έρευνα. Έτσι, ξεπερνιούνται συνεχώς περιορισμοί και δύνεται η δυνατότητα στα Α.Δ.Α. να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικότερα και να δοκιμαστούν σε νέες εφαρμογές. Η ανάγκη για μέτρηση της θερμοκρασίας με αυξημένη ακρίβεια από ένα Α.Δ.Α. έχει δημιουργηθεί κυρίως από εφαρμογές συλλογής ιατρικών δεδομένων, όπου η συνεχής και με ακρίβεια παρακολούθηση της θερμοκρασίας του ασθενή, μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες για την κατάσταση και την πορεία της υγείας του. Επίσης η τάση που επικρατεί στη σύγχρονη γεωργία και ονομάζεται γεωργία ακριβείας, βασίζεται στα Α.Δ.Α. και απαιτεί και αυτή αξιόπιστες μετρήσεις θερμοκρασίας για την καλύτερη παρατήρηση και εκτίμηση της κατάστασης των καλλιεργειών. Για τους παραπάνω λόγους, η σχεδίαση ενός ασύρματου συστήματος με δυνατότητα μέτρησης θερμοκρασίας με υψηλή ακρίβεια, αποτελεί ένα πεδίο με μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον.

1.1 Σκοπός Μεταπτυχιακής Διατριβής

Σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η σχεδίαση και η υλοποίηση ενός ασύρματου συστήματος μέτρησης θερμοκρασίας χαμηλού κόστους και μεγάλης ακρίβειας. Το σύστημα αυτό θα βασίζεται στα πρότυπα των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Α.Δ.Α - WSN) και θα αποτελείται από έναν τουλάχιστον ασύρματο κόμβο αισθητήρων (node), έναν κόμβο συντονισμού (controller) και το περιβάλλον διασύνδεσης του συστήματος με τον χρήστη.

Στον ασύρματο κόμβο αισθητήρων ο στόχος είναι η πραγματοποίηση μετρήσεων θερμοκρασίας με ακρίβεια μεγαλύτερη από $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Αυτό θα επιχειρηθεί να επιτευχθεί επιλέγοντας έναν κατάλληλο αισθητήρα, σχεδιάζοντας το κύκλωμα σύνδεσης του αισθητήρα με τον ασύρματο κόμβο και βαθμονομώντας τον αισθητήρα (calibration) με τη βοήθεια λογισμικού. Οι μετρήσεις που θα πραγματοποιεί ο ασύρματος κόμβος αισθητήρων θα στέλνονται στον κόμβο συντονισμού ο οποίος θα συνδέεται ενσύρματα με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή του χρήστη. Από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή ο χρήστης θα έχει τη δυνατότητα τόσο για τον έλεγχο των ασύρματων κόμβων, όσο και για την αποθήκευση, απεικόνιση και επεξεργασία των μετρήσεων.

1.2 Βασικά Ερευνητικά Ερωτήματα

Σε σύγκριση με τα κλασικά δίκτυα υπολογιστών, τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων συναντούν περιορισμούς σε υπολογιστική ισχύ, αποθήκευση δεδομένων και κατανάλωση ενέργειας. Οι περιορισμοί αυτοί θέτουν τα όρια στις δυνατότητές τους. Από την άλλη πλευρά η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών, προσφέρει ισχυρότερους μικροελεγκτές και καλύτερων προδιαγραφών περιφερειακές συσκευές (όπως ADCs και ασύρματες μονάδες) που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Ο συνδυασμός των ηλεκτρονικών αυτών, με αισθητήρες μεγάλης ακρίβειας και λειτουργικές τεχνικές βαθμονόμησης, μπορούν να έχουν σαν αποτέλεσμα την επίτευξη καλύτερων μετρήσεων από συστήματα με περιορισμένους πόρους όπως τα Α.Δ.Α. Τα ερωτήματα λοιπόν που καλούνται να απαντηθούν από αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή, είναι η ακρίβεια με την οποία μπορεί να μετρηθεί η θερμοκρασία από ασύρματους κόμβους και κάτω υπό ποιες συνθήκες και προϋποθέσεις η ακρίβεια αυτή μπορεί να βελτιωθεί.

1.3 Ανασκόπηση Ερευνητικού Πεδίου

Η μέτρηση της θερμοκρασίας σε πολλαπλά σημεία από Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων έχει δώσει λύσεις σε πολλές εφαρμογές και για το λόγο αυτό έχει αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον. Για παράδειγμα για τη βελτιστοποίηση διαχείρισης ενέργειας σε συστήματα κλιματισμού, οι V. Boonsawat, J. Ekchamanonta, K. Bumrungkhe και S. Kittiriyakul [19], μέτρησαν τη θερμοκρασία σε διαφορετικά σημεία του κτιρίου, υλοποιώντας ένα ασύρματο δίκτυο χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα ανάπτυξης Arduino και μονάδες επικοινωνίας τεχνολογίας Zigbee. Μια αντίστοιχη υλοποίηση έχουν εφαρμόσει και οι Wen-Tsai Sung, Jui-Ho Chen, Ching-Li Hsiao και Jia-Syun Lin [48] για παρακολούθηση και διαμόρφωση του κλίματος σε θερμοκήπια.

Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, η ακρίβεια στη μέτρηση της θερμοκρασίας εξαρτάται από την ακρίβεια του αισθητήρα και την ακρίβεια με την οποία ο ασύρματος κόμβος μπορεί να διαβάσει την έξοδο του αισθητήρα. Στην περίπτωση των αισθητήρων ολοκληρωμένου κυκλώματος με ψηφιακή έξοδο, ο ασύρματος κόμβος μπορεί μεν να διαβάζει χωρίς σφάλμα τις τιμές θερμοκρασίας, αλλά η ίδια η ακρίβεια των τιμών αυτών είναι περιορισμένη. Από την άλλη, οι μεγαλύτερης ακριβείας αναλογικοί αισθητήρες, χαρακτηρίζονται από μη γραμμική έξοδο και επιπλέον το σφάλμα του κυκλώματος διασύνδεσης του αισθητήρα με τον ασύρματο κόμβο, προστίθεται και αυτό στο συνολικό σφάλμα της μέτρησης. Έτσι, για την επίτευξη μιας μέτρησης θερμοκρασίας με ακρίβεια από έναν ασύρματο κόμβο που χρησιμοποιεί αναλογικό αισθητήρα, απαιτείται η προσαρμογή της μη γραμμικής εξόδου του και η διαβάθμιση (calibration) του αισθητήρα ή του συνολικού κυκλώματος λήψης της μέτρησης.

Για τη βελτίωση της ακριβείας στη μέτρηση της θερμοκρασίας με προσαρμογή της εξόδου σε αισθητήρες με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, έχουν δημοσιευτεί αρκετές μελέτες. Για παράδειγμα οι Utpal Sarma και Boruah [39], εφάρμοσαν μια μέθοδο πολυωνυμικής προσαρμογής. Στο σύστημα που υλοποίησαν, χρησιμοποίησαν για αισθητήρα ένα K τύπου θερμοστοιχείο και υπολόγισαν τη θερμοκρασία με ένα πολυώνυμο 9^{ου} βαθμού και τους συντελεστές που δίνει το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (NIST) για εύρος από 0 έως 200°C. Για τη μείωση των σφαλμάτων που προκύπτουν από τη διαφορά της απόκρισης μεταξύ του θερμοστοιχείου και του αισθητήρα αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας θερμοκρασίας σε ψηφιακό σήμα (TDC) ο οποίος είναι και αυτός που περιορίζει και την συνολική ακρίβεια του συστήματος. Η διαβάθμιση έγινε σε λουτρό με υψηλή θερμοκρασία (100.2 °C) και η ακρίβεια του συστήματος ήταν $\pm 0.08^\circ\text{C}$ στη θερμοκρασία αυτή.

Η διαβάθμιση των αισθητήρων των ασύρματων κόμβων με λογισμικό τρόπο κατά την προετοιμασία ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων, είναι μια δημοφιλής πρακτική. Εφαρμόζοντας την πρακτική αυτή, οι Tourancheau, Mazzer, Gavan, Kuznik και Krauss [51], πρότειναν ένα τμήμα λογισμικού για τον μικροελεγκτή κάθε ασύρματου κόμβου που βελτιώνει την ακρίβεια μέτρησης των ενσωματωμένων ολοκληρωμένων αισθητήρων τους.

Η βασική δυσκολία στη διαβάθμιση των αναλογικών αισθητήρων θερμοκρασίας (όπως θερμοστοιχείων και θερμίστορ), είναι η αυξημένη μη γραμμικότητά τους. Τη λύση στο πρόβλημα αυτό έρχονται να δώσουν αρκετές ερευνητικές προτάσεις που ασχολούνται αποκλειστικά με τη βαθμονόμηση μη γραμμικών αισθητήρων. Οι Rivera, Herrera, και Chacon [38], παρουσίασαν μια βελτίωση στον προοδευτικό πολυωνυμικό αλγόριθμο, που διευκολύνει τη διαδικασία βαθμονόμησης και μπορεί να εφαρμοστεί σε έξυπνους αισθητήρες προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα αυτόματης βαθμονόμησης. Η πρότασή τους βασίζεται στη μέθοδο βαθμονόμησης που υποβλήθηκε από τους Lyahou, Horn και Huijsing [29], αλλά είναι βελτιωμένη σε δύο σημεία: την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου σε σχέση με το ποσοστό της μη γραμμικότητας του σήματος εισόδου, και τη βελτιστοποίηση της μεθόδου για την επίτευξη του ελάχιστου σφάλματος. Στην έρευνά τους, λαμβάνεται ένας ελάχιστος αριθμός σημείων βαθμονόμησης και γίνεται αξιολόγηση σύμφωνα με το σωστό αριθμό σημείων βαθμονόμησης, για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, η λειτουργία του αλγορίθμου για διαφορετικούς αισθητήρες καθίσταται ευκολότερη και η εφαρμογή μπορεί να μειώσει το κόστος βαθμονόμησης. Για την αποτίμηση της μεθόδου σχεδιάστηκε ένα σύστημα μέτρησης της θερμοκρασίας που βασίζεται σε ένα θερμίστορ που παρουσιάζει υψηλό δείκτη μη γραμμικότητας.

Μια διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα της διαβάθμισης έκαναν οι Danisman, Dalkiran και Celebi [18]. Πρότειναν μια τεχνική που βασίζεται σε ένα μοντέλο Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (Artificial Neural Network). Πραγματοποίησαν μια διαδικασία εκπαίδευσης με πολυεπίπεδα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα Πρόσθιας Τροφοδότησης (Multilayer Perceptrons, MLP) με τη χρήση του αλγορίθμου LM. Η τεχνική αυτή είχε σαν αποτέλεσμα την αυτόματη ακύρωση του σφάλματος ενίσχυσης και αντιστάθμισης του κυκλώματος επεξεργασίας σήματος. Παρόλο που η τεχνική εφαρμόστηκε σε διάφορους τύπους αισθητήρων θερμοστοιχείου, έχει την δυνατότητα να εφαρμοστεί σε όλα τα συστήματα μετρήσεων που βασίζονται σε μη γραμμικούς αισθητήρες.

Κατά την τελευταία δεκαετία τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης για τη διάγνωση και τη θεραπεία ασθενειών. Η

μέτρηση της θερμοκρασίας του δέρματος με τα δίκτυα αυτά, έχει ωθήσει τους ερευνητές σε μελέτες για ασύρματους κόμβους μικρούς σε όγκο, που θα μπορούν να λαμβάνουν μετρήσεις ακριβείας και θα έχουν μεγάλη αυτονομία. Η επίτευξη της μέτρησης της θερμοκρασίας με μεγάλη ακρίβεια από τους μικρούς αυτούς ασύρματους κόμβους, επιχειρείται συνήθως με τον συνδυασμό της προσαρμογής της μη γραμμικής εξόδου αναλογικών αισθητήρων ακριβείας και μιας αποδοτικής διαβάθμισης του κυκλώματος λήψης της μέτρησης. Στη συνέχεια της ερευνητικής αυτής ανασκόπησης, παρουσιάζονται με περισσότερες λεπτομέρειες, δυο από τις σημαντικότερες προσπάθειες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας με ακρίβεια από ασύρματους κόμβους σε ιατρικές εφαρμογές και οι οποίες αποτελούν την αφετηρία για την έρευνα της μεταπτυχιακής αυτής διατριβής.

Στο 5^ο Διεθνές Συνέδριο για Δίκτυα Σώματος (BodyNets) το 2010, οι Wei Chen, Sietse Dols, Sidarto Oetomo και Loe Feijs, παρουσίασαν την έρευνά τους για την μέτρηση της θερμοκρασίας σώματος σε νεογνά με φορητούς αισθητήρες [15]. Σχεδίασαν μια μαλακή ζώνη από υφάσματα μπαμπού και ενσωμάτωσαν μέσα σε αυτή έναν μικρό αισθητήρα θερμοκρασίας θερμίστορ (NTC Mon-A-Therm 90045). Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε πάνω από το ήπαρ και για να περιοριστούν οι εξωτερικές επιδράσεις, μονώθηκε με αφρό μαλακού βαμβακιού (soft cotton foam). Τα καλώδια σύνδεσης, αντικαταστάθηκαν με αγωγία κλωστοϋφαντουργικά νήματα για μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια. Το εύρος μέτρησης για τη συσκευή αυτή είναι από +25°C μέχρι +43°C και πριν την εφαρμογή ο αισθητήρας χρειάζεται διαβάθμιση για μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι δοκιμές στις πραγματικές συνθήκες μιας κλινικής, έδειξαν πως η διαφορά της θερμοκρασίας για το εύρος αυτό ήταν $\pm 0.1^\circ\text{C}$ σε σχέση με τις ενδείξεις των συμβατικών οργάνων παρακολούθησης ασθενών (Solar[®] 8000M) της κλινικής. Για ασύρματη επικοινωνία σε ιατρικό περιβάλλον, η Wei Chen μαζί με τους Nguyen, Coops, Oetomo και Feijs, αναπτύσσουν ένα σύστημα [16] που βασίζεται στην Bluetooth ασύρματη μονάδα BlueSMiRF και μια πλατφόρμα Arduino pro mini με ενσωματωμένο τον μικροελεγκτή της Atmel ATmega168. Το σύστημα αυτό, μπορεί να μεταδώσει δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες σε μια απόσταση 20 μέτρων.

Το 2011, οι Carlo Alberto Boano, Matteo Lasagni, Kay Romer και Tanja Lange, παρουσίασαν ένα σύστημα ασύρματων αισθητήρων [11], για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας του σώματος σε πραγματικό χρόνο και 24ωρη βάση. Το πρωτότυπο αυτό σύστημα είναι βασισμένο στους ασύρματους κόμβους του ινστιτούτου Tyndall των 10mm [23] και 25mm [09]. Ο κόμβος Tyndall των 10mm έχει διαστάσεις 10x10x3 mm και είναι σχεδιασμένος για να υποστηρίξει πολύ μικρή κατανάλωση ρεύματος με μόλις 3.3μΑ στην λειτουργία ύπνου (sleep mode). Αποτελείται από την μονάδα ασύρματης επικοινωνίας nRF9e5 της Nordic Semiconductor (συχνότητα λειτουργίας

433MHz) και έναν μικροελεγκτή τύπου 8051. Ο μικροελεγκτής παρέχει έναν 10-Bit (επεκτάσιμο έως 12) μετατροπέα ADC που υποστηρίζει 100k δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Ο μικροελεγκτής περιλαμβάνει επίσης μνήμη RAM 256 byte, και το πρόγραμμα για την συγκεκριμένη εφαρμογή φορτώνεται στο πρώτο μισό (4 kB) μιας μνήμης EEPROM (Atmel AT25640A). Το δεύτερο μισό (4 kB) χρησιμοποιείται για την αποθήκευση δεδομένων. Ο μικρός αυτός κόμβος Tyndall συνδέθηκε από την ομάδα του Boano με δυο αισθητήρες θερμίστορ (NTC - MF51E) για μέτρηση της θερμοκρασίας στο δέρμα και πάνω από αυτό. Η διασύνδεση αυτή έγινε με την κατασκευή μιας ηλεκτρονικής πλακέτας που παρέχει σταθερό ρεύμα διέγερσης στο θερμίστορ και μεταφράζει την αντίστασή του σε τάση στην έξοδό της. Η τροφοδοσία της συσκευής, έγινε με μια μπαταρία λιθίου (Lithium Thionyl) χωρητικότητας 420mAh και δίνει αυτονομία για αρκετές εβδομάδες. Ο κόμβος Tyndall των 25mm είναι ένας ισχυρότερος κόμβος και αποτελείται από το μικροελεγκτή της Atmel ATmega128 και την μονάδα ασύρματης επικοινωνίας nRF9e5. Δημιουργεί με τους κόμβους των 10mm ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρα και χρησιμοποιείται για να αποθηκεύει τα δεδομένα που του στέλνουν οι μικροί κόμβοι μέχρι ο ασθενής να μπει στην εμβέλεια ενός σταθμού βάσης όπου οι μετρήσεις μπορούν να φορτωθούν αυτόματα σε έναν προσωπικό υπολογιστή. Η ακρίβεια στη μέτρηση της θερμοκρασίας από αυτό το σύστημα για εύρος από +16°C έως +42°C, μπορεί να φτάσει τους $\pm 0.02^\circ\text{C}$. Για την επίτευξη αυτής της ακρίβειας εφαρμόζεται ο μέσος όρος τιμών από 50 δείγματα για μείωση του θορύβου και διαβάθμιση των αισθητήρων ξεχωριστά για τις ζώνες από +16°C έως +32.5°C και +32.5°C έως +42°C. Η διαβάθμιση των αισθητήρων πραγματοποιείται εισάγοντας η σημεία δεδομένων διαβάθμισης και δημιουργώντας ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων με 2 μεταβλητές και η εξισώσεις. Το σύστημα αυτό λύνεται με την τεχνική βελτιστοποίησης των μέσων των ελαχίστων τετραγώνων.

1.4 Δομή Διατριβής

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται έρευνα στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Ερευνάται η δομή των ασύρματων κόμβων, η επικοινωνία μεταξύ τους, καθώς και τα λειτουργικά συστήματα που χρησιμοποιούν.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια σύντομη αναφορά στον ορισμό, τις κλίμακες και τις τεχνικές μέτρησης της θερμοκρασίας.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται έρευνα στους πιο διαδεδομένους αισθητήρες θερμοκρασίας. Μελετώνται τα χαρακτηριστικά τους, οι διαφορετικοί τρόποι συνδεσμολογίας τους σε ένα κύκλωμα και γίνεται ανάλυση των σφαλμάτων τους.

Στο Κεφάλαιο 5 θέτονται οι προδιαγραφές του ασύρματου συστήματος μέτρησης που θα υλοποιηθεί και γίνεται έρευνα για την επιλογή των υλικών και των μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση του κυκλώματος διασύνδεσης του αισθητήρα και παρουσιάζονται τα βασικά λειτουργικά μέρη του συστήματος που αναπτύχθηκαν.

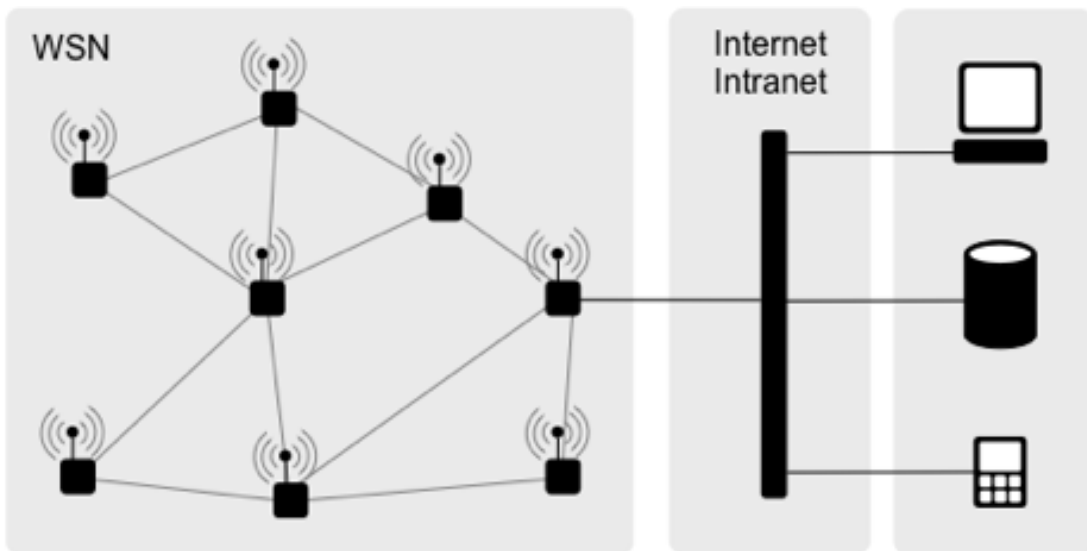
Στο Κεφάλαιο 7 επιχειρείται η αξιολόγηση του συστήματος στην ακρίβεια μέτρησης της θερμοκρασίας που μπορεί να επιτύχει. Για το λόγο αυτό, περιγράφεται μια σειρά από διαδικασίες διαβάθμισης που πραγματοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται σε γραφήματα.

Στο Κεφάλαιο 8 παραθέτονται τα γενικά συμπεράσματα, η μελλοντική εργασία και οι επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Η έρευνα και η τεχνολογική εξέλιξη σε πολλούς επιστημονικούς τομείς όπως της φυσικής, των υλικών και της μικροηλεκτρονικής, έχουν δώσει τη δυνατότητα ασύρματης δικτύωσης σε ένα μεγάλο πλήθος κυκλωμάτων χαμηλής ισχύος, εξοπλισμένα με μικροεπεξεργαστές, τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνίας και αισθητήρες. Η δυνατότητα ασύρματης δικτύωσης τέτοιων κυκλωμάτων έχουν δημιουργήσει μια ειδική κατηγορία υπολογιστικών δικτύων που μπορούν να οδηγήσουν στην υλοποίηση νέων εργαλείων παρακολούθησης φυσικών και περιβαλλοντολογικών φαινομένων όπως θερμοκρασία, δόνηση, πίεση, κίνηση ή ρύπους. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται «Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων» (Α.Δ.Α., Wireless Network Sensors - WNS) και αποτελούνται από μεμονωμένα ενσωματωμένα συστήματα (κόμβους) που παρακολουθούν το περιβάλλον τους μέσω αισθητήρων, επεξεργάζονται τα δεδομένα τοπικά και ανταλλάσσουν πληροφορίες ασύρματα με τους γειτονικούς τους κόμβους (Σχήμα 2.1). Τα δεδομένα παρακολούθησης μεταφέρονται σε μια κεντρική θέση ή βάση δεδομένων όπου μπορούν να παρατηρηθούν και να αναλυθούν. Η βάση δεδομένων μπορεί να δρα σαν διεπαφή μεταξύ των χρηστών και του δικτύου, έτσι ώστε κάποιος να μπορεί να ανακτήσει πληροφορίες από το δίκτυο με την εκτέλεση ερωτημάτων και συγκέντρωση αποτελεσμάτων από τη βάση αυτή.

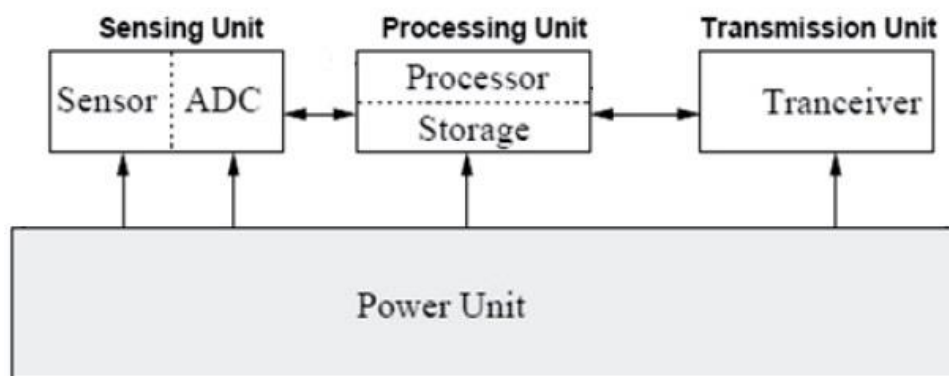


Σχήμα 2.1: Τυπικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων

Τα Α.Δ.Α. επιτρέπουν την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και απαιτούν μη συμβατική σχεδίαση πρωτοκόλλων εξ' αιτίας διάφορων περιορισμών. Λόγω της απαίτησης για χαμηλή πολυπλοκότητα της συσκευής σε συνδυασμό με τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (δηλ. μεγάλη διάρκεια ζωής του δικτύου), πρέπει να βρεθεί μια κατάλληλη ισορροπία μεταξύ των δυνατοτήτων επικοινωνίας και επεξεργασίας σήματος ή δεδομένων. Αυτό παρακινεί μια τεράστια ερευνητική δραστηριότητα, προσπάθεια τυποποίησης και βιομηχανική επένδυση στον τομέα αυτό την τελευταία δεκαετία. Στο μέλλον κάθε εφαρμογή Α.Δ.Α. θα ενσωματώνει ένα καλά καθορισμένο πρότυπο μίξης υλικού και λογισμικού. Προς το παρόν όμως οι σχεδιαστές των ασύρματων δικτύων έρχονται αντιμέτωποι με το περιεχόμενο και την κατανόηση των πολύπλοκων συμβιβασμών που πρέπει να γίνουν με μεταβλητές που περιλαμβάνουν το κόστος ανάπτυξης, την αξιοπιστία υλικού και λογισμικού, την ασφάλεια και τις επιδόσεις [02][31].

2.1 Δομή Ασύρματων Κόμβων Αισθητήρων

Η τμηματική σχεδιαστική προσέγγιση στο υλικό μέρος, παρέχει μια ευέλικτη και εύκολα προσαρμόσιμη πλατφόρμα για την αντιμετώπιση μιας ποικιλίας εφαρμογών. Για παράδειγμα, ανάλογα με τον αισθητήρα που θα τοποθετηθεί σε έναν κόμβο, το τμήμα διαχείρισης σήματος, μπορεί να επαναπρογραμματιστεί ή να αντικατασταθεί. Αυτό επιτρέπει μια ευρεία ποικιλία διαφορετικών αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έναν ασύρματο κόμβο αίσθησης. Με τον ίδιο τρόπο η ασύρματη επικοινωνία μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με την απαίτηση της εφαρμογής για ασύρματη εμβέλεια ή την ανάγκη για αμφίδρομη επικοινωνία. Για το λόγο αυτό ένας κόμβος αισθητήρων αποτελείται τυπικά από τέσσερις μονάδες που μπορεί να είναι ξεχωριστές ή ενσωματωμένες στο ίδιο σύστημα. Αυτές είναι οι μονάδες αισθητήρων, επεξεργασίας, ασύρματης επικοινωνίας και τροφοδοσίας (Σχήμα 2.2). Μπορεί επίσης να περιλαμβάνει επιπρόσθετες μονάδες που να εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή, όπως ένα σύστημα εύρεσης θέσης (GPS), αποστολής μηνυμάτων (GSM), ή μια μονάδα σύνδεσης με υπολογιστή (USB) ή δίκτυα άλλων ειδών (π.χ. Ethernet, Wi-Fi κ.τ.λ.). Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τις βασικές μονάδες και τα κυριότερα στοιχεία από τα οποία αποτελούνται.



Σχήμα 2.2: Οι βασικές μονάδες του κόμβου αισθητήρων.

2.1.1 Μονάδα Ανίχνευσης

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων οι οποίοι μπορούν να συνδεθούν με έναν ασύρματο κόμβο. Το χαρακτηριστικό που καθορίζει τον τρόπο διασύνδεσής τους είναι η μορφή της εξόδου τους. Αυτή μπορεί να είναι είτε αναλογική (όπως αντίσταση, τάση, ένταση κ.τ.λ.), είτε ψηφιακή (όπως ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας). Όταν η μορφή της εξόδου του αισθητήρα είναι ψηφιακή, η διασύνδεσή του μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας απλά κάποιες από τις ψηφιακές

εισόδους/εξόδους του μικροελεγκτή και το κατάλληλο λογισμικό για την διαχείρισή τους. Στην περίπτωση αυτή η μονάδα ανίχνευσης αποτελείται μόνο από τον ψηφιακό αισθητήρα, κάτι που απλοποιεί κατά πολύ τον σχεδιασμό του ασύρματου κόμβου.

Όταν το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι αναλογικό, η μονάδα ανίχνευσης συνήθως αποτελείται από δυο υπομονάδες. Η πρώτη υπομονάδα αποτελείται από τον αναλογικό αισθητήρα, το κύκλωμα για τη διέγερσή του (αν απαιτείται) και το κύκλωμα προσαρμογής του σήματος εξόδου του. Η δεύτερη υπομονάδα είναι ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter - ADC). Ο ADC μετατρέπει το αναλογικό σήμα που παράγεται από την έξοδο του κυκλώματος του αισθητήρα σε ψηφιακό και με αυτό τροφοδοτεί τη μονάδα επεξεργασίας μέσω των ψηφιακών εισόδων του μικροελεγκτή [31]. Πολλοί μικροελεγκτές διαθέτουν ενσωματωμένους μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό σε αναλογικές εισόδους. Η χρήση των εισόδων αυτών, όταν το επιτρέπουν οι προδιαγραφές της εφαρμογής, απλοποιούν και εξοικονομούν χώρο για το κύκλωμα του ασύρματου αισθητήρα.

Η διαδικασία μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό εξαρτάται από δύο παραμέτρους. Το αναλογικό σήμα πρέπει να κβαντιστεί, δηλαδή να μετατραπεί από μία συνεχή τιμή σήματος σε μια διακριτή τιμή σήματος (διακριτή τόσο σε χρόνο όσο και μέγεθος). Η πρώτη σημαντική απόφαση στο στάδιο αυτό είναι ο προσδιορισμός του αριθμού των επιτρεπόμενων διακριτών τιμών ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από τη συχνότητα και το μέγεθος του σήματος όπως επίσης και από την διαθέσιμη επεξεργαστική ισχύ και μνήμη. Η δεύτερη σημαντική απόφαση είναι η συχνότητα δειγματοληψίας. Στη μηχανική της επικοινωνίας και της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, η συχνότητα δειγματοληψίας αποφασίζεται από τη συχνότητα Nyquist. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων όμως, η συχνότητα Nyquist δεν αρκεί λόγω του αυξημένου θορύβου και απαιτείται υπερδειγματοληψία. Η κύρια συνέπεια για την πρώτη περίπτωση (Nyquist δειγματοληψία) είναι το σφάλμα κβαντισμού, ενώ για τη δεύτερη (υπερδειγματοληψία) είναι η αναδίπλωσης φάσματος.

Μια μονάδα ADC ορίζεται, μεταξύ άλλων, όσον αφορά και την ανάλυσή της. Η ανάλυση αποτελεί έκφραση του αριθμού των δυαδικών ψηφίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κωδικοποιηθούν την ψηφιακή έξοδο. Για παράδειγμα, ένας ADC με ανάλυση 24 bit μπορεί να αναπαραστήσει 16.777.216 ξεχωριστές διακριτές τιμές. Η «ανάλυση τάσης» ενός ADC είναι ίση με τη συνολική κλίμακα μέτρησης της τάσης διαιρούμενης δια του αριθμού των διακριτών διαστημάτων και εκφράζεται με τον τύπο:

$$Q = \frac{E_{pp}}{2^M}$$

όπου Q είναι η ανάλυση σε volts ανά βήμα εξόδου, E_{pp} είναι η αναλογική τάση peak-to-peak και M είναι η ανάλυση του ADC σε bits. Εδώ το Q υποδηλώνει ότι το διάστημα μεταξύ των διακριτών βημάτων (τιμές) είναι ομοιόμορφο. Στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει αφού στους περισσότερους ADC, το λιγότερο σημαντικό bit αλλάζει κάθε 0.5 της τάσης Q και το περισσότερο σημαντικό bit αλλάζει κάθε 1,5 της τάσης Q. Τα διαστήματα που έχουν ανάλυση την τάση Q, βρίσκονται στη μέση του εύρους εισόδου του ADC [12].

Κατά την επιλογή ενός ADC, η γνώση της διεργασίας ή της δραστηριότητας που παρακολουθείται είναι σημαντική. Σε μια βιομηχανική διεργασία της οποίας η θερμοκρασία κυμαίνεται από -20 έως 80 °C, η επιλογή του αισθητήρα καθώς και του ADC εξαρτάται από τον τύπο της θερμικής μεταβολής που ενδιαφέρει. Αν για παράδειγμα, μια μεταβολή των 0,5 °C είναι απαραίτητη, ένας ADC με ανάλυση 8 bits είναι επαρκής. Εάν, από την άλλη, μια αλλαγή των 0.0625 °C είναι απαραίτητη, τότε ο ADC πρέπει να έχει μια ανάλυση 11 δυαδικών ψηφίων.

2.1.2 Μονάδα Επεξεργασίας

Η μονάδα επεξεργασίας συνδέεται συνήθως με μια μικρή μονάδα αποθήκευσης και διαχειρίζεται τις διαδικασίες που κάνουν τον κόμβο αισθητήρων να συλλέγει πληροφορίες και να συνεργάζεται με τους άλλους κόμβους. Χρησιμοποιώντας μνήμη flash, οι απομακρυσμένοι κόμβοι μπορούν να αποκτήσουν δεδομένα από έναν σταθμό βάσης, ή ένα γεγονός που ανιχνεύεται από μία ή περισσότερες εισόδους αίσθησης στον κόμβο. Για την μονάδα επεξεργασίας συνήθως χρησιμοποιείται ένας μικροελεγκτής ο οποίος είναι ένας υπολογιστής σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Σήμερα απλά συστήματα, όπως ανελκυστήρες, εξαεριστήρες, μηχανές γραφείου, οικιακές συσκευές, ηλεκτρικά εργαλεία και παιχνίδια ενσωματώνουν τέτοιους μικροελεγκτές.

Ένας μικροελεγκτής συνήθως αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά:

- έναν πυρήνα επεξεργαστή που κυμαίνεται από έναν μικρό και απλό 4-bit επεξεργαστή ή έναν περισσότερο πολύπλοκο 32 ή 64-bit επεξεργαστή.
- μια μνήμη RAM για την αποθήκευση των δεδομένων.

- μια μνήμη ROM, EPROM, EEPROM, ή flash για την αποθήκευση σχετικά απλού κώδικα εντολών.
- παράλληλες διεπαφές εισόδου/εξόδου (I/O interfaces)
- διακριτά bits εισόδου και εξόδου, που επιτρέπει τον έλεγχο ή την ανίχνευση της λογικής κατάστασης ενός ακροδέκτη.
- μια γεννήτρια ρολογιού (clock generator) η οποία είναι συνήθως ένας ταλαντωτής χρονισμού με έναν κρύσταλλο χαλαζία.
- έναν ή περισσότερους εσωτερικούς μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADCs).
- διεπαφές σειριακής επικοινωνίας, όπως Serial Peripheral Interface και Controller Area Network για τη διασύνδεση των περιφερειακών του συστήματος, όπως μετρητές γεγονότων (event counters), χρονόμετρα (timers), ή χρονόμετρα επαγρύπνησης (watchdog timers).

Σε σχέση με άλλους τύπους επεξεργαστών περιορισμένης κλίμακας, οι μικροελεγκτές επιλέγονται για τους ασύρματους κόμβους αισθητήρων λόγω της ευελιξίας που προσφέρουν στον προγραμματισμό. Η συμπαγής κατασκευή τους, το μικρό μέγεθός τους, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και το χαμηλό κόστος τους, τους καθιστούν κατάλληλους για την κατασκευή υπολογιστικά λιγότερο απαιτητικών, αυτόνομων εφαρμογών. Οι περισσότεροι από τους εμπορικά διαθέσιμους μικροελεγκτές, μπορούν να προγραμματιστούν με τη γλώσσα assembly και τη γλώσσα προγραμματισμού C [19].

Οι λειτουργίες του μικροελεγκτή σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων περιλαμβάνουν:

- Διαχείριση της συλλογής δεδομένων από τους αισθητήρες.
- Εκτέλεση λειτουργιών διαχείρισης ενέργειας.
- Διασύνδεση των δεδομένων του αισθητήρα με το ασύρματο φυσικό επίπεδο.
- Διαχείριση του πρωτοκόλλου ασύρματου δικτύου.

Βασική προτεραιότητα για κάθε μικροελεγκτή είναι η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται από το σύστημα. Συνήθως η ασύρματη μονάδα απαιτεί τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας. Για το λόγο αυτό, τα δεδομένα πρέπει να αποστέλλονται μέσω της ασύρματης ζεύξης μόνο όταν αυτό απαιτείται. Ένας αλγόριθμος στον μικροελεγκτή πρέπει να προσδιορίζει το πότε θα γίνεται αυτό με βάση τα περιστατικά που ανιχνεύονται. Επίσης

σημαντική είναι και η ελαχιστοποίηση της ισχύς που καταναλώνεται από τον αισθητήρα. Ο μικροελεγκτής θα πρέπει να ελέγχει με σύνεση την τροφοδοσία ή το σήμα διέγερσης στον αισθητήρα [31].

2.1.3 Μονάδα Ασύρματης Επικοινωνίας

Η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας είναι η μονάδα που συνδέει τον κόμβο με άλλους κόμβους και γενικότερα με το υπόλοιπο δίκτυο. Η σύνδεση αυτή γίνεται μέσω των ελεύθερων για κάθε χώρα ISM (Industrial – Scientific - Medical) RF συχνοτήτων. Η επιλογή της μονάδας ασύρματης επικοινωνίας στους κόμβους αισθητήρων, εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και ειδικότερα από παράγοντες όπως:

- συχνότητα RF μετάδοσης (π.χ. 868MHz ή 2.4GHz)
- ρυθμό μετάδοσης (π.χ. 250KBps)
- απόσταση μετάδοσης
- χρήση συγκεκριμένων πρωτοκόλλων (π.χ. της σουίτας IP)
- τοπολογία του δικτύου (π.χ. αστέρα ή πλέγματος)
- μέγεθος του δικτύου
- διαλειτουργικότητα του δικτύου
- κατανάλωση ενέργειας

Η ανάγκη για διαλειτουργικότητα των δικτύων, έχει επιβάλει τη σύσταση οργανισμών για την ανάπτυξη προτύπων ασύρματης επικοινωνίας. Κάθε πρότυπο προσπαθεί να δώσει λύσεις σε συγκεκριμένες ανάγκες της ασύρματης σύνδεσης, εστιάζοντας σε χαρακτηριστικά όπως η κατανάλωση ενέργειας, η εμβέλεια των κόμβων ή η σύνδεση με το Διαδίκτυο. Πάνω σε αυτά τα πρότυπα βασίζουν οι κατασκευαστές τις λύσεις που προσφέρουν. Έτσι, έχει δημιουργηθεί μια ποικιλία από ασύρματες μονάδες επικοινωνίας που υποστηρίζουν τεχνολογίες βασισμένες στα πρότυπα αυτά. Οι κυριότερες από αυτές τις τεχνολογίες είναι:

- Wi-Fi
- Bluetooth
- Zigbee

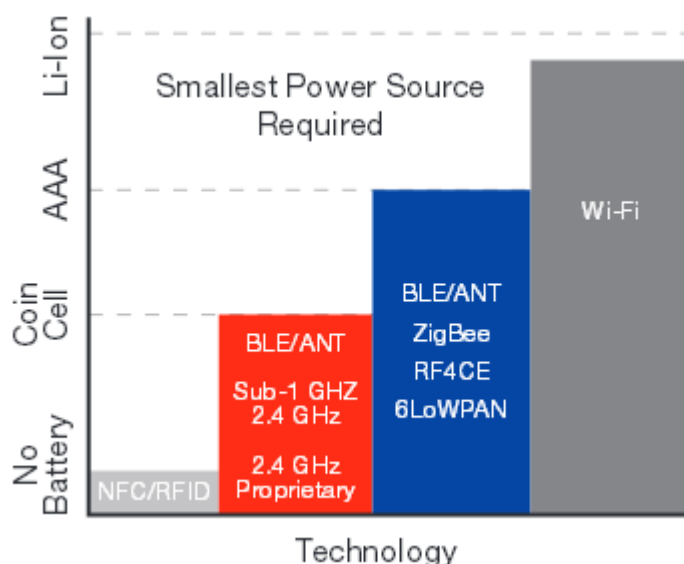
- 6LoWPAN
- Sub-1GHz
- Proprietary 2.4GHz
- RF4CE
- NFC/RFID

Στην Παράγραφο 2.2.4 γίνεται αναφορά στους οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων και διαχείρισης προγραμμάτων πιστοποίησης συμβατότητας. Ακόμα εξετάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δημοφιλέστερων τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σήμερα.

2.1.4 Μονάδα Τροφοδοσίας

Η μονάδα τροφοδοσίας είναι μια από τις σημαντικότερες μονάδες του κόμβου αισθητήρων. Οι ασύρματοι κόμβοι χρειάζονται μια τάση τροφοδοσίας για τη λειτουργία των υπόλοιπων μονάδων. Ο μικροελεγκτής για παράδειγμα της μονάδας επεξεργασίας, χρειάζεται μια τάση που κυμαίνεται συνήθως από 1.8 έως 5.5V. Ακόμα η μονάδα ανίχνευσης απαιτεί μια τάση για την διέγερση των αισθητήρων, την τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών που διαμορφώνουν το σήμα της εξόδου του αισθητήρα και την τροφοδοσία του μετατροπέα του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Η μονάδα όμως που απαιτεί την περισσότερη ενέργεια και καθορίζει τις προδιαγραφές του ασύρματου κόμβου, είναι η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας.

Οι ασύρματοι κόμβοι, λόγω του ότι συνήθως κατανέμονται σε ένα εξωτερικό περιβάλλον, είναι δύσκολο να τροφοδοτηθούν με τάση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι η τροφοδοσία τους γίνεται με μικρού μεγέθους μπαταρίες και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να υποστηριχτεί και από συλλέκτες ενέργειας όπως οι ηλιακές κυψέλες. Ο τύπος των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στους ασύρματους κόμβους, συνήθως εξαρτάται από την απαίτηση για αυτονομία της εφαρμογής του Α.Δ.Α. και σχετίζεται άμεσα με την τεχνολογία που χρησιμοποιεί η μονάδα επικοινωνίας. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.3), δίνεται μια ενδεικτική χρήση του τύπου της μπαταρίας για την κάλυψη της ελάχιστης απαίτησης σε ενέργεια της κάθε τεχνολογίας [49].



Σχήμα 2.3: Ενδεικτική χρήση τύπου μπαταρίας, ανάλογα της τεχνολογίας επικοινωνίας

2.1.5 Διασύνδεση Υπομονάδων Ασύρματων Κόμβων

Ο τρόπος που τα επιμέρους τμήματα διασυνδέονται με τη μονάδα επεξεργασίας ενός κόμβου Α.Δ.Α., είναι σημαντικής σημασίας. Το κόστος σε ενέργεια και η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων μεταξύ των υποσυστημάτων του, είναι κρίσιμη για τη συνολική απόδοση του δικτύου. Ωστόσο, το μικρό μέγεθος του κόμβου εισάγει έναν περιορισμό στους διαύλους του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επικοινωνία μέσω ενός παράλληλου διαύλου είναι ταχύτερη από την επικοινωνία μέσω ενός σειριακού, ένας παράλληλος δίαυλος χρειάζεται περισσότερο χώρο. Επιπλέον απαιτεί μια ειδική γραμμή για κάθε υποσύστημα που πρέπει να μεταδώσει ταυτόχρονα, ενώ αντίθετα ο σειριακός δίαυλος απαιτεί μόνο μία γραμμή δεδομένων. Λόγω του μεγέθους του κόμβου, συνήθως στο σχεδιασμό του δεν υποστηρίζονται παράλληλοι δίαυλοι και συχνά γίνεται επιλογή μεταξύ σειριακών διασυνδέσεων όπως:

- serial peripheral interface (SPI)
- general purpose input/output (GPIO)
- secure data input/output (SDIO)
- inter-integrated circuit (I²C)
- Universal Serial Bus (USB)

Μεταξύ αυτών, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διασυνδέσεις είναι η SPI και η I²C.

Το Serial Peripheral Interface (SPI) είναι ένας υψηλής ταχύτητας, αμφίδρομος, σύγχρονος σειριακός διάυλος. Αναπτύχθηκε από τη Motorola στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Αυτό δεν είναι επίσημο πρότυπο ως έχει, αλλά οι κατασκευαστές που δημιουργούν συσκευές που χρησιμοποιούν το SPI πρέπει να συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές της υλοποίησης των άλλων κατασκευαστών προκειμένου να στηρίξουν τη σωστή επικοινωνία (για παράδειγμα, οι συσκευές θα πρέπει να συμφωνήσουν για το αν θα μεταδώσει πρώτα το πιο σημαντικό bit (MSB) ή το λιγότερο σημαντικό bit (LSB)).

Ο SPI διάυλος ορίζει τέσσερις ακροδέκτες:

- Master-Out/Slave-In (MOSI)
- Master-In/Slave-Out (MISO)
- Serial Clock (SCLK)
- Chip Select (CS)

Το inter-integrated circuit (I²C) είναι ένας multi-master half-duplex σύγχρονος σειριακός διάυλος. Αναπτύχθηκε από την Philips Semiconductors η οποία είναι επίσης και ο ιδιοκτήτης του επίσημου προτύπου. Το I²C χρησιμοποιεί μόνο δύο αμφίδρομες γραμμές (σε αντίθεση με το SPI το οποίο χρησιμοποιεί τέσσερις). Ο στόχος του I²C είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος για τη σύνδεση συσκευών σε ένα σύστημα με την αποδοχή μικρότερων ταχυτήτων μετάδοσης. Το I²C ορίζει δύο διαθέσιμες ταχύτητες: μια γρήγορη μέθοδο (Fast-Mode) με ρυθμό μετάδοσης έως 400 kbps και μια υψηλής ταχύτητας μέθοδο (High-Speed-Mode, αναφέρεται ως Hs-mode) η οποία υποστηρίζει ρυθμό μετάδοσης έως και 3,4 Mbps. Ο ρυθμός 100 kbps (Standard-mode) ορίστηκε σε προηγούμενες εκδόσεις. Παρ' όλα αυτά, οι συσκευές Fast-Mode και Hs-mode, είναι συμβατές προς τα κάτω για την εξασφάλιση της επικοινωνίας με παλαιότερες συσκευές. Ο Πίνακας 2.1 παρέχει μια σύγκριση μεταξύ SPI και I²C [19].

SPI	I ² C
<p>Τέσσερις γραμμές επιτρέπουν full-duplex μετάδοση.</p> <p>Δεν απαιτείται απόδοση διευθύνσεων. Αυτό αυξάνει την απόδοση αλλά απαιτεί επιπλέον υλικό για σύνδεση περισσότερων συσκευών slave.</p> <p>Επιτρέπει μόνο μια συσκευή master για να αποφεύγει τις συγκρούσεις.</p> <p>Οι απαιτήσεις της υποστήριξης υλικού αυξάνονται με την αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών, αυξάνοντας και το κόστος.</p> <p>Το ρολόι της συσκευής master έχει ρυθμιστεί ανάλογα με την ταχύτητα της slave. Αυτό ελευθερώνει τις συσκευές slave από την απαίτηση χρονισμού. Ωστόσο, η προσαρμογή της ταχύτητας επιβραδύνει την συσκευή master.</p> <p>Η ταχύτητα εξαρτάται από τη μέγιστη ταχύτητα της βραδύτερης συσκευής.</p> <p>Διαφορετικού μεγέθους καταχωρητής επιτρέπει την ευελιξία στις συσκευές που υποστηρίζονται.</p> <p>Ο συνδυασμός των καταχωρητών συνεπάγεται ότι διαβάζεται κάθε μετάδοση.</p> <p>Η απουσία ενός επίσημου προτύπου οδηγεί σε υλοποιήσεις συγκεκριμένων εφαρμογών.</p>	<p>Δυο γραμμές ελαττώνουν το χώρο και απλοποιούν τη διάταξη. Χαμηλότερο κόστος.</p> <p>Η απόδοση διευθύνσεων ενεργοποιεί τη λειτουργία multimaster mode η οποία με τη σειρά της, επιτρέπει περισσότερες από μία συσκευές να εκκινήσουν επικοινωνία.</p> <p>Η λειτουργία multimaster mode είναι επιρρεπής σε συγκρούσεις, όταν δύο ή περισσότερες συσκευές master επικοινωνούν ταυτόχρονα. Η διαιτησία είναι απαραίτητη.</p> <p>Οι απαιτήσεις υλικού είναι ανεξάρτητες από τον αριθμό των συσκευών που χρησιμοποιούν το δίαυλο.</p> <p>Πιο αργές συσκευές μπορεί να παρατείνουν το ρολόι αυξάνοντας έτσι την καθυστέρηση και κρατώντας άλλες συσκευές σε αναμονή για την πρόσβαση στο δίαυλο.</p> <p>Η ταχύτητα περιορίζεται στα 3.4MHz και όλες οι συσκευές πρέπει να υποστηρίζουν την υψηλότερη ταχύτητα που χρησιμοποιείται στο σύστημα. Διαφορετική μια πιο αργή συσκευή μπορεί λανθασμένα να ανιχνεύσει τη διεύθυνση συσκευής της.</p> <p>Η ομοιογένεια μεγέθους του καταχωρητή μειώνει την επιβάρυνση από το ότι δεν απαιτούνται πρόσθετα bits ελέγχου για μετάδοση.</p> <p>Οι συσκευές που δεν διαβάζουν ή παρέχουν δεδομένα, δεν είναι υποχρεωμένες να παρέχουν εν δυνάμει άχρηστα bytes</p> <p>Επίσημο πρότυπο διευκολύνει την ενσωμάτωση συσκευών δεδομένου ότι οι σχεδιαστές μπορούν να βασιστούν σε συγκεκριμένη υλοποίηση.</p>

Πίνακας 2.1: Σύγκριση SPI και I²C πρωτοκόλλων.

2.1.6 Πρότυποι Κόμβοι Αισθητήρων

Η πλειοψηφία της έρευνας στα δίκτυα αισθητήρων έχει επικεντρωθεί γύρω από της γενιές των κόμβων-αισθητήρων που αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο του Berkeley. Ανάμεσα στους πρώτους κόμβους που κατασκευάστηκαν εκεί είναι οι RF Mote και weC motes, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν ως RF πομποδέκτη το ολοκληρωμένο TR1000 και τον μικροελεγκτή AT90LS8535 της Atmel.

Οι εμπορικοί κόμβοι αισθητήρων θα μπορούσαν να διαχωριστούν σε αυτούς των χαμηλών και αυτούς των υψηλών επιδόσεων. Οι κόμβοι των χαμηλών επιδόσεων χαρακτηρίζονται από τις περιορισμένες τους δυνατότητες σε θέματα επεξεργασίας δεδομένων, μνήμης και επικοινωνίας. Σχεδιάστηκαν για να συνδέονται σε μεγάλους αριθμούς μέσα σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων και να εκτελούν καθήκοντα αίσθησης παρέχοντας παράλληλα μια υποδομή διασύνδεσης. Οι κύριοι εκπρόσωποι των κόμβων αυτών είναι:

- **Mica:** Η οικογένεια κόμβων Mica παράγεται από την Crossbow [17] και αποτελείται από τα Mica, Mica2, MicaZ και IRIS. Κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με έναν 8-bit Atmel AVR μικροελεγκτή με ταχύτητα 4-16MHz και προγραμματιζόμενη μνήμη flash 128-256kB. Παρά το ότι οι μικροελεγκτές της οικογένειας Mica είναι παρόμοιοι, οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με ένα ευρύ φάσμα από πομποδέκτες. Ο κόμβος Mica περιλαμβάνει ένα 916 ή 433MHz πομποδέκτη στα 40 kbps, ενώ ο κόμβος Mica2 είναι εξοπλισμένος με έναν 433/868/916 MHz πομποδέκτη στα 40 kbps. Από την άλλη μεριά οι κόμβοι MicaZ και IRIS έχουν πομποδέκτες συμβατούς με το πρότυπο IEEE 802.15.4 που λειτουργούν σε συχνότητα 2.4GHz και ρυθμό μετάδοσης 250 kbps. Κάθε κόμβος έχει περιορισμένη μνήμη σε RAM (4-8 kB) και μνήμη δεδομένων (521 kB). Επιπρόσθετα κάθε κόμβος έχει μια 51 pin σύνδεση που χρησιμεύει για τη σύνδεση επιπλέον μονάδας αισθητήρων ή προγραμματισμού.
- **Telos/Tmote:** Για τους κόμβους Telos και Tmote Sky από την Sentilla (άλλοτε Moteiv) υιοθετήθηκε μια αρχιτεκτονική παρόμοια με αυτή του κόμβου MicaZ. Ενώ ο πομποδέκτης παραμένει ανέπαφος, οι κόμβοι Telos/Tmote έχουν μεγαλύτερη RAM αφού χρησιμοποιούν έναν 8MHz TI MSP430 μικροελεγκτή με 10 kB RAM. Επιπλέον οι κόμβοι αυτοί μπορούν να συνδεθούν με μια ποικιλία από αισθητήρες όπως φωτός, IR, υγρασίας, θερμοκρασίας και να επικοινωνήσουν μέσω USB που περιορίζει τις ανάγκες για επιπλέον μονάδες αίσθησης ή προγραμματισμού. Εκτός αυτών, συμπεριλαμβάνονται και ακροδέκτες για σύνδεση επιπλέον αισθητήρων.

- **EYES:** Ο κόμβος EYES σχεδιάστηκε σαν αποτέλεσμα ενός ευρωπαϊκού προγράμματος τριών χρόνων και έχει παρόμοια αρχιτεκτονική με τους Telos/Tmote κόμβους. Στον κόμβο αυτό χρησιμοποιείται ένας 16bit μικροελεγκτής με 60 kB μνήμη προγραμματισμού και 2 kB μνήμη δεδομένων [24]. Με τον κόμβο EYES υπάρχουν ενσωματωμένοι αισθητήρες πυξίδας, επιτάχυνσης, θερμοκρασίας, φωτός και πίεσης. Περιλαμβάνει τον πομποδέκτη TR1001 ο οποίος υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης μέχρι 115.2 kbps με ενεργειακή κατανάλωση 14.4mW, 16.0mW και 15.0μW κατά την μετάδοση, τη λήψη και την λειτουργία ύπνου (sleep mode) αντίστοιχα. Ο κόμβος επίσης περιλαμβάνει μια RS232 σειριακή διεπαφή για προγραμματισμό.

Επιπρόσθετα της αίσθησης, της τοπικής επεξεργασίας και της επικοινωνίας πολλαπλών αλμάτων, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρειάζονται και επιπρόσθετη λειτουργικότητα που δεν μπορεί να διεξαχθεί με τους κόμβους χαμηλών επιδόσεων. Υψηλών απαιτήσεων λειτουργίες όπως η διαχείριση του δικτύου, απαιτούν συγκριτικά μεγάλη επεξεργαστική ισχύ και μνήμη. Ακόμα η ένταξη των Α.Δ.Α. σε υπάρχουσες υποδομές δικτύων απαιτεί πολλαπλές τεχνικές επικοινωνίας για την ενσωμάτωση μέσω συσκευών πύλης (gateways). Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων αυτών, έχουν σχεδιαστεί υψηλών επιδόσεων κόμβοι για τα Α.Δ.Α.. Αναφέρονται ενδεικτικά μερικοί από αυτούς:

- **Stargate:** Ο Stargate είναι ένας υψηλών επιδόσεων επεξεργασίας κόμβος, σχεδιασμένος για αίσθηση, επεξεργασία σήματος, έλεγχο και διαχείριση δικτύου. Βασίζεται στον Intel PXA-255 Xscale 400MHz RISC επεξεργαστή ο οποίος είναι ο ίδιος επεξεργαστής που υπάρχει σε πολλούς υπολογιστές χειρός όπως ο Compaq IPAQ και ο Dell Axim. Έχει 32MB μνήμη flash, 64MB SDRAM, μια ενσωματωμένη υποδοχή για σύνδεση με κόμβους της οικογένειας Mica καθώς και σύνδεση με PCMCIA Bluetooth ή IEEE 802.11 κάρτες. Μπορεί λοιπόν να δουλεύει σαν ασύρματη πύλη και σαν υπολογιστικό κέντρο για επεξεργασία αλγορίθμων μέσα στο δίκτυο. Όταν συνδέεται με μια δικτυακή κάμερα ή άλλη συσκευή καταγραφής, μπορεί να λειτουργήσει σαν ένας μεσαίας ανάλυσης αισθητήρας πολυμέσων, αν και η κατανάλωση ενέργειας παραμένει υψηλή [04]. Το Stargate NetBridge αναπτύχθηκε σαν ο διάδοχος του Stargate και βασίζεται στον Intel IXP420 XScale 266MHz επεξεργαστή. Περιλαμβάνει μια ενσύρματη θύρα Ethernet, δυο USB 2.0 πόρτες, 8MB flash προγραμματισμού, 32MB RAM και 2GB USB 2.0 δίσκο συστήματος στον οποίο τρέχει λειτουργικό Linux.
- **Imote και Imote2:** Η Intel ανέπτυξε δυο πρωτότυπες γενιές ασύρματων αισθητήρων γνωστές σαν Imote και Imote2 για υψηλές επιδόσεις αίσθησης και εφαρμογές πύλης. Ο

κόμβος Imote είναι χτισμένος πάνω σε έναν ολοκληρωμένο ασύρματο μικροελεγκτή που αποτελείται από έναν 8bit, 12MHz ARM7 επεξεργαστή, έναν πομποδέκτη Bluetooth, 64kB RAM, 32kB μνήμη flash, καθώς και πολλές επιλογές εισόδων/εξόδων. Η δεύτερη γενιά των κόμβων της Intel, το Imote2, είναι χτισμένο γύρω από τον μικρής κατανάλωσης νέο 32bit, PXA271 XScale, 320/416/520 επεξεργαστή, ο οποίος επιτρέπει DSP λειτουργίες για αποθήκευση ή συμπίεση, και ένα πομποδέκτη IEEE 802.15.4 ChipCon CC2420. Έχει RAM και flash μνήμη στα 32MB, επιπρόσθετη υποστήριξη για εναλλακτικούς πομποδέκτες και μια ποικιλία από μεγάλης ταχύτητας εισόδους/εξόδους για σύνδεση ψηφιακών αισθητήρων ή κάμερας. Το μέγεθός του είναι πολύ μικρό, 48x33 mm, και μπορεί να τρέξει το λειτουργικό σύστημα Linux και εφαρμογές Java [02].

Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των γνωστότερων πρότυπων κόμβων αισθητήρων.

Mote type	CPU speed (MHz)	Prog. mem. (kB)	RAM (kB)	Radio freq. (MHz)	Tx. rate (kbps)
<i>Berkeley [3]</i>					
WeC	8	8	0.5	916	10
rene	8	8	0.5	916	10
rene2	8	16	1	916	10
dot	8	16	1	916	10
mica	6	128	4	868	10/40
mica2	16	128	4	433/868/916	38.4 kbaud
micaz	16	128	4	2.4 GHz	250
Cricket [3]	16	128	4	433	38.4 kbaud
EyesIFX [17]	8	60	2	868	115
TelosB/Tmote [3]	16	48	10	2.4 GHz	250
SHIMMER [16]	8	48	10	BT/2.4 GHz ^a	250
Sun SPOT [9]	16–60	2 MB	256	2.4 GHz	250
BTnode [1]	8	128	64	BT/433–915 ^a	Varies
IRIS [3]	16	128	8	2.4 GHz	250
V-Link [15]	N/A	N/A	N/A	2.4 GHz	250
TEHU-1121 [7]	N/A	N/A	N/A	0.9/2.4 GHz	N/A
NI WSN-3202 [6]	N/A	N/A	N/A	2.4 GHz	250
Imote [3]	12	512	64	2.4 GHz (BT)	100
Imote2 [3]	13–416	32 MB	256	2.4 GHz	250
Stargate [3]	400	32 MB	64 MB SD	2.4 GHz	Varies ^b
Netbridge NB-100 [3]	266	8 MB	32 MB	Varies ^b	Varies ^b

^a BTnode and SHIMMER motes are equipped with two transceivers: Bluetooth and a low-power radio.

^b The transmission rate of the Stargate board and the Netbridge depends on the communication device connected to it (MicaZ node, WLAN card, etc.).

Πίνακας 2.2: Σύγκριση πρότυπων κόμβων αισθητήρων[02].

2.2 Ασύρματη Σύνδεση Κόμβων

Οι κόμβοι αισθητήρων συνήθως διασπείρονται σε ένα πεδίο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Κάθε ένας από τους διάσπαρτους κόμβους έχει δυνατότητα συλλογής δεδομένων και αποστολής τους στη βάση δεδομένων με αποδέκτη τον τελικό χρήστη. Όπως φαίνεται και στο σχήματα 2.1 η βάση δεδομένων μπορεί να επικοινωνεί με τον κόμβο διαχείρισης μέσω του διαδικτύου ή δορυφορικά.

2.2.1 Κανάλια Συχνοτήτων και Διεθνείς Κανονισμοί

Οι ραδιοφωνικές μεταδόσεις ρυθμίζονται σε παγκόσμια κλίμακα από οργανισμούς όπως η «Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών» (Federal Communications Commission - FCC) στις Ηνωμένες Πολιτείες και η «Διάσκεψη των Ταχυδρομικών και Τηλεπικοινωνιακών Οργανισμών» (Conference of Postal and Telecommunications Administrations - CEPT) στην Ευρώπη. Αυτοί οι οργανισμοί κατανέμουν ζώνες συχνοτήτων για συγκεκριμένη χρήση και οδηγούν πρότυπα και σχέδια πιστοποίησης για ραδιοπομπούς. Το μεγαλύτερο μέρος από το χρησιμοποιήσιμο φάσμα έχει οριστεί να χρησιμοποιείται κατόπιν άδειας στις περισσότερες περιοχές, δηλαδή οι χρήστες πρέπει να αγοράσουν μια άδεια από την τοπική ρυθμιστική αρχή για να λειτουργήσουν ένα ραδιοπομπό σε ένα καθορισμένο κανάλι συχνότητας.

Ο τομέας ραδιοεπικοινωνιών της Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU), ο οποίος συντονίζει την κοινή παγκόσμια χρήση του ραδιοφωνικού φάσματος, έχει δεσμεύσει κάποιες ζώνες συχνοτήτων για βιομηχανικές (Industrial), επιστημονικές (Scientific) και ιατρικές (Medical) εφαρμογές (ISM). Αυτές οι ISM συχνότητες είναι χωρίς άδεια, και διαφέρουν ελαφρώς από χώρα σε χώρα. Οι δημοφιλείς ISM ζώνες συχνοτήτων των τελευταίων ετών είναι τα 433MHz, 868MHz, 915MHz και 2.4GHz που χρησιμοποιούνται από ασύρματα συστήματα επικοινωνίας όπως τηλεχειριστήρια, ασύρματα τηλέφωνα και Wi-Fi αντίστοιχα. Η ζώνη των 2.4 GHz έγινε πολύ δημοφιλής επειδή επιτρέπεται η χρήση της χωρίς άδεια σε όλες τις χώρες, κάνοντας έτσι την ανάπτυξη και διανομή των προϊόντων που βασίζονται σε αυτή ευκολότερη.

Κατά γενικό κανόνα, οι υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων προσφέρουν περισσότερα κανάλια και μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ως εκ τούτου μπορούν να εξυπηρετούν μεγαλύτερα δίκτυα και να μεταφέρουν περισσότερα δεδομένα. Οι χαμηλότερες συχνότητες ραδιοκυμάτων διαδίδονται

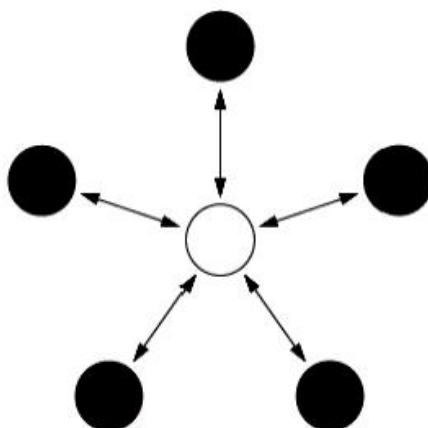
καλύτερα από ό, τι οι υψηλότερες συχνότητες και για αυτό μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερη έκταση, ειδικά στο εσωτερικό των κτιρίων.

2.2.2 Τοπολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την τοπολογία τους. Τοπολογία ενός ασύρματου δικτύου είναι ο τρόπος με τον οποίο οι κόμβοι του είναι διασπαρμένοι στο χώρο επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι δυο βασικές τοπολογίες δικτύων είναι η τοπολογία αστέρα και η τοπολογία πλέγματος. Η μίξη αυτών των δύο, μπορεί να δώσει μια υβριδική τοπολογία αστέρα-πλέγματος που γίνεται όλο και περισσότερο δημοφιλής αφού συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο βασικών τοπολογιών. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά στον τρόπο λειτουργίας και τα χαρακτηριστικά της κάθε τοπολογίας.

Τοπολογία Αστέρα

Στην τοπολογία αστέρα (Σχήμα 2.4), ένας κεντρικός σταθμός μπορεί να στέλνει και να δέχεται μηνύματα από έναν αριθμό απομακρυσμένων κόμβων. Οι απομακρυσμένοι κόμβοι δεν επιτρέπεται να στέλνουν μηνύματα απευθείας ο ένας στον άλλον.



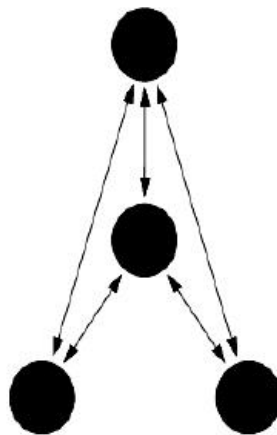
Σχήμα 2.4: Τοπολογία αστέρα

Τα πλεονεκτήματα της τοπολογίας αυτής για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η απλότητα και η ικανότητα να κρατηθεί η κατανάλωση ενέργειας του απομακρυσμένου κόμβου στο ελάχιστο. Επιτρέπει επίσης την χαμηλή καθυστέρηση στην επικοινωνία του απομακρυσμένου κόμβου με τον κεντρικό σταθμό.

Το μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι ότι ο κεντρικός σταθμός πρέπει να βρίσκεται εντός της εμβέλειας επικοινωνίας όλων των απομακρυσμένων κόμβων, κάτι που περιορίζει σημαντικά το χώρο κάλυψης του ασύρματου δικτύου. Επίσης η διαχείριση (και επομένως η εξάρτηση), ολόκληρου του δικτύου από τον κεντρικό σταθμό, δημιουργεί θέματα αξιοπιστίας.

Τοπολογία Πλέγματος

Στην τοπολογία πλέγματος (Σχήμα 2.5) επιτρέπεται η μετάδοση δεδομένων από έναν κόμβο του δικτύου σε έναν άλλο που βρίσκεται εντός του εύρους μετάδοσής του. Αυτό επιτρέπει αυτό που είναι γνωστό ως επικοινωνία πολλαπλού άλματος (multi-hop). Αυτό σημαίνει ότι εάν ένας κόμβος θέλει να στείλει ένα μήνυμα σε έναν άλλο κόμβο που βρίσκεται εκτός της εμβέλειας μετάδοσης, μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα ενδιάμεσο κόμβο για να διαβιβάσει το μήνυμα στον επιθυμητό κόμβο.



Σχήμα 2.5: Τοπολογία πλέγματος

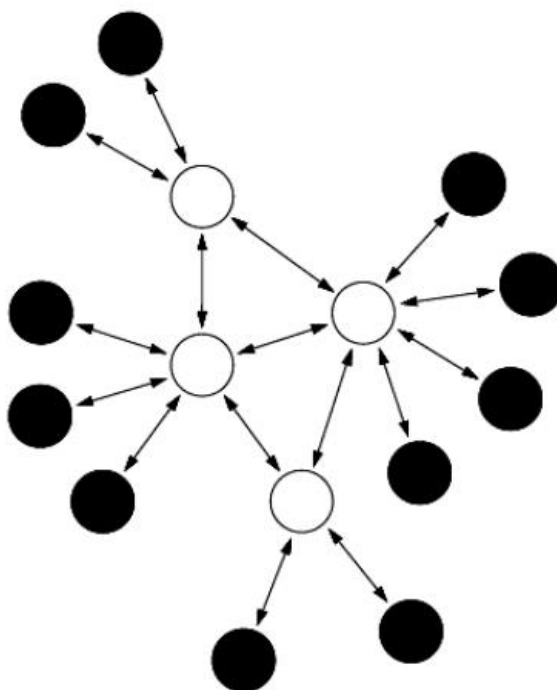
Τα πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας δικτύου είναι ο πλεονασμός και η κλιμάκωση. Εάν ένας μεμονωμένος κόμβος αποτύχει, οι υπόλοιποι κόμβοι εξακολουθούν να μπορούν να επικοινωνήσουν με οποιονδήποτε άλλο κόμβο μέσα στην εμβέλειά τους, ο οποίος με τη σειρά του μπορεί να διαβιβάσει το μήνυμα στην επιθυμητή θέση. Επιπλέον το εύρος του δικτύου δεν περιορίζεται αναγκαστικά από το εύρος της εμβέλειας κάθε μεμονωμένου κόμβου αλλά μπορεί να επεκταθεί απλά με την προσθήκη περισσότερων κόμβων στο σύστημα.

Το μειονέκτημα στην τοπολογία πλέγματος είναι η κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους που εφαρμόζουν το πολλαπλό άλμα και που γενικά είναι υψηλότερη από τους κόμβους που δεν

έχουν αυτή τη δυνατότητα. Επίσης εάν η λειτουργία «χαμηλής ισχύος» των κόμβων είναι μια απαίτηση, καθώς ο αριθμός των αλμάτων για την αποστολή ενός μηνύματος αυξάνεται, ο χρόνος για να παραδοθεί το μήνυμα αυξάνεται και αυτός.

Υβριδική Τοπολογία Αστέρα-Πλέγματος

Ένα υβριδικό δίκτυο μεταξύ αστέρα και πλέγματος (Σχήμα 2.6), μπορεί να εξασφαλίσει ένα ανθεκτικό και ευέλικτο δίκτυο επικοινωνιών και να διατηρήσει στο ελάχιστο την κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους αισθητήρων. Στην τοπολογία αυτή, οι κόμβοι αισθητήρων με τη χαμηλότερη ενέργεια απενεργοποιούν τη δυνατότητα διαβίβασης μηνυμάτων. Αυτό επιτρέπει να διατηρηθεί η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, οι άλλοι κόμβοι στο δίκτυο με ενεργοποιημένη τη δυνατότητα πολλαπλού άλματος, τους επιτρέπεται να διαβιβάζουν μηνύματα από τους κόμβους χαμηλής ενέργειας σε άλλους κόμβους στο δίκτυο. Σε γενικές γραμμές οι κόμβοι με δυνατότητα πολλαπλών αλμάτων είναι μεγαλύτερης κατανάλωσης και αν είναι δυνατόν, συχνά συνδέονται σε γραμμή ηλεκτρικού ρεύματος. Η υλοποίηση αυτής της τοπολογίας κυριαρχεί και τείνει να γίνει πρότυπο δικτύωσης πλέγματος, γνωστό και ως ZigBee.

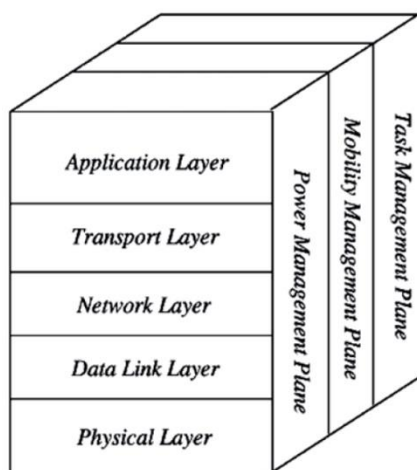


Σχήμα 2.6: Υβριδική τοπολογία αστέρα-πλέγματος.

2.2.3 Στοιβά Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα συστήματα επικοινωνίας χρησιμοποιούν ένα σύνολο κανόνων και προτύπων για τη μορφοποίηση των δεδομένων και τον έλεγχο της ανταλλαγής δεδομένων. Το πιο κοινό μοντέλο σε συστήματα επικοινωνίας δεδομένων, είναι το μοντέλο «διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων» (Open Systems Interconnection - OSI), το οποίο διασπά την επικοινωνία σε 7 λειτουργικά στρώματα και διευκολύνει την υλοποίηση κλιμακωτών και διαλειτουργικών δικτύων. Υλοποιήσεις σε απλουστευμένες εκδοχές του OSI δίνουν τις στοιβές πρωτοκόλλων, με γνωστότερη τη στοιβή TCP/IP που είναι μια συλλογή πρωτοκόλλων επικοινωνίας στα οποία βασίζεται το Διαδίκτυο αλλά και μεγάλο ποσοστό των εμπορικών δικτύων.

Η στοιβή πρωτοκόλλων που χρησιμοποιείται συνήθως στα Α.Δ.Α., δίνεται στο σχήμα 2.7. Η στοιβή πρωτοκόλλων των Α.Δ.Α. συνδυάζει τις ενεργειακές ανάγκες με τις ανάγκες δικτύωσης και ασύρματης επικοινωνίας, προάγοντας την συνεργασία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων.



Σχήμα 2.7: Στοιβά πρωτοκόλλων Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (wsn protocol stack).

Η στοιβή πρωτοκόλλων των Α.Δ.Α. αποτελείται από το επίπεδο εφαρμογής, το επίπεδο μεταφοράς, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο ζεύξης δεδομένων, το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο διαχείρισης ενέργειας, το επίπεδο διαχείρισης κινητικότητας, και το επίπεδο διαχείρισης εργασιών.

- Στο επίπεδο εφαρμογής (Application Layer) διαφορετικοί τύποι εφαρμογών λογισμικού μπορούν να κατασκευαστούν και να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τη λειτουργία των

αισθητήρων. Αυτό το επίπεδο καθιστά το υλικό και το λογισμικό του χαμηλότερου επιπέδου διαφανές για τον τελικό χρήστη.

- Το επίπεδο μεταφοράς (Transport Layer) βοηθά στη διαχείριση της ροής δεδομένων εάν η εφαρμογή του δικτύου αισθητήρων το απαιτεί. Είναι αναγκαίο για παράδειγμα, όταν το σύστημα χρειάζεται να είναι προσβάσιμο μέσω του Διαδικτύου ή άλλων εξωτερικών δικτύων.
- Το επίπεδο του δικτύου (Network Layer) φροντίζει για τη δρομολόγηση των δεδομένων που παρέχονται από το επίπεδο μεταφοράς και ειδικά για τη δρομολόγηση των πολλαπλών αλμάτων του ασύρματου πρωτοκόλλου μεταξύ των κόμβων αισθητήρων.
- Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer) είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία της ροής δεδομένων, την ανίχνευση πλαισίου, τον έλεγχο πρόσβασης μέσου και τον έλεγχο σφάλματος. Σύμφωνα με το μοντέλο αναφοράς IEEE 802, το επίπεδο αυτό διαιρείται περαιτέρω στο στρώμα «λογικού ελέγχου σύνδεσης» (Logical Link Control) και στο στρώμα «ελέγχου πρόσβασης μέσου» (Medium Access Control) που λειτουργεί ακριβώς πάνω από το φυσικό επίπεδο (Physical Layer) αναλαμβάνοντας τον πλήρη έλεγχο του ασύρματου μέσου. Η κύρια λειτουργία του στρώματος MAC είναι να αποφασίζει πότε ένας κόμβος έχει πρόσβαση σε ένα κοινόχρηστο μέσο και να επιλύει τυχόν πιθανές συγκρούσεις μεταξύ ανταγωνιστικών κόμβων. Είναι επίσης υπεύθυνο για την διόρθωση των σφαλμάτων επικοινωνίας που συμβαίνουν στο φυσικό επίπεδο και την εκτέλεση άλλων δραστηριοτήτων όπως η πλαισίωση διευθύνσεων και ο έλεγχος ροής.
- Το φυσικό επίπεδο (Physical Layer) παρέχει υπηρεσίες για την διαχείριση του μέσου μετάδοσης. Καλύπτει τις τεχνικές για την ανάγκη μιας απλής αλλά ισχυρής διαμόρφωσης σήματος, την επιλογή συχνότητας, την κρυπτογράφηση και την αποστολή και λήψη των δεδομένων.

Επιπρόσθετα των επιπέδων αυτών, τα επίπεδα διαχείρισης των Α.Δ.Α. (ενέργειας, κινητικότητας και εργασιών) ελέγχουν την κατανάλωση ενέργειας, την κινητικότητα και την κατανομή εργασιών μεταξύ των κόμβων αισθητήρων με στόχο την συντονισμό των κόμβων στην συλλογή δεδομένων και τη μείωση της συνολικής κατανάλωση ενέργειας [31].

Τα δίκτυα πολλών επιπέδων επιτρέπουν μεγάλη ευελιξία και κλιμάκωση και για το λόγο αυτό τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα σήμερα έχουν υλοποιηθεί με αυτόν το τρόπο. Μια υλοποίηση όμως του δικτύου σε πολλά επίπεδα εισάγει πολυπλοκότητα και απαιτεί περισσότερο κώδικα

και μνήμη. Επίσης παράγει αύξηση του όγκου δεδομένων αφού κάθε στρώμα απαιτεί πρόσθετα μηνύματα διαμόρφωσης και ελέγχου [37].

Σε ένα εξειδικευμένο απλό τοπικό δίκτυο με καθόλου ή μικρή διαστρωμάτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ιδιόκτητο πρωτόκολλο μιας εφαρμογής που να τρέχει απευθείας πάνω από το φυσικό στρώμα που παρέχεται από ένα απλό ασύρματο πομποδέκτη. Ένα τέτοιο ιδιόκτητο πρωτόκολλο μπορεί να γίνει πολύ αποδοτικό και η σύνδεση στο Internet μπορεί να γίνει μέσω μιας πύλης. Η πύλη αυτή θα επικοινωνεί από τη μία πλευρά με τις τοπικές συσκευές που χρησιμοποιούν το ιδιωτικό πρωτόκολλο και από την άλλη πλευρά με συσκευές στο Internet μέσω της στοίβας πρωτοκόλλων TCP/IP.

2.2.4 Πρότυπα και Τεχνολογίες Ασύρματης Σύνδεσης Κόμβων

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στα συστήματα επικοινωνίας είναι η διαλειτουργικότητα, δηλαδή η ικανότητα ανταλλαγής δεδομένων συσκευών από διαφορετικούς προμηθευτές. Η αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης είναι ο κύριος στόχος πολλών οργανισμών προτύπων που καθορίζουν προδιαγραφές και διαδικασίες ελέγχου που έχουν σχεδιαστεί για να εξασφαλίζουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των συσκευών. Ορισμένα πρότυπα ορίζουν ένα ή περισσότερα επίπεδα δικτύου σύμφωνα με το μοντέλο OSI, ενώ άλλα ορίζουν τις προδιαγραφές ολόκληρου του δικτύου από άκρο σε άκρο.

Το «Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών» (IEEE) είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που ιδρύθηκε το 1963 και εστιάζει στην μηχανική της επικοινωνίας και της ραδιοεπικοινωνίας. Είναι γνωστός από τη συμβολή του στην τεχνολογία δικτύωσης μέσω της οικογένειας προτύπων IEEE 802.x που καθορίζει το «στρώμα ζεύξης» του δικτύου. Μερικά μέλη της οικογένειας προτύπων 802.x, είναι το 802.3 που ορίζει τις προδιαγραφές του Ethernet και διέπει σήμερα τα περισσότερα ενσύρματα δίκτυα υπολογιστών, το 802.11 που ορίζει τις προδιαγραφές του WLAN (Wireless Local Area Network) και είναι η βάση του προτύπου Wi-Fi και το 802.15.4 που ορίζει το πρότυπο WPAN (Wireless Personal Area Network) και χρησιμοποιείται στα ZigBee, 6LoWPAN και WirelessHART.

Ο Internet Engineering Task Force (IETF) είναι ένας οργανισμός ανοιχτών προτύπων που δημιουργήθηκε το 1986 ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη προτύπων του Διαδικτύου και κυρίως της σουίτας TCP/IP. Οι προδιαγραφές του IETF καθορίζονται με τη δημοσίευση ενός

προσχέδιου προδιαγραφών υπό τον τίτλο “request for comments” (RFCs). Το προσχέδιο RFC ακολουθείται από πολλές αξιολογήσεις και επεξεργασίες που γίνονται από τα μέλη του IETF μέχρι η προδιαγραφή να εγκριθεί σε κατάσταση «βέλτιστης τρέχουσας πρακτικής» (best current practice). Υπάρχουν χιλιάδες πρότυπα του Διαδικτύου που ορίζονται από τα προσχέδια προδιαγραφών του RFC. Μερικά παραδείγματα είναι το RFC 791 που περιγράφει το πρωτόκολλο IPv4, το RFC 793 που περιγράφει το πρωτόκολλο TCP και το RFC 2616 που καθορίζει το πρωτόκολλο HTTP/1.1.

Ο IETF όπως και το IEEE δεν τρέχουν προγράμματα πιστοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι οι προμηθευτές δεν μπορούν να πάρουν αναγνώριση από αυτούς τους οργανισμούς ότι τα προϊόντα τους συμμορφώνονται με οποιοδήποτε πρότυπο. Άλλοι οργανισμοί υιοθετούν πρότυπα από το IEEE και τον IETF και τα χρησιμοποιούν για να δημιουργήσουν προγράμματα πιστοποίησης. Αυτοί οι οργανισμοί υιοθετούν συχνά μόνο ένα μέρος του προτύπου του IEEE ή του IETF για διάφορους λόγους.

Τρεις γνωστοί οργανισμοί που διαχειρίζονται τα προγράμματα πιστοποίησης σήμερα για να εξασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ ασύρματα συνδεδεμένων συσκευών είναι οι Wi-Fi Alliance, Bluetooth Special Interest Group (SIG) και ZigBee Alliance. Και οι τρεις οργανισμοί παρέχουν στις εταιρείες μέλη τη δυνατότητα να λάβουν προϊόντα μέσα από ένα πρόγραμμα δοκιμών διαλειτουργικότητας, το οποίο χορηγεί δικαιώματα για τη χρήση του λογότυπου Wi-Fi, Bluetooth και ZigBee. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά με περισσότερες λεπτομέρειες στις βασικές τεχνολογίες ασύρματης σύνδεσης.

Wi-Fi

Η τεχνολογία Wi-Fi (Wireless Fidelity) στηρίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11 και αναπτύχθηκε ως μια ασύρματη αντικατάσταση του δημοφιλούς ενσύρματου IEEE 802.3 (Ethernet). Αν και η τεχνολογία Wi-Fi καθορίζει κυρίως το στρώμα ζεύξης ενός τοπικού δικτύου, αλληλεπιδρά σε τέτοιο βαθμό με τη στοίβα TCP/IP ώστε οι χρήστες που λένε ότι χρησιμοποιούν Wi-Fi εμμέσως εννοούν ότι χρησιμοποιούν και το πρωτόκολλο TCP/IP για σύνδεση στο Internet. Τα δίκτυα Wi-Fi έχουν συνήθως τοπολογία αστέρα με το «σημείο πρόσβασης» (access point –AP) να είναι η πύλη για το Internet. Η ισχύς εξόδου του Wi-Fi είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις την πλήρη κάλυψη ενός σπιτιού. Σε επιχειρήσεις και σε μεγάλα κτίρια,

συχνά τοποθετούνται περισσότερα από ένα AP σε διαφορετικές θέσεις στο εσωτερικό του κτιρίου για την αύξηση της κάλυψης του δικτύου.

Τα περισσότερα δίκτυα Wi-Fi λειτουργούν στην ελεύθερη ζώνη ISM 2.4GHz. Το Wi-Fi μπορεί επίσης να λειτουργεί και στη ζώνη των 5GHz, όπου υπάρχουν περισσότερα κανάλια και είναι διαθέσιμες υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Ωστόσο, δεδομένου ότι η ασύρματη κάλυψη των 5-GHz στο εσωτερικό των κτιρίων είναι μικρότερη σε σύγκριση με των 2.4 GHz, τα 5 GHz χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές επιχειρήσεων, μαζί με πολλαπλά APs για να εξασφαλιστεί η καλή κάλυψη Wi-Fi.

Το λογισμικό του Wi-Fi και του TCP/IP είναι αρκετά μεγάλο και πολύπλοκο. Για φορητούς υπολογιστές και smartphones με ισχυρούς μικροεπεξεργαστές (MPUs) και μεγάλες ποσότητες μνήμης, αυτό δεν θέτει κανένα πρόβλημα. Μέχρι πρόσφατα, η πρόσθεση Wi-Fi συνδεσιμότητας σε συσκευές με μικρή υπολογιστική ισχύ, όπως θερμοστάτες και οικιακές συσκευές, δεν ήταν δυνατή ή οικονομικά αποδοτική. Σήμερα, συσκευές πυριτίου και υπομονάδες που βγαίνουν στην αγορά, ενσωματώνουν το λογισμικό Wi-Fi και TCP/IP στο εσωτερικό της συσκευής. Αυτές οι νέες συσκευές επιτρέπουν την ασύρματη σύνδεση στο Internet σε μικρότερους σε ισχύ μικροεπεξεργαστές όπως τους μικροελεγκτές (MCUs).

Για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων (πάνω από 100Mbps σε ορισμένες περιπτώσεις) και καλή εσωτερική κάλυψη, το Wi-Fi έχει αρκετά μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα για ορισμένες συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες και δεν μπορούν να φορτίζονται συχνά. Νέες συσκευές πυριτίου εφαρμόζουν προηγμένα πρωτόκολλα ύπνου (sleep protocols) και γρήγορο on/off χρόνο για να μειώσουν δραματικά τη μέση κατανάλωση ενέργειας. Δεδομένου ότι πολλές ασύρματες συσκευές δεν χρειάζονται τις μέγιστες ταχύτητες δεδομένων, το Wi-Fi μπορεί να προσφέρει έξυπνη διαχείριση ενέργειας αντλώντας αποτελεσματικά για πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα, μικρές ποσότητες ρεύματος από την μπαταρία. Έτσι μπορεί να κρατήσει συσκευές που συνδέονται με το Διαδίκτυο για περισσότερο από ένα χρόνο, χρησιμοποιώντας μόνο δύο αλκαλικές μπαταρίες AA.

Bluetooth

Η τεχνολογία Bluetooth, το όνομά της οποίας προέρχεται από έναν αρχαίο σκανδιναβό βασιλιά, εφευρέθηκε από την Ericsson το 1994 ως πρότυπο για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των τηλεφώνων και των υπολογιστών. Το επίπεδο σύνδεσης του Bluetooth που λειτουργεί στη ζώνη των ISM 2.4GHz, ήταν παλαιότερα τυποποιημένο σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.1, αλλά σήμερα η τεχνολογία Bluetooth ελέγχεται από την Bluetooth SIG.

Το Bluetooth είναι μια τεχνολογία PAN (Personal Area Network) που σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως ως αντικατάσταση του καλωδίου για επικοινωνία περιορισμένου φάσματος. Υποστηρίζει μετάδοση δεδομένων έως και 2Mbps και παρόλο που πιο πολύπλοκες τοπολογίες περιλαμβάνονται στις προδιαγραφές του, το Bluetooth χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σε δίκτυα με τοπολογία σημείο προς σημείο (point-to-point) ή αστέρα. Απαιτεί αρκετά χαμηλή ενέργεια και οι συσκευές που το χρησιμοποιούν, τροφοδοτούνται συνήθως με μικρές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ή δύο αλκαλικές μπαταρίες.

Το **Bluetooth Low Energy** (επίσης γνωστό ως Bluetooth Smart) είναι μια πιο πρόσφατη προσθήκη στις προδιαγραφές του Bluetooth. Είναι σχεδιασμένο για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών Bluetooth και επιτρέπει τη λειτουργία για έτη με τη χρήση μπαταριών κέρματος. Υποστηριζόμενο από τη νέα γενιά των smartphones και των tablets, το Bluetooth Low Energy έχει επιταχύνει την ανάπτυξη της αγοράς Bluetooth και έχει επιτρέψει μια ευρεία γκάμα νέων εφαρμογών που καλύπτουν την υγεία, παιχνίδια, αυτοκίνητα και βιομηχανικούς χώρους.

Το "κλασικό" πρότυπο Bluetooth μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα έως και οκτώ συσκευές που συνδέονται σε ένα δίκτυο αστέρα. Το πρότυπο Bluetooth Low Energy αφαιρεί τον περιορισμό αυτό και μπορεί θεωρητικά να υποστηρίξει απεριόριστο αριθμό συσκευών, αλλά πρακτικά ο αριθμός των ταυτόχρονα συνδεδεμένων συσκευών είναι μεταξύ 10 και 20.

ZigBee

Η τεχνολογία ZigBee πήρε το όνομά της από το βούισμα (Waggle Dance) που κάνουν οι μέλισσες όταν επιστρέφουν ύστερα από μια πτήση, για να επικοινωνήσουν με τις άλλες μέλισσες της κυψέλης τους για την απόσταση, την κατεύθυνση και το είδος της τροφής που βρέθηκε. Αυτή η αντιστοίχιση φανερώνει και τη φύση του πλέγματος ZigBee όπου τα δεδομένα μεταπηδούν από κόμβο σε κόμβο, σε πολλαπλές κατευθύνσεις και μονοπάτια, σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα.

Με βάση το πρότυπο IEEE 802.15.4 του στρώματος ζεύξης, το ZigBee είναι μια τεχνολογία χαμηλής απόδοσης, χαμηλής ισχύος και χαμηλού κόστους. Δραστηριοποιείται κυρίως στην ζώνη ISM 2.4GHz, αν και τα χαρακτηριστικά του υποστηρίζουν επίσης και τις ζώνες 868MHz και 915MHz. Το ZigBee μπορεί να προσφέρει ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων έως 250kbps αλλά συνήθως χρησιμοποιείται σε πολύ χαμηλότερες ταχύτητες. Επίσης έχει την ικανότητα να διατηρεί πολύ μεγάλα διαστήματα ύπνου και χαμηλής κύκλους λειτουργίας (duty cycles) και μπορεί να τροφοδοτείται για χρόνια από μπαταρίες νομίσματος. Νέες συσκευές ZigBee που έρχονται στην αγορά, μπορούν να επιτρέψουν ακόμα και τεχνικές συλλογής ενέργειας για λειτουργία χωρίς μπαταρία.

Το πρότυπο ZigBee διατηρείται από την ZigBee Alliance. Η οργάνωση αυτή λειτουργεί προγράμματα πιστοποίησης εξασφαλίζοντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των συσκευών που επιτρέπεται να φορούν το λογότυπο Certified ZigBee. Το πρότυπο ορίζει τα ανώτερα στρώματα διαδικτύου πάνω από το στρώμα διασύνδεσης 802.15.4 και διάφορα προφίλ εφαρμογών επιτρέπουν πλήρη διαλειτουργικότητα σε εφαρμογές. Το ZigBee μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές αλλά έχει κερδίσει την μεγαλύτερη επιτυχία στην έξυπνη ενέργεια (smart energy), τον οικιακό αυτοματισμό (home automation) και τις εφαρμογές ελέγχου φωτισμού (lighting control), με κάθε τομέα να έχει ένα συγκεκριμένο προφίλ ZigBee και πιστοποίησης. Ένας άλλος λόγος που το πρότυπο ZigBee τα έχει πάει τόσο καλά σε αυτές τις περιοχές εφαρμογών είναι λόγω της τοπολογίας πλέγματος που μπορεί να περιλαμβάνει μέχρι και χιλιάδες κόμβους.

Μολονότι στο πρότυπο ZigBee υπάρχει προδιαγραφή για IP, αυτή δεν έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής στην βιομηχανία. Για τη σύνδεση με το Internet, τα δίκτυα ZigBee χρησιμοποιούν μια πύλη επιπέδου εφαρμογής. Η πύλη συμμετέχει ως ένας από τους κόμβους στο δίκτυο ZigBee και παράλληλα τρέχει μια στοίβα TCP/IP και εφαρμογή μέσω Ethernet ή Wi-Fi.

6LoWPAN

Το 6LoWPAN είναι ένα ακρωνύμιο για το IPv6 πάνω σε χαμηλής ισχύος ασύρματα προσωπικά δίκτυα (wireless Personal Area Networks). Η υπόσχεση του 6LoWPAN είναι να εφαρμόσει IP σε μικρότερες, χαμηλότερης κατανάλωσης και πιο περιορισμένες σε επεξεργαστική ισχύ συσκευές. Το 6LoWPAN είναι το πρώτο πρότυπο ασύρματης σύνδεσης που δημιουργήθηκε για το "Internet of Things". Είναι αρκετά νέο στην αγορά και οι αρχικές υλοποιήσεις του χρησιμοποιούν τις ISM ζώνες 2.4GHz και 868MHz/915MHz.

Το πρότυπο δημιουργήθηκε από την ομάδα εργασίας 6LoWPAN του IETF και επισημοποιήθηκε με το προσχέδιο προδιαγραφών RFC 6282 "Compression format for IPv6 datagrams over IEEE 802.15.4-based networks", το Σεπτέμβριο του 2011. Όπως φαίνεται από τον τίτλο του RFC, το πρότυπο 6LoWPAN ορίζει μόνο ένα αποδοτικό στρώμα προσαρμογής μεταξύ του στρώματος ζεύξης 802.15.4 και μιας στοίβας TCP/IP.

Ο όρος 6LoWPAN αόριστα χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για να αναφερθεί σε ολόκληρη τη στοίβα πρωτοκόλλων που περιλαμβάνουν το στρώμα ζεύξης 802.15.4, το στρώμα συμπίεσης κεφαλίδας IETF IP και μια στοίβα TCP/IP. Δυστυχώς δεν υπάρχει βιομηχανικό πρότυπο για ολόκληρη τη στοίβα πρωτοκόλλων, ούτε υπάρχει ένας οργανισμός προτύπων για την εκτέλεση προγραμμάτων πιστοποίησης για το 6LoWPAN. Δεδομένου ότι το στρώμα ζεύξης 802.15.4 έχει πολλαπλές προαιρετικές λειτουργίες, διάφοροι προμηθευτές μπορούν να εφαρμόσουν λύσεις που δεν είναι διαλειτουργικές σε επίπεδο τοπικού δικτύου, αλλά εξακολουθούν να τις αποκαλούν «δίκτυα 6LoWPAN». Οι συσκευές 6LoWPAN όμως που τρέχουν σε διαφορετικά δίκτυα, μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του Διαδικτύου υπό τον όρο ότι χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο εφαρμογής Internet. Επίσης μια συσκευή 6LoWPAN μπορεί να επικοινωνεί με οποιοδήποτε άλλο βασισμένο σε IP διακομιστή ή συσκευή στο διαδίκτυο, συμπεριλαμβανομένων συσκευών Wi-Fi και Ethernet.

Το IPv6 επιλέχθηκε ως το μόνο υποστηριζόμενο πρωτόκολλο IP στο 6LoWPAN (εξαιρουμένου του IPv4) επειδή υποστηρίζει ένα μεγαλύτερο χώρο διευθύνσεων και ως εκ τούτου πολύ μεγαλύτερα δίκτυα αλλά και επειδή έχει ενσωματωμένη υποστήριξη για αυτόματη διαμόρφωση δικτύου. Τα δίκτυα 6LoWPAN απαιτούν μια Ethernet ή Wi-Fi πύλη για την πρόσβαση στο Internet. Η πύλη αυτή που είναι επιπέδου IP (και όχι εφαρμογής), επιτρέπει στους 6LoWPAN κόμβους και τις εφαρμογές, άμεση πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο

μέρος του Διαδικτύου σήμερα εξακολουθεί να χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο IPv4, μια πύλη 6LoWPAN συνήθως περιλαμβάνει μια μετατροπή πρωτοκόλλου IPv6 σε IPv4.

RF Πομποδέκτες με Ιδιότητα Πρωτόκολλα

Σήμερα πολλές βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούν ιδιότητα πρωτόκολλα που τρέχουν πάνω σε ασύρματους πομποδέκτες. Ο πομποδέκτης παρέχει το στρώμα ζεύξης του δικτύου (ή πολλές φορές μόνο το φυσικό στρώμα). Το υπόλοιπο δικτυακό πρωτόκολλο υλοποιείται από OEM (Original Equipment Manufacturer). Συστήματα τέτοιας αρχιτεκτονικής, αφήνουν περισσότερη ευελιξία στον σχεδιαστή ενός συστήματος σε βάρος της διαλειτουργικότητας και της αναπτυξιακής προσπάθειας. Λόγο του ότι κάνουν χρήση των δικών τους πρωτοκόλλων και δεν ακολουθούν πρότυπα IEEE, είναι υπολογιστικά ελαφριά και βελτιστοποιημένα για ειδικές εφαρμογές σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας και τον όγκο των πακέτων.

Τα ιδιότητα συστήματα πομποδεκτών που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούν τις χαμηλές ζώνες συχνοτήτων ISM 433MHz, 868MHz και 915MHz αναφέρονται συνήθως ως λύσεις Sub-1 GHz. Οι λύσεις Sub-1 GHz, συχνά μεταδίδουν υψηλή ισχύ που μπορεί να φτάσει πάνω από 25 χιλιόμετρα σε μια απλή τοπολογία σημείο προς σημείο ή αστέρα. Πολλές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, δημιουργούν ιδιότητα δίκτυα ανά γειτονιά για την αναμετάδοση ενδείξεων μετρητών σε ένα σημείο συλλογής. Άλλες δημοφιλείς εφαρμογές των πομποδεκτών Sub-1 GHz είναι τα συστήματα ασφάλειας, βιομηχανικού ελέγχου και παρακολούθησης. Οι λύσεις επικοινωνίας που χρησιμοποιούν την παγκοσμίως ελεύθερη ζώνη συχνοτήτων ISM 2.4GHz αναφέρονται ως Proprietary 2.4GHz ή 2.4GHz RF. Εάν το υλικό υποστηρίζει Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) τρόπο μετάδοσης, όταν ανιχνεύονται παρεμβολές πριν από την έναρξη μιας μετάδοσης, μεταβαίνουν σε αυτή τη λειτουργία για να βρουν ένα πιο «ήσυχο» κανάλι.

Για τη σύνδεση με το Internet, τα συστήματα αυτά χρειάζονται μια πύλη Internet σε επίπεδο εφαρμογής. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτό είναι απλά ένας προσωπικός υπολογιστής που τρέχει μια στοίβα TCP/IP.

2.3 Λειτουργικά Συστήματα Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγάλους αριθμούς σε διάφορα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων και των απομακρυσμένων και εχθρικών περιοχών, όπου η εξοικονόμηση ενέργειας και οι ad hoc επικοινωνίες αποτελούν βασικό συστατικό. Για το λόγο αυτό, το λογισμικό των Α.Δ.Α. θα πρέπει να αντιμετωπίζει ζητήματα όπως η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής, η ανθεκτικότητα και η ανοχή στα σφάλματα και η αυτόματη ρύθμιση. Μερικά από τα σημαντικά θέματα στην έρευνα του λογισμικού για τα Α.Δ.Α. είναι τα λειτουργικά συστήματα, η ασφάλεια, η κινητικότητα, η ευχρηστία και η συντήρηση.

Ένα λειτουργικό σύστημα (OS) σε ένα Α.Δ.Α. είναι ένα λεπτό στρώμα λογισμικού που παρέχει βασικές λειτουργίες και δρα αφαιρετικά στον κώδικα των εφαρμογών. Το κύριο καθήκον του είναι να επιτρέπει στις εφαρμογές να αλληλεπιδρούν με τους υλικούς πόρους, να προγραμματίζει και να ιεραρχεί καθήκοντα και να παρέχει διαιτησία μεταξύ των υποστηριζόμενων εφαρμογών και υπηρεσιών. Τα επιπλέον χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν:

- Διαχείριση μνήμης.
- Διαχείριση ισχύος.
- Δικτύωση.
- Μια σειρά από περιβάλλοντα προγραμματισμού (όπως εντολές, προγράμματα εντόπισης σφαλμάτων κ.τ.λ.) για την ανάπτυξη, διόρθωση και εκτέλεση προγραμμάτων από τους χρήστες.
- Σημεία εισόδου στο λειτουργικό σύστημα για την πρόσβαση σε ευαίσθητους πόρους όπως η γραφή σε στοιχεία εισόδου.

Παραδοσιακά, τα λειτουργικά συστήματα ταξινομούνται σε μονής ή πολλαπλής εργασίας (single-task/multitasking) και ενός ή πολλών χρηστών (single-user/multi-user). Ένα single-task λειτουργικό σύστημα επεξεργάζεται μια εργασία σε μια στιγμή, ενώ ένα multitasking λειτουργικό σύστημα μπορεί να εκτελεί πολλαπλές εργασίες ταυτόχρονα. Τα Multitasking λειτουργικά συστήματα απαιτούν μια μεγάλη ποσότητα μνήμης για να διαχειριστούν τις καταστάσεις των πολλαπλών καθηκόντων, αλλά επιτρέπουν εργασίες με διαφορετική πολυπλοκότητα να εκτελούνται παράλληλα. Για παράδειγμα, σε ένα ασύρματο κόμβο αισθητήρων, η μονάδα

επεξεργασίας μπορεί να αλληλεπιδρά με τη μονάδα επικοινωνίας ενώ παράλληλα να γίνεται η άθροιση των δεδομένων που φθάνουν από τη μονάδα ανίχνευσης. Ένα multitasking λειτουργικό σύστημα είναι ο καλύτερος υποψήφιος για περιβάλλον τέτοιου είδους. Ωστόσο λόγω των περιορισμένων πόρων, η επιβάρυνση της ταυτόχρονης επεξεργασίας μπορεί να μην είναι προσιτή. Σε ένα λειτουργικό σύστημα single-task, μία μόνο εργασία εκτελείται κάθε φορά και ως εκ τούτου, κατά κανόνα οι εργασίες θα πρέπει να έχουν μικρή διάρκεια. Σε ένα single-user OS, ένας χρήστης (ο ιδιοκτήτης των πόρων) είναι ενεργός κάθε φορά, ενώ ένα λειτουργικό σύστημα multi-user επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μοιράζονται τους πόρους ενός ενιαίου συστήματος την ίδια στιγμή.

Τα Α.Δ.Α., λόγω της ιδιομορφίας των εφαρμογών που εκτελούν και των περιορισμένων πόρων τους, απαιτούν μια διαφορετική προσέγγιση στη σχεδίαση του λειτουργικού τους συστήματος για τη διαχείριση των πόρων, τον έλεγχο των περιφερειακών συσκευών και την παροχή μιας αφηρημένης απεικόνισης του υλικού. Στη συνέχεια θα αναφερθούν μερικές από τις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά των πιο γνωστών λειτουργικών συστημάτων για Α.Δ.Α..

2.3.1 TinyOS

Το TinyOS είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, πλούσια τεκμηριωμένο, και υποβοηθούμενο από εργαλεία, λειτουργικό σύστημα σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Επιπλέον έχει υποβληθεί σε μια μακρά διαδικασία σχεδιασμού και εξέλιξης που καθιστά την αρχή λειτουργίας του κατανοητή. Η συμπαγής αρχιτεκτονική του TinyOS, το καθιστά κατάλληλο για την υποστήριξη πολλών εφαρμογών.

2.3.2 LiteOS

Το LiteOS είναι ένα λειτουργικό σύστημα που βασίζεται σε νήματα και υποστηρίζει πολλαπλές εφαρμογές. Βασίζεται στην αρχή του καθαρού διαχωρισμού μεταξύ του λειτουργικού συστήματος και των εφαρμογών που τρέχουν πάνω του. Σε αντίθεση με όλα τα άλλα λειτουργικά συστήματα, το LiteOS δεν παρέχει στοιχεία ή μονάδες που θα πρέπει να συνδέονται μαζί για να οικοδομήσουν μια εφαρμογή. Η ανάπτυξη δομικών στοιχείων και ο καθορισμός του τρόπου με τον οποίο αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, είναι αποκλειστικά έργο του προγραμματισμού των εφαρμογών. Αντίθετα, παρέχει πολλές κλήσεις συστήματος με ένα

κέλυφος (shell) που απομονώνει τις κλήσεις συστήματος από το χρήστη, ένα ιεραρχικό σύστημα διαχείρισης αρχείων και μια τεχνική δυναμικού επαναπρογραμματισμού.

2.3.3 Contiki

Το Contiki είναι ένα ανοικτού κώδικα υβριδικό λειτουργικό σύστημα και είναι σχεδιασμένο για χρήση σε μια ποικιλία από κόμβους συμπεριλαμβανομένων και των μικροελεγκτών όπως ο TI MSP430 και ο Atmel AVR οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις οικογένειες Telos, Tmote και Mica. Από προεπιλογή, ο πυρήνας του λειτουργεί ως ένας πυρήνας οδηγούμενος από συμβάντα (event-driven), αλλά η πολυνηματική (multithreading) υποστήριξη υλοποιείται ως μια βιβλιοθήκη εφαρμογών. Για να γίνει αυτό, υπάρχει μια στρατηγική δυναμικής σύνδεσης για τη σύνδεση της multithreading βιβλιοθήκης με τις εφαρμογές που το απαιτούν [19].

Κεφάλαιο 3

Θερμομετρία

Θερμομετρία ονομάζεται η επιστήμη που μετρά την θερμοκρασία ενός συστήματος ή την ικανότητα ενός συστήματος να μεταφέρει θερμότητα σε ένα άλλο [55]. Η μέτρηση της θερμοκρασίας είναι σημαντικός παράγοντας σε πολλές εφαρμογές της φυσικής, της χημείας, της μετεωρολογίας, της γεωργίας, της κτηνοτροφίας αλλά και της ιατρικής. Τα όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας ονομάζονται θερμόμετρα και είναι πολύ διαδεδομένα στην καθημερινή μας ζωή. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη αναφορά στον ορισμό, τις κλίμακες και τις πιο διαδεδομένες τεχνικές μέτρησης της θερμοκρασίας.

3.1 Θερμοκρασία και Κλίμακες Μέτρησης

Αναφερόμενοι στη θερμοκρασία, έχουμε κατά νου το φυσικό μέγεθος που εκφράζει το πόσο κρύο ή ζεστό είναι ένα σώμα. Το μέτρο της θερμοκρασίας στην ουσία εκφράζει τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων που συνθέτουν μια ουσία ή ένα υλικό [28]. Είναι η κατάσταση της διέγερσης των μορίων ενός σώματος και όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία ενός σώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η κινητική ενέργεια των μορίων του και μεγαλύτερη η τάση να μεταφέρει

αυτή τη μοριακή κινητική ενέργεια σε ένα άλλο σώμα. Υψηλότερη κινητική ενέργεια των μορίων δίνει ως αποτέλεσμα υψηλότερες μετρήσεις σε ένα θερμόμετρο.

Για τη μέτρηση και σύγκριση θερμοκρασιών, είναι αναγκαία η συμφωνία και τυποποίηση μιας κοινά αποδεκτής κλίμακας. Οι κλίμακες θερμοκρασίας ορίζονται σύμφωνα με τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε σταθερές θερμοκρασίες. Οι θερμοκρασίες των φαινομένων αυτών είναι γνωστές ως σταθερά σημεία.

3.1.1 Κλίμακα Κελσίου

Η κλίμακα θερμοκρασίας Κελσίου καθορίζεται από διεθνή συμφωνία όσον αφορά δύο σταθερά σημεία: το σημείο τήξης (πάγος) και το σημείο βρασμού (ατμός). Η θερμοκρασία του σημείου τήξης ορίζεται ως 0° Κελσίου και το σημείο βρασμού ως 100° Κελσίου.

Το σημείο τήξης είναι η θερμοκρασία στην οποία πάγος και νερό συνυπάρχουν σε πίεση $1.0132 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$ (αρχικά μία πρότυπη ατμόσφαιρα = 760 mm στήλης υδραργύρου). Ο πάγος θα πρέπει να παρασκευάζεται από αποσταγμένο νερό σε μορφή λεπτών ρινισμάτων και αναμιγμένος με παγωμένο αποσταγμένο νερό [13].

3.1.2 Kelvin, Απόλυτη ή Θερμοδυναμική Κλίμακα

Ο Kelvin όρισε μια κλίμακα που βασίζεται σε θερμοδυναμικές αρχές που δεν εξαρτάται από τις ιδιότητες της κάθε ουσίας. Ο Kelvin χώρισε το διάστημα μεταξύ των σημείων τήξης και βρασμού σε 100 τμήματα, έτσι ώστε μια μονάδα να είναι το ίδιο διάστημα θερμοκρασίας με ένα βαθμό Κελσίου. Η μονάδα του Kelvin, ή θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας, ονομάζεται Kelvin. Ο ορισμός του Kelvin είναι το κλάσμα $1/273.16$ της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού. Ο ορισμός αυτός εγκρίθηκε από την 13η σύνοδο της Γενικής Διάσκεψης Μέτρων και Σταθμών, το 1967 (13η CGPM, 1967). Προσοχή χρειάζεται στη διαφορά μεταξύ του σημείου τήξης (0°) που χρησιμοποιείται για την κλίμακα Κελσίου και του τριπλού σημείου του νερού, του οποίου είναι 0,01 °C.

Η σχέση μεταξύ της κλίμακας Kelvin και κλίμακας Κελσίου, είναι τέτοια ώστε 0 °C να είναι ίσοι με 273,15 K: $t = T - 273.15$, όπου το t αναπαριστά τη θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου και T είναι η θερμοκρασία Kelvin [13].

3.1.3 Διεθνής Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασίας (IPTS-68)

Εξ' αιτίας του ότι οι κλίμακες θερμοκρασίας μπορούσαν να αναπαραχθούν σε πολύ υψηλότερο βαθμό ακρίβειας από ό, τι μπορούσαν να οριστούν, μια Διεθνής Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασίας (IPTS) εγκρίθηκε το 1929 και αναθεωρήθηκε το 1948. Η τελευταία αναθεώρηση της κλίμακας συνέβη το 1968 (IPTS-68). Η κλίμακα του 1948 εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε πολλά μέρη στη βιομηχανία. Οι διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών στις δύο κλίμακες είναι μικρές και συχνά μικρότερες από την ακρίβεια που προσφέρουν τα εμπορικά όργανα. Ο Πίνακας 3.1 δείχνει την απόκλιση της κλίμακας του 1948 από την αναθεώρηση του 1968 [13].

Deviation of IPTS-68 from IPTS-48	
t_{68} (°C)	$t_{68} - t_{48}$
-200	0.022
-150	-0.013
0	0.000
50	0.010
100	0.000
200	0.043
400	0.076
600	0.150
1,000	1.24

Πίνακας 3.1: Απόκλιση της κλίμακας IPTS-68 από την IPTS-48.

Η Διεθνής Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασίας βασίζεται σε έναν αριθμό από καθορισμένα σταθερά σημεία, καθένα από τα οποία έχει καθοριστεί με αξιόπιστο θερμόμετρο αερίου ή θερμόμετρο ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό η Διεθνής Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασίας είναι πρακτική και με ακρίβεια αναπαραγωγής και παρέχει μέσα για τον εντοπισμό οποιασδήποτε θερμοκρασία εντός πολύ στενότερων ορίων από ό, τι είναι δυνατό για την θερμοδυναμική κλίμακα.

Τα καθορισμένα σταθερά σημεία συστάθηκαν με την επίτευξη καταστάσεων ισορροπίας μεταξύ των φάσεων καθαρών ουσιών. Αυτές οι καταστάσεις ισορροπίας και οι τιμές τους δίνονται στον Πίνακα 3.2. Η Διεθνής Πρακτικής Κλίμακα Θερμοκρασίας Kelvin διακρίνεται με το σύμβολο T_{68} και η Διεθνής Πρακτική Κλίμακα Θερμοκρασίας Κελσίου με το σύμβολο t_{68} . Η σχέση μεταξύ T_{68} και t_{68} είναι: $t_{68} = T_{68} - 273.15K$

Defining fixed points of the IPTS-68⁽¹⁾

Equilibrium state	Assigned value of International Practical temperature	
	T_{68}	t_{68}
Triple point of equilibrium hydrogen	13.81 K	-259.34°C
Boiling point of equilibrium hydrogen at pressure of 33, 330.6 kN · m ⁻²	17.042 K	-256.108°C
Boiling point of equilibrium hydrogen	20.28 K	-252.87°C
Boiling point of neon	27.102 K	-246.048°C
Triple point of oxygen	54.361 K	-218.789°C
Boiling point of oxygen	90.188 K	-182.962°C
Triple point of water ⁽³⁾	273.16 K	0.01°C
Boiling point of water ⁽²⁾⁽³⁾	373.15 K	100°C
Freezing point of zinc	692.73 K	419.58°C
Freezing point of silver	1,235.08 K	961.93°C
Freezing point of gold	1,337.58 K	1,064.43°C

1. Except for the triple points and one equilibrium hydrogen point (17.042 K), the assigned values of temperature are for equilibrium states at a pressure $P_0 = 1$ standard atmosphere (101.325 kN · m⁻²).

In the realization of the fixed points, small departures from the assigned temperatures will occur as a result of the differing immersion depths of thermometers or the failure to realize the required pressure exactly. If due allowance is made for these small temperature differences, they will not affect the accuracy of realization of the scale.

2. The equilibrium state between the solid and liquid phases of tin (freezing point of tin has assigned value of t_{68} 231.9681°C and may be used as an alternative to the boiling point of water).

3. The water used should have the isotopic composition of ocean water.

Πίνακας 3.2: Καταστάσεις ισορροπίας της κλίμακας IPTS-68 [13].

Επιπρόσθετα των καθορισμένων σταθερών σημείων, δίνονται αντιστοιχίες θερμοκρασίας και για δευτερεύοντα σημεία. Αυτά τα σημεία (ιδίως τα σημεία τήξης των μετάλλων) αποτελούν κατάλληλα σημεία βαθμονόμησης στο εργαστήριο για τα όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας (βλ. Πίνακα 3.3)

Secondary reference points (IPTS-68)

Substance	Equilibrium state	Temperature (K)
Normal hydrogen	TP	13.956
Normal hydrogen	BP	20.397
Neon	TP	24.555
Nitrogen	TP	63.148
Nitrogen	BP	77.342
Carbon dioxide	Sublimation point	194.674
Mercury	FP	234.288
Water	Ice point	273.15
Phenoxy benzene	TP	300.02
Benzoic acid	TP	395.52
Indium	FP	429.784
Bismuth	FP	544.592
Cadmium	FP	594.258
Lead	FP	600.652
Mercury	BP	629.81
Sulphur	BP	717.824
Copper/aluminum eutectic	FP	821.38
Antimony	FP	903.89
Aluminum	FP	933.52
Copper	FP	1,357.6
Nickel	FP	1,728
Cobalt	FP	1,767
Palladium	FP	1,827
Platinum	FP	2,045
Rhodium	FP	2,236
Iridium	FP	2,720
Tungsten	FP	3,660

TP = triple point; FP = freezing point; BP = boiling point.

Πίνακας 3.3: Δευτερεύοντα σημεία ισορροπίας της κλίμακας IPTS-68 [13].

3.1.4 Κλίμακες Θερμοκρασίας Fahrenheit και Rankine

Οι κλίμακες θερμοκρασίας Fahrenheit και Rankine είναι πλέον ξεπερασμένες αλλά ένα μεγάλο μέρος τεχνικών δεδομένων δημοσιεύθηκαν χρησιμοποιώντας τις θερμοκρασίες αυτές, Για το λόγο αυτό απλώς αναφέρουμε την μετατροπή τους σε °C.

- Για την κλίμακα Fahrenheit ισχύει: $t_{\text{C}} = \frac{5}{9}(F - 32)$
- Για την κλίμακα Rankine ισχύει: $t_{\text{C}} = \frac{5}{9}(R - 491.67)$

3.2 Τεχνικές Μέτρησης Θερμοκρασίας

Οι μέθοδοι μέτρησης της θερμοκρασίας έχουν αλλάξει σημαντικά κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια και ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος της θερμοκρασίας, το εύρος της κλίμακας, την ακρίβεια μέτρησης, το υλικό προς μέτρηση και το κόστος. Σχεδόν κάθε εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία επίδραση μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο, σε εργαστήρια ή σε ειδικές βιομηχανικές συνθήκες, ένα ευρύτερο φάσμα οργάνων μέτρησης είναι διαθέσιμο. Όλα τα όργανα μέτρησης πρέπει να βαθμονομούνται σε σχέση με τα πρότυπα. Στην περίπτωση της θερμοκρασίας, τα πρότυπα είναι τα καθορισμένα σταθερά σημεία στο IPTS-68. Αυτά τα σταθερά σημεία δεν είναι ιδιαίτερα εύκολο να επιτευχθούν σε συνθήκες εργαστηρίου. Παρά το γεγονός ότι τα δευτερεύοντα σημεία προορίζονται ως πρότυπα εργαστηρίων, είναι πιο συνηθισμένο στα περισσότερα εργαστήρια, η βαθμονόμηση να γίνεται έναντι υψηλής ακρίβειας οργάνων των οποίων η βαθμονόμηση μπορεί να επιτευχθεί με τα σταθερά σημεία IPTS-68 [13].

Η μέτρηση της θερμοκρασίας ενός σώματος βασίζεται στην επίτευξη θερμοδυναμικής ισορροπίας μεταξύ του σώματος και της διάταξης ανίχνευσης ή του αισθητήρα μέτρησης που χρησιμοποιεί ένα όργανο. Η ισορροπία αυτή επιτυγχάνεται με την μετάδοση θερμότητας που προκύπτει λόγω διαφοράς θερμοκρασίας του σώματος και της διάταξης ανίχνευσης θερμοκρασίας του οργάνου. Τα όργανα μέτρησης θερμοκρασίας χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τη χρήση ή όχι ηλεκτρικά μεταδιδόμενου σήματος από τον αισθητήρα.

Οι τεχνικές μέτρησης της θερμοκρασίας με μη ηλεκτρικές μεθόδους, συνήθως χρησιμοποιούν την τεχνική του «Άμεσου αποτελέσματος» και ταξινομούνται ανάλογα με τη φύση της αλλαγής που προκαλείται από την αλλαγή της θερμοκρασίας στη διάταξη ανίχνευσης. Έτσι έχουμε τα όργανα

που εκμεταλλεύεται τη διαστολή υγρού, τη διαστολή αερίου, την αλλαγή φυσικής κατάστασης και τη διαστολή στερεών.

Οι τεχνικές μέτρησης θερμοκρασίας με ηλεκτρικές μεθόδους, χρησιμοποιούν αισθητήρες που με κατάλληλη διάταξη μεταφράζουν τη διαφορά της θερμοκρασίας σε διαφορά ηλεκτρικού σήματος. Τα πλεονεκτήματα από αυτή τη μετατροπή της θερμοκρασίας σε ηλεκτρικό σήμα είναι ότι θερμομέτρα αυτού του τύπου μπορούν να συνδυαστούν με ηλεκτρονικές συσκευές και να βαθμονομηθούν με ηλεκτρονικό ή και λογισμικό τρόπο, να εμφανίζουν τις μετρήσεις σε οθόνες με οποιαδήποτε μορφή, να τις αποθηκεύουν ψηφιακά και να τις στέλνουν σε οποιοδήποτε απομακρυσμένο σημείο χρησιμοποιώντας είτε ενσύρματα είτε ασύρματα μέσα. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα των οργάνων αυτών είναι ότι με ειδικό σχεδιασμό μπορούν να έχουν πραγματικά πολύ μικρές διαστάσεις, κάνοντας τη χρήση τους ιδανική σε διάφορες εφαρμογές που ο όγκος και η φορητότητα παίζει σημαντικό ρόλο.

Κεφάλαιο 4

Αισθητήρες Θερμοκρασίας

Η αίσθηση είναι ένα μέσο που χρησιμοποιείται για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με ένα φυσικό αντικείμενο ή διαδικασία, συμπεριλαμβανομένης της εμφάνισης γεγονότων (δηλαδή αλλαγές κατάστασης όπως πτώση θερμοκρασίας ή πίεσης). Ένα αντικείμενο που εκτελεί μια διαδικασία αίσθησης ονομάζεται αισθητήρας. Από τεχνικής πλευράς, ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή που μεταφράζει παραμέτρους ή γεγονότα από τον φυσικό κόσμο σε σήματα που μπορούν να μετρηθούν και να αναλυθούν. Ένας άλλος συνήθης όρος που χρησιμοποιείται είναι «διάταξη μετατροπέα» (transducer) ο οποίος χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει μια συσκευή που μετατρέπει την ενέργεια από μία μορφή σε μια άλλη. Ένας αισθητήρας είναι λοιπόν ένα είδος μετατροπέα που μετατρέπει την ενέργεια από τον φυσικό κόσμο σε ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να περάσει σε ένα υπολογιστικό σύστημα ή ελεγκτή.

Οι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν διαφόρων ειδών αισθητήρες για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του αισθητήρα, η μονάδα αισθητήρων του κόμβου μπορεί να αποτελείται από υπομονάδες όπως την μονάδα επεξεργασίας αναλογικού σήματος και τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (ADC). Οι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι οι αισθητήρες που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια αφού στόχος μας είναι η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα θερμοκρασίας που θα μπορέσει να προσαρμοστεί σε έναν «κόμβο αισθητήρων» για την επίτευξη όσο το δυνατόν ακριβέστερης μέτρησης της θερμοκρασίας.

Οι πιο δημοφιλείς αισθητήρες θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τα θερμοστοιχεία (thermocouples), οι «διατάξεις αντίστασης μετάλλου» (Resistive Temperature Devices - RTDs), τα θερμίστορ (thermistors), και η πιο πρόσφατη τεχνολογία των «ολοκληρωμένων αισθητήρων βασισμένων στο πυρίτιο» (Integrated Silicon Based Sensors) [08]. Κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες αισθητήρων ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας και περιβαλλοντικές συνθήκες. Το εύρος θερμοκρασίας, η ανθεκτικότητα, και η ευαισθησία του αισθητήρα είναι μόνο μερικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί εάν μια συσκευή θα ικανοποιήσει τις απαιτήσεις μιας εφαρμογής. Κανείς αισθητήρας θερμοκρασίας δεν είναι κατάλληλος για όλες τις εφαρμογές. Όταν θέλουμε να μετρήσουμε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών το θερμοστοιχείο είναι η καλύτερη επιλογή, ενώ όταν η γραμμικότητα είναι το ζητούμενο θα επιλέξουμε το RTD. Το θερμίστορ έχουν υψηλή ευαισθησία ιδιαίτερα μεταξύ -50 και + 100 °C αλλά μεγάλη μη γραμμικότητα. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανίχνευση μικρών αλλαγών στη θερμοκρασία περιβάλλοντος που συναντώνται σε περιβαλλοντικές, μετεωρολογικές, ιατρικές και οικιακές εφαρμογές. Προκειμένου να επιτευχθεί όμως ένας αποδεκτός βαθμός ακρίβειας, θα πρέπει το κάθε θερμίστορ να είναι χωριστά βαθμολογημένο [10].

Στον πίνακα 4.1 βλέπουμε περιληπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των τεσσάρων αυτών αισθητήρων θερμοκρασίας [08]. Ο πίνακας αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια πρώτη ανασκόπηση στην διαδικασία επιλογής αισθητήρα. Περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με την κατασκευή και τα χαρακτηριστικά αυτών των αισθητήρων θα δοθούν στη συνέχεια.

	Θερμοστοιχείο	RTD	Θερμίστορ	Ολοκληρωμένο κύκλωμα πυριτίου
Εύρος θερμοκρασίας	-270 έως 1800°C	-270 έως 1800°C	-100 έως 450°C	-55 έως 150°C
Ευαισθησία	10s του $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.00385 W/W/°C (πλατίνα)	Αρκετά W/W/°C	Βασισμένα στην τεχνολογία του ότι είναι 2mV/°C ευαίσθητα
Ακρίβεια	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	$\pm 0.01^\circ\text{C}$	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	$\pm 1^\circ\text{C}$
Γραμμικότητα	Απαιτεί τουλάχιστον ένα 4 ^{ου} βαθμού πολυώνυμο ή ισοδύναμο πίνακα τιμών.	Απαιτεί τουλάχιστον ένα 2 ^{ου} βαθμού πολυώνυμο ή ισοδύναμο πίνακα τιμών.	Απαιτεί τουλάχιστον ένα 3 ^{ου} βαθμού πολυώνυμο ή ισοδύναμο πίνακα τιμών.	Στην καλύτερη περίπτωση εντός ορίου $\pm 1^\circ\text{C}$. Δεν απαιτείται γραμμικοποίηση.

	Θερμοστοιχείο	RTD	Θερμίστορ	Ολοκληρωμένο κύκλωμα πυριτίου
Ανθεκτικότητα	Τα μεγαλύτερου διαμετρήματος καλώδια του θερμοστοιχείου και τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται ενισχύσουν την ανθεκτικότητά του θερμοστοιχείου.	Τα RTDs εύκολα καταστρέφονται ως αποτέλεσμα της δόνησης.	Τα πιο σταθερά θερμίστορ περικλείονται σε γυαλί, είναι γενικά πιο δύσκολα στο χειρισμό αλλά δεν επηρεάζονται από κραδασμούς και δονήσεις.	Ανθεκτικά όπως κάθε ολοκληρωμένο κύκλωμα που περικλείεται σε πλαστικό περίβλημα.
Ανταπόκριση σε αναδεδυόμενο λάδι	Λιγότερο από 1 sec	1 έως 10 secs	1 έως 5 secs	4 έως 60 secs
Διέγερση	Δεν απαιτείται	Πηγή έντασης	Πηγή τάσης	Συνήθως πηγή τάσης
Μορφή εξόδου	Τάση	Αντίσταση	Αντίσταση	Τάση, ένταση ή ψηφιακή

Πίνακας 4.1: Κύρια χαρακτηριστικά των αισθητήρων θερμοκρασίας

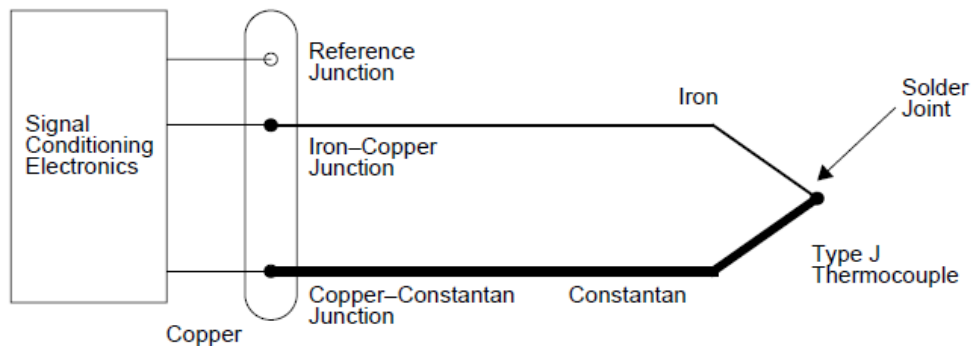
Σαν συμπλήρωση των χαρακτηριστικών του πίνακα 4.1, ο πίνακας 4.2 παραθέτει μια λίστα από τις τυπικές εφαρμογές των αισθητήρων αυτών.

Τύπος αισθητήρα	Εφαρμογή
Θερμοστοιχείο	Μέτρηση υψηλών θερμοκρασιών, βιοφυσική, έρευνα στην κοπή μετάλλων, αέρια χρωματογραφία, εσωτερική θερμοκρασία κινητήρων εσωτερικής καύσης, χημικές αντιδράσεις.
RTD	Αισθητήρες θερμοκρασίας γέφυρας, βαθμονόμηση, έλεγχο διεργασιών
Θερμίστορ	Αισθητήριες θερμοκρασίας γέφυρας, βαθμονόμηση πυρομέτρων, μανόμετρα κενού, ανεμόμετρα, μετρητές ροής, μετρητές στάθμης υγρού, μετρητές ταχύτητα υγρού, κύτταρα θερμικής αγωγιμότητας, αέρια χρωματογραφία.
Ολοκληρωμένο κύκλωμα πυριτίου	Προσωπικοί υπολογιστές, ηλεκτρονικά είδη γραφείου, κινητά τηλέφωνα, HVAC, διαχείριση μπαταρίας.

Πίνακας 4.2: Τυπικές εφαρμογές για κάθε τύπο αισθητήρων.

4.1 Θερμοστοιχείο (Thermocouple)

Το θερμοστοιχείο (ή θερμοζεύγος) αποτελείται από δύο σύρματα ανόμοιων μετάλλων που είναι συγκολλημένα μαζί στο ένα άκρο (θερμή επαφή), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η θερμοκρασία στη σύνδεση αναφοράς (επίσης γνωστή και ως ψυχρή επαφή ή κόμβος αναφοράς) χρησιμοποιείται για να αντισταθμιστούν τα σφάλματα που προέρχονται από τους κόμβους σιδήρου-χαλκού και constantan-χαλκού. Το σημείο σύνδεσης των δύο μετάλλων του θερμοστοιχείου (θερμή επαφή) είναι τοποθετημένα στο σημείο όπου γίνεται η μέτρηση της θερμοκρασίας. Αυτή η διάταξη των υλικών παράγει μια τάση μεταξύ των δύο συρμάτων στα ελεύθερα άκρα που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του συνόλου των συνδέσεων. Αυτή η τάση ονομάζεται «ηλεκτρεγερτική δύναμη» του θερμοστοιχείου (Electromotive Force - EMF) και αλλάζει με τη θερμοκρασία χωρίς να χρειάζεται η διέγερση από ρεύμα ή τάση [07]. Εάν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της σύνδεσης και των ελεύθερων άκρων του θερμοστοιχείου αλλάξει, τότε θα αλλάξει και η τάση EMF.



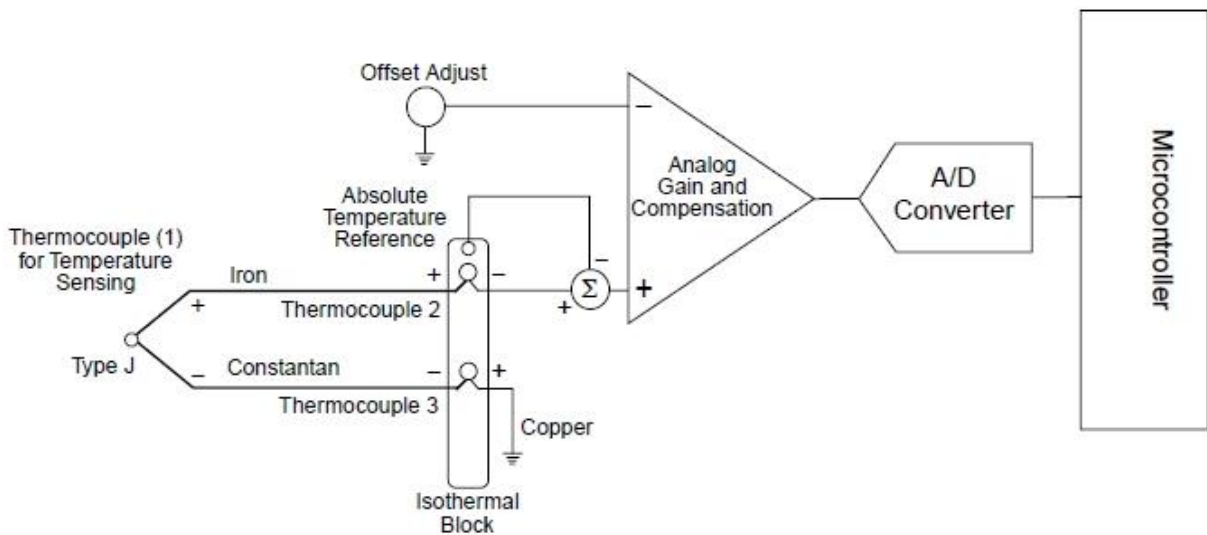
Σχήμα 4.1: Η κατασκευή του θερμοστοιχείου από δυο διαφορετικά μεταλλικά σύρματα.

Παρόλο που ένα θερμοστοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί από οποιαδήποτε δύο μέταλλα, στην πράξη έχει υιοθετηθεί μια τυποποίηση συνδυασμών αυτών των δυο μετάλλων λόγω των επιθυμητών χαρακτηριστικών γραμμικότητας και του μεγέθους της πτώσης τάσεως τους συναρτήσει της θερμοκρασίας. Οι τύποι αυτών των θερμοστοιχείων είναι οι E, J, T, K, N, S, B, και R (συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3).

Τύπος Θερμ/χείου	Αγωγοί	Εύρος θερμ/σίας (°C)	Συντελεστής Seebeck
E	Chromel, Constantan	-200 to 900	60 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
J	Iron, Constantan	0 to 760	51 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
T	Copper, Constantan	-200 to 371	40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
K	Chromel, Alumel	-200 to 1260	40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
N	Nicrosil, Nisil	0 to 1260	38 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
S	Platinum(10% Rhodium), Platinum	0 to 1480	11 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
B	Platinum (30% Rhodium) Platinum (6% Rhodium)	0 to 1820	8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
R	Platinum (13% Rhodium), Platinum	0 to 1480	12 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Πίνακας 4.3: Τα χαρακτηριστικά των περισσότερο κοινών τύπων θερμοστοιχείων κατά NIST 175

Δεδομένου ότι μια τάση αναπτύσσεται στα ελεύθερα άκρα των δύο ανόμοιων συρμάτων, φαίνεται πως η ανάγνωση του θερμοστοιχείου θα μπορούσε να γίνει απ' ευθείας με τη μέτρηση της διαφοράς τάσης μεταξύ των συρμάτων. Αυτό θα μπορούσε να είναι εφικτό στην περίπτωση που τα άκρα του θερμοστοιχείου δεν ήταν συνδεδεμένα με ένα άλλο μέταλλο το οποίο είναι συνήθως ο χαλκός. Αυτό δημιουργεί ένα άλλο ζευγάρι από θερμοστοιχεία (Σχήμα 4.2) που προέρχονται από τη σύνδεση των αγωγών του θερμοστοιχείου με τα ίχνη χαλκού της πλακέτας και το οποίο εισάγει ένα σημαντικό σφάλμα στο σύστημα. Έτσι η τάση που παράγει ένα θερμοστοιχείο αντιπροσωπεύει την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμής επαφής και των δυο άλλων άκρων των συρμάτων. Εάν απαιτείται μια απόλυτη μέτρηση της θερμοκρασίας (και όχι η σχετική), ένα τμήμα της ηλεκτρονικής διαμόρφωσης του σήματος του θερμοστοιχείου, πρέπει να αφιερωθεί στη δημιουργία μιας θερμοκρασίας αναφοράς. Αυτή χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της EMF τάσης σφάλματος που δημιουργείται στα θερμοστοιχεία 2 και 3 (Σχήμα 4.2). Ένα ισοθερμικό μπλοκ κατασκευάζεται έτσι ώστε τα θερμοστοιχεία 2 και 3 να διατηρούνται στην ίδια θερμοκρασία που αναφέρεται και ως η «απόλυτη θερμοκρασίας» της συσκευής ανίχνευσης. Με αυτή τη διαμόρφωση, η γνωστή θερμοκρασία των κόμβων του χαλκού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της πραγματικής θερμοκρασίας στο άκρο μέτρησης του θερμοστοιχείου.



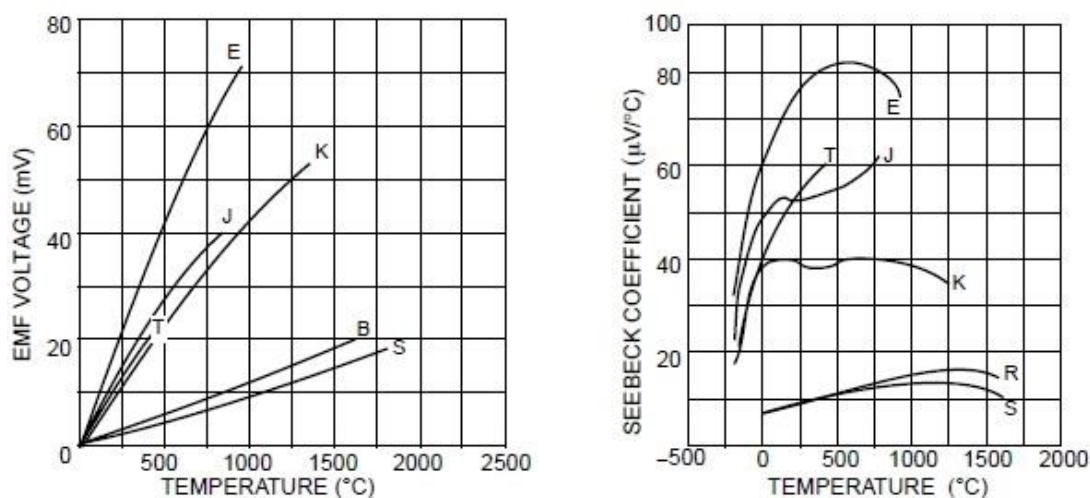
Σχήμα 4.2: Η διαδρομή του σήματος του θερμοστοιχείου.

Πολλές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση της θερμοκρασίας αναφοράς στο ισοθερμικό μπλοκ. Στη λίστα που ακολουθεί αναφέρονται μερικές από αυτές:

- Χρησιμοποίηση ενός δεύτερου θερμοστοιχείου για την ανίχνευση του περιβάλλοντος στη σύνδεση του χαλκού που είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να εξομαλύνει την προκύπτουσα τάση σε μια θερμοκρασία που μπορεί να καθοριστεί.
- Χρησιμοποίηση μίας τυπικής διόδου για την ανίχνευση της θερμοκρασίας αναφοράς της συσκευής. Αυτό γίνεται με τη χρήση του αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας $-2.2\text{mV}/^\circ\text{C}$ των χαρακτηριστικών της διόδου.
- Χρησιμοποίηση ενός αισθητήρα θερμίστορ. Όπως και με τη δίοδο, το θερμίστορ έχει ένα αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας. Το θερμίστορ είναι πιο δύσκολο στη χρήση λόγω της μη-γραμμικής του τάσης.
- Χρησιμοποίηση ενός αισθητήρα RTD. Οι αισθητήρες αυτοί είναι οι πλέον κατάλληλοι για κυκλώματα ακριβείας.
- Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ολοκληρωμένος αισθητήρας πυριτίου για τη μέτρηση της θερμοκρασίας αναφοράς.

Αφού γίνει γνωστή η θερμοκρασία αναφοράς του ισοθερμικού μπλοκ, η θερμοκρασία στο άκρο του θερμοστοιχείου μπορεί να προσδιοριστεί. Αυτό γίνεται με τη λήψη της τάσης EMF και αφαιρώντας τα σφάλματα από το ισοθερμικό μπλοκ. Η εύρεση της θερμοκρασίας γίνεται σε επόμενο στάδιο μέσω πινάκων αντιστοιχίας (look-up tables) ή εξισώσεων γραμμικοποίησης

(λόγω της μη γραμμικότητας του σήματος). Για να γίνει αυτό, η τάση EMF θα πρέπει να ψηφιοποιηθεί μέσω ενός μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) προκειμένου να εκτελεστούν εύκολα αυτές τις λειτουργίες. Τα θερμοστοιχεία όμως έχουν πολύ χαμηλό σήμα εξόδου στα άκρα των αγωγών τους που κυμαίνεται από μερικά nano volts έως μερικές δεκάδες millivolts (Σχήμα 4.3α). Στο Σχήμα 4.3β φαίνεται ότι η μεταβολή της τάσης EMF ανά °C είναι επίσης μικρή (mV/°C). Αυτό επιβάλλει στο κύκλωμα αναλογικής επεξεργασίας σήματος που ακολουθεί, ένα στάδιο αναλογικής ενίσχυσης. Αυτό γίνεται συνήθως με έναν ενισχυτή οργάνων (instrumental amplifier) ή ένα τελεστικό ενισχυτή (op amp) με υψηλό κέρδος διαμόρφωσης. Ένας ενισχυτής οργάνων χρησιμοποιεί διάφορους τελεστικούς ενισχυτές και έχει ρυθμιστεί ώστε να έχει ηλεκτρικά ισοδύναμες διαφορικές εισόδους, υψηλή αντίσταση εισόδου, δυνητικά υψηλό κέρδος και καλή απόρριψη κοινής κατάστασης (common-mode). Από τα τέσσερα αυτά χαρακτηριστικά, τα τρία πρώτα είναι τα πιο χρήσιμα για εφαρμογές θερμοστοιχείων [07].



Σχήμα 4.3: α) Η τάση β) η τάση ανά βαθμό κελσίου των διάφορων τύπων θερμοστοιχείων σε σχέση με την θερμοκρασία.

Έχοντας ενισχυθεί και μετατραπεί σε ψηφιακό, το σήμα του θερμοστοιχείου θα πρέπει να μεταφραστεί σε μια τιμή θερμοκρασίας. Τα θερμοστοιχεία όμως είναι εξαιρετικά μη γραμμικά σε σχέση με τα RTD και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα πυριτίου. Ο Συντελεστής Seebeck στον πίνακα 4.3 αντιπροσωπεύει τη μέση μετατόπιση του συγκεκριμένου θερμοστοιχείου σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Κατά τη στιγμή της αποστολής του θερμοστοιχείου από τον προμηθευτή, η απόδοση του είναι εγγυημένη σύμφωνα με το πρότυπο NIST 175 (που εγκρίθηκε από την ASTM - American Society for Testing and Materials). Αυτό το πρότυπο καθορίζει τη θερμική συμπεριφορά του θερμοστοιχείου καθώς και την ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται. Για την γραμμικοποίηση της εξόδου τους απαιτείται η εκτέλεση πολύπλοκων

αλγορίθμων από τον επεξεργαστή του κυκλώματος. Ένα παράδειγμα της πολυπλοκότητας των υπολογισμών παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.4. Αυτοί είναι οι συντελεστές του θερμοστοιχείου τύπου K που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη γραμμικοποίηση των αποτελεσμάτων της τάσης εξόδου για μία περιοχή θερμοκρασιών από 0 °C έως 1372 °C. Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται στην εξίσωση

$$V = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + \dots$$

Όπου V είναι ίσο με την τάση στην ένωση του θερμοστοιχείου και t είναι ίσο με τη θερμοκρασία.

C ₀	-1.7600413686 x 10 ⁻²	C ₅	-5.6072844889 x 10 ⁻²
C ₁	3.8921204975 x 10 ⁻²	C ₆	5.6075059059 x 10 ⁻²
C ₂	1.8558770032 x 10 ⁻²	C ₇	-3.2020720003 x 10 ⁻²
C ₃	-9.9457592874 x 10 ⁻²	C ₈	9.7151147152 x 10 ⁻²
C ₄	3.1840945719 x 10 ⁻²	C ₉	-1.2104721275 x 10 ⁻²

Πίνακας 4.4: Οι συντελεστές του θερμοστοιχείου τύπου K που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για γραμμικοποίηση.

Η εναλλακτική λύση της χρήσης αυτών των πολύπλοκων υπολογισμών είναι η χρησιμοποίηση της μνήμης του προγράμματος για έναν πίνακα αντιστοιχιών (look-up table). Ο πίνακας για την αντικατάσταση των συντελεστών της εξίσωσης του θερμοστοιχείου τύπου K στον Πίνακα 4.4 είναι περίπου ένας 11 x 14 πίνακας δεκαδικών αριθμών που κυμαίνονται από 0,000 έως 13,820.

4.1.1 Ανάλυση Σφάλματος Θερμοστοιχείου

Η ακρίβεια του θερμοστοιχείου βασίζεται στην καθαρότητα του θερμοστοιχείου και τις συνδέσεις του. Κάθε τύπος θερμοστοιχείου έχει τα όριά του από σφάλματα με βάση τις αποκλίσεις των υλικών του. Υπάρχουν επίσης ειδικοί αισθητήρες διαθέσιμοι που έχουν κατασκευαστεί και δοκιμαστεί με πολύ αυστηρότερες διαδικασίες. Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 4.5) δείχνει τους τύπους των θερμοστοιχείων που διατίθενται από την Omega και τα όρια των σφαλμάτων τους.

Τύπος	Τυπικό Θερμ/χείο	Ειδικό Θερμ/χείο
J	2.2°C	1.1°C
	0.75%	0.4%
T	1°C	0.5°C
	0.75%	0.4%
K	2.2°C	1.1°C
	0.75%	0.4%
E	1.7°C	1°C
	0.5%	0.4%

Πίνακας 4.5: Όρια σφαλμάτων θερμοστοιχείων Omega

Τα θερμοστοιχεία είναι γενικά χαμηλού κόστους, ανθεκτικά και διαθέσιμα σε μικρότερα μεγέθη από τους άλλους αισθητήρες θερμοκρασίας. Κάθε πίεση επί του υλικού, λόγω κάμψης ή συμπίεσης, μπορεί να αλλάξει τα χαρακτηριστικά των θερμικών διαβαθμίσεών τους. Επίσης ένα διαβρωτικό υλικό θα μπορούσε να διαπεράσει το μονωτικό υλικό και να προκαλέσει μια μεταβολή των θερμικών τους χαρακτηριστικών.

4.2 Διάταξη Αντίστασης Μετάλλου (Resistive Temperature Device - RTD)

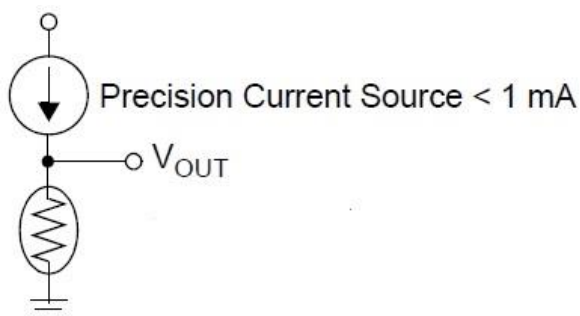
Η τεχνολογία των αντιστάσεων μετάλλου (RTDs) βελτιώνεται συνεχώς ενισχύοντας την ποιότητα στις μετρήσεις θερμοκρασίας. Η αντίσταση μετάλλου είναι ένα ωμικό στοιχείο κατασκευασμένο από μέταλλα όπως πλατίνα (λευκόχρυσος), νικέλιο ή χαλκό. Τα συγκεκριμένα μέταλλα επιδεικνύουν μία προβλέψιμη μεταβολή της αντίστασής τους με τη θερμοκρασία. Ακόμα έχουν τις βασικές φυσικές ιδιότητες που επιτρέπουν την εύκολη κατασκευή τους. Ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης των μετάλλων αυτών είναι αρκετά μεγάλος για να καταστήσει μετρήσιμες αλλαγές της αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία [08].

Η πλατίνα είναι το πρότυπο υλικό που χρησιμοποιείται στο θερμόμετρο αντίστασης το οποίο ορίζει και τη διεθνή πρακτική κλίμακα θερμοκρασίας, όχι επειδή έχει ένα ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή αντίστασης, αλλά λόγω της σταθερότητάς του στη χρήση. Έχοντας το υψηλότερο δυνατό συντελεστή αντίστασης, θεωρείται το καλύτερο υλικό για την κατασκευή των θερμομέτρων. Χρησιμοποιείται στην βιομηχανία για μέτρηση θερμοκρασίας έως 800 °C.

Το νικέλιο αποτελεί μια φθηνή εναλλακτική λύση της πλατίνας για θερμόμετρα αντίστασης. Το ωφέλιμο εύρος περιορίζεται από $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ αλλά ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης του νικελίου είναι 50% μεγαλύτερος από αυτό της πλατίνας και αυτό είναι ένα πλεονέκτημα σε ορισμένα όργανα. Τα θερμόμετρα αντίστασης με νικέλιο βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε συστήματα θέρμανσης νερού και κλιματισμού.

Τέλος ο χαλκός έχει τα μειονεκτήματα της χαμηλής αντίστασης (με αποτέλεσμα αισθητήρες μεγάλου όγκου) και της κακής αντοχής στη διάβρωση με αποτέλεσμα την αστάθεια των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του. Ο κύριος τομέας της εφαρμογής του χαλκού για θερμόμετρα αντίστασης είναι τα ηλεκτρονικά όργανα που λειτουργούν σε ελεγχόμενο περιβάλλον και που απαιτείται μια ουσιαστικά γραμμική χαρακτηριστική θερμοκρασίας [13].

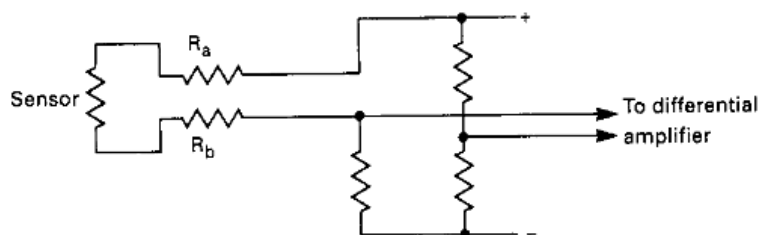
Το RTD είναι αισθητήρας απόλυτης μέτρησης της θερμοκρασίας, σε αντίθεση με το θερμοστοιχείο το οποίο ανιχνεύει από μόνο του σχετικές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια, επιπλέον αισθητήρες θερμοκρασίας δεν είναι απαραίτητοι για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας. Ακόμα το RTD είναι παθητικό αισθητήριο και απαιτεί ρεύμα διέγερσης για να παράγει μία τάση εξόδου V_{out} (Σχήμα 4.4). Από την τάση αυτή μπορεί να προσδιοριστεί η ωμική αντίσταση και κατά συνέπεια να υπολογιστεί η θερμοκρασία. Ωστόσο η πτώση τάσης στα άκρα του RTD είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση εξόδου του θερμοστοιχείου [54].



Σχήμα 4.4: Το ρεύμα διέγερσης της αντίστασης μετάλλου.

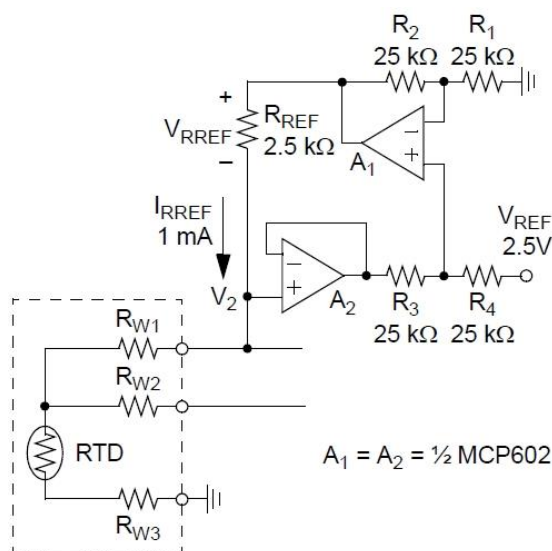
Η σχέση μεταξύ της αντίστασης και της θερμοκρασίας του RTD είναι σχεδόν γραμμική. Αυτό απλοποιεί το κύκλωμα αναλογικής επεξεργασίας του σήματος που ακολουθεί το RTD Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τα θερμόμετρα με αντίσταση πλατίνας, είναι ένα κύκλωμα διαιρέτη τάσης και για πολλές εφαρμογές μια απλή γέφυρα Wheatstone (Σχήμα 4.5) είναι επαρκής [42]. Η τάση που μετρείται στο κέντρο της γέφυρας Wheatstone, συνήθως

ενισχύεται από έναν τελεστικό ενισχυτή και ανάλογα της εφαρμογής μπορεί να ψηφιοποιηθεί από έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC).



Σχήμα 4.5: Απλή γέφυρα Wheatstone που χρησιμοποιείται στα θερμομέτρα πλατίνας.

Για καλύτερη γραμμικότητα, η μεταλλική αντίσταση απαιτεί ένα σταθερό ρεύμα αναφοράς για διέγερση. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ένας από τους τρόπους αυτούς δείχνεται στο Σχήμα 4.6. Στο κύκλωμα αυτό μια τάση αναφοράς μαζί με δύο τελεστικούς ενισχυτές χρησιμοποιούνται για την δημιουργία μιας πηγής ρεύματος 1 mA [05].



Σχήμα 4.6: Κύκλωμα για παροχή σταθερού ρεύματος διέγερσης σε αντίσταση μετάλλου.

Η τιμή της αντίστασης του μετάλλου στους 0°C είναι διαθέσιμη σε ένα ευρύ φάσμα αντιστάσεων και μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη. Για παράδειγμα, η τυπική αντίσταση ενός RTD πλατίνας είναι 100 Ω , αλλά είναι επίσης διαθέσιμη και σε τιμές των 50, 100, 200, 500, 1000 και 2000 Ω . Ο Πίνακας 4.6 δείχνει τη θερμοκρασία συναρτήσεως της αντίστασης ενός RTD 100 Ω από πλατίνα. Επίσης δείχνει και την ακρίβειά που μπορεί να δώσει για κάθε εύρος θερμοκρασίας τόσο σε διαφορά ωμικής αντίστασης $\Delta\Omega$ όσο και σε διαφορά θερμοκρασίας $\Delta^\circ\text{C}$ από την ιδανική.

Θερμοκρασία	Τυπική Απόλυτη Τιμή Αντίστασης	Απόκλιση σε Ω	Απόκλιση σε °C
-200	23.0	± 0.56	± 1.3
-100	61.5	± 0.32	± 0.8
0	100.0	± 0.12	± 0.3
100	138.5	± 0.30	± 0.8
200	177.0	± 0.48	± 1.3
300	215.5	± 0.64	± 1.8
400	254.0	± 0.79	± 2.3
500	292.5	± 0.93	± 2.8
600	331.0	± 1.06	± 3.3
700	369.5	± 1.17	± 3.8
800	408.0	± 1.28	± 4.3

Πίνακας 4.6: Τυπική απόλυτη τιμή μεταλλικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας και οι αποκλίσεις σε ωμική αντίσταση και θερμοκρασία.

Η μεταβολή της αντίστασης στην θερμοκρασία για καθένα από τους τύπους των μεταλλικών αντιστάσεων φαίνεται στον Πίνακα 4.7. Εφαρμόζοντας τον τύπο:

$$\Delta R = (\text{Θερμική απόκριση}) \times R_0 \times \Delta t$$

μπορούμε να δούμε ότι η μεταβολή της αντίστασης από τους 0°C έως τους 100°C είναι $\Delta R = 38.5\Omega$. Το RTD πλατίνας έχει την πιο γραμμική θερμική απόκριση, καλή χημική αδράνεια και είναι εύκολο να κατασκευαστεί με τη μορφή συρμάτων μικρής διαμέτρου ή ταινιών (films). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.7, η ειδική αντίσταση της πλατίνας είναι υψηλότερη από ό, τι στα άλλα μέταλλα, καθιστώντας τον όγκο του αισθητήρα μικρότερο. Αυτό προσφέρει πλεονεκτήματα στις περιπτώσεις όπου ο μικρός όγκος και η άμεση απόκριση είναι στις άμεσες προτεραιότητες.

Υλικά Αντίστασης Μετάλλων	Θερμική Απόκριση (σε 0°C)	Τυπική Ειδική Αντίσταση Υλικού
Πλατίνα	0.00385 Ω/Ω/°C (IEC 751)	9.81 x 10 ⁻⁶ Ω cm
Νικέλιο	0.00672 Ω/Ω/°C	5.91 x 10 ⁻⁶ Ω cm
Χαλκός	0.00427 Ω/Ω/°C	1.53 x 10 ⁻⁶ Ω cm

Πίνακας 4.7: Θερμική απόκριση και ειδική αντίσταση των τριών κυριότερων τύπων RTDs.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η έξοδος της μεταλλικής αντίστασης δεν χρειάζεται γραμμικοποίηση. Όταν όμως η εφαρμογή απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω αλγόριθμοι:

- Για θερμοκρασίες από -200°C έως τους 0°C $R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) + C (t - 100t^3)$
- Για θερμοκρασίες από 0°C έως τους 859°C $R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$

Όπου:

R_t είναι η αντίσταση της μεταλλικής αντίστασης στην θερμοκρασία μέτρησης

t είναι η μετρούμενη θερμοκρασία

R_0 είναι η τιμή της μεταλλικής αντίστασης στους 0°C

$A, B,$ και C είναι εμπειρικοί συντελεστές βαθμονόμησης

Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται με πέντε επαναλήψεις δίνοντας ακρίβεια $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ [08].

4.2.1 Ανάλυση Σφάλματος RTD

Πέρα από τα αρχικά λάθη της αντίστασης μετάλλου που φαίνονται στον Πίνακα 4.6, υπάρχουν και άλλες πηγές σφάλματος που επηρεάζουν τη συνολική ακρίβεια του αισθητήρα αντίστασης μετάλλου. Η εισαγωγή ατελειών στην μηχανική ακεραιότητα του αισθητήρα, όπως κάμψη των συρμάτων, κραδασμών που οφείλονται σε τραχύ χειρισμό, στένωση της συσκευασίας που οδηγεί σε πίεση κατά τη διάρκεια της θερμικής διαστολής και η δόνηση, μπορεί να έχουν μακροπρόθεσμη επίδραση στην επαναληψιμότητα του αισθητήρα.

Αν και οι μηχανικές καταπονήσεις μπορεί να επηρεάσουν μακροχρόνια την σταθερότητα, το ηλεκτρονικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση, την ενίσχυση και την ψηφιοποίηση της εξόδου του RTD μπορεί επίσης να επηρεάσει τη γενική ακρίβεια. Μία από αυτές τις πηγές των σφαλμάτων είναι η θέρμανση του αισθητήρα από τον εαυτό του (self-heating) που προκύπτει από το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα ρεύμα διέγερσης χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την αντίσταση του RTD σε τάση. Είναι επιθυμητό το ρεύμα αυτό της διέγερσης να είναι υψηλό προκειμένου να διατηρήσει την τάση εξόδου πάνω από τα επίπεδα θορύβου του συστήματος. Μια αρνητική πλευρά σε αυτή την προσέγγιση του σχεδιασμού είναι ότι το στοιχείο της αντίστασης θα θερμανθεί (self-heating) ως αποτέλεσμα του υψηλού ρεύματος. Ο συνδυασμός του ρεύματος και της αντίστασης

δημιουργούν ισχύ ($P = I^2 \times R$) που με τη σειρά της εκλύει θερμότητα. Η θερμότητα που παράγεται από την απώλεια ισχύος του στοιχείου αυξάνει τεχνητά την αντίσταση του RTD.

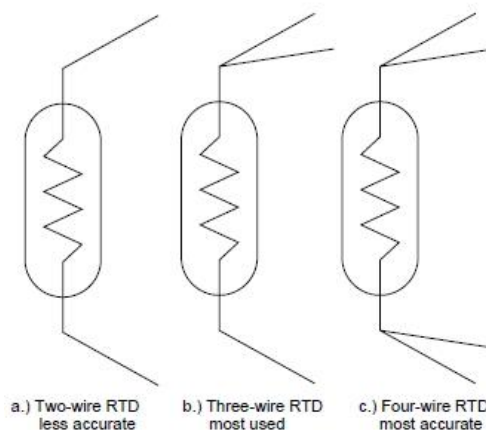
Η συνεισφορά στο σφάλμα της θερμότητας που παράγεται από την κατανάλωση ισχύος στην αντίσταση μετάλλου, υπολογίζεται εύκολα δίνοντας το πακέτο θερμικής αντίστασης (package thermal resistance - $\theta_{PACKAGE}$), το μέγεθος του ρεύματος διέγερσης και την τιμή της αντίστασης του RTD (R_{RTD}).

Για παράδειγμα αν το πακέτο θερμικής αντίστασης είναι $50^\circ\text{C}/\text{W}$, η ονομαστική τιμή της αντίστασης είναι 250Ω και η πηγή ρεύματος 5mA , η τεχνητή αύξηση της θερμοκρασίας ($\Delta^\circ\text{C}$) σαν το αποτέλεσμα της αυτό-θέρμανσης είναι:

$$\Delta^\circ\text{C} = I^2 R_{RTD} \cdot \theta_{PACKAGE} = (5\text{mA})^2 \times 250\Omega \times 50^\circ\text{C}/\text{Watt} = 0.3125^\circ\text{C}$$

Αυτό το παράδειγμα απεικονίζει τη σημασία της διατήρησης του μεγέθους του ρεύματος διέγερσης όσο το δυνατόν χαμηλότερο και κατά προτίμηση μικρότερο από 1mA .

Μία δεύτερη πηγή σφάλματος που προκύπτει από την ηλεκτρική σχεδίαση, προέρχεται από τα καλώδια οδήγησης από και προς το αισθητήριο στοιχείο. Η τεχνική που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του RTD με το υπόλοιπο κύκλωμα μπορεί να είναι ένα κρίσιμο ζήτημα. Τρεις πιθανές διατάξεις σύνδεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη σύνδεση του αισθητήρα με το υπόλοιπο το κύκλωμα. Στο Σχήμα 4.7a η διάταξη δυο καλωδίων (2-wire) είναι μακράν η λιγότερο δαπανηρή. Ωστόσο το ρεύμα που χρησιμοποιείται για τη διέγερση του αισθητήρα RTD ρέει και διαμέσου των καλωδίων, καθώς ανήκουν και αυτά στην ωμική αντίσταση του αισθητήρα. Ένα τμήμα των καλωδίων είναι εκτεθειμένο στις ίδιες θερμοκρασίες όπως και το RTD. Οι συνέπειες της μεταβολής αντίστασης των καλωδίων με τη θερμοκρασία μπορεί να γίνει ένα κρίσιμο ζήτημα [08].



Σχήμα 4.7: Διατάξεις σύνδεσης αντίστασης μετάλλου.

Εάν για παράδειγμα το καλώδιο σύνδεσης κατασκευάζεται από ηλεκτρόδια χαλκού διαμετρήματος 5 και έχουν 50 μέτρα μήκος (με αντίσταση καλωδίου $1.028\Omega / \text{km}$), η συμβολή και των δύο καλωδίων αυξάνει την αντίσταση του RTD κατά 0.1028Ω . Αυτό μεταφράζεται σε σφάλμα μέτρησης θερμοκρασίας $0.26\text{ }^\circ\text{C}$ για ένα RTD των 100Ω στους 0°C . Αυτό το σφάλμα συμβάλλει στην μη-γραμμικότητα της συνολικής μέτρησης. Η λιγότερο ακριβής από τις διατάξεις που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.7 είναι αυτή των 2-καλωδίων. Ένα κύκλωμα μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τη διάταξη 3-καλωδίων (3-wire) και 4-καλωδίων (4-wire) για να αφαιρέσει το εισερχόμενο σφάλμα των καλωδία σύνδεσης εντελώς.

4.3 Θερμίστορ (Thermistor)

Το θερμίστορ είναι μια διάταξη που αλλάζει την ηλεκτρική αντίστασή του με τη θερμοκρασία. Για την κατασκευή τους είναι επιθυμητά υλικά με συγκεκριμένες και προβλέψιμες τιμές της αλλαγής αυτής. Το πρωτότυπο θερμίστορ κατασκευάστηκε αρχικά με βρόχους σύρματος αντίστασης, αλλά το τυπικό θερμίστορ σε χρήση σήμερα είναι ένα υλικό ημιαγωγού το οποίο είναι ικανό για μεγάλες αλλαγές στην αντίσταση για μια μικρή μεταβολή στη θερμοκρασία.

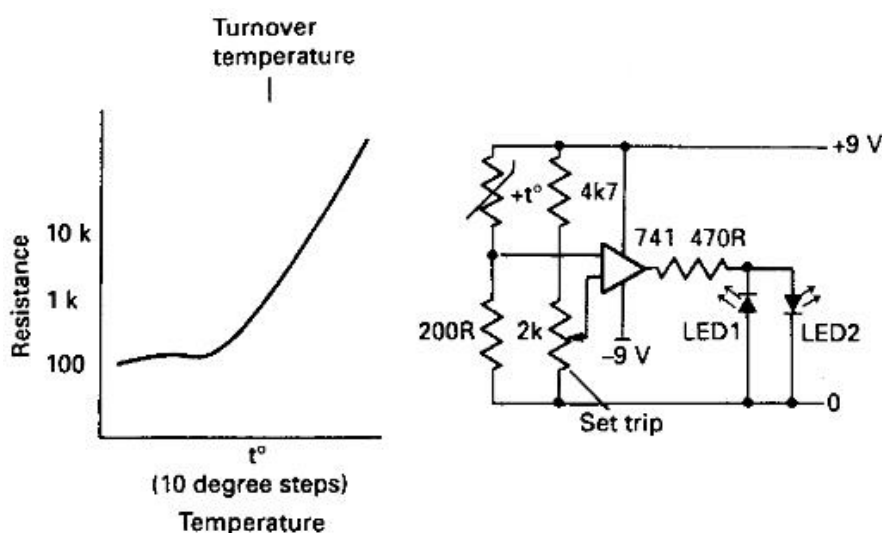
Τα θερμίστορ χωρίζονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τον αρνητικό ή θετικό συντελεστή θερμοκρασίας που παρουσιάζουν και στον οποίο δεν έχει νόημα να αποδοθεί μια συγκεκριμένη τιμή, αφού αυτή αλλάζει με τη θερμοκρασία. Αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές μέτρησης θερμοκρασίας είναι τα NTC (negative temperature coefficient) θερμίστορ με αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας. Τα PTC (positive temperature coefficient) θερμίστορ

κυρίως χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα προστασίας ηλεκτρικού εξοπλισμού όπως μετασχηματιστών και κινητήρων [13] και έχουν θετικό συντελεστή θερμοκρασίας.

4.3.1 Θερμίστορ PTC

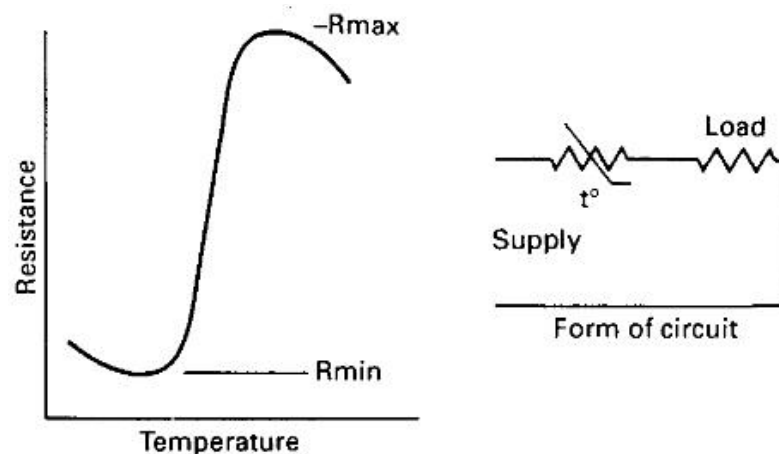
Το PTC θερμίστορ κατασκευάζεται από ενώσεις τιτανικών αλάτων του βαρίου, μολύβδου και στροντίου (κεραμικά υλικά). Έχει θετικό συντελεστή θερμοκρασίας, δηλαδή καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει, έχουμε αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Υπάρχουν δυο τύποι θερμίστορ PTC.

Ο τύπος PTC για προστασίας υπερθέρμανσης έχει ένα σημείο μετάβασης σε μια θερμοκρασία αναφοράς (ή trip temperature - T_r). Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία μετάβασης, η αντίσταση του PTC είναι αρκετά σταθερή, αλλά κοντά στη θερμοκρασία αναφοράς τα χαρακτηριστικά του PTC αναλαμβάνουν και η αντίσταση του αυξάνεται πολύ απότομα καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει. Μια τυπική γραφική παράσταση της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας μαζί με ένα κύκλωμα προστασίας δείχνεται στο Σχήμα 4.8. Η ξαφνική αλλαγή στην αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία ενός δείκτη ή να αλλάξει άλλα κυκλώματα για προστασία κινητήρων ή για την πρόληψη της υπερθέρμανσης των μετασχηματιστών [42].



Σχήμα 4.8: Χαρακτηριστική του PTC θερμίστορ που χρησιμοποιείται για την αίσθηση της υπερβολικής θερμοκρασίας

Ο άλλος τύπος του PTC χρησιμοποιείται για κυκλώματα προστασίας από μεγάλη ένταση ρεύματος και το διάγραμμα αντίστασης/θερμοκρασίας του απεικονίζεται στο σχήμα 4.9. Τα χαρακτηριστικά του ακολουθούν μια καμπύλη σχήματος «S» που έχει δύο σημεία λειτουργίας, ένα στο σημείο ελάχιστης αντίστασης R_{min} και το άλλο στο σημείο της μέγιστης αντίστασης R_{max} . Μεταξύ 0°C και R_{min} , ο συντελεστής θερμοκρασίας είναι αρνητικός. Είναι επίσης αρνητικός και στις θερμοκρασίες στην περιοχή υψηλότερα από R_{max} . Μεταξύ R_{min} και R_{max} ο συντελεστής θερμοκρασίας είναι μεγάλος και θετικός. Σε αυτήν την περιοχή η μεταβολή της αντίστασης του PTC μπορεί να αυξάνει 100% για κάθε 1°C αύξησης στην θερμοκρασία. Όταν ένα τέτοιο θερμίστορ συνδέεται στη σειρά με ένα φορτίο, το φορτίο είναι προστατευμένο έναντι υπερβολικού ρεύματος. Όταν από το κύκλωμα περάσει υπερβολικό ρεύμα, η αντίσταση του PTC βοηθούμενη και από την αυτό-θέρμανση (self-heating), αυξάνει με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της τάσης να εφαρμόζεται στο θερμίστορ μέχρι το ρεύμα να πέσει και πάλι σε χαμηλά επίπεδα [42].



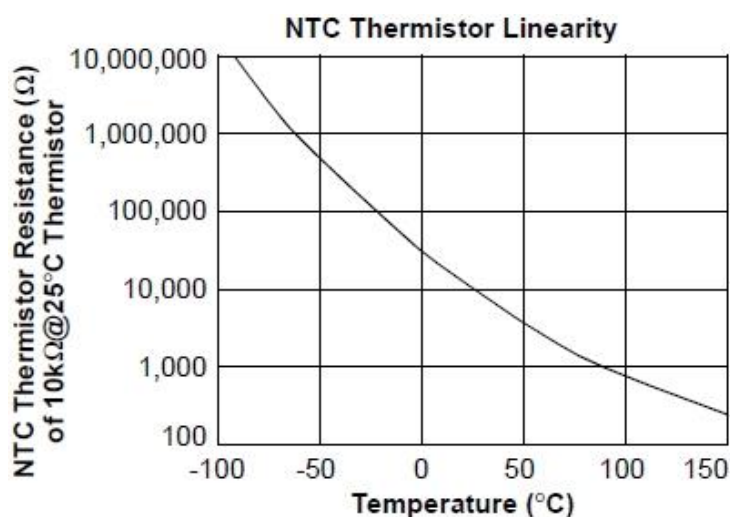
Σχήμα 4.9: Χαρακτηριστική του PTC θερμίστορ που χρησιμοποιείται για την αίσθηση της υπερβολικής έντασης ρεύματος

4.3.2 Θερμίστορ NTC

Τα θερμίστορ που χρησιμοποιούνται κυρίως για μέτρηση της θερμοκρασίας είναι τα NTC. Αυτό το κάνουν όπως και τα RTDs εκμεταλλευόμενα τα χαρακτηριστικά της αντίστασης έναντι της θερμοκρασίας. Είναι κατασκευασμένα από συνδυασμό δύο ή περισσότερων από τα ακόλουθα οξείδια: κοβάλτιο, χαλκό, σίδηρο, μαγνήσιο, μαγγάνιο, νικέλιο, κασσίτερο, τιτάνιο, βανάδιο και ψευδάργυρο.

Η μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία είναι πολύ υψηλότερη από ό, τι στην περίπτωση των μεταλλικών αντιστάσεων (RTDs). Τυπικές τιμές αντίστασης είναι 10 KΩ στους 25 °C και 200Ω στους 100°C. Αυτή η πολύ υψηλή ευαισθησία επιτρέπει τη μέτρηση σε πολύ υψηλή ανάλυση των διαφορών θερμοκρασίας. Αυτό το χαρακτηριστικό του, το κάνει πολύ ελκυστικό για εφαρμογές όπου η ακρίβεια είναι το κύριο ζητούμενο. Το συνολικό εύρος που μπορεί να μετρηθεί με θερμίστορ είναι από -100 °C έως 300 °C. Ωστόσο το εύρος αυτό δεν μπορεί να καλυφθεί από ένα τύπο θερμίστορ, αλλά χρειάζονται τέσσερα ή πέντε είδη [13].

Το θερμίστορ είναι και αυτό ένα παθητικό στοιχείο και χρειάζεται μια τάση ή ένταση διέγερσης για τη δημιουργία μιας τάσης η οποία μπορεί να μεταφραστεί σε θερμοκρασία. Έχει αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας (καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει έχουμε πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης) ο οποίος δεν είναι σταθερός και για αυτό το λόγο η σχέση της αντίστασης με την θερμοκρασία δεν είναι γραμμική (Σχήμα 4.10). Παρόλα αυτά έχει μεγάλη επαναληψιμότητα όσο η ισχύς που καταναλώνεται στον αισθητήρα παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Μόλις ξεπεραστεί κάποιο όριο, το θερμίστορ αυτό-θερμαίνεται τεχνητά και η αντίστασή του μειώνεται δίνοντας μια υψηλότερη από την πραγματική ανάγνωση της θερμοκρασίας [06].



Σχήμα 4.10: Γραφική παράσταση της αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία του θερμίστορ.

4.3.3 Λογισμική Γραμμικοποίηση Θερμίστορ

Παρά το γεγονός ότι το θερμίστορ έχει σημαντικά καλύτερη γραμμικότητα από την γραμμικότητα του θερμοστοιχείου, εξακολουθεί να απαιτεί γραμμικοποίηση στα περισσότερα κυκλώματα ανίχνευσης θερμοκρασίας. Αυτό μπορεί να γίνει λογισμικά αφού πρώτα γίνει ψηφιοποίηση της εξόδου του με ένα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC) και υπολογιστεί η αντίστασή του. Στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας πίνακας αντιστοιχιών (look-up table) αντίστασης με θερμοκρασία ο οποίος παρέχεται συνήθως από τον κατασκευαστή. Η εναλλακτική του πίνακα αντιστοιχιών είναι ή χρησιμοποίηση εξισώσεων που περιγράφουν την καμπύλη θερμοκρασίας σε σχέση με την αντίσταση.

Η εξίσωση Steinhart-Hart είναι ο εμπειρικός τύπος που αντιπροσωπεύει καλύτερα την σχέση αντίστασης έναντι της θερμοκρασίας του NTC θερμίστορ. Για την εύρεση της θερμοκρασίας όταν είναι γνωστή η αντίσταση, η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$1/T = a + b \ln(R_{Th}) + c \ln^3(R_{Th})$$

Όπου:

T = θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin ($K = ^\circ C + 273.15$)

a, b και c είναι σταθερές της εξίσωσης

R_{Th} = αντίσταση του θερμίστορ σε θερμοκρασία T.

Για την εύρεση της αντίστασης όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία, η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$R = e^{\left[\left(-\frac{\chi}{2} + \left(\frac{\chi^2}{4} + \frac{\psi^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(-\frac{\chi}{2} - \left(\frac{\chi^2}{4} + \frac{\psi^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]}$$

Όπου:

$$\chi = \frac{a - 1/T}{c}, \quad \psi = \frac{b}{c}$$

Οι σταθερές a, b και c μπορούν να υπολογιστούν είτε για ένα υλικό των θερμίστορ, ή για μεμονωμένες τιμές των θερμίστορ ενός τύπου υλικού. Για να βρεθούν οι σταθερές θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τρία ζευγάρια τιμών: στην αρχή, τη μέση και το τέλος του εύρους της μετρούμενης θερμοκρασίας. Αυτό θα εξασφαλίσει την καλύτερη αναπαράσταση της καμπύλης

σε όλο το εύρος. Η τυπική ακρίβεια είναι καλύτερη από $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ στο εύρος από $- 50^{\circ}\text{C}$ έως $+150^{\circ}\text{C}$. Αν τα ζευγάρια τιμών για τον υπολογισμό a, b και c, επιλεγούν από τους πίνακες αντιστοιχίας R-T για εύρος 100°C και υποθέτοντας ακρίβεια μέτρησης με τουλάχιστον τέσσερα σημαντικά ψηφία και κατά προτίμηση πέντε, η ακρίβεια θα είναι καλύτερη από $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ [52]. Αν το κάθε θερμίστορ βαθμονομηθεί ξεχωριστά, τότε η ακρίβεια μπορεί να φτάσει έως $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$ για εύρος θερμοκρασίας 100°C [43].

Μια απλούστερη εξίσωση που στηρίζεται στην παράμετρο B του θερμίστορ, η οποία συνήθως δίνεται από τους κατασκευαστές, είναι η εξίσωση B-parameter:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

Όπου:

T = θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin ($\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$)

R_0 = η αντίσταση του θερμίστορ για θερμοκρασία T_0 σε βαθμούς Kelvin και δίνετε από τον κατασκευαστή (π.χ. $10\text{k}\Omega$ στους 25°C)

B = σταθερά για ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας

B ή τιμή Beta, είναι μια ένδειξη της κλίσης της καμπύλης που αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ της αντίστασης και της θερμοκρασίας ενός συγκεκριμένου θερμίστορ μετρούμενη υπό συνθήκες μηδενικής ισχύος. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή Beta τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της αντίστασης ανά $^{\circ}\text{C}$. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας δυο ζευγάρια τιμών (R_{T1} $T1$, R_{T2} $T2$) στο εύρος της θερμοκρασίας από τον παρακάτω τύπο:

$$B = \ln \frac{R_{T1}}{R_{T2}} / \left(\frac{1}{T1} - \frac{1}{T2} \right) = \frac{T1 * T2}{T2 - T1} \ln \frac{R_{T1}}{R_{T2}}$$

Εκτός αν υποδεικνύεται διαφορετικά, η τιμή B υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την αντίσταση μηδενικής ισχύος σε 25°C (298.15K) και στους 50°C (323.15K) και συμβολίζεται σε αυτή την περίπτωση $B_{25/50}$. Πολύ συνηθισμένη είναι η χρήση της $B_{25/85}$ αντίστοιχα. Η τιμή Beta δεν είναι μια αυστηρή σταθερά αλλά εξαρτάται από την θερμοκρασία μέσα σε ένα μικρό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας.

Η εξίσωση B-parameter είναι μια ειδική περίπτωση της εξίσωσης Steinhart-Hart όπου:

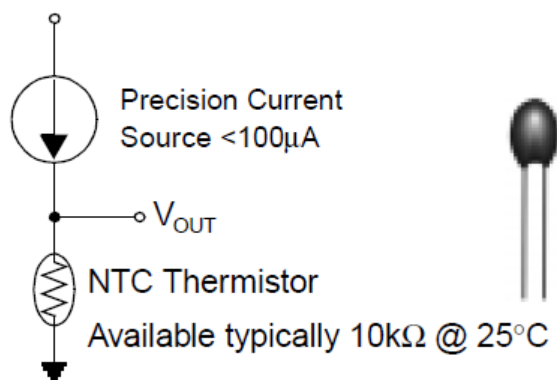
$$a = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{B} \ln(R_0), \quad b = \frac{1}{B} \quad \text{και} \quad c = 0$$

Θέτοντας $c = 0$ στην εξίσωση Steinhart-Hart, ο όρος $\ln^3(R_{Th})$ παραλείπεται. Το λάθος που προκύπτει από αυτή τη παράληψη είναι αμελητέο αφού για τυπικές τιμές αντίστασης θερμίστορ (R_{Th}), $c \approx 10^{-8}$ [11].

Η τυπική ακρίβεια της εξίσωσης B είναι $\pm 1^\circ\text{C}$ σε εύρος τιμών από 0°C έως $+100^\circ\text{C}$ [52] και $\pm 0.5^\circ\text{C}$ για εύρος 50°C [43].

4.3.4 Υλική Γραμμικοποίηση Θερμίστορ

Ένας απλός τρόπος διέγερσης του θερμίστορ με μια πηγή ρεύματος φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Με αυτό τον τρόπο, μετρώντας την τάση, υπολογίζεται η μεταβολή στην αντίσταση του αισθητήρα. Η τιμή της πηγής ρεύματος είναι τυπικά κάτω από $100\mu\text{A}$, και κατά προτίμηση γύρω στα $20\mu\text{A}$. Χαμηλότερες τιμές ρεύματος εμποδίζουν την αυτο-θέρμανση (self-heating) του θερμίστορ, αλλά η μέτρηση γίνεται αποτελεσματική για περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών. Σε υψηλότερες περιοχές της θερμοκρασίας, η μεταβολή στην αντίσταση είναι πάρα πολύ υψηλή για να μετατραπεί με ακρίβεια η αντίσταση σε τάση χωρίς να υποπέσει σε περιορισμούς λόγω θορύβου στην αναλογική διαδρομή του σήματος.



Σχήμα 4.11: Διέγερση θερμίστορ με πηγή ρεύματος ακριβείας.

Σαν παράδειγμα, το εύρος της θερμοκρασίας ενός τυπικού θερμίστορ 10kΩ στους 25°C της BetaTHERM είναι από -80°C έως 150°C. Η μεταβολή της αντίστασής του για εύρος θερμοκρασίας από -5°C έως 90°C, παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.8 [06].

Θερμ. (°C)	Αντίσ. (Ω)	Θερμ. (°C)	Αντίσ. (Ω).	Θερμ. (°C)	Αντίσ. (Ω).	Θερμ. (°C)	Αντίσ. (Ω).	Θερμ. (°C)	Αντίσ. (Ω).
-5	42314.6	15	15714.0	35	6530.1	55	2985.1	75	1480.1
0	32650.8	20	12493.7	40	5324.9	60	2487.1	80	1256.17
5	25398.5	25	10000	45	4366.9	65	2082.3	85	1070.58
10	19903.5	30	8056.0	50	3601.0	70	1751.6	90	916.11

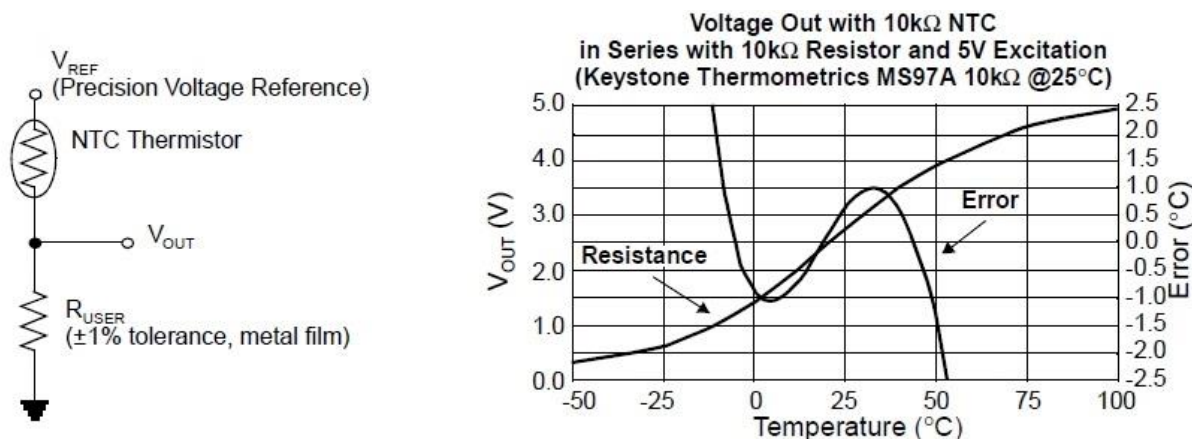
Πίνακας 4.8: Μεταβολή θερμοκρασίας ενός θερμίστορ 10kΩ στους 25°C της BetaTHERM

Από τον πίνακα παρατηρείται ότι η μεταβολή της αντίστασης για διαφορά 5°C σε υψηλή θερμοκρασία είναι σημαντικά μικρότερη από τη διαφορά 5°C σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, η αλλαγή στην αντίσταση της συσκευής στον Πίνακα 4.8 από 85°C έως 90°C είναι 154.47Ω (1070.58Ω – 916.11Ω). Η αλλαγή στην αντίσταση του ίδιου θερμίστορ από 0°C έως 5°C είναι 7252.3Ω (32650.8Ω - 25398.5Ω). Αυτή η ποικιλομορφία στην αναλογία της αντίστασης με τη θερμοκρασία πάνω στο εύρος του θερμίστορ, δημιουργεί ένα δύσκολο αναλογικό πρόβλημα. Εάν το θερμίστορ σε αυτό το παράδειγμα διεγερθεί με μια πηγή ρεύματος 20μΑ, το αναλογικό κύκλωμα πρέπει να κάνει διαχωρισμό ανά 3.09mV (154.47Ω x 20μΑ) για υψηλές θερμοκρασίες και 145.05mV (7252.3Ω x 20μΑ) για χαμηλές θερμοκρασίες για ανάλυση 5°C. Αυτό σε ένα γραμμικό σύστημα ψηφιοποίησης αναγκάζει το μέγεθος του LSB (least significant bit) να είναι 1/2 από 3.09mV και θα απαιτούσε για την επίτευξη ακρίβειας 5°C σε ένα εύρος θερμοκρασίας από 0°C έως 90°C, 409.48 διαβαθμίσεις ((32650.8Ω – 916.11Ω) x 20μΑ / 1.55mV), δηλαδή έναν 8.68 ≈ 9bit μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC).

Για την αποδοτικότερη ψηφιοποίηση του σήματος του θερμίστορ, υπάρχουν εύκολες τεχνικές γραμμικοποίησης με υλικό τρόπο που μπορούν να εφαρμοστούν πριν από την ψηφιοποίηση της εξόδου του θερμίστορ. Η ακρίβεια των εν λόγω τεχνικών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που περιλαμβάνουν το ίδιο το κύκλωμα, τις τιμές των συστατικών του κυκλώματος και το εύρος θερμοκρασίας γραμμικοποίησης [44]. Με τις παθητικές μεθόδους γραμμικοποίησης, πρόσθετες αντιστάσεις συνδέονται με το θερμίστορ (σε σειρά ή παράλληλα) και έτσι πετυχαίνεται η γραμμικοποίηση διαφόρων τμημάτων της χαρακτηριστικής του [20], [14]. Μια δεύτερη ομάδα μεθόδων γραμμικοποίησης βασίζεται στη σύνδεση του θερμίστορ σε κυκλώματα που περιέχουν λογαριθμικούς ενισχυτές [26], [25], [36]. Μια τρίτη ομάδα μεθόδων γραμμικοποίησης βασίζεται

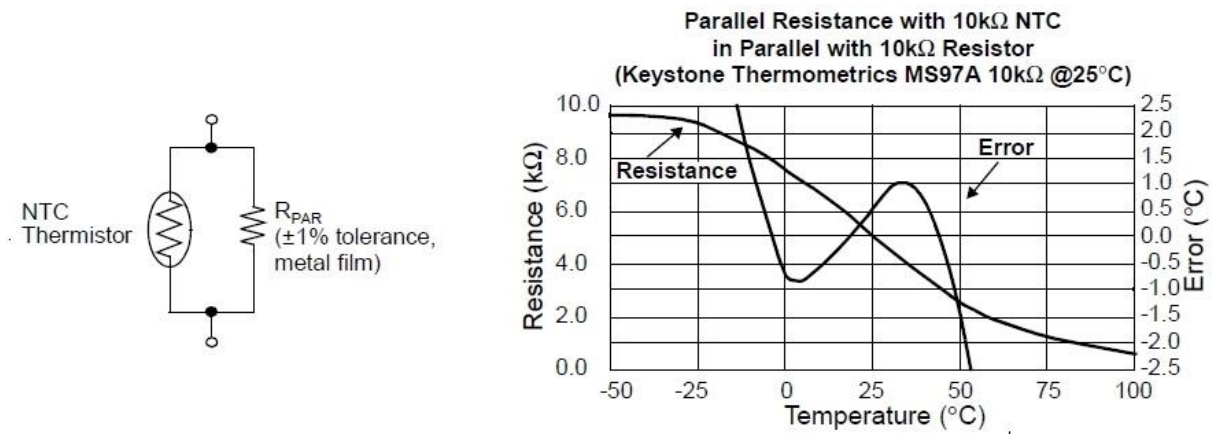
στην μετατροπή της θερμοκρασίας σε συχνότητα ή διαστήματα χρόνου. Στην περίπτωση αυτή το θερμίστορ είναι συνδεδεμένο σε κυκλώματα με βάση διακριτά ενεργά στοιχεία τα οποία επιτελούν αυτή τη μετατροπή [44], [45], [47], [41], [33].

Ένα κύκλωμα γραμμικοποίησης είναι αυτό όπου το θερμίστορ τοποθετείται σε σειρά με μια αντίσταση αναφοράς (R_{USER}) και μία πηγή τάσεως (V_{REF}) (Σχήμα 4.12). Η τάση V_{OUT} είναι σχετική με την αντίσταση του θερμίστορ και ισούται με $V_{OUT} = R / (R + R_{USER}) \times V_{REF}$. Η τάση V_{OUT} ανταποκρίνεται στη θερμοκρασία κατά γραμμικό τρόπο επί ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασίας. Η τιμή της αντίστασης R_{USER} θα πρέπει να είναι ίση με την τιμή αντίστασης του θερμίστορ στο μέσο της περιοχής του εύρους θερμοκρασίας. Αυτό δημιουργεί μια απόκριση όπου η κλίση της τάσης εξόδου βρίσκεται στο πιο απότομο σημείο της σε αυτή τη θερμοκρασία. Εάν απαιτείται υψηλή ακρίβεια, το μετρούμενο εύρος θερμοκρασίας θα πρέπει να είναι τυπικά $\pm 25^\circ\text{C}$ γύρω από την θερμοκρασία του θερμίστορ όταν η τιμή αντίστασής του είναι ίση με την R_{USER} [06].



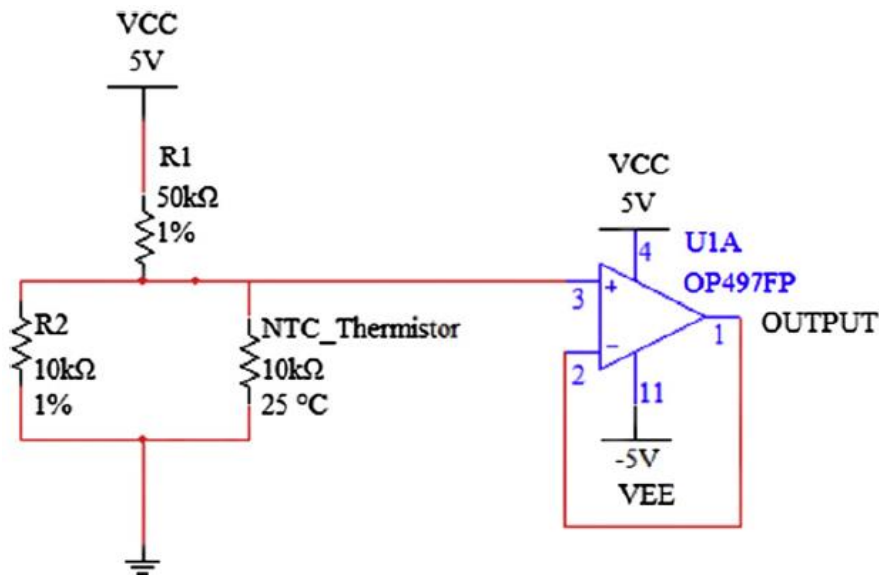
Σχήμα 4.12: Διέγερση του θερμίστορ με τάση αναφοράς σε σειρά με μια αντίσταση και απόκριση της εξόδου σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Συνδέοντας το θερμίστορ παράλληλα με μια αντίσταση R_{PAR} , δημιουργείται ένα σύνθετο στοιχείο αντίστασης (Σχήμα 4.13). Αυτό το είδος της διαμόρφωσης χρησιμοποιείται κυρίως στους βρόχους ανάδρασης ενός ενισχυτή σε κυκλώματα αυτόματου ελέγχου ενίσχυσης και δεν απαιτεί μια τάση αναφοράς ακριβείας. Στο Σχήμα 4.13 φαίνεται επίσης και η συνολική απόκριση της αντίστασης μαζί με το σφάλμα γραμμικοποίησης σε σχέση με τη θερμοκρασία. Και με αυτή τη διάταξη, η βέλτιστη γραμμικότητα της απόκρισης λαμβάνεται στο σημείο όπου η αντίσταση του θερμίστορ και της R_{PAR} είναι ίσες [06].



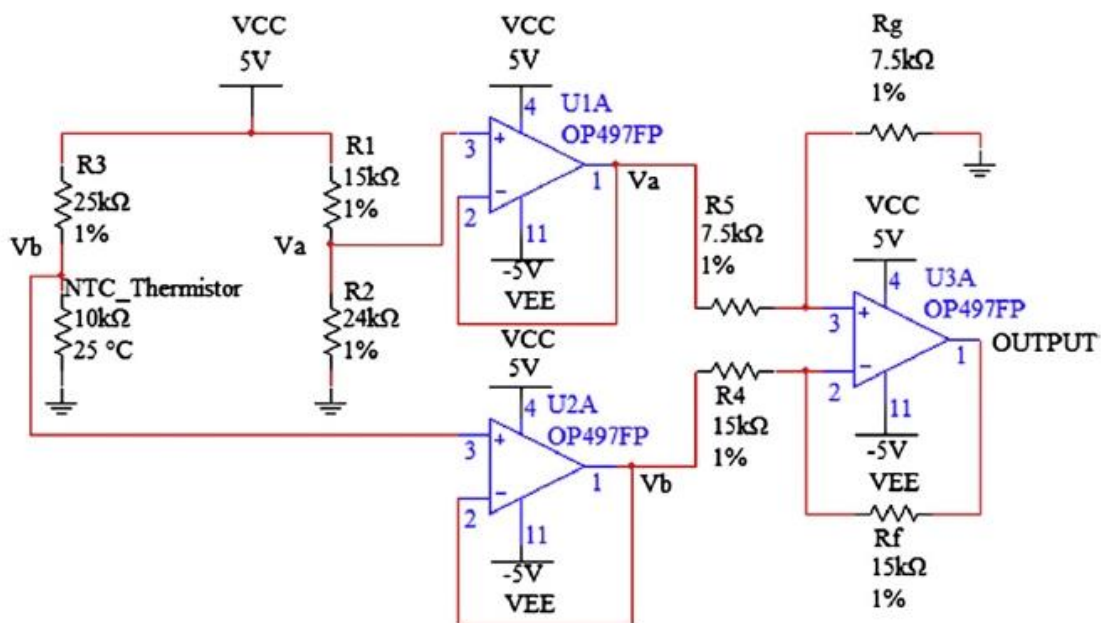
Σχήμα 4.13: Παράλληλη σύνδεση του θερμίστορ με μια αντίσταση και η απόκριση της συνολικής αντίστασης της διάταξης σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Ο συνδυασμός των δυο παραπάνω κυκλωμάτων δίνει το κύκλωμα γραμμικοποίησης θερμίστορ “Serial-Parallel Resistor” (SPR) το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Σε αυτό το κύκλωμα η τάση εισόδου V_{CC} διαιρείται μεταξύ της αντίστασης R_1 , και της παράλληλης σύνδεσης της αντίστασης R_2 και του NTC θερμίστορ. Η έξοδος του κυκλώματος SPR είναι η τάση στα άκρα της παράλληλης σύνδεσης η οποία οδηγείτε σε έναν τελεστικό ενισχυτή με ρόλο ακόλουθου τάσης (voltage follower) για την παροχή μιας σταθερής τάσης εξόδου ενός άκρου (single-ended), κατάλληλη για συστήματα συλλογής δεδομένων, ειδικά σε περιπτώσεις μετρήσεων πολλαπλών καναλιών. Με τον κατάλληλο συνδυασμό των αντιστάσεων R_1 και R_2 , μπορεί να επιτευχθεί αρκετά καλή γραμμικοποίηση της εξόδου του [44].



Σχήμα 4.14: Το SPR κύκλωμα γραμμικοποίησης του θερμίστορ.

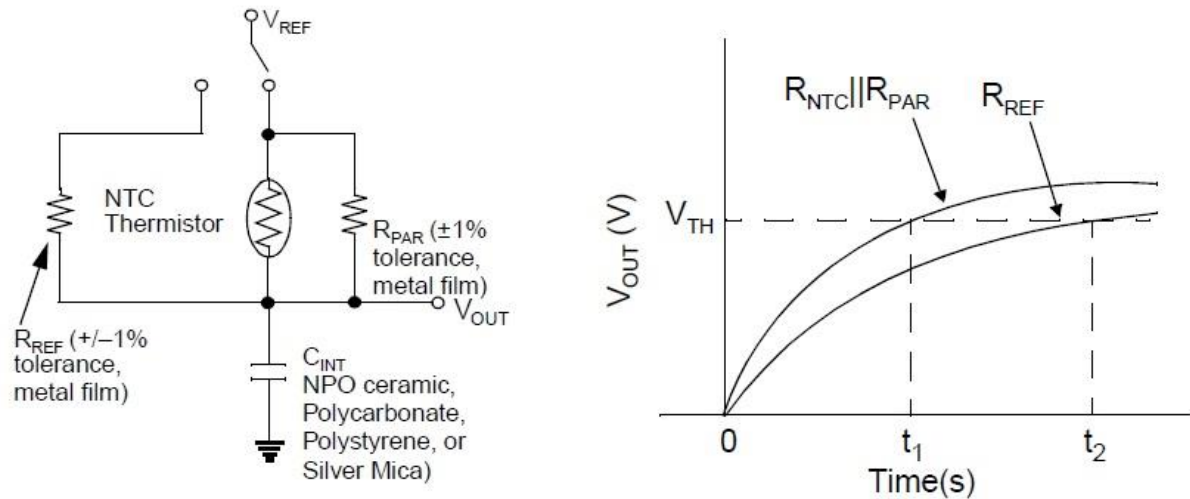
Ένα ακόμα κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την γραμμικοποίηση του θερμίστορ βασίζεται στη γέφυρα Wheatstone όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15. Η έξοδος του κυκλώματος ισούται με: $OUTPUT = V_a - V_b$. Η σταθεροποίηση της εξόδου της γέφυρας γίνεται με τη χρήση τριών ενισχυτών op-amp. Οι ενισχυτές U1A και U2A λειτουργούν σαν ακόλουθοι τάσης κάνοντας την διαφορά τάσης $V_a - V_b$ ίση με την έξοδο της γέφυρας Wheatstone. Ο τελεστικός ενισχυτής U31 λειτουργεί στην ουσία σε σύνδεση μη ανάστροφου κέρδους (αναλύονται οι συνδέσεις ενισχυτή στην επόμενη ενότητα) για να δημιουργήσει τάση ενός άκρου (single-ended) και οι τιμές για τις αντιστάσεις R_4 , R_f , R_5 και R_g επιλέγονται έτσι ώστε το κέρδος να ισούται με ένα ($(R_g + R_5)/R_g = (1 + R_f/R_4)$). Μπορούμε με κατάλληλες τιμές στις αντιστάσεις αυτές να πάρουμε κάποια ενίσχυση στην έξοδο αλλά αυτό θα το δούμε αναλυτικότερα παρακάτω. Η αντίσταση R_3 είναι αυτή που καθορίζει το ρεύμα που θα περάσει από το θερμίστορ και για αυτό η τιμή της περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών. Αυτό δημιουργεί περιορισμούς στην εξάλειψη του λάθους γραμμικοποίησης του κυκλώματος [44]. Το πλεονέκτημα της γέφυρας είναι ότι ο συνδυασμός των αντιστάσεων R_1 και R_2 μπορεί να φέρει το κύκλωμα σε ισορροπία (δηλ. $V_a - V_b = 0$) για μια τιμή αντίστασης του θερμίστορ και επομένως και της θερμοκρασίας που επιθυμούμε.



Σχήμα 4.15: Το WB κύκλωμα γραμμικοποίησης του θερμίστορ

Μια διαφορετική προσέγγιση γραμμικοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Αυτό το κύκλωμα συνδυάζει την παράλληλη διαμόρφωση του σχήματος 4.13 με μια πρόσθετη αντίσταση αναφοράς (R_{REF}) και ενός πυκνωτή (C_{INT}). Ο διακόπτης χρησιμοποιείται για τη φόρτιση και

εκφόρτιση του πυκνωτή ολοκλήρωσης μέσω των παράλληλων αντιστάσεων $R_{NTC}||R_{PAR}$ και της αντίστασης αναφοράς R_{REF} . Μόλις η τάση του πυκνωτή φθάσει μία συγκεκριμένη τιμή V_{TH} (Σχήμα 4.16), ο χρόνος φόρτισης καταγράφεται και η μεταβαλλόμενη τάση αναφοράς ρυθμίζεται στο μηδέν όπου και ο πυκνωτής εκφορτίζεται. Μόλις ο πυκνωτής εκφορτιστεί, η τάση αναφοράς εφαρμόζεται στην αντίσταση R_{REF} . Όταν η τάση εξόδου V_{out} φτάσει της τιμή V_{TH} ο χρόνος φόρτισης καταγράφεται.



Σχήμα 4.16: Παράλληλη διάταξη με συνδυασμό πυκνωτή και η απόκριση του κυκλώματος στο χρόνο.

Ο χρόνος φόρτισης του πυκνωτή μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τους τύπους:

$$V_{OUT} = V_{REF} (1 - e^{-t/RC}) \quad \text{ή} \quad t = RC \ln (1 - V_{TH}/V_{REF})$$

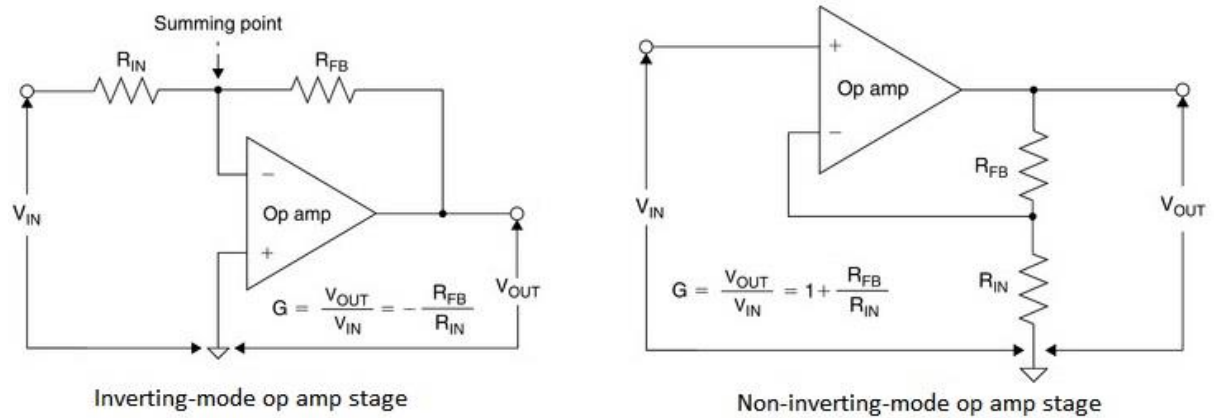
Εάν η αναλογία V_{TH}/V_{REF} διατηρείται σταθερή, η άγνωστη αντίσταση $R_{NTC}||R_{PAR}$ μπορεί να προσδιοριστεί από τον τύπο:

$$R_{NTC}||R_{PAR} = (t_2/t_1) \times R_{REF}$$

Στη διάταξη αυτή, ο υπολογισμός της αντίστασης του παράλληλου συνδυασμού $R_{NTC}||R_{PAR}$ είναι ανεξάρτητος από την C_{INT} .

4.3.5 Ενίσχυση Σήματος

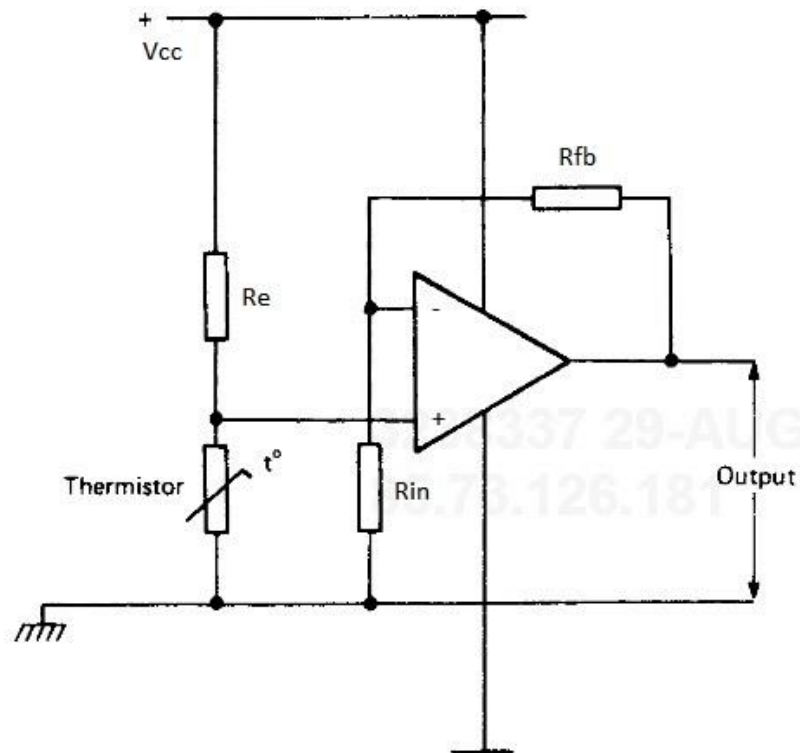
Υπάρχουν δυο βασικοί τρόποι συνδεσμολογίας της τάσης ανάδρασης (Voltage Feedback -VFB) ενός τελεστικού ενισχυτή. Έτσι έχουμε τον αναστρέφων ενισχυτή (Inverting-mode op amp) με κέρδος $G = -R_{FB}/R_{IN}$ και τον μη-αναστρέφων ενισχυτή (Non-inverting-mode op amp) με κέρδος $G = 1 + R_{FB}/R_{IN}$ όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17: Συνδεσμολογίες τάσης ανάδρασης τελεστικών ενισχυτών.

Όπως είδαμε στα παραπάνω κυκλώματα γραμμικοποίησης SPR και WB, οι τελεστικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται σαν ακόλουθοι τάσης. Ο ακόλουθος τάσης είναι μια υποπερίπτωση της συνδεσμολογίας μη αναστρέφοντος ενισχυτή και ο ρόλος του είναι να απομονώνει μια πηγή από το φορτίο της και το φορτίο να λαμβάνει όλο το σήμα που στέλνεται από την πηγή. Σε πολλές εφαρμογές όμως, πέρα από την απομόνωση του σήματος, είναι αναγκαία και η ενίσχυση του. Στην περίπτωση του θερμίστορ, η ενίσχυση του σήματος προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία τόσο στη διέγερση όσο και στη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στο Σχήμα 4.18 όπου χρησιμοποιείται η σύνδεση του μη αναστρέφοντος ενισχυτή. Η διέγερση του θερμίστορ μπορεί να ρυθμιστεί για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία από την αντίσταση R_e και η τάση στα άκρα του θερμίστορ ενισχύεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$V_{out} = V_{th} \left(1 + \frac{R_{fb}}{R_{in}} \right), \quad \text{όπου} \quad V_{th} = V_{CC} * \frac{R_{th}}{R_e + R_{th}}$$



Σχήμα 4.18: Κύκλωμα ενίσχυσης σήματος θερμίστορ με μη αναστρέφων ενισχυτή.

Ένα κύκλωμα με σταθερή ένταση διέγερσης στο θερμίστορ δίνεται στο Σχήμα 4.19 [11]. Χρησιμοποιεί στην ουσία τη συνδεσμολογία του αναστρέφοντος ενισχυτή και ενός διαιρέτη τάσης. Στο κύκλωμα αυτό, το θερμίστορ δημιουργεί την ανάδραση σε μια αναστρέφουσα σύνδεση ενισχυτή. Ο αναστρέφων ενισχυτής αποτελείται από τον τελεστικό ενισχυτή, την αντίσταση R_a και το θερμίστορ. Η διαφορά είναι στην θετική είσοδο του ενισχυτή (σημείο 3) η οποία δεν είναι γειωμένη, αλλά έχει μια τάση V_+ που ισούται με:

$$V_+ = \frac{V_{cc} * R_c}{R_b + R_c}$$

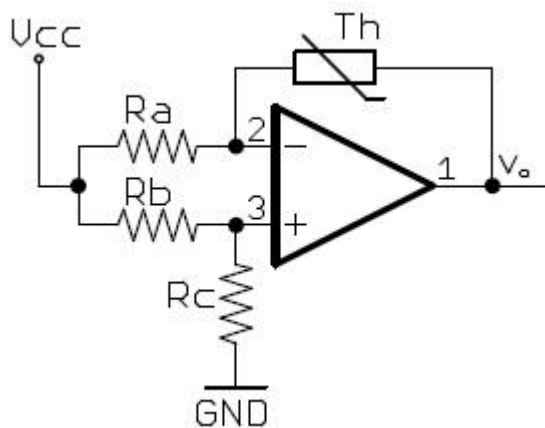
Η έξοδος V_o σύμφωνα με το κέρδος της αναστρέφουσας σύνδεσης είναι:

$$V_o - V_+ = -(V_{cc} - V_+) \frac{R_{th}}{R_a} \Rightarrow V_o = V_+ + V_+ \frac{R_{th}}{R_a} - V_{cc} \frac{R_{th}}{R_a}$$

Αντικαθιστώντας την τάση V_+ παίρνουμε την σχέση:

$$V_o = V_{cc} * \left(\frac{R_a * R_c}{R_a * (R_b + R_c)} - R_{th} * \frac{R_b}{R_a * (R_b + R_c)} \right)$$

Θέτοντας $R_a = R_b$, μπορούμε να δούμε πως η τάση V_o πλησιάζει τα +0Volt όταν η αντίσταση R_{th} πλησιάζει από αριστερά την τιμή της R_c (δηλ. $R_{th} \leq R_c$). Έχοντας κατά νου ότι, μείωση της θερμοκρασίας σημαίνει αύξηση της αντίστασης του θερμίστορ R_{th} , γίνεται κατανοητό ότι η αντίσταση R_c λειτουργεί σαν αντισταθμιστής του μηδενός (zero offset) για το κατώτατο όριο του εύρους της μετρούμενης θερμοκρασίας ($R_{th-max} \leq R_c$). Βρίσκοντας την R_c μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε και τις αντιστάσεις $R_a = R_b$ που θα μας δώσουν την επιθυμητή τάση στο ανώτατο όριο του εύρους της θερμοκρασίας (όπου R_{th-min}). Αυτό μας δίνει την ευελιξία να ορίσουμε εύκολα το εύρος θερμοκρασίας και τις τάσεις που επιθυμούμε να πάρουμε από το κύκλωμα. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, η ένταση ρεύματος που διαρρέει το θερμίστορ είναι σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας/αντίστασης R_{th} και ισούται με $I_{th} = \frac{V_{cc} \cdot R_b}{R_a(R_b + R_c)}$. Όταν οι αντιστάσεις R_a και R_b είναι ίσες τότε η σχέση αυτή γίνεται $I_{th} = \frac{V_{cc}}{R_b + R_c}$.



Σχήμα 4.19: Σύνδεση θερμίστορ στην ανάδραση του ενισχυτή.

4.3.6 Ανάλυση Σφάλματος Θερμίστορ

Λόγω του ότι το NTC θερμίστορ είναι μια αντίσταση ευαίσθητη στην θερμοκρασία, όπως και ο αισθητήρας θερμοκρασίας RTD, οι δυο αυτοί αισθητήρες έχουν πολλές κοινές πηγές σφάλματος. Όταν χρησιμοποιείται το θερμίστορ, δημιουργείται εύκολα ένα σφάλμα που οφείλεται στην υπερθέρμανση (self-heating). Επίσης ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά το σχεδιασμό της διέγερσης του θερμίστορ λόγω του ότι οι τιμές αντίστασής του είναι συνήθως υψηλότερες από τις αντίστοιχες του RTD.

Για τον υπολογισμό του φαινομένου της αυτο-θέρμανσης οι κατασκευαστές δίνουν τον «συντελεστή διάχυσης δ » (dissipation factor ή dissipation coefficient). Ο συντελεστής διάχυσης δ

καθορίζει τη σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης ισχύς και της αυτο-θέρμανσης του θερμίστορ από την άποψη της αύξησης της θερμοκρασίας. Αυτή η σχέση ορίζεται ως εξής:

$$\delta = \frac{P}{\Delta T}$$

Όπου: P είναι η διαχεόμενη ισχύς (power dissipated) σε watts και ΔT είναι η αύξηση της θερμοκρασίας σε °C.

Ο συντελεστής διάχυσης (δ) εκφράζεται σε μονάδες mW/°C.

Μια συγκεκριμένη τιμή του δ αντιστοιχεί με το ποσό της ισχύς που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του θερμίστορ κατά 1°C. Επειδή ο συντελεστής διάχυσης δ εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων, οι τιμές που αναφέρονται στα δελτία χαρακτηριστικών των κατασκευαστών είναι μόνο για αναφορά.

Για παράδειγμα, στο δελτίο χαρακτηριστικών του θερμίστορ μεγάλης ακρίβειας 103AP-2-A της Semitec του οποίου η αντίσταση είναι 10kΩ στους 25°C, ο συντελεστής διάχυσης δ δίνεται 1.2 mW/°C [40]. Με διέγερση 0.2mA, η τεχνητή αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι:

$$\Delta T = \frac{P}{\delta} = \frac{I^2 * R_{th}}{\delta}$$

$$\Delta T = \frac{(0.2mA)^2 * 10k\Omega}{1.2mW/^\circ C}$$

$$\Delta T = 0.33^\circ C$$

Αντίστοιχα, για να μην ξεπεραστεί το όριο των 0.05°C, η διέγερση θα πρέπει να είναι:

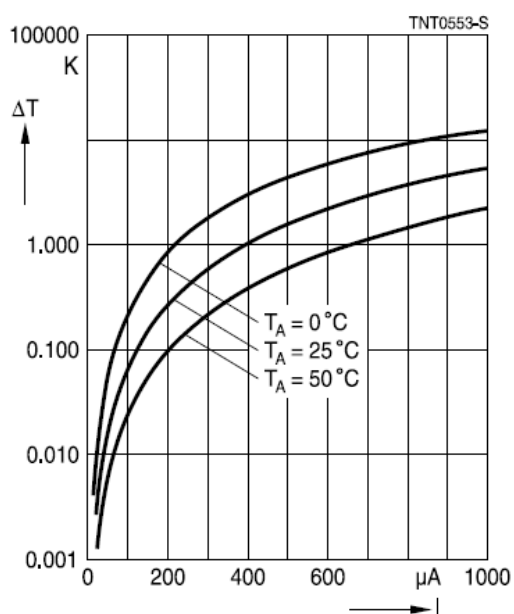
$$I \leq \sqrt{\frac{\Delta T * \delta}{R_{th}}}$$

$$I \leq \sqrt{\frac{0.05^\circ C * 1.2mW/^\circ C}{10k\Omega}}$$

$$I \leq 0.077mA$$

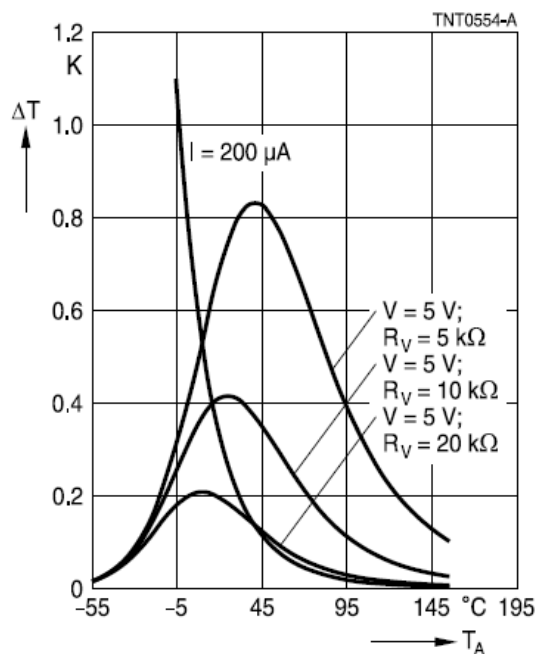
Με μεταβολές τέτοιας φύσεως στη θερμοκρασία, η μέτρηση είναι προφανώς ανακριβής. Το φαινόμενο της αυτο-θέρμανσης αυξάνει για αρκετά δευτερόλεπτα μέχρι η θερμοκρασία του θερμίστορ να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το θερμικό αποτέλεσμα περιπλέκεται ακόμα περισσότερο αφού η θέρμανση του θερμίστορ μειώνει την αντίστασή του (αντί να την αυξάνει όπως παρατηρείται με το RTD) με αποτέλεσμα η υπερθέρμανση να ανακόπτεται.

Το αποτέλεσμα της αυτο-θέρμανσης ως συνάρτηση του εφαρμοζόμενου ρεύματος διέγερσης, για το NTC θερμίστορ B57861S0103F045, φαίνεται στο Σχήμα 4.20 [21]. Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι για διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (T_A), είναι διαφορετική και η απόκλιση της θερμοκρασίας του θερμίστορ.



Σχήμα 4.20: Υπερθέρμανση του θερμίστορ NTC B57861S0103F045 για διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Υπάρχει επίσης σημαντική διαφορά στην αυτό-θέρμανση, ανάλογα με το αν η διέγερση του θερμίστορ γίνεται με σταθερή παροχή τάσης σε συνδυασμό με μια αντίσταση (κύκλωμα στο Σχήμα 4.18), ή με σταθερή παροχή ρεύματος (κύκλωμα στο Σχήμα 4.19). Στο Σχήμα 4.21 καταγράφεται το φαινόμενο και στις δυο περιπτώσεις για σταθερό ρεύμα 200 μA και σταθερή τάση 5V. Στην περίπτωση της σταθερής τάσης, το φαινόμενο καταγράφεται για τρεις διαφορετικές ονομαστικές τιμές αντίστασης θερμίστορ (5k Ω , 10k Ω και 20k Ω στους 25°C)[21].



Σχήμα 4.21: Σύγκριση του φαινομένου της αυτο-θέρμανσης για σταθερή παροχή τάσης και έντασης.

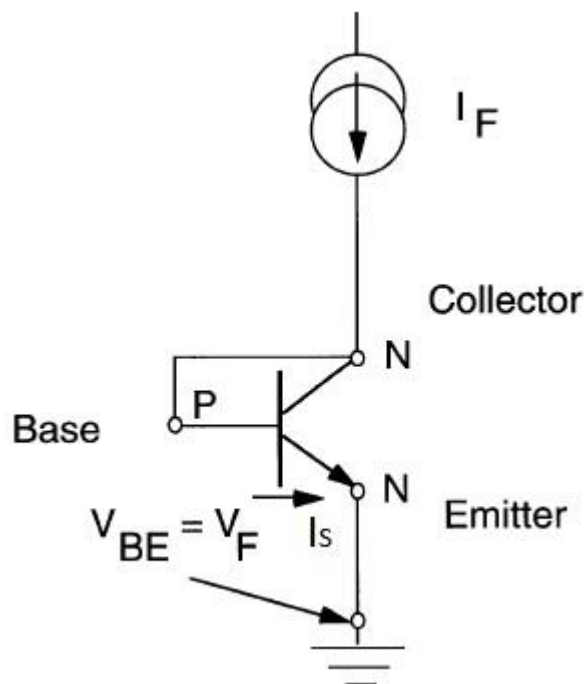
Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι στην περίπτωση του σταθερού ρεύματος, η αυτο-θέρμανση εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (υπάρχει μια απότομη κλίση στο $T_A = 25^\circ\text{C}$ και κάτω), ενώ στην περίπτωση της σταθερής τάσης η αυτο-θέρμανση είναι καλύτερα κατανοημένη σε όλο το φάσμα της θερμοκρασίας.

4.4 Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Πυριτίου (Integrated Silicon Based Sensor)

Αισθητήρες θερμοκρασίας μπορούν εύκολα να παραχθούν χρησιμοποιώντας την τεχνολογία των ημιαγωγών και των χαρακτηριστικών της θερμοκρασίας της σύνδεσης PN. Η μαζική παραγωγή και οι βελτιωμένες διαδικασίες παραγωγής που σχετίζονται με την τεχνολογία των ημιαγωγών, μπορούν να προσφέρουν ποιοτικούς αισθητήρες θερμοκρασίας με χαμηλό κόστος. Η ευαισθησία στην θερμοκρασία της σύνδεσης PN, είναι μέρος του ορισμού εξισώσεων του τρανζίστορ και είναι αρκετά προβλέψιμη πάνω από την τυπική περιοχή λειτουργίας του ημιαγωγού των -55°C έως $+150^\circ\text{C}$.

Οι περισσότεροι αισθητήρες θερμοκρασίας σύνδεσης ημιαγωγών, χρησιμοποιούν την δίοδο ενός διπολικού τρανζίστορ (σύνδεση συλλέκτη-βάσης). Ένα σταθερό ρεύμα (I_s) διέρχεται μέσω της σύνδεσης βάσης-εκπομπού (Σχήμα 4.22) και παράγει μία πτώση τάσης (V_{be}) που είναι γραμμική

συνάρτηση της θερμοκρασίας. Η συνολική πτώση τάσης έχει ένα συντελεστή θερμοκρασίας περίπου $2\text{mV}/^\circ\text{C}$ [53].



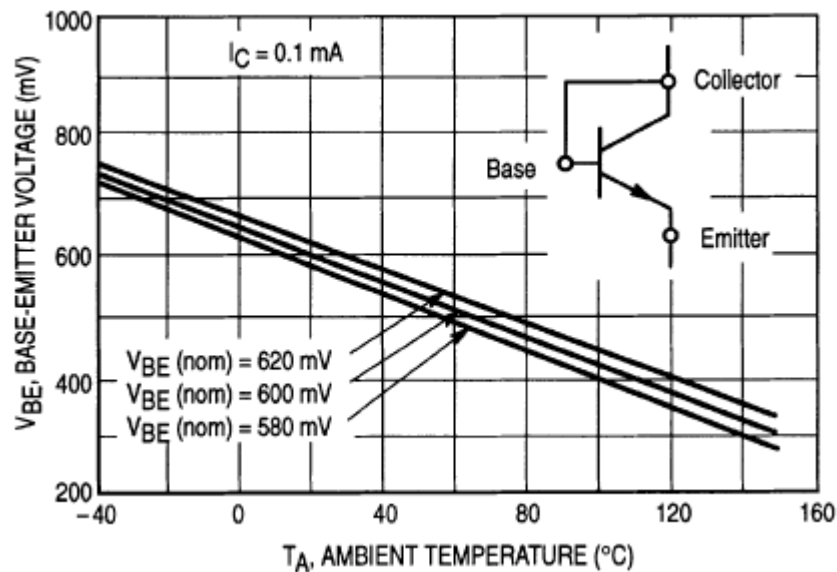
Σχήμα 4.22: Διπολικό τρανζίστορ διαμορφωμένο ως αισθητήρας θερμοκρασίας.

Συγκρινόμενο με ένα θερμοστοιχείο ή ένα RTD, ο συντελεστής της θερμοκρασίας ενός αισθητήρα ημιαγωγού είναι μεγαλύτερος αλλά εξακολουθεί να είναι αρκετά μικρός. Επίσης η τάση του αισθητήρα ημιαγωγού έχει μια μετατόπιση που ποικίλλει σημαντικά από μονάδα σε μονάδα. Ωστόσο, συναρτήσει της θερμοκρασίας, είναι πολύ πιο γραμμική από εκείνη ενός θερμοστοιχείο ή ενός RTD.

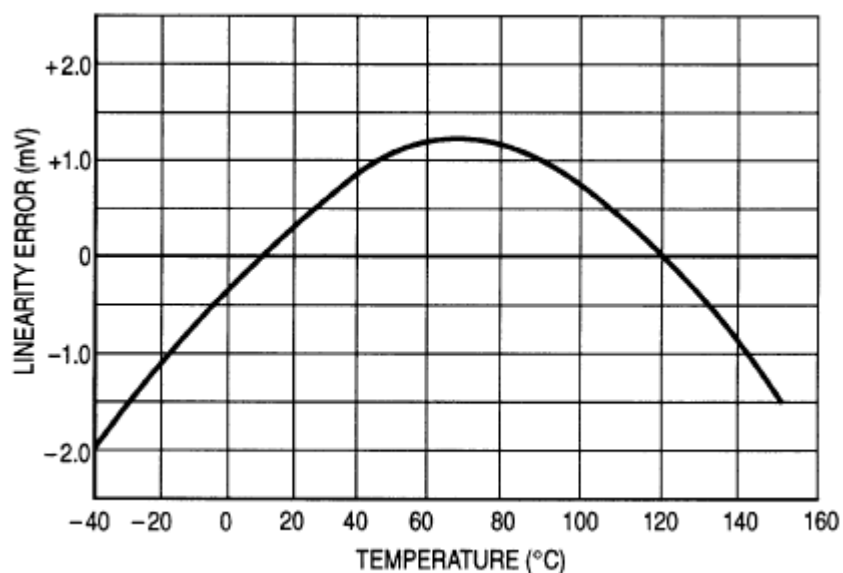
Ένα κοινό τρανζίστορ μικρού σήματος όπως ένα 2N2222 ή 2N3904, είναι αρκετό για τη δημιουργία ενός αισθητήρα θερμοκρασίας. Επιλέγοντας ένα στενό τμήμα της συνολικής κατανομής της τάσης V_{be} , μπορεί να επιτευχθεί ένας αισθητήρας θερμοκρασίας με χαμηλότερη διακύμανση των χαρακτηριστικών του.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.23 [53], ένας αισθητήρας θερμοκρασίας πυριτίου έχει μια ονομαστική τάση εξόδου 730mV στους -40°C και 300mV στους 150°C . Η τάση V_{be} στους 25°C κυμαίνεται μεταξύ 580mV και 620mV . Το σφάλμα γραμμικότητας, ή η διακύμανση από την ευθεία γραμμή, από τη διάταξη αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.24 [53]. Η συνολική ακρίβεια είναι εντός $\pm 3.0\text{mV}$, συμπεριλαμβανομένης της μη γραμμικότητας η οποία είναι τυπικά εντός

$\pm 1^\circ\text{C}$ στην περιοχή από -40°C έως 150°C . Αυτές οι μετρήσεις γίνονται με σταθερό ρεύμα συλλέκτη (I_C) 0.1mA για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της αυτο-θέρμανσης της σύνδεσης. Όταν το συνεχές ρεύμα που εφαρμόζεται είναι μεγαλύτερο από 0.1mA , το αποτέλεσμα της αυτο-θέρμανσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.



Σχήμα 4.23: Τάση βάσης - εκπομπού σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 4.24: Γραμμικό σφάλμα (σε mV) σε σχέση με τη θερμοκρασία για έναν αισθητήρα θερμοκρασίας πυριτίου.

Ένα σταθερό ρεύμα δια μέσω μιας ιδανικής pn σύνδεσης πυριτίου, παράγει μια πτώση τάσης που δίνεται από τον τύπο:

$$V_{BE} = (kT/q) * \ln(I_F/I_S)$$

Όπου:

k = Σταθερά του Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

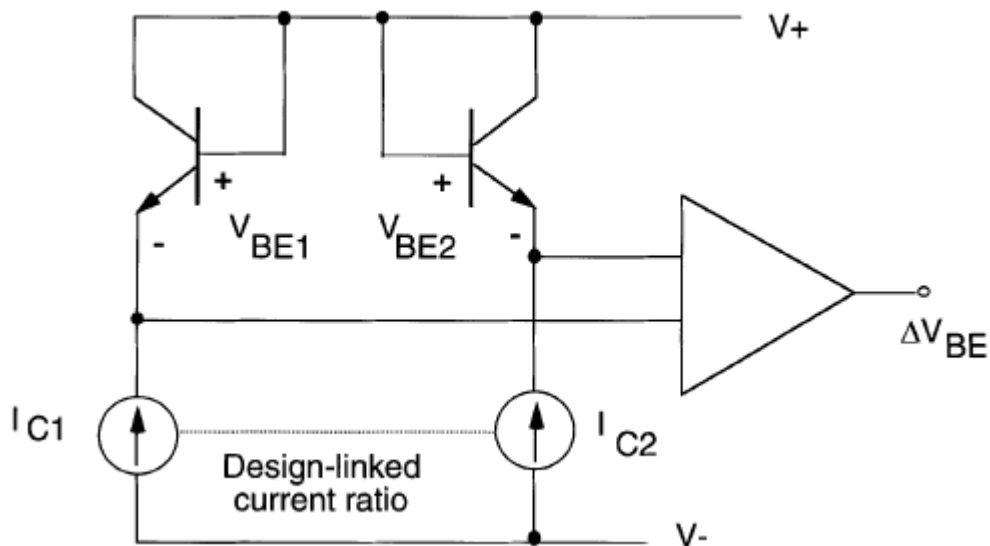
T = Θερμοκρασία

q = Φόρτιση των ηλεκτρονίων ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

I_F = Ρεύμα διέγερσης συλλέκτη (Forward current (A))

I_S = Αντίστροφο ρεύμα κορεσμού σύνδεσης (Junction's reverse saturation current (A))

Για σταθερό I_S , η τάση σύνδεσης (V_{be}) θα είναι ευθέως ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία. Δυστυχώς το I_S δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και ποικίλει ανάλογα με τον κύβο της απόλυτης θερμοκρασίας. Ως αποτέλεσμα, η τάση V_{BE} έχει συνολικό συντελεστή θερμοκρασίας περίπου $-2\text{mV}^\circ\text{C}^{-1}$.



Σχήμα 4.25: Σύνδεση τρανζίστορ για τον σχηματισμό αισθητήρα θερμοκρασίας, ανεξάρτητο των διακυμάνσεων της πηγής ρεύματος.

Για να μειωθεί η διακύμανση της θερμοκρασίας, μια αναφορά τάσης (band gap) διαμορφώνεται με βάση δύο παρακαείμενα και ουσιαστικά ταυτόσημη σε-συμπεριφορά τρανζίστορ (Σχήμα 4.25). Οι δύο συνδέσεις βάσεως-εκπομπού πολώνονται με διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος (I/A), αλλά η αναλογία των πυκνοτήτων ρεύματος είναι ουσιαστικά σταθερή σε όλο το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (-55°C έως $+150^\circ\text{C}$). Η ακόλουθη εξίσωση δείχνει πώς η διαφορική

τάση (ΔV_{be}) σχετίζεται με το ρεύμα (I) και την περιοχή εκπομπού (A) των αντίστοιχων τρανζίστορ.

$$V_{be1} + V_{be2} = (kT/q) * \ln((I_1/A_1)/(I_2/A_2))$$

Η διαφορική τάση που εμφανίζεται στην έξοδο μπορεί να ενισχυθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25 και να χρησιμοποιηθεί ως άμεση ένδειξη της απόλυτης θερμοκρασίας. Πρόσθετα κυκλώματα μπορούν να εξαλείψουν την τάση απόκλισης στους 0°C και να δώσουν έξοδο σε βαθμούς Κελσίου ή Φαρενάιτ.

Αφού ένας αισθητήρας θερμοκρασίας κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας ημιαγωγών, μια σειρά από μειονεκτήματα του αισθητήρα μπορούν να διορθωθούν με πρόσθετο κύκλωμα ενσωματωμένο στον αισθητήρα ή εξωτερικά από αυτόν. Μεταξύ των πιθανών βελτιώσεων είναι η αύξηση της γραμμικότητας, οι τάσης αναφοράς ακριβείας, οι ενισχυτές τάσης ακριβείας και οι ψηφιακές έξοδοι για άμεση διασύνδεση με έναν μικροελεγκτή (MCU). Έτσι τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων θερμοκρασίας με ολοκληρωμένα κυκλώματα πυριτίου, περιλαμβάνουν φιλικές προς το χρήστη μορφές εξόδου και ευκολία εγκατάστασης σε περιβάλλον συναρμολόγησης PCB. Από την άλλη πλευρά, η ακρίβεια και η περιοχή θερμοκρασίας αυτών των αισθητήρων δεν ταιριάζει με τα άλλα είδη αισθητήρων που συζητήθηκαν σε αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή. Ένας συνηθισμένος αισθητήρας ολοκληρωμένου κυκλώματος μπορεί να λειτουργήσει σε ένα εύρος θερμοκρασίας από -55 έως 150°C.

Κεφάλαιο 5

Σχεδιασμός του Ασύρματου Συστήματος Μέτρησης

Ένας μεγάλος αριθμός από ηλεκτρονικές λύσεις είναι διαθέσιμος για την αυτοματοποιημένη ανίχνευση, την παρακολούθηση και την συλλογή πληροφοριών. Υπάρχουν όμως πολλά προβλήματα τα οποία μπορεί να περιορίσουν την εφαρμογή τους στο ερευνητικό έργο και την αποδοχή τους από τους ερευνητές. Τα χαρακτηριστικά, οι δυνατότητες και οι τιμές των εμπορικά διαθέσιμων οργάνων, μπορεί να ποικίλλουν από φθηνές, χαμηλής ανάλυσης συσκευές περιορισμένων εισόδων, μέχρι και ακριβά, πλήρως εξοπλισμένα όργανα. Ο εξοπλισμός παρακολούθησης που αναπτύσσεται από την ιδιωτική βιομηχανία, συχνά περιλαμβάνει τεχνολογία που οι κατασκευαστές δεν επιθυμούν να δημοσιευτεί και συχνά έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί μόνο με αισθητήρες ενός συγκεκριμένου κατασκευαστή. Ακόμα, εάν είναι επιθυμητή μια σειρά από εξειδικευμένους αισθητήρες, ένας και μόνο προμηθευτής μπορεί να μην παρέχει όλα όσα χρειάζονται και ίσως να απαιτούνται πολλά συστήματα παρακολούθησης λόγω ασυμβατότητας τεχνολογιών. Τέλος, δεδομένου ότι η αγορά στην «επιστημονική συλλογή δεδομένων και παρακολούθηση» είναι μικρή, οι ιδιωτικές εταιρείες ίσως καθυστερούν να εισάγουν την καινοτομία και τις νέες τεχνολογίες στα προϊόντα τους. Το αποτέλεσμα όλων αυτών είναι ότι το κόστος της απόκτησης επαρκών και ποιοτικών δεδομένων από πολλαπλές

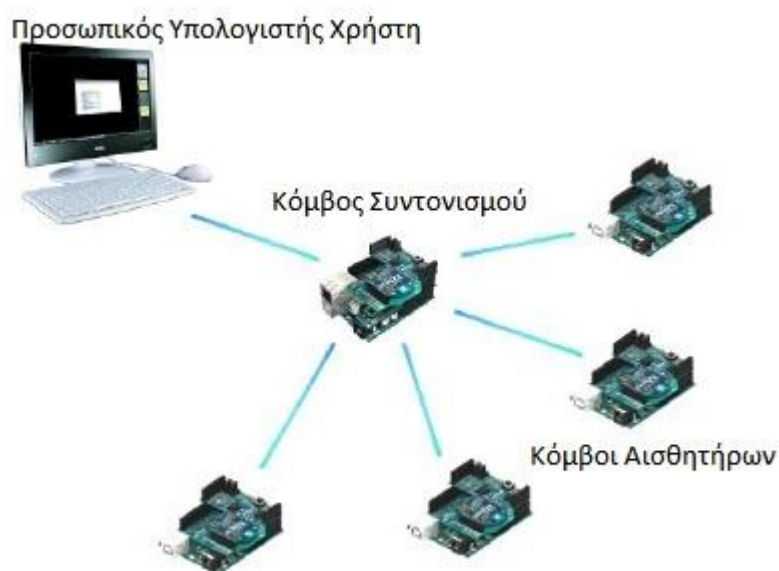
τοποθεσίες για εφαρμογές όπως η ιατρική παρακολούθηση ασθενών, η κτηνοτροφία και η γεωργία ακριβείας, πολλές φορές είναι απαγορευτικό.

Η πρόοδος της τεχνολογίας στα ηλεκτρονικά, έχει οδηγήσει σε μια ποικιλία από νέες και φθηνές δυνατότητες ανίχνευσης, παρακολούθησης και ελέγχου. Αυτές οι ταχέως εξελισσόμενες τεχνολογίες παρέχουν στους ερευνητές πρόσβαση σε χαμηλού κόστους αισθητήρες και προγραμματιζόμενα κυκλώματα βασισμένα σε μικροελεγκτές. Επιπλέον, πολλοί τύποι αισθητήρων και βοηθητικά εξαρτήματα, όπως τσιπ μνήμης, ρολόγια και συσκευές επικοινωνιών, είναι διαθέσιμα για απευθείας διασύνδεση με μικροελεγκτές, απλοποιώντας τα σχέδια των κυκλωμάτων και θέτοντας την ηλεκτρονική σχεδίαση προσιτή σε άτομα με περιορισμένο υπόβαθρο και γνώση στα ηλεκτρονικά. Αυτό ενισχύει και η προσπάθεια που γίνεται τα τελευταία χρόνια, παρόμοια με αυτή του Λογισμικού Ανοικτού Κώδικα (Open Source Initiative, <http://www.opensource.org>) για να καταστεί δυνατή, η ελεύθερη και ανοιχτή διάδοση σχεδίων και έργων σε υλικό επίπεδο (hardware) [22]. Έτσι με την ανταλλαγή και τη συνεργασία ατόμων που έχουν παρόμοια ενδιαφέροντα και ανάγκες, μπορούν να προταθούν βελτιώσεις και καινοτομίες και να ενσωματωθούν σε εφαρμογές με αποτέλεσμα περισσότεροι χρήστες να έχουν πρόσβαση σε εξειδικευμένα και τεχνολογικά προηγμένα προϊόντα.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα τεθούν οι προδιαγραφές του συστήματος και θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των βασικών μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των προδιαγραφών αυτών.

5.1 Προδιαγραφές Συστήματος

Το ασύρματο σύστημα που θα κατασκευαστεί, για λόγους απλότητας θα βασιστεί σε ένα απλό δίκτυο αστέρα του οποίου το διάγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Θα αποτελείται από τρία κυρίως μέρη τα οποία θα είναι οι κόμβοι αισθητήρων, ο κόμβος συντονισμού και η διασύνδεση με τον χρήστη. Πριν τον σχεδιασμό του συστήματος θα τεθούν οι προδιαγραφές για κάθε ένα από τα μέρη αυτά.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα του ασύρματου συστήματος μέτρησης θερμοκρασίας

5.1.1 Προδιαγραφές Κόμβου Αισθητήρων

Κάθε κόμβος αισθητήρων θα φέρει τουλάχιστον έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και το κατάλληλο κύκλωμα για την διασύνδεσή του με τον επεξεργαστή του κόμβου. Κρίσιμο σημείο στις απαιτήσεις του συστήματος είναι το σφάλμα και το εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας. Με μεγαλύτερο εύρος στην θερμοκρασία, θα υπάρξει σαν συνέπεια και μεγαλύτερο σφάλμα στη μέτρηση. Συνήθως τα όρια αυτά τα καθορίζουν οι απαιτήσεις των εφαρμογών στις οποίες καλείται το εκάστοτε σύστημα να δώσει λύση. Το σύστημα που σχεδιάζουμε για τις ανάγκες αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής, είναι ένα γενικού σκοπού Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί θεωρητικά στην γεωργία ακριβείας, την κτηνοτροφία και την ιατρική παρακολούθηση ασθενών. Έτσι το εύρος της θερμοκρασίας θα τεθεί από 0°C έως

50°C και η απόκλιση της μέτρησης θα τεθεί σαν αρχικός στόχος στο όριο των $\pm 0.5^\circ\text{C}$ και στη συνέχεια θα επιχειρηθεί μια βελτιστοποίηση της μέτρησης αυτής.

Ο κόμβος αισθητήρων θα φέρει επίσης υπομονάδα ασύρματης επικοινωνίας μέσω της οποίας θα δέχεται εντολές και θα μεταδίδει τις μετρήσεις. Οι βασικές λειτουργίες που θα διεκπεραιώνει το πρόγραμμα στον επεξεργαστή του κόμβου αισθητήρων θα είναι η λήψη και αποκωδικοποίηση εντολών, η διαχείριση του αισθητήρα για τη λήψη μέτρησης θερμοκρασίας, η αποστολή της μέτρησης μέσω της ασύρματης υπομονάδας και η διαβάθμιση (calibration) του αισθητήρα θερμοκρασίας. Βασική προϋπόθεση είναι η μικρή κατανάλωση του κόμβου ώστε να υπάρξει αυξημένη αυτονομία, κάνοντας το σύστημα λειτουργικό σε πραγματικές ανάγκες εφαρμογών.

5.1.2 Προδιαγραφές Κόμβου Συντονισμού

Ο κόμβος συντονισμού θα είναι η μονάδα που θα ελέγχει τους κόμβους αισθητήρων στέλνοντας τους εντολές και συλλέγοντας τις μετρήσεις της θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό θα φέρει και αυτός μια υπομονάδα ασύρματης επικοινωνίας. Εκτός από την επικοινωνία του με τους κόμβους αισθητήρων, ο κόμβος συντονισμού θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα διασύνδεσης με ένα υπολογιστικό σύστημα (π.χ. έναν προσωπικό υπολογιστή), από όπου ο χρήστης θα μπορεί να επεμβαίνει στο σύστημα και να αποθηκεύει τις μετρήσεις του συστήματος για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία. Οι βασικές λειτουργίες που θα διεκπεραιώνει ο επεξεργαστής του κόμβου συντονισμού θα είναι η επικοινωνία με το περιβάλλον διασύνδεσης χρήστη του υπολογιστικού συστήματος, η αποστολή εντολών στους κόμβους αισθητήρων και η προώθηση μετρήσεων και καταστάσεων από τους κόμβους στο περιβάλλον διασύνδεσης χρήστη.

5.1.3 Προδιαγραφές Περιβάλλοντος Διασύνδεσης Χρήστη

Το περιβάλλον διασύνδεσης χρήστη θα είναι το λογισμικό στον προσωπικό υπολογιστή που συνδέεται ο κόμβος συντονισμού. Μέσω του λογισμικού αυτού ο χρήστης θα μπορεί να εποπτεύει την λειτουργία του συστήματος, ίσως να παρεμβαίνει με την αποστολή κάποιων ρυθμίσεων στους κόμβους και να βλέπει σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα που λαμβάνει ο κόμβος συντονισμού. Η δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων σε κάποια πρότυπη μορφή αρχείου κρίνεται αναγκαία για μελλοντική επεξεργασία τους, καθώς επίσης και η απεικόνισή τους σε γραφήματα (charts) φιλικά προς το χρήστη, για την εξαγωγή συμπερασμάτων και αποτίμηση του συστήματος.

5.2 Επιλογή Υλικών

Βασικά κριτήρια για την επιλογή των υλικών υλοποίησης του συστήματος είναι η επίτευξη των προδιαγραφών που τέθηκαν, κρατώντας ωστόσο το κόστος χαμηλά. Η χρησιμοποίηση Υλικού και Λογισμικού Ανοιχτού Κώδικα (Open Source Hardware/Software), μπορεί να προσφέρει έτοιμες λύσεις (π.χ. βιβλιοθήκες εξαρτημάτων), να δώσει ελευθερία στην παραμετροποίηση και να συμβάλει στην δοκιμή και ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών με μικρό σχετικά κόστος.

5.2.1 Πλατφόρμες Ανάπτυξης

Οι επιλογές για την πλατφόρμα ανάπτυξης του συστήματος ήταν ανάμεσα σε κάποιο πρότυπο ασύρματο κόμβο αισθητήρων που κυκλοφορεί στο εμπόριο, όπως για παράδειγμα η οικογένεια των κόμβων Mica (βλέπε ενότητα 2.1.6), ή κάποια πλατφόρμα γενικού σκοπού με παρόμοια χαρακτηριστικά. Το Arduino είναι μια γενικού σκοπού πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα που φημίζεται για την ευκολία της χρήσης του υλικού και του λογισμικού της. Η επίσημη πλατφόρμα Arduino κυκλοφορεί σε διάφορες εκδόσεις και μπορεί να συνδυαστεί με συμβατές μονάδες προέκτασης (όπως Ethernet, GSM και WiFi shields), καλύπτοντας έτσι τις απαιτήσεις ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών [03]. Εκτός από τις επίσημες εκδόσεις, αρκετές εταιρίες έχουν αναπτύξει και τις δικές τους συμβατές με το Arduino πλατφόρμες (Funduino, ArduPilot κ.ά.), δίνοντας έτσι στον σχεδιαστή μιας εφαρμογής, τη δυνατότητα επιλογής μέσα από μια μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών.

Συγκρίνοντας το κόστος της δημοφιλέστερης πλατφόρμας Arduino (Arduino Uno) με αυτό ενός κόμβου Mica (MICAz) για το έτος 2014 (Πίνακας 5.1), η επιλογή του Arduino για ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης μεταπτυχιακής διατριβής δείχνει να είναι περισσότερο προσιτή. Ψάχνοντας κανείς για δημοσιεύσεις που σχετίζονται με ασύρματους αισθητήρες σε επιστημονικά περιοδικά, θα παρατηρήσει ότι ένα μεγάλο μέρος των ερευνητών χρησιμοποιεί πλατφόρμες Arduino για την υλοποίηση των πρωτότυπων συσκευών τους [16][12][48][30][27].

Arduino Uno Rev3	MICAz
<ul style="list-style-type: none"> • Πλακέτα επεξεργαστή: 20.00€ + Φ.Π.Α. • Δεν απαιτείται ξεχωριστή μονάδα για τον προγραμματισμό 	<ul style="list-style-type: none"> • Πλακέτα επεξεργαστή (MPR2400CB): 125.00€ + Φ.Π.Α. • USB μονάδα προγραμματισμού (MIB520): 95.00€ + Φ.Π.Α.

Πίνακας 5.1: Κόστος ανάπτυξης πλατφόρμας Arduino Uno και MICAz (2014).

Οι πλατφόρμες Arduino προγραμματίζονται με το δικό τους ελεύθερο και ανοιχτό λογισμικό Arduino IDE. Το λογισμικό αυτό είναι διαθέσιμο για λήψη και εγκατάσταση στα δημοφιλέστερα λειτουργικά συστήματα ηλεκτρονικών υπολογιστών όπως GNU/Linux, Mac OS X και Windows. Χρησιμοποιώντας το Arduino IDE, ο χρήστης μπορεί να γράψει πρόγραμμα σε γλώσσα που βασίζεται στην C++. Για το ανέβασμα του νέου κώδικα χωρίς τη χρήση εξωτερικού προγραμματιστή, οι περισσότερες εκδόσεις Arduino, έχουν προεγκατεστημένο στον μικροελεγκτή ένα boot loader που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο STK500. Υπάρχει η δυνατότητα παράκαμψης του boot loader και ο μικροελεγκτής να προγραμματιστεί μέσω των ακροδεκτών ICSP (In-Circuit Serial Programming) χρησιμοποιώντας μια μονάδα προγραμματισμού όπως την “Arduino ISP” ή κάτι αντίστοιχο. Με αυτόν τον τρόπο μένει περισσότερος χώρος ελεύθερος στη μνήμη flash για την αποθήκευση του προγράμματος. Μεγάλο πλεονέκτημα στην ανάπτυξη κώδικα, είναι η μεγάλη γκάμα από βιβλιοθήκες που υπάρχουν ελεύθερες στο διαδίκτυο και κάνουν το Arduino συμβατό με μεγάλο αριθμό συσκευών που προσθέτουν επιπλέον δυνατότητες (π.χ. μετατροπείς ADC 16-bit ή μονάδες ασύρματης επικοινωνίας).

Πλατφόρμα Κόμβου Συντονισμού

Για την υλοποίηση του κόμβου συντονισμού (controller), η έκδοση Arduino Uno Rev3 (Σχήμα 5.2) θα μπορούσε να καλύψει τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί. Βασίζεται στον 8bit προγραμματιζόμενο μικροελεγκτή ATmega328 (Atmel Corporation, San Jose, CA USA), ο οποίος είναι τοποθετημένος σε ένα κύκλωμα έτσι ώστε οι ακροδέκτες εισόδου/εξόδου (IO) του να έχουν εύκολη πρόσβαση. Ο μικροελεγκτής του Arduino Uno Rev3 περιέχει 32KB (kbyte) μνήμη flash (με 0.5KB να χρησιμοποιούνται για το boot loader), 2 KB μνήμη SRAM (static RAM) και 1KB μη πτητική (non-volatile) μνήμη αποθήκευσης δεδομένων (EEPROM). Οι γραμμές IO αποτελούνται από 14 ψηφιακούς και 6 αναλογικούς ακροδέκτες. Οι αναλογικοί ακροδέκτες παρέχουν 6 κανάλια με ικανότητα 10-bit μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Ο μικροελεγκτής παρέχει πολλές ενσωματωμένες λειτουργίες συμπεριλαμβανομένων χρονομέτρηση/μέτρηση (timer/counter), εσωτερικές και εξωτερικές διακοπές (interrupts), δυνατότητα σειριακής

επικοινωνίας αλλά και την υλοποίηση και άλλων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Επίσης υποστηρίζει προγραμματιζόμενο χρονόμετρο επιφυλακής (watchdog timer) και λειτουργία χαμηλής ισχύος για εξοικονόμησης ενέργειας. Μια περίληψη των χαρακτηριστικών αυτών όπως τα δίνει η ιστοσελίδα της εταιρίας φαίνεται στον Πίνακα 5.2.



Σχήμα 5.2: Οι δυο όψεις (πάνω και κάτω) του Arduino Uno Rev3.

Χαρακτηριστικά Arduino Uno Rev3	
Επεξεργαστής	ATmega328
Τάση λειτουργίας	5V
Τάση εισόδου (προτεινόμενη)	7-12V
Τάση εισόδου (όρια)	6-20V
Ψηφιακοί ακροδέκτες I/O	14 (από τους οποίους οι 6 παρέχουν και έξοδο PWM)
Αναλογικοί ακροδέκτες I/O	6
DC ρεύμα ανά I/O	40mA
DC ρεύμα για τον ακροδέκτη 3.3V	50mA
Μνήμα Flash	32 KB (ATmega328) από τα οποία τα 0.5KB χρησιμοποιούνται για το boot loader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Ταχύτητα ρολογιού	16 MHz

Πίνακας 5.2: Τα βασικά χαρακτηριστικά του Arduino UNO Rev3

Το Arduino Uno μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω της σύνδεσης USB (πρακτικό για τον κόμβο συντονισμού) ή με εξωτερική τροφοδοσία που μπορεί να προέλθει από έναν μετατροπέα AC/DC ή μια μπαταρία. Οι συνδεόμενες σε αυτό μονάδες επέκτασης μπορούν να τροφοδοτηθούν από τους παρακάτω ακροδέκτες:

- Ακροδέκτης 5V: Ο ακροδέκτης αυτός είναι η έξοδος του ολοκληρωμένου NCP1117ST50T3G και παρέχει τάση 5V με απόκλιση $\pm 1.0\%$.
- Ακροδέκτης 3V3: Ο ακροδέκτης αυτός είναι η έξοδος του ολοκληρωμένου LP2985-33DBVR και παρέχει τάση 3.3V με απόκλιση μικρότερη του $\pm 2.5\%$ όταν η κατανάλωση είναι μικρότερη των 50mA.

Η επικοινωνία του Arduino Uno με εξωτερικές συσκευές μπορεί να γίνει μέσω των λειτουργιών και των τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας που υποστηρίζει. Ο ATmega328 παρέχει UART TTL (5V) σειριακή επικοινωνία, η οποία είναι διαθέσιμη στους ψηφιακούς ακροδέκτες 0 (RX) και 1 (TX). Το ολοκληρωμένο ATmega16U2 της πλακέτας του Arduino, διοχετεύει αυτή τη σειριακή επικοινωνία μέσω της θύρας USB και εμφανίζει μια εικονική θύρα COM στο λειτουργικό του υπολογιστή. Η βιβλιοθήκη "SoftwareSerial" επιτρέπει τη σειριακή επικοινωνία για οποιοδήποτε ψηφιακό ακροδέκτη του Arduino Uno. Ο ATmega328 υποστηρίζει επίσης τις επικοινωνίες I²C (Inter-Integrated Circuit) και SPI (Serial Peripheral Interface). Το Arduino IDE χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη "Wire" μπορεί να απλοποιήσει τη χρήση του διαύλου I²C στους ακροδέκτες 4 (SDA) και 5 (SCL). Για την επικοινωνία SPI χρησιμοποιούνται οι ακροδέκτες 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK) και η βιβλιοθήκη "SPI".

Πλατφόρμα Κόμβου Αισθητήρων

Για τον κόμβο αισθητήρων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όπως και για τον κόμβο συντονισμού το Arduino Uno. Το μέγεθος της πλατφόρμας όμως σε αυτή την περίπτωση παίζει σημαντικότερο ρόλο μιας και ο κόμβος αισθητήρων θα είναι στην ουσία μια φορητή συσκευή που θα τροφοδοτείται με μπαταρία. Για το λόγο αυτό θα επιλέξουμε ένα μικρότερο σε μέγεθος Arduino με παρόμοια όμως χαρακτηριστικά. Το Arduino Nano 3.0, το οποίο είναι σχεδιασμένο και παράγεται από την Gravitech, διαθέτει και αυτό όπως και το Arduino Uno, τον μικροελεγκτή ATmega328 σε SMD μορφή και είναι αρκετά μικρότερο σε μέγεθος (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Οι δυο όψεις (πάνω και κάτω) του Arduino Nano.

Βασική διαφορά του Arduino Nano είναι το ότι χρησιμοποιεί το ολοκληρωμένο FTDI FT232RL για τη σειριακή επικοινωνία μέσω της Mini-B USB θύρας που διαθέτει και μέσω αυτής μπορεί να τροφοδοτηθεί και να προγραμματιστεί. Η τροφοδοσία του μπορεί να γίνει ακόμα με εξωτερική ασταθή τροφοδοσία 6-20V μέσω του ενσωματωμένου σταθεροποιητή 78M05 (VIN - pin30) ή με σταθεροποιημένη τάση 5V (5V - pin27). Η πηγή ενέργειας επιλέγεται αυτόματα από την υψηλότερη τάση.

Οι συνδεόμενες σε αυτό μονάδες επέκτασης μπορούν να τροφοδοτηθούν από τους παρακάτω ακροδέκτες:

- Ακροδέκτης 5V: Ο ακροδέκτης αυτός είναι η έξοδος του σταθεροποιητή 78M05. Όταν το Arduino Nano τροφοδοτείται από εξωτερική ασταθή τροφοδοσία, ο σταθεροποιητής 78M05 υποβιβάζει και σταθεροποιεί την τάση στα 5V και με αυτή τροφοδοτεί τόσο το ίδιο το Arduino, όσο και τις συνδεόμενες με αυτό μονάδες. Στην περίπτωση που υπάρχει εξωτερική σταθεροποιημένη τάση 5V, ο ακροδέκτης αυτός λειτουργεί σαν είσοδος της τροφοδοσίας.
- Ακροδέκτης 3V3: Ο ακροδέκτης αυτός είναι η έξοδος 3V του εσωτερικού σταθεροποιητή του ολοκληρωμένου FTDI FT232RL που χρησιμοποιείται για την USB επικοινωνία και μπορεί να δώσει ρεύμα μέχρι και 50mA.

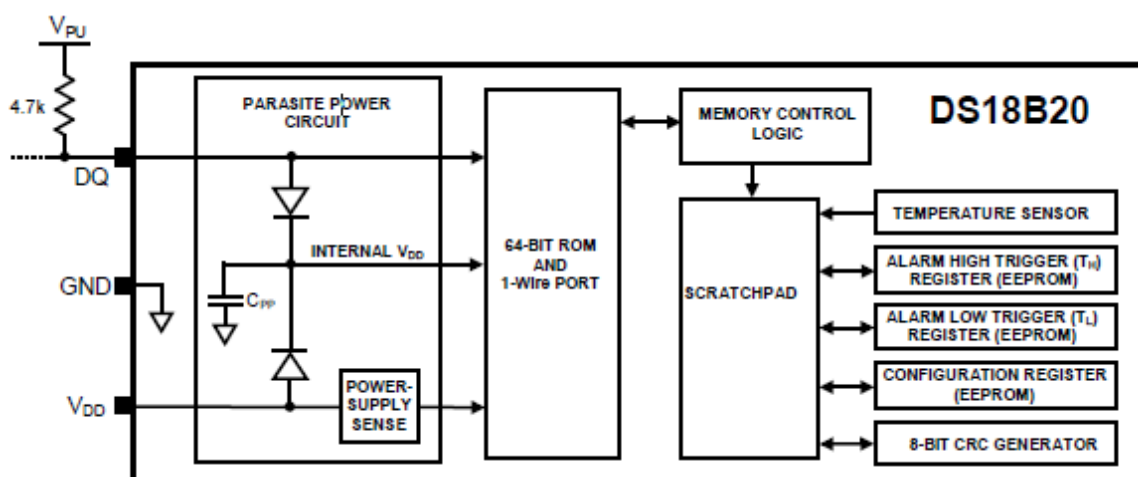
Το κόστος ενός Arduino Nano στην Ελλάδα είναι 24.42€ (2015).

5.2.2 Αισθητήρες

Ο πιο απλός, φτηνός και παράλληλα αρκετά αξιόπιστος τρόπος για την μέτρηση της θερμοκρασίας μέσω μιας ηλεκτρονικής συσκευής, είναι ένας αισθητήρας ολοκληρωμένου κυκλώματος πυριτίου. Στα πλεονεκτήματα των αισθητήρων αυτών συγκαταλέγεται η μη αναγκαία κατασκευή κυκλώματος διέγερσης και το περιθώριο επιλογής της κατάλληλης μορφής

εξόδου που θα διευκολύνει τη σχεδίαση του συστήματος. Τα βασικά μειονεκτήματα των αισθητήρων ολοκληρωμένου κυκλώματος πυριτίου, είναι η ακρίβεια της μέτρησης που δίνουν και η δυσκολία παραμετροποίησης τους.

Η έρευνα αγοράς για προσιτούς αισθητήρες ακριβείας ολοκληρωμένου κυκλώματος, κατέληξε στον αισθητήρα DS18B20. Ο DS18B20, του οποίου το block διάγραμμα απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4, είναι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας με ψηφιακή έξοδο. Χρησιμοποιεί πρωτόκολλο 1-γραμμής (1-Wire) της εταιρίας Maxim για την υλοποίηση διαύλου επικοινωνίας με τον κεντρικό μικροελεγκτή και κάθε δίαυλος μπορεί να χειριστεί ένα μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Η ανάλυση του αισθητήρα θερμοκρασίας διαμορφώνεται από το χρήστη σε 9, 10, 11, ή 12 bits, που αντιστοιχούν σε βήματα των 0.5°C, 0.25°C, 0.125°C, και 0.0625°C αντίστοιχα. Το εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας είναι από -55°C έως +125°C και η ακρίβεια είναι έως $\pm 0.5^\circ\text{C}$ πάνω στο εύρος από -10°C έως +85°C. Επιπλέον ο DS18B20 μπορεί να τροφοδοτηθεί απ' ευθείας από τη γραμμή δεδομένων, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για εξωτερική τροφοδοσία [32]. Η βιβλιοθήκη OneWire.h (<http://playground.arduino.cc/Learning/OneWire>) τον κάνει εύκολα συμβατό με το Arduino και το κόστος του είναι μικρότερο από 2.50€. Μπορεί να βρεθεί επίσης στην ίδια τιμή, ενσωματωμένος μέσα σε αδιάβροχο κάλυμμα με καλώδιο και έτοιμος για χρήση.



Σχήμα 5.4: Block Διάγραμμα του αισθητήρα DS18B20

Από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα DS18B20, γίνεται αντιληπτό πως ο αισθητήρας καλύπτει τις βασικές προδιαγραφές του συστήματος στο εύρος μέτρησης και την ακρίβεια χωρίς καν να χρειαστεί διαβάθμιση (calibration). Παρ' όλα αυτά στην μεταπτυχιακή αυτή διατριβή θα γίνει μια προσπάθεια για να προσδιοριστούν τα όρια της ακρίβειας που μπορούν να επιτευχθούν από ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Για το λόγο αυτό, θα δοκιμαστούν και διαφορετικής τεχνολογίας

αισθητήρες, προσπαθώντας με την παραμετροποίηση και τη διαβάθμισή τους, την επίτευξη μιας καλύτερης ακρίβειας μέτρησης.

Οι καταλληλότεροι αισθητήρες για την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας με μικρό κόστος είναι τα θερμίστορ NTC. Οι κύριοι λόγοι είναι η μεγάλη ευαισθησία τους στην μεταβολή της θερμοκρασίας και η επαναληψιμότητα τους. Για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής διατριβής, θα δοκιμαστούν δυο διαφορετικά NTC θερμίστορ:

- NTCLE100E3103JB0: Το NTCLE100E3103JB0 είναι θερμίστορ αντίστασης 10kΩ στους 25°C και τιμή $B_{25/85} = 3977$. Η ανοχή της αντίστασής του στους 25°C είναι $\pm 2\%$ και της τιμής $B_{25/85}$ $\pm 0.75\%$. Ο «συντελεστής διάχυσης δ» (dissipation coefficient Παρ. 3.4.3) είναι της τάξης των 7 mW/°C και η «θερμική σταθερά χρόνου» (thermal time constant) είναι περίπου 15sec. Το κόστος του είναι 0.77€ (<http://robotstore.gr>).
- 103AP-2-A: Το 103AP-2-A είναι ένα πολύ μεγάλης ακριβείας θερμίστορ με αντίσταση 10kΩ στους 25°C και τιμή $B_{25/85} = 3976$. Η ανοχή της αντίστασής του και της τιμής $B_{25/85}$ είναι $\pm 0.5\%$. Ο «συντελεστής διάχυσης δ» είναι ≥ 1.2 mW/°C στον αέρα και η «θερμική σταθερά χρόνου» (thermal time constant) είναι ≤ 15 sec. Το κόστος του είναι λίγο κάτω από 2.50€.

5.2.3 Κύκλωμα Διασύνδεσης Αναλογικού Αισθητήρα

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, θα επιχειρηθεί με την χρησιμοποίηση και διαβάθμιση (calibration) ενός αναλογικού αισθητήρα και πιο συγκεκριμένα ενός θερμίστορ, η επίτευξη μετρήσεων της θερμοκρασίας με μεγαλύτερη ακρίβεια. Για τη διασύνδεση του αισθητήρα θα χρειαστεί η δημιουργία ενός κυκλώματος από αυτά που εξετάστηκαν στην ενότητα 4.4.3 ή κάποια παραλλαγή αυτών, ανάλογα με τα αποτελέσματα των δοκιμών που θα πραγματοποιηθούν στη συνέχεια.

Βασικό στοιχείο του κυκλώματος διασύνδεσης του αναλογικού αισθητήρα είναι σε κάθε περίπτωση ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC converter). Λόγω του αναλογικού προβλήματος που περιγράψαμε στην γραμμικοποίηση του θερμίστορ με υλικά μέσα (βλέπε ενότητα 4.4.3), το θερμίστορ MF52A1103F3950 για εύρος από 0-50°C και ακρίβεια 0.05°C, με μια σταθερή ένταση διέγερσης, θα χρειαστεί μετατροπέα ADC 14bit αφού:

$$R_{th}(0^{\circ}\text{C}) = 33620.60\Omega, \quad R_{th}(49.95^{\circ}\text{C}) = 3594.98\Omega \quad R_{th}(50^{\circ}\text{C}) = 3588.18\Omega$$

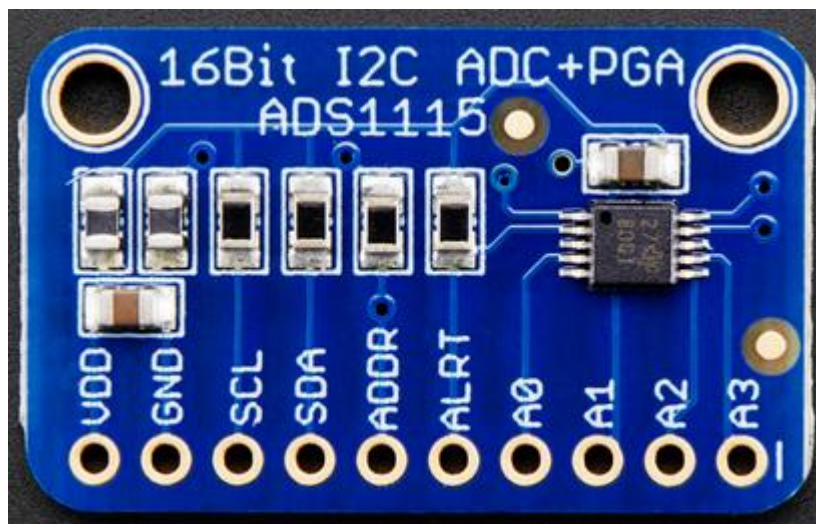
άρα $\Delta R_{th}(0-50) = 30032.42\Omega$ και $\Delta R_{th}(49.95-50) = 6.8\Omega$

οπότε θα χρειαστούν $\frac{\Delta R_{th}(0-50)}{\Delta R_{th}(49.95-50)} * 2 = 8833.065$ διαβαθμίσεις

δηλαδή μετατροπέα ADC $\log_2(8833.065 + 1) = 13.11 \approx 14bit$

Η ικανότητα μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό του μικροελεγκτή ATmega328, που χρησιμοποιεί η πλατφόρμα του Arduino Nano, είναι 10bit. Αυτό μας κάνει να αναζητήσουμε για την υλοποίηση του κυκλώματος διασύνδεσης, έναν εξωτερικό ADC μετατροπέα με ικανότητα μετατροπής τουλάχιστον 14bits. Η έρευνα στο διαδίκτυο μας οδήγησε στην πλακέτα της Adafruit ADS1115 με κόστος περίπου 15.00€, για την οποία η εταιρία προσφέρει βιβλιοθήκη για το λογισμικό Arduino IDE (<http://www.adafruit.com/product/1085>).

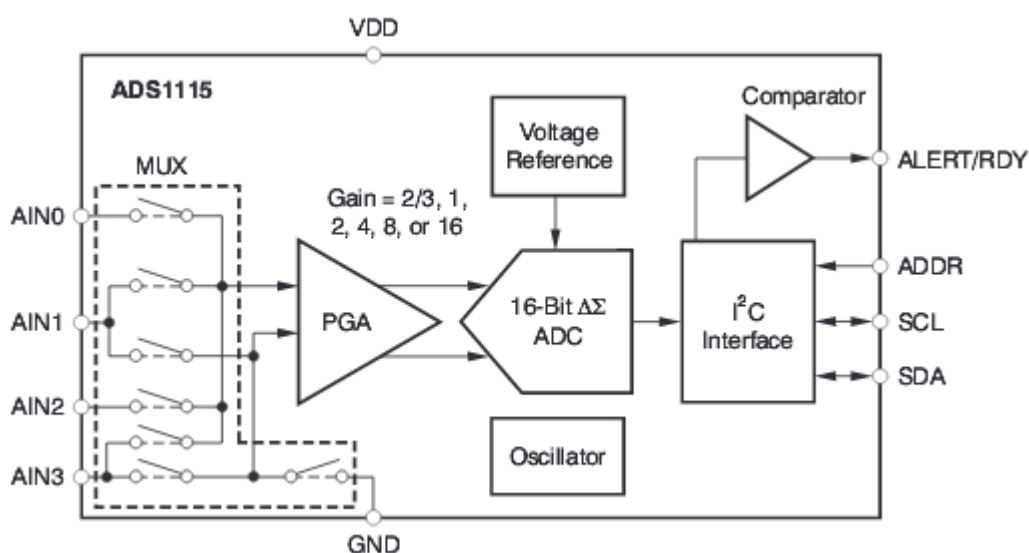
Η πλακέτα ADS1115 της Adafruit (Σχήμα 5.5), είναι στην ουσία η ενσωμάτωση του SMD ολοκληρωμένου ADS1115 της Texas Instruments Inc σε μια εύχρηστη πλακέτα, πλαισιωμένο με φερρίτες για το φιλτράρισμα του θορύβου στους ακροδέκτες τροφοδοσίας (AVDD και AGND).



Σχήμα 5.5: Η πλακέτα ADS1115 της Adafruit.

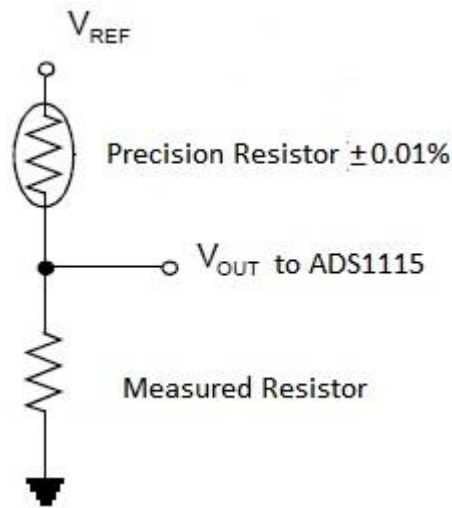
Το ολοκληρωμένο ADS1115 του οποίου το λειτουργικό διάγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 5.6, είναι ένας ADC μετατροπέας ακριβείας με ανάλυση 16 bit. Διαθέτει ενσωματωμένη τάση αναφοράς, ταλαντωτή και η μεταφορά δεδομένων γίνεται μέσω μιας σειριακής διασύνδεσης, συμβατής με το πρωτόκολλο I²C. Στη γραμμή I²C μπορούν να συνδεθούν μέχρι τέσσερα ολοκληρωμένα ADS1115 όπου στο καθένα αποδίδεται διαφορετική διεύθυνση μέσω των ακροδεκτών. Μπορεί να εκτελέσει μετατροπές με ταχύτητα από 8 μέχρι 860 δείγματα το δευτερόλεπτο (SPS) και ο

ενσωματωμένος προγραμματιζόμενος ενισχυτής (programmable gain amplifier - PGA) προσφέρει εύρος εισόδου από $\pm 256\text{mV}$ μέχρι την τάση τροφοδοσίας, επιτρέποντας τόσο τα μικρά όσο και μεγάλα σήματα να μετρηθούν με μεγάλη ανάλυση. Η τροφοδοσία του γίνεται με τάση από 2.0 έως 5.5V και η κατανάλωσή του σε ρεύμα είναι μόνο 150 μA σε συνεχή λειτουργία. Εκτός από το συνεχές τρόπο λειτουργίας, έχει τη δυνατότητα για λειτουργία με “single-shot” τρόπο. Στη λειτουργία αυτή, η τροφοδοσία σταματά μετά από κάθε μετατροπή, μειώνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την κατανάλωση κατά την περίοδο αδράνειας. Τέλος, ο εσωτερικός πολυπλέκτης (MUX) που διαθέτει, παρέχει δυο διαφορικές (differential) ή τέσσερις ενός άκρου (single ended) εισόδους [50].



Σχήμα 5.6: Το Λειτουργικό Διάγραμμα του ολοκληρωμένου ADS1115.

Η ενσωματωμένη τάση αναφοράς, επιτρέπει στο ολοκληρωμένο ADS1115 να χρησιμοποιηθεί και σαν ένα ψηφιακό βολτόμετρο μεγάλης ακριβείας. Ο συνδυασμός του με ένα διαιρέτη τάσης (Σχήμα 5.7), όπου η μια αντίσταση είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια, μπορεί να μας δώσει ένα ωμόμετρο ακριβείας. Κάτι τέτοιο θα φανεί χρήσιμο στη συνέχεια όπου θα ερευνηθούν τα όρια της κατώτερης διέγερσης όπου οι τιμές μέτρησης της αντίστασης των θερμίστορ δεν παρεκκλίνουν από τις πραγματικές. Σαν αντίσταση αναφοράς για τη σύγκριση θα χρησιμοποιηθεί μια 10k Ω αντίσταση μεταλλικού φύλλου (metal foil resistor) με ανοχή $\pm 0.01\%$ (Y078510K000T9L). Οι αντιστάσεις που θα μετρηθούν και θα χρησιμοποιηθούν στο κύκλωμα διασύνδεσης, θα είναι αντιστάσεις μεταλλικού φιλμ (metal film resistors) ανοχής $\pm 1\%$.

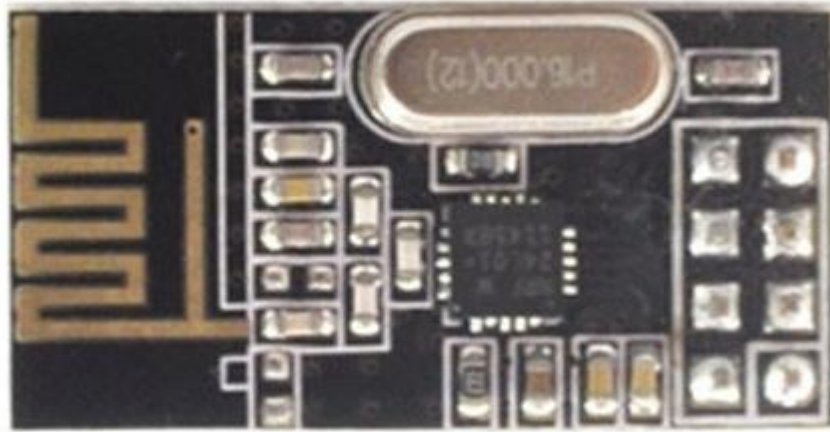


Σχήμα 5.7: Διαίρετης τάσης για μέτρηση αντιστάσεων.

5.2.4 Μονάδα Ασύρματης Επικοινωνίας

Το σύστημα που θα υλοποιηθεί για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής διατριβής, μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένα απλό και εξειδικευμένο ασύρματο δίκτυο. Οι κόμβοι αισθητήρων θα παίρνουν μετρήσεις θερμοκρασίας από το περιβάλλον και θα τις στέλνουν ασύρματα στον κόμβο συντονισμού ο οποίος θα επικοινωνεί ενσύρματα με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή του χρήστη. Για το λόγο αυτό, η χρήση μιας μονάδας επικοινωνίας που θα ακολουθεί τα πρότυπα και τη διαστρωμάτωση μιας πιστοποιημένης τεχνολογίας (Wi-Fi, Bluetooth ή Zigbee) δεν κρίνεται αναγκαία. Μια μονάδα επικοινωνίας που στηρίζεται σε ένα ιδιόκτητο πρωτόκολλο μπορεί να γίνει περισσότερο αποδοτική, μειώνοντας τα σήματα ελέγχου (overhead), την απαίτηση για μνήμη και την κατανάλωση ενέργειας.

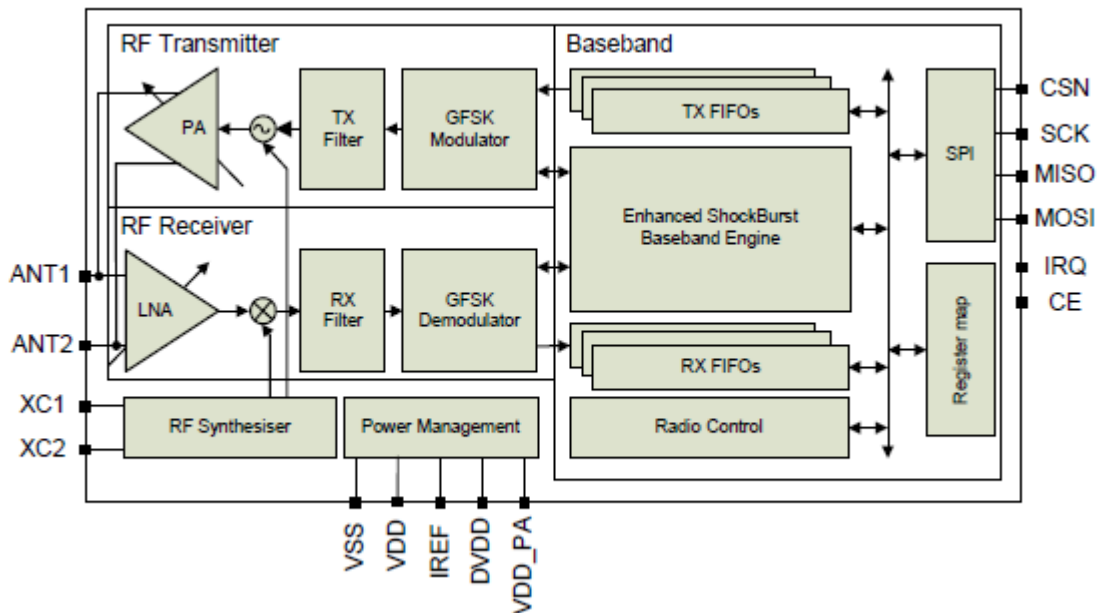
Η έρευνα αγοράς για μια μονάδα ασύρματης επικοινωνίας, συμβατής με το Arduino και με χαμηλό κόστος, μας οδήγησε στην μονάδα nRF24L01+ (κόστος 1.00€) που στηρίζεται στο ολοκληρωμένο nRF24L01+ της Nordic Semiconductor (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8: Η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας nRF24L01+.

Το ολοκληρωμένο nRF24L01+ της Nordic Semiconductor, είναι ένας υψηλής ολοκλήρωσης RF πομποδέκτης που λειτουργεί στη ζώνη ISM 2.4GHz. Για τον σχεδιασμό μιας ασύρματης μονάδας επικοινωνίας, χρειάζεται τη συνεργασία με έναν μικροελεγκτή (MCU), έναν κρύσταλλο στα 16MHz και μερικά ακόμα εξωτερικά παθητικά στοιχεία. Ο χειρισμός και η ρύθμιση των παραμέτρων του γίνεται μέσω μιας σειριακής σύνδεσης SPI με τον μικροελεγκτή, ο οποίος ελέγχει τους καταχωρητές διαμόρφωσής του σε όλους τους τρόπους λειτουργίας. Τροφοδοτείται με τάση από 1.9 μέχρι 3.6 Volt, αλλά μπορεί να δεχτεί τάσεις εισόδου μέχρι 5 Volt.

Όπως φαίνεται και στο λειτουργικό του διάγραμμα (Σχήμα 5.9), ενσωματώνει τη μηχανή του ιδιόκτητου πρωτοκόλλου Enhanced Shock-Burst™, το οποίο βασίζεται στην επικοινωνία πακέτων και είναι κατάλληλο για ασύρματες εφαρμογές πολύ χαμηλής κατανάλωσης (ULP) [34]. Το nRF24L01+ χρησιμοποιεί διαμόρφωση GFSK και παράμετροι όπως η συχνότητα καναλιού, η ισχύς εξόδου και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ρυθμίζονται από τον χρήστη.



Σχήμα 5.9: Το Λειτουργικό Διάγραμμα του ολοκληρωμένου nRF24L01+.

Η ισχύς εξόδου μπορεί να καθοριστεί στα 0, -6, -12 ή -18dBm με την κατανάλωση να είναι 11.3, 9.0, 7.5, και 7.0mA αντίστοιχα. Η ευαισθησία του δέκτη εξαρτάται από την ταχύτητα μετάδοσης και είναι -94dBm για 250kbps, -85 για 1Mbps και -82dBm για 2Mbps. Η κατανάλωση στον δέκτη είναι και αυτή ανάλογη της ταχύτητας μετάδοσης με 12.6mA για 250kbps και 13.5mA για 2Mbps.

Εκτός από τις λειτουργίες μετάδοσης (TX) και λήψης (RX) δεδομένων, για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ρεύματος, το nRF24L01+ μπορεί να μεταβεί στη λειτουργία "Power Down". Στη λειτουργία αυτή το nRF24L01+ απενεργοποιείται διατηρώντας τις τιμές των καταχωρητών και τη σύνδεση SPI διαθέσιμη για αλλαγή ρυθμίσεων και ανέβασμα/κατέβασμα των δεδομένων των καταχωρητών του. Η κατανάλωση σε αυτή τη λειτουργία είναι 900nA. Το nRF24L01+ υποστηρίζει ακόμα δυο λειτουργίες αναμονής. Στη λειτουργία αναμονής I (Standby-I mode), κρατιέται ενεργός μόνο ο κρυσταλλικός ταλαντωτής, ελαχιστοποιώντας έτσι τη μέση κατανάλωση ρεύματος στα 26μA και διατηρώντας παράλληλα μικρό το χρόνο εκκίνησης. Στη λειτουργία αναμονής II (Standby-II mode), είναι ενεργοί επιπλέον ενδιάμεσοι χρονιστές (clock buffers) και καταναλώνεται επιπλέον ρεύμα.

Το εύρος κάλυψης της μονάδας σε ανοικτό χώρο για ρυθμό μετάδοσης 250kbps, είναι συνήθως 100 μέτρα (για την έκδοση χαμηλής ισχύος). Σε εσωτερικούς χώρους το εύρος αυτό περιορίζεται. Για αποστάσεις που μπορούν να φτάσουν μέχρι το 1km, υπάρχουν μονάδες που προσθέτουν

ενισχυτές ισχύος στον πομπό και προενισχυτές στον δέκτη. Αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούν εξωτερικές κεραίες οι οποίες μπορεί να συνδέονται άμεσα ή μέσω καλωδίου για περισσότερο κέρδος ή κατευθυντικότητα [35].

Για την ευκολία στην παραμετροποίηση και τον χειρισμό της μονάδας μέσω της πλατφόρμας του Arduino, προσφέρονται διάφορες βιβλιοθήκες όπως οι MySensors, AVRLib, RadioHead, RF24 και Mirf.

Κεφάλαιο 6

Υλοποίηση του Ασύρματου Συστήματος Μέτρησης

Έχοντας συγκεντρώσει και μελετήσει τα χαρακτηριστικά των υλικών με τα οποία θα αναπτυχθεί το σύστημα, επόμενο βήμα είναι ο κατάλληλος συνδυασμός τους για τη δημιουργία του ασύρματου δικτύου δεδομένων που ικανοποιεί τις προδιαγραφές που τέθηκαν. Ο βασικός στόχος της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η ακρίβεια μέτρησης της θερμοκρασίας και η σχεδιαστική προσέγγιση ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι το κρίσιμο σημείο του συστήματος είναι ο σχεδιασμός του κόμβου αισθητήρων και πιο συγκεκριμένα του κυκλώματος διασύνδεσης ενός αισθητήρα με το Arduino Nano. Η ανάπτυξη του κυκλώματος διασύνδεσης του αισθητήρα έγινε με τη βοήθεια δοκιμαστικής πλακέτας (breadboard). Με αυτόν τον τρόπο, ήταν ευκολότερο να δοκιμαστούν και να αποτιμηθούν διαφορετικές υλοποιήσεις ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία σχεδίασης και υλοποίησης για την επίτευξη του στόχου της μεταπτυχιακής διατριβής.

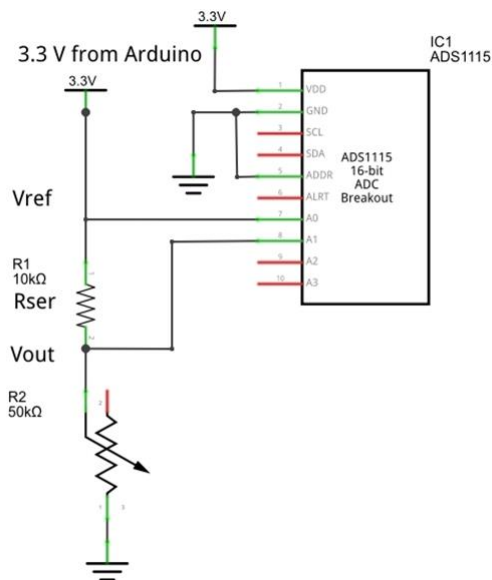
6.1 Κύκλωμα Διασύνδεσης Αισθητήρα

Όπως έχουμε είδη περιγράψει, το θερμίστορ είναι μια διάταξη που αλλάζει την ηλεκτρική του αντίστασή ανάλογα με τη θερμοκρασία. Για να μετρηθεί η αντίσταση αυτή (όπως και κάθε αντίσταση), χρειάζεται μια διέγερση ακριβείας με μια πηγή τάσης ή έντασης. Στην ενότητα 3.4.3 είδαμε τους βασικότερους τρόπους διασύνδεσης για τη διέγερση και την γραμμικοποίηση ενός NTC θερμίστορ όπου χρησιμοποιούνται τελεστικοί ενισχυτές (op amps) είτε σαν ενισχυτές σήματος είτε σαν ακόλουθοι τάσης. Το ερώτημα σε αυτό το σημείο είναι ποιο είναι το αποδοτικότερο κύκλωμα στην δικιά μας εφαρμογή όπου κύρια ζητούμενα είναι η απλότητα, η κατανάλωση και η ακρίβεια στη μέτρησης της θερμοκρασίας. Για να απαντηθεί το ερώτημα, ο σχεδιασμός του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρα ξεκίνησε με ένα απλό κύκλωμα μέτρησης

αντίστασης. Τα αποτελέσματα του κυκλώματος αυτού μας οδήγησαν σταδιακά στο τελικό κύκλωμα μέτρησης της θερμοκρασίας από ένα θερμίστορ. Στη συνέχεια περιγράφονται με τη σειρά τα κυκλώματα και ο τρόπος που αυτά δοκιμάστηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

6.1.1 Κύκλωμα Μέτρησης Αντίστασης

Το γεγονός ότι στο κύκλωμα θα χρησιμοποιηθεί ο ADC μετατροπέας ακριβείας ADS1115 (ανάλυση 16 bit) ο οποίος διαθέτει και ενσωματωμένο προγραμματιζόμενο ενισχυτή (programmable gain amplifier - PGA), οδήγησε αρχικά στην υιοθέτηση και ανάλυση του απλού κυκλώματος διαιρέτη τάσης (Σχήμα 6.1). Στον διαιρέτη τάσης εφαρμόστηκε τάση V_{ref} 3.3Volt από τον αντίστοιχο ακροδέκτη του Arduino Nano και ο οποίος δίνει σταθερότερη τάση συγκριτικά με την έξοδο των 5.5Volt. Στο κύκλωμα αυτό του διαιρέτη τάσης, η αντίσταση του θερμίστορ μπορεί να προσδιοριστεί παίρνοντας τιμές με τον ADC μετατροπέα από την τάση V_{ref} (περίπου 3.3V) και την τάση V_{out} (Σχήμα 6.1). Ο ADC μετατροπέας οδηγείται από την πλατφόρμα του Arduino μέσω της χρήσης του διαύλου I²C (ακροδέκτες SDA και SCL) και για το εύρος $\pm 4.096V$, κάθε bit στην τιμή που λαμβάνει ισοδυναμεί με ανάλυση $res = 0.125mV$. Το πώς οι τιμές αυτές προσδιορίζουν το μέγεθος της μετρούμενης αντίστασης, θα το δούμε στην ενότητα του λογισμικού του μικροελεγκτή στον κόμβο αισθητήρων (βλέπε ενότητα 6.3.1). Για την αντίσταση σε σειρά, χρησιμοποιήθηκε μια 10k Ω αντίσταση μεταλλικού φύλλου (metal foil resistor - Y078510K0000T9L) με ανοχή $\pm 0.01\%$ ($\pm 1\Omega$). Η ανάγκη για τόσο μεγάλης ακρίβειας αντίσταση, προέρχεται από το γεγονός ότι χρειαζόμαστε ένα γνωστό με ακρίβεια μέγεθος αναφοράς. Για τις ανάγκες αποτίμησης του κυκλώματος, το θερμίστορ αντικαταστάθηκε με ένα ποτενσιόμετρο 50K Ω και 12 στροφών ώστε να είναι δυνατή η αποτίμηση του κυκλώματος σε όλο το εύρος τιμών που θα κινηθεί το θερμίστορ.



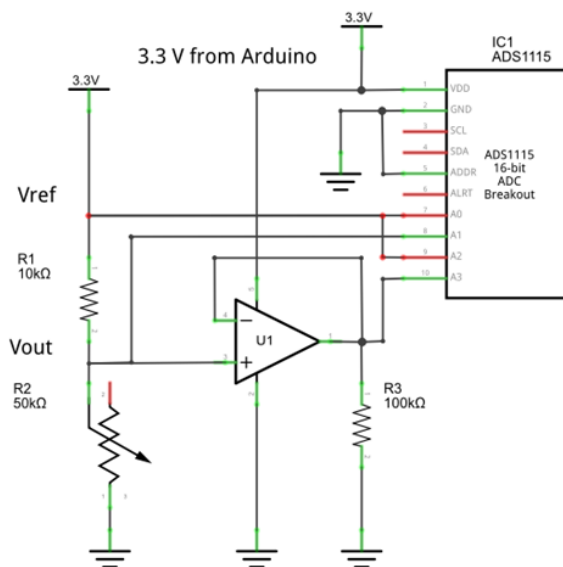
Σχήμα 6.1: Κύκλωμα διαίρετη τάσης σε σύνδεση με το ADS1115

Ο τρόπος για να διαπιστωθεί η ακρίβεια με την οποία το κύκλωμα μετράει την αντίσταση στο ποτενσιόμετρο, ήταν η μέτρηση και η επαλήθευση του αποτελέσματος μεταφέροντας το ποτενσιόμετρο στην θέση της αντίστασης ακριβείας και την αντίσταση στη θέση του ποτενσιόμετρου. Η απόκλιση της μέτρησης αυτής από την γνωστή τιμή της αντίστασης ακριβείας, μπόρεσε να μας δώσει ένα μέγεθος για το σφάλμα της μέτρησης του κυκλώματος. Το σφάλμα αυτό εκτιμήθηκε πως είναι μικρότερο από $\pm 0.03\%$ για όλο το εύρος στο οποίο θα κινηθούν οι τιμές του NTC θερμίστορ (περίπου 3588Ω για 50 C έως 33621Ω για 0 C). Ένα τέτοιο σφάλμα θα μπορούσε να μας δώσει υπό ιδανικές συνθήκες, ακρίβεια στη μέτρηση για θερμοκρασία μεγαλύτερη από $\pm 0.01^\circ\text{C}$, κάτι που κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό.

Στο παραπάνω κύκλωμα, δοκιμάστηκε το σήμα εξόδου V_{out} να οδηγηθεί στον ADC μετατροπέα, μέσω ενός ακόλουθου τάσης. Για το σκοπό αυτό δοκιμάστηκαν διάφοροι τελεστικοί ενισχυτές ακριβείας σε συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης όπως οι OP90, OPA241, ALD1721 και OPA344. Το μη σταθερό offset των τελεστικών ενισχυτών, πρόσθεσε σε όλες τις περιπτώσεις σφάλμα στις μετρήσεις. Το πρόσθετο αυτό σφάλμα έφτασε μέχρι 0.07% που μεταφρασμένο σε θερμοκρασία είναι περίπου 0.015°C .

Το γεγονός ότι ο ADC μετατροπέας διαθέτει επιπλέον δυο εισόδους (A2 και A3), μας έδωσε τη δυνατότητα να συγκρίνουμε τις διαφορές στις μετρήσεις με απευθείας σύνδεση του ποτενσιόμετρου στον ADC και με τη χρήση ακόλουθου τάσης ταυτόχρονα. Αυτό έγινε με την υλοποίηση του κυκλώματος του σχήματος 5.2 και τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν το σφάλμα

που το offset των τελεστικών προσθέτει στις μετρήσεις. Άρα οποιαδήποτε χρήση τελεστικού ενισχυτή, τόσο σαν ακόλουθου τάσης, όσο και σαν ενισχυτή σήματος, θα πρόσθετε ανεπιθύμητο σφάλμα στις μετρήσεις λόγω του σφάλματος αντιστάθμισης (offset) και ενίσχυσης (gain) αντίστοιχα.



Σχήμα 6.2: Κύκλωμα για την αποτίμηση του σφάλματος που προσθέτει το offset του τελεστικού.

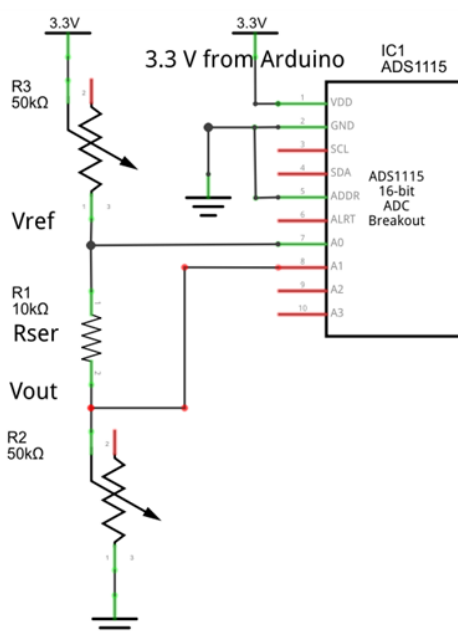
6.1.2 Επέκταση Κυκλώματος για Χρήση Θερμίστορ

Παρά το ότι οι μετρήσεις στην αντίσταση του ποτενσιόμετρου με το παραπάνω κύκλωμα κρίνονται αρκετά ικανοποιητικές, όταν το ποτενσιόμετρο αντικατασταθεί με NTC θερμίστορ, πρέπει να λάβουμε υπόψη το φαινόμενο της αυτό-θέρμανσης (self-heating) του θερμίστορ. Όπως είδαμε στην ενότητα 4.3.6 «Ανάλυση Σφάλματος του Θερμίστορ», ο συντελεστής διάχυσης δ που δίνει ο κατασκευαστής, μας επιτρέπει να αποκτήσουμε μια γενική εικόνα για την αύξηση της θερμοκρασίας του θερμίστορ όταν αυτό διεγείρεται από ρεύμα, με τον τύπο $\Delta T = \frac{P}{\delta} = \frac{I^2 * R_{th}}{\delta}$.

Στο κύκλωμα που έχει υλοποιηθεί, η αυτό-θέρμανση υπολογίστηκε πως μπορεί να ξεπεράσει ακόμα και τους 0.2°C στο μέσο της κλίμακας (25°C) όπου το ρεύμα διέγερσης είναι 166μΑ και η αντίσταση του θερμίστορ 10KΩ. Άρα για την επίτευξη ακριβούς μέτρησης της θερμοκρασίας, το φαινόμενο αυτό πρέπει να περιοριστεί σημαντικά.

Σύμφωνα με τον τύπο που δίνει την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου, με **μείωση του ρεύματος διέγερσης**, θα έχουμε και μείωση της αυτό-θέρμανσης. Η μείωση αυτή δε θα πρέπει να ξεπεράσει το όριο όπου ο θόρυβος του κυκλώματος θα γίνεται φανερά αισθητός. Ακόμα θα πρέπει το ρεύμα διέγερσης να είναι αρκετό ώστε ο ADC μετατροπέας να λαμβάνει μετρήσεις με την ίδια ακρίβεια.

Για τη μείωση του ρεύματος διέγερσης, προστέθηκε στο κύκλωμα ένα ποτενσιόμετρο σε σειρά με την αντίσταση R_{ser} (Σχήμα 6.3). Αυξάνοντας την αντίσταση του ποτενσιόμετρου, μειώνεται η τάση στο άκρο της αντίστασης R_{ser} με συνέπεια να μειώνεται και το ρεύμα διέγερσης του θερμίστορ.



Σχήμα 6.3: Προσθήκη ποτενσιόμετρου για μείωση του ρεύματος διέγερσης.

Μετά από αρκετές δοκιμές στο παραπάνω κύκλωμα, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη επιλογή στην τιμή του ποτενσιόμετρου είναι τα 30KΩ. Μεγαλύτερες τιμές από τα 30KΩ, μειώνουν τόσο το ρεύμα διέγερσης, που η επίδραση του θορύβου κάνει τον ADC μετατροπέα να χάνει την ακρίβειά του για τιμές στα άκρα της κλίμακας (3568Ω, 33630Ω). Για την τιμή των 30KΩ, το ρεύμα διέγερσης κινείται μεταξύ των ορίων 45μΑ (0°C) και 76μΑ (50°C) με το φαινόμενο της αυτό-θέρμανση να παρουσιάζεται κυρίως στην αρχή της κλίμακας (0°C) και με τιμές της τάξης των **0.06°C**. Ακόμα με την τιμή των 30KΩ η μέγιστη τιμή της τάσης V_{ref} φτάνει τα 2V (για 0°C) και αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να μειώσουμε την ενίσχυση στον

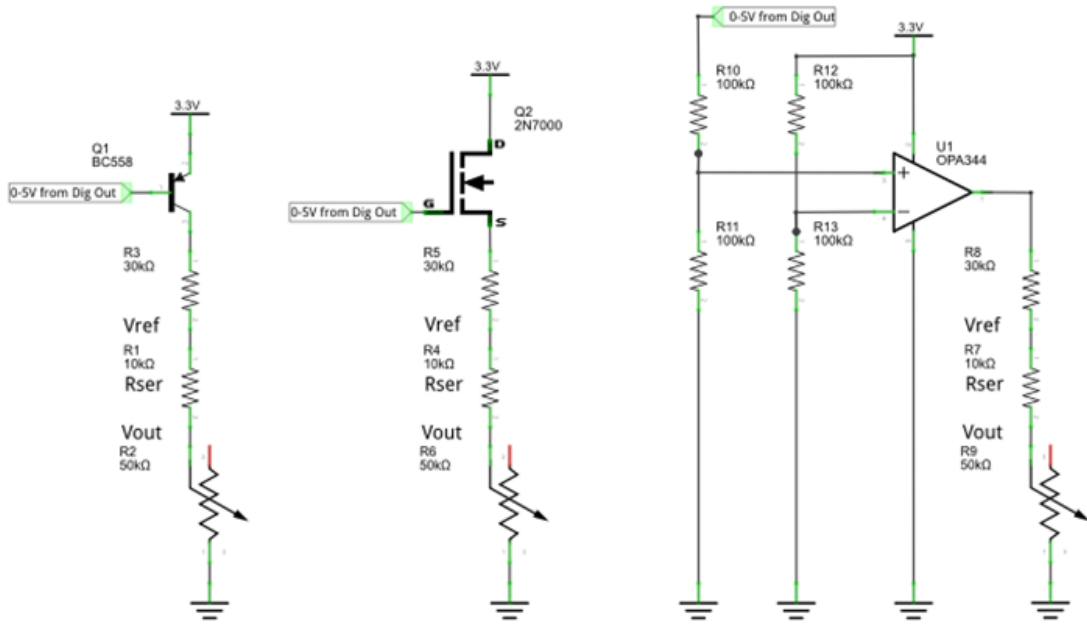
προγραμματιζόμενο ενισχυτή (PGA) του ADC στα $\pm 2.048V$ και να πάρουμε ανάλυση $0.0625mV$ ανά bit.

Έχοντας υπόψη ότι το φαινόμενο της αυτό-θέρμανσης αυξάνει για αρκετά δευτερόλεπτα μέχρι η θερμοκρασία του θερμίστορ να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, η ιδέα της **διέγερσης του θερμίστορ μόνο κατά τη διάρκεια της μέτρησης** θα μπορούσε να μειώσει ακόμα περισσότερο το φαινόμενο.

Η χρονική διάρκεια μέτρησης για κάθε ακροδέκτη του ADC μετατροπέα είναι λίγο μεγαλύτερη από $10msec$. Ο ADC μετατροπέας χρειάζεται δυο μετρήσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης του θερμίστορ (μέτρηση ακροδέκτη A0 για V_{ref} και A1 για V_{out}). Η διέγερση λοιπόν του θερμίστορ θα μπορούσε να γίνεται μόνο για χρονικό διάστημα $20msec$ (όσο διαρκούν οι δυο μετρήσεις) και μετά να σταματά η παροχή ρεύματος στο θερμίστορ ώστε αυτό να επιστρέφει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο τρόπος με τον οποίο θα γίνεται ο έλεγχος του ρεύματος διέγερσης δεν θα πρέπει παρ' όλα αυτά να επηρεάζει αρνητικά τη σταθερότητά του ή να προσθέτει θόρυβο στο κύκλωμα.

Για το σκοπό αυτό δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές τεχνικές όπως ένα PNP transistor BC558, ένα transistor N-Channel FET 2N7000 (Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου) και ακόμα η δημιουργία του ρεύματος διέγερσης με τη χρήση ενός τελεστικού ενισχυτή OPA344, ο οποίος με σταθερή τάση τροφοδοσίας $3.3V$ και συνδεσμολογία συγκριτή (comparator) μπορεί να δώσει σταθερές τάσεις 0 και $3.3V$ (Σχήμα 6.4). Η δοκιμή των κυκλωμάτων έδειξε ότι στο Arduino Nano, το transistor N-Channel FET δημιούργησε τον καθαρότερο παλμό διέγερσης έχοντας άμεση απόκριση στην εφαρμοζόμενη της τάση των $5V$ από την ψηφιακή έξοδο του μικροελεγκτή.

Μια καθυστέρηση λίγο μεγαλύτερη από $30 msec$ μετά από κάθε παλμό διέγερσης και μέχρι την επόμενη μέτρηση, μας έδωσε ενδείξεις ότι το θερμίστορ προλαβαίνει να επιστρέψει κατά ένα μεγάλο βαθμό στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχοντας υπόψη ότι η λήψη περισσότερων από ένα δείγμα για κάθε μέτρηση θα βοηθήσει σε τυχόν θόρυβο που παρουσιαστεί στο κύκλωμα και θα αυξήσει την ανάλυση των $0.0625mV$ του ADC μετατροπέα, αποφασίστηκε κάθε τελική μέτρηση της θερμοκρασίας να δημιουργείται από **35 δείγματα** με καθυστέρηση **50 msec** το καθένα.

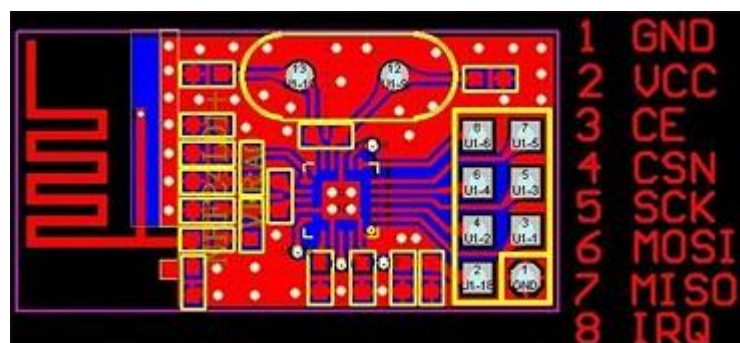


Σχήμα 6.4: Τα τρία κυκλώματα που δοκιμάστηκαν για τον έλεγχο του ρεύματος διέγερσης.

Τροφοδοτώντας το Arduino Nano με μπαταρία των 9V (και όχι από τη θύρα USB του υπολογιστή), παρουσιάστηκε στην αρχή κάθε παλμού διέγερσης μια διαταραχή η οποία εξομαλύνονταν μετά από 25msec. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε τροφοδοτώντας των ADC μετατροπέα με 3.3V από την έξοδο ενός σταθεροποιητή LP2950-33LPE συνδεδεμένου στην έξοδο των 5V του Arduino.

6.2 Διασύνδεση Ασύρματων Μονάδων

Η ασύρματη μονάδα nRF24L01+, διαθέτει οκτώ ακροδέκτες για τη σύνδεσή της στην πλατφόρμα ανάπτυξης, η σειρά των οποίων φαίνεται στο τυπωμένο κύκλωμα (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Το τυπωμένο κύκλωμα της μονάδας nRF24L01+ (πάνω όψη).

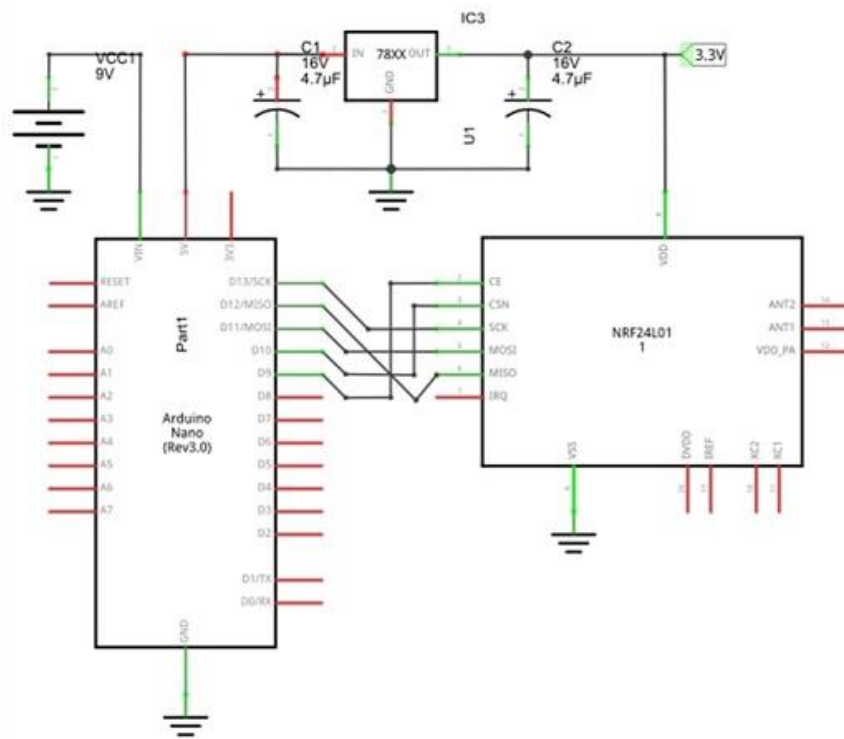
Η τροφοδοσία παρέχεται από τους ακροδέκτες 1 και 2 (GND και VCC) και σύμφωνα με τα φύλλα δεδομένων πρέπει να είναι 3.3V.

Το Arduino UNO το οποίο χρησιμοποιούμε σαν κόμβο συντονισμού, παρέχει την τάση αυτή με τον ακροδέκτη 3V3. Ο ακροδέκτης αυτός είναι η έξοδος του ολοκληρωμένου LP2985-33DBVR και παρέχει τάση 3.3V με απόκλιση μικρότερη του $\pm 2.5\%$ όταν η κατανάλωση είναι μικρότερη των 50mA. Η απευθείας τροφοδότηση λοιπόν από τον ακροδέκτη 3V3 του Arduino UNO φαίνεται ότι δεν θα προκαλέσει κάποιο πρόβλημα στη ομαλή λειτουργία του αφού στον κόμβο συντονισμού δεν υπάρχουν άλλες μονάδες που χρειάζονται τροφοδοσία αλλά ούτε μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα και η παραγωγή θορύβου.

Το Arduino Nano το οποίο χρησιμοποιούμε για τον κόμβο αισθητήρων, παρέχει και αυτό τάση 3.3V με τον ακροδέκτη 3V3. Ο ακροδέκτης αυτός όμως στο Arduino Nano είναι η έξοδος 3.3V του ολοκληρωμένου FTDI FT232RL που χρησιμοποιείται για την USB επικοινωνία και μπορεί να δώσει ρεύμα μέχρι και 50mA. Εκτός από την ασύρματη μονάδα, το Arduino Nano πρέπει να τροφοδοτήσει με τάση 3.3V τόσο την πλακέτα του ADC μετατροπέα, όσο και τον παλμό διέγερσης του θερμίστορ ο οποίος πρέπει να μένει σταθερός. Το γεγονός αυτό μας οδήγησε στο να προσθέσουμε στον κόμβο αισθητήρων έναν σταθεροποιητή τάσης 3.3V. Συνδέοντας την είσοδο ενός LP2950-33 με την τάση 5V του Arduino Nano, δημιουργήσαμε μια δεύτερη πηγή τροφοδοσίας 3.3V (Σχήμα 6.6). Με την πηγή αυτή τροφοδοτήθηκε η ασύρματη μονάδα καθώς και η πλακέτα του ADC μετατροπέα. Ο ακροδέκτης 3V3 από το ολοκληρωμένο FTDI FT232RL έμεινε μόνο για τη δημιουργία ενός καθαρού παλμού διέγερσης.

Οι ακροδέκτες 3 και 4 (CE και CSN) συνδέονται στους ακροδέκτες του Arduino που καθορίζει η βιβλιοθήκη που χρησιμοποιείται. Στην βιβλιοθήκη RF24 χρησιμοποιούνται σαν προεπιλογή οι ακροδέκτες 9 και 10 αντίστοιχα. Στην βιβλιοθήκη Mirf την οποία χρησιμοποιούμε, προεπιλογή είναι οι ακροδέκτες 8 και 7, αλλά για λόγους συμβατότητας με τις άλλες βιβλιοθήκες, στο λογισμικό του μικροελεγκτή και στην αρχικοποίηση των ασύρματων μονάδων ορίζουμε και εμείς για ακροδέκτες CE και CSN τους 9 και 10 αντίστοιχα.

Οι ακροδέκτες 5, 6, 7 και 8 (SCK, MOSI, MISO, IRQ) συνδέονται αντίστοιχα στους ακροδέκτες 13, 11, 12 και 2 του Arduino. Ο IRQ δε χρησιμοποιείται από τη βιβλιοθήκη Mirf οπότε στον κόμβο αισθητήρων τον αφήνουμε στον αέρα (ο ακροδέκτης 2 του Arduino Nano χρησιμοποιείται για την οδήγηση του παλμού διέγερσης στο δεύτερο κανάλι).



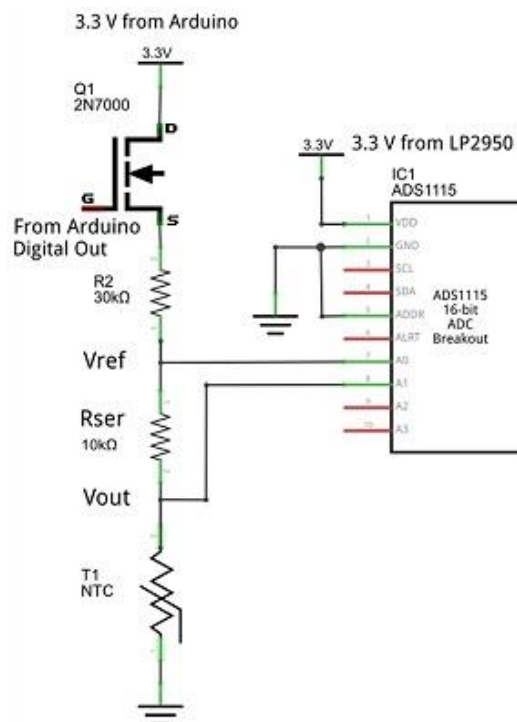
Σχήμα 6.6: Το σχηματικό σύνδεσης της μονάδας nRF24L01+ στον κόμβο αισθητήρων.

6.3 Λογισμικό Μικροελεγκτή Κόμβου Αισθητήρων

Παράλληλα με την ανάπτυξη του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρα, ήταν αναγκαία και η ανάπτυξη του λογισμικού στον μικροελεγκτή του κόμβου τόσο για τη λήψη των μετρήσεων όσο και για τον έλεγχο της ποιότητας των μετρήσεων αυτών. Με την ολοκλήρωση των συναρτήσεων για τη λήψη και τον έλεγχο των μετρήσεων, γράφτηκαν επιπλέον συναρτήσεις για τη διαβάθμιση του κυκλώματος διασύνδεσης και για την σειριακή και ασύρματη (μέσω του κόμβου συντονισμού) αμφίδρομη επικοινωνία με το λογισμικό διασύνδεσης χρήστη. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η λογική και οι τεχνικές για τη δημιουργία των συναρτήσεων αυτών.

6.3.1 Λήψη Μετρήσεων από τον Αισθητήρα

Όπως έχουμε δει μέχρι τώρα, για τη λήψη μετρήσεων από τον NTC αισθητήρα, χρησιμοποιήσαμε τον ADC μετατροπέα ADS1115. Για την οδήγηση του ADS1115 από το Arduino, χρειάστηκε η βοήθεια της βιβλιοθήκης «[Adafruit ADS1015.h](#)». Με τη χρήση της βιβλιοθήκης αυτής δίνεται η δυνατότητα για τη λήψη ενός αριθμού (adc) από την κάθε είσοδο του μετατροπέα (0 έως 3). Ο αριθμός αυτός αν πολλαπλασιαστεί με την ανάλυση (res) που προηγουμένως έχει τεθεί από τον προγραμματιζόμενο ενισχυτή (PGA), δίνει την τάση στην είσοδο του μετατροπέα.



Σχήμα 6.7: Κύκλωμα διασύνδεσης αισθητήρα.

Ο τύπος που θα μας δίνει την αντίσταση του θερμίστορ από τις τάσεις Vref και Vout (Σχήμα 6.7) είναι:

$$R = \frac{R_{ser}}{\frac{V_{ref}}{V_{out}} - 1}, \text{ όπου } R_{ser} \text{ είναι η τιμή της αντίστασης σε σειρά.}$$

Ο τύπος αυτός μπορεί να γραφεί αν αντικαταστήσουμε τις τάσεις Vref και Vout σε:

$$R = \frac{R_{ser}}{\frac{adc0 * res}{adc1 * res} - 1} \Rightarrow R = \frac{R_{ser}}{\frac{adc0}{adc1} - 1} \quad (6.1), \text{ όπου } adc0, \text{ και } adc1 \text{ είναι οι τιμές που λαμβάνει το Arduino}$$

από τον ADC μετατροπέα.

Οι τιμές adc0, και adc1 στον κώδικα του μικροελεγκτή, είναι ο μέσος όρος από 32 δείγματα (sample0, sample1 αντίστοιχα) που λαμβάνονται ανά 50 msec κατά τον ακόλουθο τρόπο:

```
// λήψη δειγμάτων
digitalWrite(excitPin, HIGH); // έναρξη παλμού διέγερσης
sample0 = ads.readADC_SingleEnded(channel_0); // λήψη δείγματος από είσοδο 0
sample1 = ads.readADC_SingleEnded(channel_1); // λήψη δείγματος από είσοδο 1
digitalWrite(excitPin, LOW); // τερματισμός παλμού διέγερσης και αναμονή 50 msec
//
```

Γνωρίζοντας μετά από αυτή τη διαδικασία την αντίσταση του NTC θερμίστορ, μπορούμε να την αντιστοιχίσουμε με κάποια τιμή θερμοκρασίας. Χρησιμοποιώντας την αντίσταση (R_0) του θερμίστορ στους 25°C (T_0) και την τιμή $B_{25/85}$ (ή $B_{25/50}$) από τα φύλλα δεδομένων του θερμίστορ, εφαρμόζουμε την εξίσωση B-parameter:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

Όπου:

T = θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin ($K = ^\circ C + 273.15$)

R_0 = η αντίσταση του θερμίστορ για θερμοκρασία T_0 σε βαθμούς Kelvin και δίνετε από τον κατασκευαστή

B = σταθερά για ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας

Η υλοποίηση της εξίσωσης αυτής στο λογισμικό του Arduino γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

```

// μετατροπή τιμής αντίστασης σε τιμή θερμοκρασίας
float steinhart;
steinhart = resistance / THERMISTORNOMINAL; // (R/Ro)
steinhart = log(steinhart); // ln(R/Ro)
steinhart /= BCoefficient; // ln(R/Ro)/B
steinhart += 1.0 / (TEMPERATURENOMINAL + 273.15); // + (1/To)
steinhart = 1.0 / steinhart; // Invert
steinhart -= 273.15; // convert to C
return steinhart;
//

```

Εκτός από τον κώδικα για τον υπολογισμό της αντίστασης, προστέθηκε και κώδικας ώστε να μπορούν να αποτιμηθούν κατά ένα βαθμό οι μετρήσεις αυτές. Έτσι για τα 35 δείγματα της τάσης που λαμβάνονται για κάθε μέτρηση, ο κώδικας αυτός παρουσιάζει την τιμή και τον αύξοντα αριθμό του ελάχιστου και του μέγιστου δείγματος, καθώς και τη διαφορά τους. Επίσης κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζει και παρουσιάζει την ελάχιστη και μέγιστη αντίσταση που παρουσιάζεται στο θερμίστορ κατά τη διάρκεια των 35 δειγμάτων και το τι σημαίνει αυτή η διαφορά τους σε βαθμούς θερμοκρασίας. Αυτό επιτρέπει την αξιολόγηση της μέτρησης αφού μεγάλες αποκλίσεις στις ελάχιστες και μέγιστες τιμές με σχετικά σταθερή θερμοκρασία, σημαίνει πρακτικά ότι στο κύκλωμα διασύνδεσης του αισθητήρα υπάρχει θόρυβος. Τέλος υπολογίζεται το ρεύμα διέγερσης του θερμίστορ και εκτιμάται η αύξηση στη θερμοκρασία που θα προκαλούσε λόγω του φαινομένου της αυτό-θέρμανσης αν εφαρμόζονταν χωρίς διακοπές. Ένα δείγμα αυτής της αναφοράς με τροφοδοσία του κόμβου από την θύρα USB του υπολογιστή παρουσιάζεται στην εικόνα 6.1.

```

AIN0: 1285.05 mV   AIN1: 593.65 mV
Thermistor resistance: 8586.10 Ohm 8586.10 Ohm
Temperature: 28.44760 *C

Max0: 20564   at sample: 1
Min0: 20554   at sample: 0
Dif0: 10   which is: 625.00 nV

Max1: 9502   at sample: 2
Min1: 9496   at sample: 6
Dif1: 6   which is: 375.00 nV

MaxRes: 8592.87   at sample: 2
MinRes: 8579.69   at sample: 6
DifRes: 13.18   which is: 0.03513 *C

Current: 69.14 uA
Auto-thermal: 0.03420 *C

```

Εικόνα 6.1: Αναφορά για την αξιολόγηση της μέτρησης.

6.3.2 Διαβάθμιση Κυκλώματος Διασύνδεσης

Η λήψη μετρήσεων θερμοκρασίας με την εξίσωση B-parameter που περιγράψαμε, στηρίζει την ακρίβειά της στους παρακάτω παράγοντες:

- Την ακρίβεια με την οποία είναι γνωστή η τιμή της αντίστασης σε σειρά Rser για τον υπολογισμό της αντίστασης του θερμίστορ.
- Την ακρίβεια με την οποία δίνονται από τα φύλλα δεδομένων η αντίσταση (Ro) του θερμίστορ στους 25°C (To) και η τιμή B_{25/85} για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας.

Η εξίσωση B-parameter γράφεται και ισοδύναμα:

$$T = \frac{B}{\frac{B}{T_0} + \ln \frac{R}{R_0}} = \frac{B}{\ln(e^{B/T_0}) + \ln(\frac{R}{R_0})} = \frac{B}{\ln(\frac{R}{R_0} * e^{B/T_0})}$$

και θέτοντας $r = \frac{e^{B/T_0}}{R_0}$, που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του θερμίστορ, παίρνει τη μορφή:

$$T = \frac{B}{\ln(R * r)}$$

Αντικαθιστώντας την αντίσταση του θερμίστορ R από την εξίσωση 6.1, θα έχουμε:

$$T = \frac{B}{\ln\left(\frac{1}{\frac{adc0}{adc1}-1} * Rser * r\right)}, \text{ και με}$$

$$X = \frac{1}{\frac{adc0}{adc1}-1} \tag{6.2},$$

που εξαρτάται από τις μετρήσεις που παίρνουμε από το κύκλωμα και

$$A = Rser * r \tag{6.3},$$

που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος έχουμε:

$$T = \frac{B}{\ln(X * A)} \quad (6.4)$$

Συνεχίζοντας τον μετασχηματισμό της εξίσωσης B-parameter θα έχουμε:

$$\frac{B}{T} = \ln(X * A) \Leftrightarrow X * A = e^{B/T} \text{ και θέτοντας}$$

$$Y = e^{B/T} \quad (6.5)$$

καταλήγουμε στην γραμμική συνάρτηση $Y = A * X$, που είναι η μοντελοποίηση του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρα και αναπαριστά μια ευθεία με συντελεστή διεύθυνσης A που εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος ($A = \frac{e^{B/T_0}}{R_0} * R_{ser}$).

Χρησιμοποιώντας ένα θερμόμετρο ακριβείας (ή τουλάχιστον αναφοράς) για μετρήσεις «πραγματικών» τιμών θερμοκρασίας T και αντιστοιχίζοντάς τις μετρήσεις αυτές με μετρήσεις X (6.2) από το κύκλωμα διασύνδεσης, μπορούμε να δημιουργήσουμε ζευγάρια τιμών (X,T). Από τον τύπο 6.5 και χρησιμοποιώντας **μια τιμή B** (θα το εξετάσουμε παρακάτω), τα (X,T) ζευγάρια μετατρέπονται σε ζευγάρια (X,Y). Με την **Μέθοδο των Ελάχιστων Τετραγώνων** μπορεί να γίνει προσαρμογή N ζευγαριών (X,Y) στο γραμμικό μοντέλο $Y=A*X$ που βρήκαμε πως ισχύει για το κύκλωμα διασύνδεσης του αισθητήρα. Πρακτικά αυτό σημαίνει την εύρεση της παραμέτρου A για την οποία το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων ($\sum_{i=1}^N (Y_i - A * X_i)^2$) είναι ελάχιστο. Αφού βρεθεί η τιμή της παραμέτρου A, μπορεί να εκτιμηθεί η θερμοκρασία από τις μετρήσεις του κυκλώματος χρησιμοποιώντας τον τύπο 6.4.

Η παράμετρος A περιέχει όπως είδαμε μαζί με τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος, και την τιμή B του θερμίστορ. Η τιμή B όμως παρουσιάζεται και στην εξαρτημένη μεταβλητή Y (6.5) και χρειάζεται για την μετατροπή των ζευγαριών (X,T) σε (X,Y) αλλά και για την εκτίμηση της θερμοκρασίας από την 6.4. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση NTC θερμίστορ μεγάλης ακρίβειας και βάζοντας στις αντίστοιχες εξισώσεις την τιμή B από τα φύλλα δεδομένων [11]. Στην διατριβή αυτή προσπαθήσαμε να βρούμε μια ικανοποιητική τιμή για το B, εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων για όλες τις τιμές B μιας ζώνης με κέντρο το B που αναγράφεται στα φύλλα δεδομένων. Το B για το οποίο το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων είναι μικρότερο, είναι και αυτό που ικανοποιεί καλύτερα το μοντέλο του

κυκλώματος. Με την τεχνική αυτή δεν είναι απαραίτητη η χρήση θερμίστορ ακριβείας και αυτό που μας απασχολεί πλέον είναι το κατά πόσο το B αυτό μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

Για όλα τα θερμίστορ η τιμή B παραμένει πραγματικά σταθερή μόνο για ένα μικρό εύρος. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και αν η τιμή B προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια, η εξίσωση B-parameter δεν μπορεί να περιγράψει με την αντίστοιχη ακρίβεια ολόκληρη την καμπύλη της θερμοκρασίας παρά μόνο ένα μέρος της. Για το λόγο αυτό, το συνολικό εύρος μέτρησης (0-50 °C) μπορεί να χωριστεί σε περισσότερα τμήματα και για κάθε τμήμα ξεχωριστά να εφαρμοστεί η τεχνική της εύρεσης των A και B που περιγράφηκε νωρίτερα.

Η υλοποίηση της διαβάθμισης αυτής προστέθηκε στον κώδικα του Arduino διαιρώντας το συνολικό εύρος μέτρησης σε 5 τμήματα των 10°C και με κάποιες μικρές τροποποιήσεις λόγω της ιδιαιτερότητας που παρουσιάζουν οι μεταβλητές float στο λογισμικό ανάπτυξης κώδικα Arduino IDE (ανάλυση 5 δεκαδικών ψηφίων, προσεγγίσεις που οδηγούν σε λανθασμένα αποτελέσματα και overflow σε αθροίσματα). Έτσι οι μετρήσεις X του κυκλώματος που κυμαίνονται γύρω από τη μονάδα, παρουσιάστηκαν σαν μετρήσεις αντίστασης πολλαπλασιασμένες με το 10,000 που είναι η θεωρητική τιμή αντίστασης σε σειρά Rser. Ακόμα για να μειωθεί το σφάλμα στον υπολογισμό της παραμέτρου A από τη συνάρτηση που εκτελεί τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων, τα X (που τώρα αντιπροσωπεύουν αντίσταση θερμίστορ) και Y πρέπει να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Για το λόγο αυτό και για την αποφυγή overflow στους καταχωρητές του Arduino, στον κώδικα υλοποίησης οι τιμές X διαιρούνται με 4 (dividerX) και οι τιμές Y με 128 (dividerY). Με αυτή τη διαμόρφωση μια τυπική τιμή για το A υπολογίζεται κοντά στο 2 και τα 5 δεκαδικά ψηφία ανάλυσης δείχνουν να είναι αρκετά.

Η διαδικασία της διαβάθμισης ξεκινά με εντολή που δίνεται από τον χρήστη του συστήματος και με την οποία καθορίζονται η θερμοκρασία έναρξης (STARTLIMIT), λήξης (STOPLIMIT) και το βήμα (STEP). Κατά τη διαδικασία αυτή, ένα σώμα (στερεό ή υγρό) μεταβαίνει αργά από τη θερμοκρασία έναρξης στη θερμοκρασία λήξης και καταγράφεται από τον ασύρματο κόμβο και το πρότυπο θερμόμετρο ακριβείας, μια μέτρηση (ζευγάρι (X,T)) κάθε φορά που η θερμοκρασία στο σώμα μεταβάλλεται κατά το βήμα που έχει καθοριστεί. Η μετάβαση αυτή μπορεί να είναι αύξουσα (αν STARTLIMIT < STOPLIMIT) ή φθίνουσα (αν STARTLIMIT > STOPLIMIT) και αυτό εξυπηρετεί ανάλογα με το τμήμα του εύρους για το οποίο ο χρήστης θέλει να γίνει η διαβάθμιση και ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας στο μετρούμενο σώμα.

Με την ολοκλήρωση της λήψης των μετρήσεων, ο μικροελεγκτής εξετάζει ανά τμήμα (0-10°C, 10-20°C κ.τ.λ.) τον αριθμό των μετρήσεων, και για τα τμήματα που υπάρχουν περισσότερες των δυο μετρήσεων εφαρμόζει την Μέθοδο των Ελάχιστων Τετραγώνων με τον τρόπο που αναλύσαμε. Τα αποτελέσματα (A, B), καθώς και η μεγαλύτερη μέτρηση αντίστασης από τον κόμβο (δηλ. η μικρότερη θερμοκρασία ως σημείο αναφοράς) για κάθε τμήμα, αποθηκεύονται στην μνήμη eeprom του μικροελεγκτή και φορτώνονται από εκεί κάθε φορά που ξεκινά η λειτουργία του.

6.3.3 Ενσύρματη και Ασύρματη Επικοινωνία

Ο ασύρματος κόμβος προγραμματίστηκε για να επικοινωνεί αμφίδρομα τόσο ενσύρματα (μέσω USB) όσο και ασύρματα (μέσω του κόμβου συντονισμού) με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το περιβάλλον διαχείρισης χρήστη.

Για την ενσύρματη επικοινωνία, η αποστολή μηνυμάτων γίνεται κάθε φορά με την εντολή `Serial.print("message")` που διαθέτει το λογισμικό Arduino IDE. Για την λήψη μηνυμάτων, δημιουργήθηκε μια διακοπή (interrupt) ανά 100 msec που ελέγχει αν υπάρχουν χαρακτήρες στη σειριακή είσοδο. Αν υπάρχουν, τους προσθέτει σε μια γραμμή κειμένου (String) μέχρι να βρεθεί ο χαρακτήρας αλλαγής γραμμής "\n" που σηματοδοτεί και τη λήξη του μηνύματος. Αν συμπληρωθούν 32 χαρακτήρες χωρίς να βρεθεί ο χαρακτήρας αλλαγής γραμμής, η γραμμή κειμένου αδειάζει και η διαδικασία ξεκινά από την αρχή.

Για την επικοινωνία μέσω της ασύρματης μονάδας nRF24L01+, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη [Mirf](#) λόγω της σταθερότητας και της απλής διαδικασίας αποστολής και λήψης των χαρακτήρων ενός μηνύματος. Αφού δηλωθούν τα ονόματα του αποστολέα και του παραλήπτη, η αποστολή μηνυμάτων γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στην ενσύρματη σειριακή επικοινωνία. Η λήψη μηνυμάτων δεν κατέστη δυνατή με τη διαδικασία του ελέγχου μέσω συχνών διακοπών στη ροή του προγράμματος. Πιθανός λόγος η έλλειψη της απαραίτητης SRAM μνήμης στον μικροελεγκτή για την ταυτόχρονη διαχείριση της διακοπής και της διαχείρισης της βιβλιοθήκης Mirf. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε εισάγοντας στις δυο βασικές συναρτήσεις του προγράμματος (loop και calibrate) μια διαδικασία ελέγχου για εισερχόμενα μηνύματα (`checkForRadioMessage`). Ο αλγόριθμος αυτός στέλνει στον κόμβο συντονισμού αίτημα με το χαρακτήρα "\$" και περιμένει ανταπόκριση για ένα δευτερόλεπτο. Αν υπάρχει διαθέσιμο μήνυμα στον κόμβο συντονισμού για τον κόμβο αισθητήρων, αυτό στέλνεται σαν ανταπόκριση

του αιτήματος. Σε διαφορετική περίπτωση, η ροή του προγράμματος συνεχίζεται κανονικά μετά την αναμονή του ενός δευτερολέπτου.

Ένα μήνυμα που στέλνει ή δέχεται ο κόμβος αισθητήρων είναι μια σειρά από χαρακτήρες που η λήξη της σηματοδοτείται με το χαρακτήρα αλλαγής γραμμής “\n”. Τα μηνύματα που στέλνει ο κόμβος αισθητήρων μπορεί να ενσωματώνουν:

- *μετρήσεις θερμοκρασίας*: Μια ή δυο μετρήσεις θερμοκρασίας ανάλογα με τον αριθμό των ενεργών καναλιών του κόμβου. Οι τιμές έχουν ανάλυση τριών δεκαδικών ψηφίων και περικλείονται για τον διαχωρισμό τους με τον χαρακτήρα “@”. Τέλος ακολουθεί ο αύξων αριθμός του μηνύματος μέτρησης θερμοκρασίας. Παράδειγμα μηνύματος κόμβου με ένα κανάλι είναι το “@13.125@1\n” και κόμβου δυο καναλιών το “@13.125@13.224@1\n”.
- *μετρήσεις διαβάθμισης του κυκλώματος αισθητήρα*: Μετρήσεις που έχουν τη μορφή “#13.125#13.224#1\n” κατά το πρότυπο των μηνυμάτων θερμοκρασίας. Η πρώτη τιμή (13.125) είναι μέτρηση της αντίστασης του αισθητήρα μεταφρασμένη σε θερμοκρασία, η δεύτερη τιμή (13.224) η θερμοκρασία αναφοράς από το «θερμόμετρο ακριβείας» και τέλος ο αύξων αριθμός της μέτρησης διαβάθμισης. Τις μετρήσεις διαβάθμισης θα αναλύσουμε στο κεφάλαιο αποτίμησης του συστήματος.
- *τις αποθηκευμένες στην EEPROM παραμέτρους διαβάθμισης*: Αποτελούνται από τα RC (μέγιστη αντίσταση), BC (τιμή B) και AC (παραμέτρο A) για κάθε τμήμα του εύρους θερμοκρασίας και στέλνονται με τη μορφή “#0#29442.33#3969#1.88577\n”. Η πρώτη τιμή είναι ο αύξων αριθμός του τμήματος για το οποίο αναφέρεται (π.χ. 0 για την περιοχή 0 - 10°C).
- *αίτημα για λήψη μηνύματος*: Ο χαρακτήρας “\$”.
- *αναφορά ότι η διαβάθμιση έλαβε τέλος*: Οι χαρακτήρες “#\n”.

Τα μηνύματα που δέχεται ο κόμβος αισθητήρων μπορεί είναι:

- *αίτημα για έναρξη διαδικασίας διαβάθμισης*: Έχει τη μορφή “@10@20@0.5\n” και οι τιμές αναφέρονται στη θερμοκρασία έναρξης (STARTLIMIT), λήξης (STOPLIMIT) και το βήμα (STEP) αντίστοιχα.
- *αίτημα διακοπής διαδικασίας διαβάθμισης*: Ο χαρακτήρας “@”.
- *αίτημα αποστολής των αποθηκευμένων στην EEPROM παραμέτρων*: Ο χαρακτήρας “#”.

- νέοι παράμετροι για φόρτωση και αποθήκευση στην *eprom*: Το μήνυμα έχει την ίδια μορφή όπως και κατά την αποστολή των παραμέτρων (“#0#29442.33#3969#1.88577\n”).

6.4 Λογισμικό Μικροελεγκτή Κόμβου Συντονισμού

Ο κόμβος συντονισμού είναι η γέφυρα που συνδέει με αμφίδρομο τρόπο τους ασύρματους κόμβους αισθητήρων με την εικονική σειριακή θύρα του υπολογιστή την οποία διαχειρίζεται το περιβάλλον διαχείρισης χρήστη. Η λειτουργία του συνοψίζεται στην παρακολούθηση της εισόδου από την ασύρματη μονάδα και η συμπλήρωση μιας μεταβλητής κειμένου με τον χαρακτήρα που καταφθάνει κάθε φορά. Η σηματοδότηση ότι κάποιο μήνυμα ολοκληρώθηκε, γίνεται με τη λήψη του χαρακτήρα αλλαγής γραμμής “\n”. Τότε το περιεχόμενο της μεταβλητής κειμένου (το μήνυμα) προωθείται στη σειριακή θύρα και η μεταβλητή καθαρίζεται για την υποδοχή του επόμενου μηνύματος. Το ίδιο συμβαίνει και για την αντίθετη κατεύθυνση με μια μικρή διαφορά λόγω του ότι ο ασύρματος κόμβος αισθητήρων δεν είναι πάντα διαθέσιμος για λήψη μηνυμάτων. Έτσι, με τη συμπλήρωση του μηνύματος από την παρακολούθηση της σειριακής εισόδου του υπολογιστή, ενεργοποιείται η «σημαία» ότι υπάρχει μήνυμα προς ασύρματη μετάδοση. Το μήνυμα αυτό μεταδίδεται όταν ο κόμβος συντονισμού λάβει από τον κόμβο αισθητήρων το χαρακτήρα “\$” που σημαίνει ότι είναι έτοιμος να παραλάβει μήνυμα.

6.5 Λογισμικό Περιβάλλοντος Διαχείρισης Χρήστη

Οι μετρήσεις του συστήματος καθώς και οποιαδήποτε άλλη πληροφορία των κόμβων, προωθούνται με τη μορφή μηνυμάτων και μέσω της θύρας USB, στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του χρήστη. Εκεί ένα λογισμικό θα πρέπει να κάνει ανάκτηση και διαχείριση των μηνυμάτων αυτών ανάλογα με το είδος τους και τις επιλογές του χρήστη (παρουσίαση, αποθήκευση κτλ). Επίσης θα πρέπει να δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να στέλνει μηνύματα στους κόμβους, τα οποία θα περιέχουν εντολές λειτουργίας ή παραμέτρους διαβάθμισης.

Η υλοποίηση του λογισμικού, αποφασίστηκε να γίνει με τη γλώσσα προγραμματισμού Java. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της Java έναντι των περισσότερων άλλων γλωσσών, είναι η ανεξαρτησία του λειτουργικού συστήματος. Τα προγράμματα που είναι γραμμένα σε Java τρέχουν ακριβώς το ίδιο σε Windows, Linux, Unix και Macintosh χωρίς να χρειαστεί να ξαναγίνει μεταγλώττιση (compiling) ή να αλλάξει ο πηγαίος κώδικας για κάθε διαφορετικό λειτουργικό

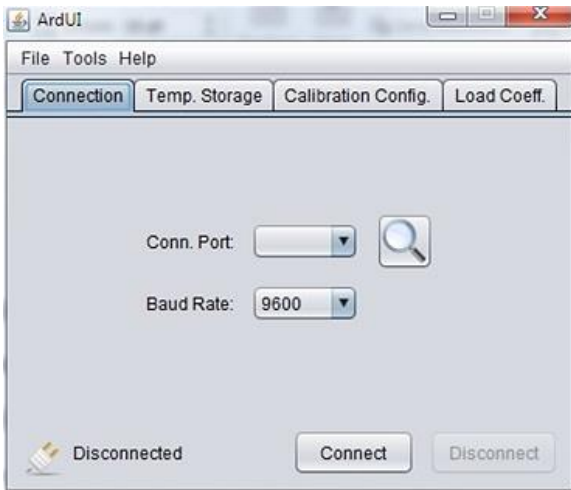
σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της Εικονικής Μηχανής (Virtual Machine ή VM) που είναι εγκατεστημένη σε κάθε σύστημα.

Για να γράψει κάποιος κώδικα Java δε χρειάζεται τίποτα άλλο παρά έναν επεξεργαστή κειμένου, όπως το Σημειωματάριο (Notepad) των Windows. Παρ' όλα αυτά, ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) βοηθάει πολύ, ιδιαίτερα στον εντοπισμό σφαλμάτων (debugging). Για την υλοποίηση του κώδικα του περιβάλλοντος διαχείρισης χρήστη, προτιμήθηκε το περιβάλλον ανάπτυξης NetBeans IDE 8.0.2. Κύριος λόγος για αυτό είναι η ευκολία δημιουργίας γραφικού περιβάλλοντος με τη χρήση οπτικού προγραμματισμού.

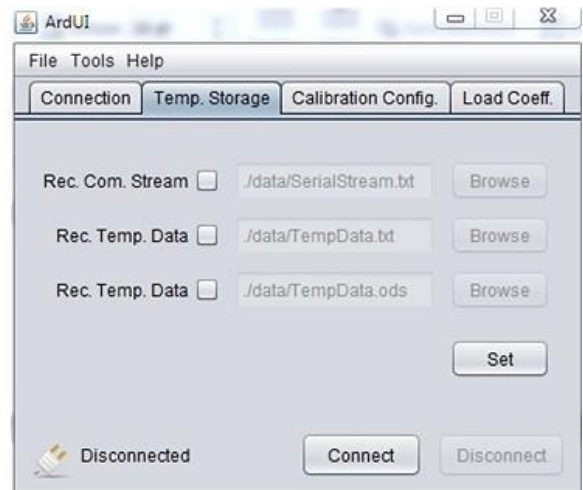
Βασικά συστατικά του λογισμικού είναι:

- **Το γραφικό περιβάλλον διαχείρισης:** Είναι το περιβάλλον με το οποίο ο χρήστης αλληλεπιδρά για τη διαχείριση του συστήματος. Είναι χωρισμένο σε τέσσερις καρτέλες και σε κάθε μια από αυτές μπορεί να κάνει κάποιες συγκεκριμένες ενέργειες. Στην πρώτη καρτέλα (Connection, εικόνα 6.2A) μπορεί να ελέγξει τις διαθέσιμες θύρες και να κάνει σύνδεση ή αποσύνδεση με μια από αυτές. Στην δεύτερη (Temp. Storage, εικόνα 6.2B) μπορεί να επιλέγει τα δεδομένα που θέλει να καταγράφονται καθώς και τα αρχεία για την αποθήκευσή τους. Με την τρίτη καρτέλα (Calibration Config, εικόνα 6.2C) μπορεί να δώσει εντολή για την εκκίνηση της λειτουργίας διαβάθμισης του κόμβου αισθητήρων για συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας και βήμα. Τέλος, από την τέταρτη καρτέλα (Load Coeff., εικόνα 6.2D) και έχοντας αποθηκευμένες σε ένα αρχείο τις μετρήσεις διαβάθμισης ενός κόμβου αισθητήρων, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ένα νέο αρχείο με τις παραμέτρους (R, B, A) της διαβάθμισης για τον κόμβο αυτό. Οι παράμετροι μπορούν να σταλούν και να αποθηκευτούν στον κόμβο αισθητήρων, ξεχωριστά για κάθε τμήμα εύρους θερμοκρασίας. Από τον κατάλογο επιλογής (bar menu) ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει σε αρχείο τις αποθηκευμένες στην EEPROM του κόμβου παραμέτρους διαβάθμισης.
- **Ο διαχειριστής της σειριακής θύρας:** Είναι το τμήμα του προγράμματος που με τη χρήση της βιβλιοθήκης RXTXComm.jar και του οδηγού rxtxSerial.dll, ελέγχει την εικονική σειριακή θύρα. Μπορεί να δημιουργήσει μια λίστα με τις διαθέσιμες θύρες και να πραγματοποιήσει μια σύνδεση ή αποσύνδεση από αυτές. Τέλος, λαμβάνει και προωθεί την εισερχόμενη ροή δεδομένων στο διαχειριστή δεδομένων και δίνει τη δυνατότητα αποστολής προς τη σειριακή θύρα, μιας σειράς χαρακτήρων.

- **Η οθόνη προβολής της εισερχόμενης ροής δεδομένων:** Για λόγους εποπτείας και αποσφαλμάτωσης της λειτουργίας του συστήματος, η οθόνη αυτή (εικόνα 6.3) προβάλλει σε ένα παράθυρο κειμένου, όλα τα μηνύματα που καταφθάνουν στη συνδεδεμένη σειριακή θύρα κατά τα πρότυπα του εργαλείου “Serial Monitor” του Arduino IDE. Επίσης περιλαμβάνει τη δυνατότητα αποθήκευσης και ανάγνωσης των μηνυμάτων αυτών, με τη χρήση αρχείων κειμένου.
- **Ο διαχειριστής δεδομένων:** Τα μηνύματα που συλλέγει ο διαχειριστής της σειριακής θύρας επεξεργάζονται στο διαχειριστή δεδομένων. Αν σε κάποιο μήνυμα υπάρχει η ένδειξη ότι πρόκειται για μήνυμα μετρήσεων ή παραμέτρων με συγκεκριμένη δομή, τότε αυτό αποκωδικοποιείται και ανάλογα με τις ρυθμίσεις του χρήστη, τα δεδομένα στέλνονται για παρουσίαση σε κάποια οθόνη ή αποθηκεύονται σε αρχεία.
- **Η οθόνη προβολής των μετρήσεων θερμοκρασίας:** Η οθόνη αυτή (εικόνα 6.4) είναι μια απλουστευμένη και ευανάγνωστη μορφή παρουσίασης σε πραγματικό χρόνο, των μετρήσεων και για τα δυο κανάλια του κόμβου αισθητήρων.
- **Τα γραφήματα (charts) παρουσίασης των μετρήσεων:** Για την ευκολία παρακολούθησης των μεταβολών των τιμών των μετρήσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων, τα γραφήματα παρουσιάζουν στην ίδια οθόνη με διαφορετικά χρώματα, τις τιμές θερμοκρασίας κάθε καναλιού σε σχέση με το χρόνο (εικόνα 6.5A). Ο κάθετος άξονας του χρόνου, μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της παρατήρησης για χρονική διάρκεια από 1 λεπτό μέχρι 6 ώρες. Μια παραλλαγή του γραφήματος που θα βοηθήσει στην αποτίμηση του συστήματος, είναι το γράφημα που παρουσιάζει στην ίδια οθόνη τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των καναλιών (υποτιθέμενο λάθος) και τη θερμοκρασία του δεύτερου καναλιού (θερμοκρασία αναφοράς) (εικόνα 6.5B).



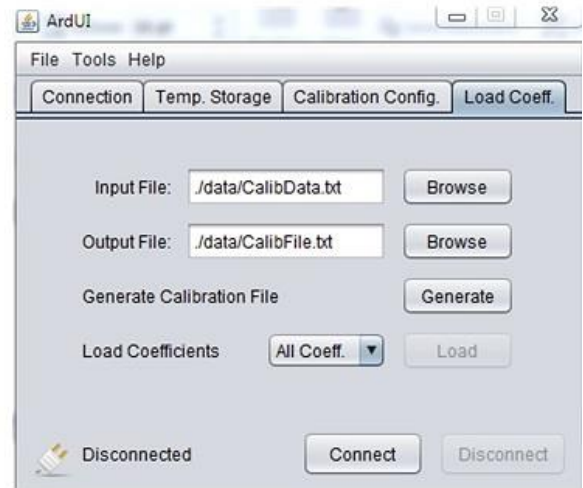
A



B

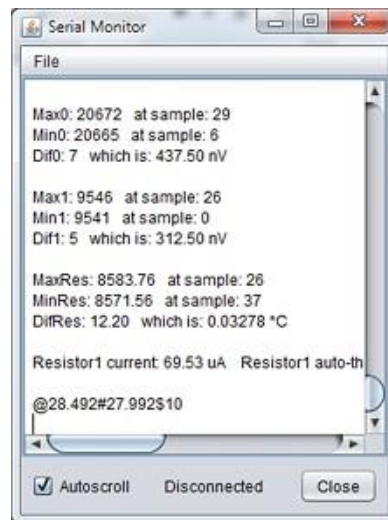


C



D

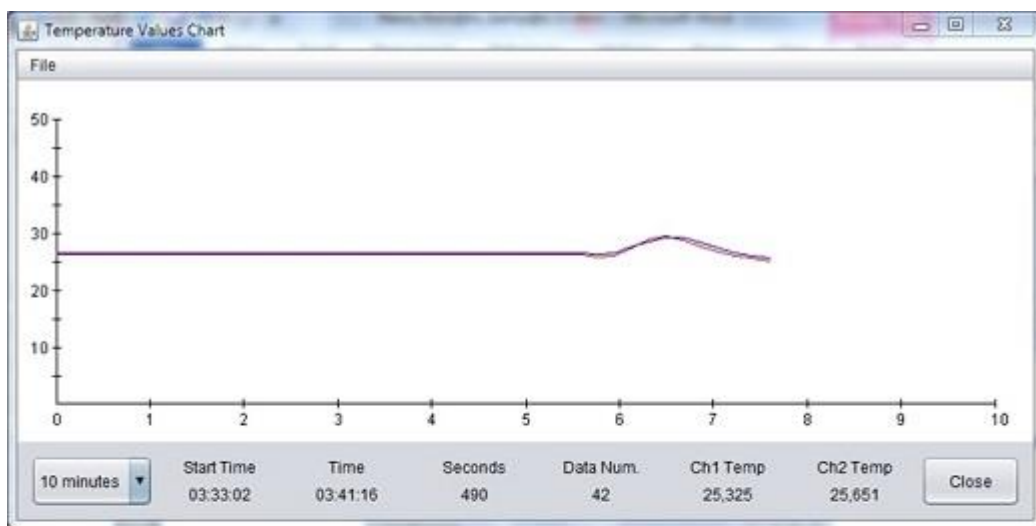
Εικόνα 6.2: Οι καρτέλες του περιβάλλοντος διαχείρισης χρήστη.



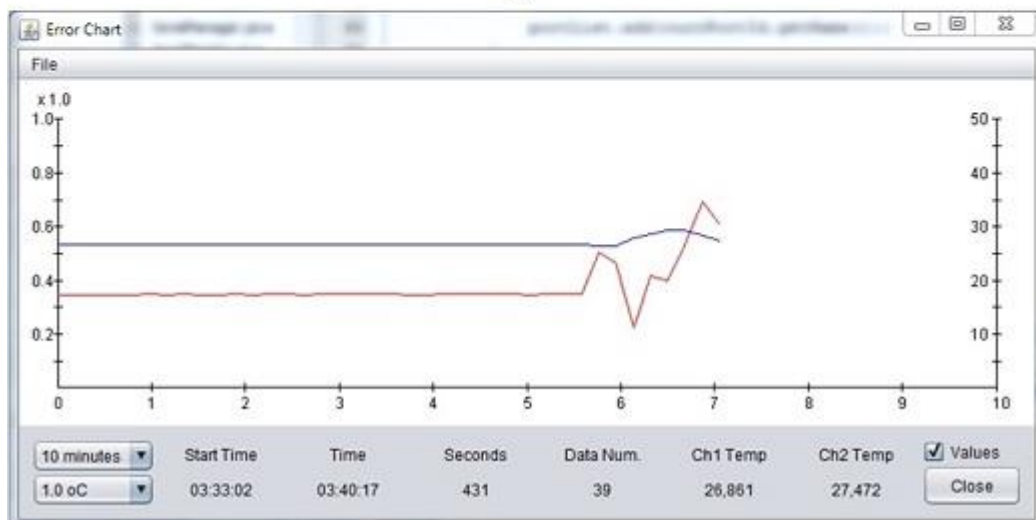
Εικόνα 6.3: Η οθόνη προβολής της εισερχόμενης ροής δεδομένων.



Εικόνα 6.4: Η οθόνη προβολής των μετρήσεων θερμοκρασίας.



A



B

Εικόνα 6.5: Τα γραφήματα (charts) παρουσίασης των μετρήσεων

Κεφάλαιο 7

Αποτίμηση Λειτουργίας του Ασύρματου Συστήματος Μέτρησης

Με την ολοκλήρωση της υλοποίησης του συστήματος, θα έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος για να διαπιστωθεί η χωρίς πρόβλημα λειτουργία του συστήματος και η ακρίβεια στη μέτρηση που μπορεί να προσφέρει. Οι δοκιμαστικές μετρήσεις και διαβαθμίσεις έδειξαν καλή επικοινωνία μεταξύ των κόμβων συντονισμού και αισθητήρων χωρίς να χάνονται μηνύματα ακόμα και στην περίπτωση που χωρίζονται από τοίχο. Η ανάλυση των μετρήσεων θερμοκρασίας έδειξε να είναι μεγαλύτερη της τάξης των 0.001°C . Αυτό διαπιστώθηκε αφού το σύστημα μπορεί να ανιχνεύει καθαρά μεταβολές της θερμοκρασίας σε αυτόν το βαθμό.

Για την διακρίβωση της ακρίβειας μέτρησης της πραγματικής θερμοκρασίας αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της μη διαθεσιμότητας κάποιου πιστοποιημένου θερμομέτρου της αντίστοιχης ακρίβειας. Έχοντας αυτό σαν δεδομένο, ακολουθήθηκε η διαδικασία της διαβάθμισης του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρα του πρώτου καναλιού, σε σχέση με αυτό του δεύτερου, πάνω στον ίδιο κόμβο.

Για το πρώτο κανάλι χρησιμοποιήθηκε:

- αντίσταση σε σειρά $R_{ser} = 10\text{k}\Omega$ με ανοχή $\pm 1\%$
- θερμίστορ NTCLE100E3103JB0 με αντίσταση $10\text{k}\Omega$ στους 25°C ανοχής $\pm 2\%$ και τιμή $B_{25/85} = 3977$ ανοχής $\pm 0.75\%$.

Για το δεύτερο κανάλι χρησιμοποιήθηκε:

- αντίσταση σε σειρά $R_{ser} = 10\text{k}\Omega$ με ανοχή $\pm 0.01\%$

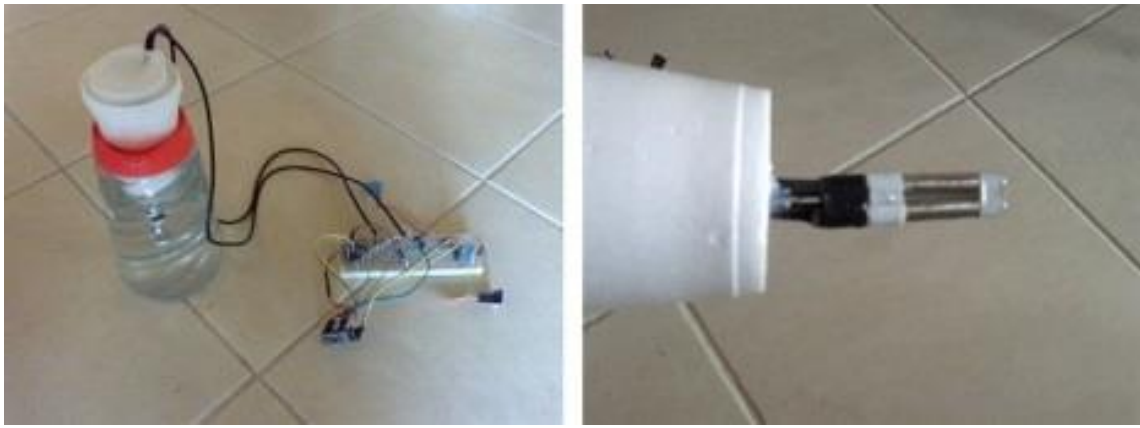
- θερμίστορ ακριβείας(103AP-2-A) με αντίσταση 10kΩ στους 25°C αλλά ανοχή $\pm 0.5\%$ και τιμή $B_{25/85} = 3976$ με επίσης ανοχή $\pm 0.5\%$.

Από τα χαρακτηριστικά των δυο κυκλωμάτων, είναι φανερό πως στο πρώτο κανάλι θα έχουμε μετρήσεις που θα περιέχουν σχετικά μεγάλο σφάλμα λόγω του ότι δεν είναι γνωστά με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της αντίστασης και του θερμίστορ. Στο δεύτερο κανάλι οι μετρήσεις θα είναι περισσότερο κοντά στις πραγματικές και για αυτό το κανάλι θεωρήθηκε σαν το θερμόμετρο αναφοράς.

Λόγω της μη ύπαρξης κάποιας ειδικής συσκευής διαβάθμισης, αποφασίστηκε οι μετρήσεις να γίνουν σε σώματα στα οποία αφού πρώτα τους μεταβληθεί τεχνητά η θερμοκρασία, τα αφήνουμε να επανέλθουν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι δημιουργώντας τις κατάλληλες διατάξεις, πήραμε δείγματα για τη διαβάθμιση από μετρήσεις στη μεταβολή της θερμοκρασίας νερού και ενός μεταλλικού αντικειμένου. Στη συνέχεια επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία και χρησιμοποιώντας τους συντελεστές της διαβάθμισης (A, B), προσπαθήσαμε να εξάγουμε συμπεράσματα.

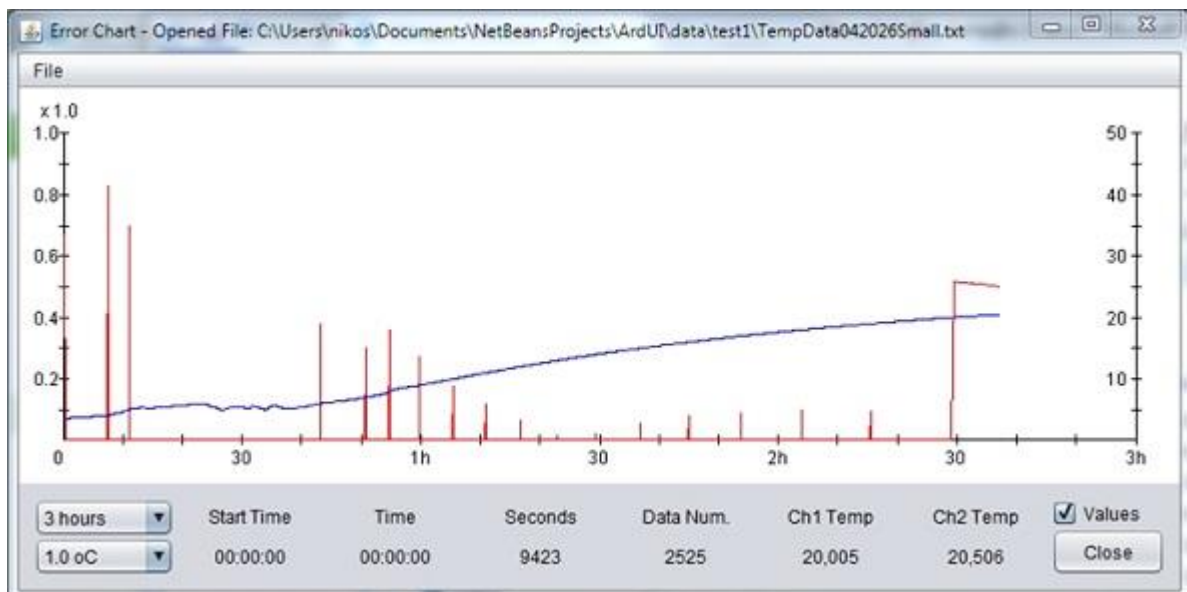
7.1 Διαβάθμιση σε Νερό

Για την διαβάθμιση σε νερό, χρησιμοποιήθηκε ένα γυάλινο κυλινδρικό δοχείο ύψους 19 εκ. και διαμέτρου 11 εκ. Οι αισθητήρες αφού πρώτα τοποθετήθηκαν μέσα σε αδιάβροχες θήκες, πέρασαν μέσα από ένα θερμομονωτικό πλαστικό ποτήρι που χρησιμοποιήθηκε σαν καπάκι, στο εσωτερικό του δοχείου και σε σταθερή θέση στο κέντρο του (Εικόνα 7.1). Το δοχείο τοποθετήθηκε σε μια λεκάνη ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσθέτοντας κρύο ή ζεστό νερό μέσα σε αυτή, να επηρεάζεται και η θερμοκρασία του νερού μέσα στο δοχείο.

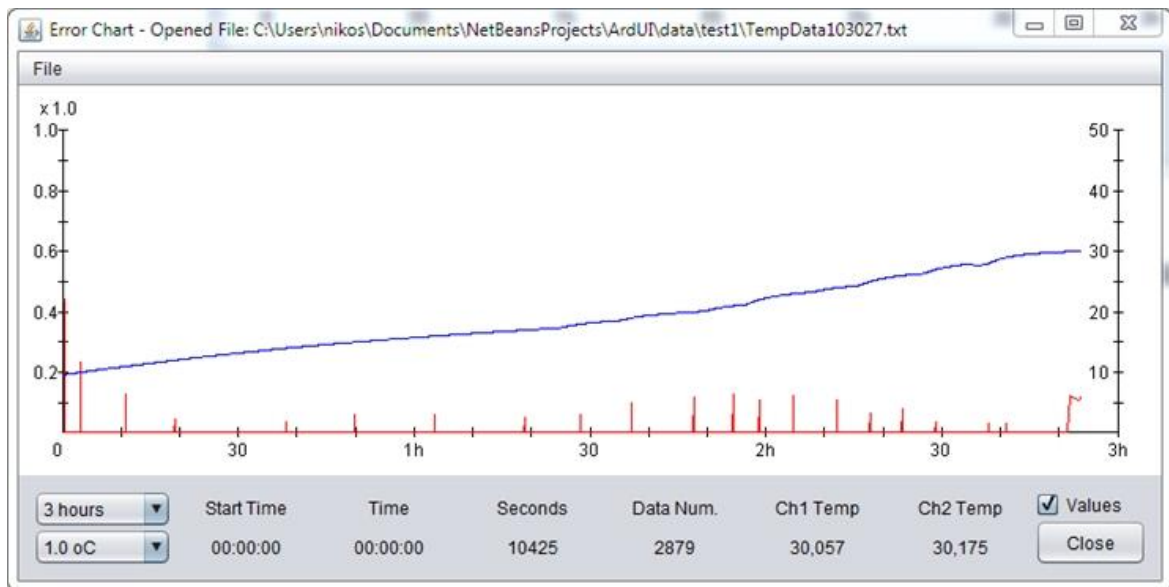


Εικόνα 7.1: Διάταξη διαβάθμισης σε νερό.

Γεμίζοντας το δοχείο κρύο νερό με παγάκια, η θερμοκρασία του έφτασε κάτω από τους 4°C, και αφήνοντάς το να επανέλθει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος (περίπου 30°C), πήραμε δείγματα για κάθε 1°C αύξησης της θερμοκρασίας. Στο γράφημα 7.2 φαίνεται με γαλάζιο χρώμα η αύξηση της θερμοκρασίας αναφοράς (δεξιά κλίμακα) σε σχέση με το χρόνο. Οι κόκκινες ακίδες είναι τα δείγματα που πάρθηκαν από το πρώτο κανάλι (προς διαβάθμιση) και το ύψος τους αντιπροσωπεύει το σφάλμα (αριστερή κλίμακα) από τη θερμοκρασία αναφοράς, χρησιμοποιώντας για τον υπολογισμό του την εξίσωση B-parameter με τιμές B και Rser από τα φύλλα δεδομένων (χωρίς δηλ. να έχει γίνει διαβάθμιση).



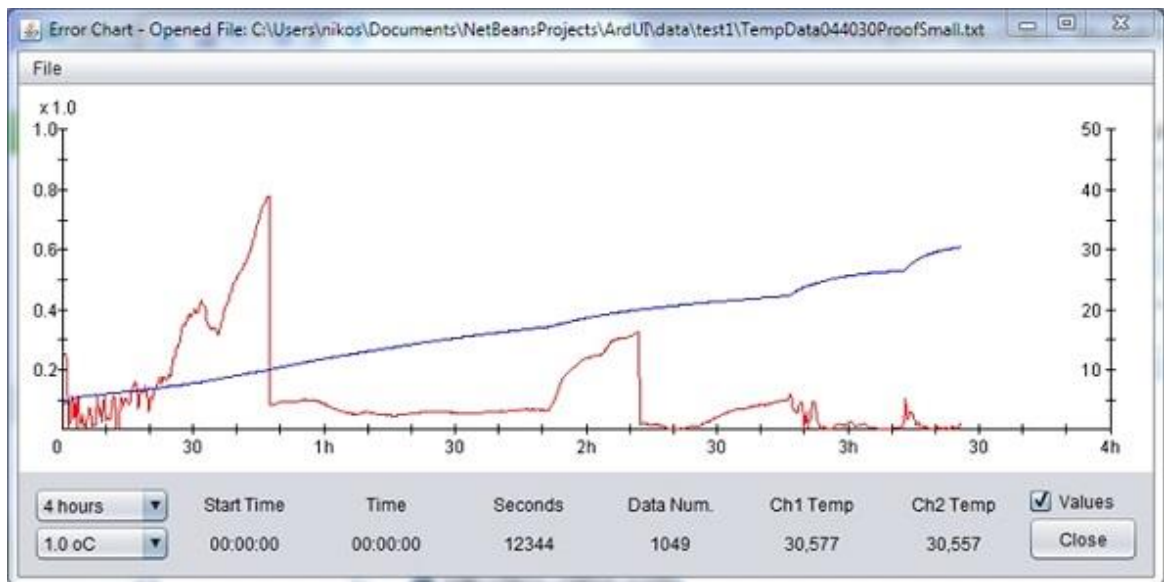
Εικόνα 7.2: Γράφημα διαβάθμισης σε νερό για 4 έως 20°C.



Εικόνα 7.3: Γράφημα διαβάθμισης σε νερό για 20 έως 30°C.

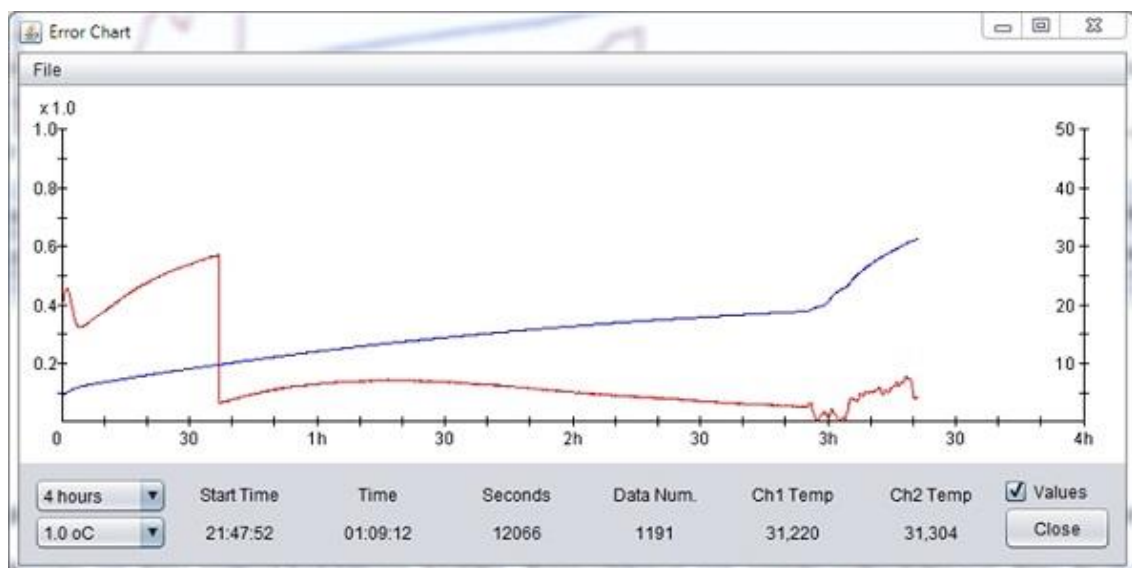
Οι παράμετροι που προέκυψαν από τη διαβάθμιση αυτή, δεν έδειξαν να είναι ικανοποιητικοί. Για τα 6 δείγματα που πάρθηκαν για το τμήμα 4-10°C, η τιμή $B_{0/10}$ υπολογίστηκε σε 3577 από 3977 που παρουσιάζεται στα φύλλα δεδομένων και είναι η μικρότερη δυνατή τιμή που θα μπορούσαμε να είχαμε υπολογίσει (B κατασκευαστή ± 400). Για το τμήμα 10-20°C με 10 δείγματα, η τιμή $B_{10/20}$ υπολογίστηκε 4104 και σε επανάληψη της διαδικασίας με σταδιακή προσθήκη ζεστού νερού για τη διαβάθμιση του τμήματος 20-30°C (Εικόνα 7.3), η τιμή $B_{20/30}$ με 10 δείγματα υπολογίστηκε 4030.

Βάζοντας ξανά κρύο νερό στο δοχείο και μετρώντας τη μεταβαλλόμενη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας τις παραπάνω παραμέτρους, πήραμε το γράφημα 7.4 Στο γράφημα αυτό, με γαλάζιο εμφανίζεται η θερμοκρασία αναφοράς (δεξιά κλίμακα) και με κόκκινο το σφάλμα (αριστερή κλίμακα) σε συνάρτηση με το χρόνο. Βλέποντας το γράφημα, επιβεβαιώνεται πως για το τμήμα 4-10°C υπάρχει αστοχία στους υπολογισμούς, ενώ για το τμήμα 10-20°C τα πράγματα είναι κάπως καλύτερα αλλά με απότομη μεταβολή στο σφάλμα μετά την θερμοκρασία των 17°C. Παρατηρώντας καλύτερα διαπιστώνεται ότι η απότομη μεταβολή στο σφάλμα συμβαίνει όταν μεταβάλλεται, έστω και ελάχιστα, ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας. Αυτό με τη σειρά του συνέβη όταν προσπαθήσαμε να επιταχύνουμε τη διαδικασία προσθέτοντας μικρές ποσότητες ζεστού νερού στη λεκάνη, εξωτερικά του δοχείου. Στο τμήμα 20-30°C το σφάλμα φτάνει μέχρι 0.1°C αλλά και εδώ εξαρτάται από τη μεταβολή στο ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας.



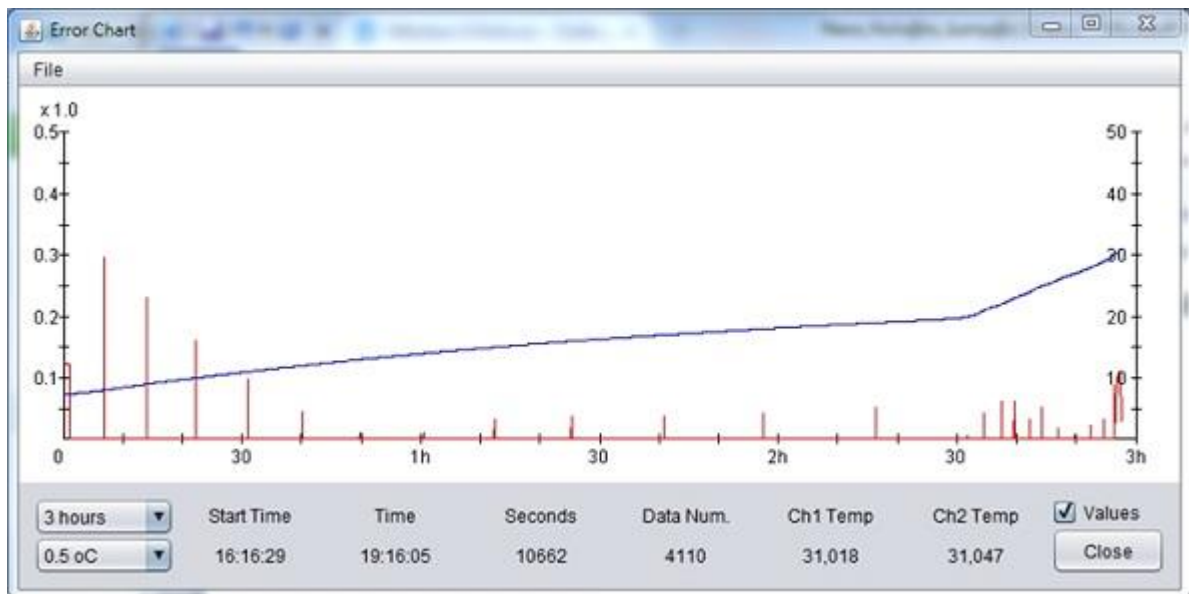
Εικόνα 7.4: Γράφημα αποτίμησης σε νερό με εκτίμηση τιμής B για 4 έως 30°C.

Γνωρίζοντας πως τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των τιμών B δεν πάρθηκαν με τον καταλληλότερο τρόπο, δοκιμάσαμε να χρησιμοποιήσουμε την τιμή B του κατασκευαστή (3977) και να υπολογίσουμε μόνο τη τιμή A για κάθε τμήμα. Εισάγοντας τις νέες τιμές και κάνοντας αποτίμηση πήραμε το γράφημα της εικόνας 7.5. Στο γράφημα φαίνεται ότι για το τμήμα 0-10°C, παρά το ότι το σφάλμα είναι μεγαλύτερο σε μέση τιμή, δεν εμφανίζει την απότομη μεταβολή που παρουσιάστηκε προηγουμένως και φτάνει μέχρι 0.48°C, πράγμα που είναι προτιμότερο για την ακρίβεια του συστήματος. Θα ίσχυε όμως το ίδιο αν τα δείγματα ήταν ποιοτικότερα;

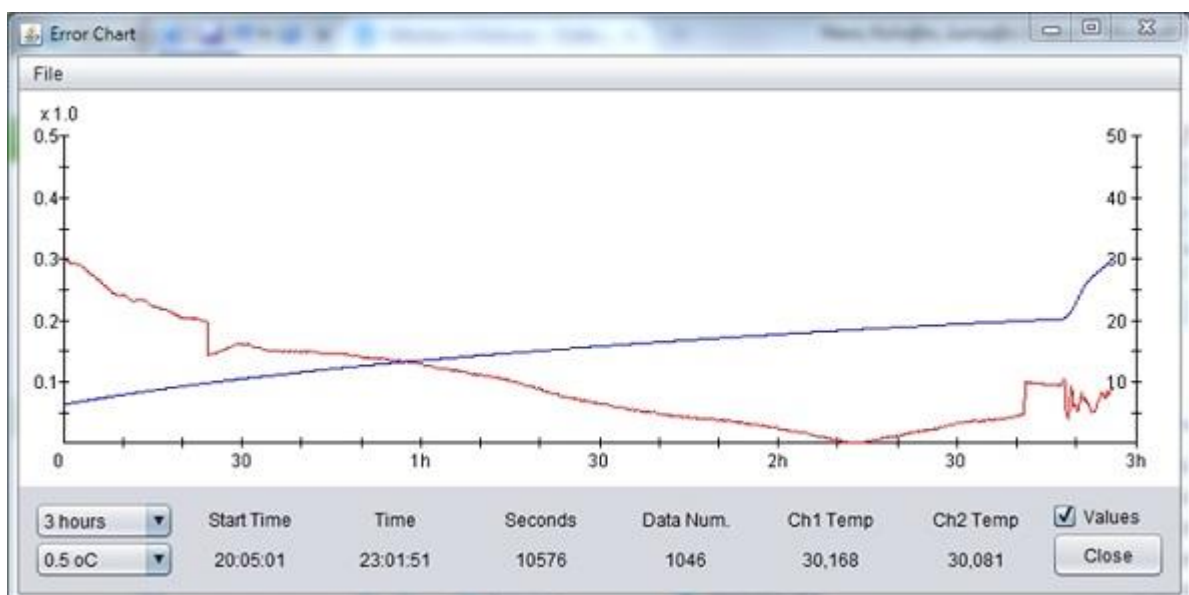


Εικόνα 7.5: Γράφημα αποτίμησης σε νερό με B κατασκευαστή για 7 έως 30°C.

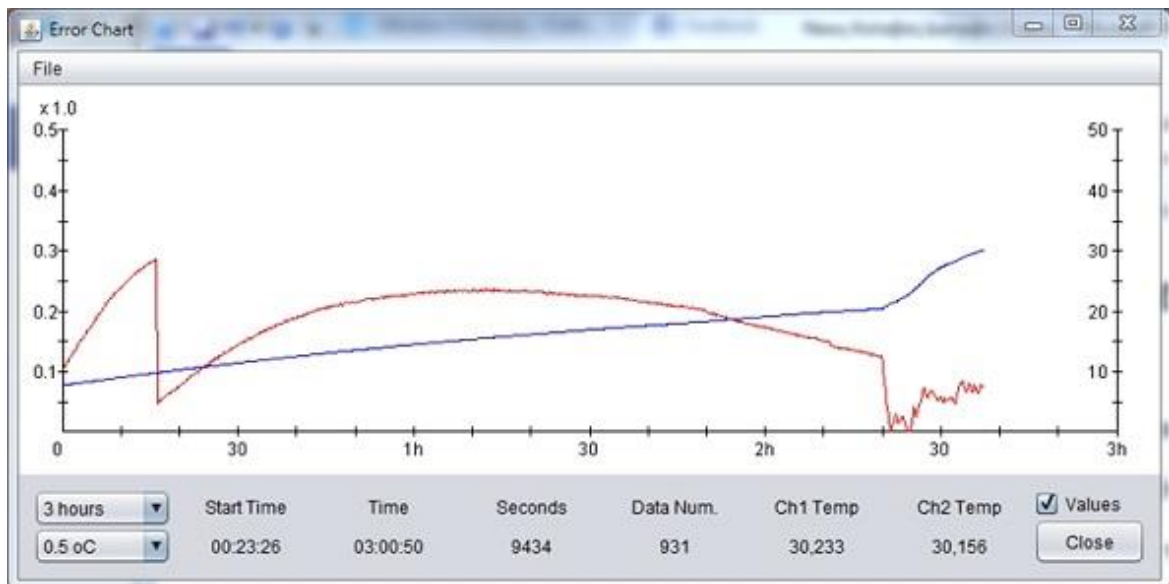
Επαναλαμβάνοντας όλη τη διαδικασία από την αρχή χωρίς εξωτερικές παρεμβάσεις (μέχρι τους 20°C) για να πάρουμε ποιοτικότερα δείγματα (Εικόνα 7.6), καταλήξαμε στον υπολογισμό των τιμών $B_{0/10}=4243$ με 2 δείγματα, $B_{10/20}= 4066$ με 10 δείγματα και $B_{20/30}= 3989$ με 10 δείγματα. Η αποτίμηση των τιμών αυτών φαίνεται στο γράφημα 7.7 και είναι φανερό πως το σφάλμα μεταβάλλεται με ομαλότερο τρόπο και έχει χαμηλότερες τιμές. Χρησιμοποιώντας την τιμή B του κατασκευαστή και υπολογίζοντας μόνο την τιμή A από τα ίδια δείγματα, πήραμε το γράφημα 7.8 όπου το σφάλμα είναι αυξημένο.



Εικόνα 7.6: Γράφημα διαβάθμισης σε νερό για 8 έως 30°C.

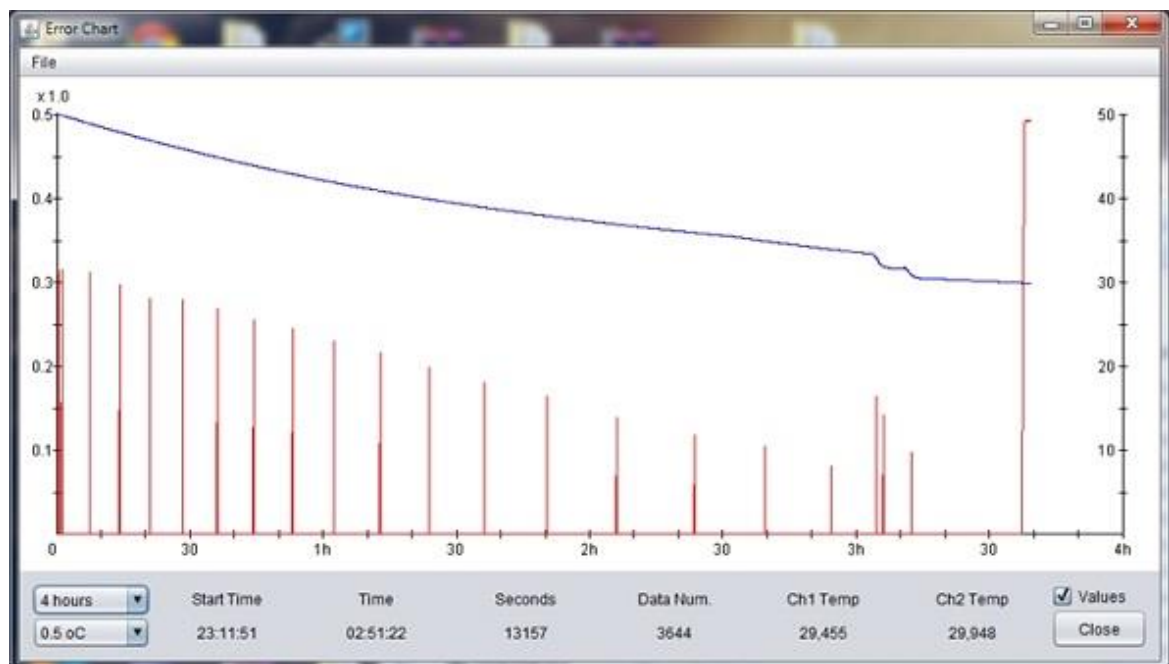


Εικόνα 7.7: Γράφημα αποτίμησης σε νερό με εκτίμηση τιμής B για 8 έως 30°C.

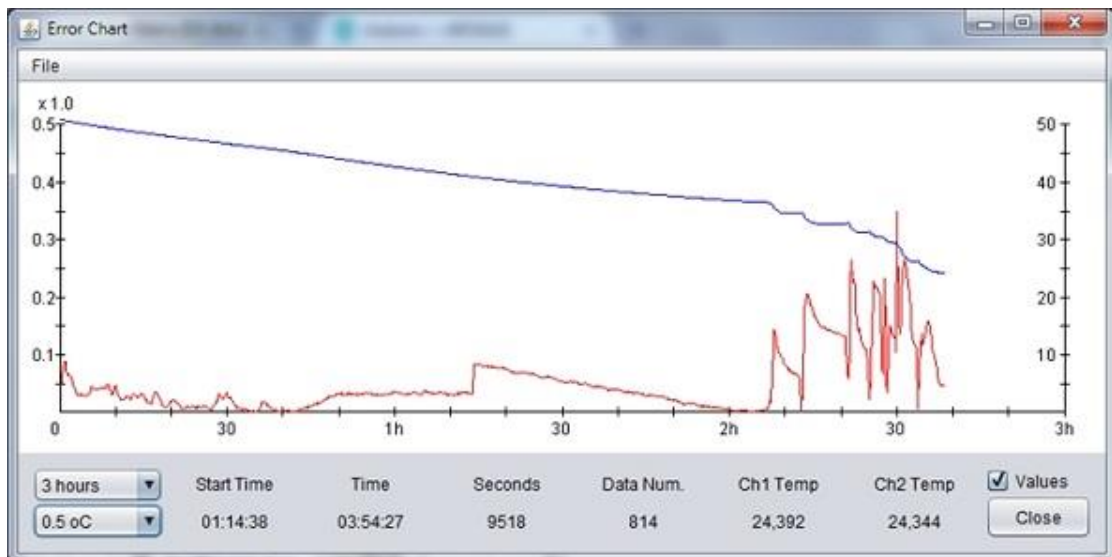


Εικόνα 7.8: Γράφημα αποτίμησης σε νερό με Β κατασκευαστή για 8 έως 30°C.

Για τη διαβάθμιση των τμημάτων 30-40°C και 40-50°C, στο δοχείο προστέθηκε ζεστό νερό και πάρθηκαν δείγματα καθώς η θερμοκρασία μειώνονταν. Το γράφημα της διαβάθμισης (Εικόνα 7.9) δείχνει ότι το σφάλμα των δειγμάτων μεταβάλλεται σταθερά μέχρι την παρέμβασή μας στους 33°C με στόχο την επιτάχυνση της διαδικασίας. Οι τιμές Β υπολογίστηκαν σε $B_{30/40}=3996$ και $B_{40/50}=4014$ και το γράφημα της αποτίμησης φαίνεται στην εικόνα 7.10.

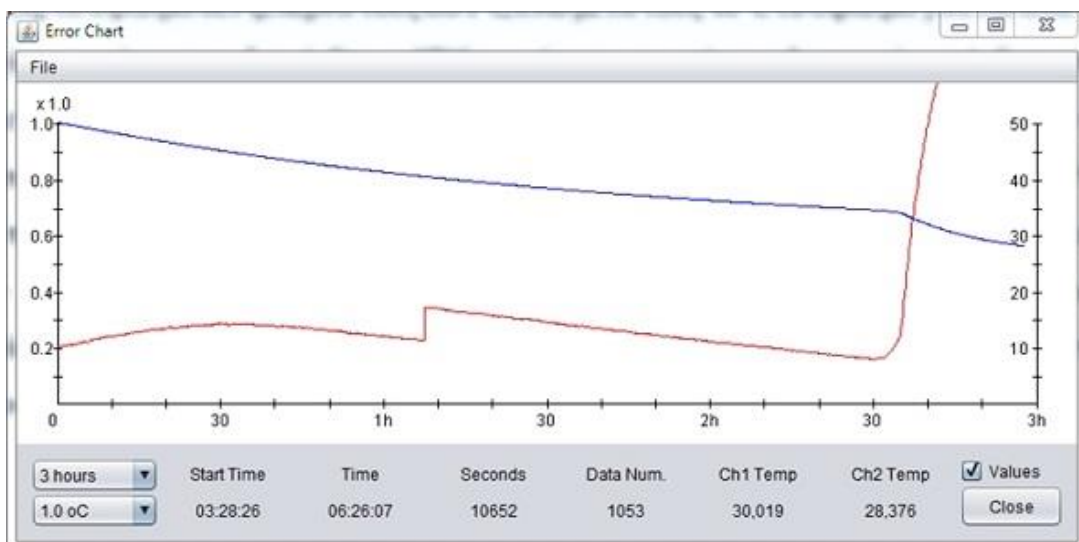


Εικόνα 7.9: Γράφημα διαβάθμισης σε νερό για 50 έως 30°C.



Εικόνα 7.10: Γράφημα αποτίμησης σε νερό με εκτίμηση του B για 50 έως 30°C.

Στο γράφημα αυτό φαίνεται πως για το τμήμα 50-40°C όπου η διαβάθμιση έγινε χωρίς παρεμβάσεις, το σφάλμα δεν ξεπερνά τους 0.04°C, ενώ μετά τους 40°C το σφάλμα γίνεται 0.08°C για να αρχίσει να πέφτει σταδιακά. Στους 37°C που άρχισε να υπάρχει εξωτερική παρέμβαση, το σφάλμα μεταβάλλεται ανάλογα με το ρυθμό πτώσης της θερμοκρασίας. Η χρήση της τιμής B του κατασκευαστή έδωσε το γράφημα της εικόνας 7.11 όπου το σφάλμα ξεπερνά τους 0.3°C. Αξίζει να παρατηρήσει κανείς σε αυτό το γράφημα το σφάλμα που ξεπερνά τον 1°C όταν αυξήσαμε μόνιμα το ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας, δείγμα ότι οι αισθητήρες ανταποκρίνονται με τελείως διαφορετικό τρόπο στη μεταβολή της θερμοκρασίας και το φαινόμενο αυτό ίσως το ευνοούν οι αδιάβροχες θήκες.



Εικόνα 7.11: Γράφημα αποτίμησης σε νερό με B κατασκευαστή για 50 έως 30°C.

7.2 Διαβάθμιση με Μεταλλικό Αντικείμενο

Έχοντας κάνει διαβάθμιση και αποτίμηση του αποτελέσματος με νερό, επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία μιας διάταξης όπου οι αισθητήρες θα μπορούν να μετρήσουν απευθείας τη μεταβαλλόμενη θερμοκρασία ενός σώματος χωρίς την ανάγκη χρήσης αδιάβροχης εξωτερικής θήκης. Κάτι τέτοιο θα διευκόλυνε τη ροή θερμότητας από το σώμα στους αισθητήρες, κάνοντάς τους να ανταποκρίνονται πιο άμεσα στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

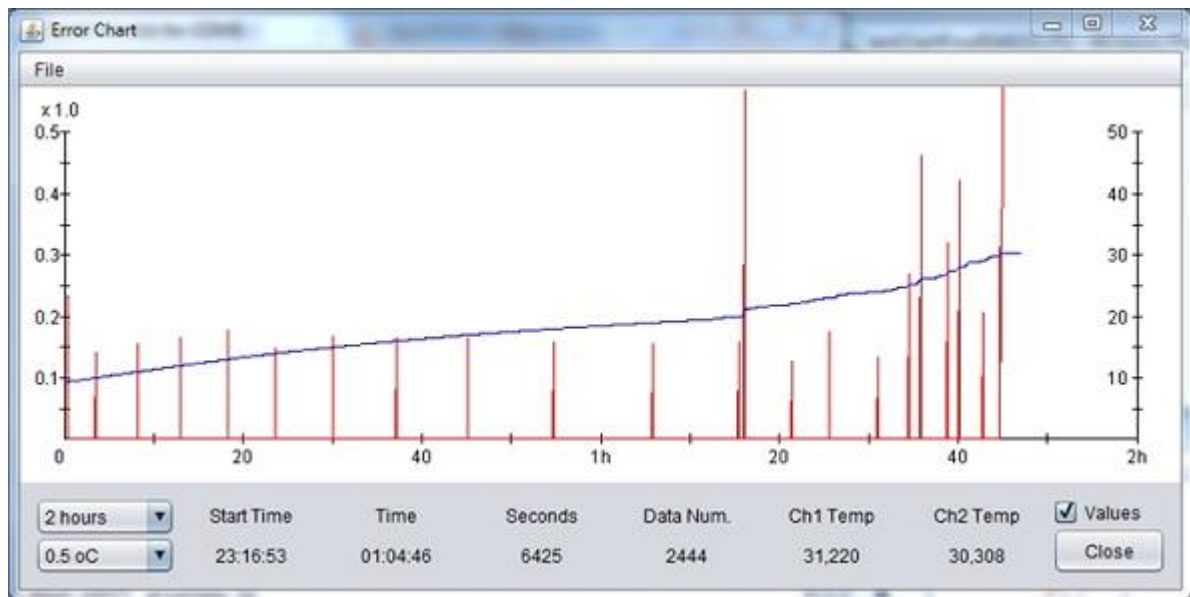
Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια μεταλλική φόρμα κέικ όπου οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στην οπή του κέντρου της και σε όσο το δυνατόν κοντινότερη απόσταση (Εικόνα 7.12). Για να διευκολυνθεί η ροή θερμότητας από και προς τους αισθητήρες, χρησιμοποιήθηκε θερμοαπαγωγική πάστα στην επαφή τους με το μέταλλο και η σύνδεση μονώθηκε από το εξωτερικό περιβάλλον με μονωτικό για σωλήνες. Βάζοντας κρύο ή ζεστό νερό στο εσωτερικό της φόρμας και αφήνοντάς το να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία στη σύνδεση μεταβάλλεται σταδιακά, δίνοντας τη δυνατότητα για μετρήσεις.



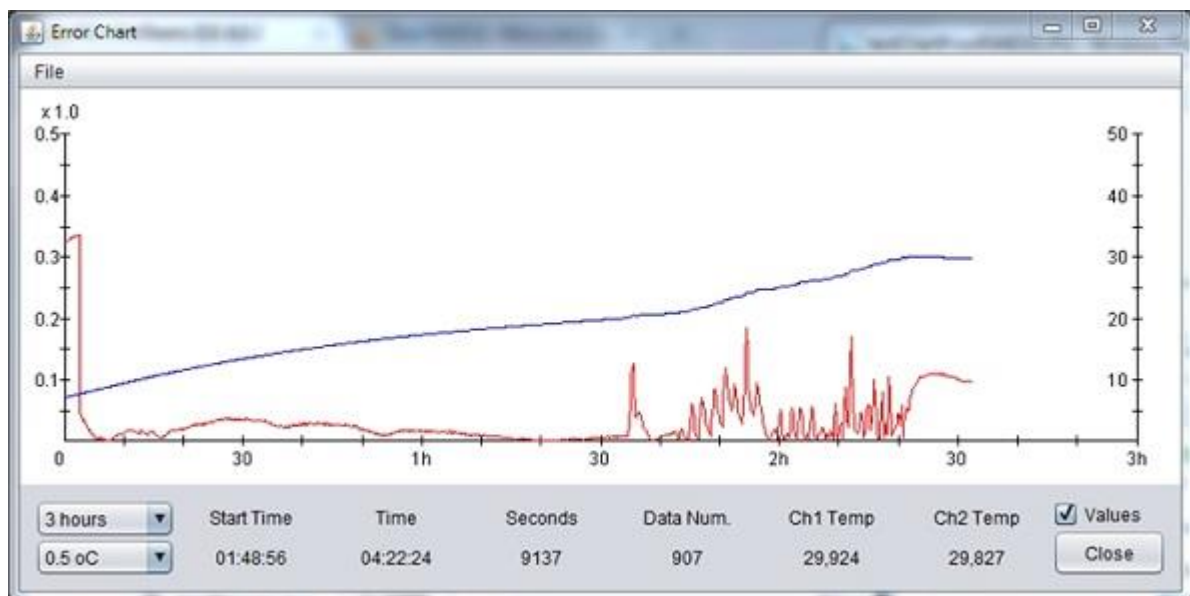
Εικόνα 7.12: Διάταξη διαβάθμισης σε μεταλλικό αντικείμενο.

Κάνοντας διαβάθμιση για το τμήμα 10-20°C χωρίς εξωτερική παρέμβαση και συνεχίζοντας στους 30°C προσθέτοντας σταδιακά ζεστό νερό, πήραμε το γράφημα της εικόνας 7.13. Στο γράφημα αυτό φαίνεται το σφάλμα στα δείγματα να είναι σχεδόν σταθερό μέχρι τους 20°C και να μεταβάλλεται ακανόνιστα μέχρι τους 30°C. Οι τιμές για τα B που υπολογίστηκαν ήταν $B_{10/20}=3975$ (πολύ κοντά στην τιμή που δίνει ο κατασκευαστής) και $B_{20/30}=3577$ αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας τις τιμές $B=3975$ και $A=1.91207$ που προέκυψαν από το τμήμα 10-20°C για όλο το εύρος από 0 έως 30°C επαναλάβαμε τη διαδικασία για να πάρουμε το γράφημα 7.14. Στο γράφημα αυτό το μέγιστο σφάλμα φτάνει τους 0.04°C για να πέσει κάτω από το 0.03°C μετά

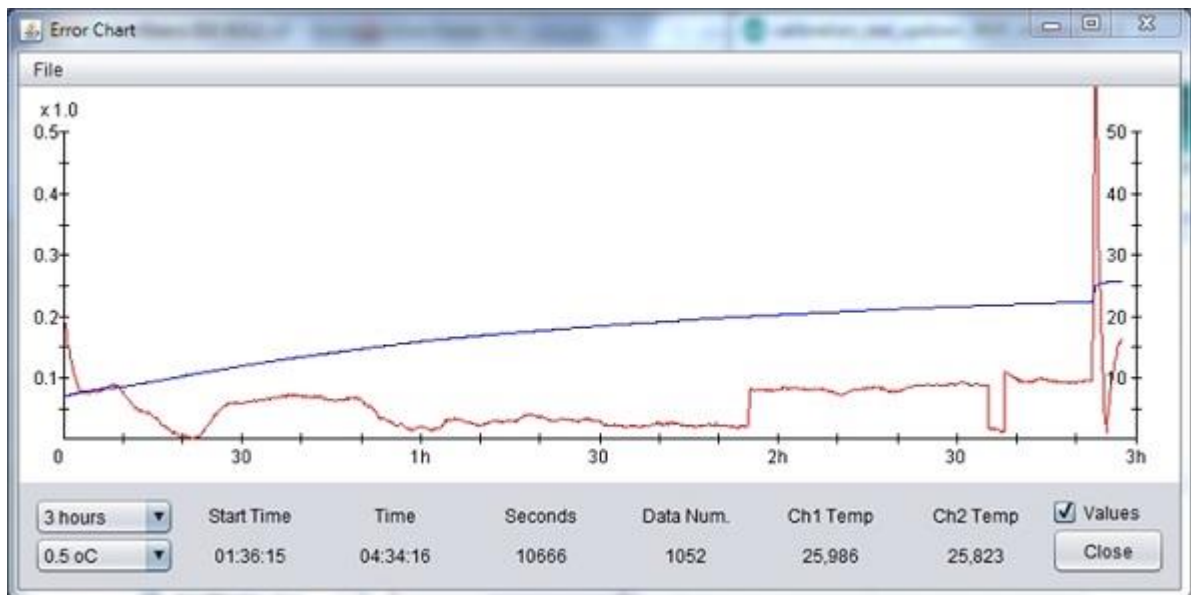
τους 15°C. Στο γράφημα της εικόνας 7.15 παρουσιάζεται η αποτίμηση με τη χρήση της τιμής B του κατασκευαστή και υπολογισμό μόνο της τιμής A. Το σφάλμα σε αυτή την περίπτωση είναι αυξημένο για το μεγαλύτερο μέρος του εύρους.



Εικόνα 7.13: Γράφημα διαβάθμισης σε στερεό σώμα για 10 έως 30°C.

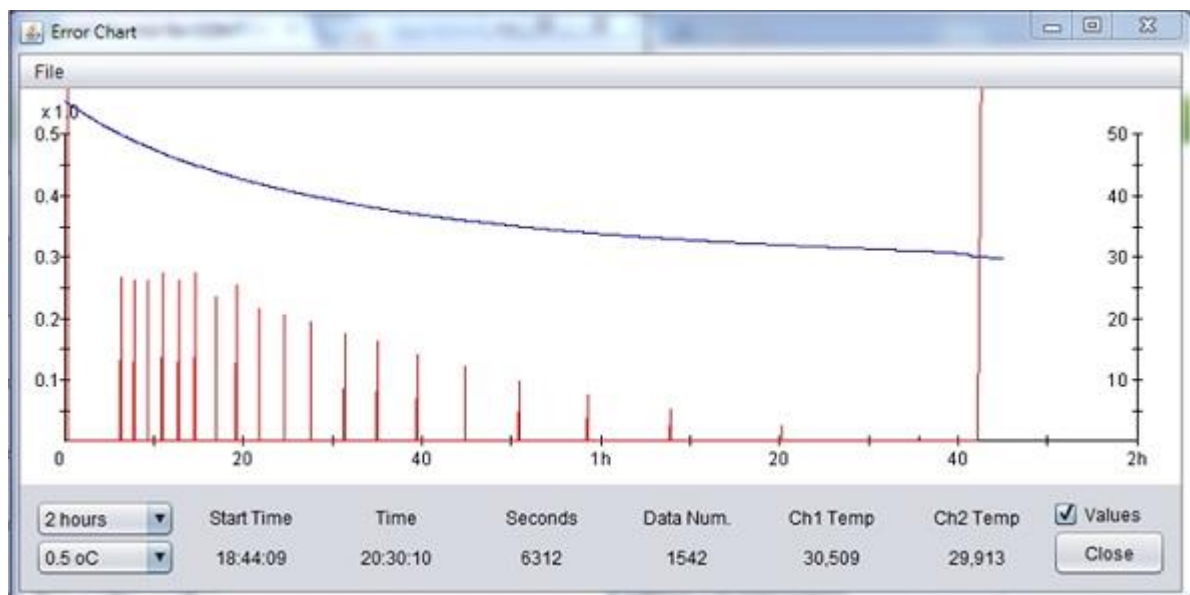


Εικόνα 7.14: Γράφημα αποτίμησης σε στερεό σώμα με εκτίμηση του B για 8 έως 30°C.

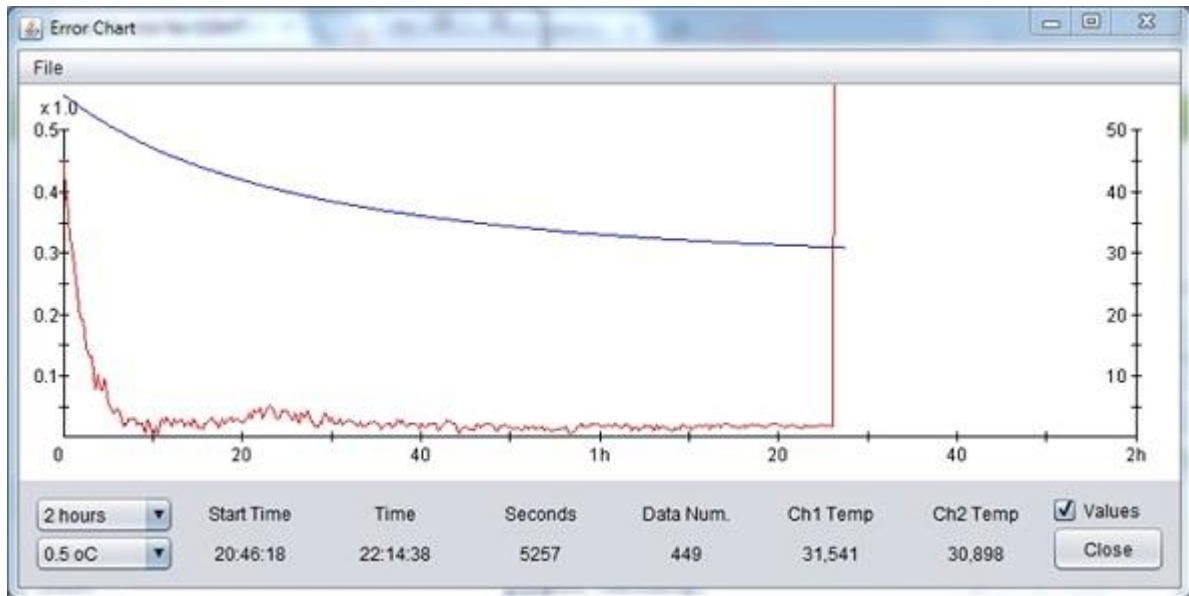


Εικόνα 7.15: Γράφημα αποτίμησης σε στερεό σώμα με Β κατασκευαστή για 8 έως 30°C.

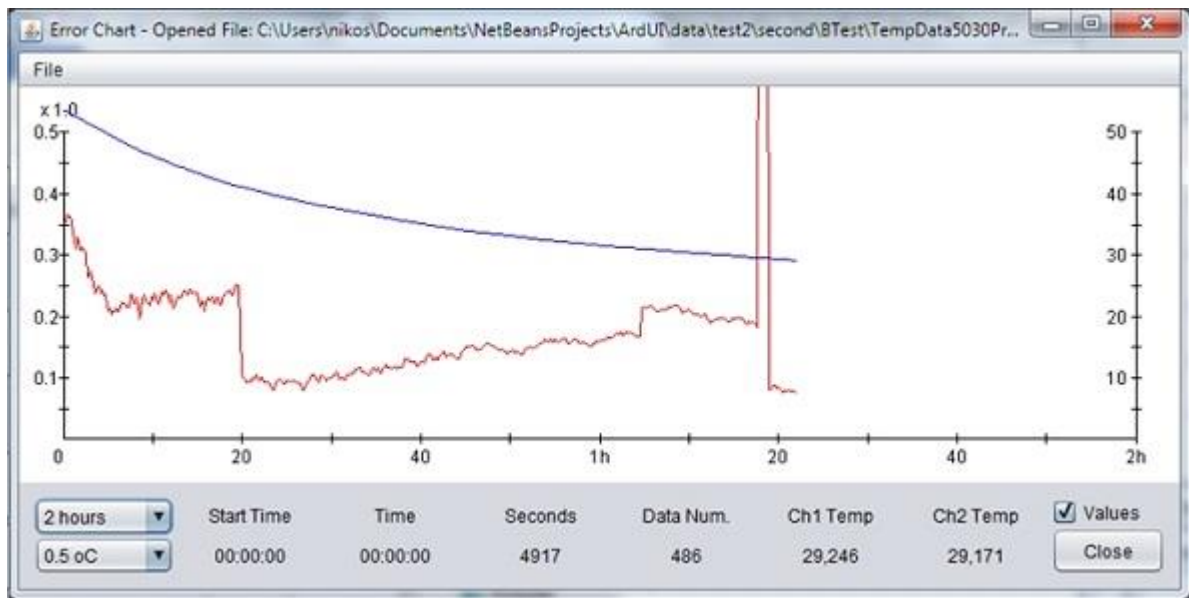
Η διαβάθμιση για το εύρος 30-50°C έγινε και εδώ βάζοντας ζεστό νερό στη φόρμα και αφήνοντάς το να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα δείγματα που προέκυψαν όπως φαίνονται στο γράφημα διαβάθμισης (Εικόνα 7.16) μας έδωσαν τιμές $B_{30/40}=4059$ και $B_{40/50}=3997$, οι οποίες με τη σειρά τους έδωσαν το γράφημα αποτίμησης της εικόνας 7.17. Στο γράφημα φαίνεται το μέγιστο σφάλμα να είναι 0.05°C γύρω από τους 40°C, τα άκρα δηλαδή των δυο τμημάτων. Στα υπόλοιπα σημεία το σφάλμα πέφτει κάτω από 0.03°C. Η χρήση της τιμής Β του κατασκευαστή φαίνεται στο γράφημα 7.18 όπου το σφάλμα βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα.



Εικόνα 7.16: Γράφημα διαβάθμισης σε στερεό σώμα για 50 έως 30°C.



Εικόνα 7.17: Γράφημα αποτίμησης σε στερεό σώμα με εκτίμηση του B για 50 έως 30°C.



Εικόνα 7.18: Γράφημα αποτίμησης σε στερεό σώμα με B κατασκευαστή για 50 έως 30°C.

7.3 Συμπεράσματα από τη Διαβάθμιση

Έχοντας ολοκληρώσει μια σειρά από μετρήσεις, τόσο για τη διαβάθμιση όσο και για την αποτίμηση του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρων, μπορέσαμε να κάνουμε μερικές παρατηρήσεις και να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα που θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα στην προσπάθεια διαβάθμισης και επίτευξης της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ακρίβειας στη μέτρηση της θερμοκρασίας. Τα σημαντικότερα από αυτά τα παραθέτουμε στη συνέχεια.

Τα θερμίστορ που χρησιμοποιήσαμε για το προς διαβάθμιση κύκλωμα και για το κύκλωμα αναφοράς (NTCLE100E3103JB0 και 103AP-2-A αντίστοιχα) είχαν διαφορετική απόκριση στην μεταβολή της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα το θερμίστορ του κυκλώματος αναφοράς ακολουθούσε γρηγορότερα τις αυξομειώσεις θερμοκρασίας με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια λάθος εκτίμηση του σφάλματος, ανάλογη του ρυθμού μεταβολής. Για το λόγο αυτό, η λήψη ποιοτικών δειγμάτων κατά τη διαδικασία της διαβάθμισης, απαιτεί τον ελάχιστο και όσο το δυνατόν σταθερότερο ρυθμό μεταβολής στη θερμοκρασία του μετρούμενου σώματος. Παρά τα μικρά σφάλματα που έδειξαν τα γραφήματα αποτίμησης για κάθε διαβάθμιση, δεν σημαίνει ότι τα σφάλματα αυτά θα παραμείνουν στις ίδιες τιμές αν η αποτίμηση γίνει με τον αντίστροφο τρόπο (π.χ. μείωση της θερμοκρασίας στην διαβάθμιση και αύξηση για την αποτίμηση).

Από τα γραφήματα της διαβάθμισης και από τον υπολογισμό των τιμών B, σε πολλές περιπτώσεις καταφέραμε να εκτιμήσουμε εκ των προτέρων τα αποτελέσματα της αποτίμησης. Στις περιπτώσεις που το σφάλμα των δειγμάτων μεταβάλλονταν ακανόνιστα (π.χ. σε μερικές λήψεις δειγμάτων για τα τμήματα 0-10°C και 20-30°C), υπήρξε αστοχία στον υπολογισμό μιας αποδεκτής τιμής για το B. Έτσι η χρήση των τιμών B και A του αμέσως επόμενου τμήματος ή της τιμής B του κατασκευαστή και υπολογισμό μόνο της τιμής A, έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα. Το συμπέρασμα που βγαίνει από αυτή τη διαπίστωση είναι πως ο υπολογισμός της τιμής B έχει νόημα μόνο όταν υπάρχουν ποιοτικά δείγματα. Όταν αυτό δεν ισχύει, η μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα της συνάρτησης που προκύπτει, μπορεί να δώσει ανεπιθύμητα αποτελέσματα με απότομη αύξηση του σφάλματος στα άκρα του κάθε τμήματος.

Κεφάλαιο 8

Επίλογος

Ξεκινώντας τη μεταπτυχιακή αυτή διατριβή, θέσαμε σαν στόχο τη μέτρηση της θερμοκρασίας από έναν κόμβο ασύρματου δικτύου με ακρίβεια μεγαλύτερη των $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Αυτό θα το επιτυγχάναμε σχεδιάζοντας ένα αποδοτικό κύκλωμα σύνδεσης του αισθητήρα με τον ασύρματο κόμβο και βαθμονομώντας τον αισθητήρα με τη βοήθεια λογισμικού. Φτάνοντας στο τέλος της μεταπτυχιακής διατριβής, διαπιστώσαμε πως το όριο των $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί σχεδιάζοντας έναν ασύρματο κόμβο χαμηλού κόστους και ακολουθώντας μια σχετικά απλή διαδικασία διαβάθμισης. Για να φτάσουμε σε αυτή τη διαπίστωση, χρειάστηκε να ασχοληθούμε με τομείς όπως η θερμομετρία, οι τεχνολογίες των αισθητήρων θερμοκρασίας, τα ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και ο προγραμματισμός. Χρειάστηκε ακόμα η υλοποίηση και δοκιμή διαφορετικών ηλεκτρονικών διατάξεων με τη λήψη και αξιολόγηση πολλών ειδών μετρήσεων. Στο διάστημα αυτό απαντήθηκαν αρκετά ερωτήματα αλλά δημιουργήθηκαν και νέα που ίσως απαντηθούν σε μελλοντικές επεκτάσεις.

8.1 Γενικά Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη της τεχνολογία έχει δώσει τη δυνατότητα απόκτησης εξειδικευμένων ηλεκτρονικών συσκευών με μικρό οικονομικό κόστος. Με κόστος μικρότερο από 60€ υλοποιήσαμε ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων αποτελούμενο από έναν κόμβο συντονισμού και έναν κόμβο αισθητήρων που λαμβάνει μετρήσεις θερμοκρασίας με πολύ υψηλή ανάλυση (0.001°C).

Συνδυάζοντας δείγματα των μετρήσεων αυτών με αντίστοιχες μετρήσεις αναφοράς υψηλής ανάλυσης και μεγαλύτερης ακρίβειας, μπορέσαμε να πάρουμε ένα μοντέλο εκτίμησης της θερμοκρασίας αναφοράς με πολύ μικρό σφάλμα. Το σφάλμα αυτό εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από την ποιότητα των δειγμάτων και κατά συνέπεια από την ίδια τη διαδικασία διαβάθμισης.

Στη διαδικασία διαβάθμισης που ακολουθήθηκε με δείγματα από σώματα που επανέρχονταν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο κύριος λόγος παραγωγής σφαλμάτων ήταν η διαφορετική συμπεριφορά των θερμίστορ στον ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας. Παρ' όλα αυτά, χωρίζοντας το εύρος της κλίμακας σε τμήματα των 10°C (0-10°C, 10-20°C κ.τ.λ.), παίρνοντας 10 δείγματα για κάθε τμήμα και κρατώντας όσο το δυνατόν μικρότερο το ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας, καταφέραμε να έχουμε σφάλμα από τη θερμοκρασία αναφοράς μικρότερο των $\pm 0.05^\circ\text{C}$. Πιθανοί τρόποι υπέρβασης του ορίου αυτού είναι η ακόμα ομαλότερη μεταβολή της θερμοκρασίας στη διαβάθμιση, ο διαχωρισμός του εύρους της κλίμακας σε περισσότερα τμήματα και η επεξεργασία περισσότερων δειγμάτων για κάθε τμήμα.

Η αντικατάσταση των μετρήσεων αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν με μετρήσεις ενός διαπιστευμένου θερμομέτρου εργαστηρίου υψηλής ακρίβειας, θα μας δώσει μια καλύτερη εικόνα για την πραγματική ακρίβεια στη μέτρηση της θερμοκρασίας που μπορεί να επιτευχθεί από τον κόμβο αισθητήρων μετά από τη διαβάθμιση. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαμε να έχουμε και μια καλύτερη εκτίμηση για τον αριθμό των τμημάτων που είναι απαραίτητο να χωριστεί το εύρος μέτρησης, καθώς και για τον αριθμό των δειγμάτων κάθε τμήματος.

8.2 Μελλοντική Εργασία και Επεκτάσεις

Το Α.Δ.Α. που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής διατριβής έχει σκοπό κυρίως τη λήψη μετρήσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Για το λόγο αυτό έχει αφήσει πολλά περιθώρια για μελλοντική εξέλιξη.

Πρώτη προτεραιότητα της μελλοντικής εργασίας είναι, όπως περιγράψαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, η διαβάθμιση του κυκλώματος διασύνδεσης αισθητήρα με τη χρήση ενός διαπιστευμένου θερμομέτρου εργαστηρίου υψηλής ακρίβειας. Για την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων από τη διαδικασία αυτή, θα χρειαστεί επίσης η περεταίρω ανάπτυξη του λογισμικού περιβάλλοντος διαχείρισης χρήστη, ώστε να υπάρξει μεγαλύτερη δυνατότητα επεξεργασίας των μετρήσεων και παρουσίασής τους σε γραφήματα.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα βελτίωσης στην κατανάλωση του κόμβου αισθητήρων. Κατά τη διαδικασία αποτίμησης του συστήματος, η 9 Volt μπαταρία που τροφοδοτούσε τον κόμβο κράτησε μόνο μερικές μέρες. Αυτή βέβαια δεν είναι η κατανάλωση σε πραγματικές συνθήκες αφού κατά τη διάρκεια της διαβάθμισης και αποτίμησης είχαμε συνεχή αποστολή μηνυμάτων.

Βάζοντας τον μικροελεγκτή και την μονάδα ασύρματης επικοινωνίας σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) όταν δεν πραγματοποιούν κάποια ενέργεια, θα μπορούσαμε να μειώσουμε αισθητά την κατανάλωση σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Κάτι που θα μπορούσε να μειώσει ακόμα περισσότερο την κατανάλωση, είναι η χρήση για τον κόμβο ενός πιο απλού Arduino Pro Mini έναντι του Arduino Nano.

Απαραίτητη κρίνεται τέλος η δημιουργία ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας που θα μας δώσει τη δυνατότητα εισαγωγής στο δίκτυο και διαχείρισης περισσότερων κόμβων αισθητήρων. Το πρωτόκολλο αυτό θα μπορούσε να βασιστεί σε μια υβριδική τοπολογία αστέρα – πλέγματος για μεγαλύτερη κάλυψη, ανθεκτικότητα και ευελιξία.

Βιβλιογραφία

- [01] Arampatzis, Th., Lygeros, J., Manesis, S. "A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks," Intelligent Control, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation , vol., no., pp.719,724, 27-29 June 2005
- [02] Akyildiz, I., Vuran, M. "Wireless Sensor Networks", John Wiley & Sons, 10, Chapter 1, June 2010
- [03] Arduino Site at <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- [04] B. Margi, C., Petkov, V., Obraczka, K., Manduchi, R. "Characterizing Energy Consumption in a Visual Sensor Network Testbed" Proceeding of the IEEE/Create-Net International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TridentCom '06), Barcelona, Spain, March 2006
- [05] Baker, B. "Precision Temperature-Sensing With RTD Circuits", AN687, Microchip Technology Inc, 2008
- [06] Baker, B., "Thermistors in Single Supply Temperature Sensing Circuits", AN685, Microchip Technology Inc, 2002
- [07] Baker, B. "Single Supply Temperature Sensing with Thermocouples", AN684, Microchip Technology Inc, 2002
- [08] Baker, B. "Temperature Sensing Technologies", AN679, Microchip Technology Inc, 1998
- [09] Barton, J., Hynes, G., Flynn, B., Aherne, K., Norman, A., Morrissey, A. "25mm Sensor-actuator Layer: a Miniature, Highly Adaptable Interface Layer," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 132, no. 1, pp. 362 – 369, 2006

- [10] Bentley, J. "Temperature Sensor Characteristics and Measurement System Design", *Journal of Physics, Scientific. Instruments*, vol. 17, 1984
- [11] Boano, C., Lasagni, M., Römer, K., Lange, T. "Accurate Temperature Measurements for Medical Research Using Body Sensor Networks," *Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops (ISORCW)*, 2011 14th IEEE International Symposium on , vol., no., pp.189,198, 28-31 March 2011
- [12] Boonsawat, V., Ekchamanonta, J., Bumrungkhe, K., Kittipiyakul, S. "XBee Wireless Sensor Networks for Temperature Monitoring", *School of Information Computer and Communication Technology*, 2010
- [13] Boyes, W. "Instrumentation Reference Book, 4th Edition", Butterworth-Heinemann, Chapter 21, 11 December 2009
- [14] Burke, A. "Linearizing Thermistors with a Single Resistor", *Electron*, vol. 54, no. 11, pp. 151–154, 1981.
- [15] Chen, W., Dols, S., Oetomo, S., Feijs, L. "Monitoring Body Temperature of Newborn Infants at Neonatal Intensive Care Units Using Wearable Sensors," in *Proceedings of the 5th International Conference on Body Area Networks (BodyNets)*, Corfu Island, Greece, Sep. 2010
- [16] Chen, W., Nguyen, S., Coops, R., Bambang Oetomo, S., Feijs, L. "Wireless Transmission Design for Health Monitoring at Neonatal Intensive Care Units", the 2nd international symposium on applied sciences in biomedical and communication technologies (ISABEL 2009), Bratislava, Slovakia, Nov. 2009
- [17] Crossbow technology. <http://www.xbow.com>
- [18] Danisman, D., Dalkiran, I., Celebi, F. "Design of a High Precision Temperature Measurement System Based on Artificial Neural Network for Different Thermocouple Types", *Measurement*, Volume 39, Issue 8, pp. 695-700, October 2006
- [19] Dargie, W., Poellabauer, C. "Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice", Wiley, 2010

- [20] Diamond, M. "Linearization of Resistance Thermometers and Other Transducers", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 41, no. 1, pp. 53–60, Jan. 1970.
- [21] Epcos, "NTC Thermistors, General Technical Information", Feb 2009, available at <http://www.physics.queensu.ca/~robbie/ENPH354/NTC-Thermistors-Technote.pdf>
- [22] Fisher, D., Gould, P. "Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research", *Scientific Research, Modern Instrumentation*, Apr 2012.
- [23] Harte, S., Flynn, B., Catal'a, R., Popovici, E. "Design and Implementation of a Miniaturised, Low-Power Wireless Sensor Node," in *Proceedings of the 18th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, Seville, Spain, Aug. 2007, pp. 894–897
- [24] Hoesel, L., Dulman, S., Havinga, P., Kip, H. "Design of a Low Power Testbed for Wireless Sensor Networks and Verification", Technical report, University of Twente, 2003
- [25] Khan, A., "An Improved Linear Temperature/Voltage Converter Using Thermistor in Logarithmic Network", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-34, no. 5, pp. 635–638, Dec. 1985.
- [26] Khan, A., Sengupta, R. "A Linear Temperature/Voltage Converter Using Thermistor in Logarithmic Network", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-33, no. 1, pp. 2–4, Mar. 1984.
- [27] Kioumars, A., Liqiong Tang "Wireless network for health monitoring: heart rate and temperature sensor," *Sensing Technology (ICST), 2011 Fifth International Conference on*, vol., no., pp.362,369, Nov. 28 2011-Dec. 1 2011
- [28] Lawrence, D. "Master Math: Essential Physics", Course Technology PTR, 19 April 2012
- [29] Lyahou, K., Horn, G., Huijsing, J. "A Non-iterative Polynomial 2-D Calibration Method Implemented in a Microcontroller", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997
- [30] Mansor, H., Shukor, M., Meskam, S., Rusli, N., Zamery, N. "Body temperature measurement for remote health monitoring system," *Smart Instrumentation, Measurement and*

Applications (ICSIMA), 2013 IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,5, 25-27
Nov. 2013

- [31] Matin, M. "Wireless Sensor Networks – Technology and Protocols", InTech Prepress, Chapter 1, September 2012
- [32] Maxim Integrated, "DS18B20, Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer", 2008, available at <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [33] Natarajan, S., Bhattacharyya, B. "Temperature-to-Time Converters", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-26, no. 1, pp. 77–79, Mar. 1977.
- [34] Nordic Semiconductor, "nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver - Product Specification v1.0", available at <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P>
- [35] nRF24L01 2.4GHz Radio/Wireless Transceivers How-To, Available at <http://arduino-info.wikispaces.com/Nrf24L01-2.4GHz-HowTo>
- [36] Patranabis, D., Ghosh, S., Bakshi, C. "Linearizing Transducer Characteristics", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 37, no. 1, pp. 66–69, Mar. 1988.
- [37] Reiter, G. "Wireless Connectivity for the Internet of Things", Texas Instruments Incorporated, 2014.
- [38] Rivera, J., Herrera, G., Chacón, M. "Improved Progressive Polynomial Algorithm for Self-Calibration and Optimal Response in Smart Sensors", Measurement, Volume 42, Issue 9, pp. 1395-1401, November 2009
- [39] Sarma, U., Boruah, P. "Design and Development of a High Precision Thermocouple Based Smart Industrial Thermometer With On Line Linearisation and Data Logging Feature", Measurement, Volume 43, Issue 10, pp. 1589-1594, December 2010
- [40] Semitec, "AP Thermistor", Data sheet available at <http://www.semitec-usa.com/downloads/apthermistor.pdf>

- [41] Sengupta, R. "A Widely Linear Temperature to Frequency Converter Using a Thermistor in a Pulse Generator", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 37, no. 1, pp. 62–65, Mar. 1988.
- [42] Sinclair, I, "Sensors and Transducers, 3rd Edition", Newnes, Chapter 4, 30 May 2001
- [43] Spectrum Sensors & Controls Inc, "NTC Thermistors Engineering Notes", available at <http://precisionsensors.meas-spec.com/ntc-engineering.asp>
- [44] Stankovic, D. "Linearized Thermistor Multivibrator Bridges for Temperature Measurement", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-23, no. 2, pp. 179–180, Jun. 1974.
- [45] Stankovic, D., Elazar, J. "Thermistor Multivibrator As The Temperature-to-Frequency Converter and as a Bridge for Temperature Measurement", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-26, no. 1, pp. 41–46, Mar. 1977.
- [46] Stanković, S., Kyriacou, P. "The Effects Of Thermistor Linearization Techniques On The T-History Characterization Of Phase Change Materials", Applied Thermal Engineering, Volume 44, Pages 78-84, November 2012
- [47] Sundvist, B. "Simple, Wide-Range, Linear Temperature-to-Frequency Converters Using Standard Thermistors", J. Phys. E, Sci. Instrum., vol. 16, no. 4, pp. 261–264, Apr. 1983.
- [48] Sung, W., Chen, J., Hsiao, C., Lin, J. "Multi-sensors Data Fusion Based on Arduino Board and XBee Module Technology," Computer, Consumer and Control (IS3C), 2014 International Symposium on , vol., no., pp.422,425, 10-12 June 2014
- [49] Texas Instrument Incorporated "Wireless Connectivity Guide", 2014, available at <http://www.ti.com/lit/sg/slab056d/slab056d.pdf>
- [50] Texas Instruments, "ADS1113, ADS1114, ADS1115 - Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference", 2009, available at <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>
- [51] Tourancheau, B., Mazzer, Y., Gavan, V., Kuznik, F., Krauss, G. "Software Calibration of Wirelessly Networked Sensors," Sensor Technologies and Applications, 2009.

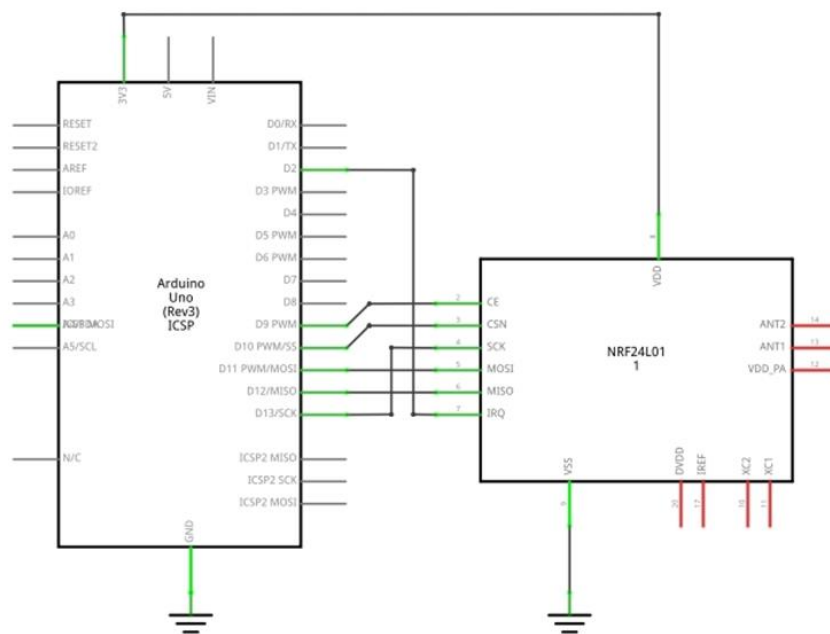
SENSORCOMM '09. Third International Conference on , vol., no., pp.314,319, 18-23 June 2009

- [52] Vishay Dale, "Selecting NTC Thermistors", Document Number 33001, Revision 04 Mar 2002, available at <http://www.vishay.com/docs/33001/seltherm.pdf>
- [53] Webster, J. "Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook", CRC Press LLC, 1999.
- [54] Zumbahlen, H. "Linear Circuit Design Handbook", Newnes, Chapter 1, 30 August 2011
- [55] Ζώγου, Ο. "Θερμομετρία Θερμογραφία" Νοέμβριος 2007

Παράρτημα Α

Ηλεκτρονικά Σχέδια Κόμβων

A.1 Ηλεκτρονικό Σχέδιο Κόμβου Συντονισμού



A.2 Ηλεκτρονικό Σχέδιο Κόμβου Αισθητήρων

