



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ

Πολίτης Βασίλειος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Χανιά, Απρίλιος 2021

Πρόλογος

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Κουτρούλη Ευτύχιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του και την επιμονή που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην οικογένεια μου για τη διαρκή υπομονή και υποστήριξή της. Ιδιαίτερα θα ήθελα να απευθύνω ευχαριστίες στην μητέρα μου Ντέμπε και στον πατέρα μου Ευάγγελο για την υποστηρικτική τους παρουσία και την αμέριστη συμπαράστασή τους.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη Μιχαέλα Βασιλειάδη για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή της, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας κατοικιών. Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (ΑΔΑ / Wireless Sensor Network - WSN) για την μέτρηση και τον έλεγχο της κατανάλωσης ενός εύρους πιθανών φορτίων σε μια κατοικία. Μέσω της συλλογής των δεδομένων από τους κόμβους αισθητήρων του δικτύου, γίνεται η μεταφορά της παρούσας κατάστασης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της κατοικίας, στην κεντρική βάση δεδομένων. Εκεί σε πραγματικό χρόνο γίνεται η εποπτεία του συστήματος και μπορεί να μεταβληθεί η κατάσταση κατανάλωσης της κατοικίας, αποσυνδέοντας τα αντίστοιχα φορτία μέσω του ασυρμάτου δικτύου, και των κόμβων που τα ελέγχουν.

Κάθε κόμβος αποτελείται από έναν ραδιοπομποδέκτη με εξωτερική κεραία στην μπάνα των 2.4GHz που χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.15.4, δύο μικροελεγκτές, αισθητήρες τάσης, ρεύματος και θερμοκρασίας, ρυθμιστές σήματος των αισθητήρων, καθώς και έναν ηλεκτρονόμο (ρελέ) και το κύκλωμα ελέγχου του. Με αυτόν τον τρόπο οι κόμβοι μπορούν να μετρήσουν και να υπολογίσουν την ενεργό τάση, το ενεργό ρεύμα, την συχνότητα του ρεύματος και την θερμοκρασία του κόμβου, και να στείλουν στον κεντρικό κόμβο πληροφορίες για την ισχύ και την κατανάλωση ενέργειας του φορτίου στο οποίο είναι συνδεδεμένοι. Είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται από τους αλγορίθμους που κάνουν τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς στους κόμβους, να μπορούν να τροποποιηθούν ασύρματα με κατάλληλες εντολές από τον κεντρικό κόμβο, όπως και την ασύρματη διακοπή των φορτίων με την χρήση του ηλεκτρονόμου των κόμβων.

Οι ασύρματοι αισθητήρες που υλοποιήθηκαν τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή με τα φορτία που ελέγχουν, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Τέλος, έγιναν μετρήσεις και βαθμονομήθηκε το σύστημα, από τις οποίες προέκυψαν συμπεράσματα για την γραμμικότητα, την επαναληψιμότητα και την ευαισθησία του δικτύου ασύρματων αισθητήρων που υλοποιήθηκε.

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1	Γενικά	5
1.2	Σύνοψη Κεφαλαίων	6
2.	ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	8
2.1	Το πρότυπο IEEE 802.15.4.....	8
2.1.1	Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου	9
2.1.2	Τύποι Κόμβων	9
2.1.3	Τοπολογίες10	
2.1.4	Αρχιτεκτονική Μεταφοράς Δεδομένων	10
2.1.5	Αξιοπιστία και Ασφάλεια.....	11
2.2	Αισθητήρας ρεύματος.....	13
2.3	Τροφοδοσία κόμβων	15
3.	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ	18
3.1	Ο Αισθητήρας Τάσης.....	24
3.2	Ο Αισθητήρας Ρεύματος Hall Effect.....	27
3.3	Τροφοδοσία ασύρματου κόμβου	29
3.4	Ο Ηλεκτρονόμος.....	31
3.5	Οι Μικροελεγκτές.....	33
3.5.1	Διεπαφή Προγραμματισμού	37
3.5.2	Σειριακή Διεπαφή USART	38
3.5.3	Δειγματοληψία και Συγχρονισμός.....	42
3.5.4	Αφαίρεση Μετατόπισης DC	46
3.5.5	Μέτρηση Τάσης και Ρεύματος.....	47
3.5.6	Λογισμικό Κόμβων	47
3.5.7	Διαδικασία αποστολής και λήψης πακέτων	47
3.6	Αισθητήρας Θερμοκρασίας.....	49
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	51
4.1	Περιγραφή Μεθοδολογίας Μετρήσεων	53
4.2	Βαθμονόμηση	56
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	64
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία και η οικονομική ανάπτυξη εξελίσσονται με ταχύ ρυθμό και επακόλουθο αυτού είναι η ανάγκη των ανθρώπων για κατανάλωση ενέργειας να αυξάνεται. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση τόσο της κατανάλωσης όσο και της παραγωγής ενέργειας έχουν τα συστήματα μέτρησης και διαχείρισης της ενέργειας.

Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη κατανόηση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα κτίριο και κατά συνέπεια στην ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών της διαχείρισης της. Η χρήση αυτών των συστημάτων είναι απαραίτητη τόσο για τον έλεγχο της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για την εξοικονόμηση χρημάτων, περιορίζοντας τη σπατάλη της.

Τα απλά συστήματα μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι μετρητές που διαθέτουν όλες οι κατοικίες, είναι περιορισμένων δυνατοτήτων και μπορούν μόνο να μετρήσουν και να απεικονίσουν το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο έχει καταναλωθεί. Δεν υπάρχουν δυνατότητες απόκτησης δεδομένων για ανάλυση και δεν έχουν την δυνατότητα να επηρεάσουν την κατανάλωση άμεσα, κάνοντας εξοικονόμηση ενέργειας με έλεγχο των

φορτίων που μετράνε. Τα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να μετρούν, να διαχειρίζονται και να ελέγχουν την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται συνολικά αλλά και στα επιμέρους τμήματα μιας κατοικίας. Στόχος αυτών των συστημάτων είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η εξοικονόμηση χρημάτων, η μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος και η βελτίωση της ποιότητας ζωής που προσφέρει ο εκτεταμένος και εύκολος έλεγχος της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μιας κατοικίας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, κατασκευάστηκε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (ΑΔΑ), σχεδιασμένο για τοποθέτηση σε πρίζες μέσα στο σπίτι, για την μέτρηση, τη συλλογή δεδομένων και τον έλεγχο της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει αυτό εφικτό, κάθε κόμβος αισθητήρα συλλέγει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την τάση, την ένταση και τη συχνότητα του ρεύματος, των γραμμών τροφοδοσίας που συνδέονται με συσκευές στην πρίζα, καθώς και τη θερμοκρασία λειτουργίας στην οποία βρίσκεται ο κάθε κόμβος. Κάθε κόμβος υπολογίζει την ενεργό τιμή (RMS) των κυματομορφών που μετρώνται και στέλνει τα δεδομένα με χρονική σήμανση πίσω στον κεντρικό κόμβο ασύρματα για την επεξεργασία των μετρήσεων και τον έλεγχο των ηλεκτρικών φορτίων με σκοπό τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα τέτοιο ασύρματο δίκτυο διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούμενο από αυτόνομους ασυρμάτους κόμβους αισθητήρων, μπορεί να αποτελέσει τη βάση για πολλές εφαρμογές στον οικιακό αλλά και επαγγελματικό χώρο.

Πάνω σε αυτό το δίκτυο μπορεί να υλοποιηθεί αυτόματο σύστημα που ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις να διαχειρίζεται την ενέργεια που καταναλώνεται με αποτέλεσμα να προκύπτει μείωση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οδηγεί σε μικρότερο κόστος και μεγαλύτερη απόδοση και συνεπώς σε ελαχιστοποίηση της σπάταλης. Επίσης είναι δυνατό να ελεγχθεί η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που εξοικονομήθηκε, και με την συλλογή αυτών των δεδομένων να κατασκευαστεί ένα προφίλ ζήτησης ενέργειας του δικτύου, για να γίνει πρόβλεψη και καλύτερη μελλοντική διαχείριση.

1.2 Σύνοψη Κεφαλαίων

Η δομή της εργασίας αυτής είναι η εξής:

- Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ασύρματων κόμβων αισθητήρων. Περιγράφεται αναλυτικά το πρότυπο IEEE 802.15.4 που χρησιμοποιούν οι κόμβοι για την μεταφορά των δεδομένων τους, ο

τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο αισθητήρας ρεύματος Hall Effect κλειστού βρόχου (αντισταθμιζόμενος) και ο τρόπος σχεδίασης της τροφοδοσίας του κόμβου.

- Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του συστήματος που υλοποιήθηκε και των επιμέρους στοιχείων του. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα μέρη των κόμβων, η σχεδίαση τους και η λειτουργία του συνολικού συστήματος.
- Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την βαθμονόμηση και τον έλεγχο της λειτουργίας του ασύρματου δικτύου που υλοποιήθηκε.
- Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προτάσεις για μελλοντική μελέτη.

2.

ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Το πρότυπο IEEE 802.15.4

Το IEEE 802.15.4 είναι ένα τεχνικό πρότυπο που καθορίζει τη λειτουργία ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής χαμηλού ρυθμού (Low-Rate Wireless Personal Area Networks, LR-WPANs). Προσδιορίζει το φυσικό επίπεδο (Physical layer, PHY) και τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control, MAC) για τα LR-WPAN, και διατηρείται από την ομάδα εργασίας IEEE 802.15, η οποία καθόρισε το πρότυπο το 2003. Είναι η βάση για τις προδιαγραφές Zigbee, ISA100.11a, WirelessHART, MiWi, 6LoWPAN, Thread και SNAP, καθεμία από τις οποίες επεκτείνει περαιτέρω το πρότυπο, αναπτύσσοντας τα ανώτερα επίπεδα που δεν ορίζονται στο IEEE 802.15.4 .

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 προσφέρει τα βασικά χαμηλότερα επίπεδα δικτύου ενός τύπου ασύρματου προσωπικού δικτύου (WPAN), που εστιάζει στην χαμηλού κόστους και χαμηλής ταχύτητας επικοινωνία μεταξύ συσκευών.

Η απόσταση μετάδοσης για κάθε κόμβο κυμαίνεται από τα 10 m έως 75 m ανάλογα με την ισχύ του πομπού. Η RF επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου γίνεται στις βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές (ISM) περιοχές συχνοτήτων των 2.45 Ghz ή 869 MHz. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι 250 kbps για μετάδοση στα 2.45 Ghz και 20 kbps για μετάδοση στα 869 MHz [1].

2.1.1 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου

Ο ορισμός των επιπέδων δικτύου βασίζεται στο μοντέλο αναφοράς Ανοικτής Διασύνδεσης Συστημάτων (Open Systems Interconnection model, OSI) και μόνο τα κατώτερα επίπεδα ορίζονται στο πρότυπο. Το φυσικό επίπεδο (PHY) είναι το χαμηλότερο επίπεδο στο μοντέλο αναφοράς OSI που χρησιμοποιείται παγκοσμίως και παρέχει την υπηρεσία μετάδοσης δεδομένων. Το PHY διαχειρίζεται τον πομποδέκτη RF και εκτελεί την επιλογή καναλιών μαζί με τις λειτουργίες διαχείρισης ενέργειας και σήματος

Ο έλεγχος πρόσβασης στο μέσο επιτρέπει τη μετάδοση των πακέτων MAC μέσω της χρήσης του φυσικού καναλιού. Προσφέρει μια διεπαφή διαχείρισης και διαχειρίζεται την πρόσβαση στο φυσικό κανάλι και την σηματοδότηση (beaconing) του δικτύου. Ελέγχει επίσης την επικύρωση των πακέτων, εγγνύεται χρονικά διαστήματα και χειρίζεται συσχετισμούς κόμβων. Δεν καθορίζονται επίπεδα υψηλότερου βαθμού και υποεπίπεδα διαλειτουργικότητας στο πρότυπο.

2.1.2 Τύποι Κόμβων

Το πρότυπο ορίζει δύο τύπους κόμβου δικτύου:

- Ο πρώτος είναι η συσκευή πλήρους λειτουργίας Full-Function Device (FFD). Μπορεί να χρησιμεύσει ως συντονιστής ενός προσωπικού δικτύου περιοχής ή μπορεί να λειτουργήσει ως ένας κοινός κόμβος. Εφαρμόζει ένα γενικό μοντέλο επικοινωνίας που του επιτρέπει να μιλά με οποιαδήποτε άλλη συσκευή. Μπορεί επίσης να μεταδίδει μηνύματα μεταξύ κόμβων, οπότε ονομάζεται συντονιστής (συντονιστής PAN όταν είναι υπεύθυνος για ολόκληρο το δίκτυο).
- Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν συσκευές μειωμένης λειτουργίας Reduced-Function Devices (RFD). Αυτές είναι εξαιρετικά απλές συσκευές με πολύ μικρές απαιτήσεις

πόρων και επικοινωνίας. Λόγω αυτού, μπορούν να επικοινωνούν μόνο με FFD και δεν μπορούν ποτέ να λειτουργήσουν ως συντονιστές.

2.1.3 Τοπολογίες

Τα δίκτυα μπορούν να δημιουργηθούν είτε σε διομότιμη τοπολογία (peer-to-peer) είτε σε τοπολογία αστερισμού.



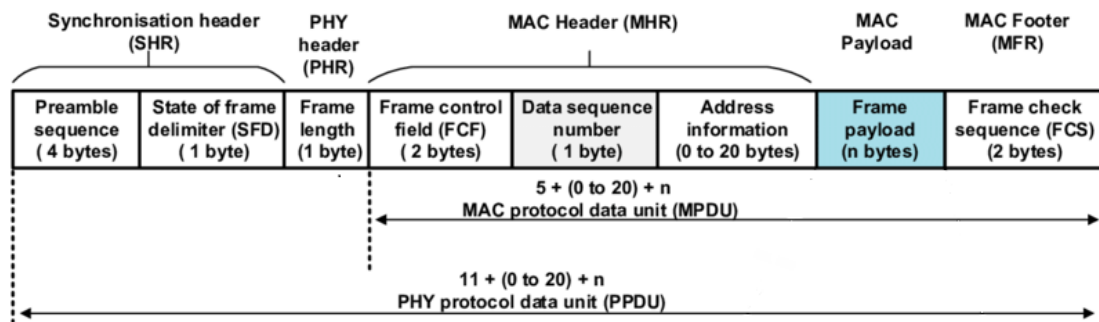
Σχήμα 2-1 Δίκτυο ασύρματων αισθητήρων σε τοπολογία αστέρα.

Ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων σε τοπολογία αστέρα δίνεται στο Σχήμα 2-1. Ωστόσο, κάθε δίκτυο χρειάζεται τουλάχιστον ένα FFD για να λειτουργεί ως συντονιστής του δικτύου. Τα δίκτυα διαμορφώνονται με αυτόν τον τρόπο από ομάδες συσκευών που διαχωρίζονται από κατάλληλες αποστάσεις. Κάθε συσκευή έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό 64-bit, αλλά, εάν πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύντομα αναγνωριστικά 16-bit σε περιορισμένο περιβάλλον.

2.1.4 Αρχιτεκτονική Μεταφοράς Δεδομένων

Τα πακέτα είναι η βασική μονάδα μεταφοράς δεδομένων. Υπάρχουν τέσσερις θεμελιώδεις τύποι πακέτων: δεδομένα, αναγνώριση, πακέτα σηματοδότησης (beacon) και MAC πακέτα. Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται η δομή ενός πακέτου δεδομένων του πρωτοκόλλου μεταφοράς

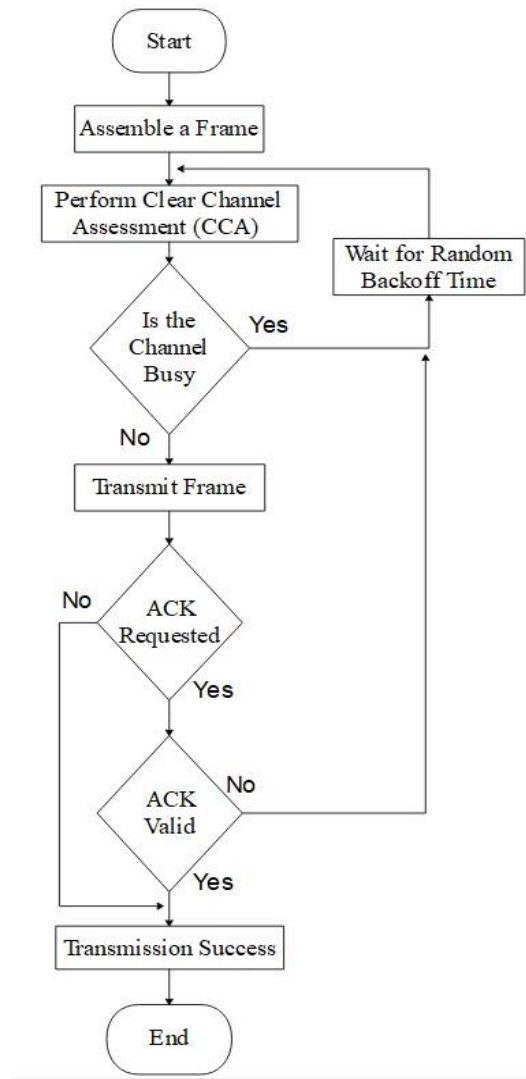
δεδομένων (PHY protocol data unit, PDU). Οι μεταφορές δεδομένων στον συντονιστή απαιτούν συγχρονισμό των κόμβων (beacon synchronization), εάν υπάρχει, ακολουθούμενη από μετάδοση CSMA / CA. Τα πακέτα αναγνώρισης είναι προαιρετικά. Γενικά, όλες οι εφαρμοζόμενες διαδικασίες ακολουθούν μια τυπική ταξινόμηση αίτησης-επιβεβαίωσης / ένδειξης-απόκρισης.



Σχήμα 2-2 Τυπική δομή πακέτου προτύπου [1].

2.1.5 Αξιοπιστία και Ασφάλεια

Η πρόσβαση στο φυσικό μέσο γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA / CA). Ένα διάγραμμα ροής του αλγορίθμου CSMA / CA δίνεται στο Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3 Απλοποιημένος αλγόριθμος CSMA / CA.

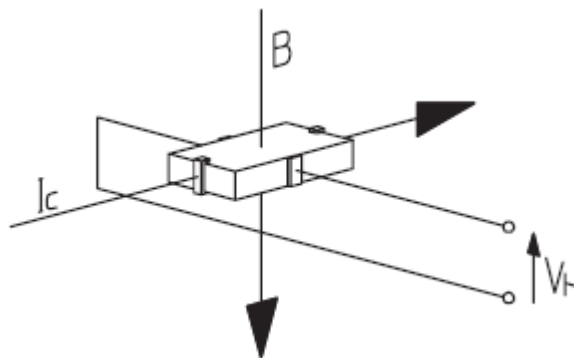
Το CSMA / CA είναι μια μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης δικτύου, στην οποία χρησιμοποιείται η ανίχνευση φορέα στο φυσικό μέσο και οι κόμβοι προσπαθούν να αποφύγουν συγκρούσεις ξεκινώντας τη μετάδοση μόνο αφού αισθανθούν ότι το κανάλι είναι "αδρανές". Όταν γίνεται μετάδοση από τους κόμβους, τα πακέτα τους μεταδίδονται στο σύνολό τους.

Όσον αφορά τις ασφαλείς επικοινωνίες, το επίπεδο MAC προσφέρει επιλογές που μπορούν να αξιοποιηθούν από τα ανώτερα επίπεδα για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ασφάλειας. Οι διαδικασίες υψηλού επιπέδου μπορεί να καθορίζουν κλειδιά για την εκτέλεση συμμετρικής κρυπτογράφησης για την προστασία του ωφέλιμου φορτίου και τον περιορισμό του σε μια ομάδα συσκευών ή απλώς έναν σύνδεσμο από σημείο σε σημείο. Αυτές οι ομάδες συσκευών μπορούν να καθοριστούν σε λίστες ελέγχου πρόσβασης.

2.2 Αισθητήρας ρεύματος

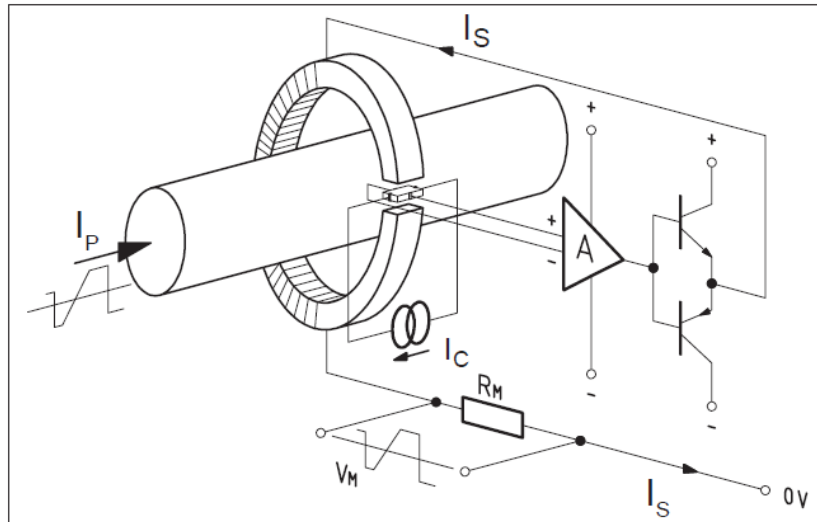
Η επιλογή του σωστού αισθητήρα ρεύματος είναι συχνά ένας συμβιβασμός μεταξύ πολλών παραμέτρων όπως: το εύρος μετρούμενου ρεύματος, ο τύπος σήματος εξόδου, η ακρίβεια, η απόκριση συχνότητας, το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας, το βάρος, το μέγεθος και το κόστος. Το LTS 25-NP είναι ένας αισθητήρας ρεύματος κλειστού βρόχου (αντισταθμιζόμενος), και πολλαπλής εμβέλειας, από την LEM που χρησιμοποιεί στοιχείο Hall Effect. Αυτός ο αισθητήρας χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση του ρεύματος (DC ή AC) με γαλβανική απομόνωση μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κυκλώματος.

Αποτελείται από μια γεννήτρια Hall όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4, τοποθετημένη στο διάκενο αέρα ενός μαγνητικού πυρήνα, ένα πηνίο γύρω από τον πυρήνα και έναν ενισχυτή ρεύματος.



Σχήμα 2-4 Hall Element: μια μικρή πλάκα αγώγιμου ή ημιαγώγιμου υλικού που διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο, εμφανίζει τάση στα άκρα της [2].

Ο αγωγός ο οποίος μεταφέρει ρεύμα μέσω του ανοίγματος του αισθητήρα παράγει ένα μαγνητικό πεδίο με τιμή που είναι ανάλογη με το μετρούμενο ρεύμα. Αυτό το πεδίο συγκεντρώνεται από τον πυρήνα και ανιχνεύεται από τη γεννήτρια Hall. Η γεννήτρια Hall έχει την ιδιότητα μετατροπής της μαγνητικής ροής σε τάση, όταν το στοιχείο τροφοδοτείται με ρεύμα. Το στοιχείο Hall συνδέεται με την είσοδο ενός ενισχυτή ρεύματος, το οποίο τροφοδοτεί το πηνίο με ανάλογο ρεύμα. Το ρεύμα που διέρχεται μέσω του πηνίου παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, αντίθετο από αυτό το οποίο παράγεται από το ρεύμα που διέρχεται μέσω του ανοίγματος. Κατά την εφαρμογή της αρχής κλειστού βρόχου, η τάση Hall χρησιμοποιείται μόνο για εξισορρόπηση της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας μαγνητικής ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5 Αρχή λειτουργίας του μετατροπέα κλειστού βρόχου [2].

Η λειτουργία της γεννήτριας Hall σε κατάσταση μηδενικής μαγνητικής ροής εξαλείφει την μετατόπιση του κέρδους με τη θερμοκρασία. Όταν η μαγνητική ροή αντισταθμίζεται πλήρως, το μαγνητικό δυναμικό (σε Ampere – turns, A-t) των δύο πηνίων είναι πανομοιότυπο. Η έξοδος του αισθητήρα είναι ανάλογη τόσο με το ρεύμα ανοίγματος όσο και με τον αριθμό στροφών του πηνίου. Εάν το ρεύμα μέσω του ανοίγματος στο πρωτεύον του μετατροπέα είναι I_p , ο αριθμός στροφών του πρωτεύοντος είναι N_p , ο αριθμός στροφών στην περιέλιξη αντιστάθμισης είναι N_s και το ρεύμα στην περιέλιξη αντιστάθμισης είναι I_s , τότε στην κατάσταση μηδενικής ροής προκύπτει η εξίσωση 2.1:

$$N_p * I_p = N_s * I_s \quad (2.1)$$

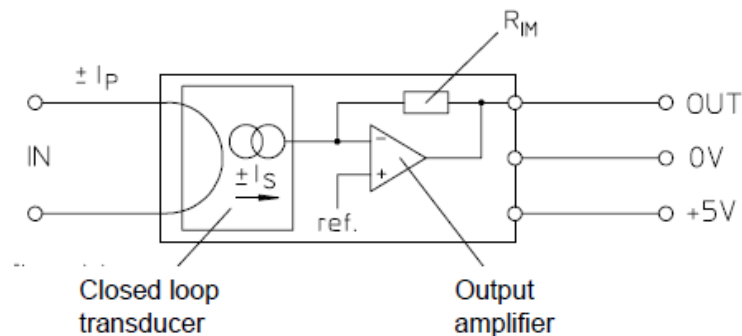
οπότε:

$$I_s = I_p * N_p / N_s \quad (2.2)$$

Κατά συνέπεια, το δευτερεύον ρεύμα, I_s , είναι η ακριβής εικόνα του πρωτεύοντος ρεύματος, I_p . Η εισαγωγή μιας «αντίστασης μέτρησης», R_m , σε σειρά με το δευτερεύον πηνίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6, δημιουργεί μια τάση εξόδου που είναι ανάλογη του μετρούμενου ρεύματος.

Οι μετατροπείς κλειστού βρόχου είναι ικανοί να μετρήσουν DC, AC και σύνθετες κυματομορφές ρεύματος ενώ εξασφαλίζουν γαλβανική απομόνωση. Τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων κλειστού βρόχου περιλαμβάνουν πολύ καλή ακρίβεια και γραμμικότητα, μετατόπιση χαμηλού κέρδους, μεγάλο εύρος ζώνης και γρήγορο χρόνο απόκρισης. Ένα άλλο

πλεονέκτημα είναι ότι η έξοδος είναι εύκολα κλιμακούμενη και λειτουργεί πολύ καλά σε περιβάλλον υψηλού θορύβου [2].

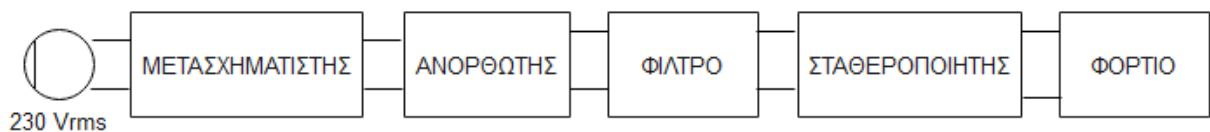


Σχήμα 2-6 Κύκλωμα αισθητήρα ρεύματος LTS-25P [7].

Οι κύριοι περιορισμοί της τεχνολογίας κλειστού βρόχου είναι η υψηλή κατανάλωση ρεύματος από την τροφοδοσία (καθώς πρέπει να παρέχει και το ρεύμα πόλωσης), οι μεγαλύτερες διαστάσεις (πιο αισθητές στους μετατροπείς υψηλού ρεύματος), η ακριβότερη κατασκευή σε σύγκριση με τις απλούστερες διατάξεις ανοικτού βρόχου και η πιο περιορισμένη τάση εξόδου λόγω της εσωτερικής πτώσης τάσης στο στάδιο εξόδου και στην αντίσταση του δευτερεύοντος πηνίου. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, τα πλεονεκτήματα συχνά υπερτερούν των περιορισμών και η ακρίβεια και απόκριση του κλειστού βρόχου είναι η επιθυμητή λύση έναντι άλλων εναλλακτικών λύσεων.

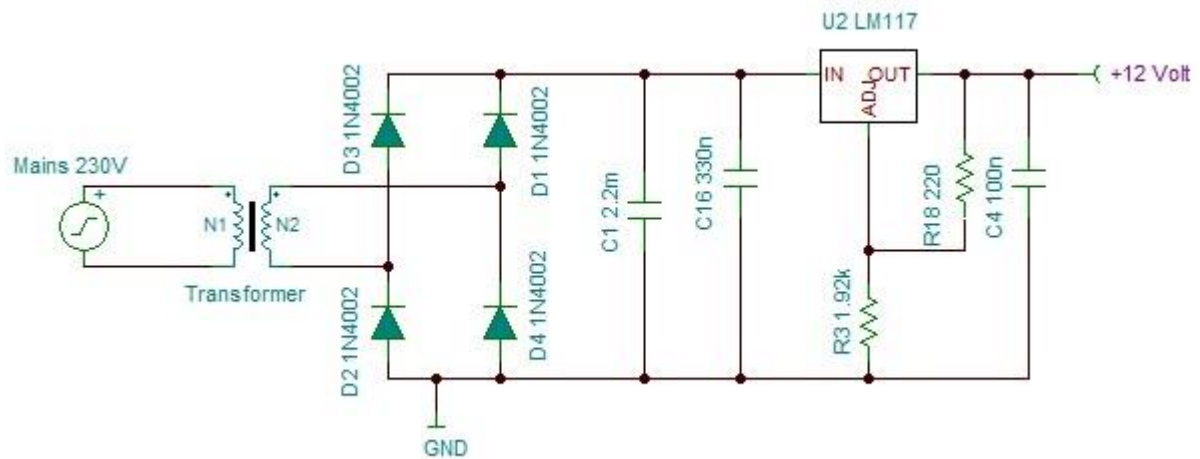
2.3 Τροφοδοσία κόμβων

Ένα τροφοδοτικό DC αποτελείται από έναν μετασχηματιστή ο οποίος δέχεται την τάση AC του δικτύου για να την υποβιβάσει σε τάση AC κατάλληλου πλάτους. Ακολουθεί η βαθμίδα ανόρθωσης αυτής της τάσης AC, η οποία στη συνέχεια φιλτράρεται και τέλος πραγματοποιείται η σταθεροποίηση της τάσης DC με έναν σταθεροποιητή. Στο Σχήμα 2-7 δίνεται το δομικό διάγραμμα με τα τμήματα ενός τροφοδοτικού DC.



Σχήμα 2-7 Δομικό διάγραμμα ενός τροφοδοτικού.

Ο ανορθωτής χρησιμοποιεί τέσσερις διόδους συνδεδεμένες σε διάταξη «γέφυρας» για να παράγει την επιθυμητή έξοδο.



Σχήμα 2-8 Ανορθωτής γέφυρας πλήρους κύματος και ρυθμιζόμενος σταθεροποιητής τάσης LM317T.

Στο Σχήμα 2-8 φαίνονται οι τέσσερις διόδους με την ένδειξη D1 έως D4. Είναι συνδεδεμένες σε «ζεύγη σειρών» με μόνο δύο διόδους να έχουν ρεύμα σε κάθε μισό κύκλο της AC τάσης εισόδου. Κατά τη διάρκεια του θετικού μισού κύκλου της AC τάσης εισόδου, οι διόδους D1 και D2 άγουν σε σειρά ενώ οι διόδους D3 και D4 είναι ανάστροφα πολωμένες και το ρεύμα ρέει μέσω του φορτίου. Κατά τη διάρκεια του αρνητικού μισού κύκλου της AC τάσης εισόδου, οι διόδους D3 και D4 άγουν σε σειρά, και οι διόδους D1 και D2 είναι ανάστροφα πολωμένες. Το ρεύμα που διατρέχει το φορτίο έχει την ίδια κατεύθυνση με πριν. Το ρεύμα ρέει μέσω δύο διόδων αντί μίας, οπότε το πλάτος της τάσης εξόδου είναι κατά δύο πτώσεις τάσης μικρότερο από το πλάτος εισόδου V_{\max} .

Η συχνότητα κυματισμού είναι διπλάσια από τη συχνότητα τροφοδοσίας (πχ. 100 Hz για τροφοδοσία 50 Hz ή 120 Hz για τροφοδοσία 60 Hz.) Μπορεί να βελτιωθεί η μέση τιμή της τάσης εξόδου του ανορθωτή, μειώνοντας ταυτόχρονα την AC κυμάτωση της, χρησιμοποιώντας εξομαλυντικούς πυκνωτές για το φιλτράρισμα της κυματομορφής εξόδου. Ο πυκνωτής εξομάλυνσης συνδεδεμένος παράλληλα με το φορτίο στην έξοδο του κυκλώματος ανορθωτή πλήρους κύματος, αυξάνει το DC επίπεδο εξόδου καθώς ενεργεί ως στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα σταθεροποιητών τάσης περιέχουν τα δικτυώματα της τάσης αναφοράς, του συγκριτή, του στοιχείου ελέγχου και την προστασία από υπερφόρτωση, όλα σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα παρέχουν σταθεροποίηση μιας καθορισμένης θετικής τάσης, μιας καθορισμένης αρνητικής ή μιας ρυθμιζόμενης τάσης.

Στους ανορθωτές πλήρους κύματος η φόρτιση του φίλτρου πυκνωτή πραγματοποιείται σε ολόκληρη την περίοδο του σήματος προς ανόρθωση. Έτσι, η τάση εξόδου του ανορθωτή πλήρους κύματος έχει μικρότερες κυματοειδείς διακυμάνσεις από τους ανορθωτές μισού κύματος.

Ένα μειονέκτημα του ανορθωτή πλήρους κύματος είναι ότι είναι ακριβότερος από τον ανορθωτή μισού κύματος και τείνει να καταλαμβάνει περισσότερο χώρο λόγω του μεγέθους του απαγωγέα θερμότητας που χρειάζεται σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος [3].

3.

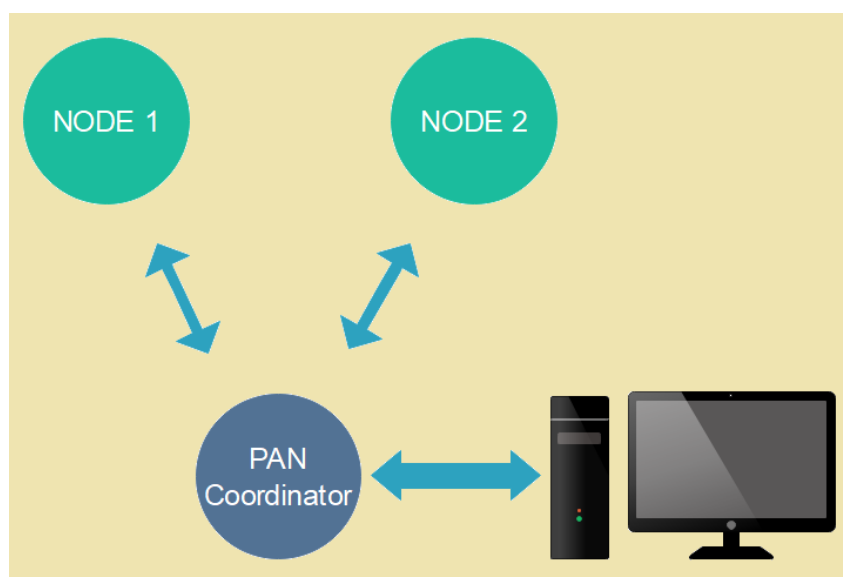
ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ

Τα βασικά χαρακτηριστικά που πληροί το σύστημα που κατασκευάστηκε είναι τα ακόλουθα:

- Είναι ένα σύστημα με ασύρματους κόμβους αισθητήρων σε τοπολογία αστέρα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκαν συσκευές δικτύωσης ραδιοσυχνοτήτων 2.4 GHz βασισμένες στο πρότυπο IEEE 802.15.4. Τα βασικά πλεονεκτήματα που έχουν αυτές οι συσκευές είναι το χαμηλό κόστος τους και η μικρή κατανάλωση ενέργειας.
- Είναι ένα σύστημα στο οποίο η πρόσβαση στους κόμβους γίνεται απομακρυσμένα. Η πρόσβαση επιτυγχάνεται από τον κεντρικό κόμβο που είναι συνδεδεμένος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο συλλέγονται τα δεδομένα από όλες τις συσκευές του ασύρματου δικτύου. Οι παράμετροι όλων των κόμβων του δικτύου μπορούν να ρυθμιστούν διαφορετικά κάθε φορά μέσω εντολών που στέλνονται από τον κεντρικό κόμβο. Επιπροσθέτως, έχει ενσωματωθεί απομακρυσμένος έλεγχος του μετρούμενου φορτίου, δηλαδή από τον κεντρικό κόμβο μπορεί να συνδέεται ή να αποσυνδέεται το φορτίο με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικού ρελέ.

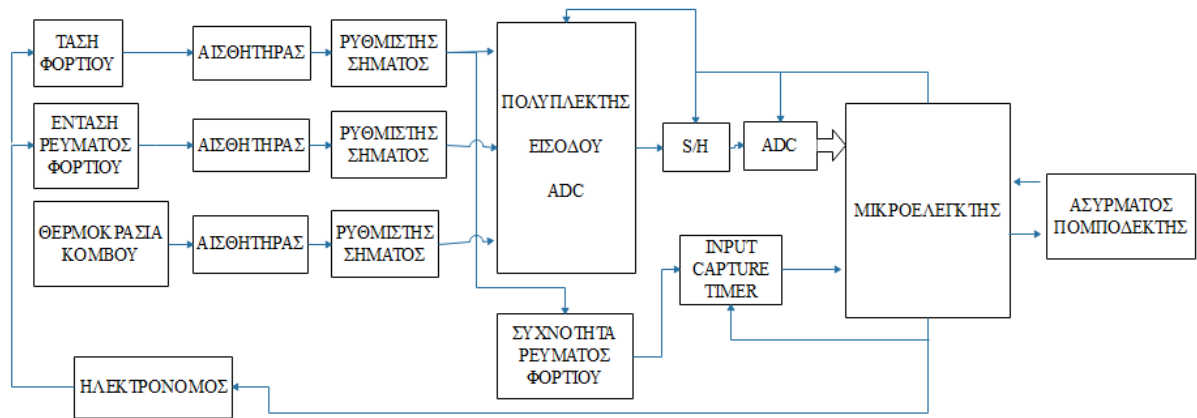
- Το σύστημα που κατασκευάστηκε καταναλώνει πολύ μικρή ενέργεια καθώς όλα τα τμήματα που το απαρτίζουν επιλέχτηκαν με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος.
- Για να γίνει η συσκευή ασφαλής στη χρήση της, επιλέχτηκαν και χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες με απομόνωση από τις υψηλές τάσεις και τα ρεύματα των φορτίων που ελέγχει το σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο απομονώνεται το δευτερεύον ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο υπάρχουν πολλά ευαίσθητα μικροηλεκτρονικά, από την υψηλή τάση και ισχύ του πρωτεύοντος κυκλώματος.

Το πειραματικό πρωτότυπο σύστημα που κατασκευάστηκε αποτελείται από δυο ασύρματους κόμβους αισθητήρων και έναν κεντρικό συντονιστή ασύρματο κόμβο συνδεδεμένο σε υπολογιστή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Μπορεί όμως να επεκταθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει περισσότερους ασύρματους κόμβους, ανάλογα με τον αριθμό των ελεγχόμενων ηλεκτρικών φορτίων/συσκευών.



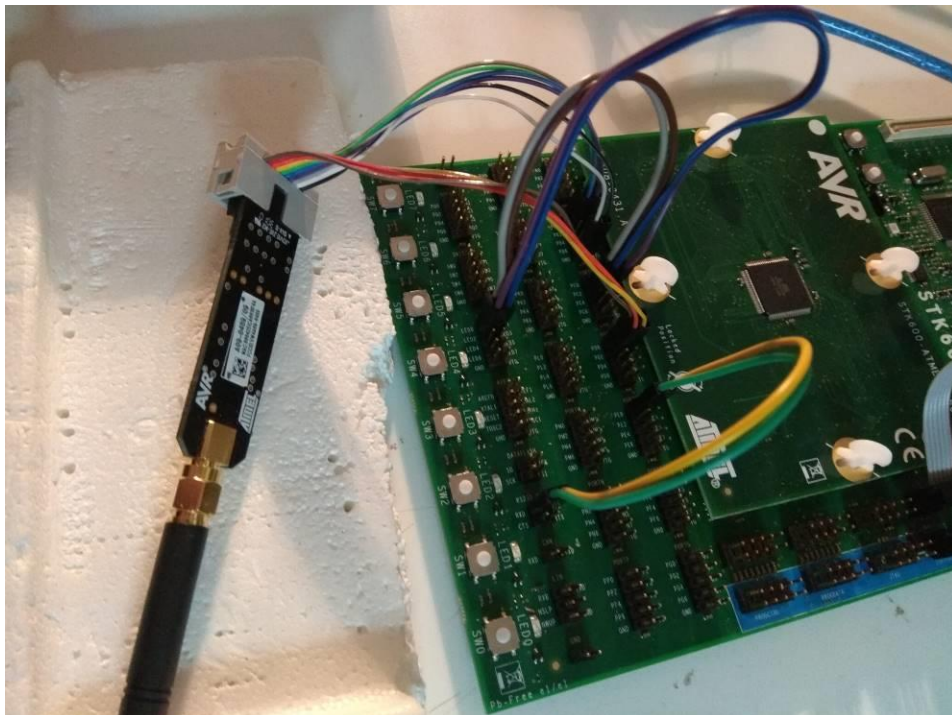
Σχήμα 3-1 Τοπολογία του συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

Το δομικό διάγραμμα των ασύρματων κόμβων αισθητήρων φαίνεται στο Σχήμα 3-2. Αποτελείται από τον αισθητήρα ρεύματος με στοιχείο Hall Effect, τον μετασχηματιστή τάσης, τον ηλεκτρονόμο, τους ρυθμιστές σήματος των αισθητήρων, μια πλακέτα Arduino UNO με τον μικροελεγκτή ATmega328p, τον ADC του μικροελεγκτή μαζί με τα κυκλώματα του πολυπλέκτη και Sample and Hold, την μονάδα Input Capture του Timer1 του μικροελεγκτή και την πλακέτα RZ600 USB Adaptor με τον μικροελεγκτή AT32UC3A3256S που ελέγχει τις κεραίες AT86RF231.

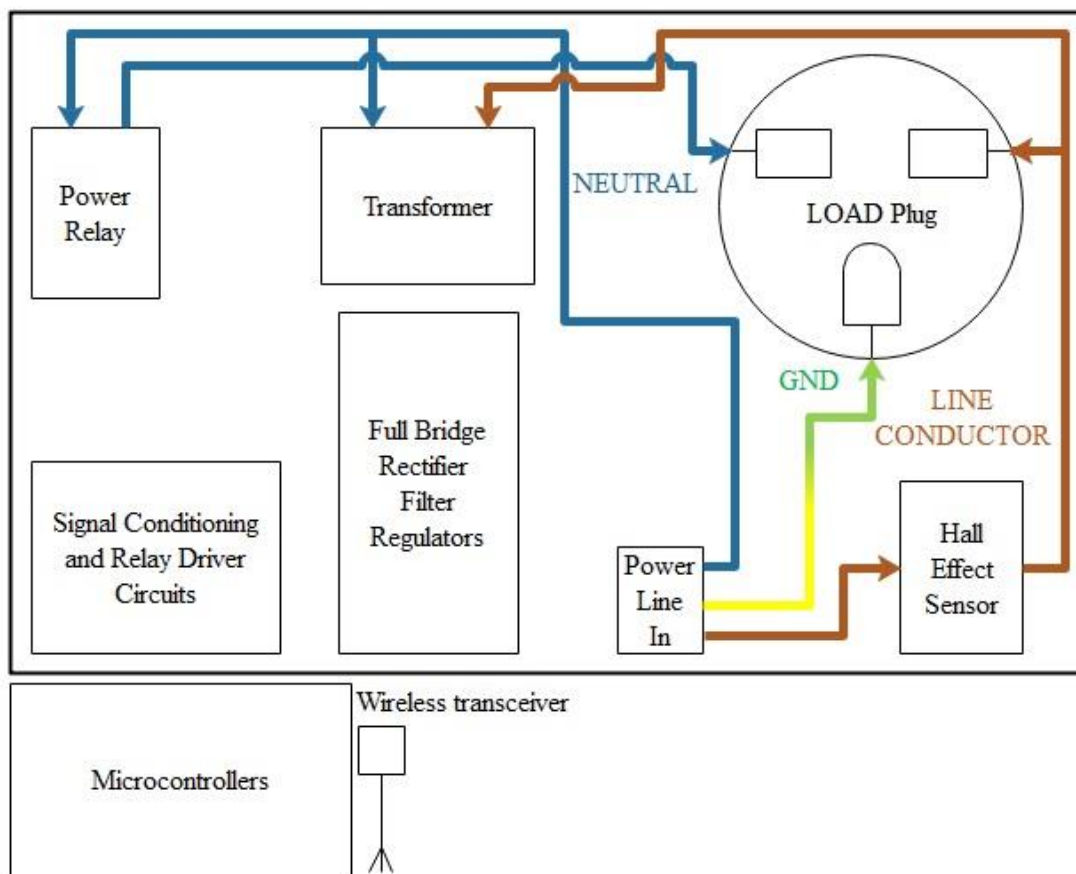


Σχήμα 3-2 Δομικό διάγραμμα ενός ασύρματου κόμβου όπως σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε.

Ο κεντρικός ασύρματος κόμβος, αποτελείται από μία πλακέτα STK600 με έναν μικροελεγκτή ATmega2560 που ελέγχει την κεραία AT86RF230, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3.



Σχήμα 3-3 STK600 με τον μικροελεγκτή ATmega2560 συνδεδεμένο στο AT86RF230.



Σχήμα 3-4 Σχεδιασμός του ασύρματου κόμβου και τοποθέτηση των τμημάτων του στην κεντρική πλακέτα.

Για τον σχεδιασμό της κεντρικής πλακέτας των ασύρματων κόμβων του συστήματος, όπως φαίνεται στην τελική τοποθέτηση στο Σχήμα 3-4, έγινε έλεγχος του αισθητήρα ρεύματος Hall Effect στο εργαστήριο και βρέθηκε να επηρεάζεται η έξοδος του, μόνο όταν στο μπροστινό του μέρος διαταρασσόταν το μαγνητικό πεδίο. Με βάση αυτή την παρατήρηση τοποθετήθηκε μακριά από καλώδια και άλλα μέρη του συστήματος, με την μπροστινή πλευρά να έχει κατεύθυνση προς τα έξω. Προσοχή δόθηκε και στα κυκλώματα ρυθμιστών σημάτων που τοποθετήθηκαν μακριά από τα μαγνητικά πεδία του μετασχηματιστή. Ο ηλεκτρονόμος, δεν είναι σε λειτουργία κατά την κανονική λειτουργία του κόμβου και όταν ενεργοποιείται δεν γίνονται μετρήσεις από το σύστημα. Τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε οι γραμμές με την υψηλή τάση να βρίσκονται περιμετρικά και μακριά από αυτές με την χαμηλή τάση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-5.



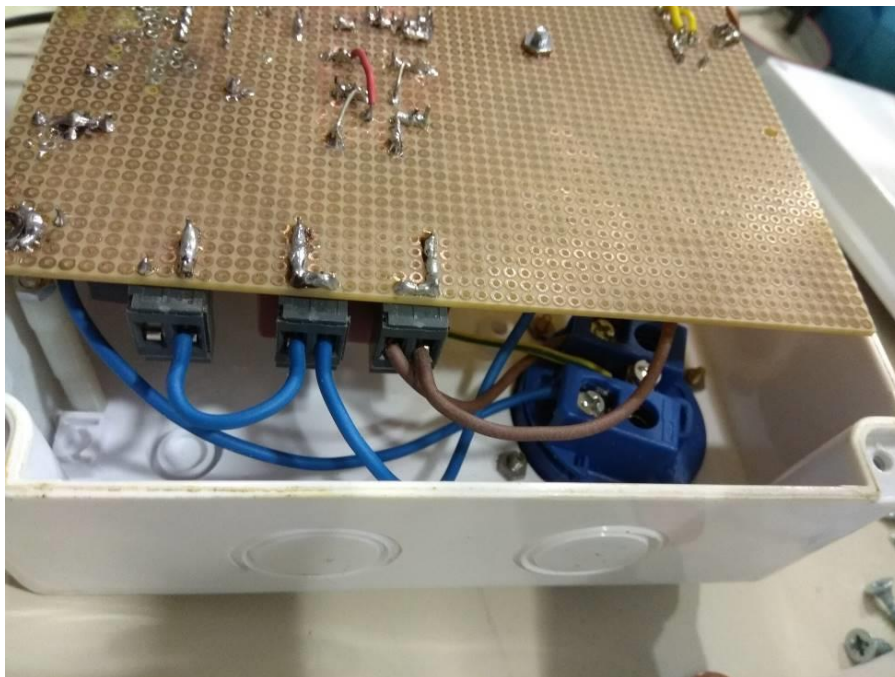
Σχήμα 3-5 Θέση ηλεκτρονόμου και μετασχηματιστή στην κεντρική πλακέτα του ασύρματου κόμβου.

Κατά την διάρκεια της υλοποίησης, όλα τα σήματα που είναι κρίσιμα για την σωστή λειτουργία των κόμβων ελέγχονταν ξεχωριστά όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6 Έξοδοι κρίσιμων σημάτων από τον κόμβο για έλεγχο.

Οι κόμβοι που κατασκευάστηκαν σε αυτή την διπλωματική εργασία, συνδέονται με υψηλά ρεύματα και υψηλές τάσεις. Υψηλά ρεύματα και υψηλές τάσεις μπορεί να είναι επικίνδυνες, ακόμη και θανατηφόρες. Ως εκ τούτου, οι κόμβοι πρέπει να λειτουργούνται με ιδιαίτερη προσοχή. Παρόλο που υπάρχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ τάσης και έντασης ρεύματος γραμμής και κόμβων, αυτοί πρέπει να είναι κλειστοί μέσα σε μη-αγώγιμο περίβλημα για την αποφυγή ατυχημάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7.



Σχήμα 3-7 Ο ένας ασύρματος κόμβος μέσα σε ηλεκτρολογικό κουτί.

Παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες των τμημάτων που αποτελούν το σύστημα που κατασκευάστηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

3.1 Ο Αισθητήρας Τάσης

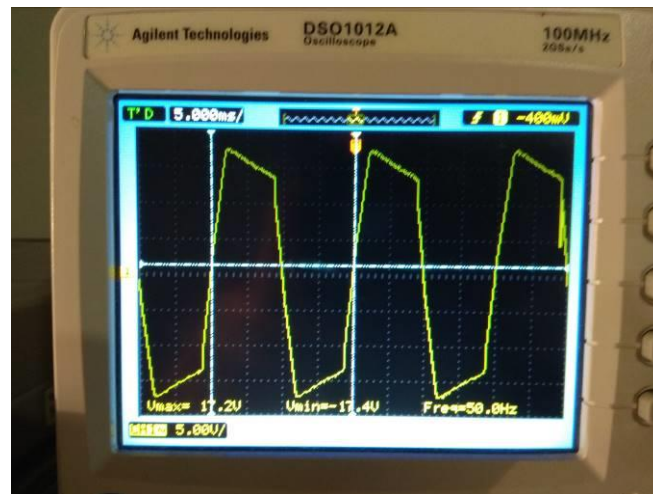
Η τάση της γραμμής μειώθηκε πρώτα χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματιστή τάσης της εταιρίας Thai Lin Radio, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8. Έχει ονομαστική ισχύ 2.4 VA και ονομαστική τάση λειτουργίας 230 VAC/12 VAC $\pm 15\%$ στα 50 / 60 Hz [4].



Σχήμα 3-8 Ο μετασχηματιστής τάσης που χρησιμοποιήθηκε.

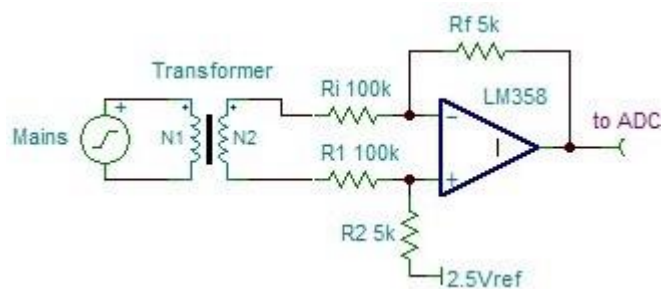
Στο εργαστήριο μετρήθηκε η έξοδος του χωρίς φορτίο να είναι $\pm 20 V_{pp}$. Στο Σχήμα 3-9 φαίνεται η κυματομορφή εξόδου του μετασχηματιστή συνδεδεμένου με φορτίο, όπου

παρατηρείται η παραμόρφωση της λόγω της μη-ιδανικής ηλεκτρικής συμπεριφοράς του μετασχηματιστή τάσης.



Σχήμα 3-9 Έξοδος του μετασχηματιστή τάσης με φορτίο.

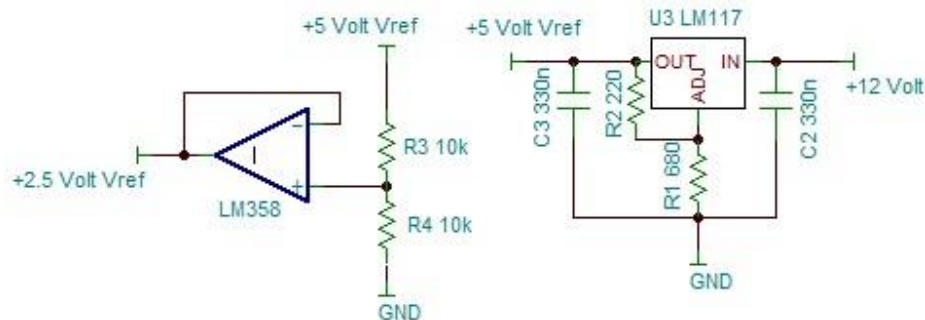
Για τη σύνδεση του μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC) του μικροελεγκτή στην έξοδο του αισθητήρα τάσης χρησιμοποιήθηκε ως ρυθμιστής σήματος ένας τελεστικός ενισχυτής σε συνδεσμολογία ενισχυτή διαφοράς. Η συνδεσμολογία του ενισχυτή διαφοράς χρησιμοποιείται στα συστήματα μετρήσεων για την ενίσχυση της διαφοράς δυο σημάτων και την μετάδοσή της στην επόμενη βαθμίδα [5]. Ο ενισχυτής διαφοράς είναι η κατάλληλη συνδεσμολογία όταν υπάρχει ανάγκη ενίσχυσης μια τάσης που δεν έχει κοινό σημείο με την γείωση, όπως σε αυτήν την περίπτωση.



Σχήμα 3-10 Κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή σε συνδεσμολογία ενισχυτή διαφοράς.

Χρησιμοποιήθηκε ως τελεστικός ενισχυτής ο LM358 της εταιρίας Texas Instruments [6], όπως φαίνεται στο κύκλωμα του Σχήματος 3-10. Στο εργαστήριο μετρήθηκε το εύρος τάσης εξόδου του ολοκληρωμένου κυκλώματος στα 1 - 3.84 V_{pp}. Για να μετατοπιστεί η έξοδος του μετασχηματιστή σε αποδεκτές τιμές για την είσοδο του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό

(ADC) που έχει εύρος 0-5 V, δόθηκε τάση αναφοράς 2.5 V στην μη-αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή διαφοράς. Η τάση αναφοράς 5 V δημιουργήθηκε στο υποσύστημα της τροφοδοσίας, και με διαιρέτη τάσης μειώθηκε στα 2.5 V, στον οποίο προστέθηκε ένας ακόλουθος τάσης για να τον απομονώσει από πιθανές αλλαγές στο φορτίο του. Στο Σχήμα 3-11 φαίνονται τα αντίστοιχα κυκλώματα για την δημιουργία της τάσης αναφοράς του ρυθμιστή σήματος.



Σχήμα 3-11 Κύκλωμα δημιουργίας της τάσης αναφοράς.

Με βάση τη συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος που δίνεται από τη σχέση (3.1):

$$V_0 = V_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} * \left(\frac{R_f}{R_i} + 1 \right) - V_2 * \frac{R_f}{R_i} \quad (3.1)$$

και θέτοντας τις αντιστάσεις:

$$R_1 = R_i \text{ και } R_2 = R_f \quad (3.2)$$

και επιλέγοντας να ισχύει ότι:

$$\frac{R_f}{R_i} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.3)$$

τότε η παραπάνω σχέση γίνεται ως εξής:

$$V_0 = \frac{R_f}{R_i} * (V_1 - V_2) \quad (3.4)$$

όπου:

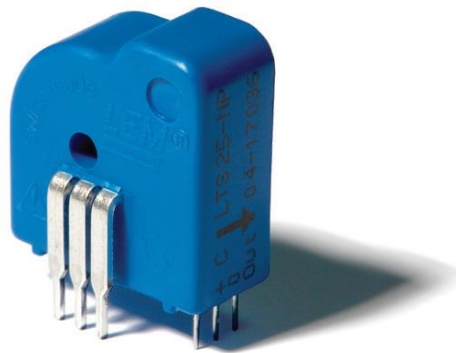
V_0 η έξοδος του ενισχυτή διαφοράς και

V_1 και V_2 οι είσοδοι του ενισχυτή διαφοράς.

Θέτοντας τις αντιστάσεις R_1 και R_i ίσες με $100\text{ k}\Omega$ και τις αντιστάσεις R_2 και R_f ίσες με $5\text{ k}\Omega$ επετεύχθη ενίσχυση με κέρδος 0.05 στην τελική έξοδο από τον ρυθμιστή σήματος, και τάση εισόδου στον μετατροπέα ADC ίση με $2.5 \pm 1\text{ V}$.

3.2 Ο Αισθητήρας Ρεύματος Hall Effect

Ο αισθητήρας ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας LEM, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-12, και είναι τύπου κλειστού βρόχου με αντιστάθμιση (παράγραφος 2.2).



Σχήμα 3-12 Ο αισθητήρας ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε [7].

Ο αισθητήρας ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε λειτουργεί με ονομαστική τιμή Ampere – turns ίση με 25 A-t [7]. Για παράδειγμα, αν ρέουν δύο Ampere μέσα από το πρωτεύον πηνίο δέκα στροφών τότε θα προκύψουν 20 A-t . Η μέγιστη τιμή της έντασης ρεύματος που μπορεί να αποκτήσει ο αισθητήρας με μία στροφή στο πρωτεύον είναι $\pm 80\text{ A}$. Ο αισθητήρας χρησιμοποιήθηκε με 3 στροφές στο πρωτεύον που του δίνει νέα ονομαστική RMS ένταση ρεύματος τα 8 A RMS και το νέο εύρος τιμής του είναι $\pm 26\text{ A}$ [6]. Χρησιμοποιώντας 2000 στροφές στο δευτερεύον πηνίο N_s , η τάση στην έξοδο του αισθητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$V_{out} = 2.5 \pm (I_p * N_p * R_m / N_s) \quad (3.5)$$

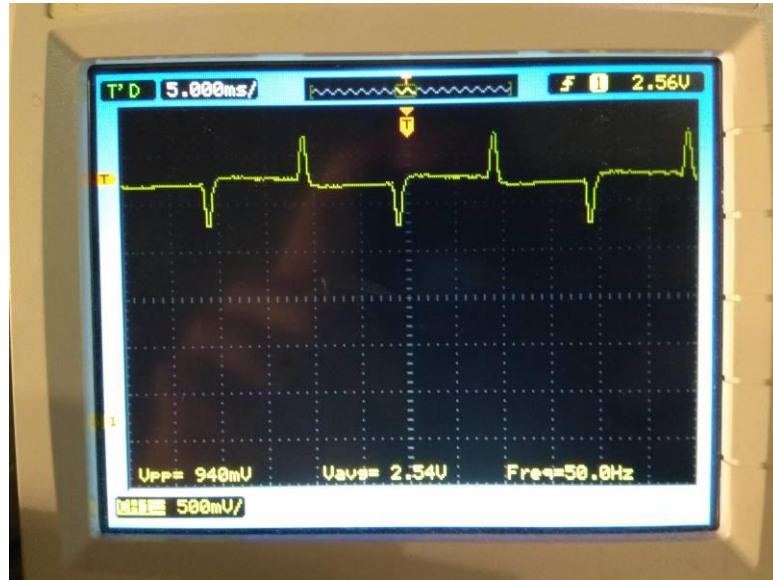
όπου 2.5V η τάση αναφοράς του αισθητήρα,

I_p το ρεύμα που περνάει από το πρωτεύον πηνίο με N_p στροφές,

R_m η αντίσταση μέτρησης εξόδου και

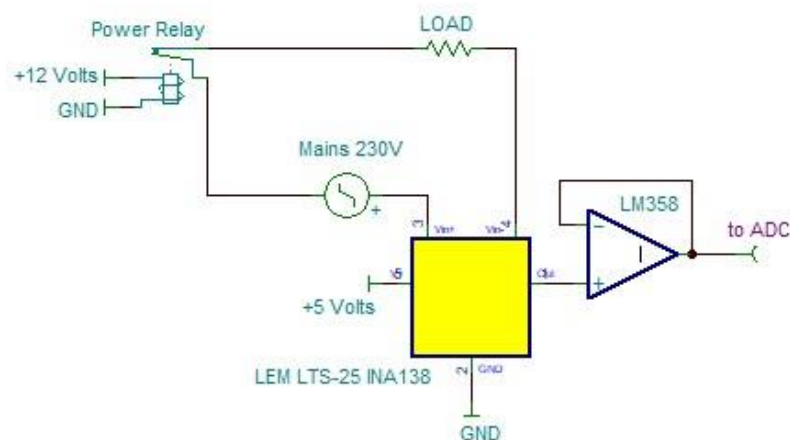
N_s ο αριθμός στροφών στο δευτερεύον πηνίο.

Στο Σχήμα 3-13 φαίνεται η κυματομορφή της τάσης εξόδου του αισθητήρα όταν διαρρέεται στο πρωτεύον από το μη-ημιτονοειδές ρεύμα εισόδου του τροφοδοτικού ενός φορητού υπολογιστή (laptop).



Σχήμα 3-13 Παράδειγμα τάσης εξόδου του αισθητήρα όταν διαρρέεται στο πρωτεύον από το μη-ημιτονοειδές ρεύμα εισόδου του τροφοδοτικού ενός φορητού υπολογιστή (laptop).

Η έξοδος του αισθητήρα ρεύματος στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως είσοδος σε έναν ακόλουθο τάσης και μετά στον ADC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-14.

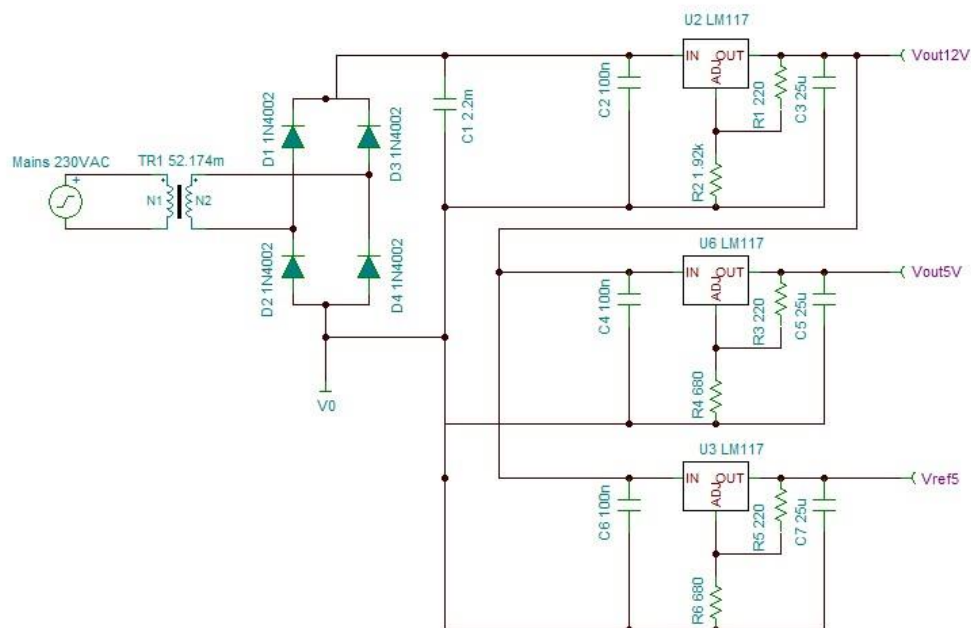


Σχήμα 3-14 Ρυθμιστής σήματος αισθητήρα ρεύματος.

Η μέγιστη ένταση ρεύματος εισόδου του αισθητήρα $I_p = 8 \text{ A RMS}$ σε συνδυασμό με το κέρδος του, σύμφωνα με τη σχέση (3.5), δίνει τελική έξοδο με μέγιστη τιμή 3.35 V , το οποίο είναι μικρότερο από τη μέγιστη τάση (3.84 V) που μετρήθηκε ότι μπορούν να παράγουν οι τελεστικοί ενισχυτές LM358 που χρησιμοποιήθηκαν με τάση τροφοδοσίας $+5 \text{ V}$. Η αρχική ευαισθησία του αισθητήρα με μία στροφή στο πρωτεύον υπολογίζεται στα 25 mV / A από την εξίσωση (3.5). Με 3 στροφές στο πρωτεύον ανέρχεται στα 75 mV / A , τρεις φορές μεγαλύτερο. Ο ADC που χρησιμοποιήθηκε έχει τάση αναφοράς 5 V και παράγει 10 bit ψηφιακής λέξης. Η διακριτική ικανότητα του ADC είναι ίση με το πηλίκο της τάσης αναφοράς με τον αριθμό του δυαδικού κώδικα των 10 bit, ή ίση με $5 \text{ V} / 1024$ δηλαδή σχεδόν 5 mV . Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ελάχιστη τιμή που πρέπει να έχει η ένταση ρεύματος που διέρχεται από τον αισθητήρα για να μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακή τιμή από τον ADC του μικροελεγκτή είναι 65 mA . Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα που κατασκευάστηκε έχει εύρος λειτουργίας από 15 W έως 1840 W .

3.3 Τροφοδοσία ασύρματου κόμβου

Για την τροφοδοσία του ασύρματου κόμβου κατασκευάστηκε μία πηγή τάση 12 V , μια πηγή τάσης 5 V , μια πηγή τάσης 3.3 V και μια τάση αναφοράς 5 V . Για την υλοποίηση αυτών των πηγών τάσης, σχεδιάστηκε ένας μετατροπέας εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα, χρησιμοποιώντας έναν ανορθωτή γέφυρας πλήρους κύματος με φίλτρο πυκνωτή και 3 σταθεροποιητές τάσεις LM317 [8] με κατάλληλες συνδεσμολογίες αντιστάσεων ώστε να παράγονται οι τιμές τάσεων που απαιτούνται. Το κύκλωμα τροφοδοσίας των κόμβων φαίνεται στο Σχήμα 3-15.



Σχήμα 3-15 Κύκλωμα παραγωγής των τάσεων τροφοδοσίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων κάθε ασύρματου κόμβου.

Πίνακας 3-1. Η τάση και το ρεύμα τροφοδοσίας των υποσυστημάτων των ασύρματων κόμβων			
Υλικό	Τύπος	Τάση	Ρεύμα
Αισθητήρας Ρεύματος	LEM Hall Effect Transducer	5 V	28 mA
Τελεστικοί ενισχυτές	LM358 (2)	5 V	1 mA
Ηλεκτρονόμος	Power Relay HRS4	12 V	37.5 mA
Μικροελεγκτής	ATmega328 (ενεργή κατάσταση, 16 MHz)	5 V	10 mA
Μικροελεγκτής	AT32UC3A3256 (ενεργή κατάσταση, 48 MHz)	3.3 V	32.3 mA
Σταθεροποιητές	LM317 (4)	12/5/3.3 V	20 μ A
Αισθητήρας θερμοκρασίας	LM35	5 V	60 μ A

Στον Πίνακα 3-1 γίνεται η παρουσίαση των απαιτήσεων παροχής τάσης και ρεύματος τροφοδοσίας των υποσυστημάτων των ασύρματων κόμβων. Το χειρότερο σενάριο είναι όταν επιλέγεται από τον χρήστη να κλείσει ο κόμβος το φορτίο και ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος. Στο εργαστήριο μετρήθηκε ότι η ολική κατανάλωση του κόμβου είναι 110 mA. Τυπικά, το τροφοδοτικό χρειάζεται να τροφοδοτεί λιγότερο από 1.5 W (στα 12 V),

αλλά πρέπει επίσης να μπορεί να παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για να την ενεργοποίηση του πηνίου του ηλεκτρονόμου.

Η τάση απενεργοποίησης του σταθεροποιητή ο οποίος επιλέχτηκε είναι 1.5 V. Αυτό προκύπτει από το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας του κόμβου, την ένταση ρεύματος την οποία πρέπει να παρέχει ο σταθεροποιητής (λιγότερο από 200 mA) και σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων της κατασκευάστριας εταιρίας [8]. Αυτή είναι η ελάχιστη διαφορά τάσης που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου και εξόδου του σταθεροποιητή ώστε να λειτουργεί σωστά. Αν η τάση εισόδου πέσει πολύ χαμηλά, το ολοκληρωμένο LM317 δεν θα παρέχει σταθεροποίηση τάσης. Μετά τον ανορθωτή πλήρους κύματος και με ρεύμα πλήρους φορτίου, παράγεται τάση 14.2 V_{peak}. Επειδή η τάση πριν τον σταθεροποιητή δεν πρέπει να πέσει κάτω από 13.5 V, σύμφωνα με τον κατασκευαστή του, επιλέχτηκε το φίλτρο πυκνωτή έτσι ώστε να περιορίσει την κυμάτωση της εξόδου στα 0.7 V. Επειδή ο κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης εμφανίζεται σε κάθε μισό του κύκλου ενός ανορθωτή πλήρους ανόρθωσης, η περίοδος της ανορθωμένης κυματομορφής είναι η μισή της περιόδου του σήματος εισόδου. Αρά για να αποτραπεί η τάση του πυκνωτή να πέσει κάτω από 13.5 V θα πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από:

$$I = C (V_{\max} - V_{\min}) / T/2 \Rightarrow C = 2 \text{ mF} \quad (3.6)$$

όπου:

I το ρεύμα που διαρρέει τον σταθεροποιητή,

C η χωρητικότητα του πυκνωτή,

V_{max} και V_{min} η μέγιστη και ελάχιστη, αντίστοιχα, τιμή τάσης που μπορεί να λάβει ως είσοδο ο σταθεροποιητής και

T η περίοδος του σήματος εισόδου .

Για τη ρύθμιση των σταθεροποιητών χρησιμοποιήθηκε το φύλλο δεδομένων της κατασκευάστριας εταιρίας και με βάση την εξίσωση:

$$V_O = V_{\text{REF}} (1 + R_2/R_1) + I_{\text{ADJ}} R_2 \quad (3.7)$$

όπου η τιμή του V_{REF} δίνεται ως 1.25V και το I_{ADJ} ένα πολύ μικρό ρεύμα, υπολογίστηκαν οι κατάλληλες τιμές αντιστάσεων, για τις τιμές τάσεων που απαιτούνται.

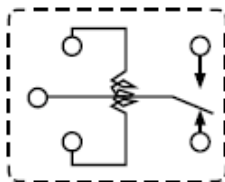
3.4 Ο Ηλεκτρονόμος

Ο ηλεκτρονόμος που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας Multicomp, και φαίνεται στο Σχήμα 3-16. Έχει ονομαστική τάση λειτουργίας 12 V και ονομαστική ισχύ πηνίου 450 mW.

Έχει μέγιστη ισχύ διακοπής φορτίου 2500 VA στα 10 A και 250 VAC για καθαρά ωμικά φορτία, και 1250 VA στα 5 A και 250 V για επαγωγικά φορτία [9]. Στο Σχήμα 3-17 φαίνεται το διάγραμμα σύνδεσης του ηλεκτρονόμου.

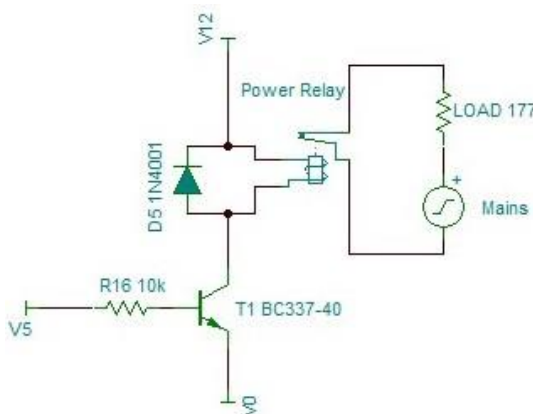


Σχήμα 3-16 Ο ηλεκτρονόμος που χρησιμοποιήθηκε στους ασύρματους κόμβους [9].



Σχήμα 3-17 Διάγραμμα σύνδεσης του ηλεκτρονόμου [9].

Το κύκλωμα οδήγησης του ηλεκτρονόμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-18, αποτελείται από ένα τρανζίστορ BC317 τύπου npn για την χρησιμοποίηση του ελάχιστου ρεύματος που μπορεί να δώσει στην έξοδο του ο μικροελεγκτής, ώστε να οδηγηθεί σε ενεργοποίηση το πηνίο του ηλεκτρονόμου. Η διάδος flyback προστατεύει το τρανζίστορ από υπερτάσεις, που δημιουργούνται κατά τη διακοπή του ρεύματος που διέρχεται μέσα από το πηνίο του ηλεκτρονόμου.



Σχήμα 3-18 Κύκλωμα οδήγησης του ηλεκτρονόμου.

3.5 Οι Μικροελεγκτές

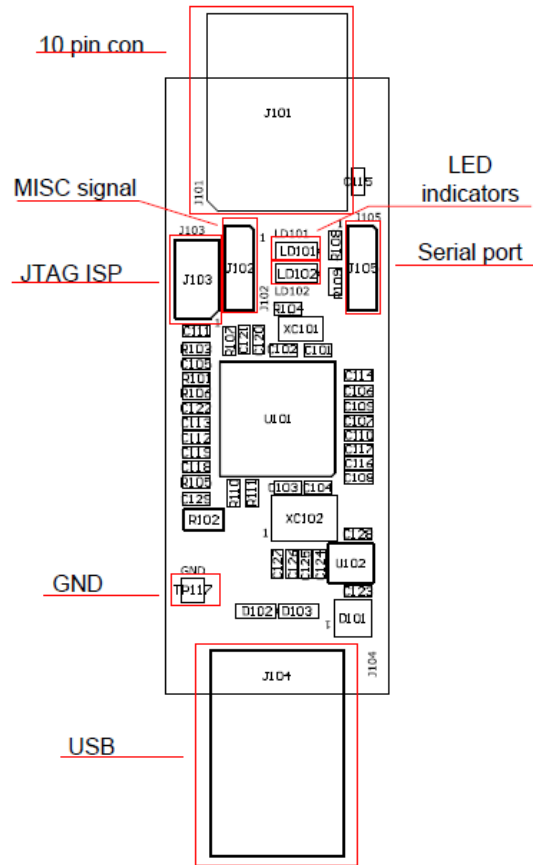
Οι δυο ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων περιέχουν δυο μικροελεγκτές. Ο ασύρματος κεντρικός κόμβος περιέχει έναν μικροελεγκτή. Οι δυο ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιούν το σύστημα RZ600 της ATMEL. Οι USB πλακέτες με τους μικροελεγκτές AT32UC3A3256S του συστήματος RZ600 στις οποίες είναι τοποθετημένοι δεν έχουν έξοδο με πρόσβαση στο ADC τους. Για να γίνει η δειγματοληψία στους κόμβους επιλέχθηκαν τα Arduino με τον μικροελεγκτή ATmega328p.

Ο μικροελεγκτής ATmega328p είναι ένας μικροελεγκτής CMOS 8-bit χαμηλής ισχύος που βασίζεται στην αρχιτεκτονική AVR, μιας τροποποιημένης αρχιτεκτονικής RISC [10] και είναι εγκατεστημένος στην πλακέτα Arduino UNO, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-19.



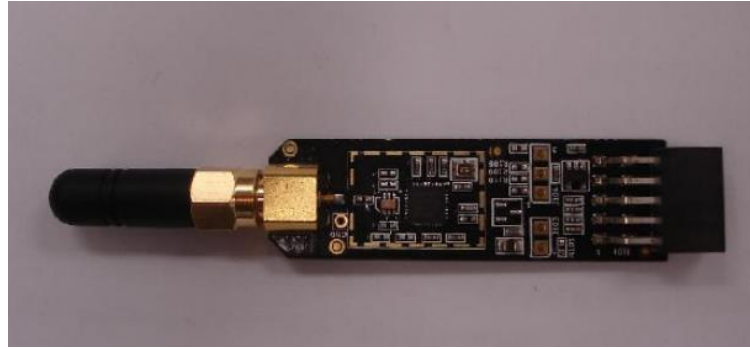
Σχήμα 3-19 Arduino Uno.

Ο μικροελεγκτής συνδυάζει μνήμη Flash 32 KB (In-System Programming, ISP) με δυνατότητες ανάγνωσης-εγγραφής, 1024 B EEPROM, 2 KB SRAM, μετατροπέα A/D 6-καναλιών 10-bit τύπου διαδοχικών προσεγγίσεων, σειριακό προγραμματιζόμενο USART, σειριακή θύρα SPI και πέντε τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας που επιλέγονται από λογισμικό. Ο μικροελεγκτής λειτουργεί στα 5 V και τα 16 MHz και είναι υπεύθυνος για την απόκτηση των δεδομένων από το περιβάλλον και την επεξεργασία και μεταφορά τους στον δεύτερο μικροελεγκτή AT32UC3A3256S που είναι εγκατεστημένος στην πλακέτα USB Host Board του αναπτυξιακού συστήματος RZ600, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-20.



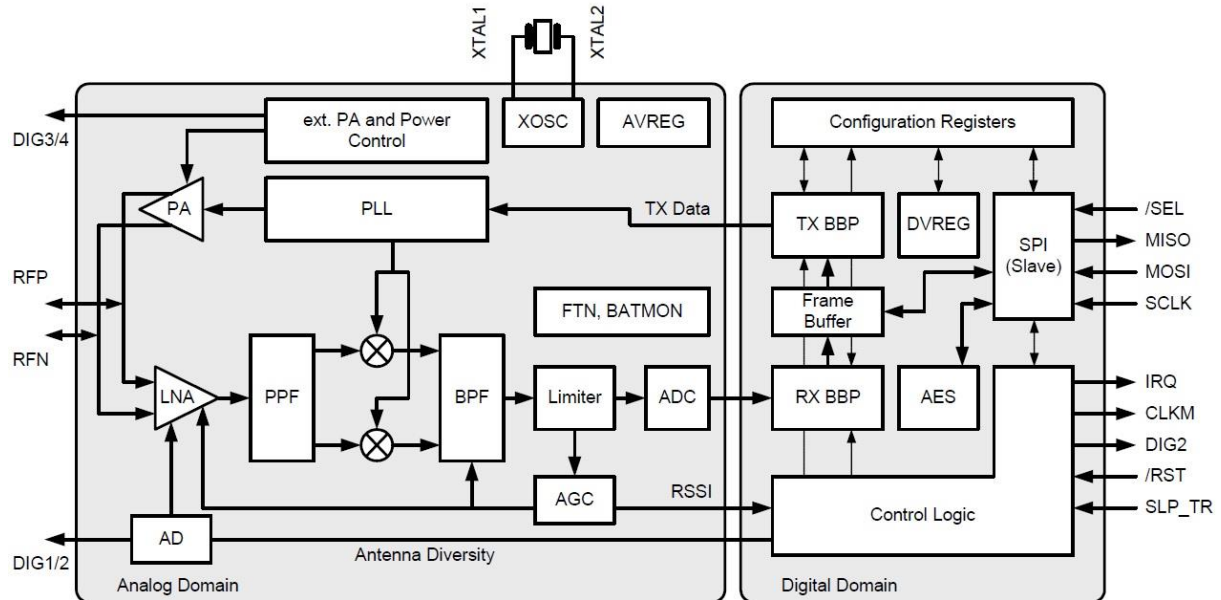
Σχήμα 3-20 USB πλακέτα με τον AT32UC3A3256S [11].

Ο μικροελεγκτής AT32UC3A3256S είναι ένας μικροελεγκτής 32-bit που βασίζεται στην αρχιτεκτονική AVR και έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υψηλή απόδοση [11]. Λειτουργεί στα 3.3 V και τα 48 MHz και ενσωματώνει μνήμες flash on-chip και SRAM. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον ATmega328p με κατάλληλες ενέργειες με βάση το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 στέλνονται στον κεντρικό κόμβο H/Y με τις κεραίες AT86RF231 και AT86RF230 που είναι τοποθετημένες στα RZ600 RF Radio Boards, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-21.



Σχήμα 3-21 Ραδιοπομποδέκτης AT86RF231.

Οι AT86RF231 και AT86RF230 είναι υψηλής απόδοσης πομποδέκτες RF-CMOS 2.4 GHz με στόχο εφαρμογές βασισμένες στα πρότυπα IEEE 802.15.4, ZigBee, 6LoWPAN, RF4CE, SP100, WirelessHART και ISM. Οι συσκευές αυτές παρέχουν μια πλήρη διεπαφή RF πομποδέκτη μεταξύ της κεραίας και του μικροελεγκτή μέσω SPI. Περιλαμβάνουν τον αναλογικό πομποδέκτη RF και την ψηφιακή αποδιαμόρφωση, συμπεριλαμβανομένου του συγχρονισμού χρόνου και συχνότητας και της αποθήκευσης δεδομένων, όπως φαίνεται στο γενικό διάγραμμα του Σχήματος 3-22.



Σχήμα 3-22 Δομικό διάγραμμα του πομποδέκτη AT86RF231 [12].

Το διαφορικό σήμα RF που λαμβάνεται στην είσοδο RFP - RFN ενισχύεται από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου (low noise amplifier LNA), περνάει από ένα RF φίλτρο (PPF) και δημιουργείται ένα σήμα που καταλήγει στο ενσωματωμένο φίλτρο καναλιού (BFP). Ο

περιοριστής (limiter) παρέχει το κατάλληλο εύρος τάσης στον ADC και δημιουργεί ένα ψηφιακό σήμα RSSI (Received Signal Strength Indicator). Η έξοδος του ADC δειγματοληπτείται από τον digital base band receiver (RX-BBP) όπου και πραγματοποιείται επιπλέον φιλτράρισμα και συγχρονισμός του σήματος.

Το σύστημα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται από το AT86RF231 είναι το offset-QPSK (O-QPSK) με φίλτρο διαμόρφωσης παλμών μισής ημιτονικής μορφής. Το σήμα διαμόρφωσης δημιουργείται στον ψηφιακό πομπό TX-BBP ο οποίος διαβάζει τα δεδομένα από τον frame buffer και τα μετατρέπει σε σύμβολα, όπως καθορίζεται από το πρότυπο IEEE 802.15.4. Η μονάδα PLL μετατρέπει το σήμα σε RF διασφαλίζοντας τη σύμφωνη (coherent) διαμόρφωση φάσης που απαιτείται για την αποδιαμόρφωση O-QPSK σημάτων και το διαμορφωμένο σήμα καταλήγει στον ενισχυτή ισχύος PA. Όλα τα κρίσιμα στοιχεία RF είναι ενσωματωμένα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των απαιτούμενων εξωτερικών εξαρτημάτων. Οι αμφίδρομοι ακροδέκτες κεραίας, που χρησιμοποιούνται για μετάδοση και λήψη, εξαλείφουν την ανάγκη για εξωτερικό διακόπτη κεραίας. Ένα εσωτερικό buffer RAM 128 byte μεταδίδει και λαμβάνει τα δεδομένα. Οι δύο ρυθμιστές χαμηλής πτώσης τάσης (LDO) παρέχουν την εσωτερική αναλογική και ψηφιακή παροχή τάσης 1.8V. Οι πομποδέκτες AT86RF231 και AT86RF230 διαθέτουν ειδική υποστήριξη υλικού IEEE 802.15.4-2006, με επιταχυντή υλικού MAC (hardware MAC accelerator). Αυτό χειρίζεται χρονικά κρίσιμα καθήκοντα MAC, που απαιτούνται από το πρότυπο IEEE 802.15.4, από το hardware. Αυτό έχει σαν συνέπεια μια πιο αποτελεσματική IEEE 802.15.4 MAC εφαρμογή λογισμικού που περιλαμβάνει μειωμένο μέγεθος κώδικα και μπορεί να επιτρέψει τη χρήση ενός μικρότερου μικροελεγκτή ή τη λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες ρολογιού. Το hardware MAC accelerator περιλαμβάνει το Frame Check Sequence (FCS) που προορίζεται για χρήση από το επίπεδο MAC για την ανίχνευση κατεστραμμένων πακέτων σε ένα πρώτο επίπεδο φιλτραρίσματος. Το FCS υπολογίζεται εφαρμόζοντας ένα πολυώνυμο ITU CRC (International Telecommunication Union Cyclic Redundancy Check) σε όλα τα bytes που έχουν μεταφερθεί μετά το πεδίο μήκους του πακέτου. Η ακολουθία ελέγχου έχει μήκος 16 bit και βρίσκεται στα δύο τελευταία byte του πακέτου. Το AT86RF231 εφαρμόζει έναν έλεγχο FCS σε κάθε πακέτο που λαμβάνεται.

Μια μέτρηση Clear Channel Assessment (CCA) χρησιμοποιείται από τον πομποδέκτη για την ανίχνευση ενός ελεύθερου καναλιού. Η εκτίμηση CCA πραγματοποιείται μετά από οκτώ περιόδους συμβόλων και οποιαδήποτε λαμβανόμενη ισχύς πάνω από ένα καθορισμένο από το πρότυπο επίπεδο ερμηνεύεται ως απασχολημένο κανάλι.

Το αυτόματο acknowledgement (ACK) του AT86RF231 περιλαμβάνει την λήψη ενός πακέτου και τον έλεγχο FCS. Στην περίπτωση που το πακέτο περάσει από το φίλτρο διευθύνσεων (το οποίο αξιολογεί αν το πακέτο προορίζεται για την συγκεκριμένη διεύθυνση του δικτύου) και τον έλεγχο FCS, προκαλείται interrupt υποδεικνύοντας την λήψη του πακέτου στον μικροελεγκτή. Αν απαιτείται από το είδος του πακέτου ή υπάρχει αίτηση για ACK, στην συνέχεια μεταδίδεται πακέτο ACK.

Η αυτόματη CSMA-CA αναμετάδοση του AT86RF231 περιλαμβάνει τις ενέργειες της αυτόματης προσπάθειας CCA και τυχαίου back-off. Η μετάδοση ολοκληρώνεται με την αποστολή πακέτου με αυτόματη δημιουργία πεδίου FCS και λήψη πακέτου ACK αν ζητήθηκε. Αν το πακέτο ACK δεν ληφθεί, τότε γίνεται αυτόματη αναμετάδοση.

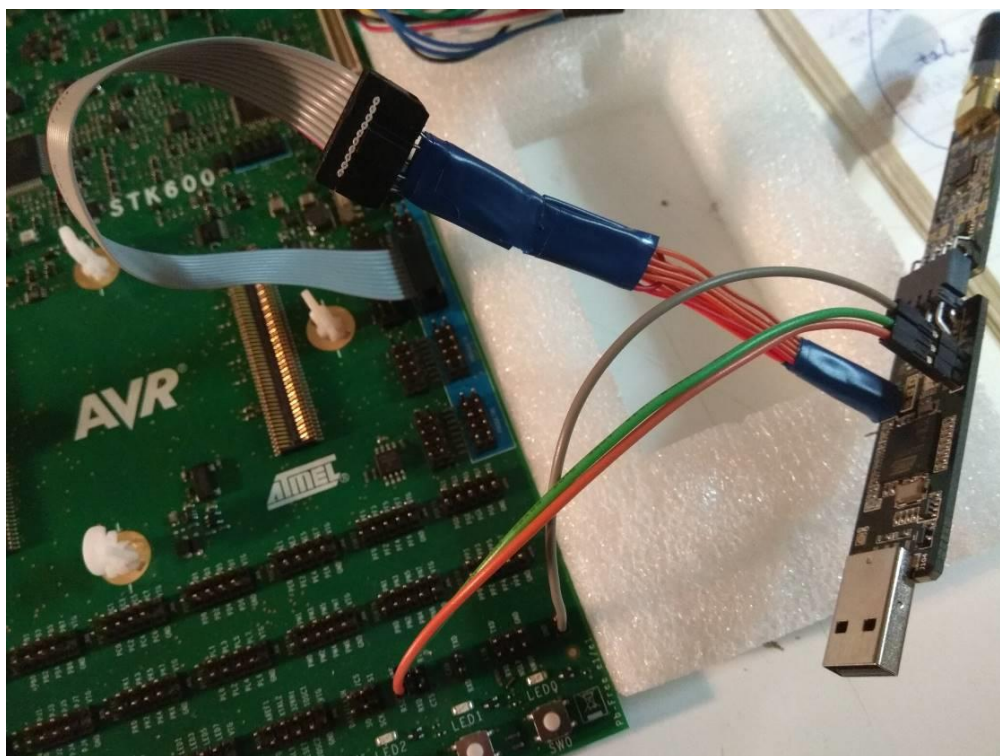
3.5.1 Διεπαφή Προγραμματισμού

Η διεπαφή προγραμματισμού απαιτείται για τον προγραμματισμό των μικροελεγκτών και για τη βαθμονόμηση των κόμβων. Ο προγραμματισμός εντός συστήματος (In-System Programming ISP) των συσκευών MegaAVR και AT32UC της Atmel μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την σειριακή διεπαφή προγραμματισμού Serial Peripheral Interface (SPI) της AVR, που σημαίνει ότι οι μικροελεγκτές δεν χρειάζεται να αφαιρεθούν για να προγραμματιστούν. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η πρόσβαση για λήψη κώδικα τόσο στη μνήμη Flash όσο και στη μνήμη EEPROM μέσω του ίδιου συνδέσμου. Ο προγραμματισμός του ISP απαιτεί μόνο VCC, GND, RESET και τρεις γραμμές σήματος. Δεν απαιτούνται σήματα υψηλής τάσης. Ο πλήρης προγραμματισμός και η βαθμονόμηση του συστήματος μπορούν να πραγματοποιηθούν ανά πάσα στιγμή. Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε ο προγραμματιστής STK600 της ATMEL (Σχήμα 3-23) με ένα σύστημα δρομολόγησης και Socketcard [13], ώστε να πραγματοποιηθεί ο προγραμματισμός των μικροελεγκτών AT32UC3A3256S και ATmega2560.



Σχήμα 3-23 Ο προγραμματιστής STK600 της ATMEL [13].

Στο Σχήμα 3-24 φαίνεται η συνδεσμολογία ISP του προγραμματιστή STK600 με τον μικροελεγκτή AT32UC3A3256S.

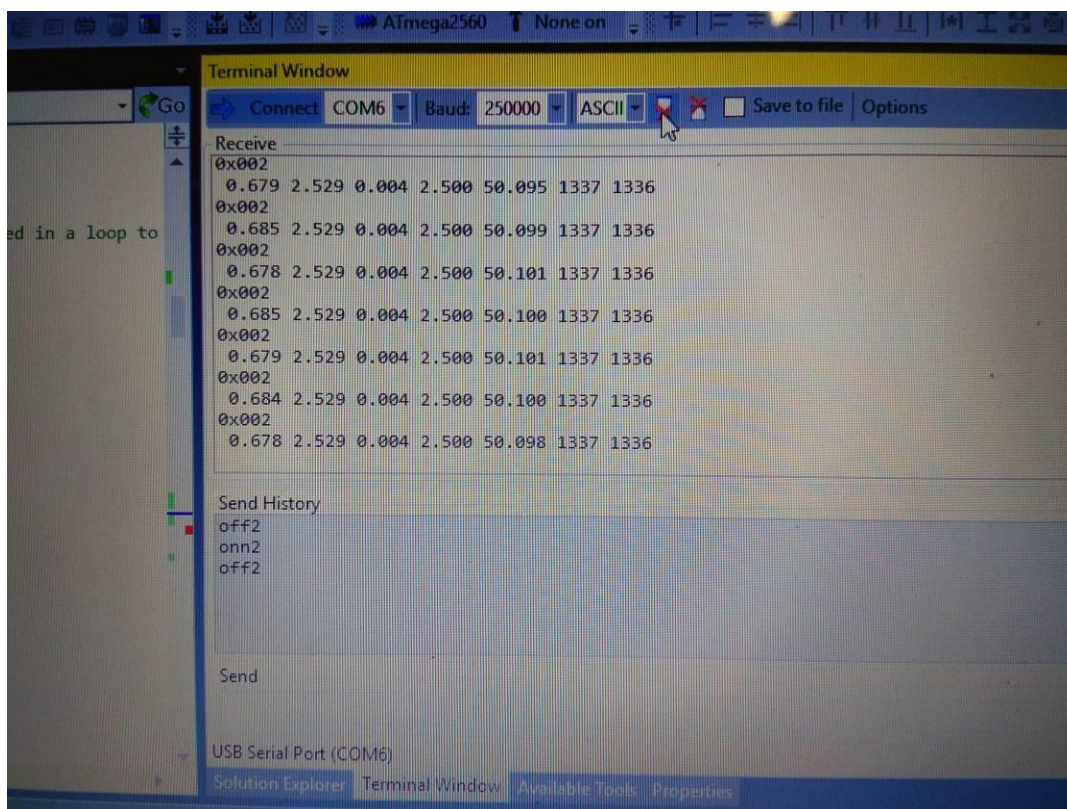


Σχήμα 3-24 Προγραμματισμός μικροελεγκτή AT32UC3A3256S.

3.5.2 Σειριακή Διεπαφή USART

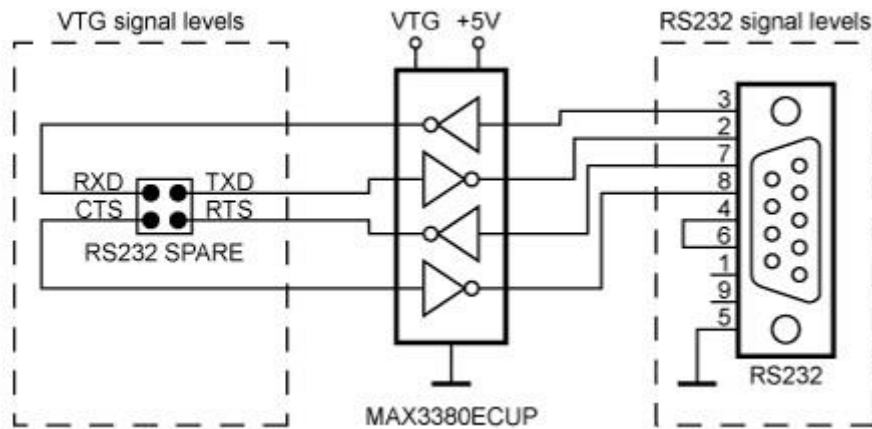
Το σύστημα χρησιμοποιεί τη διεπαφή USART (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver / Transmitter) του AVR για αποστολή δεδομένων μέτρησης στον υπολογιστή από

τον κεντρικό κόμβο και για επικοινωνία μεταξύ των μικροελεγκτών στον κάθε ασύρματο κόμβο. Οποιοδήποτε λογισμικό τερματικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποστολή εντολών στους κόμβους και για τη λήψη δεδομένων μέτρησης. Οι εντολές από τον κεντρικό κόμβο στους ασύρματους κόμβους σχεδιάστηκαν ώστε να είναι δύο τύπων: οι εντολές για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου και οι εντολές για αλλαγή παραμέτρων του συστήματος. Η μορφή που μπορούν να πάρουν οι εντολές αυτές είναι της μορφής `abcN;xx\n`, όπου `abc` είναι ένας από τους τρεις πιθανούς κωδικούς “onn”, “off”, “rms” ή “avg”, αντίστοιχα, `N` είναι ο αριθμός του κόμβου στον οποίο θα αποσταλεί η εντολή και `xx` είναι ο καινούργιος αριθμός περιόδων για την οποία θα γίνει δειγματοληψία στην περίπτωση των κωδικών “rms” και “avg”. Ο χρήστης εισάγει στο τερματικό όποια από τις παραπάνω εντολές επιθυμεί να πραγματοποιηθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-25.



Σχήμα 3-25 Παράδειγμα χρήσης του τερματικού για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου του κόμβου 2.

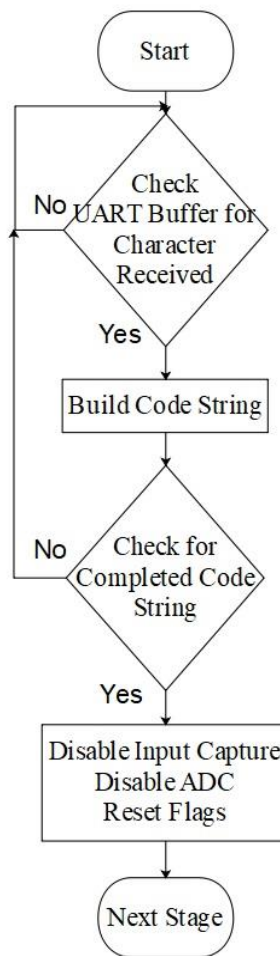
Από το τερματικό του υπολογιστή, μέσω καλωδίου USB σε RS232, η σειρά χαρακτήρων που έχει εισαχθεί, μεταφέρεται στην αντίστοιχη διεπαφή RS232 του προγραμματιστή STK600. Εκεί είναι συνδεδεμένο το UART του μικροελεγκτή του κεντρικού κόμβου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-26.



Σχήμα 3-26 Διεπαφή RS232 του STK600 [13].

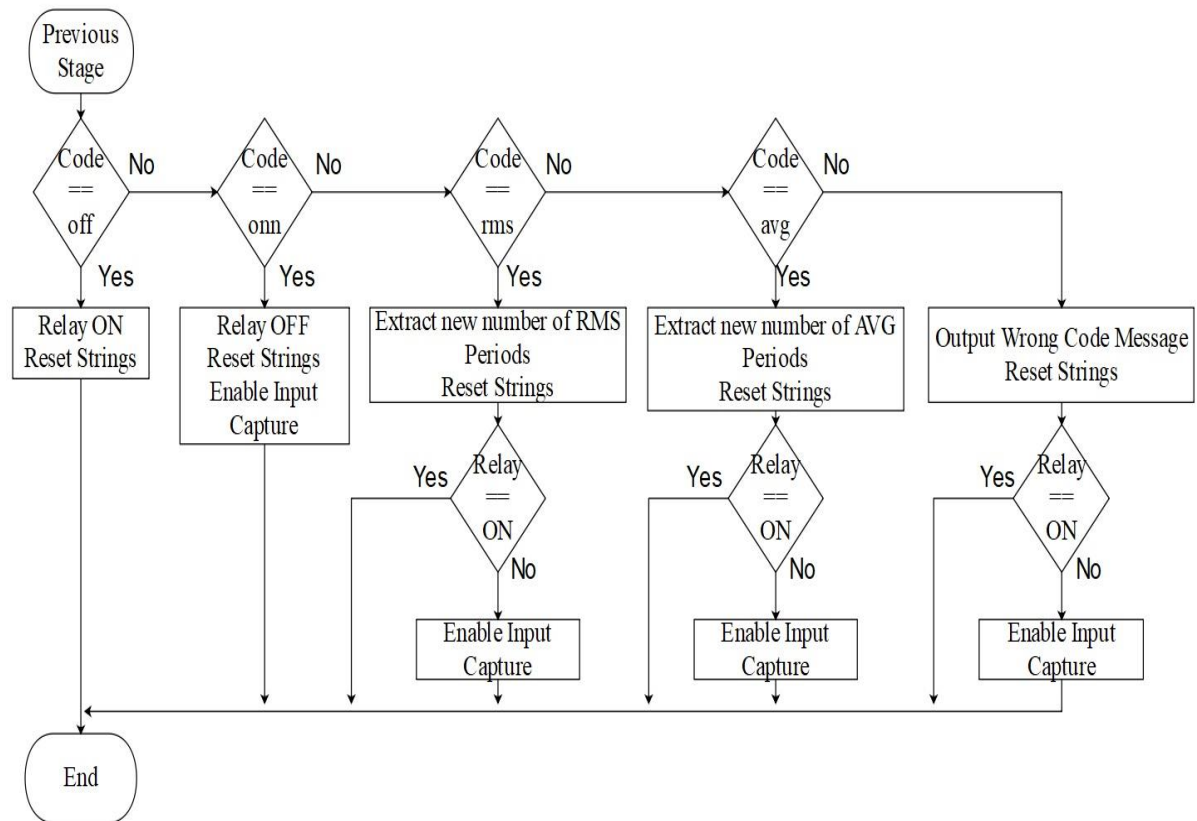
Ο μικροελεγκτής του κεντρικού κόμβου είναι προγραμματισμένος έτσι ώστε όταν εμφανίζονται χαρακτήρες στους καταχωρητές της μονάδας UART να προκαλείται interrupt και με Interrupt Service Routine (ISR) να γεμίζει κάποια προσωρινή μνήμη. Στο κύριο πρόγραμμα του μικροελεγκτή, ελέγχεται περιοδικά αν έχει ληφθεί μια ολοκληρωμένη εντολή της σωστής μορφής. Όταν ληφθεί ολοκληρωμένη εντολή, πρώτα εξάγεται η διεύθυνση του κόμβου για τον οποίο προορίζεται. Στην περίπτωση που είναι εντολή για αλλαγή παραμέτρου, στη συνέχεια εξάγεται ο καινούργιος αριθμός για αποστολή. Ο κεντρικός κόμβος στέλνει στους ασύρματους κόμβους εντολές με την μορφή $abcxx\backslash n$ όπου abc είναι ένας από τους τρεις πιθανούς κωδικούς “on”, “off”, “rms” ή “avg”, αντίστοιχα και xx είναι ο καινούργιος αριθμός παραμέτρου που θα αλλαχθεί στην περίπτωση των κωδικών “rms” και “avg”. Πριν την αποστολή, με βάση τα στοιχεία που έχουν εξαχθεί από την σειρά χαρακτήρων που είχε εισάγει ο χρήστης, δημιουργείται το κατάλληλο πακέτο σύμφωνα με το πρωτόκολλο του δικτύου.

Όταν το πακέτο με την εντολή του χρήστη ληφθεί από τον ασύρματο κόμβο, εξάγεται από αυτόν, όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3-27, και με κατάλληλους ελέγχους ο μικροελεγκτής κάνει τις σωστές ενέργειες όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3-28.



Σχήμα 3-27 Διάγραμμα ροής όταν δέχονται οι ασύρματοι κόμβοι εντολές από τον κεντρικό κόμβο.

Αρχικά απενεργοποιείται η μονάδα Input Capture του Timer1 (βλ. παράγραφο 3.5.3) και ο ADC. Στη συνέχεια, ανάλογα με τον κωδικό της εντολής, στην περίπτωση “off” ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος, διακόπτοντας την τροφοδοσία του φορτίου που μετριέται, και ο κόμβος βρίσκεται σε αναμονή για την απενεργοποίηση του. Στην περίπτωση της εντολής “onn” απενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος, επαναφέροντας την τροφοδοσία στο φορτίο, και ενεργοποιείται η μονάδα Input Capture και ο ADC για την συνέχιση των μετρήσεων.

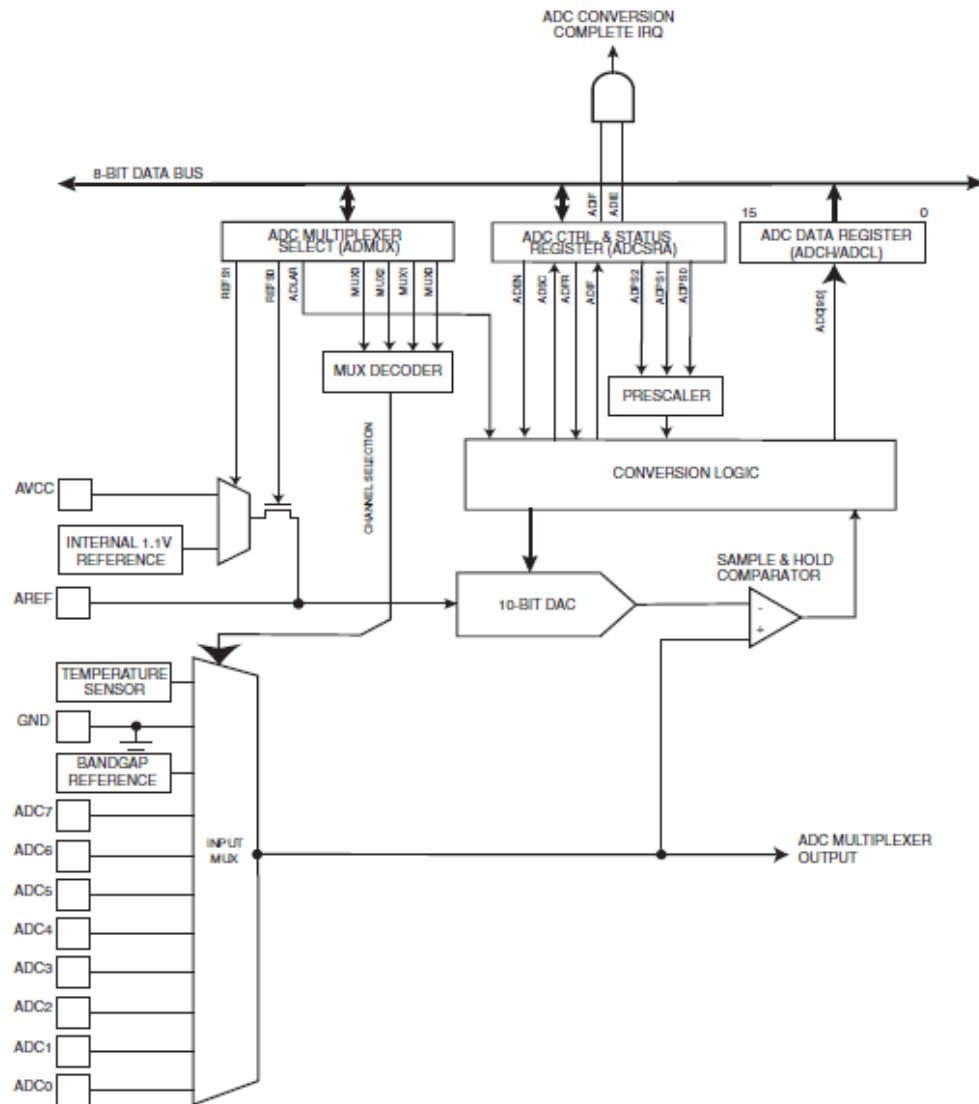


Σχήμα 3-28 Διάγραμμα ροής των ενεργειών του ασύρματου κόμβου ανάλογα με την εντολή που δέχτηκε.

Στις άλλες δυο περιπτώσεις, εξάγονται οι καινούργιες τιμές των παραμέτρων, αποθηκεύονται στις σωστές μεταβλητές και ανάλογα με την προηγούμενη κατάσταση του ασύρματου κόμβου, είτε συνεχίζονται οι μετρήσεις με τις καινούργιες παραμέτρους, είτε το σύστημα βρίσκεται σε αναμονή.

3.5.3 Δειγματοληψία και Συγχρονισμός

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε έχει μετατροπέα A/D τύπου SAR, και στο Σχήμα 3-29 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμά του.



Σχήμα 3-29 Δομικό Διάγραμμα ADC ATMEGA328p [10].

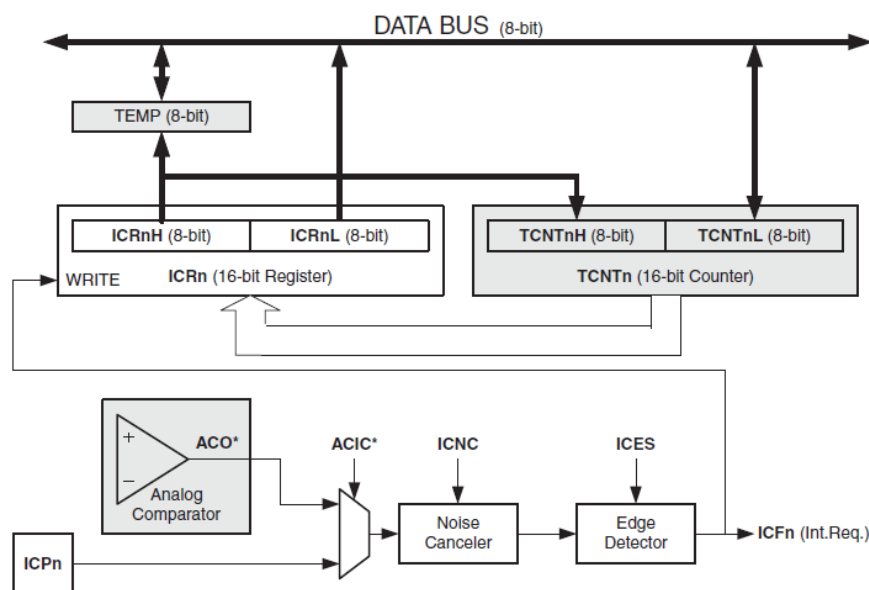
Στον μετατροπέα A/D τύπου Διαδοχικών Προσεγγίσεων (Successive Approximations, SAR) η αναλογική τάση εισόδου συγκρατείται από ένα κύκλωμα S/H, ενώ η ψηφιακή έξοδος του μετατροπέα A/D αποθηκεύεται σε ένα καταχωρητή των 10-bit. Ένας συγκριτής χρησιμοποιείται για την σύγκριση του αναλογικού σήματος προς μετατροπή με την τάση εξόδου ενός μετατροπέα D/A των 10-bit ο οποίος έχει ως είσοδο την ψηφιακή τιμή που αποθηκεύεται στον καταχωρητή εξόδου. Για έναν μετατροπέα A/D τύπου SAR 10-bit απαιτούνται 10 συγκρίσεις για να ολοκληρωθεί μια μετατροπή και για την πραγματοποίηση μιας σύγκρισης πρέπει να έχει τελειώσει η προηγούμενη, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος μετατροπής του μετατροπέα A/D. Για τον λόγο αυτόν, οι μετατροπείς A/D τύπου SAR δεν χρησιμοποιούνται για την μετατροπή σημάτων πολύ υψηλής συχνότητας. Τα σήματα που δέχεται το σύστημα είναι χαμηλής συχνότητας αφού όλα τα σήματα που

δειγματοληπτούνται είναι κοντά στα 50 Hz. Οι μετατροπείς A/D τύπου SAR εμφανίζουν χαμηλή κατανάλωση ισχύος και έχουν μικρές διαστάσεις (οπότε απαιτείται η διάθεση μικρού χώρου για την κατασκευή του μετατροπέα μέσα σε ολοκληρωμένο κύκλωμα) που συμβαδίζει με τις απαιτήσεις του κόμβου του συστήματος που σχεδιάστηκε.

Ο ADC έχει ρυθμιστεί ώστε να λειτουργεί σε λειτουργία μίας μετατροπής, που σημαίνει ότι μια νέα μετατροπή θα ξεκινήσει μόνο μετά την ολοκλήρωση της τρέχουσας μετατροπής και όταν γραφτεί λογικό ένα στο bit ADC Start Conversion. Έχει ρυθμιστεί να έχει συχνότητα ρολογιού 125 kHz (την μέγιστη που μπορεί να έχει αυτός ο μικροελεγκτής) και κάθε δειγματοληψία διαρκεί 13 κύκλους του ADC ρολογιού. Αυτό μας δίνει έναν θεωρητικό ρυθμό δειγματοληψίας 9615 δείγματα/δευτερόλεπτο. Χρησιμοποιούνται τρία κανάλια στον πολυπλέκτη του ADC, ένα για την τάση του ελεγχόμενου φορτίου, ένα για την ένταση του ρεύματος του ελεγχόμενου φορτίου και ένα για την θερμοκρασία, τα οποία επιλέγονται μέσα από το Interrupt Service Routine του ADC πριν από κάθε νέα μετατροπή.

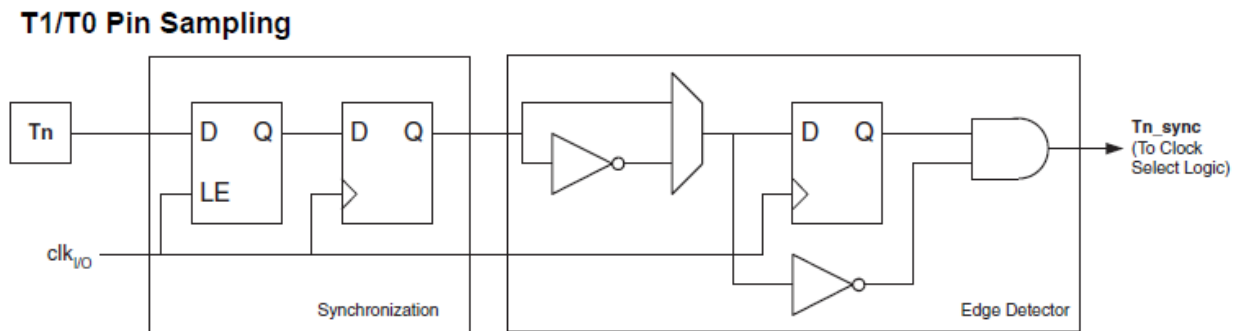
Στο τέλος μιας μετατροπής, το ADC δημιουργεί ένα αίτημα interrupt και το MCU ξεκινά να εκτελεί το Interrupt Service Routine (ISR). Ο ISR διαβάζει και αποθηκεύει τα δείγματα δεδομένων και στη συνέχεια, επιστρέφει την εκτέλεση στο κύριο πρόγραμμα. Μόλις ξεκινήσει, το ISR ενδέχεται να συνεχίσει να διακόπτει το κύριο πρόγραμμα, ακόμη και όταν είναι απασχολημένο με τον υπολογισμό.

Ο συγχρονισμός του συστήματος με την περίοδο των δειγμάτων που δειγματοληπτούνται επιτυγχάνεται με την Input Capture μονάδα του Timer 1 του μικροελεγκτή.



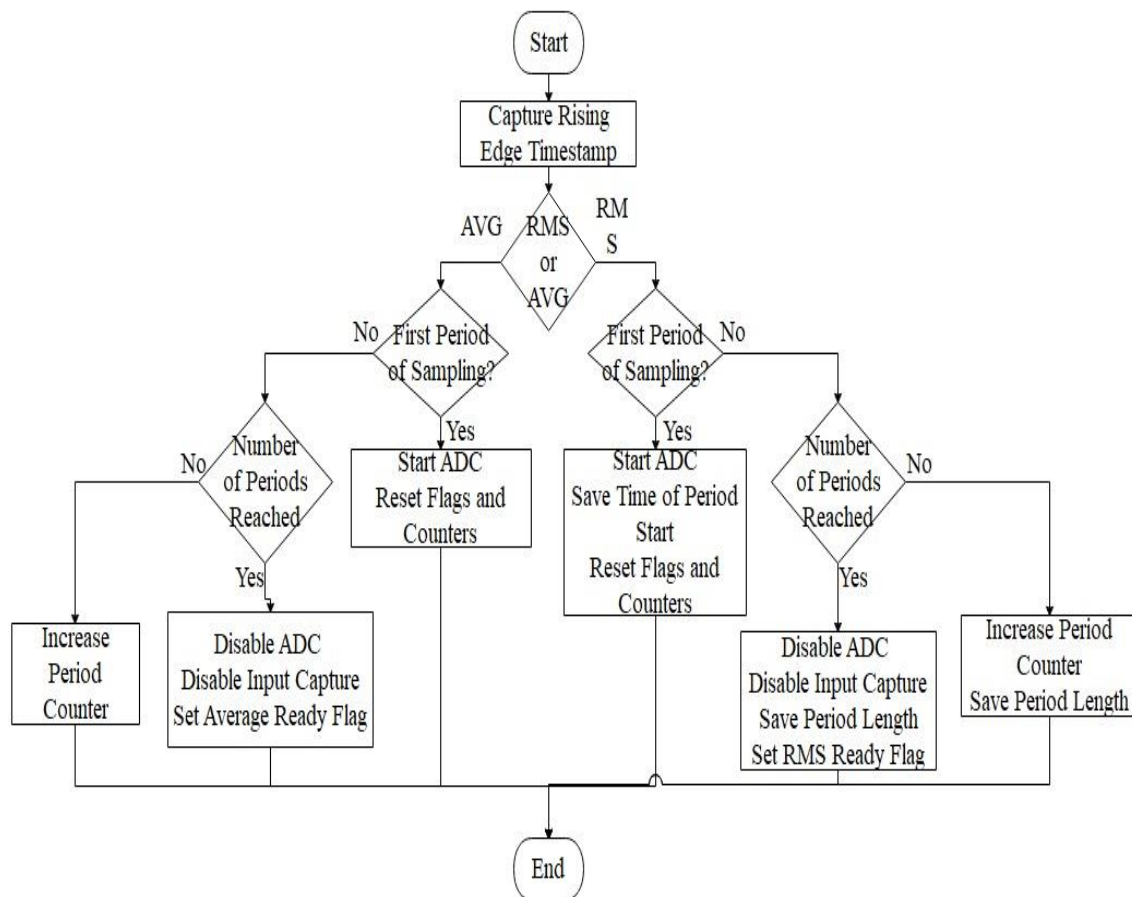
Σχήμα 3-30 Δομικό διάγραμμα της μονάδας σύλληψης εισόδου [10].

Στο Σχήμα 3-30 φαίνονται τα δομικά μέρη της μονάδας Input Capture του Timer 1. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιεί ως είσοδο την έξοδο του συγκριτή από το αναλογικό άκρο. Όταν μια αλλαγή του λογικού επιπέδου (ένα συμβάν) συμβαίνει στον ακροδέκτη Input Capture (ICP1) του μικροελεγκτή και αυτή η αλλαγή επικυρώνεται από την ρύθμιση του Edge Detector (rising edge / falling edge), Σχήμα 3-31, η 16-bit τιμή του Timer1 (TCNT1) αποθηκεύεται στο καταχωρητή Input Capture (ICR1) και προκαλείται ένα interrupt με το δικό του ISR.



Σχήμα 3-31 Δομικό διάγραμμα της μονάδας ανίχνευσης ακμών [10].

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής του Interrupt Service Routine του Input Capture στο Σχήμα 3-32, αποθηκεύεται η χρονική στιγμή του συμβάντος για τον υπολογισμό της συχνότητας του ρεύματος και ενεργοποιείται ο ADC για να δειγματοληπτηθεί ίδιος αριθμός δειγμάτων ανά περίοδο. Στο τέλος της περιόδου μέσα στο ISR του Input Capture και αφού η έξοδος του συγκριτή έχει μεταβεί στο λογικό 0 και ξανανεβεί στο 1, αποθηκεύεται η χρονική στιγμή του συμβάντος και όταν αφαιρεθούν αυτές οι τιμές προκύπτει η διάρκεια της περιόδου των σημάτων, και κατ' επέκταση της συχνότητάς τους. Αυτό επαναλαμβάνεται για όσες περιόδους έχει οριστεί από τον χρήστη και στην τελευταία περίοδο σταματάει η λειτουργία του ADC και η κύρια ρουτίνα αναλαμβάνει την αποστολή των αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίοδο δειγματοληπτούνται διαδοχικά τα σήματα της τάσης και έντασης του ρεύματος του φορτίου που μετριέται. Όταν αυτά είναι έτοιμα παραδίδονται στην κύρια ρουτίνα για την επεξεργασία, και επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία.



Σχήμα 3-32 Διάγραμμα ροής του interrupt service routine του συστήματος input capture του μικροελεγκτή.

3.5.4 Αφαίρεση Μετατόπισης DC

Όταν ξεκινά το σύστημα, η πρώτη του εργασία είναι να διαβάσει δείγματα δεδομένων που έχουν αποθηκευτεί από το ADC σε θέσεις στην SRAM όπου δεν μπορούν να αντικατασταθούν από νέα δεδομένα. Η πρώτη εργασία που πρέπει να εκτελεστεί στα δεδομένα είναι η αφαίρεση της μετατόπισης DC (offset) που έχει εισαχθεί στα σήματα στο αναλογικό άκρο. Για να επιτευχθεί αυτό, στις πρώτες περιόδους των δειγματοληπτημένων σημάτων, υπολογίζεται η μέση τιμή των σημάτων, που δίνει με μεγάλη ακρίβεια την DC μετατόπιση. Οι τιμές που υπολογίζονται σε αυτό το βήμα αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε για τον υπολογισμό των RMS τιμών των σημάτων. Αποφεύγοντας να χρησιμοποιηθούν σταθερές, θεωρητικά υπολογισμένες, τιμές για την μετατόπιση DC, καταφέρνει το σύστημα να μην επηρεάζεται πολύ από μεταβολές στην θερμοκρασία και διαφορές στην τροφοδοσία των κόμβων.

3.5.5 Μέτρηση Τάσης και Ρεύματος

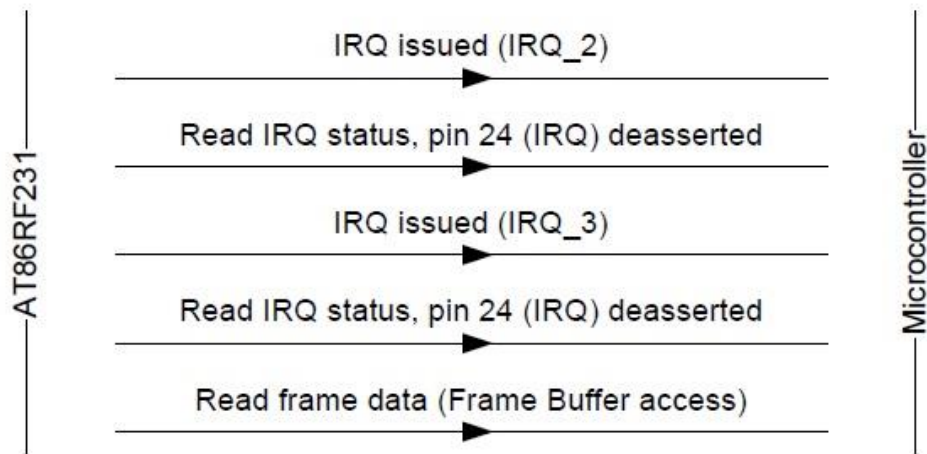
Το λογισμικό υπολογίζει τις ενεργές τιμές του ρεύματος και της τάσης του ελεγχόμενου ηλεκτρικού φορτίου του ασύρματου κόμβου (Root-Mean-Square, RMS). Η τιμή RMS ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των στιγμιαίων τιμών μιας περιοδικά μεταβαλλόμενης ποσότητας για έναν πλήρη κύκλο. Αφού υπολογιστεί η μετατόπιση DC (offset) για κάθε κανάλι, ξεκινάει ο αλγόριθμος υπολογισμού των RMS τιμών τάσης και έντασης ρεύματος. Για κάθε δείγμα που μετατρέπεται από τον ADC, αφαιρείται η αντίστοιχη μετατόπιση, τετραγωνίζονται τα αποτελέσματα της ποσότητας που προκύπτει και προστίθενται σε ένα άθροισμα. Από αυτό το άθροισμα υπολογίζεται ο μέσος όρος των τετραγώνων σε σχέση με τον αριθμό των δειγμάτων σε ένα εύρος περιόδων ανάλογα με την επιλογή του χρήστη. Όλες οι πράξεις γίνονται με ακέραιους χωρίς πρόσημο μειώνοντας έτσι τον υπολογιστικό χρόνο των πράξεων και την εισαγωγή σφαλμάτων μετασχηματισμών τιμών. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ψηφιακές λέξεις των 32-bit (χωρίς πρόσημο).

3.5.6 Λογισμικό Κόμβων

Το λογισμικό είναι γραμμένο σε γλώσσα C και μεταγλωττίζεται στο GNU Compiler Collection (GCC) που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα Atmel Studio της Atmel. Η σύνταξη της γλώσσας είναι τυπική C, επομένως το λογισμικό είναι εύκολο να μεταφερθεί σε άλλους μεταγλωττιστές C. Το λογισμικό βασίζεται σε interrupts και στα Interrupt Service Routines που αντιστοιχούν σε αυτά, πράγμα που σημαίνει ότι το κύριο πρόγραμμα αποτελείται από έναν ατελείωτο βρόχο που διακόπτεται από αιτήματα διακοπής σε τακτική βάση. Τα interrupts δημιουργούνται από το ADC, από το ρολόι του συστήματος Timer1 το οποίο ανιχνεύει την αρχή των περιόδων των σημάτων που μετρώνται και από την σειριακή διεπαφή επικοινωνίας των μικροελεγκτών.

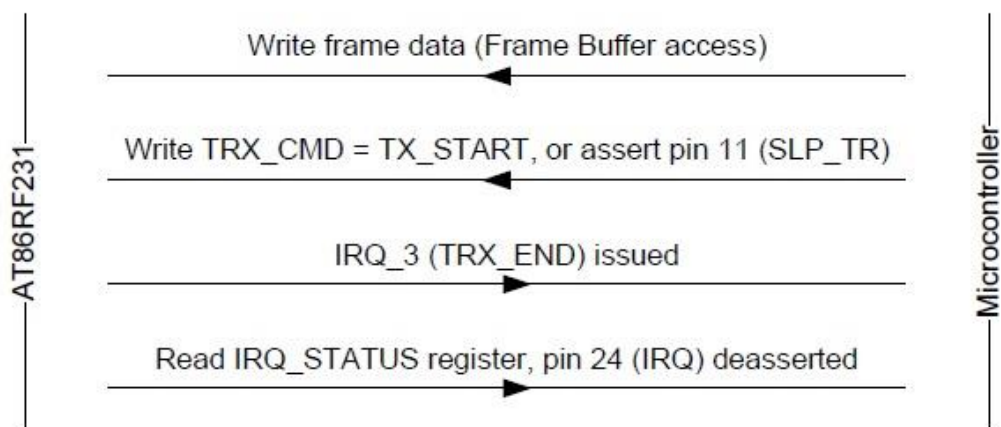
3.5.7 Διαδικασία αποστολής και λήψης πακέτων

Όταν ο πομποδέκτης βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας λήψης (RX_ON) αναζητά εισερχόμενα πακέτα στο επιλεγμένο κανάλι. Μόλις ανιχνευτεί ένα πακέτο του προτύπου IEEE 802.15.4 αυτό υποδεικνύεται στον μικροελεγκτή με ένα interrupt IRQ_2 (RX_START). Η λήψη πακέτων αποτελείται από δυο ενέργειες. Το επίπεδο PHY λαμβάνει και αποδιαμορφώνει το πακέτο στο Frame Buffer και σηματοδοτεί την λήψη του στον μικροελεγκτή με ένα interrupt IRQ_3 (TRX_END). Ο μικροελεγκτής στη συνέχεια λαμβάνει τα δεδομένα του πακέτου από το Frame Buffer μέσω της διεπαφής SPI, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3-33.



Σχήμα 3-33 Επικοινωνία AT86RF231 με τον μικροελεγκτή κατά την διάρκεια λήψης πακέτου [12].

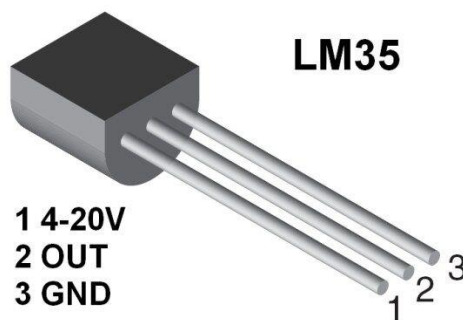
Η αποστολή πακέτων αποτελείται από δυο ενέργειες. Μετά από την εγγραφή ενός πακέτου στο Frame Buffer από τον μικροελεγκτή, η αποστολή του πακέτου από τον πομποδέκτη ξεκινά με την εγγραφή της εντολής TX_START στον καταχωρητή TRX_STATE, ενώ ο πομποδέκτης βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας TX_ONN. Η ολοκλήρωση της μετάδοσης υποδεικνύεται στον μικροελεγκτή με ένα interrupt IRQ_3 (TRX_END) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-34.



Σχήμα 3-34 Επικοινωνία AT86RF231 με τον μικροελεγκτή κατά την διάρκεια αποστολής πακέτου [12].

3.6 Αισθητήρας Θερμοκρασίας

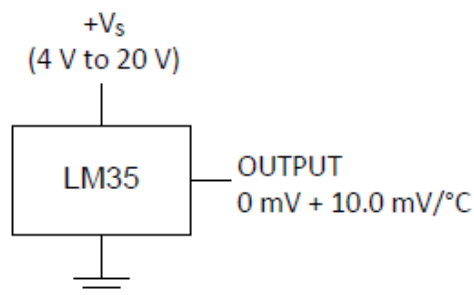
Στους ασύρματους κόμβους, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας τους με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας τους, τοποθετήθηκαν αισθητήρες θερμοκρασίας της σειράς LM35 από την εταιρία Texas Instruments. Είναι διατάξεις μέτρησης θερμοκρασίας ακριβείας, σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος και με τάση εξόδου γραμμικά ανάλογη με τη θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-35.



Σχήμα 3-35 Ο αισθητήρας θερμοκρασίας LM35 των ασύρματων κόμβων [14].

Ο αισθητήρας LM35 έχει ένα πλεονέκτημα έναντι των γραμμικών αισθητήρων θερμοκρασίας που βαθμονομούνται σε Kelvin, καθώς δεν απαιτείται να αφαιρεθεί μεγάλη σταθερά από την έξοδο τους για να μετατραπεί σε κλίμακα Κελσίου [14].

Ο αισθητήρας LM35 δεν απαιτεί εξωτερική βαθμονόμηση για να παρέχει τυπική ακρίβεια $\pm 1/4$ °C σε θερμοκρασία δωματίου και $\pm 3/4$ °C σε πλήρες εύρος θερμοκρασίας -55 °C έως 150 °C. Η μικρή σύνθετη αντίσταση εξόδου του, η γραμμική έξοδος και η ακρίβεια του αισθητήρα LM35 καθιστούν ιδιαίτερα εύκολη τη διεπαφή του με τον μετατροπέα ADC του μικροελεγκτή.



Σχήμα 3-36 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του αισθητήρα θερμοκρασίας LM35 [14].

Η τάση εξόδου του LM35 σε σχέση με τη μετρούμενη θερμοκρασία, υπολογίζεται από μια απλή γραμμική εξίσωση (Σχήμα 3-36):

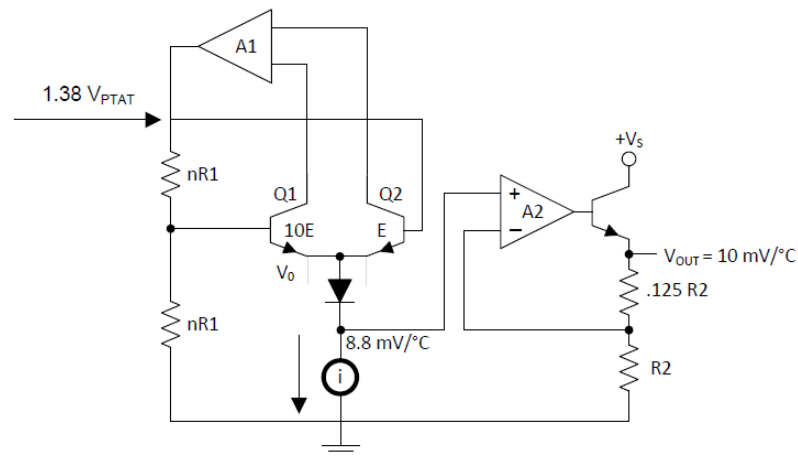
$$V_{OUT} = 10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \times T \quad (3.8)$$

όπου:

V_{OUT} είναι η τάση εξόδου και

T είναι η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$.

Ο αισθητήρας LM35 αντλεί μόνο 60 μA από την πηγή τροφοδοσίας, συνεπώς έχει πολύ χαμηλή αυτοθέρμανση, μικρότερη από 0.1°C σε ακίνητο αέρα.



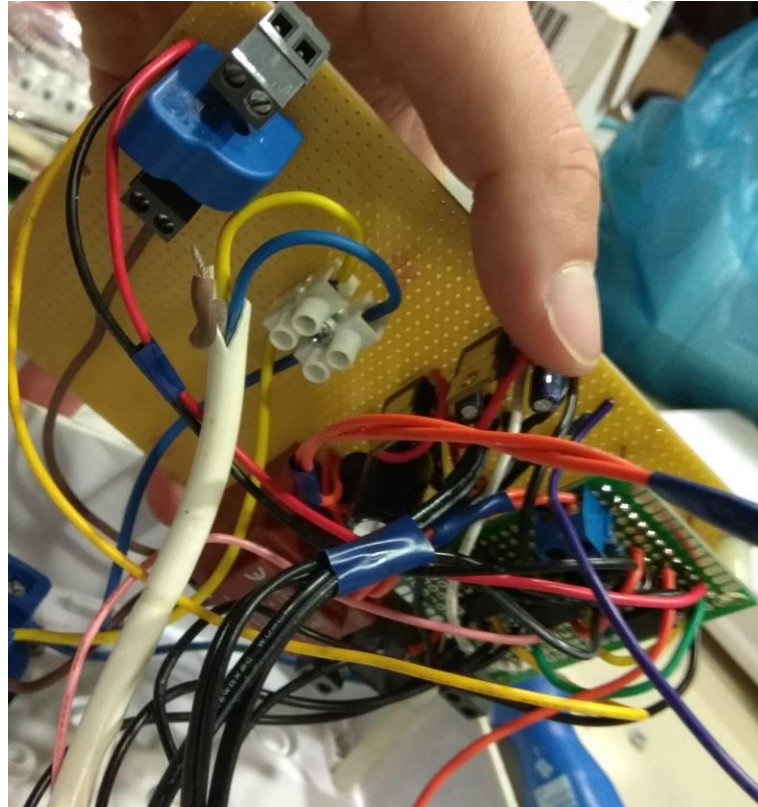
Σχήμα 3-37 Το εσωτερικό κύκλωμα λειτουργίας του αισθητήρα θερμοκρασίας LM35 [14].

Στο Σχήμα 3-37 φαίνεται το εσωτερικό κύκλωμα λειτουργίας του αισθητήρα θερμοκρασίας LM35. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας ο αισθητήρας εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της επίδρασης της θερμοκρασίας σε μια επαφή P-N, η τάση της οποίας μεταβάλλεται με την θερμοκρασία αν διαρρέεται από ρεύμα. Η τάση εκπομπού-βάσης (V_{BE}) ενός τρανζίστορ NPN πυριτίου έχει μια τέτοια εξάρτηση θερμοκρασίας. Στο κύκλωμα λειτουργίας του αισθητήρα θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται δυο τρανζίστορ Q_1 και Q_2 , με το Q_1 να έχει 10 φορές μεγαλύτερη περιοχή εκπομπού από το τρανζίστορ Q_2 με αποτέλεσμα η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις επαφές βάσης-εκπομπών τους (ΔV_{BE}) να εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία αν ο λόγος των ρευμάτων τους παραμένει σταθερός. Η τάση εξόδου του στοιχείου ανίχνευσης θερμοκρασίας στη συνέχεια ρυθμίζεται από έναν ενισχυτή και παρέχεται στην έξοδο V_{OUT} . Ο ενισχυτής έχει τυπική αντίσταση εξόδου 0.5 Ω .

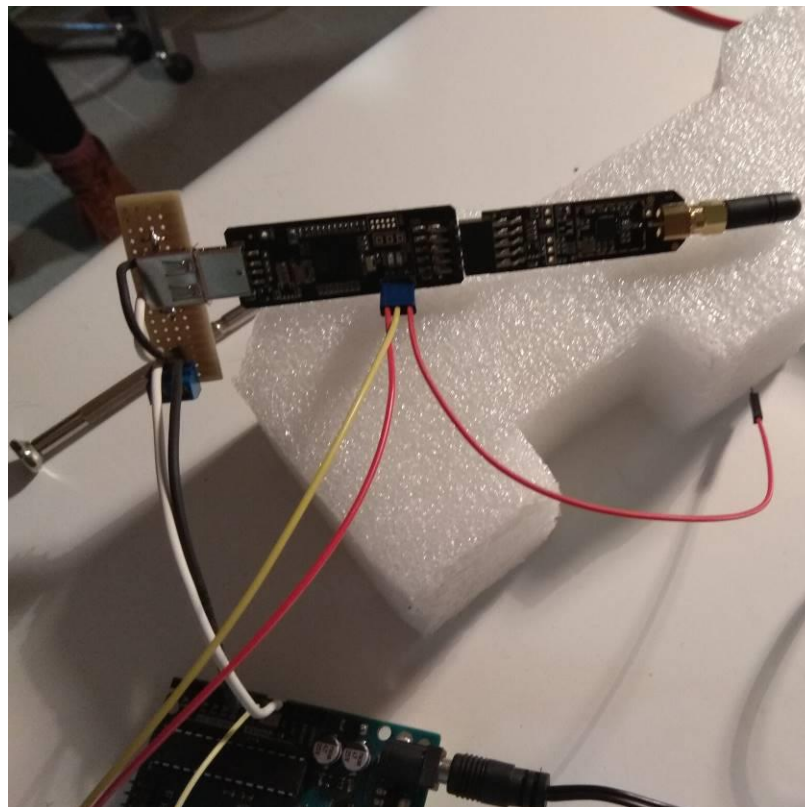
4.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις καθώς και η διαδικασία της βαθμονόμησης του συστήματος μέτρησης που κατασκευάστηκε. Στα Σχήματα 4-1 και 4-2 φαίνεται η εσωτερική σχεδίαση των κόμβων και η σύνδεση μικροελεγκτών με πομποδέκτη.



Σχήμα 4-1 Εσωτερικό των ασύρματων κόμβων.



Σχήμα 4-2 Σύνδεση μικροελεγκτών με τον πομποδέκτη AT86RF231.

4.1 Περιγραφή Μεθοδολογίας Μετρήσεων

Κατά την διάρκεια όλης της διαδικασίας κατασκευής του συστήματος, όλα τα επιμέρους αναλογικά μέρη ελέγχονταν για την σωστή λειτουργία τους και την παραγωγή των σωστών σημάτων. Έγιναν δοκιμές για την σωστή λειτουργία των ADC των μικροελεγκτών, των αλγορίθμων υπολογισμού των αποτελεσμάτων και του ασύρματου δικτύου των κόμβων.

Η διαδικασία των μετρήσεων έγινε με τον εξής τρόπο: οι δύο ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων τοποθετήθηκαν σε δύο διαφορετικές πρίζες μέσα στο εργαστήριο και ο κεντρικός κόμβος με σειριακή διεπαφή USART, μέσω USB συνδέθηκε σε υπολογιστή με την κονσόλα του προγράμματος Atmel Studio. Η κονσόλα ρυθμίστηκε έτσι ώστε να καταγράφει τα δεδομένα τα οποία αποστέλλουν οι κόμβοι, καθώς και τις εντολές ελέγχου που μπορούν να αποσταλούν στους κόμβους. Ο κάθε κόμβος στην συνέχεια συνδέεται με ένα εύρος ηλεκτρικών φορτίων, που έχουν επιλεγεί για να αξιοποιηθεί το πλήρες εύρος του συστήματος και με το πολύμετρο λαμβάνονται μετρήσεις πραγματικών μεγεθών τάσης και ρεύματος στους κόμβους. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται περιλαμβάνουν όλα τα μέρη του συστήματος και κατ' επέκταση όλα τα πιθανά συστηματικά σφάλματα που μπορεί να υπάρχουν σε αυτό. Για την αντιμετώπιση των τυχαίων σφαλμάτων, όλες οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν τρεις φορές για κάθε μετρούμενο μέγεθος του συστήματος.

Τα φορτία που επιλέχθηκαν για τις μετρήσεις είναι τα ακόλουθα:

1. Μία σόμπα με ονομαστική τάση 230 V και ονομαστική ισχύ 800 W συνολικά (χωρίς καμία αντίσταση ενεργή),
2. Μία λάμπα πυρακτώσεως με ονομαστική τάση 230 V και ονομαστική ισχύ 75 W,
3. Μία σόμπα με ονομαστική τάση 230 V και ονομαστική ισχύ 800 W συνολικά (με τη χρήση μίας αντίστασης 400 W),
4. Μια τοστιέρα με ονομαστική τάση 220 V και ονομαστική ισχύ 640 W,
5. Μία σόμπα με ονομαστική τάση 230 V και ονομαστική ισχύ 800 W συνολικά (με τη χρήση δύο ενεργών αντιστάσεων),
6. Μία τοστιέρα μαζί με τη σόμπα με μία αντίσταση ενεργή και
7. Μία τοστιέρα μαζί με τη σόμπα με δύο αντιστάσεις ενεργές.

Τα φορτία και οι συνδυασμοί τους επιλέχτηκαν να χρησιμοποιηθούν ώστε να μετρηθεί η ισχύς σε όλο το εύρος περιοχής μέτρησης των ασύρματων κόμβων του συστήματος. Παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση της σόμπας, όταν καμία αντίσταση δεν ήταν αναμμένη, μια μικρή ένταση ρεύματος διέρρεε το φορτίο. Όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 3-2, αυτή η πολύ μικρή ένταση ρεύματος δεν είναι ανιχνεύσιμη από το σύστημα που κατασκευάστηκε. Συμπεριλαμβάνεται όμως στα αποτελέσματα για μια ολοκληρωμένη εικόνα του συστήματος. Το εύρος της περιοχής μέτρησης του συστήματος είναι από 15 W έως 1840 W.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να ληφθούν τα αποτελέσματα είναι η ακόλουθη. Αρχικά, οι ασύρματοι κόμβοι συνδέθηκαν σε πρίζες. Στη συνέχεια οι ασύρματοι κόμβοι συνδέθηκαν με το πρώτο και δεύτερο φορτίο. Το πολύμετρο συνδέεται είτε παράλληλα είτε σε σειρά με το φορτίο κάθε φορά και τα δεδομένα μέτρησης εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή και αποθηκεύονται. Η μεταφορά των δεδομένων από τους κόμβους προς τον υπολογιστή γίνεται ασύρματα με τη χρήση του ασύρματου δικτύου.

0x002								
133	518	69	513	40176	54	897	896	298
0x002								
133	518	69	513	40173	54	897	896	298
0x002								
133	518	69	512	40168	54	897	896	298
0x002								
133	518	69	513	40165	54	897	896	298
0x002								
133	518	69	513	40160	54	896	896	298
0x002								
134	518	69	513	40159	54	896	896	298
0x002								
134	518	69	513	40157	54	896	896	298
0x002								
133	518	77	513	40153	54	896	896	298
0x002								
132	518	90	512	40151	54	896	896	298
0x002								
131	518	96	512	40147	54	896	896	298
0x002								
131	518	95	512	40144	54	896	896	298
0x002								
131	518	95	512	40143	54	896	896	298
0x002								
131	518	95	512	40136	54	896	895	298
0x002								
131	518	95	512	40133	54	896	895	298
0x002								
131	518	95	512	40126	54	896	895	298
0x002								
131	518	95	512	40121	54	896	895	298
0x002								
131	517	95	512	40114	54	895	895	298
0x002								
131	518	95	513	40110	54	895	895	298
0x002								
131	517	95	512	40105	54	895	895	298
0x002								
131	518	94	512	40098	54	895	895	298
0x002								
131	518	94	512	40095	54	895	894	298
0x002								
131	518	94	512	40090	54	895	894	298
-	-	-	-	-	-	-	-	-

Σχήμα 4-3 Δεδομένα από τον κόμβο 1.

Στο Σχήμα 4-3 φαίνεται μια σειρά από εισερχόμενα δεδομένα που έχει αποθηκεύσει ο κεντρικός κόμβος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο είναι συνδεδεμένος. Πρόκειται για δεδομένα που έχει στείλει ο κόμβος με 16-bit διεύθυνση δικτύου 0x002. Το φορτίο που μετριέται είναι η τοστιέρα σε συνδυασμό με την σόμπα με μια αντίσταση και στην συνέχεια ανάβεται και η δεύτερη αντίσταση. Μετά την διεύθυνση, το πρώτο νούμερο είναι η μη-βαθμονομημένη έξοδος του υπολογισμού της RMS τάσης των φορτίων. Το επόμενο νούμερο προς τα δεξιά στην σειρά δεδομένων είναι η τιμή της DC offset σε raw ADC values του ρυθμιστή σήματος της τάσης. Με βάση την διακριτική ικανότητα του 10-bit ADC του κόμβου αυτή μπορεί να υπολογιστεί ως $V_{AVGv} = ADC_{value} * V_{REF} / 1024 = 2.529 \text{ V}$. Στην συνέχεια λαμβάνεται η μη-βαθμονομημένη έξοδος του υπολογισμού του RMS ρεύματος των φορτίων και η τιμή της DC offset σε raw ADC values του αισθητήρα ρεύματος. Μπορεί να

υπολογιστεί ως $V_{AVGi} = ADC_{value} * V_{REF} / 1024 = 2.5 \text{ V}$. Η πέμπτη μέτρηση στο πακέτο που λαμβάνεται είναι η συχνότητα του ρεύματος των φορτίων σε raw Counter values του 16-bit Timer1. Με βάση την συχνότητα 16 MHz του CPU clock του μικροελεγκτή και τον επιλεγμένο prescaler = 8 που δίνει την διακριτική ικανότητα του Timer1, $F_{timer1} = 16 / 8 = 2 \text{ MHz}$, η συχνότητα μπορεί να υπολογιστεί την ως $F = F_{timer1} / Counter_{values} = 2000000 / 40176 = 49.78 \text{ Hz}$. Η έκτη μέτρηση που επιστρέφεται είναι η raw ADC value της θερμοκρασίας και από την εξίσωση (3.8) και την διακριτική ικανότητα του 10-bit ADC υπολογίζεται $T = ADC_{value} * V_{REF} * 100 / 1024 = 26.36 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Τέλος, οι τρεις τελευταίες τιμές είναι ο αριθμός των δειγμάτων που έχουν γίνει από τον ADC του μικροελεγκτή, για τα τρία κανάλια στον πολυπλέκτη, της τάσης του ρεύματος και της θερμοκρασίας, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4-1 παρατηρείται η μετάβαση των μετρήσεων από όταν το φορτίο της σόμπας έχει μια αντίσταση ενεργή, και μετά ενεργοποιείται και η δεύτερη.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για τα επόμενα 6 φορτία. Για το κάθε φορτίο έγιναν 3 μετρήσεις τάσης και 3 μετρήσεις έντασης ρεύματος. Αφού καταγράφηκαν όλα τα αποτελέσματα ξεκίνησε η επεξεργασία τους.

4.2 Βαθμονόμηση

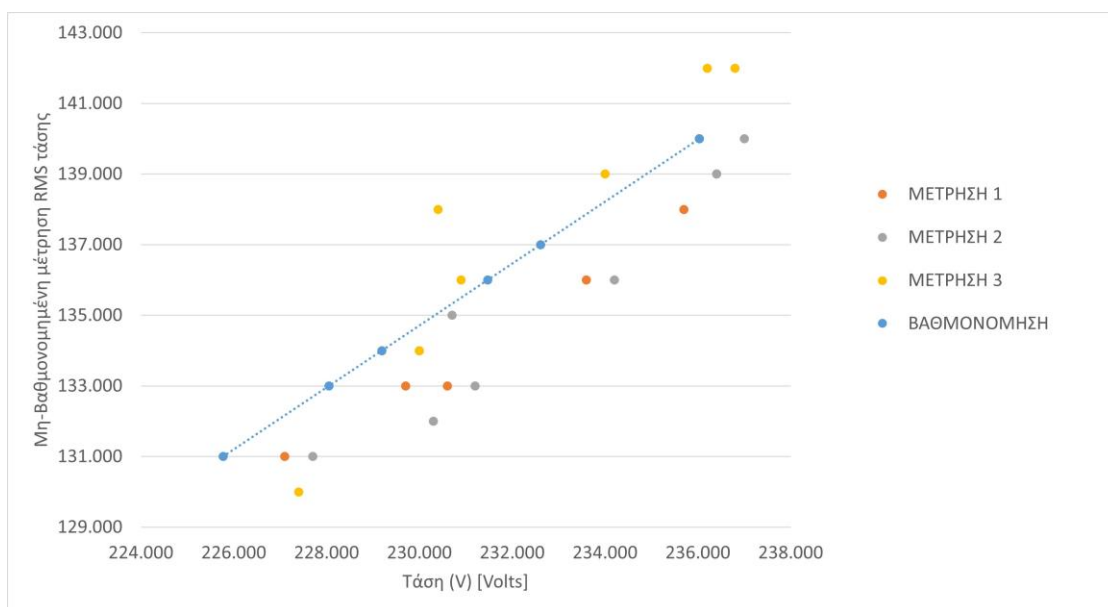
Στον Πίνακα 4-1 φαίνεται η RMS τιμή των μετρήσεων του ADC (raw ADC values ή counts) για τον αισθητήρα τάσης (μη-βαθμονομημένες μετρήσεις RMS τάσης) και για κάθε φορτίο, από τον κόμβο 1. Για την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων στους μικροελεγκτές, όλες οι πράξεις έγιναν με ακέραιους μη-προσημασμένους αριθμούς. Αποφεύχθηκαν έτσι σφάλματα από μετατροπές τιμών, οπότε στα αποτελέσματα του πίνακα θα πρέπει να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση για τον υπολογισμό της RMS τιμής της τάσης σε Volt.

Πίνακας 4-1 Μετρήσεις Μη-Βαθμονομημένης RMS Τάσης Φορτίων από τον Κόμβο 1.				
Φορτίο	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέση τιμή
Τοστιέρα και δύο αντιστάσεις σόμπας	131.000	131.000	130.000	131.000
Τοστιέρα και μια αντίσταση σόμπας	133.000	132.000	134.000	133.000
Σόμπα με δύο αντιστάσεις	133.000	133.000	136.000	134.000
Τοστιέρα	134.000	135.000	138.000	136.000
Σόμπα με μια αντίσταση	136.000	136.000	139.000	137.000
Λάμπα πυρακτώσεως	138.000	139.000	142.000	140.000
Σόμπα χωρίς αντιστάσεις	139.000	140.000	142.000	140.000

Στον Πίνακα 4-2 φαίνονται οι μετρήσεις με πολύμετρο των RMS τάσεων των φορτίων που συνδέθηκαν στον κόμβο 1.

Πίνακας 4-2 Μετρήσεις RMS Τάσης Φορτίου στον Κόμβο 1 με Πολύμετρο σε Volt (V).				
Φορτίο	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέση τιμή
Τοστιέρα και δύο αντιστάσεις σόμπας	227.100	227.700	227.400	227.400
Τοστιέρα και μία αντίσταση σόμπας	229.700	230.300	230.000	230.000
Σόμπα με δύο αντιστάσεις	230.600	231.200	230.900	230.900
Τοστιέρα	230.000	230.700	230.400	230.400
Σόμπα με μία αντίσταση	233.600	234.200	234.000	233.900
Λάμπα πυρακτώσεως	235.700	236.400	236.200	236.100
Σόμπα χωρίς αντιστάσεις	236.400	237.000	236.800	236.700

Στο Σχήμα 4-4 απεικονίζονται οι αντιστοιχίσεις των υπολογισμένων RMS τιμών του ADC (μη-βαθμονομημένες μετρήσεις RMS τάσης) για τον αισθητήρα τάσης και για κάθε φορτίο με τις πραγματικές τιμές του πολυμέτρου και η γραμμική εξίσωση που υπολογίστηκε. Πάνω σε αυτήν τη γραμμή εμφανίζονται οι τιμές που επιστρέφει ο κόμβος 1 μετά την βαθμονόμησή του.



Σχήμα 4-4 Σχέση μη-βαθμονομημένων μετρήσεων RMS τάσης του ασύρματου κόμβου 1 με τις μετρήσεις πραγματικών τιμών RMS τάσης με πολύμετρο για τα 7 φορτία.

Για την βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης [5]. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων RMS τάσης γίνεται εμφανής η σημαντική σχέση ανάμεσα

στην έξοδο του συστήματος και τον αισθητήρα τάσης. Υπολογίζοντας τον συντελεστή συσχέτισης r από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, βρέθηκε να είναι $r = 0.96$, μια θετική συσχέτιση. Από τις μετρήσεις σε όλο το εύρος περιοχής του συστήματος και χρησιμοποιώντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προσδιορίστηκαν οι παράμετροι a και b της γραμμικής εξίσωσης 4.1:

$$V_{RMS} = a * X_{SYS} + b \quad (4.1)$$

όπου X_{SYS} η έξοδος του συστήματος και V_{RMS} η τελική έξοδος μετά την βαθμονόμηση.

Με αυτόν τον τρόπο η συνάρτηση βαθμονόμησης του συστήματος μέτρησης για τον υπολογισμό της RMS τάσης στο φορτίο είναι $V_{RMS} = 1.04 * X_{SYS} + 91$ και έχει μέγιστο σχετικό σφάλμα 0.88 %.

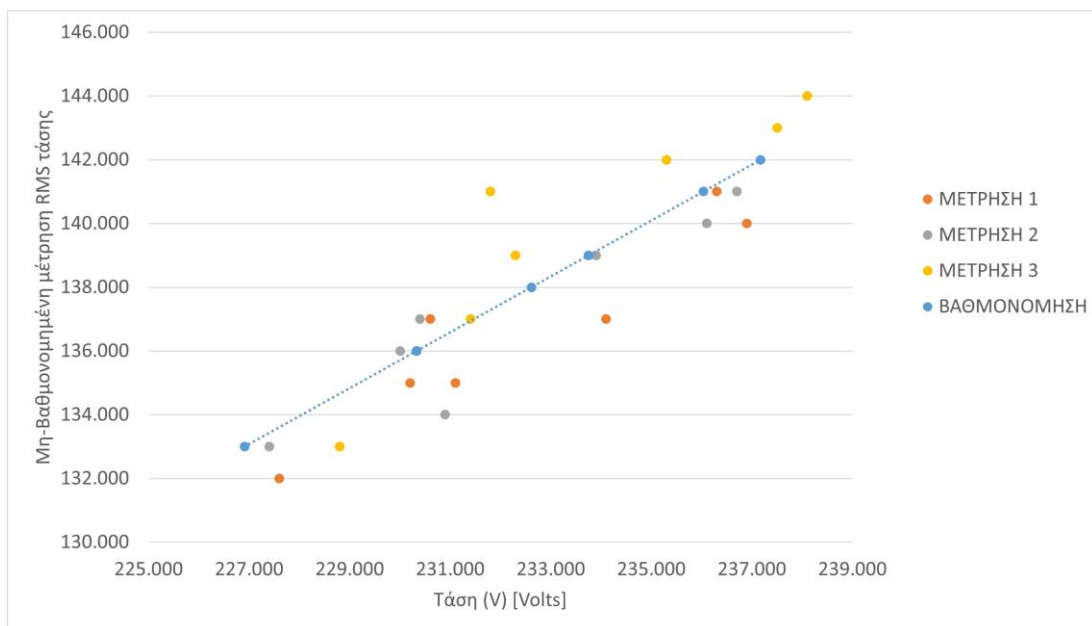
Στον Πίνακα 4-3 φαίνονται οι μετρήσεις μη-βαθμονομημένης RMS τάσης για κάθε φορτίο από τον κόμβο 2.

Πίνακας 4-3 Μετρήσεις Μη-Βαθμονομημένης RMS Τάσης Φορτίων από τον Κόμβο 2.				
Φορτίο	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέση τιμή
Τοστιέρα και δύο αντιστάσεις σόμπας	132.000	133.000	133.000	133.000
Τοστιέρα και μία αντίσταση σόμπας	135.000	136.000	137.000	136.000
Σόμπα με δύο αντιστάσεις	135.000	134.000	139.000	136.000
Τοστιέρα	137.000	137.000	141.000	138.000
Σόμπα με μία αντίσταση	137.000	139.000	142.000	139.000
Λάμπα πυρακτώσεως	141.000	140.000	143.000	141.000
Σόμπα χωρίς αντιστάσεις	140.000	141.000	144.000	142.000

Στον Πίνακα 4-4 φαίνονται οι μετρήσεις με πολύμετρο των RMS τάσεων των φορτίων που συνδέθηκαν στον κόμβο 2.

Πίνακας 4-4 Μετρήσεις RMS Τάσης Φορτίων στον Κόμβο 2 με Πολύμετρο σε Volt (V).				
Φορτίο	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέση τιμή
Τοστιέρα και δύο αντιστάσεις σόμπας	227.600	227.400	228.800	227.900
Τοστιέρα και μία αντίσταση σόμπας	230.200	230.000	231.400	230.500
Σόμπα με δύο αντιστάσεις	231.100	230.900	232.300	231.400
Τοστιέρα	230.600	230.400	231.800	230.900
Σόμπα με μία αντίσταση	234.100	233.900	235.300	234.400
Λάμπα πυρακτώσεως	236.300	236.100	237.500	236.600
Σόμπα χωρίς αντιστάσεις	236.900	236.700	238.100	237.200

Στο Σχήμα 4-5 απεικονίζονται οι αντιστοιχίσεις των μη-βαθμονομημένων μετρήσεων RMS τάσης των φορτίων με τις πραγματικές τιμές του πολυμέτρου και η γραμμική εξίσωση που υπολογίστηκε. Πάνω σε αυτήν τη γραμμή εμφανίζονται οι τιμές που επιστρέφει ο κόμβος 2 μετά την βαθμονόμησή του.



Σχήμα 4-5 Σχέση μη-βαθμονομημένων μετρήσεων RMS τάσης του ασύρματου κόμβου 2 με μέτρηση πραγματικής τιμής RMS τάσης με πολύμετρο για τα 7 φορτία.

Για την βαθμονόμηση του δεύτερου κόμβου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης, όπως και στον πρώτο ασύρματο κόμβο. Με την ίδια μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον πρώτο κόμβο υπολογίστηκε η συνάρτηση βαθμονόμησης του συστήματος μέτρησης για τον υπολογισμό της RMS τάσης στο φορτίο, ώστε να είναι $V_{RMS} = 1.14 * V_{SYS} + 75.5$. Το μέγιστο σχετικό σφάλμα που προκύπτει είναι 0.82 %.

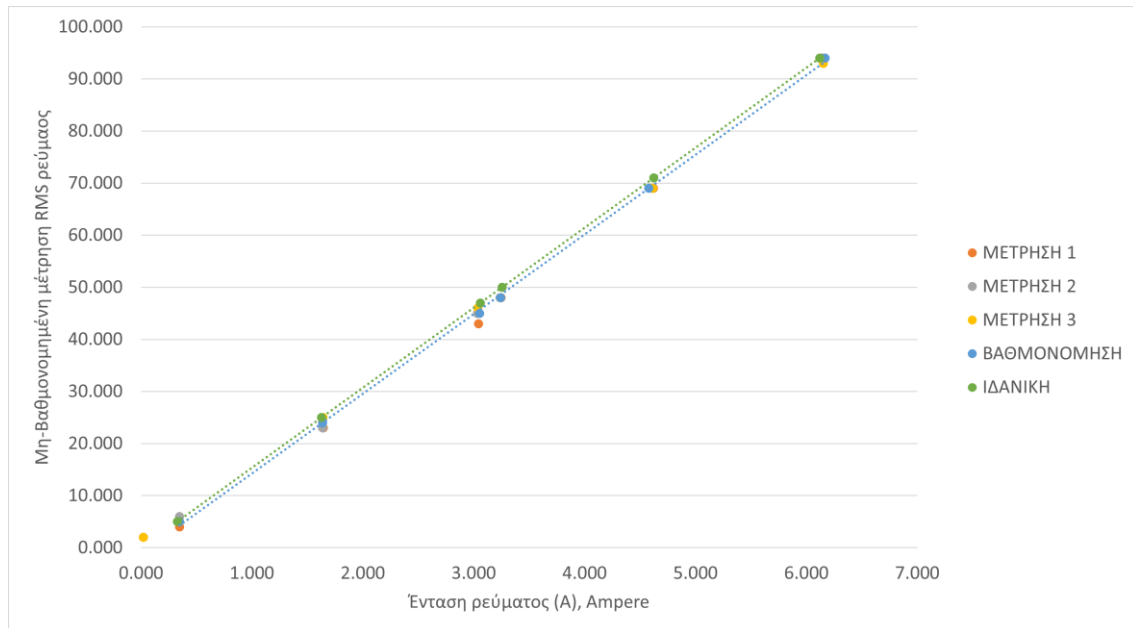
Στον Πίνακα 4-5 φαίνεται η μη-βαθμονομημένη RMS ένταση ρεύματος για κάθε φορτίο από τον κόμβο 1.

Πίνακας 4-5 Μετρήσεις Μη-Βαθμονομημένης RMS Έντασης Ρεύματος Φορτίου από τον Κόμβο 1.				
Φορτίο	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέση τιμή
Τοστιέρα και δύο αντιστάσεις σόμπας	94.000	94.000	93.000	94.000
Τοστιέρα και μία αντίσταση σόμπας	69.000	69.000	69.000	69.000
Σόμπα με δύο αντιστάσεις	48.000	48.000	48.000	48.000
Τοστιέρα	43.000	45.000	46.000	45.000
Σόμπα με μία αντίσταση	23.000	23.000	25.000	24.000
Λάμπα πυρακτώσεως	4.000	6.000	5.000	5.000
Σόμπα χωρίς αντιστάσεις	2.000	2.000	2.000	2.000

Στον Πίνακα 4-6 φαίνονται οι μετρήσεις με πολύμετρο των RMS εντάσεων ρεύματος των φορτίων που συνδέθηκαν στον κόμβο 1.

Πίνακας 4-6 Μετρήσεις RMS Έντασης Ρεύματος Φορτίου στον Κόμβο 1 με Πολύμετρο σε Ampere (A).				
Φορτίο	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέση τιμή
Τοστιέρα και δύο αντιστάσεις σόμπας	6.160	6.144	6.152	6.152
Τοστιέρα και μία αντίσταση σόμπας	4.620	4.608	4.614	4.614
Σόμπα με δύο αντιστάσεις	3.246	3.238	3.242	3.242
Τοστιέρα	3.041	3.032	3.036	3.036
Σόμπα με μία αντίσταση	1.642	1.638	1.639	1.640
Λάμπα πυρακτώσεως	0.346	0.345	0.345	0.346
Σόμπα χωρίς αντιστάσεις	0.020	0.020	0.020	0.020

Στο Σχήμα 4-6 απεικονίζονται οι αντιστοιχίσεις των υπολογισμένων RMS τιμών του ADC (μη-βαθμονομημένες μετρήσεις RMS έντασης ρεύματος) για τον αισθητήρα ρεύματος των φορτίων με τις πραγματικές τιμές του πολυμέτρου και η γραμμική εξίσωση που υπολογίστηκε. Πάνω σε αυτήν τη γραμμή εμφανίζονται οι τιμές που επιστρέφει ο κόμβος 1 μετά την βαθμονόμησή του.



Σχήμα 4-6 Σχέση μη-βαθμονομημένων μετρήσεων RMS έντασης ρεύματος του ασύρματου κόμβου 1 με μέτρηση πραγματικής τιμής RMS έντασης ρεύματος με πολύμετρο για τα 7 φορτία.

Ο αισθητήρας έντασης ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα που κατασκευάστηκε, σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων [6] της κατασκευάστριας εταιρίας είναι γραμμικός. Όπως αναφέρεται στη παράγραφο 3.2, η ευαισθησία του αισθητήρα σε συνδυασμό με την διακριτική ικανότητα του ADC δίνει θεωρητική ιδανική χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος την $I_{RMS} = 0.066 * X_{SYS}$.

Από τις μετρήσεις και όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3, η συνάρτηση βαθμονόμησης του συστήματος μέτρησης διαφέρει από την ιδανική. Για τον προσδιορισμό της πραγματικής συνάρτησης βαθμονόμησης του κόμβου, $I_{RMS} = a * X_{SYS} + b$, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι η έξοδος του συστήματος για τιμές ίσες και πάνω από 42 περιγράφεται από την συνάρτηση βαθμονόμησης $I_{RMS} = 0.063 * X_{SYS} + 0.189$ με μέγιστο σχετικό σφάλμα 0.76 %. Για τιμές κάτω από 42 περιγράφεται από την συνάρτηση βαθμονόμησης $I_{RMS} = 0.068 * X_{SYS} + 0.0055$ με μέγιστο σχετικό σφάλμα 0.15 %.

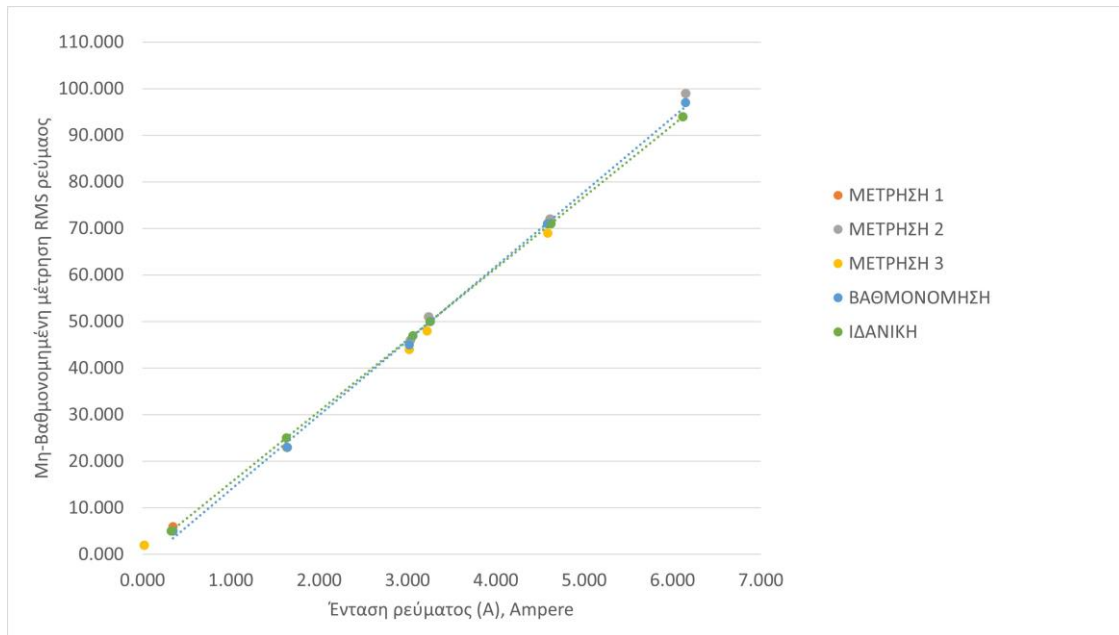
Στον Πίνακα 4-7 φαίνεται η μη-βαθμονομημένη RMS ένταση ρεύματος για κάθε φορτίο από τον κόμβο 2.

Πίνακας 4-7 Μετρήσεις Μη-Βαθμονομημένης RMS Έντασης Ρεύματος Φορτίου από τον Κόμβο 2.				
Φορτίο	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέση τιμή
Τοστιέρα και δύο αντιστάσεις σόμπας	99.000	99.000	94.000	97.000
Τοστιέρα και μία αντίσταση σόμπας	72.000	72.000	69.000	71.000
Σόμπα με δύο αντιστάσεις	50.000	50.000	48.000	49.000
Τοστιέρα	46.000	46.000	44.000	45.000
Σόμπα με μία αντίσταση	23.000	23.000	23.000	23.000
Λάμπα πυρακτώσεως	6.000	5.000	5.000	5.000
Σόμπα χωρίς αντιστάσεις	2.000	2.000	2.000	2.000

Στον Πίνακα 4-8 φαίνονται οι μετρήσεις με πολύμετρο των RMS εντάσεων ρεύματος των φορτίων που συνδέθηκαν στον κόμβο 2.

Πίνακας 4-8 Μετρήσεις RMS Έντασης Ρεύματος Φορτίου στον Κόμβο 2 με Πολύμετρο σε Ampere (A).				
Φορτίο	Μέτρηση 1	Μέτρηση 2	Μέτρηση 3	Μέση τιμή
Τοστιέρα και δύο αντιστάσεις σόμπας	6.146	6.152	6.114	6.138
Τοστιέρα και μία αντίσταση σόμπας	4.610	4.614	4.586	4.603
Σόμπα με δύο αντιστάσεις	3.239	3.242	3.222	3.234
Τοστιέρα	3.033	3.036	3.018	3.029
Σόμπα με μία αντίσταση	1.638	1.640	1.630	1.636
Λάμπα πυρακτώσεως	0.345	0.346	0.344	0.345
Σόμπα χωρίς αντιστάσεις	0.020	0.020	0.020	0.020

Στο Σχήμα 4-7 απεικονίζονται οι αντιστοιχίσεις των υπολογισμένων RMS τιμών του ADC (μη-βαθμονομημένες μετρήσεις RMS έντασης ρεύματος) για τον αισθητήρα ρεύματος των φορτίων με τις πραγματικές τιμές του πολυμέτρου και η γραμμική εξίσωση που υπολογίστηκε. Πάνω σε αυτήν τη γραμμή εμφανίζονται οι τιμές που επιστρέφει ο κόμβος 1 μετά την βαθμονόμησή του.



Σχήμα 4-7 Σχέση υπολογισμένης τιμής εξόδου ασύρματου κόμβου 2 με μέτρηση πραγματικής τιμής RMS έντασης ρεύματος με πολύμετρο για τα 7 φορτία.

Από τις μετρήσεις και όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-4, η συνάρτηση βαθμονόμησης του συστήματος διαφέρει από την ιδανική. Για τον προσδιορισμό της πραγματικής συνάρτησης βαθμονόμησης του κόμβου, $I_{RMS} = a * X_{SYS} + b$, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι η έξοδος του συστήματος για τιμές ίσες και πάνω από 28 περιγράφεται από την συνάρτηση βαθμονόμησης $I_{RMS} = 0.060 * X_{SYS} + 0.308$ με μέγιστο σχετικό σφάλμα 0.73 %, ενώ για τιμές κάτω από 28 από την εξίσωση $I_{RMS} = 0.072 * X_{SYS} - 0.014$ με μέγιστο σχετικό σφάλμα 0.15 %.

5.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ένα ηλεκτρονικό σύστημα για την διαχείριση της ενέργειας μιας κατοικίας. Σχεδιάστηκε ώστε να είναι χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης και με μεγάλη ακρίβεια. Χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο IEEE 802.15.4 για τη λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Αυτό πέτυχε να κρατήσει χαμηλά το κόστος της ασύρματης λειτουργίας του συστήματος, χωρίς όμως να το περιορίσει με κάποιον τρόπο.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν την μεγάλη σημασία που έχει η επιλογή των αισθητήρων. Στην περίπτωση του ρεύματος του φορτίου, χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας κλειστού βρόχου με αντιστάθμιση, ο οποίος δεν επηρεάζεται από την θερμοκρασία και την αλλαγή στο φορτίο. Αντιθέτως, ο αισθητήρας τάσης που χρησιμοποιήθηκε, επηρεάζεται από το φορτίο που πρέπει να τροφοδοτεί αλλά και από διακυμάνσεις στην θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα στο οποίο λειτουργεί ο κόμβος. Μία βελτίωση που μπορεί να γίνει στους κόμβους είναι να διαχωριστεί ο μετασχηματιστής ώστε να παρέχει αποκλειστικά ισχύ στον κόμβο και να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός αισθητήρας για μέτρηση της τάσης.

Το σύστημα μέτρησης και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας που υλοποιήθηκε μπορεί να αυτοματοποιηθεί, αξιοποιώντας έναν αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας και θέτοντας αποδεκτές τιμές κατανάλωσης για κάποια χρονικά διαστήματα. Με αυτόν τον τρόπο ο

έλεγχος και οι αποφάσεις για την λειτουργία ή όχι των επιμέρους ηλεκτρικών συσκευών, αλλά και την επιλογή των φορτίων στην κατοικία, θα λαμβάνονται αυτοματοποιημένα, με τον χρήστη μόνο να επιλέγει επίπεδα κατανάλωσης και το σύστημα να κάνει όλους τους υπολογισμούς και τις ενέργειες που απαιτούνται.

Με την μεγάλη ανάπτυξη που έχει το Internet of Things (IoT) και με τα έξυπνα δίκτυα που διαμορφώνονται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να είναι αποδοτικά και φιλικά προς το περιβάλλον, συμπεραίνεται ότι το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που υλοποιήθηκε μπορεί να συμμετάσχει σε μια τέτοια προσπάθεια. Το IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN) του Internet Engineering Task Force (IETF), βασιζόμενο στην ιδέα ότι και η πιο μικρή συσκευή πρέπει να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο, έχει δημιουργήσει μηχανισμούς που ενθυλακώνουν και συμπιέζουν κεφαλίδες ώστε πακέτα IP6ν να μπορούν να σταλούν και να ληφθούν από δίκτυα με IEEE 802.15.4. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα που συλλέγει το σύστημα που κατασκευάστηκε σε αυτή την εργασία, μπορούν να αποθηκευτούν στο Υπολογιστικό Νέφος. Οπουδήποτε με πρόσβαση στον παγκόσμιο ιστό και με κατάλληλα διαμορφωμένη ιστοσελίδα θα υπάρχει δυνατότητα για εμφάνιση των μετρήσεων του συστήματος, αλλά και απομακρυσμένης πρόσβασης στους ασύρματους κόμβους και κατ' επέκταση του ελέγχου της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της κατοικίας.

6.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks," in *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, pp. 1-800, July 2020.
- [2] LEM, "Isolated current and voltage transducers Characteristics - Applications - Calculations", 3rd Edition, Publication CH 24101 E/US (05.04 • 15/8 • CDH).
- [3] Horowitz, Paul, Winfield Hill, "The Art of Electronics", 3rd Edition., Cambridge University Press, 2015.
- [4] Thai Lin Radio Coil Manufactory Limited, "Energy Related Products (ErP) Encapsulated Transformer Type EI30", 086-088, Feb 2013.
- [5] Καλαιτζάκης Κ., Κουτρούλης Ε. "Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2010.
- [6] Texas Instruments, "LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers", SNOSBT3I, Jan 2000, Revised Dec. 2014.
- [7] LEM, "Current Transducer LTS 25 - NP", N° 97.37.19.000.0 [Version 23], Aug 2017.
- [8] Texas Instruments, "LM317 3-Terminal Adjustable Regulator", SLVS044Y, Sep 1997, Revised Apr. 2020.
- [9] MulticompPro, "Power Relays HRS4", 3176360, Dec. 2020.
- [10] Microchip, "ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P", DS40002061B, May 2019, Rev. B Sept. 2020.
- [11] Microchip, "32-bit AVR MicrocontrollerAT32UC3A3256S", 32072H-AVR32, Nov. 2012.

- [12] Microchip, “Low Power 2.4 GHz Transceiver for ZigBee, IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, RF4CE, SP100, WirelessHART and ISM Applications - AT86RF231”, 8111C, Sept. 2009.
- [13] Microchip, “AVR UC3 32-bit Microcontrollers STK600 User Guide”, 32221A, Apr. 2016.
- [14] Texas Instruments, “LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors”, SNIS159H, Aug. 1999, Revised Dec. 2017.