



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και κατασκευή ψηφιακού καταγραφέα στις πλατφόρμες
Raspberry Pi και Arduino για σύνδεση σε εφαρμογές μικρών
ανεμογεννητριών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Α. Καραΐσκος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Αθήνα, Μάρτιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και κατασκευή ψηφιακού καταγραφέα στις πλατφόρμες
Raspberry Pi και Arduino για σύνδεση σε εφαρμογές μικρών
ανεμογεννητριών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Α. Καραΐσκος

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε απο την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16^η Μαρτίου 2016

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

.....

Σταύρος Σ. Παπαθανασίου

.....

Παύλος Γεωργιλιάκης

Αθήνα, Μάρτιος 2016

.....

Κωνσταντίνος Α. Καραϊσκος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Κωνσταντίνος Α. Καραϊσκος, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή άλλης φύσεως, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δε πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση και κατασκευή ενός ψηφιακού καταγραφέα ανοιχτού κώδικα και χαμηλού κόστους για την σύνδεση σε εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών. Η υλοποίηση έγινε με βάση τις πλατφόρμες του Arduino και του Raspberry Pi. Για τις ανάγκες της εφαρμογής σχεδιάστηκε πρότυπη αναπτυξιακή πλακέτα και πραγματοποιήθηκαν πειράματα μέτρησης της ακρίβειας του συστήματος για εναλλασσόμενη τάση και ρεύμα, συνεχή τάση και ρεύμα και μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου.

Αρχικά, εισάγονται οι βασικές έννοιες και τα χαρακτηριστικά των μικρών ανεμογεννητριών και ιδιαίτερα στα πρότυπα μέτρησης των μικρών ανεμογεννητριών, καθώς και οι λόγοι επιλογής υλοποίησης της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι έννοιες του μικροελεγκτή και του μικροεπεξεργαστή και παρουσιάστηκαν οι αρχιτεκτονικές των ενσωματωμένων συστημάτων και των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή. Αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων και παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές μέτρησης των ηλεκτρικών μεγεθών παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που αφορούν την προεπεξεργασία, την δειγματοληψία και την μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.

Έπειτα, περιγράφεται ο γενικός στόχος όσον αφορά την επιλογή των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του καταγραφέα, δηλαδή των ενσωματωμένων, των αισθητήρων και των A/D μετατροπέων καθώς και οι λόγοι της επιλογής.

Η διαδικασία σχεδίασης της αναπτυξιακής πλακέτας στην πλατφόρμα του Raspberry Pi και της πλακέτας του Arduino, εξηγείται αναλυτικά στη συνέχεια. Περιγράφεται, επίσης, η διαδικασία υλοποίησης του λογισμικού που αφορά των κομμάτι της επικοινωνίας των ολοκληρωμένων με τον μικροελεγκτή, τις βασικές διαδικασίες μέτρησης των τιμών που υλοποιήθηκαν και η διαδικασία βαθμονόμησης.

Τέλος, περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν τόσο σε εργαστηριακές συνθήκες, όσο και στην ανεμογεννήτρια για την εξακρίβωση της ακρίβειας του συστήματος και των περιορισμών που υπάρχουν.

Λέξεις κλειδιά: καταγραφέας, σύστημα συλλογής δεδομένων, αισθητήρες, οργανολογία, μικρές ανεμογεννήτριες, μικροελεγκτές, μικροί υπολογιστές, ανοιχτός κώδικας, εφαρμογές χαμηλού κόστους, ακρίβεια, Raspberry Pi, Arduino, μέτρηση ενέργειας, SPI, πρωτόκολλα επικοινωνίας

Abstract

The purpose of this thesis is the planning and constructing of a low cost, open source data logger, for connection to small wind turbines. The implementation was based on Arduino and Raspberry Pi platforms. For the project needs, we designed a standard board and conducted experiments about the accuracy of the system regarding ac voltage and current, dc voltage and current and wind speed.

At first, basic characteristics of small turbines are introduced, along with the reasons we chose this application. Then, we take a look at the basics of microcontrollers and microprocessors and we present the architectures of embedded systems and communication protocols used in the application. Basic concepts about sensors are discussed and measuring techniques of electrical parameters are presented, along with their pros and cons. Moreover, preprocessing, sampling and analog to digital conversion are discussed.

We describe the basic target regarding the choice of elements used in the implementation of the data logger (the embedded systems, the sensors and the A/D converters). The procedure of desiging of the Raspberry Pi's and Arduino's boards is presented next. Additionally, the implementation procedure of the software regarding the communication between the embedded systems and the microprocessors is presented, such as the calibration procedure.

Finally, the laboratory and turbine experiments are thoroughly described, in order to discuss the accuracy of the system and the existing restrains.

Key words: data logger, data acquisition system, sensors, instrumentation, small wind turbines, microcontrells, mini computers, open source, low cost, Raspberry Pi, Arduino, energy metering, analog to digital converters, communication protocols, SPI

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλους, τον Αθανάσιο Βασιλάκη και τον Θωμά Πάζιο για την καθοδήγηση και την υπομονή τους καθόλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον Κώστα Λατούφη και όλα τα παιδιά του εργαστηρίου για την βοήθεια και τις υποδείξεις τους. Ιδιαίτερα ευχαριστώ στον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π, για την υποστήριξη της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ το hackerspace και ιδιαίτερα τον Άγη, για την παραχώρηση του χώρου για την εκτύπωση των πλακετών. Τον Χρήστο και τον Παναγιώτη για την στήριξη τους και την βοήθεια τους.

**Στους γονείς μου
και τη θεία μου**

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	17
1.1 Σκοπός.....	17
1.2 Μικρές ανεμογεννήτριες.....	17
1.2.1 Ενδιάμεση τεχνολογία.....	18
1.2.2 Τοπικά κατασκευασμένες ανεμογεννήτριες.....	19
1.2.3 Η ανεμογεννήτρια Hugh Piggot.....	19
1.3 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών.....	20
1.3.1 Χαρακτηριστικά ισχύος.....	20
1.3.2 Κατανομή ανέμου.....	21
1.3.3 Περιορισμός της ισχύος.....	22
1.4 Σύνδεση ανεμογεννητριών.....	23
1.4.1 Η AC σύνδεση.....	23
1.4.2 Η DC σύνδεση.....	24
1.5 Μετρήσεις ανεμογεννητριών.....	26
1.5.1 Τοποθεσία δοκιμών ανεμογεννήτριας.....	26
1.5.2 Εξοπλισμός μετρήσεων.....	27
1.6 Συστήματα Συλλογής Δεδομένων (Data Acquisition).....	30
1.6.1 Ψηφιακός Καταγραφέας Δεδομένων (data logger).....	31
1.6.2 Χαρακτηριστικά καταγραφών.....	31
Κεφάλαιο 2: Μικροελεγκτές και Μικροϋπολογιστές.....	33
2.1 Ενσωματωμένα συστήματα.....	33
2.1.1 Επεξεργαστής.....	34
2.1.2 Μνήμη.....	34
2.1.3 Περιφερειακές συσκευές.....	35

2.1.4 Διεπαφή χρήστη (User interface).....	35
2.2 Μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές και μικροϋπολογιστές.....	36
2.3 Οι επεξεργαστές ARM.....	37
2.3.1 Αρχιτεκτονική RISC.....	38
2.3.2 Αρχιτεκτονική ARM.....	39
2.4 Οι μικροελεγκτές AVR.....	39
2.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας.....	41
2.5.1 SPI.....	41
Κεφάλαιο 3: Αισθητήρες και μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών.....	47
3.1 Ορισμός.....	47
3.2 Ταξινόμηση των αισθητηρων.....	47
3.3 Χαρακτηριστικά αισθητήρων.....	48
3.3.1 Συνάρτηση μεταφοράς.....	48
3.3.2 Εύρος ή Πλήρης Κλίμακα Εισόδου.....	50
3.3.3 Πλήρης Κλίμακα Εξόδου.....	50
3.3.4 Ακρίβεια.....	50
3.3.5 Βαθμονόμηση.....	51
3.3.6 Σφάλμα βαθμονόμησης.....	53
3.3.7 Υστέρηση.....	54
3.3.8 Κορεσμός.....	54
3.3.9 Επαναληψιμότητα.....	55
3.3.10 Νεκρή Ζώνη.....	55
3.3.11 Διακριτική Ικανότητα.....	55
3.4 Μέτρηση ρεύματος.....	55
3.4.1 Αντιστάσεις.....	56

3.4.2 Μετασχηματιστές ρεύματος.....	57
3.4.3 Πηνίο Rogowski.....	60
3.4.4 Hall Effect transducers.....	62
3.5 Μέτρηση Τάσης.....	66
3.5.1 Απευθείας σύνδεσης.....	66
3.5.2 Διαρέτης τάσης.....	67
3.5.3 Hall Effect μετατροπείς τάσης.....	68
3.5.4 Ενισχυτές.....	69
3.6 Συνοπτική παρουσίαση.....	71
Κεφάλαιο 4: Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.....	73
4.1 Επεξεργασία σημάτων.....	73
4.1.1 Ενίσχυση.....	74
4.1.2 Διέγερση.....	74
4.1.3 Γραμμικοποίηση.....	74
4.1.4 Απομόνωση.....	75
4.1.5 Φιλτράρισμα.....	75
4.2 Μετατροπείς αναλογικού-σε-ψηφιακό σήμα (Analog-to-digital converters – ADC)....	75
4.2.1 Κβαντοποίηση του σήματος.....	76
4.2.2 Θεωρία δειγματοληψίας.....	77
4.2.3 Σφάλματα A/D μετατροπέων.....	79
4.3 Αρχιτεκτονικές μετατροπέων.....	83
4.3.1 Direct-conversion ή flash ADC.....	83
4.3.2 Successive-approximation (SAR) ADC.....	84
4.3.3 Ramp-compare ADC.....	84
4.3.4 Wilkinson ADC.....	84

4.3.5 Integrating ADC.....	85
4.3.6 Σ-Δ ADC.....	85
4.3.7 Pipeline ADC.....	85
Κεφάλαιο 5: Επιλογή στοιχείων.....	87
5.1 Επιλογή μετατροπέων αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.....	88
5.1.1 Μέτρηση AC κυκλώματος.....	88
5.1.2 Μέτρηση DC κυκλώματος και μετεωρολογικών αισθητήρων.....	93
5.2 Επιλογή αισθητήρων.....	96
5.2.1 Μέτρηση τάσης.....	96
5.2.2 Μέτρηση εναλλασσόμενου ρεύματος.....	97
5.2.3 Μέτρηση συνεχούς ρεύματος.....	99
5.2.4 Εξοπλισμός μετεωρολογικών μετρήσεων.....	99
5.2.5 Μέτρηση ταχύτητας ανέμου.....	99
5.3 Επιλογή μικροελεγκτή/υπολογιστή.....	101
5.3.1 Raspberry Pi.....	103
5.3.2 Arduino.....	103
Κεφάλαιο 6: Σχεδίαση Υλικού.....	105
6.1 Σχεδίαση αναπτυξιακής πλακέτας για το Raspberry Pi.....	106
6.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά της πλακέτας.....	106
6.1.2 Επικοινωνία Raspberry Pi με τους A/D μετατροπείς.....	113
6.1.3 Σύνδεση των δύο περιφερειακών στον διάυλο SPI.....	114
6.1.4 Γειώσεις.....	115
6.1.5 Ταλαντωτής.....	116
6.2 Σχεδίαση πλακέτας για το Arduino.....	117
6.2.1 Είσοδος εναλλασσόμενου ρεύματος.....	118

6.2.2	Είσοδος εναλλασσόμενης τάσης.....	119
6.2.3	Επικοινωνία ADE7758 με Arduino.....	119
6.3	Σχεδίαση κυκλώματος τροφοδοσίας.....	120
6.3.1	Τροφοδοσία ADE7758.....	121
6.3.2	Τροφοδοσία LM2907 και AD7327.....	122
6.3.3	Τροφοδοσία Raspberry Pi.....	123
6.3.4	Τροφοδοσία transducer μέτρησης ρεύματος.....	123
Κεφάλαιο 7:	Διάταξη του καταγραφέα.....	125
7.1	Μέτρηση Ισχύος.....	125
7.1.1	Μονοφασικό.....	126
7.1.2	Τριφασική Διάταξη Τεσσάρων Καλωδίων.....	127
7.1.3	Τριφασική μέτρηση τριών καλωδίων.....	129
7.2	Διάταξη DC και μετεωρολογικών αισθητήρων.....	131
7.3	Γενική περιγραφή του καταγραφέα.....	132
Κεφάλαιο 8:	Λογισμικό.....	133
8.1	Λογισμικό Arduino.....	133
8.2	Λογισμικό Raspberry Pi.....	133
8.3	Υλοποίηση SPI.....	134
8.3.1	Υλοποίηση SPI Arduino.....	135
8.3.2	Υλοποίηση SPI στο Raspberry Pi.....	137
8.4	Υλοποίηση βασικών λειτουργιών.....	140
8.4.1	ADE7758.....	140
8.4.2	AD7327.....	144
8.5	Διαδικασία βαθμονόμησης.....	147
8.5.1	Βαθμονόμηση εισόδων στο ADE7758.....	147

8.5.2 Βαθμονόμηση εισόδων στο AD7327.....	155
Κεφάλαιο 9: Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών.....	157
9.1 Μετρήσεις ρεύματος της γεννήτριας για επιλογή μετασχηματιστή.....	158
9.2 Εργαστηριακές μετρήσεις φασικής τάσης.....	167
9.3 Μετρήσεις τάσης μίας φάσης και συχνότητας της γεννήτριας.....	170
9.4 Εργαστηριακές μετρήσεις πολικών μεγεθών AC ρεύματος και τάσης.....	172
9.5 Μέτρηση μονοφασικής ισχύος.....	175
9.6 Μέτρηση Τριφασικής ισχύος.....	177
9.7 Μέτρηση συνεχούς τάσης και ρεύματος.....	178
9.8 Μέτρηση συχνότητας – ταχύτητας ανέμου.....	180
Συμπεράσματα και βελτιωτικές προτάσεις.....	183
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	186
Παράρτημα Α :Σχέδια των πλακετών.....	186
Παράρτημα Β :Παρουσίαση της πλατφόρμας του Raspberry Pi και Arduino.....	188
Παράρτημα Γ :Κώδικας.....	195
Βιβλιογραφία.....	196

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Σκοπός της εργασίας ήταν η σχεδίαση και η κατασκευή ενός καταγραφέα ανοιχτού κώδικα , χαμηλού κόστους και υψηλής ακρίβειας για την μέτρηση και καταγραφή δεδομένων σε εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών.

Η φιλοσοφία του ανοιχτού κώδικα (open source) προωθεί την ιδέα της καθολικής πρόσβασης μέσω ελεύθερων αδειών στο σχέδιο ενός προϊόντος, καθώς και στην καθολική αναδιανομή του εν λόγω σχεδίου, συμπεριλαμβανομένων και των μεταγενέστερων βελτιώσεων για συγκεκριμένες άδειες. Η φιλοσοφία αυτή ενισχύει την δημιουργία ανοιχτών κοινοτήτων δημιουργίας και μοιράσματος της γνώσης ελεύθερα.

Η επιλογή δημιουργίας ενός καταγραφέα ανοιχτού κώδικα έγινε ως συνέχεια της λογικής κατασκευής μικρών ανεμογεννητριών. Επίσης, η δημιουργία ενός project ανοιχτού κώδικα δημιουργεί τις βάσεις της συνεργασίας, ενώ αυξάνει και την λειτουργικότητα ενός προϊόντος καθώς τα σχέδια του είναι ανοιχτά σε όλους για βελτιώσεις.

Η σχεδίαση έγινε με βάση τις πλατφόρμες Raspberry Pi και Arduino. Η επιλογή των δύο έγινε γιατί αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικές λογικές, τους μικρούς υπολογιστές και τους μικροελεγκτές.

Στη συνέχεια, έγινε η επιλογή των μετατροπέων αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και των αισθητήρων μέτρησης. Η σχεδίαση του μετρητικού είχε σαν βασικό στόχο την ακρίβεια μέτρησης των μεγεθών ισχύος της γεννήτριας, των DC μεγεθών, καθώς και των απαραίτητων μετεωρολογικών δεδομένων της ανεμογεννήτριας.

1.2 Μικρές ανεμογεννήτριες

Το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει στην ολοένα και μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως για παράδειγμα η αιολική, η γεωθερμική, η ηλιακή κ.ά. Οι συνθήκες που ευνοούν αυτό το φαινόμενο είναι η χαμηλή εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα, το χαμηλότερο κόστος παραγωγής καθώς και η εκμάθηση μεθόδων κατασκευής και παραγωγής ενέργειας από ολόκληρες κοινωνικές ομάδες, οι οποίες είναι αποκλεισμένες από τις συμβατικές μορφές παραγωγής (πχ υδρογονάνθρακες).

Παρόλα αυτά, η μεγάλης κλίμακας συγκεντρωτική παραγωγή δεν εξυπηρετεί πάντα τις ανάγκες της τοπικής κοινωνίας. Πολλές φορές έχουν υπάρξει αντιδράσεις που αφορούν περιβαλλοντικές συνέπειες των μεγάλων σταθμών παραγωγής όσο και τον τρόπο διαχείρισης τους. Γι αυτό αντιπροτείνεται η λύση των μικρών πηγών παραγωγής ενέργειας. Όσον αφορά τις μικρής κλίμακας εφαρμογές , εννοούμε κατασκευές με ονομαστική ισχύ κάτω από 70kW,

ενώ, πιο συγκεκριμένα, ανεμογεννήτριες με ονομαστική ισχύ 10kW και κάτω χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα μικρές. Η σύνδεση τους γίνεται είτε στο δίκτυο χαμηλής τάσης, είτε, σε περιπτώσεις που η σύνδεση στο δίκτυο είναι αδύνατη, αυτόνομα. Χαρακτηριστικό των μικρών ανεμογεννητριών είναι η καμπύλη ισχύος που επιτρέπει τον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που παράγεται στη διάρκεια ενός έτους και ονομάζεται ενεργειακή απόδοση. Η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται από την κατανομή του ανέμου.

Στο γενικότερο κοινωνικό πλαίσιο οι μικρές εφαρμογές επιτρέπουν την αυτονόμηση και τον έλεγχο της παραγωγής από κοινότητες ανθρώπων. Η κατασκευή, η συντήρηση κι ο έλεγχος της τεχνολογίας από τους ίδιους τους ανθρώπους της κοινότητας, χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις δημιουργεί συνθήκες συλλογικής δουλειάς με αρκετές προεκτάσεις σε οικονομικό, κοινωνικό και κατ' επέκταση πολιτικό πεδίο. Η διάδοση της γνώσης οδηγεί σε ευκολότερη κατανόηση των αναγκών και της οριζόντιας ανάπτυξης της κοινωνικής ζωής.

1.2.1 Ενδιάμεση τεχνολογία

Η ενδιάμεση τεχνολογία (intermediate technology) ή αλλιώς κατάλληλη τεχνολογία (appropriate technology) είναι τεχνολογία μικρής κλίμακας, αποκεντρωμένη, τοπικά ελεγχόμενη, εντάσεως – εργασίας και φιλική προς το περιβάλλον. Βασίζεται στην αντίληψη πως οι ανθρώπινες κοινωνίες χρειάζεται να έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν άμεσα για το μέλλον τους σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες τους και έχει στόχο να τις ενδυναμώσει προς αυτή την κατεύθυνση. Ο όρος “ενδιάμεση τεχνολογία” διατυπώθηκε πρώτη φορά το 1973 στο βιβλίο του E.F.Schumacher, “Small is Beautiful: A Study of Economics As If People Mattered”.

Οι εφαρμογές ενδιάμεσης τεχνολογίας έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο
- Δίνουν έμφαση στην χρήση τοπικών πρώτων υλών, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού
- Είναι πιο παραγωγικές από πολλές παραδοσιακές τεχνολογίες, αν και χρειάζονται σχετικά εντατική εργασία κατά την κατασκευή τους.
- Είναι αρκετά μικρές σε κλίμακα έτσι ώστε να είναι οικονομικά προσιτές σε οικογενειακό ή κοινοτικό επίπεδο.
- Είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας τους, ο έλεγχος και η συντήρηση τους από τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν την τεχνολογία χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση.
- Μπορεί να παραχθεί η τεχνολογία σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών και κοινοτήτων.
- Προϋποθέτουν τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης.

- Προσφέρουν ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της.
- Είναι ευέλικτες και μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά μέρη και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή χωρίς να προκαλούν βλάβες στο περιβάλλον.
- Σχεδιάζονται για να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (planned obsolescence).

Η ενδιάμεση τεχνολογία αποτελεί μεν ένα συμβιβασμό σε σχέση με τη δυτική υψηλή τεχνολογία αλλά και μία επανεξέταση του ορισμού της τεχνολογίας και των σκοπών που αυτή εξυπηρετεί[2].

1.2.2 Τοπικά κατασκευασμένες ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες είναι τεχνολογίες ιδιαίτερα κατάλληλες για παραγωγή μικρής κλίμακας και επιλέγονται ήδη ως βιώσιμες εναλλακτικές των συμβατικών γεννητριών στην ύπαιθρο και σε απομακρυσμένες περιοχές. Συγκεκριμένα για εφαρμογές σε αγροτικές εγκαταστάσεις, οι ανεμογεννήτριες έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν καταλαμβάνουν μεγάλες επιφάνειες γης που θα μπορούσε να καλλιεργηθεί.

Η σύνδεση των ανεμογεννητριών, όπως αναφέραμε μπορεί να γίνει είτε κατευθείαν στο δίκτυο χαμηλής τάσης, είτε σαν αυτόνομες εγκαταστάσεις αποθηκεύοντας την ενέργεια τους σε συσσωρευτές. Αυτή η τοπολογία έχει δοκιμαστεί στο χρόνο και έχει αποδειχθεί απλή, αξιόπιστη και ευέλικτη. Χάρη στα σχέδια που έχουν εκδοθεί ([3] , [4]) και σε πρακτικά σεμινάρια που διεξάγονται για την κατασκευή μικρών ανεμογεννητριών, δίνεται η δυνατότητα σε ανθρώπους χωρίς εξειδικευμένη γνώση και με απλά εργαλεία και υλικά να κατασκευάσουν οι ίδιοι μια μικρή ανεμογεννήτρια καθώς και να τη συντηρούν και να την επισκευάζουν. Λόγω της δημοτικότητας και της χρησιμότητας αυτών των αυτόνομων συστημάτων είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία τους.

Σήμερα το ένα τρίτο περίπου του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα και φθηνά και να ηλεκτροδοτήσουν σχολεία, κλινικές και άλλα ζωτικά κέντρα μιας κοινότητας, συμβάλλοντας στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων της. Άλλες εφαρμογές που μπορούν να έχουν σε αγροτικό επίπεδο είναι η σύνδεση τους με αντλίες νερού για ύδρευση και άρδευση και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε κέντρα φόρτισης συσσωρευτών.

1.2.3 Η ανεμογεννήτρια Hugh Piggot

Η μελέτη και η σχεδίαση της εφαρμογής του καταγραφέα έγινε με βάση την ανεμογεννήτρια Hugh Piggot [3].



Εικόνα 1.1: Η ανεμογεννήτρια Hugh Piggot

Το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας είναι η δυνατότητα ιδιοκατασκευής της, χρησιμοποιώντας υλικά όπως ξύλο, χάλυβα, χαλκό και απλά εργαλεία χωρίς να προϋποθέτει κάποια ιδιαίτερη εμπειρία. Επίσης, λόγω της απουσίας πυρήνα στο στάτη έχει υψηλή απόδοση και μηδενική ροπή ευθυγράμμισης, κάτι που της επιτρέπει να εκκινεί σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Τέλος, είναι σημαντικές και οι εκπαιδευτικές δυνατότητες που προσφέρει, εφόσον μέσα από την κατασκευή και λειτουργία της, μπορούν φοιτητές και μαθητές να κατανοήσουν τις βασικές έννοιες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των ηλεκτρικών μηχανών και της αεροδυναμικής.

1.3 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

1.3.1 Χαρακτηριστικά ισχύος

Η μηχανική ισχύς που μπορεί να δεσμευτεί από τον άνεμο είναι γνωστό ότι δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$P_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \pi \cdot R_{turb}^2 \cdot V_w^3 \quad (1.1)$$

όπου

- ◆ ρ – η πυκνότητα του ανέμου
- ◆ c_p – ο αεροδυναμικός συντελεστής
- ◆ R_{turb} – η ακτίνα της φτερωτής
- ◆ V_w – η ταχύτητα του ανέμου

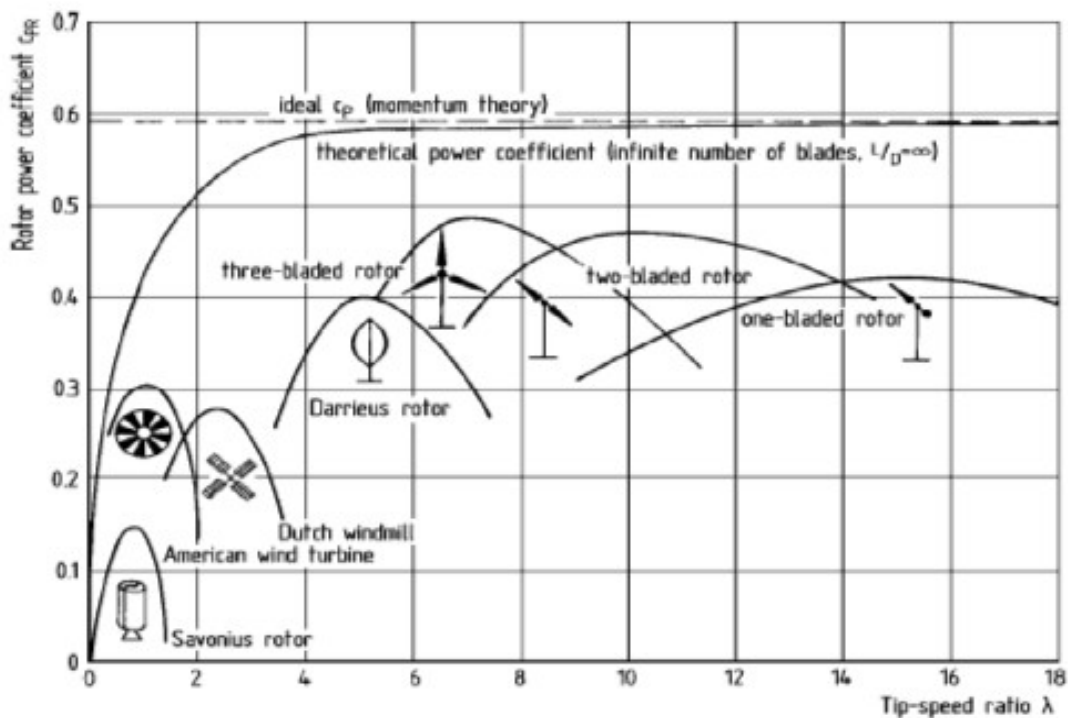
Ο αεροδυναμικός συντελεστής υπόκειται σε κάποιους θεωρητικούς περιορισμούς, σύμφωνα με το νόμο του Betz ο οποίος δείχνει ως μέγιστη τιμή το 0.593. Επίσης, οι τιμές του δε μένουν σταθερές αλλά μεταβάλλονται ανάλογα με τις τιμές του ανέμου, την ακτίνα της φτερωτής και τις στροφές της γεννήτριας σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$\lambda = \omega \cdot \frac{R_{turb}}{V_w} \quad (1.2)$$

όπου

- ♦ ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας.

Το κλάσμα αυτό αναφέρεται ως λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι άμεση συνάρτηση του λόγου αυτού. Παρακάτω παρατίθενται οι μεταβολές του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με το λ και το βήμα πτερυγίου θ , που είναι αεροδυναμική κατασκευαστική παράμετρος που επηρεάζει τη συμπεριφορά των πτερυγίων κατά την πρόσπτωση ανέμου πάνω τους.



Εικόνα 1.2: Η μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή

1.3.2 Κατανομή ανέμου

Αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο όταν εξετάζουμε μια ανεμογεννήτρια είναι η ενεργειακή της παραγωγή, το μέγεθος δηλαδή εκείνο που μας δίνει μια εικόνα της παραγωγής ενέργειας σε διάστημα ενός έτους. Είναι προφανές ότι από τη στιγμή που ο άνεμος δε μπορεί να είναι σταθερός σε διάστημα ενός έτους συνεχόμενα και η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας δε θα είναι σταθερή, μιας και αλλάζει τόσο το C_p όσο και το λ . Επομένως για να ξεπεράσουμε το στοχαστικό αυτής της κατάστασης θα χρησιμοποιήσουμε μια κατανομή ανέμου. Έτσι σύμφωνα με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull η κατανομή του ανέμου σε μία θέση περιγράφεται από την εξής σχέση Q:

$$h(V_w) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V_w}{c}\right)^{(k-1)} \cdot e^{-\left(\frac{V_w}{c}\right)^k} \quad (1.3)$$

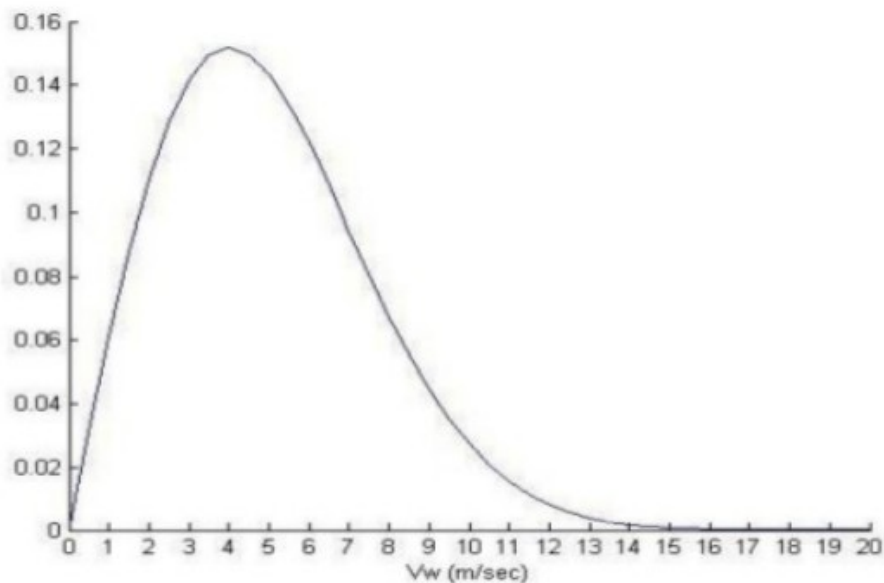
Όπου

- ◆ k - η παράμετρος μορφής
- ◆ c - η παράμετρος κλίμακας.

Για την περιοχή της Ελλάδας έχουμε k=1.5-2 και για την τιμή 2 έχουμε τη κατανομή Rayleigh:

$$h(V_w) = \frac{2}{c^2} \cdot V_w \cdot e^{-\left(\frac{V_w}{c}\right)^2} \quad (1.4)$$

Με μέση τιμή ανέμου τα 5 m/sec και c = 0.35 έχουμε και την παρακάτω μορφή της κατανομής :



Εικόνα 1.3: Η κατανομή ανέμου για μέση τιμή ανέμου 5m/s

1.3.3 Περιορισμός της ισχύος

Τα ονομαστικά μεγέθη κάθε ανεμογεννήτριας ουσιαστικά προσδιορίζουν και μία συγκεκριμένη τιμή ανέμου μέχρι την οποία μπορεί να λειτουργήσει η ανεμογεννήτρια χωρίς κίνδυνο βλάβης. Τιμές μεγαλύτερες των ονομαστικών έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων και επομένως είναι άμεσα ορατός ο κίνδυνος υπερθέρμανσης των

τυλιγμάτων. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι και τα ίδια τα φτερά υπάρχει περίπτωση να μην αντέξουν στις καταπονήσεις που επιφέρουν μεγαλύτερες τιμές ανέμου από τις ονομαστικές.

Σε εφαρμογές και κατασκευές μεγάλου κόστους αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή της γωνίας βήματος θ , κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εμβαδού της φτερωτής, άρα και της επιφάνειας που “βλέπει” ο άνεμος, άρα και την ισχύ. Η τεχνική αυτή ονομάζεται pitch control και επιτυγχάνει τη διατήρηση της ανεμογεννήτριας σε ονομαστικά μεγέθη ακόμα και για αρκετά μεγαλύτερες τιμές ανέμου από τις ονομαστικές.

Επειδή όμως κάτι τέτοιο είναι οικονομικά ασύμφορο για εφαρμογές χαμηλού κόστους, η τεχνική η οποία χρησιμοποιείται είναι αυτή του furling. Εν ολίγοις το σύστημα αυτό απομακρύνει την ανεμογεννήτρια από το μέτωπο του ανέμου με αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς του ανέμου και επομένως να επιτυγχάνεται και έλεγχος ισχύος της γεννήτριας. Ουσιαστικά αποτελείται από μία ουρά η οποία ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου και αξιοποιώντας χαρακτηριστικά όπως το βάρος και η κατασκευή της απομακρύνει την φτερωτή από το μέτωπο του ανέμου κατά μια γωνία, η οποία ονομάζεται γωνία yaw.

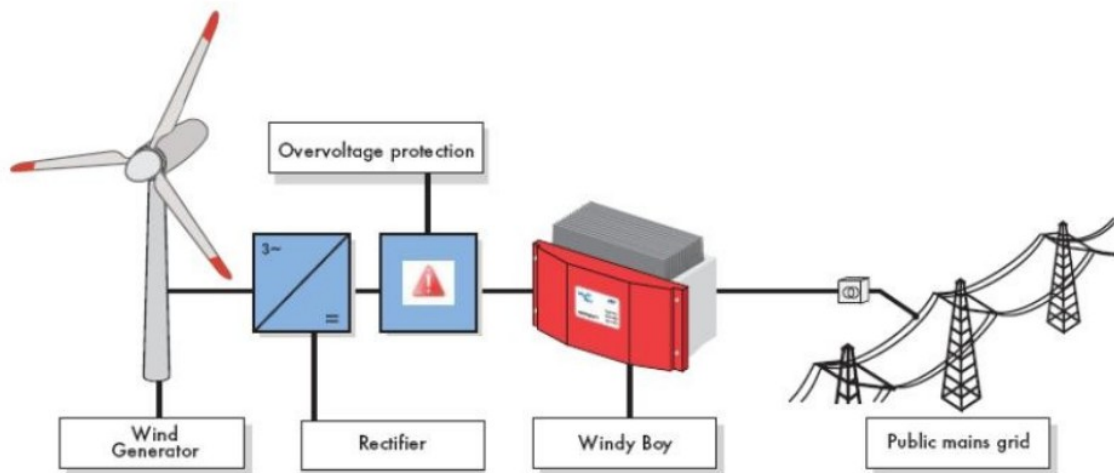
1.4 Σύνδεση ανεμογεννητριών

Η σύνδεση των ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει είτε απευθείας στο δίκτυο, είτε στο ζυγό του AC μικροδικτύου, είτε σε ένα ζυγό DC που περιλαμβάνει μέσα αποθήκευσης. Τα χαρακτηριστικά της κάθε σύνδεσης, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, αναλύονται παρακάτω.

1.4.1 Η AC σύνδεση

Η σύνδεση στον AC ζυγό ενός μικροδικτύου γίνεται μέσω αντιστροφέα. Το βασικό πλεονέκτημα της σύνδεσης αυτής είναι ότι στον ίδιο ζυγό μπορούν να συνδεθούν πολλές πηγές οι οποίες μπορεί να βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές. Επομένως, η σύνδεση αυτή είναι κατάλληλη για ένα μεγάλο μικροδίκτυο, όπως έναν μεγάλο οικισμό, κι όχι για το μικροδίκτυο μιας οικίας. Επίσης τα υψηλά επίπεδα τάσης οδηγούν σε χαμηλότερες απώλειες. Φυσικά θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος, όπως οι ελεγκτές.

Η γενική δομή μιας AC σύνδεσης μπορεί να περιγραφεί στο σχήμα (1.4) :



Εικόνα 1.4: Η δομή της AC σύνδεσης της ανεμογεννήτριας

Η έξοδος της γεννήτριας μας, που είναι σύγχρονη τριφασική αρχικά ανορθώνεται μέσω μιας μη ελεγχόμενης ανόρθωσης ενώ στη συνέχεια περνά από ένα μονοφασικό αντιστροφέα όπου εκεί εκτελείται η λειτουργία MPPT η οποία αναλύεται παρακάτω. Τέλος αφού η έξοδος γίνει πάλι AC, όλο το σύστημα ξανασυνδέεται στο δίκτυο.

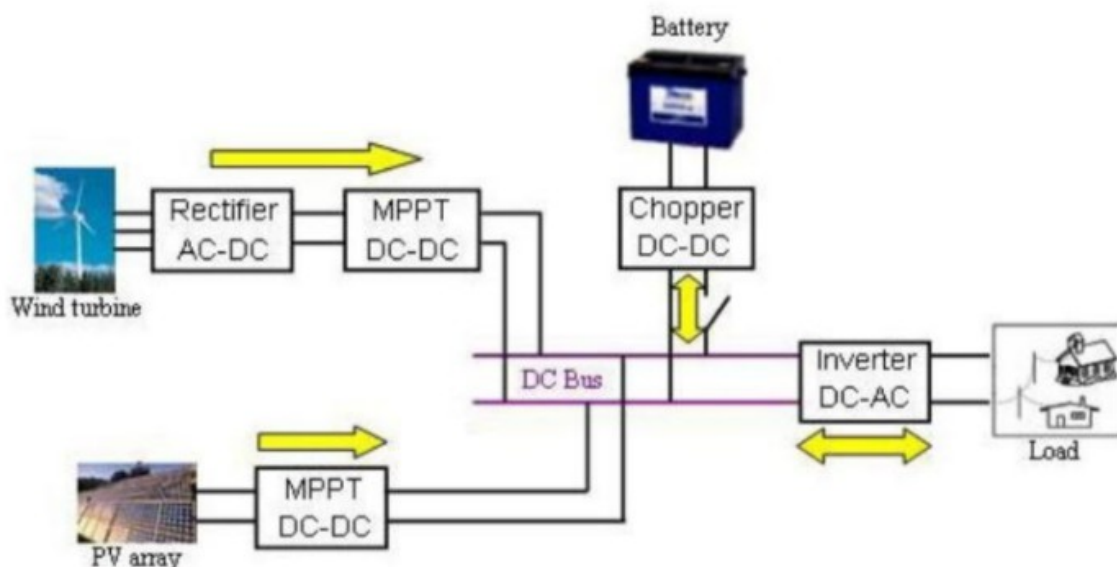
Η προστασία υπέρτασης που φαίνεται στο σχήμα συνοδεύει τον ανορθωτή και προστατεύει τον αντιστροφέα υπερτάσεις αλλά και την φτερωτή από ανάπτυξη μεγάλων επιταχύνσεων. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η ΗΕΔ της γεννήτριας και επομένως και η τάση που βλέπει ο ανορθωτής που χρειάζεται προστασία, αυξάνεται. Έτσι όταν φυσήσει πάνω από τα ονομαστικά και πριν προλάβει να επενεργήσει το σύστημα Furling (το σύστημα το οποίο απομακρύνει την ανεμογεννήτρια από το μέτωπο του ανέμου με αποτέλεσμα να μειώνεται η ισχύς του ανέμου και επομένως να επιτυγχάνεται και έλεγχος ισχύος της γεννήτριας), η γεννήτρια θα δώσει ισχύ στην προστασία υπέρτασης, που πλέον λειτουργεί σαν απορριπτικό φορτίο, και κατ' αυτόν τον τρόπο θα περάσουν μεγαλύτερα ρεύματα από το τύλιγμα της με αποτέλεσμα να επιβραδυνθεί, αυξάνοντας την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Ουσιαστικά πρόκειται για σταδιακή βραχυκύκλωση της γεννήτριας με σταδιακή αφαίρεση αντιστάσεων, που ειδικά στις μικρές γεννήτριες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το φρενάρισμα τους, έχει ως συνέπεια όμως την έντονη φθορά τους. Τέλος αν για κάποιο λόγο χαθεί το δίκτυο που τροφοδοτεί η γεννήτρια τότε όλη η ισχύς παρέχεται στο απορριπτικό φορτίο [1].

1.4.2 Η DC σύνδεση

Στην περίπτωση μιας κατοικίας ή γενικά μίας αυτόνομης εγκατάστασης, προτιμάται η DC σύνδεση αποφεύγονται οι δύο ή περισσότεροι αντιστροφείς της AC σύνδεσης, συνεπώς το κόστος γίνεται αρκετά μικρότερο. Συνήθως μία τέτοιου είδους εγκατάσταση περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά και μικρές ανεμογεννήτριες και είναι αρκετά εύκολο να υλοποιηθεί ακόμα και

σε αμιγώς αστικά τοπία. Η DC σύνδεση έχει ως εξής. Όλες οι πηγές συνδέονται άμεσα στον DC ζυγό συσσωρευτών, η τάση των οποίων αντιστρέφεται και λαμβάνει την κατάλληλη τιμή (τάση – συχνότητα) μέσω ενός αντιστροφέα πηγής τάσης. Εν συνεχεία ο αντιστροφέας αυτός τροφοδοτεί φορτίο. Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται με βοήθεια ενός τριφασικού ανορθωτή γέφυρας. Επομένως, πλέον η γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί στους συσσωρευτές. Ένας διπολικός διακόπτης παρεμβάλλεται μεταξύ γεννήτριας και ανορθωτή και στόχο έχει τη βραχυκύκλωση της γεννήτριας ώστε αυτή να μη περιστρέφεται σε περιπτώσεις εργασιών συντήρησης. Για να ελέγχεται το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών συνδέεται επίσης στο σύστημα και ένας ρυθμιστής φόρτισης, δουλειά του οποίου είναι να ελέγχει τόσο τον τρόπο φόρτισης και εκφόρτισης, καθ' ότι αυτοί πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένους αλγορίθμους, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο εισάγεται και εξάγεται αντίστοιχα από το σύστημα το απορριπτικό φορτίο.

Η σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές έχει το χαρακτηριστικό ότι η τάση της γεννήτριας παραμένει σταθερή και ίση περίπου με αυτή των συσσωρευτών. Επομένως δε μπορεί να ρυθμιστεί διαρκώς με σκοπό να έχουμε τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Κατ' αυτόν τον τρόπο λοιπόν δικαιολογείται και η έλλειψη συστήματος MPPT. Για να επιλυθεί το παραπάνω πρόβλημα αξιοποιείται ένας DC/DC μετατροπέας ο οποίος συνδέεται μεταξύ ανορθωτή και συσσωρευτών και ενώ διατηρεί την τάση στην έξοδο του σταθερή και ίση με αυτή των συσσωρευτών έχει την δυνατότητα να ελέγχει την τάση στην είσοδο του ώστε η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί πάντα σε βέλτιστες τιμές C_p και λ [5]. Μία τέτοια υλοποίηση φαίνεται στην εικόνα (1.5) :



Εικόνα 1.5: Σύστημα ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκού σε DC σύνδεση με δυνατότητα MPPT

1.5 Μετρήσεις ανεμογεννητριών

Από το 1998 έχει καθιερωθεί το διεθνές πρότυπο IEC 61400-12 για τη μέτρηση της καμπύλης ισχύος μίας ανεμογεννήτριας, το οποίο ανανεώνεται κι αναβαθμίζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να καλύπτονται οι ορθές προδιαγραφές για έναν πιο ολοκληρωμένο υπολογισμό της καμπύλης ισχύος που χαρακτηρίζει μία ανεμογεννήτρια και την περιοχή τοποθέτησης της.

Το πρότυπο αυτό καθορίζει μία συγκεκριμένη διαδικασία για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών απόδοσης της ισχύος μίας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας. Αφορά όλες τις ανεμογεννήτριες ανεξαρτήτως ονομαστικής ισχύος, υπάρχουν ξεχωριστά κριτήρια βέβαια για κάθε τάξη ανεμογεννήτριας, και για σύνδεση είτε με το ηλεκτρικό δίκτυο είτε με σύστημα συσσωρευτών. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για εκτίμηση της απόδοσης μίας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας σε συγκεκριμένη τοποθεσία είτε για την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων για τη σύγκριση μεταξύ διάφορων τύπων ανεμογεννητριών.

Η απόδοση μίας ανεμογεννήτριας καθορίζεται από τη μέτρηση και τον υπολογισμό της καμπύλης καμπύλης ισχύος και την αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή παραγωγή (ΑΕΠ). Η καμπύλη ισχύος υπολογίζεται από τη συλλογή ταυτόχρονων μετρήσεων της ταχύτητας ανέμου και της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος για μια συγκεκριμένη τοποθεσία και για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ώστε να σχηματιστεί μια καλή εικόνα, η οποία θα περιλαμβάνει μία επαρκή στατιστικά βάση δεδομένων για ένα φάσμα ταχυτήτων και για διαφορετικές ανεμικές κι ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η ΑΕΠ προκύπτει από το συνδυασμό της καμπύλης ισχύος με την κατανομή συχνότητας της ταχύτητας ανέμου, θεωρώντας 100% διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας, άρα και της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Επιπροσθέτως, πρέπει να τονιστεί το πρότυπο αυτό περιγράφει μία μεθοδολογία μέτρησης που απαιτείται ο υπολογισμός της καμπύλης ισχύος και της προκύπτουσας ενεργειακής παραγωγής να συμπληρώνεται από την αξιολόγηση της αβεβαιότητας των μετρούμενων δεδομένων μέτρησης που απαιτείται ο υπολογισμός της καμπύλης ισχύος και της προκύπτουσας ενεργειακής παραγωγής να συμπληρώνεται από την αξιολόγηση της αβεβαιότητας των μετρούμενων δεδομένων[6].

1.5.1 Τοποθεσία δοκιμών ανεμογεννήτριας

Στην τοποθεσία δοκιμών πρέπει να τοποθετηθεί ένας μετεωρολογικός ιστός δίπλα στην ανεμογεννήτρια για να καθοριστεί η ταχύτητα του ανέμου που χρησιμοποιείται από την ανεμογεννήτρια. Ο τόπος αυτός παίζει καθοριστικό ρόλο κι έχει μεγάλη επίδραση στη μετρούμενη απόδοση ισχύος της ανεμογεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, η διαστρέβλωση της ροής του ανέμου μπορεί να προκαλέσει διαφοροποίηση της ταχύτητας ανέμου μεταξύ του μετεωρολογικού ιστού και της ανεμογεννήτριας. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να αξιολογηθούν οι παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν ριπές ανέμου, έτσι ώστε να επιλεγεί η τοποθεσία του μετεωρολογικού ιστού, να οριστεί ένας έγκυρος τομέας μετρήσεων και να αξιολογηθεί η αβεβαιότητα λόγω του φαινομένου. Πιο ειδικά, θα πρέπει ληφθούν υπόψη, οι

τοπογραφικές παραλλαγές, άλλες ανεμογεννήτριες και διάφορα εμπόδια (όπως κτίρια, δέντρα κ.ά.).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην τοποθέτηση του μετεωρολογικού ιστού. Δεν θα πρέπει να τοποθετηθεί πολύ κοντά στην ανεμογεννήτρια, γιατί η ταχύτητα του ανέμου θα επηρεαστεί μπροστά από την Α/Γ. Επίσης, δεν πρέπει να τοποθετηθεί πολύ μακριά από την ανεμογεννήτρια, αφού η συσχέτιση της ταχύτητας ανέμου και της εξόδου ηλεκτρικής ισχύος θα μειωθεί. Η απόσταση μεταξύ μετεωρολογικού ιστού κι ανεμογεννήτριας θα πρέπει να είναι 2 με 4 φορές η διάμετρος της φτερωτής. Η πλέον κατάλληλη απόσταση είναι ίση με 2,5 φορές το μήκος διαμέτρου του δρομέα.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η καλύτερη τοποθέτηση του μετεωρολογικού ιστού είναι μπροστά από την ανεμογεννήτρια από τη μεριά της φτερωτής, στην κατεύθυνση στην οποία αναμένεται ο επικρατέστερος άνεμος κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Άλλες φορές, όμως, είναι καταλληλότερο να τοποθετηθεί ο ιστός δίπλα από την γεννήτρια, όπως στην περίπτωση μίας ανεμογεννήτριας τοποθετημένης σε μία κορυφογραμμή.

1.5.2 Εξοπλισμός μετρήσεων

Ο βασικός εξοπλισμός των μετρήσεων στις ανεμογεννήτριες όπως περιγράφεται από το πρότυπο IEC 61400-12 περιλαμβάνει μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος, μετρήσεις μετεωρολογικών δεδομένων και στο σύστημα συλλογής των μετρήσεων[7] .

Ηλεκτρική Ισχύς

Η ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας πρέπει να μετρηθεί με τη χρήση συσκευής κατάλληλης για το σκοπό αυτό και να βασίζεται στις μετρήσεις ρεύματος και τάσης σε κάθε φάση της ανεμογεννήτριας.

Η κλάση των οργάνων μέτρησης θα πρέπει να πληρούν τα πρότυπα IEC 60044-1 και 60186, για μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να είναι κλάσης 0,5 ή καλύτερης.

Η κλάση της συσκευής μέτρησης ισχύος, εάν είναι transducer ισχύος, πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις του IEC 60688 και να είναι κλάσης 0,5 τουλάχιστον. Εάν δεν χρησιμοποιείται transducer τότε η ακρίβεια πρέπει να είναι ισοδύναμη με την κλάση 0,5 των power transducers. Το εύρος λειτουργίας της συσκευής πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε να μετράει όλες τις θετικές και τις αρνητικές κορυφές ισχύος της ανεμογεννήτριας. Σαν οδηγό, η πλήρης κλίμακα της μέτρησης ισχύος πρέπει να είναι από -50% έως 200% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας. Τα δεδομένα πρέπει να ελέγχονται περιοδικά κατά την διάρκεια των δοκιμών, για να εξακριβωθεί ότι τα όρια δεν έχουν ξεπεραστεί. Η συσκευή πρέπει να τοποθετηθεί μεταξύ της ανεμογεννήτριας και της ηλεκτρικής σύνδεσης. Πρέπει, επίσης, να

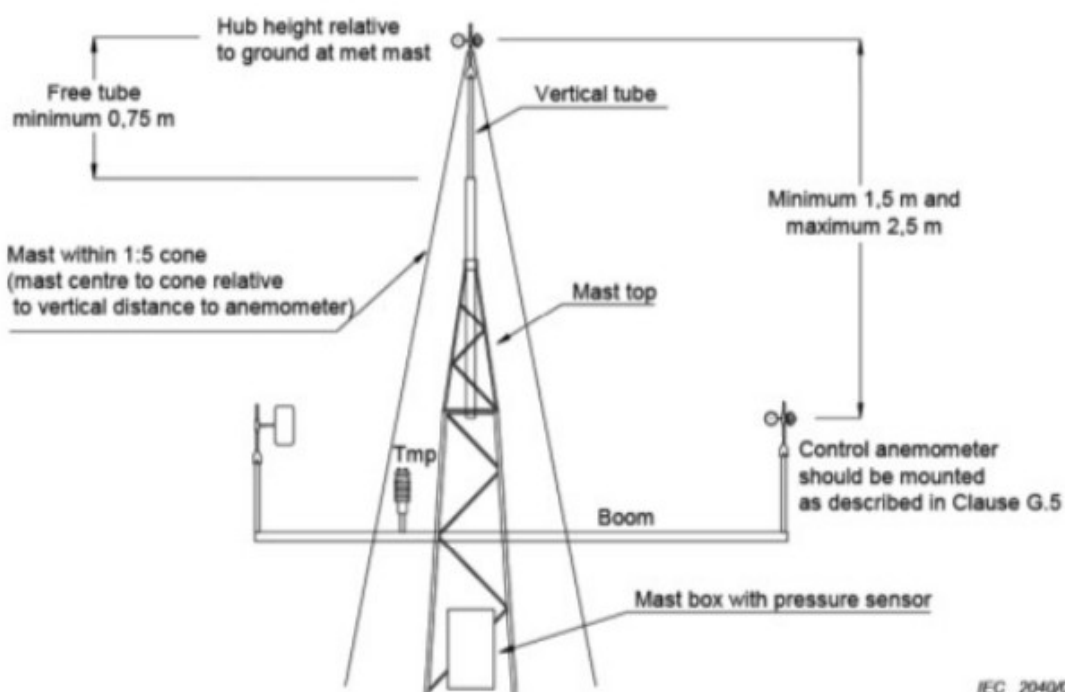
αναφέρεται αν οι μετρήσεις γίνονται στην πλευρά της γεννήτριας ή του δικτύου ή των συσσωρευτών.

Μετρήσεις μετεωρολογικών μεγεθών

Η μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου πρέπει να γίνονται με κυπελλοφόρο ανεμόμετρο κλάσης 1,7A τουλάχιστον. Η ταχύτητα του ανέμου ορίζεται ως η μέση τιμή του μέτρου της οριζόντιας συνιστώσας του στιγμιαίου διανύσματος της ταχύτητα. Κατά συνέπεια, η γωνιακή απόκριση του ανεμομέτρου πρέπει να έχει ημιτονοειδές σχήμα. Το ανεμόμετρο πρέπει να βαθμονομείται πριν και μετά την διαδικασία του πειράματος. Η διαφορά των γραμμών παλινδρόμησης μεταξύ των δύο σταδίων βαθμονόμησης πρέπει να είναι $\pm 0,1\text{m/s}$ στο εύρος των 6m/s ως τα 12m/s . Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και δεύτερο ανεμόμετρο για την επιβεβαίωση των μετρήσεων του πρώτου (ανεμόμετρο ελέγχου).

Η κατεύθυνση του ανέμου μετριέται με έναν ανεμοδείκτη. Ο ανεμοδείκτης πρέπει να τοποθετείται στο μετεωρολογικό ιστό πάνω σε μια κεραία. Ο συνδυασμός βαθμονόμησης, λειτουργίας και αβεβαιότητας της μέτρησης της κατεύθυνσης του ανέμου πρέπει να είναι μικρότερος από 5° .

Άλλα όργανα που χρησιμοποιούνται είναι αισθητήρες μέτρησης της πίεσης, της θερμοκρασίας και της υγρασίας (όχι κατά ανάγκη απαραίτητο). Στην φωτογραφία (1.6) φαίνεται η τοποθέτηση τους στον μετεωρολογικό ιστό.



Εικόνα 1.6: Τοποθέτηση των αισθητήρων στο μετεωρολογικό ιστό

Σύστημα συλλογής δεδομένων

Το ψηφιακό σύστημα συλλογής δεδομένων πρέπει να έχει συχνότητα δειγματοληψίας τουλάχιστον 1 Hz, ώστε να συλλέγει τις μετρήσεις και να αποθηκεύει τα προ-επεξεργασμένα δεδομένα. Η βαθμονόμηση και η ακρίβεια του συστήματος (επικοινωνία, κατάσταση σήματος και καταγραφή δεδομένων) πρέπει να επαληθεύονται με παραγωγή γνωστών σημάτων στα άκρα των transducers και συγκρίνοντας τις εισόδους με τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα. Σαν οδηγός προτείνεται η αβεβαιότητα του συστήματος να είναι αμελητέα σε σχέση με την αβεβαιότητα των μετασχηματιστών.

Διαδικασία των μετρήσεων

Μπορούν να αποθηκεύονται είτε τα δειγματοληπτικά δεδομένα είτε στατιστικά 10 λεπτών με χαρακτηριστικά που να αφορούν στα ακόλουθα :

- Μέση τιμή
- Διακύμανση τιμών στα 10 λεπτά
- Μέγιστη τιμή
- Ελάχιστη τιμή

Απόρριψη δεδομένων

Για να εξασφαλιστεί ότι τα δεδομένα που συλλέγονται αντιπροσωπεύουν την κανονική λειτουργία της γεννήτριας και δεν είναι κατεστραμμένα, κάποια από αυτά πρέπει να απορριφθούν από τη βάση δεδομένο στις παρακάτω περιστάσεις :

- Εξωτερικές συνθήκες (εκτός της ταχύτητας ανέμου) που είναι εκτός του εύρους λειτουργίας της ανεμογεννήτριας
- Η γεννήτρια να μην μπορεί να λειτουργήσει εξαιτίας σφάλματος
- Η γεννήτρια έχει κλείσει χειροκίνητα ή βρίσκεται σε λειτουργία συντήρησης
- Βλάβη ή υποβάθμιση (π.χ. λόγω πάγου) του εξοπλισμού δοκιμών
- Η κατεύθυνση του ανέμου να βρίσκεται εκτός του τομέα μέτρησης
- Η κατεύθυνση του ανέμου να βρίσκεται εκτός των τομέων βαθμονόμησης των δοκιμών

Βάση Δεδομένων

Μετά τον υπολογισμό των μέσων τιμών δεκαλέπτου για κάθε μέγεθος, θα πρέπει να γίνει διαχωρισμός των δεδομένων χρησιμοποιώντας τη " μέθοδο των διαστημάτων (bins) " για την ταχύτητα του ανέμου. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το φάσμα των μετρούμενων ταχυτήτων θα πρέπει να χωριστεί σε συνεχόμενα διαστήματα πλάτους 0,5 m/s το καθένα, στα οποία το κέντρο τους θα είναι πολλαπλάσιο των 0,5 m/s. Τα αποκτηθέντα δεδομένα θα πρέπει να καλύπτουν ένα φάσμα ταχυτήτων που να κυμαίνεται από 1 m/s πιο χαμηλά από την ταχύτητα ένταξης της Α/Γ μέχρι την ταχύτητα που ισούται με 1,5 φορές την ταχύτητα του ανέμου που αντιστοιχεί στο 85% της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ. Διαφορετικά, η ταχύτητα του ανέμου θα πρέπει να εκτείνεται από το 1 m/s πιο χαμηλά από την ταχύτητα V_{cut-in} μέχρι την ταχύτητα στην οποία η "μετρούμενη ΑΕΠ" είναι μεγαλύτερη ή ίση με το 95% της "προσεγγιστικής ΑΕΠ", ορισμοί για την αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή που θα εξηγηθούν λίγο παρακάτω. Επιπλέον, στην αναφορά θα πρέπει να δηλώνεται ποιος από τους δύο ορισμούς έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος.

Η βάση δεδομένων, άρα κι η μέτρηση της καμπύλης ισχύος, θεωρείται ολοκληρωμένη κι επαρκής, όταν πλέον θα πληροί τα παρακάτω δύο κριτήρια :

- κάθε bin (διάστημα) τιμών να περιέχει τουλάχιστον δεδομένα 30 λεπτών
- η βάση δεδομένων να περιλαμβάνει τουλάχιστον συνολικά δεδομένα 180 ωρών

Εάν υπάρχει ένα διάστημα για το οποίο δεν υπάρχουν δεδομένα, είναι δυνατό να ολοκληρωθεί η καμπύλη ισχύος με εύρεση της τιμής του bin από γραμμική παρεμβολή των δύο γειτονικών του διαστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί εξίσου να διευρυνθεί το εύρος των ταχυτήτων ανέμου για ταχύτητες μεγαλύτερες από το φάσμα που ορίστηκε παραπάνω.

Τα αποκτηθέντα δεδομένα θα πρέπει να κανονικοποιηθούν σε δύο διαφορετικές πυκνότητες αέρα. Η πρώτη πυκνότητα θα είναι η πυκνότητα που είναι καθορισμένη στο επίπεδο της θάλασσας (Mean Sea Level) κι ισούται με $1,225 \text{ kg/m}^3$. Η δεύτερη, η πραγματική, θα πρέπει να είναι η πυκνότητα που προκύπτει ως μέση τιμή των μετρούμενων πυκνοτήτων αέρα για την περίοδο μετρήσεων, στρογγυλοποιημένη στο κοντινότερο $0,05 \text{ kg/m}^3$. Βέβαια, σε περίπτωση που η πραγματική μέση πυκνότητα είναι $1,225 \pm 0,05 \text{ kg/m}^3$ δεν χρειάζεται να γίνει κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων σε αυτή, παρά μόνο στην πρώτη πυκνότητα που ορίζεται για το επίπεδο της θάλασσας. Η πυκνότητα του αέρα υπολογίζεται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την υγρασία του ανέμου.

1.6 Συστήματα Συλλογής Δεδομένων (Data Acquisition)

Συλλογή δεδομένων (Data acquisition - DAQ) ονομάζεται η διαδικασία δειγματοληψίας αναλογικών σημάτων και η μετατροπή τους σε ψηφιακά σήματα που μπορούν να αποτυπωθούν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα σήματα αυτά μπορούν να αφορούν ηλεκτρικά ή άλλα φυσικά μεγέθη όπως τάση, πίεση, θερμοκρασία, πίεση, ήχος κ.ά[8]. Ένα σύστημα συλλογής δεδομένων (ή συντομογραφικά DAQ) περιλαμβάνει συνήθως:

- Αισθητήρες για τη μέτατροπή του φυσικού μεγέθου σε ηλεκτρικό σήμα
- Ένα ή περισσότερα κυκλώματα μετατροπής του σήματος του αισθητήρα σε μορφή κατάλληλη για ψηφιακή επεξεργασία
- Έναν ή περισσότερους μετατροπείς του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (analog-to-digital converter)
- Έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή ή μία επεξεργαστική μονάδα, με το κατάλληλο λογισμικό για την εμφάνιση και επεξεργασία του ψηφιακού σήματος.

1.6.1 Ψηφιακός Καταγραφέας Δεδομένων (data logger)

Ψηφιακός Καταγραφέας Δεδομένων ή αλλιώς data logger ονομάζεται η ηλεκτρονική συσκευή η οποία καταγράφει δεδομένα σε μία περίοδο χρόνου. Είναι κατασκευασμένη είτε με ενσωματωμένα όργανα και αισθητήρες είτε εξωτερικά. Κατά κύριο λόγο, όχι όμως πάντα, είναι βασισμένα σε έναν ψηφιακό επεξεργαστή ή υπολογιστή. Πρόκειται για μικρές συσκευές, οι οποίες κατά κανόνα λειτουργούν με μπαταρίες και είναι φορητές. Κάποιοι data loggers χρησιμοποιούν προσωπικό ηλεκτρονικό υπολογιστή για την αποθήκευση των δεδομένων, την προβολή και την ανάλυση τους, ενώ άλλοι έχουν ενσωματωμένα όργανα (π.χ μια οθόνη LCD) και λειτουργούν αυτόνομα (stand-alone). Οι λειτουργίες τους μπορεί να κυμαίνονται από ένα μεγάλο εύρος μετρήσεων μέχρι πολύ συγκεκριμένων τιμών σε συγκεκριμένες συνθήκες. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα τους είναι ότι παραμένουν ανοιχτοί και συλλέγουν μετρήσεις όλο το 24ωρο[9].

Συχνά οι όροι data logging και data acquisition είναι συγκεχυμένοι. Η βασική διαφορά είναι ότι ένας καταγραφέας περιέχει την έννοια της συλλογής δεδομένων, ενώ ένα σύστημα συλλογής δεν είναι απαραίτητα καταγραφέας.

1.6.2 Χαρακτηριστικά καταγραφών

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των καταγραφών καθώς και οι αντίστοιχες διαφορές τους από ένα σύστημα συλλογής δεδομένων είναι:

- Οι καταγραφείς έχουν χαμηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας. Για παράδειγμα συχνότητα δειγματοληψίας 1Hz είναι αρκετά καλή για έναν καταγραφέα, αλλά θεωρείται μικρή για ένα σύστημα συλλογής.
- Οι καταγραφείς λειτουργούν και σαν αυτόνομες συσκευές ενώ ένα σύστημα συλλογής δεδομένων επικοινωνεί με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή των δεδομένων. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού χρειάζονται μία ενσωματωμένη

μνήμη για την αποθήκευση των δεδομένων. Το μέγεθος της μνήμης εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και το χρονικό διάστημα συλλογής των μετρήσεων. Η μνήμη μπορεί να είναι μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memory, RAM), flash ή EEPROM.

- Οι ηλεκτρονικοί καταγραφείς, συνήθως, έχουν τη δυνατότητα καταγραφής της ημερομηνίας και της ώρας έτσι ώστε να είναι δυνατόν να συγκριθούν και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα σε σχέση με το χρόνο της συλλογής τους. Επομένως, οι καταγραφείς διαθέτουν ενσωματωμένο ρολόι πραγματικού χρόνου.
- Επειδή οι καταγραφείς είναι κατά κανόνα φορητές συσκευές που χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες εφαρμογές, χρειάζονται μία DC πηγή για να λειτουργήσουν, όπως οι μπαταρίες.

Κεφάλαιο 2: Μικροελεγκτές και Μικροϋπολογιστές

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων συστημάτων και η αρχιτεκτονική τους. Στη συνέχεια, ορίζονται οι έννοιες του μικροεπεξεργαστή, του μικροελεγκτή και του μικροϋπολογιστή και γίνεται η διάκρισή τους. Παρουσιάζονται, επίσης, οι αρχιτεκτονικές και τα χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή μας, δηλαδή των μικροεπεξεργαστών ARM και των μικροελεγκτών AVR. Τέλος, γίνεται ανάλυση του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή, ώστε να κατανοηθούν οι βασικές αρχές που ακολουθήθηκαν κατά την υλοποίηση του πρωτοκόλλου.

2.1 Ενσωματωμένα συστήματα

Ο όρος ενσωματωμένο σύστημα (embedded system) μπορεί να έχει διάφορες ερμηνείες και ορισμούς. Γενικά, ενσωματωμένο σύστημα είναι ένα σύστημα με βάση έναν μικροεπεξεργαστή που έχει κατασκευαστεί για μια ή περισσότερες λειτουργίες, “τρέχοντας” ένα λογισμικό και δεν μπορεί να προγραμματιστεί από το χρήστη σαν ένα ολοκληρωμένος υπολογιστής. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέγει κάποιες διαδικασίες όσον αφορά τη λειτουργικότητα του συστήματος, αλλά όχι να αφαιρεί ή να προσθέτει λογισμικό. Για παράδειγμα, ένας υπολογιστής μπορεί να λειτουργεί σαν αριθμομηχανή και συγχρόνως σαν παιχνιδιομηχανή ανάλογα με τον χρήστη και τις ανάγκες του, αντίθετα ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι προορισμένο για συγκεκριμένες λειτουργίες εξαρχής. Συγκρινόμενο, επίσης, με έναν ολοκληρωμένο υπολογιστή, ένα ενσωματωμένο σύστημα έχει περιορισμούς ως προς το υλικό και το λογισμικό ενώ η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας και η Μνήμη του συστήματος έχουν χαμηλότερη απόδοση για την εξοικονόμηση ενέργειας. Γενικά, ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι μικρό σε μέγεθος, με χαμηλή κατανάλωση και σχετικά χαμηλού κόστους [10].



Εικόνα 2.1: Ένα ενσωματωμένο σύστημα

Κάποια από τα χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων συστημάτων αναλύονται παρακάτω.

2.1.1 Επεξεργαστής

Ο επεξεργαστής σε ένα ενσωματωμένο σύστημα πρέπει να παρέχει την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ για την εκτέλεση των διαδικασιών για τις οποίες σχεδιάστηκε. Παρόλο που φαίνεται προφανές, πολλές φορές υποεκτιμούνται διεργασίες που πρέπει να εκτελεστούν όσον αφορά το μέγεθος και την πολυπλοκότητα με αποτέλεσμα η ισχύς του επεξεργαστή να μην επαρκεί για τις ανάγκες του συστήματος. Σε πολλές περιπτώσεις, τα προβλήματα αυτά επιδεινώνονται από τις μετρήσεις που γίνονται ώστε να χαρακτηριστεί ο τύπος του επεξεργαστή, οι οποίες δεν αντιπροσωπεύουν τις λειτουργίες που χρειάζονται. Έτσι, ο επεξεργαστής λειτουργεί τελείως εκτός της κρυφής μνήμης (Cache memory) με αποτέλεσμα το λειτουργικό σύστημα να μην είναι δυνατόν να “σηκώσει” το λογισμικό. Πέρα, όμως, από την επεξεργαστική ισχύ υπάρχουν και άλλα θέματα που πρέπει να ελεγχθούν κατά την επιλογή ενός επεξεργαστή όπως το κόστος, η κατανάλωση ισχύος και η διαθεσιμότητα στα κατάλληλα εξαρτήματα.

2.1.2 Μνήμη

Η μνήμη είναι ένα σημαντικό μέρος των ενσωματωμένων συστημάτων και είναι εξαρτώμενη από τη σχεδίαση του λογισμικού και τις περισσότερες φορές καταδεικνύει τον τρόπο ανάπτυξής του. Στα πρώτα στάδια κατανόησης της λειτουργίας των ενσωματωμένων, η μνήμη επιτελεί δύο βασικές διαδικασίες.

Την αποθήκευση του λογισμικού που τρέχει το σύστημα. Αυτή, στο χαμηλότερο επίπεδο παίρνει την μορφή μη-πτητικής μνήμης, η οποία διατηρεί τα δεδομένα και αφού αφαιρεθεί η τροφοδοσία. Αυτή μπορεί να είναι μία ενσωματωμένη μνήμη μόνο-για-ανάγνωση (Read Only Memory, ROM) ή μία εξωτερική EPROM.

Την αποθήκευση δεδομένων όπως οι μεταβλητές του προγράμματος, τα αποτελέσματα και γενικότερα κάθε δεδομένο που προκύπτει κατά την εκτέλεση του λογισμικού. Το πρόγραμμα χρειάζεται μνήμη για να αποθηκεύει τις μεταβλητές και να εκτελεί τις δομές του. Το μέγεθος της μνήμης για τις μεταβλητές είναι συνήθως μικρότερο από αυτό που χρειάζεται για να τρέξει τις συναρτήσεις και τις διαδικασίες. Επειδή συνήθως οι μνήμες RAM είναι πιο ακριβές από τις ROM τα ενσωματωμένα συστήματα, και κυρίως οι μικροελεγκτές, έχουν ενσωματωμένη μνήμη RAM ειδικά για την εκτέλεση του κώδικα. Επομένως, ο προγραμματιστής θα πρέπει να λάβει υπόψιν του το μέγεθος της μνήμης RAM και να το ελαχιστοποιήσει.

2.1.3 Περιφερειακές συσκευές

Ένα ενσωματωμένο σύστημα χρειάζεται να επικοινωνήσει με τον εξωτερικό κόσμο και αυτό καθίσταται δυνατόν μέσω των περιφερειακών του συσκευών. Τα περιφερειακά εισόδου,

συνήθως, αφορούν αισθητήρες οι οποίοι μετατρέπουν τα φυσικά σήματα σε σήματα κατάλληλα για ψηφιακή επεξεργασία. Με τον τρόπο αυτό ελέγχονται οι λειτουργίες εξόδου που είναι επιφορτισμένο το σύστημα να εκτελέσει. Σε αυτό το μοντέλο, το ενσωματωμένο μοντελοποιείται σε σωλήνωση τριών σταδίων. Το πρώτο εισάγει τα δεδομένα και τις πληροφορίες στο σύστημα, το δεύτερο εκτελεί τις εργασίες και το τρίτο εμφανίζει τα αποτελέσματα.

Οι κύριοι τύποι περιφερειακών που χρησιμοποιούνται χρησιμοποιούν

- Δυαδικές εξόδους (binary outputs). Πρόκειται για εξωτερικά pins η κατάσταση των οποίων μπορεί να είναι είτε λογικό 1, είτε λογικό 0. Μπορεί να λειτουργούν ανεξάρτητα ή σε ομάδες δημιουργώντας παράλληλες θύρες (parallel ports) όπου τα δυαδικά ψηφία εισέρχονται ή εξέρχονται ταυτόχρονα.
- Σειριακές εξόδους (Serial outputs). Πρόκειται για διεπαφές που στέλνουν ή λαμβάνουν δεδομένα χρησιμοποιώντας ένα ή δύο pins σε παράλληλη κατάσταση (parallel mode). Είναι λιγότερο δύσκολες στη σύνδεση, αλλά έχουν μεγαλύτερο βαθμό πολυπλοκότητας στο προγραμματιστικό μέρος. Μια σειριακή θύρα πρέπει να έχει αποθηκευμένα δεδομένα σε έναν καταχωρητή και μετά να αρχίσει να εκτελεί τις εντολές.
- Αναλογικές θύρες. Ενώ ο επεξεργαστής λειτουργεί στο ψηφιακό πεδίο, τα φυσικά μεγέθη πρέπει να αναπαρασταθούν σε αναλογικές τιμές. Επομένως, η διάδραση μεταξύ περιβάλλοντος και ψηφιακού συστήματος καθιστά αναγκαία την μετατροπή τους σε ψηφιακά μεγέθη και το αντίστροφο.
- Χρονικές εισόδους/εξόδους. Οι μετρητές και οι χρονιστές είναι τα πιο συνηθισμένες λειτουργίες ενός ενσωματωμένου συστήματος.

2.1.4 Διεπαφή χρήστη (User interface)

Τα ενσωματωμένα καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος από συστήματα χωρίς καμία διεπαφή μέχρι συστήματα με πολύπλοκες γραφικές διεπαφές που μοιάζουν με τα γραφικά περιβάλλοντα σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων. Πιο εξελιγμένες συσκευές, χρησιμοποιούν οθόνες αφής ή και κουμπιά (buttons) για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα προσφέροντας ευελιξία. Επίσης αρκετά ενσωματωμένα χρησιμοποιούν απομακρυσμένες διεπαφές μέσω επικοινωνιακών πρωτοκόλλων (όπως RS-232 ή το I2C, τα οποία θα τα αναλύσουμε παρακάτω) ή ακόμα και σύνδεση δικτύου (Ethernet). Αυτό προσφέρει τεράστιες δυνατότητες επέκτασης των λειτουργιών ενός συστήματος, ενώ ταυτόχρονα ρίχνει και το κόστος λειτουργίας (αντικαθιστώντας την οθόνη από έναν web server).

2.2 Μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές και μικροϋπολογιστές

Οι όροι μικροεπεξεργαστής, μικροελεγκτής και μικροϋπολογιστής είναι λίγο ή πολύ συγκεχυμένοι. Ωστόσο, κάθε ένας έχει διακριτική σημασία και είναι σημαντική η κατανόηση των διαφορών τους.

Ένας μικροεπεξεργαστής είναι ουσιαστικά μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Central Processing Unit ή CPU), υλοποιημένη μέσα σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Παλιότερα, μια τέτοια μονάδα επεξεργασίας σχεδιαζόταν με τη βοήθεια πολλών διακριτών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεσαίας και μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης.

Όταν ένα μικροεπεξεργαστής (μαζί με τα απαραίτητα κυκλώματα υποστήριξης) τοποθετηθούν μαζί στο ίδιο υλικό έτσι ώστε να σχηματίσουν έναν στοιχειώδη υπολογιστή, ειδικότερα στις εφαρμογές ελέγχου και λήψης δεδομένων, η διάταξη που προκύπτει καλείται μικροϋπολογιστής. Για παράδειγμα αν με βάση έναν μικροεπεξεργαστή, τοποθετούσαμε μνήμη EPROM για αποθήκευση του προγράμματος, μνήμη RAM για την αποθήκευση των μεταβλητών και αποτελεσμάτων διάφορων πράξεων, καθώς και μονάδες εισόδου – εξόδου θα είχαμε σχηματίσει έναν μικροϋπολογιστή. Ο περισσότερος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε έναν μικροϋπολογιστή είναι ενσωματωμένος σε ένα μόνο κουτί, αν και μερικά μέρη μπορούν να βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις και να συνδέονται με το κουτί, όπως π.χ. το πληκτρολόγιο, το ποντίκι, η οθόνη κτλ. Οι πιο πολλοί μικροϋπολογιστές εξυπηρετούν μόνο έναν χρήστη κάθε φορά, αν και ανάλογα με το λειτουργικό τους σύστημα μπορούν να εκτελούν ταυτόχρονα προγράμματα διαφορετικών χρηστών. Εκτός από την CPU, ο μικροϋπολογιστής είναι εξοπλισμένος με τουλάχιστον μία μνήμη RAM. Αν και μερικοί μικροϋπολογιστές (κυρίως οι 8-bit) μπορούν να εκτελέσουν απλές εργασίες αρκούμενοι μόνο στη RAM, συνήθως μια ακόμα μνήμη είναι απαραίτητη. Άλλα υποσυστήματα που αποτελούν μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος μικροϋπολογιστή είναι το τροφοδοτικό και συσκευές εισόδου/εξόδου.

Επεκτείνοντας την λογική του μικροϋπολογιστή, όταν όλες οι παραπάνω διακριτές μονάδες που αποτελούν έναν μικροϋπολογιστή τοποθετηθούν μέσα στο σώμα του ίδιου του ολοκληρωμένου κυκλώματος, η διάταξη ονομάζεται μικροελεγκτής. Σήμερα έχουν εμφανιστεί πολλές και διαφορετικές οικογένειες μικροελεγκτών. Μια συγκεκριμένη οικογένεια μικροελεγκτών προσδιορίζει ένα σύνολο πολλών διαφορετικών μικροελεγκτών, οι οποίοι διαθέτουν τον ίδιο κεντρικό πυρήνα αλλά διαφορετική συσκευασία, διαφορετικές περιφερειακές μονάδες κτλ[11].

Τα πλεονεκτήματα των μικροελεγκτών είναι τα εξής

- Αυτονομία, μέσω της ενσωμάτωσης σύνθετων περιφερειακών υποσυστημάτων όπως μνήμες και θύρες επικοινωνίας. Έτσι πολλοί μικροελεγκτές δεν χρειάζονται κανένα άλλο ολοκληρωμένο κύκλωμα για να λειτουργήσουν.
- Η ενσωμάτωση περιφερειακών σημαίνει ευκολότερη υλοποίηση εφαρμογών λόγω των απλούστερων διασυνδέσεων. Επίσης, οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος,

μεγιστοποιώντας τη φορητότητα και ελαχιστοποιεί το κόστος της συσκευής στην οποία ενσωματώνεται ο μικροελεγκτής.

- Χαμηλό κόστος.
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία, και πάλι λόγω των λιγότερων διασυνδέσεων.
- Μειωμένες εκπομπές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και μειωμένη ευαισθησία σε αντίστοιχες παρεμβολές από άλλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Το πλεονέκτημα αυτό προκύπτει από το μικρότερο αριθμό και μήκος εξωτερικών διασυνδέσεων καθώς και τις χαμηλότερες ταχύτητες λειτουργίας.
- Περισσότεροι διαθέσιμοι ακροδέκτες για ψηφιακές εισόδους-εξόδους (για δεδομένο μέγεθος ολοκληρωμένου κυκλώματος), λόγω της μη δέσμευσής τους για τη σύνδεση εξωτερικών περιφερειακών.
- Μικρό μέγεθος συνολικού υπολογιστικού συστήματος.

2.3 Οι επεξεργαστές ARM

Οι επεξεργαστές ARM είναι το πιο διαδεδομένο εξάρτημα ενός ενσωματωμένου συστήματος. Η πρώτη ερμηνεία των αρχικών Acorn RISC Machine, ενώ η μεταγενέστερη αφορά τον όρο Προχωρημένη Μηχανή RISC (Advanced RISC Machine) και κατασκευάζονται από την εταιρία ARM Holdings. Ακολουθούν αρχιτεκτονική συνόλου εντολών RISC(Reduced Instruction Set Computing) και αποτελούν τη δημοφιλέστερη αρχιτεκτονική συστημάτων 32-bit. Αυτό σημαίνει πως οι επεξεργαστές ARM χρειάζονται πολύ λιγότερα transistors από την τυπική CISC (Complex Instruction Set Computing) που χρησιμοποιούν οι επεξεργαστές των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτό μειώνει το κόστος, την θερμοκρασία του επεξεργαστή και την κατανάλωση, με αποτέλεσμα η χρήση τους να είναι κατάλληλη για ελαφριές, κινητές εφαρμογές που λειτουργούν με μπαταρία – όπως έξυπνα τηλέφωνα (smartphones), tablets, notepads, PDAs κá.

2.3.1 Αρχιτεκτονική RISC

Reduced Instruction Set Computer (RISC) είναι μία στρατηγική σχεδίαση της Κεντρική Μονάδας Επεξεργασίας που βασίζεται στο γεγονός ότι ένα απλοποιημένο σύνολο εντολών θα μεγιστοποιήσει την απόδοση ενός συστήματος βασισμένου σε έναν μικροεπεξεργαστή ο οποίος εκτελεί συγκεκριμένες εντολές σε λιγότερους κύκλους ανά εντολή. Η αντίθετη αρχιτεκτονική ονομάζεται CISC.

Τα στοιχεία που διατηρήθηκαν στον ARM είναι τα εξής

- Αρχιτεκτονική φόρτωσης/αποθήκευσης (load/store). Οι εντολές οι οποίες επεξεργάζονται τα δεδομένα λειτουργούν κατευθείαν στους καταχωρητές του επεξεργαστή και είναι ξεχωριστές από τις εντολές προσπέλασης της μνήμης. Αντίθετα με τους CISC επεξεργαστές που επιτρέπουν την προσπέλαση τιμών της μνήμης ενώ γίνεται η επεξεργασία των τιμών.
- Περιλαμβάνει 16 καταχωρητές των 32 bits με σταθερό μέγεθος εντολών για εύκολη αποκωδικοποίηση και διοχέτευση (pipeline), με μειονέκτημα την μικρότερη πυκνότητα κώδικα. Αργότερα με την εισαγωγή του συνόλου εντολών Thumb το τελευταίο τροποποιήθηκε και αυξήθηκε η πυκνότητα του κώδικα.
- Ο χρόνος εκτέλεσης των εντολών γίνεται σε ένα κύκλο ρολογιού.

2.3.2 Αρχιτεκτονική ARM

Από το 1995 μέχρι σήμερα, το ARM Architecture Reference Manual [12] είναι η βασική πηγή τεκμηρίωσης πάνω στην αρχιτεκτονική του επεξεργαστή ARM και του συνόλου εντολών του, ενώ διακρίνει μεταξύ διεπαφών που όλοι οι επεξεργαστές πρέπει να υποστηρίζουν (όπως η σημασία των εντολών) και λεπτομερειών υλοποίησης, οι οποίες μπορούν να διαφέρουν ανά περίπτωση. Η αρχιτεκτονική έχει εξελιχθεί και, αρχίζοντας από τη σειρά πυρήνων Cortex, ορίζονται τρία «προφίλ» ("profiles"):

- «Εφαρμογής» ("Application"): σειρά Cortex-A
- «Πραγματικού χρόνου» ("Real-time"): σειρά Cortex-R
- «Μικροελεγκτή» ("Microcontroller"): σειρά Cortex-M

Τα προφίλ μπορεί να αποτελούν υποσύνολο της αρχιτεκτονικής. Για παράδειγμα, το προφίλ ARMv7-M που χρησιμοποιείται από τον πυρήνα Cortex-M3 υποστηρίζει μόνο το σύνολο εντολών Thumb-2, και το προφίλ ARMv6-M (που χρησιμοποιείται από τον Cortex-M0) είναι υποσύνολο του προφίλ ARMv7-M (υποστηρίζει λιγότερες εντολές). Στην πλατφόρμα του Raspberry pi 2 που χρησιμοποιήσαμε στην εφαρμογή μας χρησιμοποιείται ο ARMv7A.

2.4 Οι μικροελεγκτές AVR

Οι AVR είναι μικροελεγκτές με επεξεργαστή RISC ο οποίος έχει σχεδιαστεί με βάση την αρχιτεκτονική Harvard. Στην αρχιτεκτονική αυτή υπάρχει ξεχωριστός δίαυλος για τη μεταφορά των δεδομένων (data bus) και ξεχωριστός για την μεταφορά των εντολών (instruction bus). Η ύπαρξη δύο διαφορετικών μνημών, μνήμη δεδομένων (data memory) και μνήμη προγράμματος (program memory), καθιστά την αρχιτεκτονική Harvard ιδιαίτερα

αποδοτική, καθώς οι εντολές εκτελούνται παράλληλα με την εγγραφή ή την προσπέλαση της μνήμης. Με αυτόν τον τρόπο, εκτελούνται περισσότερες εντολές σε έναν κύκλο ρολογιού.

Τα γενικά χαρακτηριστικά των μικροελεγκτών AVR είναι τα παρακάτω[13]

- Οι μικροελεγκτές διαθέτουν ενσωματωμένη μνήμη flash με δυνατότητα προγραμματισμού εντός του συστήματος (In System Programmable, ISP) ως μνήμη προγράμματος. Δηλαδή δεν είναι απαραίτητες εξωτερικές μνήμες ROM ή EPROM που να περιέχουν τον κώδικα και δε χρειάζεται για τον προγραμματισμό τους να μεταφερθούν σε κάποια εξωτερική συσκευή.
- Οι μικροελεγκτές διαθέτουν 32 καταχωρητές εργασίας των 8 bit. Συνεπώς υπάρχουν αρκετές θέσεις ώστε, οι διάφορες μεταβλητές να μπορούν να αποθηκεύονται εντός της Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας αντί των θέσεων μνήμης, όπου η διαδικασία πρόσβασης απαιτεί περισσότερο χρόνο.
- Διαθέτουν ενσωματωμένη μνήμη δεδομένων τύπου EEPROM και SRAM στα περισσότερα μοντέλα. Οι μνήμες αυτές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση σταθερών τιμών και μεταβλητών καθώς δεν χάνουν τα δεδομένα τους με τη διακοπή της τροφοδοσίας ρεύματος.
- Διαθέτουν ενσωματωμένο προγραμματιζόμενο χρονιστή με μονάδα διαίρεσης συχνότητας (prescaler). Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια του χρονισμού είναι κρίσιμη.
- Διαθέτουν προγραμματιζόμενο χρονιστή επιτήρησης (Watch Dog Timer), ο οποίος επιβλέπει την αποφυγή εσφαλμένων λειτουργιών σε περίπτωση κατάρρευσης του συστήματος.
- Διαθέτουν έως τέσσερις παράλληλες θύρες (των 8-bit) και πληθώρα περιφερειακών όπως UART, SPI, αναλογικό συγκριτή, μετατροπέα ADC κ.ά. Για την υποστήριξη των θυρών εισόδου-εξόδου διαθέτουν έως και 64 καταχωρητές (δεδομένων, ελέγχου, και ρύθμισης λειτουργίας).
- Έχουν τη δυνατότητα για εξωτερικές και εσωτερικές διακοπές (interrupts).
- Έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας σε συχνότητες χρονισμού από 0 έως 10MHz. Καθώς οι περισσότερες εντολές ολοκληρώνονται σε μία περίοδο του κεντρικού σήματος χρονισμού (το ρολόι της Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας), η επίδραση είναι ανώτερη σε σύγκριση με τους κλασικούς μικροελεγκτές που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα χρονισμού, αλλά απαιτούν για την εκτέλεση μιας εντολής περισσότερους κύκλους ρολογιού.
- Τα διάφορα μοντέλα διαθέτουν ενσωματωμένο ταλαντωτή τύπου RC για επιλογή της συχνότητας χωρίς τη χρήση εξωτερικού κρυστάλλου.
- Διαθέτουν εσωτερικό κύκλωμα που επανατοποθετεί το σύστημα κατά την εφαρμογή της τάσης τροφοδοσίας (Power On Reset – POR)

- Διαθέτουν λειτουργίες αποκοπής (Power down) και ηρεμίας (Sleep). Ο επεξεργαστής τίθεται στις καταστάσεις αυτές όταν δεν υπάρχει δραστηριότητα, ούτως ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ισχύος.

Το σημαντικό σε όλους τους τύπου μικροελεγκτών AVR είναι ότι ο πυρήνας της αρχιτεκτονικής τους είναι ο ίδιος και έχουν το ίδιο σύνολο εντολών. Διαφέρουν μόνο στα περιφερειακά και στο μέγεθος της μνήμης που παρέχουν. Συνεπώς, το λογισμικό είναι μεταφέρσιμο μεταξύ των διάφορων τύπων. Φυσικά, αν ένας μικροελεγκτής διαθέτει μεγαλύτερη πληθώρα περιφερειακών, απαιτείται η εισαγωγή του αντίστοιχου κώδικα για την λειτουργία τους.

2.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι απαραίτητα για την επικοινωνία ενός μικροεπεξεργαστή ή ενός μικροελεγκτή με τα περιφερειακά ολοκληρωμένα κυκλώματα, όπως έναν A/D μετατροπέα. Τα δύο βασικά πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι η Μονάδα Σειριακής Περιφερειακής Επικοινωνίας (Serial Peripheral Interface - SPI) και ο Δίαυλος Διασύνδεσης Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (Inter Integrated Circuit – I²C). Παρακάτω παρουσιάζεται και αναλύεται το πρωτόκολλο SPI καθώς αυτό χρησιμοποιήθηκε και υλοποιήθηκε στην εφαρμογή μας.

2.5.1 SPI

Η μονάδα σύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (Serial Peripheral Interface – SPI) είναι ένας διάυλος επικοινωνίας κοντινών αποστάσεων μεταξύ των μικροελεγκτών και διάφορων άλλων περιφερειακών συσκευών, όπως οι μετατροπείς αναλογικού-σε-ψηφιακό, και χρησιμοποιείται ευρέως σε ενσωματωμένα συστήματα.

Υλικό του SPI

Η αρχιτεκτονική της επικοινωνίας είναι το μοντέλο μίας κύριας συσκευής (master) η οποία αρχικοποιεί και ελέγχει μία ή περισσότερες δευτερεύουσες συσκευές (slaves). Η επικοινωνία προϋποθέτει τη συμφωνία μεταξύ κύριας και δευτερεύουσας συσκευής στις ρυθμίσεις του σήματος χρονισμού. Τέσσερα σήματα χρειάζονται για την επικοινωνία: MISO, MOSI, SCK και SS. Η λειτουργία κάθε σήματος είναι η εξής:

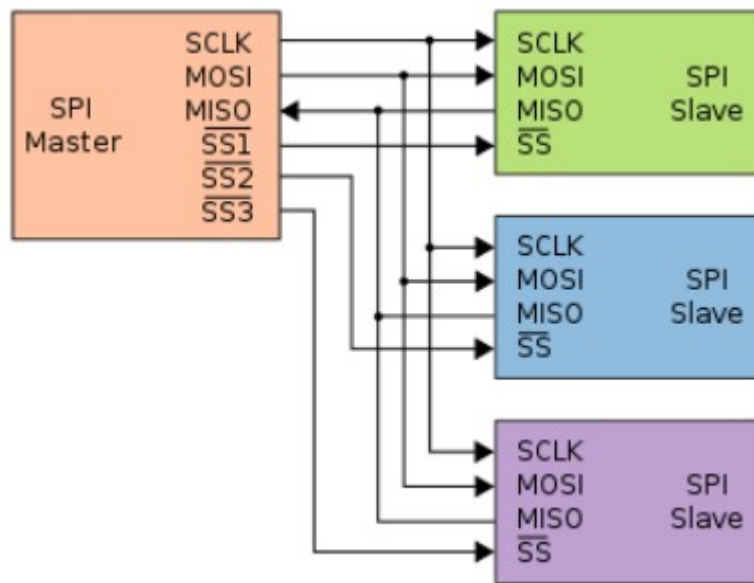
MISO (Master In Slave Out): Η έξοδος των σημάτων της δευτερεύουσας συσκευής.

MOSI (Master Out Slave In): Η έξοδος των σημάτων της κύριας συσκευής.

SCK(Serial Clock): Στην κύρια διάταξη είναι η έξοδος του σήματος της γεννήτριας χρονισμού, ενώ στην δευτερεύουσα είναι η είσοδος του σήματος χρονισμού.

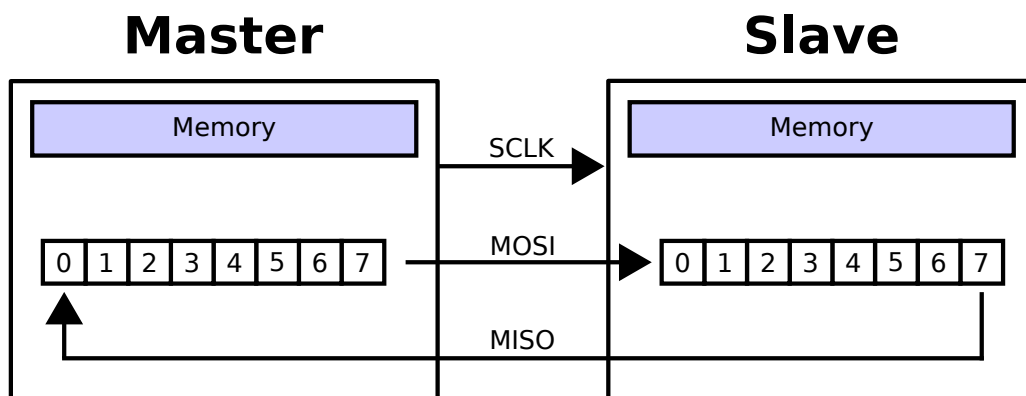
SS (Slave Select): Το σήμα επιλογής δευτερεύουσας συσκευής. Όταν είναι σε υψηλή κατάσταση (high), όλοι οι ακροδέκτες των δευτερευουσών διατάξεων είναι είσοδοι και δεν λαμβάνουν δεδομένα από τη μονάδα SPI. Όταν είναι σε χαμηλή κατάσταση η μονάδα SPI ενεργοποιείται, Το λογισμικό της κύριας ελέγχει τη γραμμή SS κάθε δευτερεύουσας. Στην κύρια διάταξη, η συμπεριφορά του ακροδέκτη SS εξαρτάται από τη κατεύθυνση δεδομένων του ακροδέκτη. Αν ο SS ρυθμιστεί ως έξοδος, τότε δεν επιδρά στην μονάδα SPI. Αν ρυθμιστεί ως είσοδος, τότε πρέπει να διατηρηθεί σε υψηλή κατάσταση για να επιτύχουμε κύρια λειτουργία (master).

Στο σχήμα (2.2) φαίνεται η επικοινωνία της κύριας συσκευής με περισσότερες περιφερειακές:



Εικόνα 2.2: Βασική δομή υλικού της επικοινωνίας SPI

Μετάδοση δεδομένων



Εικόνα 2.3: Οι καταχωρητές ολίσθησης της επικοινωνίας SPI

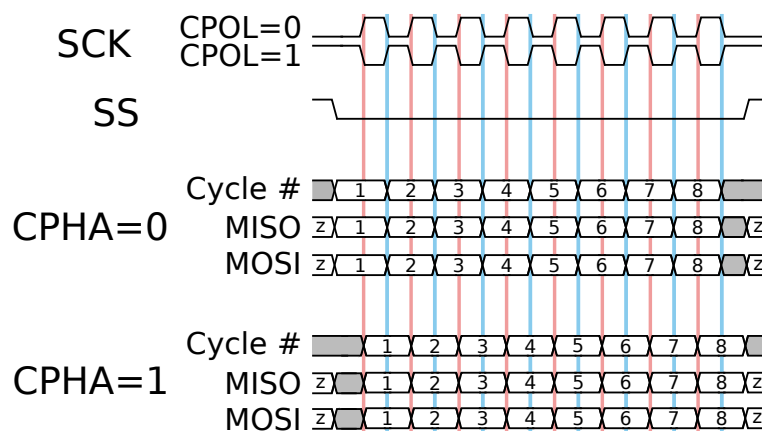
Ο πυρήνας της μονάδας SPI είναι ένας 8-bit καταχωρητής ολίσθησης, που βρίσκεται και στις δύο συσκευές όπως φαίνεται στο σχήμα (2.3). Πριν αρχίσει η επικοινωνία, η κύρια συσκευή ρυθμίζει το ρολόι, που συνήθως είναι της τάξεως των MHz. Ύστερα, γίνεται η επιλογή της περιφερειακής συσκευής μέσω της θύρας SS, η οποία μεταβαίνει στο λογικό 0 για την επιλεγμένη γραμμή μεταφοράς. Σε μερικές περιπτώσεις, είναι απαραίτητη μία περίοδος αναμονή μέχρι την αρχή της επικοινωνίας, η οποία εξαρτάται από την εκάστοτε περιφερειακή συσκευή. Οι δύο συσκευές τοποθετούν τα δεδομένα τους στους καταχωρητές ολίσθησης.

Με το που αρχίσει η επικοινωνία η κύρια συσκευή παράγει 8 παλμούς ρολογιού και τα περιεχόμενα του καταχωρητή ολίσθησης του master μεταφέρονται στον slave και αντίστροφα. Αυτό σημαίνει ότι η επικοινωνία SPI είναι αμφίδρομη. Σε κάθε bit που στέλνει η κύρια συσκευή μέσω του διαύλου MOSI, η περιφερειακή συσκευή στέλνει το πρώτο bit του καταχωρητή ολίσθησης μέσω της γραμμής MISO.

Η επιλογή του bit που θα μεταφερθεί από τον καταχωρητή ολίσθησης της κάθε συσκευής, εξαρτάται κυρίως από την περιφερειακή σύσκευή και ποιο μοντέλο υποστηρίζει. Όσον αφορά την κύρια συσκευή, η επιλογή αυτή ρυθμίζεται στις αρχικοποιήσεις της επικοινωνίας. Συνηθέστερη περίπτωση είναι η μετάδοση των δεδομένων να αρχίζει με το πιο σημαντικό bit (MSB). Μετά το τέλος της μετάδοσης η κύρια και η δευτερεύουσα συσκευή έχουν πλέον ανταλλάξει περιεχόμενο στους καταχωρητές ολίσθησης. Εάν είναι απαραίτητη η συνέχιση της μετάδοσης νέων δεδομένων, τότε οι καταχωρητές φορτώνονται εκ νέου και ξεκινάει η ίδια διαδικασία. Όταν η τερματίζει οριστικά η μετάδοση, η κύρια συσκευή σταματά να στέλνει σήματα ρολογιού και συνήθως αποσυνδέει την περιφερειακή συσκευή[13].

Πόλωση και φάση σήματος ρολογιού

Η κύρια συσκευή πέρα από την ρύθμιση της συχνότητας λειτουργίας του ρολογιού, ρυθμίζει και την πόλωση σήματος ρολογιού (Clock Polarity – CPOL) και τη φάση σήματος ρολογιού (CPHA) [14]. Ένα τυπικό διάγραμμα χρονισμού φαίνεται στην εικόνα (2.4):



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα πόλωσης και φάσης σήματος ρολογιού

Για τον καθορισμό των τιμών λειτουργίας της φάση και της πόλωσης διακρίνουμε τις παρακάτω καταστάσεις:

Όταν η πόλωση είναι $CPOL=0$ η τιμή βάσης του ρολογιού είναι το 0, επομένως η ενεργή κατάσταση του είναι στο λογικό 1 και η κατάσταση αδράνειας στο λογικό 0.

- Όταν η φάση είναι ίση με $CPHA=0$, τα δεδομένα λαμβάνονται κατά την θετική ακμή του σήματος χρονισμού και εξάγονται κατά την αρνητική
- Όταν η φάση είναι ίση με $CPHA=1$, τα δεδομένα λαμβάνονται κατά την αρνητική ακμή και εξάγονται κατά την θετική.

Όταν η πόλωση είναι ίση με $CPOL=1$, τότε η τιμή βάσης του ρολογιού είναι το 1, επομένως η ενεργή κατάσταση του είναι στο λογικό 0 και η κατάσταση αδράνειας στο λογικό 1.

- Όταν η φάση είναι ίση με $CPHA=0$, τα δεδομένα λαμβάνονται κατά την αρνητική ακμή και εξάγονται κατά την θετική.
- Όταν η φάση είναι ίση με $CPHA=1$, τα δεδομένα λαμβάνονται κατά την θετική ακμή του σήματος χρονισμού και εξάγονται κατά την αρνητική.

Επομένως όταν η $CPHA=0$, η δειγματοληψία πραγματοποιείται στην αρχή της φάσης χρονισμού, δηλαδή στην πρώτη ακμή του παλμού ρολογιού. Όταν η $CPHA=1$, η δειγματοληψία πραγματοποιείται στο τέλος της φάσης χρονισμού, δηλαδή στη δεύτερη ακμή, είτε θετική είτε αρνητική.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της επικοινωνίας SPI συνοψίζονται στα:

- ✓ Είναι αμφίδρομη επικοινωνία
- ✓ Μεγάλη ευελιξία για τα μεταφερόμενα bits
- ✓ Δεν περιορίζεται στην μεταφορά 8-bit λέξεων
- ✓ Σχετικά απλή διεπαφή υλικού
- ✓ Χαμηλότερες απαιτήσεις ισχύος σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα όπως το I²C
- ✓ Η δευτερεύουσα επαφή χρησιμοποιεί το ρολόι της κύριας και δεν χρειάζεται ταλαντωτής
- ✓ Η δευτερεύουσα συσκευή δεν χρειάζεται μοναδική διεύθυνση
- ✓ Χρησιμοποιεί 4 ακροδέκτες, τα οποία είναι πολύ λιγότερα από άλλες παράλληλες

επικοινωνίες

- ✓ Έχει μόνο μία μοναδική θύρα για κάθε συσκευή (την SS). Όλες οι υπόλοιπες μοιράζονται
- ✓ Τα σήματα είναι μονής κατεύθυνσης, επιτρέποντας εύκολη γαλβανική απομόνωση

Τα κυριότερα μειονεκτήματα του είναι:

- x Χρειάζεται περισσότερους ακροδέκτες σε σχέση με το I²C πρωτόκολλο.
- x Δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου ροής από την περιφερειακή συσκευή
- x Δεν είναι δυνατή η αναγνώριση ύπαρξης δευτερεύουσας συσκευής σε υλικό επίπεδο
- x Υποστηρίζει μόνο μία κύρια συσκευή
- x Δεν έχει οριστεί πρωτόκολλο ελέγχου σφαλμάτων
- x Είναι συμβατό για επικοινωνία μικρών αποστάσεων

Κεφάλαιο 3: Αισθητήρες και μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών

3.1 Ορισμός

Ο αισθητήρας είναι μια συσκευή που λαμβάνει κάποιο ερέθισμα και αποκρίνεται μετατρέποντας το σε ηλεκτρικό σήμα. Το ερέθισμα αυτό μπορεί να είναι οποιαδήποτε ποσότητα κατάσταση ή ιδιότητα. Μπορεί να αναφερθεί και με τον όρο μετρούμενο μέγεθος, δίνοντας έμφαση στα ποσοτικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων κι όχι στα ποιοτικά. Ο σκοπός των αισθητήρων είναι να αποκρίνονται σε κάποιο φυσικό μέγεθος ή ιδιότητα και να το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα κατάλληλο για ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα. Γενικά, είναι μεταφραστές μιας μη ηλεκτρικής τιμής σε μία ηλεκτρική, με την έννοια ότι αυτή μπορεί να διοχετεύεται, να ενισχύεται, και να τροποποιείται από ηλεκτρονικές συσκευές. Το σήμα εξόδου μπορεί να είναι τάση ή ρεύμα, ενώ το πλάτος, η συχνότητα, η φάση ή ο ψηφιακός κώδικας είναι χαρακτηριστικά που συμπληρώνουν το χαρακτηρισμό του. Επομένως ένας αισθητήρας έχει ιδιότητες εισόδου και ηλεκτρικές ιδιότητες εξόδου.

Ο όρος αισθητήρας είναι διακριτός από τον όρο μετατροπέας (transducer). Ο transducer είναι ένας μετατροπέας μίας μορφής ενέργειας σε μία άλλη, ενώ ο αισθητήρας μετατρέπει οποιαδήποτε μορφή ενέργειας σε ηλεκτρική. Ένα παράδειγμα ενός μετατροπέα είναι το μεγάφωνο όπως μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε μεταβλητό μαγνητικό πεδίο και, στη συνέχεια, σε ακουστικά κύματα. Οι transducers μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ενεργοποιητές (actuators) σε διάφορα συστήματα. Ένας ενεργοποιητής μπορεί να περιγραφεί σαν το αντίστροφο του αισθητήρα, δηλαδή μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε άλλη μορφή (μη ηλεκτρική) ενέργεια. Για παράδειγμα ένας ηλεκτρικός κινητήρας είναι ένας ενεργοποιητής, καθώς μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι transducers, επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθούν σαν μέρη ενός πολύπλοκου αισθητήρα. Για παράδειγμα ένας χημικός αισθητήρας μπορεί να έχει ένα μέρος το οποίο μετατρέπει την ενέργεια μίας χημικής αντίδρασης σε θερμότητα, και ένα μέρος που μετατρέπει την θερμότητα σε ηλεκτρικό σήμα. Ο συνδυασμός των δύο δημιουργεί έναν χημικό αισθητήρα, δηλαδή μια συσκευή που μετατρέπει την χημική αντίδραση σε ηλεκτρικό σήμα.

3.2 Ταξινόμηση των αισθητηρων

Η ταξινόμηση των αισθητήρων εκτείνεται από πολύ απλή μέχρι αρκετά πολύπλοκη. Ανάλογα με την εφαρμογή που επιλέγουμε τους αντίστοιχους αισθητήρες και το σκοπό που εξυπηρετούν, μπορούν να επιλεγούν διαφορετικά κριτήρια διαχωρισμού. Παρακάτω θα αναλύσουμε μερικές βασικές κατηγοριοποιήσεις.

Οι αισθητήρες μπορούν να είναι ενεργητικοί ή παθητικοί. Ένας παθητικός αισθητήρας δεν

χρειάζεται κάποια επιπρόσθετη ενεργειακή πηγή και λειτουργεί κατευθείαν, παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα. Μερικά παραδείγματα παθητικών αισθητήρων είναι η φωτοδίοδος και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες. Οι ενεργητικοί αισθητήρες χρειάζονται εξωτερική ενέργεια για την λειτουργία τους, η οποία ονομάζεται σήμα διέγερσης. Οι ενεργητικοί αισθητήρες κάποιες φορές αποκαλούνται και παραμετρικοί επειδή οι ιδιότητες τους αλλάζουν στην επίδραση εξωτερικών παραγόντων και στη συνέχεια οι ιδιότητες τους μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα. Για παράδειγμα ένα θερμίστορ είναι μία θερμοευαίσθητη αντίσταση. Δεν παράγει κάποιο ηλεκτρικό σήμα, αλλά όταν το ρεύμα περάσει από αυτό (σήμα διέγερσης), η αντίσταση του μπορεί να μετρηθεί παρατηρώντας τις μεταβολές στο ρεύμα που διατρέχει ή την τάση στα άκρα του. Οι μεταβολές αυτές είναι ευθέως ανάλογες με τη θερμοκρασία με γνωστή την συνάρτηση.

Σε σχέση με την επιλεγόμενη αναφορά, οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε απόλυτους και σχετικούς. Ένας απόλυτος αισθητήρας ανιχνεύει ένα σήμα σε συνάρτηση με την απόλυτη φυσική κλίμακα που είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες της μέτρησης. Αντίθετα, ένας σχετικός αισθητήρας παράγει ένα σήμα που σχετίζεται με κάποια ειδική τιμή. Ένα παράδειγμα απόλυτου αισθητήρα είναι το θερμίστορ. Η ηλεκτρική τιμή της αντίστασης είναι ευθέως ανάλογη στην απόλυτη θερμοκρασία στην κλίμακα Kelvin. Παράδειγμα σχετικού αισθητήρα είναι ένας άλλος αισθητήρας θερμοκρασίας, το θερμοστοιχείο. Παράγει ηλεκτρική τάση που είναι συνάρτηση της κλίσης της θερμοκρασίας στα άκρα των καλωδίων του στοιχείου. Επομένως, η έξοδος δεν μπορεί να συσχετιστεί ευθέως με την τιμή της θερμοκρασίας χωρίς μία τιμή αναφοράς. Ένα άλλο παράδειγμα απόλυτου και σχετικού αισθητήρα, είναι οι αισθητήρες πίεσης. Ένας απόλυτος αισθητήρας πίεσης παράγει ένα σήμα με βάση το κενό, που είναι το απόλυτο μηδέν στην κλίμακα πίεσης. Αντίθετα, ένας σχετικός αισθητήρας παράγει ένα σήμα σε σχέση με μια επιλεγμένη τιμή βάσης που δεν είναι το μηδέν, όπως για παράδειγμα η ατμοσφαιρική πίεση.

3.3 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Από την είσοδο στην έξοδο, ο αισθητήρας μπορεί να έχει διάφορα επίπεδα μετατροπής πριν παράξει το τελικό ηλεκτρικό σήμα. Παρακάτω θα αναλύσουμε τα διάφορα χαρακτηριστικά των αισθητήρων από την φυσική τους μορφή μέχρι τα απαιτούμενα βήματα για την μετατροπή του σήματος. Στο σημείο αυτό θεωρούμε τον αισθητήρα σαν ένα “μαύρο κουτί”, εξετάζοντας μόνο τις σχέσεις μεταξύ σήματος εισόδου και εξόδου [15].

3.3.1 Συνάρτηση μεταφοράς

Μία ιδανική ή θεωρητική σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου υφίσταται για κάθε αισθητήρα. Εάν ο αισθητήρας είχε σχεδιαστεί και κατασκευαστεί κάτω από ιδανικές συνθήκες και υλικά, τότε το σήμα εξόδου θα αναπαριστούσε πάντοτε την αληθινή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η ιδανική συνάρτηση μπορεί να αναπαριστάται με την μορφή πίνακα τιμών,

γραφικής παράστασης ή μαθηματικής σχέσης,. Αυτή η θεωρητική σχέση ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς. Η συνάρτηση μεταφοράς εκφράζει τη σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού σήματος S , που παράγεται από τον αισθητήρα και του μετρούμενου μεγέθους s , δηλαδή σε μαθηματική μορφή $S = f(s)$. Η συνάρτηση μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμικά (για παράδειγμα λογαριθμική, εκθετική κ.ά). Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μονοδιάστατη και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση :

$$S = a + b \cdot s \quad (3.1)$$

όπου

- ◆ a - το σημείο τομής ή μετατόπισης(intercept ή offset), δηλαδή η έξοδος με μηδενικό σήμα εισόδου
- ◆ b - η κλίση ή κέρδος της συνάρτησης.

Το μέγεθος S μπορεί να είναι κάποιο από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού σήματος, δηλαδή το πλάτος, η συχνότητα, η φάση και εξαρτάται από τις ιδιότητες και το είδος του αισθητήρα.

Για λογαριθμικές συναρτήσεις μεταφοράς έχουμε την παρακάτω έκφραση :

$$S = a + \ln(s) \quad (3.2)$$

Για εκθετικές συναρτήσεις μεταφοράς :

$$S = a \cdot e^{k \cdot s} \quad (3.3)$$

όπου

- ◆ k είναι γνωστή σταθερά.

Σε μερικές περιπτώσεις, οι παραπάνω συναρτήσεις δεν εκφράζουν με τον κατάλληλο τρόπο το αποτέλεσμα του αισθητήρα. Επομένως μη γραμμικές συναρτήσεις είναι κατάλληλες για τη μαθηματική έκφραση της εξόδου. Η κλίση λοιπόν της συνάρτησης για δεδομένη είσοδο s_0 , έχει ως εξής :

$$b = \frac{dS(s_0)}{ds} \quad (3.4)$$

Σε πολλούς μη γραμμικούς αισθητήρες παρατηρείται γραμμική προσέγγιση σε συγκεκριμένο εύρος τιμών. Επομένως, ακόμα και μη γραμμικά μοντέλα είναι δυνατόν να εκφραστούν

μαθηματικά από τη σχέση (3.1).

3.3.2 Εύρος ή Πλήρης Κλίμακα Εισόδου

Το δυναμικό εύρος του μετρούμενου μεγέθους που μπορεί να μετατρέψει ένας αισθητήρας ονομάζεται Εύρος ή Πλήρης Κλίμακα Εισόδου (Full-Scale Input – FS). Αντιπροσωπεύει την μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να μετρήσει ένας αισθητήρας χωρίς να παρουσιαστεί πολύ μεγάλο σφάλμα. Για αισθητήρες με ευρεία και μη γραμμική απόκριση, το δυναμικό εύρος εισόδου εκφράζεται σε decibel, δηλαδή τη λογαριθμική μέτρηση του λόγου ισχύος. Πρέπει να τονιστεί πως τα decibel δεν μετράνε απόλυτες τιμές, αλλά μόνο λόγους τιμών. Η κλίμακα decibel εκφράζει μεγέθη σημάτων σε μικρότερες τιμές, το οποίο σε πολλές περιπτώσεις είναι πιο βολικό. Εξ ορισμού, ένα decibel είναι με το λογάριθμο του λόγου των ισχύων και με το λόγο των δυνάμεων, ρεύματος ή τάσης. Αυτό αποτυπώνεται στις παρακάτω σχέσεις :

$$1 dB = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (3.5)$$

Η

$$1 dB = 20 \log \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (3.6)$$

3.3.3 Πλήρης Κλίμακα Εξόδου

Πλήρης Κλίμακα Εξόδου (Full-Scale Output – FSO) ονομάζεται η αλγεβρική διαφορά στην τιμή του σήματος εξόδου με είσοδο την μέγιστη τιμή εισόδου και τους σήματος εξόδου με την ελάχιστη τιμή εισόδου. Η σχέση αυτή περιλαμβάνει όλες τις αποκλίσεις από την ιδεατή συνάρτηση μεταφοράς.

3.3.4 Ακρίβεια

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων είναι η ακρίβεια. Στην πραγματικότητα με τον όρο αυτό εννοούμε την ανακρίβεια. Η ανακρίβεια υπολογίζεται ως η μέγιστη απόκλιση της τιμής που εμφανίζει ο αισθητήρας σε σχέση με την ιδανική ή πραγματική τιμή της εισόδου. Η πραγματική τιμή αποδίδεται στο όργανο της μέτρησης και γίνεται δεκτή με κάποια αβεβαιότητα. Η απόκλιση μπορεί να περιγραφεί σαν την διαφορά μεταξύ της τιμής που υπολογίστηκε από το σήμα εξόδου από την πραγματική τιμή εισόδου. Για παράδειγμα αν ένας ιδεατός γραμμικός αισθητήρας θερμοκρασίας, έχει προδιαγραφές ώστε να παράγει 1 mV /K και σε πείραμα με θερμοκρασία 300K, παράξει 303mV, τότε υπάρχει μία απόκλιση 3K από την πραγματική τιμή. Επομένως για εύρος 300K ο αισθητήρας

έχει ανακρίβεια μεγέθους $(\frac{3K}{300K}) \times 100\% = 3\%$. Εάν κατά τη διάρκεια του πειράματος ανακαλύψουμε απόκλιση 3K συνεχώς, σημαίνει ότι ο αισθητήρας έχει συστηματική ανακρίβεια 3K σε εύρος 300K. Φυσικά, τυχαία σφάλματα είναι πάντα παρόντα, οπότε το συστηματικό σφάλματος είναι συνδυασμός διαφόρων παραγόντων.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς σπανίως συμπίπτει με την ιδανική, εξαιτίας των κατασκευαστικών ή άλλων περιορισμών. Παρόλα αυτά, κάθε αισθητήρας πρέπει να έχει αποτελέσματα μέσα στα όρια της δηλωμένης ακρίβειας. Τα επιτρεπτά όρια διαφέρουν από την ιδανική συνάρτηση μεταφοράς κατά $\pm \Delta$. Η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς έχει απόκλιση από την ιδανική κατά $\pm \delta$. Προφανώς ισχύει ότι $\delta \leq \Delta$.

Το μέγεθος της ακρίβειας συμπεριλαμβάνει ένα συγκεκριμένο παραγόντων, όπως η υστέρηση, η νεκρή ζώνη, η βαθμονόμηση και τα επαναλαμβανόμενα σφάλματα. Θα αναφερθούμε αναλυτικά σε αυτά τα στοιχεία παρακάτω. Τα όρια της ακρίβειας γενικά αντικατοπτρίζουν το χειρότερο σενάριο στην ανάλυση, έτσι ώστε να καθοριστεί η χειρότερη δυνατή απόδοση ενός συστήματος. Πολλές φορές τα όρια της ακρίβειας μπορούν να ελαχιστοποιηθούν, χρησιμοποιώντας την βαθμονόμηση πολλαπλών σημείων. Στην περίπτωση αυτή, η ακρίβεια δεν προσδιορίζεται ως προς την απόκλιση σε σχέση με με την ιδανική συνάρτηση μεταφοράς, αλλά σε σχέση με την καμπύλη βαθμονόμησης, η οποία καθορίζεται κατά την διαδικασία βαθμονόμησης. Με τον τρόπο αυτό τα επιτρεπτά όρια μειώνονται, καθώς δεν υπολογίζονται οι παραλλαγές μεταξύ των αισθητήρων, αλλά είναι ειδικά υπολογισμένα γύρω από τη βαθμονομημένη μονάδα. Η μέθοδος αυτή προσφέρει πιο ακριβείς μετρήσεις, αν και σε κάποιες εφαρμογές είναι αποτρεπτική λόγω του κόστους.

Η ακρίβεια ή η ανακρίβεια μπορεί να εκφραστεί σε αριθμούς με διάφορες μορφές

- Σημειώνοντας κατευθείαν την τιμή του μετρούμενου μεγέθους
- Σε ποσοστό του εύρους εισόδου
- Σε σχέση με το σήμα εξόδου

Για παράδειγμα ένας αισθητήρας πίεσης έχει 100 kPa εύρος εισόδου και 10Ω εύρος εξόδου. Η ακρίβεια του μπορεί να εκφραστεί σαν ± 500 Pa, $\pm 0.5\%$ ή $\pm 0.05\Omega$ αντίστοιχα.

3.3.5 Βαθμονόμηση

Εάν οι κατασκευαστικές ανοχές του αισθητήρα ή του κυκλώματος επεξεργασίας του σήματος είναι μεγαλύτερες από την επιθυμητή ακρίβεια του συστήματος μας, τότε η διαδικασία βαθμονόμησης (calibration) είναι απαραίτητη. Για παράδειγμα, εάν θέλουμε να μετρήσουμε θερμοκρασία με ακρίβεια $\pm 0.1K$, αλλά ο αισθητήρας θερμοκρασίας που έχουμε έχει προδιαγραφές ακριβείας $\pm 0.5K$, τότε πρέπει να ακολουθήσουμε την διαδικασία της βαθμονόμησης του αισθητήρα. Να προσδιοριστούν δηλαδή οι μεταβλητές που περιγράφουν την συνολική συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, δηλαδή του αισθητήρα, του διαύλου

επικοινωνίας ή του A/D μετατροπέα. Το μαθηματικό μοντέλο της συνάρτησης μεταφοράς πρέπει να είναι γνωστό εκ των προτέρων. Συνεπώς, εάν το μοντέλο μας είναι γραμμικό θα χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση (3.1) και θα πρέπει να προσδιοριστούν οι μεταβλητές a και b , ενώ αν είναι εκθετικό θα χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση (3.3) και θα προσδιοριστούν οι μεταβλητές a και k . Η απλούστερη γραμμική συνάρτηση μεταφοράς χρειάζεται δύο σημεία για τον προσδιορισμό των μεταβλητών, επομένως θα πρέπει να γίνει βαθμονόμηση 2 σημείων. Συνεπώς, εφόσον η συνάρτηση μεταφοράς του είναι $S = a + b \cdot s$, για να προσδιοριστούν οι μεταβλητές a και b , χρειάζονται δύο τιμές εισόδου s_1 και s_2 και τα αντίστοιχα ηλεκτρικά σήματα εξόδου, S_1 και S_2 . Αντικαθιστώντας τις συγκεκριμένες τιμές στην συνάρτηση μεταφοράς προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$S_1 = a + b \cdot s_1 \quad (3.7)$$

$$S_2 = a + b \cdot s_2 \quad (3.8)$$

Κατά συνέπεια, οι σταθερές μπορούν να υπολογιστούν ως εξής. Για το κέρδος έχουμε:

$$b = \frac{S_2 - S_1}{s_2 - s_1} \quad (3.9)$$

και για την μετατόπιση:

$$a = S_1 - b \cdot s_1 \quad (3.10)$$

Για να υπολογίσουμε έπειτα την τιμή εισόδου χρησιμοποιούμε την παρακάτω σχέση:

$$s = \frac{S - a}{b} \quad (3.11)$$

Σε μερικές περιπτώσεις η κλίση b είναι γνωστό μέγεθος και δοσμένο από τον κατασκευαστή, ενώ συγχρόνως, δίνει και αρκετά αξιόπιστα και σταθερά αποτελέσματα. Έτσι, η μετατόπιση υπολογίζεται κατευθείαν από τη σχέση (3.10) αντικαθιστώντας το ήδη γνωστό b .

Για μη γραμμικούς αισθητήρες τις περισσότερες χρειάζονται περισσότερο από δύο σημεία. Αυτό εξαρτάται, βέβαια, και από την συνάρτηση μεταφοράς. Κάθε συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν πολυωνυμική και σε συνάρτηση με την απαιτούμενη ακρίβεια να επιλεγεί ο αριθμός των σημείων της βαθμονόμησης. Επειδή η βαθμονόμηση είναι αργή διαδικασία για να μειωθεί το κατασκευαστικό κόστος, είναι απαραίτητο να επιλεγθούν τα ελάχιστα δυνατά σημεία βαθμονόμησης.

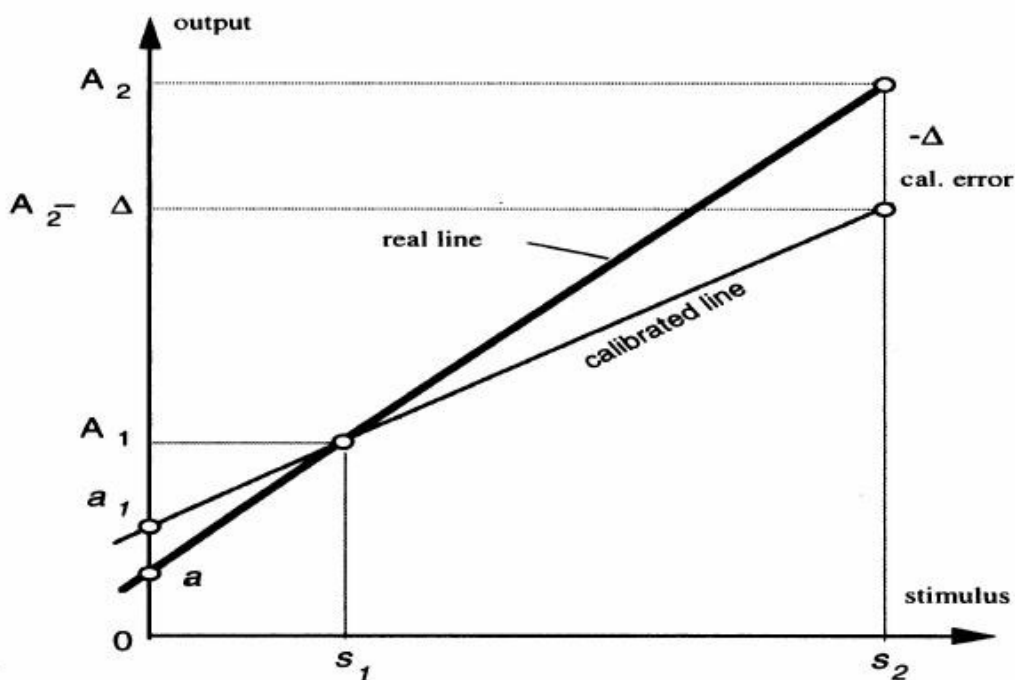
Ένας άλλος τρόπος βαθμονόμησης μη γραμμικών αισθητήρων είναι η τμηματική προσέγγιση (piecewise approximation). Όπως αναφέραμε παραπάνω, κάθε τμήμα μίας καμπύλης, όταν ελαχιστοποιηθεί κατάλληλα, μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά σαν γραμμικό. Συνεπώς, η συνολική καμπύλη περιγράφεται σαν ένα σύνολο από γραμμικές συναρτήσεις, κάθε μία από τις οποίες έχει τις δικές της σταθερές a και b . Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, πρέπει να επισημανθεί σε ποιο τμήμα της καμπύλης ανήκει κάθε σήμα εξόδου έτσι ώστε να μπορέσει να

υπολογιστεί η πραγματική τιμή εισόδου από τη σχέση (3.11).

Γενικότερα, η βαθμονόμηση επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη συνολική τιμή ακρίβειας του συστήματος μας. Μια αβεβαιότητα στο στάδιο βαθμονόμηση, υπεισέρχεται στη συνολική αβεβαιότητα του αισθητήρα ή γενικότερα του μετρητικού οργάνου.

3.3.6 Σφάλμα βαθμονόμησης

Το σφάλμα βαθμονόμησης (calibration error) είναι η ανακρίβεια που προκύπτει όταν ο αισθητήρας έχει βαθμονομηθεί στο εργοστάσιο. Το σφάλμα αυτό είναι συστηματικό, δηλαδή προστίθεται σε κάθε πραγματική συνάρτηση μεταφοράς και μετακινεί την ακρίβεια της μετατροπής κατά μία σταθερή τιμή. Δεν είναι υποχρεωτικό να έχει ίδια τιμή σε όλο το εύρος μέτρησης, αλλά εξαρτάται από τον τύπο του σφάλματος. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 3.1: Το σφάλμα βαθμονόμησης

Το σφάλμα της μετατόπισης στην συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\delta_{\alpha} = \alpha_1 - \alpha = \frac{\Delta}{s_2 - s_1}, \quad (3.12)$$

και το σφάλμα του κέρδους :

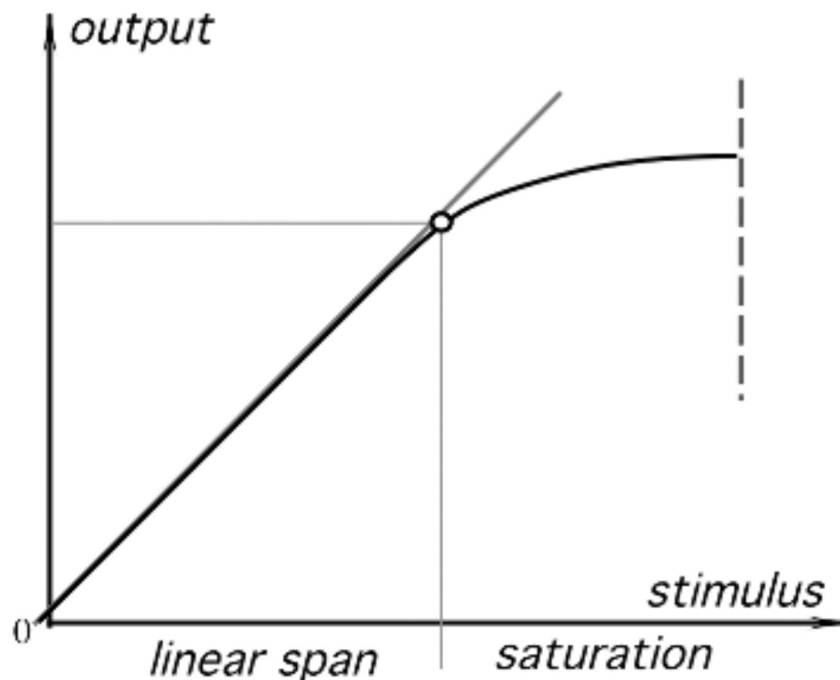
$$\delta_b = -\frac{\Delta}{s_2 - s_1} \quad (3.13)$$

3.3.7 Υστέρηση

Το σφάλμα υστέρησης είναι η απόκλιση της εξόδου του αισθητήρα όταν η κατεύθυνση της μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Ο ορισμός γίνεται πιο κατανοητός με το παράδειγμα ενός αισθητήρα μετατόπισης, στον οποίο η τιμή της τάσης εξόδου όταν το αντικείμενο μετακινείται κατά τη θετική φορά του άξονα διαφέρει από την τιμή αρνητική μετατόπισης. Αν η διαφορά αυτή είναι 20mV και ο αισθητήρας μετράει 10mV/mm τότε η υστέρηση σε μονάδες μετατόπισης είναι 2mm. Μερικές αιτίες της υστέρησης είναι η τριβή ή άλλες μορφολογικές αλλαγές των υλικών.

3.3.8 Κορεσμός

Κάθε αισθητήρας έχει κάποια όρια λειτουργίας. Ακόμα και αν είναι γραμμικός, μετά από κάποιες τιμές εισόδου του μετρούμενου μεγέθους, η απόκριση του δε θα είναι σωστή. Μία περαιτέρω αύξηση του ερεθίσματος, δεν παράγει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται κορεσμός.



Εικόνα 3.2: Ο κορεσμός του σήματος εξόδου ενός αισθητήρα

3.3.9 Επαναληψιμότητα

Το σφάλμα επαναληψιμότητας δημιουργείται από την αδυναμία του αισθητήρα να παράγει το ίδιο σήμα εξόδου κάτω από ακριβώς ίδιες συνθήκες εισόδου. Εμφανίζεται και καταγράφεται σαν την μέγιστη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων όπως προσδιορίζεται μεταξύ δύο κύκλων βαθμονόμησης. Αναπαρίσταται σαν το ποσοστό % του συνολικού εύρους :

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} \times 100 \% \quad (3.14)$$

3.3.10 Νεκρή Ζώνη

Νεκρή ζώνη (Dead Band) ονομάζεται το μέγιστο ποσό αλλαγής της εισόδου που δεν επιφέρει αλλαγή στην έξοδο, αλλά παραμένει γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή, συνήθως το μηδέν.

3.3.11 Διακριτική Ικανότητα

Ο όρος διακριτική ικανότητα (resolution) αναφέρεται στη μικρότερη αλλαγή τιμής εισόδου που μπορεί να ανιχνευτεί από τον αισθητήρα. Η διακριτική ικανότητα είναι εμφανώς κατανοήσιμη σε μία ψηφιακή οθόνη, παρατηρώντας το λιγότερο σημαντικό ψηφίο το οποίο θα μεταβληθεί με ανάλογη αλλαγή του μετρούμενου. Η ανάλυση σχετίζεται με την ακρίβεια με την οποία γίνεται η μέτρηση. Για παράδειγμα, ένα αισθητήρας μέτρησης της θερμοκρασίας έχει διακριτική ικανότητα 0.1°C, τότε είναι σε θέση να ανιχνεύσει την αλλαγή από 25°C σε 25.1°C, αλλά όχι τις ενδιάμεσες τιμές.

3.4 Μέτρηση ρεύματος

Για την μέτρηση του ρεύματος είναι απαραίτητος κάποιος αισθητήρας ή μετατροπέας (transducer) ρεύματος. Η διάκριση αυτή γίνεται γιατί ο αισθητήρας μετατρέπει οποιαδήποτε μορφή ενέργειας σε ηλεκτρική, ενώ ο transducer μία μορφή ενέργειας σε οποιαδήποτε άλλη. Το παραγόμενο σήμα μπορεί να είναι αναλογικό ρεύμα, αναλογική τάση ή ακόμα και ψηφιακό σήμα. Η είσοδος μπορεί να είναι είτε εναλλασσόμενη, είτε συνεχές ρεύμα και ανάλογα την εφαρμογή επιλέγουμε τον κατάλληλο αισθητήρα.

Οι πιο συνηθισμένες τεχνολογίες μέτρησης ρεύματος για μετρητικά και καταγραφείς είναι η παρακάτω:

- Αντιστάσεις
- Hall Effect αισθητήρες
- Μετασχηματιστές ρεύματος (transformers)
- Rogowski coil

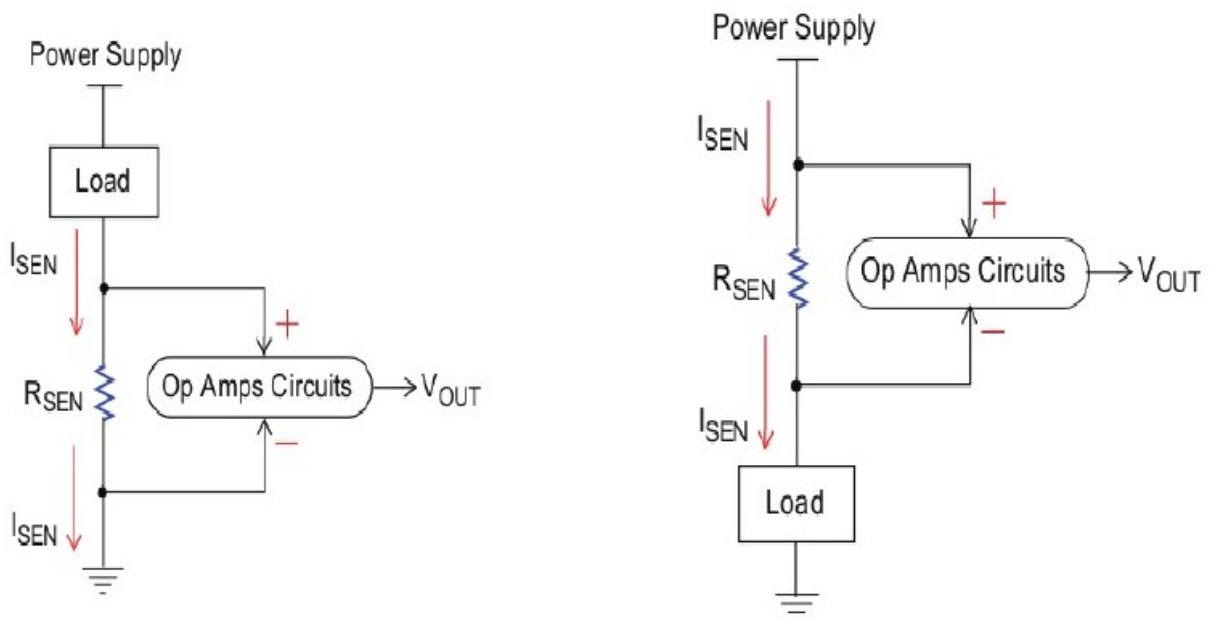
3.4.1 Αντιστάσεις

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αντιστάσεις για μέτρηση. Οι πιο συνηθισμένες αντιστάσεις είναι οι shunt. Οι shunt είναι αρκετά σταθερές, χαμηλής αντιστατικής ακρίβειας αντιστάσεις, κατάλληλες για την μέτρηση DC και AC ρευμάτων μέσω του υπολογισμού της πτώσης τάσης που προκαλεί το ρεύμα που διαπερνά την αντίσταση. Το βασικό χαρακτηριστικό που κάνει τις shunt αντιστάσεις κατάλληλες για μέτρηση ρεύματος είναι ότι δεν μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, με την αλλαγή της θερμοκρασίας και με το ρεύμα που τις διαπερνά. Επομένως έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τις απλές αντιστάσεις.

Οι δύο βασικές μέθοδοι χρήσης των αντιστάσεων είναι στην χαμηλή πλευρά και στην υψηλή πλευρά δηλαδή μετά ή πριν το φορτίο. Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στις ίδιες αρχές μέτρησης, δηλαδή στο νόμο του Ohm, δηλαδή,

$$V_{signal} = I_{sensor} \times R_{shunt} \quad (3.15)$$

Στην εικόνα (3.3) φαίνονται τα κυκλώματα και για τις δύο μεθόδους [16].



Εικόνα 3.3: Μέτρηση του ρεύματος με τη μέθοδο των Shunt αντιστάσεων

Στην πρώτη περίπτωση τα πλεονεκτήματα είναι η χαμηλή τάση κοινού σημείου, η χαμηλή τροφοδοσία και η κοινή γείωση και αναφορά εισόδου και εξόδου. Συνεπώς το κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος είναι μειωμένα. Από την άλλη το φορτίο προσθέτει ανεπιθύμητη αντίσταση στο κύκλωμα, ενώ τα μεγάλα ρεύματα είναι δύσκολο να εντοπιστούν.

Στη δεύτερη περίπτωση, εξαλείφονται οι διαταραχές λόγω γείωσης της αντίστασης και το φορτίο συνδέεται κατευθείαν στη γείωση. Αντίθετα, δημιουργεί πολύ μεγάλες και δυναμικές τάσεις κοινού σημείου και χρειάζεται μεγαλύτερη τροφοδοσία με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος.

Γενικότερα, η μέθοδος αυτή προσφέρει χαμηλού κόστους και αρκετά καλής ακρίβειας μέτρηση. Επίσης, προσφέρει ένα καλό εύρος μετρούμενων ρευμάτων από μικρά, μέχρι μεσαία ρεύματα και είναι κατάλληλη για DC και AC μετρήσεις. Στα αρνητικά, αναφέρουμε την πρόσθετη αντίσταση που προκαλεί το φορτίο, την χρήση op-amp ενισχυτή για την ενίσχυση του σήματος και την απόρριψη της τάσης κοινού σημείου. Επίσης έχουμε συνολικά απώλειες ισχύος στο κύκλωμα. Από τη στιγμή που η ισχύς υπολογίζεται από την σχέση $P=I^2 \cdot R$, η αύξηση ρεύματος επηρεάζει στο τετράγωνο την απώλεια ισχύος. Το βασικό όμως πρόβλημα, είναι η μη απομόνωση του κυκλώματος εισόδου με το μετρητικό σύστημα.

3.4.2 Μετασηματιστές ρεύματος

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος μέτρησης ρεύματος σε συστήματα ισχύος είναι μέσω μετασηματιστή ρεύματος (Current Transformer – CT). Ο σκοπός ενός μετασηματιστή ρεύματος, είναι να μετατρέψει το ρεύμα του πρωτεύοντος ενός συστήματος ισχύος σε ένα σήμα που μπορεί να αξιοποιηθεί από ηλεκτρομηχανικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Αυτές μπορεί να είναι όργανα ολοκλήρωσης ενέργειας, προστατευτικά relay, transducers κ.ά. Επειδή υπάρχει ένα μεγάλο εύρος συσκευών που μπορεί να συνδεθεί, τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε μετασηματιστή παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του κατάλληλου για την εκάστοτε εφαρμογή [17].

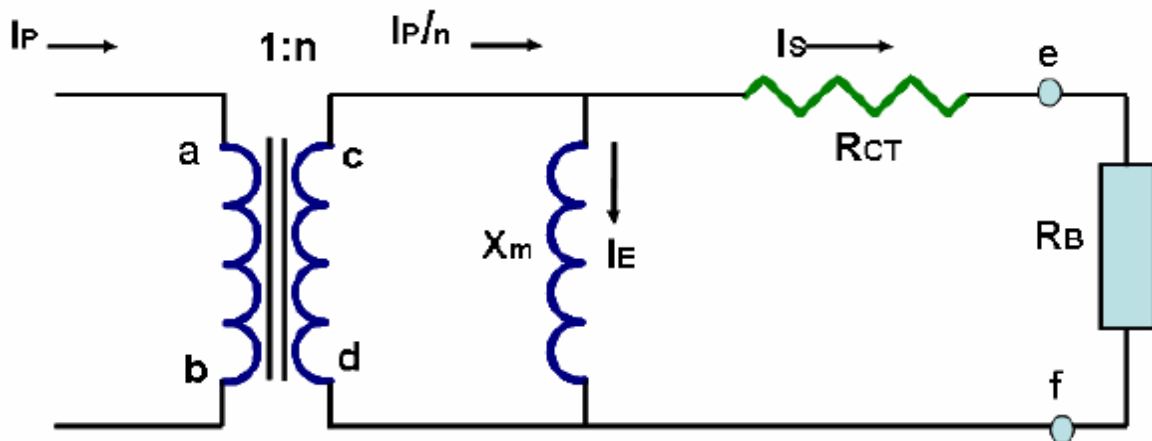
Ο μετασηματιστής συνδέεται σε σειρά με την συσκευή που παράγει το ρεύμα προς μέτρηση και μετατρέπει το ρεύμα του πρωτεύοντος στο δευτερεύον τύλιγμα, σύμφωνα με τη σχέση :

$$I_p = n \cdot I_s \quad (3.16)$$

όπου

- ◆ I_p το ρεύμα του πρωτεύοντος
- ◆ I_s το ρεύμα του δευτερεύοντος
- ◆ n ο λόγος των τυλιγμάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Δηλαδή:

$$n = \frac{N_s}{N_p} \quad (3.17)$$



Εικόνα 3.4: Το κυκλωματικό ισοδύναμο του μετασχηματιστή

Συνήθως οι μετασχηματιστές έχουν αριθμό τυλιγμάτων πρωτεύοντος ίσο με 1, επομένως το n αναφέρεται στον αριθμό των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος. Η παραπάνω σχέση (3.17), αφορά ιδανικού μετασχηματιστές ρεύματος χωρίς απώλειες και με μηδενικό ρεύμα μαγνήτισης. Πρακτικά οι μετασχηματιστές έχουν ένα ρεύμα μαγνήτισης στο πυρήνα του σιδήρου και πτώση τάσης ανάλογη του ρεύματος του δευτερεύοντος εξαιτίας της αντίστασης των τυλιγμάτων. Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή φαίνεται στο σχήμα (3.4)

Η αντίσταση R_B είναι η αντίσταση μέτρησης (burden resistance). Η επιλογή της αντίστασης αυτής καθορίζει το πλάτος της τάσης εξόδου που θα παραχθεί από τον μετασχηματιστή. Από το νόμο του Ohm έχουμε ότι :

$$V_o = R_B \cdot I_s \quad (3.18)$$

Συνδυάζοντας το παραπάνω με τη σχέση (3.16) που συνδέει το ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, εξάγουμε :

$$V_o = \frac{R_B \cdot I_p}{n} \quad (3.19)$$

Από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να καθορίσουμε την τιμή της τάσης εξόδου, ανάλογα με την εφαρμογή που χρειαζόμαστε.

Γενικά, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε ο πυρήνας του μετασχηματιστή να καλύπτει τις απαιτήσεις του φορτίου, που συμπεριλαμβάνει και την αντίσταση μέτρησης. Τυπικές τιμές φορτίου κατά τα πρότυπα IEC είναι τα 1.5 VA, 3 VA, 5 VA, 10 VA, 15 VA, 20 VA, 30 VA, 45

VA και 60 VA. Οι αντίστοιχες τυπικές τάξεις μεγέθους φορτίου για τα πρότυπα IEEE είναι B-0.1, B-0.2, B-0.5, B-1.0, B-2.0 και B-4.0. Αυτό σημαίνει πως ένας μετασχηματιστής τάξης B-0.2 έχει αντοχές μέχρι 0.2Ω στο δευτερεύον τύλιγμα. Οι τιμές αυτές είναι υπολογισμένες για ρεύματα εξόδου 5A. Για άλλη τιμή ρευμάτων πρέπει να γίνει εκ νέου υπολογισμός του ωμικού φορτίου, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η ισχύς.

Γενικά, η αντίσταση μέτρησης δεν πρέπει να είναι εκτός των προδιαγραφών. Αν η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη θα δημιουργήσει πρόβλημα γραμμικότητας και η ακρίβεια του μετασχηματιστή δε θα είναι η αναμενόμενη. Με τη χρησιμοποίηση πολύ μικρής αντίστασης, μειώνεται αρκετά η τάση εξόδου και υπάρχουν προβλήματα σχετικά με το εύρος της μέτρησης που χρειαζόμαστε.

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών που πρέπει να ελέγχονται κατά την επιλογή είναι ο λόγος μετασχηματισμού, η ακρίβεια, η πολικότητα, η κλάση, το ρεύμα κορεσμού, τα χαρακτηριστικά διέγερσης και οι τιμές των ρευμάτων, της τάσης και της θερμοκρασίας ώστε να είναι κατάλληλο για διασύνδεση με το πρωτεύον.

Η ακρίβεια των μετασχηματιστών ρεύματος εξαρτάται από μια πληθώρα παραγόντων. Μερικοί από αυτούς είναι

- Η κλάση του μετασχηματιστή
- Ο λόγος μετασχηματισμού
- Η αντίσταση μέτρησης
- Πιθανά εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία
- Η θερμοκρασία
- Η χωρητική σύζευξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος
- Η αντίσταση του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος
- Το ρεύμα μαγνήτισης

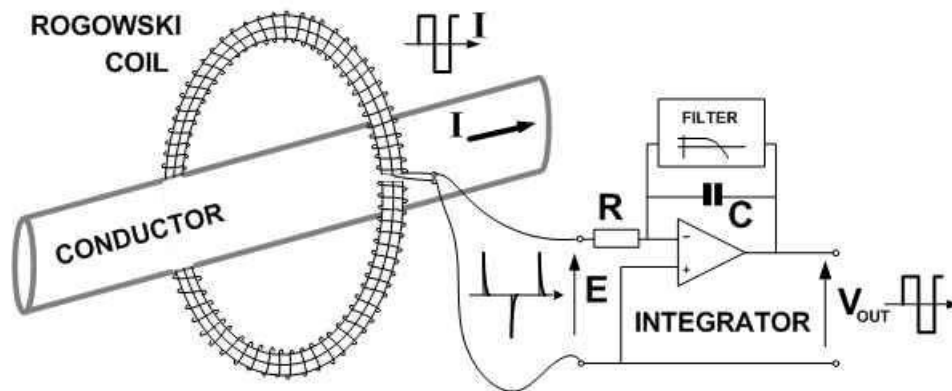
Οι κλάσεις ακρίβειας των μετασχηματιστών ρεύματος ορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61869-1 [8]. Οι τυπικές τιμές είναι 0.1, 0.2s, 0.2, 0.5, 0.5s, 1 και 3. Η ονομασία της κλάσης είναι μία προσεγγιστική αναφορά στην ακρίβεια του εκάστοτε μετασχηματιστή. Για παράδειγμα, το σχετικό σφάλμα ενός μετασχηματιστή κλάσης 1 είναι 1% στο ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του. Για μικρότερα ρεύματα το αντίστοιχο ποσοστό σχετικού σφάλματος αυξάνεται. Το σφάλμα είναι σημαντικό, ιδιαίτερα σε κυκλώματα μέτρησης και κάθε κλάση έχει ένα επιτρεπόμενο μέγιστο σφάλμα φάσης για μια καθορισμένη αντίσταση φορτίου.

Συνοψίζοντας, οι μετασχηματιστές ρεύματος αποτελούν έναν τρόπο μέτρησης χαμηλού

κόστους. Σε σχέση με τις αντιστάσεις shunt, οι οποίες έχουν το χαμηλότερο κόστος, οι μετασχηματιστές προσφέρουν γραμμικότητα για ένα μεγάλο εύρος ρεύματος και θερμοκρασίας. Επίσης, καταναλώνουν λιγότερη ισχύ και προσφέρουν απομόνωση στο υπόλοιπο κύκλωμα μέτρησης, ένας αρκετά σημαντικός παράγοντας ειδικά για την μέτρηση μεγάλων ρευμάτων.

3.4.3 Πηνίο Rogowski

Η λειτουργία του πηνίου Rogowski βασίζεται στο νόμο Faraday, δηλαδή στο ότι η συνολική ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται σε ένα κλειστό κύκλωμα είναι ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής στο χρόνο [18].



Εικόνα 3.5: Μέτρηση ρεύματος με τη μέθοδο του πηνίου Rogowski

Τάση μπορεί να επαχθεί σε ένα κλειστό βρόγχο αφαιρώντας τον αγωγό από το μαγνητικό πεδίο ή τοποθετώντας το βρόγχο σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η επαγόμενη τάση ορίζεται από την παρακάτω σχέση (που εξάγεται από το νόμο Faraday και τις εξισώσεις του Maxwell).

$$V = \oint (u' \cdot B) dl - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (3.20)$$

Όπου

- ◆ u - η ταχύτητα του τμήματος dl του αγωγού
- ◆ dl - το τμήμα του αγωγού
- ◆ B - η πυκνότητα μαγνητικής ροής
- ◆ t - ο χρόνος

- ◆ dS - ένα μικρό μέρος της επιφάνειας

Η πολικότητα της τάσης καθορίζεται από το νόμο του Lenz που σημειώνει πως είναι τέτοια ώστε να δημιουργεί ρεύμα το οποίο παράγει μαγνητική ροή κατά την φορά που αντιτίθεται στην μεταβολή της μαγνητικής ροής που διαπερνά το βρόγχο.

Ο βρόγχος μπορεί να είναι απλό τυλίγμα, ελικοειδής, τοροειδής ή άλλη διαμόρφωση κατάλληλη να σχηματιστεί ένας αισθητήρας. Στο πηνίο Rogowski της εικόνας (3.5) η μετρούμενη τάση του, είναι ανάλογη του λόγου μεταβολής του μαγνητικού πεδίου.

Η τυπική χρήση του πηνίου είναι να διαμορφωθεί σε ένα κλειστό μονοπάτι με σκοπό να παραχθεί ένα σήμα ανάλογο του ρεύματος που διαπερνά το άνοιγμα του πηνίου. Σε αυτό το σχηματισμό το πηνίο παράγει τάση ίση με την εξίσωση:

$$V = -K \cdot N \cdot A \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.21)$$

Όπου

- ◆ K - σταθερά
- ◆ N - ο αριθμός των τυλιγμάτων ανά μονάδα μήκους
- ◆ A - το μέσο εμβαδό του τυλίγματος
- ◆ $d\Phi/dt$ - η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής

Από τη στιγμή που η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου είναι ευθέως ανάλογο της μεταβολής του ρεύματος του πρωτεύοντος, τότε η τάση εξόδου μπορεί να εκφραστεί κι από τη σχέση:

$$V = -K_1 \cdot N \cdot A \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.22)$$

όπου

- ◆ K_1 - η διαπερατότητα του κενού
- ◆ di/dt - χρονική μεταβολή του στιγμιαίου ρεύματος.

Είναι απαραίτητη η ολοκλήρωση της τάσης εξόδου του πηνίου, ώστε να αναδημιουργηθεί με ακρίβεια το αρχικό ρεύμα ως προς το σχήμα, τη φάση και το πλάτος. Τα σύγχρονα probes βασισμένα στο πηνίο Rogowski διαθέτουν ολοκληρωτή. Ορισμένοι χρήστες έχουν προσπαθήσει να χρησιμοποιήσουν Rogowski πηνία χωρίς ολοκληρωτή και είχαν πολλά

προβλήματα. Για παράδειγμα, εάν το ρεύμα πρωτεύοντος περιέχει μία 10^{16} τάξης αρμονική, τότε αυτή η συνιστώσα της τάσης εξόδου είναι 10 φορές το μέγεθος της σε σύγκριση με του πρωτεύοντος.

Γενικά τα πηνία Rogowski έχουν χαμηλό κατασκευαστικό κόστος. Λόγω του γεγονότος ότι αποτελούν συσκευές ανοιχτού βρόχου παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία και μπορούν να τυλιχτούν γύρω από έναν αγωγό χωρίς να τον επηρεάσουν. Επίσης, λόγω της χαμηλής επαγωγής, έχουν πολύ μικρό χρόνο απόκρισης (της τάξης των nanosecond). Εξαιτίας αυτής της ιδιότητας, καθώς και της μη ύπαρξης πυρήνα σιδήρου ώστε να επέλθει κορεσμός, τα πηνία Rogowski είναι κατάλληλα για την μέτρηση μεγάλων κρουστικών ρευμάτων. Παρόλα αυτά, μπορούν να μετρήσουν με σχετική αξιοπιστία και μικρότερα ρεύματα, παρουσιάζοντας μεγάλο εύρος μετρήσεων ρεύματος και συχνότητας.

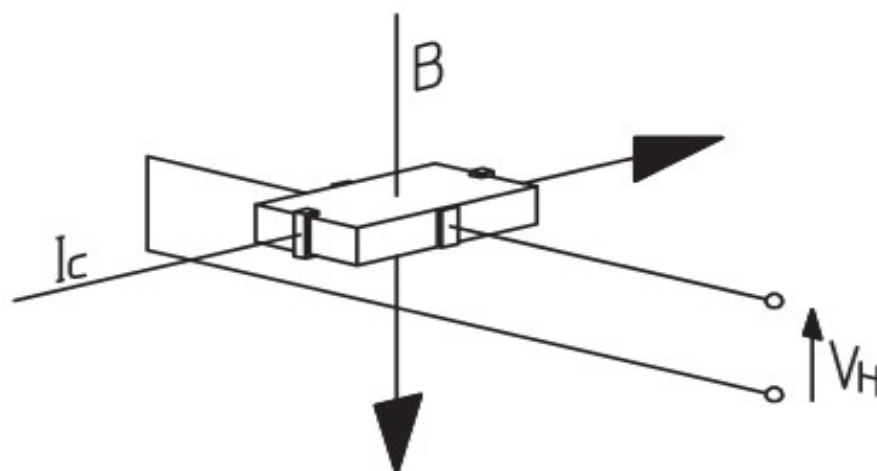
Από την άλλη πλευρά, στα αρνητικά αναφέρουμε το γεγονός ότι η έξοδος του σήματος πρέπει να περάσει μέσα από ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για να παρατηρηθεί η κυματομορφή του ρεύματος, λόγω του ότι η τάση εξόδου δεν είναι ευθέως ανάλογη του ρεύματος που διαπερνά τον αγωγό. Για τον λόγο αυτό δεν έχουν απόκριση σε συνεχές ρεύμα.

3.4.4 Hall Effect transducers

Οι Hall Effect transducers βασίζονται στο φαινόμενο Hall το οποίο προκαλείται από τις δυνάμεις Lorentz που επιδρούν σε κινούμενα φορτία μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο [19]. Η δύναμη είναι ίση με:

$$F_L = q \cdot (V \times B) \quad (3.23)$$

Η αναπαράσταση του φαινομένου Hall φαίνεται στην εικόνα (3.6).



Εικόνα 3.6: Το φαινόμενο Hall

Ένα λεπτό φύλλο επαγωγικού υλικού διαρρέεται από ρεύμα I_c . Τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία του ρεύματος επηρεάζονται από την εξωτερική μαγνητική ροή B , που παράγει μία δύναμη Lorentz F_L , κάθετη στην κατεύθυνση του ρεύματος. Το αποτέλεσμα της εκτροπής του ρεύματος, είναι να δημιουργηθούν περισσότερα ηλεκτρικά φορτία που συγκεντρώνονται στην άκρη του φύλλου, δημιουργώντας μία διαφορά δυναμικού, την τάση Hall, V_H . Για την παραπάνω διάταξη, εξάγουμε τη σχέση :

$$V_H = \frac{K}{d} \cdot I_c \cdot B \cdot V_{OH} \quad (3.24)$$

όπου

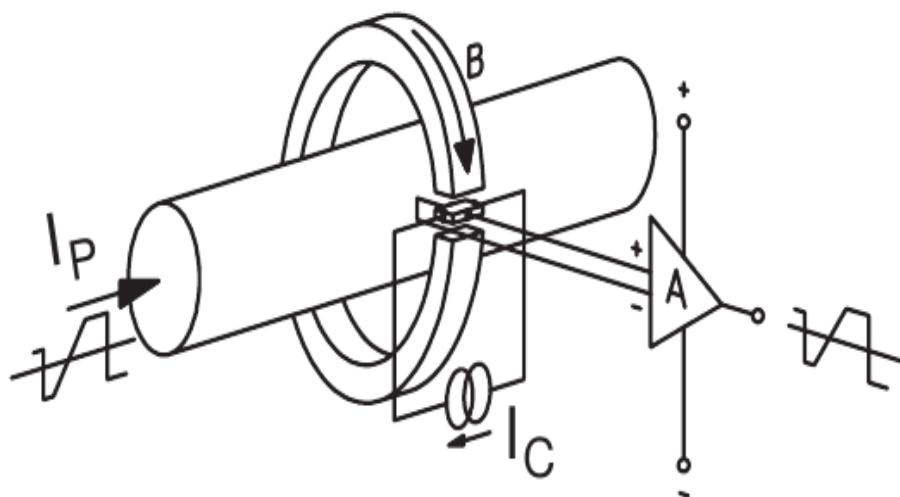
- ◆ K - η σταθερά Hall του επαγόμενου υλικού
- ◆ d - το πάχος του φύλλου
- ◆ I_c - το ρεύμα που διαπερνά το φύλλο
- ◆ B - η ένταση του μαγνητικού πεδίου
- ◆ V_{OH} - η Hall τάση με την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

Η ποσότητα $\frac{K}{d} \cdot I_c$, ονομάζεται ευαισθησία της γεννήτριας Hall και είναι εξαρτώμενη από την θερμοκρασία. Το φαινόμενο αυτό όμως μπορεί να αντισταθμιστεί από την πόλωση και την ενίσχυση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που “οδηγούν” το σήμα εξόδου.

Οι δύο συνηθισμένοι τύποι Hall transducer είναι ο ανοιχτού (open loop) και κλειστού βρόχου (closed loop).

Μετατροπείς ρεύματος ανοιχτού βρόχου

Οι ανοιχτού βρόχου transducers είναι η απλούστερη εφαρμογή του φαινομένου Hall. Προσφέρουν μία μικρού μεγέθους, ελαφριά και φθηνή λύση μέτρησης ρεύματος, ενώ έχουν και μικρή κατανάλωση ισχύος.



Εικόνα 3.7: Η λειτουργία ενός ανοιχτού βρόχου μετατροπέα Hall

Ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο συγκεντρώνεται από έναν μαγνητικό πυρήνα. Ο πυρήνας έχει ένα διάκενο και η γεννήτρια Hall χρησιμοποιείται για την μέτρηση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο διάκενο. Το ρεύμα I_C και η διαφορική ενίσχυση παρέχονται από ηλεκτρονικά ενσωματωμένα μέσα στον transducer. Στη γραμμική περιοχή λειτουργίας του υλικού η πυκνότητα μαγνητικής ροής, B , είναι ανάλογη του ρεύματος πρωτεύοντος I_P , και η τάση Hall, V_H , είναι ανάλογη στη πυκνότητα ροής. Επομένως, η έξοδος της γεννήτριας Hall είναι ανάλογο του πρωτεύοντος ρεύματος συν την offset τάση V_{OH} .

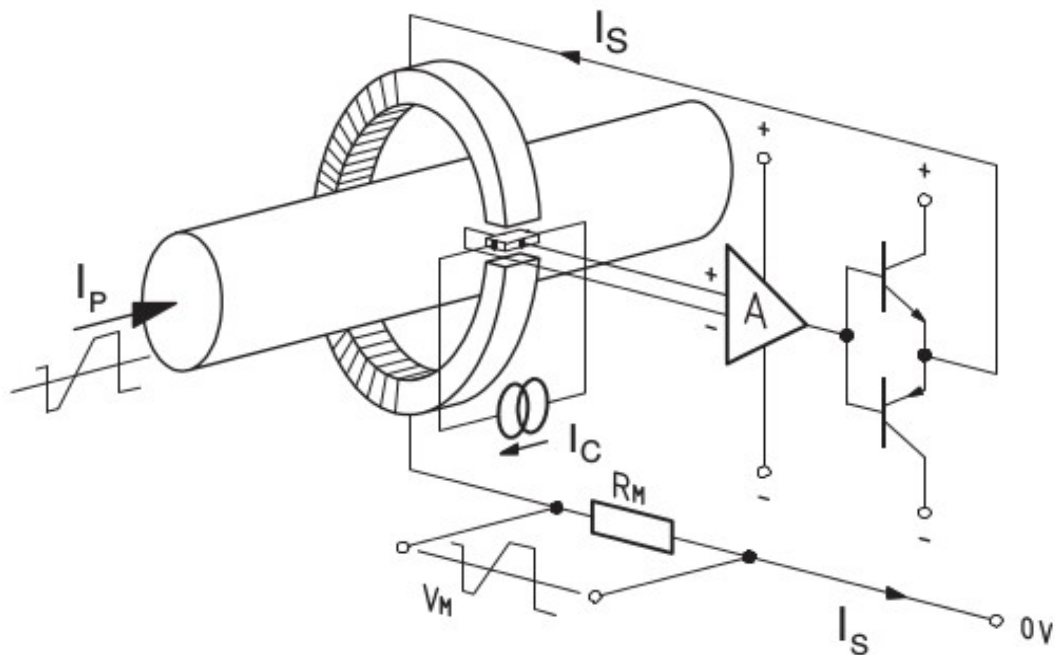
Το σήμα εξόδου αντισταθμίζεται ώστε να αφαιρεθεί η μετατόπιση και οι επιδράσεις της θερμοκρασίας και ενισχύεται σε περίπτωση που είναι μικρότερο από το επιθυμητό. Σε περίπτωση μέτρησης μικρών ρευμάτων, προτείνονται πολλαπλά τυλίγματα ώστε να αυξηθούν τα επίπεδα πυκνότητας μαγνητικής ροής και να είναι πιο αξιόπιστο το αποτέλεσμα. Η έξοδος σε έναν transducer ανοιχτού βρόχου είναι ανάλογη το μετρούμενου ρεύματος. Η τάση εξόδου, στις περισσότερες περιπτώσεις, κυμαίνεται από 0V μέχρι 4V στο ονομαστικό ρεύμα. Παραλλαγές παρατηρούνται στους διάφορους εμπορικούς transducer όσον αφορά τη μετατόπιση και τις ονομαστικές τιμές .

Οι ανοιχτού βρόχου transducers είναι κατάλληλοι για μετρήσεις AC και DC ρευμάτων, ενώ προσφέρουν και γαλβανική απομόνωση. Επίσης είναι μικροί, χαμηλού βάρους και κόστους ενώ έχουν χαμηλή κατανάλωση[20].

Μετατροπείς ρεύματος κλειστού βρόχου

Σε σύγκριση με τους Hall Effect transducers ανοιχτού βρόχου που αναλύσαμε παραπάνω, οι κλειστού βρόχου έχουν κύκλωμα αντιστάθμισης που αυξάνει δραματικά την επίδοσή τους. Ενώ οι ανοιχτού βρόχου ενισχύουν την γεννήτρια Hall για να παράξουν την τάση εξόδου, οι

κλειστού βρόχου χρησιμοποιούν την γεννήτρια Hall για να παράξουν αντισταθμισμένο ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο ώστε να δημιουργηθεί μια συνολική ροή, όπως μετριέται από την γεννήτρια, ίση με το μηδέν. Με λίγα λόγια, το ρεύμα του δευτερεύοντος, I_s , δημιουργεί ροή ίσου μέτρου, αλλά αντίθετης κατεύθυνσης από τη ροή που δημιούργησε το πρωτεύον. Η λειτουργία αυτή φαίνεται στην εικόνα (3.8).



Εικόνα 3.8: Η λειτουργία ενός κλειστού βρόχου μετατροπέα Hall

Η λειτουργία της γεννήτριας Hall σε συνθήκες μηδενικής ροής εξαλείφει την ολίσθηση του κέρδους με τη θερμοκρασία. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης, είναι ότι το δευτερεύον τύλιγμα θα λειτουργήσει ως μετασχηματιστή ρεύματος σε υψηλότερες συχνότητες, γεγονός που αυξάνει σημαντικά το εύρος ζώνης και τη μείωση του χρόνου απόκρισης του μετατροπέα.

Όταν η μαγνητική ροή είναι πλήρως αντισταθμίζεται (μηδέν), το μαγνητικό δυναμικό των δύο πηνίων είναι ίδιο. Επομένως :

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s \Leftrightarrow I_s = I_p \frac{N_p}{N_s} \quad (3.25)$$

Συνεπώς, το ρεύμα του δευτερεύοντος, είναι ακριβής απεικόνιση του ρεύματος πρωτεύοντος που θέλουμε να μετρήσουμε. Τοποθετώντας μία αντίσταση μέτρησης R_M σε σειρά με το δευτερεύον τύλιγμα, δημιουργείται μία τάση εξόδου ανάλογη του μετρούμενου ρεύματος. Δηλαδή :

$$V_{out} = R_M \cdot I_s \quad (3.26)$$

Δίνοντας μία τάξη μεγέθους, ο τυπικός αριθμός των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος είναι από 1000 έως 5000 και το ρεύμα δευτερεύοντος από 25mA έως 300mA, συνήθως, αν και μπορεί να φτάσει μέχρι 2A. Στις χαμηλές συχνότητες ο μετατροπέας λειτουργεί χρησιμοποιώντας την γεννήτρια Hall. Στις υψηλότερες συχνότητες το δευτερεύον πηνίο λειτουργεί σαν μετασχηματιστής ρεύματος, προσφέροντας ρεύμα δευτερεύοντος που ορίζεται από το λόγο των τυλιγμάτων, το οποίο μετατρέπεται σε τάση με μία αντίσταση.

Οι κλειστού βρόχου μετατροπείς είναι κατάλληλοι για μετρήσεις AC και DC ρευμάτων, ενώ προσφέρουν και γαλβανική απομόνωση. Ο σχεδιασμός τους προσφέρει πολύ καλή ακρίβεια και γραμμικότητα, μεγάλο εύρος και γρήγορη απόκριση. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι είναι κατάλληλοι για περιβάλλον με θόρυβο, παρότι είναι διαθέσιμοι μόνο με έξοδο τάσης.

Το βασικό μειονέκτημα των συγκεκριμένων μετατροπέων είναι η μεγάλη κατανάλωση ρεύματος από την τροφοδοσία της πλευράς του δευτερεύοντος. Επίσης είναι μεγαλύτεροι σε μέγεθος (ειδικά για μετρήσεις μεγαλύτερης τάξης ρευμάτων), πιο ακριβοί στην κατασκευή τους σε σχέση με την απλούστερη δομή των μετατροπέων ανοιχτού βρόχου και το περιορισμένο εύρος τάσης εξόδου εξαιτίας της πτώσης τάσης στην αντίσταση εξόδου[20].

3.5 Μέτρηση Τάσης

Όσον αφορά τις τεχνικές μέτρησης της τάσης η βασικότερη διάκριση των μεθόδων μπορεί να γίνει ανάμεσα σε απομονωμένες και μη απομονωμένες. Συχνά, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το σύστημα μας είναι υψηλής τάσης, ιδιαίτερα πάνω από τα 50V, είναι αναγκαία η παρουσία απομόνωσης του συστήματος μας. Η πρόβλεψη αυτή είναι αναγκαία πέρα των λόγων ασφαλείας και για περίπτωση καταστροφής του εξοπλισμού λόγω υπερτάσεων αλλά και σε θέματα γειώσεων, λόγω του γεγονότος ότι έχουν κοινή γείωση με το μετρούμενο σύστημα. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε συστήματα μέτρησης.

3.5.1 Απευθείας σύνδεσης

Υπάρχει η δυνατότητα απευθείας σύνδεσης της τάσης σε έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ή σε έναν μικροελεγκτή και στη συνέχεια να ακολουθήσει η επεξεργασία του σήματος και η παρουσίαση της μέτρησης.

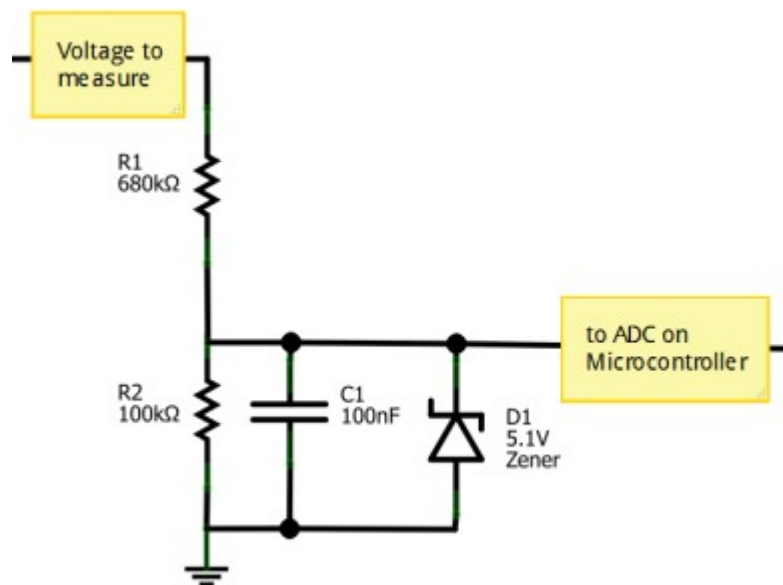
Στην περίπτωση αυτή το βασικότερο πρόβλημα είναι ότι οι περισσότεροι μικροελεγκτές έχουν περιορισμό στο εύρος της τάσης εισόδου, συνήθως κυμαίνονται μέχρι την τιμή των 5V. Επομένως οποιαδήποτε διαφορά στην τιμή της τάσης για οποιονδήποτε λόγο θα προκαλούσε

καταστροφή στον μικροελεγκτή ή στον μετατροπέα.

Επομένως, η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη μόνο για μετρήσεις πολύ χαμηλών σημάτων τάσεων και επομένως κατάλληλη για ένα πολύ μικρό εύρος εφαρμογών.

3.5.2 Διαιρέτης τάσης

Ο διαιρέτης τάσης είναι η απλούστερη και πιο συνηθισμένη μέθοδος μέτρησης της τάσης. Τα μόνα απαραίτητα στοιχεία για το διαιρέτη είναι δύο αντιστάσεις σε σειρά. Η τάση εξόδου μετριέται μεταξύ της γείωσης και του μέσου των δύο αντιστάσεων. Το κύκλωμα του διαιρέτη φαίνεται στην εικόνα (3.9):



Εικόνα 3.9: Ο διαιρέτης τάσης

Η τάση εξόδου στο διαιρέτη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (3.27)$$

Επιλέγοντας λοιπόν τον κατάλληλο λόγο των αντιστάσεων R_1 και R_2 , είναι δυνατή η ρύθμιση της επιθυμητής τάσης εξόδου σε σχέση με την μετρούμενη τάση.

Ο πυκνωτής $C1$ που υπάρχει στο σχήμα, χρησιμοποιείται σαν φίλτρο αποκοπής των υψηλών συχνοτήτων του σήματος εισόδου και η χρησιμοποίησή του δεν είναι απαραίτητη για όλες τις περιπτώσεις.

Συμπερασματικά, ο διαιρέτης τάσης είναι απλός στην υλοποίηση και αρκετά χαμηλού κόστους. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η μειωμένη ασφάλεια λόγω υψηλών τάσεων ή υπερτάσεων και η πιθανότητα καταστροφής του εξοπλισμού. Οι αντιστάσεις επίσης, επηρεάζονται από την θερμοκρασία, επομένως οι μετρήσεις δεν έχουν τη βέλτιστη ακρίβεια.

Το σχετικό συστηματικό σφάλμα του διαιρέτη τάσης (e_v) προκύπτει από τη σχέση:

$$e_v = 1 - \frac{R_{εσ} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}{1 + R_{εσ} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \quad (3.28)$$

Όπου

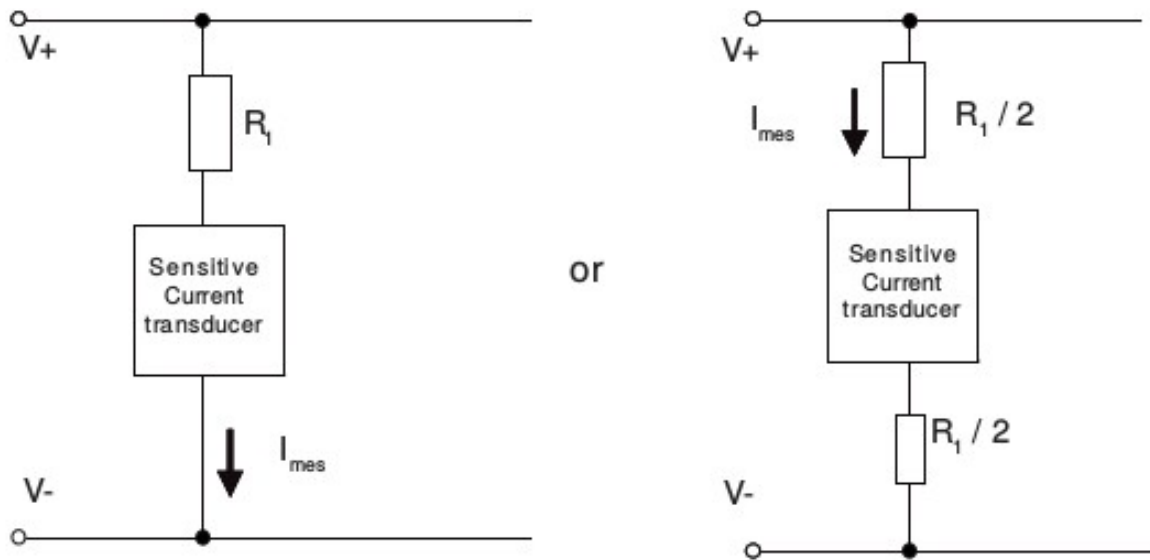
- ◆ $R_{εσ}$ – η εσωτερική αντίσταση του A/D μετατροπέα ή του μικροελεγκτή.

3.5.3 Hall Effect μετατροπείς τάσης

Σε προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν οι μετατροπείς ρεύματος βασισμένοι στο φαινόμενο Hall. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνολογίες των μετατροπέων ρεύματος, είναι δυνατόν να μετρηθεί και η τάση του πρωτεύοντος τυλίγματος. Οι μετατροπείς τάσης βασίζονται στην τεχνολογία των κλειστού βρόχου μετατροπέων. Η βασικότερη διαφορά από τους μετατροπείς ρεύματος είναι η προσθήκη ενός εσωτερικού πρωτεύοντος τυλίγματος με μεγάλο αριθμό τυλιγμάτων, επιτρέποντας στον μετατροπέα να δημιουργήσει τον απαραίτητο αριθμό Ampere*τυλιγμάτων, για την μέτρηση μικρών ρευμάτων εισόδου.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μέτρηση ενός μικρού ρεύματος το οποίο είναι ευθέως ανάλογο με την μετρούμενη τάση. Διαιρώντας την τάση με μία μεγάλη αντίσταση, δημιουργείται ένα μικρό ρεύμα, που μπορεί να μετρηθεί με μία από τις γνωστές τεχνολογίες μετατροπέων φαινομένου Hall. Η ελεγχόμενη σύνθετη αντίσταση εισόδου που διαθέτουν στην διατηρεί σε υψηλά επίπεδα την ακρίβεια και το εύρος ζώνης μέτρησης. Η αντίσταση προστίθεται σε σειρά με το πρωτεύον του μετατροπέα για να ληφθεί η βέλτιστη τιμή ρεύματος για ονομαστική τιμή της τάσης εισόδου. Η αντίσταση συχνά χωρίζεται σε δύο αντιστάσεις, τοποθετούνται και στις δύο πλευρές του πρωτεύοντος πηνίου, για τη βελτίωση της απόρριψη κοινού σημείου[20].

Η λειτουργία του μετατροπέα τάσης φαίνεται στην εικόνα (3.10).



Εικόνα 3.10: Λειτουργία ενός Hall μετατροπέα τάσης

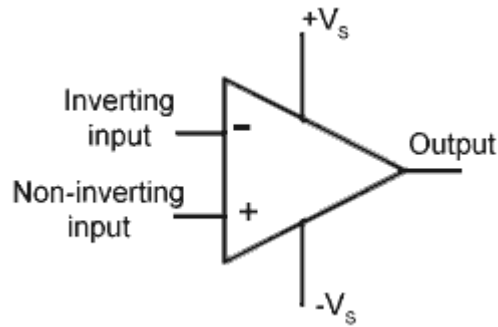
Η ακρίβεια των μετρήσεων με τη χρήση Hall μετατροπέα τάσης, επηρεάζεται από δύο βασικούς παράγοντες.

- Από την ακρίβεια της μέτρησης του ρεύματος, από το οποίο προκύπτει η μετρούμενη τάση.
- Από αναπάντεχες αλλαγές του λόγου του ρεύματος και της τάσης

Επομένως, η αλλαγή της τιμής της αντίστασης, είτε λόγω θερμοκρασίας, είτε λόγω ανοχής, θα επιδράσει στην ακρίβεια της μέτρησης.

3.5.4 Ενισχυτές

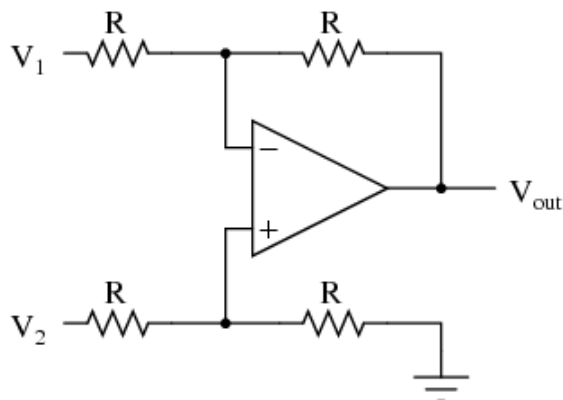
Οι τελεστικοί ενισχυτές είναι ουσιαστικά ενισχυτές τάσης με υψηλό κέρδος ανοικτού βρόχου, και δύο εισόδους και μία έξοδο και έχει τη δυνατότητα υλοποιεί πολλές διαφορετικές σχέσεις ανάμεσα στις εισόδους και εξόδους. Τα στοιχεία για μια αρνητική ανάδραση, βρίσκονται συνήθως έξω από τον ενισχυτή.



Εικόνα 3.11: Τελεστικός ενισχυτής

Οι δύο είσοδοι ονομάζονται ανάστροφη (και συμβολίζεται με αρνητικό πρόσημο) και μη-ανάστροφη (και συμβολίζεται με θετικό πρόσημο). Ο όρος "αναστροφή" χρησιμοποιείται επειδή η αντίστοιχη τάση ενισχύεται και περιστρέφεται κατά 180° , ενώ η μη-ανάστροφη μόνο ενισχύεται. Ο τελεστικός ενισχυτής ανταποκρίνεται μόνο στο σήμα διαφοράς $V_2 - V_1$ και αγνοεί οποιοδήποτε σήμα είναι κοινό και στις δύο εισόδους. Επομένως αν $V_1 = V_2$, τότε ιδανικά η απόκριση του ενισχυτή θα είναι μηδενική. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται απόρριψη κοινού σήματος (common mode rejection).

Οι πιο κοινά ενισχυτές στην κατασκευή οργάνων μέτρησης είναι οι διαφορικοί ενισχυτές ή ενισχυτές διαφορών (differential amplifiers). Οι ενισχυτές διαφορών ανταποκρίνονται στη διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων που εφαρμόζονται στην είσοδο του και, στην ιδανική περίπτωση, απορρίπτουν τα σήματα τα οποία είναι κοινά στις δύο εισόδους.



Εικόνα 3.12: Διαφορικός ενισχυτής

Ενώ ιδανικά ένας διαφορικός ενισχυτής, ενισχύει μόνο το διαφορικό σήμα εισόδου, στην πράξη η τάση εξόδου καθορίζεται από το διαφορικό κέρδος του ενισχυτή και από το κέρδος κοινού σήματος.

Η χρήση των διαφορικών ενισχυτών αντί για τους τελεστικούς, γίνεται εξαιτίας του πολύ υψηλού κέρδους του τελεστικού ενισχυτή που καθιστά αδύνατη την απευθείας χρήση του. Αντί' αυτού, είναι απαραίτητο ένα δίκτυο ανάδρασης για σύνδεση στον τελεστικό ενισχυτή ώστε να δημιουργηθεί το κέρδος του κυκλώματος να είναι πεπερασμένο και σταθερό[21].

Η έξοδος του σήματος για τον ενισχυτή της παραπάνω εικόνας είναι

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) \quad (3.29)$$

Συνήθως, στα συστήματα μέτρησης χρησιμοποιείται ενισχυτής απομόνωσης, ο οποίος είναι ένας διαφορικός ενισχυτής που προσφέρει ηλεκτρική απομόνωση.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενισχυτή είναι η απομόνωση που προσφέρει, η αρκετά καλή ακρίβεια και η χαμηλή ισχύς εισόδου. Από την άλλη μεριά, το αρνητικό είναι ότι χρειάζεται απομονωμένη τροφοδοσία για την είσοδο.

3.6 Συνοπτική παρουσίαση

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων και παρουσιάστηκαν οι βασικές τεχνικές ηλεκτρικών μετρήσεων. Στον πίνακα 3.1 περιγράφονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μίας.

Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικών μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών

Μέτρηση Ρεύματος		
Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αντιστάσεις Shunt	Χαμηλό Κόστος Εύκολη Σύνδεση Επιλογή Εύρους Μέτρησης	Δεν προσφέρει απομόνωση Απώλειες Ισχύος
Μετασχηματιστές	Αρκετά Καλή Ακρίβεια Χαμηλή Κατανάλωση Χαμηλό Κόστος	Μη γραμμικότητα για χαμηλές τιμές Δεν μετράει DC
Hall Effect Transducers	Καλή ακρίβεια και γραμμικότητα Απομόνωση Μεγάλο Εύρος μέτρησης	Μεγάλη Κατανάλωση Υψηλό Κόστος Μεγάλο μέγεθος
Πηνίο Rogowski	Χαμηλό Κόστος Μέτρηση Μεγάλων Ρευμάτων Μικρός χρόνος απόκρισης	Χρειάζεται ολοκληρωτή Δεν μετράει DC

Μέτρηση Τάσης		
Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απευθείας Σύνδεση	Μηδενικό κόστος	Μόνο για μικρά σήματα ρεύμος (συνήθως μέχρι 5V)
Διαιρέτης Τάσης	Χαμηλό Κόστος Επιλογή του εύρους μέτρησης	Μεταβολή της ακρίβειας Δεν προσφέρει απομόνωση
Hall Effect Transducer	Ακρίβεια Απομόνωση	Εξάρτηση από την αντίσταση μέτρησης Τροφοδοσία
Ενισχυτής	Απομόνωση Καλή ακρίβεια	Χρειάζεται τροφοδοσία

Κεφάλαιο 4: Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Στα συστήματα συλλογής και μετατροπής δεδομένων, είναι απαραίτητη η είσοδος σημάτων από μία ή περισσότερες πηγές και η μετατροπή τους σε ψηφιακά σήματα για ανάλυση ή μετάδοσή τους σε μία τερματική συσκευή, όπως ένας υπολογιστής ή η εμφάνιση τους σε μία ψηφιακή οθόνη. Τις περισσότερες φορές, όπως αναφέραμε, τα αναλογικά σήματα εισέρχονται στο σύστημα μέσω αισθητήρων ή transducer ή οποιοί μετατρέπουν τα πραγματικά μεγέθη σε ηλεκτρικά σήματα και τα οποία με την σειρά τους ψηφιοποιούνται με τη βοήθεια ενός μετατροπέα. Η ικανότητα των ηλεκτρονικών συστημάτων μετατροπής κρίνεται στο κατά πόσο μπορούν να διατηρούν την ακρίβεια και την ακεραιότητα του σήματος[22].

Τα βασικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για ένα σύστημα μετατροπής αναλογικού σήματος είναι τα εξής

- Προεπεξεργασία του σήματος
- Κύκλωμα συγκράτησης και ενίσχυση του σήματος
- Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό
- Χρονισμός

4.1 Επεξεργασία σημάτων

Τα σήματα που λαμβάνονται από τον αισθητήρα δεν είναι πάντα κατάλληλα για να περάσουν από έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό απ' ευθείας, καθώς η είσοδος του μετατροπέα μπορεί να μετατρέψει μόνο σήματα με ορισμένα επίπεδα τάσης και ποιότητας. Το σήμα από τον αισθητήρα θα μπορούσε να είναι θορυβώδης, να έχει μικρό ή μεγάλο πλάτος. Διάφοροι αισθητήρες όπως τα θερμοστοιχεία, οι μετρητές τάσης και ρεύματος κ.ά. παράγουν τάση της τάξης των mV, η οποία μπορεί να είναι πολύ χαμηλή για έναν μετατροπέα αναλογικού-σε-ψηφιακό. Ως εκ τούτου, το σήμα του αισθητήρα συνήθως πρέπει να υποστεί επεξεργασία και βελτίωση πριν να μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή. Για να λειτουργούν σωστά, οι περισσότεροι αισθητήρες πρέπει να διαθέτουν εξωτερικές συσκευές ώστε να εκτελέσουν την εργασία τους, όπως και οι μετρητές τάσης που τοποθετούνται σαν μία αντίσταση στη γέφυρα Wheatstone. Οι αισθητήρες, όπως είδαμε, ταξινομούνται είτε ως ενεργητικοί είτε ως παθητικοί. Ενεργητικοί αισθητήρες, όπως θερμικές συσκευές αντίστασης (Resistance Thermal Devices -RTD), χρειάζονται μια εξωτερική πηγή ρεύματος διέγερσης. Παθητικοί αισθητήρες, όπως τα θερμοστοιχεία, που μετατρέπουν τη φυσική ενέργεια σε ηλεκτρική απευθείας, παράγουν σήματα εξόδου, χωρίς την ανάγκη για μια πηγή διέγερσης.

Οι τεχνικές επεξεργασίας σήματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις παρακάτω

κατηγορίες[24]:

- Διέγερση
- Ενίσχυση
- Γραμμικοποίηση
- Απομόνωση
- Φιλτράρισμα

4.1.1 Ενίσχυση

Η ενίσχυση χρησιμοποιείται για να αυξήσει το επίπεδο της τάσης ενός σήματος για να καταστεί κατάλληλο να ψηφιοποιηθεί από τον μετατροπέα. Το θερμοστοιχείο είναι ένα καλό παράδειγμα σε αυτή την περίπτωση, καθώς το σήμα που παράγει είναι μια τάση της τάξης των mV. Μια τέτοια χαμηλή τάση δεν είναι κατάλληλη για τους περισσότερους μετατροπείς, και πρέπει να ενισχυθεί. Η ενίσχυση διεξάγεται καλύτερα με εξωτερική ενίσχυση όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς την πηγή εξόδου του αισθητήρα, και όχι στην κάρτα αναλογικού-σε-ψηφιακού, καθώς η κάρτα θα ενισχύσει επίσης και τον θόρυβο που μεταδίδεται από τα καλώδια που συνδέουν τον αισθητήρα στον μετατροπέα.

4.1.2 Διέγερση

Οι ενεργητικοί αισθητήρες διεγείρονται χρησιμοποιώντας είτε ένα ελεγχόμενο ρεύμα ή τάση. Οι αισθητήρες έντασης και πίεσης διεγείρονται συνήθως με διέγερση σταθερής τάσης, ενώ σταθερό ρεύμα διέγερσης χρησιμοποιείται για την αντίσταση των αισθητήρων, όπως στην περίπτωση των RTD ή των θερμίστορ. Το ρεύμα διέγερσης είναι προτιμότερο από τη διέγερση τάσης σε θορυβώδη περιβάλλοντα λόγω της καλύτερης επεξεργασίας του θορύβου.

Η DC διέγερση είναι πιο απλό να εφαρμοστεί και συνήθως έχει χαμηλότερο κόστος, αλλά είναι ευαίσθητη στο θόρυβο και την αντιστάθμιση σφαλμάτων. Η AC διέγερση, αν και είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστεί, προσφέρει καλύτερη ανοχή στο θόρυβο, στον παράγοντα του offset, και τις επιπτώσεις των παρασιτικών θερμοστοιχείων.

4.1.3 Γραμμικοποίηση

Η γραμμικοποίηση είναι απαραίτητη όταν η έξοδος του αισθητήρα είναι μη γραμμική, κάτι που είναι πολύ συχνό για σχεδόν όλους τους αισθητήρες θερμοκρασίας. Στο παρελθόν, τα πολύπλοκα αναλογικά κυκλώματα επεξεργασίας σχεδιάζονταν για να διορθώσουν τη μη γραμμικότητα του αισθητήρα, καθώς η μη γραμμικότητα οδηγεί σε μεγαλύτερα σφάλματα μέτρησης στη διαδικασία της μέτρησης. Σήμερα, οι έξοδοι αισθητήρων έχουν ψηφιοποιηθεί

από υψηλής ταχύτητας και ακρίβειας κάρτες ψηφιακής καταγραφής σημάτων, έτσι η γραμμικοποίηση μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πινάκων οι οποίοι εξάγονται από τον χρήστη ή με την χρήση πινάκων που είναι αποθηκευμένοι στη μνήμη του μικροελεγκτή, απλοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις για το αναλογικό κύκλωμα.

4.1.4 Απομόνωση

Η απομόνωση χρησιμοποιείται για να περάσει το σήμα από την πηγή στο σύστημα μέτρησης χωρίς την παρεμβολή καμίας φυσικής σύνδεσης. Με τον τρόπο αυτό, τα προβλήματα που προκαλούνται από τυχόν ακατάλληλη γείωση δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις. Επιπλέον, εμποδίζει την απομόνωση των αιχμών υψηλής τάσης και απορρίπτει τις υψηλές μεταβολές της τάσης, προστατεύοντας έτσι τον ακριβό εξοπλισμό μέτρησης και τον ίδιο τον χειριστή. Για τους σκοπούς της απομόνωσης, διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται, όπως μετασχηματιστές και οπτική ή χωρητική σύζευξη.

4.1.5 Φιλτράρισμα

Τα φίλτρα απορρίπτουν τον ανεπιθύμητο θόρυβο σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Για παράδειγμα, οι συνηθισμένες κάρτες καταγραφής είναι συνήθως επιρρεπείς σε 50 Hz ή 60 Hz θορύβου που προέρχεται από τις γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος και άλλες περιβαλλοντικές πηγές. Με το φιλτράρισμα, αυτός ο θόρυβος εξαλείφεται. Επίσης, τα anti-aliasing φίλτρα εξαλείφουν το πρόβλημα που προκύπτει όταν το σήμα undersampled, δηλαδή έχει γίνει δειγματοληψία κάτω από την συχνότητα Nyquist. Ένα φίλτρο με συχνότητα αποκοπής κάτω από το μισό του ρυθμού δειγματοληψίας χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό. Το φιλτράρισμα μπορεί επίσης να εκτελείται ψηφιακά από μια εφαρμογή χρήστη ή λογισμικό ανάλυσης δεδομένων, το οποίο προσφέρει μια ευρεία επιλογή των φίλτρων.

4.2 Μετατροπείς αναλογικού-σε-ψηφιακό σήμα (Analog-to-digital converters – ADC)

Οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog-to-digital converters - ADC) μεταφράζουν ένα αναλογικό σήμα ή ποσότητα, τα οποία είναι χαρακτηριστικά των φαινομένων στον πραγματικό κόσμο, στην ψηφιακή γλώσσα, που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία των πληροφοριών, την πληροφορική, την μετάδοση δεδομένων, καθώς και τα συστήματα ελέγχου. Η αντίθετη διαδικασία εκτελείται από μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (Digital-to-Analog Converters - DAC) που χρησιμοποιούνται στο μετασχηματισμό, μετάδοση και αποθήκευση των αποτελεσμάτων της ψηφιακής επεξεργασίας, πίσω στον πραγματικό κόσμο.

4.2.1 Κβαντοποίηση του σήματος

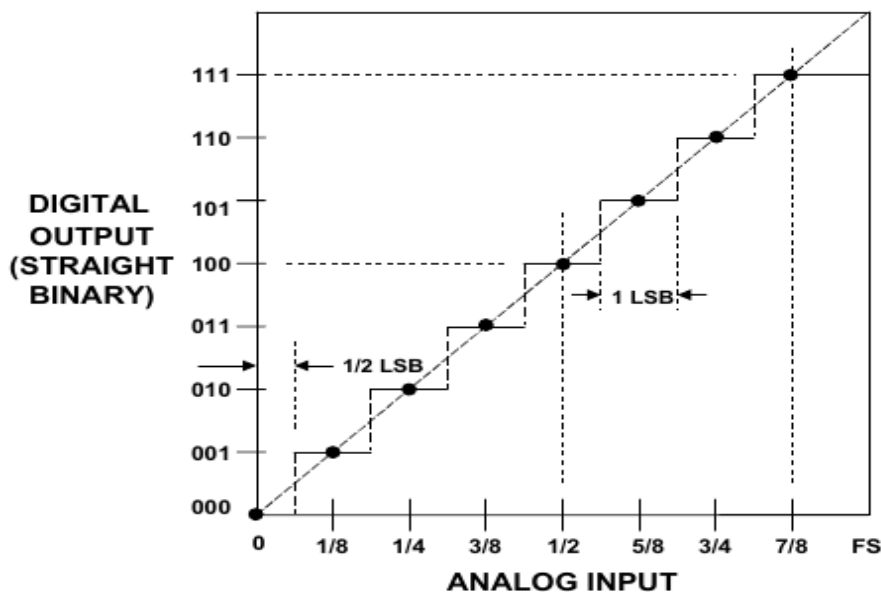
Το πιο σημαντικό στοιχείο των A/D μετατροπέων είναι το γεγονός ότι η έξοδος του σήματος είναι σε ψηφιακή μορφή, επομένως το σήμα εξέρχεται από τον μετατροπέα κβαντισμένο. Με άλλα λόγια, μία λέξη μεγέθους N-bit μπορεί να έχει μόνο 2^N πιθανές καταστάσεις. Επομένως, ένας N-bit μετατροπέας έχει μόνο 2^N πιθανές ψηφιακές εξόδους. Το γεγονός αυτό του περιορισμού των τιμών μπορούν να παραχθούν από έναν μετατροπέα ονομάζεται ανάλυση (resolution).

Η ανάλυση των μετατροπέων μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. Στο βάρος του λιγότερο σημαντικού bit (Least Significant Bit - LSB), σε μέρη ανά εκατομμύριο του πλάτους πλήρους κλίμακας (parts per million Full-Scale - ppm FS) ή σε millivolt (mV). Διαφορετικές συσκευές (ακόμη και από τον ίδιο κατασκευαστή) είναι δυνατόν να προσδιορίζονται με διαφορετικό τρόπο, επομένως οι χρήστες του μετατροπέα πρέπει να μπορούν να μεταφράσουν μεταξύ των διαφόρων τύπων των προδιαγραφών και να συγκρίνουν τις συσκευές με επιτυχία.

Για την έκφραση σε mV, που είναι η συνηθέστερη, για έναν μετατροπέα ανάλυσης N ψηφίων, με εύρος τάσης εισόδου E, η ανάλυση Q δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{E}{2^N} \quad (4.1)$$

Στην παρακάτω εικόνα (4.1) φαίνονται τα ιδανικά χαρακτηριστικά μεταφοράς για έναν μονοπολικό μετατροπέα μεγέθους 3 bit. Η είσοδος σε ένα A/D μετατροπέα είναι αναλογική και η έξοδος της είναι κβαντισμένη. Επομένως, το χαρακτηριστικό μεταφοράς αποτελείται από 8 (2^3) οριζόντια βήματα. Κατά την εξέταση της μετατόπισης, του κέρδους και της γραμμικότητας του μετατροπέα θεωρούμε τη γραμμή που ενώνει τα μεσαία σημεία από αυτά τα βήματα[23].



Εικόνα 4.1: Ψηφιοποίηση ενός αναλογικού σήματος

Η διάκριση των A/D μετατροπέων σε μονοπολικούς και διπολικούς αφορά την αναπαράσταση των αναλογικών εισόδων τους στον κώδικα εξόδου. Όταν το εύρος της αναλογικής εισόδου περιλαμβάνει μόνο θετικές τιμές, τότε αναφερόμαστε σε μονοπολικό μετατροπέα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι απαραίτητη η μετατροπή ενός αναλογικού σήματος με εύρος θετικών και αρνητικών τιμών. Στην περίπτωση αυτή, η ψηφιακή αναπαράσταση θα πρέπει να αντικατοπτρίζει όλο το εύρος των τιμών. Για την κωδικοποίηση των ψηφιακών σημάτων εξόδου υπάρχουν διάφορα συστήματα όπως τα παρακάτω[25] :

- Ευθέως δυαδικό (Straight binary)

Το σύστημα αυτό αποτελεί την πιο απλή έκφραση κωδικοποίησης. Στην μορφή αυτή όλα τα δυαδικά 0 αντιστοιχούν στο ελάχιστο όριο του σήματος εισόδου του μετατροπέα και όλα τα δυαδικά 1 στην μέγιστη τιμή του σήματος εισόδου. Οι ενδιάμεσες τιμές ψηφιοποιούνται σύμφωνα με την ανάλυση του μετατροπέα. Επομένως για έναν μετατροπέα 8-bit και εύρους 0-10V, η τα 0V αντιστοιχούν στην δυαδική τιμή $0^N = 1$ και τα 10V στην τιμή $(1...1)^N = 256$.

- Προσημασμένου μέτρου (signed magnitude)

Σύμφωνα με την έκφραση αυτή το πιο σημαντικό bit της λέξης καθορίζει το πρόσημο του αριθμού. Το δυαδικό 1 υποδηλώνει αρνητικό πρόσημο, ενώ το δυαδικό 0 θετικό. Τα υπόλοιπα ψηφία αναπαριστούν το πλάτος της λέξης, Δηλαδή για μία λέξη μεγέθους 4 bit, ο δυαδικός αριθμός 1111 αναπαριστά το -6, ενώ ο δυαδικός αριθμός 0111 αναπαριστά το 6.

- Συμπλήρωμα ως προς 1 (1's complement)

Το συμπλήρωμα ως προς 1 ενός δυαδικού ορίζεται ως η τιμή που παίρνουμε όταν αντιστρέφουμε όλα τα ψηφία (bits) του δυαδικού αριθμού (αλλάζοντας τα 0 σε 1 και το αντίστροφο - το 0 είναι το συμπλήρωμα του 1 και το αντίθετο). Στην αναπαράσταση βάσης με συμπλήρωμα όταν το πιο σημαντικό ψηφίο του αριθμού είναι 1 σημαίνει ότι ο αριθμός αυτός είναι αρνητικός. Όλοι οι θετικοί αριθμοί ξεκινάνε με 0. Για παράδειγμα ο αριθμός 25 σε 8 bits δυαδική αναπαράσταση ισούται με το 00011001, ενώ ο -25 είναι ο αριθμός 11100110 (αντιστρέφοντας όλα τα bits - συμπλήρωμα ως προς 1).

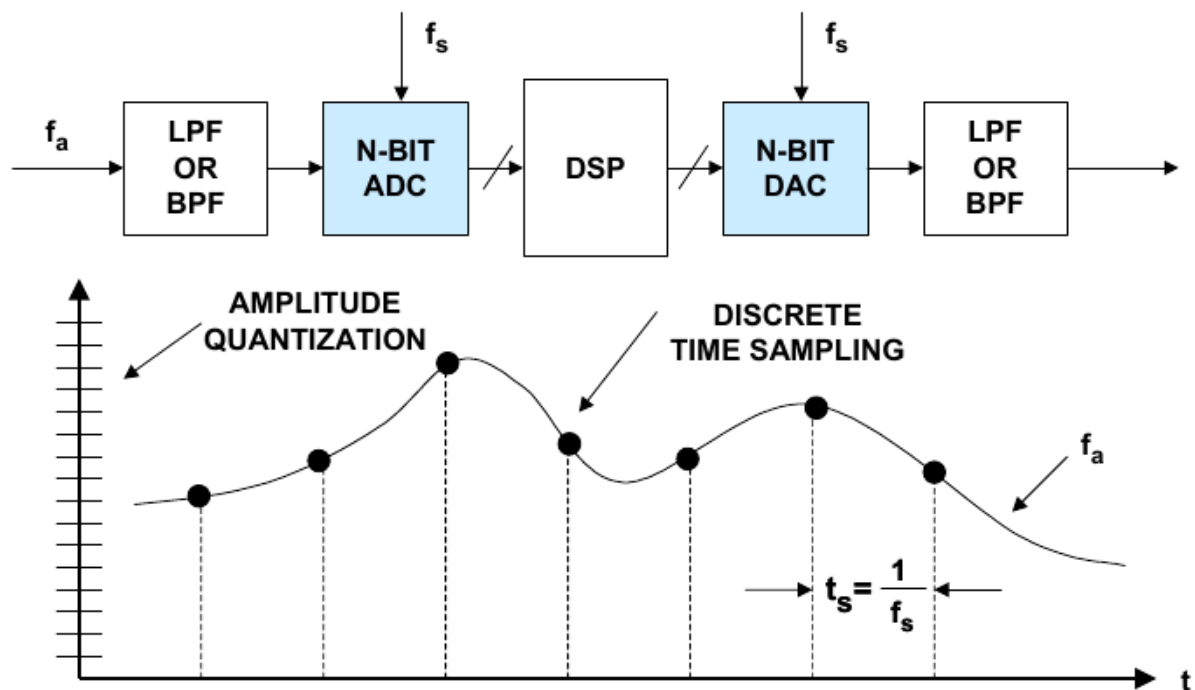
- Συμπλήρωμα ως προς 2 (2's complement)

Το συμπλήρωμα ως προς 2 ενός δυαδικού αριθμού ορίζεται ως η τιμή που παίρνουμε όταν αντιστρέφουμε όλα τα ψηφία του δυαδικού αριθμού (αλλάζοντας τα 0 σε 1 και το αντίστροφο) και στην συνέχεια να προσθέσουμε το 1. Δηλαδή για να υπολογίσουμε το συμπλήρωμα ως προς 2, υπολογίζουμε πρώτα το συμπλήρωμα ως προς 1 και στην συνέχεια προσθέτουμε το 1. Στα ψηφιακά κυκλώματα υπολογιστών χρησιμοποιείται το συμπλήρωμα ως προς 2 για την αναπαράσταση αρνητικών αριθμών.

4.2.2 Θεωρία δειγματοληψίας

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στα βασικά σημεία της θεωρίας δειγματοληψίας. Ένα διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος δεδομένων πραγματικού χρόνου δειγματοληψίας

παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Πριν από την πραγματική μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, το αναλογικό σήμα συνήθως περνά μέσα από ένα κύκλωμα επεξεργασίας σήματος το οποίο επιτελεί τις λειτουργίες που αναφέραμε στην ενότητα (4.1). Ένα ζωνοπερατό φίλτρο χαμηλής διέλευσης απαιτείται για να αφαιρέσει τα ανεπιθύμητα σήματα εκτός του απαραίτητου εύρους ζώνης και να εξαλείψει το aliasing. Το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα είναι ένα σύστημα πραγματικού χρόνου, δηλαδή το σήμα συνεχώς δειγματοληπτείται με ρυθμό f_s , και ο A/D μετατροπέας εξάγει ένα νέο δείγμα στο κύκλωμα επεξεργασίας σε αυτό το ρυθμό. Προκειμένου να διατηρηθεί η λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, το κύκλωμα επεξεργασίας πρέπει να εκτελέσει όλες τις απαιτούμενες διαδικασίες εντός του διαστήματος δειγματοληψίας, ίσο με $1/f_s$, και να εξάγει ένα δείγμα εξόδου πριν από την άφιξη του επόμενου δείγματος του μετατροπέα.



Εικόνα 4.2: Δειγματοληψία

Οι περισσότεροι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό έχουν ενσωματωμένο κάποιο κύκλωμα συγκράτησης (sample-and hold), για την επεξεργασία των εναλλασσόμενων σημάτων. Η παρουσία ενός τέτοιου κυκλώματος είναι απαραίτητη, ώστε να μην περιορίζεται η μέγιστη συχνότητα των δειγμάτων που εισέρχονται στο μετατροπέα προς ψηφιοποίηση.

Το ιδανικό κύκλωμα συγκράτησης, είναι ένας διακόπτης ο οποίος οδηγεί έναν πυκνωτή συγκράτησης ακολουθούμενο από έναν συγκριτή με μία αντίσταση εισόδου. Η αντίσταση εισόδου είναι απαραίτητο να έχει μεγάλη τιμή, έτσι ώστε ο πυκνωτής να αποφορτίζει σε λιγότερο από 1 LSB κατά τη διάρκεια του χρόνου συγκράτησης (hold time). Το κύκλωμα δειγματοληπτεί το σήμα κατά τη λειτουργία δειγματοληψίας (sample mode) και διατηρεί σταθερό το σήμα κατά τη λειτουργία συγκράτησης (hold mode). Ο χρονισμός είναι προκαθορισμένος έτσι ώστε ο μετατροπέας να κάνει την ψηφιοποίηση κατά τη διάρκεια του

χρόνου συγκράτησης. Επομένως, ένας μετατροπέας που διαθέτει κύκλωμα συγκράτησης μπορεί να επεξεργάζεται σήματα σε πολύ γρηγορότερο χρόνο[24].

Το κριτήριο Nyquist

Ένα αναλογικό σήμα δειγματοληπτείται σε διακριτά χρονικά διαστήματα, $t_s = 1/f_s$, τα οποία πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά για να εξασφαλιστεί μια ακριβή αναπαράσταση του αρχικού αναλογικού σήματος. Είναι προφανές, ότι όσο περισσότερα δείγματα λαμβάνονται (δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός της δειγματοληψίας), τόσο πιο ακριβής είναι η ψηφιακή αναπαράσταση, διαφορετικά χάνονται σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το σήμα.

Το κριτήριο Nyquist ορίζει ότι η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερη από την υψηλότερη συχνότητα που περιέχεται στο σήμα. Εάν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μικρότερη από το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας του αναλογικού σήματος, τότε θα συμβεί το φαινόμενο aliasing.

4.2.3 Σφάλματα A/D μετατροπών

Σφάλματα ψηφιακής μετατροπής

Τα 4 σφάλματα ψηφιακής μετατροπής σε έναν A/D μετατροπέα είναι το σφάλμα μετατόπισης (offset), το σφάλμα κέρδους και τα σφάλματα που αφορούν τους δύο τύπους γραμμικότητας (διαφορική και ολοκληρωμένη). Τα σφάλματα μετατόπισης και κέρδους είναι ανάλογα των σφαλμάτων αντιστάθμισης και του κέρδους των ενισχυτών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, για έναν διπολικό μετατροπέα. Αν και το σφάλμα μετατόπισης είναι σχεδόν ίδιο στους ενισχυτές και στους μονοπολικούς μετατροπείς, δεν είναι ίδιο στους διπολικούς μετατροπείς και θα πρέπει να γίνεται προσεκτική διάκριση.

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός μετατροπέα μπορεί να εκφραστεί ως μια ευθεία που δίνεται από τη σχέση:

$$D = G \cdot A + K \quad (4.2)$$

όπου

- ◆ D - το ψηφιακό σήμα
- ◆ A - το αναλογικό σήμα
- ◆ K και G - σταθερές.

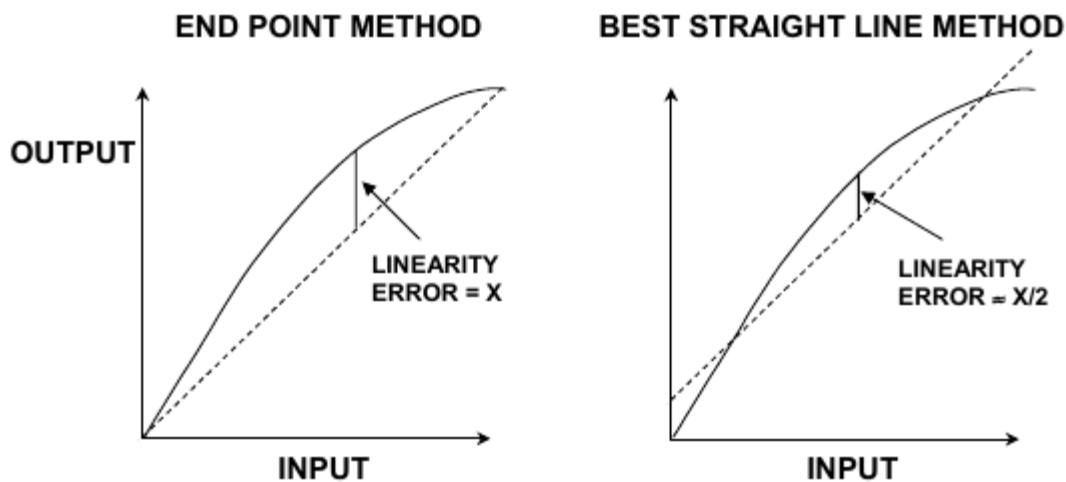
Η σχέση αυτή είναι ίδια με την σχέση της συνάρτησης μεταφοράς ενός αισθητήρα (σχέση 3.1) προσαρμοσμένη σε έναν A/D μετατροπέα. Το G εκφράζει το κέρδος του μετατροπέα, ενώ το K την μετατόπιση (offset).

Σε ένα μονοπολικό μετατροπέα, η ιδανική τιμή του K είναι ίση με μηδέν, ενώ σε έναν διπολικό μετατροπέα είναι -1 MSB, όσο και η αρνητική μετατόπισή του. Το σφάλμα

μετατόπισης είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής του K και της ιδανικής.

Το σφάλμα κέρδους είναι η διαφορά του κέρδους (δηλαδή της σταθεράς G) από την ιδανική τιμή της και εκφράζεται γενικά ως η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των δύο, αν και μπορεί να οριστεί σαν τη συμβολή του σφάλματος κέρδους (σε mV ή LSB) στο συνολικό σφάλμα πλήρους κλίμακας. Αυτά τα σφάλματα μπορούν συνήθως να διαγραφούν από το χρήστη του μετατροπέα.

Το σφάλμα της απόλυτης γραμμικότητας (integral nonlinearity – INL) του μετατροπέα είναι ανάλογο με το σφάλμα γραμμικότητας του ενισχυτή, και ορίζεται ως η μέγιστη απόκλιση της πραγματικής χαρακτηριστικής συνάρτησης μεταφοράς του μετατροπέα από μια ευθεία γραμμή, και γενικά εκφράζεται ως ποσοστό επί της πλήρους κλίμακας, αλλά μπορεί να δοθεί σε μέγεθος LSB . Για έναν A/D μετατροπέα, η πιο συχνή σύμβαση είναι να χαραχθεί η ευθεία γραμμή που περνά από το κέντρο των ψηφίων. Υπάρχουν δύο συνήθεις τρόποι επιλογής της ευθείας γραμμής: τελικό σημείο (end point) και η καλύτερη ευθεία γραμμή (best straight line), όπως φαίνεται στο σχήμα (4.3).



Εικόνα 4.3: Μέθοδοι επιλογής της καλύτερης γραμμής

Στο σύστημα τελικού σημείου, η απόκλιση μετριέται από την ευθεία γραμμή που ορίζεται από το αρχικό σημείο (συνήθως το μηδέν) και το σημείο της πλήρους κλίμακας εισόδου, μετά την προσαρμογή του κέρδους. Αυτή είναι η πιο χρήσιμη μέθοδος μέτρησης του σφάλματος της ολοκληρωμένης γραμμικότητας για εφαρμογές ελέγχου και μετρήσεων δεδομένων, λόγω του ότι το σφάλμα προκύπτει από την απόκλιση με την ιδανική ευθεία κι όχι από κάποια τυχαία ευθεία βέλτιστης προσαρμογής.

Η μέθοδος καλύτερης ευθείας γραμμής, από την άλλη, δίνει καλύτερη πρόβλεψη της παραμόρφωσης σε AC εφαρμογές και επίσης δίνει χαμηλότερη τιμή του σφάλματος γραμμικότητας. Η καλύτερη προσαρμογή της ευθείας γραμμής γίνεται μέσω της συνάρτησης

μεταφοράς της συσκευής, χρησιμοποιώντας τεχνικές προσαρμογής πρότυπης καμπύλης, και η μέγιστη απόκλιση μετρείται από αυτή τη γραμμή. Σε γενικές γραμμές, το μετρούμενο σφάλμα γραμμικότητας είναι μόνο 50% της τιμής που μετράται με τη μέθοδο τελικού σημείου. Αυτό καθιστά τη μέθοδο καλή για την παραγωγή φύλλων δεδομένων, αλλά είναι λιγότερο χρήσιμη για την ανάλυση του σφάλματος. Για εφαρμογές AC είναι πιο χρήσιμο να καθοριστεί η παραμόρφωση σε σχέση με την DC γραμμικότητα, γι' αυτό και σπάνια χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη μέθοδος.

Ο άλλος τύπος μη γραμμικότητας ενός μετατροπέα είναι η διαφορική μη γραμμικότητα (Differential Nonlinearity - DNL). Σχετίζεται με την γραμμικότητα του κώδικα μεταβάσεις του μετατροπέα. Στην ιδανική περίπτωση, η μεταβολή ενός LSB σε ψηφιακό κωδικό αντιστοιχεί σε μια αλλαγή ακριβώς ενός LSB αναλογικού σήματος, δηλαδή σε έναν A/D μετατροπέα θα πρέπει να υπάρχει μεταβολή ακριβώς ένα LSB της αναλογικής εισόδου για να υπάρξει μετακίνηση από την μία ψηφιακή κατάσταση στην άλλη. Σφάλμα διαφορικής γραμμικότητας ορίζεται ως το μέγιστο ποσό της απόκλισης κάθε κβάντου (ή LSB) σε ολόκληρη την συνάρτηση μεταφοράς από το ιδανικό μέγεθος ενός LSB.

Όταν μία αλλαγή στο αναλογικό σήμα που αντιστοιχεί σε ένα LSB ψηφιακού σήματος είναι περισσότερο ή λιγότερο από ένα LSB, τότε λέγεται ότι υπάρχει σφάλμα διαφορικής μη γραμμικότητας. Το σφάλμα αυτό ενός μετατροπέα συνήθως ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της μη γραμμικότητας που είναι δυνατόν να βρεθεί σε οποιοδήποτε μετάβασης σε όλο το εύρος του μετατροπέα.

Σφάλματα Αναλογικής Μετατροπής

Τα μόνα λάθη (ψηφιακής ή αναλογικής μετατροπής) που συνδέονται με ένα ιδανικό μετατροπέα δεδομένων N-bit είναι αυτά που σχετίζονται με τις διαδικασίες δειγματοληψίας και κβαντοποίησης. Το μέγιστο σφάλμα που παράγει ένας ιδανικός μετατροπέας κατά την ψηφιοποίηση ενός σήματος είναι $\pm 1/2$ LSB. Το σφάλμα κβαντισμού ως συνάρτηση του χρόνου δείχνεται στο Σχήμα 2.38. Η συνάρτηση του σφάλματος είναι μία απλοποιημένη πριονωτή κυματομορφή πλάτους $\pm q$.

Η εξίσωση της κυματομορφής δίνεται από τη σχέση:

$$e(t) = s \cdot t, -\frac{q}{2s} < t < +\frac{q}{2s} \quad (4.3)$$

Η μέση τετραγωνική τιμή του σφάλματος βρίσκεται από τη σχέση:

$$\overline{\varepsilon^2(t)} = \frac{s}{q} \int_{-q/2s}^{+q/2s} (st)^2 dt \quad (4.4)$$

Ολοκληρώνοντας και απλοποιώντας την παραπάνω σχέση, εξάγουμε:

$$\overline{e^2(t)} = \frac{q^2}{12} \quad (4.5)$$

Η ρίζα επομένως του μέσου τετραγωνικού σφάλματος κβαντοποίησης (rms) είναι:

$$\sqrt{\overline{e^2(t)}} = \frac{q}{\sqrt{12}} \quad (4.6)$$

Ο θόρυβος που παράγεται είναι περίπου γκαουσιανός και εξαπλώνεται περισσότερο ή λιγότερο ομοιόμορφα πάνω από τη Nyquist συχνότητα, $f_s/2$. Η βασική υπόθεση είναι ότι ο θόρυβος κβαντισμού είναι συσχετισμένος με το σήμα εισόδου. Υπό ορισμένες συνθήκες, όπου το ρολόι δειγματοληψίας και το σήμα είναι αρμονικά συνδεδεμένα, ο θόρυβος κβαντισμού είναι συσχετισμένος και η ενέργεια συγκεντρώνεται στις αρμονικές του σήματος, με την ενεργό τιμή να παραμένει περίπου $q/\sqrt{12}$.

Ο θεωρητικός λόγος του σήματος προς το θόρυβο (signal-to-noise ratio) μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ως είσοδο πλήρους κλίμακας ένα ημιτονοειδές σήμα:

$$v(t) = \frac{q2^N}{2} \cdot \sin(2\pi f t) \quad (4.7)$$

Η rms τιμή του σήματος εισόδου είναι:

$$\frac{q2^N}{2\sqrt{2}} \quad (4.8)$$

Επομένως, η rms τιμή του λόγου του σήματος σε σχέση με το θόρυβο εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$SNR = \frac{RMS \text{ τιμή εισόδου}}{RMS \text{ τιμή του σφάλματος κβαντοποίησης}} = 20 \log\left(\frac{q \cdot 2^N / 2\sqrt{2}}{q/\sqrt{12}}\right) \quad (4.9)$$

η οποία για εύρος δειγματοληψίας Nyquist είναι ίση με $6.02N + 1.76 \text{ dB}$

Πρόσμιξη

Η απόδοση ενός μετατροπέα μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας μία μικρή ποσότητα θορύβου η οποία εισάγεται στην είσοδο πριν την μετατροπή και ονομάζεται πρόσμιξη (dither). Το αποτέλεσμα είναι να ταλαντώνει την τιμή του λιγότερου σημαντικού bit μεταξύ του 0 και του 1, το οποίο της περισσότερες φορές μένει σταθερό, όταν εισέρχονται σήματα μικρού πλάτους.

Συνεπώς, αντί το σήμα να αποκοπεί εντελώς σε χαμηλά επίπεδα εισόδου, μεγιστοποιείται το εύρος των σημάτων που ο μετατροπέας είναι δυνατόν να μετατρέψει, λόγω της αύξησης του θορύβου. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του σφάλματος κβαντοποίησης. Το αρνητικό αυτό, αντισταθμίζεται από την μη αποκοπή των χαμηλών σημάτων, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι επιθυμητή. Ένα κατάλληλο φίλτρο στην έξοδο του συστήματος μπορεί έτσι να ανακτήσει αυτή τη μικρή μεταβολή του σήματος.

Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται, πέρα των άλλων εφαρμογών στην επεξεργασία εικόνας και ήχου, και στα μετρητικά ενέργειας. Δεδομένου ότι οι τιμές προστίθενται, η εισαγωγή θορύβου παράγει αποτελέσματα πιο ακριβή από τον μετατροπέα του αναλογικού σήματος. Η πρόσμιξη μπορεί να αυξήσει μόνο την ανάλυση της δειγματοληψίας και όχι τη γραμμικότητα, επομένως η ακρίβεια του μετατροπέα δεν βελτιώνεται απαραίτητα.

4.3 Αρχιτεκτονικές μετατροπέων

Οι βασικές αρχιτεκτονικές των A/D μετατροπέων είναι οι εξής.

4.3.1 Direct-conversion ή flash ADC

Ένας direct-conversion ή αλλιώς flash A/D μετατροπέας έχει ένα πλήθος συγκριτών, οι οποίοι πραγματοποιούν τη δειγματοληψία του σήματος εισόδου, παράλληλα. Οι συγκριτές τροφοδοτούν ένα λογικό κύκλωμα που παράγει ένα ψηφιακό σήμα για κάθε εύρος τάσης. Η άμεση μετατροπή είναι πολύ γρήγορη, ικανή για ρυθμούς δειγματοληψίας της τάξεως των GHz, αλλά συνήθως έχει μόνο 8 bits ανάλυση ή και λιγότερα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των συγκριτών που απαιτούνται είναι $2^N - 1$, επομένως το πλήθος τους διπλασιάζεται με κάθε επιπλέον ψηφίο, απαιτώντας ένα μεγάλο, δαπανηρό κύκλωμα. Μετατροπείς αυτού του τύπου έχουν ένα μεγάλο μέγεθος ολοκληρωμένου κυκλώματος, υψηλή χωρητικότητα εισόδου, υψηλή κατανάλωση ισχύος, και είναι επιρρεπείς στο να παράγουν δυσλειτουργίες στην έξοδο εξάγοντας μη σειριακούς ψηφιακά σήματα. Η αναβάθμιση σε νεότερες τεχνολογίες δεν βοηθά, καθώς η αναντιστοιχία της συσκευής είναι ο κυρίαρχος περιορισμός στη σχεδίαση. Χρησιμοποιούνται συχνά για βίντεο, ευρυζωνικές επικοινωνίες ή για γρήγορα σήματα σε οπτικά μέσα αποθήκευσης.

4.3.2 Successive-approximation (SAR) ADC

Ένας SAR μετατροπέας χρησιμοποιεί έναν συγκριτή για να περιορίσει διαδοχικά ένα εύρος που περιέχει την τάση εισόδου. Σε κάθε διαδοχικό στάδιο, ο μετατροπέας συγκρίνει την τάση εισόδου με την έξοδο ενός D/A μετατροπέα που θα αντιπροσωπεύει το μέσο του επιλεγμένου εύρους τάσης. Σε κάθε βήμα στη διαδικασία αυτή, η προσέγγιση αποθηκεύεται σε έναν successive-approximation καταχωρητή (SAR). Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε μια τάση εισόδου 6,3 V, ενώ το αρχικό εύρος είναι 0 έως 16 V. Για την πρώτη βαθμίδα, η είσοδος 6,3 V συγκρίνεται με τα 8 V (το μέσο του εύρους 0-16 V). Ο συγκριτής αναφέρει ότι η τάση εισόδου είναι μικρότερη από 8 V, έτσι ώστε ο SAR ενημερώνεται για να περιορίσει το εύρος σε 0-8 V. Για το δεύτερο βήμα, η τάση εισόδου συγκρίνεται με 4 V (το μέσο του νέου εύρους 0-8V). Ο συγκριτής αναφέρει ότι η τάση εισόδου είναι πάνω από 4 V, οπότε ο SAR θα ενημερωθεί ώστε να αντικατοπτρίζει την τάση εισόδου είναι στο εύρος 4-8 V. Για το τρίτο βήμα, η τάση εισόδου συγκρίνεται με 6 V (στα μισά του εύρους μεταξύ 4 και 8V). Ο συγκριτής αναφέρει η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη από 6V, και το εύρος αναζήτησης γίνεται 6-8 V. Τα βήματα συνεχίζονται έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή ανάλυση.

4.3.3 Ramp-compare ADC

Ένας ramp-compare μετατροπέας παράγει ένα πριονωτό σήμα το οποίο πηγαίνει προς τα πάνω ή προς τα κάτω και στη συνέχεια, γρήγορα επιστρέφει στο μηδέν. Όταν ξεκινά η κλίση, ένα χρονόμετρο αρχίζει να μετρά. Όταν η τάση ράμπας αντιστοιχιστεί με την είσοδο, ένας συγκριτής πυροδοτείται και η τιμή χρονομέτρου καταγράφεται. Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς απαιτούν το λιγότερο αριθμό των τρανζίστορ. Ο χρόνος της ράμπας είναι ευαίσθητος ως προς τη θερμοκρασία, επειδή το κύκλωμα πυροδότησης συχνά αποτελείται από έναν απλό ταλαντωτή. Υπάρχουν δύο λύσεις ως προς αυτό. Πρώτον, η χρησιμοποίηση ένα χρονισμένου μετρητή ο οποίος θα οδηγεί έναν D/A μετατροπέα και στη συνέχεια ένας συγκριτής θα διατηρεί την τιμή του μετρητή και δεύτερον, η βαθμονόμηση της χρονομετρημένης ράμπας. Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου είναι ότι συγκρίνοντας ένα δεύτερο σήμα απαιτείται απλά ένας ακόμα συγκριτής και ένας καταχωρητής για αποθήκευση της τιμής της τάσης. Ένα πολύ απλό παράδειγμα (μη γραμμικό) μπορεί να υλοποιηθεί με ένα μικροελεγκτή και μια αντίσταση και έναν πυκνωτή.

4.3.4 Wilkinson ADC

Οι μετατροπείς Wilkinson βασίζονται στη σύγκριση της τάσης εισόδου με την τάση που παράγεται από έναν πυκνωτή φόρτισης. Ο πυκνωτής επιτρέπεται να φορτιστεί μέχρι τάση του είναι ίση με το πλάτος του παλμού εισόδου. Ένας συγκριτής καθορίζει πότε έχει φτάσει αυτή η κατάσταση. Στη συνέχεια, ο πυκνωτής αφήνεται να αποφορτιστεί γραμμικά και παράγει μία τάση ράμπας. Στο σημείο όπου ο πυκνωτής αρχίζει να εκφορτίζεται, ένας παλμός πύλης

εκκινείται. Ο παλμός πύλης παραμένει έως ότου ο πυκνωτής αποφορτιστεί πλήρως. Έτσι, η διάρκεια του παλμού πύλης είναι ευθέως ανάλογη με το πλάτος του παλμού εισόδου. Ο παλμός οδηγεί μία γραμμική πύλη που δέχεται παλμούς από έναν ταλαντωτή υψηλών συχνοτήτων. Ενώ η πύλη είναι ανοικτή, ένας διακριτός αριθμός παλμών ρολογιού περνούν μέσω της πύλης και υπολογίζονται από τον καταχωρητή διευθύνσεων. Ο χρόνος για τον οποίο η πύλη είναι ανοικτή είναι ανάλογος με το πλάτος του παλμού εισόδου, έτσι ο αριθμός των παλμών ρολογιού που καταχωρείται στον καταχωρητή είναι επίσης ανάλογο. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να παρακολουθείται η φόρτιση του πυκνωτή αντί για την απόρριψη.

4.3.5 Integrating ADC

Ένας integrating μετατροπέας εφαρμόζει την άγνωστη τάση εισόδου στην είσοδο ενός ολοκληρωτή και επιτρέπει την τάση να αυξάνεται για μια καθορισμένη χρονική περίοδο (περίοδος ανόδου). Στη συνέχεια, μια γνωστή τάση αναφοράς αντίθετης πολικότητας εφαρμόζεται στον ολοκληρωτή και αφήνεται να μειώνεται μέχρι η έξοδος του ολοκληρωτή να επιστρέψει στο μηδέν (περίοδος καθόδου). Η τάση εισόδου υπολογίζεται ως συνάρτηση της τάσης αναφοράς, την σταθερή περίοδο καθόδου, και του μετρούμενου χρόνου καθόδου. Η μέτρηση του χρόνου καθόδου γίνεται συνήθως σε μονάδες του ρολογιού του μετατροπέα, έτσι ώστε μεγαλύτερος χρόνος ολοκλήρωσης να επιτρέπει υψηλότερες αναλύσεις. Επομένως, η ταχύτητα του μετατροπέα μπορεί να βελτιωθεί μειώνοντας την απαιτούμενη ανάλυση. Οι μετατροπείς αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται στις περισσότερες ψηφιακές βολτόμετρα λόγω της γραμμικότητας και την ευελιξίας τους.

4.3.6 Σ-Δ ADC

Ένας Σ-Δ μετατροπέας πραγματοποιεί oversampling στο επιθυμητό σήμα και φιλτράρει την επιθυμητή ζώνη του σήματος. Γενικά, μετατρέπεται μικρότερος αριθμός ψηφίων από τον απαιτούμενο, χρησιμοποιώντας έναν flash μετατροπέα μετά το φίλτρο. Το σήμα εξόδου, μαζί με το σφάλμα που παράγεται από τα διακριτά επίπεδα του flash μετατροπέα, ανατροφοδοτείται και αφαιρείται από την είσοδο του φίλτρου. Αυτή η αρνητική ανάδραση έχει ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση θορύβου στο σφάλμα λόγω του flash μετατροπέα έτσι ώστε να μην εμφανίζεται στις επιθυμητές συχνότητες σήματος. Ένα ψηφιακό φίλτρο (φίλτρο αποδεκατισμού) χρησιμοποιείται μετά τον μετατροπέα ώστε να μειώσει το ρυθμό δειγματοληψίας, να φιλτράρει το ανεπιθύμητο σήμα θορύβου και να αυξήσει την ανάλυση της εξόδου.

4.3.7 Pipeline ADC

Ένας pipeline μετατροπέας χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερα στάδια μετατροπών. Πρώτα, πραγματοποιείται μία βασική μετατροπή. Σε ένα δεύτερο στάδιο, η διαφορά στο σήμα

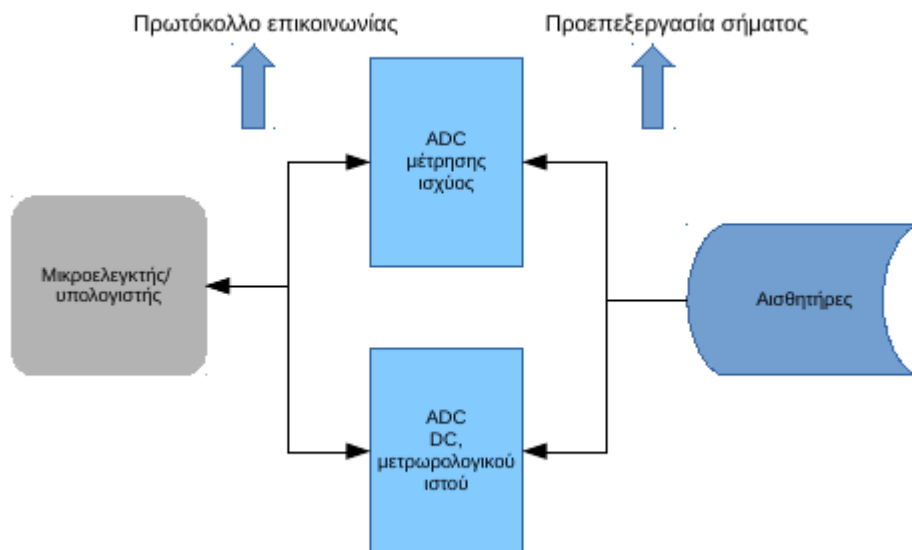
εισόδου προσδιορίζεται με ένα D/A μετατροπέα. Αυτή η διαφορά στη συνέχεια μετατρέπεται λεπτομερέστερα, και τα αποτελέσματα συνδυάζονται σε ένα τελευταίο βήμα. Αυτού του τύπου οι μετατροπείς μπορούν να θεωρηθούν ως βελτίωση της SAR, όπου η ανάδραση αναφοράς αποτελείται από την ενδιάμεση μετατροπή μιας ολόκληρης σειράς των ψηφίων και όχι μόνο το επόμενο MSB. Με το συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των SAR και flash μετατροπέων αυτός ο τύπος είναι γρήγορος, διαθέτει υψηλή ανάλυση, και απαιτεί μόνο ένα μικρό μέγεθος ολοκληρωμένου κυκλώματος

Κεφάλαιο 5: Επιλογή στοιχείων

Τα βασικά στοιχεία για την σχεδίαση του μετρητικού συστήματος περιλαμβάνουν:

- Την μέτρηση των απαραίτητων μεγεθών μέσω των αισθητήρων ή των μετατροπέων
- Την μετατροπή του αναλογικού σήματος, ύστερα από την απαραίτητη επεξεργασία, σε ψηφιακό.
- Και την ανάλυση και καταγραφή του ψηφιακού σήματος, μέσω μίας επεξεργαστικής μονάδας.

Το σχεδιάγραμμα (5.1) αποτυπώνει τη σύνθεση των στοιχείων για την δημιουργία του σήματος.



Εικόνα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα των βασικών στοιχείων του καταγραφέα

Η συλλογή των αναλογικών μεγεθών που απαιτούνται για τον καταγραφέα συλλέγονται από αισθητήρες. Τα μεγέθη αυτά είναι:

- Εναλλασσόμενη τάση, με μέγιστη τιμή 30V ανά φάση, λόγω απευθείας σύνδεσης της ανεμογεννήτριας στους συσσωρευτές.
- Εναλλασσόμενο ρεύμα, με μέγιστη τιμή 49A (για σύνδεση σε συσσωρευτές 24V) ή 25A (για σύνδεση σε συσσωρευτές 48V). Η τιμή του ρεύματος διπλασιάζεται σε περίπτωση ριπών ανέμων.
- Συνεχής τάση, με μέγιστη τιμή ίση με 60V, λόγω των συσσωρευτών.
- Συνεχές ρεύμα, με μέγιστη τιμή ίσο με $1.35 \cdot I_{ac} = 66A$.

- Ταχύτητα ανέμου, με μέγιστη τιμή τα 40m/s, για ερευνητικούς λόγους.
- Διεύθυνση ανέμου
- Θερμοκρασία
- Ατμοσφαιρική Πίεση
- Υγρασία

Επειδή βασικός σκοπός ήταν η καταγραφή και η μελέτη της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει η ανεμογεννήτρια, η μετατροπή των μεγεθών AC ρεύματος και τάσης, αποφασίστηκε να γίνει με ένα ολοκληρωμένο που θα κάνει υπολογισμό της ισχύος. Η μετατροπή των υπόλοιπων μεγεθών γίνεται με άλλο A/D μετατροπέα.

Και οι δύο A/D μετατροπείς, επικοινωνούν με τον μικροελεγκτή. Η επιλογή του μικροελεγκτή έγινε με βάση την δυνατότητα ανάλυσης δεδομένων πραγματικού χρόνου, σε μεγάλη ταχύτητα και επεξεργαστική ισχύ, με δυνατότητα επεξεργασίας των μετρήσεων για μελλοντική εμφάνιση των αποτελεσμάτων σε κάποιο γραφικό περιβάλλον.

5.1 Επιλογή μετατροπέων αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

5.1.1 Μέτρηση AC κυκλώματος

Για την μέτρηση των AC μεγεθών της ανεμογεννήτριας επιλέχθηκε το ADE7758. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο είναι της εταιρίας Analog Devices και είναι ειδικά σχεδιασμένο για μέτρηση τριφασικής ενέργειας και ισχύος, άλλων ηλεκτρικών μεγεθών όπως η τάση και το ρεύμα καθώς και της συχνότητας της τάσης εισόδου. Έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια και υποστηρίζει τα πρότυπα IEC 60687, IEC 61036, IEC 61268, IEC 62053-21, IEC 62053-22 και IEC 62053-23.

Το ADE7758 διαθέτει δεύτερης τάξης Σ-Δ μετατροπείς, έναν ψηφιακό ολοκληρωτή, κύκλωμα αναφοράς, αισθητήρα θερμοκρασίας και όλες τις διαδικασίες επεξεργασίας σήματος έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις ενεργού, άεργου και φαινόμενης ενέργειας καθώς και υπολογισμοί των RMS μεγεθών. Είναι κατάλληλο για μέτρηση τριφασικού συστήματος, είτε σε συνδεσμολογία αστέρα είτε τριγώνου και με τη χρήση είτε τριών είτε τεσσάρων καλωδίων. Επιπρόσθετα, το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο διαθέτει σύστημα βαθμονόμησης κάθε φάσης ξεχωριστά, για το ρεύμα, την τάση και τις ισχείς[26].

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά επιλογής του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου συνοψίζονται στα εξής:

- Είναι κατάλληλο για μέτρηση τριφασικών εφαρμογών με δυνατότητα διασύνδεσης 3

και 4 καλωδίων. Αυτό δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης σε φορτία με σύνδεση αστέρα και τριγώνου, καθώς και σε εφαρμογές που δεν έχουμε τη δυνατότητα σύνδεσης του καλωδίου του ουδετέρου, όπως στις μικρές ανεμογεννήτριες.

- Προσφέρει τη δυνατότητα μέτρησης όλων των επιθυμητών μεγεθών όπως rms τιμή ρεύματος και τάσης, ενεργό, άεργο και φαινόμενη ισχύ.
- Προσφέρει τη δυνατότητα μέτρησης της συχνότητας του σήματος, σημαντικό για την εφαρμογή μας για να γίνει η διακρίβωση του cut-in της ανεμογεννήτριας.
- Υπάρχει η επιλογή της ψηφιακής βαθμονόμησης με την εγγραφή των αντίστοιχων καταχωρητών κέρδους και μετατόπισης. Η διαδικασία, επομένως, της βαθμονόμησης, μπορεί να προγραμματιστεί με το λογισμικό του μικροελεγκτή ή του υπολογιστή και να απλοποιηθεί.
- Παρουσιάζει αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα οι τυπικές τιμές σφάλματος για την μέτρηση των rms τιμών του ρεύματος και της τάσης είναι 0.5% ανα φάση σε εύρος 500:1 και 20:1, αντίστοιχα. Για την μέτρηση της ενεργού ισχύος το σφάλμα φτάνει σε 0.1% σε εύρος 1000:1.
- Έχει μικρή κατανάλωση της τάξης των 13mW. Αυτό σημαίνει ότι για 5V τροφοδοσία καταναλώνει ρεύμα 9 mA.

Το ADE7758 ακολουθεί συγκεκριμένες διαδικασίες για τον υπολογισμό των βασικών AC μεγεθών που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή για τις rms τιμές της τάσης και του ρεύματος καθώς και για τον υπολογισμό των ενεργειών και κατ' επέκταση των ισχύων. Οι διαδικασίες που ακολουθούνται κατά τη μέτρηση αναλύονται παρακάτω.

Υπολογισμός RMS μεγεθών

Ο υπολογισμός της τιμής της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square - rms) είναι μία θεμελιώδη μέτρηση του πλάτους ενός AC σήματος. Ο ορισμός του μπορεί να είναι είτε πρακτικός, είτε μαθηματικός. Με τον όρο πρακτικός, εννοούμε ότι η rms τιμή ενός AC σήματος είναι το DC σήμα που απαιτείται ώστε να παράξει το ίδιο μέγεθος ισχύος στο φορτίο. Μαθηματικά, η rms τιμή ενός συνεχούς σήματος ορίζεται από τον τύπο:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} \quad (5.1)$$

Για σήματα διακριτού χρόνου ο μαθηματικός τύπος υπολογισμού της rms τιμής εκφράζει την τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των σημάτων που δειγματοληπτούνται. Επομένως έχουμε:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f^2(N)} \quad (5.2)$$

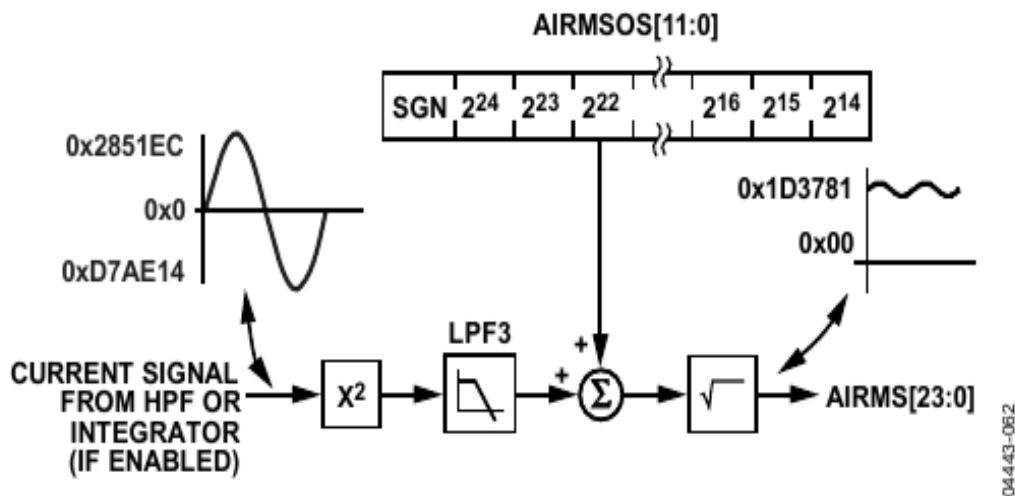
Η μέθοδος που ακολουθεί το ADE7758 για τον υπολογισμό των rms τιμών είναι να περνάει το τετράγωνο του σήματος εισόδου μέσα από ένα βαθυπερατό φίλτρο και εν τέλει να τετραγωνίζει το αποτέλεσμα. Οι τιμές αποθηκεύονται σε τρεις αντίστοιχους καταχωρητές, έναν για κάθε φάση. Δηλαδή έστω το σήμα ρεύματος εισόδου:

$$i(t) = \sqrt{2} \times IRMS \times \sin(\omega t) \quad (5.3)$$

Με τον τετραγωνισμό έχουμε:

$$i^2(t) = IRMS^2 - IRMS^2 \cdot \cos(\omega t) \quad (5.4)$$

Η διαδικασία υπολογισμού της rms τιμής του ρεύματος μίας φάσης του κυκλώματος φαίνεται στο σχήμα (5.2).



Εικόνα 5.2: Υπολογισμός της rms τιμής του ρεύματος στο ADE7758

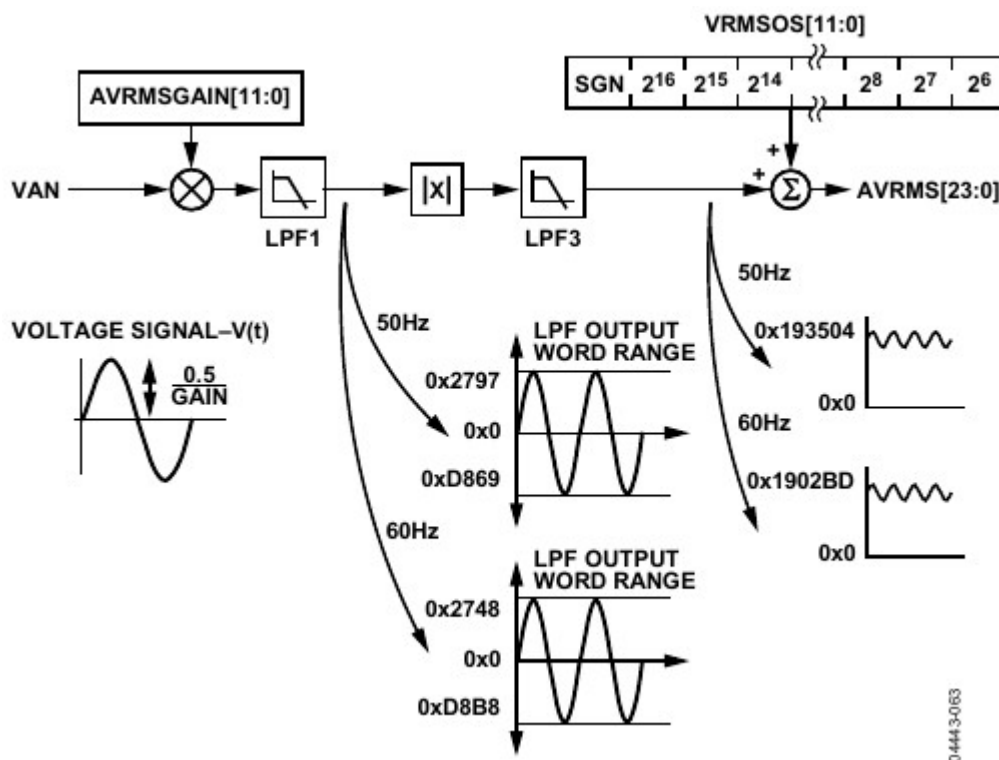
Όσον αφορά τον υπολογισμό της rms τιμής της τάσης, ακολουθείται μία διαφορετική διαδικασία. Η εκτίμηση της τιμής γίνεται χρησιμοποιώντας το μέσο όρο των απόλυτων τιμών (mean absolute value - MAV) των επιμέρους σημάτων. Ισχύει δηλαδή ότι

$$V_{MAV} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2} u(t) \cos(\omega t) \quad (5.5)$$

Για ένα ιδανικό ημιτονοειδές σήμα ισχύει ότι

$$V_{MAV} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{RMS} \quad (5.6)$$

Επομένως το άθροισμα των απόλυτων τιμών είναι ανάλογο της rms τιμής, επομένως γνωρίζοντας αυτό μπορεί να υπολογιστεί το απαιτούμενο μέγεθος. Η διαδικασία υπολογισμού της τιμής της τάσης φαίνεται στο σχήμα (5.3)



Εικόνα 5.3: Υπολογισμός rms τιμής της τάσης στο ADE7758

Υπολογισμός Ενεργού Ισχύος

Η στιγμιαία ισχύς υπολογίζεται από τις συναρτήσεις του ρεύματος και της τάσης. Με γνωστό ότι :

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot IRMS \cdot \sin(\omega t) \quad (5.7)$$

και

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot VRMS \cdot \cos(\omega t) \quad (5.8)$$

ενέργεια.

Υπολογισμός άεργου ισχύος

Η άεργος ισχύς ορίζεται σαν το αποτέλεσμα των συναρτήσεων της τάσης και του ρεύματος, όταν ένα από τα δύο σήματα μετατοπιστεί κατά 90°. Στο ADE7758 ο υπολογισμός της στιγμιαίας άεργου ισχύος γίνεται με αντίστοιχη μετατόπιση του σήματος του ρεύματος. Η παρακάτω σχέση περιγράφει τον υπολογισμό αυτό:

$$q(t) = V \cdot I \sin(\theta) + V \cdot I \sin(2\omega t - \theta) \quad (5.12)$$

Ο υπολογισμός γίνεται κατά αντίστοιχο τρόπο με την ενεργό ισχύ. Πολλαπλασιάζεται δηλαδή το σήμα της τάσης με το σήμα του ρεύματος, μετατοπισμένο κατά 90°. Η DC συνιστώσα αφαιρείται από ένα βαθυπερατό φίλτρο. Στους αντίστοιχους καταχωρητές η ολοκλήρωση της άεργου ισχύος σε κάποιο χρονικό διάστημα και προκύπτει η αντίστοιχη ενέργεια από τη σχέση:

$$\text{Reactive Energy} = \int q(t) dt = \lim_{T \rightarrow 0} \sum_{n=0}^{\infty} q(nT) \times T \quad (5.13)$$

5.1.2 Μέτρηση DC κυκλώματος και μετεωρολογικών αισθητήρων

Τα υπόλοιπα προς μέτρηση στοιχεία (εκτός του AC κυκλώματος) ήταν τα εξής :

- Τάση DC
- Ρεύμα DC
- Θερμοκρασία
- 2 αισθητήρες ταχύτητας του ανέμου
- Αισθητήρας διεύθυνσης ανέμου
- Αισθητήρας πίεσης

Για τον λόγο αυτό ήταν απαραίτητη η χρήση ενός ολοκληρωμένου με δυνατότητα σύνδεσης πολλών στοιχείων. Επιλέχθηκε το AD7327 της εταιρίας Analog Devices. Το συγκεκριμένο μοντέλο διαθέτει 8 εισόδους, οι οποίες επαρκούν για να καλύψουν τα μεγέθη που θέλουμε να μετρήσουμε. Η μετατροπή του αναλογικού σήματος γίνεται με τη βοήθεια ενός successive-approximation μετατροπέα μεγέθους 12 bit[27].

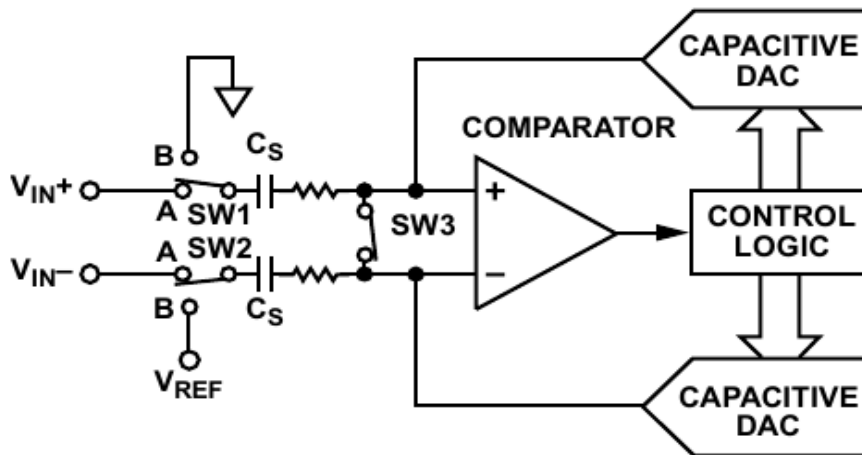
Βασικά χαρακτηριστικά

Τα βασικά χαρακτηριστικά του AD7327, σύμφωνα με τα οποία έγινε η επιλογή του είναι τα εξής:

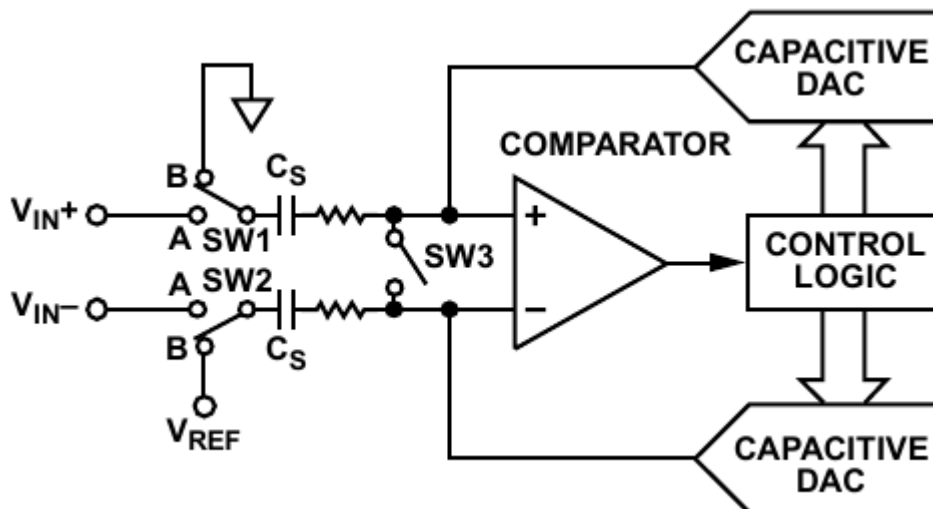
- Το AD7327 δέχεται αναλογικά διπολικά σήματα εισόδου πλάτους $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 2.5V$ και μονοπολικά πλάτους $0-10V$. Υπάρχει δυνατότητα εσωτερικής ρύθμισης του εύρους μέτρησης των αναλογικών σημάτων, γεγονός που προσδίδει ευελιξία στο σύστημα. Το επιλεγμένο μέγιστο πλάτος των $10V$ είναι επαρκές για να καλύψει τις ανάγκες των μετρήσεων μας.
- Έχει τη δυνατότητα ρύθμισης μέτρησης 8 μονών εισόδων (single-ended), 4 διαφορικών και 4 ή 7 ψευδο-διαφορικών σημάτων. Αυτό αυξάνει τη λειτουργικότητα του συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα διασύνδεσης διαφορετικού τύπου αισθητήρων.
- Διαθέτει SPI πρωτόκολλο επικοινωνίας συχνότητας δειγματοληψίας 500 kSPS. Η συχνότητα είναι αρκετά υψηλή για τον τύπο των μετρήσεων που μας ενδιαφέρει.
- Έχει χαμηλή κατανάλωση, της τάξεως των 18mW σε πλήρη λειτουργία στα 500kSPS. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, με τροφοδοσία 5V, το καταναλισκόμενο ρεύμα ανέρχεται στα 9mA.
- Διαθέτει δυνατότητα εσωτερικής ρύθμισης λήψης διαδοχικών μετρήσεων από τα επιλεγόμενα κανάλια. Η δυνατότητα αυτή αυξάνει τη λειτουργικότητα και την ταχύτητα του συστήματος.
- Το πλάτος της τάσης των ψηφιακών εξόδων καθορίζεται από την αντίστοιχη τροφοδοσία Vdrive που διαθέτει το ολοκληρωμένο. Λόγω του γεγονότος ότι η πλατφόρμα του Raspberry Pi δέχεται ψηφιακές εισόδου μέγιστου πλάτους 3.3V, η δυνατότητα επιλογής είναι κρίσιμη ώστε να μην καθίσταται απαραίτητη η ρύθμιση της τάσης των λογικών εξόδων της επικοινωνίας.

Λειτουργία

Το AD7327 είναι ένας SAR μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, κατασκευασμένος γύρω από δύο χωρητικούς D/A μετατροπείς. Στις εικόνες (5.5) και (5.6) φαίνεται το απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα του A/D μετατροπέα σε μονής εισόδου κατάσταση κατά τη διάρκεια των φάσεων συλλογής και μετατροπής, αντίστοιχα.



Εικόνα 5.5: Ο μετατροπέας του AD7327 κατά την φάση της συλλογής των δεδομένων



Εικόνα 5.6: Ο μετατροπέας του AD7327 κατά την φάση της μετατροπής

Ο μετατροπέας αποτελείται από μία λογική ελέγχου (control logic), έναν successive-approximation καταχωρητή και χωρητικούς D/A μετατροπείς. Κατά τη διάρκεια της φάσης συλλογής (acquisition phase) ο διακόπτης SW2 είναι κλειστός κι ο SW1 στη θέση A, επιτρέποντας στον συγκριτή να βρίσκεται σε ισορροπία και η συστοιχία των πυκνωτών δειγματοληψίας συλλέγουν το σήμα στην είσοδο.

Όταν αρχίζει η διαδικασία της μετατροπής, ο διακόπτης SW2 ανοίγει κι ο διακόπτης SW1 μεταφέρεται στη θέση B, προκαλώντας ασυμμετρία στον συγκριτή. Ο έλεγχος λογικής και ο

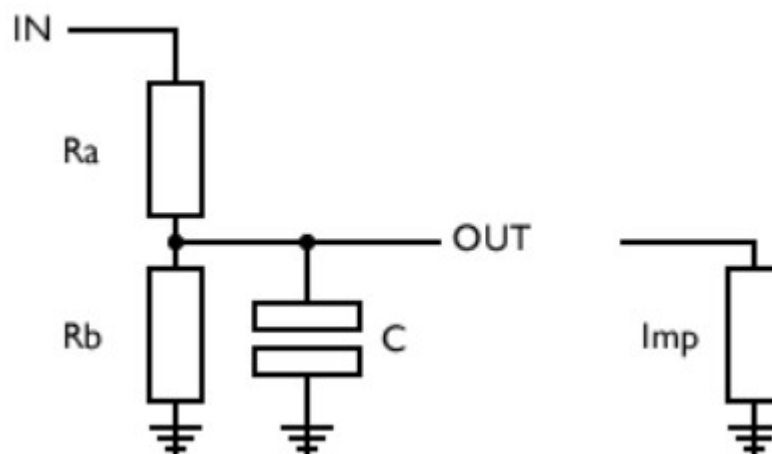
D/A μετατροπέας, προσθέτουν και αφαιρούν σήματα με τον τρόπο που αναλύθηκε στην ενότητα 4.3.2, ώστε να φέρουν το συγκριτή σε ισορροπία. Όταν ο συγκριτής εξισορροπηθεί, η μετατροπή είναι πλήρης. Η λογική ελέγχου δημιουργεί τον κώδικα εξόδου του μετατροπέα.

Στο AD7327 η μορφή του προεπιλεγμένου κώδικα εξόδου είναι συμπληρώματος ως προς 2. Η επιλογή της μορφής μπορεί να γίνει με την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ενός ψηφίου του καταχωρητή ελέγχου που διαθέτει το AD7327. Η άλλη πιθανή μορφή είναι η απλή δυαδική.

5.2 Επιλογή αισθητήρων

5.2.1 Μέτρηση τάσης

Για την μέτρηση της τάσης, DC και AC επιλέχθηκε η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αντίστοιχες εφαρμογές ψηφιακών μετρητικών, δηλαδή ένας διαιρέτης τάσης. Ο λόγος της επιλογής είναι το πολύ χαμηλό κόστος και ο απλός σχεδιασμός του κυκλώματος και της πλακέτας. Το κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα (5.7):



Εικόνα 5.7: Διαιρέτης τάσης

Οι τιμές των δύο αντιστάσεων του διαιρέτη επιλέγονται έτσι ώστε η τάση εξόδου να είναι μέσα στο εύρος εισόδου των ολοκληρωμένων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των μεγεθών. Η τιμή τους συνήθως είναι της τάξης των $k\Omega$, καθώς σύμφωνα σχέση (3.28), επιλέγονται όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές για μικρότερη κατανάλωση ισχύος και για τον περιορισμό του ρεύματος εισόδου, που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία του μετρητικού συστήματος.

Επιπρόσθετα, η τιμή της αντίστασης R_2 θα πρέπει να είναι αρκετά μικρότερη από την αντίσταση εισόδου του αντίστοιχου ολοκληρωμένου που πραγματοποιεί την μέτρηση. Αυτό

είναι απαραίτητο καθώς στην είσοδο θα αναπτυχθεί μία τάση ίση με $V' = I \cdot R_{in}$. Η τάση αυτή προστίθεται στην τάση που παράγεται από την έξοδο του διαιρέτη και κατά συνέπεια προστίθεται κάποιο σφάλμα στην μέτρηση. Έχοντας λοιπόν, $R_{in} \gg R_2$, μειώνεται αισθητά το ρεύμα που εισέρχεται στο μετρητικό, επομένως και το σφάλμα μέτρησης.

5.2.2 Μέτρηση εναλλασσόμενου ρεύματος

Για την μέτρηση του εναλλασσόμενου ρεύματος επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν μετασχηματιστές ρεύματος. Πρόκειται για έναν τρόπο μέτρηση χαμηλού κόστους. Σε σχέση με τις αντιστάσεις shunt, οι οποίες έχουν το χαμηλότερο κόστος, οι μετασχηματιστές προσφέρουν γραμμικότητα για ένα μεγάλο εύρος ρεύματος και θερμοκρασίας. Επίσης, καταναλώνουν λιγότερη ισχύ και προσφέρουν μεγάλη ευκολία στη σύνδεση της ανεμογεννήτριας.

Οι επιλογές που κάναμε στους διάφορους μετασχηματιστές που εξετάσαμε είναι οι εξής.

CT08-1200

Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής [28] κατασκευάζεται από την εταιρία ICE Components και τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:

- Ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας 50A.
- Λόγος μετασχηματισμού 1:1200
- Μεγάλη πυκνότητα ρεύματος .
- Εύρος συχνοτήτων βέλτιστης λειτουργίας 40-200Hz.
- Εύρος θερμοκρασίας -40C° έως +130C°.
- Σταθερός λόγος Volts/Ampere για διάφορες τιμές αντιστάσεων μέτρησης.

AC1020

Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής[29] κατασκευάζεται από την εταιρία Talema Group LLC και τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:

- Τιμή ονομαστικού ρεύματος 20A και μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 60A.
- Λόγος μετασχηματισμού 1:1000
- Γραμμική λειτουργία για εύρος αντιστάσεων μέτρησης έως 200Ω.

- Εύρος θερμοκρασίας -55°C έως $+130^{\circ}\text{C}$

CST-1030

Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής[30] κατασκευάζεται από την εταιρία Triad Magnetics και τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:

- Ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας 30A.
- Λόγος μετασχηματισμού 1:1000
- Αντίσταση μέτρησης 100Ω
- Βέλτιστο εύρος συχνοτήτων 45-65Hz.

CT05-500

Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής [31] κατασκευάζεται από την εταιρία ICE Components και τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:

- Ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας 25 A.
- Λόγος μετασχηματισμού 1:500.
- Εύρος συχνοτήτων έως 500kHz
- Εύρος θερμοκρασίας -40°C έως $+130^{\circ}\text{C}$.

CS2106L

Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής[32] κατασκευάζεται από την εταιρία ICE Components και τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:

- Εύρος μέτρησης ρεύματος από 0.5 έως 20A.
- Λόγος μετασχηματισμού 1:500.
- Εύρος συχνότητας 50 – 400Hz.
- Αντίσταση μέτρησης για λόγο 0.1 Volts/Ampere λόγο εξόδου ίση με 68Ω .

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα μετρήσεων και για τους 5 επιλεγμένους αισθητήρες, τόσο σε συνθήκες εργαστηρίου, όσο και στην γεννήτρια. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιλέχθηκε ο μετασχηματιστής AC1020. Εκτός από τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, ο συγκεκριμένος επιλέχθηκε και για τους εξής λόγους:

- Μεγαλύτερο εύρος τιμών μετρούμενου ρεύματος
- Αναλογικά χαμηλότερο κόστος
- Έχει την επαρκή διάμετρο (9.5mm) για 10mm² καλώδιο.
- Δεν χρειάζεται να κοπεί το κύκλωμα, όπως στην περίπτωση των CS2106L και CT05-500.

5.2.3 Μέτρηση συνεχούς ρεύματος

Σε σχέση με τις μεθόδους μέτρησης του εναλλασσόμενου ρεύματος, οι τρόποι μέτρησης του συνεχούς ρεύματος είναι πιο περιορισμένοι. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί Hall transducer κλειστού πολύ καλή ακρίβεια, γραμμικότητα και ευκολία στη σύνδεση. Επίσης, προτιμήθηκε έναντι των ανοιχτού βρόχου μετατροπέων, λόγω της ευελιξίας που προσφέρουν στην επιλογή εύρους της τάσης εξόδου, λόγω της αντίστασης μέτρησης. Επομένως, θα ήταν εύκολη η χρήση όλου του εύρους πλήρους κλίμακας του μετρητικού μας, με αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη αξιοπιστία μετρήσεων.

Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε το μοντέλο LA 55-P [33].

Το συγκεκριμένο μοντέλο κατασκευάζεται από την εταιρία LEM και τα βασικότερα χαρακτηριστικά του είναι:

- Μέγιστο ρεύμα πρωτεύοντος 70A, ονομαστικό ρεύμα 50A
- Τροφοδοσία ± 12 έως $\pm 15V$
- Λόγος μετασχηματισμού 1:1000
- Γραμμικότητα κάτω από 0.15%
- Εύρος συχνοτήτων έως 200kHz
- Εύρος θερμοκρασίας -40 έως 85 °C.

5.2.4 Εξοπλισμός μετεωρολογικών μετρήσεων

Όσον αφορά τις μετεωρολογικές μετρήσεις η σχεδίαση του συστήματος έγινε με βάση τους αισθητήρες που ορίζει το πρότυπο IEC [7] για την μέτρηση των αντίστοιχων μεγεθών του μετεωρολογικού ιστού των ανεμογεννητριών.

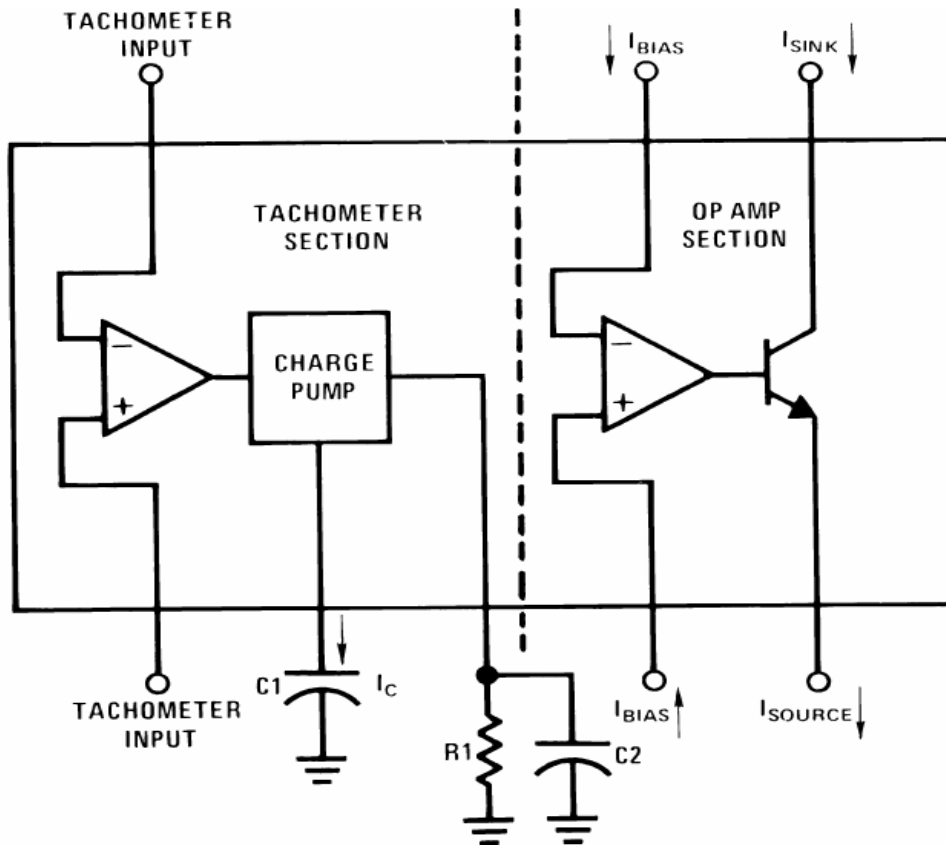
5.2.5 Μέτρηση ταχύτητας ανέμου

Τα ανεμόμετρα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ταχύτητας, παράγουν μία συχνότητα ανάλογη της ταχύτητας. Για τη μέτρηση της συχνότητας και κατ' επέκταση της ταχύτητας του ανέμου επιλέχθηκε η χρήση ενός μετατροπέα συχνότητας σε τάση. Η επιλογή

αυτή έγινε γιατί με τον τρόπο αυτό δίνεται λύση σε επίπεδο υλικού, καθώς για την πλατφόρμα του Raspberry Pi η μέτρηση της συχνότητας ενός σήματος δεν είναι δυνατή με εύκολο και αξιόπιστο τρόπο μέσω των ακροδεκτών της πλατφόρμας.

Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο μετατροπέας LM2907 της εταιρίας Texas Instruments[34]. Πρόκειται για έναν μετατροπέα που χρησιμοποιεί την τεχνική της διάταξης φορτίου (charge pump) μαζί με έναν τελεστικό ενισχυτή/συγκριτή.

Το βασικό κύκλωμα του μετατροπέα φαίνεται στην εικόνα (5.8):



Εικόνα 5.8: Κύκλωμα διάταξης LM2907

Το πρώτο στάδιο της λειτουργίας είναι ένας διαφορικός ενισχυτής ο οποίος οδηγεί ένα flip-flop κύκλωμα θετικής ανατροφοδότησης. Η τάση κατωφλίου της εισόδου είναι η τιμή της διαφορικής τάσης εισόδου κατά την οποία η έξοδος του σταδίου αυτού αλλάζει κατάσταση. Το LM2908 έχει μία είσοδο εσωτερικά γειωμένη, έτσι ώστε το σήμα εισόδου να ταλαντεύεται πάνω και κάτω από την αναφορά της γείωσης και όταν υπερβαίνει τα όρια εισόδου να παράγει μια έξοδο. Αυτή η ενιαία είσοδος είναι πλήρως προστατευμένη έναντι εναλλαγών της τάσης σε εύρος $\pm 28V$.

Η επιλογή διαφορικής εισόδου του LM2908 δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να καθορίσει το επίπεδο μεταγωγής εισόδου, ενώ εξακολουθεί να έχει την υστέρηση γύρω από αυτό το επίπεδο τάσης για απόρριψη θορύβου σε οποιαδήποτε εφαρμογή. Φυσικά, προκειμένου να μπορέσουν οι είσοδοι να παράγουν τάση κοινού σημείου (common-mode) πάνω από το

επίπεδο της γείωσης, αφαιρείται η προστασία εισόδου και επομένως τα όρια της εισόδου δεν θα πρέπει να λαμβάνονται έξω από τα όρια της τάσης τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται.

Μετά το στάδιο της εισόδου, είναι η αντλία φόρτισης (charge pump) όπου η συχνότητα εισόδου μετατρέπεται σε μια DC τάση. Για να γίνει αυτό απαιτείται ένας πυκνωτής χρονισμού, μια αντίσταση εξόδου, και ένας πυκνωτής φίλτρου. Όταν το στάδιο εισόδου αλλάζει κατάσταση (λόγω ενός κατάλληλου zero crossing ή λόγω διαφορικής τάση στην είσοδο) ο πυκνωτής χρονισμού φορτίζει και εκφορτίζει γραμμικά μεταξύ των δύο τάσεων των οποίων η διαφορά είναι $V_{CC}/2$. Στη συνέχεια, το μισό κύκλο της συχνότητας εισόδου ή σε χρονικό διάστημα ίσο με το $1/2 \cdot f_{in}$, η αλλαγή στο φορτίο του πυκνωτή χρονισμού είναι ίση με $V_{CC}/2 \times C_1$. Το μέσο ποσό του ρεύματος που αντλείται μέσα ή έξω από το πυκνωτή τότε είναι:

$$\frac{\Delta Q}{T} = I_{c(AVG)} = C_1 \times \frac{V_{cc}}{2} \times (2f_i) = V_{cc} \times f_i \times C_1 \quad (5.14)$$

Το κύκλωμα εξόδου αντικατοπτρίζει αυτό το ρεύμα με μεγάλη ακρίβεια στην αντίσταση φορτίου R_1 , συνδεδεμένη με το έδαφος, έτσι ώστε αν οι παλμοί του ρεύματος ολοκληρωθούν με τον πυκνωτή φίλτρου, τότε η παραγόμενη τάση εξόδου είναι ίση με:

$$V_o = I_c \times R_1 \quad (5.15)$$

και η συνολική εξίσωση μετατροπή γίνεται:

$$V_o = V_{cc} \times R_1 \times C_1 \times R_1 \quad (5.16)$$

Το μέγεθος του πυκνωτή C_2 είναι αντιστρόφως ανάλογο του ποσού της κυμάτωσης της τάσης εξόδου και ανάλογο του απαιτούμενου χρόνου απόκρισης.

5.3 Επιλογή μικροελεγκτή/υπολογιστή

Η επιλογή της πλατφόρμας πάνω στην οποία στηρίχθηκε η σχεδίαση του καταγραφέα, έγινε με βάση τις δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν στην υλοποίηση του μετρητικού συστήματος και τη λειτουργία του ως ψηφιακός καταγραφέας. Οι δύο βασικές λογικές ενσωματωμένων συστημάτων που επιλέχθηκαν ήταν του μικρού υπολογιστή και του μικροελεγκτή.

Η χρήση ενός μικρού υπολογιστή προσφέρει τις παρακάτω δυνατότητες στην υλοποίηση ενός καταγραφέα:

- ✓ Έχει τη δυνατότητα φόρτωσης λειτουργικού συστήματος, επομένως αυξάνεται η λειτουργικότητα του συστήματος προσφέροντας επιλογές ανάπτυξης προγραμμάτων, όπως για παράδειγμα ένα γραφικό περιβάλλον για την απεικόνιση των μετρούμενων μεγεθών.
- ✓ Έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με το διαδίκτυο και επομένως προσφέρει επιλογές στην δημιουργία διεπαφών διαδικτύου για απομακρυσμένη σύνδεση και εποπτεία των λειτουργιών της γεννήτριας.
- ✓ Οι ενσωματωμένες διεπαφές που διαθέτει δίνει τη δυνατότητα διασύνδεσης με πλήθος περιφερειακών συσκευών, όπως για παράδειγμα μία οθόνη ή ένα πληκτρολόγιο, καθιστώντας την εφαρμογή ιδιαίτερα λειτουργική.
- ✓ Έχει τη δυνατότητα προγραμματισμού με γλώσσες υψηλού επιπέδου με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η λειτουργία του από το χρήστη.

Οι βασικοί περιορισμοί στη χρήση μικρών υπολογιστών είναι :

- ✗ Η μεγάλη κατανάλωση ισχύος δημιουργεί προβλήματα στην αυτόνομη λειτουργία του με τροφοδοσία από μπαταρίες.
- ✗ Η διακοπή των προγραμμάτων που λειτουργούν με την αποσύνδεση του συστήματος από την τροφοδοσία.
- ✗ Η πρόσβαση στο υλικό δεν είναι πραγματικού χρόνου. Εάν η μονάδα επεξεργασία του υπολογιστή είναι απασχολημένη η διεπαφή με το υλικό μπορεί να καθυστερήσει.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ένας μικροελεγκτής για ένα μετρητικό σύστημα είμαι:

- ✓ Χαμηλό κόστος.
- ✓ Μικρή κατανάλωση ισχύος, με αποτέλεσμα να είναι ιδανικός για την αυτόνομη λειτουργία του καταγραφέα.
- ✓ Το πρόγραμμα που έχει φορτώσει εκτελείται συνεχώς, ενώ διατηρείται και μετά την επανασύνδεση του μικροελεγκτή στην τροφοδοσία, με αποτέλεσμα να είναι ευέλικτη η εφαρμογή.
- ✓ Λόγω της ευελιξίας που προσφέρουν είναι ιδανικοί για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Οι περιορισμοί των μικροελεγκτών αφορούν τα παρακάτω:

- ✗ Έχουν μικρή επεξεργαστική ισχύ με αποτέλεσμα την δύσκολη υλοποίηση διεπαφών.

- ✗ Δεν φορτώνουν κάποιο λειτουργικό σύστημα, επομένως είναι δύσκολη η δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος.
- ✗ Έχουν μικρό εύρος επιλογής της γλώσσας προγραμματισμού που μπορεί ο χρήστη να προγραμματίσει.

Η επιλογή που έγινε για τις δύο κατηγορίες ενσωματωμένων ήταν οι πλατφόρμες Raspberry Pi και Arduino. Και τα δύο αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα των διαφορετικών λογικών που αναφέρθηκαν

5.3.1 Raspberry Pi

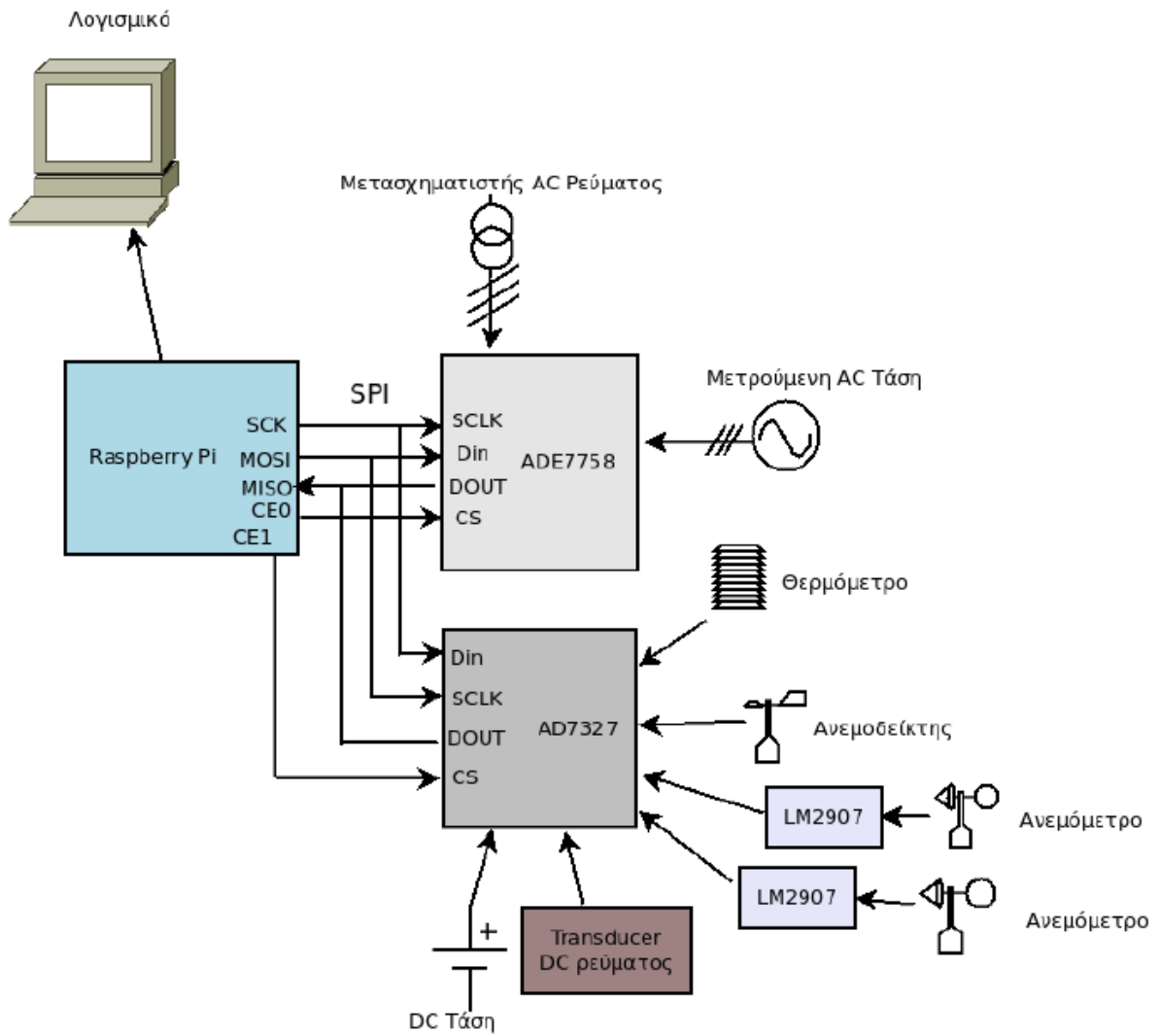
Το Raspberry Pi είναι ένας μικρός υπολογιστής σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας. Σαν συσκευή παρουσιάζει πολλές δυνατότητες, συχνά όμοιες με αυτές που εκτελούνται από έναν κανονικό ηλεκτρονικό υπολογιστή και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές και κατασκευές, που έχουν ανάγκη τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

5.3.2 Arduino

Το Arduino αποτελεί μια πλατφόρμα μικροελεγκτή ανοιχτού κώδικα. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μια μητρική πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους και εξόδους, αναλογικές και ψηφιακές. Είναι κατάλληλο για κατασκευές ψηφιακών συσκευών και διαδραστικών αντικειμένων που ελέγχουν και μετράνε ψηφιακά διάφορα μεγέθη. Στην εφαρμογή μας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Arduino Uno. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Κεφάλαιο 6: Σχεδίαση Υλικού

Στο κεφάλαιο 5 είδαμε τις βασικές επιλογές εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν στο μετρητικό μας σύστημα. Με βάση τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων, ο συνδυασμός αυτών για την υλοποίηση του καταγραφέα περιγράφεται στο σχήμα (6.1).



Εικόνα 6.1: Γενική μορφή σχεδίασης του συστήματος

6.1 Σχεδίαση αναπτυξιακής πλακέτας για το Raspberry Pi

Η βασική υλοποίηση του καταγραφέα έγινε με την πλατφόρμα του Raspberry Pi. Στην πλακέτα αυτή συνδέθηκαν όλα τα στοιχεία που είναι αναγκαία για τη διαδικασία της μέτρησης. Επιλέχθηκε η πλακέτα να μην είναι shielded πάνω στο Raspberry Pi, για λόγους ευκολίας κατά τη χρήση και την εξεύρεση σφαλμάτων, λόγω μεγαλύτερης πολυπλοκότητας του κυκλώματος.

Η συγκεκριμένη πλακέτα είναι αναπτυξιακή, επομένως σχεδιάστηκε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη δυνατότητα ευελιξίας στη χρήση της, για την αναζήτηση και επίλυση σφαλμάτων κατά τη σχεδίαση του υλικού. Τα σημεία που δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση είναι τα εξής:

- Η τοποθέτηση των αισθητήρων του ρεύματος έγινε εξωτερικά στην πλακέτα. Αυτό έγινε, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του αισθητήρα με άλλο μοντέλο, που θα προσφέρει διαφορετικό εύρος μέτρησης ρεύματος, καθώς και μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Δυνατότητα αποκοπής των δίαυλων της σειριακής περιφερειακής επικοινωνίας, με τη χρήση κλεμών. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει τη χρήση μόνο του ενός από τους A/D μετατροπείς για αναζήτηση σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν από τη λειτουργία της πλακέτας, τόσο στους στα ολοκληρωμένα όσο και στην επικοινωνία του SPI.
- Δυνατότητα αποκοπής του διαύλου μεταξύ αισθητήρα και μετατροπέα συχνότητα σε τάση, σε περίπτωση που προκύψει κάποιο σφάλμα στη λειτουργία του μετατροπέα.
- Δυνατότητα επιλογής αποσύνδεσης της τάσης αναφοράς των αναλογικών σημάτων από την κοινή γείωση τους. Αυτό δίνει τη δυνατότητα αναζήτησης σφαλμάτων, που σχετίζονται με επιστροφή ρευμάτων από την κοινή γείωση των ηλεκτρονικών στοιχείων.
- Δυνατότητα επιλογής της μέτρησης της συνεχούς τάσης, μεταξύ μονής εισόδου και διαφορικού σήματος. Σχεδιάστηκε η σύνδεση του αρνητικού σήματος της τάσης εισόδου να γίνεται είτε στο σημείο της κοινής αναφοράς όλων των αναλογικών σημάτων, είτε στην αντίστοιχη είσοδο του μετατροπέα AD7327 που επιτρέπει την μέτρηση διαφορικού σήματος της.

Τα σχέδια της πλακέτας που σχεδιάστηκε για την επικοινωνία του μετρητικού με την πλατφόρμα του Raspberry Pi φαίνονται στο Παράρτημα Α.

6.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά της πλακέτας

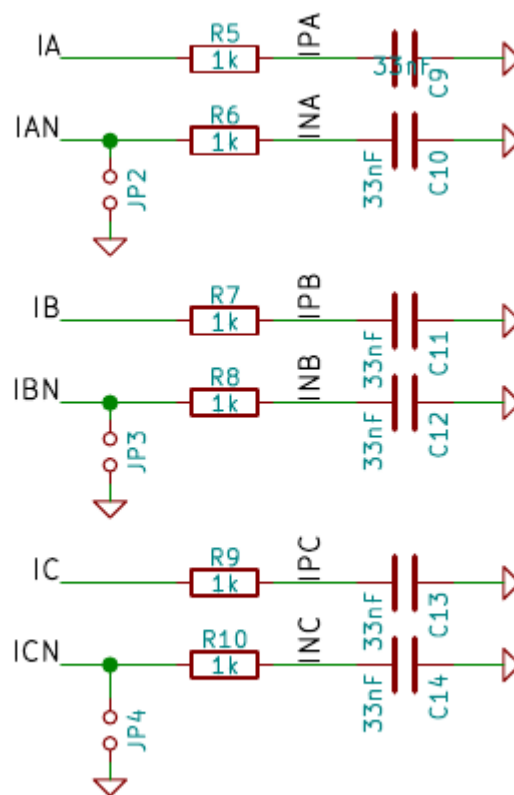
Τα βασικά χαρακτηριστικά και οι αρχές της σχεδίασης έγιναν σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών των εξαρτημάτων, των κανόνων σχεδίασης και των αναγκών του μετρητικού συστήματος.

Αναλογικές εισόδους

Ο τρόπος σχεδίασης των αναλογικών εισόδων έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών ([26], [27]) των εξαρτημάτων και την διαφοροποίηση στα σημεία που εξυπηρετούσαν τη λειτουργικότητα του καταγραφέα.

Είσοδος εναλλασσόμενου ρεύματος

Όσον αφορά την μέτρηση εναλλασσόμενου ρεύματος το βασικό κύκλωμα εισόδου φαίνεται στην εικόνα (6.2).



Εικόνα 6.2: Κύκλωμα αναλογικής εισόδου του ρεύματος

Η αντίσταση μέτρησης επιλέχθηκε να τοποθετηθεί στον μετασχηματιστή ρεύματος, ο οποίος βρίσκεται εξωτερικά της αναπτυξιακής πλακέτας, για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ευελιξία επιλογής της τάσης εισόδου στο ADE7758 και επομένως στο εύρος του μετρούμενου ρεύματος. Η πλήρης κλίμακα εισόδου στο ADE7758 είναι πλάτους 0.5V, επομένως η διαστασιολόγηση της αντίστασης μέτρησης έγινε έτσι ώστε το μέγιστο ρεύμα μέτρησης να παράγει τάση πλήρους κλίμακας για μεγαλύτερη ανάλυση και ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα, για τον μετασχηματιστή AC1020, από τη σχέση (3.19) εξάγουμε:

$$R_b = \frac{n \cdot V_o}{I_p} \quad (6.1)$$

όπου

- ◆ R_b – η αντίσταση μέτρησης
- ◆ V_o – η τάση εξόδου
- ◆ I_p – το ρεύμα του πρωτεύοντος
- ◆ n – ο λόγος μετασχηματισμού

Επομένως για μέτρηση, του μέγιστου ρεύματος της ανεμογεννήτριας, είναι απαραίτητη

$$R_b = \frac{1000 \cdot 0.5}{48,37 \cdot \sqrt{2}} = 7.31 \Omega \quad (6.2)$$

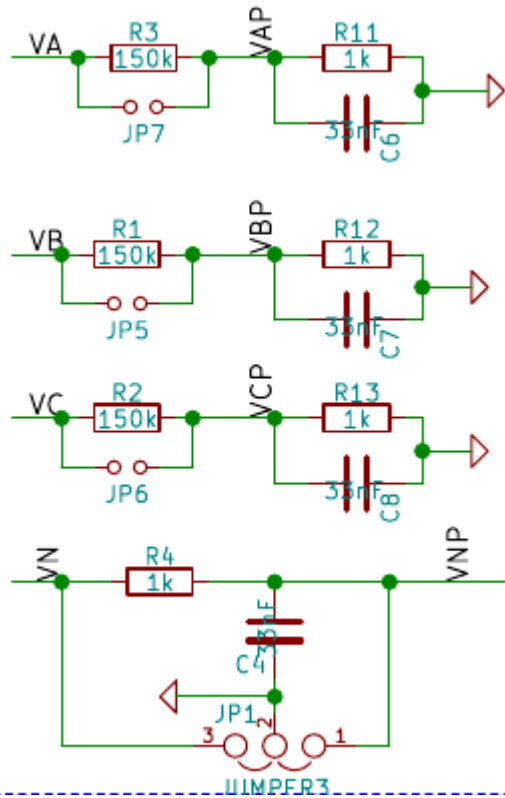
Στην αναλογική είσοδο του ADE χρησιμοποιήθηκαν antialiasing φίλτρα RC, όπως ορίζει ο κατασκευστής [35]. Η τιμές των στοιχείων είναι $R=1k\Omega$ και $C=33nF$, ώστε η τιμή της συχνότητας αποκοπής να είναι σύμφωνα με τη σχέση:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 1k \cdot 33n} = 4.823 kHz \quad (6.3)$$

Οι αναλογικές εισόδους στο ADE7758, αντέχουν τάση εύρους $\pm 6V$ χωρίς τον κίνδυνο μόνιμης βλάβης. Έτσι είναι δυνατόν να εντοπιστούν οι ριπές ανέμου που παράγουν ρεύμα διπλάσιο του ονομαστικού.

Είσοδος εναλλασσόμενης τάσης

Για την αναλογική είσοδο της εναλλασσόμενης τάσης το βασικό κύκλωμα εισόδου κάθε φάσης φαίνεται στην εικόνα (6.3)



Εικόνα 6.3: Κύκλωμα αναλογικής εισόδου της τάσης

Η μετρούμενη τάση, όπως έχουμε αναφέρει, διαιρείται και εισέρχεται στις εισόδους του ADE7758. Το κύκλωμα των αναλογικών εισόδων της τάσης σχεδιάζεται έτσι ώστε η συχνότητα αποκοπής του κυκλώματος να συμπίπτει με το anti-aliasing φίλτρο των εισόδων του ρεύματος. Αυτό το στοιχείο είναι πολύ σημαντικό, καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα παρουσιαστούν μεγάλα σφάλματα στη μέτρηση μικρών συντελεστών ισχύος. Επομένως η τιμή της αντίστασης εξόδου του διαιρέτη έχει τιμή $R_o = 1k\Omega$ και ο πυκνωτής $C = 33nF$ [35].

Η πλήρης κλίμακα του σήματος εισόδου στο ADE7758 είναι πλάτους 0.5V. Επομένως, η έξοδος του διαιρέτη, πρέπει να έχει πλάτος 0.5V για μέγιστη τάση εισόδου, ώστε να έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση και ακρίβεια. Η μέγιστη τάση εισόδου είναι 30V για φασική μέτρηση και 52V πολική. Συνεπώς, η αντίσταση εισόδου R_1 του διαιρέτη έχει τιμή ίση με:

$$R_1 = \left(\frac{V_i}{V_o} - 1 \right) \cdot R_o = \left(\frac{52V}{\frac{0,5V}{\sqrt{2}}} - 1 \right) * 1k\Omega = 146k\Omega \quad (6.4)$$

Οι αναλογικές εισόδοι στο ADE7758, αντέχουν τάση εύρους $\pm 6V$ χωρίς τον κίνδυνο μόνιμης βλάβης. Παρόλα αυτά, η διαίρεση της τάσης γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το μέγιστο σήμα να μην ξεπερνά την ενδεικνυόμενη τιμή.

Είσοδος συνεχούς ρεύματος

Όσον αφορά τη σύνδεση των αναλογικών εισόδων στο AD7327, ο κατασκευαστής προτείνει την χρήση ενός ρυθμιστή τάσης για την μείωση της επίδρασης των αρμονικών και του θορύβου. Λόγω της φύσης των μετρήσεων (συνεχές ρεύμα, 0-10V σήματα εξόδου βαθμονομημένων αισθητήρων), καθώς και λόγω της αύξησης του κόστους του συνολικού συστήματος (καθώς θα χρειαζόμασταν 6 ρυθμιστές), δεν τοποθετήθηκαν στην πλακέτα.

Ο transducer μέτρησης του ρεύματος μαζί με την αντίσταση μέτρησης δεν τοποθετήθηκε πάνω στην αναπτυξιακή πλακέτα, για ευκολότερη επιλογή του εύρους μέτρησης του ρεύματος και της πλήρους κλίμακας εισόδου στο AD7327, ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση.

Ο transducer LA-55P που επιλέχθηκε, έχει μέγιστο ρεύμα μέτρηση $I_{pmax} = 70A$ και μέγιστη αντίσταση μέτρησης 50Ω με τροφοδοσία $\pm 12V$. Επομένως η πλήρης κλίμακα εξόδου του LA-55P για μέγιστο ρεύμα είναι:

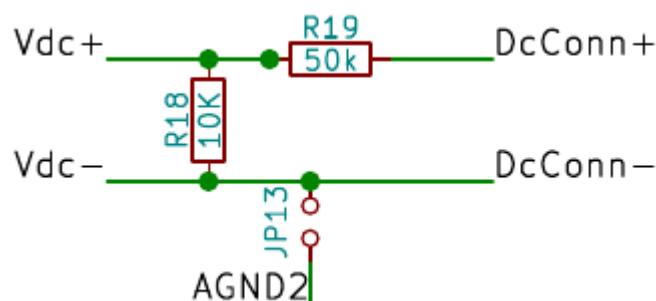
$$V_{out} = \frac{R_b \cdot I_p}{n} = \frac{70 A \cdot 50 \Omega}{1000} = 3.5 V \quad (6.5)$$

Το εύρος της αναλογικής εισόδου στο AD7327, είναι 10V. Συνεπώς, μετρώντας το μέγιστο ρεύμα έχουμε μειωμένη ανάλυση.

Υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης, μεγαλύτερης αντίστασης μέτρησης, με αντίστοιχη μείωση του μέγιστου πρωτεύοντος ρεύματος. Για το λόγο αυτό, η τοποθέτηση του αισθητήρα εκτός της αναπτυξιακής πλακέτας δίνει το ευελιξία στην επιλογή του μετρούμενου ρεύματος.

Είσοδος συνεχούς τάσης

Για την αναλογική είσοδο της συνεχούς τάσης το βασικό κύκλωμα εισόδου φαίνεται στην εικόνα (6.4)



Εικόνα 6.4: Είσοδος αναλογικού σήματος DC τάσης

Η πλήρης κλίμακα του σήματος εισόδου που επιλέξαμε για το AD7327, όπως αναφέραμε, είναι 0-10V. Επομένως, η έξοδος του διαιρέτη, πρέπει να έχει πλάτος 10V για μέγιστη τάση εισόδου, ώστε να έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ανάλυση και ακρίβεια.. Συνεπώς, ο λόγος διαίρεσης για μέγιστη τάση 60V (σε σύστημα συσσωρευτών 48V) είναι:

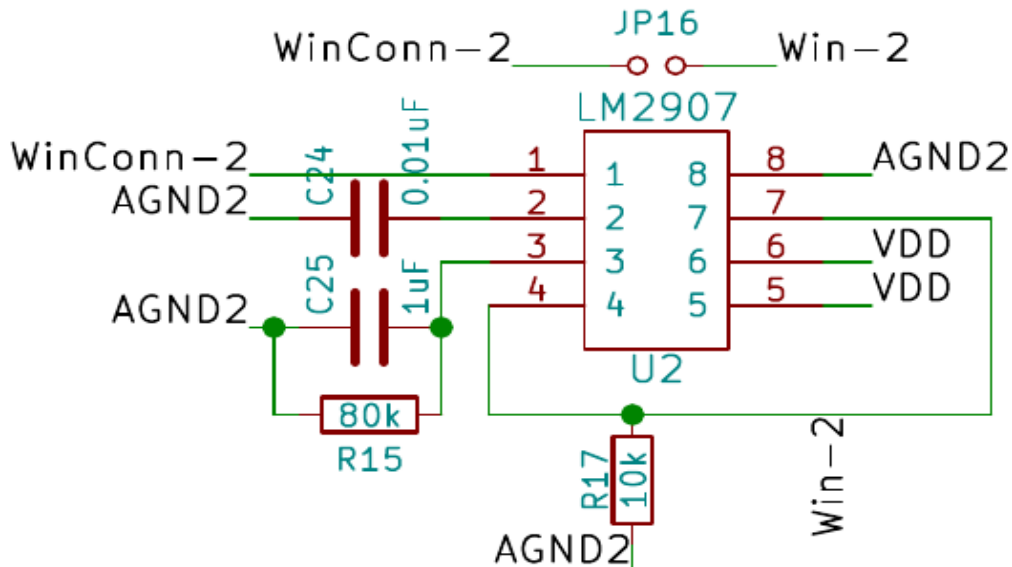
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{10V}{60V} = \frac{1}{6} \quad (6.6)$$

Επειδή, ο λόγος είναι πολύ μικρός επιλέχθηκε η αντίσταση εξόδου R_{18} , να είναι της τάξεως των 10kΩ έτσι ώστε σύμφωνα με τον τύπο (3.28) το σφάλμα μέτρησης να είναι μικρό. Συνεπώς, η αντίσταση R_{19} του διαιρέτη υπολογίζεται:

$$R_{19} = \left(\frac{V_i}{V_o} - 1\right) \cdot R_{18} = (6 - 1) \cdot 10k\Omega = 50k\Omega \quad (6.7)$$

Είσοδος μετατροπέα συχνότητας σε τάση

Το κύκλωμα που σχεδιάστηκε για τον μετατροπέα συχνότητας σε τάση φαίνεται στην εικόνα (6.5):



Εικόνα 6.5: Κύκλωμα σύνδεση του LM2907

Η βασική επιλογή ήταν της αντίστασης R_{14} και του πυκνωτή C_{22} που καθορίζουν το πλάτος της τάσης εξόδου ανάλογα με την συχνότητα εισόδου. Ο πυκνωτής C_{22} είναι απαραίτητο να έχει τιμή μεγαλύτερη των 500pF. Μικρότερες τιμές θα δημιουργούσαν ρεύμα στην αντίσταση R_{14} , επομένως η τιμή είναι μεγαλύτερη έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια της μετατροπής.

Η τιμή που επιλέχθηκε είναι 10nF.

Η αντίσταση R_{14} πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση από τον λόγο [34]:

$$R_{14} \geq \frac{V_3}{I_3} \quad (6.8)$$

Όπου

- ◆ V_3 - η μέγιστη τάση εξόδου, όπου στην περίπτωση μας είναι 12V – όση και η τροφοδοσία.
- ◆ I_3 – ορίζεται από το datasheet με τιμή 150μΑ.

Επομένως, η αντίσταση πρέπει να έχει τιμή $R_{14} \geq 80 \text{ k}\Omega$. Εάν η τιμή της αντίστασης όμως είναι πολύ μεγάλη θα υπάρξει μείωση της γραμμικότητας. Η τιμή, επομένως, που επιλέχθηκε είναι 80kΩ.

Με αυτά τα δεδομένα, για 10V μέγιστη τιμή τάσης εισόδου στο AD7327, η μέγιστη συχνότητα προκύπτει από τον τύπο (5.16) :

$$f_{max} = \frac{V_{max}}{R_{14} \cdot C_{22} \cdot V_{CC}} = 1040 \text{ Hz} \quad (6.9)$$

Η τιμή αυτή προσφέρει ένα μεγάλο εύρος επιλογής σύνδεση ανεμομέτρων.

Η αντίσταση C_{23} πρέπει να επιλεγεί με βάση την απαιτούμενη κυμάτωση της τάσης εξόδου, καθώς είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη. Επομένως, όσο πιο μεγάλη τιμή, τόσο μικρότερη κυμάτωση θα υπάρχει στο σήμα εξόδου. Από την άλλη, αν η τιμή της είναι πολύ μεγάλη αυξάνεται ο χρόνος απόκρισης του σήματος, ένα στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό στην μελέτη της ταχύτητας του ανέμου. Ο συμβιβασμός των δύο στοιχείων, οδήγησε σε επιλογή της τιμής για τον πυκνωτή C_{23} στο 1 μF.

Η κυμάτωση εξόδου, προκύπτει από τον τύπο:

$$V_{ripple} = \frac{V_{cc}}{2} \times \frac{C_1}{C_2} \times \left(1 - \frac{V_{cc} \cdot f_i \cdot C_1}{I_2}\right)_{pk-pk} \quad (6.10)$$

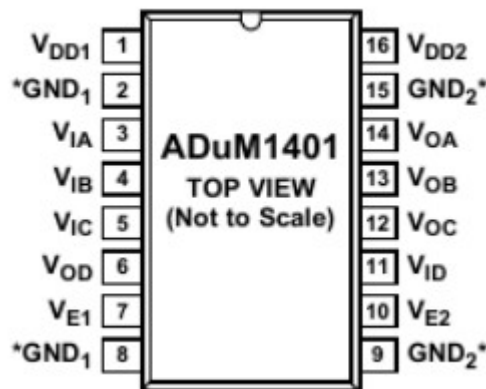
Επομένως, η κυμάτωση της τάσης εξόδου με βάση την επιλογή των στοιχείων είναι $V_{ripple} = 60\text{mV}$.

6.1.2 Επικοινωνία Raspberry Pi με τους A/D μετατροπείς

Και οι δύο συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση υποστηρίζουν σειριακή περιφερειακή επικοινωνία (SPI). Το μήκος των δίαυλων για την επικοινωνία των συσκευών πρέπει να είναι μικρό, εξαιτίας της αμφίδρομης ανταλλαγής σημάτων του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου. Επομένως, σε περίπτωση μεγάλης απόστασης είναι δυνατόν να αποσυγχρονιστεί η αποστολή των σημάτων και να προκύψουν σφάλματα κατά την επικοινωνία. Επίσης, οι δίαυλοι επικοινωνίας των δύο συσκευών πρέπει να έχουν ίδιο μήκος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις υψηλής συχνότητας.

Μεταξύ του ADE7758 και της κύριας συσκευής, προστέθηκε ένα ακόμα ολοκληρωμένο, το ADuM1401. Το συγκεκριμένο μοντέλο κατασκευάζεται από την εταιρία Analog Devices και ο ρόλος του στο κύκλωμα είναι διπλός.

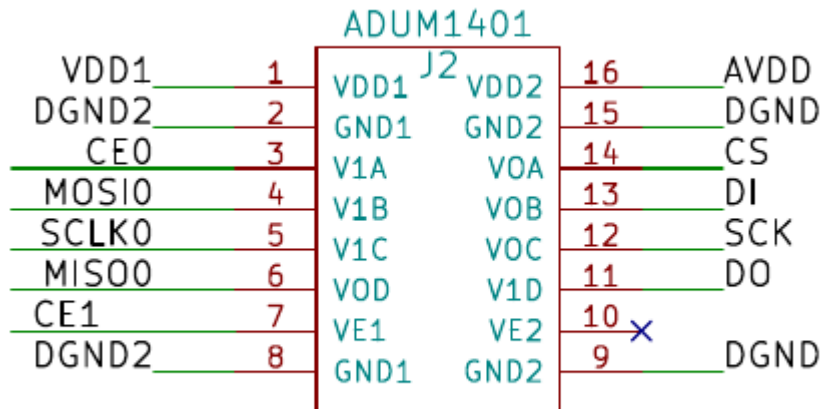
1. Σαν απομονωτής, ώστε να προστατεύεται το κύκλωμα μέτρησης ισχύος από ρεύματα επιστροφής μέσω των γειώσεων.
2. Σαν ρυθμιστής τάσης, ώστε οι τάσεις εξόδου των ψηφιακών θυρών της SPI επικοινωνίας, να είναι κατάλληλες για διασύνδεση με την πλατφόρμα του Raspberry Pi, η οποία έχει αντοχή σε τάσεις έως 3.3V.



Εικόνα 6.6: Σχηματικό διάγραμμα των ακροδεκτών του ADUM1401

Στο σχήμα (6.6) φαίνονται οι ακροδέκτες του ADUM1401. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι κατάλληλο για την επικοινωνία του SPI, καθώς έχει 3 ακροδέκτες εισόδου και 1 ακροδέκτη εξόδου του σήματος από τη μία πλευρά στην οποία συνδέεται η δευτερεύουσα συσκευή (στην περίπτωση μας το ADE7758), ενώ αντίθετα στην άλλη πλευρά έχει 3 ακροδέκτες εξόδου και 1 ακροδέκτη εξόδου για σύνδεση με την κύρια συσκευή.

Η σύνδεση του Adum1401 στο κύκλωμα γίνεται σύμφωνα με το σχήμα (6.7).



Εικόνα 6.7: Σύνδεση των ακροδεκτών του Adum1401 στο κύκλωμα

Το ADUM έχει ξεχωριστές γειώσεις για τις δύο πλευρές λειτουργίας, κάτι που το κάνει κατάλληλο για απομόνωση του κυκλώματος. Οι δύο πλευρές του λειτουργούν είτε στα 3V, είτε στα 5V, ανάλογα με την τροφοδοσία που θα συνδεθεί στους ακροδέκτες Vdd₁ και Vdd₂. Επομένως, είναι δυνατόν να λειτουργήσει είτε σαν απλός απομονωτής, είτε σαν ρυθμιστής τάσης.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, οι διάυλοι DI, CS και SCK του ADE7758 επικοινωνούν συνδέονται στους ακροδέκτες εξόδων του Adum1401 (V_{OA}, V_{OB}, V_{OC}) ενώ ο διάυλος DO στον ακροδέκτη εισόδων. Η πλευρά επικοινωνίας με το Raspberry Pi, έχει τους αντίστοιχους διαύλους, δηλαδή ο διάυλος CE₀ τοποθετήθηκε στον ακροδέκτη εισόδου V_{IA} και αντίστοιχα οι υπόλοιποι.

Ο ρυθμιστής δεν τοποθετήθηκε στην πλευρά του AD7327. Αυτό έγινε γιατί το AD7327, δεν χρειάζεται ρύθμιση τάσης για την επικοινωνία με το Raspberry Pi, καθώς έχει ενσωματωμένη ρύθμιση τάσης των ψηφιακών εξόδων, μέσω της τροφοδοσίας Vdrive, την οποία την προσφέρουμε μέσω του αντίστοιχου συνδέσμου του Raspberry. Επιπρόσθετα, δεν ήταν απαραίτητη η απομόνωση του κυκλώματος καθώς η μετρούμενη τάση δεν ξεπερνά τα 55-60V που είναι η κρίσιμη τάση για λόγους ασφαλείας.

6.1.3 Σύνδεση των δύο περιφερειακών στον διάυλο SPI

Όπως αναφέραμε, η επικοινωνία SPI, επιτρέπει τη σύνδεση δύο ή περισσότερων περιφερειακών συσκευών στην κύρια συσκευή. Στην περίπτωση μας, τα ADE7758 και AD7327 συνδέθηκαν μέσω των διαύλων της επικοινωνίας στο Raspberry Pi.

Στο θεωρητικό επίπεδο, όταν ο SS δίαυλος της μίας συσκευής πάρει την τιμή του λογικού 0, τότε η επικοινωνία ξεκινάει, ενώ αντίθετα όταν πάρει την τιμή 1, διακόπτεται η επικοινωνία. Παρόλα αυτά είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας απομονωτής τριών καταστάσεων (tristate buffer) στην έξοδο της περιφερειακής συσκευής, δηλαδή στο δίαυλο MISO. Αυτό είναι αναγκαίο ώστε όταν η συσκευή απενεργοποιείται, ο δίαυλος να μεταβαίνει σε κατάσταση υψηλής εμπέδησης (high impedance), και να απενεργοποιείται. Συνεπώς, δεν στέλνει σήματα προς το δίαυλο ώστε να διαταράσσεται η επικοινωνία της δεύτερης συσκευής που λειτουργεί.

Και το AD7327 και το ADE7758 διαθέτουν tristate buffer στην έξοδο του διαύλου MOSI. Μεταξύ της επικοινωνίας του Raspberry Pi και του ADE7758, χρησιμοποιήσαμε τον απομονωτή. Για να απενεργοποιηθεί ο δίαυλος MOSI, χρησιμοποιήθηκε ο ακροδέκτης V_{E1} που διαθέτει ο απομονωτής. Ο ακροδέκτης V_{E1} ενεργοποιεί την έξοδο V_{OD} , όταν μεταβαίνει σε υψηλή κατάσταση (λογικό 1) ή αλλιώς όταν απενεργοποιείται. Επομένως, συνδέσαμε τον ακροδέκτη με τον δίαυλο CE1 του AD7327, έτσι ώστε όταν είναι εκτός λειτουργίας (και επομένως η κατάσταση του CE1 στο λογικό 1) να ενεργοποιηθεί η έξοδος VOD και να πραγματοποιηθεί η μετάδοση των δεδομένων, ενώ να διακοπεί όταν ο δίαυλος CE1 μεταβεί στην κατάσταση 0.

6.1.4 Γειώσεις

Οι γειώσεις είναι ένα από τα πιο συχνά προβλήματα στη διαδικασία σχεδίασης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Ενώ οι βασικές αρχές είναι σχετικά απλές, η εφαρμογή τους είναι αρκετά περίπλοκη. Δεν υπάρχει κάποιος γενικός κανόνας που θα λύσει το πρόβλημα των γειώσεων. Στα τυπωμένα κυκλώματα, η εφαρμογή της σωστής γείωσης είναι εξίσου δύσκολη. Παρόλα αυτά τα εργαλεία που προσφέρει η σχεδίαση τυπωμένων κυκλωμάτων με την χρήση των περιοχών γειώσεων (ground planes) διευκολύνει την επίλυση των ζητημάτων.

Κάποια άλλα ζητήματα των γειώσεων που πρέπει να αντιμετωπιστούν, περιλαμβάνουν τον έλεγχο των παρασιτικών γειώσεων και την επιστροφή σήματος τάσης που μπορεί να υποβαθμίσει την απόδοση του κυκλώματος. Αυτές οι τάσεις μπορεί να οφείλονται είτε σε κάποια εξωτερική σύζευξη του σήματος ή στην πτώση τάσης στους ακροδέκτες των γειώσεων. Η σωστή δρομολόγηση και το σωστό μέγεθος των αγωγών των γειώσεων καθώς και η απομόνωση των γειώσεων επιτρέπει τον έλεγχο και τον περιορισμό των τάσεων αυτών.

Γενικά, τα αναλογικά κυκλώματα είναι ευάλωτα στο θόρυβο στις γραμμές της τροφοδοσίας και στις γειώσεις. Επομένως, σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός των αναλογικών και των ψηφιακών κυκλωμάτων για την πρόληψη του ψηφιακού θορύβου ο οποίος επιδρά στην αναλογική απόδοση. Πολλοί A/D μετατροπείς διαθέτουν ξεχωριστούς ακροδέκτες για αναλογικές και ψηφιακές γειώσεις (AGND και DGND), όπως στην περίπτωση των ADE7758 και AD7327. Οι προδιαγραφές των μετατροπέων προτείνουν τη σύνδεση των ακροδεκτών των δύο γειώσεων. Οι ονομασίες “αναλογική γείωση” και “ψηφιακή γείωση” στους ακροδέκτες αναφέρονται στα εσωτερικά μέρη του μετατροπέα με τα

οποία συνδέονται κι όχι στις γειώσεις του συστήματος με τις οποίες πρέπει να συνδεθούν. Οι δύο ακροδέκτες γενικά πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους και με την αναλογική γείωση του συστήματος [37].

Οι αναλογικές και ψηφιακές γειώσεις του συστήματος πρέπει να συνδέονται σε κάποιο σημείο έτσι ώστε να είναι δυνατή η κοινή αναφορά των σημάτων. Το σημείο αυτό, πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά έτσι ώστε να μην εισάγει ρεύματα μέσω της γείωσης από το αναλογικό μέρος του κυκλώματος. Το βέλτιστο σημείο είναι η σύνδεση να γίνει στις τροφοδοσίες. Εάν η ψηφιακή τροφοδοσία του μετατροπέα είναι απομονωμένη από την αναλογική γείωση με έναν πυκνωτή (συνήθως της τάξης των 100nF), όλα τα ρεύματα του μετατροπέα θα επιστρέφουν στη γείωση μέσω του πυκνωτή και δεν θα εμφανιστούν στην εξωτερική γείωση του κυκλώματος [36].

Πιο συγκεκριμένα η πλακέτα σχεδιάστηκε με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά όσον αφορά τις γειώσεις:

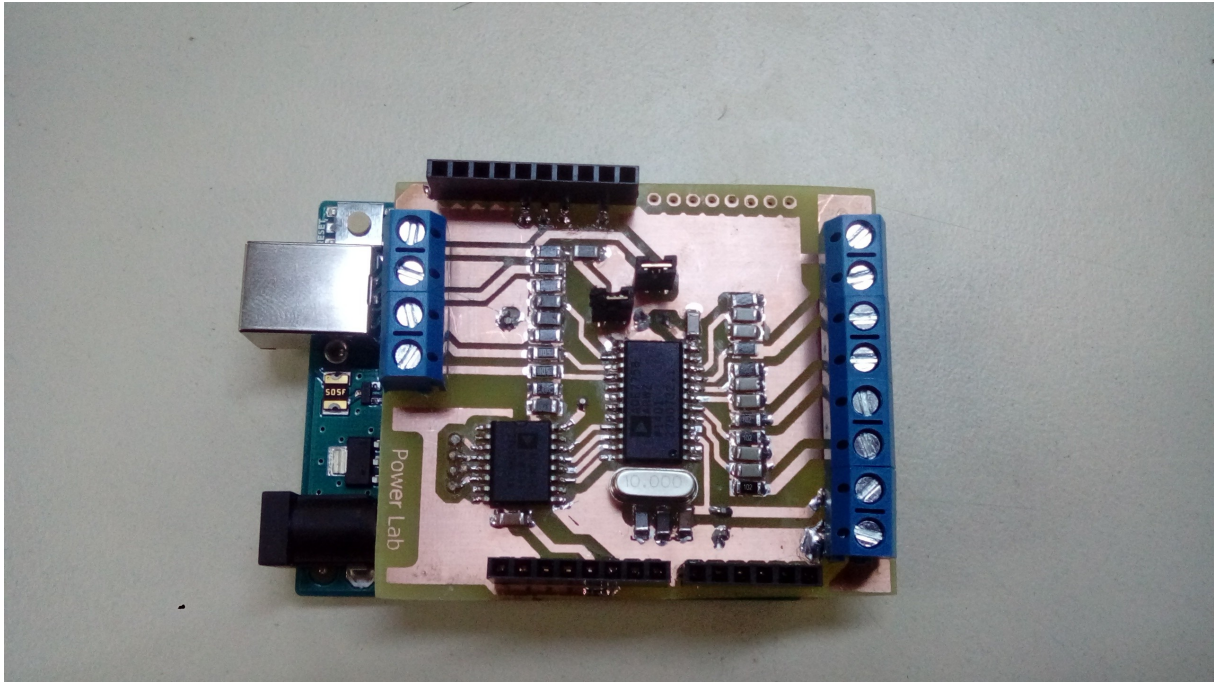
- Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές περιοχές γειώσεων. Μία για το κύκλωμα μέτρησης της ισχύος και μία άλλη για το υπόλοιπο κύκλωμα.
- Οι ακροδέκτες DGND και AGND του κάθε ολοκληρωμένου, συνδέθηκαν μεταξύ τους σε ένα σημείο, όπως υποδεικνύει και ο κατασκευαστής τους.
- Η γείωση του κυκλώματος μέτρησης της ισχύος απομονώθηκε από το υπόλοιπο κύκλωμα με την χρήση του Adum1401.

6.1.5 Ταλαντωτής

Σε υψηλής απόδοσης συστήματα δειγματοληψίας δεδομένων, ένας κρυσταλλικός ταλαντωτής πρέπει να χρησιμοποιείται, για την δειγματοληψία των σημάτων του μετατροπέα, λόγω του γεγονότος ότι το jitter του ρολογιού της δειγματοληψίας αυξάνει τα επίπεδα θορύβου και παραμόρφωσης. Ο ταλαντωτής πρέπει να είναι απομονωμένος από τα ψηφιακά κυκλώματα που παράγουν θόρυβο και να είναι γειωμένος στην αναλογική γείωση [36].

Στο κύκλωμα μας έχουμε συνδέσει έναν ταλαντωτή 10MHz, ο οποίος είναι γειωμένος στην πλευρά της μέτρησης ισχύος και απομονωμένος με πυκνωτές.

6.2 Σχεδίαση πλακέτας για το Arduino



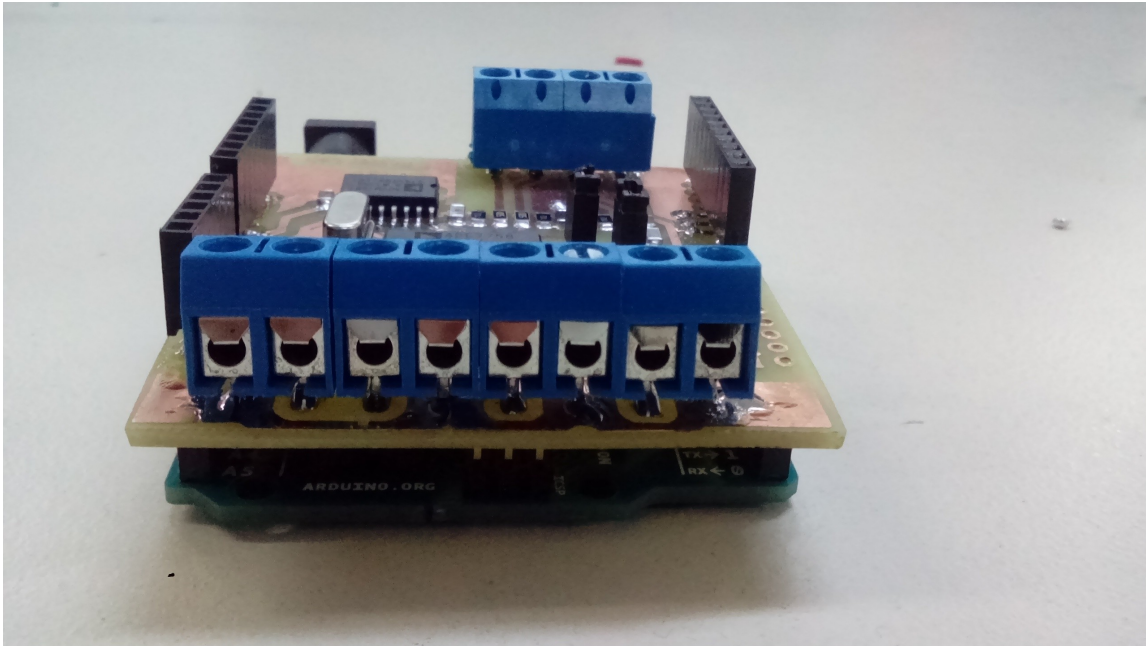
Εικόνα 6.8: Η τυπωμένη πλακέτα του Arduino

Η πλακέτα του Arduino (που φαίνεται στην εικόνα 6.8) σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του ευρωπαϊκού προγράμματος Cotevos. Πιο συγκεκριμένα, εγκαταστάθηκε σε σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων για την καταγραφή και εποπτεία του συστήματος.

Ο βασικός στόχος της υλοποίησης ήταν η μέτρηση των εναλλασσόμενων μεγεθών του δικτύου, επομένως στην πλακέτα δεν τοποθετήθηκε στην πλακέτα το κύκλωμα μέτρησης DC μεγεθών καθώς και των μετεωρολογικών δεδομένων. Λόγω του γεγονότος ότι ο Arduino είναι μικροελεγκτής, επομένως είναι κατάλληλος για γρήγορη επικοινωνία, χωρίς τη δυνατότητα διαδραστικότητας με το χρήστη μέσω λειτουργικού συστήματος, η πλακέτα σχεδιάστηκε να είναι shielded στην πλατφόρμα του Arduino. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη σχεδίαση έγινε λόγω περιορισμένου χώρου και λόγω της τοποθέτησης ενός επιπλέον shield πάνω από το Arduino του σταθμού.

Η σχεδίαση των βασικών χαρακτηριστικών της πλακέτας έγινε με βάση την αναπτυξιακή πλακέτα. Πιο συγκεκριμένα για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σχεδίασης της πλακέτας του Arduino.

6.2.1 Είσοδος εναλασσόμενου ρεύματος



Εικόνα 6.9: Οι κλέμες για τις αναλογικές εισόδους και την τροφοδοσία

Η αντίσταση μέτρησης επιλέχθηκε να τοποθετηθεί στον μετασχηματιστή τάσης, ο οποίος βρίσκεται εξωτερικά της πλακέτας. Η μέτρηση μας αφορούσε μέγιστο ρεύμα μέτρησης 17A. Επομένως η τιμή της αντίστασης μέτρησης που τοποθετήθηκε δίπλα στο μετασχηματιστή AC1020 είναι:

$$R_b = \frac{1000 \cdot 0.5}{17 \cdot \sqrt{2}} = 20 \Omega \quad (6.11)$$

Στην αναλογική είσοδο του ADE χρησιμοποιήθηκαν antialiasing φίλτρα RC. Η τιμές των στοιχείων είναι $R=1k\Omega$ και $C=33nF$, ώστε η τιμή της συχνότητας αποκοπής να είναι σύμφωνα με τη σχέση:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 1k \cdot 33n} = 4.823 kHz \quad (6.12)$$

6.2.2 Είσοδος εναλλασσόμενης τάσης

Η μέτρηση της τάσης, όπως έχουμε αναφέρει, έγινε με διαιρέτη τάσης. Το κύκλωμα των αναλογικών εισόδων της τάσης σχεδιάζεται έτσι ώστε η συχνότητα αποκοπής του κυκλώματος να συμπίπτει με το anti-aliasing φίλτρο των εισόδων του ρεύματος. Επομένως, η τιμή της αντίστασης εξόδου του διαιρέτη έχει τιμή $R_o = 1k\Omega$ και ο πυκνωτής $C = 33nF$.

Η συγκεκριμένη σχεδίαση αφορούσε μέτρηση ηλεκτρικού δικτύου, δηλαδή για τάση 230V. Επομένως, η αντίσταση R_1 που επιλέχθηκε είναι της τάξεως των $1M\Omega$. Επομένως, για τάση εισόδου 230V ο διαιρέτης παράγει σήμα πλάτους ίσο με:

$$V_o = \left(\frac{R_o}{R_o + R_1}\right) \cdot V_i = 325 mV \quad (6.13)$$

Το μέγιστο πλάτος κανονικής λειτουργίας του ADE7758 είναι 0.5V, επομένως η τιμές των αντιστάσεων είναι στα αποδεκτά όρια.

Οι αναλογικές εισοδοί στο ADE7758, αντέχουν τάση εύρους $\pm 6V$ χωρίς τον κίνδυνο μόνιμης βλάβης. Παρόλα αυτά, η διαίρεση της τάσης γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το μέγιστο σήμα να μην ξεπερνά την ενδεικνυόμενη τιμή.

6.2.3 Επικοινωνία ADE7758 με Arduino

Η επικοινωνία SPI του ADE7758 με το Arduino έγινε μέσω των ακροδεκτών της πλακέτας. Μεταξύ των διαύλων του ADE7758 και του Arduino, προστέθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα Adum1401. Η χρήση του στη συγκεκριμένη πλακέτα, δεν έγινε για ρύθμιση της τάσης των ψηφιακών εξόδων των επικοινωνιακών διαύλων, αλλά για απομόνωση του κυκλώματος μέτρησης της ισχύος από το υπόλοιπο κύκλωμα του σταθμού.

Με τον τρόπο αυτό, απομονώσαμε την γείωση του υπόλοιπου συστήματος από την περιοχή γείωσης και κοινής αναφοράς του μετρητικού κυκλώματος.

Τα βασικά σχέδια της πλακέτας φαίνονται στο Παράρτημα Β.

6.3 Σχεδίαση κυκλώματος τροφοδοσίας

Ένα από τα ζητήματα της σχεδίασης του μετρητικού συστήματος είναι η τροφοδοσία. Επιλέχθηκε ο καταγραφέας να τροφοδοτείται από τους συσσωρευτές του συστήματος. Η πρόβλεψη έγινε και για 24V και για 48V συστήματα, που αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία αυτού του τύπου εφαρμογών.

Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος με την τιμή της τροφοδοσίας και της μέγιστης κατανάλωσης ισχύος μαζί με την αντίστοιχη κατανάλωση ρεύματος.

Πίνακας 6.1: Καταναλώσεις των στοιχείων

Στοιχείο	Τροφοδοσία	Κατανάλωση Ισχύος	Κατανάλωση Ρεύματος
Raspberry Pi	+5V	3W	600mA
ADE7758	+5V	65mW	13mA
AD7327	+12V / ±12V, +5V, +3.3V	13mW	2.6mA
LM2907	+12V	30mW	2.5mA
ADUM	+5V, +3.3V	2.7mW	0.53mA
LA-55P	±12V	82.5mW	7mA

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην διαδικασία σχεδίασης του κυκλώματος τροφοδοσιών στις γειώσεις. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου, χρησιμοποιήθηκαν δύο απομονωμένες περιοχές γειώσεων (ground planes), μία για το κύκλωμα μέτρησης ισχύος και μία για το υπόλοιπο κύκλωμα. Η μία περιοχή γείωσης περιλαμβάνει το ADE7758 και το ADUM, ενώ η δεύτερη περιοχή τα υπόλοιπα.

Επίσης, η τροφοδοσίες των +5V και των +3.3V του AD7327, αντλούνται από τους αντίστοιχους ακροδέκτες του Raspberry Pi, οι οποίοι τροφοδοτούν το κύκλωμα με τις αντίστοιχες τάση τροφοδοσίας.

Συνολικά, λοιπόν, οι τροφοδοσίες που πρέπει να παραχθούν από την τάση των συσσωρευτών είναι:

- +5V, για τη μέτρηση ισχύος, με συνολική κατανάλωση 18.3mA.
- +5V, για το Raspberry, με συνολική κατανάλωση 600mA.
- +12V για το AD7327 και για το LM2907, με συνολική κατανάλωση 5.1mA
- ±12V για το LEM LA-55P, δυνατότητα σύνδεσης και του AD7327, με συνολική κατανάλωση 9.6mA.

Για την παραγωγή των τροφοδοσιών επιλέχθηκαν τα εξής.

6.3.1 Τροφοδοσία ADE7758

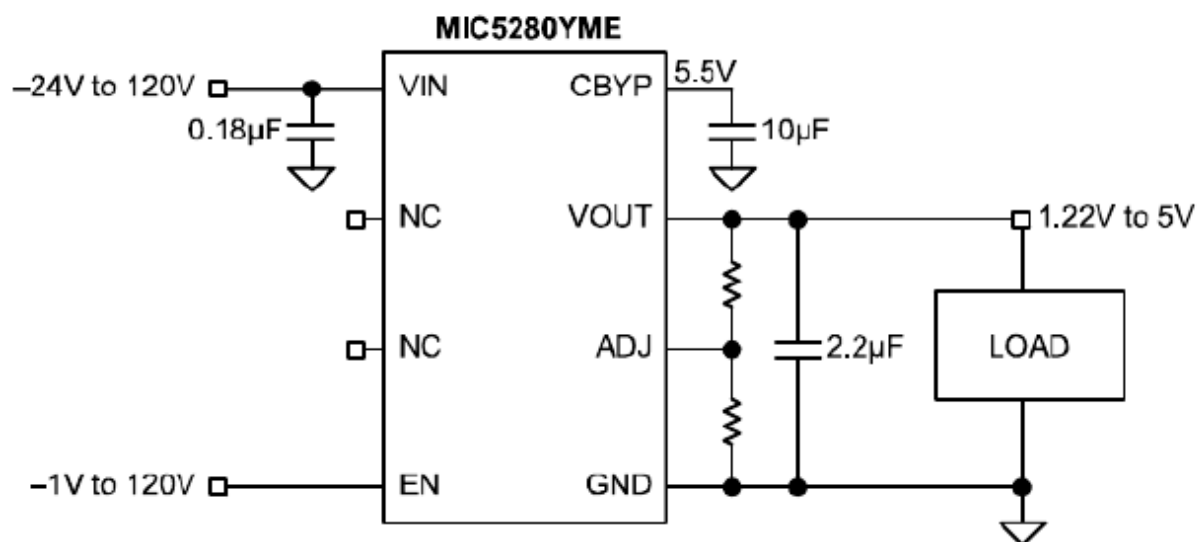
Για την τροφοδοσία του ADE7758 καθώς και της πλευράς των +5V του ADUM, επιλέχθηκε ο γραμμικός ρυθμιστής τάσης MIC5280YME[38] της εταιρίας Micrel. Η επιλογή ενός αναλογικού ρυθμιστή χωρίς μεγάλη απόδοση έγινε λόγω της μικρής ισχύος που πρέπει να τροφοδοτήσει, με αποτέλεσμα οι απώλειες να είναι μικρές.

Πρόκειται για έναν γραμμικό μετατροπέα υποβιβασμού τάση με

- Εύρος DC τάσης εισόδου 4.5V-120V
- Τάση εξόδου με τιμή τάσης εξόδου από 1.2V έως 5V
- Ρεύμα εξόδου φτάνει στα 25mA

Τιμές οι οποίες καλύπτουν τις απαιτήσεις του κυκλώματος για την τροφοδοσία.

Το τυπικό κύκλωμα σύνδεσης και λειτουργίας του ρυθμιστή είναι το παρακάτω (εικόνα 6.10)



Telecom Application

Εικόνα 6.10: Κύκλωμα σύνδεσης του MIC5280

Οι δύο αντιστάσεις ρυθμίζουν το πλάτος της τάσης εξόδου. Οι τυπικές τιμές τους, είναι 15.4kΩ και 4.87Ω. Για αλλαγή της τιμής της τάσης εξόδου, αρκεί η διατήρηση της τιμής της μίας αντιστάσης και ο υπολογισμός της δεύτερης από την σχέση:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad , \text{ με } V_{ref} = 1.219V \quad (6.14)$$

6.3.2 Τροφοδοσία LM2907 και AD7327

Για την τροφοδοσία του υπόλοιπου κυκλώματος, χρησιμοποιήθηκε για αρχή ο DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης EC4SAW-48S12N [39] της εταιρίας Cincon.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Εύρος τάσης εισόδου 18-75V
- Τάση εξόδου 12V
- Ισχύς εξόδου 5-6W

Τα οποία καλύπτουν τις απαιτήσεις του συστήματος. Από τον μετατροπέα τροφοδοτούνται τα LM2907 και AD7327.

6.3.3 Τροφοδοσία Raspberry Pi

Για την τροφοδοσία του Raspberry Pi, χρησιμοποιήθηκε ο DC-DC μετατροπέας SPU03M-05 [40] με χαρακτηριστικά

- Εύρος τάσης εισόδου 10.8-13.2V
- Τάση εξόδου 5V
- Έξοδος 600mA και 3W

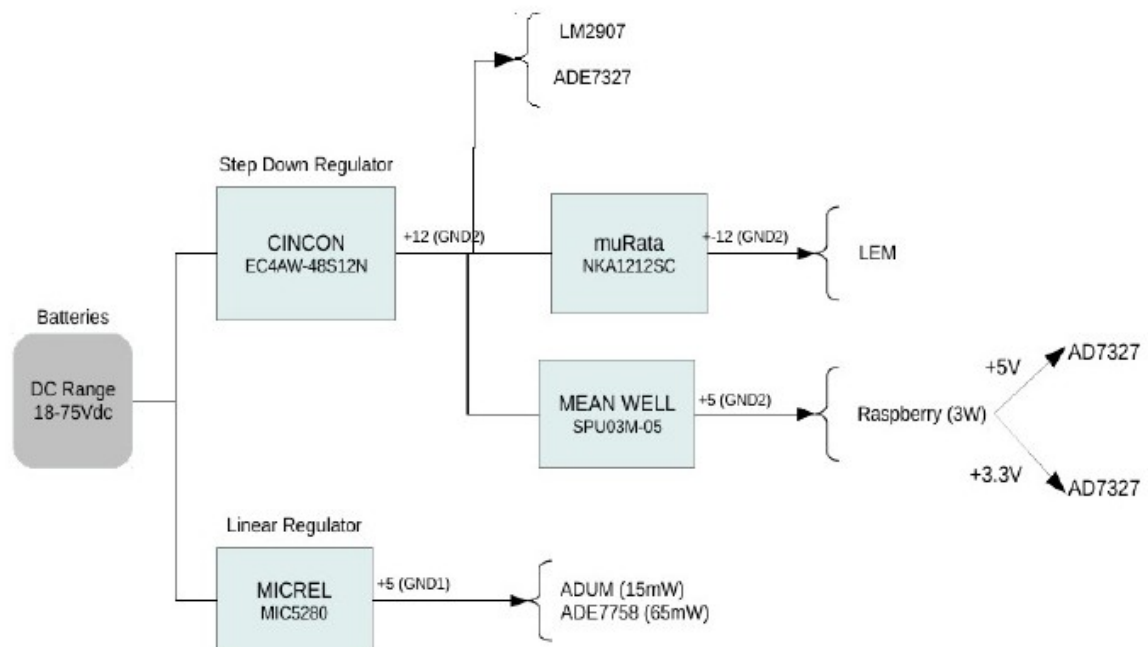
τα οποία καλύπτουν τις απαιτήσεις τροφοδοσίας του Raspberry Pi.

6.3.4 Τροφοδοσία transducer μέτρησης ρεύματος

Τέλος, για την τροφοδοσία του LEM, χρησιμοποιήθηκε ο DC-DC μετατροπέας NKA1212SC[41], της εταιρίας Murata. Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Τάσης εισόδου 12V
- Τάση εξόδου $\pm 12V$
- Ρεύμα εξόδου $\pm 42mA$

Συνοψίζοντας το διάγραμμα του κυκλώματος τροφοδοσίας φαίνεται στο διάγραμμα (6.11).



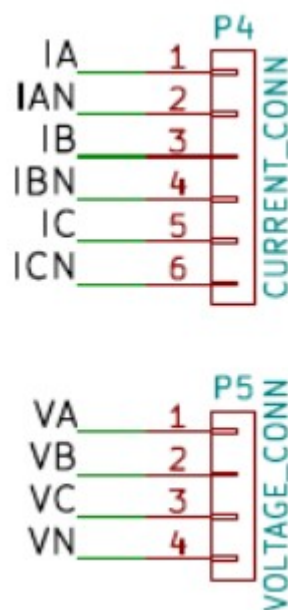
Εικόνα 6.11: Συνοπτικό διάγραμμα παρουσίασης των τροφοδοσιών

Κεφάλαιο 7: Διάταξη του καταγραφέα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η διάταξη των εισόδων στον καταγραφέα για την μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος καθώς και των μεγεθών συνεχούς ρεύματος και των μετεωρολογικών αισθητήρων.

7.1 Μέτρηση Ισχύος

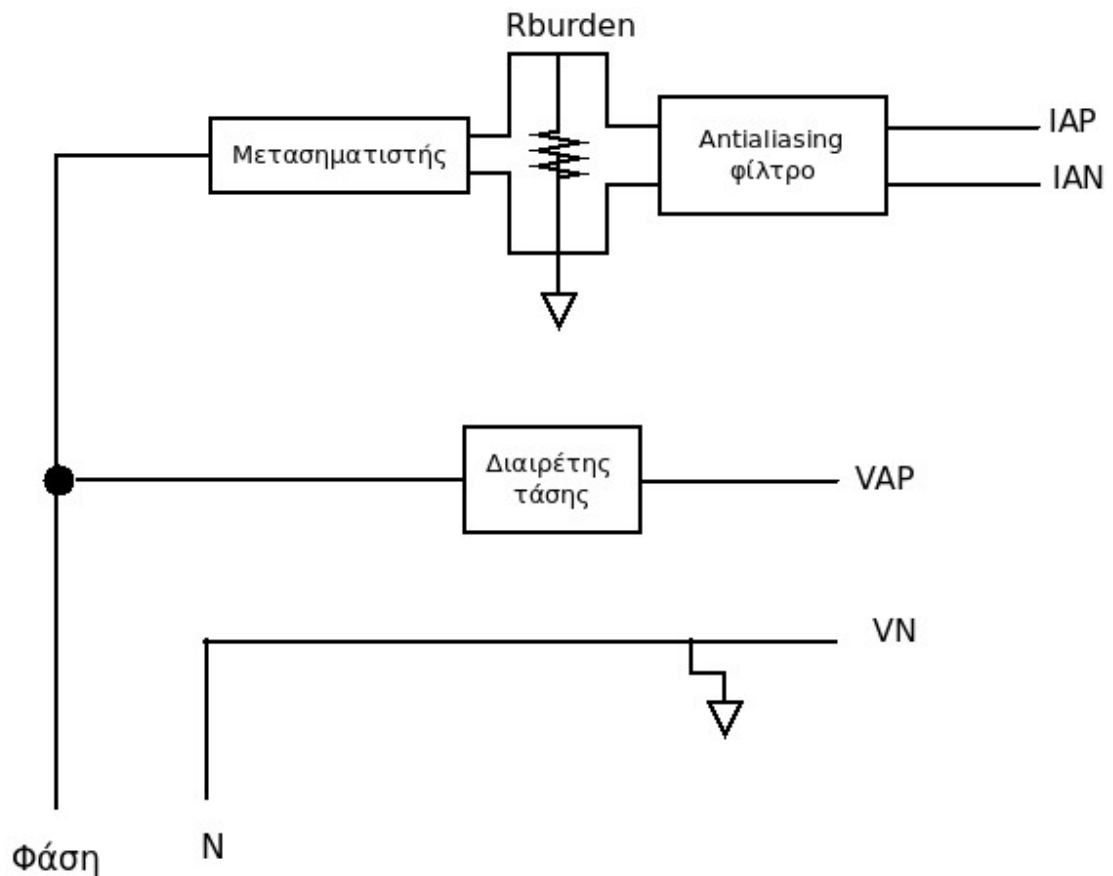
Τοποθετήθηκαν έξι κλέμες για την μέτρηση τριών φάσεων του εναλλασσόμενου ρεύματος. Επειδή η μέτρηση και η βαθμονόμηση του ρεύματος γίνεται για τις τρεις φάσεις ξεχωριστά είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις είτε σε μία είτε σε δύο φάσεις. Επίσης, τοποθετήθηκαν τρεις κλέμες για την είσοδο και την μέτρηση τριών φάσεων εναλλασσόμενης τάσης και μία κλέμα για την είσοδο του αγωγού του ουδετέρου. Η σχεδίαση τους φαίνεται στην εικόνα (7.1).



Εικόνα 7.1: Είσοδος αγωγών τάσης και ρεύματος

Οι πιθανές διατάξεις της σύνδεσης των εισόδων στον καταγραφέα και την μέτρησης της αντίστοιχης παραγόμενης ισχύος αναλύονται στις παρακάτω ενότητες.

7.1.1 Μονοφασικό



Εικόνα 7.2: Διάταξη μονοφασικής μέτρησης

Σύμφωνα με τη διάταξη της εικόνας (7.2), τοποθετείται ένας μετασηματιστής ρεύματος για την μέτρηση του ρεύματος. Η έξοδος του μετασηματιστή συνδέεται στις κλέμες εισόδου της φάσης. Ο αγωγός της τάσης συνδέεται με την αντίστοιχη κλέμα εισόδου και στη συνέχεια διαιρείται και εισέρχεται στην είσοδο του ADE7758.

Με την διάταξη αυτή υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς της μετρούμενης φάσης.

$$P_A = (V_{AP} - V_N) \times (I_{AP} - I_{AN}) \quad (7.1)$$

Δηλαδή,

$$P_A = V_A \times I_A \quad (7.2)$$

Αντίστοιχα, υπολογίζονται και η άεργος και η φαινόμενη ισχύς.

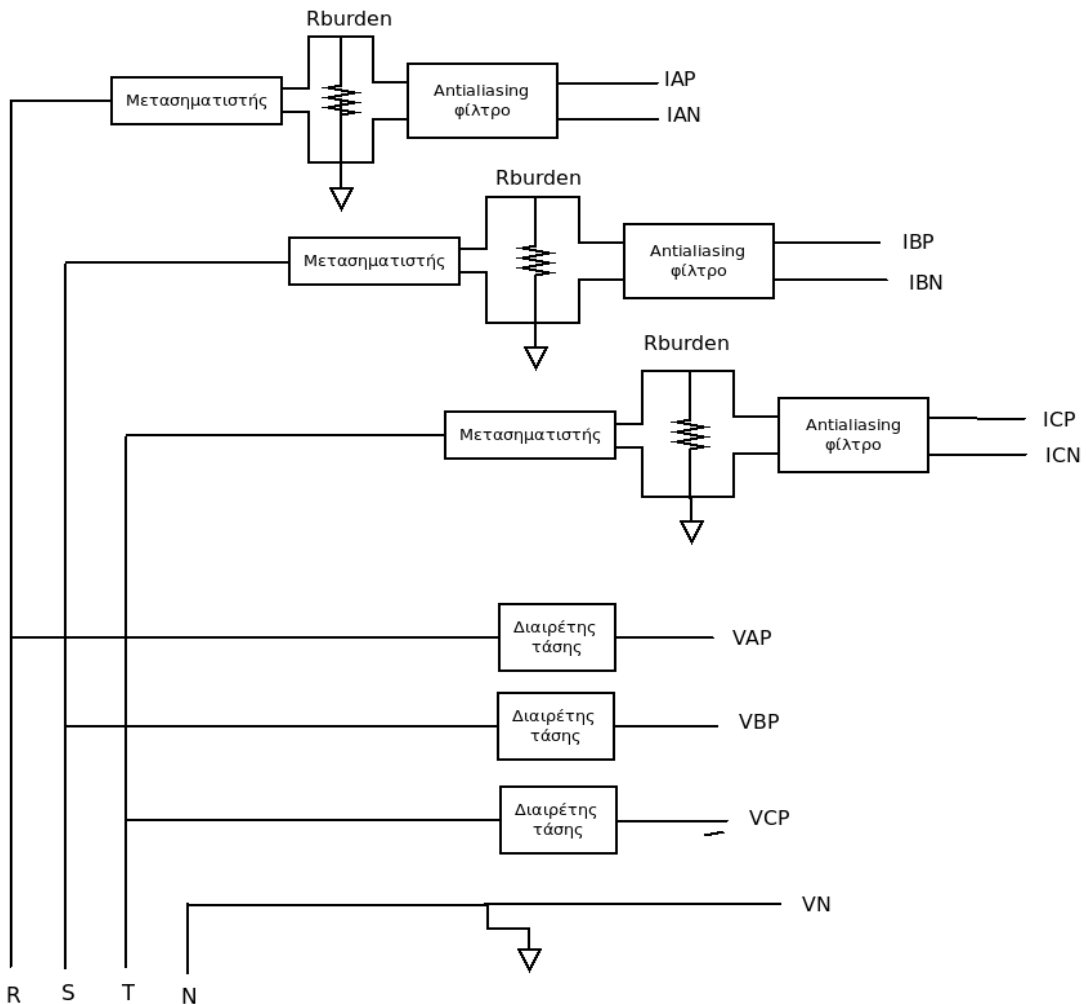
Ο συντελεστής ισχύος στην περίπτωση αυτή προκύπτει από:

$$PF = \frac{P_A}{S_A} \quad (7.3)$$

7.1.2 Τριφασική Διάταξη Τεσσάρων Καλωδίων

Η βασική διάταξη για την εποπτεία και καταγραφή των μετρήσεων της ανεμογεννήτριας είναι η τριφασική. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν δύο διαφορετικές διατάξεις σύνδεσης.

Η πρώτη αφορά την περίπτωση στην οποία από την ανεμογεννήτρια έχει εξαχθεί αγωγός για το σημείο του ουδετέρου. Στην περίπτωση, αυτή η διάταξη της μέτρησης φαίνεται στο σχήμα (7.3).



Εικόνα 7.3: Σύνδεση τριφασικής μέτρησης 4 καλωδίων

Σύμφωνα με τη διάταξη αυτή, τοποθετούνται 3 μετασχηματιστές ρεύματος για την μέτρηση του ρεύματος κάθε φάσης. Οι έξοδοι του κάθε μετασχηματιστή συνδέονται στις αντίστοιχες κλέμες. Κάθε φάση της τάσης συνδέεται με την αντίστοιχη κλέμα εισόδου και στη συνέχεια διαιρείται και εισέρχεται στην είσοδο του ADE7758. Ο ουδέτερος συνδέεται στην αντίστοιχη κλέμα, και συνδέεται εσωτερικά στην πλακέτα εσωτερικά με την κοινή αναφορά του κυκλώματος.

Η διάταξη αυτή επιτρέπει την μέτρηση τριών ρευμάτων και των τριών φασικών τάσεων της γεννήτριας.

Η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται από το ρεύμα και την τάση της κάθε φάσης. Επομένως, είναι δυνατή η μέτρηση τόσο της συνολικής ισχύος, όσο και της ισχύος της κάθε φάσης ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα για την φάση Α η παραγόμενη ενεργός ισχύς υπολογίζεται από

$$P_A = V_A \times I_A \quad (7.4)$$

Ομοίως για τις άλλες δύο φάσεις

$$P_B = V_B \times I_B \quad (7.5)$$

και

$$P_C = V_C \times I_C \quad (7.6)$$

Επομένως η συνολική ισχύς προκύπτει από το άθροισμα

$$P_{\text{ολ}} = P_A + P_B + P_C \quad (7.7)$$

Κατά αντίστοιχο τρόπο προκύπτουν και η άεργος και η φαινόμενη ισχύ.

Ο συντελεστή ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

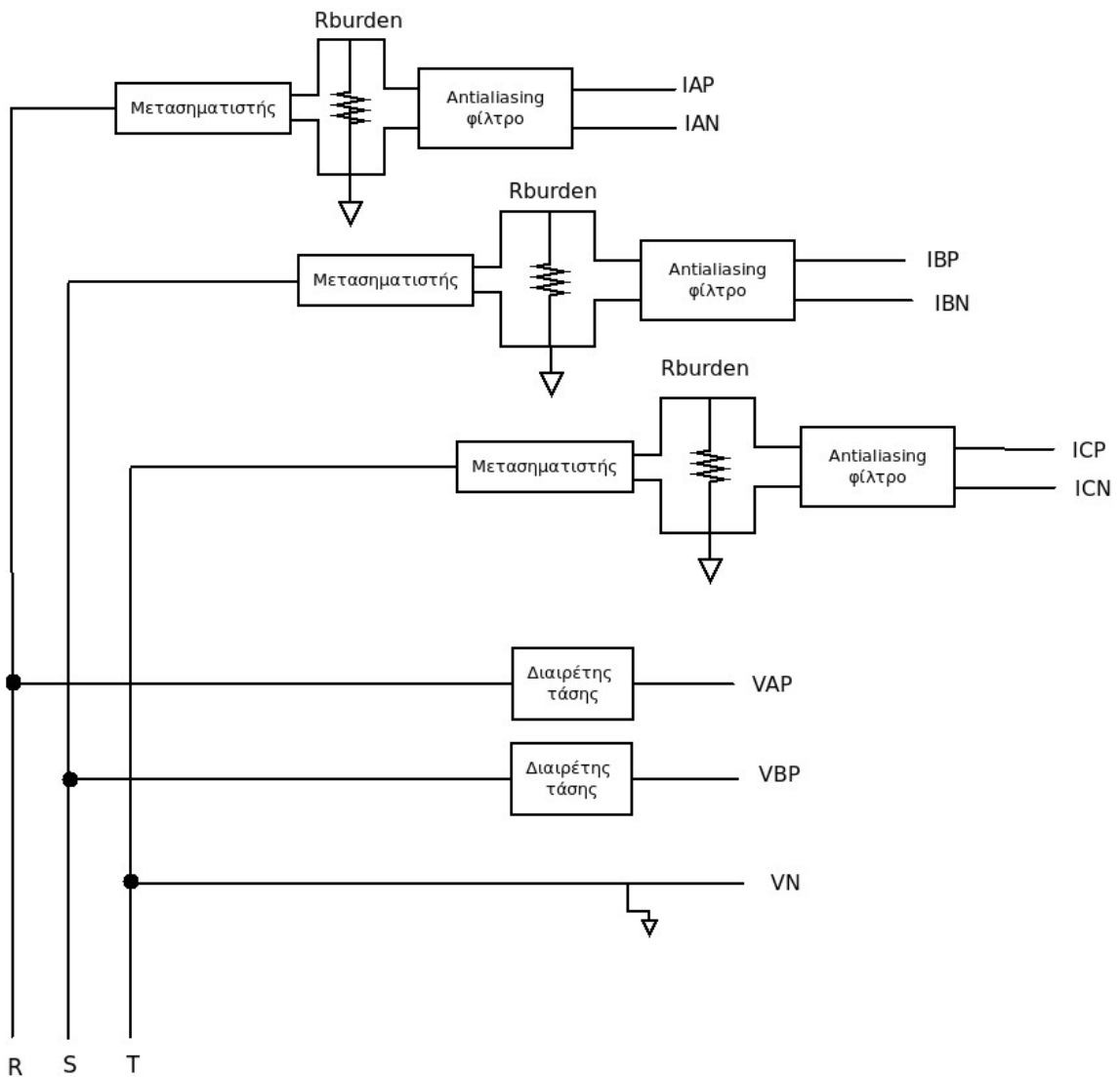
$$PF = \frac{\sum P}{\sum S} \quad (7.8)$$

Συνεπώς η διάταξη αυτή προσφέρει αξιόπιστη εποπτεία του συνολικού κυκλώματος, υπολογίζοντας τόσο τις φασικές τιμές της τάσης, την ισχύ σε κάθε φάση του κυκλώματος καθώς και την συνολική. Προσφέρει τη δυνατότητα υπολογισμού με ακρίβεια του συντελεστή ισχύος.

7.1.3 Τριφασική μέτρηση τριών καλωδίων

Σε πολλές κατασκευές των μικρών ανεμογεννητριών δεν υπάρχει αγωγός για την σύνδεση του ουδετέρου. Σε αυτή την περίπτωση, είναι αδύνατος ο απευθείας υπολογισμός και η μέτρηση της φασικής τάσης και συνεπώς και της ισχύος.

Σε μία τέτοια διάταξη της ανεμογεννήτριας, ακολουθείται η σύνδεση που φαίνεται στο σχήμα (7.4).



Εικόνα 7.4: Τριφασική μέτρηση 3 καλωδίων

Το ADE7758, έχοντας σαν είσοδο τις τάσεις VA και VB, και σαν αναφορά την τάση της φάσης C, εξάγει σαν αποτέλεσμα της τάσης την πολική τιμή. Συνεπώς, είναι δυνατή η μέτρηση μόνο δύο πολικών τάσεων VAB και VAC και των τριών ρευμάτων. Η τρίτη πολική

τάση υπολογίζεται:

$$V_{AB} = V_{AC} - V_{BC} \quad (7.9)$$

Από την σχέση:

$$V_{L-L} = \sqrt{3} V_{L-N} \quad (7.10)$$

Προκύπτουν οι αντίστοιχες φασικές τάσεις.

Με

$$I_C = -I_B - I_A \quad (7.11)$$

Η συνολική ισχύ προκύπτει:

$$\begin{aligned} P_{ολ} &= V_A \cdot I_A + V_B \cdot I_B + V_C \cdot I_C \rightarrow \\ P_{ολ} &= V_A \cdot I_A + V_B \cdot I_B + V_C \cdot (-I_A - I_B) \rightarrow \\ P_{ολ} &= (V_A - V_C) \cdot I_A + (V_B - V_C) \cdot I_B \end{aligned} \quad (7.12)$$

Συνεπώς

$$P_{ολ} = V_{AC} \cdot I_A + V_{BC} \cdot I_B \quad (7.13)$$

Με την διάταξη αυτή το εξαγόμενο αποτέλεσμα έχει φυσική σημασία, μόνο αθροίζοντας τις δύο ισχύεις που προκύπτουν από τους εσωτερικούς υπολογισμούς του ADE7758. Κατά αντίστοιχο τρόπο, μπορεί να προκύψει και η τριφασική άεργος ισχύς, με τους ίδιους περιορισμούς. Στην συγκεκριμένη διάταξη είναι αδύνατη η μέτρηση της φαινόμενης ισχύς μέσω του ADE7758.

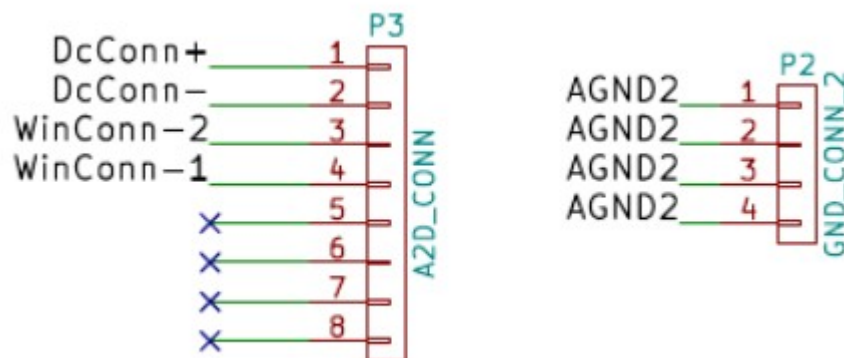
Ο συντελεστής ισχύος με την διάταξη υπολογίζεται μόνο για συμμετρικά φορτία από τον τύπο [42]:

$$\tan\varphi = \sqrt{3} \cdot \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \right) \quad (7.14)$$

Συμπερασματικά, με τη διάταξη αυτή είναι δυνατός ο υπολογισμός 2 πολικών τάσεων (εξάγοντας το αποτέλεσμα της τρίτης, όπως και των αντίστοιχων φασικών. Αντίθετα με την διάταξη των 4 αγωγών, δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ισχύος κάθε φάσης ξεχωριστά καθώς και ο ακριβής υπολογισμός του συντελεστή ισχύος για μη συμμετρικά φορτία.

7.2 Διάταξη DC και μετεωρολογικών αισθητήρων

Για την είσοδο των αγωγών του DC ρεύματος, της DC τάσης καθώς και των μετεωρολογικών αισθητήρων χρησιμοποιήθηκαν 8 κλέμες. Επίσης, τοποθετήθηκαν 4 κλέμες για την είσοδο των καλωδίων αναφοράς. Η κλέμες αυτές είναι συνδεδεμένες με την περιοχή γείωσης του αντίστοιχου κυκλώματος, όπως περιγράφηκε στην ενότητα των γειώσεων. Η σχεδίαση τους φαίνεται στο σχήμα 7.5.



Εικόνα 7.5: Είσοδοι καλωδίων DC και μετεωρολογικών μεγεθών

Η είσοδος της τάσης τοποθετείται στις δύο εισόδους όπως φαίνεται στο σχήμα, ώστε να δίνεται η επιλογή της μέτρησης μεταξύ διαφορικής και μονής εισόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα (6.4). Εάν ο jumper είναι ανοιχτός τότε πραγματοποιείται διαφορική μέτρηση της συνεχούς τάσης, ενώ αν είναι κλειστός τότε πραγματοποιείται μονής εισόδου μέτρηση της τάσης, δηλαδή η το πλάτος της τάσης μετριέται με αναφορά την κοινή αναφορά ή την περιοχή γείωσης του κυκλώματος. Η προεπιλεγμένη διάταξη είναι η διαφορική μέτρηση και με αυτήν πραγματοποιήθηκαν και τα πειράματα της μέτρησης DC τάσης.

Για τις υπόλοιπες εισόδους των αισθητήρων, το θετικό άκρο τοποθετείται στις κλέμες εισόδων του AD7327 και το αρνητικό στις κλέμες που συνδέονται με την γείωση του κυκλώματος, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μονής εισόδου μέτρηση.

7.3 Γενική περιγραφή του καταγραφέα

Στον πίνακα 7.1 περιγράφονται συνοπτικά τα συνολικά χαρακτηριστικά μέτρησης του καταγραφέα.

Πίνακας 7.1: Γενική περιγραφή του μετρητικού συστήματος

Μέγεθος	Μέγιστη Τιμή	Μέτρηση	Διάταξη
AC Τάση	3-52V	1 φάση 3 φασικές 2 Πολικές (η 3η υπολογίζεται)	1φασικό (2-καλωδίων) 3φασικό (4-καλωδίων) 3φασικό (3-καλωδίων)
AC Ρεύμα	0,1 - 60A	Μονοφασικό 2 φάσεις, 3 φάσεις	-
Ενεργός Ισχύς	-	Μονοφασική Συνολική	1φασικό (2-καλωδίων) / 3φασική (4-καλωδίων) 3φασική(3-καλωδίων)
DC Ρεύμα	70A	-	Μονής εισόδου
DC Τάση	60V	-	Μονής εισόδου
Ανεμόμετρο 1	1000Hz	-	Μονής εισόδου
Ανεμόμετρο 2	1000Hz	-	Μονής εισόδου
Μετεωρολογικοί Αισθητήρες	0-10V	-	Μονής εισόδου

Όσον αφορά το κόστος, την παρούσα μελέτη δεν έχει γίνει εκτενής μελέτη με την συνολική τιμή, λόγω του γεγονότος ότι αφορά τη σχεδίαση και κατασκευή ενός ερευνητικού πρωτοτύπου.

Γενικός στόχος είναι το συνολικό κόστος της διάταξης να παραμείνει σε τιμή κάτω από τα 100 ευρώ στην τελική φάση σχεδίασης του μετρητικού συστήματος.

Κεφάλαιο 8: Λογισμικό

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στα βασικά στοιχεία με τα οποία υλοποιήθηκε το λογισμικό του μετρητικού και για τις δύο πλατφόρμες, Arduino και Raspberry. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην υλοποίηση του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου για τα δύο chip, καθώς και στις βασικές λειτουργίες που υλοποιήθηκαν σε επίπεδο λογισμικού. Τέλος, αναλύεται η διαδικασία βαθμονόμησης και μετρήσεων των σημάτων εισόδων του μετρητικού συστήματος.

8.1 Λογισμικό Arduino

Η πλακέτα του Arduino βασίζεται σε έναν AVR μικροελεγκτή. Το λογισμικό, επομένως, μπορεί να γραφτεί σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού με ένα μεταγλωτιστή (compiler) που παράγει δυαδικό κώδικα μηχανής. Παρόλα αυτά, το Arduino παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment – IDE), το οποίο είναι μία cross-platform εφαρμογή γραμμένο σε Java.

Το Arduino IDE υποστηρίζει τις γλώσσες προγραμματισμού C/C++ με τη χρήση ειδικών κανόνων οργάνωσης κώδικα. Το Arduino IDE παρέχει μια βιβλιοθήκη λογισμικού που ονομάζεται Wiring, από το ομώνυμο project, η οποία παρέχει πολλές κοινές διαδικασίες εισόδου και εξόδου. Ένα τυπικό Arduino C / C ++ πρόγραμμα αποτελείται από δύο συναρτήσεις που καταρτίζονται και συνδέονται σε μία κύρια συνάρτηση main ():

- setup () : μια συνάρτηση που εκτελείται μία φορά κατά την έναρξη του προγράμματος και προετοιμάζει τις ρυθμίσεις.
- loop () : μια συνάρτηση η οποία εκτελείται συνεχώς μέχρι τη διακοπή της τροφοδοσίας της πλακέτας.

Η φόρτωση του λογισμικού στο Arduino γίνεται από τον υπολογιστή μέσω της USB θύρας που διαθέτει η πλακέτα.

8.2 Λογισμικό Raspberry Pi

Το Raspberry Pi αποτελεί μία πλατφόρμα μικρού υπολογιστή, επομένως χρησιμοποιεί κάποιο λειτουργικό σύστημα. Το πιο διαδεδομένο λειτουργικό είναι το Raspbian, το οποίο είναι βασισμένο στη διανομή Debian των Linux και είναι ειδικά σχεδιασμένο για τις πλατφόρμες του Raspberry. Η εγκατάσταση του λειτουργικού γίνεται μέσω της SD κάρτας στην οποία είναι αποθηκευμένος ο install manager του λειτουργικού.

Η πρόσβαση στο Raspberry είναι δυνατή με δύο τρόπους

- Συνδέοντας μία οθόνη και ένα πληκτρολόγιο στις αντίστοιχες θύρες της πλατφόρμας.
- Μέσω secure shell (SSH) σύνδεσης, από έναν υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος σε κοινό δίκτυο με την πλατφόρμα.

Το Raspberry έχει τη δυνατότητα προγραμματισμού σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού, μπορεί να μεταγλωτίσει ο ARM μικροεπεξεργαστής που διαθέτει. Η επιλογή που έγινε ήταν ο προγραμματισμός σε Python, για τους εξής λόγους:

- Είναι γλώσσα υψηλού επιπέδου
- Περιέχει αρκετές υλοποιημένες συναρτήσεις
- Είναι κατάλληλη για σχεδίαση γραφικού περιβάλλοντος και web interface

8.3 Υλοποίηση SPI

Και τα δύο ολοκληρωμένα που χρησιμοποιήθηκαν στη σχεδίαση επικοινωνούν με τον μικροελεγκτή ή τον υπολογιστή μέσω της σειριακής περιφερειακής επικοινωνίας (SPI). Τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας και μετάδοσης δεδομένων του SPI, έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι βασικές αρχικοποιήσεις που είναι απαραίτητες για την πραγματοποίηση της επικοινωνίας, όσον αφορά το κομμάτι του λογισμικού είναι

- Η επιλογή της κύριας συσκευής και της δευτερεύουσας. Ως κύρια συσκευή και για τις δύο υλοποιήσεις του καταγραφέα ορίζεται ο μικροελεγκτής/υπολογιστής.
- Οι αρχικοποιήσεις των συνδέσεων του Arduino και του Raspberry ώστε να λειτουργήσουν για την συγκεκριμένη επικοινωνία.
- Ο ορισμός της τάξης του ψηφίου που θα μεταφερθεί πρώτο από τον καταχωρητή ολίσθησης, δηλαδή αν θα είναι το λιγότερο ή το πιο σημαντικό ψηφίο (LSB ή MSB).
- Ο ορισμός της συχνότητας του ρολογιού της επικοινωνίας.
- Ο ορισμός της πόλωσης και της φάσης του σήματος ρολογιού.
- Ο ορισμός της επιλογής της δευτερεύουσας συσκευής, θέτοντας στο λογικό 0 την κατάσταση του ακροδέκτη Slave Select (SS).
- Η έναρξη της επικοινωνίας.
- Μετάδοση των δεδομένων για επικοινωνία με τη δευτερεύουσα συσκευή.

Το πρωτόκολλο SPI είναι χαλαρό στην εφαρμογή και σε κάθε συσκευή υλοποιείται λίγο διαφορετικά. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα ιδιαίτερα

χαρακτηριστικά της κάθε περιφερειακής συσκευής για την σωστή σύνταξη του κώδικα.

8.3.1 Υλοποίηση SPI Arduino

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI υλοποιείται στο λογισμικό του Arduino με τη βοήθεια μίας βιβλιοθήκης ανοιχτού κώδικα, της <SPI.h>. Η βιβλιοθήκη αυτή προγραμματίζει με τέτοιο τρόπο την επικοινωνία, ώστε το Arduino να λειτουργεί πάντα σαν κύρια συσκευή.

Επίσης, οι συνδέσεις του Arduino έγιναν στους ειδικά σχεδιασμένους ακροδέκτες για το SPI. Οι ακροδέκτες στους οποίους συνδέονται οι MISO, MOSI και SCLK δίαυλοι είναι ειδικά σχεδιασμένοι για την επικοινωνία SPI. Υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του ακροδέκτη, τροποποιώντας την επικοινωνία στον κώδικα της αντίστοιχης βιβλιοθήκης, κάτι που για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν μας απασχόλησε. Η σύνδεση του ακροδέκτη του Arduino για το δίαυλο SS δεν είναι αυστηρή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε από τους διαθέσιμους ψηφιακούς ακροδέκτες.

Η υλοποίηση του λογισμικού που αφορά στην βασική επικοινωνία με το ADE7758, αναλύεται παρακάτω.

- **Ρύθμιση συχνότητας ρολογιού, ψηφίου προτεραιότητας (LSB ή MSB), πόλωση και φάση σήματος ρολογιού.**

Η επιλογή των ρυθμίσεων γίνεται κατά την έναρξη της επικοινωνίας με τη συνάρτηση:

```
SPI.beginTransaction(SPISettings(Clock_Frequency,MSBFIRST ή LSBFIRST, SPI_MODE));
```

Η επιλογή της συχνότητας του ρολογιού που έγινε για την εφαρμογή μας ήταν 1MHz. Η τιμή αυτή αφορά τη μέγιστη συχνότητα της επικοινωνίας. Το Arduino αυτόματα επιλέγει την καλύτερη δυνατή συχνότητα η οποία είναι ίση ή μικρότερη της τιμής που επιλέξαμε.

Το ADE7758 επικοινωνεί με την κύρια συσκευή, μεταφέροντας πρώτα το πιο σημαντικό bit στον καταχωρητή ολίσθησης. Επομένως, η ρύθμιση προϋποθέτει την MSBFIRST επιλογή.

Όσον αφορά την πόλωση και τη φάση του σήματος ρολογιού, η βιβλιοθήκη SPI έχει 4 δυνατές λειτουργίες. Η ρύθμιση της πόλωσης απαιτεί τον προσδιορισμό της τιμής βάσης του ρολογιού (λογικό 1 ή λογικό 0) και η ρύθμιση της φάσης τον προσδιορισμό της θετικής ή αρνητικής ακμής που γίνεται η μεταφορά των δεδομένων. Για τους μικροελεγκτές AVR, οι δυνατοί συνδυασμοί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Προσδιορισμός φάσης και πόλωσης ρολογιού

Mode	Clock Polarity (CPOL)	Clock Phase (CPHA)
SPI_MODE0	0	0
SPI_MODE1	0	1
SPI_MODE2	1	0
SPI_MODE3	1	1

Το ADE έχει σαν τιμή βάσης ρολογιού το 0 και λαμβάνει τα δεδομένα εισόδου κατά την αρνητική ακμή. Επομένως ορίζουμε στις ρυθμίσεις SPI_MODE_1.

- **Ο ορισμός της δευτερεύουσας συσκευής.**

Η επικοινωνία με την περιφερειακή συσκευή της επιλογής του χρήστη γίνεται, ορίζοντας αρχικά την κατάσταση του συνδέσμου του Arduino, στον οποίο έχει συνδεθεί ο δίαυλος SS, σαν έξοδο με την εντολή:

```
pinMode(CS,OUTPUT); // CS = αριθμός του pin που έχει συνδεθεί το αντίστοιχο καλώδιο
```

- **Μετάδοση δεδομένων**

Η έναρξη της μετάδοσης των δεδομένων ξεκινάει αφού φέρουμε την κατάσταση του SS στο λογικό 0, με την εντολή:

```
digitalWrite(CS,LOW);
```

Στη συνέχεια, γίνεται η αποστολή των δεδομένων. Όπως έχουμε αναφέρει το SPI είναι παράλληλη επικοινωνία, στέλνοντας δεδομένα η κύρια στην περιφερειακή συσκευή και αντίστροφα.

Η αποστολή των δεδομένων υλοποιείται με την εντολή:

```
SPI.transfer(Byte);
```

Όλες οι λειτουργίες του ADE7758 είναι προσβάσιμες μέσω των διευθυνσιοδοτημένων καταχωρητών που είναι ενσωματωμένοι. Για την πρόσβαση του κάθε καταχωρητή είναι απαραίτητο πρώτα η εγγραφή του καταχωρητή επικοινωνίας (communication register). Ο καταχωρητής αυτός έχει μέγεθος 8 bits. Τα 7 λιγότερα σημαντικά bits αφορούν την διεύθυνση του καταχωρητή με τον οποίο θα γίνει η επικοινωνία και το πιο σημαντικό ορίζει αν θα είναι εγγραφή ή ανάγνωση των περιεχομένων του καταχωρητή. Η επιλογή αυτή γίνεται θέτοντας λογικό 1 για εγγραφή και λογικό 0 για ανάγνωση.

Αφού γίνει η πρώτη μετάδοση, στη συνέχεια εάν πρόκειται για διαδικασία ανάγνωσης του καταχωρητή αποστέλλεται ένα (ή περισσότερα ανάλογα με το μέγεθος του καταχωρητή) δεσμευμένο bit. Το bit αυτό ορίζεται από τις ρυθμίσεις της εκάστοτε συσκευής και για το ADE7758 είναι το 0. Αυτή η αποστολή γίνεται ώστε να ακολουθήσει η απάντηση του ADE7758 ως περιφερειακής συσκευής και να αποθηκευτεί η πληροφορία στο Arduino.

Εάν η επιλογή είναι η εγγραφή του καταχωρητή, αποστέλλεται το Byte που περιέχει την τιμή την οποία θέλουμε να εγγράψουμε.

Μετά το τέλος της επικοινωνίας, η κατάσταση του SS επανέρχεται στο 1, δηλαδή η συσκευή παραμένει ανενεργή. Αυτό ορίζεται από την εντολή:

```
digitalWrite(CS,HIGH);
```

8.3.2 Υλοποίηση SPI στο Raspberry Pi

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI υλοποιείται στην γλώσσα Python με την οποία προγραμματίσουμε το Raspberry Pi, με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης spidev.

Η βιβλιοθήκη αυτή προγραμματίζει με τέτοιο τρόπο την επικοινωνία, ώστε το Raspberry να λειτουργεί πάντα σαν κύρια συσκευή.

Οι συνδέσεις του Raspberry έγιναν στους ειδικά σχεδιασμένους ακροδέκτες για το SPI. Οι ακροδέκτες στους οποίους συνδέονται οι MISO, MOSI και SCLK δίαυλοι είναι ειδικά σχεδιασμένοι για την επικοινωνία SPI. Υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του ακροδέκτη, τροποποιώντας την επικοινωνία στον κώδικα της αντίστοιχης βιβλιοθήκης, κάτι που για τη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν μας απασχόλησε.

Η σύνδεση των ακροδεκτών του Raspberry για το δίαυλο SS έγινε στους ακροδέκτες CE0 και CE1 για το ADE7758 και το AD7327 αντίστοιχα.

Υλοποίηση επικοινωνίας του ADE7758

Η υλοποίηση του λογισμικού που αφορά στην βασική επικοινωνία με το ADE7758, αναλύεται παρακάτω.

- **Ρύθμιση συχνότητας ρολογιού, ψηφίου προτεραιότητας (LSB ή MSB), πόλωση**

και φάση σήματος ρολογιού.

Η επιλογή της συχνότητας, του ψηφίου προτεραιότητας καθώς και η πόλωση και φάση του σήματος γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως αναλύσαμε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μέγιστη ταχύτητα επικοινωνίας στο 1MHz, CPOL=0 και CPHA = 1, ενώ η μετακίνηση στον καταχωρητή ολίσθησης γίνεται με προτεραιότητα του πιο σημαντικού ψηφίου. Οι συγκεκριμένες αρχικοποιήσεις υλοποιούνται στην βιβλιοθήκη `spidev` με τις συγκεκριμένες εντολές:

```
spi.max_speed_hz = 1000000
spi.mode = 0b01
spi.lsbfirst = False
```

- **Έναρξη επικοινωνίας και ορισμός της δευτερεύουσας συσκευής.**

Η επικοινωνία με την περιφερειακή συσκευή της επιλογής του χρήστη αρχίζει ανοίγοντας το δίαυλο επικοινωνίας του πρωτοκόλλου με το Raspberry Pi και επιλέγοντας τον αντίστοιχο σύνδεσμο στον οποίο έχει συνδεθεί από την εντολή:

```
spi.open(0,SS) # με SS = 0 για τον slave του CE0 και SS=1 για τον slave του CE1.
```

Στην περίπτωση του ADE7758 έχουμε συνδέσει το SS δίαυλο στο CE0, επομένως SS=0.

- **Μετάδοση δεδομένων**

Η έναρξη της μετάδοσης των δεδομένων ξεκινάει αφού φέρουμε την κατάσταση του SS στο λογικό 0, όπως έχουμε αναφέρει. Στη συνέχεια γίνεται η αποστολή των δεδομένων μεταξύ κύριας και περιφερειακής συσκευής.

Στην βιβλιοθήκη `spidev` η παραπάνω διαδικασία υλοποιείται με τις παρακάτω συναρτήσεις:

```
xfer(list of values[, speed_hz, delay_usec, bits_per_word])
```

```
xfer2(list of values[, speed_hz, delay_usec, bits_per_word])
```


με

- ◆ list of values – τα bytes που αποστέλλονται. Σε αντίθεση με την διαδικασία της βιβλιοθήκης του Arduino, η `spidev` προσφέρει τη δυνατότητα πολλαπλής αποστολής δεδομένων. Ορίζοντας τον χρόνο καθυστέρησης μεταξύ των αποστολών με το όρισμα:
- ◆ `delay_usec` – ορισμός της καθυστέρησης μεταξύ των αποστολών σε μονάδες `μsec`.
- ◆ `speed_hz` – η ταχύτητα της μετάδοσης σε `Hz`
- ◆ `bits_per_word` – πόσα ψηφία θα διαθέτει η κάθε λέξη που αποστέλλεται. Η επιλογή είναι μεταξύ 8 και 9.

Η διαφορά των συναρτήσεων `xfer` και `xfer2` είναι ότι ενώ και οι δύο επιλέγουν το `SS` σε κάθε κλήση της συνάρτησης, ορίζοντας το σε λογικό 0 στην αρχή και λογικό 1 με το πέρας της αποστολής, η `xfer` τερματίζει την επικοινωνία μεταξύ των αποστολών, αποεπιλέγοντας το `SS`, ενώ η `xfer2` διατηρεί το `SS` ενεργό, καθ' όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας.

Για την επικοινωνία του Raspberry με το `ADE7758`, επιλέξαμε την συνάρτηση `xfer2`, ενώ όσον αφορά τα όρια, επιλέχθηκε `1MHz` ταχύτητα μετάδοσης, `4μsec` καθυστέρηση (καθώς τόσο είναι αναγκαίο για την ασφαλή επικοινωνία σύμφωνα με το [26]) και 8 ψηφία ανά λέξη που αποστέλλεται, δηλαδή 1 Byte.

SPI επικοινωνία του AD7327

Το `AD7327` χρησιμοποιήθηκε στην αναπτυξιακή πλακέτα η οποία επικοινωνεί με το Raspberry Pi. Επομένως, η υλοποίηση του επικοινωνιακού πρωτοκόλλου έγινε με την βιβλιοθήκη της `spidev` της Python.

Η διαδικασία είναι η ίδια που αναλύθηκε παραπάνω για το `ADE7758`. Τα βασικά σημεία διαφοροποίησης όσον αφορά την υλοποίηση στο `AD7327` είναι τα εξής:

- Διαφορετική κατάσταση φάσης και πόλωσης ρολογιού. Το `AD7327` έχει σαν τιμή βάσης του `SCK` το λογικό 1, ενώ δειγματοληπτεί τα δεδομένα κατά την αρνητική ακμή του ρολογιού, επομένως η φάση και η πόλωση του ρολογιού ορίζονται από το `SPI_Mode = (10)2`.
- Διαφορετικός ακροδέκτης σύνδεσης του δίαυλου `SS`. Το `SS` είναι συνδεδεμένο στον ακροδέκτη `CE1`, επομένως η ενεργοποίηση της επικοινωνίας γίνεται με την εντολή:

```
spi.open(0,1)
```

- Στο `AD7327` η επικοινωνία γίνεται σε 16 κύκλους ρολογιού, επομένως κάθε μεταφορά

δεδομένων αφορά 16 ψηφία. Το AD7327 διαθέτει 4 καταχωρητές οι οποίοι είναι μόνο για εγγραφή. Τα 3 πιο σημαντικά ψηφία κάθε μετάδοσης, είναι τα ψηφία επιλογής του καταχωρητή, ενώ τα υπόλοιπα γράφουν τα δεδομένα στον επιλεγμένο καταχωρητή. Σε ανάγνωση της τιμής της εκάστοτε επιλεγμένης εισόδου γίνεται στέλνοντας μία δεσμευμένη λέξη, την μηδενική

8.4 Υλοποίηση βασικών λειτουργιών

Οι βασικές λειτουργίες των ADE7758 και AD7327 οι οποίες υλοποιήθηκαν στην εφαρμογή, αναλύονται στις επόμενες ενότητες

8.4.1 ADE7758

Οι βασικές λειτουργίες του ADE7758 είναι προσβάσιμες από τους καταχωρητές τους οποίους έχει ενσωματωμένους. Κάθε καταχωρητής έχει μία συγκεκριμένη διεύθυνση για πρόσβαση και επικοινωνία. Οι καταχωρητές αυτοί ρυθμίζουν ένα μεγάλο εύρος λειτουργιών και προσφέρουν τη δυνατότητα επιλογής προσαρμογής του ADE7758 στην εκάστοτε εφαρμογή.

Αρχικοποιήσεις λειτουργίας

Οι βασικοί τρόποι λειτουργίας του ADE7758 ρυθμίζονται από τους αντίστοιχους καταχωρητές (mode registers). Κάθε καταχωρητής έχει μία προεπιλεγμένη τιμή, που αντιστοιχεί σε μία προεπιλεγμένη λειτουργία του ADE7758. Για τις διάφορες χρήσεις όμως του μετρητικού οι καταχωρητές που διαμορφώθηκαν είναι οι εξής:

- **MMODE**

Ο καταχωρητής αυτός καθορίζει τη διαμόρφωση της μέτρησης συχνότητας ή περιόδου. Θέτοντας τα δύο τελευταία ψηφία του καταχωρητή σύμφωνα με τις επιλογές που φαίνονται στο σχήμα παρακάτω, επιλέγεται η φάση της τάσης από την οποία γίνεται ο υπολογισμός της συχνότητας

Η αρχικοποίηση που έγινε στην εφαρμογή, ήταν η μέτρηση να γίνεται από την φάση A, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της συχνότητας, είτε σε μονοφασικό είτε σε τριφασικό.

FREQSEL1	FREQSELO	Source
0	0	Phase A
0	1	Phase B
1	0	Phase C
1	1	Reserved

Εικόνα 8.1: FREQSEL ψηφία του καταχωρητή MMODE

- **LCYCMODE**

Ο καταχωρητής LCYCMODE καθορίζει τον τρόπο που θα γίνει η ολοκλήρωση γραμμής κατά τη διαδικασία μέτρησης της ενέργειας. Τα ψηφία φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Τα ψηφία LWATT, LVAR και LVA, είναι απενεργοποιημένα στις αρχικές συνθήκες, αλλά χρειάζονται αλλαγή τιμής σε 1, ώστε να ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εξαγωγής της ενέργειας από τους αντίστοιχους καταχωρητές μέσω της διαδικασία γραμμικής ολοκλήρωσης, που θα αναλύσουμε παρακάτω.

Τα ZXSEL ψηφία ενεργοποιούν τις 3 φάσεις του κυκλώματος στην διαδικασία της ολοκλήρωσης. Επομένως, αναλόγως τις φάσεις που συνδέουμε γίνεται ανάλογη επιλογή για την ενεργοποίηση των ψηφίων.

Το ψηφίο RSTEAD, ορίζεται ανενεργό, λόγω της ενεργοποίησης των τριών πρώτων ψηφίων,

Το ψηφίο FREQSEL, ενεργοποιεί τη δυνατότητα μέτρησης συχνότητας ή περιόδου. Με την προεπιλεγμένη τιμή, ορίζεται μέτρηση συχνότητας, ενώ με την ενεργοποίηση, ορίζεται μέτρηση περιόδου. Στην εφαρμογή μας για λόγους που αναφέρονται παρακάτω, επιλέχθηκε μέτρηση περιόδου.

Bit Location	Bit Mnemonic	Default Value
0	LWATT	0
1	LVAR	0
2	LVA	0
3 to 5	ZXSEL	7
6	RSTREAD	1
7	FREQSEL	0

Εικόνα 8.2: Τα ψηφία του καταχωρητή LCYCMODE

Μέτρηση Συχνότητας

Το ADE7758 διαθέτει τη δυνατότητα μέτρησης της συχνότητας ή της περιόδου της τάσης του σήματος. Η μέτρηση γίνεται με την προσπέλαση του 12-bit καταχωρητή FREQ. Η φάση στην οποία θα γίνει η μέτρηση καθορίζεται από τα δύο λιγότερα σημαντικά bits του καταχωρητή MMODE. Η επιλογή της μέτρησης μεταξύ της συχνότητας και της περιόδου γίνεται με την επιλογή του bit 7 του καταχωρητή LCYCMODE. Θέτοντας 1 το ψηφίο του καταχωρητή επιλέγεται μέτρηση περιόδου. Η προκαθορισμένη τιμή είναι το 0, για μέτρηση συχνότητας.

Στην περίπτωση επιλογής μέτρησης περιόδου η ανάλυση του καταχωρητή είναι $96/CLKIN$ ανά LSB, (ή $9.6\mu s/LSB$ όταν υπάρχει ο ταλαντωτής των 10MHz). Η ανάλυση του καταχωρητή στην επιλογή μέτρησης συχνότητας είναι $0.0625Hz/LSB$. Επομένως,

Προτείνεται, η επιλογή να γίνει για μέτρηση περιόδου. Πρώτον, γιατί η μέτρηση της περιόδου είναι χρήσιμη στην μέτρηση και τη βαθμονόμηση της ενέργειας και δεύτερον γιατί η μέτρηση της συχνότητας έχει μικρότερο εύρος από την αντίστοιχη της περιόδου. Η εξαγωγή της τιμής της συχνότητας μπορεί να γίνει πολύ εύκολα αντιστρέφοντας την τιμή του καταχωρητή.

Εξαγωγή rms τιμής ρεύματος και τάσης.

Η rms μέτρηση στο ADE7758 εξάγεται από 6 καταχωρητές, 3 για τις φάσεις του ρεύματος και 3 για τις φάσεις της τάσης. Οι καταχωρητές έχουν μέγεθος 24 bits. Η διαδικασία εξαγωγής της τιμής περιλαμβάνει την εξής διαδικασία:

1. Επιλογή N αριθμού δειγμάτων μέτρησης. Η επιλογή του αριθμού είναι τέτοια ώστε να η μέτρηση να καλύπτει όλη την περίοδο του σήματος, επομένως η δειγματοληψία πρέπει να αφορά τουλάχιστον 50 δείγματα το δευτερόλεπτο. Όσο περισσότερα είναι τα δείγματα, τόσο περισσότερο αξιόπιστη είναι η μέτρηση.
2. Μέτρηση της τιμής του καταχωρητή N φορές
3. Υπολογισμός της μέσης τιμής

Με την διαδικασία αυτή αποφεύγεται η διαδικασία της επίβλεψης των zero crossings μέσω των διακοπών.

Μέτρηση ενέργειας/ισχύος

Η διαδικασία μέτρησης της ισχύος όπως είδαμε στο κεφάλαιο 5, περιλαμβάνει την μέτρηση των στιγμιαίων τιμών τάσης και ρεύματος και κατά συνέπεια της στιγμιαίας ισχύος και στη συνέχεια την ολοκλήρωση της τιμής για ένα συγκεκριμένο χρόνο και εξαγωγή της ενέργειας σε μονάδες kWh.

Η διαδικασία ολοκλήρωσης και μέτρησης της ενέργειας είναι η εξής.

1. Αρχικοποίηση των καταχωρητών.
2. Εγγραφή των κύκλων που θα χρησιμοποιηθούν για την ολοκλήρωση στο καταχωρητή LINECYC(0x1C). Ο χρόνος ολοκλήρωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Accumulation\ Time = \frac{LINECYC}{2 \times Frequency \times Phases} \quad (8.1)$$

Όπου:

- ◆ LINECYC - οι κύκλοι γραμμής που έχουν επιλεγθεί από το χρήστη
- ◆ Frequency - η συχνότητα της γραμμής, η οποία εξάγεται απευθείας από την τιμή του αντίστοιχου καταχωρητή.
- ◆ Phases – ο αριθμός των φάσεων που έχουν επιλεγθεί από το χρήστη για ολοκλήρωση.

3. Επαναφορά του καταχωρητή διακοπών (Reset InterruptStatus), διαβάζοντας τον καταχωρητή RSTATUS (0x1A). Το βήμα αυτό μπορεί να γίνει έξω από τον βρόχο της διαδικασίας, για ευελιξία στην εφαρμογή της ολοκλήρωσης διαφορετικών φάσεων.
4. Αναμονή για τερματισμό του χρόνου ολοκλήρωσης. Αυτό γίνεται αντιληπτό με την διακοπή που στέλνει ο καταχωρητής Status(0x19) θέτοντας το αντίστοιχο LENERGY bit, το οποίο υποδεικνύει την λήξη του χρόνου.
5. Εφαρμογή ενός flag για την επίβλεψη του LENERGY bit. Μόλις αυτό ενεργοποιηθεί διαβάζονται οι καταχωρητές της ενέργειας.

8.4.2 AD7327

Το AD7327 έχει 4 προγραμματιζόμενους καταχωρητές οι οποίοι ρυθμίζουν τη λειτουργία του. Τον καταχωρητή ελέγχου (control register), τον καταχωρητή ακολουθίας (sequence register) και 2 καταχωρητές επιλογής εύρους εισόδου (Range registers). Οι καταχωρητές αυτοί, είναι προσβάσιμοι μόνο για εγγραφή ώστε να καθοριστούν οι επιθυμητές λειτουργίες.

Ο καταχωρητής ελέγχου χρησιμοποιείται για την επιλογή της αναλογικής εισόδου μέτρησης, την διαμόρφωση των αναλογικών εισόδων, την τάση αναφοράς, την μορφή του κώδικα εξόδου και τη λειτουργία κατανάλωσης. Ο καταχωρητής είναι μεγέθους 12 bit. Επειδή κάθε μεταφορά δεδομένων στο AD7327 είναι 16 κύκλων, επομένως είναι απαραίτητο να μεταφερθούν 16 bit. Τα 3 πρώτα πιο σημαντικά bit καθορίζουν το ποιος καταχωρητής θα είναι προσβάσιμος, και όπως έχουμε αναφέρει τα ψηφία αυτά για τον καταχωρητή ελέγχου είναι 100. Στη συνέχεια ακολουθούν τα 12 bit του καταχωρητή, ενώ το τελευταίο ψηφίο είναι δεσμευμένο στην τιμή 0. Τα 12 ψηφία του καταχωρητή φαίνονται στον πίνακα 8.2

Πίνακας 8.2: Τα ψηφία του καταχωρητή ελέγχου

12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
ADD2	ADD1	ADD0	Mode1	Mode0	PM1	PM2	Coding	Ref	Seq2	Seq1	0

Πιο αναλυτικά

- Τα ψηφία ADD2, ADD1, ADD0 καθορίζουν το κανάλι της αναλογικής είσοδο που θα διαβαστεί.
- Τα ψηφία Mode1 και Mode0 καθορίζουν την διαμόρφωση των αναλογικών εισόδων, δηλαδή αν πρόκειται για μονής εισόδου, διαφορική ή ψευδο-διαφορική.

Οι δυνατοί συνδυασμοί φαίνονται στον πίνακα 8.3.

Πίνακας 8.3: Επιλογή διαμόρφωσης αναλογικής εισόδου στο ADE7327

Κανάλι εισόδου			Mode1=1, Mode0=1		Mode1=1, Mode0=0		Mode1=0, Mode0=1		Mode1=0, Mode0=0	
			7 ψευδο - διαφορικές είσοδοι		4 διαφορικές είσοδοι		4 ψευδο - διαφορικές είσοδοι		8 Single-ended είσοδοι	
ADD2	ADD1	ADD0	Vin+	Vin-	Vin+	Vin-	Vin+	Vin-	Vin+	Vin-
0	0	0	Vin0	Vin7	Vin0	Vin1	Vin0	Vin1	Vin0	AGND
0	0	1	Vin1	Vin7	Vin0	Vin1	Vin0	Vin1	Vin1	AGND
0	1	0	Vin2	Vin7	Vin2	Vin3	Vin2	Vin3	Vin2	AGND
0	1	1	Vin3	Vin7	Vin2	Vin3	Vin2	Vin3	Vin3	AGND
1	0	0	Vin4	Vin7	Vin4	Vin5	Vin4	Vin5	Vin4	AGND
1	0	1	Vin5	Vin7	Vin4	Vin5	Vin4	Vin5	Vin5	AGND
1	1	0	Vin6	Vin7	Vin6	Vin7	Vin6	Vin7	Vin6	AGND
1	1	1	Θερμοκρασία		Vin6	Vin7	Vin6	Vin7	Vin7	AGND

Όσον αφορά την συγκεκριμένη υλοποίηση, επιλέχθηκε οι 6 εισοδοι να είναι single-ended και η είσοδος Vin6 που αφορά την DC τάση να είναι ψευδοδιαφορικής μορφής, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο της σχεδίασης του υλικού.

- Τα ψηφία PM1 και PM 0 καθορίζουν την λειτουργία ισχύος του κυκλώματος. Για κανονική λειτουργία, δηλαδή όλα τα εσωτερικά κυκλώματα να τροφοδοτούνται συνεχί επιλέγουμε το συνδυασμό PM1 = 0 και PM0 =0.
- Το ψηφίο coding καθορίζει την μορφή του κώδικα εξόδου. Εάν είναι ενεργοποιημένο, τότε είναι της μορφής συμπληρώματος ως προς 2, ενώ αν είναι απενεργοποιημένο είναι της απλής δυαδικής μορφής. Η επιλογή που κάναμε είναι για απλή δυαδική μορφή, καθώς είναι πιο εύκολη στην χρήση και πιο πρακτική στην παρούσα εφαρμογή καθώς δεν θα έχουμε αρνητικά σήματα.
- Το ψηφίο Ref καθορίζει εάν θα υπάρχει εξωτερική ή εσωτερική τάση αναφοράς. Με

την απενεργοποίηση του ψηφίου επιλέγεται εσωτερική αναφορά, η οποία ήταν η πιο χρήσιμη για την εφαρμογή.

- Τα ψηφία Seq1 και Seq0 καθορίζουν την ακολουθία των εισόδων που θα διαβαστούν. Στην παρούσα εφαρμογή, επιλέξαμε να μην υπάρχει ακολουθία στις εισόδους για μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή των εισόδων που θα διαβαστούν.

Οι καταχωρητές εύρους καθορίζουν το εύρος των αναλογικών εισόδων στο AD7327. Είναι μεγέθους 8 bit. Η επιλογή του εύρους φαίνεται στους πίνακες 8.4 και 8.5.

Για τον καταχωρητή1 :

Πίνακας 8.4: Ψηφία του καταχωρητή εύρους 1

16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	0	1	Vin0A	Vin0B	Vin1A	Vin1B	Vin2A	Vin2B	Vin3A	Vin3B	0	0	0	0	0

Και για τον καταχωρητή2:

Πίνακας 8.5: Ψηφία του καταχωρητή εύρους 2

16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	1	0	Vin4A	Vin4B	Vin5A	Vin6B	Vin6A	Vin6B	Vin7A	Vin7B	0	0	0	0	0

Ο καταχωρητής 1, αφορά την επιλογή των 4 πρώτων εισόδων, ενώ ο καταχωρητής 2 την επιλογή των 4 τελευταίων. Το εύρος κάθε εισόδου καθορίζεται από τον συνδυασμό δύο ψηφίων. Οι δυνατοί συνδυασμοί που μπορούν να γίνουν φαίνονται στον πίνακα 8.6

Πίνακας 8.6: Επιλογή εύρους εισόδου

VinXA	VinXB	Εύρος εισόδου
0	0	±10 V
0	1	±5 V
1	0	±2.5 V
1	1	0 έως +10V

Εξαιτίας του γεγονότος πως στην εφαρμογή μας έχουμε αναλογικές εισόδους εύρους 0-10V, το απαιτούμενο εύρος ορίζεται εγγράφοντας και στους δύο καταχωρητές το δυαδικό συνδυασμό (11)₂, για όλες τις εισόδους.

Αφού γίνουν οι παραπάνω αρχικοποιήσεις, η μέτρηση των τιμών από το AD7327 γπραγματοποιείται με την απόστολή 2 δεσμευμένων byte, που στην περίπτωση του AD7327 είναι το μηδενικό. Η απόκριση του AD7327 στην απόστολη θα είναι μία λέξη μήκους 16 ψηφίων. Επειδή το AD7327 έχει ανάλυση 13 ψηφίων, είναι απαραίτητο να διαβαστούν μόνο τα 13 λογότερο σηματικά ψηφία της λέξης για την σωστή μέτρηση της τιμής.

8.5 Διαδικασία βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση των αισθητήρων των αναλογικών εισόδων υλοποιήθηκε σε επίπεδο λογισμικού, έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη και λιγότερο χρονοβόρα η διαδικασία.

8.5.1 Βαθμονόμηση εισόδων στο ADE7758

Το ADE7758 προσφέρει τη δυνατότητα ενσωματωμένης βαθμονόμησης, μέσω των αντίστοιχων καταχωρητών που διαθέτει. Η βαθμονόμηση γίνεται για κάθε φάση ξεχωριστά, επομένως είναι δυνατή η σύνδεση διαφορετικών αισθητήρων μέτρησης για κάθε φάση του συστήματος.

Είσοδοι AC ρεύματος και τάσης

Για την βαθμονόμηση της μετατόπισης (offset) του ρεύματος και της τάσης υπάρχει η δυνατότητα να γίνει συγχρόνως ώστε να απλοποιηθεί η διαδικασία και να μειωθεί ο χρόνος βαθμονόμησης. Παρόλα αυτά, επιλέχθηκε η βαθμονόμηση να γίνει σε διαφορετικούς χρόνους για μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς είναι πολύ δύσκολη η σύμπτωση των τιμών τάσης και ρεύματος. Τα βήματα που απαιτούνται είναι τα παρακάτω

Βήμα 1: Η αρχικοποίηση των καταχωρητών με τον τρόπο που αναπτύξαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Βήμα 2: Επιλέγονται οι τιμές του ρεύματος και της τάσης στις οποίες θα γίνει η βαθμονόμηση. Οι τιμές αυτές είναι η I_{min} . Ως ελάχιστη ορίζεται για το ρεύμα η τιμή:

$$I_{min} = \frac{I_{fullscale}}{500} \quad (8.2)$$

Και για την τάση η τιμή:

$$V_{min} = \frac{V_{fullscale}}{20} \quad (8.3)$$

Όπου:

- ◆ $I_{fullscale}$ και $V_{fullscale}$ η πλήρης κλίμακα εισόδου.

Και οι δύο τιμές αφορούν τις τιμές ρεύματος και τάσης στις οποίες παράγεται το πλήρες σήμα εισόδου στην είσοδο το ADE7758. Επειδή οι μετρήσεις αφορούν rms τιμές, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός πως το πλήρες σήμα εισόδου αφορά πλάτος 0.5V, επομένως πρέπει να γίνει μετατροπή είτε της μία τιμής, είτε της άλλης για σωστή αντιστοίχιση.

Η συγκεκριμένη επιλογή ελαχίστων τιμών δεν είναι τυχαία. Το ADE7758 διατηρεί τη γραμμικότητα του για δυναμικό εύρος εισόδου στους αναλογικούς ακροδέκτες μέτρησης ρεύματος 500:1 και δυναμικό εύρος μέτρησης τάσης 20:1. Επομένως, οι τιμές αυτές αφορούν τις ελάχιστες τιμές στην περιοχή γραμμικότητας του μετρητικού. Μπορεί να γίνει διαφορετική επιλογή ελάχιστης τιμής, αναλόγως το εύρος μέτρησης, από το χρήστη, πάντοτε μέσα στα προαναφερθέντα όρια.

Βήμα 3: Μέτρηση της των τιμών των καταχωρητών ρεύματος και τάσης για κάθε μία από τις τιμές που αναφέρθηκαν παραπάνω, με την υλοποιημένη διαδικασία μετρήσεων που έχει αναλυθεί στην ενότητα 8.4.1.

Βήμα 4: Στη συνέχεια πραγματοποιείται υπολογισμός της μετατόπισης (offset). Για την μετατόπιση το ADE7758 διαθέτει 3 καταχωρητές μετατόπισης για κάθε φάση του ρεύματος και αντίστοιχα για την τάση. Οι τιμές των καταχωρητών της τάσης και του ρεύματος προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$V_{RMS} = V_{RMS0} + V_{RMSOS} \times 64 \quad (8.4)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{RMS0}^2 + 16384 \times I_{RMSOS}} \quad (8.5)$$

Όπου:

- ◆ I_{RMS0} και V_{RMS0} οι τιμές του καταχωρητή με μηδενική μετατόπιση
- ◆ I_{RMSOS} και V_{RMSOS} οι τιμές των αντίστοιχων καταχωρητών μετατόπισης για ρεύμα και τάση

Πραγματοποιώντας τη διαδικασία της γραμμικής παρεμβολής για τις δύο τιμές (ονομαστική και ελάχιστη), προκύπτουν οι σχέσεις υπολογισμού της τιμής που πρέπει να γραφτεί στους

αντίστοιχους καταχωρητές :

$$I_{RMSOS} = \frac{1}{16384} \cdot \frac{(I_{nom}^2 \times I_{regmin}^2) - (I_{min}^2 \times I_{regnom}^2)}{I_{min}^2 - I_{nom}^2} \quad (8.6)$$

και

$$V_{RMSOS} = \frac{1}{64} \cdot \frac{(V_{nom} \times V_{regmin}) - (V_{min} \times V_{regnom})}{V_{min} - V_{nom}} \quad (8.7)$$

Όπου

- ◆ I_{regmin} και I_{regnom} , οι τιμές του καταχωρητή για τις αντίστοιχες τιμές ρεύματος εισόδου
- ◆ V_{regmin} και V_{regnom} , οι τιμές του καταχωρητή για τις αντίστοιχες τιμές τάσης εισόδου

Στη συνέχεια οι τιμές αυτές γράφονται στους καταχωρητές αποθηκεύονται σε ένα αρχείο στην μνήμη. Η αποθήκευση της τιμής σε αρχείο γίνεται:

- Για τη δυνατότητα ελέγχου και σύγκρισης των τιμών σε μελλοντικό χρόνο
- Για την διασφάλιση της αποθήκευσης των τιμών σε περίπτωση επανέναρξης της λειτουργίας του ADE7758 και επαναφοράς των αρχικών του ρυθμίσεων.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία προσδιορισμού της μετατόπισης και η εγγραφή των καταχωρητών, γίνεται ο προσδιορισμός του κέρδους. Η τιμή της σταθεράς του κέρδους προσδιορίζεται διαβάζοντας την τιμή του καταχωρητή σε μία συγκεκριμένη τιμή ρεύματος και τάσης και αντιστοιχίζοντας τον στην πραγματική τιμή, η οποία έχει μετρηθεί με μία αξιόπιστη αναφορά. Έτσι το κέρδος προκύπτει:

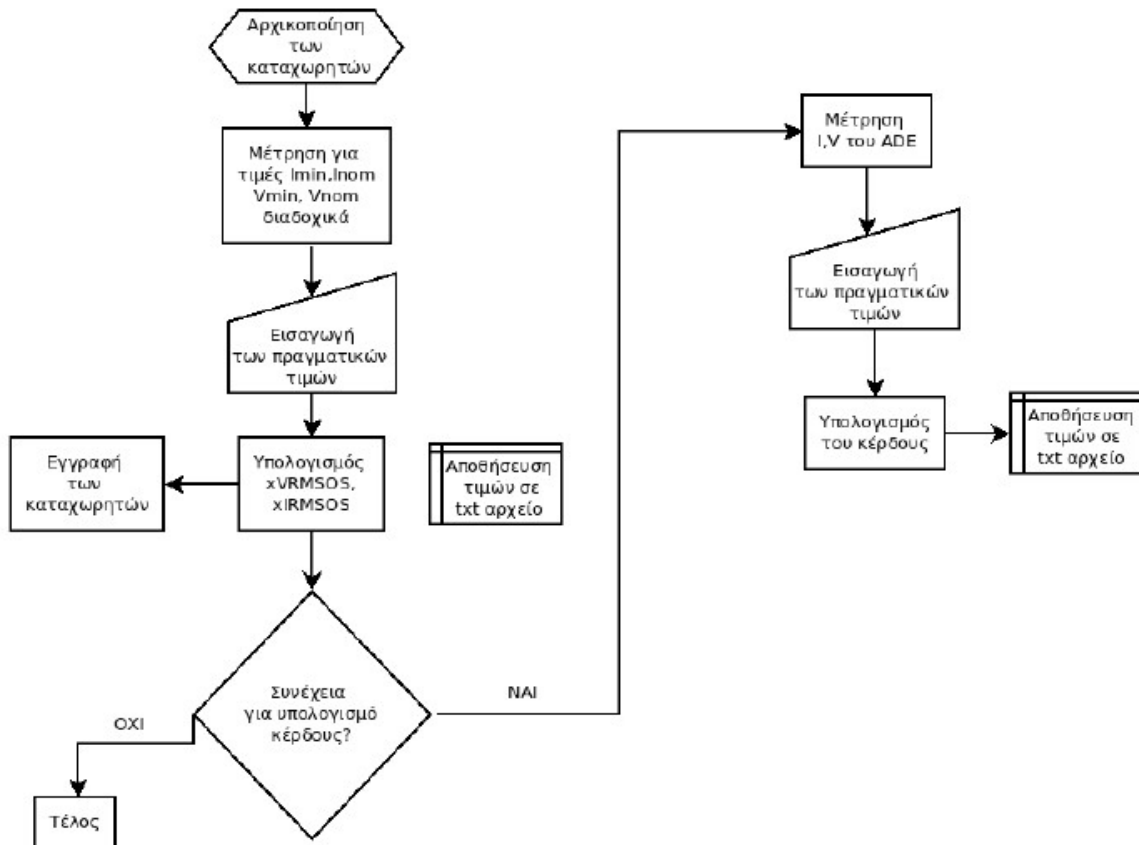
$$Gain = \frac{RMS}{Register Value} \quad (8.8)$$

Επομένως, για οποιαδήποτε rms τιμή εισόδου, ο υπολογισμός γίνεται από τη σχέση:

$$RMS = gain \times Register Value \quad (8.9)$$

Η τιμή αυτή αποθηκεύεται σε ένα αρχείο για λόγους ασφαλείας και για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια των μετρήσεων για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων.

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας απεικονίζεται στην εικόνα (8.3).



Εικόνα 8.3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βαθμονόμησης της τάσης

Βαθμονόμηση μέτρησης ισχύος

Για την βαθμονόμηση της μέτρησης ισχύος το ADE7758 δίνει την επιλογή μεταξύ δύο διαφορετικών μεθόδων. Η επιλογή που έγινε για την μέθοδο βαθμονόμησης, ήταν η διαδικασία ολοκλήρωση γραμμής (line accumulation). Η διαδικασία αυτή προσφέρει το πλεονέκτημα της βαθμονόμησης και των τριών φάσεων συγχρόνως και της εξάλειψης της κυμάτωσης της κυματομορφής της στιγμιαίας ισχύος, μέσω της ολοκλήρωσής της.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τρία διαφορετικά στάδια.

1. Τον προσδιορισμό του σφάλματος της διαφοράς φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης.
2. Τον υπολογισμό της μετατόπισης της τιμής της ενέργειας.

3. Τον προσδιορισμό του κέρδους.

Για την αντιστάθμιση της διαφοράς φάσης τα βήματα που υλοποιήθηκαν είναι τα εξής

Βήμα 1: Αρχικοποίηση των καταχωρητών.

Βήμα 2: Επιλογή των μεγεθών για βαθμονόμηση της φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος. Η ρύθμιση αυτή γίνεται για την να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που είναι πιθανόν να υπάρχει μεταξύ της φάσης του ρεύματος και της φάσης της τάσης, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται λάθη σε μετρήσεις διαφορετικών συντελεστών ισχύος. Οι τιμές οποίες θα γίνει η βαθμονόμηση είναι το ονομαστικό ρεύμα, η ονομαστική τάση και συντελεστής ισχύος 1 και 0.5. Η ρύθμιση της φάσης γίνεται εσωτερικά στο ADE7758 με την εγγραφή των καταχωρητών APHCAL, BPHCAL, CPHCAL για τις 3 φάσεις του κυκλώματος.

Βήμα 3: Διάβασμα των τιμών των καταχωρητών ενέργειας για ονομαστικά μεγέθη ρεύματος, τάσης και συντελεστή ισχύος 1.

Βήμα 4: Διάβασμα των τιμών των καταχωρητών για ονομαστικά μεγέθη τάσης, ρεύματος και συντελεστή ισχύος 0.5.

Βήμα 5: Υπολογισμός της τιμής των καταχωρητών με την παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, υπολογίζεται το σφάλμα μέτρησης της τιμής των καταχωρητών στους δύο δοκιμαστικούς συντελεστές ισχύος με την παρακάτω σχέση:

$$Error = \frac{WATTHR_{PF=0.5} - \frac{WATTHR_{PF=1}}{2}}{\frac{WATTHR_{PF=1}}{2}} \quad (8.10)$$

Όπου

- ◆ $WATTHR_{PF=0.5}$ και $WATTHR_{PF=1}$ οι τιμές των καταχωρητών για συντελεστή ισχύος 0.5 και 1 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το σφάλμα της φάσης από τη σχέση:

$$Phase\ Error = -\arcsin\left(\frac{Error}{\sqrt{3}}\right) \quad (8.11)$$

Στη συνέχεια η τιμή του καταχωρητή της διαφοράς φάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PHCAL = \frac{9.6}{PHCALWeight} \times \frac{FREQ}{360^\circ} \quad (8.12)$$

Όπου:

- ◆ η σταθερά PHCAWeight = 1.2 εάν το error είναι αρνητικό και PHCALWeight = 2.4 εάν το error είναι θετικό.
- ◆ FREQ η τιμή του καταχωρητή συχνότητας, με ρύθμιση μέτρησης περιόδου.

Για την μετατόπιση (offset) της ενεργού ενέργειας πραγματοποιούνται τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1: Ρύθμιση των μεγεθών για τον υπολογισμό της μετατόπισης της ενεργού ισχύος. Η ρύθμιση της μετατόπισης γίνεται εσωτερικά στο ADE7758 με την εγγραφή των καταχωρητών AWATTOS, BWATTOS, CWATTOS για τις 3 φάσεις του κυκλώματος. Οι μετρήσεις για την διαδικασία θα γίνουν σε συνθήκες συντελεστή ισχύος ίσο με 1 και σε ελάχιστο και ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας.

Βήμα 2: Μέτρηση και αποθήκευση των τιμών των καταχωρητών ενεργού ενέργειας για ελάχιστο ρεύμα λειτουργία και χρόνο ολοκλήρωσης ίσο με 5000 κύκλους γραμμής.

Η επιλογή του χρόνου είναι επιλογή του χρήστη. Συνήθως για το ελάχιστο ρεύμα λειτουργίας χρησιμοποιείται μεγάλος χρόνος ολοκλήρωσης – τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερος από τον χρόνο σε συνθήκες κανονικών μετρήσεων.

Βήμα 3: Μέτρηση και αποθήκευση των τιμών των καταχωρητών ενεργού ενέργειας για ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας και χρόνο ολοκλήρωσης ίσο με 500 κύκλους ρολογιού.

Βήμα 4: Υπολογισμός της μετατόπισης και της αντίστοιχης τιμής εγγραφής στον καταχωρητή. Η τιμή υπολογίζεται από τη σχέση :

$$Offset = \frac{WATTHR_{I_{min}} \times I_{test} - (WATTHR_{I_{test}} \times \frac{LINECYC_{IMIN}}{LINECYC_{I_{test}}}) \times I_{min}}{I_{min} - I_{test}} \quad (8.13)$$

Όπου:

- ◆ I_{min} και I_{test} - οι πραγματικές τιμές ελάχιστου και ονομαστικού ρεύματος
- ◆ $WATTHR_{I_{min}}$ - και $WATTHR_{I_{test}}$ οι τιμές του καταχωρητή αντίστοιχες πραγματικές τιμές ρεύματος
- ◆ $LINECYC_{I_{min}}$ και $LINECYC_{I_{test}}$ - οι επιλεγμένοι κύκλοι για την ολοκλήρωση της ισχύος στην ελάχιστη και ονομαστική τιμή του ρεύματος, αντίστοιχα.

Και η τιμή η οποία εγγράφεται στον καταχωρητή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$WATTOS = \frac{offset \times 4}{AccumTime \times CLKIN} \cdot 2^{29} \quad (8.14)$$

Όπου:

- ◆ AccumTime - ο χρόνος ολοκλήρωσης της ισχύος
- ◆ CLKIN – η συχνότητα του ταλαντωτή ίση με 10MHz

Ενώ η διαδικασία για τον υπολογισμό της μετατόπισης της άεργου ισχύος έχει ως εξής:

Βήμα 1: Ρύθμιση των μεγεθών για τον υπολογισμό της μετατόπισης της άεργου ισχύος. Η ρύθμιση της μετατόπισης γίνεται εσωτερικά στο ADE7758 με την εγγραφή των καταχωρητών AVAROS, BVAROS, CVAROS για τις 3 φάσεις του κυκλώματος. Οι μετρήσεις για την διαδικασία θα γίνουν σε συνθήκες συντελεστή ισχύος ίσο με 0 και σε ελάχιστο και ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας.

Βήμα 2: Μέτρηση και αποθήκευση των τιμών των καταχωρητών άεργου ενέργειας για ελάχιστο ρεύμα λειτουργία και χρόνο ολοκλήρωσης ίσο με 5000 κύκλους γραμμής.

Βήμα 3: Μέτρηση και αποθήκευση των τιμών των καταχωρητών άεργου ενέργειας για ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας και χρόνο ολοκλήρωσης ίσο με 500 κύκλους ρολογιού.

Βήμα 4: Υπολογισμός της μετατόπισης και της αντίστοιχης τιμής εγγραφής στον καταχωρητή. Η τιμή υπολογίζεται από τη σχέση

$$Offset = \frac{VARHR_{I_{min}} \times I_{test} - (VARHR_{I_{test}} \times \frac{LINECYC_{IMIN}}{LINECYC_{I_{test}}}) \times I_{min}}{I_{min} - I_{test}} \quad (8.15)$$

Όπου:

- I_{min} και I_{test} , οι πραγματικές τιμές ελάχιστου και ονομαστικού ρεύματος
- $VARHR_{I_{min}}$ και $VARHR_{I_{test}}$ οι τιμές του καταχωρητή αντίστοιχες πραγματικές τιμές ρεύματος
- $LINECYC_{I_{min}}$ και $LINECYC_{I_{test}}$, οι επιλεγμένοι κύκλοι για την ολοκλήρωση της ισχύος στην ελάχιστη και ονομαστική τιμή του ρεύματος, αντίστοιχα.

Και η τιμή η οποία εγγράφεται στον καταχωρητή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$VAROS = \frac{offset \times 4}{AccumTime \times CLKIN} \cdot 2^{29} \quad (8.16)$$

Μετά την ολοκλήρωση των προηγούμενων διαδικασιών, ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού του κέρδους. Η διαδικασία γίνεται για να προσδιοριστεί ο λόγος kWh/LSB και να εκφραστεί η τιμή του καταχωρητή σε αντιστοιχία με την πραγματική.

Το κέρδος υπολογίζεται διαβάζοντας την τιμή του καταχωρητή ενέργειας, ύστερα από τον ορισμένο χρόνο ολοκλήρωσης και σημειώνοντας την πραγματική τιμή από μία αναφορά ακριβείας.

Το κέρδος προκύπτει από τη σχέση:

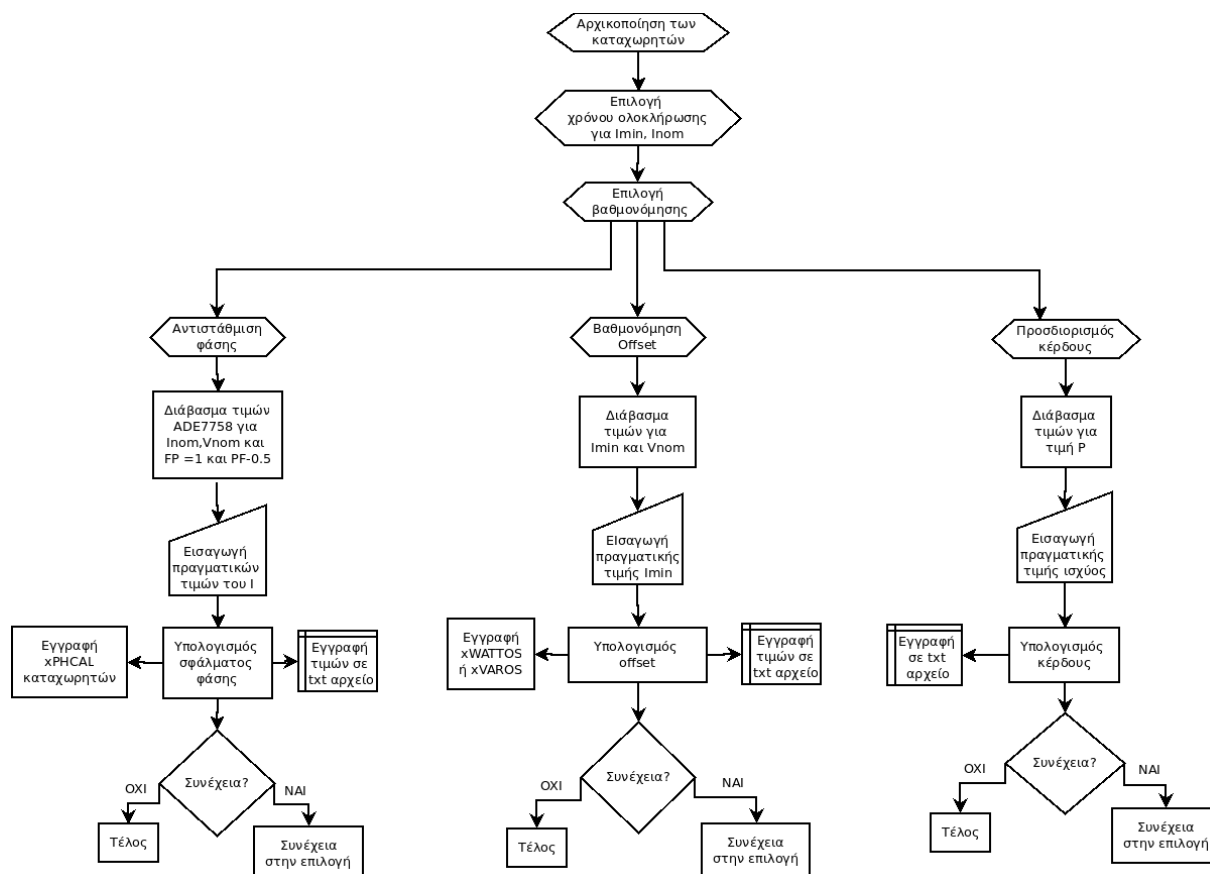
$$gain = \frac{P_{real} \cdot AccumTime}{Register Value \cdot 3600} \quad (8.17)$$

Επομένως η μετατροπή της τιμής του καταχωρητή σε πραγματική τιμή ισχύος γίνεται από:

$$P = gain \times (Register Value) \times \frac{3600}{AccumTime} \quad (8.18)$$

Επειδή το ADE7758 εμφανίζει την τιμή της ενέργειας στον αντίστοιχο χρόνο ολοκλήρωσης είναι απαραίτητος ο πολλαπλασιασμός με την τιμή $AccumTime/3600$ ώστε να εμφανιστεί ο λόγος kWh/LSB. Στις μετρήσεις, επιλέγουμε την αναγωγή της τιμής αυτής σε πραγματική τιμή ισχύος. Εφόσον, ο χρόνος ολοκλήρωσης της βαθμονόμησης είναι ίδιος με αυτόν των μετρήσεων ο λόγος $AccumTime/3600$ δεν είναι απαραίτητο να εισαχθεί στον υπολογισμό του κέρδους.

Στην εικόνα (8.4), παρατίθεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας βαθμονόμησης της ισχύος.



Εικόνα 8.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βαθμονόμησης της ισχύος

8.5.2 Βαθμονόμηση εισόδων στο AD7327

Το ADE7327 δεν διαθέτει ενσωματωμένη διαδικασία βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση υλοποιήθηκε σε επίπεδο λογισμικού, επιτρέποντας στο χρήστη να επιλέξει τον αριθμό των τιμών που θα χρησιμοποιηθούν και να εξάγει το αποτέλεσμα αυτόματα, αποθηκεύοντας τις τιμές κέρδους και μετατόπισης σε ένα αρχείο. Η διαδικασία είναι κοινή για τις αναλογικές εισόδους που είναι δυνατόν να συνδεθούν στο AD7327, δηλαδή DC τάσης, ρεύματος, 2 ανεμόμετρα, ανεμοδείκτη, θερμόμετρο και αισθητήρα ατμοσφαιρικής πίεσης.

Τα βήματα της διαδικασίας βαθμονόμησης είναι τα εξής:

Βήμα 1 : Επιλογή της αναλογικής εισόδου που θα βαθμονομηθεί.

Βήμα 2: Διάβασμα της τιμής του AD7327 σε μία συγκεκριμένη πραγματική τιμή.

Βήμα 3: Επιλογή τερματισμού της διαδικασίας ή συνέχεια επιλογής τιμών για τη βαθμονόμησης.

Βήμα 4: Με τον τερματισμό η αριθμό επαναλήψεων κι ενώ οι πραγματικές τιμές έχουν

αποθηκευτεί σε έναν πίνακα y και οι τιμές μέτρησης του AD7327 σε ένα πίνακα x , υπολογίζονται οι τιμές του κέρδους και της μετατόπισης με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Πιο συγκεκριμένα, το κέρδος προκύπτει από τη σχέση:

$$slope = \frac{n \cdot \sum (xy) - \sum x \cdot \sum y}{n \cdot \sum (x^2) - (\sum x)^2} \quad (8.19)$$

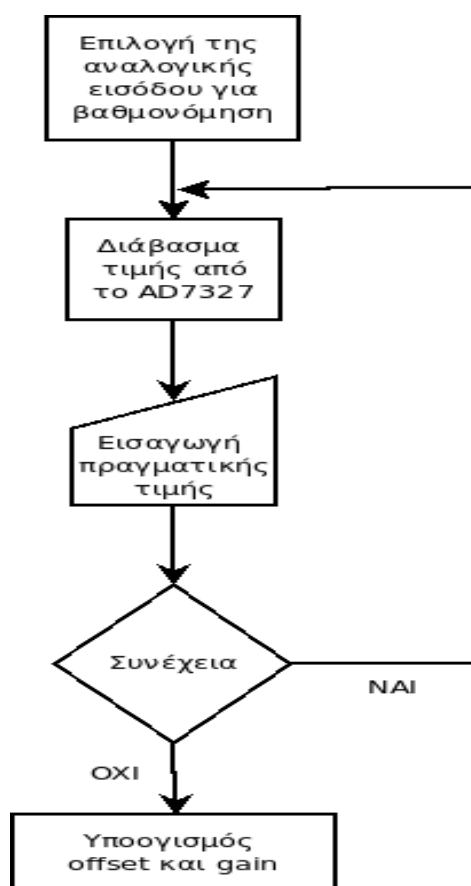
Ενώ η μετατόπιση από τη σχέση:

$$offset = \sum y - slope \cdot \sum (n \cdot x) \quad (8.20)$$

Επομένως η εμφάνιση των μετρούμενων των τιμών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων γίνεται μέσω της σχέσης:

$$X_{measure} = slope \cdot X_{ad7327} + offset \quad (8.21)$$

Το διάγραμμα ροής της βαθμονόμησης των αναλογικών εισόδων του AD7327, φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 8.5: Διάγραμμα ροής βαθμονόμησης αισθητήρων AD7327

Κεφάλαιο 9: Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

Μετά την σχεδίαση της πλακέτας, πραγματοποιήθηκαν πειράματα μετρήσεων για να προσδιοριστεί η ακρίβεια του καταγραφέα κάτω από τις διάφορες συνθήκες μέτρησης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές διατάξεις.

- Μία εργαστηριακή, όπου έγινε έλεγχος κάτω από συνθήκες παραπλήσιες των πραγματικών συνθηκών. Η διαφοροποιήσεις από τις συνθήκες λειτουργίας της γεννήτριας έγιναν για να εξακριβωθεί η λειτουργία και η ακρίβεια του οργάνου έξω από στις συνθήκες που περιορίζουν τις δυνατότητες του οργάνου, όπως για παράδειγμα η παρουσία των αρμονικών, καθώς και για καθαρά τεχνικούς λόγους. Η επιθυμητή AC τάση, καθώς και το ρεύμα παράχθηκαν από το δίκτυο με την βοήθεια ενός αυτομετασχηματιστή συνδεδεμένο σε μία αντίσταση.
- Πειράματα στην γεννήτρια. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκε η γεννήτρια μονίμων μαγνητών (ferrite) αξονικής ροής, με ονομαστική ισχύ 850W που ήταν εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου.

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε σαν αναφορά για την ανεύρεση της ακρίβειας του οργάνου είναι ο power analyzer WT3000 της εταιρίας Yokogawa. Πρόκειται για έναν υψηλής ακρίβειας όργανο, της τάξης του 0.02% στη μέτρηση της ισχύος.



Εικόνα 9.1: Ο power analyzer WT3000

Οι βαθμονομημένοι transducer που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του ρεύματος είναι οι Danfysik Ultrastab 867-60I.



Εικόνα 9.2: Ο transducer Danfysik Ultrastab 867-60I

Για τις μετρήσεις και τον προσδιορισμό των σφαλμάτων ακολουθήθηκαν τα παρακάτω:

- Η μέτρηση των rms τιμών του ρεύματος και της τάσης πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας το μέσο των τιμών για ένα χρονικό διάστημα και συγκρίνοντας με τον μέσο όρο των τιμών του WT3000 στο ίδιο χρονικό διάστημα. Το σχετικό σφάλμα προέκυψε

$$\varepsilon = \frac{|RMS_{\text{μετρ.}} - RMS_{WT3000}| \cdot 100}{RMS_{WT3000}} \quad (9.1)$$

- Στην μέτρηση της ισχύος, ορίστηκε ο χρόνος ολοκλήρωσης του ADE7758 και συγκρίθηκε με την μέτρηση της ισχύος του WT3000 στον ίδιο χρόνο ολοκλήρωσης. Το σχετικό σφάλμα υπολογίστηκε από την ίδια σχέση:

$$\varepsilon = \frac{|P_{\text{μετρ.}} - P_{WT3000}| \cdot 100}{P_{WT3000}} \quad (9.2)$$

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των διατάξεων.

9.1 Μετρήσεις ρεύματος της γεννήτριας για επιλογή μετασχηματιστή

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα μέτρησης του ρεύματος στην γεννήτρια για τον προσδιορισμό του κατάλληλου μετασχηματιστή ρεύματος. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για εύρος μετρούμενου ρεύματος, από την τιμή πριν το cut-in έως την μέγιστη τιμή των 9A λόγω των τεχνικών περιορισμών που αφορούν στην αντοχή της αντίστασης του φορτίου.

Για τον AC1020, πραγματοποιήθηκε μέτρηση χρησιμοποιώντας αντίσταση μέτρησης $R_b = 20\Omega$, διαμορφώνοντας την πλήρη κλίμακα εισόδου στο μετρητικό στα 11.7851A. Όπως

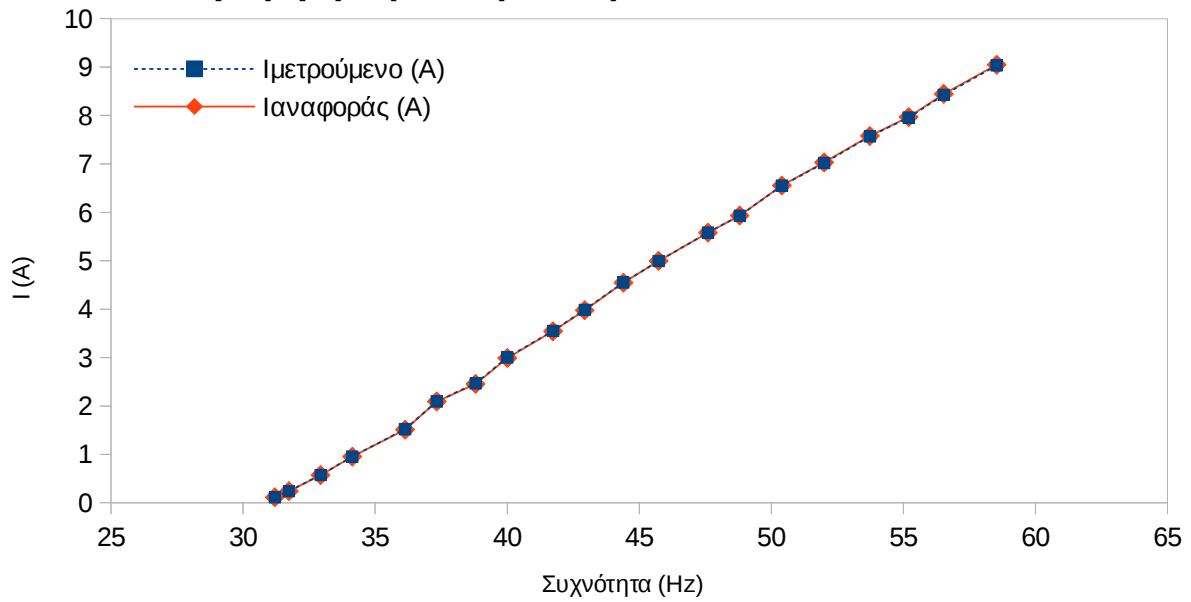
αναφέρεται στην ενότητα 5.1.1 το δυναμικό εύρος της μέτρησης του ρεύματος είναι 500:1, δηλαδή το ελάχιστο ρεύμα στο οποίο ο καταγραφέας λειτουργεί στην γραμμική περιοχή είναι 0.0235702A. Η τιμή αυτή είναι κατάλληλη για τις μετρήσεις μας, καθώς η γεννήτρια δεν παράγει τέτοιας τάξης ρεύματα πριν το cut-in.

Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στον πίνακα 9.1 και στο διάγραμμα (9.3).

Πίνακας 9.1: Αποτελέσματα μέτρησης ρεύματος με τον μ/σ AC-1020

N	I αναφοράς(A)	I μετρούμενο (A)	Σφάλμα (%)	Απόκλιση	f (Hz)
1	0.1142	0.1122	1.7513	0.0070	31.2000
2	0.2407	0.2389	0.7478	-0.0018	31.7333
3	0.5705	0.5761	0.9816	0.0056	32.9333
4	0.9555	0.9550	0.0523	-0.0005	34.1333
5	1.5106	1.5195	0.5892	0.0089	36.1333
6	2.0919	2.0947	0.1338	0.0028	37.3333
7	2.4551	2.4639	0.3584	0.0088	38.8000
8	2.9898	3.0010	0.3746	0.0112	40.0000
9	3.5429	3.5491	0.1750	0.0062	41.7333
10	3.9773	3.9844	0.1785	0.0071	42.9333
11	4.5469	4.5516	0.1034	0.0047	44.4000
12	4.9949	4.9941	0.0160	-0.0008	45.7333
13	5.5805	5.5811	0.0108	0.0006	47.6000
14	5.9341	5.9328	0.0219	-0.0013	48.8000
15	6.5535	6.5496	0.0595	-0.0039	50.4000
16	7.0317	7.0202	0.1635	-0.0115	52.0000
17	7.5771	7.5691	0.1056	-0.0080	53.7333
18	7.9679	7.9581	0.1230	-0.0098	55.2000
19	8.4453	8.4276	0.2096	-0.0177	56.5333
20	9.0479	9.0343	0.1503	-0.0136	58.5333

Απόκλιση τιμής ρεύματος με τον μ/σ AC1020



Εικόνα 9.3: Απόκλιση μέτρησης ρεύματος με τον μ/σ AC1020

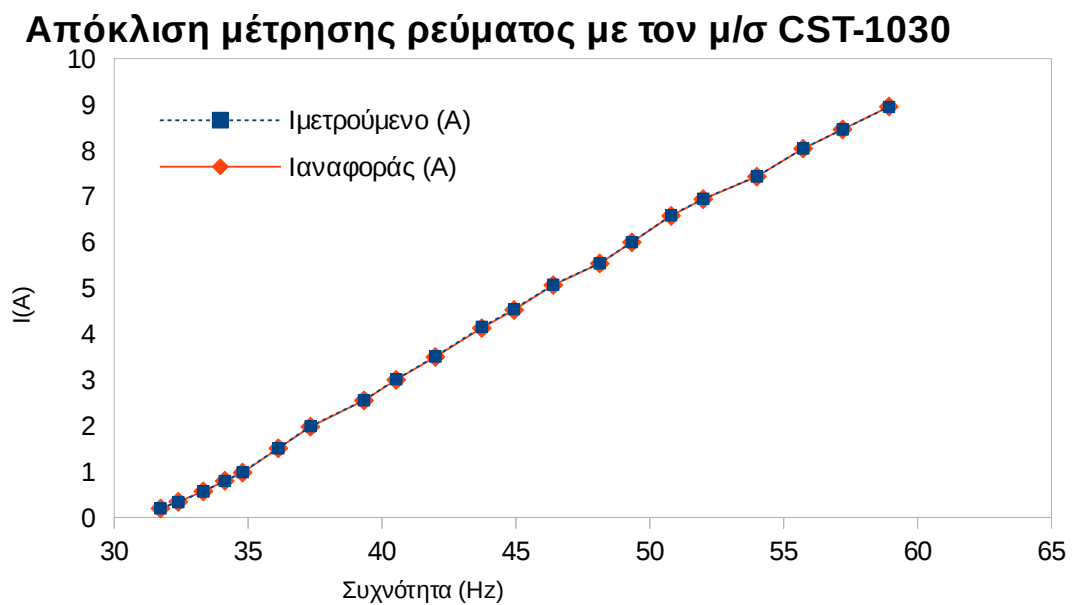
Για τον μετασχηματιστή CST-1030, πραγματοποιήθηκε μέτρηση χρησιμοποιώντας αντίσταση μέτρησης $R_b = 30\Omega$, διαμορφώνοντας την πλήρη κλίμακα εισόδου στο μετρητικό στα 11.7851A. Το ελάχιστο δυναμικό εύρος επιτρεπόμενης μέτρησης είναι τα 0.0235702A

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 9.2 και στο διάγραμμα (159)

Πίνακας 9.2: Μετρήσεις ρεύματος με τον CST-1030 μετασχηματιστή

N	Ιαναφοράς (A)	Ιμετρούμενο (A)	Σφάλμα (%)	Απόκλιση	f (Hz)
1	0.1930	0.1946	0.8187	0.0016	31.7333
2	0.3381	0.3326	1.6326	-0.0055	32.4000
3	0.5636	0.5627	0.1597	-0.0009	33.3333
4	0.7952	0.7929	0.2892	-0.0023	34.1333
5	0.9739	0.9849	1.1295	0.0110	34.8000
6	1.5053	1.5072	0.1262	0.0019	36.1333
7	1.9744	1.9867	0.6230	0.0123	37.3333

8	2.5472	2.5533	0.2395	0.0061	39.3333
9	2.9944	3.0077	0.4442	0.0133	40.5333
10	3.4955	3.5076	0.3462	0.0121	42.0000
11	4.1248	4.1493	0.5940	0.0245	43.7333
12	4.5186	4.5384	0.4382	0.0198	44.9333
13	5.0604	5.0701	0.1917	0.0097	46.4000
14	5.5342	5.5363	0.0379	0.0021	48.1333
15	5.9950	5.9962	0.0200	0.0012	49.3333
16	6.5721	6.5824	0.1567	0.0103	50.8000
17	6.9366	6.9411	0.0649	0.0045	52.0000
18	7.4266	7.4315	0.0660	0.0049	54.0000
19	8.0389	8.0398	0.0112	0.0009	55.7333
20	8.4547	8.4555	0.0095	0.0008	57.2000
21	8.9533	8.9470	0.0704	-0.0063	58.9333



Εικόνα 9.4: Απόκλιση μέτρησης ρεύματος με τον μ/σ CST-1030

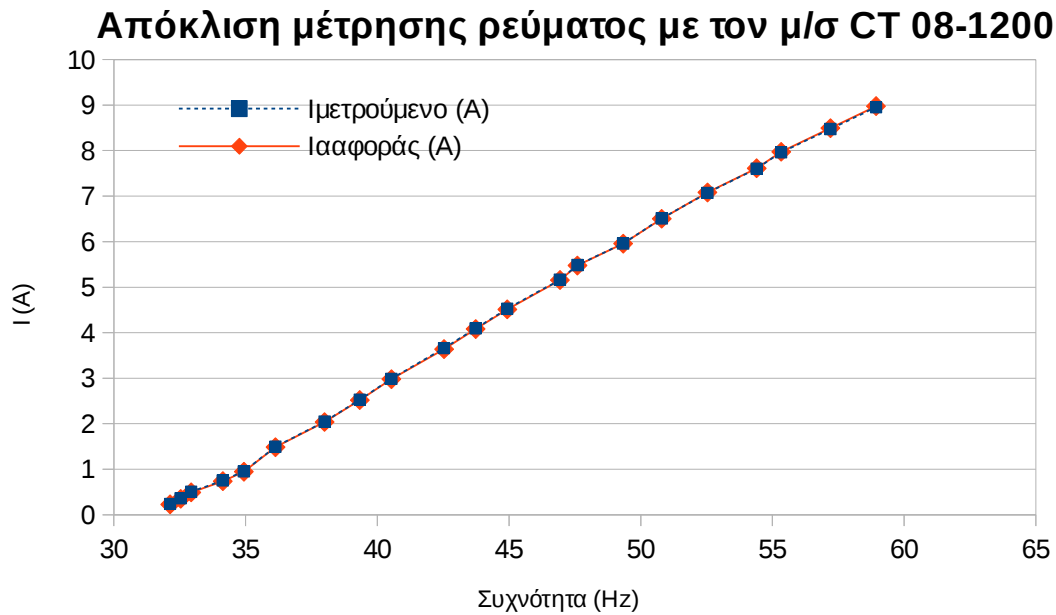
Για τον μετασχηματιστή CT-08-1200, πραγματοποιήθηκε μέτρηση χρησιμοποιώντας αντίσταση μέτρησης $R_b = 40\Omega$, διαμορφώνοντας την πλήρη κλίμακα εισόδου στο μετρητικό στα 10.6160. Το ελάχιστο δυναμικό εύρος επιτρεπόμενης μέτρησης είναι τα 0.2121A.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 9.3 και στο διάγραμμα (9.5).

Πίνακας 9.3: Μετρήσεις ρεύματος με τον CT-08-1200 μετασχηματιστή

N	Ιαναφοράς (A)	Ιμετρούμενο (A)	Σφάλμα (%)	Απόκλιση	f (Hz)
1	0.2285	0.2385	4.4036	0.0101	32.1333
2	0.3490	0.3599	3.1436	0.0110	32.5333
3	0.4910	0.5037	2.5866	0.0127	32.9333
4	0.7378	0.7524	1.9789	0.0146	34.1333
5	0.9453	0.9520	0.7088	0.0067	34.9333
6	1.4860	1.4953	0.6258	0.0093	36.1333
7	2.0374	2.0446	0.3534	0.0072	38.0000
8	2.5190	2.5285	0.3771	0.0095	39.3333
9	2.9788	2.9862	0.2484	0.0074	40.5333
10	3.6382	3.6599	0.5964	0.0217	42.5333
11	4.0816	4.0926	0.2695	0.0110	43.7333
12	4.5132	4.5255	0.2725	0.0123	44.9333
13	5.1568	5.1620	0.1008	0.0052	46.9333
14	5.4756	5.4855	0.1808	0.0099	47.6000
15	5.9564	5.9595	0.0520	0.0031	49.3333
16	6.5023	6.5097	0.1138	0.0074	50.8000
17	7.0794	7.0719	0.1059	-0.0075	52.5333
18	7.6113	7.6038	0.0985	-0.0075	54.4000
19	7.9731	7.9615	0.1455	-0.0116	55.3333

20	8.4929	8.4733	0.2308	-0.0196	57.2000
21	8.9780	8.9535	0.2729	-0.0245	58.9333



Εικόνα 9.5: Απόκλιση μέτρησης ρεύματος με τον μ/σ CT 08-1200

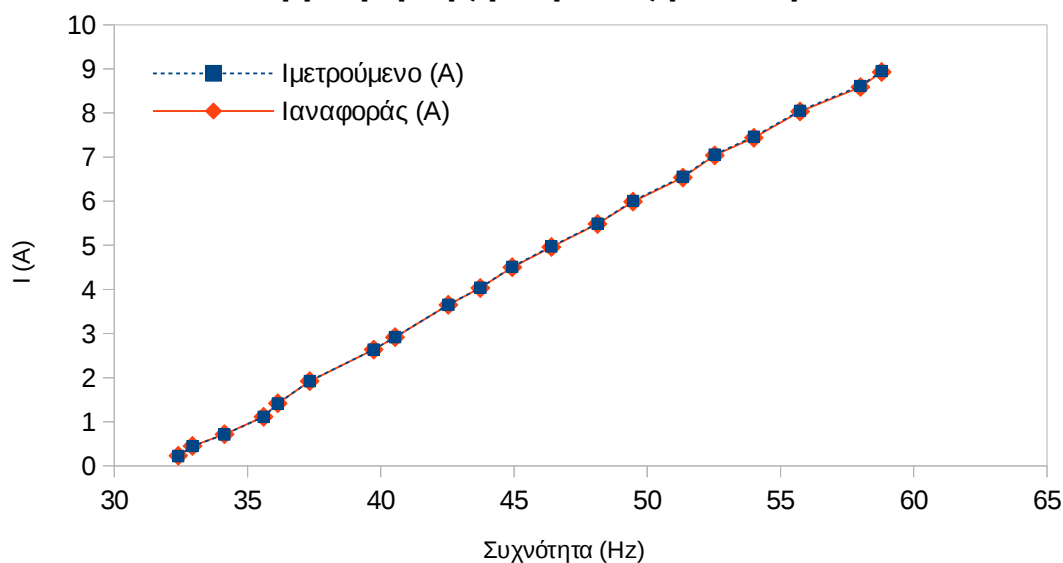
Για τον μετασχηματιστή CS2106L, πραγματοποιήθηκε μέτρηση χρησιμοποιώντας αντίσταση μέτρησης $R_b = 20\Omega$, διαμορφώνοντας την πλήρη κλίμακα εισόδου στο μετρητικό στα 8.8388A. Το ελάχιστο δυναμικό εύρος επιτρεπόμενης μέτρησης είναι τα 0.01767A.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 9.4 και στο διάγραμμα 9.6.

Πίνακας 9.4: Μετρήσεις ρεύματος με τον CS2106L μετασχηματιστή

N	Ιαναφοράς (A)	Ιμετρούμενο (A)	Σφάλμα (%)	Απόκλιση	f (Hz)
1	0.2282	0.2205	3.3742	-0.0077	32.4000
2	0.4496	0.4479	0.3781	-0.0017	32.9333
3	0.7168	0.7116	0.7254	-0.0052	34.1333
4	1.1117	1.1105	0.1079	-0.0012	35.6000
5	1.4179	1.4107	0.5078	-0.0072	36.1333
6	1.9180	1.9219	0.2033	0.0039	37.3333
7	2.6354	2.6360	0.0228	0.0006	39.7333
8	2.9177	2.9186	0.0308	0.0009	40.5333
9	3.6498	3.6504	0.0164	0.0006	42.5333
10	4.0311	4.0373	0.1538	0.0062	43.7333
11	4.5017	4.5111	0.2088	0.0094	44.9333
12	4.9616	4.9765	0.3003	0.0149	46.4000
13	5.4827	5.4904	0.1404	0.0077	48.1333
14	5.9909	6.0059	0.2504	0.0150	49.4667
15	6.5359	6.5553	0.2968	0.0194	51.3333
16	7.0392	7.0595	0.2884	0.0203	52.5333
17	7.4391	7.4608	0.2917	0.0217	54.0000
18	8.0340	8.0514	0.2166	0.0174	55.7333
19	8.5883	8.6141	0.3004	0.0258	58.0000
20	8.9276	8.9498	0.2487	0.0222	58.8000

Απόκλιση μέτρησης ρεύματος με τον μ/σ CS2106L



Εικόνα 9.6: Απόκλιση μέτρησης ρεύματος με τον μ/σ CS2106L

Για τον μετασχηματιστή CT05-500, πραγματοποιήθηκε μέτρηση χρησιμοποιώντας αντίσταση μέτρησης $R_b = 20\Omega$, διαμορφώνοντας την πλήρη κλίμακα εισόδου στο μετρητικό στα 8.8388A. Το ελάχιστο δυναμικό εύρος επιτρεπόμενης μέτρησης είναι τα 0.01767A.

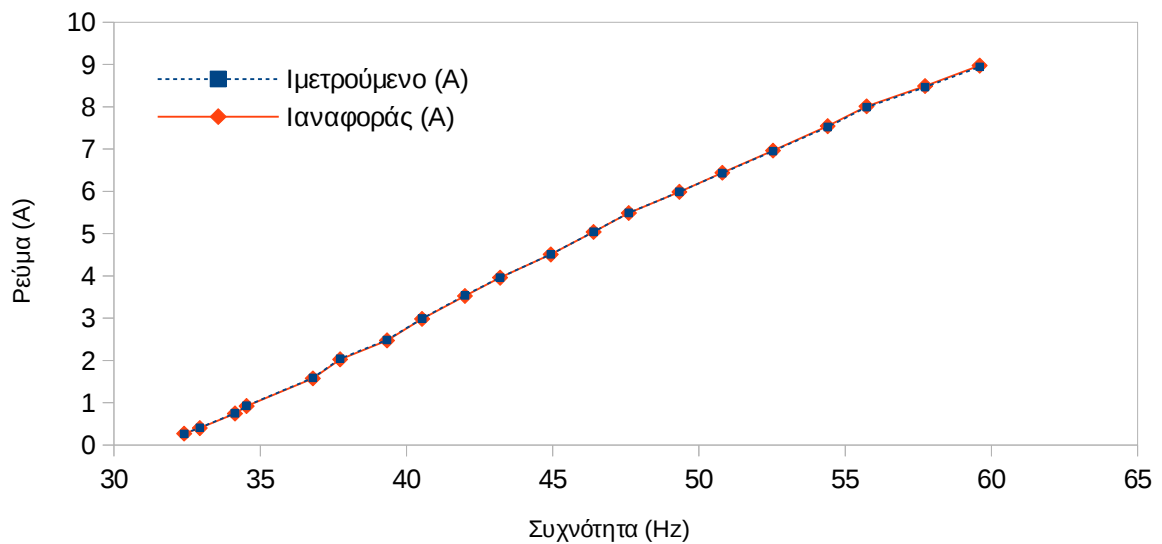
Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 9.5 και στο διάγραμμα 9.7

Πίνακας 9.5: Μετρήσεις ρεύματος με τον μετασχηματιστή CT05-500

N	Ιαναφοράς (A)	Ιμετρούμενο (A)	Σφάλμα (%)	Απόκλιση	f(Hz)
1	0.2683	0.2660	0.8720	-0.0023	32.4000
2	0.4012	0.4101	2.2183	0.0089	32.9333
3	0.7444	0.7517	0.9807	0.0073	34.1333
4	0.9212	0.9291	0.8631	0.0080	34.5333
5	1.5760	1.5863	0.6536	0.0103	36.8000
6	2.0263	2.0430	0.8242	0.0167	37.7333
7	2.4735	2.4839	0.4205	0.0104	39.3333
8	2.9833	2.9914	0.2715	0.0081	40.5333

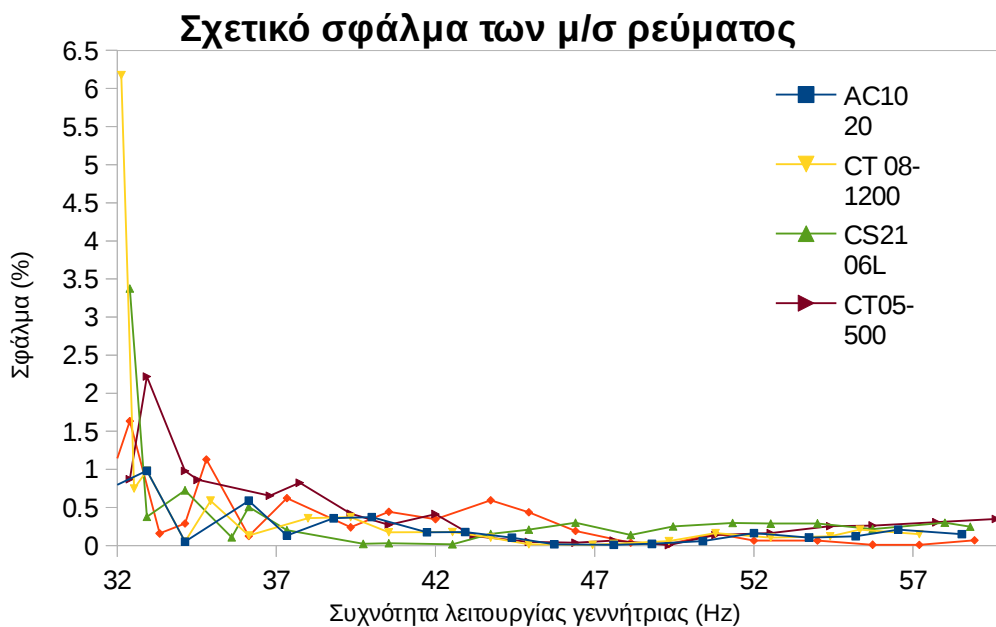
9	3.5262	3.5408	0.4140	0.0146	42.0000
10	3.9581	3.9631	0.1263	0.0050	43.2000
11	4.5075	4.5097	0.0488	0.0022	44.9333
12	5.0400	5.0419	0.0377	0.0019	46.4000
13	5.4866	5.4903	0.0674	0.0037	47.6000
14	5.9877	5.9874	0.0050	-0.0003	49.3333
15	6.4393	6.4303	0.1398	-0.0090	50.8000
16	6.9631	6.9518	0.1623	-0.0113	52.5333
17	7.5408	7.5216	0.2546	-0.0192	54.4000
18	8.0105	7.9894	0.2634	-0.0211	55.7333
19	8.4901	8.4641	0.3062	-0.0260	57.7333
20	8.9738	8.9424	0.3499	-0.0314	59.6000

Απόκλιση μέτρησης ρεύματος με τον μ/σ CT 05-500



Εικόνα 9.7: Απόκλιση μέτρησης ρεύματος με τον μ/σ CT 05-500

Όπως παρατηρούμε από την εικόνα (9.8) τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά και εντός των προδιαγραφών του μετρητικού, για σφάλμα 0,5% στα περισσότερες τιμές του ρεύματος. Σε πολύ χαμηλές συχνότητες, παρατηρούνται σε ορισμένους μετασχηματιστές μεγάλα σφάλματα. Αυτό οφείλεται στην μη γραμμικότητά τους σε πολύ χαμηλά ρεύματα και στο γεγονός ότι σε κάποιες περιπτώσεις στο ότι η τιμή της μέτρησης ήταν εκτός του εύρους βαθμονόμησης.



Εικόνα 9.8: Σύγκριση σφαλμάτων μετασχηματιστών

Μετά την περάτωση των πειραμάτων αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματιστής AC1020, λόγω του ότι παρουσιάζει

- Καλύτερη ακρίβεια
- Χαμηλό κόστος
- Επαρκή διατομή (9.5mm) για να περάσουν οι αγωγοί του ρεύματος.

9.2 Εργαστηριακές μετρήσεις φασικής τάσης

Η μέτρηση της τάσης μίας φάσης του κυκλώματος, όπως αναφέραμε, έγινε στο εργαστήριο με τη βοήθεια αυτο-μετασχηματιστή. Εκτελέστηκαν δύο πειράματα με διαφορετικά εύρη μετρήσεων. Ένα για 8V έως 30V και ένα για 8V έως 60V. Η διάκριση αυτή έγινε για να καλυφθούν οι περιπτώσεις σύνδεσης της ανεμογεννήτριας τόσο σε φασική τάση όσο και σε πολική. Η ελάχιστη τιμή των 8V, επιλέχθηκε γιατί είναι μέσα στο όρια της περιοχής μέτρησης της γεννήτριας, δηλαδή πριν από το cut-in.

Τα αποτελέσματα για τις δύο διατάξεις φαίνονται στους πίνακες 9.6 και 9.7 και η σύγκριση της πραγματικής και τις μετρούμενης τιμής στα διαγράμματα (9.9) και (9.10).

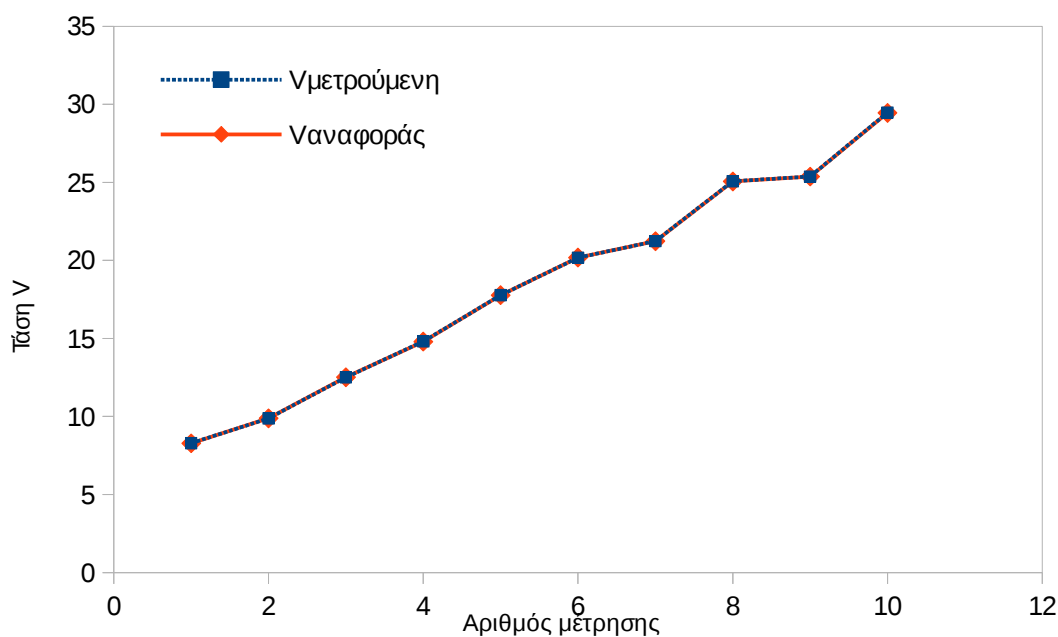
Πίνακας 9.6: Μετρήσεις μίας φάσης με μέγιστη τάση 30 V.

N	Ναναφοράς (V)	Νμετρούμενη (V)	Σφάλμα %	Απόκλιση
1	8.280	8.290	0.121	0.01
2	9.879	9.876	0.030	-0.003
3	12.511	12.505	0.048	-0.006
4	14.800	14.808	0.054	0.008
5	17.769	17.770	0.006	0.001
6	20.178	20.171	0.035	-0.007
7	21.229	21.232	0.014	0.003
8	25.062	25.068	0.024	0.006
9	25.368	25.376	0.032	0.008
10	29.454	29.475	0.071	0.021

Πίνακας 9.7: Μετρήσεις μίας φάσης με μέγιστη τάση 30 V.

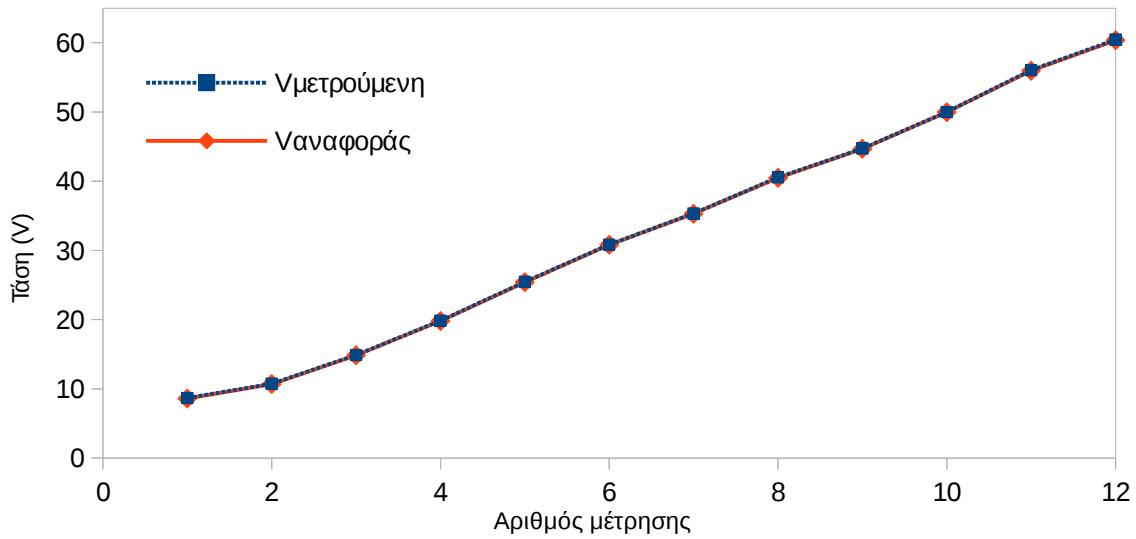
N	Ναναφοράς (V)	Νμετρούμενη (V)	Σφάλμα %	Απόκλιση
1	8.613	8.687	0.8591663764	0.074
2	10.711	10.744	0.3080944823	0.033
3	14.859	14.892	0.2220876237	0.033
4	19.812	19.851	0.1968503937	0.039
5	25.416	25.454	0.1495121184	0.038
6	30.807	30.852	0.1460706982	0.045
7	35.3	35.339	0.1104815864	0.039
8	40.479	40.56	0.2001037575	0.081
9	44.686	44.726	0.0895134942	0.04
10	49.978	49.998	0.0400176077	0.02
11	55.96	56.05	0.1608291637	0.09
12	60.381	60.449	0.1126182077	0.068

Απόκλιση μέτρησης φασικής τάσης



Εικόνα 9.9: Απόκλιση μέτρησης φασικής τάσης με $V_{max} = 30V$

Απόκλιση μέτρησης φασικής τάσης



Εικόνα 9.10: Απόκλιση μέτρησης φασικής τάσης με $V_{max} = 60V$

9.3 Μετρήσεις τάσης μίας φάσης και συχνότητας της γεννήτριας

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις τόσο της τάσης μίας φάσης της γεννήτριας όσο και της αντίστοιχης συχνότητας. Οι μετρήσεις έγιναν πριν από το cut-in της γεννήτριας μέχρι το μέγιστο ρεύμα των 9A.

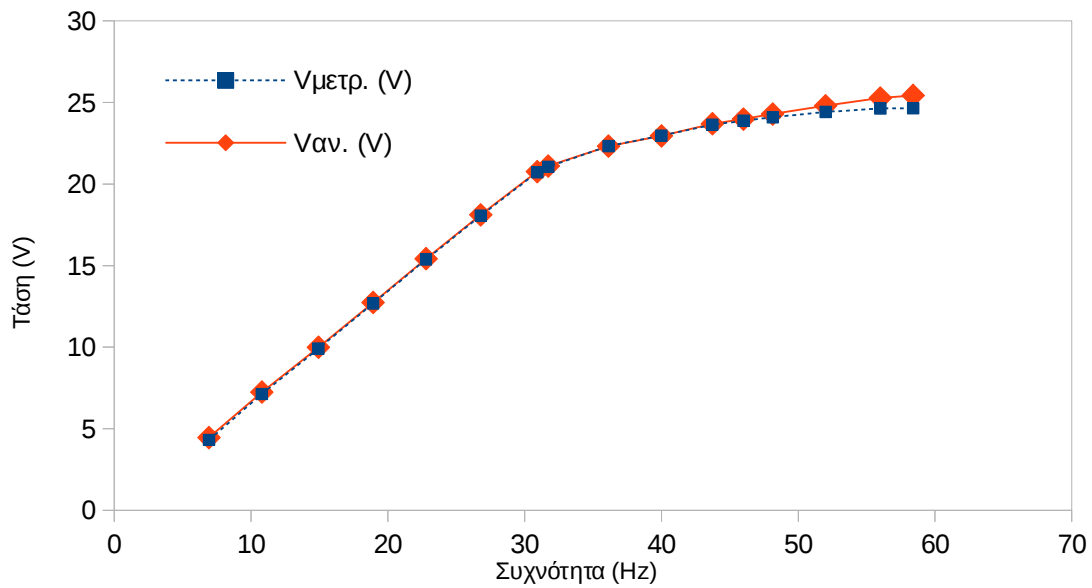
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.8.

Πίνακας 9.8: Αποτελέσματα μέτρησης τάσης και συχνότητας στη γεννήτρια

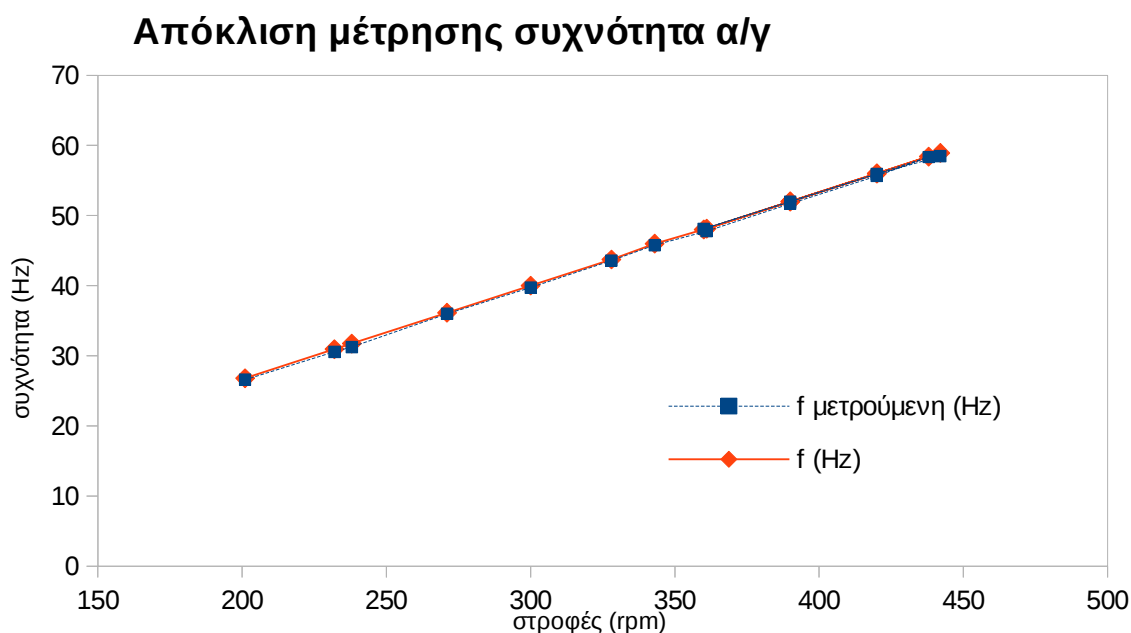
n(rpm)	Van. (V)	Νμετρ. (V)	Σφάλμα %	Φαν. (Hz)	Φμετρ. (Hz)	Σφάλμα (%)
52	4.4594	4.3158	3.2202	-	-	-
81	7.2457	7.1259	1.6534	-	-	-
112	9.9886	9.9112	0.7749	-	-	-
142	12.7433	12.6826	0.4763	-	-	-
171	15.4249	15.3725	0.3397	-	-	-
201	18.1102	18.0567	0.2954	26.8	26.6	0.7836

232	20.7628	20.7235	0.1893	30.9	30.8	0.5603
238	21.0992	21.0558	0.2057	31.7	31.2	1.5546
271	22.3215	22.3259	0.0197	36.1	36.0	0.4244
300	22.9525	22.9651	0.0549	40.0	39.7	0.7000
328	23.6921	23.6371	0.2321	43.7	43.6	0.3506
343	23.9814	23.8747	0.4449	46.0	45.8	0.4987
361	24.2884	24.0926	0.8061	48.1	47.8	0.7133
390	24.8023	24.4139	1.5660	52.0	51.7	0.6154
420	25.2679	24.6284	2.5309	56.0	55.7	0.6071
438	25.4249	24.6399	3.0875	58.4	58.3	0.1027

Απόκλιση μέτρησης φασικής τάσης α/γ



Εικόνα 9.11: Απόκλιση μέτρησης φασικής τάσης στην α/γ



Εικόνα 9.12: Απόκλιση μέτρησης συχνότητας στη γεννήτρια

Όπως παρατηρούμε οι τιμές της τάσης παρουσιάζουν απόκλιση μετά από την τιμή της συχνότητας των 50Hz. Αυτό συμβαίνει, λόγω των αρμονικών που προκαλεί ο ανορθωτής. Το σφάλμα προκύπτει εξαιτίας του εύρους συχνότητας μέτρησης της rms τιμής της τάσης, το οποίο περιορίζεται στα 260Hz για το ADE7758. Εξαιτίας του μεγάλου αρμονικού περιεχόμενου στην 5η τάξη των αρμονικών υπάρχει απόκλιση σε συχνότητες μεγαλύτερες των 50Hz, καθώς η 5η αρμονική βρίσκεται εκτός του εύρους των μετρήσεων.

Όσον αφορά τη μέτρηση της συχνότητας, η μέτρηση έγινε για τιμές από 25Hz και πάνω. Η τιμή αυτή είναι στα όρια για το cut-in της γεννήτριας και μας ενδιαφέρει για λόγους επίβλεψης. Στο υπόλοιπο εύρος των μετρήσεων οι τιμές απόκλισης είναι μέσα στα όρια που αναφέρει ο κατασκευαστής.

9.4 Εργαστηριακές μετρήσεις πολικών μεγεθών AC ρεύματος και τάσης

Εξαιτίας της απουσίας καλωδίου του ουδετέρου η μέτρηση του τριφασικού συστήματος γίνεται με τη σύνδεση 3 καλωδίων στο μετρητικό σύστημα. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη μέτρηση δύο πολικών τάσεων, καθώς η μία από τις τρεις φάσεις του συστήματος χρησιμοποιείται σαν αναφορά. Τα ρεύματα είναι δυνατόν να μετρηθούν κανονικά με την χρήση τριών αισθητήρων.

Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε μετρήθηκαν 2 πολικές τάσεις και δύο ρεύματα. Ο περιορισμός του αριθμού των μετρούμενων ρευμάτων έγινε για τεχνικούς λόγους.

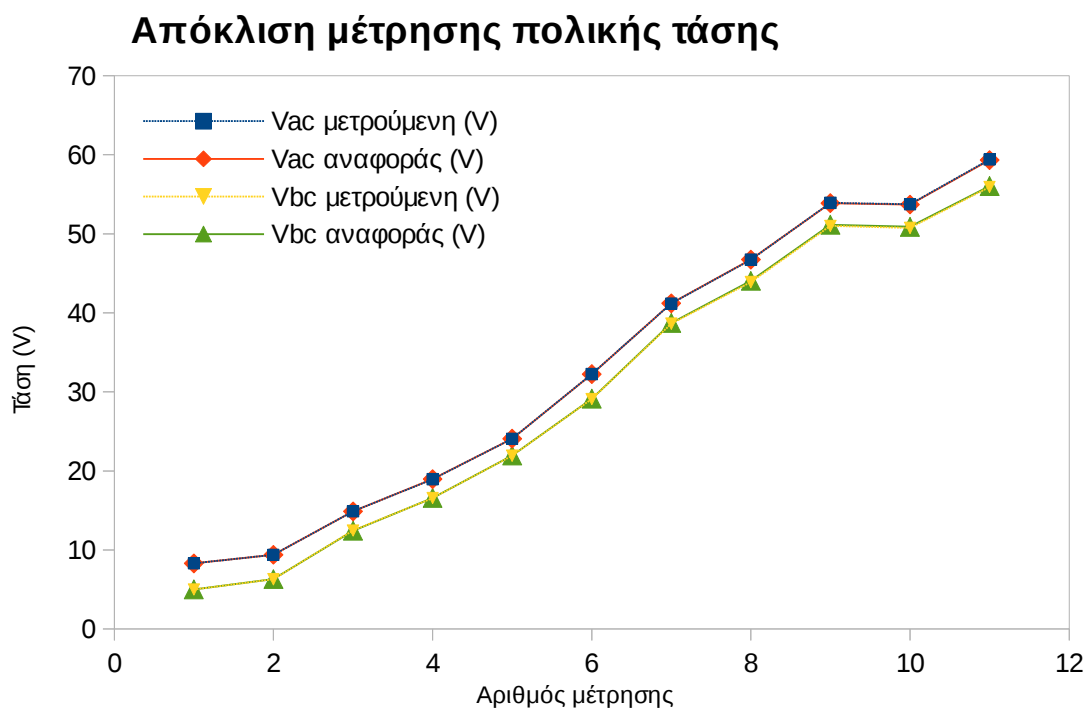
Όπως φαίνεται και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων στους πίνακες 9.9 και 9.10 και στα διαγράμματα (9.13) και (9.14) υπήρχε μεγάλη ασυμμετρία μεταξύ των φάσεων. Το εύρος των μετρήσεων ήταν 8-60V για την τάση και 0.19-5A για το ρεύμα.

Πίνακας 9.9: Πίνακας μετρήσεων πολικών τάσεων

Vac αναφοράς (V)	Vac μετρούμενη (V)	Σφάλμα Vac (%)	Vbc αναφοράς (V)	Vbc μετρούμενη (V)	Σφάλμα Vbc (%)
8.2935	8.3045	0.1327	5.0035	4.9924	0.2225
9.3846	9.3830	0.0174	6.3144	6.2967	0.2795
14.8730	14.8783	0.0353	12.4322	12.4591	0.2166
18.9581	18.9482	0.0522	16.5839	16.5660	0.1077
24.0794	24.0652	0.0588	21.9481	21.9213	0.1222
32.2455	32.2466	0.0034	29.1374	29.0843	0.1821
41.2031	41.1816	0.0523	38.7214	38.6294	0.2377
46.7397	46.7196	0.0430	44.0411	43.8858	0.3525
53.8726	53.9008	0.0524	51.1371	50.9995	0.2692
53.6921	53.7331	0.0763	50.8783	50.7331	0.2854
59.3192	59.3909	0.1209	56.0363	55.9224	0.2033

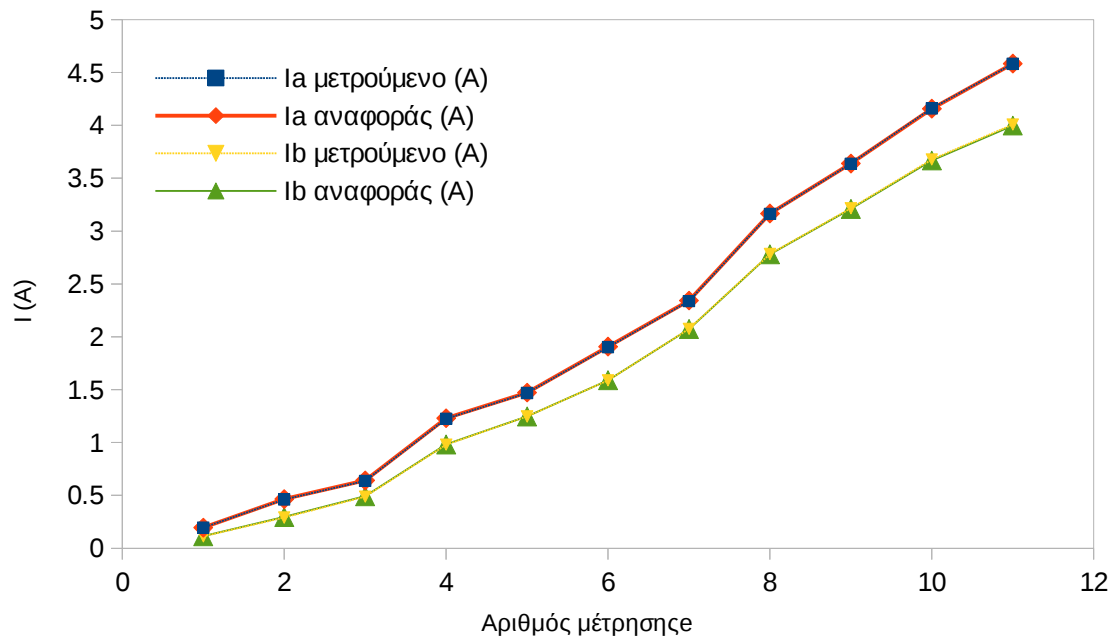
Πίνακας 9.10: Ταυτόχρονη μέτρηση 2 ρευμάτων

Ia αναφοράς (A)	Ia μετρούμενο (A)	Σφάλμα Ia (%)	Ib αναφοράς (A)	Ib μετρούμενο (A)	Σφάλμα Ib (%)
0.1951	0.1952	0.0606	0.1142	0.1128	1.2420
0.4641	0.4611	0.6462	0.2953	0.2907	1.5576
0.6407	0.6371	0.5655	0.4918	0.4875	0.8761
1.2298	1.2249	0.3952	0.9815	0.9799	0.1649
1.4718	1.4686	0.2146	1.2470	1.2461	0.0698
1.9070	1.9018	0.2725	1.5894	1.5880	0.0855
2.3431	2.3376	0.2355	2.0731	2.0748	0.0841
3.1659	3.1629	0.0957	2.7803	2.7828	0.0892
3.6390	3.6372	0.0505	3.2096	3.2158	0.1927
4.1579	4.1607	0.0663	3.6676	3.6769	0.2546
4.5838	4.5816	0.0469	3.9977	4.0083	0.2643



Εικόνα 9.13: Απόκλιση μετρήσεων πολικών τάσεων

Απόκλιση μέτρησης δύο ρευμάτων



Εικόνα 9.14: Απόκλιση μετρήσεων 2 ρευμάτων

Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα, τα σφάλματα είναι μέσα στα όρια των προδιαγραφών του μετρητικού.

9.5 Μέτρηση μονοφασικής ισχύος

Η μέτρηση της μονοφασικής ισχύος έγινε στο εργαστήριο κάτω από τις συνθήκες εκτέλεση των πειραμάτων μονοφασικής μέτρησης τάσης. Το εύρος μέτρησης αφορά ισχύ από 36W έως 650W.

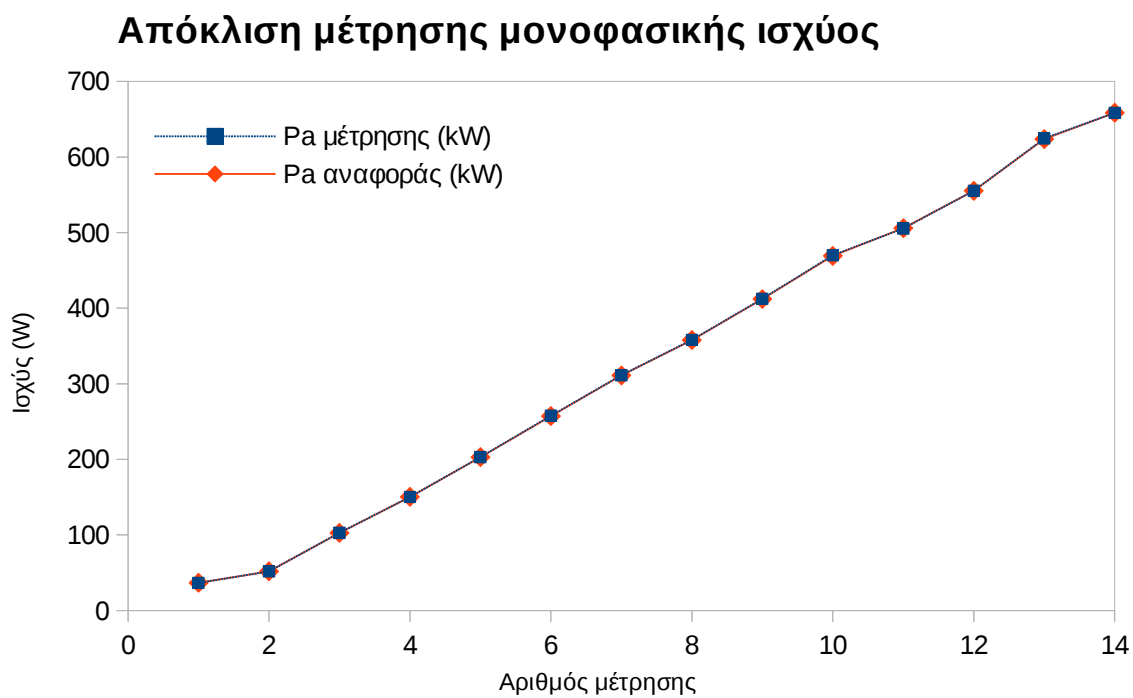
Το ADE7758 για τον υπολογισμό της ισχύος διαβάζει τη στιγμιαία ισχύ και την ολοκληρώνει σε μία περίοδο κύκλων ρολογιού, εξάγοντας ουσιαστικά ενέργεια. Ο χρόνος ολοκλήρωσης που επιλέχθηκε είναι $t=5s$.

Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στον πίνακα 9.11 και στο διάγραμμα (9.15)

Πίνακας 9.11: Μέτρηση μονοφασικής ισχύος

Pa αναφοράς (kW)	Pa μέτρησης (kW)	Σφάλμα Pa (%)	Απόκλιση
0.0367	0.03648	0.5994	-0.00022
0.05177	0.05164	0.2511	-0.00013

0.10265	0.10273	0.0779	0.00008
0.15021	0.1502	0.0066	-0.00001
0.20286	0.20299	0.0640	0.00013
0.25715	0.2576	0.1749	0.00045
0.311	0.31138	0.1221	0.00038
0.35789	0.35799	0.0279	0.0001
0.41206	0.41242	0.0873	0.00036
0.46904	0.46996	0.1961	0.00092
0.50577	0.50541	0.0711	-0.00036
0.55515	0.55522	0.0126	0.00007
0.62374	0.62448	0.1186	0.00074
0.65844	0.65841	0.0045	-0.00003



Εικόνα 9.15: Απόκλιση μέτρησης μονοφασικής ισχύος

9.6 Μέτρηση Τριφασικής ισχύος

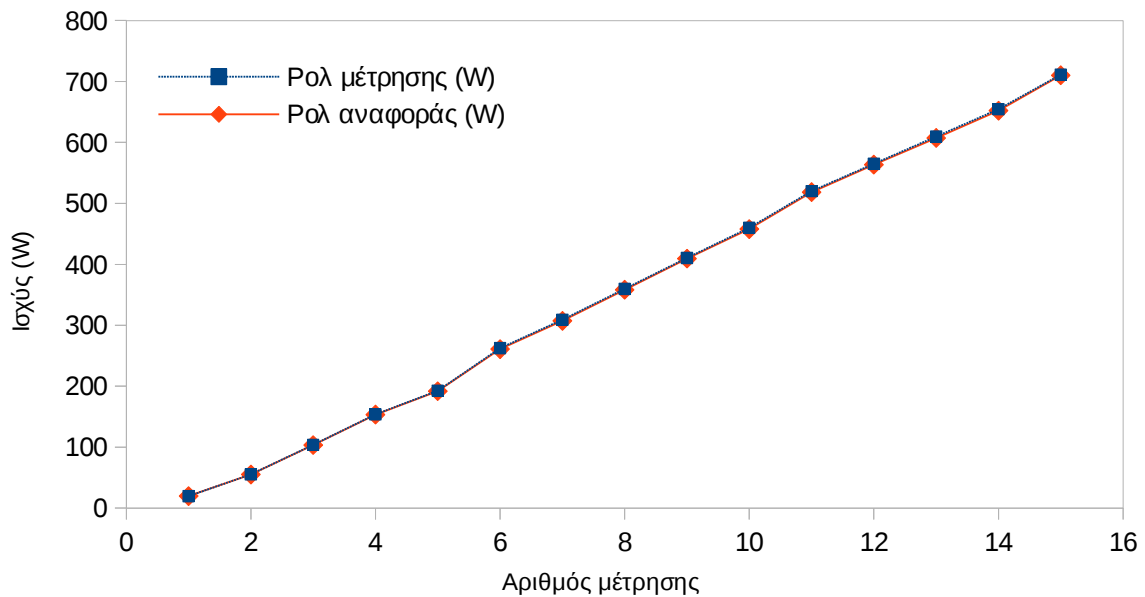
Για την τριφασική ισχύ, όπως αναφέραμε, μπορούμε να μετρήσουμε μόνο τη συνολική. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε κάτω από εργαστηριακές συνθήκες και η σύνδεση ήταν με την διάταξη μέτρηση τριφασικής ισχύς τριών καλωδίων.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 9.12 και στο διάγραμμα (9.16).

Πίνακας 9.12: Αποτελέσματα μέτρησης τριφασικής ισχύος με την διάταξη τριών καλωδίων

Ρολ αναφοράς (W)	Ρολ μέτρησης (W)	Σφάλμα (%)	Απόκλιση
19.475	19.548	0.3748	0.073
55.075	55.298	0.4049	0.223
103.367	103.7673	0.3872	0.4003
153.333	153.745	0.2686	0.412
191.832	192.59	0.3951	0.758
260.96	262.33	0.5249	1.37
307.3	309.05	0.5694	1.75
358.26	359.69	0.3991	1.43
409.34	410.42	0.2638	1.08
457.73	459.8	0.4522	2.07
518.5	520.09	0.3066	1.59
563.48	565	0.2697	1.52
607.35	609.7	0.3869	2.35
652.27	654.59	0.35568	2.32

Απόκλιση μέτρησης 3φασικής ισχύος



Εικόνα 9.16: Απόκλιση μέτρησης 3φασικής ισχύος με την διάταξη τριών καλωδίων

Όπως παρατηρούμε το σφάλμα είναι πολύ χαμηλό. Παρατηρούμε μία μικρή αύξηση του σφάλματος σε σχέση με την μέτρηση μονοφασικής ισχύος, η οποία οφείλεται στο αλγεβρικό άθροισμα των ισχύων κάθε φάσης.

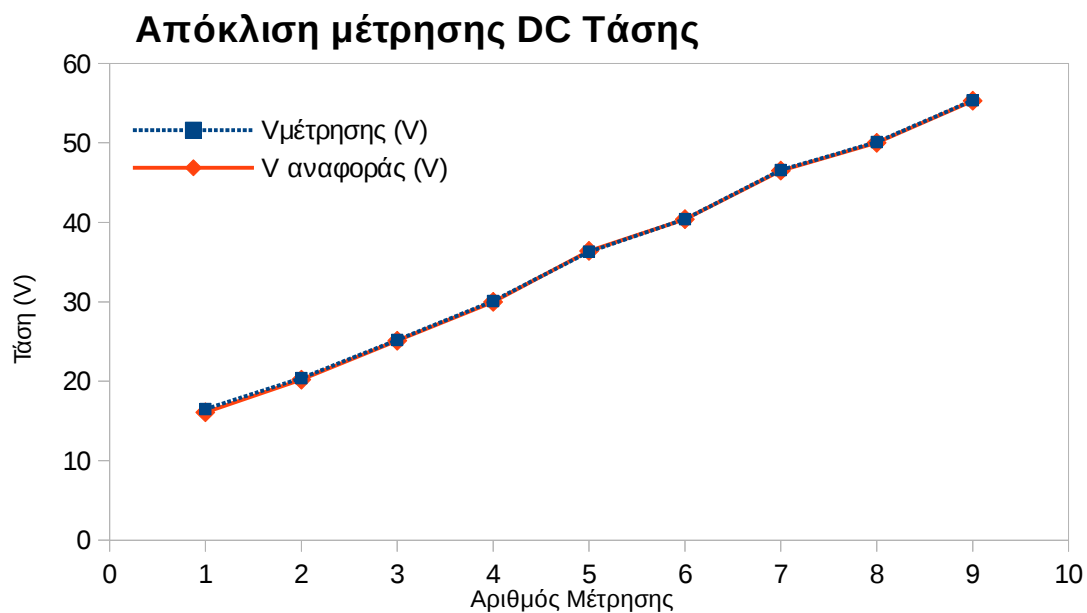
9.7 Μέτρηση συνεχούς τάσης και ρεύματος

Όσον αφορά την μέτρηση της DC τάσης, οι μετρήσεις έγιναν σε εύρος 16-60V ώστε να καλυφθεί η περίπτωση σύνδεσης του συστήματος με 24V μπαταρίες και 48V μπαταρίες.

Τα αποτελέσματα από τη μέτρηση συνεχούς τάσης και ρεύματος παρουσιάζονται στον πίνακα 9.13.

Πίνακας 9.13: Αποτελέσματα μετρήσεων Vdc, Idc

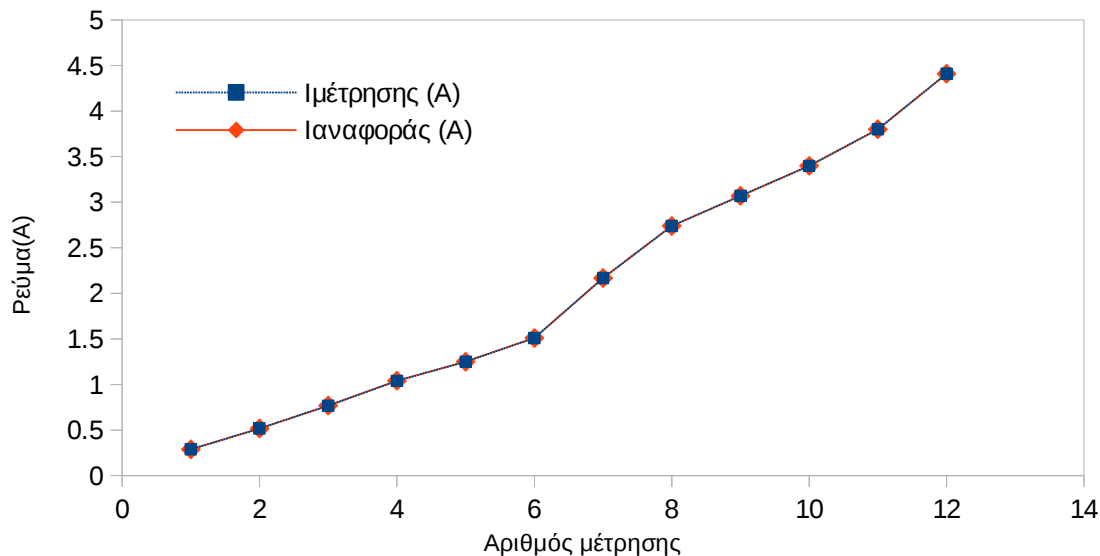
V αναφοράς (V)	Vμέτρησης (V)	Σφάλμα (%)	Ιαναφοράς (A)	Ιμέτρησης (A)	Σφάλμα(%)
16.1	16.5	2.4845	0.748	0.768	2.6738
20.2	20.4	0.9901	1.03	1.04	0.9709
25.1	25.2	0.3984	1.25	1.25	0.0000
30	30.1	0.3333	1.51	1.51	0.0000
36.4	36.3	0.2747	2.17	2.168	0.0922
40.4	40.4	0.0000	2.74	2.74	0.0000
46.5	46.58	0.1720	3.07	3.07	0.0000
50	50.1	0.2000	3.4	3.399	0.0294
55.3	55.35	0.0904	3.79	3.8	0.2639
60	60.1	0.1667	4.4	4.41	0.2273



Εικόνα 9.17: Απόκλιση μέτρησης dc τάσης

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι εντός των προδιαγραφών του κατασκευαστή.

Απόκλιση μέτρησης DC ρεύματος



Εικόνα 9.18: Απόκλιση μέτρησης DC ρεύματος

9.8 Μέτρηση συχνότητας – ταχύτητας ανέμου

Για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου μετρήθηκε η παραγόμενη συχνότητα της παλμογεννήτριας. Η αναγωγή σε τιμές ταχύτητας έγινε μέσω του βαθμονομημένου ανεμομομέτρου, Vector A100K της Windspeed, του οποίου η γραμμική συνάρτηση είναι $u = 0.05f + 0.25$. Η διακρίβωση γίνεται για μετρήσεις από 4-16 m/s.

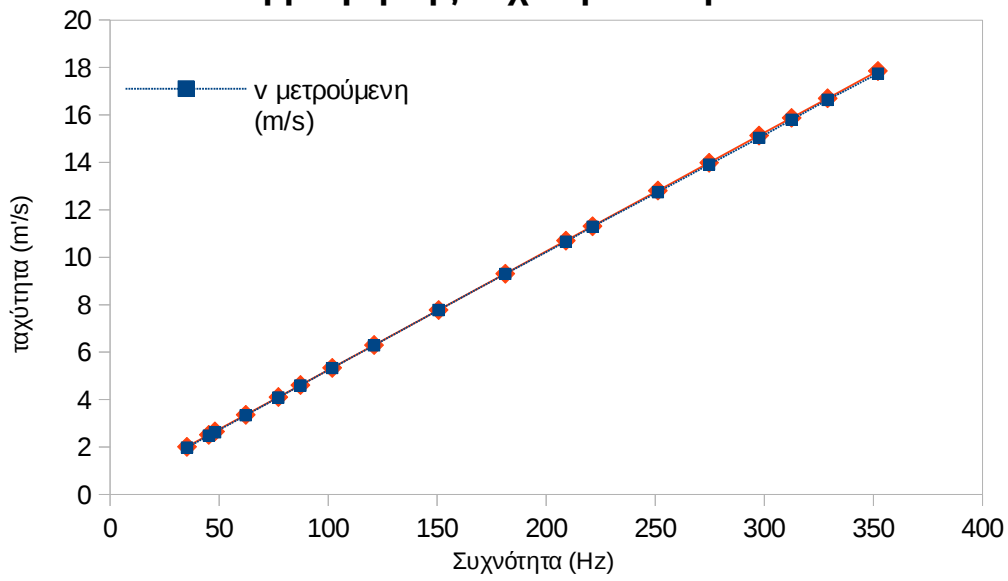
Στον πίνακα 9.14 και το διάγραμμα (9.19) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και το αντίστοιχο σφάλμα των μετρήσεων.

Πίνακας 9.14: Αποτελέσματα μέτρησης ταχύτητας ανέμου

f (Hz)	v (m/s)	v (ic) (m/s)	error(%)
35.2700	2.0135	1.9815	1.5893
45.2900	2.5145	2.4881	1.0499
48.1000	2.6550	2.6273	1.0433
62.1900	3.3595	3.3361	0.6965
77.1600	4.1080	4.0881	0.4844

87.2600	4.6130	4.5971	0.3447
101.8000	5.3400	5.3311	0.1667
121.0000	6.3000	6.2861	0.2206
150.6000	7.7800	7.7741	0.0758
181.2000	9.3100	9.3001	0.1063
209.0000	10.7000	10.6611	0.3636
221.2000	11.3100	11.2891	0.1848
251.2000	12.8100	12.7461	0.4988
274.7000	13.9850	13.9101	0.5356
297.6000	15.1300	15.0311	0.6537
312.5000	15.8750	15.7961	0.4970
329.0000	16.7000	16.6381	0.3707
352.1000	17.8550	17.7421	0.6323

Απόκλιση μέτρησης ταχύτητα ανέμου



Εικόνα 9.19: Απόκλισης μέτρησης ταχύτητας ανέμου

Τα αποτελέσματα και η ακρίβεια τους είναι πολύ ικανοποιητικά για την εφαρμογή μας.

Συμπεράσματα και βελτιωτικές προτάσεις

Σκοπός της εργασίας ήταν η σχεδίαση και κατασκευή ενός μετρητικού συστήματος ανοιχτού κώδικα για σύνδεση σε εφαρμογές μικρών γεννητριών.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε ο σχεδιασμός μίας πρότυπης αναπτυξιακής πλακέτας στην οποία τοποθετήθηκαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την μέτρηση των μεγεθών των ανεμογεννητριών. Η σχεδίαση έγινε με γνώμονα την ευελιξία και την πρόβλεψη όσο των δυνατών περισσότερων διατάξεων.

Στο κομμάτι του λογισμικού υλοποιήθηκαν οι βασικές διαδικασίες μέτρησης και βαθμονόμησης του συνολικού μετρητικού συστήματος. Η υλοποίηση του κομματιού αυτού έγινε με βάση τις ανάγκες των ανεμογεννητριών και την δυνατότητα μελλοντικών βελτιώσεων και εξελίξεων στο κομμάτι των διεπαφών και της ανάπτυξης στην κατεύθυνση της λογικής χρήσης ενός μικρού υπολογιστή όσο και ενός μικροελεγκτή.

Στα πειράματα που διεξήχθησαν μετρήθηκε με ακρίβεια εντός των ορίων των κατασκευαστών η AC τάση και το ρεύμα, η ενεργός ισχύς, η DC τάση και το DC ρεύμα καθώς και η ταχύτητα του ανέμου.

Ορισμένες προτάσεις που αφορούν τις βελτιώσεις που αφορούν τους υπάρχοντες περιορισμούς που είχαμε καθώς και την περαιτέρω ανάπτυξη τη εφαρμογής είναι:

1. Η βελτίωση και επέκταση της διαδικασίας των μετρήσεων. Αυτό αφορά στην εναρμόνιση της καταγραφής, της αποθήκευσης και της παρουσίασης των μετρήσεων σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.
2. Η διεξαγωγή περισσότερων δοκιμών στο πεδίο της ανεμογεννήτριας για εξακρίβωση της αντοχής και της σταθερότητας του καταγραφικού συστήματος.
3. Η επέκταση της υλοποίησης μέτρησης της ισχύος. Αυτό αφορά πειραματικές μετρήσεις στην ανεμογεννήτρια για την διακρίβωση της ανακρίβειας της μέτρησης ισχύος τόσο για την άεργο όσο και για την φαινόμενη ισχύ. Παράλληλα με αυτή τη διαδικασία, είναι δυνατόν να εξεταστεί και η αξιοπιστία του συστήματος στην εξαγωγή του συντελεστή ισχύος.
4. Η περαιτέρω μελέτη και δοκιμή στην μέτρηση της τάσης για συχνότητες που ξεπερνάνε τα 50-55Hz, που είναι το όριο για την μέτρηση της 5ης αρμονικής. Προτείνεται η μελέτη αναβάθμισης της εφαρμογής με την χρήση ενός ολοκληρωμένου με μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων της RMS τιμής της τάσης.

5. Η σύνδεση των αισθητήρων θερμοκρασίας, διεύθυνσης ανέμου και ατμοσφαιρικής πίεσης και η δοκιμή τους σε πραγματικές συνθήκες. Επίσης, προτείνεται η υλοποίηση δεύτερου τρόπου μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου και σύγκρισης με την υπάρχουσα υλοποίηση.
6. Η δημιουργία διεπαφής γραφικού περιβάλλοντος για την παρουσίαση των μετρήσεων. Η υλοποίηση της εφαρμογής στην πλατφόρμα του Raspberry Pi, δίνει τη δυνατότητα για εύκολη ανάπτυξη ενός τέτοιου προγράμματος. Γενικότερα, οι δυνατότητες της πλατφόρμας του Raspberry προσφέρουν τη ευελιξία για μεγαλύτερη ανάπτυξη των διεπαφών του συστήματος.
7. Η ανάπτυξη της διαδραστικότητας της εφαρμογής με το χρήστη με την χρήση διάφορων περιφερειακών συσκευών.
8. Η αναλυτικότερη μελέτη του κόστους. Μείωση του κόστους αντικαθιστώντας στοιχεία του καταγραφέα που είναι εύκολα προς αναβάθμιση, ιδιαίτερα στο κύκλωμα τροφοδοσία. Όσον αφορά το κομμάτι της τροφοδοσίας θα μπορούσε να γίνει μελέτη τροφοδοσίας από μπαταρίες ώστε το σύστημα να είναι φορητό και να δίνεται η δυνατότητα χρήσης στο χώρο δοκιμών πριν την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας.


Παράρτημα Β : Παρουσίαση της πλατφόρμας του Raspberry Pi και Arduino

Raspberry Pi

Το Raspberry Pi είναι ένας μικρός υπολογιστής σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας. Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε από την Raspberry Pi Foundation με σκοπό την ενίσχυση της διδασκαλίας της επιστήμης των υπολογιστών σε σχολεία και αναπτυσσόμενες χώρες. Σαν συσκευή παρουσιάζει πολλές δυνατότητες, συχνά όμοιες με αυτές που εκτελούνται από έναν κανονικό ηλεκτρονικό υπολογιστή και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές και κατασκευές, που έχουν ανάγκη τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Το Raspberry Pi έχει κυκλοφορήσει σε δύο εκδόσεις (Pi 1 και Pi 2), καθώς και διάφορα μοντέλα (Model A, Model B, Model B+). Κάθε ένα από αυτά έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες τόσο ως προς το μέγεθος της μνήμης, όσο και ως προς τα περιφερειακά που μπορούν να συνδεθούν.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα διάφορα μοντέλα του Raspberry Pi μαζί με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους.

	Raspberry Pi 2	Model B+	Model A+
SoC/CPU	BCM2836 Quadcore 900 MHz ARMv7	BCM2835 700 MHz ARMv6k	BCM2835 700 MHz ARMv6k
GPU	Broadcom VideoCore IV @ 250 MHz	Broadcom VideoCore IV @ 250 MHz	Broadcom VideoCore IV @ 250 MHz
RAM	1GB	512 MB	256 MB
Storage	MicroSD	MicroSD	MicroSD
USB	4	4	1
Ethernet	1	1	0
Video output	HDMI/Composite via RCA jack	HDMI/Composite via RCA jack	HDMI/Composite via RCA jack
Audio output	3.5 mm jack	3.5 mm jack	3.5 mm jack
GPIO	40	40	40
Price	\$35	\$35	\$20

Εικόνα Β.1: Χαρακτηριστικά μοντέλων Raspberry Pi

Επεξεργαστής

Η πρώτη έκδοση του Raspberry Pi βασίζεται στο SoC BCM2835. SoC σημαίνει System on Chip και είναι μία μέθοδος στην οποία τοποθετούμε όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά στοιχεία προκειμένου να λειτουργήσει ένας υπολογιστής σε ένα μόνο ολοκληρωμένο (δηλαδή την μνήμη, τον επεξεργαστή κ.ά.). Ο πυρήνας είναι ένας απλός ARM1176JZF-S 700MHz και η Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών (Graphics Processing Unit – GPU) η VideoCore IV. Στην δεύτερη έκδοση του Raspberry χρησιμοποιείται το SoC BCM2836 με τετραπύρρηνο επεξεργαστή quad-core ARM-Cortex A-7 των 900MHz.

Στο μοντέλο A της πρώτης έκδοσης ο μνήμη SDRAM ήταν μεγέθους 256 MB την οποία μοιράζεται με την GPU. Στο μοντέλο B η μνήμη αυξήθηκε στα 512MB, ενώ η δεύτερη έκδοση διαθέτει SDRAM μεγέθους 1GB.

Τροφοδοσία

Το Raspberry χρειάζεται για την λειτουργία του τροφοδοσία 5V. Τα 1,2V που χρειάζεται ο πυρήνας του επεξεργαστή τα παίρνει από ενσωματωμένο διακόπτη στον αντίστοιχο σύνδεσμο του BCM. Αυτό αποτρέπει τις καταστροφικές συνέπειες που θα είχε για την πλατφόρμα εάν ο χρήστης ακούσια δώσει παραπάνω από 5V καθώς η τροφοδοσία παρέχεται κατευθείαν στις HDMI και USB θύρες. Η πλακέτα διαθέτει επίσης δίοδο προστασίας, ημιαγωγικό διακόπτη και σφικκτήρα τάσης.

Η κατανάλωση διαφέρει ανάλογα με τα μοντέλα και τις λειτουργίες που εκτελεί κάθε φορά η πλακέτα. Κάποιες τυπικές τιμές φαίνονται στον πίνακα παραπάνω. Για το Raspberry Pi 2 η τυπική κατανάλωση είναι 600mA, δηλαδή 3W στα 5V τροφοδοσίας. Η τροφοδοσία της πλατφόρμας επομένως κατα τη σχεδίαση της εκάστοτε εφαρμογής πρέπει να υπολογιστεί αναλόγως. Η κοινότητα του Raspberry, προτείνει ότι για εφαρμογές που χρησιμοποιούν τις θύρες USB, το τροφοδοτικό πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει τουλάχιστον 1A. Η ανεπάρκεια στην τροφοδοσία που είναι δυνατόν να προκύψει μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους που έχουν να κάνουν με τις λειτουργίες και τα περιφερειακά που χρησιμοποιεί η πλατφόρμα. Οι τρεις κυριότερες πηγές κατανάλωσης επιπλέον ισχύος είναι

- Ένα γραφικό περιβάλλον (GUI)
- USB συσκευές, καθώς και η σύνδεση Ethernet
- Η GPU

Περιφερειακά

Το BCM2836 προσφέρει ένα μεγάλο εύρος περιφερειακών που μπορούν να συνδεθούν και να

έχουν πρόσβαση στον επεξεργαστή. Αυτά είναι τα εξής

- Χρονιστές
- Ελεγκτή διακοπών
- Εισόδους/Εξόδους Γενικού Σκοπού
- Θύρες USB
- PCM / I2S
- DMA ελεγκτές
- I2C master
- I2C / SPI slave
- SPI με δυνατότητα σύνδεσης τριών συσκευών slaves.
- Pulse Width Modulation (PWM)
- Δύο σειριακές θύρες

Γενικότερα η πλατφόρμα προσφέρει την δυνατότητα σύνδεσης ηλεκτρολογίου μέσω της θύρα USB, οθόνης και κεραίας WiFi, οπότε σε ένα γενικότερο πλαίσιο καλύπτει αρκετές ανάγκες που καλύπτει και ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής. Επίσης ένα από τις πιο διαδεδομένες λειτουργίες είναι η χρήση πρόσθετης κάμερας για την λήψη φωτογραφιών και τον έλεγχο απομακρυσμένων χώρων.

Είσοδοι/Εξοδοι

Επιπρόσθετα με τις θύρες USB, Ethernet και HDMI το Raspberry προφέρει τη δυνατότητα απευθείας σύνδεσης διάφορων ηλεκτρονικών συσκευών. Αυτά μπορεί να είναι ψηφιακές εισοδοι (διακόπτες, αισθητήρες), ψηφιακές έξοδοι (φώτα, άνοιγμα και κλείσιμο κάποιου κινητήρα) και επικοινωνία μέσω χαμηλού επιπέδου πρωτόκολλα όπως το SPI, το I2C και η σειριακή. Οι συνδέσεις πραγματοποιούνται μέσω των εισόδων/εξόδων γενικού σκοπού (General Purpose Input/Output – GPIO), οι οποίες σε αντίθεση με την USB δεν είναι “plug and play” αλλά θέλουν προσοχή κατά τη σύνδεση για τυχόν σφάλματα.

Το Raspberry Pi 2 διαθέτει μια κεφαλή 40 pins για πρόσβαση στα GPIO. Τα 26 από αυτά υπήρχαν από το πρώτο μοντέλο, ενώ τα υπόλοιπα 14 εισήχθησαν με το μοντέλο B. Τα GPIO της τάσης είναι ανθεκτικά σε τάση μέχρι 3.3V κι όχι 5V – όπως ισχύει σε άλλες πλακέτες και μικροελεγκτές. Δεν υπάρχει προστασία στο κύκλωμα, επομένως, είναι απαραίτητη η σχεδίαση εξωτερικού κυκλώματος για την αποφυγή καταστροφής των ακροδεκτών. Όλα τα GPIO μπορούν να επαναπρογραμματιστούν για να παράξουν εναλλακτικές λειτουργίες, όπως το SPI, το I2C, το PWM κ.ά. Κάθε ένα από τα GPIO μπορεί να επιβλέψει διακόπτες, θετικές ή αρνητικές ακμές και αλλαγές στην τιμή μέτρησης.

Λειτουργικό

Οι πλατφόρμες του Raspberry Pi συνήθως χρησιμοποιούν κάποιο λειτουργικό βασισμένο στα Linux. Το πλέον διαδεδομένο λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιείται είναι το Raspbian, ένα λειτουργικό ειδικά κατασκευασμένο για Raspberry Pi και είναι βασισμένο στην διανομή Debian των Linux. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και λειτουργικά που δεν είναι Linux όπως το RISC OS που ναι το πρώτο λειτουργικό για συστήματα βασισμένα στον ARM. Επιπλέον στο Raspberry Pi 2 μπορεί να χρησιμοποιηθούν και Windows 10 κάτι που δεν ήταν εφικτό στις προηγούμενες εκδόσεις. Ο install manager είναι ο New Out Of Box Software (NOOBS), ο οποίος δίνει τη δυνατότητα επιλογής του λειτουργικού. Αυτό αποθηκεύεται στην κάρτα SD.

Arduino

Το arduino αποτελεί μια πλατφόρμα μικροελεγκτή ανοιχτού κώδικα. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μια μητρική πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους και εξόδους, αναλογικές και ψηφιακές. Είναι κατάλληλο για κατασκευές ψηφιακών συσκευών και διαδραστικών αντικειμένων που ελέγχουν και μετράνε ψηφιακά διάφορα μεγέθη.

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή πραγματοποιείται σε γλώσσα Arduino, η οποία βασίζεται στη Wiring και μοιάζει αρκετά στη δομή και στη σύνταξη της με τη γλώσσα C. Ο μικροελεγκτής ATmega328 έχει προεγκατεστημένο ένα πρόγραμμα εκκίνησης που επιτρέπει να φορτώνονται οι κώδικες στην πλακέτα χωρίς να χρειάζεται εξωτερική πλακέτα προγραμματισμού. Η επικοινωνία με τον μικροελεγκτή γίνεται με χρήση του πρωτοκόλλου STK500. Το περιβάλλον ανάπτυξης είναι βασισμένο και αναπτυγμένο σε Processing και μπορεί είτε να αξιοποιηθεί μόνο του είτε να επικοινωνήσει με πλήθος λογισμικού όπως είναι το MaxMSP,Flash,Processing και πολλά άλλα.

Επίσης, τα σχέδια κατασκευής του είναι ανοιχτού κώδικα, όπως και όλα τα προγράμματα που συνοδεύουν τα shields του ή τις διάφορες εφαρμογές που πραγματοποιούν οι χρήστες του, επομένως έχουμε να κάνουμε με ένα αρκετά πλούσιο πεδίο πειραματισμού, μία αρκετά ενεργή κοινότητα και πλούσια γκάμα είτε συναρμολογημένων shields είτε βιβλιοθήκες και εξαρτήματα που έχουν δημιουργηθεί και δοκιμαστεί από την κοινότητά του.

Η εφαρμογή μας σχεδιάστηκε με βάση το μοντέλο της πλατφόρμας Arduino Uno, ο οποίος έχει σαν βάση τον μικροελεγκτή ATmega328.[10] Έχει 14 συνδέσμους (pins) ψηφιακών εισόδων/εξόδων (6 εξ αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν PWM έξοδοι), 6 αναλογικές εισόδους, ένα κρυσταλλικό ρολόι συχνότητας 16MHz, USB επικοινωνία για σύνδεση με τον υπολογιστή, ένα καλώδιο τροφοδοσίας, μια ICSP κεφαλή και ένα κουμπί επανεκκίνησης (reset button). Περιέχει όλα όσα χρειάζονται για τον έλεγχο του μικροελεγκτή.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης πλατφόρμας.

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Εικόνα Β.2: Χαρακτηριστικά της πλατφόρμας Arduino Uno

Τροφοδοσία

Το Arduino Uno μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε από την θύρα USB είτε με εξωτερική τροφοδοσία. Η εξωτερική τροφοδοσία μπορεί να είναι ή με την χρήση μετασχηματιστή από εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή ή με την χρήση μπαταριών. Ο μετασχηματιστής συνδέεται μέσω βύσματος 2,1 χιλιοστών με τον θετικό πόλο στο κέντρο, στο βύσμα που βρίσκεται ενσωματωμένο στο Arduino. Η πλακέτα μπορεί να λειτουργήσει με εξωτερική τροφοδοσία από 6 έως 20V. Αν όμως τροφοδοτηθεί με λιγότερο από 7 V ο σύνδεσμος τροφοδοσίας 5 V που διαθέτει η πλακέτα ίσως να μην μπορέσει να παράξει 5V και η πλακέτα να είναι ασταθής. Αν χρησιμοποιηθούν περισσότερα από 12 V για τροφοδοσία ο ρυθμιστής τάσης μπορεί να υπερθερμανθεί και να χαλάσει την πλακέτα. Επομένως, προκύπτει πως η προτεινόμενη τροφοδοσία κυμαίνεται από 7 έως 12 V.

Οι σύνδεσμοι τροφοδοσίας έχουν ως εξής:

- Vin: Είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας που έχει εφαρμοστεί στο Arduino. Μπορεί να τροφοδοτήσει εξωτερικές πλακέτες.

- 5V: Προσφέρει τάση 5V που έχει προκύψει από τον ρυθμιστή τάσης της πλακέτας σε περίπτωση που η τροφοδοσία είναι μεγαλύτερη των 5V.
- 3,3V: Προσφέρει 3,3V που προέρχονται από τον ρυθμιστή τάσης της πλακέτας. Το μεγαλύτερο ρεύμα που καταναλώνεται είναι 500mA.
- GND: Σύνδεσμος γείωσης.

Μνήμη

Ο μικροελεγκτής ATmega328 διαθέτει μνήμη 32KB (όπου το 0.5 KB χρησιμοποιούνται από τον φορτωτή εκκίνησης (bootloader)). Διαθέτει επίσης 2KB μνήμη SRAM και 1KB μνήμη EEPROM.

Είσοδοι και Έξοδοι

Κάθε ένα από τις 14 συνδέσεις του Arduino μπορεί να λειτουργήσει σαν είσοδος ή σαν έξοδος κάνοντας χρήση της κατάλληλης συνάρτησης από την αντίστοιχη βιβλιοθήκη. Λειτουργούν στα 5V και μπορεί να προσφέρει ή να καταναλώσει το μέγιστο 40mA. Διαθέτουν, επίσης, εσωτερική αντίσταση που κυμαίνεται από 20-50kΩ. Μπορεί οι συνδέσεις του να λειτουργούν σαν γενικού σκοπού, παρόλα αυτά κάποια από αυτά έχουν επιπρόσθετες ιδιότητες.

- Σειριακή επικοινωνία (Serial): 0 (RX) και 1 (TX). Αυτοί οι ακροδέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποστείλουν (TX) ή να λάβουν (RX) TTL σειριακά δεδομένα. Αυτά συνδέονται με τα αντίστοιχα του ATmega8U2.
- Εξωτερικές διακοπές (External Interrupts). Οι ακροδέκτες 2 και 3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να διαπιστωθεί μια διακοπή σε χαμηλή τιμή, θετική ή αρνητική ακμή ή μια αλλαγή σε μία τιμή, με την χρήση της κατάλληλης συνάρτησης του λογισμικού.
- PWM: Οι ακροδέκτες 3,5,6,9,10,11 έχουν τη δυνατότητα PWM εξόδου μεγέθους 8 bit με την χρήση της αντίστοιχης συνάρτησης.
- SPI: Οι ακροδέκτες 10, 11, 12, 13 υποστηρίζουν την SPI επικοινωνία, όπως θα αναλύσουμε εκτενέστερα παρακάτω.
- LED: Υπάρχει ενσωματωμένο led που υποστηρίζεται από τον ακροδέκτη 13. Όταν το pin μεταβαίνει σε κατάσταση HIGH, το led ανάβει, ενώ όταν μεταβεί σε κατάσταση LOW, σβήνει.
- TWI: Το A4 ή SDA ακροδέκτη και το A5 ή SCL ακροδέκτη υποστηρίζουν την TWI επικοινωνία χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη Wire.

Η πλατφόρμα του UNO διαθέτει επίσης 6 αναλογικές εισόδους (A0 έως A5) η κάθε μία από αυτές έχει ανάλυση 10-bit, δηλαδή 1024 διαφορετικές τιμές. Προεπιλεγμένα, μπορούν να

μετρήσουν τιμές από 0 έως 5 V. Μέσω όμως του ακροδέκτη AREF και της αντίστοιχης συνάρτησης, το οποίο ρυθμίζει την τάση αναφοράς, είναι δυνατόν να αλλάξει το πάνω όριο του εύρους αυτού.

Επικοινωνία

Το Uno διαθέτει μεγάλη ποικιλία δυνατοτήτων επικοινωνίας με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, με άλλη πλατφόρμα Arduino ή κάποιον άλλον μικροελεγκτή. Ο Atmega328 προσφέρει UART σειριακή επικοινωνία μέσω των ακροδεκτών RX και TX όπως αναφέραμε προηγουμένως. Ο ATmega16U2 μετατρέπει την σειριακή επικοινωνία σε USB με αποτέλεσμα μία εικονική θύρα για το λογισμικό του υπολογιστή. Τα LED RX και TX στην πλακέτα του Arduino ανάβουν κάθε φορά που επικοινωνεί μέσω της θύρας USB.

Παράρτημα Γ : Κώδικας

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή μπορεί να βρεθεί στο github:

<https://github.com/SmartRUE-Lab/RurergDataLogger>

Βιβλιογραφία

- [1] Μεσσήνης Γεώργιος, “Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεσης” ΕΜΠ, 2011
- [2] Τρουλλάκη Αικατερίνη, “Μελέτη Διαφορετικών Μαγνητικών Υλικών Για Τοπικά Κατασκευασμένες Μικρές Ανεμογεννήτριες Σε Εφαρμογές Αγροτικής Ηλεκτροδότησης”, ΕΜΠ, 2011
- [3] H. Piggott, “A wind turbine recipe book”, 2009.
- [4] D. Bartmann, D. Fink, “Homebrew Wind Power: Hands-on guide to harnessing the wind”, Buckville Publications, 2009.
- [5] Θωμάς Πάζιος, “Μελέτη σύνδεσης μικρών ανεμογεννητριών σε μικρής κλίμακας εφαρμογές με αποθήκευση σε συσσωρευτές και μελέτη,σχεδίαση και κατασκευή ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών με απορριπτικό φορτίο”, ΕΜΠ, 2012
- [6] Α. Γκράβας, “Μέτρηση της καμπύλης ισχύος μικρών ανεμογεννητριών και βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας για εφαρμογές χαμηλού κόστους” ΕΜΠ, 2011
- [7] Wind turbines – Part 12-1:Power performance measurements of electricity producing wind turbines , IEC 61400-12-1, 2005
- [8] Instrument transformers - Part 1: General requirements, IEC 61869-1, 2007
- [9] R.V.D Plass, Integrated Analog-To-Digital and Digital-To-Analog Converters, Springer, 1994
- [10] C.Alippi, Intelligence for Embedded Systems. Springer, 2014
- [11] Dhananjay V. Garde, Programming and Customizing the AVR Microcontroller, 2001
- [12] ARM Architecture Reference Manual, ARM Limited
- [13] Κ. Πεκμεστζής, Συστήματα Μικροϋπολογιστών II, Συμμετρία, 2009
- [14] SPI Block Guide V03.06, Freescale Semiconductor, Inc., 2003
- [15] Jacob Fraden, Handbook of Modern Sensors, Third Edition, Springer, 2003
- [16] Current Sensing Circuit Concepts and Fundamentals, Microchip, AN1332
- [17] Ganesan S (2012) Selection of current transformers and wire sizing in substations, 2012
- [18] David E. Shepard, Donald W. Yauch, An Overview Of Rogowski Coil Current Sensing, 2012
- [19] Gerard Meijer, Smart Sensors Systems, Wiley, 2008
- [20] Isolated Current and Voltage Transducers Characteristics - Applications – Calculations,

LEM Corporate Communications, 1996

- [21] A.S. Sedra, K.C. Smith, Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα, Παπασωτηρίου, 2010, 5η έκδοση
- [22] Principles of Data Acquisition and Conversion, Texas Instruments Inc., Rev. 2015
- [23] Data Conversion Handbook, Analog Devices Inc, Newnes, 2005
- [24] R. Malaric, *Instrumentation and Measurement in Electrical Engineering*, BrownWalker Press.2011
- [25] A. Chang, Y. Chen, P. Delmas, 2.5.2: Data Representation: Offset binary representation (Excess-K), Department of Computer Science University of Oakland, 2006
- [26] ADE 7758 Data Sheet, <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7758.pdf>
- [27] AD7327 Data Sheet, <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7327.pdf>
- [28] CT-08-1200 Data Sheet,
<http://www.icecomponents.com/images/document/PDF/CT08.pdf>
- [29] AC1020 Data Sheet, http://www.promelec.ru/pdf/AC-1020_Jun-06.pdf
- [30] CST-1030 Data Sheet, <http://catalog.triadmagnetics.com/Asset/CST-1030.pdf>
- [31] CT05-500 Data Sheet, <http://www.icecomponents.com/images/document/PDF/CT05.pdf>
- [32] CS2106L Data Sheet, <http://www.coilcraft.com/pdfs/sen60tr.pdf>
- [33] LA 55-P Data Sheet, <http://www.lem.com/docs/products/la%2055-p%20e.pdf>
- [34] LM2907 Data Sheet, <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm2917-n.pdf>
- [35] ADE 7758 Evaluation Board Documentation, Analog Devices,
http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/ADE7758_EvalBoard.pdf
- [36] Hank Zumbalen, Staying Well Grounded, Analog Dialogue Vol.46, 2012
- [37] H.W. Ott. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [38] MIC5280 Data Sheet, http://www.micrel.com/_PDF/mic5280.pdf
- [39] EC4SAW-48S12N Data Sheet,
http://www.fortecag.de/fileadmin/user_data/Dokumente/Datenblaetter/Power/Cincon/EC4SAW-V11.pdf
- [40] SPU03M-05 Data Sheet, <http://www.intertrafo.fi/assets/files/datasheets/SPU03.pdf>
- [41] NKA1212SC Data Sheet,

[42] A.V. Bakshi, U.A. Bakshi, Electrical Circuit Analysis, Technical Publications, 2008