



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη Συσκευής Παρακολούθησης
Της Ποιότητας Ηλεκτρικής Ισχύος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος, Ν. Τζαβάρας

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη Συσκευής Παρακολούθησης Της Ποιότητας Ηλεκτρικής Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος, Ν. Τζαβάρας

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Φεβρουαρίου 2020

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής
Σχολή ΗΜΜΥ

Δημήτριος Μανωλάκος
Καθηγητής
Σχολή ΜΜ

Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής
Σχολή ΗΜΜΥ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

.....
Ευάγγελος, Ν. Τζαβάρας

Διπλωματούχος Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τηλεπικοινωνιών Και Δικτύων,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Copyright © Ευάγγελος, Τζαβάρας, 2020.
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 ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας συσκευής χαμηλού κόστους και μικρού μεγέθους, η οποία θα επιτρέπει την παρακολούθηση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος. Η εργασία χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη: Το πρώτο είναι το θεωρητικό και αφορά στους σύγχρονους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ενέργειας, και το δεύτερο είναι το πειραματικό που περιλαμβάνει την ανάλυση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μία σύντομη αναφορά στους λόγους και στην ανάγκη ελέγχου της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος σήμερα, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα όπως είναι η υπέρταση, η βύθιση τάσης, οι ταχείες διακυμάνσεις (φλίκερ) και οι παραμορφώσεις των αρμονικών συναρτήσεων τάσης.

Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται κάποιοι από τους υπάρχοντες αισθητήρες μέτρησης τάσης, ρεύματος και ισχύος, με μικρή αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην περιγραφή των αισθητήρων Hall ανοιχτού και κλειστού βρόχου καθώς και στην παρουσίαση εξισώσεων θεμελιωδών μεγεθών, όπως είναι η μαγνητική ροή, η θερμική ολίσθηση και η στιγμιαία ισχύς.

Το Κεφάλαιο 3, περιλαμβάνει το κατασκευαστικό τμήμα της συσκευής, καθώς και τα πειράματα που διεξήχθησαν με τη χρήση της και παρουσιάζει λεπτομερώς όλες τις μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο, με τη βοήθεια ενός Arduino Uno, του αισθητήρα έντασης ρεύματος ACS712 για 5A και 20A, καθώς και του αισθητήρα τάσης ZMPT101B. Στις μετρήσεις των συσκευών μικρής ισχύος, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας ACS712 των 5A, ενώ στις τελευταίες μετρήσεις που αφορούσαν μεγάλα φορτία, κρίθηκε αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας ACS712 των 20A.

Λέξεις Κλειδιά: Ποιότητα Ισχύος, Ένταση Ρεύματος, Αισθητήρας Μέτρησης Έντασης Ρεύματος, Αισθητήρας Μέτρησης Τάσης, Arduino Uno.

Abstract

The purpose of the thesis was the qualitative study of the power of energy in various electrical load-consuming appliances. The thesis is divided into two main parts, the first one which is theoretical regarding current energy measuring sensors, and the second one which includes the analysis of the equipment used in the experiments presented in the thesis.

In Chapter 1, a brief mention is made of the reasons and the need to measure energy qualitatively nowadays so that we can avoid problems such as overvoltage, voltage dips, flicker intensity and distortions of harmonic voltage functions.

In Chapter 2, they are listed some existing voltage measuring sensors, electric current and power on the market nowadays, with a short reference to the advantages and disadvantages of each sensor separately. Particular attention is paid to the description of open and closed loop Hall sensors as well as the presentation of fundamental calculus equations such as magnetic flux, thermal slip and instantaneous power of energy.

Chapter 3 contains the construction part of the appliance, the experiments carried out using it and presents in detail all measurements made in the laboratory, with the help of Arduino Uno, ACS712 for 5A and for 20A power sensor, and of the ZMPT101B voltage sensor. In the measurements of low power consumption appliances used the sensor ACS712 of 5A, while the latest measurements for high loads found it necessary to use the sensor ACS712 of 20 A.

Keywords: *Power Quality, Current Amperage, Current Sensor, Voltage Sensor, Arduino Uno.*

Πρόλογος

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών που μου εμπιστεύτηκε την παρούσα διπλωματική εργασία στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος “Συστήματα Αυτοματισμού”. Η καθοδήγηση και η επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν σημαντικές, τόσο με τη βιβλιογραφία που μου πρότεινε, όσο και με το χρόνο που δαπάνησε για την ολοκλήρωσή της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον διδάκτορα κ. Αγγελόπουλο Σπυρίδωνα για την σημαντική επιστημονική βοήθεια που μου προσέφερε, μέσω των προσωπικών του γνώσεων επάνω στους αισθητήρες και το Arduino, καθώς και την καθοδήγηση που μου προσέφερε στο κομμάτι της κατασκευής και της σύνδεσης των επιμέρους αισθητήρων.

Δηλώνω υπεύθυνα ότι στην μεταπτυχιακή μου εργασία, όπου έχω βασιστεί σε επιστημονικές ιδέες ή κείμενα άλλων, έχω προσπαθήσει με όλες μου τις δυνάμεις να το προσδιορίσω επακριβώς μέσα στο κείμενο, κάνοντας καλή χρήση αναφορών και ακολουθώντας την ακαδημαϊκή δεοντολογία και τη διάταξη της IEEE.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Νικόλαο και Ιωάννα, για την καθημερινή στήριξη και την ηθική συμπαράσταση που μου παρέχουν όλον αυτό τον καιρό, γιατί χωρίς αυτά δεν θα μπορούσα να είχα ολοκληρώσει τις μεταπτυχιακές σπουδές μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract.....	iii
Περιεχόμενα.....	vii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ποιότητα Ενέργειας	1
1.2 Η Μελέτη της Ενέργειας Σήμερα	2
1.3 Προβλήματα Ποιότητας Ενέργειας.....	3
2 Συστήματα Ποιότητας Ενέργειας	7
2.1 Μετρητικά Συστήματα Ποιότητας Τάσης	7
2.1.1 Ολοκληρωμένο CS5490	7
2.1.2 Ολοκληρωμένο BL0930E	11
2.1.3 Ολοκληρωμένο AD71056	15
2.2 Μετρητικά Συστήματα Ποιότητας Ρεύματος.....	21
2.2.1 Αισθητήρες Hall Ανοιχτού - Κλειστού Βρόχου	21
2.2.2 Ολοκληρωμένο ACS758.....	26
2.2.3 Ολοκληρωμένο TMCS1100.....	28
2.3 Μετρητικά Συστήματα Ποιότητας Ισχύος.....	31
2.3.1 Σύστημα OpenZmeter Ανάλυσης Ισχύος.....	32
3 Ανάπτυξη συσκευής παρακολούθησης ηλεκτρικής ισχύος.....	41
3.1 Arduino Uno	41
3.2 Αισθητήρας ACS712	43
3.3 Μοντέλο ZMPT101B	52
3.4 Παραδείγματα Εφαρμογών Χαμηλού Φορτίου.....	54
3.4.1 Αναλογικός Παλμογράφος	55
3.4.2 Σταθμός αποκόλλησης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων	60
3.4.3 Σταθμός κόλλησης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.....	63
3.5 Παραδείγματα Εφαρμογών Υψηλού Φορτίου	68
3.5.1 Μετασχηματιστής Τάσης.....	68
3.5.2 Ηλεκτρικός Φούρνος	74

4	Συμπεράσματα.....	79
5	Βιβλιογραφία.....	81
6	Παράρτημα	83

1 Εισαγωγή

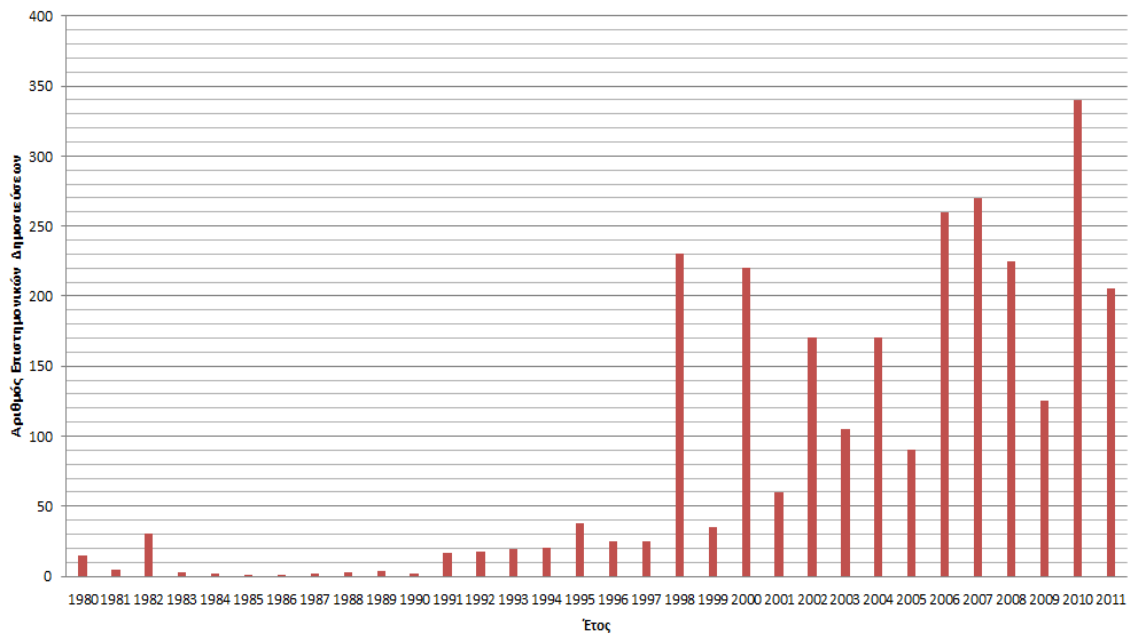
1.1 Ποιότητα Ενέργειας

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει το μείζον πρόβλημα της μέτρησης της ποιότητας ενέργειας, καθώς και τις διατάξεις με τις οποίες σήμερα τα δημόσια βιομηχανικά κτίρια και οι ιδιωτικοί οικισμοί επιτυγχάνουν ενεργειακή αποδοτικότητα. Όλοι αυτοί οι οικισμοί που εντάσσονται στις εγκαταστάσεις τριτογενούς τομέα, περιέχουν σύγχρονα συστήματα κτιριακών αυτοματισμών, τα οποία αποτελούνται εσωτερικά κυρίως από αισθητήρες, ελεγκτές και ενεργοποιητές. Αξίζει να τονιστεί όμως, ότι η ενέργεια μετριέται κυρίως σε ποσοτικό επίπεδο (άμεση εξοικονόμηση πόρων) και λιγότερο σε ποιοτικό επίπεδο (έμμεση εξοικονόμηση πόρων) [1].

Το έναυσμα για την συγγραφή αυτής της εργασίας ήταν το σταθερά αυξανόμενο ενδιαφέρον όλης της εκπαιδευτικής και επιστημονικής κοινότητας στο πώς θα είναι αποδοτική η ενέργεια που παράγεται και στο πώς θα μεγιστοποιηθεί.

Οι σημερινοί ενεργειακοί χρήστες έχουν πλέον συνειδητοποιήσει τα οφέλη από την κατανάλωση υψηλής ποιότητας ρεύματος (αποφυγή βλαβών στον εξοπλισμό τους, μείωση κόστους από τις διακοπές τροφοδοσίας στις εγκαταστάσεις κλπ.), με αποτέλεσμα να πιέζουν την παγκόσμια κοινότητα να εξελίξει τους αισθητήρες και τους μικροεπεξεργαστές σε τέτοιο βαθμό, που σε κάθε πιθανή διακύμανση της ενέργειας θα επιτυγχάνεται η μικρότερη δυνατή ευαισθησία.

Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει την συνεχιζόμενη αύξηση του ενδιαφέροντος της διεθνούς κοινότητας μετά το 1980 για το πώς θα μελετήσει εκτεταμένα και με ποιο τρόπο θα βελτιώσει την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος [1].



Σχήμα 1.1: Χρήση του όρου «ποιότητα ενέργειας» σε επιστημονικά άρθρα [1].

1.2 Η Μελέτη της Ενέργειας Σήμερα

Παλαιότερα, όταν κάποιος καταναλωτής ήθελε να μετρήσει την ποιότητα της ενέργειας δεν μπορούσε να εξαγάγει ασφαλή συμπεράσματα, διότι οι μετρήσεις γίνονταν επί τόπου από τον υπεύθυνο εγκαταστάτη και απαιτούνταν πολλές μέρες για την ολοκλήρωσή τους. Σήμερα, εκτός από την συνεχιζόμενη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος που αναφέρθηκε παραπάνω, η ποιότητα της ενέργειας πρέπει να μετριέται για τρεις επιπλέον λόγους:

- Καταγραφή των διαταραχών σε ευρεία κλίμακα και σε οποιαδήποτε σημείο του κυκλώματος συμβεί, με σκοπό να βρεθεί ο λόγος και η συσχέτιση που μπορούν να έχουν μεταξύ τους. Εδώ είναι απαραίτητη η χρήση συσκευών που θα παραθέσουν όλα τα στατιστικά δεδομένα των αναλύσεων.
- Διαχωρισμός των καταστάσεων διαταραχής της εσωτερικής ηλεκτρικής εγκατάστασης από φυσικά εποχικά φαινόμενα (πχ κεραυνός).
- Ανάπτυξη προληπτικών δράσεων και μέτρων προστασίας μιας εγκατάστασης, ειδικά αυτών που απευθύνονται σε μεγάλους καταναλωτές [2].

Ο καλύτερος τρόπος για να λυθεί οποιοδήποτε πρόβλημα ποιότητας ενέργειας είναι ο προσδιορισμός της αιτίας που το προκαλεί, μέσω της ανάλυσης της ποιότητας του ρεύματος και της τάσης του δικτύου. Μία συσκευή αν δεν λαμβάνει την κατάλληλη ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο, μπορεί να φθαρεί ή να μην λειτουργήσει σωστά. Η ποιότητα ενέργειας εξαρτάται από την ποιότητα τάσης και την ποιότητα ρεύματος που εμφανίζει ένα κύκλωμα. Η ποιότητα τάσης είναι καθορισμένη εξ ολοκλήρου από τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η ποιότητα ρεύματος είναι συνυφασμένη με τον τρόπο που χρησιμοποιεί ο καταναλωτής την συσκευή [3].

1.3 Προβλήματα Ποιότητας Ενέργειας

Τα προβλήματα στην ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εμφανιστούν όταν υπάρξει διαταραχή της κυματομορφής της τάσης και της έντασης του ρεύματος ή της συχνότητας της τάσης. Τα σημαντικότερα προβλήματα που μπορεί να υποβαθμίσουν την ποιότητα ισχύς της ενέργειας είναι τα εξής:

- Βύθιση της ονομαστικής τιμής του πλάτους τάσης σε ένα δίκτυο.
- Προσωρινή υπέρταση ή μεταβατική υπέρταση.
- Ταχείες διακυμάνσεις τάσης (φλίκερ).
- Ασυμμετρία στις τιμές των τάσεων.
- Αρμονικές ημιτονοειδείς τάσεις.
- Διαρμονικές τάσεις που οδηγούν σε παραμόρφωση ονομαστικών τιμών [3].

Κατά τη διάρκεια της βύθισης, το μέγεθος της τάσης για κάποια δευτερόλεπτα μπορεί να μειωθεί σε επίπεδα κάτω του 90% της ενεργού τιμής (RMS). Η χαμηλότερη τιμή τάσης που θα παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια του φαινομένου, ονομάζεται βάθος βύθισης της τάσης. Για να είναι δυνατή η επαναφορά της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα και να μην προκληθούν βλάβες στις διατάξεις, πρέπει να χρησιμοποιηθούν τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS) μεταξύ του φορτίου και του δικτύου, τα οποία με τα κατάλληλα ηλεκτρονικά ισχύος που διαθέτουν επαναφέρουν την τάση στη σωστή ημιτονοειδή μορφή [4].

Η υπέρταση σχετίζεται με πιθανό βραχυκύκλωμα μίας διάταξης ή της γείωσης του δικτύου. Ως αποτέλεσμα της, είναι η αύξηση της ονομαστικής τιμής της τάσης που οδηγεί σε καταπόνηση των μονώσεων σε ένα κτίριο, ενώ η μεταβατική υπέρταση προκαλείται από κεραυνοπληξία ή τήξη ασφαλειών και διακοπών [3].

Κατά το φαινόμενο ταχείας διακύμανσης (φλίκερ), η τάση μεταβάλλεται από 90% έως 110% της ονομαστικής τιμής, με αποτέλεσμα να υπάρχουν οπτικές μεταβολές κυρίως στον φωτισμό. Τέτοιες διακυμάνσεις προκαλούνται από μεγάλα φορτία που καταναλώνουν ρεύμα σε ένα δίκτυο, όπως οι ηλεκτρικοί κλίβανοι και οι μηχανές συγκόλλησης. Η μακροπρόθεσμη ένταση φλίκερ, την οποία και μελετούν οι αναλυτές του φαινομένου, δίνεται από τη σχέση 1.1:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (1.1)$$

Στην περίπτωση που εμφανιστεί ασυμμετρία στις τιμές των τάσεων, η ονομαστική τιμή των φασικών γωνιών δεν είναι η ίδια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ασυμμετρία φορτίου σε αστέρα, όπου το σύστημα πρέπει να χωριστεί σε τρία υποσυστήματα a,b,c που έχουν κοινό αγωγό σε περίπτωση ασύμμετρης φόρτισης. Ο ουδέτερος αγωγός N αποτελεί τη κοινή επιστροφή των τριών ρευμάτων και οι φασικές τάσεις στις γραμμές είναι ίσες. Επομένως ισχύει η σχέση 1.2 [2]:

$$I_N = I_a + I_b + I_c \quad (1.2)$$

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί μια συνάρτηση τάσης ή ρεύματος σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα, περιγράφεται μέσω των αρμονικών ημιτονοειδών συναρτήσεων. Η αυξημένη ένταση του μαγνητικού πεδίου δημιουργεί το φαινόμενο του μαγνητικού κορεσμού, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του μετασχηματιστή να αυξάνεται πάνω από τα επίπεδα αντοχής και να εμφανίζονται απώλειες στον πυρήνα των πυκνωτών (αρμονική παραμόρφωση). Η συνάρτηση τάσης δίνεται από την ημιτονοειδή σχέση $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$, όπου το πλάτος V_0 αναπαριστά την DC συνιστώσα όλων των περιοδικών κυματομορφών τάσης που εμφανίζονται [1].

Για την παραπάνω σχέση, υπάρχει στη βιβλιογραφία το άθροισμα fourier όλων των αρμονικών που είναι: $V(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega_1 t) + V_2 \sin(\omega_2 t) + \dots + V_{(n+1)} \sin(\omega_{n+1} t)$.

Η συνολική αρμονική παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση 1.3:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{hmax} M_h^2}}{M_1} \quad (1.3)$$

όπου M_h είναι το πλάτος της τάσης της αρμονικής h , ενώ M_1 είναι η ενεργός τιμή τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας. Τάσεις και ρεύματα που εμφανίζουν συχνότητα όχι ανάλογη της συχνότητας λειτουργίας, μπορούν να επηρεάσουν τις γραμμές μεταφοράς, λόγω παραμόρφωσης ή αστάθειας (διαρμονικές τάσεις). Η συνολική διαρμονική παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση 1.4:

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n Q_i^2}}{Q_1} \quad (1.4)$$

όπου το Q_i είναι η τιμή αναφοράς της διαρμονικής i , και Q_1 η τιμή της θεμελιώδους διαρμονικής συνιστώσας. Συνεπώς, η λύση και η καταγραφή των προβλημάτων ποιότητας ενέργειας γίνεται μέσω της κατανόησης και της ανάλυσης των επιμέρους ηλεκτρονικών συστημάτων. Πρώτα γίνεται η συλλογή των δεδομένων μέσω καταγραφικών συσκευών και στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων, ώστε να βρεθεί η καλύτερη δυνατή λύση [2].

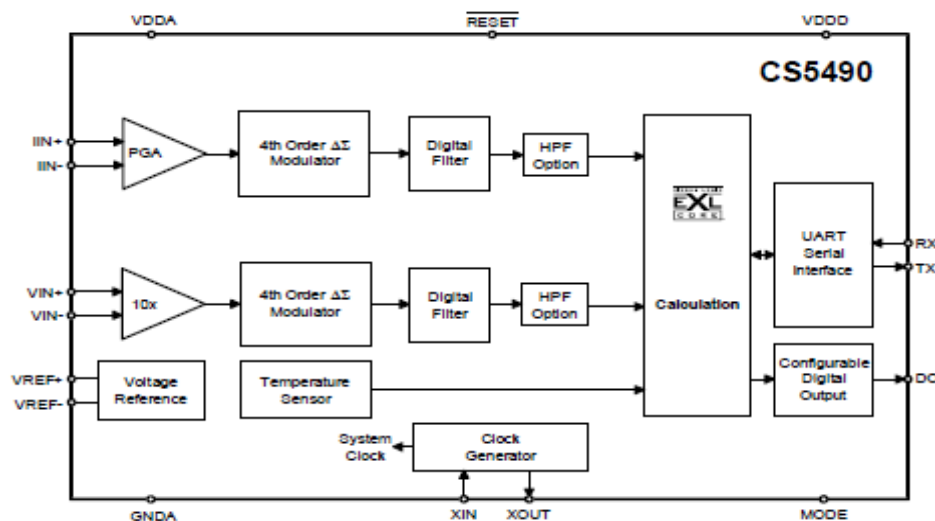
2 Συστήματα Ποιότητας Ενέργειας

2.1 Μετρητικά Συστήματα Ποιότητας Τάσης

Εάν κάποιος καταναλωτής αντιμετωπίζει προβλήματα με κάποιο φορτίο συσκευής τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η ζημιά να οφείλεται στην ποιότητα ενέργειας (ποιότητα τάσης ή ρεύματος) που παρέχει το δίκτυο στην τροφοδοσία της συσκευής. Σε περίπτωση που υπάρχει βλάβη στην ίδια τη συσκευή, οι μετρητικές συσκευές μπορούν να δείξουν κάτω από ποιες συνθήκες και ποια δεδομένα εμφανίζονται τα προβλήματα που διακόπτουν την ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών. Η λύση του ζητήματος θα παρουσιαστεί σε αυτή την εργασία, όπου για την αιτία του προβλήματος θα γίνει λεπτομερής ανάλυση στα χαρακτηριστικά του ρεύματος και στην τάση ενός ηλεκτρικού φορτίου [4].

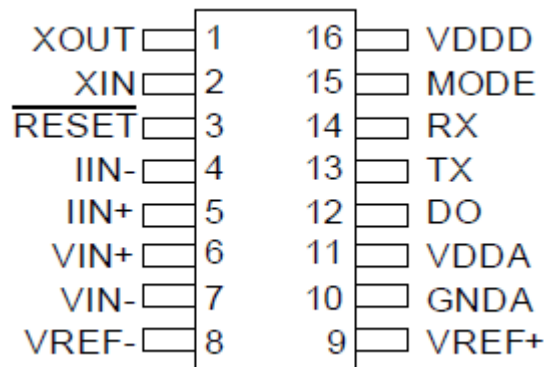
2.1.1 Ολοκληρωμένο CS5490

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα αυτό χρησιμεύει στην μέτρηση παλμών, διακοπών τάσης, και της RMS (Root Mean Square) τιμής της τάσης. Περιλαμβάνει δύο κανάλια εισόδων αναλογικού σήματος, τα οποία μέσω των μετατροπέων δίνουν στην έξοδο ψηφιακά σήματα, τα οποία απεικονίζουν την στιγμιαία τιμή τάσης ή ρεύματός και το αν υπάρχει υπέρταση ή όχι στο κύκλωμα. Το κύκλωμα απεικονίζεται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Ανάλυση Του Μοντέλου CS5490

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι ότι παράγει στην έξοδο του ψηφιακό σήμα που δείχνει το πώς επηρεάζεται η λειτουργία του κυκλώματος ανάλογα με τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του. Έχει τάση λειτουργίας στα 3.3V και μικρή ισχύ (λιγότερη από 13mW). Η διάταξη αυτού του μοντέλου περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό αισθητήρων, αντιστάσεων, μετασχηματιστών, μικροελεγκτών και υπερπαρατάτων φίλτρων, των οποίων η ανάλυση θα γίνει στη συνέχεια. Τα 16 pins του κυκλώματος είναι τα εξής [5]:



Σχήμα 2.2: Ονομασία των pins του μοντέλου CS5490

Τα pins Xin και XOut αναφέρονται στο ρολόι του συστήματος που είναι κατασκευασμένο από κρύσταλλο χαλαζία. Το ρολόι αυτό, όταν δουλεύει δημιουργεί παλμούς που ο αριθμός τους εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος, σύμφωνα με τη σχέση 2.1:

$$F_{OUT} = \frac{PulseRate \times 2000}{2^{FREQRNG}} \quad (2.1)$$

όπου F_{OUT} είναι το πλήθος των παλμών σε έναν κύκλο ρολογιού, ενώ ο αρχικός χρόνος που διαρκεί κάθε παλμός είναι 256.6 μ s και μπορεί να εμφανίσει ένα χρονικό εύρος διακύμανσης που δίνεται από τη σχέση 2.2:

$$Active - Low = 250\mu s + \left(\frac{1}{64000} \right) \quad (2.2)$$

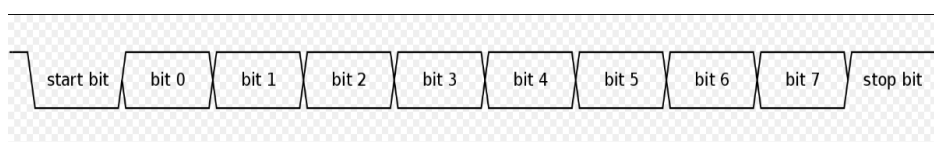
Το pin DO (Digital Output) είναι η ψηφιακή έξοδος, από την οποία προκύπτει η πληροφορία για τυχόν υπέρταση, υπερένταση ή διακοπές στη τάση τροφοδοσίας.

Η αρχική τιμή είναι 0, ενώ αν εμφανιστεί κάποια από τις τρεις περιπτώσεις στο κύκλωμα, η έξοδος λαμβάνει την τιμή 1. Χρησιμοποιείται και ένα βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο έχει ως συχνότητα αποκοπής τα 80Hz, για την περαιτέρω εξάλειψη τυχών αρμονικών.

Το pin RESET είναι αυτό που δίνει το έναυσμα στο ολοκληρωμένο ώστε να επαναφερθούν όλες οι μεταβλητές και οι καταχωρητές του κυκλώματος στην αρχική κατάσταση λειτουργίας. Για να μην εμφανιστεί η πιθανότητα ακούσιας επαναφοράς των τιμών που θα επιφέρει θόρυβο στο κύκλωμα, εσωτερικά το ολοκληρωμένο διαθέτει έναν πυκνωτή απόζευξης και μία αντίσταση [5].

Τα pins TX και RX που αναφέρονται στην αποστολή και λήψη δεδομένων, είναι υπεύθυνα για τη σειριακή επικοινωνία του ολοκληρωμένου. Το ολοκληρωμένο αποτελείται εσωτερικά από 8 bits που μεταφέρουν τις πληροφορίες και ένα ακόμα bit για διακοπή της λειτουργίας του μικροελεγκτή σε περίπτωση που ανιχνευτούν λανθασμένες πληροφορίες.

Κατά τη διαδικασία μετάδοσης πληροφοριών, μόλις το σύστημα αποστολής δώσει ένα χαρακτήρα στο πρώτο bit έναρξης, μετατοπίζονται ασύγχρονα όλα τα bits προς τη γραμμή δεδομένων και γίνεται έλεγχος από το bit ισοτιμίας για το εάν υπάρχουν σφάλματα [5].



Σχήμα 2.3: Σειριακή Δομή Μετάδοσης Πληροφοριών

Το pin VDDA, αναφέρεται στη αναλογική τροφοδοσία του κυκλώματος που είναι στα +3.3V και συνδέεται παράλληλα με έναν πυκνωτή χωρητικότητας 0.1μF ώστε να εξαλείφει το θόρυβο στις χαμηλές συχνότητες και να μην χάνεται η πληροφορία του σήματος. Στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας, είναι πρωτίστως συνδεδεμένο με το MODE pin για να δίνονται οι εντολές λειτουργίας, ενώ το GNDA αναφέρεται πάντοτε στην γείωση του κυκλώματος. Οι δύο τάσεις πρέπει να ικανοποιούν πάντα την σχέση $[(VDDA) - (GNDA)] \geq 4.0V$.

Η τάση VDDD αναφέρεται στην ψηφιακή DC τροφοδοσία του κυκλώματος, συνδέοντας επίσης παράλληλα έναν πυκνωτή απόζευξης 0.1μF λόγω μεγάλης εσωτερικής αντίστασης. Οι δύο τάσεις εσωτερικά έχουν το δικό τους κύκλωμα επαναφοράς ενέργειας POR (Power On Reset Circuit). Κατά την ενεργοποίησή τους, οι τροφοδοσίες είναι επάνω από τα επιτρεπτά όρια αναφοράς, για αυτό καθίσταται απαραίτητη η επαναφορά στις απαιτούμενες τιμές τάσης [5].

Τα VIN± pins συνδέονται με την έξοδο και την είσοδο του καναλιού τάσης το οποίο εμφανίζει μέγιστη τροφοδοσία ±250 mV. Επειδή όμως το εισερχόμενο σήμα στη γραμμή είναι ημιτονοειδές, η μέγιστη RMS τάση μπορεί να φτάσει μέχρι την τιμή $\frac{250}{\sqrt{2}} = 176.78mV$. Σε περίπτωση υπολογισμού της στιγμιαίας RMS τιμής τάσης μετά από N δειγματοληψίες σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η σχέση 2.3:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} V_n^2}{N}} \quad (2.3)$$

Αντίστοιχα, υπάρχει και το κανάλι του ρεύματος όπου λαμβάνεται το αναλογικό σήμα μέσω των IIN+ και IIN-. Επάνω στο κανάλι έχει εισαχθεί ένας ενισχυτής κέρδους 10 I/I και 50 I/I για μεγαλύτερη ακρίβεια αναλογικών τιμών. Η RMS τιμή του ρεύματος δίνεται από τη σχέση 2.4 για N δειγματοληψίες κατά Nyquist. Συνήθως το N στο υπάρχον κύκλωμα λαμβάνει την τιμή 4000 [5].

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n^2}{N}} \quad (2.4)$$

Τέλος, ανάμεσα στα pin Vref+ και Vref- δημιουργείται μία τάση αναφοράς με μέση τιμή 2.4V και τοποθετείται παράλληλα ένας πυκνωτής χωρητικότητας 0.1μF για να λειτουργεί ως φίλτρο. Για τη μέτρηση της τάσης αναφοράς, χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας θερμοκρασίας που ελέγχει αν η μεταβλητή θερμοκρασίας T είναι εντός των ορίων ± 128°C. Ο συντελεστής θερμοκρασίας της τάσης αναφοράς δίνεται από τη σχέση 2.5:

$$TC_{VREF} = \left(\frac{VREF_{MAX} - VREF_{MIN}}{VREF_{AVG}} \right) \left(\frac{1}{T_{A MAX} - T_{A MIN}} \right) (1.0 \times 10^6) \quad (2.5)$$

όπου η VREF μπορεί να πάρει τιμές από 2.3V έως 2.5V.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του μοντέλου είναι τα ακόλουθα:

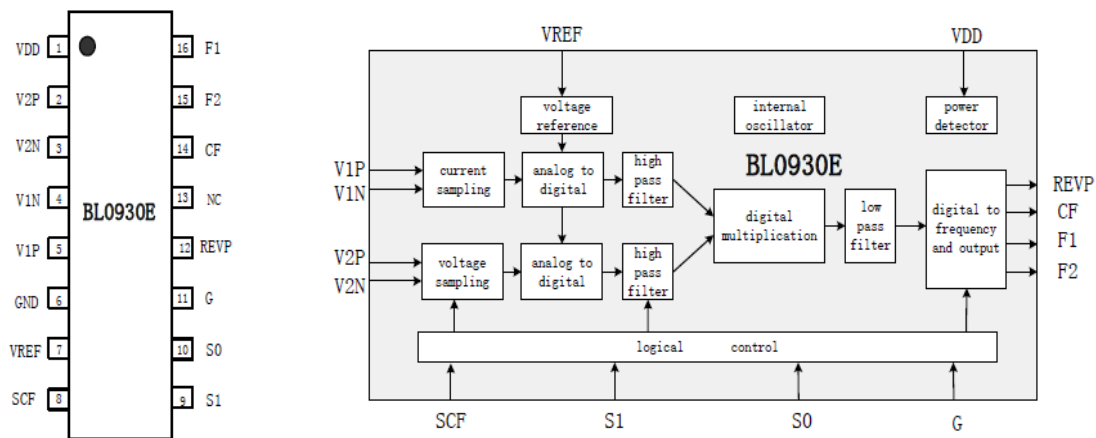
- Χαμηλός θόρυβος στην μετάδοση αναλογικών σημάτων.
- Μικρό επίπεδο σφάλματος (ακρίβεια 400:1).
- Βαθμονόμηση ψηφιακής πληροφορίας στην έξοδο του συστήματος.
- Χαμηλή ισχύς (<13mW).
- Δυνατότητα επαναφοράς μεταβλητών στην αρχική κατάσταση [5].

2.1.2 Ολοκληρωμένο BL0930E

Το παραπάνω ολοκληρωμένο μοντέλο τάσης, λαμβάνει ως είσοδο 2 αναλογικά σήματα σε κάθε κανάλι ξεχωριστά που μετατρέπονται σε ένα ψηφιακό σήμα εξόδου. Στην έξοδο του σήματος χρησιμοποιείται ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων, ώστε στο σήμα να γίνει δειγματοληψία σε συχνότητα >900kHz με βάση το μοντέλο Nyquist-Shannon. Η διάταξη θεωρείται πολύ απλή, γιατί οι μετατροπείς σήματος στα δύο κανάλια εισόδου είναι άμεσα συνδεδεμένοι με ένα φίλτρο υψηλών συχνοτήτων που πετυχαίνει τη μείωση του εύρους διακύμανσης των ημιτονοειδών σημάτων (περιορισμός του bandwidth) και την εξάλειψη τυχών αντισταθμίσεων στην αναλογική τιμή της τάσης και του ρεύματος. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατός ο υπολογισμός της πραγματικής ισχύος με υψηλή ακρίβεια τιμών και ελάχιστα περιθώρια σφάλματος [6].

Η συχνότητα εξόδου είναι ανάλογη με τη μέση πραγματική ισχύ του συστήματος, επομένως είναι σε θέση να δώσει πληροφορίες για την πραγματική ενέργεια. Επειδή η συχνότητα λαμβάνει υψηλές τιμές, το χρονικό διάστημα της συσσώρευσης των παλμών εξόδου είναι μικρό και επομένως είναι δυνατόν στο τέλος της διαδικασίας να υπάρξει βαθμονόμηση του συστήματος. Η μετατροπή των αναλογικών σημάτων εισόδου στο ψηφιακό σήμα εξόδου γίνεται δειγματοληπτικά στα 16 bits.

Η ονομασία των pins λειτουργιών και το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 2.4:



Σχήμα 2.4: Λειτουργία Του Μοντέλου BL0930E

Το μοντέλο αυτό καταφέρνει σε σημαντικό βαθμό να μειώσει την κατανάλωσή ενέργειας, άρα και τις ανάγκες για παροχή ρεύματος. Ένα pin λειτουργίας χρησιμοποιείται πάντα για να παρακολουθεί την τάση τροφοδοσίας αν βρίσκεται στην επιθυμητή τιμή των 4V. Στην περίπτωση που δεν έχει φτάσει σε αυτή τη τιμή, το κύκλωμα μένει στην κατάσταση αδράνειας έως ότου γίνει η επαναφορά της τροφοδοσίας στα επίπεδα λειτουργίας (Reset Mode). Ακολουθεί αναλυτικά η περιγραφή της λειτουργίας του κάθε pin ξεχωριστά [6]:

VDD: Παρέχει την τάση τροφοδοσίας στο κύκλωμα. Η καθορισμένη τιμή είναι 5V, με μία πιθανή απόκλιση τιμής $\pm 5\%$.

V2P: Η θετική είσοδος του καναλιού τάσης. Παρέχεται μία διαφορική τάση που μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 165V.

V2N: Η αρνητική είσοδος του καναλιού τάσης. Εμφανίζει αντίστοιχα αρνητική διαφορική τάση που μπορεί να φτάσει μέχρι τα -165 V.

V1N: Η αρνητική είσοδος του καναλιού ρεύματος. Η είσοδος είναι διαφορική τάση με ελάχιστο επίπεδο αναλογικού σήματος τα -660 mV.

V1P: Η θετική είσοδος του καναλιού ρεύματος. Στην είσοδο μεταφέρεται αναλογικό σήμα μέσω της διαφορικής τάσης που εμφανίζει μέγιστη θετική τιμή 660 mV.

GND: Παρέχει την γείωση στο κύκλωμα [6].

VREF: Η τάση αναφοράς στο κύκλωμα λαμβάνει τιμή 2.42V, με ένα περιθώριο αλλαγής τιμής $\pm 8\%$ σε ειδικές περιπτώσεις και έχει πάντα έναν συντελεστή θερμοκρασίας 30 ppm/°C. Υπάρχει η δυνατότητα να συνδεθεί μία πηγή αναφοράς σε αυτόν τον ακροδέκτη.

SCF: Η επιλογή συχνότητας που θα γίνει η βαθμονόμηση του συστήματος. Εισάγονται λογικές τιμές στον ελεγκτή και με βάση αυτές γίνεται η επιλογή της συχνότητας εξόδου του συστήματος.

S1, S0: Οι δύο συχνότητες εξόδου που έπονται της βαθμονόμησης. Μία από τις 4 ψηφιακές εισόδους επιλέγεται από τον ελεγκτή ώστε να μετατραπεί αργότερα στην επιθυμητή συχνότητα εξόδου, μέσω του ψηφιακού πολλαπλασιασμού των δύο τιμών S1 και S0. Αυτό προσφέρει στον χρήστη μεγαλύτερη ευελιξία όταν χρησιμοποιεί έναν τέτοιο μετρητή ενέργειας.

G: Επιλογή κέρδους τάσης. Δίνεται η δυνατότητα στο κανάλι να επιλέξει ένα από τα 4 δυνατά κέρδη. Οι πιο συνηθισμένες τιμές κέρδους είναι 1 και 16.

REVP: Λογική τιμή που δείχνει αρνητική ένδειξη ισχύος στο κύκλωμα. Αυτό σημαίνει ότι στην παρούσα κατάσταση η γωνία φάσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης εξόδου είναι μεγαλύτερη από 90°. Είναι απαραίτητο να γίνει επανεκκίνηση του συστήματος ώστε να ρυθμιστεί και πάλι η ισχύς και η γωνία φάσης.

NC: Pin που δεν χρησιμοποιείται.

CF: Συχνότητα εξόδου βαθμονόμησης. Η έξοδος αυτή δίνει πληροφορίες για την πραγματική ισχύ του κυκλώματος.

F1, F2: Πληροφορίες για τη μέση πραγματική ισχύ του συστήματος στις χαμηλές συχνότητες λειτουργίας. Οι λογικές έξοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άμεση κίνηση βηματικών κινητήρων (stepper motors).

Η έξοδος χαμηλής συχνότητας, δημιουργείται μέσω των χαμηλών ενεργών παλμών που δίνουν πληροφορία για την πραγματική ισχύ, επειδή συσσωρεύονται για μεγάλο χρονικό διάστημα και λόγω της ψηφιακής μετατροπής του αποτελέσματος σε συχνότητα. Η συχνότητα εξόδου και ο ρυθμός παλμών σχετίζονται με την τάση εισόδου μέσω της ακόλουθης σχέσης [6]:

$$Freq = \frac{18.98 * V(v) * V(I) * F_z * Gain}{V_{ref}^2} \quad (2.6)$$

Freq: Συχνότητα εξόδου των F1 και F2 (Hz).

V (v): Διαφορικό σήμα τάσης στο κανάλι 1 (V).

V (I): Διαφορικό σήμα τάσης στο κανάλι 2 (V).

Gain: Κέρδος τάσης, με τιμές 1 ή 16. Για την τιμή 1, το μέγιστο διαφορικό σήμα φτάνει τα $\pm 660\text{mV}$, ενώ για κέρδος 16 φτάνει μέχρι τα $\pm 41\text{mV}$.

V_{ref} : Η τάση αναφοράς (2.42V) με μία ανοχή τιμών $\pm 8\%$.

F_z : Μία από τις τέσσερις πιθανές εισόδους συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας τις λογικές εισόδους S0 και S1 (00, 01, 10, 11).

Η στιγμιαία ισχύς του συστήματος δίνεται από τη σχέση 2.7:

$$p(t) = U_{max} * \cos(\omega t) \times I_{max} * \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.7)$$

όπου U_{max}, I_{max} είναι οι μέγιστες τιμές του σήματος τάσης και ρεύματος, ω είναι η συχνότητα γωνίας των σημάτων εισόδου και φ η διαφορά φάσης τάσης – ρεύματος.

Η μέση ισχύς της ενέργειας στην έξοδο του ψηφιακού σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{U_{max} * I_{max}}{2} \cos(\varphi) \quad (2.8)$$

Ο συντελεστής ισχύος (Power Factor) των δύο καναλιών είναι η τιμή του συνημίτονου της διαφοράς φάσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης. Όταν η διαφορά φάσης γίνεται παραπάνω από 90° , τότε το P λαμβάνει αρνητικές τιμές. Η μέτρηση της ενέργειας παράγει ένα σφάλμα μέτρησης που ορίζεται από τον τύπο:

$$\text{Ποσοστό \%} = \frac{\text{Μετρήσιμη Ενέργεια} - \text{Πραγματική Ενέργεια}}{\text{Πραγματική ενέργεια}} \times 100\% \quad (2.9)$$

Όταν η θετική πραγματική ισχύς είναι ίση με την αρνητική πραγματική ισχύ, τότε το θετικό και το αρνητικό πραγματικό σφάλμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 2.10:

$$eNP\% = \frac{eN\% - eP\%}{1 + eP\%} \times 100\% \quad (2.10)$$

όπου το $eP\%$ είναι το θετικό σφάλμα πραγματικής ενέργειας και το $eN\%$ το αρνητικό σφάλμα πραγματικής ενέργειας. Τα θετικά αυτού του μοντέλου είναι τα εξής [6]:

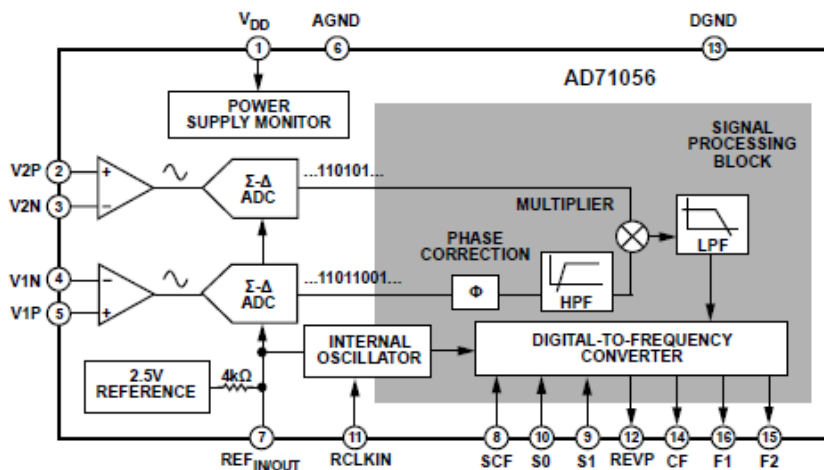
- Υψηλή ακρίβεια μέτρησης πραγματικής ισχύος (σφάλμα μόλις 0.1%).
- Έξοδοι χαμηλής συχνότητας που βοηθούν στη βαθμονόμηση του συστήματος.
- Χαμηλή ισχύς 15mV λόγω καλύτερης διανομής της ενέργειας.
- Χαμηλό κόστος κατασκευής.
- Αποφυγή καταστάσεων σφάλματος

Αντιθέτως, τα αρνητικά αυτού του μοντέλου είναι:

- Μη επαρκής έλεγχος της θερμοκρασίας του κυκλώματος.
- Απουσία ελέγχου του θορύβου στη μετάδοση των πληροφοριών.

2.1.3 Ολοκληρωμένο AD71056

Το μοντέλο αυτό είναι ένα κύκλωμα υψηλής ακρίβειας με την παρουσία ενός κυκλώματος ταλαντωτή να λειτουργεί ως πηγή ρολογιού στο ολοκληρωμένο. Εξαλείφεται η ανάγκη για χρήση κρυστάλλου και μειώνεται το συνολικό κόστος κατασκευής ενός μετρητή. Το ολοκληρωμένο συνδέεται άμεσα με μία αντίσταση βραχυκύκλωσης 4kΩ. Το κύκλωμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5 [7]:



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα Λειτουργίας AD71056

Τα 16 pins χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες λειτουργίες και ειδικότερα:

V_{DD} : Παροχή τάσης τροφοδοσίας στο κύκλωμα. Η τιμή της τάσης είναι πάντα 5V με μία μικρή απόκλιση $\pm 5\%$ της τιμής. Χρησιμοποιείται παράλληλα ένας πυκνωτής 10 μ F με έναν κεραμικό πυκνωτή χωρητικότητας 100nF.

$V2P, V2N$: Διαφορικό ζεύγος αναλογικών εισόδων στο κανάλι τάσης V2. Η μέγιστη διαφορική τάση εισόδου ορίζεται στις τιμές ± 165 mV, ενώ υπάρχει εσωτερικό κύκλωμα προστασίας που εξασφαλίζει ότι η υπέρταση δεν θα ξεπεράσει τα ± 6 V.

$V1N, V1P$: Διαφορικές αναλογικές τάσεις εισόδου στο κανάλι του ρεύματος, με την μέγιστη διαφορική τιμή τάσης του σήματος εισόδου να φτάνει τα ± 30 mV. Στο τρέχον κανάλι εισόδου υπάρχει κύκλωμα προστασίας για να μην ξεπεράσει η υπέρταση τα ± 6 V και δημιουργηθούν μόνιμες βλάβες στο κύκλωμα.

$AGND$: Αναφορά της γείωσης αναλογικού επιπέδου του κυκλώματος. Το αναλογικό επίπεδο γείωσης είναι η αναφορά γείωσης για όλα τα αναλογικά κυκλώματα, όπως τα φίλτρα, οι αισθητήρες ρεύματος και οι αισθητήρες τάσης. Για να μειωθεί ο θόρυβος, συνδέεται σε ένα σημείο το αναλογικό επίπεδο γείωσης με το ψηφιακό, μέσω της διαμόρφωσης κατά αστέρα ώστε να διατηρούνται σε απόσταση τα θορυβώδη ψηφιακά ρεύματα από το αναλογικό κύκλωμα [7].

SCF : Επιλογή συχνότητας βαθμονόμησης. Η συχνότητα αυτή εξαρτάται από τις λογικές τιμές που δίνονται στις εισόδους του κυκλώματος.

REF_{IN} : Η τάση αναφοράς με τυπική ονομαστική τιμή 2.45V και συντελεστή θερμοκρασίας 20ppm/ $^{\circ}$ C. Σε μερικές περιπτώσεις συνδέεται και μία εξωτερική πηγή αναφοράς, ενώ πάντοτε χρησιμοποιείται ένας πυκνωτής 1 μ F σε σειρά με έναν άλλο κεραμικό πυκνωτή 100nF.

$S1, S0$: Επιλογή εισόδου μετατροπής ψηφιακών τιμών σε λογική συχνότητα εξόδου. Μία από τις τέσσερις πιθανές εισόδους μεταβιβάζεται και ενσωματώνεται στον μετατροπέα ψηφιακής συχνότητας που με την πάροδο του χρόνου παράγει τη συχνότητα εξόδου. Η μέση τιμή ενός ημιτονοειδούς σήματος είναι μηδέν, επομένως η συχνότητα που παράγεται είναι ανάλογη με τη μέση πραγματική ισχύ. Η μετατροπή γίνεται πάντα υπό σταθερές συνθήκες φορτίου. Για τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιείται στην είσοδο ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων που εμφανίζει απόκριση συχνότητας:

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{4.45^2}}} \quad (2.11)$$

όπου f είναι η συχνότητα του συστήματος με καθοριζόμενη τιμή 50Hz και αρμονική διπλάσια της συχνότητας γραμμής (2ω) λόγω του υπολογισμού της στιγμιαίας ενέργειας [7].

RCLKIN: Ο ενεργοποιητής ρολογιού στο κύκλωμα μέσω της χρήσης ενός εσωτερικού ταλαντωτή σε ονομαστική συχνότητα 450 kHz. Η ενεργοποίηση γίνεται μέσω της σύνδεσης στη γείωση του κυκλώματος μίας αντίστασης χαμηλής θερμοκρασίας που έχει τιμή 6.2kΩ. Οι συχνότητες εξόδου εξαρτώνται άμεσα από τη συχνότητα του ταλαντωτή, οπότε το ρολόι πρέπει να έχει χαμηλή ανοχή και μετατόπιση θερμοκρασίας που θα εξασφαλίζει τη γραμμικότητα των συχνοτήτων εξόδου του ολοκληρωμένου. Ο ταλαντωτής λειτουργεί ιδανικά στο ρολόι όταν η αντίσταση παίρνει τιμές στο εύρος 5.5–20 kΩ και το εύρος ζώνης (Bandwidth) των αναλογικών σημάτων είναι στα 7kHz, δηλαδή στην ονομαστική τιμή της συχνότητας του. Σε μία εφαρμογή μέτρησης, το εύρος θερμοκρασίας του ταλαντωτή είναι από -40°C έως και 85°C. Η σταθερότητα της συχνότητάς του μετράται λαμβάνοντας υπόψιν τη διαφορά της μετρούμενης συχνότητας στο εύρος των διαθέσιμων θερμοκρασιών με αυτή της μετρούμενης συχνότητας στους 25°C.

REVP: Pin ανίχνευσης αρνητικής ισχύος στο κύκλωμα, όταν η γωνία φάσης και ρεύματος είναι μεγαλύτερη των 90°. Η έξοδος επαναφέρεται σε κανονικές συνθήκες όταν ανιχνευθεί θετική ισχύς στο κύκλωμα και εμφανιστούν παλμοί εξόδου στην συχνότητα βαθμονόμησης.

DGND: Αναφορά γείωσης των ψηφιακών κυκλωμάτων. Ένα ψηφιακό κύκλωμα περιλαμβάνει τον πολλαπλασιαστή συχνοτήτων, τις λυχνίες LED και τον μετατροπέα ψηφίων σε συχνότητες. Για την εξάλειψη της εμφάνισης θορύβου ή σφάλματος στο κύκλωμα συνδέεται μέσω διάταξης αστέρα, το αναλογικό με το ψηφιακό τμήμα της γείωσης σε ένα μόνο σημείο.

CF: Συχνότητα βαθμονόμησης συστήματος που δίνει πληροφορίες για την στιγμιαία πραγματική ισχύ του κυκλώματος [7].

$F1, F2$: Έξοδοι χαμηλών συχνοτήτων που δίνουν πληροφορίες για τη μέση πραγματική ισχύ.

Για τον υπολογισμό της πραγματικής ισχύος πρέπει πρώτα να παραχθεί το σήμα στιγμιαίας ισχύος. Αυτό γίνεται μέσω του πολλαπλασιασμού των σημάτων τάσης και ρεύματος. Για να εξάγουμε το DC κομμάτι του στιγμιαίου σήματος, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων, το οποίο υπό σταθερή θερμοκρασία και για όλους τους συντελεστές ισχύος θα επεξεργάζεται ψηφιακά όλες τις κυματομορφές των σημάτων τάσης και ρεύματος.

Η ίδια μέθοδος εφαρμόζεται και όταν οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης δεν είναι ημιτονοειδείς, επειδή έχουν κάποιο αρμονικό περιεχόμενο και τότε μπορούν να εκφραστούν μέσω των μετασχηματιστών Fourier. Συγκεκριμένα, οι αρμονικές των σημάτων τάσης και ρεύματος περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις [7]:

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2 \times \sum_{h=0}^{\infty} V_h} \times \sin(h\omega t + a_h) \quad (2.12)$$

Όπου:

$v(t)$: Στιγμιαία τάση σήματος (V).

V_0 : Η μέση τιμή του σήματος (V).

v_h : Η RMS τιμή της τάσης για την αρμονική h (V).

a_h : Η γωνία φάσης της αρμονικής h (°).

Ενώ η αρμονική του ρεύματος δίνεται από τον τύπο:

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \times \sum_{h=0}^{\infty} I_h \times \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (2.13)$$

$i(t)$: Στιγμιαία τιμή ρεύματος (A).

I_0 : Η DC συνιστώσα του ρεύματος (A).

I_h : Η RMS τιμή του ρεύματος για την αρμονική h (A).

β_h : Η γωνία φάσης του αρμονικού ρεύματος h (°).

Η πραγματική ενέργεια P μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα της φαινομενικής και της αρμονικής ενέργειας, δηλαδή $P = P_1 + P_H$, όπου:

$$P_1 = V_1 \times I_1 \cos \varphi_1 \quad \mu\epsilon \quad (2.14)$$

$$\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1 \quad \text{και}$$

$$P_H = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_H \times I_H \cos \varphi_h \quad \mu\epsilon \quad (2.15)$$

$$\varphi_h = \alpha_h - \beta_h$$

Όπως συνηθίζεται, η έξοδος του pin CF είναι συνδεδεμένη με έναν μετρητή παλμών για έναν δεδομένο χρόνο απόκρισης που καθορίζεται εσωτερικά. Η ενέργεια που καταναλώνεται στη διάρκεια μίας περιόδου δίνεται από τη σχέση: Ενέργεια = Μέση ισχύς \times Χρόνος Περιόδου, με τον χρόνο περιόδου να είναι συνήθως 20s, χρόνος απαραίτητος για την συσσώρευση αρκετών παλμών που θα εξασφαλίσουν τον μέσο όρο της συχνότητας. Ο ρυθμός των παλμών για τα αναλογικά σήματα είναι μέγιστος όταν οι ψηφιακές τιμές των S0, S1 παίρνουν τη τιμή 0 [7].

Για μικρότερα επιθυμητά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας στη μονάδα MCU (Multipoint Control Unit) είναι πιθανό η περίοδος ολοκλήρωσης να μειωθεί κατά ένα με δύο δευτερόλεπτα. Υπάρχει περίπτωση να λείπει κάποιος παλμός στην έξοδο, επειδή η συχνότητα εξόδου (pin F1, F2) λειτουργεί ασύγχρονα με τον χρονοδιακόπτη της MCU. Αυτό οδηγεί σε ένα σφάλμα της τάξης του 5% στη μέτρηση ισχύος, αν η συχνότητα εξόδου είναι 10Hz και η περίοδος ολοκλήρωσης 2s.

Όπως αναφέραμε, οι πληροφορίες της συχνότητας εξόδου εξάγονται στα pins F1, F2 με τη μορφή παλμών σε χαμηλό ρυθμό, ώστε η συσσώρευση σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα να εξάγει πιο ασφαλή δεδομένα. Η συχνότητα εξόδου F_{req} και ο ρυθμός των παλμών f , σχετίζονται με την παρακάτω σχέση 2.16:

$$F_{req} = \frac{494.75 \times V1_{rms} \times V2_{rms} \times f_{1...4}}{V_{REF}^2} \quad (2.16)$$

Όπου:

Freq = Συχνότητα εξόδου στα F1, F2 (Hz).

$V1_{rms}$ = Διαφορική RMS τάση στο κανάλι V1 (V).

$V2_{rms}$ = Διαφορική τάση RMS στο κανάλι V2 (V).

V_{REF} = Η τάση αναφοράς 2.45V με μία μικρή αυξομείωση $\pm 200\text{mV}$ (V).

$f_{1...4}$ = Μία από τις τέσσερις πιθανές εισόδους συχνοτήτων, επιλεγμένες από τα pins S0, S1.

Η ιδανική λειτουργία του μοντέλου έχει παρατηρηθεί για $V1_{rms} = 30\text{mV}$ (μέγιστο πλάτος τάσης V1), $V2_{rms} = 165\text{mV}$ (μέγιστο πλάτος τάσης V2), $V_{REF} = 2.45\text{V}$ (τάση αναφοράς) και $f_{1...4} = 0.86\text{Hz}$. Αντικαθιστώντας αυτούς τους αριθμούς στην εξίσωση 2.16, προκύπτει ότι η μέγιστη συχνότητα εξόδου είναι 0.175Hz [7].

Κατά τον σχεδιασμό ενός μετρητή ενέργειας, η ονομαστική τάση στο κανάλι V2 θα πρέπει να ρυθμιστεί στη μισή κλίμακα τιμών για να γίνει εφικτή η σταθερή βαθμονόμηση του μετρητή. Όταν ο μετρητής αντιληφθεί μέγιστο φορτίο, το κανάλι δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τη μισή κλίμακα τιμών. Αυτό το τέχνασμα επιτρέπει τη διόρθωση και την προσαρμογή των σημάτων που έχουν εμφανίσει φαινόμενα υπερέντασης ή υψηλές τιμές πλάτους. Επειδή μπορεί να επιλεγθεί μόνο μία από τις τέσσερις συχνότητες εξόδου, η βελτιστοποίηση της επιλογής γίνεται για μέγιστο ρεύμα από 10A μέχρι 20A.

Η μόνη αναλογική μέθοδος που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα αναφοράς είναι η Σ - Δ ADC (Analog To Digital Converter) που μετατρέπει σήματα χαμηλής συχνότητας σε σήματα υψηλής συχνότητας. Με αυτή τη μέθοδο, η ακρίβεια της διαμόρφωσης σήματος βελτιώνεται για διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και το σφάλμα αντίστοιχα μειώνεται, επειδή στην ψηφιακή έξοδο δίνεται μόνο ένα bit. Συμπερασματικά, τα θετικά αυτού του μοντέλου είναι τα εξής [7]:

- Μικρό κόστος κατασκευής και αντοχή σε αλλαγή περιβαλλοντικών συνθηκών.
- Ακριβής βαθμονόμηση που παρέχει πληροφορίες για την πραγματική ισχύ.
- Χαμηλή ισχύς (συνήθως 20 mW).
- Υψηλή ακρίβεια και μικρά επίπεδα σφάλματος (κλίμακα $\frac{1}{500}$).
- Pin που υποδεικνύει αν υπάρχει στο κύκλωμα αρνητική ισχύς ή εσφαλμένη σύνδεση επιμέρους καλωδίων.

Αντιθέτως, τα αρνητικά αυτής της διάταξης είναι τα εξής:

- Απουσία χρήσης αισθητήρα θερμοκρασίας.
- Χαμηλή ταχύτητα επεξεργασίας ψηφιακού σήματος.
- Απουσία ελέγχου υπέρτασης σε μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας, άρα κίνδυνος να καταστραφεί ο αισθητήρας.

2.2 Μετρητικά Συστήματα Ποιότητας Ρεύματος

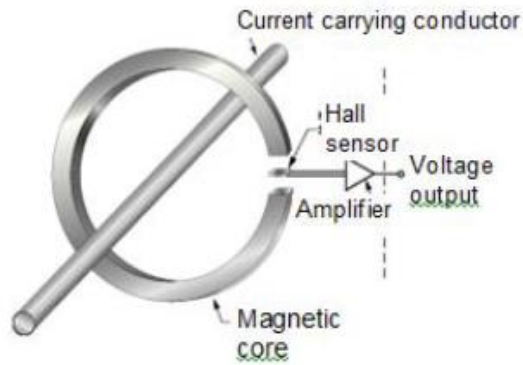
Τα συστήματα ανίχνευσης ρεύματος απαιτείται να λειτουργούν σε ένα δυναμικό εύρος συχνοτήτων λόγω των πλούσιων αρμονικών περιεχομένων στις κυματομορφές. Οι πιο κοινές τεχνολογίες αισθητήρων μέτρησης ρεύματος είναι ο μετασχηματιστής ρεύματος, η χαμηλή αντίσταση ρεύματος και ο αισθητήρας Hall. Στην παρούσα εργασία θα αναφερθεί μόνο ο αισθητήρας Hall.

2.2.1 Αισθητήρες Hall Ανοιχτού - Κλειστού Βρόχου

Υπάρχουν δύο τύποι αισθητήρων που βασίζονται στο φαινόμενο Hall: Οι αισθητήρες ανοιχτού βρόχου και οι αισθητήρες κλειστού βρόχου. Οι περισσότεροι αισθητήρες Hall βρίσκονται σε μετρητές ενέργειας με σχεδιασμό ανοιχτού βρόχου, επειδή το κόστος του συστήματος μειώνεται πολύ. Ένας αισθητήρας Hall έχει τη δυνατότητα να μετρήσει μεγάλο ρεύμα προσφέροντας εξαιρετική απόκριση συχνότητας. Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι η έξοδος του αισθητήρα παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση θερμοκρασίας, για αυτό και απαιτείται η σύνδεση εξωτερικής πηγής ρεύματος [8].

Ο Hall ανοιχτού βρόχου παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε υψηλές τιμές ρεύματος, για αυτό και η θερμική του απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συντελεστή θερμικής ολίσθησης και το κέρδος του κυκλώματος ενίσχυσης.

Για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα της ευαισθησίας και να αυξηθεί η θερμική απόδοση πρέπει να α) προστεθεί ένας μαγνητικός πυρήνας που γύρω του συγκεντρώνει τη μαγνητική ροή και ταυτόχρονα μειώνει το κέρδος ενίσχυσης, ή β) να χρησιμοποιηθούν δύο μαγνητικοί αισθητήρες Hall μαζί. Ο αισθητήρας ανοιχτού βρόχου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6:



Σχήμα 2.6: Αισθητήρας Ανοιχτού Βρόχου

Οι αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Hall (Hall Effect) μπορούν να χωριστούν σε αυτούς που έχουν μηδενική θερμική ολίσθηση (Non Linear Hall ICs) και σε αυτούς που έχουν διάκενο στο εσωτερικό τους (Linear Hall ICs). Η θερμική ολίσθηση TCV_0 σε θερμοκρασία αναφοράς 25°C υπολογίζεται από τη σχέση 2.17 :

$$TCV_0 = \frac{V_0(T_1) - V_0(25^\circ\text{C})}{V_0(25^\circ\text{C}) * (T_1 - 25^\circ\text{C})} \times 10^6 \left[\frac{\text{ppm}}{^\circ\text{C}} \right] \quad (2.17)$$

όπου η $V_0(25^\circ\text{C})$ είναι η τάση εξόδου μηδενικής ολίσθησης στην θερμοκρασία αναφοράς και η $V_1(25^\circ\text{C})$ είναι η μηδενική ολίσθηση της τάσης εξόδου στη θερμοκρασία T_1 . Η παράμετρος του θερμικού συντελεστή ολίσθησης είναι μία σχετική τιμή που είναι ανεξάρτητη από την τάση εξόδου. Επομένως, είναι καλύτερο να χρησιμοποιούμε ως μονάδα το $\text{ppm}/^\circ\text{C}$, παρά το $\text{mV}/^\circ\text{C}$.

Ο θερμικός συντελεστής του αισθητήρα ρεύματος που χρησιμοποιεί δύο αισθητήρες Hall είναι καλύτερος από αυτόν που χρησιμοποιεί έναν. Η τάση εξόδου μηδενικής ολίσθησης V_0 των Hall, μπορεί να εκφραστεί από το σχέση 2.18 [9]:

$$V_0 = K * (V_{h1} - V_{h2}) + V_{ref} \quad (2.18)$$

όπου K είναι το κέρδος του κυκλώματος ενίσχυσης, V_{ref} η σταθερά της τάσης αναφοράς και $V_{h1,2}$ οι τάσεις εξόδου των γραμμικών αισθητήρων Hall. Υποθέτοντας ότι η τάση αναφοράς και το K δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ο συντελεστής θερμικής ολίσθησης είναι ανάλογος της διαφοράς των συντελεστών ολίσθησης των

δύο Hall. Αν θέλουμε να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας του αισθητήρα και να αντισταθμίσουμε τις διακυμάνσεις, θα πρέπει οι τιμές συντελεστών των δύο στοιχείων Hall να είναι παραπλήσιες. Αντίστοιχα, η τάση εξόδου μηδενικής μετατόπισης V_0 του Hall Effect δίνεται από τη σχέση 2.19:

$$V_0 = K * (V_h - V_{ref}) + V_h \quad (2.19)$$

όπου V_h είναι η τάση εξόδου του Hall.

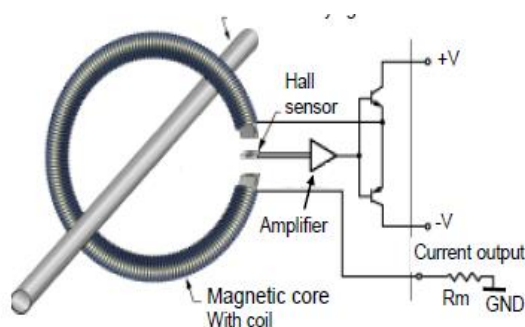
Στη περίπτωση εφαρμογής αισθητήρα με μαγνητικό πυρήνα, μειώνεται το κέρδος του κυκλώματος ενίσχυσης, επειδή η μαγνητική ροή που παράγεται από τον αγωγό ρεύματος συγκεντρώνεται στο διάκενο αέρα του μαγνητικού πυρήνα, στον οποίον τοποθετείται ο Hall. Μελέτες έχουν δείξει ότι το κέρδος του ενισχυτή μπορεί να μειωθεί μέχρι και δέκα φορές όταν χρησιμοποιείται μαγνητικός πυρήνας.

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής παράγεται με χρήση ενός χάλκινου σύρματος ή ενός μαγνητικού πυρήνα. Στη δεύτερη περίπτωση επιτυγχάνεται πολύ χαμηλότερη θερμική ολίσθηση του αισθητήρα, ακριβώς γιατί η πυκνότητα της μαγνητικής ροής αυξάνεται από τον ίδιο τον μαγνητικό πυρήνα [9].

Συνδυάζοντας τα δύο είδη αισθητήρων ανοιχτού βρόχου που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι δυνατή η κατασκευή ενός αισθητήρα που περιλαμβάνει έναν μαγνητικό πυρήνα και δύο Hall. Η θερμική ολίσθηση τότε θα βελτιωνόταν αισθητά γιατί το κέρδος θα μειωνόταν έως και 30 φορές. Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε άλλη μία κατηγορία αισθητήρων Hall, τους αισθητήρες κλειστού βρόχου. Με τη διαμόρφωση του χωρισμένου πυρήνα, το σύστημα κατασκευής του αισθητήρα ρεύματος κατασκευάζεται πιο εύκολα. Η χρήση του κλειστού βρόχου βελτιώνει την ακρίβεια των μετρήσεων, έχοντας μάλιστα και χαμηλό κόστος [10].

Στην τοπολογία κλειστού βρόχου, ένα δευτερεύον πηνίο τυλίγεται γύρω από τον μαλακό μαγνητικό πυρήνα και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται ανιχνεύεται από τον αισθητήρα Hall. Η τάση Hall είναι συνδεδεμένη με έναν ενσωματωμένο ενισχυτή και παράγει ένα ρεύμα για την οδήγηση του πηνίου. Η μαγνητική ροή στον πυρήνα είναι συνεχώς μηδέν, γιατί το μαγνητικό πεδίο με το ρεύμα του πηνίου έχουν αντίθετη φορά. Η έξοδος του αισθητήρα είναι ένα ρεύμα, που ισούται με το

πρωτεύον ρεύμα διαιρεμένο με τον αριθμό των σπειρών του πηνίου. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται ο αισθητήρας Hall κλειστού βρόχου:



Σχήμα 2.7: Αισθητήρας Hall Κλειστού Βρόχου

Ο αισθητήρας αυτός έχει τα πλεονεκτήματα της ευρείας περιοχής συχνοτήτων, της καλής ακρίβειας μετρήσεων, του γρήγορου χρόνου απόκρισης και τέλος της μικρής θερμικής ολίσθησης χωρίς πολλές απώλειες. Όμως υπάρχει δυσκολία στο να κατασκευαστεί η διάταξη με διαχωρισμένο πυρήνα. Στο διαχωρισμό αυτό, ο πυρήνας του αισθητήρα ρεύματος χωρίζεται σε δύο με τρεις επιπλέον πυρήνες, που έχουν κενό αέρος μεταξύ τους. Η επαγωγή L ενός μαλακού μαγνητικού πυρήνα επιφέρει αλλαγή στη μαγνητική ροή εσωτερικά και υπολογίζεται από τη σχέση 2.20 [10]:

$$L = \frac{\mu_i * N^2 * A}{l_m + \mu_r * l_g} \quad (2.20)$$

όπου μ_i είναι η αρχική διαπερατότητα του πυρήνα, μ_r η σχετική διαπερατότητα του πυρήνα, N ο αριθμός στροφών του επαγωγέα, A η διατομή του πυρήνα, l_m το μέσο μήκος του πυρήνα και l_g το πλάτος του κενού αέρα εσωτερικά.

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της επαγωγής $L = N * B / I$, όπου B είναι η μαγνητική ροή και I το ρεύμα, η μαγνητική ροή σε έναν τέτοιο αισθητήρα ρεύματος υπολογίζεται ως εξής:

$$B = \frac{\mu_i * N * I * A}{l_m + \mu_r * l_g} \quad (2.20)$$

Το συνολικό πλάτος του διάκενου του πυρήνα αυξάνεται με επιπλέον κενό αέρα και τότε η μαγνητική ροή μέσω του πυρήνα γίνεται μικρότερη. Η τάση εξόδου του Hall ορίζεται ως $V_H = K * B$ με το K να δείχνει την ευαισθησία του αισθητήρα Hall. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τον αγωγό αντισταθμίζεται πάντοτε από το αντίθετο μαγνητικό πεδίο που παράγεται μέσω του ρεύματος που διέρχεται στο δευτερεύον πηνίο [10].

Το δευτερεύον ρεύμα μπορεί να γραφτεί μέσω της σχέσης 2.21:

$$I_S = \frac{V_H * G}{R_L + Z_S} = \frac{K * B * G}{R_L + Z_S} \quad (2.21)$$

Με το G να είναι ο συντελεστής κέρδους τάσης, R_L η αντίσταση μέτρησης και Z_S η δευτερεύουσα σύνθετη αντίσταση. Το ρεύμα εξόδου του αισθητήρα μειώνεται όταν μειωθεί η μαγνητική ροή, στη περίπτωση που εφαρμόσει κάποιος τη μέθοδο του διαχωρισμένου πυρήνα σε επιμέρους πυρήνες.

Ο στόχος για αυτό το είδος του αισθητήρα Hall είναι να βρεθούν τρόποι αντιστάθμισης της μείωσης του ρεύματος εξόδου. Ο πιο βολικός τρόπος είναι η μείωση των σπειρών του δευτερεύοντος πηνίου από N_1 σε N_2 ($N_1 > N_2$). Τότε για να έχουμε $I_1 < I_2$, θα πρέπει να αντισταθμίσουμε το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το πρωτεύον ρεύμα, σύμφωνα με τη σχέση $N_1 * I_1 = N_2 * I_2$.

Μία δεύτερη μέθοδος είναι να αυξηθεί η διαπερατότητα του μαγνητικού πυρήνα με κατάλληλη επεξεργασία θέρμανσης του, ωστόσο αυτός ο τρόπος δεν είναι ο πλέον οικονομικά αποδεκτός, ενώ η τρίτη και τελευταία λύση είναι να ρυθμίσουμε το σήμα εξόδου του αισθητήρα, μέσω ενός κυκλώματος αντιστάθμισης [10].

Συμπερασματικά και με βάση πειράματα που έχουν γίνει, μερικές παράμετροι του αισθητήρα πρέπει να προσδιοριστούν ώστε να υπάρχει μεγάλο εύρος μέτρησης και υψηλή ακρίβεια. Αυτές οι παράμετροι είναι οι εξής:

- Το κενό αέρα του πυρήνα αισθητήρα.
- Η διάσταση των διαχωρισμένων πυρήνων.
- Οι στροφές και η θέση του δευτερεύοντος πηνίου
- Η θέση τμήματος του μαλακού μαγνητικού πυρήνα, και

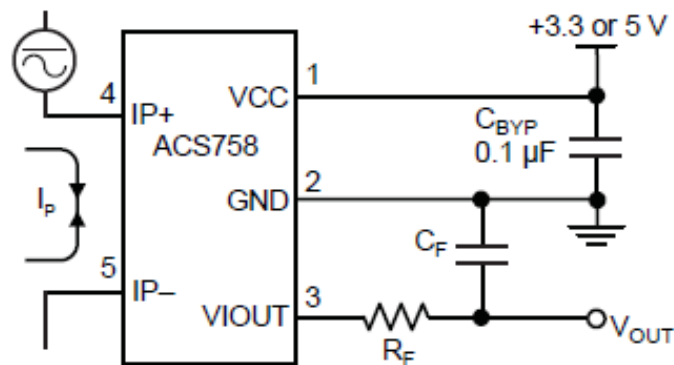
- ο Η θέση των στοιχείων Hall στο Hall Effect.

Αφού προσδιοριστούν όλες οι παράμετροι του αισθητήρα ρεύματος, το κέρδος τάσης του κυκλώματος επεξεργασίας αναλογικού σήματος θα πρέπει να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται ότι ο αισθητήρας αυτός θα ικανοποιεί τις ελάχιστες απαιτήσεις ρεύματος. Για περαιτέρω μελέτη, είναι χρήσιμο να βελτιωθούν οι παράμετροι και οι δομές, ώστε η έξοδος των αισθητήρων να γίνει πιο ακριβής και σταθερότερη με βάση την τεχνολογία αντιστάθμισης σήματος [10].

2.2.2 Ολοκληρωμένο ACS758

Ο πρώτος αισθητήρας μέτρησης ρεύματος που θα παρουσιαστεί είναι ο ACS758, που έχει παρόμοια διάταξη και λειτουργία με το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα παρακάτω. Ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιείται για ανίχνευση ρεύματος και τυπικές του εφαρμογές στη βιομηχανία είναι ο έλεγχος κινητήρα, η διαχείριση του ρεύματος και η ανίχνευση πιθανού σφάλματος υπερέντασης [11].

Η συσκευή αποτελείται από έναν γραμμικό αισθητήρα Hall. Μέσω μιας διαδρομής χαλκού, διέρχεται ρεύμα που δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που είναι υπεύθυνο για μία αναλογική τάση. Η εσωτερική αντίσταση της διαδρομής του χαλκού είναι 100μΩ, παρέχοντας χαμηλή απώλεια ισχύος. Το επόμενο σχήμα 2.8 παρουσιάζει αυτό το μοντέλο αισθητήρα με χρήση 5 pins.



Σχήμα 2.8: Μοντέλο ACS758

Η έξοδος της συσκευής έχει πάντα θετική κλήση ($> V_{CC}/2$) όταν αυξάνεται το ρεύμα I_p που ρέει μέσω των ακροδεκτών 4 και 5. Το πάχος του αγωγού του χαλκού επιτρέπει τη λειτουργία του αισθητήρα σε συνθήκες υπερβολικά υψηλού ρεύματος. Όλη η οικογένεια των αισθητήρων ACS επιτρέπει τη χρήση τους σε εφαρμογές που απαιτούν ηλεκτρική μόνωση, χωρίς τη χρήση οπτικών απομονωτών. Στο σχήμα 2.8 φαίνεται το αναλογικό σήμα V_{OUT} , το οποίο μεταβάλλεται γραμμικά με το ρεύμα δειγματοληψίας, εντός μίας καθορισμένης περιοχής [11]. Ο πυκνωτής C_F χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του θορύβου με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Η συσκευή είναι πλήρως βαθμονομημένη από το εργοστάσιο και λειτουργεί με 5 pins τα οποία περιγράφονται στον πίνακα 2.1:

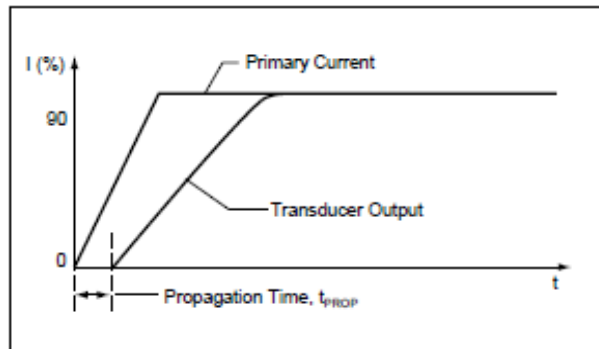
Πίνακας 2.1: Περιγραφή Pins ACS758

Αριθμός Pin	Ονομασία	Περιγραφή
1	VCC	Τροφοδοσία ισχύος συσκευής
2	GND	Γείωση
3	V _{IO} UT	Αναλογικό σήμα εξόδου
4	IP+	Θετικό τερματικό λήψης ρεύματος IP
5	IP-	Αρνητικό τερματικό λήψης ρεύματος IP

Οι κύριοι χαρακτηριστικοί ορισμοί που συναντάμε σε αυτό το μοντέλο είναι οι εξής:

- a) Ηλεκτρική τάση μετατόπισης (V_{OE}): η απόκλιση της συσκευής από την ιδανική κατάσταση ηρεμίας ($V_{CC}/2$), λόγω μη μαγνητικών αιτιών.
- b) Μαγνητικό σφάλμα μετατόπισης (I_{ERROM}): Η μετατόπιση που οφείλεται σε υπολειμματικό μαγνητισμό του υλικού του πυρήνα. Το σφάλμα αυτό είναι υψηλό όταν το μαγνητικό κύκλωμα παρουσιάζει κορεσμό, σε καταστάσεις υπερφόρτωσης υψηλού ρεύματος.
- c) Καθυστέρηση μετάδοσης (t_{PROP}): Ο χρόνος που απαιτεί η συσκευή εξόδου να αντικατοπτρίσει μία αλλαγή στο σήμα του πρωτογενούς ρεύματος δειγματοληψίας. Η καθυστέρηση αυτή αποδίδεται στην επαγωγική φόρτιση

του Hall και στον επαγωγικό βρόχο που σχηματίζεται από την γεωμετρία του πρωτεύοντος αγωγού. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9 [11]:



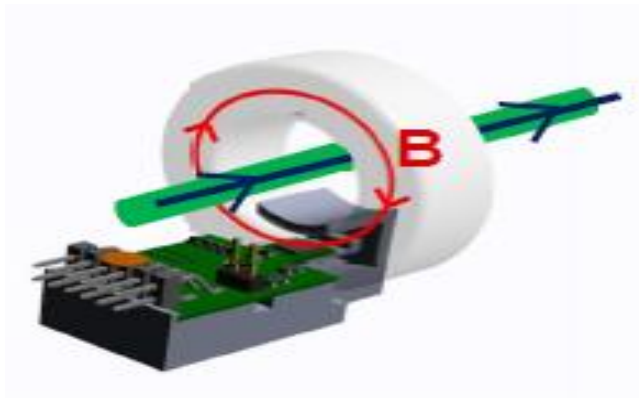
Σχήμα 2.9: Καθυστέρηση Μετάδοσης Σήματος

Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου και τα πλεονεκτήματά του είναι τα εξής:

- Κορυφαία απόδοση στη βιομηχανία λόγω χρήσης αισθητήρα Hall.
- Συνολική βελτίωση σφάλματος εξόδου, μέσω κέρδους μετατόπισης από την αλλαγή της θερμοκρασίας λειτουργίας.
- Μικρό μέγεθος συσκευασίας και εύκολη τοποθέτηση.
- Ανίχνευση ρεύματος σε συστήματα υψηλής τάσης και εξαιρετικά μικρή απώλεια ισχύος, λόγω χρήσης εσωτερικής αντίστασης εισόδου.
- Λειτουργία τροφοδοσίας στα 3–5.5 V και εύρος ζώνης συχνοτήτων 120kHz.
- Χρόνος απόκρισης 3μs.
- Τάση εξόδου ανάλογη προς τα ρεύματα AC και DC, σταθερή τάση μετατόπισης εξόδου και μηδενική μαγνητική υστέρηση [11].
- Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας -40°C μέχρι και 150°C.

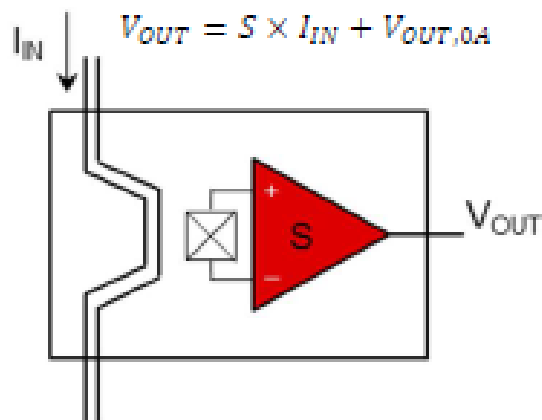
2.2.3 Ολοκληρωμένο TMCS1100

Το τελευταίο μοντέλο μέτρησης ρεύματος που θα περιγράψει θεωρητικά αφορά τον αισθητήρα TMCS1100. Κατά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, παράγεται ένα ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό με κατεύθυνση που δίνει ένας μικρός ωμικός αντισταθμιστής. Η ανίχνευση του ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 2.10 [12]:



Σχήμα 2.10: Ανίχνευση Ρεύματος

Το ρεύμα ρέει μέσω ενός μαγνητικού πλαισίου που είναι απομονωμένο από την κύρια μήτρα του αγωγού. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται είναι ανάλογο του ρεύματος. Η χρήση του Hall μετατρέπει το μαγνητικό πεδίο αυτό σε σήμα τάσης, μέσω της σχέσης που δείχνει το σχήμα παρακάτω:



Σχήμα 2.11: Σχέση Μαγνητικού Πεδίου - Ρεύματος

Το μοντέλο αυτό παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια στη μετάβαση ρεύματος – σήματος τάσης και το σήμα τάσης που εξάγεται από τον Hall αισθητήρα, μετατρέπεται στην έξοδο σε σήμα 0 – 5 V (για το V_{OUT}) [12].

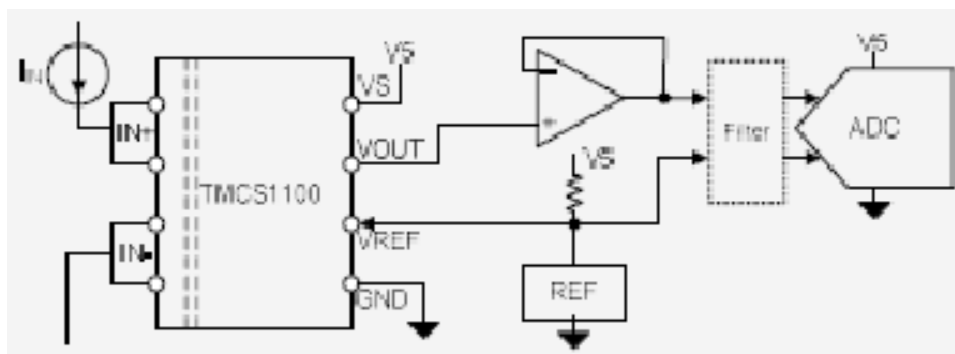
Τα συστήματα TMCS δίνουν μία πιο αντισταθμισμένη λύση κόστους κατασκευής / απόδοσης, αφού τα σήματα των αισθητήρων υπερνικούν τις δύο μεγαλύτερες προκλήσεις: α) γραμμικότητα και β) σταθερότητα θερμοκρασίας κατά τη μαγνητική ανίχνευση ρεύματος. Η συσκευή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Δυνατότητα για μετρήσεις AC ή DC ρεύματος.
- Ελαχιστοποίηση κόστους, λόγω λίγων εξαρτημάτων.
- Η έξοδος αναλογικού ενισχυτή χαμηλής τάσης ενσωματώνεται με προσοχή στον αισθητήρα βιομηχανικού τύπου.
- Βελτιστοποιημένη απόδοση και ευελιξία σήματος στο θερμοκρασιακό εύρος -40°C με 125°C , ενώ το σφάλμα απόδοσης είναι $<1\%$. Τέλος, η γραμμικότητα φτάνει το επίπεδο του 0.1% .

Η ευαισθησία παραμένει σταθερή σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, ενώ οι τιμές λειτουργίας του αισθητήρα είναι οι παρακάτω:

- Εύρος ζώνης συχνοτήτων 80kHz.
- Τάση λειτουργίας 600V.
- 20A μέγιστο συνεχές ρεύμα και τάση VCC μεταξύ 3 και 5.5 V.
- Ευαισθησία 50 mV/A σε όλη τη γραμμική περιοχή λειτουργίας.

Η έξοδος ακριβείας με βάση τη γείωση σημαίνει λιγότερες πηγές σφαλμάτων, ενώ η σταθερή ευαισθησία ελαχιστοποιεί τον θόρυβο παροχής του κυκλώματος. Τα 8 pins του μοντέλου TMCS1100 δείχνονται παρακάτω (σχήμα 2.12):



Σχήμα 2.12: Ονομασία pins Μοντέλου TMCS1100

Όπου τα V_S και V_{ref} βρίσκονται σε μία ενιαία συσκευή για τη βελτίωση του σήματος (μέσω της χρήσης φίλτρου).

Η ενσωματωμένη είσοδος 600V βοηθάει στη μείωση των εξαρτημάτων καταμέτρησης ρεύματος [12]. Το ρεύμα εισόδου V_{supply} χρησιμοποιείται για την γαλβανική απομόνωση του φίλτρου με το ADC σήμα. Τελειώνοντας τη περιγραφή του αισθητήρα, τα θετικά του είναι τα εξής:

- Ικανότητα να μετρηθεί απομονωμένα ένα ρεύμα DC ή AC.
- Ανίχνευση ρεύματος υψηλής ακρίβειας και χωρίς σφάλματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Μικρός θόρυβος λόγω καλής ευαισθησίας.
- Γρήγορος χρόνος απόκρισης.
- Υψηλή λειτουργικότητα της τάσης των 600V με τη χρήση των 8 pins.
- Εσωτερική τάση αναφοράς V_s για την αμφίδρομη ή την μονοκατευθυντική ανίχνευση του ρεύματος.
- Η ανίχνευση του ρεύματος απλοποιεί τον σχεδιασμό του PCB (Printed Circuit Board).

2.3 Μετρητικά Συστήματα Ποιότητας Ισχύος

Οι μετρήσεις της ποιότητας ισχύος σχετίζονται με την παροχή και την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας, δίνοντας πληροφορίες για την παροχή ενέργειας. Επειδή η ευαισθησία των συστημάτων είναι υψηλή σήμερα, είναι σημαντικό να παρακολουθείται η κατανάλωση και η ποιότητα της ισχύος PQ (Power Quality), μέσω της εγκατάστασης συστημάτων παρακολούθησης για ένα χρονικό διάστημα. Τέτοιες συσκευές χρησιμοποιούνται από μηχανικούς και ηλεκτρολόγους που διεξάγουν διαγνωστικές μελέτες στα ηλεκτρικά συστήματα και εντοπίζουν πιθανά σφάλματα πριν συμβούν, μέσω της βοήθειας των pins ελέγχου. Το αρνητικό σε αυτά τα συστήματα είναι ότι είναι αρκετά δαπανηρά, δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα στο μέγιστο δυνατό βαθμό και δεν γίνεται να χρησιμοποιηθούν από ανειδίκευτους χρήστες [13].

2.3.1 Σύστημα OpenZmeter Ανάλυσης Ισχύος

Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Αλμερίας από μια ομάδα ερευνητών με σκοπό την ανάλυση της ποιότητας ισχύος. Μέσω της ανάπτυξης λογισμικού ανοιχτού κώδικα, κατασκευάστηκε μία προηγμένη φθηνή συσκευή (που κοστίζει γύρω στα 50 δολάρια) η οποία βελτίωσε πολλά από τα χαρακτηριστικά των ήδη υπαρχόντων εμπορικών συσκευών. Η εγκατάστασή του θεωρείται πολύ εύκολη και η παράλληλη επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων (μέσω ενός φιλικού προς τον χρήστη συστήματος ελέγχου εποπτείας και καταγραφής δεδομένων) κερδίζει μεγάλο έδαφος στις μέρες μας.

Στα θετικά του προσμετρώνται η εξαγωγή στατιστικών, η εξεύρεση μορφών κατανάλωσης χάρης στις πολλαπλές οπτικοποιήσεις και η ανάλυση της απαιτούμενης ισχύος με τέτοιο τρόπο, ώστε να καθορίζεται αν η ηλεκτρική συσκευή απαιτεί ή όχι λιγότερη ενέργεια για τη λειτουργία της. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι τεχνικές προδιαγραφές του μονοφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας και μία σύντομη ανάλυση των δεδομένων που μετρούνται. Η ακριβής ποσοτικοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει την αποδοτικότητα του συστήματος και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα σφαλμάτων.

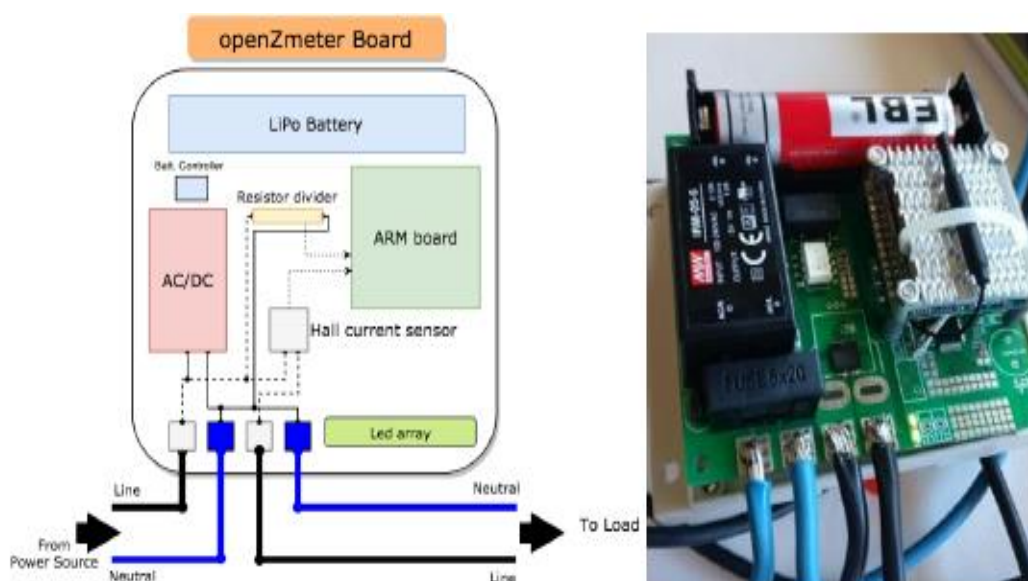
Μία τέτοια υψηλής ποιότητας ανάλυση δεδομένων ευνοεί την αποτελεσματική χρήση των ενεργειακών πόρων και καθιστά την συσκευή ουσιαστική στη μελέτη των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και της κατανάλωσης ενέργειας. Η καταγραφή της ενεργειακής απόδοσης βοηθάει στον καλύτερο σχεδιασμό των συστημάτων αυτοματισμού και στην ανάκτηση πληροφοριών χρησιμοποίησης της ενέργειας. Οι αναλυτές ποιότητας ισχύος μετρούν μια μεγάλη ποικιλία παραμέτρων, όπως είναι οι αρμονικές παραμορφώσεις, οι βραχυχρόνιες διαταραχές λόγω θορύβου, οι μεταβατικές μεταβολές τάσης και η ένταση φλίκερ [13].

Οι ερευνητές αυτής της συσκευής παρουσίασαν ένα φορητό κύκλωμα ενεργειακής καταγραφής με χρήση μπαταριών για την παρακολούθηση της ενέργειας και την ανάλυση συχνότητας με σκοπό την παρακολούθηση της κυματομορφής της ποιότητας ισχύος.

Το Open Energy Monitor είναι ένα άλλο σύστημα παρακολούθησης της ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο. Ο βασικός του ρόλος θα αποδειχθεί παρακάτω,

όπου οι έξυπνοι μετρητές και το σύστημα διαχείρισης ενσωματώνονται σε ένα πλαίσιο έξυπνου δικτύου. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον μπορούμε να προσθέσουμε κάποιες επιπλέον λειτουργίες, όπως ένα μη παρεμβατικό φορτίο παρακολούθησης, καινούργια στατιστικά στοιχεία που θα εξασφαλίζουν ότι οι μετρήσεις θα έχουν μικρό σφάλμα και θα ακολουθούν μόνο τα διεθνή πρότυπα μέτρησης ενέργειας (όπως είναι το IEC 62052) [13].

Το OpenZmeter ξεπερνάει τις ήδη υπάρχουσες έξυπνες συσκευές, αφού είναι σε θέση να μετράει ταυτόχρονα συχνότητα, τάση, ρεύμα, αρμονικές, φάσεις και συντελεστές ισχύος. Οι τιμές που προσμετρώνται σε πραγματικό χρόνο μπορούν να σταλούν μέσω δικτύου σε υπηρεσίες κοινής ωφέλειας, αφού υπάρχει διασύνδεση με API εφαρμογή που βασίζεται στην ήδη υπάρχουσα αξιοπιστία του λειτουργικού συστήματος των LINUX. Η φυσική διάταξη και οι τεχνικές προδιαγραφές του OpenZmeter παρουσιάζονται στο σχήμα 2.13:



Σχήμα 2.13: α) Διάγραμμα Λειτουργίας β) Φυσική Διάταξη Του oZm

Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζονται το σχήμα λειτουργίας του oZm και μία εικόνα της πραγματικής συσκευής. Η συσκευή έχει αναλογικό τμήμα που είναι υπεύθυνο για τη λήψη κυματομορφών τάσης και ρεύματος. Η τάση αποκτάται με έναν απλό διαχωριστή αντίστασης, ο οποίος μειώνει την τιμή των 230V σε πολύ μικρότερη τιμή που είναι κατάλληλη για την είσοδο στον ADC μετατροπέα σήματος.

Το ρεύμα μετριέται από έναν ενσωματωμένο αισθητήρα Hall, μέγιστης τιμής 50A και ακρίβειας 1%. Για την αποφυγή σφαλμάτων, τόσο ο αισθητήρας Hall όσο και το πηνίο Rogowsky (που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση εκατοντάδων amperes σε μεγαλύτερα κτίρια) συγχρονίζουν τα κανάλια τους με την τάση, ώστε η απόκλιση να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη [13].

Η τροφοδοσία του oZm γίνεται απευθείας από το δίκτυο με χρήση απομονωμένης πηγής AC/DC. Μία μπαταρία ιόντων λιθίου χρησιμοποιείται για να διατηρείται σε λειτουργία το σύστημα σε συνθήκες χαμηλής τάσης ή διακοπών. Όταν αποκατασταθεί η κύρια ισχύς στο κύκλωμα η μπαταρία επαναφορτίζεται. Το oZm έχει γαλβανική απομόνωση για την τάση εισόδου, για το ρεύμα εισόδου και για την πλακέτα του συστήματος (μέσω χρήσης οπτικών συζευκτών). Οι συνήθειες προσεγγίσεις για την παρακολούθηση των μετρήσεων βασίζονται στην χρήση μικροεπεξεργαστών, καρτών συλλογής δεδομένων και FPGA (Field Programmable Gate Array). Σε κάθε περίπτωση, η έξυπνη συσκευή μέτρησης έχει σχεδιαστεί για να συνδέει το λειτουργικό Linux με τον μικροελεγκτή STM32, που είναι εύκολα διαχειρίσιμος και με μικρό κόστος. Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από την ποιότητα βαθμονόμησης του συστήματος και από την ορθότητα των αλγόριθμων που εφαρμόζονται στον μετρητή. Το oZm εκπληρώνει αυτές τις απαιτήσεις ακρίβειας.

Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται τοπικά χάρη στην ενσωματωμένη μνήμη χωρητικότητας έως και 16 GB, με δυνατότητα επέκτασης με μία ακόμη κάρτα εσωτερικά. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει ένα API για την αποστολή των δεδομένων στον υπολογιστή [13].

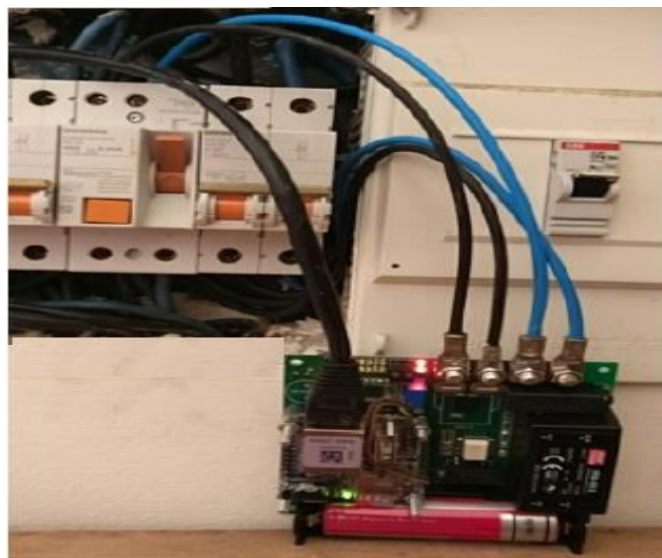
Η απομακρυσμένη παρακολούθηση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: α) με τη χρήση ενός τερματικού που θα έχει πρόσβαση στα δεδομένα με απλό και εύκολο τρόπο και β) με τη χρήση ενός προγράμματος περιήγησης ιστού (έχοντας ένα VPN δίκτυο – Virtual Private Network) που θα συνδέεται επάνω στον τοπικό εξυπηρετητή και θα τρέχει στην βιβλιοθήκη που έχει επιλεγεί. Τα κύρια χαρακτηριστικά του oZm είναι:

- Ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα.
- Ηλεκτρικές μετρήσεις που αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων.
- Μετρήσεις για την κατανάλωση και τη παραγωγή ενέργειας.

- Μετρήσεις με ακρίβεια 0.1 %, σε ρεύμα έως 50A και συχνότητας 10MHz.
- Συχνότητα δειγματοληψίας 15.62Hz. Χρησιμοποιείται και φίλτρο ψηφιακής εισόδου για την ελαχιστοποίηση του θορύβου. Διαφορά χρόνου: 64μs μεταξύ των δειγμάτων.
- Σύστημα διαχείρισης και εμφάνισης διακοπών ή υπερτάσεων.
- Ενσωμάτωση στο κανάλι τάσης 10 κύκλων, με 3s διαφορά ο καθένας, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-30.
- Μικρό σφάλμα χρόνου (μικρότερο από 20ms) σε ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον διασύνδεσης εφαρμογών.
- Σύνδεση σε σύστημα για την απόκτηση ημερήσιων τιμών της ενέργειας.

Παρά το ευρύ φάσμα εφαρμογών που έχει το oZm αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί, όπως η έλλειψη τεχνικής υποστήριξης για το υλικό και για το λογισμικό [13].

Η διαμόρφωση του oZm μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση Wi-Fi ή Ethernet. Η τοποθέτηση και η καλωδίωσή του είναι παρόμοια με αυτή του μετρητή ενέργειας, έτσι ώστε η ονομαστική του τάση να εφαρμόζεται σε έναν εσωτερικό διαιρέτη τάσης που παρέχει μία έξοδο χαμηλής τάσης, γραμμική στη τάση εισόδου του ADC. Το πλάτος της εξόδου υπολογίζεται για να αποφευχθεί η θέρμανση που προκαλείται από τις απώλειες του φαινομένου Joule.



Σχήμα 2.14: Εγκατάσταση Του oZm Στον Κεντρικό Πίνακα Κτιρίου

Το σχήμα 2.14 δείχνει την εγκατάσταση της συσκευής σε κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα διακοπών για ένα οικιακό κύκλωμα. Το μονοφασικό οZm μπορεί να εγκατασταθεί και σε μεγάλα κτίρια, τοποθετώντας αρκετές συσκευές σε διάφορες τοποθεσίες, ώστε να παρακολουθούνται καθημερινά με το βέλτιστο δυνατό και ποιοτικό τρόπο όλες οι ηλεκτρικές παράμετροι που καταναλώνουν ενέργεια. Αυτό γίνεται μέσω της ανάλυσης δεδομένων που ακολουθεί στη συνέχεια:

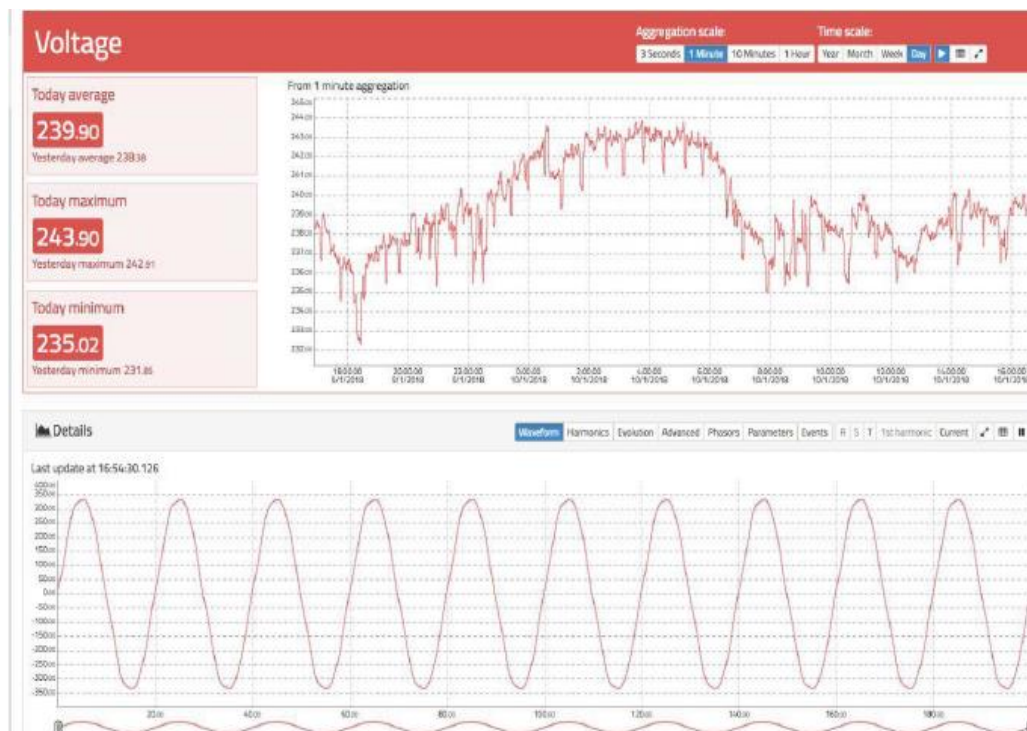
Τα δεδομένα αρχικά συλλέγονται ανά κατηγορία και μετά αναλύονται διεξοδικά, χρησιμοποιώντας στατιστικά εργαλεία και τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε μία γραφική διεπαφή που σχεδιάστηκε ειδικά για το μοντέλο οZm. Η μορφή των αποτελεσμάτων αυτών (που αφορούν την κατανάλωση και την ποιότητα της ενέργειας) παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 2.15, όπου ο πίνακας του οZm περιλαμβάνει μετρήσεις για βασικά μεγέθη, όπως είναι η ενεργή κατανάλωση ενέργειας (σε kWh). Τέτοια μεγέθη αναλύονται σε διαφορετικό χρόνο και σε διαφορετική κλίμακα συσσώρευσης τιμών [13].



Σχήμα 2.15: Πίνακας Μετρήσεων Του ΟZm

Όλα τα παράθυρα που εμφανίζονται δημιουργούνται μέσω ενός κοινού προτύπου που βασίζεται στις γλώσσες HTML5, JavaScript και JQuery, παρέχοντας πληροφορίες για την ενεργό τάση, το ενεργό ρεύμα, τη συχνότητα και την ενεργό ισχύ για ένα διάστημα κάποιων δευτερολέπτων. Το επάνω μέρος του προγράμματος δείχνει την ημερήσια ενεργή κατανάλωση ενέργειας σε ένα οικιακό δίκτυο που έγιναν οι μετρήσεις. Οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων SQL και μπορούν να ανακτηθούν μετά από μία ημέρα, μία βδομάδα, ένα μήνα ή ένα έτος.

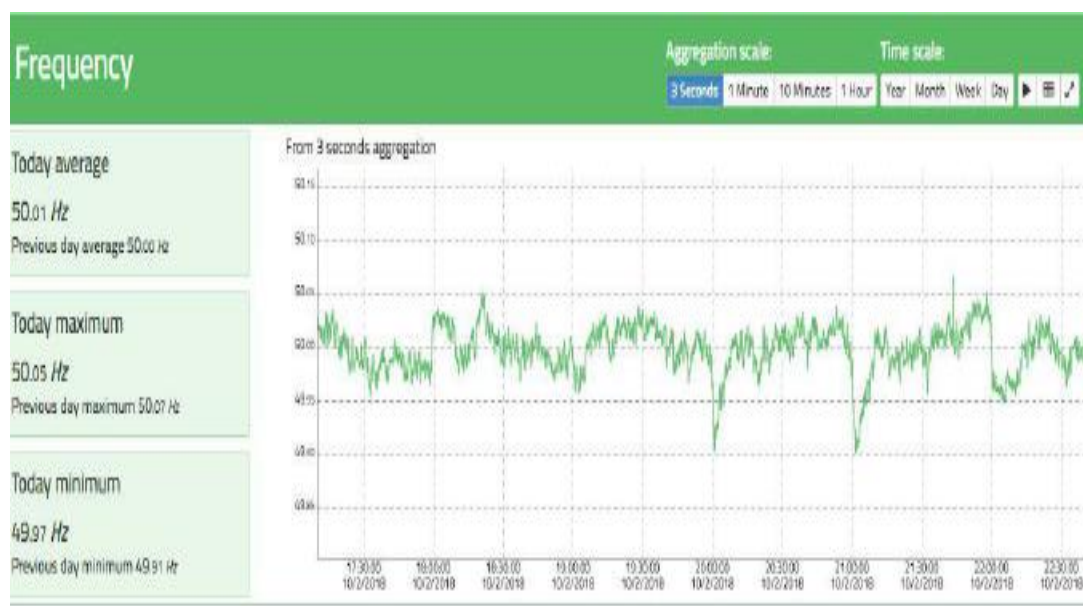
Το oZm μπορεί να χρησιμεύσει και ως παλμογράφος για τη διάγνωση μίας κυματομορφής και να υπολογίσει το μέσο, το ελάχιστο και το μέγιστο μέγεθος της τάσης για ένα χρονικό διάστημα. Αυτό ακριβώς το είδος κυματομορφής φαίνεται στο επόμενο σχήμα 2.16:



Σχήμα 2.16: Αναλυτικές Πληροφορίες Του OZm Για Την Ημερήσια Τάση

Αντίστοιχα, μπορεί να γίνει το ίδιο και για το ρεύμα και την ενεργό ισχύ των κυκλωμάτων. Η συχνότητα του εναλλασσόμενου AC ρεύματος ορίζεται στα 50 ή 60 Hz. Αν και η συχνότητα ενός συστήματος είναι αυστηρά ρυθμισμένη, δεν είναι πάντα σταθερή, εξαιτίας των συνεχόμενων αλλαγών φορτίου στο δίκτυο που έχουν ως αποτέλεσμα την αλλαγή απόκρισης. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει πάντα μία δυσκολία

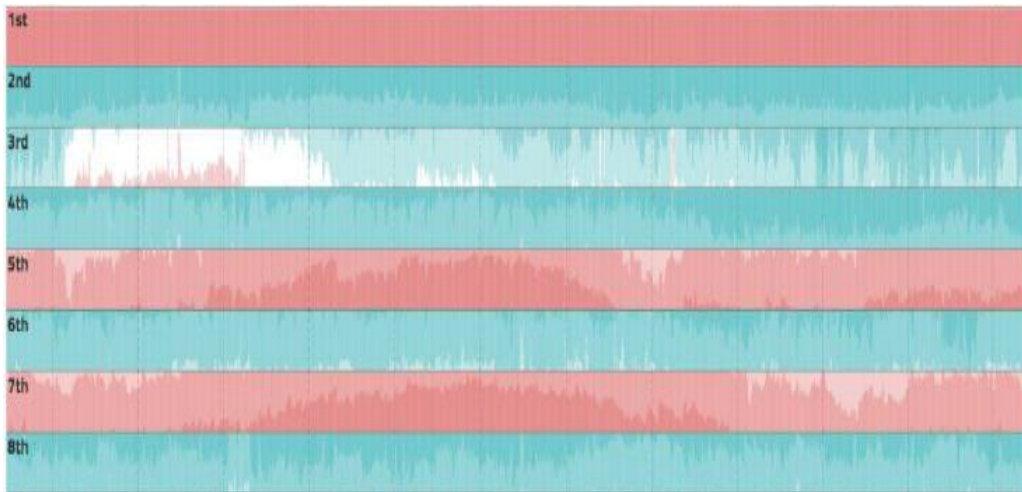
στον προγραμματισμό των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Το oZm είναι σε θέση να καταγράψει αυτές τις διακυμάνσεις στη συχνότητα, που είναι μικρές όταν μεταβάλλονται ηλεκτρικά φορτία και μεγάλες όταν μεταβάλλεται η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ακρίβεια του oZm είναι λίγο υψηλότερη από 10MHz. Το σχήμα 2.17 περιγράφει ακριβώς τα παραπάνω που αναλύθηκαν [13]:



Σχήμα 2.17: Ημερήσια Μεταβολή Της Συχνότητας

Το μοντέλο αυτό παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για τα γεγονότα των μετρήσεων της ποιότητας ισχύος που έχουν καταγραφεί σε κανονικές και μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτό γίνεται συνήθως μέσω κάποιων καμπυλών ανοχής, που αντιπροσωπεύουν τα προβλήματα που εμφανίζονται σε γεγονότα τάσεων σε μια ηλεκτρονική συσκευή. Η ανίχνευση αρμονικών συναρτήσεων σε ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σημαντικό ζήτημα, γιατί οι αρμονικές σε συνδυασμό με τη θεμελιώδη συχνότητα τροφοδοσίας μπορεί να οδηγήσουν στη παραμόρφωση των κυματομορφών τάσης και ρεύματος.

Στο κατακόρυφο σύστημα, κάθε σειρά αντιπροσωπεύει μία αρμονική συνιστώσα για τις τελευταίες 24 ώρες. Στο σχήμα 2.18 που ακολουθεί, οι πιο σκούρες αποχρώσεις σημαίνουν υψηλότερες απόλυτες τιμές, οι κόκκινες αναφέρονται σε τιμές άνω των 0dB θορύβου και οι μπλε αναφέρονται σε τιμές κάτω των 0dB [13].



Σχήμα 2.18: Εισαγωγή Των Πρώτων 8 Αρμονικών Συναρτήσεων

Συμπερασματικά, οι αναλυτές ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας σαν τον oZm χρησιμοποιούνται για να ανακαλύψουν την κατάσταση λειτουργίας των συστημάτων ενέργειας. Τα θετικά αυτού του ολοκληρωμένου μοντέλου είναι τα εξής [13]:

- Ανοικτή πηγή κώδικα χαμηλού κόστους.
- Έξυπνος μετρητής ανάλυσης ποιότητας ενέργειας.
- Ανάκτηση μεγάλης ποσότητας πληροφοριών που σχετίζονται με τη κατανάλωση και τη ποιότητα ενέργειας. Αυτή η προσέγγιση ανοιχτού κώδικα με τα δεδομένα που λαμβάνονται σε πραγματικό περιβάλλον συμβάλλει στη βιώσιμη (και χωρίς σπατάλη) χρήση της ενέργειας.
- Εύκολη διεπαφή χρήστη, αφού η ανάκτηση ποσότητας πληροφοριών γίνεται μέσω προηγμένων γραφικών απεικονίσεων. Τα γραφήματα μπορούν εύκολα να ερμηνευτούν και από μη ειδικούς χρήστες.

Αντιθέτως, τα μειονεκτήματα του τρέχοντος μοντέλου είναι:

- Μονοφασική έκδοση του μοντέλου oZm.
- Ελάχιστη ασφάλεια δεδομένων μέτρησης (λόγω ανοιχτού κώδικα).

3 Ανάπτυξη συσκευής παρακολούθησης ηλεκτρικής ισχύος

3.1 Arduino Uno

Η πλακέτα Arduino UNO επελέγη να χρησιμοποιηθεί στα πειράματα που ακολούθησαν. Διαθέτει 14 ψηφιακά pins εισόδου/εξόδου (I/O), 6 pins αναλογικών εισόδων, έναν ταλαντωτή συχνότητας 16MHz, μία θύρα USB, μία υποδοχή τροφοδοσίας και ένα κουμπί επαναφοράς. Το μοντέλο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1:



Σχήμα 3.1: Arduino Uno

Το μοντέλο διαφέρει από παλιότερα μοντέλα στο ότι χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή ATmega328. Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου είναι τα παρακάτω [14]:

Μικροελεγκτής	ATmega 328
Τάση λειτουργίας	5V
Όρια τάσης εισόδου	6-20 V
Pins εισόδου / εξόδου	14
Αναλογικά pin εισόδου	6
Ρεύμα pin εισόδου	40mA
Μνήμη	32KB
Ταχύτητα ρολογιού	16MHz

Το Uno τροφοδοτείται είτε μέσω σύνδεσης USB είτε με εξωτερικό τροφοδοτικό. Η πηγή τροφοδοσίας επιλέγεται αυτόματα. Μία μπαταρία είναι εφικτό να συνδεθεί στις υποδοχές GND και Vin.

Η πλακέτα λειτουργεί με εξωτερική τροφοδοσία 6–20 V. Εάν η τροφοδοσία είναι κάτω από 7V, τότε το pin 5V θα έχει μικρότερη παροχή και η πλακέτα θα είναι ασταθής. Εάν χρησιμοποιούνται πάνω από 12V, τότε ο σταθεροποιητής τάσης μπορεί να υπερθερμανθεί. Η ενδιάμεση λειτουργία είναι η ενδεδειγμένη. Τα pins λειτουργίας αναλυτικά είναι τα παρακάτω [14]:

- *VIN*: Η τάση εισόδου στην πλακέτα του Arduino όταν χρησιμοποιείται εξωτερική τροφοδοσία. Η τιμή της ορίζεται στα 5V.
- *5V*: Η παροχή τάσης που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή και άλλων εξαρτημάτων. Αυτή μπορεί να προέρχεται είτε από το VIN είτε από τη θύρα USB.
- *3V3*: Η τροφοδοσία των 3.3V που παρέχεται από τον σταθεροποιητή. Η μέγιστη είσοδος ρεύματος μπορεί να φτάσει τα 50 mA.
- *GND*: Ακροδέκτης γείωσης.
- *Serial RX και TX*: Λήψη και μετάδοση σειριακών δεδομένων. Τα pins τους συνδέονται στους ακροδέκτες του μικροελεγκτή ATmega328 παρέχοντας επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου TTL. Υπάρχει επίσης ένας ελεγκτής ATmega8U2 για να βοηθάει τη σειριακή επικοινωνία μεταξύ θύρας USB και της εικονικής θύρας COM του λογισμικού του υπολογιστή. Όταν διαβιβάζονται πληροφορίες οι λυχνίες των 2 pins αναβοσβήνουν και ειδοποιούν το χρήστη ότι μεταβιβάζονται πληροφορίες στον υπολογιστή.
- *Interrupt pins 2 and 3*: Τα pin αυτά ενεργοποιούν μία διακοπή λειτουργίας όταν έχουμε μία χαμηλή ή ασυνήθιστα υψηλή τιμή σε κάποια λειτουργία. Για παράδειγμα, υπάρχει ρύθμιση που προστατεύει τις θύρες USB ενός υπολογιστή από μία πιθανή υπερένταση. Αν εφαρμόζεται ρεύμα πάνω από 500mA, τότε αμέσως η ασφάλεια διακόπτει τη σύνδεση με το Arduino μέχρι να αντιμετωπιστεί ένα βραχυκύκλωμα ή μία υπερένταση.
- *Pin 3, 5, 6, 9, 10, and 11*: Pins για έξοδο τύπου PWM (σε μορφή 8-bit), όταν κληθεί η συνάρτηση `analogWrite()` στο πρόγραμμα Arduino IDE.

- *SPI*: 4 pins που χρησιμοποιούνται για την περιφερειακή σειριακή επικοινωνία (SPI – Serial Peripheral Interface) που γίνεται μέσω της ειδικής βιβλιοθήκης του προγράμματος Arduino IDE. Το λογισμικό του Arduino για την απλοποίηση της επικοινωνίας, περιλαμβάνει μία βιβλιοθήκη (Software Serial Library) που λειτουργεί και αυτή μέσω του ελεγκτή ATmega328.
- *LED*: Όταν το pin έχει τιμή HIGH, η λυχνία LED ανάβει, αλλιώς είναι κλειστή όταν το pin έχει τιμή LOW.
- *AREF*: Τάση αναφοράς για τις αναλογικές εισόδους. Κάθε αναλογική είσοδος (A0 – A5) περιέχει 10 bits (δηλαδή 1024 διαφορετικές τιμές) και η αλλαγή του εύρους τους γίνεται με χρήση του ακροδέκτη AREF.
- *RESET*: Επαναφορά του μικροελεγκτή στην αρχική κατάσταση λειτουργίας.

Το Arduino έχει πάντα εγκατεστημένο από πριν ένα πρόγραμμα φόρτωσης αρχείων, που επιτρέπει στο χρήστη να μεταφορτώνει κώδικα χωρίς χρήση εξωτερικού προγραμματιστή υλικού. Αν θέλουμε να το παρακάμψουμε, μπορούμε να το προγραμματίσουμε μέσω του ελεγκτή ICSP (In - Circuit Serial Programming) [14].

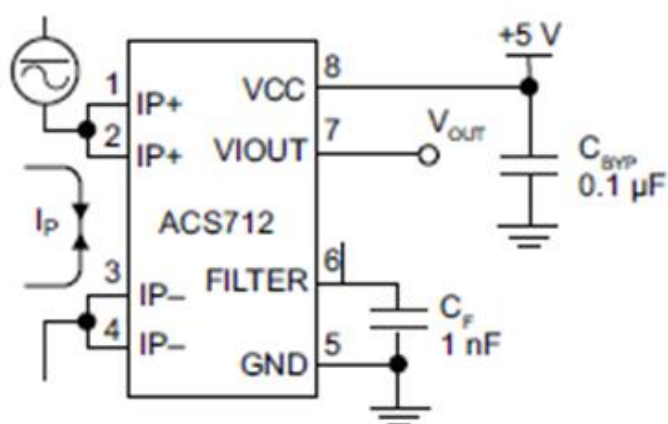
3.2 Αισθητήρας ACS712

Το μοντέλο ρεύματος που θα χρησιμοποιηθεί στις μετρήσεις μας σε αυτή την εργασία είναι το ACS712, γιατί παρέχει με ακρίβεια και με οικονομικό τρόπο λύσεις για την ανίχνευση ρεύματος σε βιομηχανικά κτίρια, αυτοκινητοβιομηχανίες και επικοινωνιακά συστήματα. Όλο το πακέτο είναι δομημένο με τέτοιο τρόπο ώστε η εφαρμογή και η χρήση του από τον καταναλωτή να είναι πολύ εύκολη. Στις τυπικές εφαρμογές του περιλαμβάνονται η ανίχνευση και ο έλεγχος ρεύματος, οι τάσεις τροφοδοσίας, ο έλεγχος υπέρτασης και η προστασία από πιθανά σφάλματα.

Η συσκευή αποτελείται από ένα κύκλωμα γραμμικού αισθητήρα Hall που παρουσιάζει μία μικρή ολίσθηση και περιέχει ένα μονοπάτι χαλκού στην επιφάνειά του. Μέσω αυτής της διαδρομής χαλκού, ρέει ένα ρεύμα και η αγωγιμότητα που δημιουργείται από αυτό, παράγει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο ανιχνεύεται από τον

αισθητήρα Hall και μετατρέπεται σε αναλογική τάση. Η ακρίβεια της συσκευής βελτιστοποιείται μέσω της μείωσης μαγνητικού σήματος στο μετατροπέα Hall [15].

Το ACS712 παράγει στην έξοδο ένα αναλογικό σήμα V_{OUT} που μεταβάλλεται γραμμικά με το ρεύμα (I_P) εντός ενός καθορισμένου εύρους. Η χρήση μίας συχνότητας βαθμονόμησης CF (Calibration Frequency) είναι απαραίτητη στο μοντέλο για την εξάλειψη του θορύβου και οι τιμές της διαφέρουν, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Το κύκλωμα του μοντέλου που μας ενδιαφέρει, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2: Το Κύκλωμα Του Μοντέλου ACS712

Όπως παρατηρείται, υπάρχουν 8 pins λειτουργιών. Η έξοδος της συσκευής έχει πάντα θετική κλίση ($>V_{IOUT}(Q)$) όταν ένα ρεύμα με αυξανόμενη τιμή ρέει μέσω του χαλκού από τους ακροδέκτες 1, 2 προς τους ακροδέκτες 3, 4, του οποίου η διαδρομή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ρεύματος. Η εσωτερική αντίσταση αυτής της αγώγιμης διαδρομής είναι 1.2 MΩ, παρέχοντας χαμηλή ισχύ στο κύκλωμα. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις χαρακτηριστικές τιμές των μεγεθών του κυκλώματος και στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή του κυκλώματος και των pins αντίστοιχα:

- Εύρος ζώνης συσκευής (Bandwidth) 50kHz .
- Χρόνος απόκρισης εισόδου 5μs.
- 2.1kV RMS τάση απομόνωσης των pins 1-4 έως τα pins 5-8 και

- 4% συνολικό σφάλμα στο εύρος διακύμανσης θερμοκρασιών (-40°C έως 85°C).
- Αντίσταση εσωτερικού αγωγού 1.2mΩ.
- Τροφοδοσία λειτουργίας στα 5V και ευαισθησία εξόδου 66–185 mV/A .
- Σχεδόν μηδενική μαγνητική υστέρηση και εξαιρετικά σταθερή τάση μετατόπισης εξόδου.

Τα pins 5 έως 8 είναι ηλεκτρικά απομονωμένα από τους αγωγούς σήματος και κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν σε συνθήκες υπερέντασης. Αυτό επιτρέπει στο κύκλωμα να χρησιμοποιηθεί με ηλεκτρική μόνωση, χωρίς τη χρήση οπτικών απομονωτών ή άλλων δαπανηρών τεχνικών απομόνωσης [15].

Το ACS712 είναι ένα μικρό πακέτο που στο κεντρικό πλαίσιο της επιφάνειάς του έχει επίστρωση με κασσίτερο για να μπορεί να συμβαδίζει με τους πρότυπους τυπικούς κανόνες συναρμολόγησης πλακέτας κυκλώματος. Η συσκευή είναι πλήρως βαθμονομημένη κατά την αποστολή της από το εργοστάσιο και με ιδιαίτερες ικανότητες στην αντοχή υψηλών θερμοκρασιών. Στη συνέχεια παρατίθεται η περιγραφή των pins 1–8 και η λειτουργία τους:

Πίνακας 1: Περιγραφή pins του μοντέλου ACS712

Αριθμός Pin	Ονομασία	Περιγραφή
1, 2	IP+	Τερματικά για ρεύμα δειγματοληψίας αναλογικής μορφής.
3, 4	IP-	Τερματικά για ρεύμα δειγματοληψίας αναλογικής μορφής.
5	GND	Τερματικό γείωσης σήματος (V=0).
6	FILTER	Τερματικό εξωτερικού πυκνωτή που καθορίζει το εύρος ζώνης συχνοτήτων.
7	VIOUT	Αναλογικό σήμα εξόδου με χαμηλό θόρυβο.
8	VCC	Τερματικό τροφοδοσίας ισχύος συσκευής.

Στο μοντέλο αυτό δίνεται μεγάλη έμφαση στα χαρακτηριστικά της ακρίβειας. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι η ευαισθησία (Sens), δηλαδή η αλλαγή στην έξοδο της συσκευής, ως απόκριση στην αλλαγή κατά 1A του ρεύματος του πρωτεύοντος αγωγού. Η ευαισθησία είναι προϊόν της ευαισθησίας του μαγνητικού κυκλώματος (G/A) και του κέρδους του γραμμικού ενισχυτή (mV/G) που προγραμματίζεται στο εργοστάσιο με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ευαισθησίας (mV/A), ώστε να καλύπτει το ρεύμα πλήρους κλίμακας της συσκευής.

Ο θόρυβος (V_{NOISE}) είναι το γινόμενο του κέρδους του γραμμικού ενισχυτή και του κατώτερου ορίου θορύβου του γραμμικού αισθητήρα Hall (1G). Ο θόρυβος αυτός προέρχεται από τον θερμικό θόρυβο που παρατηρείται στα στοιχεία Hall. Διαιρώντας το θόρυβο με τη ευαισθησία, υπολογίζουμε το ελάχιστο ρεύμα που είναι ικανό η συσκευή να αντιμετωπίσει χωρίς να καταστραφεί [15].

Η γραμμικότητα (E_{LIN}) σχετίζεται με το κατά πόσο η τάση εξόδου μεταβάλλεται σε πλήρη κλίμακα προς τη σωστή κατεύθυνση σε σχέση με το πρωτεύον ρεύμα. Η μη απόδοση γραμμικότητας μπορεί να αποδοθεί στο κορεσμό που θα έχει επέλθει στη ροή του ρεύματος διαμέσου του αγωγού. Η ακόλουθη εξίσωση 3.1 χρησιμοποιείται για να εξαγάγει τη γραμμικότητα:

$$E = \left\{ 1 - \left[\frac{\Delta gain \times \% sat \left(V_{IOUT\ fullscale\ amperes} - V_{IOUT}(Q) \right)}{2 \left(V_{IOUT\ halfscale\ amperes} - V_{IOUT}(Q) \right)} \right] \right\} \quad (3.1)$$

όπου $V_{IOUT\ full\ scales}$, είναι η τάση εξόδου όταν το ρεύμα ανίχνευσης πλησιάζει την πλήρη κλίμακα $\pm I_P$ και το I_P μας δείχνει τη τιμή του μετρήσιμου ρεύματος στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη αντοχή υπέρντασης για το μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό η τιμή θεωρείται ότι είναι 20A.

Η συμμετρία είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό της ακρίβειας και μας δείχνει το πόσο ποικίλει η απολυτή τάση εξόδου του αισθητήρα σε αναλογία με το πρωτεύον (θετικό ή αρνητικό) ρεύμα πλήρους κλίμακας. Ο παρακάτω τύπος χρησιμοποιείται για να αποδώσει συμμετρία σε ένα κύκλωμα:

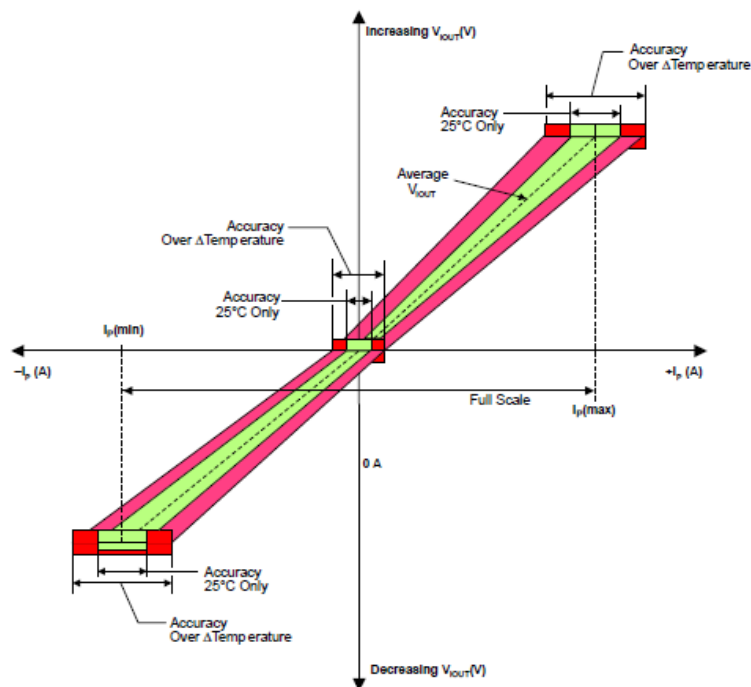
$$E_{SYM} = 100 \left(\frac{V_{IOUT_+full-scale-amperes} - V_{IOUT}(Q)}{V_{IOUT}(Q) - V_{IOUT_full-scale-amperes}} \right) \quad (3.2)$$

Με:

$V_{IOUT}(Q)$ = Τάση εξόδου αναμονής (V) του αισθητήρα όταν το πρωτεύον ρεύμα είναι μηδέν. Για μονοπολική τάση τροφοδοσίας, η ονομαστική της τιμή είναι $VCC/2$, δηλαδή $V_{IOUT}(Q) = 2.5V$. Μία πιθανή μεταβολή της μπορεί να αποδοθεί στη θερμική ολίσθηση και στην αλλαγή της τάσης του γραμμικού αισθητήρα Hall [15].

Η ηλεκτρική τάση μετατόπισης (V_{OE}) δίνει την απόκλιση της εξόδου της συσκευής από την ιδανική κατάσταση ηρεμίας (τιμή $VCC/2$) λόγω μαγνητικών αιτιών. Για να μετατραπεί η τάση σε Ampere διαιρούμε με την ευαισθησία της συσκευής.

Η ακρίβεια αντιπροσωπεύει την μέγιστη απόκλιση της πραγματικής τιμής εξόδου από την ιδανική επιθυμητή τιμή. Αυτός ο ορισμός είναι γνωστός και ως σφάλμα εξόδου τιμής και η σχέση αυτή για το σφάλμα έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο σχήμα 3.3 που ακολουθεί, απεικονίζεται γραφικά η τάση εξόδου με το τρέχον μετρήσιμο ρεύμα αντοχής υπερέντασης σε μία κλίμακα από -30A έως 30A. Για ρεύμα πλήρους κλίμακας η ακρίβεια θεωρείται στα 0A.



Σχήμα 3.3: Μέτρηση Ακρίβειας Τιμών Εξόδου Στα 0A.

Η μέτρηση της ακρίβειας μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερις κύριες περιοχές:

- *0A στους 25°C:* Ακρίβεια ανίχνευσης ροής μηδενικού ρεύματος στη θερμοκρασία αναφοράς 25°C, χωρίς τις επιπτώσεις της.
- *Ρεύμα πλήρους κλίμακας στους 25°C:* Ακρίβεια ανίχνευσης ρεύματος σε πλήρη κλίμακα τιμών, χωρίς να λαμβάνονται καθόλου υπόψιν οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας.
- *0A επάνω από τη θερμοκρασία μεταβολής Δ:* Ακρίβεια ανίχνευσης ροής μηδενικής τιμής ρεύματος, συμπεριλαμβανόμενων των επιδράσεων της θερμοκρασίας στο κύκλωμα.
- *Ρεύμα πλήρους κλίμακας επάνω από τη θερμοκρασία μεταβολής Δ:* Ακρίβεια των μετρήσεων της ροής ρεύματος πλήρους κλίμακας όταν συμπεριλαμβάνεται στις μετρήσεις και η επίδραση της θερμοκρασίας.

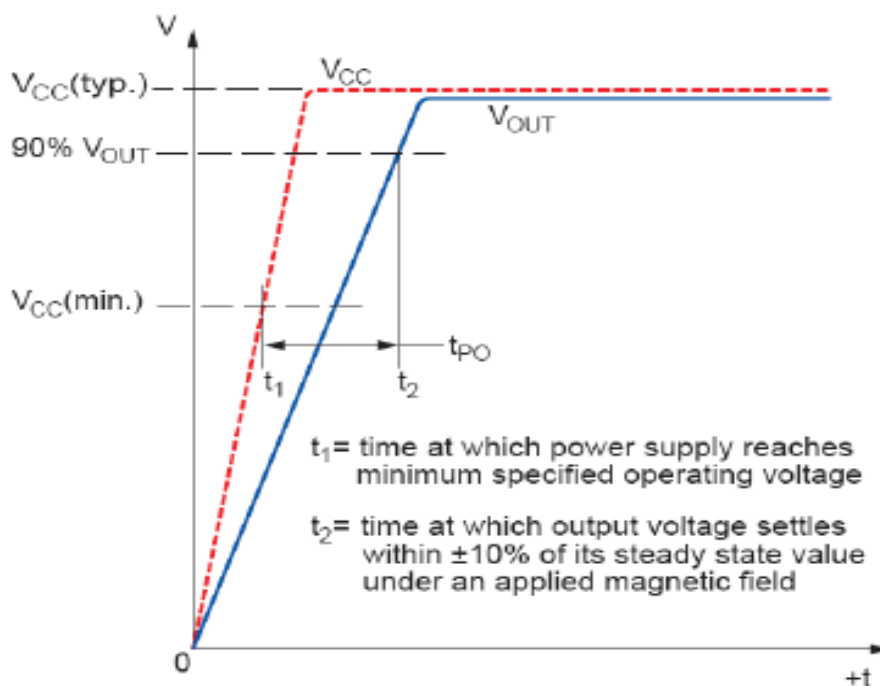
Στην συνέχεια θα αναφερθούν δύο ακόμα φαινόμενα που σχετίζονται με την ευαισθησία, όπως είναι η αναλογία που παρουσιάζει σε σχέση με άλλα μεγέθη και τα χαρακτηριστικά της ευαισθησίας στην αλλαγή του ποσοστού % αυτού. Τα χαρακτηριστικά της, δείχνουν ότι το μέγεθος της τάσης εξόδου στα 0A και η ευαισθησία είναι ανάλογα της τάσης τροφοδοσίας VCC του κυκλώματος. Η επόμενη σχέση χρησιμοποιείται για να εξαγάγει το πώς μεταβάλλεται αναλογικά η ευαισθησία σε σχέση με την τάση εξόδου στα 0A:

$$\Delta V_{IOUT(Q)RAT} (\%) = 100 * \left(\frac{V_{IOUT(Q)VCC} * 5V}{V_{CC} * V_{IOUT(Q)5V}} \right) \quad (3.3)$$

Ο λόγος της μεταβολής της ευαισθησίας ορίζεται ως:

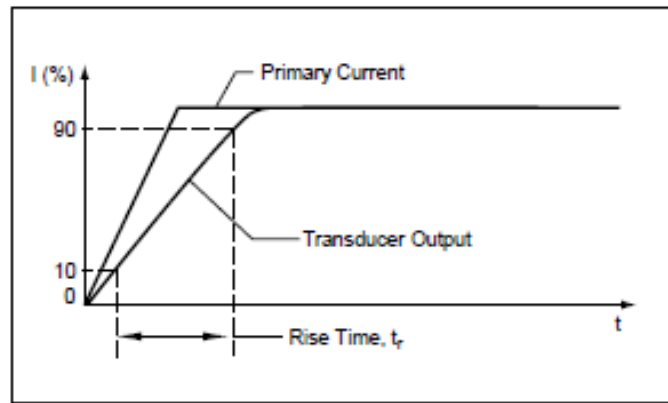
$$\Delta Sens_{RAT} (\%) = 100 * \left(\frac{Sens_{VCC} * 5V}{Sens_{5V} * V_{CC}} \right) \quad (3.4)$$

Ο χρόνος ενεργοποίησης (t_{PO}) της απόκρισης του συστήματος, είναι ο χρόνος που πρέπει να παρέλθει ώστε η τάση τροφοδοσίας να δώσει παροχή σε όλα τα εσωτερικά στοιχεία του κυκλώματος και να δημιουργηθεί ένα μαγνητικό πεδίο εισόδου. Αυτό θα συμβεί όταν η τάση εξόδου, υπό την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου, θα φτάσει κοντά στο μέγιστο πλάτος τάσης με μία μικρή απόκλιση της τάξης του $\pm 10\%$ (χρόνος t_2). Σε αυτή τη στιγμή η παροχή τάσης VCC θα έχει φτάσει στην ελάχιστη δυνατή καθορισμένη τιμή λειτουργίας (χρόνος t_1) όπως φαίνεται καθαρά στο επόμενο σχήμα 3.4:



Σχήμα 3.4: Απόκριση Χρόνου Ενεργοποίησης t_{PO}

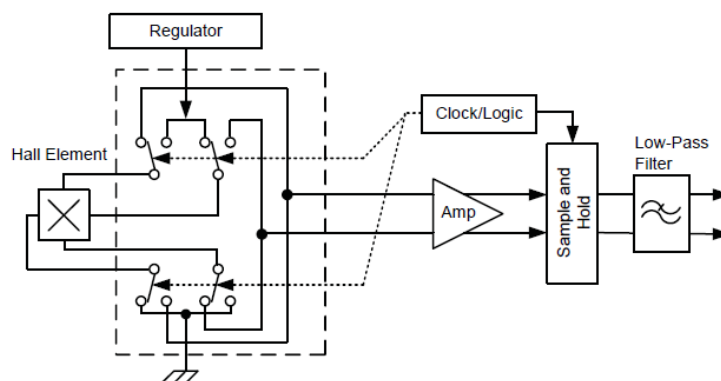
Χρόνος ανόδου (t_r): Το χρονικό διάστημα στο οποίο α) η συσκευή φτάνει το 10% της πλήρους τιμής της κλίμακας και μέχρι β) να φτάσει στο 90% της τιμής της πλήρους κλίμακας. Ο χρόνος ανόδου σε μία βηματική απόκριση χρησιμοποιείται για να αποδοθεί το εύρος ζώνης της συσκευής, στην οποία $f(-3dB) = \frac{0.35}{t_r}$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 που ακολουθεί. Τόσο ο χρόνος ανόδου όσο και ο χρόνος απόκρισης επηρεάζονται δυσμενώς από τις απώλειες ρεύματος που παρατηρούνται σε αγώγιμο επίπεδο στη γείωση ενός Hall [15].



Σχήμα 3.5: Χρόνος Ανόδου Βηματικής Απόκρισης

Στη συνέχεια, θα αναλυθεί η καινοτόμος τεχνική της σταθεροποίησης του ψαλιδισμού σε ένα κύκλωμα που χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιήσει την τάση ολίσθησης ενός στοιχείου Hall και ενός συσχετισμένου πυκνωτή. Με την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, εξαλείφεται σε μεγάλο βαθμό η ολίσθηση εξόδου που επάγεται από τη θερμοκρασία. Αυτή η αντισταθμισμένη μείωση βασίζεται στη διαδικασία διαμόρφωσης του σήματος, η οποία χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει το ανεπιθύμητο DC σήμα από το μαγνητικό επαγόμενο σήμα. Μέσω της χρήσης φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων, καταργείται η διαμορφωμένη DC επαγόμενη μετατόπιση και περνάει δια μέσου του όλο το μαγνητικό επαγόμενο σήμα [15].

Με αυτήν την τεχνική προσέγγισης, η τάση εξόδου του Hall σταματάει να παρουσιάζει ευαισθησία στις τιμές της θερμοκρασίας και της μηχανικής τάσης, ενώ οι συσκευές αποκτούν σταθερή ηλεκτρική τάση μετατόπισης και μηδενική θερμική καταπόνηση. Η τεχνική αυτή καθίσταται εφαρμόσιμη με τη χρήση ενός CMOS κυκλώματος που επιτρέπει τη χρήση ενισχυτών με χαμηλή μετατόπιση (σχήμα 3.6):



Σχήμα 3.6: Τεχνική Σταθεροποίησης

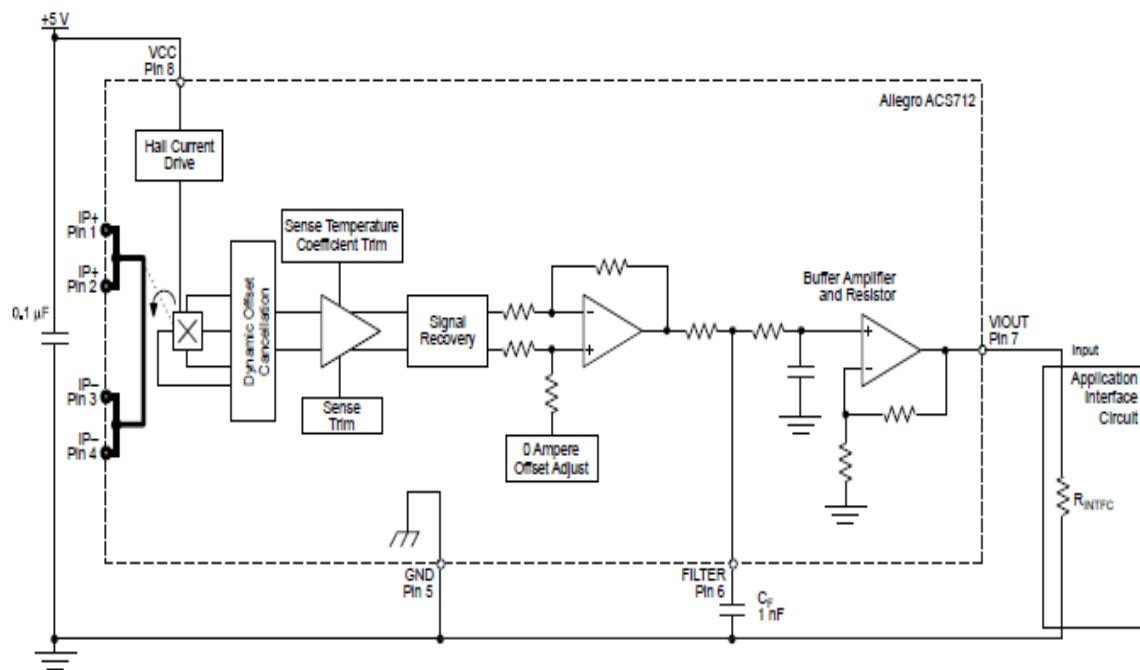
Σε εφαρμογές ανίχνευσης χαμηλής συχνότητας είναι αρκετά επωφελές να προστεθεί ένα φίλτρο RC στην έξοδο της συσκευής, γιατί έτσι θα βελτίωνε το λόγο του σήματος προς το θόρυβο, οπότε θα είχαμε καλύτερη ανάλυση του σήματος εξόδου. Όμως η προσθήκη ενός τέτοιου αισθητήρα μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη εξασθένηση του σήματος εξόδου, ακόμα και αν είναι σήμα συνεχούς ρεύματος [15].

Η λειτουργία μεταφοράς ΔV_{ATT} μας δίνει ποσοτικά την εξασθένηση του σήματος, λόγω της αντιστάθμισης που υπάρχει μεταξύ της αντίστασης φίλτρου R_F και της αντίστασης του κυκλώματος διεπαφής R_{INTFC} . Η λειτουργία μεταφοράς δίνεται από το διαιρέτη τάσης της παρακάτω σχέσης:

$$\Delta V_{ATT} = V_{IOUT} * \left(\frac{R_{INTFC}}{R_F + R_{INTFC}} \right) \quad (3.5)$$

Αν και η αντίσταση φίλτρου με την αντίσταση διεπαφής έχουν σχεδιαστεί για να ταιριάζουν, πιθανότατα οι τιμές τους θα μεταβάλλονται διαφορετικά όταν αλλάζει η θερμοκρασία. Επομένως, η εξασθένηση του σήματος θα ποικίλει ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Συνήθως η αντίσταση διεπαφής ενός τυπικού αναλογικού ψηφιακού μετατροπέα ADC (Analog To Digital Converter) μπορεί να είναι χαμηλή περί τα 10kΩ. Το μοντέλο ACS712 περιέχει ένα pin με την ονομασία FILTER που εσωτερικά του έχει μία αντίσταση και έναν ενισχυτή. Με αυτή την αρχιτεκτονική είναι εύκολο ένας χρήστης να εφαρμόσει ένα κύκλωμα RC και ένα πυκνωτή CF (Calibration Frequency) από το pin στη γείωση. Ο ενισχυτής εσωτερικά του ACS712, εξαλείφει την εξασθένηση που προκαλείται από την εξίσωση 3.5 του διαιρέτη τάσης για το ΔV_{ATT} . Επομένως, η συσκευή δίνει μέγιστη ακρίβεια μέσω του κυκλώματος RC (εξωτερικό φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων) [15].

Το σχήμα 3.7 περιγράφει ακριβώς ότι αναλύθηκε στη προηγούμενη παράγραφο:



Σχήμα 3.7: Μοντέλο ACS712 Με Κύκλωμα RC Στο Pin 6

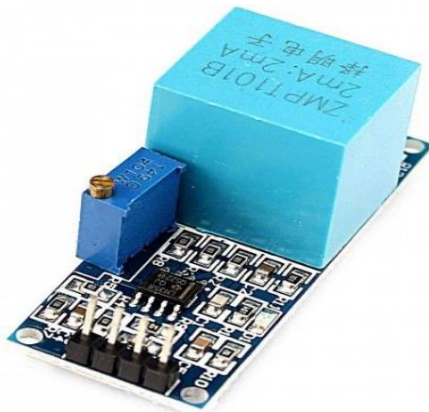
Συμπερασματικά, τα θετικά αυτού του μοντέλου είναι:

- Υψηλή ακρίβεια μετρήσεων σημάτων.
- Σχεδόν μηδενική μαγνητική υστέρηση.
- Χαμηλός θόρυβος αναλογικών σημάτων.
- Αντοχή στις αλλαγές θερμοκρασίας.

3.3 Μοντέλο ZMPT101B

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα που θα ακολουθήσουν για την μέτρηση της τάση μίας συσκευής. Ο μετασχηματιστής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος είναι μονοφασικός και συνδέεται με καλώδιο επάνω στη πλακέτα του Arduino. Η μέγιστη τάση καθορίζεται πάντοτε από την τάση αιχμής AD του βρόχου που γίνεται η δειγματοληψία. Στο Arduino αυτή η τάση AD είναι πάντα 5V. Ο αισθητήρας λειτουργεί φυσιολογικά όταν υπάρχει ρεύμα μεταξύ 1–2 mA. Όταν η τάση εισόδου είναι <math><100V</math>, τότε το ρεύμα λειτουργίας είναι ακριβώς στα 2mA, ενώ όταν είναι μεταξύ των 100 και 220 V, τότε το ρεύμα ανήκει στη περιοχή

Για τάση μεγαλύτερη των 220V, πρέπει να μεταβληθεί η αντίσταση, αλλιώς ο αισθητήρας πιθανώς θα καταστραφεί. Ο αισθητήρας που εξετάζεται, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8:



Σχήμα 3.8: Αισθητήρας ZMPT101B

Για να βελτιωθεί η αξιοπιστία, η αντίσταση που επιλέγεται για τον περιορισμό του ρεύματος είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική τιμή, ενώ και ο συντελεστής θερμοκρασίας είναι πάντα υψηλός. Κατά την επιλογή της δειγματοληψίας, η αντίσταση δεν πρέπει να υπερβαίνει τη τιμή που δίνεται στη σχέση 3.6 [16]:

$$\frac{V_{Output_{max}} * R}{V_{Input_{max}}} \quad (3.6)$$

Με την τιμή του R να είναι γνωστή εξ αρχής από τον κατασκευαστή. Η παραπάνω φόρμουλα επιλογής είναι κατάλληλη για την ενεργητική παραγωγή και για την παθητική. Στην ενεργητική, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα είναι [17]:

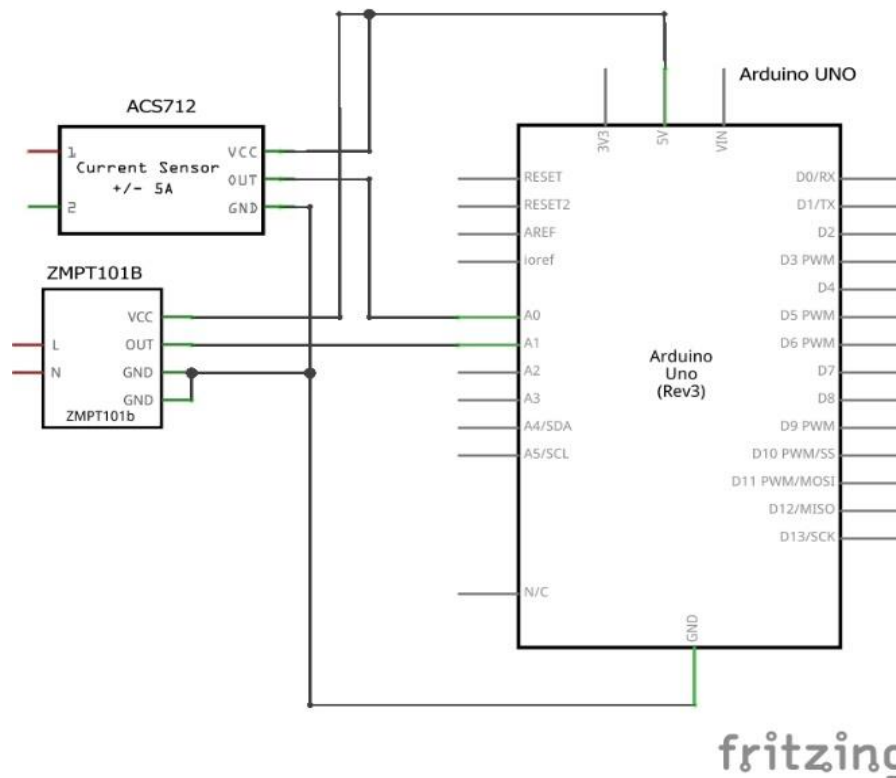
- + Υψηλή ακρίβεια και μικρό σφάλμα φάσης.
- + Υψηλή τάση εξόδου και ισχυρή χωρητικότητα φορτίου.
- Η γραμμή υλοποίησης του εσωτερικού κυκλώματος είναι πολύ περίπλοκη.

Για την παθητική έξοδο τιμών τάσης, τα θετικά είναι ότι το κύκλωμα υλοποίησης είναι πολύ απλό και η ακρίβεια τιμών και μετρήσεων ακόμα μεγαλύτερη, αλλά η τάση εξόδου έχει περιορισμό όσον αφορά τις τιμές που μπορεί να πάρει και επίσης όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση φορτίου, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης.

Τέλος, το εύρος θερμοκρασιών που λειτουργεί φυσιολογικά ο αισθητήρας, κυμαίνεται από -40°C έως $+60^{\circ}\text{C}$, η γραμμικότητα των φορτίων είναι $<0.2\%$, ενώ η τάση απομόνωσης κυμαίνεται στα 4000V [17].

3.4 Παραδείγματα Εφαρμογών Χαμηλού Φορτίου

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήριων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και σε αυτά μετρήθηκε η τάση και το ρεύμα που παρέχει το ηλεκτρικό δίκτυο στις συσκευές σε κάποιες χρονικές στιγμές. Η σύνδεση των αισθητήρων έγινε με τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα [18]:



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα Σύνδεσης Αισθητήρων Συσκευής Μέτρησης [18].

Το Arduino Υπο συνδέθηκε μέσω καλωδίων με τον αισθητήρα ρεύματος και τάσης για να μετρήσουν τις τιμές τους για κάθε χρονική στιγμή. Στα πρώτα παραδείγματα που οι εντάσεις ρεύματος των συσκευών είναι χαμηλές, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας ρεύματος ACS712 των 5Α που ενδείκνυται για μικρές συσκευές.

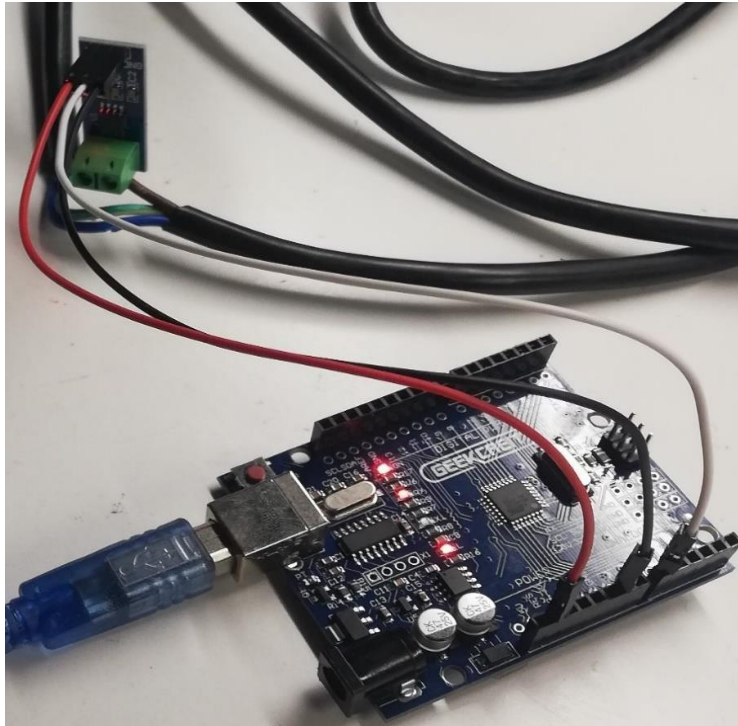
3.4.1 Αναλογικός Παλμογράφος

Η πρώτη ηλεκτρική συσκευή που μετρήθηκε είναι ένας αναλογικός παλμογράφος (μοντέλο 3502C) της εταιρείας Hung Chang, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.10:

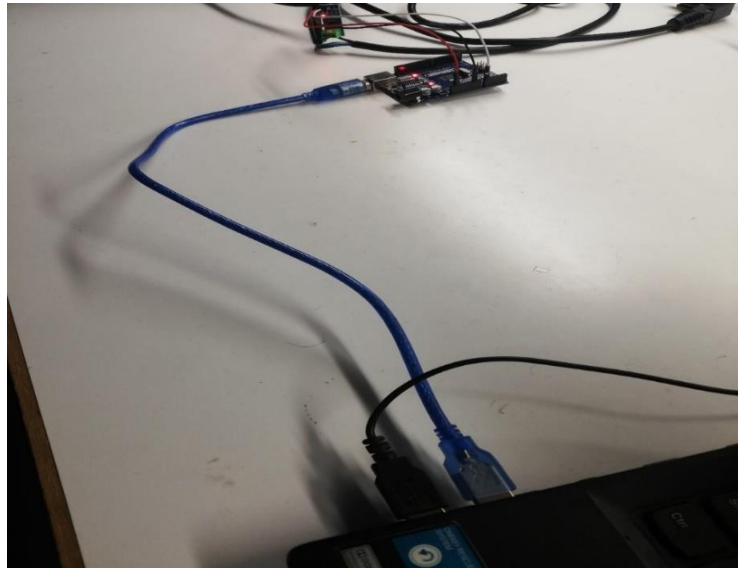


Σχήμα 3.10: Αναλογικός Παλμογράφος

Για τη μέτρηση του ρεύματος, ο αισθητήρας ρεύματος συνδέθηκε σε σειρά με τη φάση ενός καλωδίου παροχής ρεύματος. Αντίστοιχα, στο ίδιο καλώδιο συνδέθηκε παράλληλα ο αισθητήρας μέτρησης τάσης. Οι διατάξεις αυτές φαίνονται στα σχήματα 3.11 και 3.12:



Σχήμα 3.11: Σύνδεση Arduino, ACS712 Και Παλμογράφου



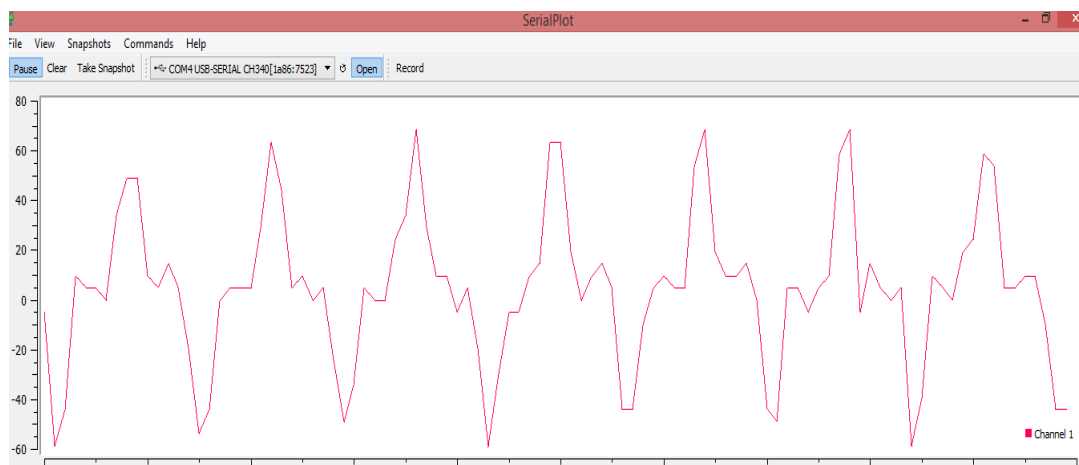
Σχήμα 3.12: Σύνδεση Arduino - Υπολογιστή Μέσω USB

Το Arduino IDE τρέχει τον κώδικα για την εύρεση των τιμών ρεύματος, τάσης και ισχύος, ενώ το πρόγραμμα Serial Plot χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος ανά συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Αφού φορτώθηκαν οι κατάλληλες βιβλιοθήκες του ACS712 στον κώδικα του Arduino, το πλάτος και οι RMS τιμές ρεύματος του ψηφιακού παλμογράφου ήταν οι εξής:

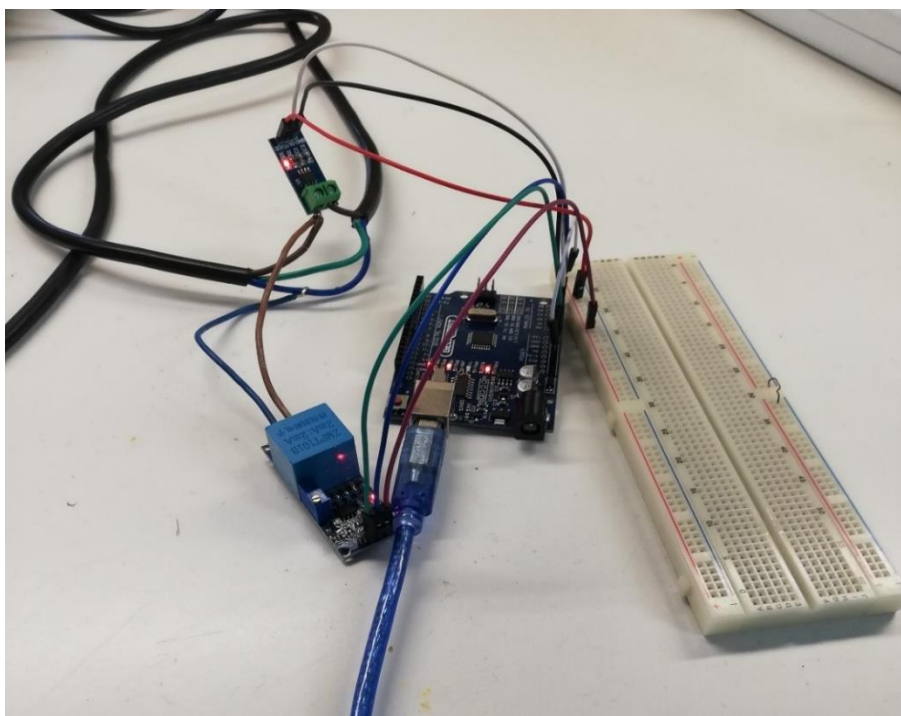
```
161.13 mA_PP    307.89 mA_RMS
156.25 mA_PP    298.56 mA_RMS
156.25 mA_PP    298.56 mA_RMS
161.13 mA_PP    307.89 mA_RMS
156.25 mA_PP    298.56 mA_RMS
151.37 mA_PP    289.23 mA_RMS
161.13 mA_PP    307.89 mA_RMS
166.02 mA_PP    317.22 mA_RMS
156.25 mA_PP    298.56 mA_RMS
156.25 mA_PP    298.56 mA_RMS
151.37 mA_PP    289.23 mA_RMS
156.25 mA_PP    298.56 mA_RMS
156.25 mA_PP    298.56 mA_RMS
```

Όπου το μέγιστο ρεύμα RMS είναι 317.22mA, ενώ το πλάτος peak to peak του ρεύματος είναι 166.02mA. Η γραφική απεικόνιση του ρεύματος κάθε χρονική στιγμή (από το δίκτυο προς τον παλμογράφο) είναι η παρακάτω (σχήμα 3.13):



Σχήμα 3.13: Απεικόνιση Του Ρεύματος Του Παλμογράφου

Παρατηρούμε ότι η παροχή ρεύματος προς τον παλμογράφο δεν είναι η καλύτερη δυνατή, αφού υπό φυσιολογικές συνθήκες η γραφική παράσταση θα έπρεπε να ήταν ένα τέλειο ημίτονο. Για τη μέτρηση της τάσης και την ανάλυσή της, κρίθηκε αναγκαίο να αγοραστεί ο αισθητήρας τάσης ZMPT101B. Η σύνδεση του αισθητήρα απεικονίζεται στο σχήμα 3.14:

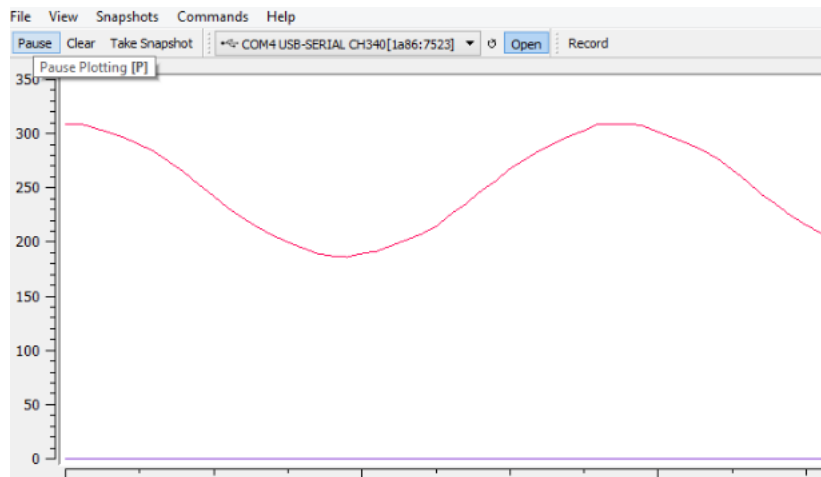


Σχήμα 3.14: Σύνδεση ZMPT101B με Arduino και ACS712

Με αυτή τη διάταξη, υπάρχει η δυνατότητα να εμφανιστούν ταυτόχρονα οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στο ίδιο γράφημα. Το ίδιο θα συμβεί και με τα αποτελέσματα στο παράθυρο του Arduino IDE, αφού οι τιμές τάσης και ρεύματος κάθε χρονική στιγμή θα υπολογίζονται ταυτόχρονα. Συνδέοντας το USB καλώδιο με τον υπολογιστή, οι τιμές της ημιτονοειδούς τάσης (σε V) είναι οι εξής:

```
264.16  
251.95  
241.21  
228.52  
218.75  
210.45  
202.15  
195.31  
189.94  
186.04  
187.01  
187.99  
193.36
```

Η αναπαράσταση της τάσης του παλμογράφου είναι η εξής (σχήμα 3.15) :



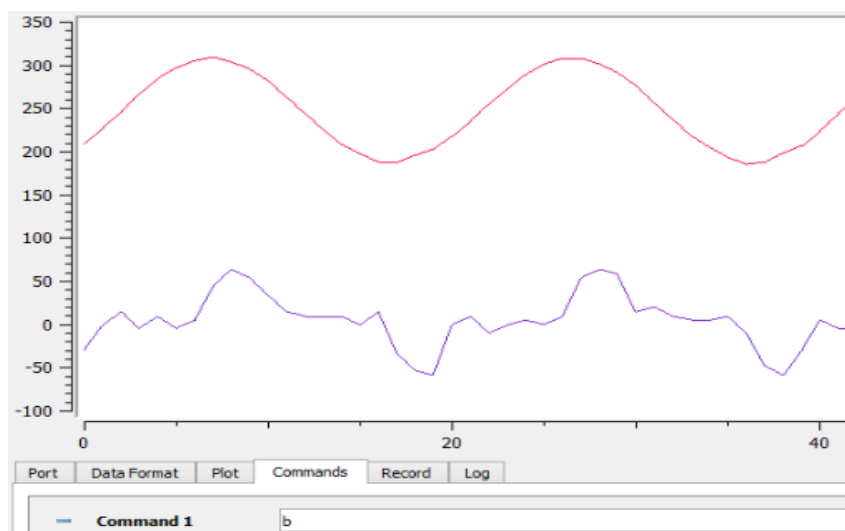
Σχήμα 3.15: Ποιοτική Αναπαράσταση Τάσης Παλμογράφου

Μέσω των βελτιώσεων που έγιναν στον κώδικα, υπήρχε η δυνατότητα στο Arduino IDE να γίνει στο παράθυρο η εμφάνιση όλων των τιμών μαζί. Πατώντας “i” είναι σε θέση ο χρήστης να δει στον οθόνη τις τιμές του ρεύματος, πατώντας “v” θα εμφανιστούν οι τιμές της τάσης, με το “b” εμφανίζονται ταυτόχρονα οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος και της τάσης. Αν πατήσει κάποιος το γράμμα “m” στο παράθυρο σειριακής επικοινωνίας, εμφανίζονται μαζί όλες οι τιμές των παραμέτρων.

```
m|
-----
Insert command. Available commands:
i: plot current
v: plot voltage
b: plot both current and voltage
m: print measurements

P = 261.17 Watts
U = 227.23 V
I = 1148.56 mA
P = 260.99 Watts
U = 226.93 V
I = 1142.77 mA
P = 259.33 Watts
U = 227.09 V
I = 1144.30 mA
P = 259.86 Watts
U = 227.35 V
I = 1141.24 mA
P = 259.46 Watts
```

Στο πρόγραμμα του Serial Plot πατώντας τώρα το γράμμα “b”, εμφανίζονται ταυτόχρονα οι γραφικές παραστάσεις ρεύματος - τάσης (σχήμα 3.16):



Σχήμα 3.16: Γραφική Παράσταση Ρεύματος Και Τάσης Ταυτόχρονα

3.4.2 Σταθμός αποκόλλησης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων

Η δεύτερη εφαρμογή μέτρησης τιμών τάσης και ρεύματος ποιοτικά αφορά ένα σταθμό αποκόλλησης (σχήμα 3.17).

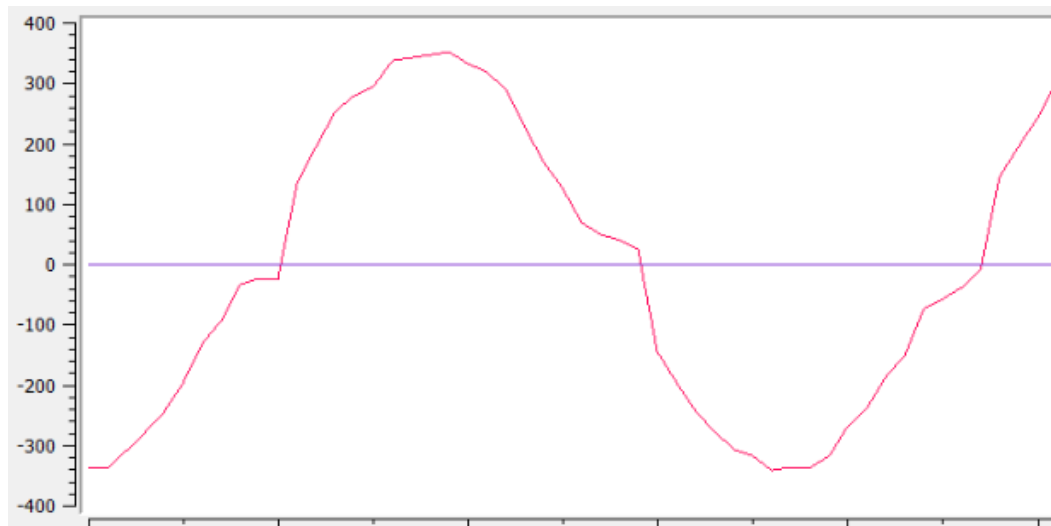


Σχήμα 3.17: Σταθμός Αποκόλλησης Εξαρτημάτων

Η ισχύς του μοντέλου σύμφωνα με τις προδιαγραφές είναι 2000 Watt. Πατώντας και πάλι το “m” στο Arduino IDE, τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα μεγέθη της συσκευής που υπολογίζονται είναι τα εξής:

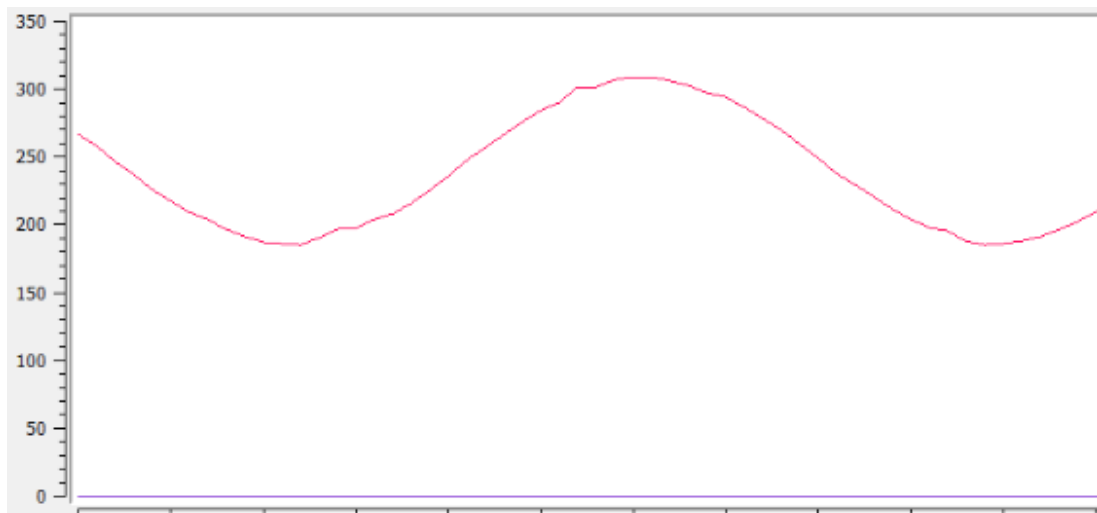
```
P = 261.17 Watts
U = 227.23 V
I = 1148.56 mA
P = 260.99 Watts
U = 226.93 V
I = 1142.77 mA
P = 259.33 Watts
U = 227.09 V
I = 1144.30 mA
P = 259.86 Watts
U = 227.35 V
I = 1141.24 mA
P = 259.46 Watts
```

Ανοίγοντας το πρόγραμμα Serial Plot και πληκτρολογώντας στο Command Line το “l”, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του ρεύματος:



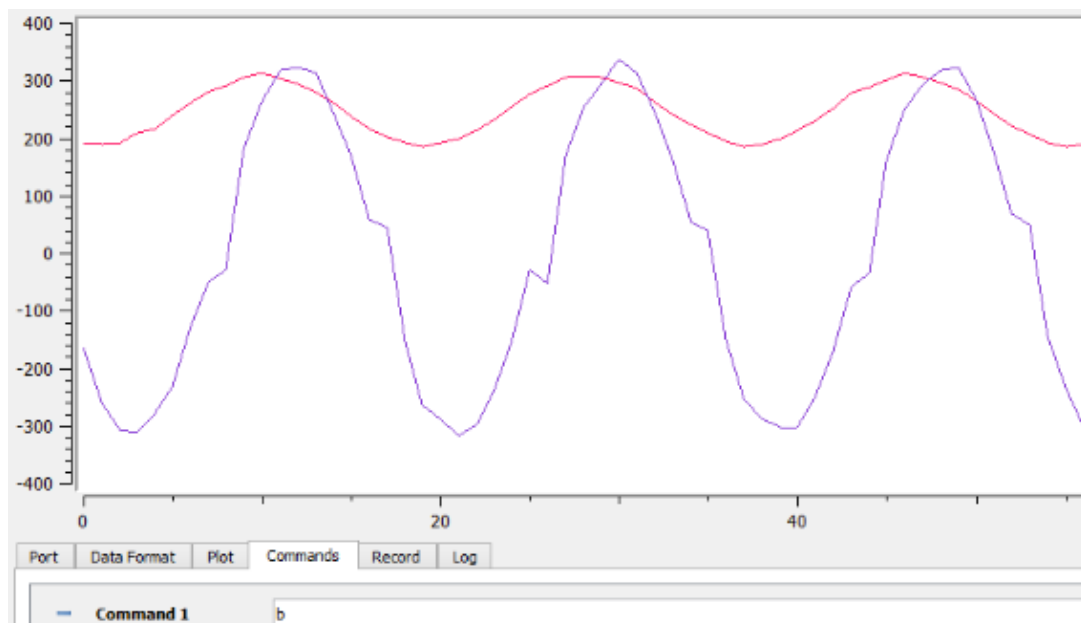
Σχήμα 3.18: Απόκριση Ρεύματος Σταθμού Αποκόλλησης

Παρατηρείται ότι ποιοτικά η απόκριση του ρεύματος είναι πολύ καλύτερη από την αντίστοιχη του παλμογράφου. Πατώντας το γράμμα “v” στο Command Line, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της τάσης που είναι:



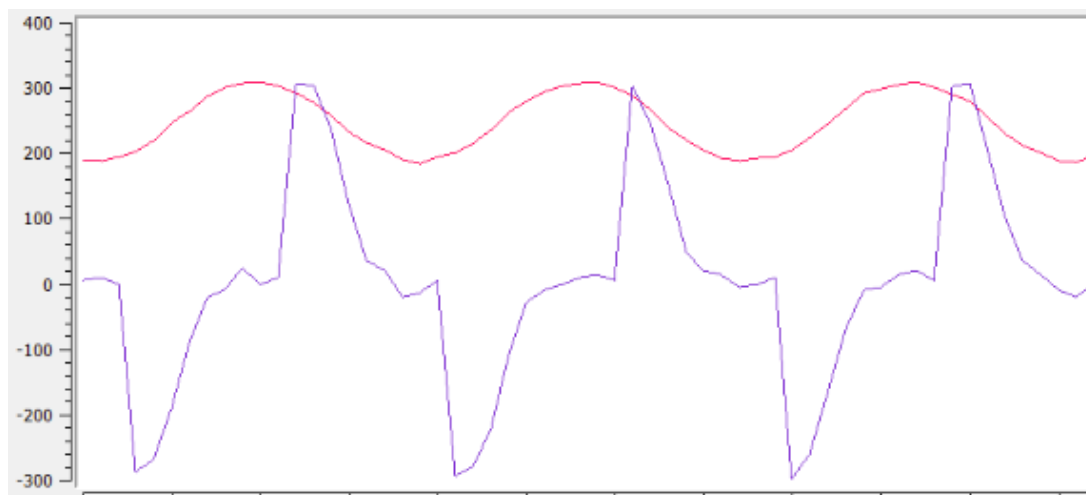
Σχήμα 3.19: Ποιοτική Απόκριση Τάσης

Αν επιθυμεί κάποιος να δει μαζί τις γραφικές παραστάσεις τάσης και ρεύματος, πατάει πάλι στο Command Line το “b” και του εμφανίζει και τις δύο γραφικές παραστάσεις (σχήμα 3.20). Οι δύο γραφικές παραστάσεις αυτές ισχύουν όταν δεν μεταβάλλεται η θερμοκρασία λειτουργίας του σταθμού.



Σχήμα 3.20: Εμφάνιση Γραφικών Παραστάσεων Τάσης - Ρεύματος

Παρατηρεί κάποιος ότι η απόκριση του ρεύματος ποιοτικά είναι πολύ καλύτερη από αυτή του παλμογράφου. Κατά τη λειτουργία θέρμανσης του σταθμού που μεταβαλλόταν η θερμοκρασία, οι καμπύλες που ελήφθησαν είναι οι εξής:



Σχήμα 3.21: Γραφικές Παραστάσεις Τάσης - Ρεύματος Για Μεταβολή της Θερμοκρασίας Λειτουργίας

Είναι φανερό ότι με αυτή τη ρύθμιση της θερμοκρασίας, η γραφική παράσταση του ρεύματος μοιάζει ποιοτικά με αυτήν που είχε ο αναλογικός παλμογράφος, ενώ αυτή της τάσης μένει σχεδόν αναλλοίωτη.

3.4.3 Σταθμός κόλλησης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων

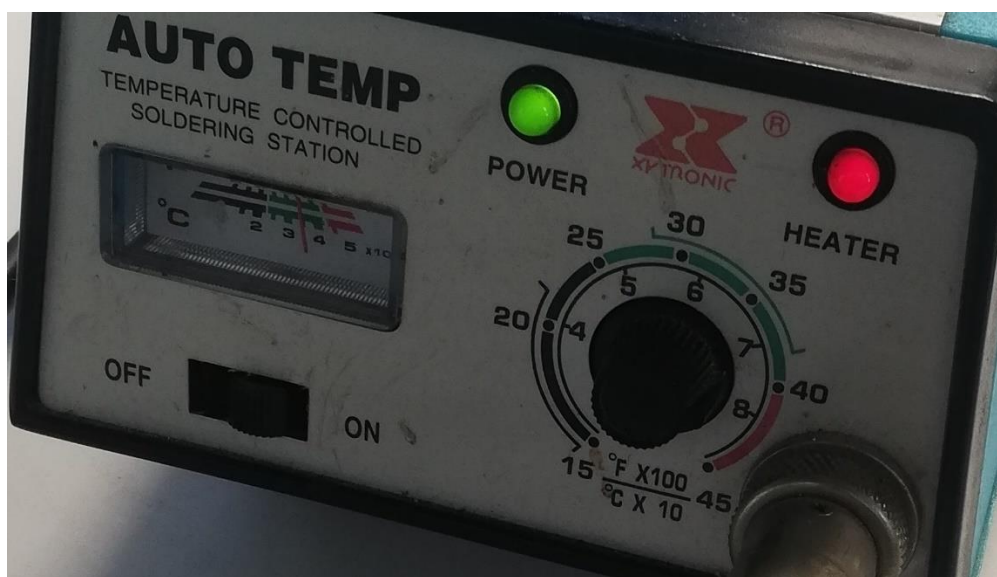
Στο παρακάτω τρίτο πείραμα που έγινε, χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του ρεύματος το μοντέλο ACS712 για 5A και για 20A ξεχωριστά. Ο λόγος που έγινε αυτό ήταν ο έλεγχος και η διαπίστωση για το πώς μεταβάλλεται η γραφική παράσταση, όταν αλλάζει η ευαισθησία και το εύρος τιμών ενός αισθητήρα.

Ο σταθμός κόλλησης ηλεκτρονικών συστημάτων που μελετήθηκε, για τους δύο αισθητήρες ρεύματος με διαφορετικών εύρος τιμών, φαίνεται στο σχήμα 3.12:

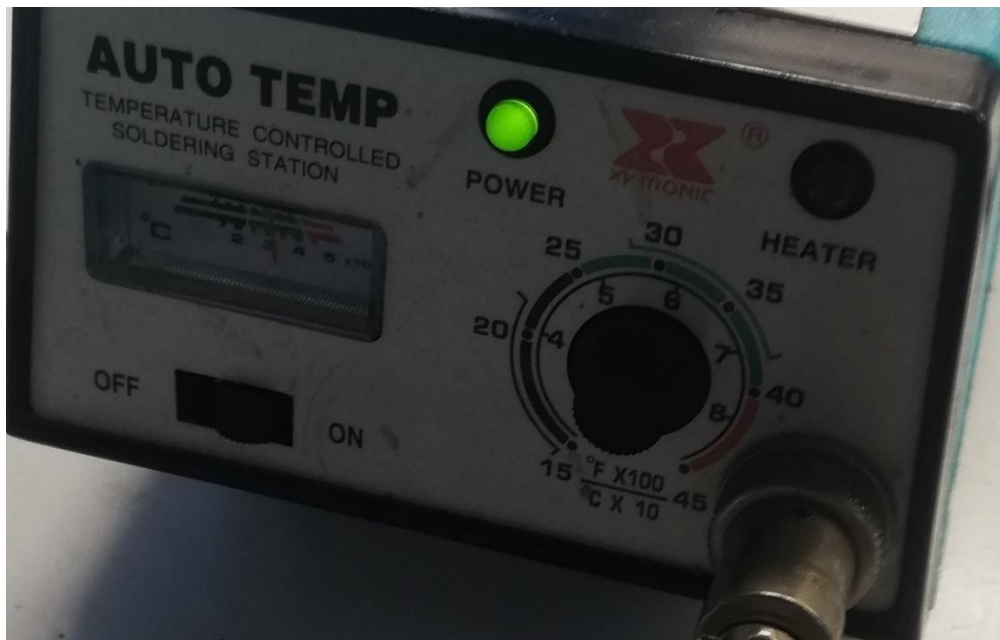


Σχήμα 3.22: Σταθμός Κόλλησης Εξαρτημάτων

Τα αποτελέσματα μέτρησης για την τάση, το ρεύμα και την ισχύ της συσκευής είναι διαφορετικά όταν η συσκευή είναι σε λειτουργία (Heater) και άλλα όταν ο θερμοστάτης την διακόπτει. Όταν λειτουργεί ο θερμοστάτης, το κουμπί Heater είναι αναμμένο (σχήμα 3.23) και αυξάνεται η ένταση ρεύματος, ενώ όταν ο θερμοστάτης δεν λειτουργεί (σχήμα 3.24) η ένταση του ρεύματος μειώνεται κατά πολύ.



Σχήμα 3.23: Ο Σταθμός Κόλλησης σε Λειτουργία (Heater)



Σχήμα 3.24: Σταθμός Κόλλησης Σε Αναμονή (Λειτουργία Off)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά την αναμονή του αισθητήρα ρεύματος για διαφορετικές χρονικές στιγμές και όταν το κουμπί Heater είναι σβηστό, είναι τα εξής:

```

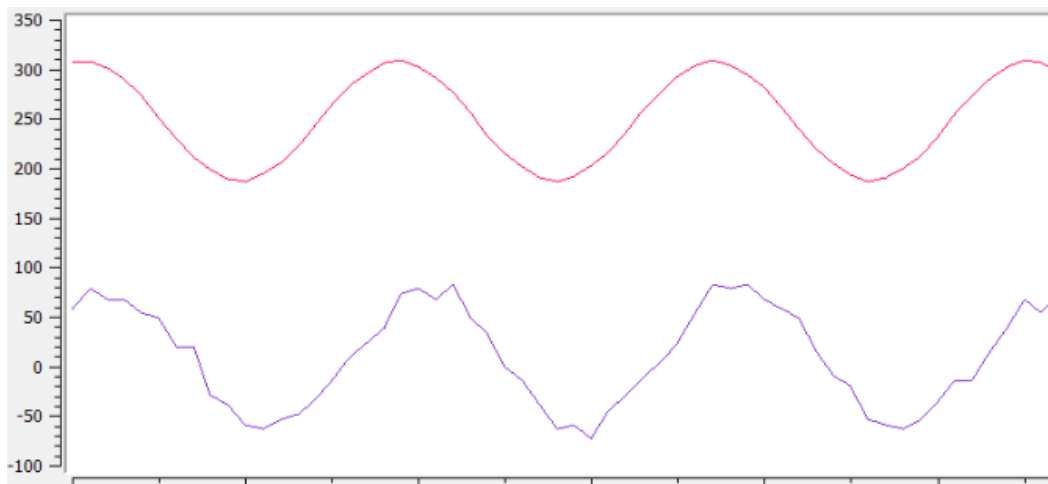
P = 11.97 Watts
U = 226.23 V
I = 52.84 mA
P = 11.95 Watts
U = 226.17 V
I = 52.84 mA
P = 11.95 Watts
U = 226.12 V
I = 59.08 mA
P = 13.36 Watts
U = 226.40 V
I = 52.84 mA
P = 11.96 Watts

```

Ενώ όταν η συσκευή λειτουργούσε και το κουμπί Heater ήταν αναμμένο, οι μετρήσεις έδειξαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

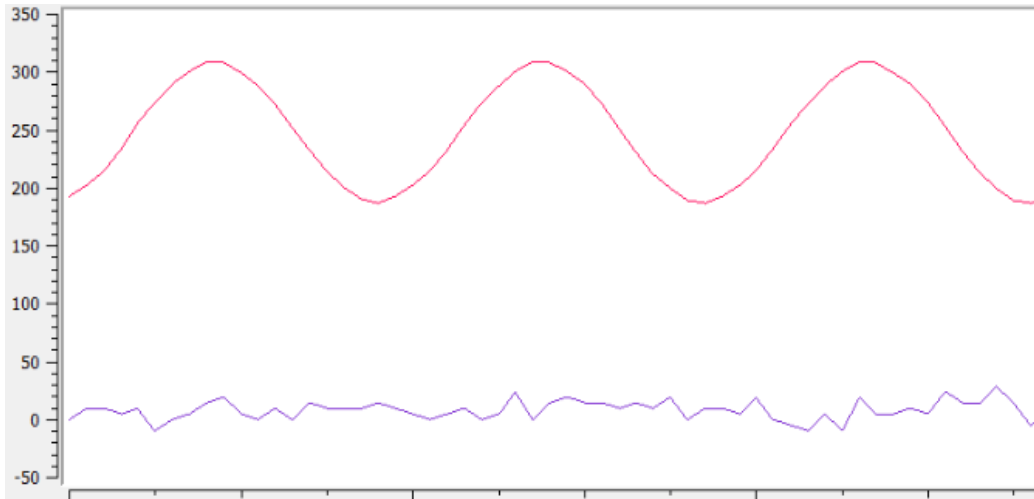
P = 60.74 Watts
U = 225.80 V
I = 268.13 mA
P = 60.54 Watts
U = 226.50 V
I = 266.82 mA
P = 60.44 Watts
U = 226.33 V
I = 266.82 mA
P = 60.39 Watts
U = 226.33 V
I = 264.19 mA
P = 59.79 Watts

Όταν η συσκευή είναι σε λειτουργία ON και έχοντας πάντα την προεπιλογή “b” στο Serial Plot, οι γραφικές παραστάσεις τάσης – ρεύματος ποιοτικά, φαίνονται στο σχήμα 3.25:



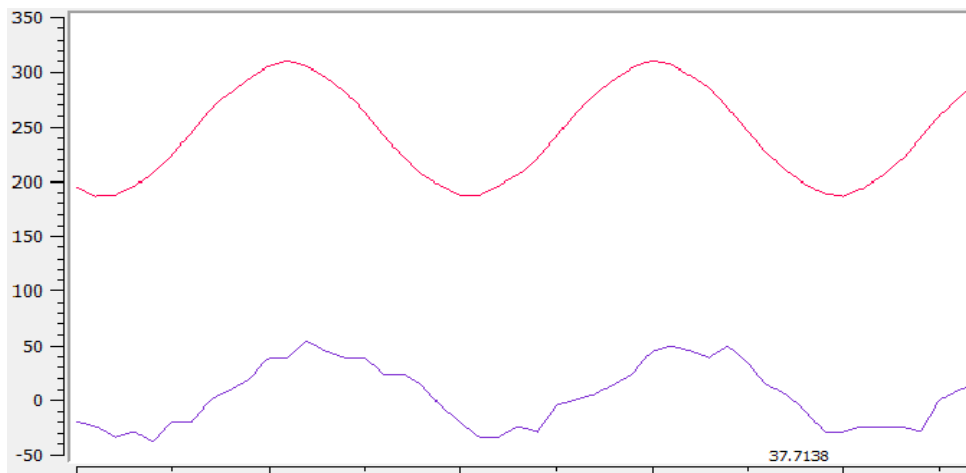
Σχήμα 3.25: Γραφικές Παραστάσεις Κατά τη Λειτουργία ON της Συσκευής

Ενώ με τη συσκευή σε αναμονή και το αντίστοιχο κουμπί κλειστό, η γραφική παράσταση τάσης και ρεύματος στο περιβάλλον του Serial Plot είναι η εξής:



Σχήμα 3.26: Γραφικές Παραστάσεις Με Τη Συσκευή Σε Αναμονή

Το επόμενο στάδιο ήταν να αντικατασταθεί ο αισθητήρας των 5A και να τοποθετηθεί ο αντίστοιχος αισθητήρας των 20A. Το μεγαλύτερο εύρος μετρήσεων και τιμών που έχει αυτός ο αισθητήρας τώρα, οδηγεί σε υψηλότερη ευαισθησία και υψηλότερο ποσοστό σφάλματος % επί των μετρήσεων. Στο σχήμα 3.27 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση τάσης – ρεύματος με χρήση τώρα του αισθητήρα ρεύματος ACS712_20A:



Σχήμα 3.27: Γραφική Παράσταση Τάσης - Ρεύματος Με Χρήση ACS712_20A

Φαίνεται καθαρά ότι η απόκριση του ρεύματος δεν είναι η καλύτερη δυνατή. Γενικά όταν υπάρχει η δυνατότητα αντοχής, προτιμάται πάντοτε αισθητήρας με μικρότερο εύρος τιμών για να ελαχιστοποιεί το σφάλμα τιμών μέτρησης.

Οι τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος της συσκευής όταν αυτή δεν λειτουργεί, για διαφορετικές χρονικές στιγμές, είναι οι εξής:

```
P = 27.21 Watts
U = 227.16 V
I = 109.29 mA
P = 24.83 Watts
U = 227.01 V
I = 109.29 mA
P = 24.81 Watts
U = 227.16 V
I = 109.29 mA
P = 24.83 Watts
U = 226.97 V
I = 119.72 mA
P = 27.17 Watts
```

Ενώ σε λειτουργία, κάποιος μπορεί να λάβει τις εξής τιμές:

```
P = 68.51 Watts
U = 227.32 V
I = 284.99 mA
P = 64.78 Watts
U = 226.85 V
I = 289.15 mA
P = 65.60 Watts
U = 226.77 V
I = 293.26 mA
P = 66.50 Watts
U = 226.90 V
I = 301.29 mA
P = 68.36 Watts
```

3.5 Παραδείγματα Εφαρμογών Υψηλού Φορτίου

3.5.1 Μετασχηματιστής Τάσης

Η πρώτη συσκευή υψηλού φορτίου που αναλύθηκε η ενέργεια, ήταν ένας μεταβλητός μετασχηματιστής τάσης 0–260 V και RMS ρεύματος 10A (σχήμα 3.28).

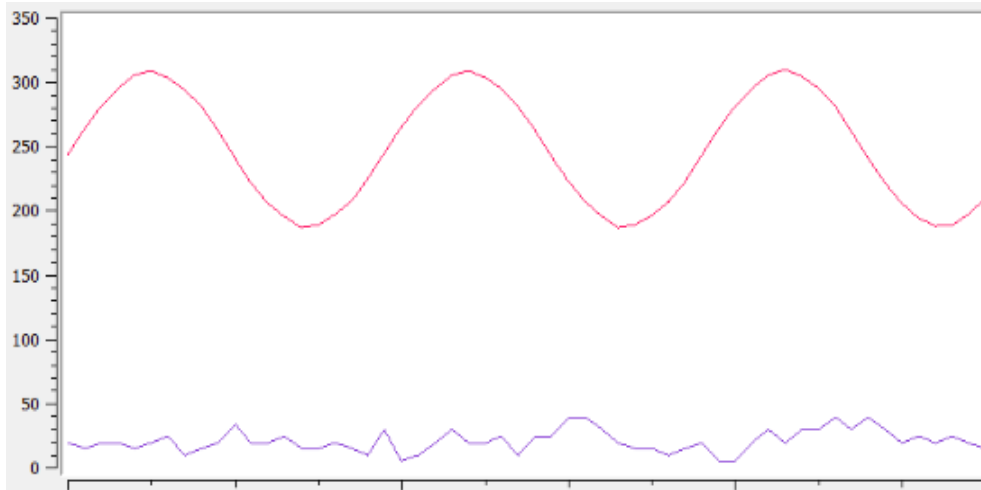


Σχήμα 3.28: Μεταβλητός Μετασχηματιστής Τάσης 260 V

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανά 60V, για τις τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος. Η πρώτη μέτρηση έγινε στα 0V και οι τιμές των μεγεθών που δίνει η συσκευή στην κατάσταση ηρεμίας είναι οι εξής:

```
P = 46.87 Watts
U = 225.77 V
I = 207.36 mA
P = 46.82 Watts
U = 225.80 V
I = 195.50 mA
P = 44.14 Watts
U = 225.85 V
I = 207.36 mA
P = 46.83 Watts
U = 225.87 V
I = 207.36 mA
P = 46.84 Watts
```

Ενώ η γραφική παράσταση τάσης - ρεύματος στη κατάσταση λειτουργίας των 0V είναι η εξής (σχήμα 3.29):



Σχήμα 3.29: Γραφική Παράσταση Τάσης - Ρεύματος Στα 0V.

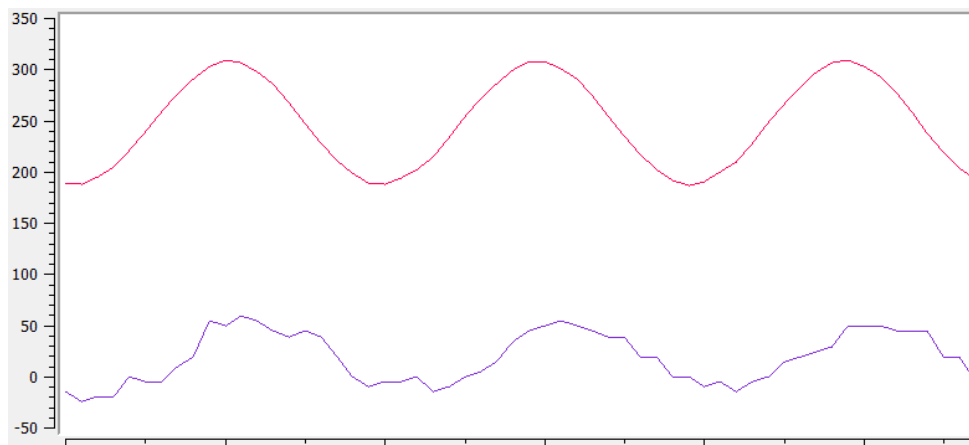
Η επόμενη μέτρηση έγινε στα 60V:

```

P = 60.44 Watts
U = 225.51 V
I = 272.13 mA
P = 61.37 Watts
U = 225.52 V
I = 263.20 mA
P = 59.36 Watts
U = 225.33 V
I = 276.48 mA
P = 62.30 Watts
U = 225.44 V
I = 267.70 mA
P = 60.35 Watts

```

Ενώ η αντίστοιχη γραφική παράσταση τάσης – ρεύματος ήταν η εξής:

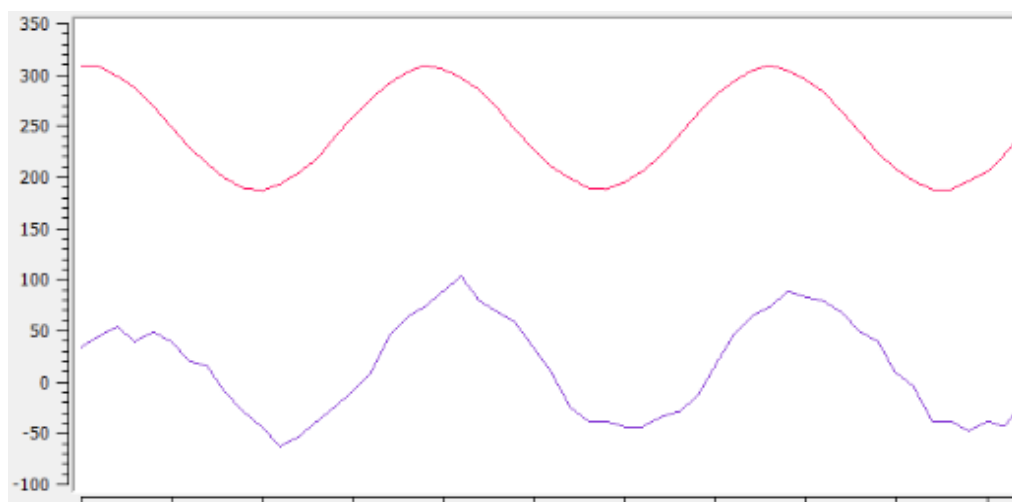


Σχήμα 3.30: Γραφική Παράσταση Τάσης - Ρεύματος Στα 60 V.

Θέτοντας την τάση στα 120V όπως φαίνεται στο σχήμα 3.28, οι καινούργιες τιμές που μετρήθηκαν ήταν οι παρακάτω:

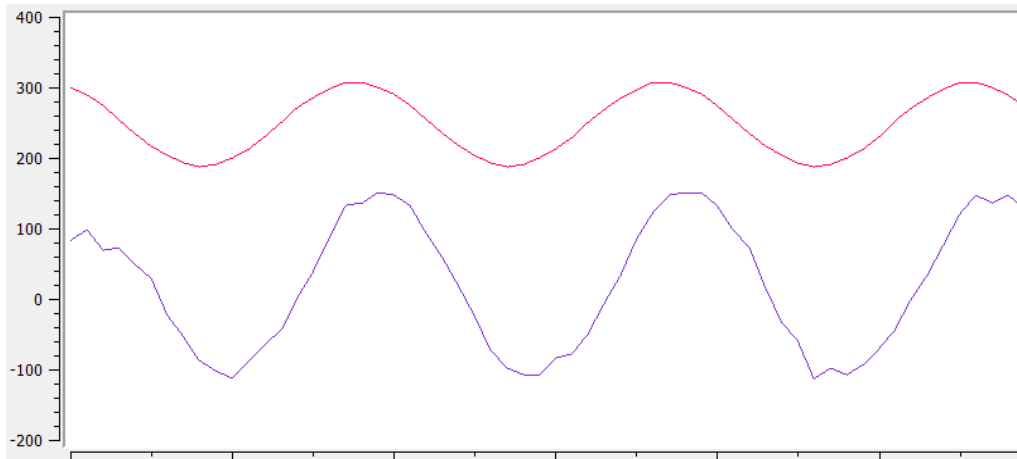
```
P = 119.57 Watts
U = 225.32 V
I = 528.67 mA
P = 119.12 Watts
U = 225.26 V
I = 528.67 mA
P = 119.09 Watts
U = 225.04 V
I = 530.93 mA
P = 119.48 Watts
U = 225.05 V
I = 537.63 mA
P = 121.00 Watts
```

Αυτές οι τιμές τάσης και ρεύματος που είναι σαφέστατα υψηλότερες αφού αυξήθηκε και η τάση εισόδου, φαίνονται στο επόμενο σχήμα που απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις τάσης και ρεύματος στα 120V (σχήμα 3.31):



Σχήμα 3.31: Γραφική Παράσταση Τάσης - Ρεύματος Στα 120V

Η επόμενη μέτρηση πραγματοποιήθηκε για τάση εισόδου 180V. Συγκεκριμένα:

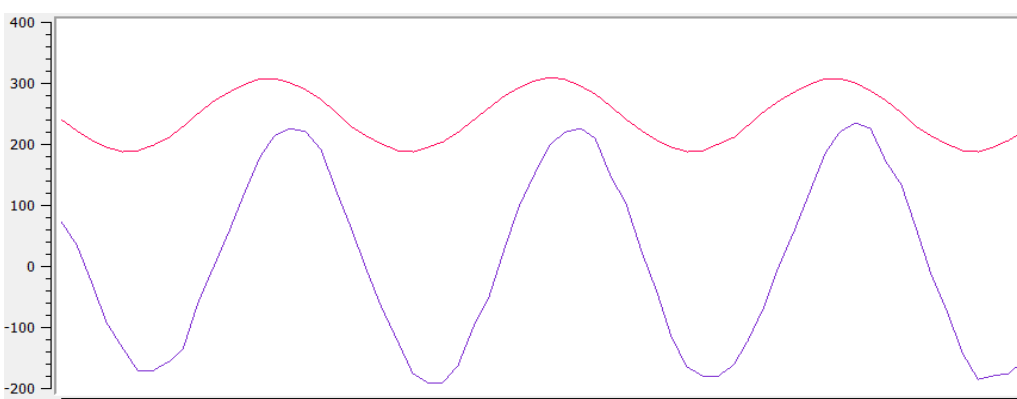


Σχήμα 3.32: Γραφική Παράσταση Τάσης - Ρεύματος Στα 180V.

Αντίστοιχα, οι τιμές τάσης, ρεύματος και ισχύος στα 180V είναι οι επόμενες:

$P = 217.26 \text{ Watts}$
 $U = 224.54 \text{ V}$
 $I = 963.98 \text{ mA}$
 $P = 216.45 \text{ Watts}$
 $U = 224.66 \text{ V}$
 $I = 950.26 \text{ mA}$
 $P = 213.48 \text{ Watts}$
 $U = 224.61 \text{ V}$
 $I = 955.27 \text{ mA}$
 $P = 214.56 \text{ Watts}$
 $U = 224.69 \text{ V}$
 $I = 962.74 \text{ mA}$
 $P = 216.31 \text{ Watts}$

Στη συνέχεια ρυθμίστηκε η τάση στα 220V (σχήμα 3.33).

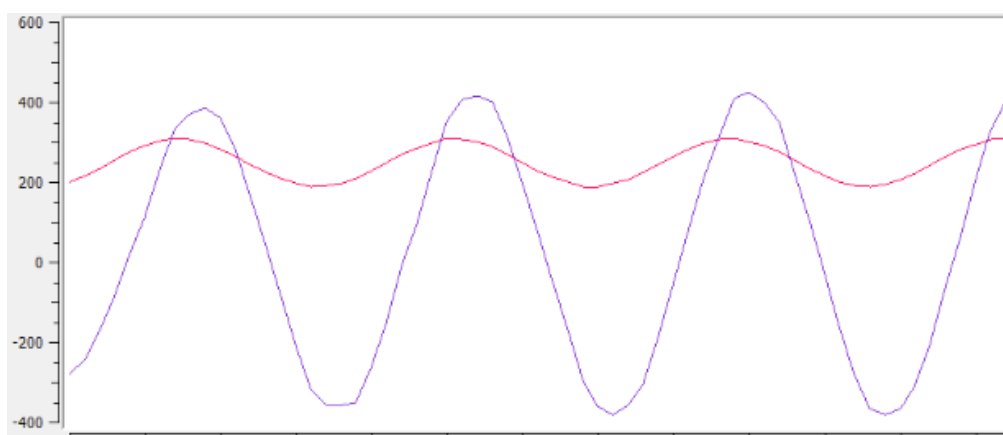


Σχήμα 3.33: Γραφική Παράσταση Τάσης - Ρεύματος Στα 220V.

Οι τιμές των θεμελιωδών μεγεθών τάσης, ρεύματος και ισχύος στη τάση μέτρησης των 220V είναι οι παρακάτω:

```
P = 342.19 Watts
U = 224.21 V
I = 1515.15 mA
P = 339.72 Watts
U = 224.24 V
I = 1515.94 mA
P = 339.94 Watts
U = 224.20 V
I = 1515.94 mA
P = 339.87 Watts
U = 224.23 V
I = 1519.87 mA
P = 340.80 Watts
```

Τέλος, για τάση 260V (που είναι και η τελευταία μέτρηση) έχουμε την παρακάτω γραφική παράσταση:



Σχήμα 3.34: Γραφική Παράσταση Τάσης - Ρεύματος Στα 260 V

Γίνεται φανερό ότι η γραφική παράσταση τάσης-ρεύματος στα 260V, είναι σχεδόν ίδια με την προηγούμενη γραφική παράσταση για 220V. Αυτό το οποίο αλλάζει είναι η ισχύς του μετασχηματιστή, αφού η περισσότερη τάση που δίνεται οδηγεί σε περισσότερη κατανάλωση ρεύματος. Τέλος, οι τιμές των μεγεθών για τη μέτρηση των 260V είναι οι εξής:

P = 641.39 Watts
U = 223.07 V
I = 2875.79 mA
P = 641.52 Watts
U = 222.96 V
I = 2890.71 mA
P = 644.50 Watts
U = 223.02 V
I = 2878.70 mA
P = 641.99 Watts
U = 223.21 V
I = 2881.60 mA
P = 643.20 Watts

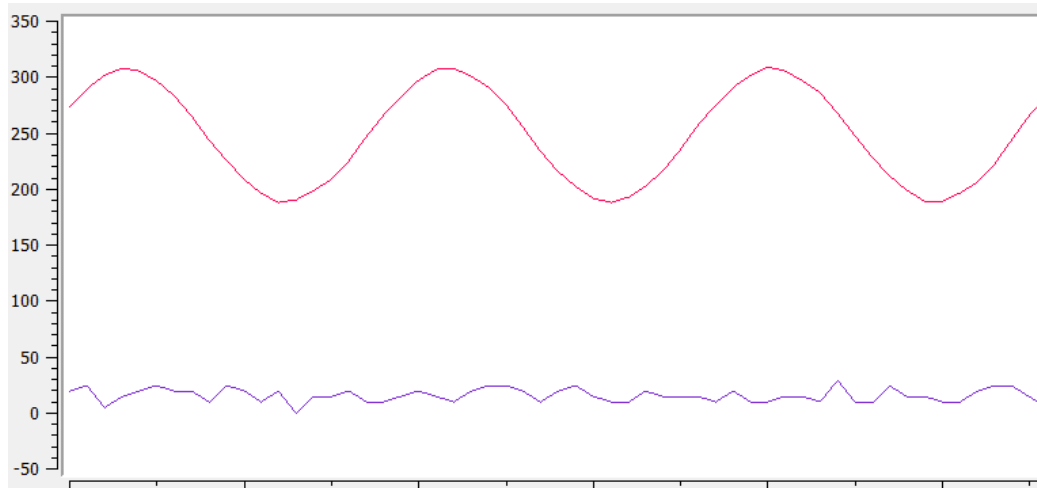
3.5.2 Ηλεκτρικός Φούρνος

Η τελευταία συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις των πειραμάτων, ήταν ένας ηλεκτρικός φούρνος που βρίσκεται εντός του εργαστηρίου και είναι ο παρακάτω (σχήμα 3.35):



Σχήμα 3.35: Ηλεκτρικός Φούρνος

Οι επόμενες μετρήσεις ακολουθούν την ίδια λογική με αυτές που έγιναν για τον σταθμό κόλλησης, επομένως αρχικά όταν η συσκευή είναι ενεργοποιημένη αλλά δεν θερμαίνει (κατάσταση αναμονής), η γραφική παράσταση τάσης – ρεύματος είναι η εξής:



Σχήμα 3.36: Γραφική Παράσταση Με τον Φούρνο Σε Αναμονή.

Και οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων μέτρησης για τάση, ρεύμα και ισχύς είναι:

```

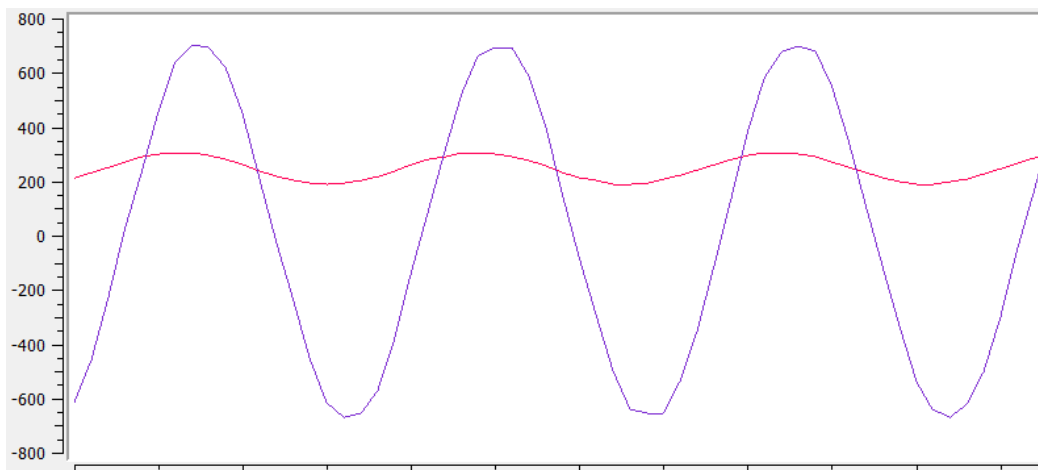
P = 39.15 Watts
U = 221.78 V
I = 162.10 mA
P = 35.95 Watts
U = 221.91 V
I = 169.31 mA
P = 37.57 Watts
U = 221.96 V
I = 176.22 mA
P = 39.11 Watts
U = 222.11 V
I = 169.31 mA
P = 37.61 Watts

```

Όταν γυριστεί ο διακόπτης θερμοκρασίας και αρχίσει να θερμαίνει ο φούρνος, οι αντίστοιχες τιμές με τη συσκευή σε πλήρη λειτουργία, είναι οι παρακάτω:

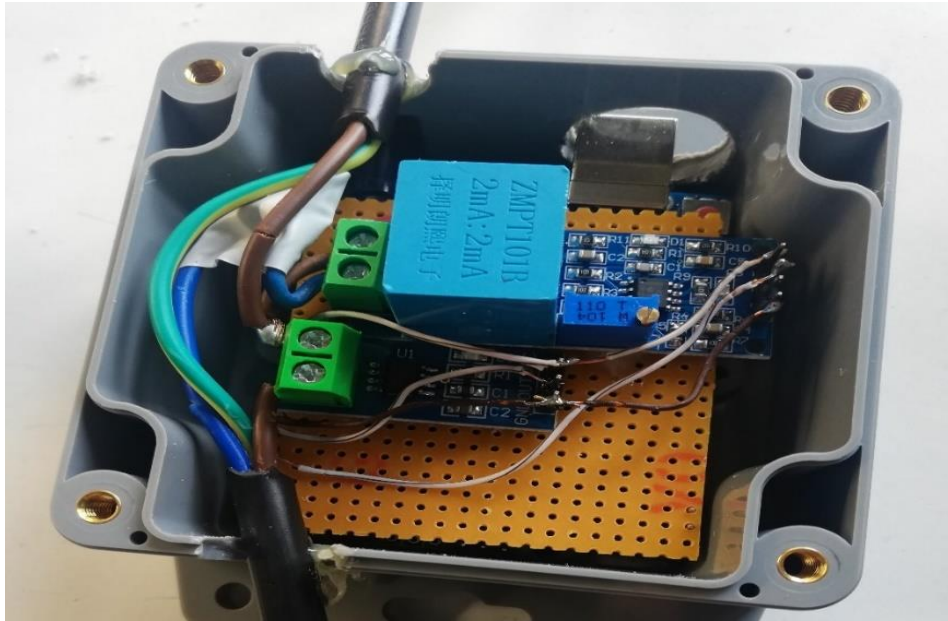
I = 4929.44 mA
P = 1078.15 Watts
U = 218.76 V
I = 4920.95 mA
P = 1076.51 Watts
U = 219.08 V
I = 4910.26 mA
P = 1075.73 Watts
U = 219.05 V
I = 4919.50 mA
P = 1077.61 Watts
U = 219.21 V
I = 4914.39 mA

Με τη τιμή μέτρησης του ρεύματος να φτάνει περίπου τα 5Α. Τέλος, το σχήμα 3.37 απεικονίζει τις γραφικές παραστάσεις τάσης – ρεύματος όταν λειτουργεί ο φούρνος:



Σχήμα 3.37: Γραφική Παράσταση Με Τον Φούρνο Σε Λειτουργία.

Παρατηρεί κάποιος ότι η ημιτονοειδής γραφική παράσταση του ρεύματος του φούρνου είναι η καλύτερη από κάθε άλλη συσκευή που παρουσιάστηκε σε αυτή την εργασία, ακριβώς επειδή το φορτίο του ρεύματος έχει μεγάλη τιμή και σε συνδυασμό με τον αισθητήρα ACS712_20A, δίνουν καλύτερη ευαισθησία και μικρότερο σφάλμα. Αφού επαληθεύτηκε η λειτουργία της συσκευής μέτρησης, αυτή τοποθετήθηκε σε ένα πλαστικό κουτί. Πρώτα δημιουργήθηκαν οι κατάλληλες εγκοπές στο κουτί για να χωρέσουν τα καλώδια που καταλήγουν στη συσκευή μέτρησης και στη πρίζα, ενώ μετά τοποθετήθηκε η διάταξη μέσα σε αυτό (σχήμα 3.38).



Σχήμα 3.38: Τοποθέτηση Της Διάταξης Εντός Κουτιού

Η τελική συσκευή που κατασκευάστηκε και μπορεί να μετρήσει την ενέργεια οποιαδήποτε συσκευής με μία μόνο απλή τοποθέτηση σε πρίζα, φαίνεται στο επόμενο σχήμα 3.39:



Σχήμα 3.39: Η Τελική Συσκευή Μέτρησης Ενέργειας

4 Συμπεράσματα

Υπάρχουν αρκετοί αισθητήρες που μπορούν να μετρήσουν τάση και ρεύμα τη σημερινή εποχή, όμως δεν έχουν όλοι την ίδια ευαισθησία, τα ίδια επίπεδα θορύβου και το ίδιο επίπεδο σφάλματος. Η χρήση του Arduino βοηθάει τον χρήστη να μετρήσει με μεγάλη ακρίβεια τις τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος, καθώς και να μελετήσει την ποιότητα της ενέργειας σε όλο το εύρος διακύμανσης του ηλεκτρικού δικτύου. Κατά τη διαδικασία εφαρμογής της συσκευής που αναπτύχθηκε, μέσω των πειραμάτων που παρατέθηκαν μπορεί να εξάγει κάποιος τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η επιλογή των αισθητήρων ρεύματος, τάσης και του Arduino Uno έγινε λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους της ευαισθησίας, της αντοχής, της ακρίβειας και του οικονομικού κόστους.
- Όσο μετρούσε κάποιος τάση κοντά στα 220V, η γραφική παράσταση του ρεύματος έτεινε να γίνει καθαρά ημιτονοειδής. Αντίθετα, για τάση εισόδου >220V, η γραφική παράσταση άλλαζε ελάχιστα (φαινόμενο κορεσμού).
- Για μικρές εντάσεις ρεύματος (<5A) χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας ACS712_5A, ενώ για μεγαλύτερες εντάσεις (από 5A μέχρι 20A) ήταν αναγκαίος ο αισθητήρας ACS712_20A.
- Οι συσκευές που απαιτούσαν ρεύμα <500mA είχαν μεγαλύτερα σφάλματα.

Κάποιες πιθανές βελτιώσεις που θα μπορούσαν να γίνουν μελλοντικά είναι οι εξής:

- Χρήση Bluetooth ή Wi-Fi, ώστε ο χρήστης να διαβάζει τις τιμές και τις γραφικές παραστάσεις των μεγεθών στο κινητό του.
- Η συσκευή μέτρησης να δίνει το πλάτος και το μέγεθος των αρμονικών του δικτύου τις τελευταίες 24 ώρες και να κρατούνται σε ένα ξεχωριστό αρχείο.
- Σύνδεση της συσκευής στον κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα για συνολική παρακολούθηση.

5 Βιβλιογραφία

- [1] Η. Κωνσταντίνος, «Μελέτη Ποιότητας Ισχύος,» Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2015.
- [2] Θεόδωρος Π. Κανταρτζής, «Εκτίμηση ποιότητας ισχύος βάσει καταγραφών του ΔΕΔΔΗΕ σε αναχώρηση με βιομηχανικούς καταναλωτές,» Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2015.
- [3] Καφούρος Σαράντος, «Διερεύνηση της λειτουργίας και σχεδιασμός συστήματος ελέγχου του δυναμικού αποκαταστάτη τάσης (DVR) που,» Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2010.
- [4] UTECO, «Ποιότητα Ισχύος,» σε *Σύντομος Οδηγός*, Αθήνα, UTECO, 2016, p. 3.
- [5] C. Logic, Two Channel Energy Measurement IC, Ostin, Texas: Cirrus Logic, inc, 2013.
- [6] Belling, BL0930E, A Single Phase Energy Meter IC with Integrated Oscillator, Shanghai , 2015.
- [7] I. Analog Devices, Energy Metering IC with Integrated Oscillator and Reverse Polarity Indication, Usa, 2006, p. 20.
- [8] W. Koon, «Current sensing for energy metering,» Wilmington, Usa, Analog Devices, Inc.
- [9] Q. Z. Y. Y. Chen Xu, «Investigation of the thermal drift of open-loop Hall Effect current sensor and its improvement,» Finsing, Germany, 2015.
- [10] J.-G. L. J. Z. Y. Y. Yixiao Wang, «Split Core Closed Loop Hall Effect Current Sensors and Applications,» σε *PCIM EUROPE International Exhibition and Conference for Power Electronics*, Nuremberg, 2012.
- [11] L. Allegro MicroSystems, σε *Thermally Enhanced, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 100 $\mu\Omega$ Current Conductor*, Worcester, Massachusetts, 2008-2013, p. 22.
- [12] T. I. -. C. & P. S. Products, TMCS1100: Bringing precision signal chain to isolated, Houston: ti.com/sensors, @ Copyright 2019.
- [13] A. A. ., F. G. M. ., R. B. Eduardo Viciano, «OpenZmeter: An Efficient Low-Cost Energy Smart Meter and Power Quality Analyzer,» p. 13, 4 November 2018.
- [14] ARDUINO, «Arduino Uno SMD,» 2018.
- [15] Allegro MicroSystems, LLC, «Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC and a Low-Resistance Current Conductor,» Worcester, Massachusetts, 2015.
- [16] ZeMing, ZMPT101B(ZMPT107) voltage transformer operating guide, NanJing ZeMing Electronic Co., Ltd, 2014, p. 4.
- [17] Q. Z. L. Electronic, «ZMPT101B Current-type Voltage Transformer,» p. 2, May 2015.
- [18] www.fritzing.org, «Fritzing Software,» University of Applied Sciences Potsdam, GPLv3 , December 2019.

6 Παράρτημα

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε είναι ο εξής:

```
#include "ZMPT101B.h"
#include "ACS712.h"

const int currentPin = A0;
const int voltagePin = A1;
ZMPT101B voltageSensor (voltagePin);
ACS712 currentSensor (ACS712_05B, currentPin); /* χαμηλά φορτία κατανάλωσης*/
ACS712 currentSensor (ACS712_20A, currentPin); /* υψηλά φορτία κατανάλωσης*/

void setup () {
  Serial.begin (9600);
  Serial.println ("Insert command. Available commands :");
  Serial.println ("i: plot current");
  Serial.println ("v: plot voltage");
  Serial.println ("b: plot both current and voltage");
  Serial.println ("m: print measurements");
}

void loop () {
  if (Serial.available () > 0) {
    int incomingByte = Serial.read ();
    if (incomingByte == 'i') {
      while (Serial.available () == 0) {
        plotCurrent ();
      }
    }
  }
}
```

```

else if (incomingByte == 'v') {
  while (Serial.available () == 0) {
    plotVoltage ();
  }
}
else if (incomingByte == 'b') {
  while (Serial.available () == 0) {
    plotBoth ();
  }
}
else if (incomingByte == 'm') {
  while (Serial.available () == 0) {
    measure ();
  }
}
else
{
  Serial.println ("Wrong input! Available commands :");
  Serial.println ("i: plot current");
  Serial.println ("v: plot voltage");
  Serial.println ("b: plot both current and voltage");
  Serial.println ("m: print measurements");
  while (! Serial.available ()) {
  }
}
}

void plotVoltage () {
  int voltageInput = analogRead (voltagePin);
  float voltage = voltageInput * (5.0 / 1024.0) * 100;
  Serial.println (voltage);
  delay (100);
}

```



```

}
void plotCurrent () {
  int currentInput = analogRead (currentPin);
  float current = ((512 - currentInput) * 5.0) * 1000 / 1024.0;
  Serial.println (current);
  delay (100);
}

```

```

void plotBoth () {
  int voltageInput = analogRead (voltagePin);
  float voltage = voltageInput * (5.0 / 1024.0) * 100;
  int currentInput = analogRead (currentPin);
  float current = ((512 - currentInput) * 5.0) * 1000 / 1024.0;
  Serial.print (voltage);
  Serial.print ("\t");
  Serial.println (current);
  Delay (100);
}

```

```

void measure () {
  float U = voltageSensor.getVoltageAC () * 10;
  float I = currentSensor.getCurrentAC () * 1000;
  float P = U * I / 1000;
  Serial.println (String ("U = ") + U + «V»);
  Serial.println (String ("I = ") + I + «mA»);
  Serial.println (String ("P = ") + P + «Watts»);
  delay (1000);
}

```