



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

**Υλοποίηση Μετρητικού Συστήματος και Οδήγηση
Μηχανής Επαγωγής μέσω FPGA**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΧΡΗΣΤΟΣ Β. ΦΡΑΓΚΟΣ**

Επιβλέπων : Αντώνιος Αντωνόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2025



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Υλοποίηση Μετρητικού Συστήματος και Οδήγηση Μηχανής Επαγωγής μέσω FPGA

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΧΡΗΣΤΟΣ Β. ΦΡΑΓΚΟΣ

Επιβλέπων : Αντώνιος Αντωνόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 15^η Σεπτεμβρίου 2025

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Δημήτριος Σούντρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2025

.....

Χρήστος Β. Φράγκος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Χρήστος Φράγκος, 2025

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

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των ημιαγωγών ευρέος ενεργειακού διακένου έχουν οδηγήσει στην αύξηση των διακοπτικών συχνοτήτων των σύγχρονων μετατροπέων αλλά και στην βελτίωση της απόδοσης τους. Ταυτόχρονα οι προηγμένες πλατφόρμες επεξεργασίας επιτρέπουν την αξιοποίηση των μετατροπέων στο έπακρο, καθώς επιτρέπουν την υλοποίηση πολύπλοκων αλγορίθμων ελέγχου με ακρίβεια και την βελτίωση της δυναμικής απόκρισης των συστημάτων. Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια πειραματική διάταξη η οποία ενσωματώνει έναν μετατροπέα υψηλών συχνοτήτων και μια υπολογιστική πλατφόρμα με FPGA με σκοπό την προετοιμασία για την υλοποίηση ενός συστήματος ελέγχου μηχανής επαγωγής. Αρχικά στο κομμάτι της εισαγωγής γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση της πορείας των ηλεκτρονικών ισχύος, μια παρουσίαση των βασικών υπολογιστικών συστημάτων ενώ παρατίθενται και κάποιες βασικές πληροφορίες για την μηχανή επαγωγής. Το κείμενο συνεχίζει με την περιγραφή της ανάπτυξης ενός μετρητικού συστήματος ρευμάτων και τάσεων το οποίο είναι απαραίτητο για την εφαρμογή ελέγχου σε διατάξεις ισχύος. Την περιγραφή της κατασκευής του συστήματος μετρήσεων ακολουθεί η διαδικασία βαθμονόμησης των μετρητικών πλακετών όπου υπολογίζονται και συγκρίνονται συναρτήσεις προσέγγισης πρώτου και δευτέρου βαθμού. Με την προετοιμασία των μετρητικών ολοκληρωμένη δίνεται στην συνέχεια έμφαση στο κομμάτι της διαμόρφωσης της προγραμματιζόμενης λογικής όπου αναπτύσσονται επιμέρους υποσυστήματα σε γλώσσα περιγραφής υλικού για α) την οδήγηση της μηχανής επαγωγής με εφαρμογή ελέγχου V/f β) την ανάγνωση ενός κωδικοποιητή ταχύτητας και την εξαγωγή της τιμής αυτής γ) την μέτρηση των τριφασικών ρευμάτων της μηχανής δ) την μεταφορά των μετρήσεων στον χρήστη. Όλα τα παραπάνω επιλέχθηκε να υλοποιηθούν στο FPGA της υπολογιστικής πλατφόρμας και όχι στον επεξεργαστή (CPU) για την εκμετάλλευση των γρήγορων ταχυτήτων ρολογιού του πρώτου και τον ντετερμινιστικό χρονισμό των διαδικασιών. Η εργασία κλείνει με την παρουσίαση της πειραματικής διάταξης, την απεικόνιση των μετρούμενων μεγεθών και τον τελικό απολογισμό της διαδικασίας.

Λέξεις Κλειδιά:

Μηχανή επαγωγής , Αρθρωτός Μετατροπέας Υψηλής Διακοπτικής Συχνότητας, Μετρητικό Τάσης ,Μετρητικό Ρεύματος, Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων, Βαθμονόμηση, Συνάρτηση Προσέγγισης, Προγραμματιζόμενη Λογική, Γλώσσα Περιγραφής Υλικού, Μέτρηση Ταχύτητας, Βαθμωτός Έλεγχος, Οδήγηση Μηχανής .

Abstract

Technological advances in the field of wide bandgap semiconductors have led to an increase in the switching frequencies of modern converters as well as an improvement in their efficiency. At the same time, advanced processing platforms allow the converters to be fully utilized, as they enable the implementation of complex control algorithms with accuracy and the improvement of the systems' dynamic response. In this thesis, an experimental setup is developed which integrates a high-frequency converter and a computational platform with an FPGA, with the purpose of preparing for the implementation of an induction machine control system. Initially, in the introduction, a brief review of the development of power electronics is presented, along with an overview of the main computational systems, while some basic information about the induction machine is also provided. The text then continues with the description of the development of a current and voltage measurement system, which is necessary for the application of control in power electronic converters. The description of the construction of the measurement system is followed by the calibration process of the measurement boards, where first- and second-order approximation functions are calculated and compared. With the measurement system prepared, emphasis is then placed on the configuration of the programmable logic, where a number of subsystems are developed in hardware description language (VHDL) for: a) driving the induction machine with V/f control, b) reading a speed encoder and extracting its value, c) measuring the three-phase currents of the machine, and d) transferring the measurements to the user. All of the above were implemented on the FPGA of the computational platform, rather than on the processor (CPU), in order to take advantage of the fast clock speeds of the former and the deterministic timing of the processes. The thesis concludes with the presentation of the experimental setup, the visualization of the measured quantities, and the final assessment of the process.

Keywords

Induction Machine, Modular High-Frequency Converter, Voltage Sensor, Current Sensor, Least Squares Method, Calibration, Approximation Function, Programmable Logic, Hardware Description Language. Speed Measurement, Scalar Control, Motor Drive.

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο μια πενταετούς πορείας προπτυχιακών σπουδών στην Σχολή ΗΜΜΥ του ΕΜΠ. Το ταξίδι αυτό αποδείχθηκε πλούσιο σε εμπειρίες, όμορφες στιγμές αλλά και προκλήσεις. Κατά την διάρκεια του αναπτυχθήκανε νέες δεξιότητες και αρετές ενώ έγινε και η χαρτογράφηση των νέων περιπετειών που θα ακολουθήσουν στο μέλλον. Επειδή όμως η ζωή κρύβει αβεβαιότητες και οποιοσδήποτε σχεδιασμός μπορεί να διαταραχθεί είναι κομβική η συμπόρευση με ανθρώπους άξιους και χαρισματικούς. Είναι βέβαιο πως δίχως τέτοιους ανθρώπους δεν θα είχε έρθει εις πέρας και ο συγκεκριμένος πολυπόθητος στόχος. Για τον λόγο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε μια σειρά από ανθρώπους οι οποίοι στάθηκαν συνοδοιπόροι σε αυτό το μακρύ ταξίδι.

Πρωτίστως την οικογένεια μου. Τους γονείς μου Βασίλειο και Μαργαρίτα και τα αδέρφια μου Ελένη, Αλέξανδρο και Αγγελική για την αδιάλειπτη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια και το κουράγιο που μου έδωσαν ώστε να συνεχίσω να προσπαθώ. Επίσης τον θείο μου Γρηγόρη και την θεία μου Ελένη για τις όμορφες Κυριακές και τις συζητήσεις που κάναμε μαζί.

Τον επιβλέποντα μου, κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο ο οποίος μέσα από τα μαθήματα του και τον χαρακτήρα του με ενέπνευσε να ασχοληθώ με τον τομέα των Ηλεκτρονικών Ισχύος. Η εμπιστοσύνη του να μου αναθέσει το συγκεκριμένο θέμα διπλωματικής και η ένταξη μου στο εργαστήριο του αποτέλεσαν το πιο σημαντικό κομμάτι της πορείας μου ως φοιτητής.

Τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Σταύρο Παπαθανασίου και κ. Δημήτριο Σούντρη για την ευκαιρία που μου έδωσαν να τους παρουσιάσω την εργασία μου αλλά και την επίδραση τους στον τρόπο σκέψης μου μέσω των μαθημάτων τους που παρακολούθησα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον κ. Παναγιώτη Ζαννή ο οποίος ήταν δίπλα μου σε όλη την διάρκεια της κατασκευής του μετρητικού συστήματος και μου μετέφερε πλούσιες πρακτικές γνώσεις απαραίτητες για κάθε μηχανικό.

Τα υπόλοιπα παιδιά που συνεισφέραν στην ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου. Τον υποψήφιο Διδάκτορα Χρήστο Λουκά για την βοήθεια του στην εκμάθηση του λογισμικού Altium. Τους συναδέλφους στο εργαστήριο Αλκίνοο Παύλο Κοτσιφάκη και Αντώνη Μακρυγιώργη για την πολυδιάστατη συνεισφορά τους και τους αμέτρητους καφέδες που ήπιαμε μαζί κατά την διάρκεια εκπόνησης των εργασιών μας. Επιπλέον τον υποψήφιο Διδάκτορα Αναστάσιο Ξυνό για την επικοινωνία μας κατά την διάρκεια διαμόρφωσης της προγραμματιζόμενης λογικής.

Τους φίλους μου Αριστείδη, Κωνσταντίνο, Νεκτάριο, Σοφία, Αναστάσιο και Μίλτο για όλες τις όμορφες στιγμές που μοιρασθήκαμε και την βοήθεια τους στο ταξίδι αυτό όταν ο ορίζοντας φαινότανε θολός.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή-Γενικά	18
1.1	Ηλεκτρονικά Ισχύος: Εξέλιξη και Σύγχρονα Δεδομένα	18
1.2	Συστήματα Επεξεργασίας	19
1.3	Αρθρωτός Μετατροπέας Υψηλής Διακοπτικής Συχνότητας (MHFC)	23
1.4	Μηχανή Επαγωγής	24
1.5	Θεωρητικό Υπόβαθρο ελέγχου V προς f	26
1.6	Συμβολή Παρούσας Εργασίας	28
2	Μετρητικό Σύστημα	29
2.1	Πλακέτα Μέτρησης Τάσης	29
2.1.1	Σχηματικό Διάγραμμα Κυκλώματος	29
2.1.2	Επιλογή Τιμών αντιστάσεων	30
2.2	Πλακέτα Μέτρησης Ρεύματος	32
2.2.1	Σχηματικό Διάγραμμα Κυκλώματος	32
2.2.2	Επιλογή Τιμών Αντιστάσεων.	34
2.3	Πλακέτα Τροφοδοσίας	35
2.4	Σχεδίαση PCBs	36
2.4.1	Κανόνες Σχεδίασης	36
2.4.2	Σχεδίαση και Κόλληση Πλακετών	37
2.5	Σύνθεση Μετρητικού Συστήματος	40
3	Βαθμονόμηση Πλακετών	42
3.1	Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων	42
3.1.1	Γενικά	42
3.1.2	Περίπτωση Γραμμικής προσέγγισης	43
3.2	Βαθμονόμηση Πλακετών Τάσης	44
3.2.1	Είσοδος στο Εύρος $[-40, 40]$ V_{rms}	45

3.2.2 Είσοδος στο Εύρος [-400 , 400] Vrms	48
3.3 Βαθμονόμηση Πλακετών Ρεύματος	51
3.3.1 Είσοδος στο Εύρος [-3.5 , 3.5] A	51
3.3.2 Είσοδος στο Εύρος [-25 , 25] A	54
3.4 Συνολικά Αποτελέσματα για την Μέτρηση Τάσης	58
3.5 Συνολικά Αποτελέσματα για την Μέτρηση Ρεύματος	59
4 Διαμόρφωση Προγραμματιζόμενης Λογικής	62
4.1 Το Υπολογιστικό Σύστημα	62
4.2 Μέτρηση ταχύτητας	63
4.3 Μέτρηση Τριφασικών Ρευμάτων Στάτη	68
4.4 Υλοποίηση Ελέγχου V/f σε Υλικό	70
4.5 Μεταφορά Μετρήσεων στον Χρήστη	75
4.6 Αποτελέσματα Υλοποίησης	77
5 Πειραματικές Μετρήσεις	79
5.1 Πειραματική Διάταξη	79
5.1.1 Μηχανή Επαγωγής	79
5.1.2 Το εργαστηριακό πρωτότυπο MHFC	79
5.1.3 Τάσεις Τροφοδοσίας	81
5.1.4 Μετρητικά Στοιχεία	81
5.1.5 Συνδεσμολογία-Τελική Διάταξη	82
5.2 Μέτρηση Ρεύματος	83
5.2.1 Οδήγηση με Συχνότητα $f=10$ Hz	83
5.2.2 Οδήγηση με Συχνότητα $f=3.1$ Hz	85
5.3 Μέτρηση Τάσης	87
5.3.1 Οδήγηση με Συχνότητα $f=10$ Hz	87
5.3.2 Οδήγηση με Συχνότητα $f=3.1$ Hz	88
5.4 Μέτρηση Ταχύτητας	89

6	Συμπεράσματα-Προτάσεις για περεταίρω Μελέτη	93
6.1	Μέτρηση Ρεύματος	93
6.2	Μέτρηση Τάσης	94
6.3	Μέτρηση Ταχύτητας	94
6.4	Προτάσεις για Περεταίρω Μελέτη	95
7	Βιβλιογραφία	96
8	Παράρτημα	98

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1.1 Ιστορική πορεία Ηλεκτρονικών Ισχύος[3].	19
Εικόνα 1.2: Σύγκριση υπολογιστικών συστημάτων[11].	22
Εικόνα 1.3: Γενική δομή μετατροπέα MHFC[12].	23
Εικόνα 1.4 : Οι δύο διαφορετικές σχεδιάσεις του δρομέα: δακτυλιοφόρος (αριστερά) ,τύπου κλωβού (δεξιά) [14].	24
Εικόνα 1.5: Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής μόνιμης κατάστασης.	25
Εικόνα 1.6: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής.	26
Εικόνα 1.7 : Διάγραμμα V- f περιγραφής ελέγχου με σταθερό λόγω τάσης προς συχνότητα.	27
Εικόνα 2.1 : Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος μέτρησης τάσης.	30
Εικόνα 2.2 : Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος μέτρησης ρεύματος.	33
Εικόνα 2.3: Σχηματικό Διάγραμμα Κυκλώματος τροφοδοσίας.	36
Εικόνα 2.4 : Πλακέτα μέτρησης τάσης: 2-D διάταξη στο περιβάλλον Altium (Αριστερά), 3-D Layout (Κέντρο), Τελικό αποτέλεσμα (Δεξιά).	38
Εικόνα 2.5: Πλακέτα μέτρησης ρεύματος: 2-D Layout στο περιβάλλον Altium (Αριστερά), 3-D Layout (Κέντρο), Τελικό αποτέλεσμα (Δεξιά).	39
Εικόνα 2.6: Πλακέτα τροφοδοσίας: 2-D Layout στο περιβάλλον Altium (Αριστερά), 3-D Layout (Κέντρο), Τελικό αποτέλεσμα (Δεξιά).	39
Εικόνα 2.7: Πλακέτα διανομής τροφοδοσίας-στήριξης: 2-D Layout στο περιβάλλον Altium (Επάνω), 3-D Layout (Μέση), Τελικό αποτέλεσμα (Κάτω).	40
Εικόνα 2.8: Διαδικασία σύνθεσης μετρητικού συστήματος (1).	41
Εικόνα 2.9: Διαδικασία σύνθεσης μετρητικού συστήματος(2).	41
Εικόνα 2.10: Αποτέλεσμα κατασκευής Μετρητικού συστήματος.	41
Εικόνα 3.1: Περιγραφική Απεικόνιση Γραμμικής Προσέγγισης.	43
Εικόνα 3.2: Διαδικασία Βαθμονόμησης πλακετών τάσης στο εύρος τάσης εισόδου [-40 - 40] V_{rms} .	45
Εικόνα 3.3: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα V0 στο εύρος εξόδου [0 , 3.3] V με τάση εισόδου στο εύρος [-40 , 40] V_{rms} .	47
Εικόνα 3.4: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα V0 στο εύρος εξόδου [-10 , 10] V με τάση εισόδου στο εύρος [-40 , 40] V_{rms} .	47
Εικόνα 3.5: Διαδικασία Βαθμονόμησης πλακετών τάσης στο εύρος τάσης εισόδου [- 400 , 400] V_{rms} .	48
Εικόνα 3.6: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα V0 στο εύρος εξόδου [0 , 3.3] V με τάση εισόδου στο εύρος [-400 , 400] V_{rms} .	50
Εικόνα 3.7: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα V0 στο εύρος εξόδου [-10 , 10] V με τάση εισόδου στο εύρος [-400 , 400] V_{rms} .	50
Εικόνα 3.8 : Διαδικασία Βαθμονόμησης πλακετών ρεύματος στο εύρος ρεύματος εισόδου [-3.5 , 3.5]A. .	52
Εικόνα 3.9: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα I0 στο εύρος εξόδου [0 , 3.3] V με ρεύμα εισόδου στο εύρος [-3.5 , 3.5]A. .	53
Εικόνα 3.10: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα I0 στο εύρος εξόδου [-10 , 10] V με ρεύμα εισόδου στο εύρος [-3.5 , 3.5]A. .	54
Εικόνα 3.11: Διάταξη βαθμονόμησης πλακετών ρεύματος στο εύρος [-25 , 25]A. .	55

Εικόνα 3.12: Φορτίο σταθερού ρεύματος RIGOL DL3021 σε λειτουργία κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης.....	55
Εικόνα 3.13: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα I0 στο εύρος εξόδου [0,3.3] V με ρεύμα εισόδου στο εύρος [-25,25]A.	57
Εικόνα 3.14: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα I0 στο εύρος εξόδου [0,3.3] V με ρεύμα εισόδου στο εύρος [-25,25]A.	57
Εικόνα 4.1: Αρχιτεκτονική του συστήματος SoC ZynQ 7000 [21].	63
Εικόνα 4.2: Απεικόνιση των δυο διαφορετικών τύπων δίσκων κωδικοποιητών ταχύτητας[22].....	64
Εικόνα 4.3: Περιγραφή λειτουργίας κωδικοποιητή ταχύτητας[22].	64
Εικόνα 4.4: Περιγραφική απεικόνιση συστήματος μέτρησης ταχύτητας.	65
Εικόνα 4.5: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για την περιγραφή της λειτουργίας του μετρητή ακμών[23].	66
Εικόνα 4.6 Απεικόνιση μέτρησης ρεύματος σε συγχρονισμό με την διαμόρφωση.	68
Εικόνα 4.7: Περιγραφική απεικόνιση συστήματος μέτρησης ρευμάτων.	69
Εικόνα 4.8: Περιγραφική απεικόνιση διαμόρφωσης του υποσυστήματος μνήμης	71
Εικόνα 4.9 Περιγραφική απεικόνιση διαμόρφωσης του υποσυστήματος δημιουργίας του φέροντος τριγώνου.	71
Εικόνα 4.10: Υπολογισμός πλάτους ημιτονικών αναφορών.	73
Εικόνα 4.11: Απεικόνιση επικοινωνίας με χρήστη και υπολογισμός παραμέτρων ελέγχου.	74
Εικόνα 4.12: Απεικόνιση μετρητών υλοποίησης της φάσης των ημιτόνων αναφοράς.....	74
Εικόνα 4.13: Περιγραφική απεικόνιση συστήματος οδήγησης με σταθερό λόγω τάσης προς συχνότητα.	75
Εικόνα 4.14: Περιγραφική απεικόνιση μεταφοράς δεδομένων στο περιβάλλον Vitis.....	76
Εικόνα 4.15: Τελικό διάγραμμα υποσυστημάτων στο περιβάλλον Vivado.	77
Εικόνα 4.16: Χρησιμοποίηση πόρων FPGA.	77
Εικόνα 4.17: Απεικόνιση υλοποίησης προγραμματιζόμενης λογικής στο υλικό.	78
Εικόνα 4.18: Υπολογισμοί κατανάλωσης ισχύος και θερμοκρασίας	78
Εικόνα 5.1:Ανω και κάτω όψεις υπομονάδας	80
Εικόνα 5.2 : Εργαστηριακό πρωτότυπο μετατροπέα MHFC.....	81
Εικόνα 5.3: Τελική πειραματική διάταξη.....	82
Εικόνα 5.4: Μετρήσεις τριφασικών ρευμάτων μηχανής στο FPGA για οδήγηση με συχνότητα $f=10$ Hz.....	83
Εικόνα 5.5: Απεικόνιση τριφασικών ρευμάτων μηχανής στον παλμογράφο για οδήγηση με συχνότητα $f = 10$ Hz.	84
Εικόνα 5.6: Απεικόνιση ρεύματος φάσης της μηχανής στον παλμογράφο μέσω του μετρητικού συστήματος και αμπεροτσιμπήδας.....	84
Εικόνα 5.7: Μετρήσεις τριφασικών ρευμάτων μηχανής για οδήγηση με συχνότητα $f=3.1$ Hz.	85
Εικόνα 5.8: Απεικόνιση τριφασικών ρευμάτων μηχανής στον παλμογράφο για οδήγηση με συχνότητα $f = 3.1$ Hz.	86
Εικόνα 5.9: Σήματα λειτουργία ADC: Σήμα convst_in(μωβ),σήμα eos (τιρκουάζ), σήμα eos (κίτρινο).	86
Εικόνα 5.10 Μέτρηση φασικής τάσης A για οδήγηση με συχνότητα $f=10$ Hz.	87
Εικόνα 5.11 Απεικόνιση φασικής Τάσης A στον παλμογράφο για οδήγηση με συχνότητα $f=10$ Hz.	88
Εικόνα 5.12: Μέτρηση φασικής τάσης A για οδήγηση με συχνότητα $f=3.1$ Hz.	89
Εικόνα 5.13: Απεικόνιση φασικής Τάσης A στον παλμογράφο για οδήγηση με συχνότητα $f=3.1$ Hz.....	89

Εικόνα 5.14: Μέτρηση ταχύτητας στην μετάβαση από τις 150 RPM στις 300 RPM.	90
Εικόνα 5.15: Μέτρηση ταχύτητας στην μετάβαση από τις 150 RPM στις 300 RPM μέσω της ταχογεννήτριας	90
Εικόνα 5.16: Απεικόνιση ταχύτητας με σταθερή αναφορά στις 300 RPM.	91
Εικόνα 5.17: Παραγόμενοι παλμοί κωδικοποιητή ταχύτητας: A (τιρκουαζ), B(μωβ),I (κίτρινο)	92

Κατάλογος Πινάκων

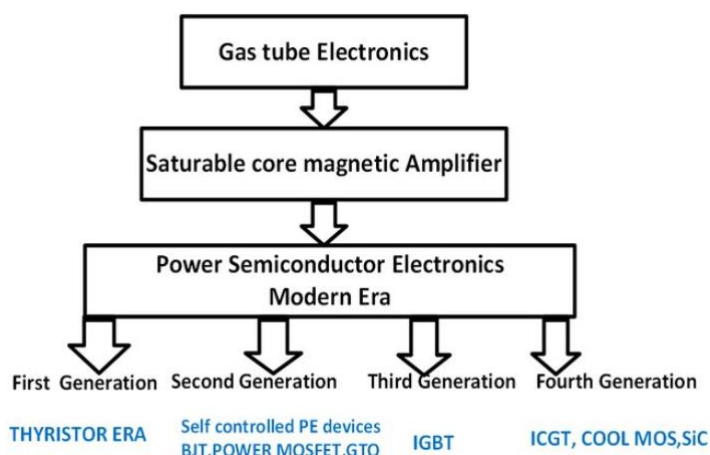
Πίνακας 2.1 :Χαρακτηριστικά αισθητήρα τάσης LEM LV 25-P	29
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά αισθητήρα ρεύματος LA 25-P.	32
Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά μετατροπέα DC-DC TMR 9-2422WI.....	35
Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα μετρήσεων πλακέτας V0 για την τάση εισόδου στο εύρος [-40 , 40] <i>V_{rms}</i>	47
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα μετρήσεων πλακέτας V0 για την τάση εισόδου στο εύρος [-400 , 400] <i>V_{rms}</i>	50
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα μετρήσεων πλακέτας I0 για το ρεύμα εισόδου στο εύρος [-3.5 , 3.5] A	53
Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα μετρήσεων πλακέτας I0 για το ρεύμα εισόδου στο εύρος [-25 , 25] A	56
Πίνακας 3.5: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες τάσης στο εύρος εισόδου [-40 , 40]V και εύρος εξόδου[0 , 3.3]V.	58
Πίνακας 3.6: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες τάσης στο εύρος εισόδου [-40 , 40]V και εύρος εξόδου[-10 , 10]V.	58
Πίνακας 3.7: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες τάσης στο εύρος εισόδου [-400 , 400]V και εύρος εξόδου[0 , 3.3]V.....	59
Πίνακας 3.8: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες τάσης στο εύρος εισόδου [-400 , 400]V και εύρος εξόδου[-10 , 10]V.	59
Πίνακας 3.9: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες ρεύματος στο εύρος εισόδου [-3.5 , 3.5]A και εύρος εξόδου[0 , 3.3]V.....	59
Πίνακας 3.10: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες ρεύματος στο εύρος εισόδου [-3.5 , 3.5]A και εύρος εξόδου[-10 , 10]V.	60
Πίνακας 3.11 Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες ρεύματος στο εύρος εισόδου [-25 , 25]A και εύρος εξόδου[0 , 3.3]V.....	60
Πίνακας 3.12: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες ρεύματος στο εύρος εισόδου [-25 , 25]A και εύρος εξόδου[-10 , 10]V.	60
Πίνακας 5.1: Παράμετροι μηχανής επαγωγής εργαστηρίου[24].	79

1 Εισαγωγή-Γενικά

1.1 Ηλεκτρονικά Ισχύος: Εξέλιξη και Σύγχρονα Δεδομένα

Ο τομέας των ηλεκτρονικών ισχύος ασχολείται με τη μετατροπή και τον έλεγχο της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διακοπτικών διατάξεων υψηλής απόδοσης. Η ιστορία του ξεκινά στις αρχές του 20ού αιώνα με την εφεύρεση του ανορθωτή υδραργύρου από τον Peter Cooper Hewitt και συνεχίζεται με την ανάπτυξη μαγνητικών ενισχυτών λίγα χρόνια αργότερα [1]. Η εφεύρεση του τρανζίστορ από τους Bardeen, Brattain και Shockley στα εργαστήρια Bell Laboratories το 1948 αποτέλεσε την απαρχή των ημιαγωγών στερεάς κατάστασης, οδηγώντας σταδιακά στην αντικατάσταση των λυχνιών κενού. Οκτώ χρόνια αργότερα, με την ανακάλυψη των p-n-p-n θυρίστορ πυριτίου (Si), ξεκίνησε η επανάσταση των ηλεκτρονικών ισχύος βασισμένων πλέον σε τεχνολογία στερεάς κατάστασης. Στα επόμενα χρόνια, διάφορες τεχνολογίες θυρίστορ και διόδων εισήχθησαν στην αγορά, πρωταγωνιστώντας στη νέα εποχή των ηλεκτρονικών ισχύος. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 εμφανίστηκαν τα BJT και τα MOSFET ισχύος, ενώ τη δεκαετία του 1980 ακολούθησαν οι IGBTs, προσφέροντας λύσεις σε υπάρχοντα προβλήματα όπως η ανεπιθύμητη μανδάλωση των θυρίστορ. Στη σύγχρονη εποχή, όπου η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και η προστασία του περιβάλλοντος αποτελούν πρωταρχικούς στόχους, τα ηλεκτρονικά ισχύος βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα συστημάτων. Η ηλεκτροκίνηση και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μαζί με μεγάλα έργα διασύνδεσης δικτύων, έχουν οδηγήσει σε ραγδαία ανάπτυξη των μετατροπών ισχύος και των συστημάτων αποθήκευσης. Παράλληλα, η αυτοκινητοβιομηχανία κινείται ταχύτατα προς την ηλεκτροκίνηση, με υβριδικά και πλήρως ηλεκτρικά οχήματα να κυριαρχούν στην αγορά. Κοινός παρονομαστής σε όλες αυτές τις εφαρμογές είναι οι μετατροπές ηλεκτρονικών ισχύος, οι οποίοι εξακολουθούν να χρησιμοποιούν MOSFET και IGBT, πλέον όμως κατασκευασμένα με ημιαγωγούς ευρέος ενεργειακού διακένου όπως το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) και το αζωτούχο γάλλιο (GaN). Τα υλικά αυτά προσφέρουν μειωμένες διακοπτικές απώλειες και ευκολότερη θερμική διαχείριση, οδηγώντας σε μεγαλύτερη απόδοση και αξιοπιστία των μετατροπών [2]. Η συνοπτική απεικόνιση της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών ισχύος απεικονίζεται στην **Εικόνα 1.1**. Η αξιόπιστη λειτουργία των σύγχρονων μετατροπών αποτελεί σημαντική απαίτηση από τους κατασκευαστές. Μία στρατηγική για την επίτευξη αυτού είναι η αρθρωτή σχεδίαση των μετατροπών, όπου η παροχή ισχύος κατανέμεται σε διαφορετικές υπομονάδες. Με τον τρόπο αυτό, ακόμη και σε περίπτωση βλάβης μιας υπομονάδας, το υπόλοιπο σύστημα

παραμένει σε λειτουργία. Σε ορισμένες εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, οι αρθρωτοί μετατροπείς μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας στον κινητήρα, αυξάνοντας έτσι και την πυκνότητα ισχύος της διάταξης. Η αύξηση της πυκνότητας ισχύος επιτυγχάνεται επίσης με την αύξηση της διακοπτικής συχνότητας των μετατροπέων, καθώς το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης μεταφέρεται σε υψηλότερα φάσματα, μειώνοντας την ανάγκη για μεγάλα φίλτρα εξομάλυνσης. Ο έλεγχος σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες είναι εφικτός χάρη στις εξελίξεις στους ημιαγωγούς ισχύος και στα σύγχρονα προηγμένα υπολογιστικά συστήματα με υψηλές συχνότητες ρολογιού και μεγάλη επεξεργαστική ισχύ. Πέρα από την μείωση του μεγέθους των φίλτρων η αύξηση της διακοπτικής συχνότητας οδηγεί σε μεγαλύτερη συχνότητα δειγματοληψίας και επομένως σε γρηγορότερη απόκριση των ελεγκτών βελτιώνοντας έτσι την δυναμική απόκριση του συστήματος ελέγχου.



Εικόνα 1.1 Ιστορική πορεία Ηλεκτρονικών Ισχύος[3].

1.2 Συστήματα Επεξεργασίας

Η εφεύρεση του τρανζίστορ, πέρα από τη νέα εποχή που εγκαινίασε στον χώρο των ηλεκτρονικών ισχύος, σηματοδότησε και μια πραγματική επανάσταση στον τομέα των υπολογιστικών συστημάτων. Η εξέλιξη της τεχνολογίας των τρανζίστορ οδήγησε, μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, στη δημιουργία των πρώτων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, γεγονός που επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους των υπολογιστικών μηχανών κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Στα επόμενα χρόνια, ολοένα και περισσότερα τρανζίστορ ενσωματώνονταν στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος. Την εξέλιξη αυτή αποτύπωσε ο Gordon Moore, διατυπώνοντας τον περίφημο «νόμο του Μουρ», σύμφωνα με τον οποίο ο αριθμός των τρανζίστορ που μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα διπλασιάζεται περίπου κάθε 18 έως 24

μήνες. Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων συνεχίζεται έως τις ημέρες μας με μια πληθώρα από αυτά να είναι διαθέσιμα για τις διαφορετικές ανάγκες κάθε εφαρμογής. Ο τομέας των ηλεκτρονικών ισχύος με την πληθώρα εφαρμογών ελέγχου που εμπεριέχει έχει πορευτεί παράλληλα με τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των υπολογιστικών συστημάτων ενσωματώνοντας αρκετές από τις αναπτυγμένες πλατφόρμες επεξεργασίας. Η λειτουργία των κυριότερων από αυτών και οι εφαρμογές τους περιγράφονται στην συνέχεια.

- **CPU (Central Processing Unit)**

Η CPU αποτελεί τον κατεξοχήν επεξεργαστή γενικής χρήσης, σχεδιασμένο ώστε να εκτελεί ένα ευρύ φάσμα προγραμμάτων και λειτουργιών με μεγάλη ευελιξία. Αποτελεί την προτιμώμενη επιλογή σε πολυάριθμες εφαρμογές, ιδίως σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται εξαιρετικά υψηλή υπολογιστική ισχύς ή ελάχιστος χρόνος απόκρισης. Η δυνατότητα προγραμματισμού της μέσω γλωσσών υψηλού επιπέδου (C , C++ , Java) καθιστά τη CPU ιδιαίτερα προσιτή και ευέλικτη ως προς την ανάπτυξη και εκτέλεση λογισμικού, προσφέροντας έτσι ευκολία στη χρήση και μεγάλη προσαρμοστικότητα ως προς την εφαρμογή. Στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, οι CPU βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή σε συστήματα ελέγχου και εποπτείας (SCADA) όπου είναι απαραίτητη η διασύνδεση και ο συντονισμός υποσυστημάτων, καθώς και η εκτέλεση πολύπλοκων αλγορίθμων ελέγχου. Σε αυτά τα περιβάλλοντα, η προτεραιότητα δίδεται στη λειτουργική αξιοπιστία του συστήματος παρά στη μεγιστοποίηση της ταχύτητας επεξεργασίας.[4]

- **DSP (Digital Signal Processor)**

Ο DSP αποτελεί μια επεξεργαστική μονάδα ειδικού σκοπού, η οποία έχει σχεδιαστεί με στόχο την επιτάχυνση διαδικασιών που σχετίζονται με την επεξεργασία ψηφιακών σημάτων. Η αρχιτεκτονική του είναι βελτιστοποιημένη ώστε να εκτελεί ταχύτατα επαναλαμβανόμενες μαθηματικές πράξεις, όπως η συνέλιξη, το φιλτράρισμα και οι μετασχηματισμοί Fourier, που αποτελούν θεμελιώδεις λειτουργίες στον χώρο της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Σε σύγκριση με την CPU, η αρχιτεκτονική του DSP είναι λιγότερο παράλληλη, αλλά περισσότερο εξειδικευμένη και επικεντρωμένη αποκλειστικά στις απαιτήσεις της επεξεργασίας σημάτων. Για τον σκοπό αυτό, οι DSP ενσωματώνουν ειδικά σετ εντολών καθώς και μονάδες παράλληλης επεξεργασίας, οι οποίες επιτρέπουν την εκτέλεση πολύπλοκων αλγορίθμων με ιδιαίτερα υψηλή ταχύτητα. Ο προγραμματισμός τους πραγματοποιείται συχνά σε γλώσσες χαμηλού επιπέδου, όπως

η assembly, ή σε γλώσσες υψηλότερου επιπέδου που διαθέτουν κατάλληλη επέκταση. Παρά τη μικρότερη ευελιξία τους και τον περιορισμένο αριθμό εφαρμογών σε σχέση με τις CPU, οι DSP υπερέχουν σε επιδόσεις όταν πρόκειται για εφαρμογές που απαιτούν σημαντική αριθμητική επεξεργασία. Στον χώρο των ηλεκτρονικών ισχύος, οι DSP χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία σημάτων (φιλτράρισμα), η υλοποίηση σύνθετων αλγορίθμων ελέγχου και η διαχείριση πολλαπλών, φωλιασμένων βρόχων ελέγχου [5].

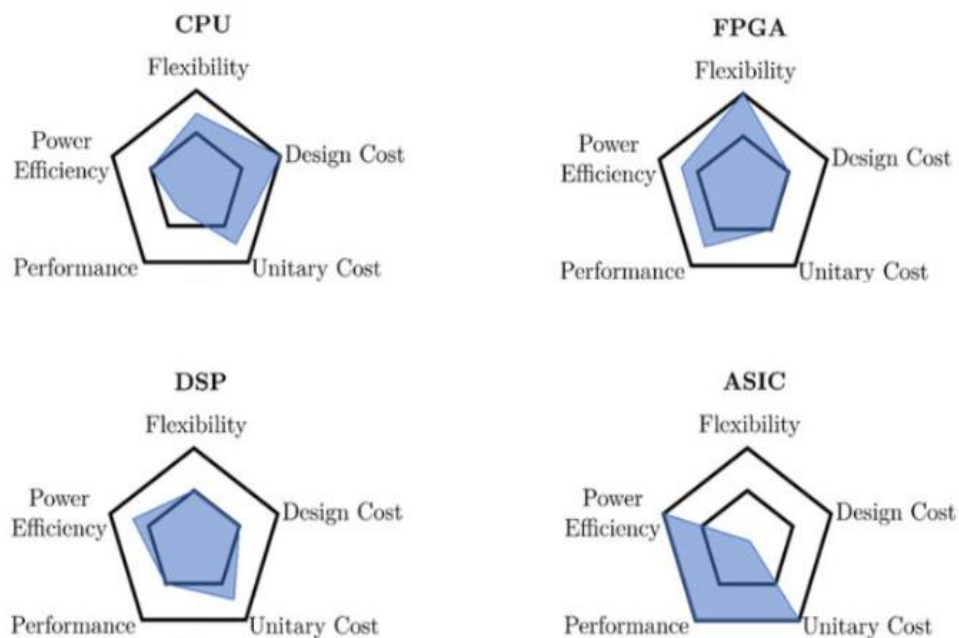
- **FPGA (Field Programmable Gate Array)**

Το FPGA (Field Programmable Gate Array) είναι ένα ευέλικτο ψηφιακό ολοκληρωμένο κύκλωμα, το οποίο, όπως δηλώνει και το όνομά του, προγραμματίζεται απευθείας στο πεδίο χρήσης. Η αρχιτεκτονική του αποτελείται από πλήθος επαναπρογραμματιζόμενων λογικών κυκλωμάτων και μπλοκ μνήμης, τα οποία μπορούν να διασυνδεθούν με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με την εφαρμογή. Ο προγραμματισμός επιτυγχάνεται μέσω γλωσσών περιγραφής υλικού (HDL), όπως οι VHDL και Verilog, που επιτρέπουν στον σχεδιαστή να περιγράψει τη λειτουργία του κυκλώματος σε επίπεδο υλικού. Η δυνατότητα σχεδιασμού της εσωτερικής δομής του FPGA καθιστά το τελικό σύστημα εξαιρετικά αποδοτικό και γρήγορο, αφού μπορεί να εξειδικευτεί απόλυτα για τη συγκεκριμένη λειτουργία. Η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των σταδίων επεξεργασίας γίνεται με βέλτιστο τρόπο, ενώ χάρη στη χρήση ρολογιών υψηλών συχνοτήτων και στον ντετερμινιστικό χρονισμό των εντολών, επιτυγχάνεται αξιόπιστη και προβλέψιμη εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο. Τα βασικά μειονεκτήματα των FPGA σχετίζονται με την μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος σε σύγκριση με τις CPU και DSP, καθώς και με την αυξημένη πολυπλοκότητα στον προγραμματισμό και τη σχεδίαση. Παρ' όλα αυτά, τα πλεονεκτήματά τους τα καθιστούν ιδανικά για απαιτητικές εφαρμογές. Ενδεικτικά, χρησιμοποιούνται: (α) στον έλεγχο κινητήριων συστημάτων υψηλών ταχυτήτων [6], (β) στην υλοποίηση διαμόρφωσης PWM με πολύ υψηλές διακοπτικές συχνότητες [7], και (γ) σε συστήματα προστασίας και ελέγχου δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας[8].

- **ASIC (Application Specific Integrated Circuit)**

Το ASIC αποτελεί ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί με σκοπό την εκτέλεση συγκεκριμένων και προκαθορισμένων διεργασιών. Σε αντίθεση με τα FPGAs τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού και

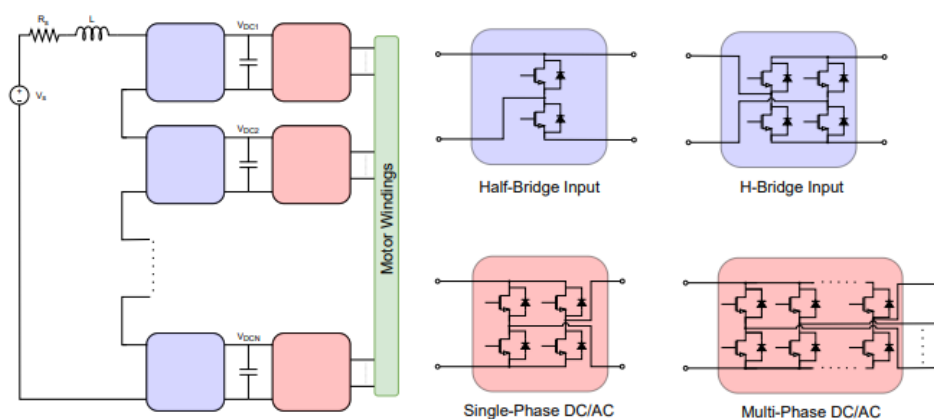
αναπροσαρμογής της λειτουργίας τους, το ASIC μόλις ολοκληρωθεί η παραγωγή του η λειτουργικότητά του δεν μπορεί να μεταβληθεί. Η αρχιτεκτονική του ενσωματώνει αποκλειστικά τις λειτουργίες που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή, αποφεύγοντας την ύπαρξη πλεοναζόντων, γενικού σκοπού υποσυστημάτων. Το γεγονός αυτό καθιστά τα ASIC εξαιρετικά αποδοτικά, τόσο σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας όσο και σε μέγεθος οδηγώντας σε σημαντική μείωση του κόστους υλικού σε περιπτώσεις μαζικής παραγωγής. Ως εκ τούτου, αποτελούν την πλέον κατάλληλη λύση για εφαρμογές όπου η υψηλή απόδοση, η αξιοπιστία και η ενεργειακή αποδοτικότητα υπερτερούν έναντι της ανάγκης για ευελιξία. Προφανώς η βασική αδυναμία των ASIC έγκειται στην αδυναμία τροποποίησης της λειτουργίας τους. Επιπλέον, η διαδικασία ανάπτυξης είναι ιδιαίτερα απαιτητική, καθώς προϋποθέτει υψηλή τεχνογνωσία, και μεγάλο χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού και δοκιμών[9]. Στον χώρο των ηλεκτρονικών ισχύος, τα ASIC απαντώνται κυρίως σε προϊόντα βιομηχανικής κλίμακας, όπου οι απαιτήσεις σε αξιοπιστία και σταθερή λειτουργία είναι κρίσιμες. Συγκεκριμένα, αξιοποιούνται στον έλεγχο ηλεκτρικών μηχανών, σε προηγμένα συστήματα προστασίας και αυτοματισμού, καθώς και σε μετρητικά συστήματα μέτρησης ρεύματος, τάσης και ταχύτητας περιστροφής[10]. Μια συνοπτική σύγκριση των παραπάνω υπολογιστικών συστημάτων γίνεται στην **Εικόνα 1.2**.



Εικόνα 1.2: Σύγκριση υπολογιστικών συστημάτων[11].

1.3 Αρθρωτός Μετατροπέας Υψηλής Διακοπτικής Συχνότητας (MHFC)

Ο MHFC (Modular High Frequency Converter) αποτελεί μια αρθρωτή διάταξη μετατροπέα, η οποία οργανώνεται σε ανεξάρτητες υπομονάδες, καθεμία από τις οποίες μπορεί να τροφοδοτήσει διαφορετικά φορτία. Κάθε υπομονάδα αποτελείται από έναν αριθμό ημιγέφυρών και έναν πυκνωτή, συνδεδεμένα παράλληλα, σχηματίζοντας τη βασική μονάδα λειτουργίας του μετατροπέα. Οι ημιγέφυρες μπορούν να συνδεθούν κατά τρόπο ώστε να σχηματίσουν ένα στάδιο εισόδου Σ.Ρ.–Σ.Ρ., το οποίο, τροφοδοτούμενο από την τάση εισόδου, δημιουργεί μια ελεγχόμενη συνεχή τάση στον πυκνωτή. Το στάδιο εξόδου χρησιμοποιεί αυτή την τάση ως είσοδο για την τροφοδοσία είτε μονοφασικών είτε πολυφασικών φορτίων. Για τη σωστή λειτουργία της διάταξης, μεταξύ της πηγής τάσης του μετατροπέα και του σταδίου εισόδου πρέπει να παρεμβληθεί ένα επαγωγικό στοιχείο, εξασφαλίζοντας την ομαλή μεταφορά ισχύος και τον περιορισμό των ρευμάτων αιχμής



Εικόνα 1.3: Γενική δομή μετατροπέα MHFC[12].

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.3**, το στάδιο εισόδου μπορεί να αποτελεί είτε ημιγέφυρα είτε πλήρης γέφυρα, ενώ το στάδιο εξόδου μπορεί να είναι είτε πλήρης γέφυρα είτε μια πιο σύνθετη πολυφασική διάταξη, ικανή να τροφοδοτεί είτε φορτία Σ.Ρ. είτε Ε.Ρ. Η αρθρωτή δομή επιτρέπει σε κάθε υπομονάδα να τροφοδοτεί είτε ξεχωριστά φορτία είτε διαφορετικά τυλίγματα του ίδιου φορτίου. Μια βασική εφαρμογή αυτής της διάταξης είναι ο διαμοιρασμός των φάσεων ή των τυλιγμάτων μιας μηχανής σε διαφορετικές υπομονάδες, επιτυγχάνοντας αυξημένη ευελιξία στον έλεγχο και διασφάλιση λειτουργίας ακόμη και υπό συνθήκες σφάλματος. Με τον κατάλληλο έλεγχο των σταδίων εισόδου και τη δημιουργία σταθερής τάσης πάνω στους πυκνωτές, κάθε φορτίο λειτουργεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, παραμένοντας ανεπηρέαστο από πιθανές διαταραχές στα υπόλοιπα τμήματα του

συστήματος[13]. Μεταξύ των κύριων πλεονεκτημάτων της διάταξης MHFC συγκαταλέγονται η ευελιξία χρήσης, η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της τάσης των πυκνωτών, η χρήση μικρότερων πυκνωτών λόγω του ελέγχου αυτού, καθώς και οι μικρότερες διακοπτικές απώλειες, που επιτυγχάνονται μέσω της δυνατότητας μείωσης της τάσης των πυκνωτών όταν οι απαιτήσεις της εφαρμογής το επιτρέπουν[12]

1.4 Μηχανή Επαγωγής

Η μηχανή επαγωγής είναι μια από τις πιο διαδεδομένες τριφασικές ηλεκτρικές μηχανές και χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών εξαιτίας της αξιοπιστίας της του μικρού κόστους κατασκευής και συντήρησης αλλά και της ευχρηστίας της. Τα δύο κύρια μέρη που την αποτελούν είναι ο στάτης και ο δρομέας. Ο στάτης αποτελείται από τον πυρήνα ο οποίος κατασκευάζεται από λεπτά φύλλα μαγνητικής λαμαρίνας και από το τριφασικό τύλιγμα το οποίο τοποθετείται στα αυλάκια του πυρήνα. Ο δρομέας είναι αυτός που περιέχει το τύλιγμα διεγέρσεως στο οποίο ρέει ρεύμα εξ επαγωγής από όπου προκύπτει και η ονομασία της μηχανής. Υπάρχουν δυο διαφορετικοί κατασκευαστικοί τύποι δρομέα. Αρχικά ο τύπος βραχυκυκλωμένου κλωβού ο οποίος αποτελείται από έναν αριθμό μεταλλικών ράβδων τοποθετημένων στην επιφάνεια του δρομέα και βραχυκυκλωμένων στα άκρα του μέσω κυκλικών βραχυκυκλωτήρων. Ύστερα ο τύπος δακτυλιοφόρου δρομέα ο οποίος τελείται από έναν τριφασικό τύλιγμα, παρόμοιο με αυτό του στάτη, το οποίο τοποθετείται στα αυλάκια του δρομέα και συνδέεται κατά κανόνα σε αστέρα. Τα τρία άλλα άκρα του τυλίγματος είναι μονωμένα και καταλήγουν σε τρεις δακτυλίους προσφέροντας έτσι την δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικών αντιστάσεων μέσω ψηκτρών. Η σύνδεση των αντιστάσεων δίνει την δυνατότητα μεταβολής της καμπύλης ροπής ταχύτητας ανάλογα με την εφαρμογή.



Εικόνα 1.4 : Οι δύο διαφορετικές σχεδιάσεις του δρομέα: δακτυλιοφόρος (αριστερά) ,τύπου κλωβού (δεξιά) [14].

Η αρχή λειτουργίας είναι αρκετά απλή: Όταν ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων εφαρμοστεί στον δρομέα παράγεται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί στον δρομέα ρεύματα εξ επαγωγής. Τα επαγόμενα ρεύματα δημιουργούν με την σειρά τους το

στρεφόμενο πεδίο του δρομέα το οποίο αλληλοεπιδρά με αυτό του στάτη και έτσι παράγεται ροπή στον άξονα της μηχανής. Αν η εφαρμοζόμενη συχνότητα στα ρεύματα του στάτη είναι f_e τότε ορίζεται η σύγχρονη ταχύτητα ορίζεται ως εξής :

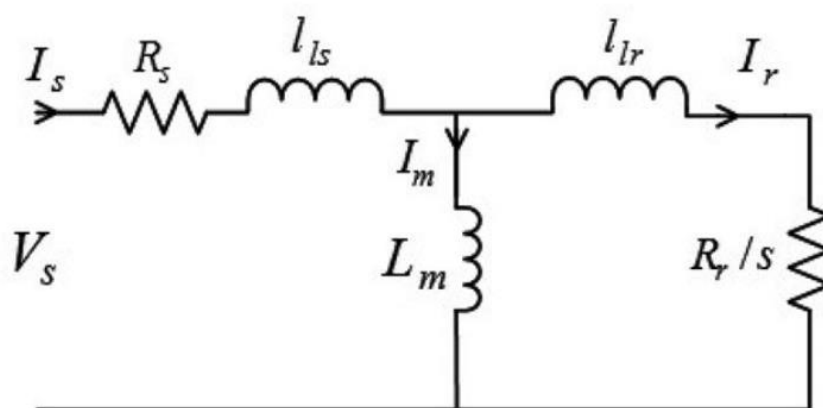
$$n_s = \frac{120 * f_e}{p} \quad (1.1)$$

Όπου p είναι ο αριθμός των μαγνητικών πόλων του δρομέα και εξαρτάται από την κατασκευαστική διαμόρφωση του δρομέα.

Αυτή είναι η ταχύτητα των δυο μαγνητικών πεδίων της μηχανής, με το δρομέα να περιστρέφεται με λίγο μικρότερη ταχύτητα. Η διαφορά αυτή ταχύτητας δημιουργεί τα επαγόμενα ρεύματα και κατά επέκταση το μαγνητικό πεδίο του δρομέα. Αν n είναι η ταχύτητα του δρομέα ορίζεται το μέγεθος της ολίσθησης ως εξής:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \% \quad (1.2)$$

Όταν η ολίσθηση είναι θετική η μηχανή επαγωγής λειτουργεί ως κινητήρας ενώ όταν είναι αρνητική λειτουργεί ως γεννήτρια, σε κανονική λειτουργία η ολίσθηση λαμβάνει τιμές μικρότερες από 5% κατά απόλυτη τιμή.

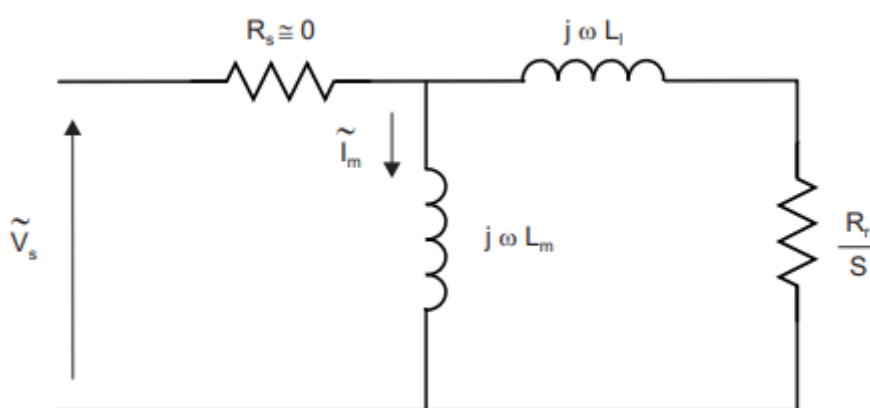


Εικόνα 1.5: Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής μόνιμης κατάστασης.

Το πιο κλασσικό ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής επαγωγής απεικονίζεται στην **Εικόνα 1.5**. Τα μεγέθη R_s, L_{ls} είναι η αντίσταση και η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων του στάτη ενώ τα R_r, L_{lr} τα αντίστοιχα μεγέθη του στάτη. Με L_m απεικονίζεται η αυτεπαγωγή μαγνήτισης η οποία εκφράζει την μαγνητική ροή που συνδέει τον στάτη και τον δρομέα και οδηγεί στην παραγωγή ροπής. Το ρεύμα I_m είναι το ρεύμα μαγνήτισης στο οποίο οφείλεται η παραγωγή του μαγνητικού πεδίου ενώ το ρεύμα του δρομέα I_r το ρεύμα που αντιστοιχεί στην παραγόμενη ισχύ και στις απώλειες στα τυλίγματα του δρομέα. Ο όρος $\frac{R_r}{s}$ αντιστοιχεί στην ισοδύναμη αντίσταση που καταναλώνει την παραπάνω ισχύ.

1.5 Θεωρητικό Υπόβαθρο ελέγχου V προς f

Έλεγχος μια μηχανής επαγωγής με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα (έλεγχος V προς f) αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους τρόπους ελέγχου μιας μηχανής επαγωγής εξαιτίας της απλότητας υλοποίησης του, και της αποτελεσματικότητας του σε εφαρμογές όπου ο έλεγχος της δυναμικής απόκριση δεν είναι ζητούμενο. Η λογική πίσω από την τεχνική αυτή βρίσκεται στο γεγονός πως η μαγνητική ροή της μηχανής παραμένει σταθερή αν ο λόγος της τάσης τροφοδοσίας προς την συχνότητα παραμένει σταθερός. Αυτό το συμπέρασμα εξηγείται αν αναλυθεί το απλοποιημένο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης μια μηχανής επαγωγής που απεικονίζεται στην **Εικόνα 1.6**



Εικόνα 1.6: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής.

Αν η αντίσταση του στάτη αμεληθεί και αυτεπαγωγή σκέδασης του στάτη συμπεριληφθεί στην αυτεπαγωγή σκέδασης του δρομέα τότε το πλάτος του ρεύματος μαγνήτισης της μηχανής προκύπτει ως εξής:

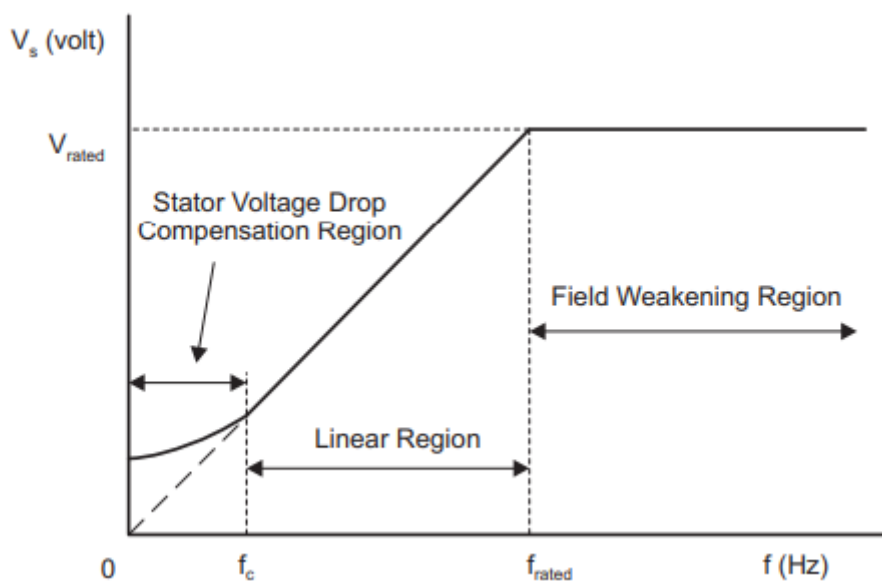
$$I_m = \frac{V_s}{2 * \pi * f * L_m} \quad (1.3)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές πως το ρεύμα μαγνήτισης παραμένει σταθερό και ανεξάρτητο της συχνότητας αν ο λόγος $\frac{V_s}{f}$ παραμένει σταθερός. Το συμπέρασμα αυτό επεκτείνεται αυτούσιο και στην μαγνητική ροή του διακένου της μηχανής εξαιτίας της αναλογίας των δύο μεγεθών. Η σταθεροποίηση της ροής στην αλλαγή της συχνότητας κάνει την ροπή της μηχανής ανεξάρτητη της συχνότητας και επομένως είναι δυνατός ο έλεγχος της ταχύτητας δίχως να επηρεάζεται η παραγόμενη ροπή. Η υλοποίηση της μεθόδου είναι αρκετά απλή, η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας προκύπτει ανάλογα από την ανάφορα της ταχύτητας με βάση την σχέση (1.4) και της τάσης από την (1.5) ώστε ο λόγος της προς την συχνότητα να είναι ίσος με τον ονομαστικό.

$$f = \frac{n_{ref} * p}{120} \quad (1.4)$$

$$V = \frac{V_N}{f_N} * f \quad (1.5)$$

Η γραμμική σχέση για την τάση εφαρμόζεται έως την ονομαστική τιμή της, πέρα από την τιμή αυτή η τάση μένει σταθερή ώστε να μην καταπονηθούν οι μονώσεις των αγωγών ενώ η συχνότητα αυξάνεται πολλές φορές έως και 2 φορές την ονομαστική τιμή της. Η περιοχή λειτουργίας πέρα από την ονομαστική τιμή τάση και συχνότητας ονομάζεται περιοχή εξασθένισης πεδίου καθώς η αύξηση μόνο της συχνότητας μειώνει τη μαγνητική ροή και επομένως τη δυνατότητα παραγωγής ροπής. Η υλοποίηση αυτή είναι η πιο απλή μορφή του ελέγχου και έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα ειδικά όταν η μηχανή δουλεύει εν κενώ ή έχει μικρό φορτίο. Όταν το φορτίο αυξάνεται εμφανίζονται δύο κυρίως προβλήματα. Πρώτον, η ύπαρξη φορτίου οδηγεί σε μεγάλες τιμές ολίσθησης με αποτέλεσμα ο έλεγχος ταχύτητας να μην είναι τόσο ακριβής. Δεύτερον, σε μικρές ταχύτητες όπου η τάση τροφοδοσίας είναι αντίστοιχα μικρή η πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση του στάτη παύει να είναι αμελητέα με αποτέλεσμα να μην ισχύει με ακρίβεια η ανεξαρτησία της μαγνητικής ροής από την συχνότητα. Η λύση στο πρώτο πρόβλημα είναι η τεχνική της εκτίμησης ολίσθησης που οδηγεί σε τιμή συχνότητας οδήγησης λίγο μεγαλύτερη από αυτή που δίνει η (4.2) ενώ στο δεύτερο η τροφοδοσία με μεγαλύτερη τάση σε χαμηλές ταχύτητες. Η τελευταία τεχνική απεικονίζεται και στο διάγραμμα V-f που ακολουθεί στην **Εικόνα 1.7**.



Εικόνα 1.7 : Διάγραμμα V- f περιγραφής ελέγχου με σταθερό λόγω τάσης προς συχνότητα.

1.6 Συμβολή Παρούσας Εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες που παρέχουν οι νέες εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και να υλοποιήσει ένα σύστημα οδήγησης ενός κινητήρα επαγωγής με έλεγχο V προς f . Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ένα υπολογιστικό σύστημα το οποίο ενσωματώνει μια CPU και ένα FPGA για τον έλεγχο ενός μετατροπέα MHFC και την οδήγηση της μηχανής επαγωγής. Η υλοποίηση του κώδικα γίνεται αξιοποιώντας όσο το δυνατόν καλύτερα τις υψηλές ταχύτητες ρολογιού των FPGA και τις δυνατότητες των διακοπών του μετατροπέα. Ο κώδικας πέρα από τον έλεγχο V προς f περιλαμβάνει την σχεδίαση συστημάτων για την μέτρηση των ρευμάτων της μηχανής και της ταχύτητας του άξονα της. Η παραπάνω υλοποίηση του ελέγχου ανοιχτού βρόχου με την σχεδίαση των συστημάτων οδήγησης και μετρήσεων προετοιμάζει σε σημαντικό βαθμό την σχεδίαση ενός συστήματος ελέγχου ταχύτητας κλειστού βρόχου καθώς εισάγει στο υπολογιστικό σύστημα όλα τα απαραίτητα μεγέθη (ρεύμα, ταχύτητα) και υλοποιεί επίσης όλα τα απαραίτητα σήματα εξόδου. Για την ανάγνωση της ταχύτητας χρησιμοποιείται ένα κωδικοποιητής ταχύτητας του εργαστηρίου ενώ για την μέτρηση των ρευμάτων της μηχανής κατασκευάστηκε ένα μετρητικό σύστημα με εύρος εισόδου προσαρμοσμένο στις ανάγκες του εργαστηρίου και εύρος εξόδου κατάλληλο για την ανάγνωση του από τις σύγχρονες υπολογιστικές πλατφόρμες. Πέρα από την σχεδίαση μετρητικών ρεύματος σχεδιαστήκαν και μετρητικά τάσης για χρήση σε άλλες εφαρμογές. Ουσιαστικά ο έλεγχος V προς f , παρά τις σχεδιαστικές προκλήσεις του σε μια γλώσσα περιγραφής υλικού, δεν αποτελεί τον πρωτεύοντα στόχο της παρούσα εργασίας, αλλά το μέσο για την ανάδειξη της υλοποίησης των μετρήσεων ρεύματος και ταχύτητας, αλλά και της προετοιμασίας για την εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου. Η σχεδίαση και η κατασκευή του μετρητικού συστήματος, η ανάπτυξη του κώδικα για την υπολογιστική πλατφόρμα και η πειραματική διαδικασία περιγράφονται με την σειρά στα επόμενα κεφάλαια.

2 Μετρητικό Σύστημα

Ο έλεγχος μετατροπών μέσω προγραμματιζόμενων υπολογιστικών μονάδων, όπως οι μικροϋπολογιστές και τα FPGA, απαιτεί τα μετρούμενα μεγέθη να εμφανίζονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος τάσης, ώστε να είναι δυνατή η μετατροπή τους σε ψηφιακά σήματα μέσω των ADCs (Analogue to Digital Converters) των συστημάτων αυτών. Επομένως, το υπό σχεδίαση μετρητικό σύστημα θα πρέπει να υποβιβάζει τη μετρούμενη τάση στο συγκεκριμένο επίπεδο, καθώς και να μετατρέπει το μετρούμενο ρεύμα σε τάση, η οποία στη συνέχεια θα υποβιβάζεται στο ίδιο επίπεδο. Το σχεδόν καθολικά χρησιμοποιούμενο επίπεδο τάσης, με το οποίο είναι συμβατές και οι υπολογιστικές μονάδες του εργαστηρίου, είναι το **[0 , 3.3 V]**. Για εκπαιδευτικούς λόγους, επιλέχθηκε η δυνατότητα το μετρούμενο μέγεθος να είναι διαθέσιμο και στο εύρος **[-10 , 10 V]**, ώστε να μπορεί να προβληθεί σε παλμογράφο.

2.1 Πλακέτα Μέτρησης Τάσης

2.1.1 Σχηματικό Διάγραμμα Κυκλώματος

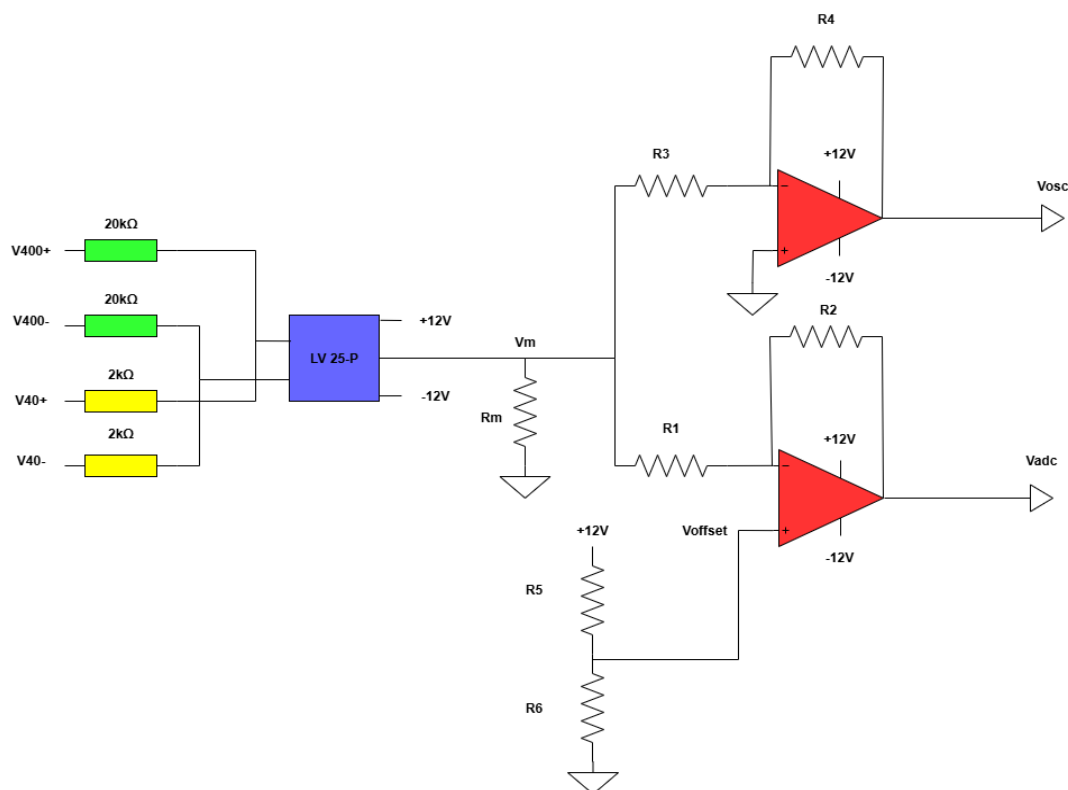
Ο αισθητήρας μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο LV 25-P της εταιρίας LEM ο οποίος βασίζεται στο φαινόμενο Hall και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τη μέτρηση συνεχούς όσο και εναλλασσόμενης τάσης. Ο αισθητήρας προσφέρει γαλβανική απομόνωση μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κυκλώματος η οποία έχει δοκιμαστεί για διαφορά δυναμικού 2.5 kV στα 50 Hz για ένα λεπτό. Τα βασικά του χαρακτηριστικά καταγράφονται στον Πίνακα 2.1. [15]

Παράμετρος	Τιμή
Εύρος ρεύματος πρωτεύοντος I_{PM}	$[-10 - 10]\text{ mA}_{rms}$
Λόγος μετασχηματισμού $\frac{N_P}{N_S}$	2500: 1000
Μέτρο τάσης τροφοδοσίας U_s	$[12 - 15]\text{ V}_{DC}$
Εύρος αντίστασης μέτρησης ($U_s = 12\text{V}$)	$[30 - 100]\text{ }\Omega$

Πίνακας 2.1 :Χαρακτηριστικά αισθητήρα τάσης LEM LV 25-P

Για μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων επιλέχθηκε η σχεδίαση της πλακέτας με δύο εισόδους, μια για την μέτρηση ενός χαμηλού εύρους τάσεων: $[0 , 40]\text{ V}_{rms}$ και μια για την μέτρηση ενός μεγαλύτερου: $[0 , 400]\text{ V}_{rms}$. Για τις δύο διαφορετικές αντιστάσεις εισόδου

επιλέχθηκαν οι τιμές $4\text{ k}\Omega$ και $40\text{ k}\Omega$ με σκοπό όταν η μετρούμενη τάση έχει την μέγιστη τιμή της το ρεύμα πρωτεύοντος να είναι ονομαστικό. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.1**.



Εικόνα 2.1 : Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος μέτρησης τάσης.

Η αρχή λειτουργίας του είναι αρκετά απλή: Η μετρούμενη τάση προκαλεί ένα ρεύμα πάνω στην αντίσταση εισόδου το οποίο πολλαπλασιάζεται με τον λόγο μετασχηματισμού του αισθητήρα και ρέει μέσω του δευτερεύοντος πάνω στην αντίσταση μέτρησης R_m δημιουργώντας την τάση V_m . Η τάση αυτή αποτελεί την είσοδο σε δύο κυκλώματα αναστρέφουσας συνδεσμολογίας με τελεστικούς ενισχυτές οι έξοδοι των οποίων αποτελούν και τις δύο εξόδους της πλακέτας. Επειδή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα Κοινά υπολογιστικά συστήματα απαιτούν τυπικά τάση στο εύρος $[0, 3.3]\text{V}$ στη μη αναστρέφουσα είσοδο του ενός έχει εφαρμοστεί η σταθερή τάση V_{offset} .

2.1.2 Επιλογή Τιμών αντιστάσεων

Οι σχέσεις που περιγράφουν τα παραπάνω είναι οι εξής:

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_{in}} \quad (2.1)$$

$$V_m = I_1 * \frac{N_P}{N_S} * R_m \quad (2.2)$$

$$V_{osc} = -\frac{R_4}{R_3} * V_m \quad (2.3)$$

$$V_{adc} = -\frac{R_2}{R_1} * V_m + V_{offset} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.4)$$

$$V_{offset} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} * 12 \quad (2.5)$$

Αρχικά επιλέχθηκε: $R_m = 93 \Omega$ τιμή που βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια του αισθητήρα για την τάση τροφοδοσίας που εφαρμόστηκε. Αυτή η επιλογή οδηγεί σύμφωνα με την σχέση (2.2) και το ονομαστικό ρεύμα του αισθητήρα στα εξής όρια για την τάση V_m :

$$V_{m,max} = \sqrt{2} * 10 \text{ mA} * 2.5 * 93 = 3.288 \text{ V} \quad (2.6)$$

$$V_{m,min} = -\sqrt{2} * 10 \text{ mA} * 2.5 * 93 = -3.288 \text{ V} \quad (2.7)$$

Θέλοντας η V_{osc} να βρίσκεται στο διάστημα $[-10,10]V$, προκύπτει από την (2.3) ότι :

$$\frac{R_4}{R_3} = 3.041$$

Όποτε από τις διαθέσιμες στο εμπόριο αντιστάσεις επιλέχθηκαν οι τιμές:

$$R_4 = 3.09 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 1 \text{ k}\Omega$$

Για την δεύτερη έξοδο της πλακέτας μέτρησης σύμφωνα με την σχέση (2.4) και την απαίτηση να ανήκει στο εύρος $[0, 3.3] \text{ V}$ με μετατόπιση της μηδενική στάθμης στο μέσο του διαστήματος προκύπτει:

$$V_{offset} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 1.65 \text{ V} \quad (2.8)$$

$$0 \leq -\frac{R_2}{R_1} * V_m + 1.65 \leq 3.3 \quad (2.9)$$

Από τις (2.6), (2.7), (2.9) εξάγεται ότι:

$$\frac{R_2}{R_1} \leq 0.5018$$

Όποτε για να διασφαλιστεί η (2.9) επιλέχθηκε:

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

Και:

$$R_1 = 2.1 \text{ k}\Omega$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην (2.8) συνεπάγεται ότι:

$$V_{offset} = 1.118 \text{ V}$$

Όποτε με βάση την (2.5) επιλέχθηκε:

$$R_6 = 1 \text{ k}\Omega$$

Και:

$$R_5 = 10 \text{ k}\Omega$$

2.2 Πλακέτα Μέτρησης Ρεύματος

2.2.1 Σχηματικό Διάγραμμα Κυκλώματος

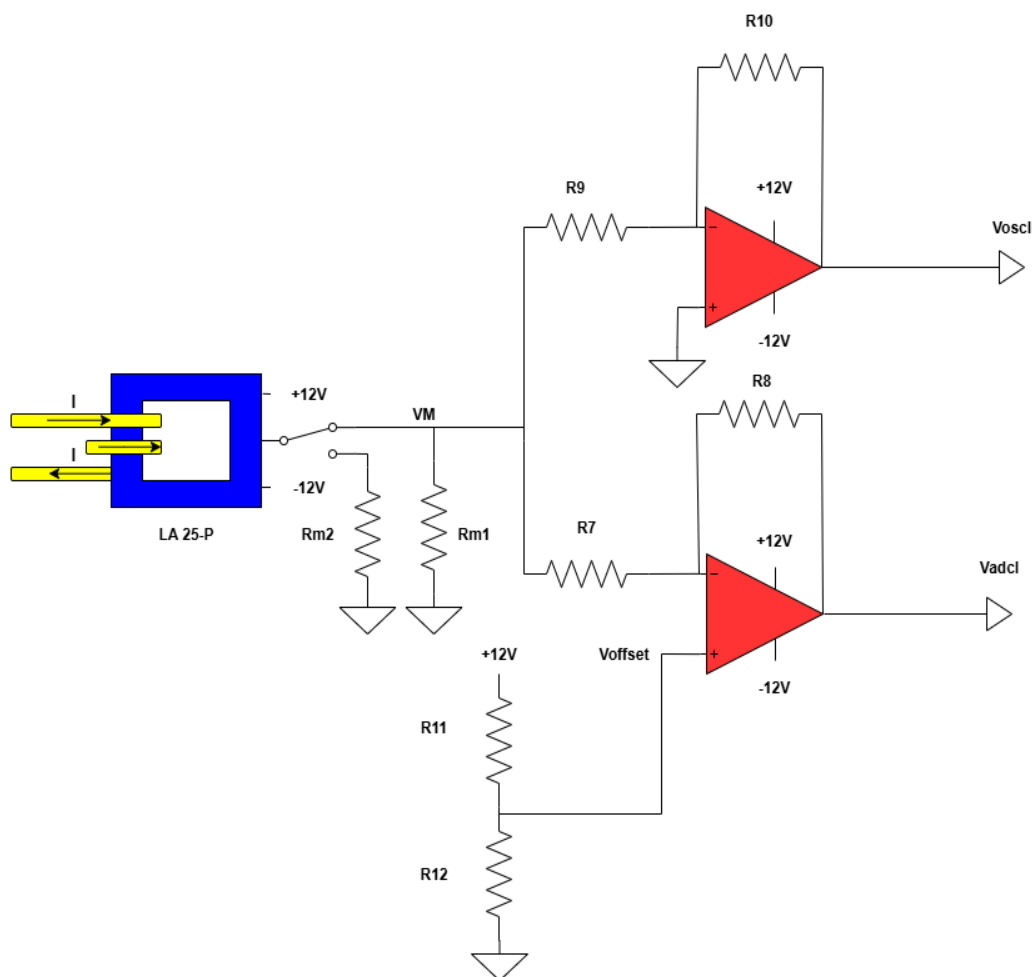
Επιλέχθηκε ο αισθητήρας LA 25-P της εταιρίας LEM ο οποίος διαθέτει τα ίδια προτερήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως για τον LV 25-P. Τα χαρακτηριστικά του καταγράφονται στον Πίνακα 2.2 [16].

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος I_{PN}	$25 A_{rms}$
Εύρος ρεύματος μέτρησης πρωτεύοντος I_{PM}	$[-55 - 55] A$
Λόγος μετασχηματισμού $\frac{N_P}{N_S}$	1: 1000
Μέτρο τάσης τροφοδοσίας U_s	$[12 - 15] V_{DC}$
Εύρος αντίστασης μέτρησης ($U_s = 12V, 25A_{max}$)	$[10 - 280] \Omega$
Εύρος αντίστασης μέτρησης ($U_s = 12V, 55A_{max}$)	$[10 - 80] \Omega$

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά αισθητήρα ρεύματος LA 25-P.

Ο αγωγός του οποίου το ρεύμα μετράται αποτελεί το πρωτεύον του αισθητήρα και ανάλογα με τις σπείρες του που τυλίγονται επηρεάζεται αντίστοιχα και η σχέση μετασχηματισμού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, εξαιτίας του επιπέδου ισχύος των διατάξεων του εργαστηρίου και έχοντας ως σκοπό την καλύτερη δυνατή ανάλυση τυλίχθηκαν δύο σπείρες. Επομένως το μετρούμενο ρεύμα από τον αισθητήρα είναι διπλάσιο από το πραγματικό που ρέει στο κύκλωμα. Για να είναι και πάλι δυνατή η μέτρηση με ακρίβεια χρησιμοποιήθηκαν δύο αντιστάσεις μέτρησης και ανάλογα με την θέση ενός διακόπτη είναι δυνατή η μέτρηση είτε στο εύρος $[-3.5, 3.5] A$ είτε στο $[-25, 25] A$. Σημειώνουμε ότι αυτό είναι το ρεύμα υπό μέτρηση και ότι ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται το διπλάσιο λόγω των δυο περιελίξεων. Για

την μέτρηση στο χαμηλό εύρος επιλέχθηκε η τιμή $R_{m1} = 200 \Omega$ ενώ για την μέτρηση στο υψηλότερο εύρος η τιμή $R_{m2} = 30 \Omega$. Κα οι δύο τιμές συμφωνούν με τα όρια του τίθενται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος παρατίθεται στην **Εικόνα 2.2**.



Εικόνα 2.2 : Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος μέτρησης ρεύματος.

Η αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια με αυτή της πλακέτας τάσης: Το υπό μέτρησή ρεύμα ρέει στο πρωτεύον του αισθητήρα και προκαλεί ρεύμα στο δευτερεύον ανάλογο του σύμφωνα με τον λόγο μετασχηματισμού. Στην έξοδο του δευτερεύοντος υπάρχει διακόπτης δύο σκελών όπου επιλέγει ποια αντίσταση θα είναι εντός του κυκλώματος. Το ρεύμα του δευτερεύοντος θα δημιουργήσει πάνω σε μια από τις δύο αντιστάσεις την τάση V_M . Το κύκλωμα δεξιά της V_M είναι ίδιο με αυτό της πλακέτας τάσης, όπου και πάλι χρησιμοποιούνται δύο τελεστικοί ενισχυτές για την μετατόπιση της τάσης στα δύο επιθυμητά εύρη.

2.2.2 Επιλογή Τιμών Αντιστάσεων.

Οι σχέσεις που περιγράφουν την λειτουργία του κυκλώματος είναι οι εξής:

$$V_M = 2 * I * \frac{N_P}{N_S} * R_{m1 \text{ ή } 2} \quad (2.10)$$

$$V_{oscl} = -\frac{R_{10}}{R_9} * V_M \quad (2.11)$$

$$V_{adc} = -\frac{R_8}{R_7} * V_M + V_{offsetI} * \left(1 + \frac{R_8}{R_7}\right) \quad (2.12)$$

$$V_{offsetI} = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}} * 12 \quad (2.13)$$

Με την αντίσταση $R_{m1} = 200 \Omega$ εντός κυκλώματος προκύπτει:

$$V_{Mmax,1} = 2 * 3.5 * \frac{1}{1000} * 200 = 1.4 V$$

$$V_{Mmin,1} = -2 * 3.5 * \frac{1}{1000} * 200 = -1.4 V$$

Ενώ με την αντίσταση $R_{m2} = 30 :$

$$V_{Mmax,2} = 2 * 25 * \frac{1}{1000} * 30 = 1.5 V$$

$$V_{Mmin,1} = -2 * 25 * \frac{1}{1000} * 30 = -1.5 V$$

Άρα στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θα θεωρηθεί:

$$V_{Mmax} = 1.5 V \quad (2.14)$$

$$V_{Mmin} = -1.5 V \quad 2.15$$

Θέλοντας και η V_{oscl} να βρίσκεται στο διάστημα $[-10,10] V$, προκύπτει από την (2.11) ότι:

$$\frac{R_{10}}{R_9} = 6.666$$

Όποτε επιλέχθηκε:

$$R_{10} = 6.65 k\Omega$$

$$R_3 = 1 k\Omega$$

Για την δεύτερη έξοδο τίθενται οι ίδιες απαιτήσεις με την πλακέτα τάσης ως προς το εύρος της τάσης, όποτε σύμφωνα με την (2.12) προκύπτουν οι εξής δύο περιορισμοί:

$$V_{offsetI} * \left(1 + \frac{R_8}{R_7}\right) = 1.65 V \quad (2.16)$$

$$0 \leq -\frac{R_8}{R_7} * V_M + 1.65 \leq 3.3 \quad (2.17)$$

Από τις (2.14), (2.15), (2.17) εξάγεται ότι:

$$\frac{R_8}{R_7} \leq 1.1$$

Όποτε για να διασφαλιστεί η (2.17) επιλέχθηκε:

$$R_8 = 3.16 \, k\Omega$$

Και:

$$R_7 = 3 \, k\Omega$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην (2.16) συνεπάγεται ότι:

$$V_{offset} = 0.8036 \, V$$

Όποτε με βάση την (2.13) επιλέχθηκε:

$$R_{11} = 18.7 \, k\Omega$$

Και:

$$R_{12} = 1.35 \, k\Omega$$

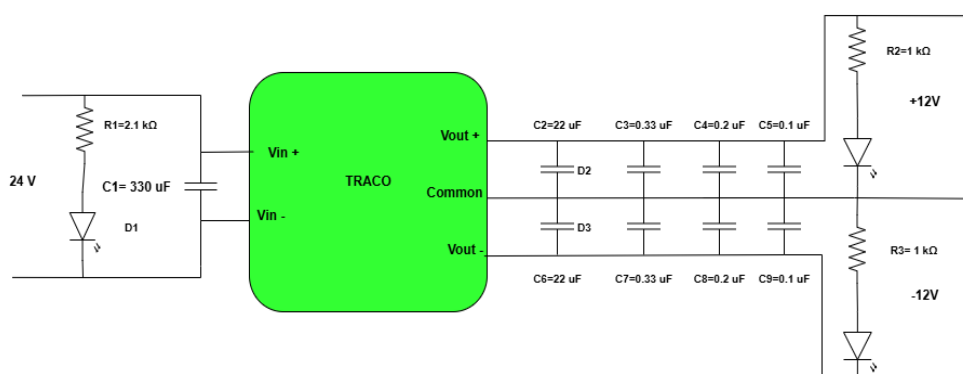
2.3 Πλακέτα Τροφοδοσίας

Για την τροφοδοσία των πλακετών μέτρησης είναι απαραίτητη ακόμα μια πλακέτα η οποία θα δημιουργεί τα δύο επίπεδα τάση που χρησιμοποιούνται ($\pm 12 \, V$). Για την πλακέτα αυτή επιλέχθηκε ο DC-DC μετατροπέας TMR 9-2422WI της εταιρίας TRACO POWER. Ο μετατροπέας αυτός προσφέρει δύο εξόδους στα επίπεδα τάσης που χρειάζονται στην συγκεκριμένη εφαρμογή ενώ προσφέρει και απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδων. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του καταγράφονται στον **Πίνακας 2.3** [17].

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική Τάση εισόδου	24 V
Εύρος Τάσης Εισόδου	9 – 24 V
Τάση 1 ^{ης} εξόδου	+12 V
Τάση 2 ^{ης} εξόδου	-12 V
Τάση απομόνωσης	1.6 kV
Ισχύς εξόδου	9 W

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά μετατροπέα DC-DC TMR 9-2422WI

Μεταξύ των δύο εξόδων του μετατροπέα και του επιπέδου αναφοράς επιλέχθηκε να τοποθετηθούν πυκνωτές αποσύζευξης (decoupling) έτσι ώστε το επίπεδο της τάσης να διατηρηθεί όσο το δυνατόν πιο σταθερό απορροφώντας τυχόν σήματα θορύβου που μπορεί να εμφανιστούν. Πιο συγκεκριμένα τοποθετήθηκε ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής $22\ \mu F$ για να αντιμετωπίσει τα σήματα θορύβου χαμηλής συχνότητας και τρεις μικρότεροι κεραμικοί με τιμές $0.33\ \mu F$, $0.2\ \mu F$ και $0.1\ \mu F$ για τα σήματα θορύβου υψηλής συχνότητας. Επίσης τοποθετήθηκε ένας μεγάλος πυκνωτής $330\ \mu F$ για την σταθεροποίηση της τάσης στην είσοδο του. Τέλος για την οπτική επιβεβαίωση της ύπαρξης τάσης τοποθετήθηκαν LEDs μεταξύ των τριών επιπέδων τάσης και του επιπέδου αναφοράς. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος τροφοδοσίας ακολουθεί στην **Εικόνα 2.1**.



Εικόνα 2.3: Σχηματικό Διάγραμμα Κυκλώματος τροφοδοσίας.

2.4 Σχεδίαση PCBs

2.4.1 Κανόνες Σχεδίασης

Για την σχεδίαση των πλακετών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Altium Designer Professional. Στο λογισμικό αυτό αρχικά σχεδιάζεται το σχηματικό διάγραμμα, όπου επιλέγονται και τα στοιχεία που θα τοποθετηθούν και στην συνέχεια γίνεται η σχεδίαση της πλακέτας με βάση το σχηματικό διάγραμμα. Για την σχεδίαση του PCB ακολουθήθηκαν οι παρακάτω γενικοί κανόνες.

- **Τοποθέτηση Πυκνωτών Παράκαμψης (Bypass)**

Σε κάθε στοιχείο το οποίο απαιτούσε μια από τις δύο τροφοδοσίες τοποθετήθηκε όσο πιο κοντά στην αντίστοιχη είσοδο ένας πυκνωτής χωρητικότητας $C = 100\ nF$ έτσι ώστε η τροφοδοσία του στοιχείου να είναι όσο το δυνατόν σταθερότερη και ανεπηρέαστη από θόρυβο. Παράλληλα σε περίπτωση που το στοιχείο απαιτήσει ένα

μεγάλο μεταβατικό ρεύμα αυτό θα προέλθει σε μεγάλο βαθμό από τον πυκνωτή αφήνοντας έτσι την τάση των υπόλοιπων στοιχείων ανεπηρέαστη από το φαινόμενο αυτό. Η παραπάνω επιλογή της χωρητικότητας αποτελεί μια λύση η οποία διασφαλίζει μια διαδρομή χαμηλής εμπέδησης για τον θόρυβο αλλά και ταχεία απόκριση στην περιγραφόμενη μεταβατική κατάσταση[18].

- **Χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων επιπέδων**

Στην παρούσα σχεδίαση έγινε η χρήση 4 επιπέδων. Η χρησιμοποίηση αριετών επιπέδων επιτρέπει την ένταξη κάποιων από αυτών για την μεταφορά της τροφοδοσίας και του επιπέδου αναφοράς. Αυτή η τακτική προστατεύει τα σήματα που βρίσκονται στα υπόλοιπα επίπεδα από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές διασφαλίζει την ποιότητα της τροφοδοσίας λόγω μείωσης της αντίστασης ενώ επιτρέπει την καλύτερη σχεδίαση των αγωγών των σημάτων.[19]

- **Αποφυγή Χρήσης γωνιών 90° στην σχεδίαση των αγωγών**

Μια ακόμη κοινή τακτική είναι η αποφυγή σχεδίασης αγωγών με ορθή γωνία και η σχεδίαση με γωνίες 45° αντί αυτού. Οι ορθές γωνίες μπορεί να είναι η αιτία αριετών προβλημάτων όπως η αντανακλάσεις σημάτων λόγω της ασυνέχειας της αντίστασης του αγωγού στα σημεία αυτά. Επίσης ανάλογα με το πάχος του αγωγού και την αντίσταση του μπορεί να παρατηρηθούν προβλήματα λόγω της αυξημένης χωρητικότητας στα σημεία αυτά. [20]

- **Επιλογή αντιστάσεων ακριβείας**

Σε εφαρμογές μετρήσεων όπως η συγκεκριμένη αλλά και γενικότερα σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αντιστάσεων ακριβείας οι τιμές των οποίων θα είναι όσο το δυνατόν κοντύτερα στις ονομαστικές. Η επιλογή αυτή θα διασφαλίζει την ακριβή τιμή τάσεων που προκύπτουν μέσω ωμικών διαιρετών, τα κέρδη κυκλωμάτων ενισχυτών αλλά και την συχνότητα αποκοπής φίλτρων. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις με ακρίβεια 1%. [18]

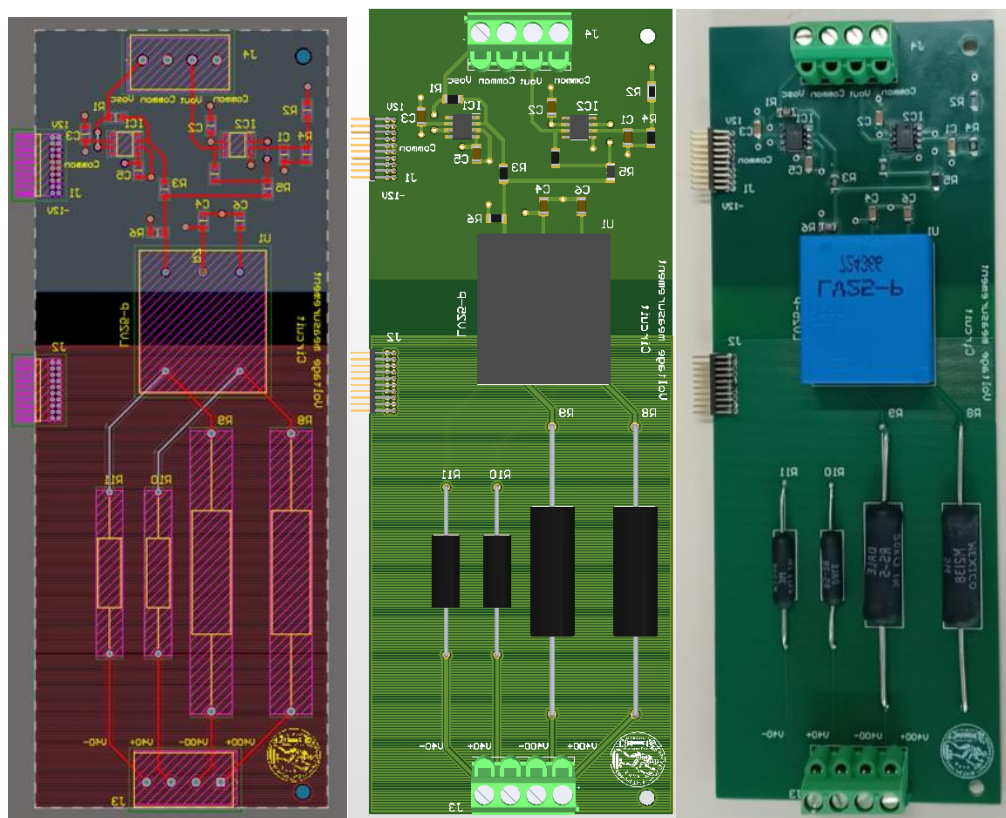
2.4.2 Σχεδίαση και Κόλληση Πλακετών

Μετά την σχεδίαση των πλακετών έγινε η παραγγελία τους όπως και η παραγγελία των υλικών για την κόλληση τους στο εργαστήριο. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία SMD μεγέθους 1206 έτσι ώστε να είναι σχετικά μικρά σε διαστάσεις αλλά να είναι και εύκολη η κόλληση τους. Σε ότι έχει να κάνει με τα επίπεδα στις πλακέτες τάσεως και ρεύματος : στο επιφανειακό τοποθετήθηκαν τα σήματα ,στο δεύτερο το επίπεδο αναφοράς και στα δύο επόμενα η θετική

και αρνητική τροφοδοσία αντίστοιχα. Πέρα από τις τρεις πλακέτες που περιεγραφήκανε προηγουμένως, σχεδιάστηκε ακόμη μια για την διανομή της τροφοδοσίας και την στήριξη τους. Η πλακέτα αυτή όπως και οι υπόλοιπες περιγράφονται περαιτέρω στην συνέχεια.

- **Πλακέτα Μέτρησης Τάσης**

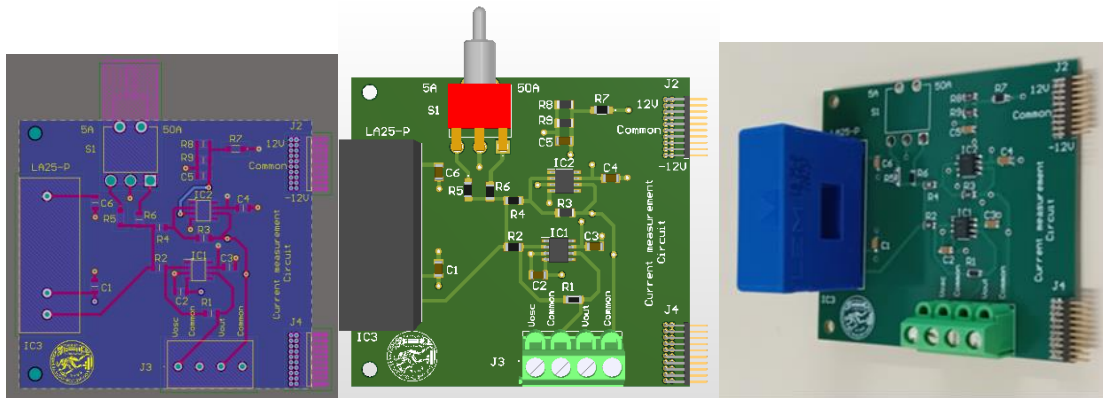
Για την σύνδεση των εισόδων και των εξόδων της πλακέτας επιλέχθηκαν κλέμμες τεσσάρων υποδοχών ενώ για την τροφοδοσία συνδετήρες ακίδων. Για την καλύτερη στήριξη της πλακέτας τοποθετήθηκε ακόμη ένα όμοιο στοιχείο, το οποίο δεν μεταφέρει κανένα σήμα. Στην **Εικόνα 2.4** απεικονίζεται η διάταξη στο περιβάλλον Altium αλλά και το τελικό αποτέλεσμα μετά τις κολλήσεις των στοιχείων.



Εικόνα 2.4 : Πλακέτα μέτρησης τάσης: 2-D διάταξη στο περιβάλλον Altium (Αριστερά), 3-D Layout (Κέντρο), Τελικό αποτέλεσμα (Δεξιά).

- **Πλακέτα Μέτρησης Ρεύματος**

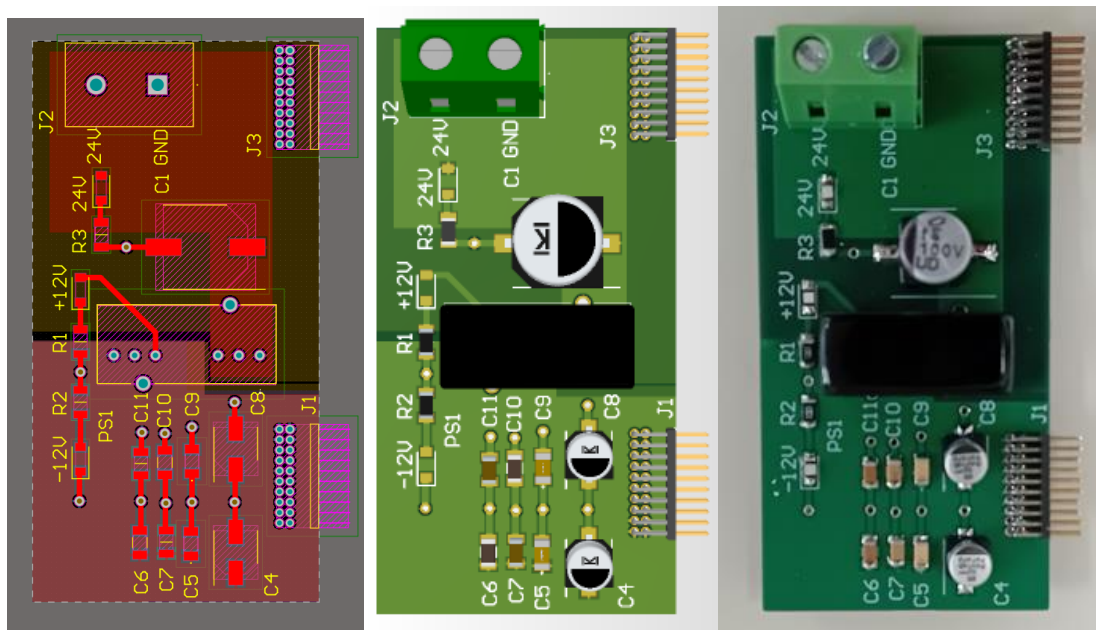
Για την σύνδεση των εισόδων και των εξόδων χρησιμοποιήθηκαν και πάλι κλέμμες 4 εισόδων ,ενώ για την τροφοδοσία και τη στήριξη προφανώς, ο ίδιος συνδετήρας ακίδων με την πλακέτα της τάσης, για να υπάρχει συμβατότητα με την πλακέτα τροφοδοσίας. Για την επιλογή τέλος του εύρους μέτρησης επιλέχθηκε διακόπτης ON-OFF-ON. Στην **Εικόνα 2.5** απεικονίζεται η διάταξη στο περιβάλλον Altium και η πλακέτα μετά την κόλληση των στοιχείων, δίχως όμως τον διακόπτη ο οποίος θα προστεθεί στην συνέχεια μέσω καλωδίων στις υποδοχές της πλακέτας.



Εικόνα 2.5: Πλακέτα μέτρησης ρεύματος: 2-D Layout στο περιβάλλον Altium (Αριστερά), 3-D Layout (Κέντρο), Τελικό αποτέλεσμα (Δεξιά).

- Πλακέτα Τροφοδοσίας

Η πλακέτα τροφοδοσίας διαθέτει μια κλέμμα δύο εισόδων για την τροφοδοσία της και δύο συνδετήρες ακίδων, ο πρώτος για την τροφοδοσία και το δεύτερος για στήριξη. Ακολουθούν οι αντίστοιχες απεικονίσεις με προηγουμένως στην **Εικόνα 2.6**.

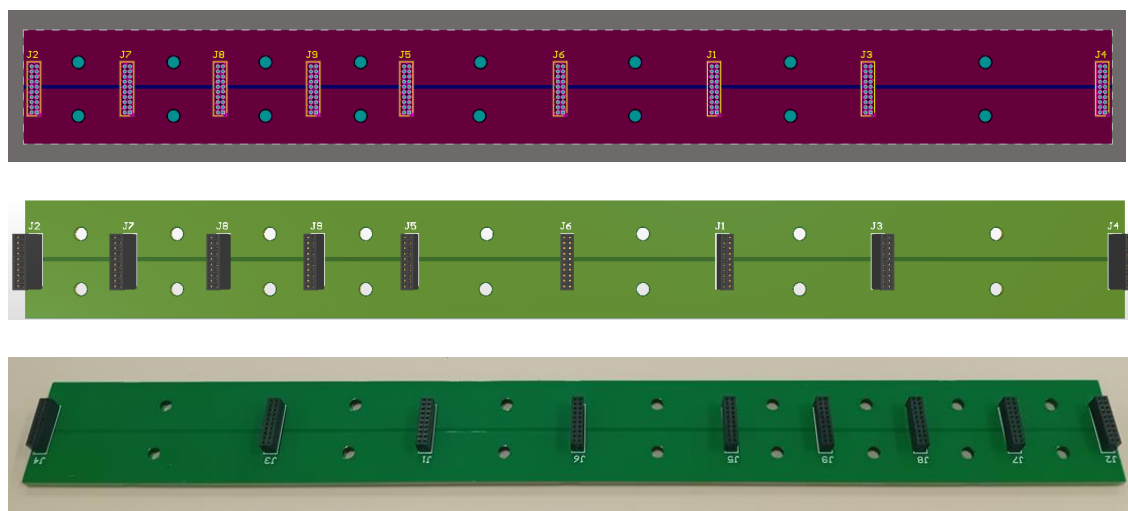


Εικόνα 2.6: Πλακέτα τροφοδοσίας: 2-D Layout στο περιβάλλον Altium (Αριστερά), 3-D Layout (Κέντρο), Τελικό αποτέλεσμα (Δεξιά).

- Πλακέτα Διανομής Τροφοδοσίας-Στήριξης

Η πλακέτα αυτή είναι δύο επιπέδων: το επιφανειακό επίπεδο έχει μοιραστεί στην μέση και μεταφέρει την θετική και την αρνητική τροφοδοσία, ενώ το δεύτερο επίπεδο χρησιμοποιείται για το επίπεδο αναφοράς των πλακετών. Πάνω του έχουν κολληθεί οι αντίστοιχοι θηλυκοί συνδετήρες ακίδων αυτών που τοποθετήθηκαν στις πλακέτες μέτρησης και τροφοδοσίας. Για

στήριξη χρησιμοποιούνται οι ίδιες πλακέτες, χωρίς όμως να μεταφέρουν κάποιο σήμα. Η σχεδίαση στο περιβάλλον Altium και το τελικό αποτέλεσμα απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.7**.

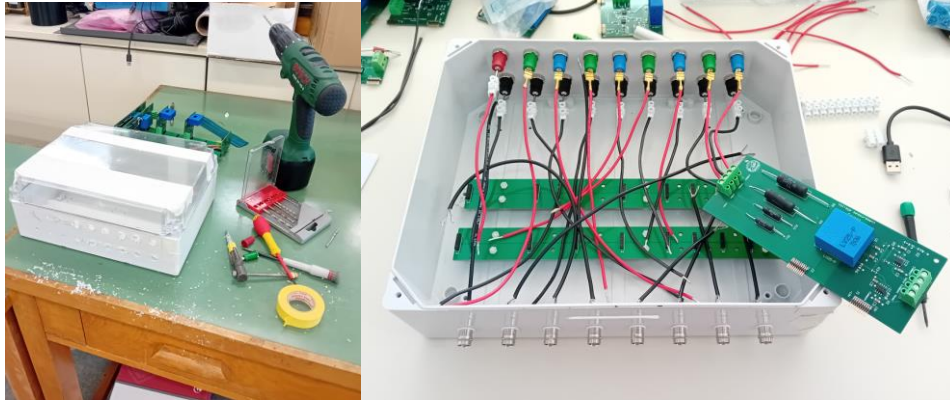


Εικόνα 2.7: Πλακέτα διανομής τροφοδοσίας-στήριξης: 2-D Layout στο περιβάλλον Altium (Επάνω), 3-D Layout (Μέση), Τελικό αποτέλεσμα (Κάτω).

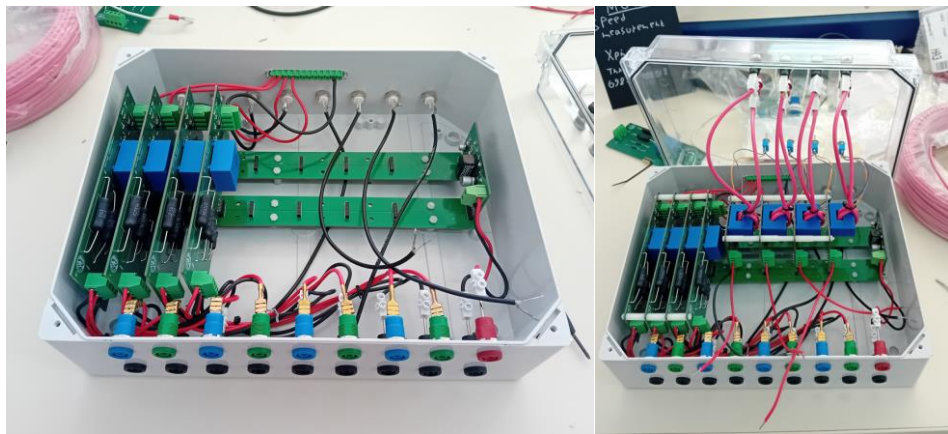
2.5 Σύνθεση Μετρητικού Συστήματος

Για λόγους ευχρηστίας αποφασίστηκε η ενσωμάτωση των παραπάνω πλακετών σε ένα ενιαίο σύστημα, το οποίο θα θεωρείται από τον χρήστη ως μαύρο κουτί έχοντας πρόσβαση μόνο στις εισόδους και τις εξόδους του. Τέσσερις κάρτες ρεύματος και τέσσερις τάσης ενσωματώθηκαν μαζί με μία πλακέτα τροφοδοσίας σε ένα πλαστικό κουτί κατάλληλο για ηλεκτρολογικές διατάξεις. Αρχικά βιδώθηκαν δύο πλακέτες διανομής στον πάτο του κουτιού και έπειτα συνδέθηκαν οι κάρτες μέσω των Pin headers κάθετα με αυτές. Για την σταθερότητα της διάταξης οι κάρτες ενώθηκαν μεταξύ τους μέσω αποστατων κατάλληλων μηκών. Στη συνέχεια στη μια πλευρά του συνδέθηκαν οι εισοδοί των πλακετών τάσης, δύο για κάθε πλακέτα: μια για το χαμηλό εύρος τάσης και μία για το διευρυμένο. Για την σύνδεση χρησιμοποιήθηκαν μπόρνες οι οποίες μέσω καλωδίων συνδέθηκαν με τις κλέμμες των καρτών. Στο καπάκι του τοποθετήθηκαν οι εισοδοί των καρτών ρεύματος, μια για κάθε κάρτα όπως και οι αντίστοιχοι διακόπτες για την επιλογή του εύρους μέτρησης. Η σύνδεση έγινε πάλι με μπόρνες ενώ χρησιμοποιήθηκε καλώδιο 6 mm ώστε να μπορεί να μεταφέρει το μέγιστο μετρούμενο ρεύμα δίχως να καταπονηθεί θερμικά. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως γίνανε δύο περιελίξεις στον αισθητήρα ρεύματος. Στην απέναντι πλευρά από αυτή της εισόδου των τάσεων τοποθετήθηκαν οι εξοδοί των μετρητικών πλακετών. Για τις εξόδους στο εύρος $[-10, 10]\text{V}$ τοποθετήθηκαν BNC ακροδέκτες οι οποίοι συνδέθηκαν στις κλέμμες των πλακετών με μικροφωνικό καλώδιο ώστε να περιοριστεί όσο το δυνατόν ο εισερχόμενος

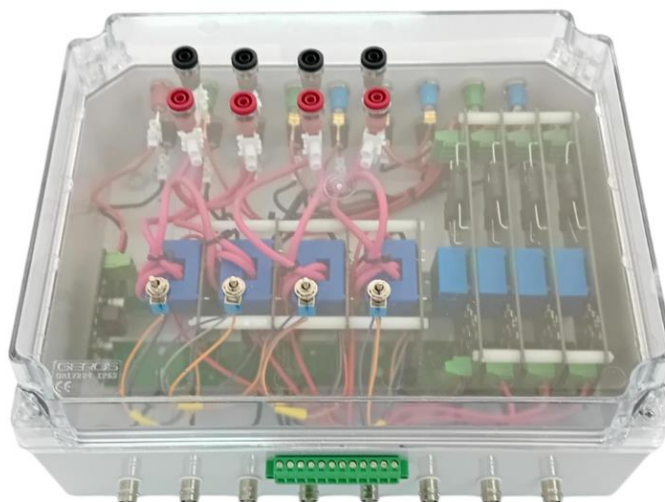
θόρυβος. Για τις εξόδους στο εύρος $[-3.3, 3.3]V$ προσαρμόστηκε στο κουτί μια κλέμμα 12 θέσεων 8 από τις οποίες αντιστοιχούν στις εξόδους των πλακετών, 2 στο κοινό επίπεδο αναφοράς και 2 μέινανε ασύνδετες. Στις **Εικόνες 2.8** και **2.9** απεικονίζονται κάποια στάδια της διαδικασίας σύνθεσης του συστήματος ενώ στην **Εικόνα 2.10** το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 2.8: Διαδικασία σύνθεσης μετρητικού συστήματος (1)



Εικόνα 2.9: Διαδικασία σύνθεσης μετρητικού συστήματος(2).



Εικόνα 2.10: Αποτέλεσμα κατασκευής Μετρητικού συστήματος.

3 Βαθμονόμηση Πλακετών

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του μετρητικού συστήματος και την επιβεβαίωση ότι οι εξοδοί του βρίσκονται εντός του προκαθορισμένου εύρους τάσεων, το επόμενο στάδιο είναι η βαθμονόμηση κάθε επιμέρους πλακέτας. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στον προσδιορισμό των μαθηματικών συναρτήσεων που, λαμβάνοντας ως είσοδο τις τάσεις εξόδου των πλακετών, θα υπολογίζουν την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η βαθμονόμηση θα πραγματοποιηθεί εφαρμόζοντας συνεχείς τιμές τάσης και ρεύματος στις εισόδους του συστήματος, καλύπτοντας ολόκληρο το εύρος μέτρησης, ενώ παράλληλα θα καταγράφονται οι αντίστοιχες τάσεις εξόδου. Τα ζεύγη εισόδου–εξόδου που θα προκύψουν θα αποτελέσουν το σύνολο δεδομένων για την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, μέσω της οποίας θα υπολογιστούν οι συντελεστές των πολυωνυμικών συναρτήσεων προσέγγισης. Αν και βάσει της γραμμικής σχέσης που έχει υλοποιηθεί, αναμένεται η προσέγγιση να αποδοθεί επαρκώς με πολυώνυμο πρώτου βαθμού, θα πραγματοποιηθεί και υπολογισμός των συντελεστών πολυωνύμου δευτέρου βαθμού, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των δύο προσεγγίσεων.

3.1 Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων

3.1.1 Γενικά

Ως ανάλυση παλινδρόμησης ορίζεται η διαδικασία εύρεσης μιας συνάρτησης η οποία θα προσεγγίζει μια σειρά από δεδομένα μετρήσεων. Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές που εφαρμόζεται σε μια ανάλυση παλινδρόμησης είναι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Η μέθοδος είναι μια στατιστική τεχνική η οποία δουλεύει με τρόπο ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων να είναι ελάχιστο. Ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ των πραγματικών τιμών των μετρήσεων και των τιμών που προβλέπει η προκύπτουσα συνάρτηση του μοντέλου. Η διαδικασία περιλαμβάνει την επιλογή ενός τύπου συνάρτησης με άγνωστους συντελεστές, και την εύρεση των τιμών αυτών μέσω ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των σφαλμάτων :

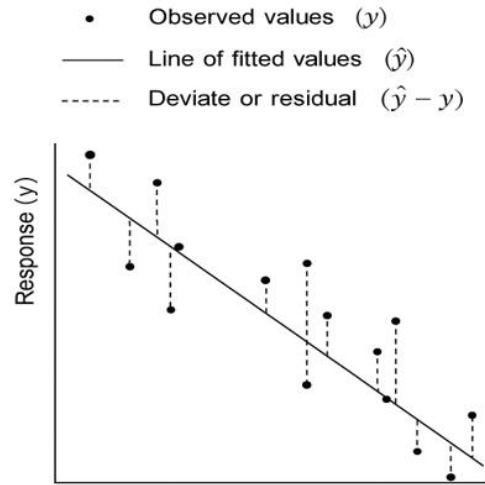
$$E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.1)$$

Όπου:

y_i : οι πειραματικά μετρούμενες τιμές

$\hat{y}_i = f(x_i)$: οι τιμές που προκύπτουν από την συνάρτηση προσέγγισης

Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και εφαρμόζεται για την εύρεση γραμμικών και μη σχέσεων για δεδομένα που περιέχουν πειραματικό θόρυβο, παρέχοντας μια βέλτιστη κατά μέση τετραγωνική έννοια προσέγγιση.



Εικόνα 3.1: Περιγραφική Απεικόνιση Γραμμικής Προσέγγισης

3.1.2 Περίπτωση Γραμμικής προσέγγισης

Η απλούστερη περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου είναι αυτή όπου η ζητούμενη συνάρτηση είναι ένα πολυώνυμο πρώτου βαθμού:

$$\hat{y} = f(x) = a * x + b \quad (3.2)$$

Όποτε:

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a * x_i + b)]^2$$

Οι αναγκαίες συνθήκες για να ελαχιστοποιείται η παραπάνω συνάρτηση δύο μεταβλητών είναι οι εξής:

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad (3.3)$$

Και

$$\frac{\partial E}{\partial b} = 0 \quad (3.4)$$

Από όπου εξάγεται:

$$-2 * \sum_{i=1}^n y_i - (a * x_i + b) * x_i = 0 \quad (3.5)$$

Και

$$-2 * \sum_{i=1}^n y_i - (a * x_i + b) = 0 \quad (3.6)$$

Αναδιατάσσοντας τους όρους προκύπτει:

$$a * \sum_{i=1}^n x_i^2 + b * \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i * y_i \quad (3.7)$$

Και

$$a * \sum_{i=1}^n x_i + b * \sum_{i=1}^n x_i^0 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.8)$$

Οι δύο παραπάνω σχέσεις αποτελούν ένα σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους το οποίο λύνεται εύκολα και προκύπτει:

$$a = \frac{(n * \sum_{i=1}^n x_i * y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i) * (\sum_{i=1}^n y_i)}{(n * \sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.9)$$

Και

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2) * (\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i * y_i) * (\sum_{i=1}^n x_i)}{(n * \sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.10)$$

3.2 Βαθμονόμηση Πλακετών Τάσης

Στην βαθμονόμηση των πλακετών τάσης για λόγους απλότητας συνδέθηκε η τάση εισόδου παράλληλά στις εισόδους των τεσσάρων πλακετών τάσης και έτσι λήφθηκαν οι μετρήσεις από όλες τις πλακέτες ταυτόχρονα. Οι μετρήσεις των εξόδων παλμογράφου γίνανε με τον παλμογράφο RIGOL DS1074Z ενώ των άλλων εξόδων ([0,3.3 V]) μέσω των ADCs του FPGA Arty z7-10 της εταιρίας Digilent. Περισσότερα για το υπολογιστικό σύστημα αυτό και την διαμόρφωση του κώδικα θα ακολουθήσουν στο επόμενο κεφάλαιο. Στην παρούσα εφαρμογή υλοποιήθηκε ένας απλός κώδικας στο περιβάλλον Vitis ο οποίος έπαιρνε μετρήσεις από τα τέσσερα πρώτα κανάλια του ADC: A0,A1,A2,A3, στα οποία είχαν συνδεθεί οι έξοδοι των πλακετών τάσης: V0,V1,V2,V3 αντίστοιχα. Ο κώδικας διαμορφώθηκε έτσι ώστε να παίρνει 15 συνεχόμενες μετρήσεις από κάθε κανάλι σε διάστημα **40 us**. Η τάση εισόδου μετρήθηκε με το διακριβωμένο πολύμετρο FLUKE 289, το οποίο έχει μέγιστη τάση μέτρησης τα 1000 V ώστε η τιμή της να είναι όσο πιο ακριβής γίνεται. Για την διαδικασία της βαθμονόμησης, για κάθε βήμα τάσης εισόδου υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων της εξόδου και έπειτα τα τελικά δεδομένα δοθήκαν ως είσοδοι στην συνάρτηση polyfit της

MATLAB με σκοπό να εξαχθούν οι παράμετροι της συνάρτησης προσέγγισης. Η βασική μορφή κλίσης της συνάρτησης είναι η εξής:

$$p = \text{polyfit}(x, y, n)$$

όπου:

x: τα σημεία μέτρησης των δεδομένων

y: τα μετρούμενα δεδομένα

n: ο βαθμός του πολωνύμου προσέγγισης

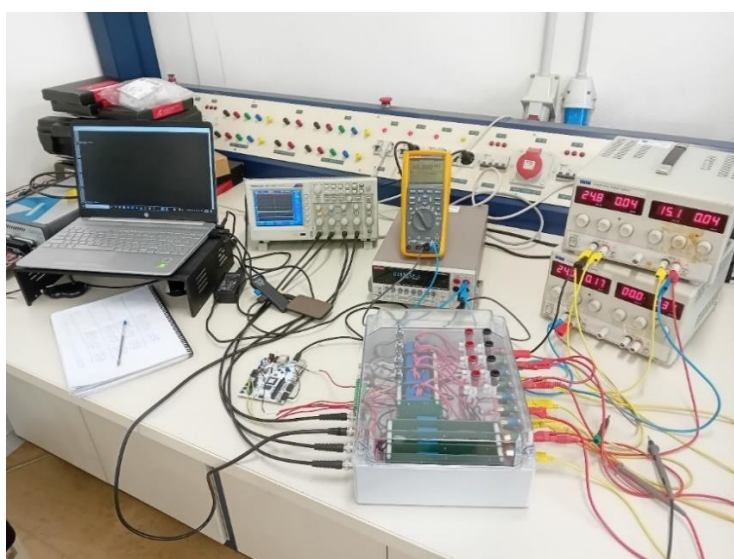
p: οι συντελεστές του πολωνύμου προσέγγισης

Για κάθε πλακέτα και συνδυασμό εισόδων εξόδων υπολογίστηκε μια συνάρτηση πρώτου βαθμού και μια δευτέρου, παρακάτω παρατίθενται οι συναρτήσεις και οι γραφικές τους παραστάσεις. Για κάθε μια από τις δύο προσεγγίσεις υπολογίστηκε και ένας δείκτης σφάλματος ο οποίος ορίστηκε ως εξής

$$\text{Sum of Absolute Errors} = \text{SAE} = \sum_{i=1}^n |y_i - f(x_i)|$$

3.2.1 Είσοδος στο Εύρος [-40 , 40] V_{rms}

Για την βαθμονόμηση στο εύρος αυτό χρησιμοποιήθηκε συνεχής τάση προερχόμενη από δύο κλασσικά εργαστηριακά τροφοδοτικά συνδεδεμένα σε σειρά. Η τάση μεταβλήθηκε με βήμα 4 V από την τιμή -56 V έως την τιμή 56 V και καταγράφηκε η τάση στις δύο εξόδους κάθε πλακέτας όπως περιεγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 3.2: Διαδικασία Βαθμονόμησης πλακετών τάσης στο εύρος τάσης εισόδου [-40 - 40] V_{rms}.

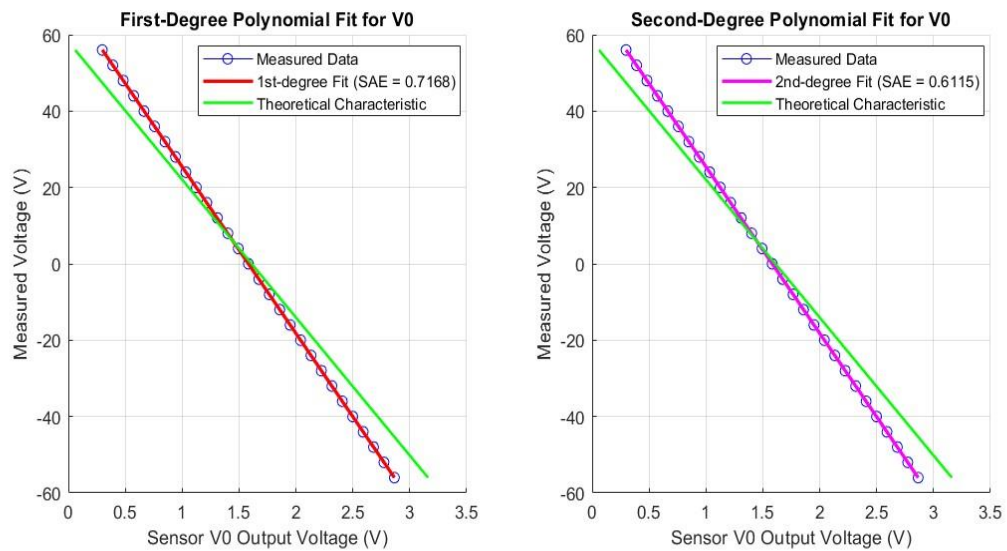
Στον **Πίνακα 2.1** που ακολουθεί απεικονίζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για την πλακέτα V0. Για την μέτρηση στο εύρος **[0-3.3]** απεικονίζεται και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων για κάθε τάση εισόδου. Στην **Εικόνα 3.3** απεικονίζονται οι συναρτήσεις προσέγγισης για το εύρος εισόδου $[0, 3.3]V$ ενώ στην **Εικόνα 3.4** για το εύρος εισόδου $[-10, 10]V$

- Πλακέτα V0

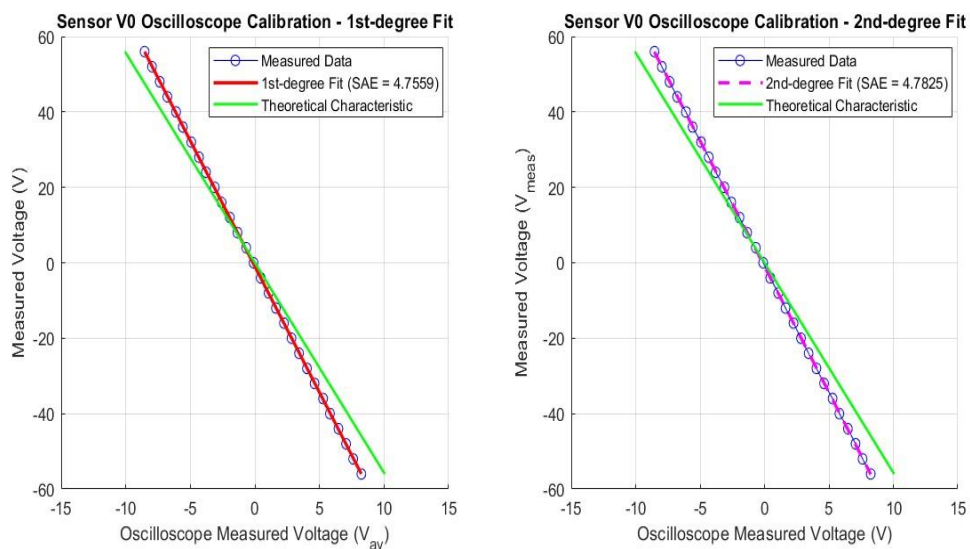
Τάση Εισόδου (V)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-56	2.864961267	0.001140716	8.24
-52	2.773209667	0.001095958	7.61
-48	2.6814278	0.001321169	7.06
-44	2.590320667	0.001058282	6.47
-40	2.498418	0.001029558	5.81
-36	2.407119467	0.000740375	5.28
-32	2.315679933	0.001143138	4.62
-28	2.223398	0.000737351	4.03
-24	2.132058933	0.000916201	3.42
-20	2.040387733	0.000629164	2.83
-16	1.9487234	0.000856494	2.25
-12	1.8569682	0.000592392	1.63
-8	1.7655792	0.001502033	1.06
-4	1.673616	0.001061191	0.445
0	1.581954933	0.000698789	-0.103
4	1.4929135	0.000713311	-0.677
8	1.40154	0.000863123	-1.35
12	1.3091404	0.000933276	-1.94
16	1.216213667	0.000631701	-2.58
20	1.124340933	0.001068794	-3.11
24	1.032438333	0.001521518	-3.79
28	0.941253933	0.001020843	-4.33
32	0.849206867	0.000624767	-4.93
36	0.757334267	0.001200055	-5.58

40	0.664491467	0.001599045	-6.1
44	0.5736428	0.000516201	-6.78
48	0.481810667	0.000742451	-7.37
52	0.390246867	0.001019299	-7.97
56	0.298216533	0.00101922	-8.54

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα μετρήσεων πλακέτας V0 για την τάση εισόδου στο εύρος [-40 , 40] V_{rms} .



Εικόνα 3.3: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα V0 στο εύρος εξόδου [0 , 3.3] V με τάση εισόδου στο εύρος [-40 , 40] V_{rms} .



Εικόνα 3.4: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα V0 στο εύρος εξόδου [-10 , 10] V με τάση εισόδου στο εύρος [-40 , 40] V_{rms} .

Οι συναρτήσεις που προκύπτουν για τις δύο προσεγγίσεις είναι οι εξής:

Πρώτου Βαθμού στο εύρος [0-3.3]. :

$$f_1(x) = -43.645x + 69.0594$$

Δευτέρου Βαθμού στο εύρος [0-3.3]:

$$g_1(x) = -0.0399x^2 - 43.645x + 69.0594$$

Πρώτου Βαθμού στο εύρος [-10-10]. :

$$h_1(x) = -6.6716x - 1.0111$$

Δευτέρου Βαθμού στο εύρος [-10-10]. :

$$q_1(x) = -0.0019x^2 - 6.6722x - 0.9624$$

3.2.2 Είσοδος στο Εύρος [-400 , 400] Vrms

Για την βαθμονόμηση στο εύρος αυτό χρησιμοποιήθηκε συνεχής τάση προερχόμενη από δύο τροφοδοτικά του εργαστηρίου Ηλεκτρικών μηχανών. Το πρώτο είναι το μοντέλο MX30 της California Instruments με μέγιστη τάση εξόδου 400 V ενώ το δεύτερο είναι το MAGNA TSD 1000-20 με μέγιστη τάση εξόδου 1000 V. Για την βαθμονόμηση μεταβλήθηκε η τάση με βήμα 40 V από την τιμή -560 V έως την τιμή 560 V και καταγράφηκε η τάση στις δύο εξόδους κάθε κάρτας όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Μέχρι τα 400 V έγινε χρήση του πρώτου τροφοδοτικού λόγω της πιο εύκολης σταθεροποίησης της τάσης ενώ από αυτή την τιμή και έπειτα του δεύτερου. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην **Εικόνα 3.5**.



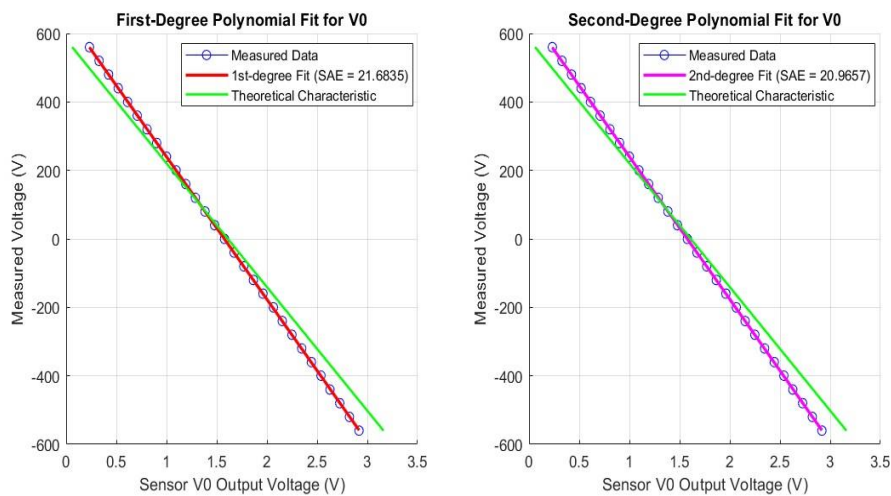
Εικόνα 3.5: Διαδικασία Βαθμονόμησης πλακετών τάσης στο εύρος τάσης εισόδου [- 400 , 400] Vrms .

Σημειώνεται ότι ανεξαρτήτως της πηγής τροφοδοσίας η τιμή της τάσης που χρησιμοποιείται είναι αυτή που μετρήθηκε με το διακριβωμένο πολύμετρο. Στον **Πίνακα 3.2** απεικονίζονται τα δεδομένα των μετρήσεων για την πλακέτα V0. Για την μέτρηση στο εύρος **[0 , 3.3] V** απεικονίζεται και πάλι η τυπική απόκλιση των μετρήσεων για κάθε τάση εισόδου. Στην **Εικόνα 3.6** απεικονίζονται οι συναρτήσεις προσέγγισης για το εύρος εισόδου **[0,3.3]V** ενώ στην **Εικόνα 3.7** για το εύρος εισόδου **[-10,10]V**

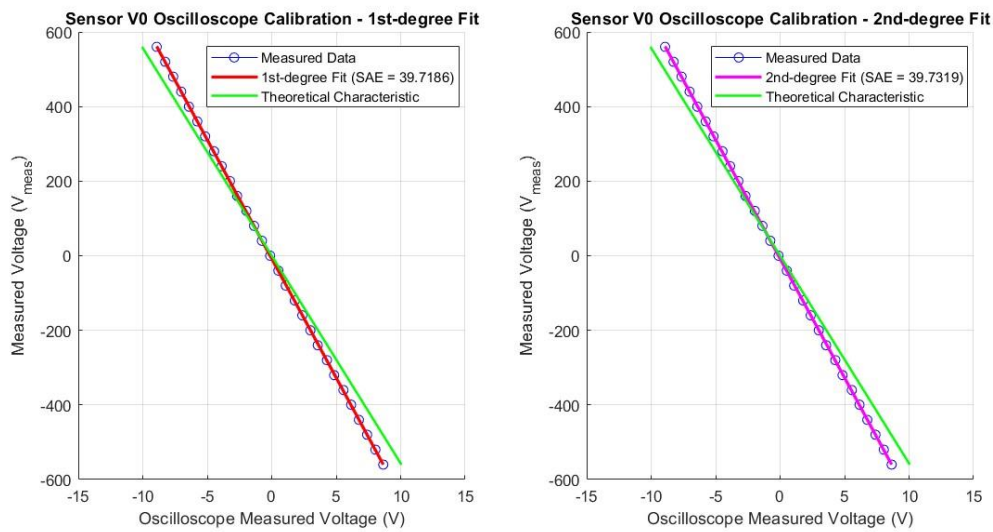
Τάση Εισόδου (V)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-560	2.917037667	0.001549194	8.65
-520	2.8216	0.002503734	8.04
-480	2.724947133	0.000599216	7.4
-440	2.627025533	0.002451299	6.76
-399.52	2.5381808	0.004034596	6.16
-360.06	2.442863867	0.001466488	5.56
-320.08	2.3461172	0.001398356	4.84
-280	2.249111933	0.001494395	4.28
-240.03	2.152224267	0.00155054	3.57
-200.06	2.0641952	0.00256731	3
-160	1.960281333	0.002522687	2.37
-120.02	1.8645046	0.002585476	1.79
-80.05	1.769449667	0.003082955	1.09
-40	1.672820467	0.001520375	0.519
0	1.576761733	0.000816815	-0.122
40.031	1.478453933	0.002147852	-0.76
80.01	1.382878667	0.00198315	-1.37
120.09	1.2865684	0.001545092	-1.96
160.06	1.1915636	0.001000795	-2.68
200	1.094897467	0.00203899	-3.24
240.07	0.998724733	0.001452037	-3.88
280.05	0.901756267	0.001630704	-4.47
320.01	0.805429067	0.001207469	-5.16

360.07	0.707984133	0.001057509	-5.77
399.75	0.612254267	0.003672063	-6.42
440.04	0.518236667	0.000986571	-7.02
480	0.422973533	0.001457348	-7.64
520	0.327599733	0.001337834	-8.26
560	0.2320314	0.001253325	-8.92

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα μετρήσεων πλακέτας V0 για την τάση εισόδου στο εύρος $[-400, 400] V_{rms}$.



Εικόνα 3.6: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα V0 στο εύρος εξόδου $[0, 3.3] V$ με τάση εισόδου στο εύρος $[-400, 400] V_{rms}$.



Εικόνα 3.7: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα V0 στο εύρος εξόδου $[-10, 10] V$ με τάση εισόδου στο εύρος $[-400, 400] V_{rms}$.

Οι συναρτήσεις που προκύπτουν για τις δύο προσεγγίσεις είναι οι εξής :

Πρώτου Βαθμού στο εύρος [0-3.3]. :

$$f_1(x) = -416.3775 + 656.0004$$

Δευτέρου Βαθμού στο εύρος [0-3.3]:

$$g_1(x) = -0.6186x^2 - 414.4297x + 654.8668$$

Πρώτου Βαθμού στο εύρος [-10-10]. :

$$h_1(x) = -63.8065x - 8.0054$$

Δευτέρου Βαθμού στο εύρος [-10-10]. :

$$q_1(x) = -0.0018x^2 - 63.8061x - 8.0548$$

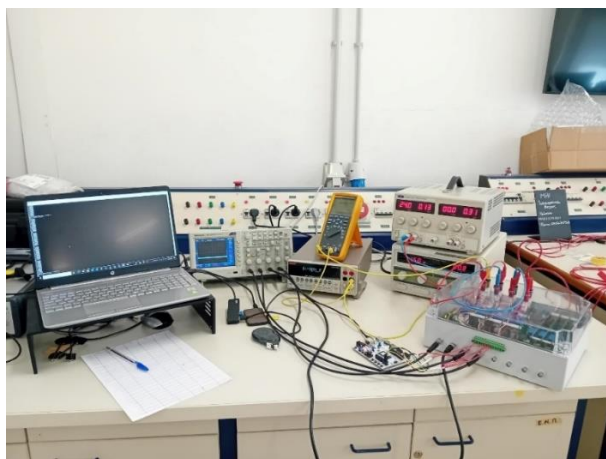
3.3 Βαθμονόμηση Πλακετών Ρεύματος

Στην βαθμονόμηση των πλακετών ρεύματος συνδεθήκαν οι τέσσερις εισοδοί σε σειρά και τροφοδοτήθηκαν όλες με το ίδιο ρεύμα, όποτε ληφθήκαν οι τέσσερις μετρήσεις ταυτόχρονα. Οι μετρήσεις της εξόδου παλμογράφου γίνανε και πάλι με τον παλμογράφο RIGOL DS1074Z, ενώ της άλλης εξόδου όπως και στις πλακέτες τάσης μέσω των ADCs του FPGA Arty z7-10. Στην παρούσα εφαρμογή τροποποιήθηκε ο προηγούμενος κώδικας ώστε να παίρνει μετρήσεις από τα τέσσερα τελευταία κανάλια του ADC: A2,A3,A4,A5, στα οποία είχαν συνδεθεί οι εξοδοί των πλακετών ρεύματος: I0,I1,I2,I3 αντίστοιχα. Ο κώδικας όπως και πριν παίρνει 15 συνεχόμενες μετρήσεις από κάθε κανάλι σε διάστημα **40 μ s**. Το ρεύμα εισόδου μετρήθηκε με το διακριβωμένο πολύμετρο FLUKE 289 έως τα **9 A**, καθώς έχει μέγιστο ρεύμα μέτρησης τα **10 A**, ενώ έπειτα εμπιστευτήκαμε την τιμή μέτρησης του αντίστοιχου οργάνου. Στην διαδικασία της βαθμονόμησης για κάθε βήμα ρεύματος εισόδου υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων και έπειτα τα τελικά δεδομένα δοθήκαν ως εισοδοί στην συνάρτηση polyfit της MATLAB. Όπως και προηγουμένως απεικονίζονται οι δύο συναρτήσεις και ο δείκτης SAE.

3.3.1 Είσοδος στο Εύρος [-3.5 , 3.5] A

Για την βαθμονόμηση στο εύρος αυτό χρησιμοποιήθηκε συνεχές ρεύμα προερχόμενο από ένα εργαστηριακό τροφοδοτικό με μέγιστο ρεύμα εξόδου τα **10A** και μεταβλήθηκε το ρεύμα με βήμα **0.25 A** από την ελάχιστη έως την μέγιστη τιμή ,ενώ παράλληλα καταγράφηκε η τάση

στις δύο εξόδους κάθε κάρτας , όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Σημειώνεται ότι ο αισθητήρας αντιλαμβάνεται το διπλάσιο του ρεύματος εισόδου λόγω των δύο περιελίξεων κάτι το οποίο έχει συνυπολογιστεί στην σχεδίαση όποτε οι συναρτήσεις εξάγονται θεωρώντας ως είσοδο το πραγματικό ρεύμα υπό μέτρηση. Στην **Εικόνα 3.8** απεικονίζεται η πειραματική διάταξη βαθμονόμησης και στον **Πίνακας 3.3** τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επίσης στην **Εικόνα 3.9** απεικονίζονται οι συναρτήσεις προσέγγισης για την έξοδο στο εύρος $[0, 3.3]V$ ενώ στην **Εικόνα 3.10** αυτές για την έξοδο στο εύρος $[-10, 10]V$.



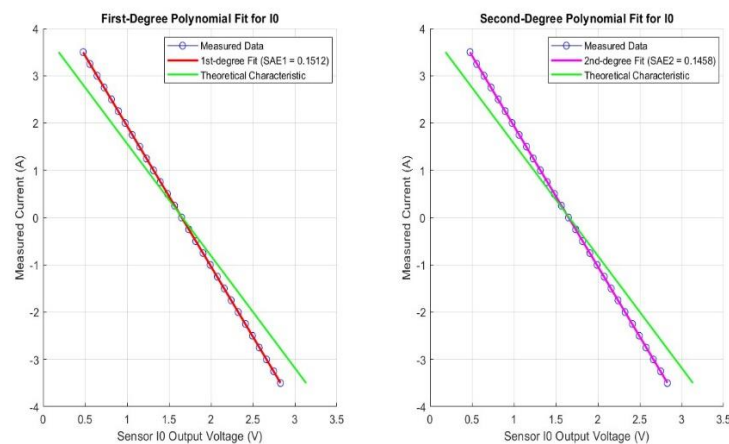
Εικόνα 3.8 : Διαδικασία Βαθμονόμησης πλακετών ρεύματος στο εύρος ρεύματος εισόδου $[-3.5, 3.5]A$.

- Πλακέτα I0

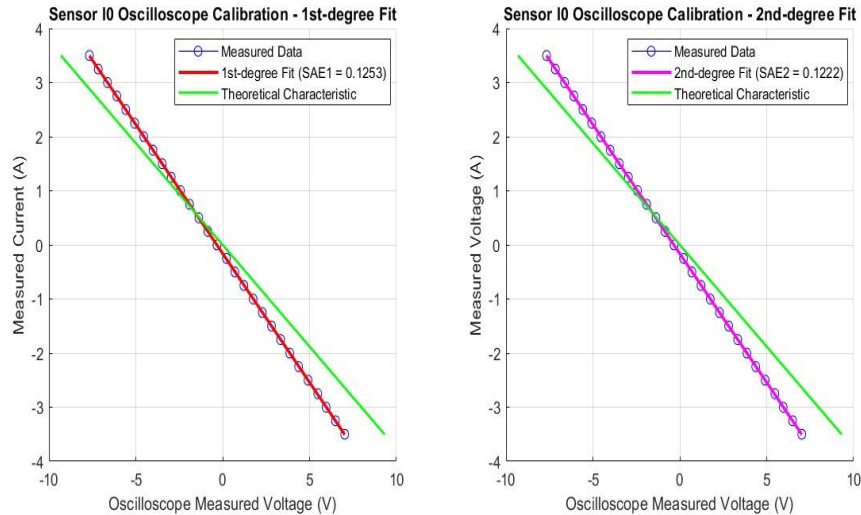
Ρεύμα Εισόδου (A)	Μέση τιμή Εξόδου $[0, 3.3]V$	Τυπική Απόκλιση Εξόδου $[0, 3.3]V$	Τιμή Εξόδου $[-10, 10] V$
-3.5	2.8281326	0.001501187	7.02
-3.25	2.747519267	0.00078832	6.49
-3	2.661356667	0.000793558	5.95
-2.75	2.5746874	0.001150046	5.47
-2.5	2.494543933	0.00094031	4.91
-2.25	2.412050667	0.002420524	4.37
-2	2.324481733	0.000858889	3.86
-1.75	2.240175733	0.001459659	3.33
-1.5	2.158558533	0.00128964	2.81
-1.25	2.076108867	0.001174801	2.28
-1	1.9903362	0.000680737	1.75

-0.75	1.905076533	0.001046558	1.22
-0.5	1.817655267	0.001288405	0.699
-0.25	1.735907267	0.001035913	0.217
0	1.649342	0.000762803	-0.331
0.25	1.566164	0.000962201	-0.853
0.5	1.482029133	0.0007984	-1.37
0.75	1.395702267	0.000987526	-1.91
1	1.3144274	0.000898317	-2.43
1.25	1.230064333	0.000678501	-2.96
1.5	1.150048467	0.000839107	-3.48
1.75	1.061348267	0.000991265	-4.01
2	0.977750667	0.00101831	-4.54
2.25	0.896338067	0.001243249	-5.07
2.5	0.8139154	0.001421659	-5.58
2.75	0.727293067	0.000405304	-6.09
3	0.642762067	0.00105655	-6.63
3.25	0.556321067	0.00094693	-7.16
3.5	0.4769666	0.001172022	-7.67

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα μετρήσεων πλακέτας I0 για το ρεύμα εισόδου στο εύρος [-3.5 , 3.5] A .



Εικόνα 3.9: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα I0 στο εύρος εξόδου [0 , 3.3] V με ρεύμα εισόδου στο εύρος [-3.5 , 3.5]A.



Εικόνα 3.10: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα I0 στο εύρος εξόδου [-10 , 10] V με ρεύμα εισόδου στο εύρος [-3.5 , 3.5]A.

Οι συναρτήσεις που προκύπτουν για τις δύο προσεγγίσεις είναι οι εξής :

Πρώτου Βαθμού στο εύρος [0 , 3.3]. :

$$f_1(x) = - 2.9717x + 4.9092$$

Δευτέρου Βαθμού στο εύρος [0 , 3.3]:

$$g_1(x) = 0.0029x^2 - 2.9813x + 4.9157$$

Πρώτου Βαθμού στο εύρος [-10 , 10]. :

$$h_1(x) = - 0.4766x - 0.1595$$

Δευτέρου Βαθμού στο εύρος [-10 , 10]. :

$$q_1(x) = 0.0001x^2 - 0.4765x - 0.1607$$

3.3.2 Είσοδος στο Εύρος [-25 , 25] A

Για τη βαθμονόμηση στο εύρος αυτό χρησιμοποιήθηκε ως πηγή τάσης το τροφοδοτικό MX30 και ως φορτίο συνεχούς ρεύματος η συσκευή DL3021 της εταιρείας RIGOL. Η λειτουργία των δύο παραπάνω συσκευών ήταν αρκετά απλή: εφόσον το όριο ρεύματος της πρώτης ήταν αρκετό η δεύτερη ρύθμιζε την αντίσταση της ώστε το ρεύμα να είναι σταθερό και όσο πιο κοντά στο ζητούμενο. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε και πάλι ο ίδιος κώδικας με προηγουμένως. Λόγω του περιορισμού στο ρεύμα μέτρησης του πολυμέτρου

σημειώθηκε το ρεύμα εισόδου των πλακετών από την ένδειξη της συσκευής DL3021 ώστε να γίνει η βαθμονόμηση σε όλο το εύρος με την ίδια συσκευή μέτρησης. Η τιμές αυτές θεωρούνται αξιόπιστες κάτι που επιβεβαιώνεται από την μικρή απόκλιση τους από τις μετρήσεις του βαθμονομημένου πολυμέτρου. Για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης της ακρίβειας παραθέτουμε και τις ενδείξεις του πολυμέτρου μέχρι τα 9 A . Σημειώνεται ότι οι εντολές ρεύματος στην πηγή ήταν οι κοντινότεροι ακέραιοι στις τιμές που μετρήθηκαν και απεικονίζονται παρακάτω. Στην **Εικόνα 3.11** απεικονίζεται η πειραματική διάταξη δίχως το τροφοδοτικό MX30 ενώ στην **Εικόνα 3.12** το φορτίο σταθερού ρεύματος.



Εικόνα 3.11: Διάταξη βαθμονόμησης πλακετών ρεύματος στο εύρος $[-25, 25]\text{A}$.

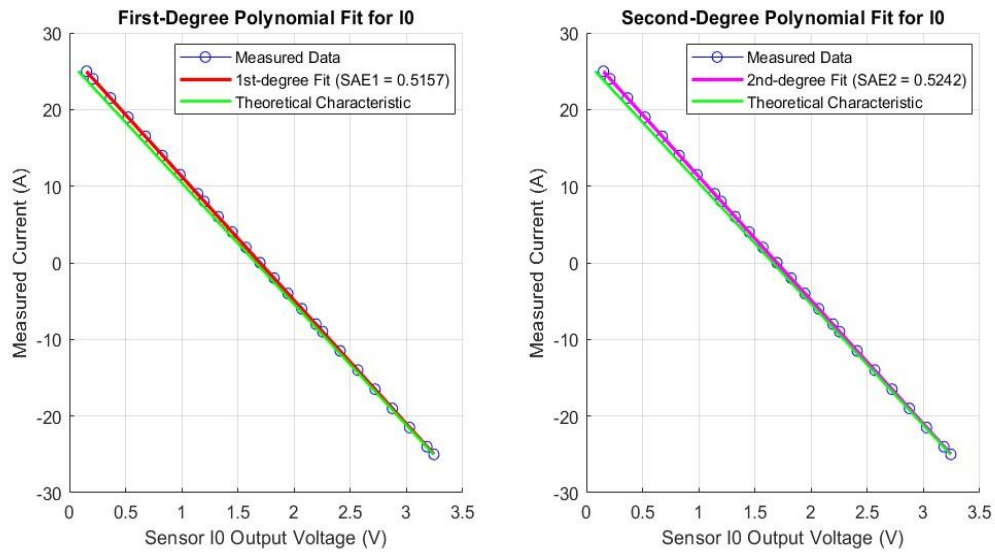


Εικόνα 3.12: Φορτίο σταθερού ρεύματος RIGOL DL3021 σε λειτουργία κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης.

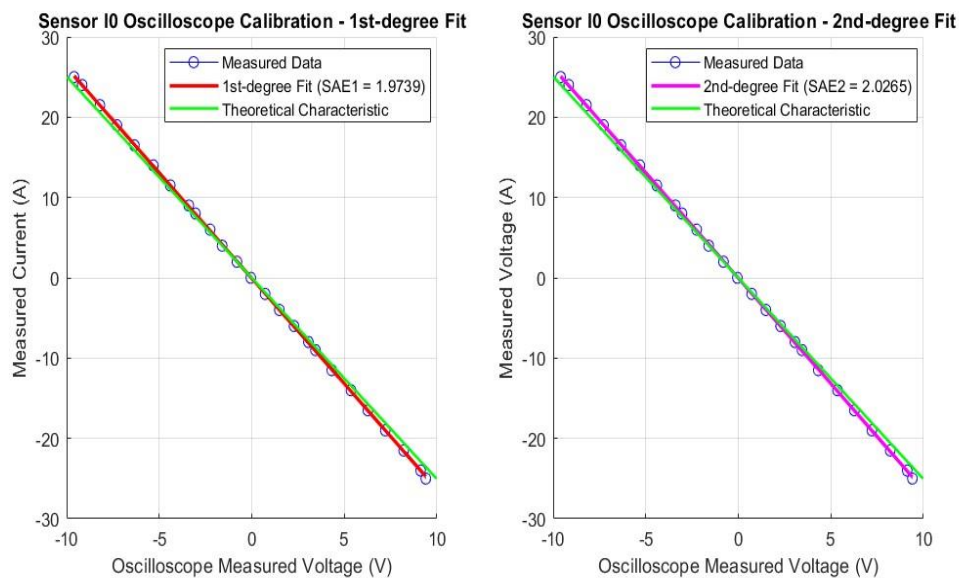
Στον **Πίνακα 3.4** απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επίσης **Εικόνα 3.13** στην απεικονίζονται οι συναρτήσεις προσέγγισης για την έξοδο στο εύρος $[0, 3.3]\text{V}$ ενώ στην **Εικόνα 3.14** αυτές για την έξοδο στο εύρος $[-10, 10]\text{V}$.

Ρεύμα Εισόδου (A) DL3021	Ρεύμα Εισόδου (A) Πολύμετρο	Μέση τιμή Εξόδου [0 ,3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0,3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10,10] V
-25.002	-	3.2432846	0.017546165	9.4
-24.002	-	3.181439867	0.012834774	9.12
-21.501	-	3.0265206	0.011614429	8.2
-19.001	-	2.873572133	0.011339858	7.21
-16.501	-	2.7194888	0.011518484	6.27
-14	-	2.565788267	0.013184217	5.36
-11.5	-	2.4088582	0.011421362	4.32
-9.001	-8.992	2.253553133	0.013016019	3.44
-8.001	-7.996	2.193004067	0.009114519	3.06
-6.001	-5.999	2.066659133	0.012058945	2.28
-4.001	-4.0011	1.9435168	0.009022459	1.49
-2.001	-2.0018	1.8217878	0.008114426	0.72
0	0	1.6959968	0.000866974	-0.052
2.001	2.0019	1.570678867	0.00862169	-0.8
4.001	4.0011	1.448939933	0.010903235	-1.6
6.001	6	1.3237126	0.010233306	-2.25
8.001	7.996	1.199173867	0.008967362	-3.04
9.001	8.99	1.1415522	0.014066584	-3.4
11.5	-	0.9846088	0.015103258	-4.4
14	-	0.826191733	0.010805411	-5.32
16.5	-	0.674814067	0.01699843	-6.34
19.001	-	0.522661067	0.013376078	-7.28
21.501	-	0.365727933	0.011795355	-8.2
24.002	-	0.210127267	0.013987819	-9.16
25.002	-	0.152377867	0.014772742	9.4

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα μετρήσεων πλακέτας I0 για το ρεύμα εισόδου στο εύρος [-25 , 25] A .



Εικόνα 3.13: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα I0 στο εύρος εξόδου [0,3.3] V με ρεύμα εισόδου στο εύρος [-25,25]A.



Εικόνα 3.14: Γραφική απεικόνιση των δύο συναρτήσεων προσέγγισης για την πλακέτα I0 στο εύρος εξόδου [0,3.3] V με ρεύμα εισόδου στο εύρος [-25,25]A.

Οι συναρτήσεις που προκύπτουν για τις δύο προσεγγίσεις είναι οι εξής :

Πρώτου Βαθμού στο εύρος [0,3.3]. :

$$f_1(x) = -16.1561x + 27.4098$$

Δευτέρου Βαθμού στο εύρος [0,3.3]:

$$g_1(x) = 0.0056x^2 - 16.1753x + 27.4212$$

Πρώτου Βαθμού στο εύρος [-10,10]. :

$$h_1(x) = -2.6257x - 0.0601$$

Δευτέρου Βαθμού στο εύρος [-10,10]. :

$$q_1(x) = 0.0010x^2 - 2.6258x - 0.0281$$

3.4 Συνολικά Αποτελέσματα για την Μέτρηση Τάσης

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για κάθε πλακέτα μέτρησης τάσης και εύρος εισόδων-εξόδων.

- Είσοδος στο εύρος [-40 , 40]V, Έξοδος στο εύρος [0 , 3.3]V

Πλακέτα	2 ^ο Βαθμού			1 ^ο Βαθμού	
	x^2	x^1	x^0	x^1	x^0
V0	-0.0399	-43.5189	68.9831	-43.6450	69.0594
V1	-0.0665	-43.7404	69.5058	-43.9511	69.6340
V2	-0.1336	-43.5360	69.0595	-43.9568	69.3133
V3	-0.0220	-43.7667	68.8418	-43.8358	68.8832

Πίνακας 3.5: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες τάσης στο εύρος εισόδου [-40 , 40]V και εύρος εξόδου[0 , 3.3]V.

- Είσοδος στο εύρος [-40 , 40]V, Έξοδος στο εύρος [-10 , 10]V

Πλακέτα	2 ^ο Βαθμού			1 ^ο Βαθμού	
	x^2	x^1	x^0	x^1	x^0
V0	-0.0019	-6.6722	-0.9624	-6.6716	-0.9624
V1	0.0026	-6.7331	-0.6183	-6.7335	-0.5528
V2	0.0035	-6.6950	-1.3112	-6.6962	-1.2249
V3	0.0028	-6.7034	-1.5374	-6.7046	-1.4960

Πίνακας 3.6: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες τάσης στο εύρος εισόδου [-40 , 40]V και εύρος εξόδου[-10 , 10]V.

- Είσοδος στο εύρος [-400 , 400]V, Έξοδος στο εύρος [0 , 3.3]V

Πλακέτα	2 ^ο Βαθμού			1 ^ο Βαθμού	
	x^2	x^1	x^0	x^1	x^0
V0	-0.6186	-414.4297	654.8668	-416.3775	656.0004
V1	-0.6369	-415.3379	659.3877	-417.3524	660.5712
V2	-0.6865	-411.9704	653.6348	-414.1724	654.9700
V3	0.9765	-413.2496	652.4981	-416.3153	654.2733

Πίνακας 3.7: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες τάσης στο εύρος εισόδου [-400 , 400]V και εύρος εξόδου[0 , 3.3]V.

- Είσοδος στο εύρος [-400 , 400]V, Έξοδος στο εύρος [-10 , 10]V

Πλακέτα	2 ^ο Βαθμού			1 ^ο Βαθμού	
	x^2	x^1	x^0	x^1	x^0
V0	0.0018	-63.8061	-8.0548	-63.8065	-8.0054
V1	0.0004	-63.9520	-7.8104	-63.9521	-7.7987
V2	-0.0060	-64.0292	-5.0586	-64.0282	-5.2226
V3	-0.0008	-63.7875	-7.5234	-63.7873	-7.5455

Πίνακας 3.8: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες τάσης στο εύρος εισόδου [-400 , 400]V και εύρος εξόδου[-10 , 10]V.

3.5 Συνολικά Αποτελέσματα για την Μέτρηση Ρεύματος

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για κάθε πλακέτα μέτρησης ρεύματος και εύρος εισόδων-εξόδων.

- Είσοδος στο εύρος [-3.5 , 3.5]A, Έξοδος στο εύρος [0 , 3.3]V

Πλακέτα	2 ^ο Βαθμού			1 ^ο Βαθμού	
	x^2	x^1	x^0	x^1	x^0
I0	0.0029	-2.9813	4.9157	-2.9717	4.9092
I1	0.008	-2.9715	4.8788	-2.9688	4.8770
I2	0.0049	-2.9824	4.9038	-2.9663	4.8930
I3	0.0013	-2.9629	4.8827	-2.9586	4.8798

Πίνακας 3.9: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες ρεύματος στο εύρος εισόδου [-3.5 , 3.5]A και εύρος εξόδου[0 , 3.3]V.

- Είσοδος στο εύρος [-3.5 , 3.5]A, Έξοδος στο εύρος [-10 , 10]V

Πλακέτα	2 ^ο Βαθμού			1 ^ο Βαθμού	
	x^2	x^1	x^0	x^1	x^0
I0	0.00006	-0.47651	-0.16069	-0.47655	-0.15953
I1	0.00007	-0.47424	-0.15044	-0.47428	-0.14904
I2	0.0001	-0.47463	-0.16528	-0.47467	-0.16323
I3	0.00034	-0.47423	-0.158459	-0.47446	-0.15186

Πίνακας 3.10: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες ρεύματος στο εύρος εισόδου [-3.5 , 3.5]A και εύρος εξόδου [-10 , 10]V.

- Είσοδος στο εύρος [-25 , 25]A, Έξοδος στο εύρος [0 , 3.3]V

Πλακέτα	2 ^ο Βαθμού			1 ^ο Βαθμού	
	x^2	x^1	x^0	x^1	x^0
I0	0.0056	-16.1753	27.4212	-16.1561	27.4098
I1	0.018	-16.2236	27.2805	-16.1630	27.2449
I2	0.0045	-16.1487	27.3731	-16.1334	27.3641
I3	0.0094	-16.1350	27.3049	-16.1031	27.2861

Πίνακας 3.11 Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες ρεύματος στο εύρος εισόδου [-25 , 25]A και εύρος εξόδου [0 , 3.3]V.

- Είσοδος στο εύρος [-25 , 25]A, Έξοδος στο εύρος [-10 , 10]V

Πλακέτα	2 ^ο Βαθμού			1 ^ο Βαθμού	
	x^2	x^1	x^0	x^1	x^0
I0	0.0010	-2.6258	-0.0281	-2.6257	-0.0601
I1	-0.0007	-2.6170	-0.0819	-2.6174	-0.1030
I2	0.0044	-2.6445	-0.0145	-2.638	0.1085
I3	0.0009	-2.6152	-0.0253	-2.6152	0.004

Πίνακας 3.12: Συντελεστές συναρτήσεων προσέγγισης για τις πλακέτες ρεύματος στο εύρος εισόδου [-25 , 25]A και εύρος εξόδου [-10 , 10]V.

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι η προσέγγιση με συνάρτηση δευτέρου βαθμού δεν προσφέρει ουσιαστική βελτίωση σε σχέση με την προσέγγιση πρώτου βαθμού. Παρότι η τιμή του δείκτη SAE είναι μικρότερη σχεδόν σε κάθε περίπτωση, η διαφορά στην ακρίβεια

παραμένει αμελητέα. Αυτό επιβεβαιώνεται τόσο από την πολύ μικρή τιμή του συντελεστή της μεταβλητής x^2 , όσο και από τις σχεδόν ταυτόσημες τιμές των υπολοίπων συντελεστών σε σύγκριση με εκείνους της γραμμικής προσέγγισης. Επομένως, η χρήση ευθείας ως μοντέλου είναι επαρκής και απολύτως λογική, καθώς και η επιθυμητή συμπεριφορά του αισθητήρα είναι γραμμική. Σημαντικό είναι επίσης να επισημανθεί ότι σε εφαρμογές με FPGA, και ιδίως όταν όλη η επεξεργασία πραγματοποιείται στο περιβάλλον Vivado, κάθε επιπλέον πράξη, και ιδιαίτερα ο πολλαπλασιασμός, επιβαρύνει τον υπολογιστικό φόρτο. Συνεπώς, η μικρή αύξηση στην ακρίβεια που προσφέρει η πολυωνυμική προσέγγιση δευτέρου βαθμού αντισταθμίζεται από την πρόσθετη υπολογιστική επιβάρυνση που συνεπάγεται.

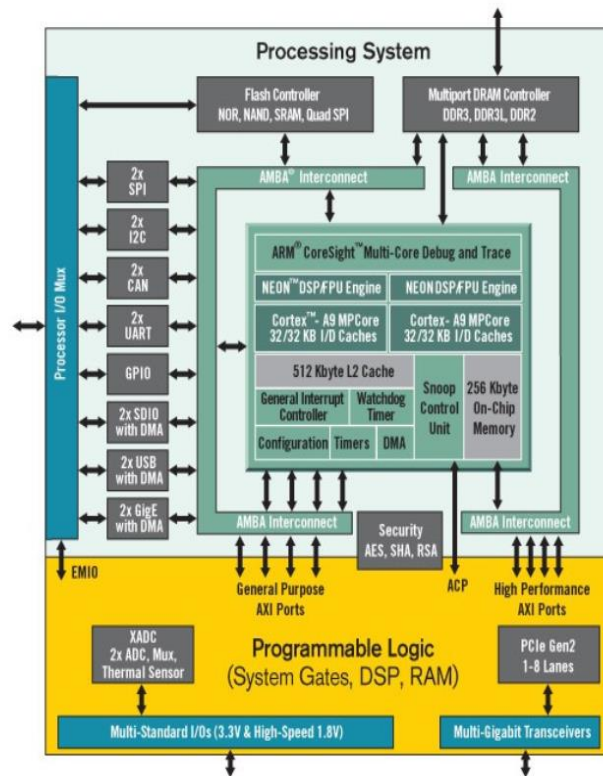
4 Διαμόρφωση Προγραμματιζόμενης Λογικής

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχεδίαση ενός συστήματος οδήγησης και μετρήσεων για μηχανές επαγωγής, εξ ολοκλήρου υλοποιημένο σε γλώσσα περιγραφής υλικού VHDL. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι η ταχύτητα του άξονα της μηχανής και τα τριφασικά ρεύματα του στάτη. Το σύστημα οδήγησης που υλοποιήθηκε είναι έλεγχος ανοιχτού βρόγχου με σταθερό λόγο $\frac{V}{f}$. Στο κομμάτι της οδήγησης δίνεται έμφαση στην εκμετάλλευση του γρήγορου ρολογιού του FPGA και την διαμόρφωση με φέρον τρίγωνο υψηλής συχνότητας **100 kHz**. Η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί σε περίοδο **10 μ s** με την οποία επιλέχθηκε ίση και η συχνότητα δειγματοληψίας των ρευμάτων της μηχανής από τους ADC του FPGA. Η ταχύτητα της μηχανής μετριέται κάθε **2 ms**, χρόνος ο οποίος σχετίζεται με την ελάχιστη ταχύτητα μέτρησης που ζητείται. Για την απεικόνιση των μετρούμενων μεγεθών χρησιμοποιούνται μνήμες BRAM στις οποίες τα δεδομένα αποθηκεύονται και στην συνέχεια διαβάζονται από τον επεξεργαστή ARM ώστε να είναι διαθέσιμα στον χρήστη.

4.1 Το Υπολογιστικό Σύστημα

Για την παρούσα εφαρμογή επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η πλατφόρμα Arty z7-10 της εταιρείας Digilent. Το προϊόν αυτό είναι μια έτοιμη προς χρήση πλατφόρμα ανάπτυξης βασισμένη στο SoC (System On Chip) Zynq-7000 της Xilinx η οποία συνδυάζει έναν διπύρρηνο επεξεργαστή ARM Cortex-A9 με την ευελιξία ενός FPGA ισοδύναμο του Artix-7. Ο επεξεργαστής ARM έχει δυνατότητα επικοινωνίας με το FPGA μέσω του πρωτοκόλλου AXI BUS (Advanced eXtensible Interface) το οποίο αποτελεί μέρος του προτύπου AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) της ARM. Ο διάυλος αυτός παρέχει υψηλή απόδοση με δυνατότητα ταυτόχρονης μεταφοράς δεδομένων υψηλές ταχύτητες και ευκολία σύνδεσης περιφερειακών συστημάτων. Η πλατφόρμα περιέχει ένα ADC δύο καναλιών, μνήμη DDR3 512 MB, Quad-SPI Flash, micro-SD υποδοχή, Gigabit Ethernet, USB (OTG/JTAG/UART), HDMI είσοδο/έξοδο, ήχο μέσω PWM, πλήθος οπτικών και εισόδων/εξόδων όπως κουμπιά, διακόπτες, LED, Pmod και Arduino headers. Όλα τα παραπάνω περιφερειακά συστήματα προσφέρουν πληθώρα δυνατοτήτων για χρήση σε πολλές εφαρμογές. Ο προγραμματισμός της πλατφόρμας γίνεται με δύο διαφορετικά προγράμματα ανάπτυξης κώδικα. Αρχικά στο περιβάλλον Vivado γίνεται ο προγραμματισμός του FPGA μέσω γλωσσών περιγραφής υλικού όπως VHDL και Verilog. Στο Vivado υποσυστήματα κώδικα RTL (Register Trasner Level) που αναπτύσσει ο χρήστης συνδυάζόμενα με έτοιμα

υποσυστήματα του ίδιου του προγράμματος διαμορφώνουν την προγραμματιζόμενη λογική του FPGA. Στο περιβάλλον αυτό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν άμεσα όλα τα περιφερειακά χωρίς την παρέμβαση του επεξεργαστή προσφέροντας έτσι την τάχιστη απόκριση τους. Αντίστοιχα στο περιβάλλον Vitis γίνεται ο προγραμματισμός του επεξεργαστή αν είναι επιθυμητή η πραγματοποίηση διεργασιών σε αυτόν μέσω γλωσσών υψηλότερου επίπεδο. Μέσω του επεξεργαστή μπορούν και πάλι προφανώς να χρησιμοποιηθούν όλα τα περιφερειακά συστήματα αλλά και να υπάρξει συνεργασία με την προγραμματιζόμενη λογική. Στην παρούσα εφαρμογή για λόγους ταχύτητας αλλά και απόδοσης είναι επιθυμητή η πραγματοποίηση όλων των λειτουργιών στο περιβάλλον Vivado και η χρήση του Vitis για την μεταφορά των αναφορών, των μετρούμενων δεδομένων και την επικοινωνία με τον χρήστη. Για τον προγραμματισμό του πρώτου χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα Verilog ενώ του δεύτερου η γλώσσα C.

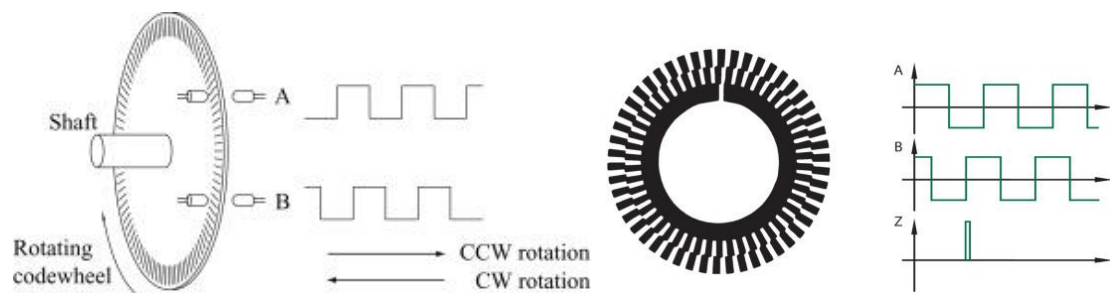


Εικόνα 4.1: Αρχιτεκτονική του συστήματος SoC ZynQ 7000 [21].

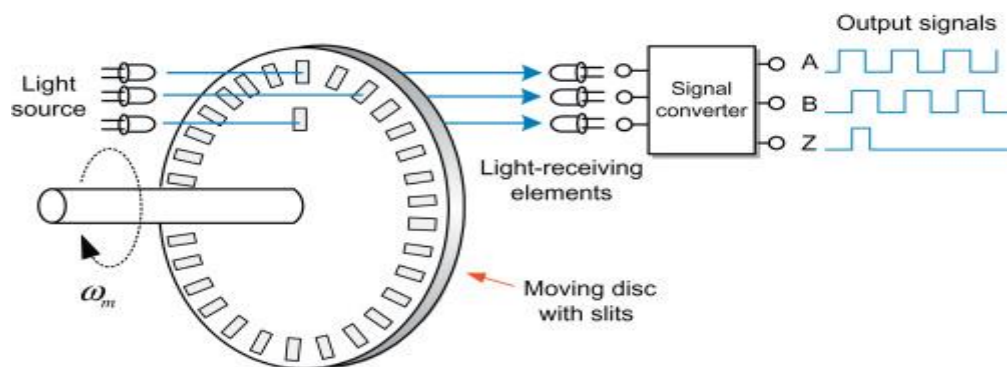
4.2 Μέτρηση ταχύτητας

Η μέτρηση της ταχύτητας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αυξητικού κωδικοποιητή (Incremental Rotary Encoder) E50S8-8000-3-N-24 της εταιρείας *Autonics*. Οι κωδικοποιητές αυτού του τύπου μετατρέπουν την περιστροφική κίνηση του άξονα σε ηλεκτρικά σήματα, μέσω των οποίων είναι δυνατός ο υπολογισμός τόσο της ταχύτητας όσο

και της φοράς περιστροφής. Πιο συγκεκριμένα, οι αυξητικοί κωδικοποιητές διαθέτουν έναν δίσκο με σχισμές στην περιφέρειά του, κάποια πηγή φωτός και δύο φωτοστοιχεία τοποθετημένα με κατάλληλη μετατόπιση. Καθώς ο άξονας, και συνεπώς ο δίσκος, περιστρέφεται τα φωτοστοιχεία ανιχνεύουν τη διέλευση των σχισμών και παράγουν δυο σήματα τετραγωνικών παλμών. Οι κωδικοποιητές αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται ως οπτικοί ωστόσο, αντί για φωτοστοιχεία, σε ορισμένες υλοποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν μαγνητικά στοιχεία. Σε κάποιες περιπτώσεις, ο δίσκος φέρει δύο σειρές σχισμών με μετατόπιση μεταξύ της, γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή των δύο σημάτων με διαφορά φάσης. Επιπλέον, συχνά υπάρχει και μία επιπρόσθετη σχισμή, η οποία αντιστοιχεί σε έναν μοναδικό παλμό ανά πλήρη περιστροφή, παρέχοντας έτσι ένα σήμα αναφοράς. Στην **Εικόνα 4.2** απεικονίζονται οι δύο διαφορετικές διαμορφώσεις του δίσκου ενώ στην **Εικόνα 4.3** η λειτουργία του κωδικοποιητή. Ο συγκεκριμένος κωδικοποιητής διαθέτει δύο εξόδους μετατοπισμένες κατά $T/4$ ενώ σε κάθε πλήρη περιστροφή παράγονται 8000 τετραγωνικοί παλμοί ανά έξοδο. Η ταχύτητα προκύπτει από τη συχνότητα των παλμών, ενώ η φορά περιστροφής καθορίζεται από τη σχέση προ πορείας–υστέρησης των δύο σημάτων.



Εικόνα 4.2: Απεικόνιση των δυο διαφορετικών τύπων δίσκων κωδικοποιητών ταχύτητας[22]



Εικόνα 4.3: Περιγραφή λειτουργίας κωδικοποιητή ταχύτητας[22].

Της αναφέρθηκε προηγουμένως, σε κάθε πλήρη περιστροφή παράγονται **8000** παλμοί σε καθεμία από της δύο εξόδους του κωδικοποιητή. Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στη μέτρηση της ταχύτητας, είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη τόσο οι θετικές όσο και οι αρνητικές

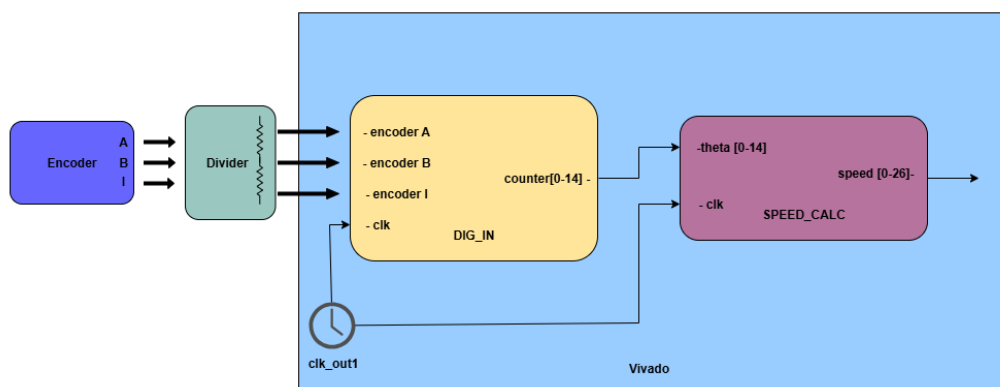
ακμές των παλμών, με αποτέλεσμα ο συνολικός αριθμός των μετρούμενων ακμών να ανέρχεται σε **32000** ανά περιστροφή. Η προσέγγιση αυτή υιοθετείται και στην παρούσα εργασία. Η εξαγωγή της ταχύτητας από τα σήματα του κωδικοποιητή μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους είτε μετρώντας το χρονικό διάστημα Δt , μεταξύ δύο διαδοχικών ακμών είτε μετρώντας τον αριθμό των ακμών N , που καταγράφονται μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό παράθυρο. Στην πρώτη περίπτωση, η ταχύτητα υπολογίζεται ως εξής

$$\omega_m = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2 * \pi}{\frac{32000}{\Delta t}} \quad (4.1)$$

Ενώ στην δεύτερη:

$$\omega_m = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{N * \frac{2 * \pi}{32000}}{T} \quad (4.2)$$

Παρόλο που η πρώτη μέθοδος παρέχει τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στον υπολογισμό της ταχύτητας, στην παρούσα εφαρμογή προτιμήθηκε η δεύτερη. Ο λόγος είναι ότι η διαίρεση με τον μεταβλητό χρόνο Δt , της φαίνεται στη σχέση (4.1), δημιουργεί σημαντικά προβλήματα χρονισμού κατά την υλοποίηση στο περιβάλλον Vivado, λόγω της ιδιαίτερα υψηλής πολυπλοκότητας που συνεπάγεται η πράξη της διαίρεσης. Αντίθετα, στη σχέση (4.2) το χρονικό διάστημα T είναι σταθερό και μπορεί να ενσωματωθεί, μαζί με τη σταθερά του αριθμητή, σε μία νέα σταθερά. Με τον τρόπο αυτό, η πράξη υπολογισμού περιορίζεται σε έναν απλό πολλαπλασιασμό αντί για διαίρεση, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά την υλοποίηση και βελτιώνει την επίδοση του συστήματος. Το σύστημα μέτρησης της ταχύτητας απεικονίζεται περιγραφικά στην **Εικόνα 4.4**.

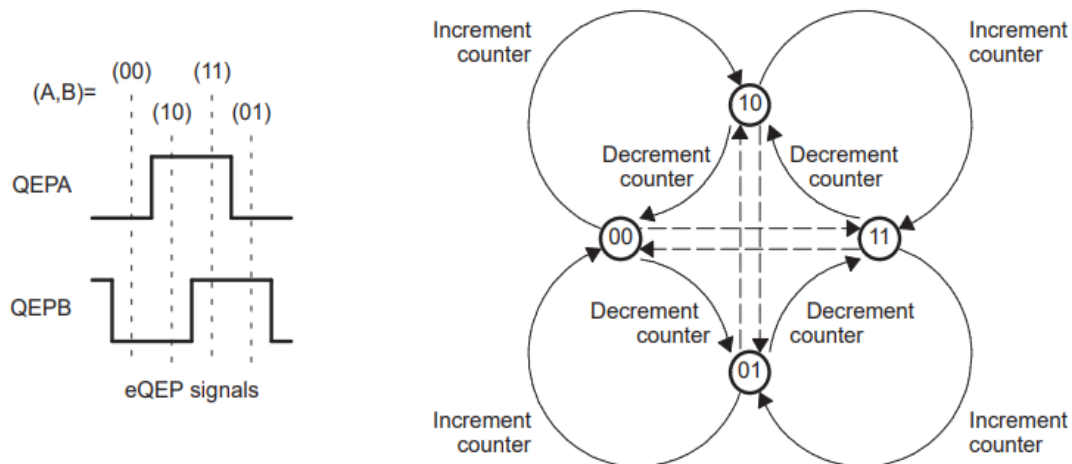


Εικόνα 4.4: Περιγραφική απεικόνιση συστήματος μέτρησης ταχύτητας.

Ο κωδικοποιητής ταχύτητας τροφοδοτείται με τάση 12 V , στο επίπεδο τάσης αυτό είναι και η έξοδος του, επομένως για την σύνδεση των εξόδων του με το FPGA είναι απαραίτητος ο υποβιβασμός της τάσης στο επίπεδο $[0 - 3.3]\text{V}$. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω ενός διαιρέτη τάσης με την σχέση υποβιβασμού να είναι:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3.2}{9.7 + 3.2} = 0.24806 \quad (4.3)$$

Εφόσον τα τρία σήματα του κωδικοποιητή έχουν υποβιβασθεί διαβάζονται από της ψηφιακές εισόδους του FPGA και αποτελούν της εισόδους του RTL υποσυστήματος DIG_IN. Ο κώδικας που το αποτελεί ουσιαστικά υλοποιεί έναν μετρητή ακμών ο οποίος είτε αυξάνεται είτε μειώνεται ανάλογα με την ακολουθία των σημάτων A,B. Πιο συγκεκριμένα όταν η ακολουθία παλμών A προηγείται της B ο μετρητής αυξάνεται κατά 1 σε κάθε ανάγνωση ακμής, είτε θετικής είτε αρνητικής, αντίθετα ο μετρητής μειώνεται με τον ίδιο τρόπο όταν η ακολουθία B προηγείται της A. Όταν γίνει ανάγνωση του παλμού I ο μετρητής τίθεται ίσος με το 0. Η λειτουργία που αναφέρθηκε παραπάνω περιγράφεται με ακρίβεια και από την μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων στην **Εικόνα 4.5**.



Εικόνα 4.5: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για την περιγραφή της λειτουργίας του μετρητή ακμών[23].

Ο μετρητής αυτός αποτελεί την είσοδο του υποσυστήματος SPEED_CALC το οποίο υπολογίζει την ταχύτητα της μηχανής με βάση την σχέση (4.2). Όπως αναφέρθηκε υπολογίζεται μια νέα μέτρηση της ταχύτητας κάθε 2 ms . Αυτός ο χρόνος σχετίζεται άμεσα με την ελάχιστη τιμή της ταχύτητας που μπορεί να μετρηθεί. Ειδικότερα έστω n_{min} η

ελάχιστη επιθυμητή μετρούμενη ταχύτητα σε $\Sigma A A$, τότε ο χρόνος μέτρησης προκύπτει ως εξής:

Οι ακμές ανά λεπτό είναι:

$$\frac{edges}{s} = n_{min} * 32000 \quad (4.4)$$

Από όπου προκύπτει η μέτρηση μιας της ακμής κάθε:

$$T = \frac{60}{n_{min} * 32000} \text{ s} \quad (4.5)$$

Για να υπάρξει μια νέα μέτρηση της ταχύτητας θα πρέπει ο μετρητής να έχει αυξηθεί τουλάχιστον κατά 1 καθώς διαφορετικά η σχέση (4.2) θα δώσει μηδενική τιμή ταχύτητας. Επομένως για να μην συμβεί αυτό θα πρέπει να υπολογίζεται μια νέα τιμή ταχύτητας αφού επέλθει το χρονικό διάστημα που προκύπτει από την (4.5).

Για $n_{min} = 1 \Sigma A A$ προκύπτει:

$$T = \frac{60}{1 * 32000} = 1.875 \text{ ms}$$

Λόγο των ταλαντώσεων του άξονα της μηχανής αλλά και για βεβαιότητα επιλέχθηκε ο χρόνος $T = 2 \text{ ms}$ για αυτή την εφαρμογή. Το κοινό ρολόι των δύο παραπάνω υποσυστημάτων έχει συχνότητα $f_1 = 100 \text{ MHz}$ δηλαδή περίοδο $T_1 = 10 \text{ ns}$. Ο κώδικας του υποσυστήματος SPEED_CALC υλοποιεί έναν μετρητή θετικών ακμών ρολογιού και μόλις ο μετρητής πάρει την τιμή:

$$cnt = \frac{\Delta t}{T_1} = 200000$$

υπολογίζεται μια νέα τιμή της ταχύτητας. Για να αποφευχθεί η χρήση αριθμών κινητής υποδιαστολής σε όλη την υλοποίηση η ταχύτητα υπολογίζεται ως προσημασμένος ακέραιος αφού πρώτα πολλαπλασιαστεί με την σταθερά 10000.

Τελικά προκύπτει ότι:

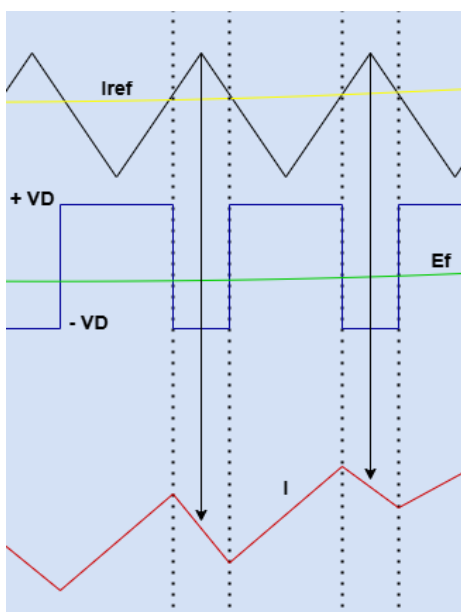
$$\omega'_m = 10000 * \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = 10000 * \frac{N * \frac{2 * \pi}{32000}}{T} = N * 981.74 \approx 982 * N \quad (4.6)$$

Όπου

$$\omega'_m = 10000 * \omega_m \quad (4.7)$$

4.3 Μέτρηση Τριφασικών Ρευμάτων Στάτη

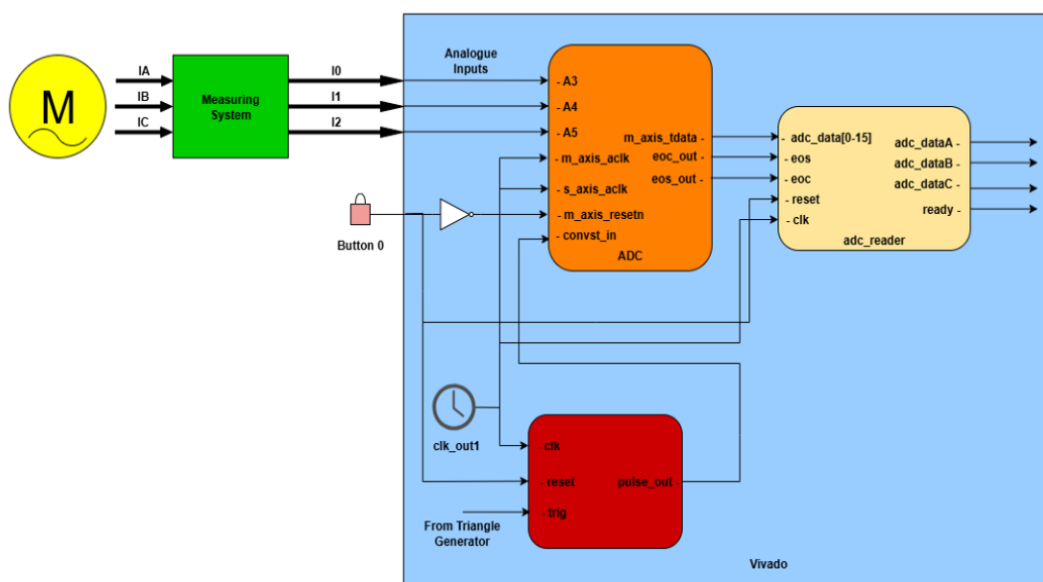
Η μέτρηση των τριών ρευμάτων της μηχανής επαγωγής θα πραγματοποιηθεί διαβάζοντας της αντίστοιχες εξόδους του μετρητικού συστήματος του οποίου η σχεδίαση και η κατασκευή αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Το εύρος τάσης των εξόδων του συστήματος αυτού επιτρέπει την απευθείας σύνδεση τους με της αναλογικές εισόδους του ADC του Arty z7-10. Η υλοποίηση του συστήματος μέτρησης έγινε εξολοκλήρου στο περιβάλλον Vivado για να αποφευχθεί η καθυστέρηση που εισάγει ο διάυλος επικοινωνίας AXI BUS που συνδέει το FPGA με τον επεξεργαστή ARM . Οι τρεις μετρήσεις λαμβάνονται κάθε 10 us σε συγχρονισμό με το φέρον τρίγωνο της διαμόρφωσης. Είναι σημαντικό οι μετρήσεις να λαμβάνονται όσο πιο κοντά της κορυφής του τριγώνου, εκεί δηλαδή που δεν συμβαίνουν συνήθως μεταβάσεις των διακοπών ώστε η μέτρηση να αφορά την μέση τιμή του ρεύματος στην συγκεκριμένη μεταβολή μεταξύ των δύο μεταβάσεων των διακοπών. Η **Εικόνα 4.6** απεικονίζει την μέτρηση του ρεύματος μιας φάσης της μηχανής έχοντας υποθέσει την ύπαρξη μιας αυτεπαγωγής μεταξύ της ΗΕΔ E_f και του μετατροπέα. Η μέτρηση του ρεύματος πραγματοποιείται στην θετική κορυφή του φέροντος τριγώνου κάτι που όπως φαίνεται οδηγεί στην μέτρηση του μέσου ρεύματος αγνοώντας έτσι την κυμάτωση του.



Εικόνα 4.6 Απεικόνιση μέτρησης ρεύματος σε συγχρονισμό με την διαμόρφωση.

Για της μετρήσεις ο ADC ρυθμίστηκε σε λειτουργία channel sequencer ώστε να διαβάζει με την σειρά τα κανάλια που έχουν επιλεγεί ως ενεργές εισοδοι και σε event mode ώστε να διαβάζει τα κανάλια όταν δεχθεί κατάλληλους παλμούς εισόδου. Συνολικά ο ADC δέχεται δυο εισόδους για κάθε κανάλι που διαβάζει, δύο σήματα ρολογιού, ένα σήμα reset και το

σήμα `convst_in` που δίνει της παλμούς ελέγχου της ανάγνωσης των καναλιών. Τα σήματα ρολογιού προέρχονται από ένα κοινό ρολόι με συχνότητα $f_1 = 100\text{ MHz}$, το σήμα `reset` προκύπτει με το πάτημα από τον χρήστη του κουμπιού με αρίθμηση 0 και μια πύλη `not` σε σειρά με το σήμα , ενώ το σήμα `convst_in` παράγεται από το υποσύστημα `ADC_CONTROL` που θα αναλυθεί στην συνέχεια. Οι έξοδοι του που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εφαρμογή είναι τρεις: το κανάλι `m_axis_tdata` που περιέχει τα δεδομένα ανάγνωσης σε έναν μη προσημασμένο αριθμό 16 ψηφίων και τα σήματα `eos` και `eoc` όπου το πρώτο σηματοδοτεί το τέλος ανάγνωσης όλων των καναλιών εισόδου και το δεύτερο το τέλος ανάγνωσης κάθε καναλιού. Οι τρεις έξοδοι αυτοί οδηγούνται στο υποσύστημα `adc_reader` όπου γίνεται διαχωρισμός των τριών μετρήσεων από το κοινό κανάλι εξόδου του ADC. Η διαμόρφωση του συστήματος μετρήσεων ρευμάτων απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.7**



Εικόνα 4.7: Περιγραφική απεικόνιση συστήματος μέτρησης ρευμάτων.

Το υποσύστημα `ADC_CONTROL` δέχεται ως είσοδο το σήμα `trig`, το οποίο σηματοδοτεί την θετική ακμή του φέροντος τριγωνικού σήματος και παράγει στην έξοδο το σήμα `pulse_out`. Το σήμα αυτό αποτελείται από τρεις θετικούς παλμούς και οδηγείται στην είσοδο `convst_in` του ADC, με κάθε παλμό να ενεργοποιεί την ανάγνωση της καναλιού του. Με την ολοκλήρωση της ανάγνωσης κάθε καναλιού, ο ADC παράγει έναν θετικό παλμό στην έξοδο `eoc`, ο οποίος υποδηλώνει ότι τα δεδομένα του καναλιού είναι διαθέσιμα για ανάγνωση μέσω της εξόδου `m_axis_data`. Όταν ολοκληρωθεί η ανάγνωση και των τριών καναλιών, παράγεται επιπλέον ένας θετικός παλμός στην έξοδο `eos`. Τα τρία αυτά σήματα τροφοδοτούνται ως είσοδοι στο υποσύστημα `adc_reader`, όπου οι μετρήσεις από τα τρία κανάλια

αποπολυπλέκονται και κατανέμονται σε τρεις διαφορετικές εξόδους. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται μέσω ενός μετρητή, ο οποίος αυξάνεται σε κάθε θετική ακμή του eos και μηδενίζεται σε κάθε θετική ακμή του eos. Έτσι, σε κάθε ανάγνωση καναλιού η τιμή του μετρητή αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο κανάλι, επιτρέποντας την ανάθεση των δεδομένων ανάγνωσης στην κατάλληλη έξοδο. Με την ολοκλήρωση της ανάγνωσης όλων των σημάτων, το σήμα ready τίθεται ίσο με 1 για έναν παλμό ρολογιού, σηματοδοτώντας την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

4.4 Υλοποίηση Ελέγχου V/f σε Υλικό

Για την σχεδίαση του ελέγχου στο περιβάλλον Vivado είναι απαραίτητη η υλοποίηση της τριγωνικού φέροντος σήματος και της ημιτονικού σήματος αναφοράς μεταβλητού πλάτους και συχνότητας. Αρχικά έχει επιλεγεί η περίοδος του φέροντος σήματος να είναι ίση με 10us. Το φέρον σήμα προφανώς θα υλοποιηθεί με ένα μετρητή ο οποίος επειδή είναι επιθυμητή η ύπαρξη όσο το δυνατόν περισσότερων επιπέδων θα μεταβάλλεται με τον γρηγορότερο ρυθμό, δηλαδή, με την συχνότητα του ρολογιού του υποσυστήματος. Για την καλύτερη δυνατή αναπαράσταση του επιλέχθηκε το υποσύστημα παραγωγής του να δουλεύει με ρολόι συχνότητας $f_2 = 200 \text{ MHz}$ έτσι ώστε να γίνει η αναπαράσταση του με διπλάσια επίπεδα από ότι αν το ρολόι παρέμενε ίδιο με της υπόλοιπης υλοποίησης. Οι παραπάνω δύο επιλογές οδηγούν στον αριθμό των επιπέδων σε μια περίοδο του φέροντος σήματος ο οποίος προκύπτει ως εξής:

$$N_{steps} = \frac{T_{carrier}}{T_2} = \frac{10us}{5ns} = 2000$$

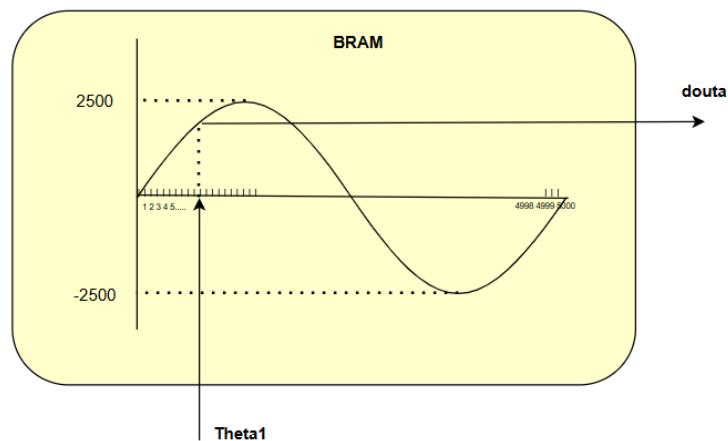
Αυτό που μένει είναι η επιλογή της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής που θα λαμβάνει όπως και του βήματος αύξησης του μετρητή. Τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται από την υλοποίηση του σήματος αναφοράς. Λόγω της μη ύπαρξης τριγωνομετρικών συναρτήσεων στην γλώσσα Verilog, για την ανάπτυξη του ημιτόνου επιλέχθηκε ένα block Μνήμης BRAM σε λειτουργία Standalone και τύπο μνήμης Single Port ROM. Για να αποφευχθεί στο σύστημα η χρήση μεταβλητών σταθερής ή κινητής υποδιαστολής το ημιτονικό σήμα και ο συντελεστής διαμόρφωσης m_a θα πρέπει να είναι ακέραιοι αριθμοί και η μέγιστη τιμή του γινομένου της θα πρέπει να ισούται με την μέγιστη τιμή του φέροντος τριγώνου ώστε να αποφευχθεί η υπερδιαμόρφωση. Ο συντελεστής διαμόρφωσης θα ήταν επιθυμητό να έχει τουλάχιστον ακρίβεια τριών δεκαδικών έτσι επιλέχθηκε να μπορεί να μεταβάλλεται από 0 έως 2000. Μια αντίστοιχη ακρίβεια θα επιλεγεί να έχει και το σήμα ημιτόνου όποτε απεικονίσθηκε στην μνήμη σε 5000 θέσεις της . Πιο συγκεκριμένα αποθηκεύτηκε στην μνήμη μια περίοδος του

πολλαπλασιασμένη με την σταθερά 2500, όποτε το σήμα μεταβάλλεται από -2500 έως 2500 και αποτελείται από 5000 δείγματα. Έτσι μέσω αυτών των επιλογών προκύπτει η μέγιστη τιμή του φέροντος και το πλάτος του βήματος:

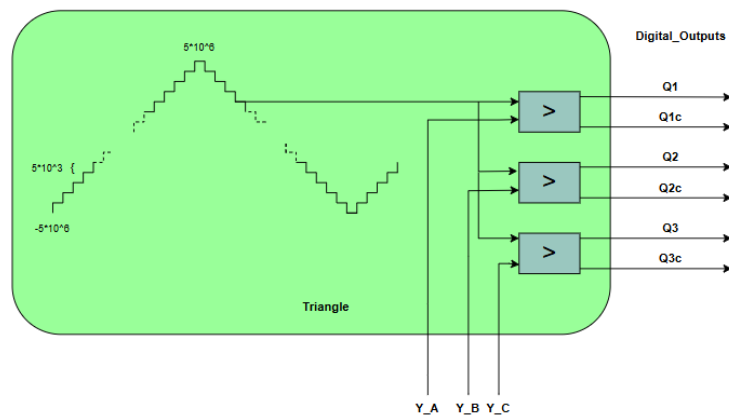
$$A_{carrier} = 2500 * 2000 = 5 * 10^6$$

$$A_{step} = \frac{4 * A_{carrier}}{N_{steps}} = 10000$$

Όπου ο συντελεστής 4 προκύπτει διότι το τρίγωνο θα ξεκινά από την ελάχιστη τιμή, θα μεταβαίνει στην μέγιστη και θα επιστρέφει στην ελάχιστη.



Εικόνα 4.8: Περιγραφική απεικόνιση διαμόρφωσης του υποσυστήματος μνήμης .



Εικόνα 4.9 Περιγραφική απεικόνιση διαμόρφωσης του υποσυστήματος δημιουργίας του φέροντος τριγώνου.

Για την διαμόρφωση αναπτύχθηκε ένα Block Μνήμης για κάθε φάση, και ένα κοινό υποσύστημα για το φέρον σήμα στο οποίο γίνεται και η σύγκριση των αναφορών με το φέρον. Η λειτουργία των δυο υποσυστημάτων αυτών περιγράφεται στην

Εικόνα 4.8 και στην **Εικόνα 4.9**. Η ενσωμάτωση του ελέγχου στα παραπάνω έχει να κάνει με την επιλογή της συχνότητας και του πλάτους των αναφορών. Ο ονομαστικός λόγος $\frac{V}{f}$ για την μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

$$\frac{V}{f} = \frac{V_N}{f_N} = \frac{230 * \sqrt{2}}{50} = 6.50538 \approx 6.5 \quad (4.8)$$

Η μέγιστη τιμή της τάσης τροφοδοσίας θα καθορίσει την συχνότητα πέρα από την οποία η μηχανή θα βρίσκεται σε λειτουργία εξασθένισης πεδίου. Αν η συνεχής τάση τροφοδοσίας του μετατροπέα είναι V_{DC} τότε ισχύει ότι:

$$V_{max} = \frac{V_{DC}}{2}$$

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή η τάση συνεχούς τροφοδοσίας επιλέχθηκε ίση με $V_{DC} = 50 V$.
Όποτε:

$$V_{max} = 25 V$$

Και από τον ονομαστικό λόγο $\frac{V}{f}$ προκύπτει ότι:

$$f_{fw} = 3.85 Hz$$

Πέρα από αυτή την τιμή της συχνότητας η τιμή του m_a θα παραμένει σταθερή και ίση με την μέγιστη ενώ η συχνότητα θα ρυθμίζεται με βάση την επιθυμητή ταχύτητα και η μηχανή θα λειτουργεί στην περιοχή εξασθένισης πεδίου. Καθώς το πείραμα θα πραγματοποιηθεί με την μηχανή εν κενό φορτίο, η γραμμική χαρακτηριστική του ελέγχου πριν την περιοχή εξασθένισης πεδίου επεκτάθηκε έως την αρχή των αξόνων δίχως να προστεθεί κάποια ενίσχυση τάσης στην περιοχή αυτή όπως στην **Εικόνα 1.7**. Η τάση της μηχανής στην περιοχή αυτή θα ρυθμίζεται όπως είναι λογικό από την τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα στη γραμμική περιοχή θα ισχύει:

$$V = m_a * \frac{V_D}{2} \quad (4.9)$$

όποτε από την (4.4)

$$m_a = 6.5 * \frac{2}{V_D} * f \quad (4.10)$$

Όπως επιλέχθηκε παραπάνω, το m_a θα μεταβάλλεται στο διάστημα $[0, 2000]$ όποτε η (4.12) θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την τιμή 2000 ώστε να βρίσκεται στο σωστό εύρος. Επομένως συνεπάγεται ότι:

$$m_a = 520 * f \quad (4.11)$$

Κατά τη λειτουργία του συστήματος ο χρήστης θα επιλέγει στο τερματικό μια τιμή αναφοράς ταχύτητας, από την οποία η συχνότητα θα προκύπτει ανάλογα. Η λειτουργία επικοινωνίας με

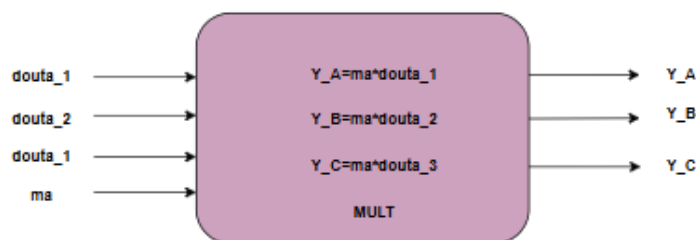
τον χρήστη θα υλοποιηθεί στο περιβάλλον του επεξεργαστή ARM από όπου η τιμή της συχνότητας μέσω του διαύλου AXI BUS θα μεταφερθεί στο FPGA. Και πάλι λόγω της ανάγκης για χρήση μόνο ακεραίων αριθμών η τιμή της συχνότητας θα πολλαπλασιαστεί με μία σταθερά. Από την (4.7) είναι εμφανές ότι η επιλογή της σταθεράς **10** είναι αρκετά βολική και επίσης δίνει μια ικανοποιητική ακρίβεια για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Όποτε τελικά:

$$m_a = 52 * f' \quad (4.12)$$

όπου

$$f' = 10 * f \quad (4.13)$$

Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.10** η προκύπτουσα τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης πολλαπλασιάζεται με το ημιτονικό σήμα για να αποτελέσει την αναφορά για την σύγκριση με το φέρον τρίγωνο.



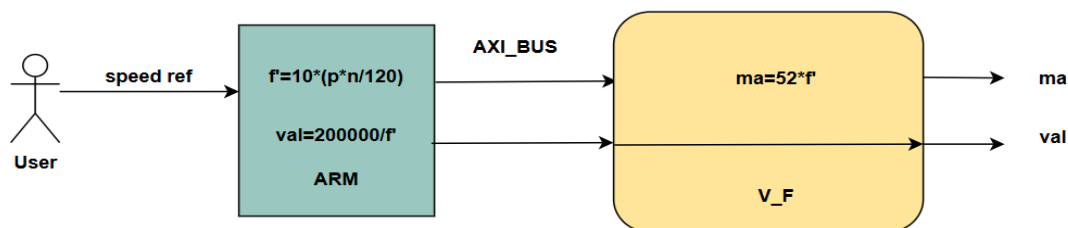
Εικόνα 4.10: Υπολογισμός πλάτους ημιτονικών αναφορών.

Όπως αναφέρθηκε, το ημιτονικό σήμα προκύπτει από ένα υποσύστημα μνήμης, το οποίο διαθέτει δυο εισόδους και μια έξοδο. Η μία είσοδος είναι το σήμα ρολογιού ενώ η δεύτερη η διεύθυνση μνήμης των ζητούμενων προς ανάγνωση δεδομένων. Η έξοδος είναι προφανώς τα δεδομένα ανάγνωσης. Για την υλοποίηση της φάσης των ημιτόνων αναφοράς σχεδιάστηκε ένα σύστημα το οποίο οδηγεί την είσοδο διευθύνσεων της μνήμης με τον κατάλληλο ρυθμό ώστε να επιτυγχάνεται κάθε φορά η κατάλληλη συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ένας μετρητής για κάθε ένα από τα τρία Block μνήμης ο οποίος αυξάνεται με βήμα 1 και μεταβάλλεται από τη χαμηλότερη διεύθυνση της μνήμης έως την υψηλότερη. Ο ρυθμός αύξησης του μετρητή προκύπτει έτσι ώστε το χρονικό διάστημα της μετάβασης από την χαμηλότερη διεύθυνση στην υψηλότερη να είναι ίσο με την επιθυμητή περίοδο της αναφοράς. Αυτό πραγματοποιείται αυξάνοντας τον μετρητή κάθε ένα συγκεκριμένο και σταθερό χρονικό διάστημα ανάλογο της περιόδου του σήματος αναφοράς. Το χρονικό διάστημα αυτό υλοποιείται με ακόμη έναν μετρητή, ο οποίος αυξάνεται σε κάθε θετική ακμή του ρολογιού μετρώντας ουσιαστικά τον χρόνο με βάση την περίοδο του ρολογιού. Μόλις ο μετρητής πάρει την κατάλληλη τιμή, σηματοδοτώντας ότι παρήλθε το απαραίτητο χρονικό διάστημα, οι

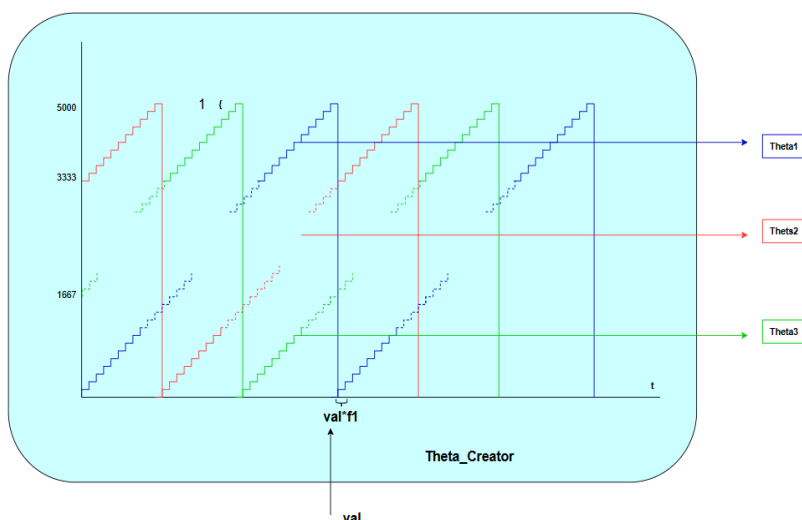
μετρητές των τριών φάσεων αυξάνονται κατά ένα. Η μέγιστη αυτή τιμή του μετρητή υπολογίζεται ως εξής:

$$val = \frac{T}{5000 * T_1} = \frac{f_1}{5000 * f} = \frac{20000}{f} = \frac{200000}{f'} \quad (4.14)$$

όπου f_1 η συχνότητα του ρολογιού και 5000 ο αριθμός διευθύνσεων της μνήμης. Ο υπολογισμός της γίνεται στον επεξεργαστή κάθε φορά που αλλάζει η αναφορά και η τιμή val μεταφέρεται στο FPGA μέσω του διαύλου AXI BUS.



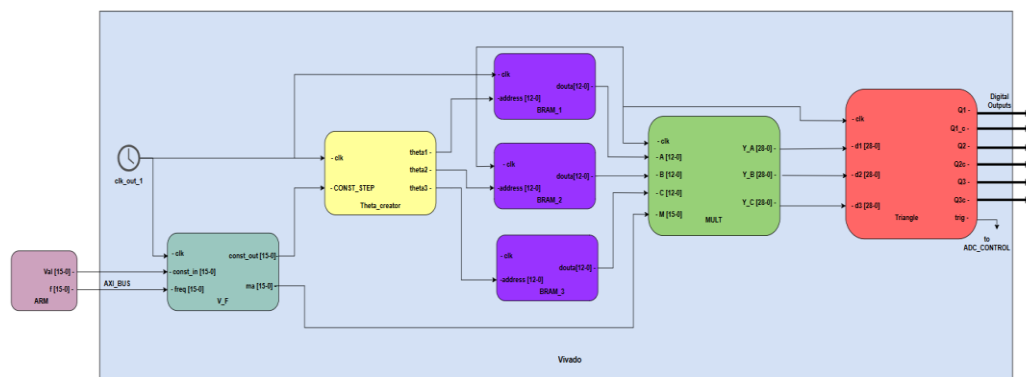
Εικόνα 4.11: Απεικόνιση επικοινωνίας με χρήστη και υπολογισμός παραμέτρων ελέγχου.



Εικόνα 4.12: Απεικόνιση μετρητών υλοποίησης της φάσης των ημιτόνων αναφοράς

Στην **Εικόνα 4.11** απεικονίζεται η επικοινωνία με τον χρήστη και η μεταφορά των δεδομένων στο Vivado ενώ στην **Εικόνα 4.12** η υλοποίηση των μετρητών φάσης των ημιτόνων. Συνολικά όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως υλοποιούνται όπως απεικονίζονται στην **Εικόνα 4.13**. Η αναφορά συχνότητας και η τιμή val μεταφέρονται μέσω του AXI BUS στο υποσύστημα V_F όπου γίνεται ο υπολογισμός του ma . Η τιμή val μεταφέρεται αυτούσια στο υποσύστημα Theta_creator όπου υλοποιούνται οι μετρητές των διευθύνσεων μνήμης. Κάθε μια από τις τρεις διευθύνσεις οδηγείται στην αντίστοιχη μνήμη, έξοδος της οποίας είναι ένα δείγμα ημιτόνου. Τα δείγματα αυτά μαζί με την τιμή του ma αποτελούν της εισόδους του υποσυστήματος MULT, στο οποίο κάθε δείγμα πολλαπλασιάζεται με την τιμή του ma . Από εκεί οι τελικές τιμές των αναφορών των τριών φάσεων μεταφέρονται στο υποσύστημα Triangle

όπου υλοποιείται το κοινό φέρον τρίγωνο και γίνονται οι συγκρίσεις μεταξύ των αναφορών και του φέροντος. Έξοδος του υποσυστήματος είναι οι έξι παλμοί οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα οι οποίοι είναι διαθέσιμοι μέσω ισάριθμων ψηφιακών εξόδων του FPGA.

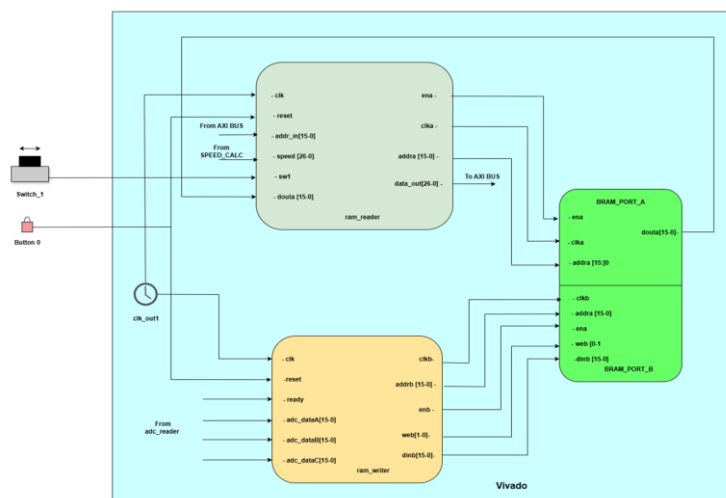


Εικόνα 4.13: Περιγραφική απεικόνιση συστήματος οδήγησης με σταθερό λόγω τάσης προς συχνότητα.

4.5 Μεταφορά Μετρήσεων στον Χρήστη

Στις παραπάνω παραγράφους αναλύθηκε η υλοποίηση των συστημάτων μέτρησης της ταχύτητας και τον ρευμάτων. Οι μετρήσεις αυτές βρίσκονται στο περιβάλλον Vivado χωρίς να είναι άμεσα διαθέσιμες στον χρήστη. Για την επαλήθευση της λειτουργίας των συστημάτων οι μετρήσεις αυτές θα πρέπει να μεταφερθούν στον επεξεργαστή και να απεικονισθούν μαζί με μετρήσεις άλλων μετρητικών οργάνων. Για την επικοινωνία μεταξύ του επεξεργαστή και του FPGA στα προηγούμενα χρησιμοποιήθηκε ο διάυλος AXI BUS ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα υλοποίηση. Μια νέα μέτρηση της ταχύτητας είναι διαθέσιμη κάθε 2 ms ενώ τρεις νέες τιμές των ρευμάτων είναι διαθέσιμες κάθε 10 us. Εξαιτίας των τριών μετρήσεων ρευμάτων σε κάθε διάστημα 10 us, αλλά και του μικρού μεγέθους αυτού του διαστήματος επιλέχθηκε η αποθήκευση των μετρήσεων σε ένα block μνήμης BRAM στο περιβάλλον Vivado και η ανάγνωση των δεδομένων σε δεύτερο χρόνο από τον χρήστη μέσω του διαύλου AXI BUS. Για τη λειτουργία της αποθήκευσης αναπτύχθηκε ένα block μνήμης BRAM σε λειτουργία Standalone και τύπο μνήμης True Dual Port RAM με 65535 θέσεις μνήμης. Η μία θύρα της μνήμης προσφέρεται για γραφή και διαθέτει ως εισόδους τα δεδομένα γραφής, τη θέση μνήμης στην οποία θα αποθηκευτούν αυτά και τα σήματα ελέγχου enb και web. Το πρώτο θέτει σε λειτουργία την θύρα ενώ το δεύτερο ενεργοποιεί την λειτουργία γραφής. Η δεύτερη θύρα, διαθέτει μια είσοδο για την διεύθυνση μνήμης προς ανάγνωση, ένα σήμα enb και το σήμα ρολογιού, έξοδο της αποτελούν τα δεδομένα προς ανάγνωση. Για την γραφή στην μνήμη αναπτύχθηκε το υποσύστημα ram_writer το οποίο δέχεται ως είσοδο τις

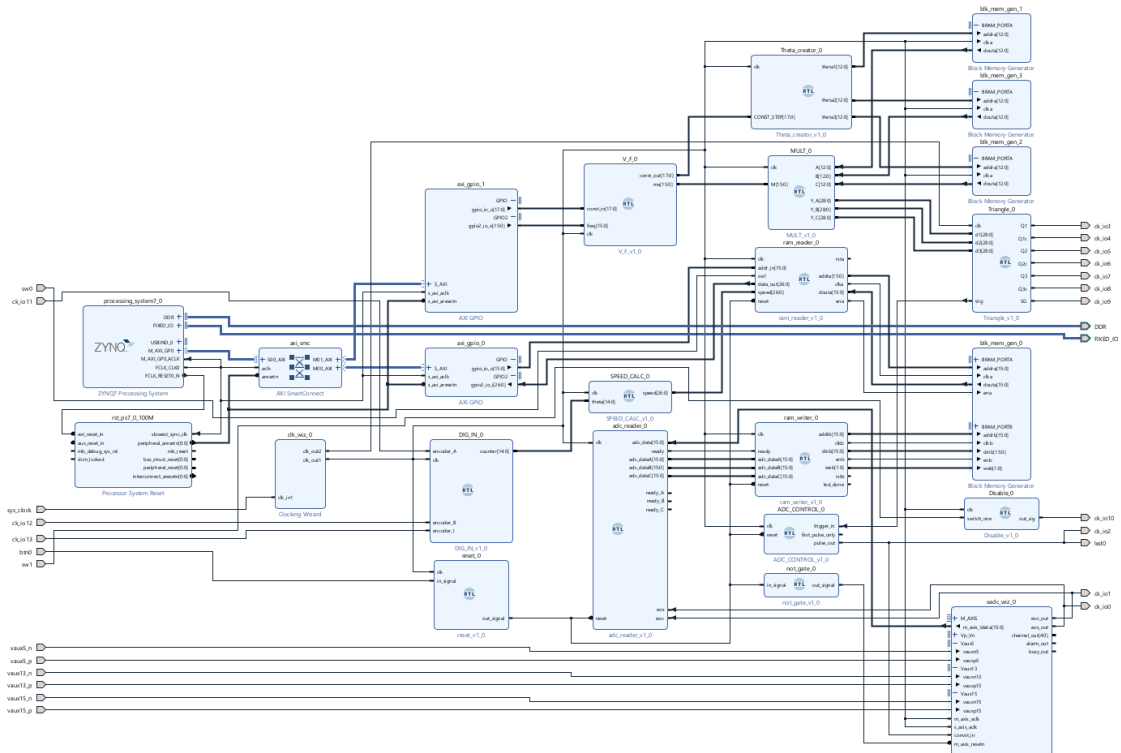
τρεις μετρήσεις των ρευμάτων ,το σήμα ready, το σήμα ρολογιού και το γενικό reset. Οι έξοδοι του οδηγούν τις αντίστοιχες εισόδους της θύρας γραφής της μνήμης. Το υποσύστημα αυτό μόλις το σήμα ready γίνει true διαβάσει τις τρεις τιμές των ρευμάτων και έπειτα αποθηκεύει σε διαδοχικές θέσεις της μνήμης τις τρεις τιμές χρησιμοποιώντας δύο μετρητές, έναν για την διεύθυνση της μνήμης και έναν για την επιλογή της εκάστοτε εκ των τριών μέτρησεων προς αποθήκευση. Το σήμα reset μηδενίζει τον μετρητή διεύθυνσης και επανεκκινεί την διαδικασία αποθήκευσης. Προφανώς τα σήματα enb και web ενεργοποιούνται ώστε να είναι η μνήμη διαθέσιμη για γραφή. Για την ανάγνωση από την μνήμη αναπτύχθηκε το υποσύστημα ram_reader με εισόδους την διεύθυνση μνήμης προς ανάγνωση, τα δεδομένα ανάγνωσης, το σήμα reset και το σήμα ρολογιού. Οι έξοδοι της είναι τα δεδομένα ανάγνωσης που συνδέονται με τον διάυλο AXI_BUS για να μεταφερθούν στο περιβάλλον Vitis και τα σήματα εισόδου της θύρας γραφής της μνήμης. Η είσοδος διεύθυνσης του υποσυστήματος συνδέεται με τον διάυλο AXI_BUS, από όπου μεταφέρονται σε αυτό οι διευθύνσεις που είναι επιθυμητό να αναγνωσθούν. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή το σήμα αυτό έχει τεθεί να μεταβάλλεται από την ελάχιστη διεύθυνση έως την μέγιστη οδηγώντας έτσι στην ανάγνωση όλων των δεδομένων της μνήμης. Η διεύθυνση συνδέεται με τη μνήμη και τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε αυτή την διεύθυνση οδηγούνται πίσω στο υποσύστημα. Εξαιτίας της ξεχωριστής απεικόνισης στο τερματικό των τιμών των ρευμάτων και της ταχύτητας επιλέχθηκε αυτά να μεταφέρονται μέσω του ίδια καναλιού του AXI BUS. Η επιλογή θα γίνεται μέσω της τιμής του διακόπτη sw1 του Arty z7-10. Για την υλοποίηση των παραπάνω προστέθηκαν στο υποσύστημα ram_reader δύο ακόμα σήματα η τιμή του διακόπτη και η μέτρηση της ταχύτητας. Έτσι ανάλογα με την επιλεγμένη θέση του διακόπτη, το σήμα δεδομένων εξόδου του υποσυστήματος μεταφέρει είτε τις μετρήσεις ρεύματος είτε τη μέτρηση της ταχύτητας. Οι διασύνδεση των υποσυστημάτων απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.14**



Εικόνα 4.14: Περιγραφική απεικόνιση μεταφοράς δεδομένων στο περιβάλλον Vitis.

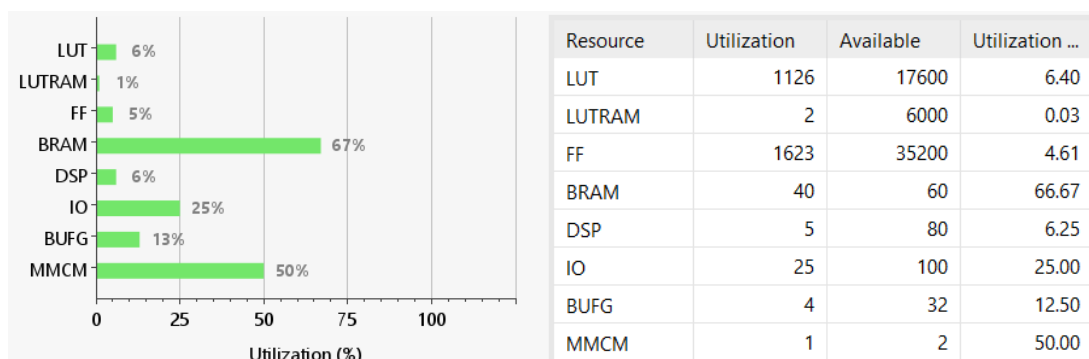
4.6 Αποτελέσματα Υλοποίησης

Το τελικό διάγραμμα με όλα τα υποσυστήματα της σχεδίασης και την σύνδεση με τα περιφερειακά της πλατφόρμας ανάπτυξης φαίνεται στην **Εικόνα 4.15**.

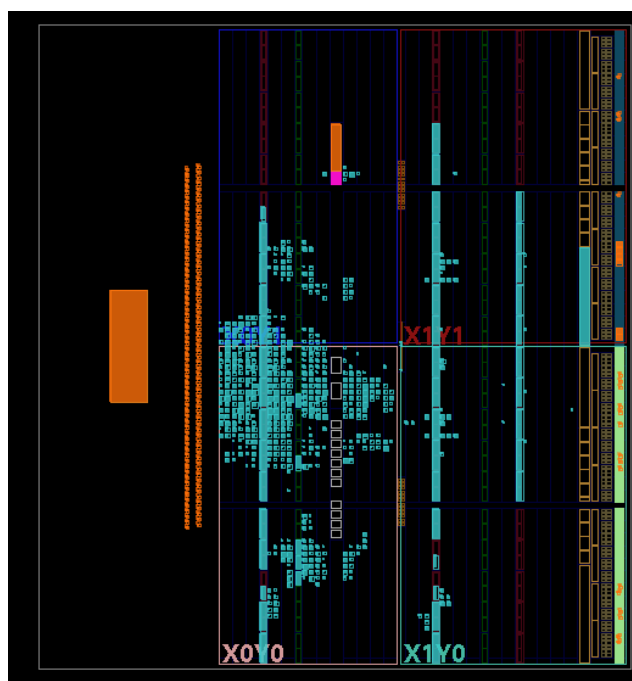


Εικόνα 4.15: Τελικό διάγραμμα υποσυστημάτων στο περιβάλλον Vivado.

Η ποσοτική και ποσοστιαία χρησιμοποίηση των πόρων του FPGA απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.16**. Αξιοσημείωτη είναι η χρήση σε μεγάλο ποσοστό της μνήμης BRAM αλλά και η μικρή χρησιμοποίηση Look Up Tables (LUT). Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.17**, όπου απεικονίζεται η τελική διαμόρφωση της προγραμματιζόμενης λογικής στο υλικό, υπάρχουν ακόμη μεγάλα περιθώρια για ανάπτυξη και επέκταση της προγραμματιζόμενης λογικής.

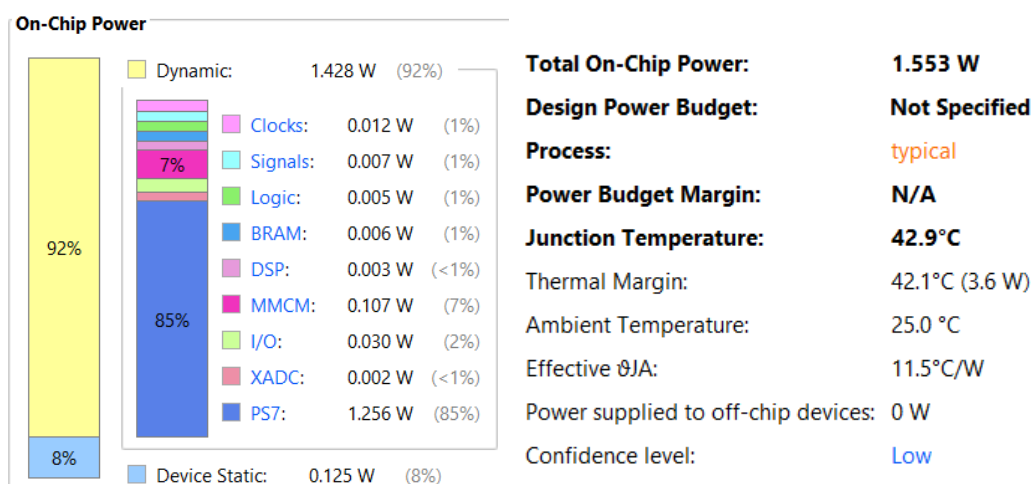


Εικόνα 4.16: Χρησιμοποίηση πόρων FPGA.



Εικόνα 4.17: Απεικόνιση υλοποίησης προγραμματιζόμενης λογικής στο υλικό.

Τέλος η **Εικόνα 4.18** απεικονίζει τους υπολογισμούς για την κατανάλωση ισχύος και την θερμοκρασία. Προκύπτει ότι η συνολική κατανάλωση ισχύος του σχεδιασμού είναι 1.553 W, με το μεγαλύτερο μέρος (85%) να προέρχεται από τον επεξεργαστή (PS7). Η συμβολή της προγραμματιζόμενης λογικής είναι μικρή (<10%), με τον MMCM (Mixed Mode Clock Manager) να εμφανίζει το πιο σημαντικό μερίδιο (7%). Η θερμοκρασία λειτουργίας παραμένει χαμηλή (42.9 °C), με σημαντικό θερμικό περιθώριο, συνεπώς δεν υπάρχουν θέματα υπερθέρμανσης.



Εικόνα 4.18: Υπολογισμοί κατανάλωσης ισχύος και θερμοκρασίας .

5 Πειραματικές Μετρήσεις

Μετά την κατασκευή του μετρητικού συστήματος και την υλοποίηση της προγραμματιζόμενης λογικής σειρά έχει η πειραματική επιβεβαίωση της λειτουργίας της. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία οδήγησης μιας μηχανής με έλεγχο σταθερής τάσης προς συχνότητα και η μέτρηση των ρευμάτων της ταχύτητας αλλά και της φασικής τάσεως της μηχανής.

5.1 Πειραματική Διάταξη

5.1.1 Μηχανή Επαγωγής

Για τις μετρήσεις ρευμάτων και ταχύτητας και την οδήγηση με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή επαγωγής του εργαστηρίου Ηλεκτρονικών ισχύος. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του απεικονίζονται στον Πίνακα 5.1 [24]

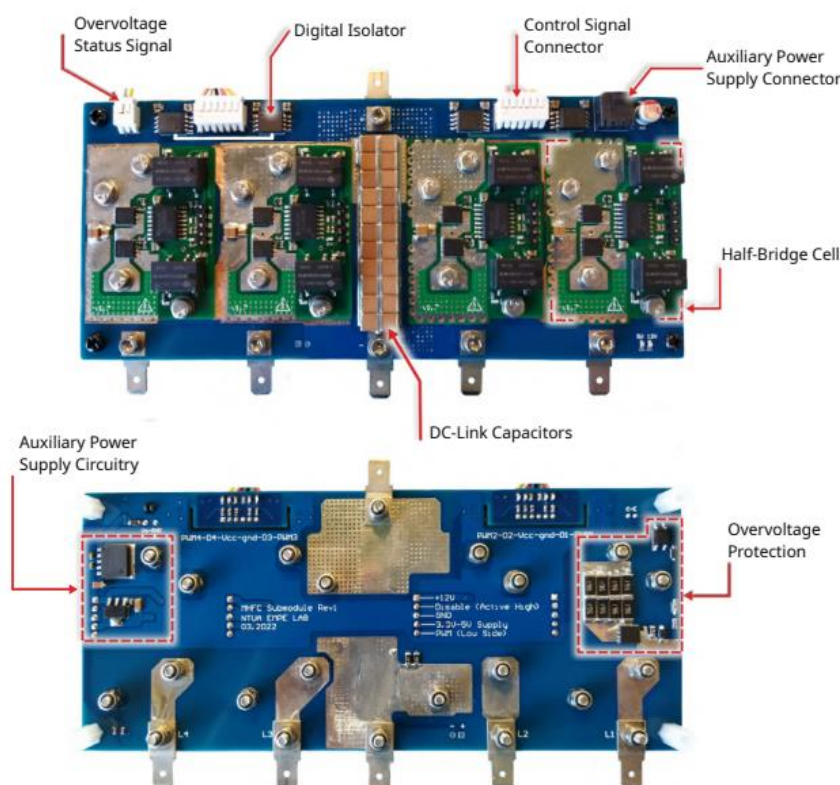
Παράμετρος	Τιμή
P_{mN}	1.47 kW
$V_N (RMS)$	230 V
$I_N (RMS)$	3.6 A
p (πόλοι)	50 Hz
n_N	1410 RPM
J	0.01 kg * m ²
R_s	6.5746 Ω
R_R	2.1060 Ω
L_M	0.3354 H
L_σ	0.0416 H

Πίνακας 5.1: Παράμετροι μηχανής επαγωγής εργαστηρίου [24].

5.1.2 Το εργαστηριακό πρωτότυπο MHFC

Για την οδήγηση της μηχανής χρησιμοποιήθηκε το εργαστηριακό πρωτότυπο MHFC που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [12]. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από τρεις υποομάδες κάθε μια από τις οποίες διαθέτει τέσσερις ημιγέφυρες δίνοντας έτσι την δυνατότητα συνδεσμολόγησης της με διαφορετικούς τρόπους. Οι δύο

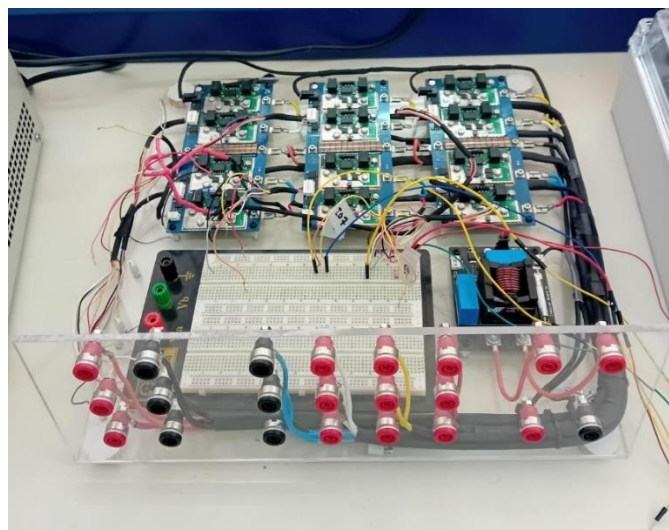
πλευρές μιας υπομονάδας απεικονίζονται στην **Εικόνα 5.1**. Όταν η υπομονάδα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση τριφασικού φορτίου οι τρεις ημιγέφυρες χρησιμοποιούνται σε συνδεσμολογία τριφασικού μετατροπέα ενώ η τέταρτη για τον έλεγχο της συνεχούς τάσης εισόδου. Ακόμη μπορούν ανά δύο να σχηματίσουν μονοφασικούς μετατροπείς πλήρους γέφυρας.



Εικόνα 5.1:Ανω και κάτω όψεις υπομονάδας.

Ο μετατροπέας έχει ονομαστική ισχύ $P_N = 1 \text{ kW}$ διατοπική συχνότητα $f_s = 100 \text{ kHz}$ ενώ η ονομαστική τάση πυκνωτών συνεχούς ρεύματος κάθε υπομονάδας είναι $V_{DC} = 100 \text{ V}$. Η συνεχής πλευρά κάθε υπομονάδας αποτελείται από 22 πυκνωτές με ονομαστικά μεγέθη: $V_N = 100 \text{ V}$, $C = 10 \text{ uF}$. Παρά το γεγονός πως η ονομαστική τιμή της συνολικής χωρητικότητας προκύπτει ίση με $C_N = 220 \text{ uF}$ λόγω της μείωσης της χωρητικότητας όταν εφαρμόζεται τάση αυτή προκύπτει να έχει τιμή 48.4 uF στα 100 V [13]. Κατά την σχεδίαση του μετατροπέα έχει υλοποιηθεί η ύπαρξη νεκρού χρόνου $t_{DT} = 100 \text{ ns}$ μεταξύ των μεταβάσεων των διακοπών με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να υλοποιηθεί στο υποσύστημα διαμόρφωσης. Επίσης κάθε υπομονάδα δέχεται μόνο έναν παλμό οδήγησης ανά ημιγέφυρα με τον δεύτερό παράγεται ως συμπληρωματικός του πρώτου εσωτερικά στα κυκλώματα οδήγησης των πυλών των διακοπών. Μεταξύ της εισόδου και των υπομοναδων συνδέεται σε

σειρά ένα πηνίο 65 mH με πυρήνα τύπου φερριτή (MnZn) το οποίο κατασκευάστηκε σε ξεχωριστή πλακέτα, το πηνίο αυτό δεν θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εφαρμογή.



Εικόνα 5.2 : Εργαστηριακό πρωτότυπο μετατροπέα MHFC.

5.1.3 Τάσεις Τροφοδοσίας

Για το παρόν πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τάσεις τροφοδοσίας προερχόμενες από τρία κλασσικά εργαστηριακά τροφοδοτικά, δύο εξ αυτών με δύο κανάλια και ένα με μόνο ένα.

- **Τάση πλευράς ΣΡ του τριφασικού μετατροπέα :** Η τάση αυτή τέθηκε στα 50 V μισή δηλαδή της ονομαστικής. Προήλθε συνδέοντας σε σειρά τα δύο κανάλια του τροφοδοτικού με μέγιστη τάση εξόδου 30 V ανά κανάλι.
- **Τάση τροφοδοσίας Μετρητικού συστήματος :** Η τάση αυτή επιλέχθηκε ίση με 24 V και προήλθε από το τροφοδοτικό ενός καναλιού με μέγιστη τάση εξόδου 30 V
- **Τάση τροφοδοσίας Μετατροπέα :** Η βοηθητική τάση τροφοδοσίας των πλακετών του μετατροπέα τέθηκε ίση με 18 V και προήλθε από το δεύτερο τροφοδοτικό δύο καναλιών.
- **Τάση τροφοδοσίας Κωδικοποιητή ταχύτητας:** Η τάση αυτή προήλθε από το δεύτερο τροφοδοτικό δύο καναλιών και έπρεπε να είναι ίση με 12 V .

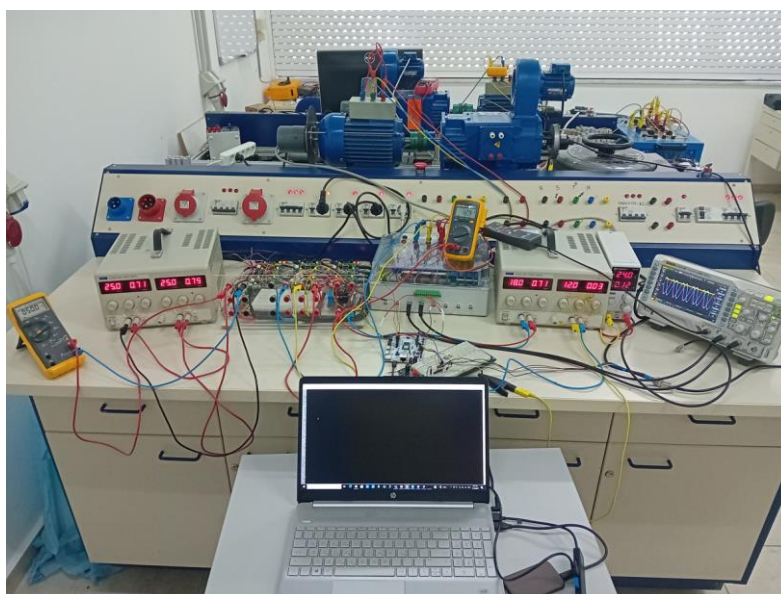
5.1.4 Μετρητικά Στοιχεία

Κατά την διάρκεια του πειράματος θα χρησιμοποιηθούν οι τρεις από τις τέσσερις πλακέτες ρεύματος για την μέτρηση των ρευμάτων των φάσεων της μηχανής και η μια πλακέτα τάσης. Σε αυτές θα μετρηθεί και η έξοδος στο εύρος $[0, 3.3]$ μέσω του FPGA αλλά και η έξοδος

στο εύρος $[-10, 10]$ μέσω παλμογράφου. Για σύγκριση των μέτρησεων ρεύματος θα χρησιμοποιηθούν και probe ρεύματος συνδεδεμένα στον παλμογράφο. Για την μέτρηση ταχύτητας πέρα από τον κωδικοποιητή που είναι απαραίτητος για την μέτρηση της ταχύτητας μέσω του FPGA θα χρησιμοποιηθεί επίσης και μια ταχογεννήτρια η οποία βρίσκεται τοποθετημένη στον ίδιο άξονα με την μηχανή και τον κωδικοποιητή. Η ανάγνωση της ταχογεννήτριας γίνεται συνδέοντας το σήμα τάσης εξόδου της σε παλμογράφο με αναλογία τάσης προς ταχύτητα ίση με $60 \frac{mV}{rpm}$. Για παρατήρηση της τάσεως του πυκνωτή ΣΡ την μέτρηση της RMS τιμής των ρευμάτων της μηχανής αλλά και διαφόρων τάσεων της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον κλασσικά πολύμετρα.

5.1.5 Συνδεσμολογία-Τελική Διάταξη

Η τελική διάταξη που αναπτύχθηκε απεικονίζεται στην **Εικόνα 5.3**. Ο υπολογιστής συνδέεται με το FPGA για την επιλογή των αναφορών και την ανάγνωση των δεδομένων στο terminal. Το FPGA δέχεται στις αναλογικές εισόδους A2 A3 A4 τα σήματα εξόδου του μετρητικού συστήματος τα οποία αφορούν τις μετρήσεις των τριφασικών ρευμάτων ενώ στις ψηφιακές εισόδους του τα τρία σήματα του κωδικοποιητή. Τρεις ψηφιακές εξοδοί του συνδέονται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων ενώ ακόμη μια ελέγχει ένα σήμα Disable του μετατροπέα το οποίο απενεργοποιεί τους παλμούς γενικά σε ολόκληρη την διάταξη. Οι τρεις φάσεις του μετατροπέα που χρησιμοποιούνται συνδέονται, αφού περάσουν μέσω του μετρητικού συστήματος, στην μηχανή η οποία είναι σε συνδεσμολογία αστέρα. Τα υπόλοιπα μετρητικά στοιχεία συνδέονται όπως περιεγράφηκε παραπάνω.



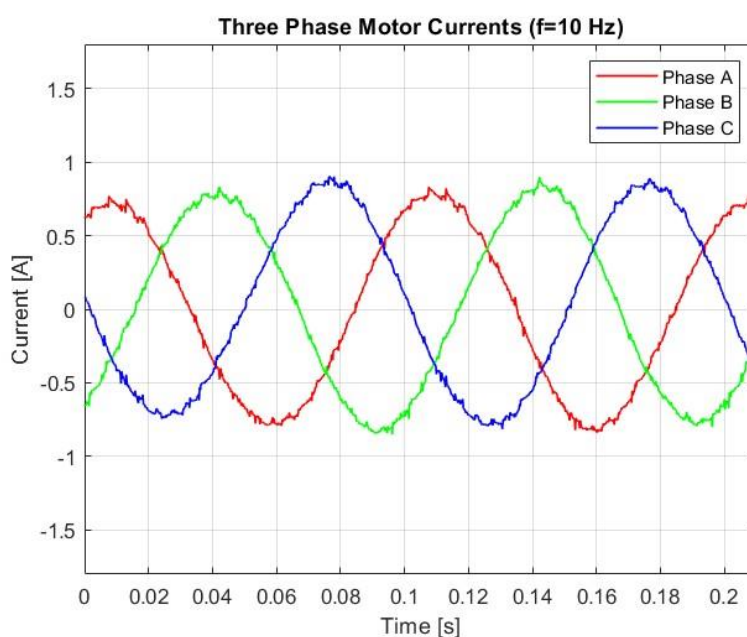
Εικόνα 5.3: Τελική πειραματική διάταξη.

5.2 Μέτρηση Ρεύματος

Μετά τη συνδεσμολογία και τον έλεγχο της διάταξης έγινε η εκκίνηση της μηχανής και λήφθηκαν οι μετρήσεις των κυριότερων μεγεθών. Στο παρόν υποκεφάλαιο απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ρεύματος και για τα δύο εύρη εξόδου των πλακετών. Για τις μετρήσεις στο εύρος $[0, 3.3]$ V χρησιμοποιήθηκε το FPGA και ο κώδικας που περιεγράφηκε παραπάνω. Αποθηκεύτηκαν στο περιβάλλον FPGA 21845 μετρήσεις ανά σήμα με χρονικό βήμα $10\ \mu s$ και ακολούθως ανακτήθηκαν στο περιβάλλον Vitis μεταγενέστερα. Για να απεικονισθούν τα τρία σήματα σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και επειδή η τύπωση στο terminal τόσο μεγάλου αριθμού μετρήσεων προκαλεί προβλήματα επιλέχθηκε να απεικονισθεί μια μέτρηση ανά 20 και συνολικά 1050 μετρήσεις ανά σήμα. Αυτό οδηγεί σε ένα χρονικό παράθυρο καταγραφής $2.1\ ms$ Για την έξοδο στο εύρος $[-10, 10]$ V χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος RIGOL DS1074Z μέσω του οποίου αποθηκεύτηκαν εικόνες και μετρήσεις από την οθόνη του αλλά και αρχεία .csv για περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων. Για τις μετρήσεις ρεύματος ο διακόπτης επιλογής εύρους ρεύματος εισόδου τέθηκε στην επιλογή των $[-3.5, 3.5]$ A.

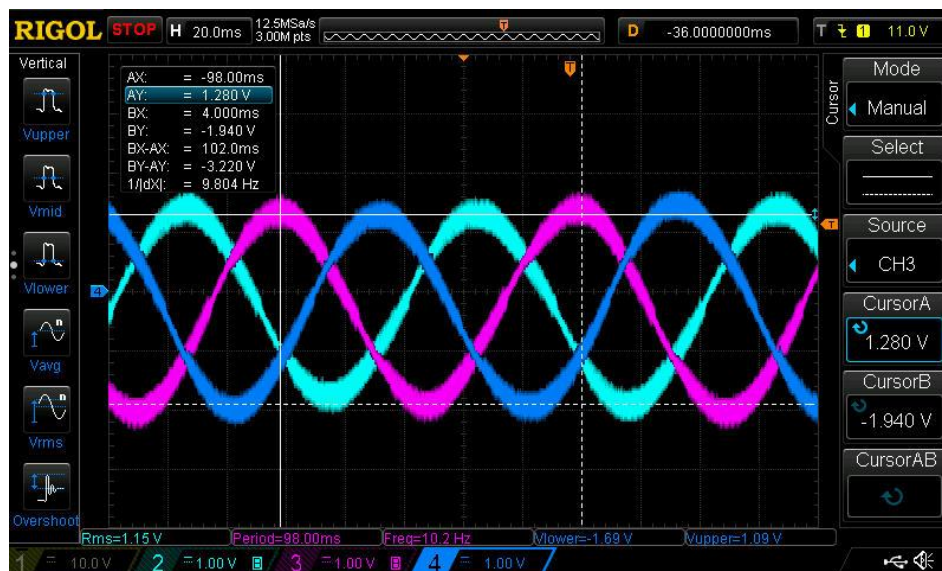
5.2.1 Οδήγηση με Συχνότητα $f=10\ Hz$

Αρχικά η μηχανή οδήγηθηκε με συχνότητα $f = 10\ Hz$ με αποτέλεσμα η μηχανή να βρίσκεται στην περιοχή εξασθένισης πεδίου.

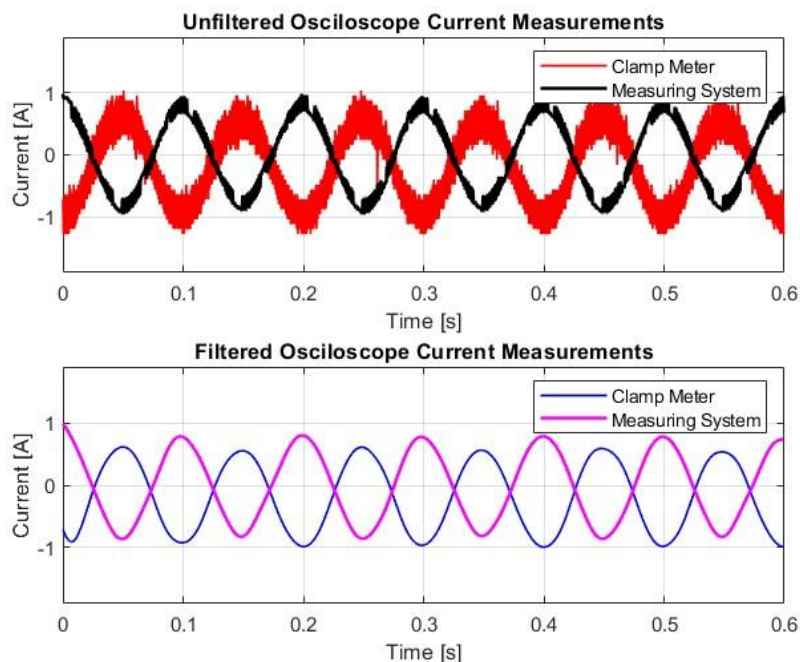


Εικόνα 5.4: Μετρήσεις τριφασικών ρευμάτων μηχανής στο FPGA για οδήγηση με συχνότητα $f=10\ Hz$

Στην **Εικόνα 5.4** απεικονίζονται οι τρεις μετρήσεις των ρευμάτων αφού έχουν εφαρμοστεί οι συναρτήσεις βαθμονόμησης πρώτου βαθμού. Απεικονίζονται 2.1 περίοδοι για κάθε σήμα με την απόλυτη τιμή του πλάτους να διαφέρει από κορυφή σε κορυφή για τα τρία σήματα. Για την φάση A θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι $I_{peak A2} = 0.773 A$



Εικόνα 5.5: Απεικόνιση τριφασικών ρευμάτων μηχανής στον παλμογράφο για οδήγηση με συχνότητα $f = 10 \text{ Hz}$.



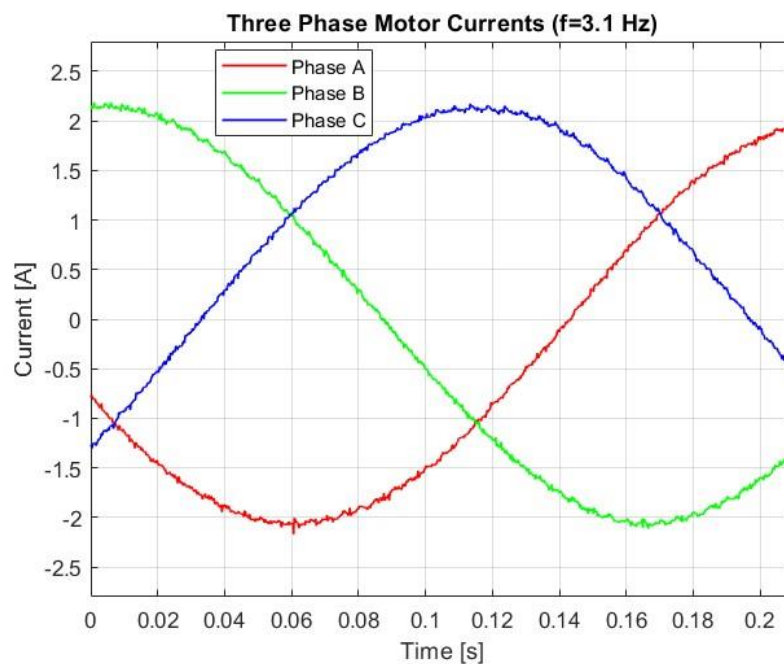
Εικόνα 5.6: Απεικόνιση ρεύματος φάσης της μηχανής στον παλμογράφο μέσω του μετρητικού συστήματος και αμπεροτσιμπίδας.

Στην **Εικόνα 5.5** απεικονίζονται οι τρεις μετρήσεις των ρευμάτων όπως φαίνονται στον παλμογράφο αφού εξέλθουν από το μετρητικό σύστημα. Για την φάση A (κανάλι 3) θα

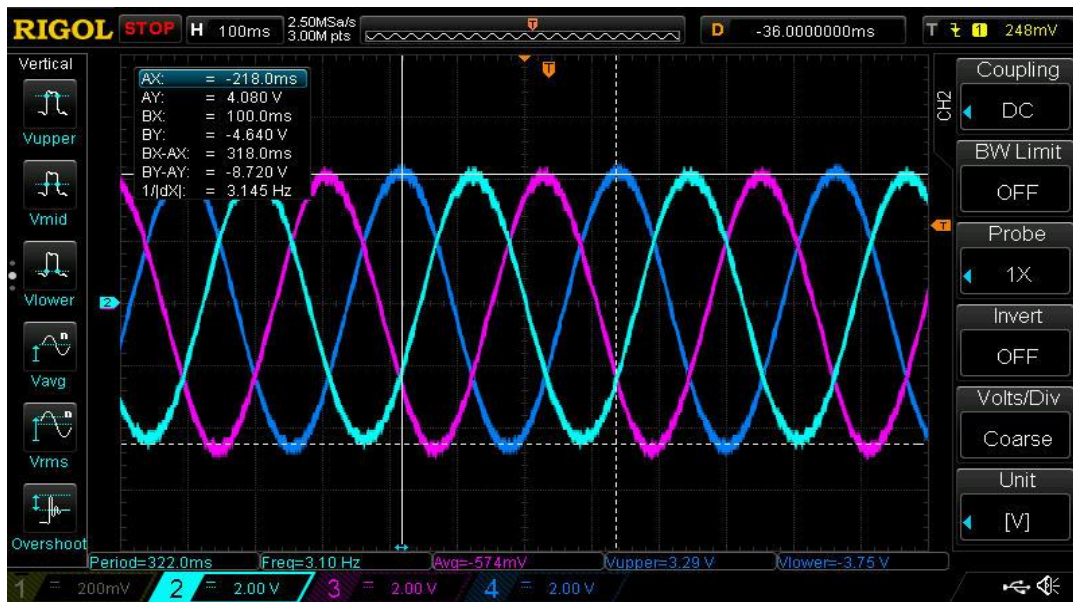
μπορούσε να μετρηθεί μέσω των κερσόρων και των συναρτήσεων βαθμονόμησης πρώτου βαθμού $I_{peak\ A2} = 0.7695\ A$. Η τιμή αυτή μετρήθηκε στο μέσο της κυμάτωσης σε μια κορυφή του σήματος. Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω μετρήσεις είναι εμφανές πως στον παλμογράφο απεικονίζεται κυμάτωση λόγω των διακοπτικών μεταβάσεων και θορύβου ενώ οι ADCs φιλτράρουν σε μεγάλο βαθμό αυτές τις συνιστώσες. Στην **Εικόνα 5.6** απεικονίζονται οι μετρήσεις του ρεύματος της φάσης B μέσω του μετρητικού συστήματος και μιας αμπεροτσιμπήδας αφού πρώτα εφαρμόστηκε στην πρώτη η συνάρτηση βαθμονόμησης πρώτου βαθμού και στην δεύτερη ο πολλαπλασιαστής αναλογίας A/V του οργάνου. Τα σήματα αυτά φιλτραρίστηκαν στο περιβάλλον MATLAB μέσω ενός φίλτρου Butterworth 4^{ου} βαθμού και συχνότητας αποκοπής $100\ Hz$. Η μέτρηση του συστήματος δίνει $I_{B\ peak\ 1} = 0.8265\ A$ ενώ η μέτρηση της αμπεροτσιμπήδας $I_{B\ peak\ 2} = 0.783\ A$. Το πλάτος της αμπεροτσιμπήδας υπολογίστηκε ως το ημιάθροισμα της απόλυτης τιμής δυο συνεχόμενων ακροτάτων καθώς η μέτρηση της παρουσιάζει σημαντική μετατόπιση της μηδενικής στάθμης.

5.2.2 Οδήγηση με Συχνότητα $f=3.1\ Hz$

Έπειτα η μηχανή οδηγήθηκε με συχνότητα $f = 3.1\ Hz$ η οποία βρίσκεται στην γραμμική περιοχή της καμπύλης V-f του ελέγχου. Στη συνέχεια απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις των ρευμάτων και από τις δύο εξόδους της πλακέτας, στην **Εικόνα 5.7** η μέτρηση στο FPGA και στο **Εικόνα 5.8** η μέτρηση στον παλμογράφο.

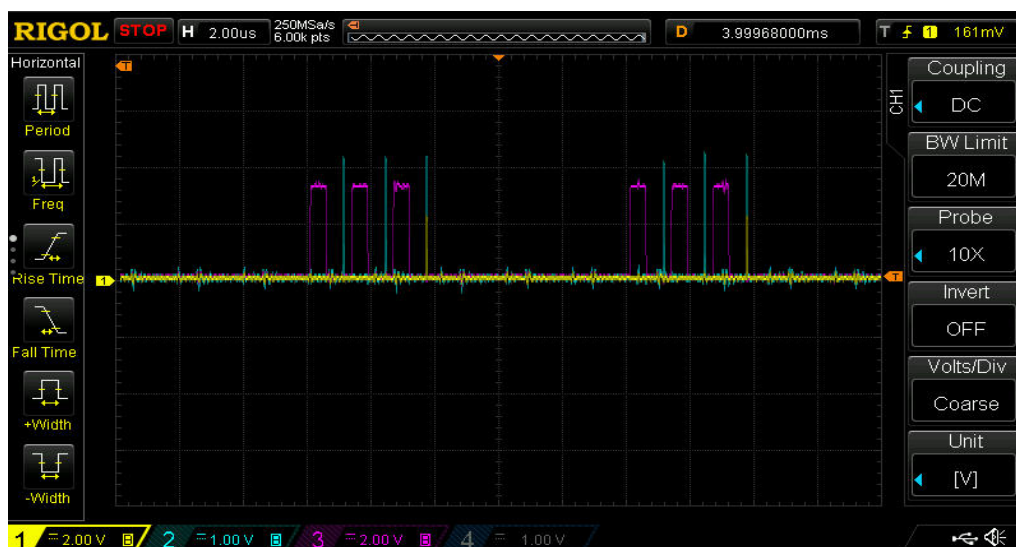


Εικόνα 5.7: Μετρήσεις τριφασικών ρευμάτων μηχανής για οδήγηση με συχνότητα $f=3.1\ Hz$.



Εικόνα 5.8: Απεικόνιση τριφασικών ρευμάτων μηχανής στον παλμογράφο για οδήγηση με συχνότητα $f = 3.1 \text{ Hz}$.

Για την μέτρηση των ρευμάτων χρησιμοποιήθηκαν και πάλι οι συναρτήσεις βαθμονόμησης πρώτου βαθμού. Αυτές έχουν εφαρμοστεί στις μετρήσεις μέσω του FPGA που απεικονίζονται στην **Εικόνα 5.7** ενώ τα δεδομένα στην **Εικόνα 5.8** απεικονίζονται όπως εξέρχονται από το μετρητικό σύστημα. Από την πρώτη μέτρηση προκύπτει το πλάτος του ρεύματος της φάσης C ίσο με $I_{peak1} = 2.13 \text{ A}$ ενώ από την δεύτερη αφού εφαρμοστεί η συνάρτηση βαθμονόμησης ίσο με $I_{peak1} = 2.09988 \text{ A}$. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζονται και τα σήματα που σχετίζονται με την λειτουργία του ADC και περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 5.9: Σήματα λειτουργία ADC: Σήμα convst_in(μωβ), σήμα eos (τιρκουάζ), σήμα eos (χίτρινο).

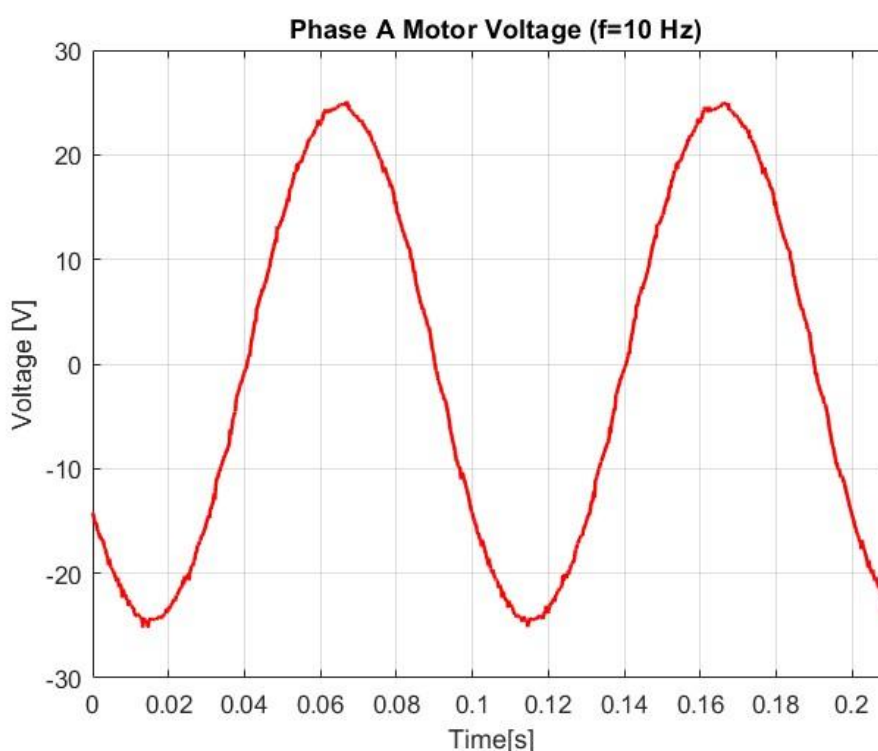
5.3 Μέτρηση Τάσης

Στην διαμόρφωση της προγραμματιζόμενης λογικής που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν αναπτύχθηκε σύστημα μέτρησης της τάσης παρόλα αυτά έγινε μέτρηση της μέσω του συστήματος μέτρησης των ρευμάτων. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε για να επιβεβαιωθεί η λειτουργία του ελέγχου με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητας αλλά και για να εξεταστεί η λειτουργία των πλακετών τάσης. Πιο συγκεκριμένα μετρήθηκε η τάση της φάσης Α ως προς τον κόμβο αναφοράς του αστέρα ακριβώς πάνω στον ακροδέκτη της μηχανής μέσω της πλακέτας V3.

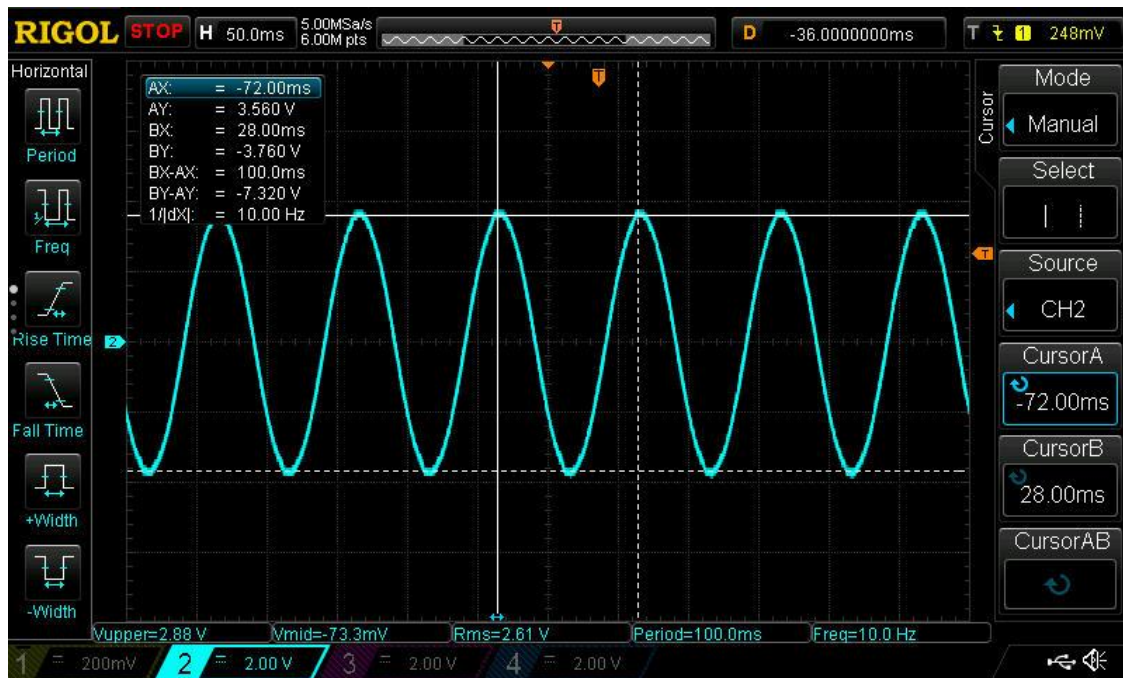
5.3.1 Οδήγηση με Συχνότητα $f=10$ Hz

Οι μετρήσεις γίνανε για τις ίδιες αναφορές οδήγησης με τις μετρήσεις ρεύματος. Στην συχνότητα των 10 Hz η μηχανή βρίσκεται στην περιοχή εξασθένισης πεδίου όποτε αναμένεται η τάση να έχει κορεστεί στην μέγιστη τιμή της δηλαδή:

$$V_{A\text{ peak}} = \frac{V_{DC}}{2} = 25\text{ V}$$



Εικόνα 5.10 Μέτρηση φασικής τάσης Α για οδήγηση με συχνότητα $f=10$ Hz.



Εικόνα 5.11 Απεικόνιση φασικής Τάσης Α στον παλμογράφο για οδήγηση με συχνότητα $f=10$ Hz.

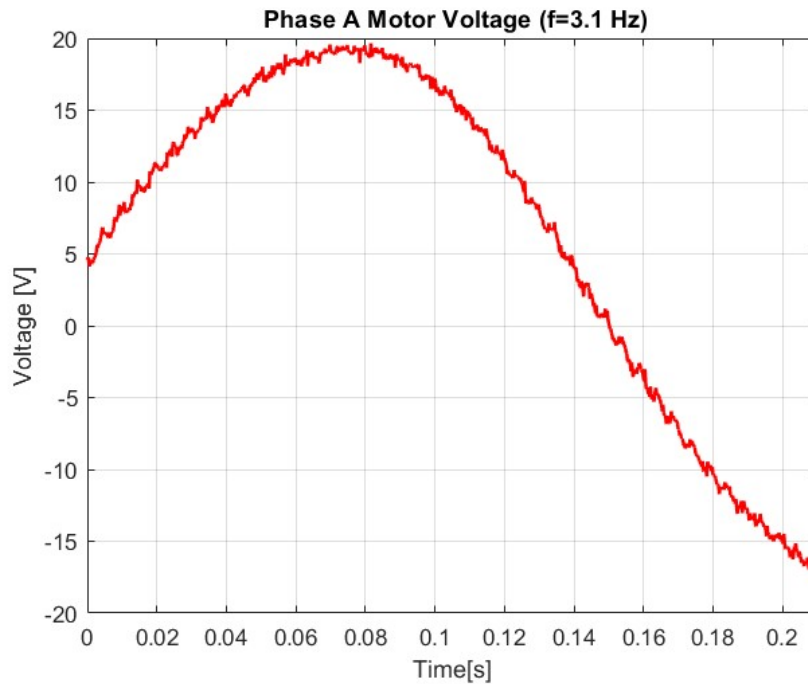
Η **Εικόνα 5.10** απεικονίζει την μέτρηση που έγινε μέσω του FPGA αφού εφαρμόστηκε η συνάρτηση βαθμονόμησης πρώτου βαθμού για την πλακέτα V3 στο εύρος εισόδου $[-40, 40]V$. Το πλάτος της τάσης προκύπτει ίσο με $V_{A\text{peak}1} = 24.7187 V$. Η **Εικόνα 5.11** απεικονίζει την μέτρηση της τάσης στον παλμογράφο από την δεύτερη έξοδο στο εύρος $[-10, 10]V$. Αφού εφαρμοστεί η αντίστοιχη συνάρτηση βαθμονόμησης πρώτου βαθμού προκύπτει $V_{A\text{peak}2} = 25.3644 V$.

5.3.2 Οδήγηση με Συχνότητα $f=3.1$ Hz

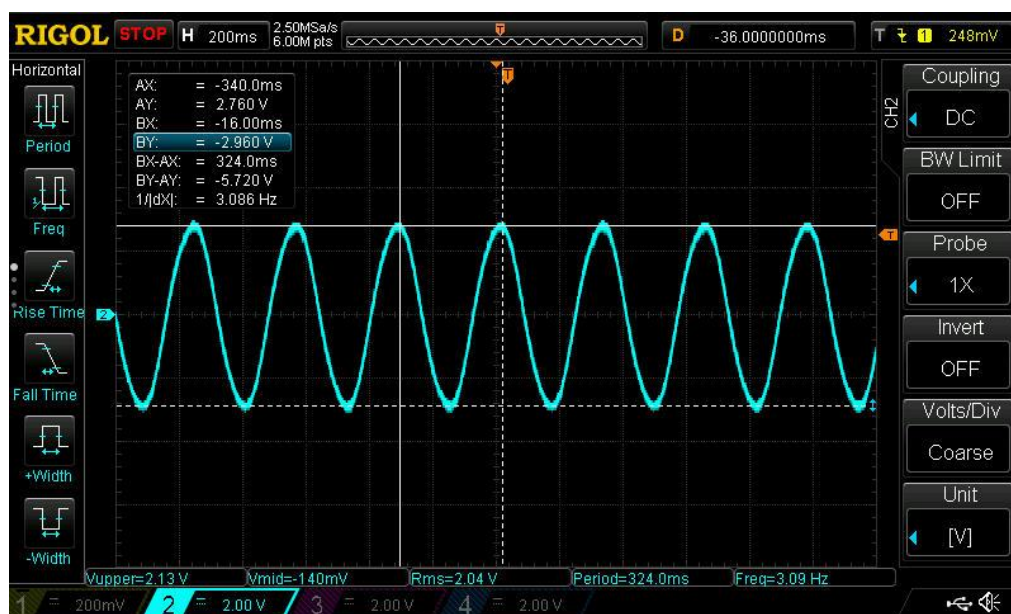
Στην συχνότητα αυτή ισχύει η γραμμική σχέση τάσης συχνότητας όποτε από τις σχέσεις (4.11) και (4.12) προκύπτει:

$$V_{A\text{peak}} = 6.5 * f = 20.15 V$$

Η **Εικόνα 5.12** απεικονίζει την μέτρηση μέσω του FPGA αφού έγινε η βαθμονόμηση με την συνάρτηση πρώτου βαθμού. Η μέγιστη τιμή της τάσης προκύπτει ίση με $V_{A\text{peak}1} = 19.5734 V$. Από την μέτρηση μέσω του παλμογράφου που παρατίθεται στην **Εικόνα 5.13** προκύπτει ότι $V_{A\text{peak}2} = 20.007 V$



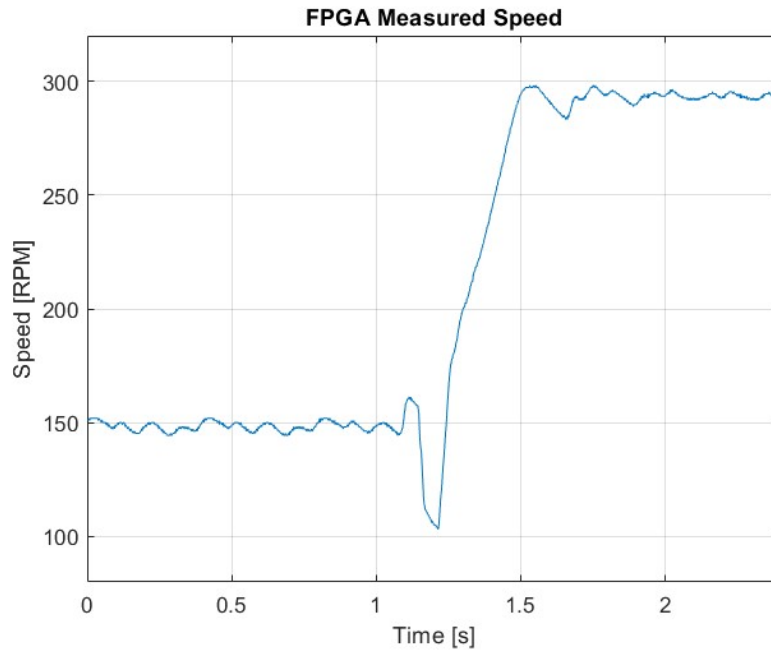
Εικόνα 5.12: Μέτρηση φασικής τάσης Α για οδήγηση με συχνότητα $f=3.1$ Hz.



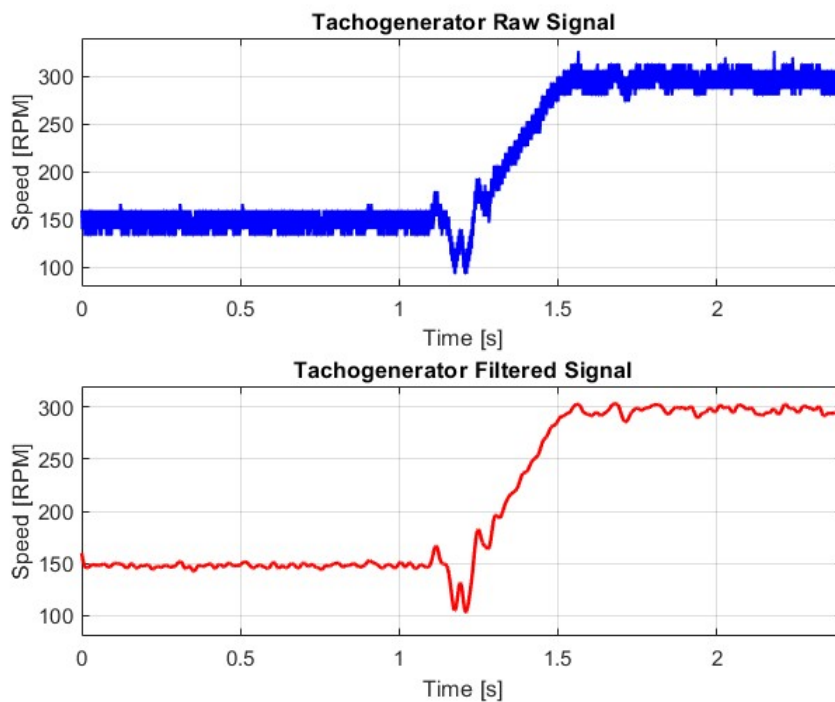
Εικόνα 5.13: Απεικόνιση φασικής Τάσης Α στον παλμογράφο για οδήγηση με συχνότητα $f=3.1$ Hz.

5.4 Μέτρηση Ταχύτητας

Για την επιβεβαίωση του συστήματος μέτρησης ταχύτητας και σε μεταβατικές καταστάσεις της μηχανής επιλέχθηκε να μετρηθεί η μετάβαση από την ταχύτητα των 150 rpm σε αυτή των 300 rpm . Η μέτρηση αυτή μέσω του FPGA απεικονίζεται στην **Εικόνα 5.14**.



Εικόνα 5.14: Μέτρηση ταχύτητας στην μετάβαση από τις 150 RPM στις 300 RPM.



Εικόνα 5.15: Μέτρηση ταχύτητας στην μετάβαση από τις 150 RPM στις 300 RPM μέσω της ταχογεννήτριας

Η μέτρηση της ταχύτητας πραγματοποιήθηκε και μέσω της ταχογεννήτριας που περιεγράφηκε προηγουμένως. Το σήμα της ταχογεννήτριας συνδέθηκε στον παλμογράφο από όπου έγινε εξαγωγή σε .csv αρχείο και επεξεργάστηκε στο περιβάλλον MATLAB. Το σήμα αυτό παρουσιάζεται αυτούσιο αλλά και έπειτα από την εισαγωγή του σε ένα φίλτρο

Butterworth 4^{ης} τάξη και συχνότητας αποκοπής 40 Hz στην **Εικόνα 5.15**. Για τον υπολογισμό και της ολίσθησης της μηχανής μετρήθηκε η ταχύτητα με την αναφορά της σταθερά στις **300 RPM**. Η απεικόνιση της ταχύτητας φαίνεται στην **Εικόνα 5.16**. Ο τύπος που δίνει την ολίσθηση είναι ο εξής

$$s = \frac{n_{ref} - n}{n_{ref}} \quad 5.1$$

όπου :

$$n_{ref} = 300 \text{ RPM}$$

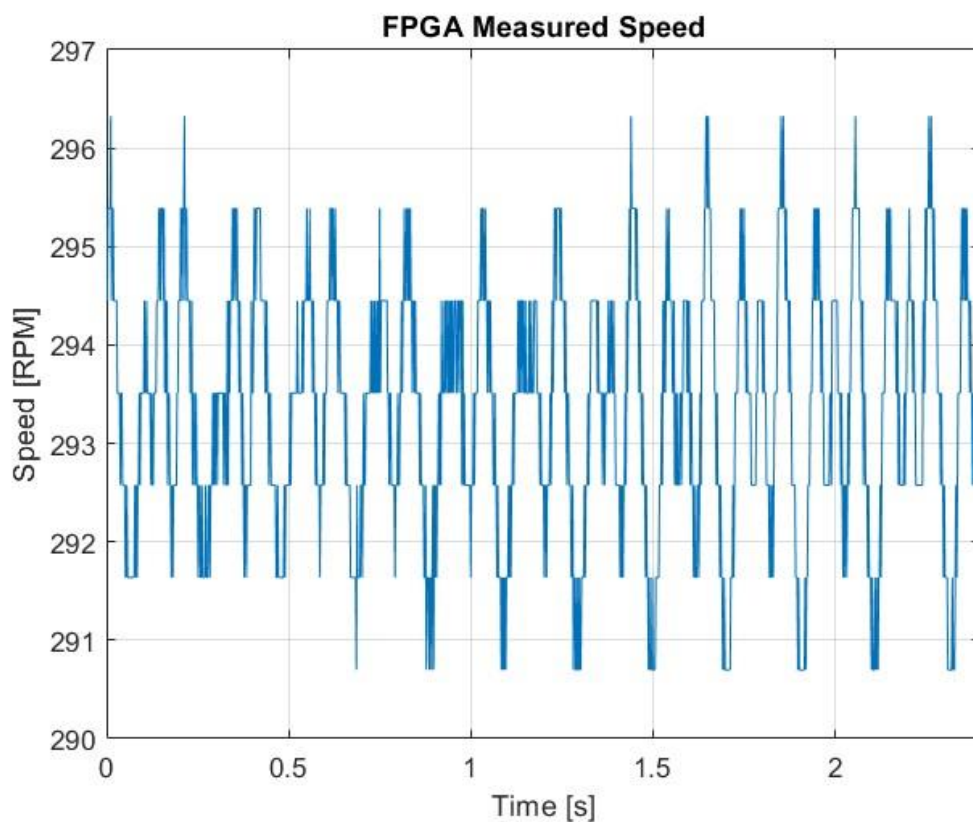
η ταχύτητα αναφοράς της μηχανής, και

$$n = 293.3449 \text{ RPM}$$

η μέση τιμή της μετρούμενης ταχύτητας.

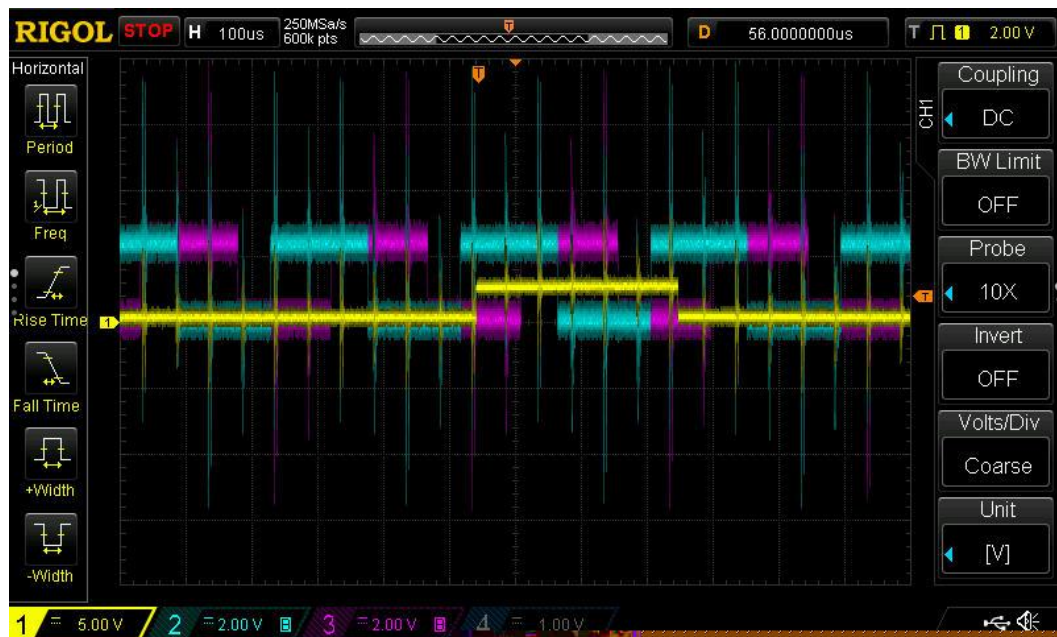
Τελικά προκύπτει:

$$s = 2.22 \%$$



Εικόνα 5.16: Απεικόνιση ταχύτητας με σταθερή αναφορά στις 300 RPM.

Τέλος απεικονίζονται στην **Εικόνα 5.17** και οι παραγόμενοι παλμοί του κωδικοποιητή ταχύτητας όπως φαίνονται στον παλμογράφο.



Εικόνα 5.17: Παραγόμενοι παλμοί κωδικοποιητή ταχύτητας: A (τιρκουαζ), B(μωβ),I (κίτρινο)

6 Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω Μελέτη

6.1 Μέτρηση Ρεύματος

- **Μέτρηση Ρεύματος στο FPGA**

Από τις μετρήσεις ρεύματος μέσω του FPGA είναι εμφανές ότι επιτυγχάνεται η επιθυμητή συχνότητα δειγματοληψίας ενώ οι μετρήσεις παρά την απουσία φίλτρων τόσο αναλογικών στο μετρητικό σύστημα αλλά και ψηφιακών μέσα στο περιβάλλον Vivado παρουσιάζουν πολύ μικρή κυμάτωση. Η διαφοράς στο πλάτος των ρευμάτων και μεταξύ των τριών φάσεων αλλά και μεταξύ συνεχόμενων κορυφών στην ίδια μέτρηση τάσης μπορούν να εξηγηθούν από τις παρατηρούμενες ταλαντώσεις κατά την διάρκεια του πειράματος και από την σχεδόν σίγουρη μικρή ασυμμετρία των φάσεων της μηχανής επαγωγής. Ακόμη, από τα σήματα εξόδου του ADC προκύπτει ότι η ανάγνωση των τριών ρευμάτων της μηχανής επιτυγχάνεται σε λιγότερο από $4\text{ }\mu\text{s}$. Αυτό σε συνάρτηση με το γεγονός ότι οι αριθμητικές πράξεις στο FPGA πραγματοποιούνται σε λίγους κύκλους ρολογιού σημαίνει ότι η δειγματοληψία των ρευμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε κάθε αρνητική ακμή του τριγωνικού φέροντος δηλαδή κάθε $5\mu\text{s}$. Έτσι η ενσωμάτωση κάποιου αλγορίθμου ελέγχου κλειστού βρόχου στην παρούσα υλοποίηση είναι δυνατή όχι μόνο με τον υπάρχοντα ρυθμό δειγματοληψίας αλλά και με τον διπλάσιο καθώς υπάρχει αρκετός χρόνος για του απαραίτητους υπολογισμούς.

- **Μέτρηση Ρεύματος μέσω παλμογράφου**

Η μέτρηση των ρευμάτων μέσω των εξόδων BNC του μετρητικού συστήματος απευθείας στον παλμογράφο εμφανίζει και πάλι την διαφορά στο πλάτος των ρευμάτων επιβεβαιώνοντας ότι για αυτή δεν οφείλεται το ο κώδικας που αναπτύχθηκε. Η κυμάτωση των μετρήσεων είναι σημαντικότερη από την αντίστοιχη στο FPGA αλλά μικρότερη από αυτή της αμπεροτσιμπίδας η οποία αποτελεί ένα εμπορικό προϊόν. Επιπλέον η τιμή μέτρησης βρίσκεται πολύ κοντά με αυτή της μέτρησης στο FPGA με τις διαφορές να οφείλονται στην κυμάτωση και στις μικρές διαφορές των συναρτήσεων βαθμονόμησης. Συνολικά η λειτουργία του κρίνεται αρκετά ικανοποιητική για τις εφαρμογές του εργαστηρίου.

6.2 Μέτρηση Τάσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η μέτρηση της τάσης δεν είναι απαιτητή για την παρούσα εφαρμογή ούτε για τον έλεγχο κλειστού βρόχου. Πραγματοποιήθηκε για την επιβεβαίωση της λειτουργίας του μετρητικού συστήματος και την επιβεβαίωση της ορθής παραγωγής της απαιτούμενης τάσης μέσω του ελέγχου V προς f . Ως προς τον έλεγχο μετρήθηκε ελάχιστα μικρότερη τάση κάτω το οποίο οφείλεται στην πτώση τάσης πάνω στους αγωγούς, στο ότι η μέτρηση έγινε ακριβώς στους ακροδέκτες της μηχανής όπως επίσης και στις διαφοροποιήσεις μεταξύ του πλάτους των κορυφών των ημιτόνων που γίνανε εμφανείς και στην μέτρηση ρεύματος. Επίσης μικρή απόκλιση μπορεί να προήλθε και από την συνάρτηση βαθμονόμησης. Τέλος η μέτρηση μέσω του παλμογράφου προέκυψε με μικρότερη κυμάτωση από αυτή του ρεύματος και πάλι λόγω του σημείου μέτρησης της τάσης ενώ αριθμητικά έδωσε κοντινότερο αποτέλεσμα στην αναμενόμενη τιμή.

6.3 Μέτρηση Ταχύτητας

Η μέτρηση της ταχύτητας επιβεβαίωσε την επιτυχή λειτουργία του ελέγχου ταχύτητας με την μικρή απόκλιση που προέκυψε να δικαιολογείται από την αναμενόμενη ολίσθηση της μηχανής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιβεβαίωση του ελέγχου είναι δυνατό να προκύψει και από την συχνότητα των μετρούμενων ρευμάτων και τάσεων της μηχανής που έγινε προηγουμένως. Επιπλέον η μετρούμενη μικρή κυμάτωση της ταχύτητας οφείλεται στις μικρές ταλαντώσεις του άξονα της μηχανής που παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος. Παρόλα αυτά κάθε δείγμα βρίσκεται πολύ κοντά στην μέση τιμή που υπολογίστηκε παραπάνω. Ως προς την μέτρηση κατά την μεταβατική κατάσταση είναι εμφανές ότι το σύστημα ακολούθησε ικανοποιητικά το φαινόμενο. Παρατηρώντας και την μέτρηση της ταχογεννήτριας είναι εμφανής μια διαφορά κατά την αρχή της μετάβασης όπου η ταχογεννήτρια εμφανίζει μια μικρή ταλάντωση στην μέτρηση της. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στην μεγαλύτερη ακρίβεια του οργάνου σε σχέση με τον κωδικοποιητή ταχύτητας. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι η γενική κυμάτωση που εμφανίζει η μέτρηση της ταχογεννήτριας είναι πολύ μεγαλύτερη. Τέλος ο ρυθμός δειγματοληψίας που επιλέχθηκε δεν φαίνεται να οδηγεί σε ανακρίβειες ενώ σίγουρα δεν οφείλεται για την απουσία της μέτρησης της ταλάντωσης καθώς αυτή έχει αρκετά μεγαλύτερη διάρκεια.

6.4 Προτάσεις για Περεταίρω Μελέτη

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας μπορούν να προταθούν κάποια παρεμφερή θέματα για περεταίρω μελέτη.

- Υλοποίηση σε γλώσσα περιγραφής υλικού ενός αλγορίθμου ελέγχου ταχύτητας για μηχανή επαγωγής.
- Υλοποίηση σε γλώσσα περιγραφής υλικού του ελέγχου μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.
- Μεταφορά του ήδη υπάρχοντος ελέγχου των τάσεων των πυκνωτών ΣΡ του μετατροπέα σε γλώσσα περιγραφής υλικού[13].
- Πλήρης αξιοποίηση του αρθρωτού μετατροπέα για την οδήγηση τριών διαφορετικών φορτίων.

7 Βιβλιογραφία

- [1] “Power electronics,” ETHW. Accessed: Sept. 04, 2025. [Online]. Available: https://ethw.org/Power_electronics
- [2] E. Staff, “A Deep Dive into SiC and GaN Technologies,” Power Electronics News. Accessed: Sept. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.powerselectronicsnews.com/a-deep-dive-into-sic-and-gan-technologies/>
- [3] A. Kebede and B. Getachew, “Power Electronics Converter Application in Traction Power Supply System,” *Am. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 9, pp. 67–73, Jan. 2020, doi: 10.11648/j.epes.20200904.12.
- [4] “CPU vs DSP vs FPGA: Understanding the Differences.” Accessed: Sept. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/terminology/cpu-vs-dsp-vs-fpga>
- [5] “Digital Control of Power Electronic Systems.” Accessed: Sept. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/control-of-power-electronic-systems/digital-control-of-power-electronic-systems?srsltid=AfmBOopF7LT1GtTnoArQ8VmPp8Yy5IBZkALQQcLdCCfEvUM5xIuFNcyH>
- [6] K. Yasumura, Y. Inoue, S. Morimoto, and M. Sanada, “FPGA implementation and examination of efficiency in a high-speed PMSM drive system based on direct torque control,” in *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Sept. 2017, pp. 343–348. doi: 10.1109/PEDS.2017.8289168.
- [7] E. Koutroulis, A. Dollas, and K. Kalaitzakis, “High-frequency pulse width modulation implementation using FPGA and CPLD ICs,” *J. Syst. Archit.*, vol. 52, no. 6, pp. 332–344, June 2006, doi: 10.1016/j.sysarc.2005.09.001.
- [8] V. Maheshwari, “The Role of FPGA in Modern Power System Protection Relaying,” vol. 13, no. 3.
- [9] “Custom ASIC Development for Electronic Systems: Benefits and Challenges - Technical Articles.” Accessed: Sept. 05, 2025. [Online]. Available: <https://eepower.com/technical-articles/benefits-and-challenges-of-custom-asic-development-for-electronic-systems/>
- [10] Helen, “ASICs are changing the face of industrial sensors & control systems,” Swindon Silicon Systems. Accessed: Sept. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.swindonsilicon.com/what-are-asic-industrial-sensors/>
- [11] E. Alcaín *et al.*, “Hardware Architectures for Real-Time Medical Imaging,” *Electronics*, vol. 10, p. 3118, Dec. 2021, doi: 10.3390/electronics10243118.
- [12] Κ. Μάνος, “Σχεδίαση και Υλοποίηση ενός Αρθρωτού Μετατροπέα Υψηλής Διακοπτικής Συχνότητας (MHFC) για την Οδήγηση Ηλεκτρικού Κινητήρα,” Nov. 2022, Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/18527>
- [13] Σ. Κατσουρίνης, “Τεχνικές Ελέγχου για Αρθρωτούς Μετατροπείς Υψηλής Διακοπτικής Συχνότητας σε Εφαρμογές Ηλεκτρικής Κίνησης,” Mar. 2024, Accessed: Sept. 05, 2025. [Online]. Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/19039>
- [14] Lesics, “Slip ring Induction Motor,” LESICS ENGINEERS PVT LTD. Accessed: Sept. 12, 2025. [Online]. Available: <https://lesics.com/slip-ring-induction-motor-how-it-works.html>
- [15] “lv_25-p_v21.pdf.” Accessed: Aug. 01, 2025. [Online]. Available: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lv_25-p_v21.pdf

- [16] “la_25-p_v6.pdf.” Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_25-p_v6.pdf
- [17] “TMR 9WI Datasheet.” Accessed: Aug. 08, 2025. [Online]. Available: https://gr.mouser.com/datasheet/2/687/tmr9wi_datasheet-3049601.pdf
- [18] E. Psaradellis, “Design and development of three phase voltage source inverter for asynchronous motor based on field oriented control,” Oct. 2024, Accessed: Sept. 01, 2025. [Online]. Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/19284>
- [19] “What Is a 4-Layer PCB? Stackup, Design & Manufacturing Guide.” Accessed: Aug. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.allpcb.com/blog/pcb-knowledge/4-layer-pcb.html>
- [20] “The Challenges of Right-Angle PCB Traces.” Accessed: Aug. 08, 2025. [Online]. Available: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2022-the-challenges-of-right-angle-pcb-traces>
- [21] “Arty Z7 Reference Manual - Digilent Reference.” Accessed: Sept. 06, 2025. [Online]. Available: <https://digilent.com/reference/programmable-logic/arty-z7/reference-manual>
- [22] “Incremental Encoder - an overview | ScienceDirect Topics.” Accessed: Aug. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/incremental-encoder>
- [23] “TMS320x280x, 2801x, 2804x Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP”).
- [24] K. Καραϊνδρου, “Προχωρημένες Τεχνικές Ελέγχου σε Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης,” June 2023, Accessed: Aug. 28, 2025. [Online]. Available: <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/18715>

8 Παράρτημα

➤ Πίνακες Μετρήσεων πλακετών Τάσης στο Εύρος εισόδου [-40 , 40] Vrms

- Πλακέτα V1

Τάση Εισόδου (V)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-56	2.858009267	0.001599978	8.24
-52	2.7666772	0.001180952	7.63
-48	2.675486067	0.001627121	7.05
-44	2.585191267	0.001068178	6.47
-40	2.493983467	0.000825442	5.9
-36	2.403346133	0.001087391	5.28
-32	2.312279267	0.000650349	4.67
-28	2.2208432	0.001533822	4.09
-24	2.1299508	0.000856282	3.43
-20	2.038662333	0.001008796	2.88
-16	1.948192867	0.001131289	2.29
-12	1.8564984	0.000847188	1.71
-8	1.7660222	0.000534024	1.1
-4	1.674310867	0.001040158	0.488
0	1.5888668	0.001170968	-0.091
4	1.496474067	0.000815167	-0.678
8	1.4053298	0.000855038	-1.28
12	1.3128296	0.000801947	-1.84
16	1.220933333	0.000847386	-2.45
20	1.1298834	0.00098777	-3.07
24	1.038866733	0.000573726	-3.68
28	0.946893267	0.001505344	-4.25
32	0.856461133	0.001054699	-4.82
36	0.764883933	0.001020207	-5.43

40	0.6734612	0.001322994	-6.06
44	0.582642733	0.001182235	-6.63
48	0.4909348	0.000998618	-7.21
52	0.3996496	0.000985539	-7.8
56	0.3086534	0.0008985	-8.32

- Πλακέτα V2

Τάση Εισόδου (V)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-56	2.8486098	0.001739916	8.19
-52	2.7578854	0.001179399	7.6
-48	2.666882467	0.001437883	6.99
-44	2.576949933	0.001192516	6.39
-40	2.486276	0.001060902	5.82
-36	2.395426933	0.001367948	5.2
-32	2.3045248	0.000890242	4.6
-28	2.213572	0.00101085	4
-24	2.1223708	0.000906015	3.4
-20	2.0315088	0.000833501	2.79
-16	1.941133533	0.000943806	2.2
-12	1.849858267	0.00047847	1.59
-8	1.758650467	0.00126541	0.988
-4	1.66801	0.001271953	0.386
0	1.585707867	0.001097708	-0.204
4	1.488974533	0.000912793	-0.735
8	1.3979512	0.000633152	-1.38
12	1.305927733	0.001361976	-1.97
16	1.2145552	0.000809229	-2.57
20	1.1231158	0.00092435	-3.2
24	1.031743467	0.000743969	-3.79
28	0.939555467	0.00134726	-4.38

32	0.848780533	0.001095897	-4.97
36	0.7569012	0.000981086	-5.6
40	0.665247	0.001539188	-6.16
44	0.5737168	0.001370635	-6.79
48	0.483056067	0.000985488	-7.29
52	0.391492267	0.000894895	-7.87
56	0.300361533	0.000712118	-8.54

- Πλακέτα V3

Τάση Εισόδου (V)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-56	2.848687133	0.001056825	8.16
-52	2.757727667	0.001386317	7.57
-48	2.6654152	0.001294168	6.94
-44	2.575432667	0.001374049	6.28
-40	2.483667667	0.001569623	5.76
-36	2.3921206	0.001193649	5.19
-32	2.3015438	0.000857664	4.57
-28	2.210671733	0.000942327	3.97
-24	2.118782267	0.000813926	3.35
-20	2.027366333	0.000893289	2.71
-16	1.935846267	0.0011703	2.19
-12	1.8448398	0.000935599	1.57
-8	1.753064467	0.000766655	0.975
-4	1.662296467	0.00093006	0.346
0	1.573015533	0.001508083	-0.279
4	1.481817533	0.000581099	-0.806
8	1.390374667	0.001353485	-1.4
12	1.298633133	0.00067975	-2
16	1.206243533	0.000576229	-2.6
20	1.114663	0.000845573	-3.2

24	1.0237102	0.000638325	-3.82
28	0.932572867	0.001269828	-4.4
32	0.841519533	0.000931201	-5
36	0.7501202	0.000995079	-5.58
40	0.658865333	0.000865624	-6.18
44	0.567389	0.001356914	-6.8
48	0.4760502	0.000914923	-7.4
52	0.3846074	0.001217047	-7.93
56	0.2933086	0.000818759	-8.54

➤ Πίνακες Μετρήσεων πλακετών Τάσης στο Εύρος εισόδου [-400 , 400] Vrms

• Πλακέτα V1

Τάση Εισόδου (V)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-560	2.9203778	0.001020684	8.66
-520	2.825718867	0.00246761	7.98
-480	2.7299288	0.0010933	7.4
-440	2.634900667	0.0019257	6.76
-399.52	2.542763067	0.003890192	6.12
-360.06	2.448060667	0.001354494	5.51
-320.08	2.351226333	0.001176606	4.84
-280	2.255093933	0.002032576	4.28
-240.03	2.1596798	0.001955418	3.62
-200.06	2.0641952	0.00256731	3
-160	1.9676902	0.002403942	2.36
-120.02	1.871956933	0.001892103	1.79
-80.05	1.775851533	0.001572421	1.13
-40	1.680198	0.001630815	0.519
0	1.584513	0.000940153	-0.12
40.031	1.4852282	0.001523161	-0.76

80.01	1.390002133	0.001590371	-1.33
120.09	1.294618133	0.001497425	-2
160.06	1.198898667	0.00088333	-2.68
200	1.103336733	0.000742996	-3.24
240.07	1.007842067	0.00098881	-3.86
280.05	0.911696133	0.00109796	-4.48
320.01	0.8151406	0.000992751	-5.16
360.07	0.718662333	0.001313083	-5.72
399.75	0.6241882	0.004858568	-6.4
440.04	0.527649667	0.001629936	-7
480	0.431832467	0.00104584	-7.64
520	0.336549333	0.001410901	-8.28
560	0.2415482	0.001422219	-8.84

• Πλακέτα V2

Τάση Εισόδου (V)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-560	2.9300188	0.001807049	8.68
-520	2.8342792	0.001580374	8.04
-480	2.736975	0.0012279	7.4
-440	2.640946667	0.003096318	6.8
-399.52	2.547560133	0.004425325	6.16
-360.06	2.452767	0.001237708	5.51
-320.08	2.356000067	0.001021714	4.92
-280	2.259400667	0.001658043	4.29
-240.03	2.162838733	0.00187794	3.68
-200.06	2.066303333	0.002188938	3.03
-160	1.9698856	0.001807306	2.44
-120.02	1.872655133	0.001339698	1.78
-80.05	1.776952467	0.002167575	1.16
-40	1.679735733	0.001637811	0.56

0	1.5828244	0.001220809	-0.119
40.031	1.483533	0.001924004	-0.691
80.01	1.387924067	0.001888027	-1.36
120.09	1.29061	0.001823816	-1.94
160.06	1.194158467	0.000816051	-2.6
200	1.098328133	0.001206337	-3.16
240.07	1.002370333	0.001362138	-3.84
280.05	0.904371267	0.00127276	-4.44
320.01	0.807990467	0.001498142	-5.08
360.07	0.710552067	0.00164166	-5.6
399.75	0.614537133	0.004470537	-6.36
440.04	0.518169533	0.001598081	-6.96
480	0.325448	0.000925859	-7.63
520	0.2299834	0.000838685	-8.2
560	2.9300188	0.001807049	-8.84

- Πλακέτα V3

Τάση Εισόδου (V)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-560	2.911522333	0.00112274	8.6
-520	2.817591733	0.000961153	8.04
-480	2.7212914	0.001602964	7.4
-440	2.625451067	0.000816198	6.81
-399.52	2.532510867	0.004247271	6.15
-360.06	2.438389067	0.00170651	5.56
-320.08	2.341732933	0.001730623	4.92
-280	2.2462284	0.001658676	4.28
-240.03	2.150545733	0.001307988	3.64
-200.06	2.054815933	0.00115021	3
-160	1.958236933	0.002043612	2.4
-120.02	1.862675133	0.00146972	1.76

-80.05	1.7667072	0.002403015	1.16
-40	1.669899867	0.001832041	0.494
0	1.573767333	0.000794967	-0.119
40.031	1.473885133	0.001910777	-0.76
80.01	1.378440933	0.002178336	-1.4
120.09	1.282345133	0.001518133	-1.97
160.06	1.186863933	0.001186737	-2.62
200	1.091389467	0.001292335	-3.24
240.07	0.995081357	0.001047533	-3.88
280.05	0.898976667	0.001353549	-4.52
320.01	0.801947933	0.001448443	-5.16
360.07	0.7056408	0.001110395	-5.8
399.75	0.610783867	0.003516253	-6.4
440.04	0.5131812	0.001321036	-7.01
480	0.417679667	0.001328632	-7.64
520	0.321409467	0.001128088	-8.28
560	0.225998867	0.000945484	-8.85

➤ Πίνακες Μετρήσεων πλακετών Ρεύματος στο Εύρος εισόδου [-3.5 , 3.5] A

- Πλακέτα I1

Ρεύμα Εισόδου (A)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-3.5	2.819824333	0.000872234	7.08
-3.25	2.739009467	0.001130583	6.52
-3	2.652578267	0.000716582	6
-2.75	2.566379067	0.001305868	5.5
-2.5	2.485503867	0.00099788	4.96
-2.25	2.404088067	0.002210601	4.42
-2	2.3163714	0.000868825	3.91

-1.75	2.230581533	0.001693385	3.37
-1.5	2.149790267	0.001209018	2.86
-1.25	2.066944533	0.000929592	2.32
-1	1.981738867	0.000745776	1.8
-0.75	1.8965232	0.000890811	1.27
-0.5	1.808957467	0.001112728	0.769
-0.25	1.726293	0.000779402	0.22
0	1.641449867	0.000678925	-0.312
0.25	1.5575264	0.001030797	-0.87
0.5	1.4734084	0.000937816	-1.38
0.75	1.3867728	0.000819532	-1.91
1	1.305702867	0.001153338	-2.42
1.25	1.220725533	0.001010882	-2.96
1.5	1.139950867	0.001086161	-3.49
1.75	1.052002467	0.000873722	-4
2	0.968227067	0.000627463	-4.54
2.25	0.886075933	0.000892653	-5.08
2.5	0.8032436	0.000650966	-5.6
2.75	0.716265667	0.000731692	-6.09
3	0.6314258	0.000932854	-6.62
3.25	0.545562067	0.000798235	-7.14
3.5	0.4669126	0.001394829	-7.7

• Πλακέτα I2

Ρεύμα Εισόδου (A)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-3.5	2.8293578	0.001303869	7.04
-3.25	2.746767333	0.000948397	6.51

-3	2.6617696	0.000998689	5.95
-2.75	2.573207067	0.001118072	5.46
-2.5	2.4945912	0.001115979	4.92
-2.25	2.410388933	0.00173935	4.39
-2	2.323004733	0.001037852	3.87
-1.75	2.240024733	0.001005536	3.33
-1.5	2.1561282	0.001418957	2.82
-1.25	2.073527533	0.000991754	2.31
-1	1.9883654	0.000938586	1.79
-0.75	1.902340667	0.000606763	1.24
-0.5	1.814667733	0.000702949	0.726
-0.25	1.7313418	0.000990133	0.198
0	1.647750867	0.000878587	-0.357
0.25	1.563427867	0.000765378	-0.889
0.5	1.479373733	0.000932051	-1.4
0.75	1.3928152	0.000649499	-1.94
1	1.3115438	0.001068106	-2.48
1.25	1.226375067	0.000643955	-2.99
1.5	1.147447	0.001131961	-3.51
1.75	1.057229333	0.0006586	-4.03
2	0.973537467	0.000509559	-4.56
2.25	0.8933774	0.000889554	-5.1
2.5	0.8105148	0.00071176	-5.61
2.75	0.7242382	0.001131714	-6.15
3	0.638791067	0.000856927	-6.64
3.25	0.549986533	0.000723145	-7.18
3.5	0.473586067	0.000816752	-7.69

• Πλακέτα Ι3

Ρεύμα Εισόδου (A)	Μέση τιμή Εξόδου [0 , 3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0 , 3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10 , 10] V
-3.5	2.8300158	0.001334722	7.07
-3.25	2.7499026	0.000981535	6.54
-3	2.662602133	0.001032932	6.03
-2.75	2.5765774	0.001062011	5.52
-2.5	2.494550667	0.001103686	4.95
-2.25	2.4134404	0.001914076	4.41
-2	2.325310933	0.001095701	3.88
-1.75	2.239648733	0.000827635	3.35
-1.5	2.158894267	0.001331817	2.84
-1.25	2.075437733	0.00107724	2.32
-1	1.989708133	0.000694554	1.8
-0.75	1.904180333	0.000747923	1.23
-0.5	1.815765333	0.001014654	0.722
-0.25	1.733171333	0.000992872	0.204
0	1.6479724	0.000789771	-0.343
0.25	1.563132667	0.000709304	-0.865
0.5	1.479054933	0.000683584	-1.38
0.75	1.392734667	0.000820528	-1.91
1	1.310724667	0.001096654	-2.45
1.25	1.2256298	0.000948034	-2.97
1.5	1.144536533	0.000951235	-3.48
1.75	1.055698467	0.001108044	-4.01
2	0.9723324	0.000540631	-4.54
2.25	0.8904434	0.000883743	-5.07
2.5	0.807235133	0.000752506	-5.59

2.75	0.7210928	0.001052999	-6.09
3	0.635309867	0.000859371	-6.63
3.25	0.548170533	0.000794023	-7.15
3.5	0.468983733	0.00128225	-7.67

➤ Πίνακες Μετρήσεων πλακετών Ρεύματος στο Εύρος εισόδου [-25 , 25] A

• Πλακέτα I1

Ρεύμα Εισόδου (A) DL3021	Ρεύμα Εισόδου (A) Πολύμετρο	Μέση τιμή Εξόδου [0 ,3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0,3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10,10] V
-25.002	-	3.234925667	0.017304822	9.4
-24.002	-	3.170123533	0.013364596	9.16
-21.501	-	3.016389333	0.010966543	8.2
-19.001	-	2.860436333	0.010837662	7.24
-16.501	-	2.708515	0.01133393	6.28
-14	-	2.551286267	0.011851185	5.36
-11.5	-	2.399573	0.01148242	4.32
-9.001	-8.992	2.2434958	0.013311687	3.36
-8.001	-7.996	2.1790426	0.00937168	3.01
-6.001	-5.999	2.0572664	0.01138933	2.3
-4.001	-4.0011	1.9335064	0.009201875	1.48
-2.001	-2.0018	1.8075442	0.008177652	0.76
0	0	1.683945267	0.001103562	-0.054
2.001	2.0019	1.560245733	0.00812003	-0.8
4.001	4.0011	1.435696867	0.009276015	-1.52
6.001	6	1.3136118	0.010358051	-2.36
8.001	7.996	1.189811267	0.00846145	-3.08
9.001	8.99	1.126959467	0.014402222	-3.44
11.5	-	0.974547933	0.015693064	-4.42
14	-	0.819122	0.011180381	-5.43
16.5	-	0.661638133	0.01604216	-6.4

19.001	-	0.512496267	0.014024747	-7.36
21.501	-	0.358104267	0.010639317	-8.18
24.002	-	0.202728467	0.014248931	-9.01
25.002	-	0.1399472	0.014759576	-9.6

• Πλακέτα I2

Ρεύμα Εισόδου (A) DL3021	Ρεύμα Εισόδου (A) Πολύμετρο	Μέση τιμή Εξόδου [0 ,3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0,3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10,10] V
-25.002	-	3.246258867	0.018742279	9.66
-24.002	-	3.182933533	0.013682703	9.16
-21.501	-	3.0282964	0.012925445	8.2
-19.001	-	2.8747906	0.009648115	7.24
-16.501	-	2.7190254	0.011218309	6.28
-14	-	2.566496533	0.012032292	5.36
-11.5	-	2.408314467	0.011781948	4.4
-9.001	-8.992	2.252519067	0.013435303	3.44
-8.001	-7.996	2.1931452	0.00948027	3.08
-6.001	-5.999	2.067565533	0.011385711	2.28
-4.001	-4.0011	1.9429058	0.009050888	1.52
-2.001	-2.0018	1.821398267	0.008768109	0.8
0	0	1.696006733	0.000822023	-0.056
2.001	2.0019	1.5720184	0.00930564	-0.759
4.001	4.0011	1.447566867	0.01077745	-1.48
6.001	6	1.325095733	0.010595178	-2.32
8.001	7.996	1.198996	0.009367206	-3.01
9.001	8.99	1.138822933	0.014096685	-3.36
11.5	-	0.982117867	0.015995018	-4.32
14	-	0.824640733	0.011014961	-5.28
16.5	-	0.673649333	0.018149642	-6.24
19.001	-	0.520754467	0.013667287	-7.2
21.501	-	0.3623542	0.011314473	-7.8

24.002	-	0.209912467	0.014060028	-8.8
25.002	-	0.147288667	0.015712322	-9.2

• Πλακέτα Ι3

Ρεύμα Εισόδου (A) DL3021	Ρεύμα Εισόδου (A) Πολύμετρο	Μέση τιμή Εξόδου [0 ,3.3]V	Τυπική Απόκλιση Εξόδου [0,3.3]V	Τιμή Εξόδου [-10,10] V
-25.002	-	3.247195467	0.01902307	9.67
-24.002	-	3.184400533	0.011893924	9.16
-21.501	-	3.030878	0.010997733	8.2
-19.001	-	2.873316867	0.009743557	7.24
-16.501	-	2.720337933	0.011569187	6.3
-14	-	2.5645058	0.010895162	5.36
-11.5	-	2.411100667	0.011453836	4.4
-9.001	-8.992	2.255755333	0.013393746	3.44
-8.001	-7.996	2.189670867	0.009407052	3.08
-6.001	-5.999	2.066759867	0.011151321	2.24
-4.001	-4.0011	1.942647333	0.008893994	1.55
-2.001	-2.0018	1.818078267	0.008341119	0.72
0	0	1.692659933	0.00085379	-0.0134
2.001	2.0019	1.568157867	0.008389347	-0.748
4.001	4.0011	1.445482133	0.009482045	-1.56
6.001	6	1.320631133	0.009566912	-2.24
8.001	7.996	1.196750133	0.008497777	-3.08
9.001	8.99	1.135476133	0.014429236	-3.44
11.5	-	0.982232133	0.015043086	-4.4
14	-	0.824953	0.010365741	-5.36
16.5	-	0.665911667	0.016566631	-6.31
19.001	-	0.514708533	0.013260888	-7.25
21.501	-	0.361709533	0.010459197	-8.2
24.002	-	0.2035778	0.01500598	-9.2
25.002	-	0.144697133	0.015230601	-9.52