

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ:1497

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΑΝΟΡΘΩΤΗ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ
ΙΣΧΥΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
ΜΕ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ**



ΑΣΟΥΚΙΔΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ 6367
ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ ΗΛΙΑΣ 6419

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΑΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΠΑΤΡΑ- 2017

**©2017, Copyright υπό Ασουκίδη Ανδρέα και Βασιλόπουλο Ηλία.
All rights reserved.**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Ισχύος και Βιομηχανικών Ηλεκτρονικών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τεχνολογικής Εκπαίδευσης του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας.

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο τη μελέτη και την κατασκευή ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα για τον έλεγχο της ενεργούς ισχύος μιας ηλεκτρικής μηχανής με ταυτόχρονη βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Η μελέτη εστίασε σε δύο βασικούς στόχους. Ο πρώτος ήταν η απόκτηση πλήρους και σφαιρικής γνώσης για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς, τη λειτουργία τους και τις τεχνικές κατασκευής τους. Ο δεύτερος στόχος ήταν η βελτίωση του τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα, για να επιτυγχάνεται βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Κατά τη διάρκεια της εργασίας πραγματοποιήθηκε αναζήτηση υλικών που κάλυπταν τις κατασκευαστικές προϋποθέσεις που είχαν θεωρηθεί ως απαραίτητες και ικανές. Στη συνέχεια, ο σχεδιασμός του μετατροπέα έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού «Trax Maker 2000». Με την ορθή χωροταξική τοποθέτηση των στοιχείων του κυκλώματος επιτυγχάνεται βέλτιστη ασφαλής λειτουργία και εργονομία. Επίσης, με τη χρήση του λογισμικού «Matlab-Simulink» δημιουργήθηκε ο απαραίτητος κώδικας για την παλμοδότηση του μετατροπέα από τον μικροελεγκτή Arduino Due. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται εύκολος προγραμματισμός και ταυτόχρονα ευελιξία στις δοκιμές, καθώς δε χρειάζεται να γράφεται κώδικας.

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Εποπτεύοντα της πτυχιακής εργασίας Δρ. Ηλ. Μηχ. κ. Γεωργάκα Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθειά του και τον Δρ. κ. Δάλλα Στέφανο για τις εύστοχες παρατηρήσεις του. Επίσης, ευχαριστούμε τις οικογένειές μας για την ηθική και οικονομική στήριξη που μας παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην πτυχιακή αυτή εργασία παρουσιάζονται η μελέτη και τα στάδια κατασκευής ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Στόχος της είναι η υλοποίηση ενός ελεγχόμενου ανορθωτή, αποτελούμενου από ένα ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο και από ανορθωτική γέφυρα με διόδους, που μπορεί να ελέγχει τη λειτουργία μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει υψηλό συντελεστή ισχύος- Power Factor (PF) και υψηλό βαθμό απόδοσης του συστήματος πηγή- μετατροπέας- μηχανή. Για την κατασκευή αυτή απαιτείται η χρήση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, όπως το τρανζίστορ ισχύος (π.χ. IGBT). Επίσης, είναι απαραίτητο το κύκλωμα παλμοδότησης και ελέγχου, δηλαδή το κύκλωμα που τροφοδοτεί και ελέγχει την έναυση και τη σβέση των ημιαγωγών. Η χρονική στιγμή της έναυσης και της σβέσης των Διπολικών Τρανζίστορς Μονωμένης Πύλης (IGBT) καθορίζουν τη διάρκεια αγωγής τους, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τα ηλεκτρικά μεγέθη στην έξοδο του μετατροπέα, άρα και τη λειτουργία της μηχανής. Επιπροσθέτως, ο τρόπος παλμοδότησης των στοιχείων διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στη λειτουργία του μετατροπέα. Η αναζήτηση, λοιπόν, της κατάλληλης τεχνικής παλμοδότησης, ώστε να επιτευχθεί βελτίωση του συντελεστή ισχύος (PF) και υψηλός βαθμός απόδοσης είναι βασικό μέρος της συγκεκριμένης εργασίας.

Έχοντας πλέον καθορίσει τα στοιχεία που θα συνθέσουν τον μετατροπέα καθώς και τον τρόπο με τον οποίο αυτός θα λειτουργεί, είναι επιτακτική ανάγκη η ανάλυση της λειτουργίας του, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα και τυχόν κίνδυνοι κατά την κατασκευή του. Τέλος, τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιούνται μελετώνται διεξοδικά για την εξαγωγή συμπερασμάτων, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί ή όχι ο αρχικός στόχος της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Γενικά για την ηλεκτρική ισχύ.....	1
1.2. Συντελεστής ισχύος και βαθμός απόδοσης.....	1
1.3. Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας.....	2
2. Ημιαγωγικά στοιχεία.....	3
2.1. Δίοδος και μη ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες.....	4
2.1.1. Η δομή της διόδου και η λειτουργία της.....	4
2.1.2. Μονοφασικές ανορθωτικές γέφυρες αποτελούμενες από διόδους.....	6
2.2. Διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία.....	8
2.2.1. Η δομή του IGBT.....	8
2.2.2. Ο τρόπος λειτουργίας του IGBT (έναυση – αγωγή – σβέση)	10
3. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος.....	11
3.1. Τοπολογίες μετατροπέων εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή.....	11
3.2. Τοπολογία μονοφασικού ηλεκτρονικού ανορθωτή για έλεγχο ισχύος DC μηχανής.....	16
3.3. Βασική πλακέτα ηλεκτρονικού μετατροπέα.....	16
3.3.1. Κύκλωμα ισχύος.....	18
3.3.2. Κύκλωμα παλμοδότησης IGBT.....	19
4. Κύκλωμα παραγωγής παλμών.....	21
4.1. Ο μικροελεγκτής Arduino Due	21
4.2. Ο αισθητήρας τάσης.....	23
4.3. Ο αισθητήρας ρεύματος.....	27
5. Τεχνική παλμοδότησης ημιαγωγών.....	32
5.1. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές παλμοδότησης.....	32
5.1.1. Τεχνικές παλμοδότησης με διακοπτική συχνότητα ίση με τη συχνότητα του δικτύου.....	32
5.1.2. Τεχνικές παλμοδότησης με διακοπτική συχνότητα μεγαλύτερη από τη συχνότητα του δικτύου.....	34
5.2. Παλμοδότηση μετατροπέα.....	36
5.2.1. Πρόγραμμα παλμοδότησης.....	37
5.2.2. Εξήγηση της παλμοδότησης μέσω προγράμματος προσομοίωσης.....	39
6. Φίλτρο μείωσης ανώτερων αρμονικών και τελική κατασκευή.....	45
6.1. Φίλτρο μείωσης ανώτερων αρμονικών.....	45
6.2. Ολοκλήρωση δομής μετατροπέα.....	46
7. Πειραματικά αποτελέσματα.....	50
7.1. Μετρήσεις και παλμογραφήματα αισθητήρων.....	50
7.1.1. Αισθητήρας τάσης.....	50
7.1.2. Αισθητήρας ρεύματος.....	53
7.2. Μετρήσεις με πρόγραμμα συνδυασμού τεχνικών HCC και PWM.....	55
7.2.1. Μετατροπέας με παθητικά φορτία.....	56
7.2.1.1. Χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών.....	56
7.2.1.2. Με φίλτρο μείωσης αρμονικών.....	64
7.2.2. Μετατροπέας με ηλεκτρικές μηχανές.....	71
7.2.2.1. Κινητήρας εν κενώ.....	72
7.2.2.2. Κινητήρας με φορτίο.....	80
7.3. Μετρήσεις με sPWM τεχνική παλμοδότησης.....	89
7.3.1. Κινητήρας εν κενώ.....	90

7.3.2. Κινητήρας με φορτίο.....	93
8. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις.....	97
8.1. Συμπεράσματα.. ..	97
8.2. Μελλοντικές επεκτάσεις.....	97
9. Βιβλιογραφία.....	99

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί την πιο αναγκαία μορφή ενέργειας. Η πλειοψηφία των συσκευών-μηχανημάτων λειτουργούν με αυτή και η ζήτηση αυξάνεται εκθετικά. Ωστόσο, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, συνήθως, πραγματοποιείται από ορυκτά καύσιμα, τα οποία μολύνουν το περιβάλλον και εξαντλούνται. Η λύση αναζητείται στις καθαρές μορφές ενέργειας, αλλά και στη μείωση της κατανάλωσης με τη χρήση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας υψηλού βαθμού απόδοσης. Στην κατεύθυνση αυτή συμβάλλει και η βελτίωση της απόδοσης των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, όπου πολλές φορές είναι συνδεδεμένη με τη βελτίωση του Συντελεστή Ισχύος. Στη συνέχεια αναλύονται κάποιες έννοιες και βασικά ενεργειακά μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν.

1.1. Γενικά για την ηλεκτρική ισχύ

Η ηλεκτρική ισχύς ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται, δηλαδή μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μία άλλη μορφή ανά μονάδα χρόνου. Συμβολίζεται με το γράμμα S και ονομάζεται Φαινόμενη Ισχύς. Το μέρος της φαινόμενης ισχύος που παράγει έργο συμβολίζεται με το γράμμα P και ονομάζεται Πραγματική Ισχύς. Αντίθετα, το μέρος της φαινόμενης που δε χρησιμοποιείται για την παραγωγή έργου συμβολίζεται με το γράμμα Q και καλείται Άεργος Ισχύς [1]. Η μαθηματική σχέση που συνδέει αυτά τα τρία μεγέθη είναι [2]:

$$S = P + j * Q$$

όπου j η φανταστική μονάδα ($j^2 = -1$)

και το μέτρο της Φαινόμενης ισχύος δίνεται από τη σχέση [2]:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Μεταξύ των δύο συνιστωσών της φαινόμενης ισχύος η πραγματική είναι η επιθυμητή, ενώ γίνεται προσπάθεια η άεργος ισχύς να μειωθεί ή και να εξαλειφθεί, αν είναι δυνατό. Η προσπάθεια αυτή γίνεται γιατί η παρουσία της άεργου ισχύος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το επιφορτίζει με ένα ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο δεν επιφέρει κάποιο επιθυμητό αποτέλεσμα. Αντίθετα, το ρεύμα αυτό αυξάνει τις απώλειες στους αγωγούς, τους μετασχηματιστές και γενικά τις παραμέτρους του συστήματος λόγω του φαινομένου Joule [3].

1.2. Συντελεστής ισχύος και βαθμός απόδοσης

Ο συντελεστής ισχύος εκφράζει το ποσοστό της συνολικής φαινόμενης ισχύος ενός κυκλώματος, το οποίο μετατρέπεται σε ενεργό ισχύ με το υπόλοιπο να αντιστοιχεί στην άεργο ισχύ [3]. Από τον ορισμό του συντελεστή ισχύος συμπεραίνεται ότι στόχος σε ένα κύκλωμα ή σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, γενικότερα, είναι το ποσοστό αυτό να τείνει πιο κοντά στο 100%, δηλαδή στην εξάλειψη της άεργου ισχύος. Γενικά, το ποσοστό αυτό επιτυγχάνεται, όταν στο κύκλωμα εμπεριέχονται μόνο αντιστάτες και η παρουσία επαγωγικών τυλιγμάτων (πηνίων) ή πυκνωτών συνεπάγεται άεργο ισχύ με αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή ισχύος κάτω από τη μονάδα.

$$PF = \frac{P}{S} \leq 1$$

Επίσης, ένα άλλο σημαντικό ηλεκτρικό μέγεθος είναι ο βαθμός απόδοσης. Βαθμός απόδοσης καλείται το πηλίκο της ωφέλιμης ισχύος στην έξοδο του συστήματος (P_{out}) ως προς την ωφέλιμη ισχύ στην είσοδο (P_{in}), εκφρασμένο συχνά επί τοις εκατό [4].

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\%$$

Ο βαθμός απόδοσης, ουσιαστικά, εκφράζει το ποσοστό της πραγματικής ισχύος, που παράγει το απαιτούμενο έργο και δεν αποβάλλεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας από τα στοιχεία του συστήματος. Έτσι, όταν ο βαθμός απόδοσης λαμβάνει χαμηλή τιμή, οι απώλειες είναι μεγάλες.

1.3. Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας

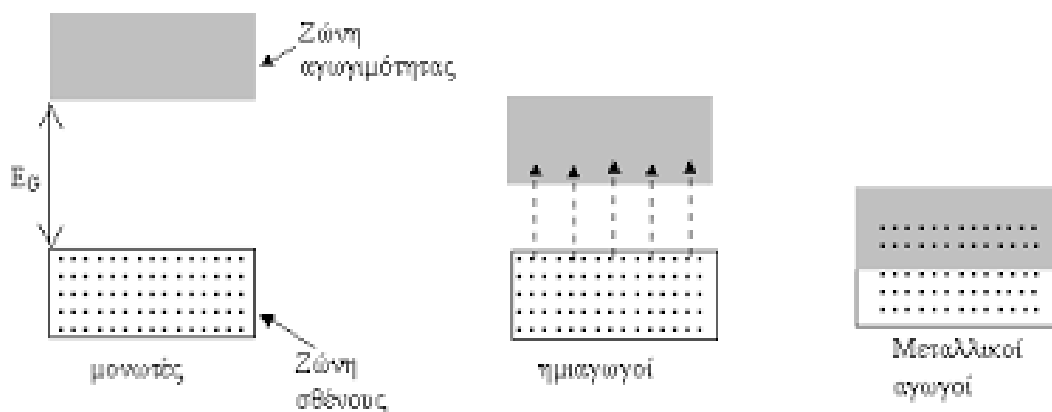
Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας έχει ως στόχο, αρχικά, τη μελέτη και έπειτα την κατασκευή ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από μία ανορθωτική διάταξη τύπου γέφυρας. Για την υλοποίησή του είναι απαραίτητη η χρήση ημιαγωγικών στοιχείων. Η επιλογή κατάλληλου ημιαγωγού πραγματοποιήθηκε μετά από προσεκτική μελέτη και σύγκριση των ιδιοτήτων διαφόρων ημιαγωγικών στοιχείων, έτσι ώστε να είναι εφικτός ο αρχικός στόχος, αλλά και να μπορούν να αποδοθούν σε αυτόν κάποια ειδικά χαρακτηριστικά που θα βελτιώσουν τη λειτουργία του. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης. Τα ηλεκτρονικά ισχύος, ως γνωστόν, εισάγουν στο σύστημα άεργο ισχύ είτε με καθυστέρηση της βασικής αρμονικής του ρεύματος ως προς την τάση, είτε με την αύξηση των ανώτερων αρμονικών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή ισχύος του συστήματος και αυτό με τη σειρά του την κατανάλωση ενέργειας, χωρίς να λαμβάνεται ωφέλιμο έργο. Ο βασικότερος τρόπος διόρθωσης του συντελεστή ισχύος είναι η τροποποίηση της παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων, δηλαδή ο διαφοροποιημένος έλεγχος στον χρόνο αγωγής τους. Επιπρόσθετα, η επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης είναι μεγάλης σημασίας, αφού μειώνονται οι απώλειες στα επιμέρους στοιχεία του μετατροπέα και αυξάνεται το ποσοστό της ωφέλιμης ενέργειας. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης θα διερευνηθεί θεωρητικά μέσα από τη βιβλιογραφία, επιλέγοντας αυτή την τεχνική που θα εμφανίζει βέλτιστα αποτελέσματα για αυτόν.



Σχήμα 1.1: Πτυχιακή εργασία- Κατασκευή.

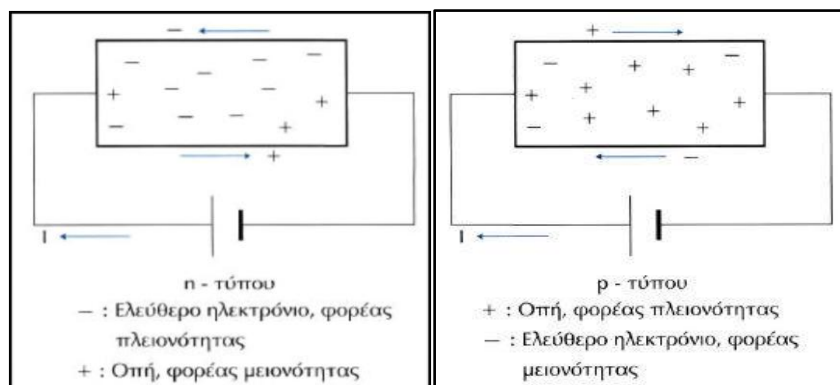
2. ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι ημιαγωγοί είναι μια κατηγορία στερεών σωμάτων, που έχουν ως χαρακτηριστικό τους έναν μικρότερο αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων, σε σχέση με τα μέταλλα που παρουσιάζουν μεγάλο πλήθος ελεύθερων ηλεκτρονίων και τους μονωτές που διαθέτουν ελάχιστα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Σημαντική διαφορά που εμφανίζουν, επίσης, αυτές οι τρεις κατηγορίες στερεών είναι αυτή που σχετίζεται με τις τιμές που εμφανίζει το ενεργειακό χάσμα E_g (Energy gap), μεταξύ των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους (σχ. 2.1). Στους αγωγούς (μηδενικό ενεργειακό χάσμα) είναι εύκολη η μεταπήδηση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Στους μονωτές είναι σχεδόν αδύνατη η μεταπήδηση ενός από τα ηλεκτρόνια σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας λόγω των υψηλών τιμών του ενεργειακού χάσματος [5].



Σχήμα 2.1: Ενεργειακό χάσμα στερεών.

Οι ημιαγωγοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους ενδογενείς ημιαγωγούς, οι οποίοι δεν έχουν καμία πρόσμειξη (π.χ. γερμάνιο Ge, πυρίτιο Si) και τους ημιαγωγούς προσμείξεων, οι οποίοι με τη σειρά τους χωρίζονται σε τύπου n και τύπου p [5,6]. Οι τύπου n προκύπτουν όταν σε έναν ενδογενή ημιαγωγό προστεθεί μικρή ποσότητα πεντασθενούς στοιχείου (π.χ. αρσενικό As), σχηματίζοντας ομοιοπολικούς δεσμούς με τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους του ενδογενούς ημιαγωγού. Το πέμπτο ηλεκτρόνιο του As μένει ελεύθερο και μπορεί να απομακρυνθεί σχετικά εύκολα (σχ. 2.2.α). Στους ημιαγωγούς τύπου p αν ένα τρισθενές στοιχείο, όπως το γάλλιο-Ga, εισαχθεί στον ημιαγωγό Si, τότε τα τρία ηλεκτρόνια σθένους του Ga σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα τρία ηλεκτρόνια σθένους τριών γειτονικών ατόμων Si, ενώ αυτό δε συμβαίνει με το τέταρτο γειτονικό άτομο του Si. Έτσι, σχηματίζεται μια οπή, που μπορεί να καλυφθεί από ένα γειτονικό ηλεκτρόνιο σθένους του Si (σχ. 2.2.β) [6,7].

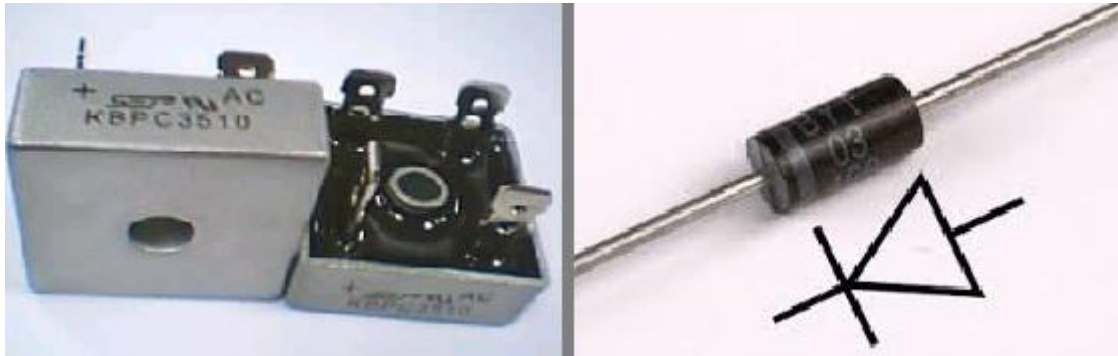


Σχήμα 2.2.α

Σχήμα 2.2.β

2.1. Δίοδος και μη ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες

Η δίοδος είναι ένα ευρέως διαδεδομένο ημιαγωγικό στοιχείο γνωστό και ως επαφή p-n, που βρίσκει χρήση σε πάρα πολλές ηλεκτρονικές διατάξεις, ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές. Μία σημαντική εφαρμογή τους είναι στις μη ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες, οι οποίες θα μελετηθούν στη συνέχεια. Οι ανορθωτικές γέφυρες χρησιμοποιούνται γενικά για τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή.



Σχήμα 2.3: Ανορθωτική γέφυρα διόδων και δίοδος.

2.1.1. Η δομή της διόδου και η λειτουργία της

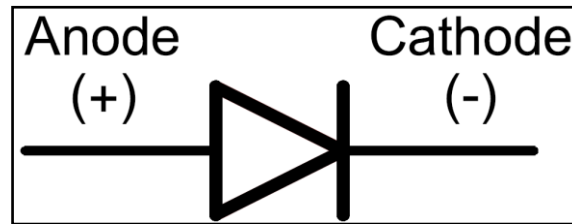
Η δίοδος είναι το ηλεκτρονικό στοιχείο που προκύπτει από την ένωση ανάμεσα σε έναν ημιαγωγό p και έναν n (σχ. 2.4). Κατά την υλοποίηση της επαφής p-n σημειώνεται μετακίνηση ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό n προς τον ημιαγωγό p για την επανασύνδεση με τις παραπλήσιες οπές, οπότε λαμβάνει χώρα η αντίδραση: ηλεκτρόνιο + οπή = ενέργεια [5,8].



Σχήμα 2.3: Δομή διόδου.

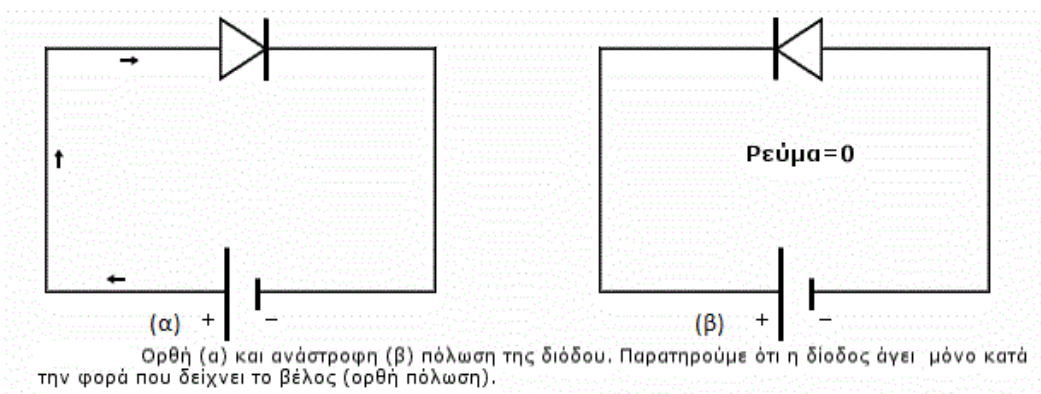
Η επαφή PN που δημιουργήθηκε με τον τρόπο που προαναφέρθηκε, λέγεται δίοδος PN, διότι επιτρέπει να διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα από αυτήν μόνο προς μια κατεύθυνση και είναι ένα μη ελεγχόμενο διακοπτικό στοιχείο. Για να δημιουργηθεί μια δίοδος PN συνδέονται τα άκρα των δυο ημιαγωγικών τμημάτων τύπου P και N με μεταλλικές επαφές. Ως εκ τούτου, δημιουργείται η άνοδος της διόδου από την πλευρά του ημιαγωγού P και η κάθοδος της

διόδου στην πλευρά N. Η διόδος PN συμβολίζεται με ένα βέλος στην πλευρά P και μια γραμμή στην πλευρά N (σχ. 2.5).



Σχήμα 2.4: Συμβολισμός διόδου.

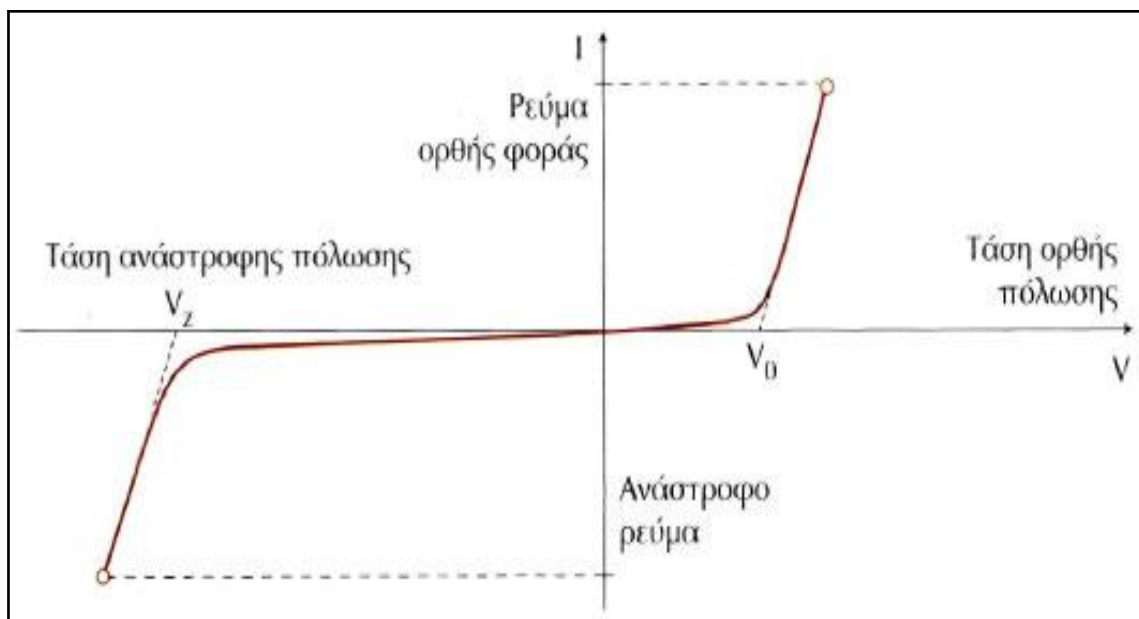
Τα δύο άκρα της διόδου μπορούν να συνδεθούν με εξωτερική τροφοδοσία με δύο τρόπους, κατά την ορθή και κατά την ανάστροφη φορά (σχ. 2.6) [5,8].



Ορθή (α) και ανάστροφη (β) πόλωση της διόδου. Παρατηρούμε ότι η διόδος άγει μόνο κατά την φορά που δείχνει το βέλος (ορθή πόλωση).

Σχήμα 2.5: Ορθή και ανάστροφη πόλωση.

Η λειτουργία της διόδου γίνεται πιο κατανοητή, βλέποντας τη χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της διόδου ή αλλιώς τη χαρακτηριστική λειτουργίας της, όπου φαίνεται η συμπεριφορά της στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας της (σχ. 2.7) [9,10].

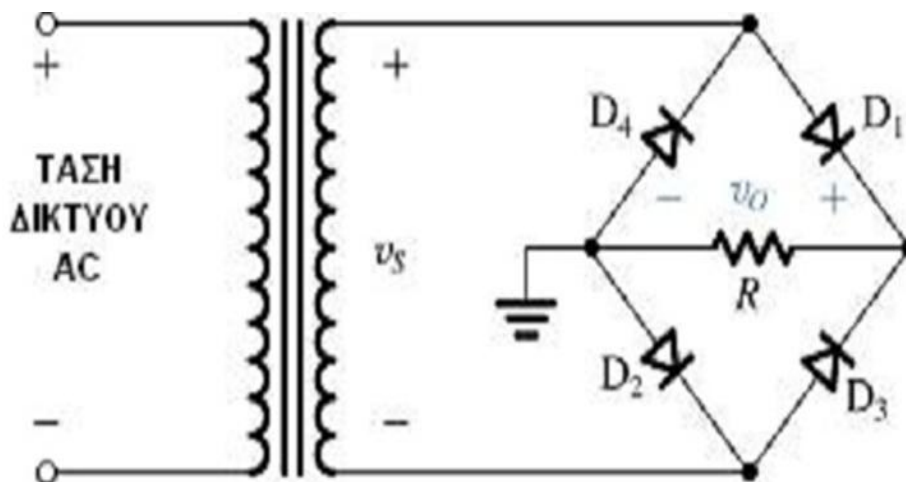


Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστική I-V.

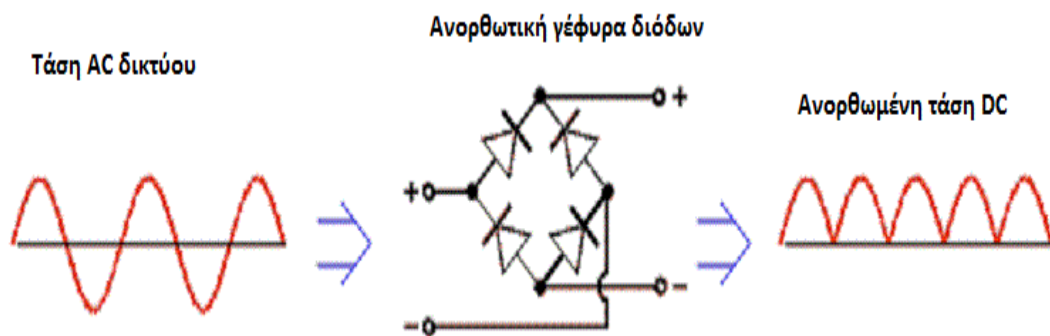
Κατά την ορθή πόλωση η διόδος θα έρθει σε αγωγή, μόνο αν η εξωτερική τάση υπερβεί μια τιμή. Η τιμή αυτή, που για το γερμάνιο είναι 0,3 Volt και για το πυρίτιο 0,7 Volt, ονομάζεται τάση κατωφλίου. Για μικρότερες τιμές της τάσης κατωφλίου το ρεύμα έχει μικρή τιμή. Όταν η εξωτερική τάση γίνει μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου, η διόδος εμφανίζει πτώση τάσης στα άκρα της, περίπου 1 Volt, και το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα, το οποίο ονομάζεται ρεύμα ορθής φοράς ή ρεύμα διάχυσης I_F . Όταν η διόδος πολωθεί ανάστροφα, βρίσκεται στην κατάσταση αποκοπής. Το ρεύμα που τη διαρρέει έχει πολύ μικρή τιμή και ονομάζεται ρεύμα διαρροής. Όταν η τάση στα άκρα της γίνει ίση με την ανάστροφη τάση διάσπασης, η διόδος καταστρέφεται και το κύκλωμα διαρρέεται από υψηλής τιμής ρεύμα, το οποίο καλείται ανάστροφο [5,9,10].

2.1.2. Μονοφασικές ανορθωτικές γέφυρες αποτελούμενες από διόδους

Η μονοφασική ανορθωτική γέφυρα είναι από τις πιο απλές και διαδεδομένες διατάξεις ισχύος (σχ. 2.8). Η τάση εισόδου της γέφυρας είναι η ημιτονοειδής τάση του AC δικτύου. Στην έξοδό της η ανορθωτική γέφυρα με διόδους παρουσιάζει κυμάτωση, η οποία μπορεί να εξαλειφθεί με πυκνωτές ή πηνία (σχ. 2.9). Η κυμάτωση αυτή εμφανίζεται στα 100 Hz, με αποτέλεσμα ο όγκος των φίλτρων να είναι αυξημένος [5].



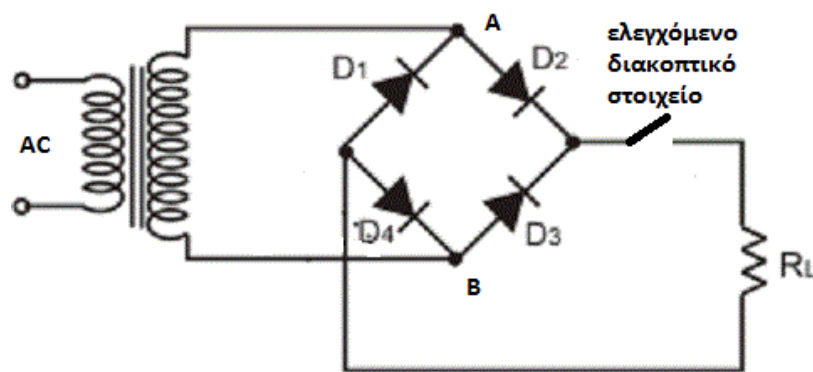
Σχήμα 2.7: Ανορθωτική γέφυρα από διόδους.



Σχήμα 2.8: Είσοδος και έξοδος ανορθωτικής γέφυρας.

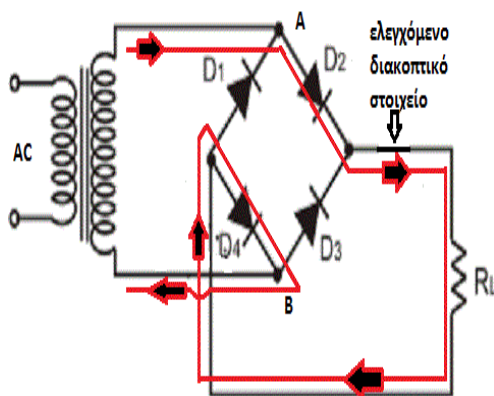
Η ταλάντωση της αέργου ισχύος μεταξύ της τροφοδοσίας και του φορτίου, χωρίς να προσφέρει ωφέλιμο έργο, αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς. Η παρουσία της οφείλεται τόσο στην καθυστέρηση της βασικής αρμονικής του ρεύματος -σε σχέση με την τάση τροφοδοσίας- όσο και στις ανώτερες αρμονικές του ρεύματος. Αν η βασική αρμονική μετακινηθεί και γίνει συμφασική με την ημιτονοειδή τάση τροφοδοσίας, μπορεί να επιτευχθεί μείωση της αέργου ισχύος. Επιπροσθέτως, ο έλεγχος της παλμοδότησης από τις παραπάνω διατάξεις μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό των ανώτερων αρμονικών, άρα και στην περαιτέρω μείωση της αέργου ισχύος [11].

Η ανορθωτική γέφυρα αποτελείται από ημιαγωγικά στοιχεία, τα οποία μπορεί να είναι δίοδοι, θυρίστορ ή τρανζίστορ. Ελέγχοντας την παλμοδότησή τους, ελέγχεται η τάση εξόδου της ανορθωτικής διάταξης. Επειδή η δίοδος δεν είναι ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο και ξεκινά να άγει, όταν πολωθεί ορθά, ο έλεγχος της γέφυρας με διόδους επιτυγχάνεται με την προσθήκη διακοπτικού ημιαγωγικού στοιχείου στην έξοδό της (σχ. 2.10) [11].

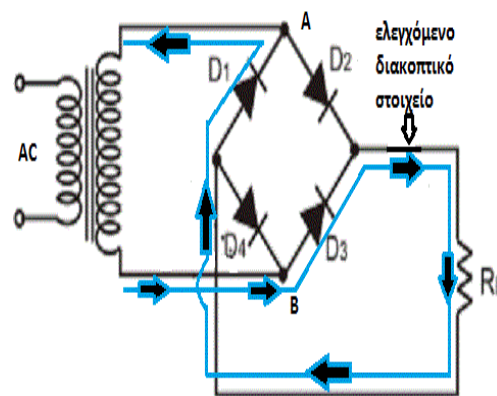


Σχήμα 2.9

Μια τέτοια διάταξη είναι αυτή που μελετάται και κατασκευάζεται στο πλαίσιο της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας. Η γέφυρα με τις διόδους τροφοδοτείται με την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου (230 Volts, 50 Hz). Κατά τη μία ημιπερίοδο το υψηλό δυναμικό της τάσης δικτύου είναι στο σημείο A και θέτει σε αγωγή τις διόδους D2, D4 και η ροή του ρεύματος στο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 2.11.α. Στην άλλη ημιπερίοδο το υψηλό δυναμικό βρίσκεται στο σημείο B και θέτει σε αγωγή τις διόδους D3, D1 και η ροή του ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 2.11.β [5,11].



Σχήμα 2.10.α



Σχήμα 2.11.β

2.2. Διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία

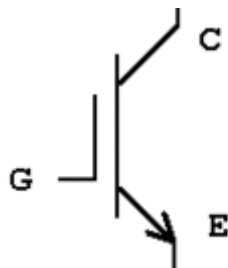
Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, για τον έλεγχο αγωγής μίας ανορθωτικής γέφυρας με διόδους χρειάζονται διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία. Αυτά είναι ημιαγωγοί στους οποίους μπορεί να ελεγχθεί το πότε θα άγουν και πότε όχι. Αποτελούνται τουλάχιστον από τρεις ακροδέκτες, όπου στους δύο γίνεται η ροή ισχύος και με τον τρίτο επιτυγχάνεται ο έλεγχος έναυσης και σβέσης του διακοπτικού στοιχείου με εφαρμογή κατάλληλης τροφοδοσίας (τάση ή ρεύμα). Στον μετατροπέα της παρούσας εργασίας ως διακοπτικό στοιχείο χρησιμοποιείται το διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Isolated Gate Bipolar Transistor- IGBT).



Σχήμα 2.12: Ημιαγωγοί: thyristor, IGCT, GTO, IGBT κ.α..

2.2.1. Η δομή του IGBT

Το διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης (σχ. 2.13, 2.14) είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο, η λειτουργία του οποίου ελέγχεται από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της πύλης (gate) και του εκπομπού (emitter). Αναπτύχθηκε το 1985 και συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του BJT (Bipolar Junction Transistor) και του MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) [11,12].



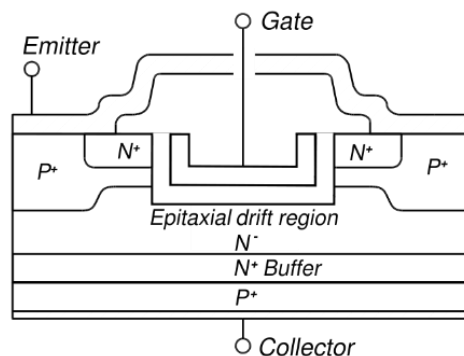
Σχήμα 2.12: Συμβολισμός IGBT.

Τα BJT έχουν μικρότερες απώλειες αγωγιμότητας, αλλά μεγαλύτερους χρόνους μετάβασης, ιδιαίτερα κατά την αποκοπή. Τα MOSFET έχουν πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάβασης, αλλά οι απώλειές τους στην κατάσταση αγωγιμότητας είναι μεγαλύτερες, ιδιαίτερα τα στοιχεία που έχουν μέγιστες τάσεις αποκοπής (μερικές εκατοντάδες Volt και άνω).



Σχήμα 2.13: IGBT

Η δομή του IGBT (σχ. 2.15) αποτελείται από ένα στρώμα πολυκρυσταλλικού πυριτίου, διαχωρισμένο με ένα άλλο στρώμα οξειδίου που βρίσκεται στο πάνω μέρος της επιφάνειας του δίσκου πυριτίου. Το στρώμα του πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι κατασκευασμένο, έτσι ώστε να επικαλύπτει τις περιοχές n^+ και n^- . Η επαφή του εκπομπού E (Emitter) είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο, το οποίο επικαλύπτει τις περιοχές n^+ και p . Στην άλλη πλευρά του δίσκου πυριτίου υπάρχει ο συλλέκτης C (collector) κατασκευασμένος από αλουμίνιο συνδεδεμένος στην περιοχή p^+ [12].

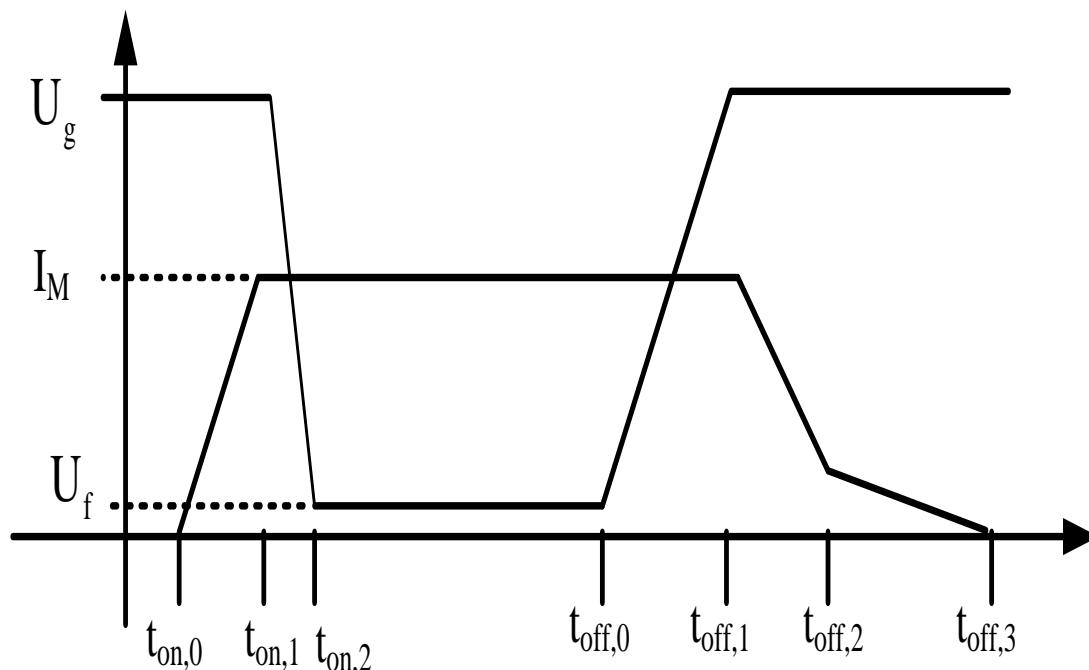


Σχήμα 2.14: Δομή IGBT.

Το G (gate) είναι η πύλη του διπολικού τρανζίστορ. Με την εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη (G) το στοιχείο έρχεται σε αγωγή, ενώ με την αφαίρεσή της έρχεται σε σβέση. Η σύνθετη αντίσταση πύλης του IGBT είναι πολύ μεγάλη, και έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα πύλης να είναι μικρό. Η ιδιότητά του να ελέγχεται από τάση με πολύ μικρό ρεύμα το κατατάσσει στα γρήγορα ημιελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία. Έτσι, όταν το IGBT πολωθεί ορθά, δηλαδή το δυναμικό του συλλέκτη είναι υψηλότερο από το δυναμικό του εκπομπού και εφαρμοστεί παλμός στην πύλη G, το στοιχείο μπαίνει σε αγωγή και συμπεριφέρεται σαν κλειστή επαφή, ενώ όταν δεν εφαρμόζεται παλμός στην πύλη, τότε το IGBT σβήνει και έχει τη συμπεριφορά ανοικτής επαφής [11].

2.2.2. Ο τρόπος λειτουργίας του IGBT (έναυση – αγωγή – σβέση)

Το IGBT μπαίνει σε αγωγή, όταν το δυναμικό του συλλέκτη (C) είναι υψηλότερο από το δυναμικό του εκπομπού (E) (ορθή πόλωση) και εφαρμοστεί θετική τάση στην πύλη (G). Αν διακοπεί αυτή η θετική τάση, το στοιχείο σταματάει να άγει και επέρχεται σβέση. Αυτή η θετική τάση μπορεί να εφαρμοστεί μέσω του κατάλληλου κυκλώματος οδήγησης. Η τιμή αυτής της dc τάσης είναι μικρή, περίπου 15Volts, και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του IGBT. Στο σχήμα 2.16 αναλύονται η τάση στα άκρα του στοιχείου και το ρεύμα που το διαρρέει κατά την έναυση, την αγωγή και τη σβέση αυτού. Κατά την έναυση ($t_{on,0} < t < t_{on,2}$), από $t_{on,0}$ έως $t_{on,1}$ το ρεύμα αυξάνεται ως την τιμή I_M η οποία εξαρτάται από το κύκλωμα, ενώ η τάση παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή U_g . Το διάστημα $t_{on,1} < t < t_{on,2}$ η τάση μειώνεται από την τιμή U_g στην τιμή U_f , ενώ το ρεύμα έχει τιμή I_M . Το IGBT βρίσκεται σε αγωγή από $t_{on,2}$ ως $t_{off,0}$. Το ρεύμα που το διαρρέει έχει την τιμή I_M και η τάση την τιμή U_f , που αποτελεί και την πτώση τάσης του στοιχείου κατά την αγωγή. Τη χρονική στιγμή $t_{off,0}$ ξεκινάει η σβέση του τρανζίστορ με αύξηση της τάσης στα άκρα του από U_f σε U_g ($t_{off,1}$). Την ίδια στιγμή, το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται στο 1/10 του I_M ($t_{off,2}$). Για $t_{off,3}$ το στοιχείο έχει ολοκληρώσει τη σβέση του, το ρεύμα έχει μηδενιστεί και το δυναμικό στα άκρα του έχει τιμή U_g . Από τα παραπάνω παρατηρείται πως κατά την έναυση και τη σβέση του IGBT εμφανίζονται πάνω στο στοιχείο τάση και ρεύμα που συνεπάγεται την ισχύ. Αυτή προκαλεί υπερθέρμανση του στοιχείου με κίνδυνο καταστροφής του και μεταφράζεται σε θερμικές απώλειες πάνω στο στοιχείο. Αυτές οι απώλειες που οφείλονται στη χρονική περίοδο έναυσης και σβέσης ονομάζονται διακοπτικές απώλειες. Η τιμή που λαμβάνουν εξαρτάται άμεσα από τη διακοπτική συχνότητα του IGBT. Επιπρόσθετα, ισχύς εμφανίζεται και κατά την αγωγή του τρανζίστορ, καθώς διαρρέεται από το ρεύμα του κυκλώματος. Οι απώλειες αυτές καλούνται απώλειες αγωγής. Είναι προφανές πως αν οι παραπάνω απώλειες είναι υψηλές, θα επηρεάσουν τον βαθμό απόδοσης του συστήματος αρνητικά. Συνεπώς, η διακοπτική συχνότητα διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στην ενεργειακή απόδοση του μετατροπέα [13].



Σχήμα 2.15: Τάση και ρεύμα στα άκρα του IGBT κατά την έναυση, την αγωγή και τη σβέση του.

3. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι διατάξεις που μεταβάλουν τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή και συστήματος, όπως το μέγεθος της τάσης και του ρεύματος, τη διαδοχή φάσεων ενός τριφασικού συστήματος, ακόμα και τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης. Αποτελούνται από ηλεκτρονικά στοιχεία που έχουν μικρό όγκο και απαιτούν ελάχιστη ισχύ για τον έλεγχό τους. Λόγω της εξέλιξής τους οι σύγχρονοι μετατροπείς έχουν μικρότερο μέγεθος, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια, καλύτερη απόκριση, χαμηλότερες απώλειες και μικρότερο κόστος σε σχέση με αντίστοιχους παλαιότερους στρεφόμενους μετατροπείς [14].

Στα αρνητικά των ηλεκτρονικών μετατροπέων εμπεριέχεται η μετατόπιση της βασικής αρμονικής που προκαλούν στο ρεύμα του κυκλώματος και η δημιουργία ανώτερων αρμονικών σε αυτό. Η χρήση τους επηρεάζει την άεργο ισχύ και τις θερμικές απώλειες. Επίσης, επηρεάζεται η λειτουργία γειτονικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων λόγω των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που προκύπτουν.

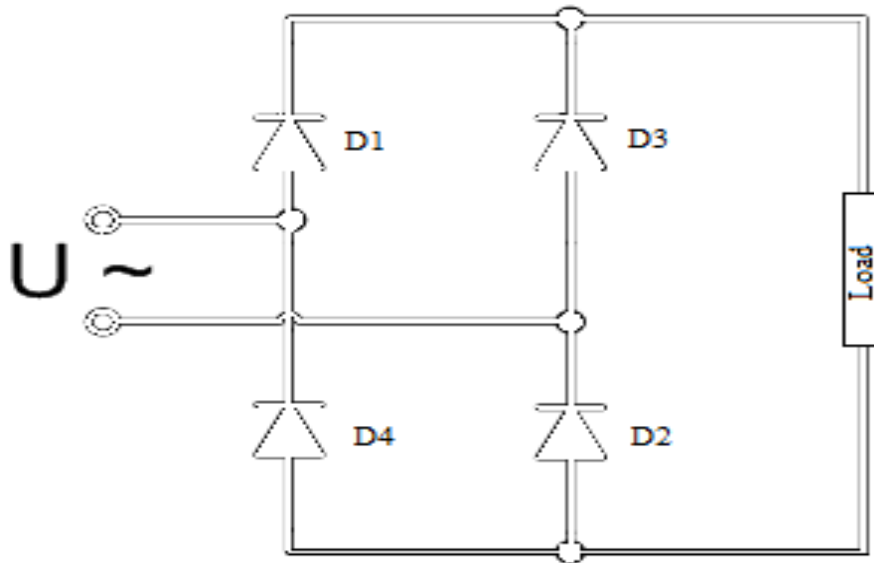
Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς μπορεί να είναι [14]:

- Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης ενός επιπέδου σε εναλλασσόμενη τάση διαφορετικού επιπέδου (AC-AC converters) ή ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (AC regulators).
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση (DC-DC converters).
- Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση (AC-DC converters) ή ανορθωτές (rectifiers)
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση (DC-AC converters) ή αντιστροφείς (inverter).

3.1. Τοπολογίες μετατροπέων εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή

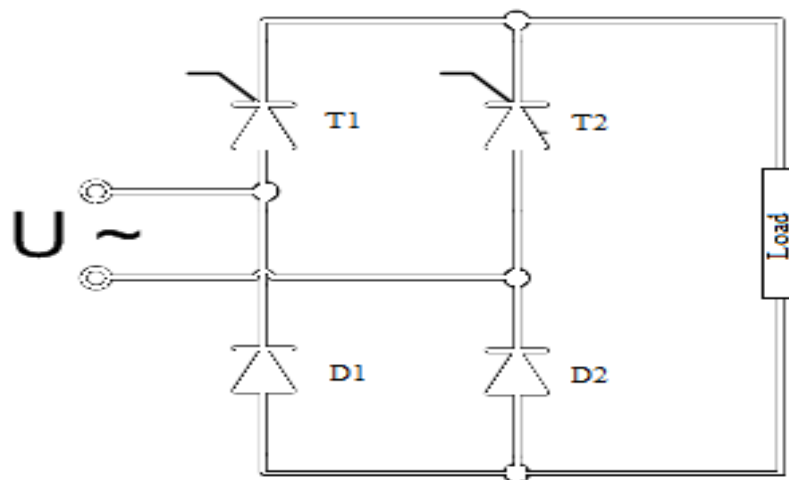
Ένας μετατροπέας AC/DC (ανορθωτής) μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση, συνήθως σταθερού πλάτους στην είσοδό του, σε συνεχή τάση μεταβλητού πλάτους στην έξοδό του. Αυτοί οι μετατροπείς τροφοδοτούνται από μία ή περισσότερες πηγές εναλλασσόμενης τάσης ή εναλλασσόμενου ρεύματος μονοφασικού ή τριφασικού δικτύου. Η μεταβαλλόμενη έξοδος είναι μια συνεχής τάση ή ένα συνεχές ρεύμα συνήθως χαμηλής κυμάτωσης. Τα κυκλώματα αυτών των μετατροπέων περιλαμβάνουν ανορθωτικές διατάξεις και μονοφασικά ή τριφασικά ελεγχόμενα κυκλώματα. Συνήθως, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπως συστήματα μεταφοράς υψηλής DC τάσης, κυκλώματα οδήγησης DC κινητήρων, ρυθμιζόμενα DC τροφοδοτικά, στατικοί αντισταθμιστές, κυκλώματα φόρτισης μπαταριών και μετατροπείς ανεμογεννητριών. Με βάση τα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματά τους οι μετατροπείς AC/DC ταξινομούνται σε μη ελεγχόμενους, ημιελεγχόμενους και σε πλήρως ελεγχόμενους. Επίσης, διαχωρίζονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς. Παρακάτω, παρουσιάζονται κάποιες τυπικές τοπολογίες ανορθωτών που χρησιμοποιούν ως ελεγχόμενο διακοπτικό στοιχείο το θυρίστορ, λόγω της ευρείας διάδοσής του [15].

Στις μη ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες (σχ. 3.1) δεν έχουμε τη δυνατότητα ελέγχου, καθώς η δίοδος δεν είναι ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο. Η ανορθωτική διάταξη ξεκινάει να λειτουργεί, όταν οι δίοδοί της πολωθούν ορθά. Η αγωγή τους σταματά, όταν πολωθούν ανάστροφα ή όταν αποσυνδεθεί η τροφοδοσία [15].

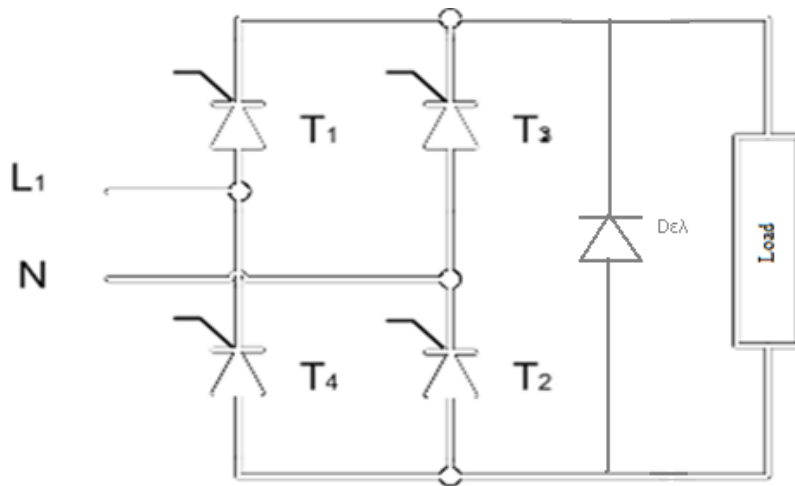


Σχήμα 3.1: Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα μη ελεγχόμενη.

Στις ημieleγόμενες ανορθωτικές διατάξεις περιλαμβάνονται ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα διακοπικά στοιχεία (σχ. 3.2). Κατά τη λειτουργία μιας τέτοιας διάταξης μια ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο. Ως ημieleγόμενη ανορθωτική γέφυρα συμπεριφέρεται και μια πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα, όταν παράλληλα στο φορτίο προστεθεί μία δίοδος, η οποία ονομάζεται δίοδος ελεύθερης διέλευσης (σχ. 3.3) [15,16,17].

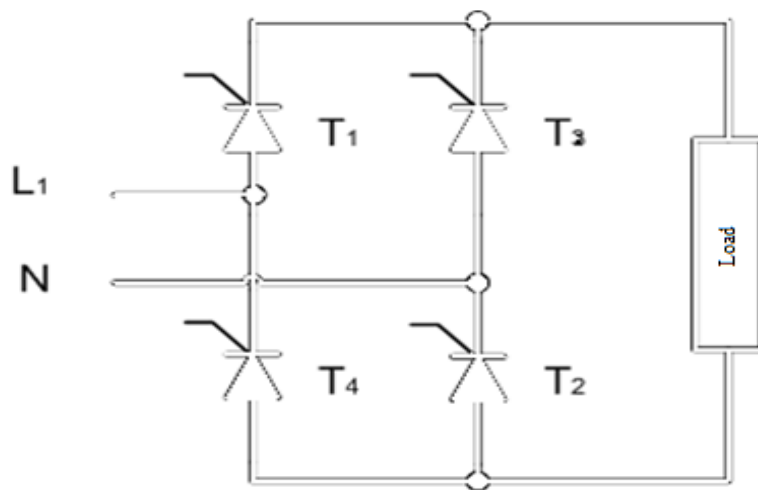


Σχήμα 3.2: Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα ημieleγόμενη με δύο θυρίστορ και δύο δίοδους.



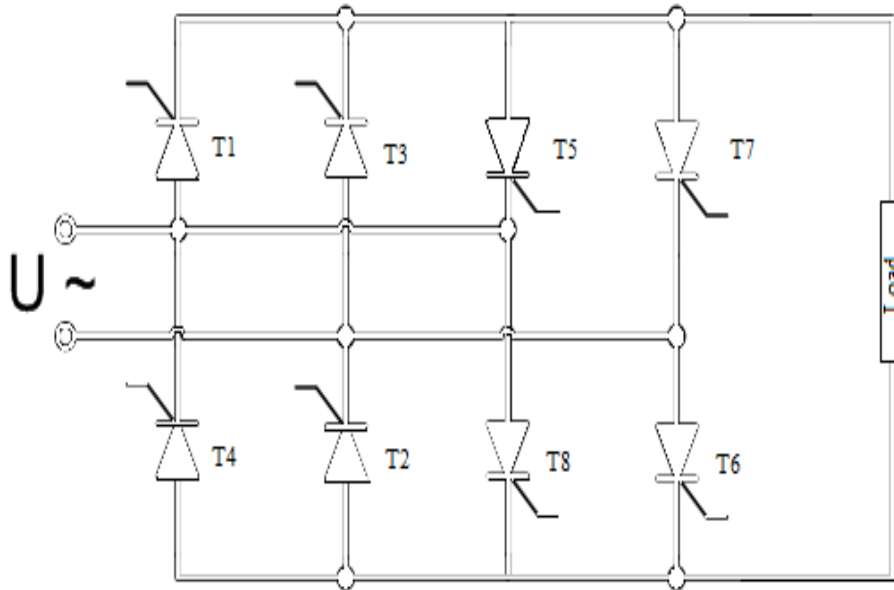
Σχήμα 3.3: Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη με δίοδο ελεύθερης διέλευσης- λειτουργεί όπως η ημιελεγχόμενη.

Στη θέση του φορτίου μια ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει σε δύο τεταρτημόρια, δηλαδή ως κινητήρας και ως γεννήτρια, μετατρέποντας την μηχανική ενέργεια του φορτίου σε ηλεκτρική, η οποία επιστρέφει στο δίκτυο. Η ενέργεια αυτή δε μετατρέπεται σε θερμότητα, όπως συμβαίνει στους κλασικούς τρόπους πέδησης, αλλά επιστρέφει στο δίκτυο αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης του συστήματος. Απομένει, λοιπόν, οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς να επιτρέψουν την επιστροφή της ηλεκτρικής ισχύος, που παράγεται κατά την πέδηση. Οι ημιελεγχόμενες γέφυρες δεν έχουν δυνατότητα επιστροφής ισχύος, γιατί δεν μπορεί να μεταβληθεί η πολικότητα της τάσης στην έξοδό τους. Στις πλήρως ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες (σχ. 3.4) παρουσιάζεται η δυνατότητα αντιστροφής της ροής ισχύος, επομένως μπορούμε να έχουμε ωφέλιμη πέδηση στο κινητήριο σύστημα [16,17].



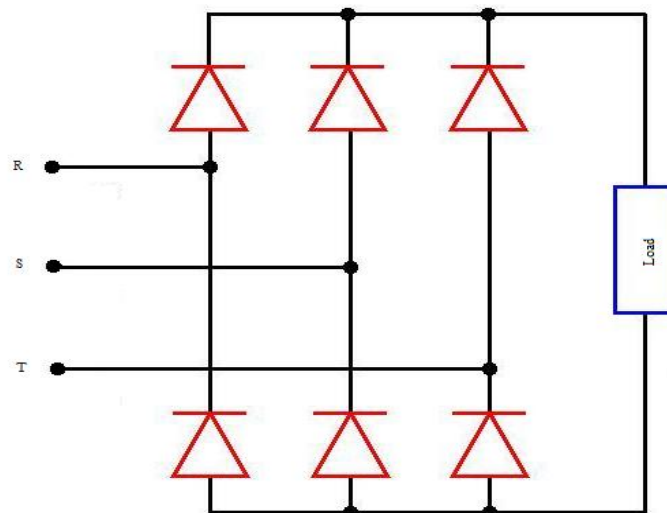
Σχήμα 3.4: Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη με θυρίστορ.

Στις αντιπαράλληλες πλήρως ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες (σχ. 3.5) έχουμε τη δυνατότητα οδήγησης και ωφέλιμης πέδησης και προς τις δύο κατευθύνσεις περιστροφής. Το κινητήριο σύστημα μπορεί να λειτουργεί είτε ως αριστερόστροφος κινητήρας ή αριστερόστροφη γεννήτρια είτε ως δεξιόστροφος κινητήρας ή δεξιόστροφη γεννήτρια [15,16].

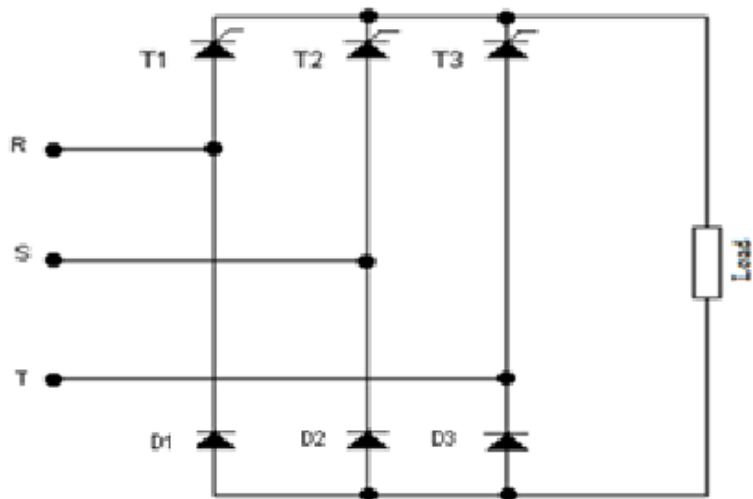


Σχήμα 3.5: Δύο αντιπαράλληλες μονοφασικές πλήρως ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες.

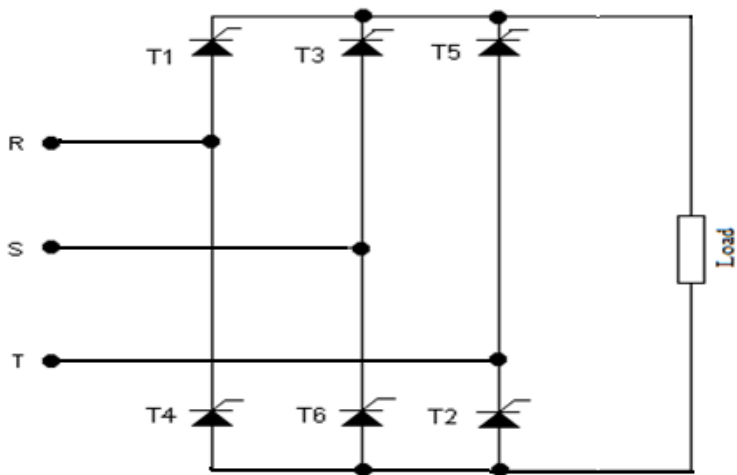
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα κυκλώματα για κάθε μία από τις τριφασικές ανορθωτικές διατάξεις (μη ελεγχόμενη, ημιελεγχόμενη, πλήρως ελεγχόμενη ανορθωτική τριφασική γέφυρα). Οι τριφασικές ανορθωτικές γέφυρες έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τις μονοφασικές, έχοντας τη δυνατότητα να διαχειριστούν συσκευές μεγαλύτερης ισχύος. Στις τριφασικές ανορθωτικές γέφυρες έχουμε έξι παλμούς, με σκοπό να επιτευχθεί η παλμοδότηση των ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων σε μία περίοδο της τάσης εισόδου. Επομένως, για τη συχνότητα των 50 Hz του δικτύου μας η συχνότητα της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης φορτίου είναι 300 Hz. Σε κάθε χρονική στιγμή άγουν δύο θυρίστορ και η χρονική διαφορά της παλμοδότησης του επόμενου ζεύγους θυρίστορ είναι 60° [15,18].



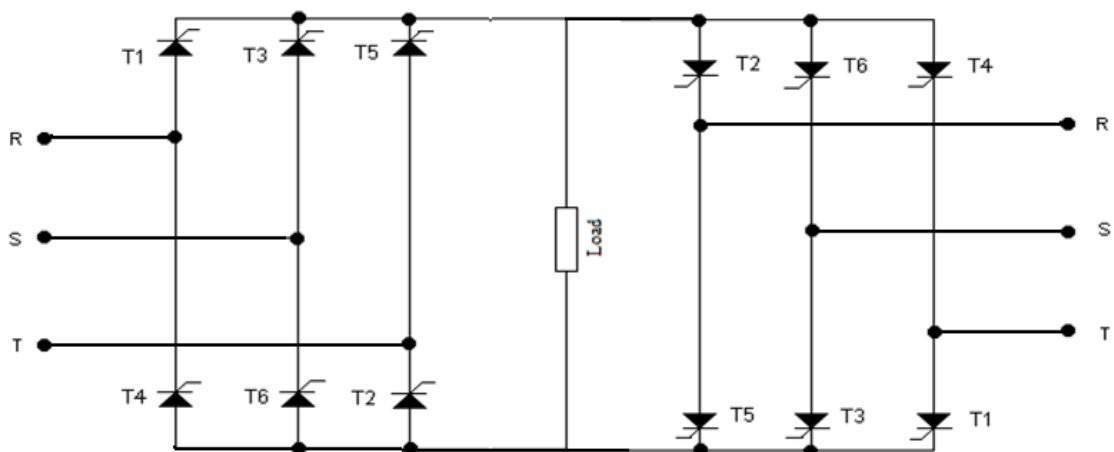
Σχήμα 3.6: Τριφασική ανορθωτική γέφυρα μη ελεγχόμενη.



Σχήμα 3.7: Τριφασική ανορθωτική γέφυρα ημιελεγχόμενη.



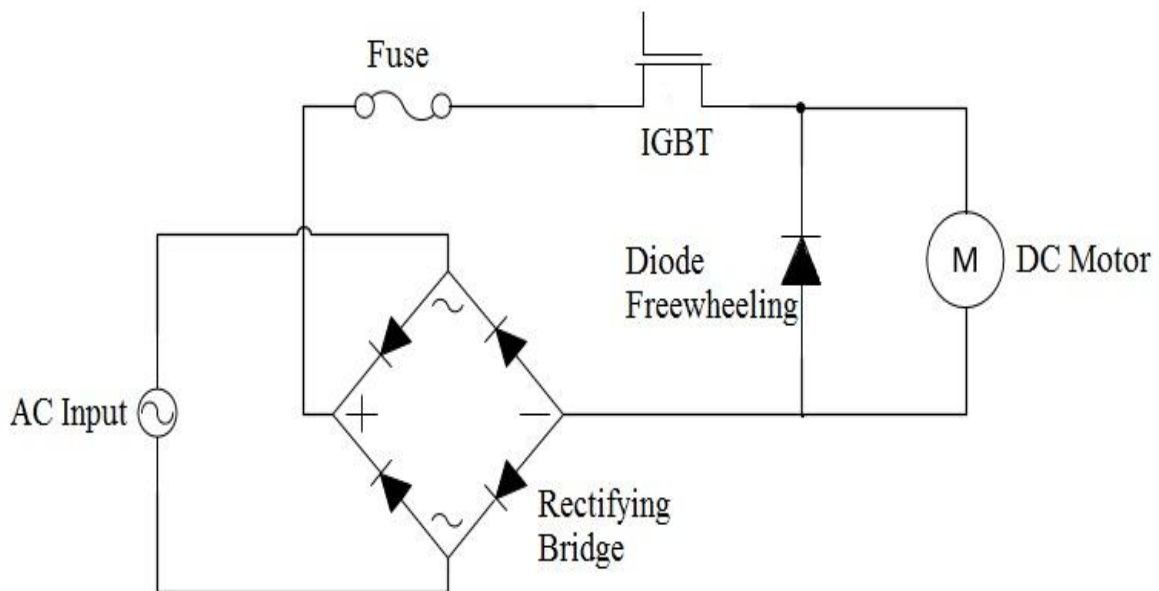
Σχήμα 3.8: Τριφασική ανορθωτική γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη.



Σχήμα 3.9: Τριφασικές ανορθωτικές γέφυρες πλήρως ελεγχόμενες σε αντιπαράλληλη σύνδεση (λειτουργία 4 τεταρτημορίων).

3.2. Τοπολογία μονοφασικού ηλεκτρονικού ανορθωτή για έλεγχο ισχύος DC μηχανής

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν τοπολογίες μετατροπέων που χρησιμοποιούν θυρίστορ ως ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία λόγω της μεγάλης διάδοσής τους. Στο θυρίστορ ελέγχεται μόνο η έναυσή του και η σβέση του πραγματοποιείται μόνο όταν στα άκρα του εφαρμοστεί ανάστροφη τάση ή όταν το ρεύμα που το διαρρέει γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκράτησης. Συνεπώς, η αδυναμία ελέγχου της σβέσης του θυρίστορ το καθιστά μη κατάλληλο για τον μετατροπέα της εργασίας, διότι θα περιορίζε σημαντικά τις δυνατότητές της. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό πως απαραίτητο χαρακτηριστικό του διακοπτικού στοιχείου είναι η ελεγχόμενη σβέση του. Ένας τέτοιος ημιαγωγός είναι το IGBT, του οποίου η δομή και η λειτουργία έχουν αναλυθεί στις παραγράφους 2.2.1 και 2.2.2 αντίστοιχα. Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στην παρουσία μιας ανορθωτικής γέφυρας και ενός IGBT (σχ. 3.10). Τα στοιχεία αυτά συνδέονται με κατάλληλο τρόπο στη βασική πλακέτα του μετατροπέα. Η πλακέτα αυτή περιέχει δύο κυκλώματα, τα οποία συνεργάζονται για την ορθή λειτουργία του μετατροπέα, το κύκλωμα ισχύος και το κύκλωμα παλμοδότησης. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται η μελέτη και η κατασκευή της πλακέτας και αναλύονται σε βάθος τα δύο κυκλώματα που περιέχει.

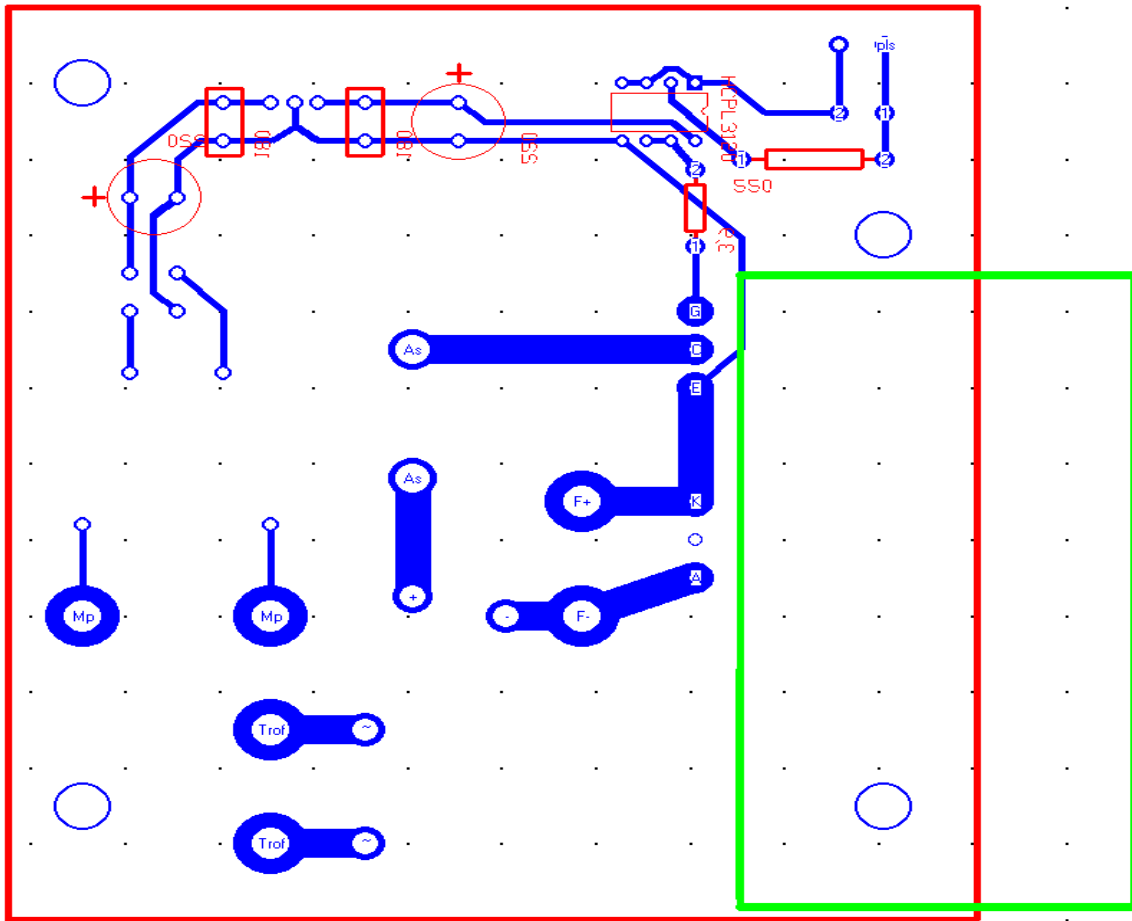


Σχήμα 3.10: Τοπολογία μετατροπέα πτυχιακής εργασίας.

3.3. Βασική πλακέτα ηλεκτρονικού μετατροπέα

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η βασική πλακέτα του μετατροπέα, η οποία σχεδιάστηκε με τη χρήση του ελεύθερου λογισμικού Trax Maker 2000. Στο σχέδιο αυτό απεικονίζονται με μπλε χρώμα οι χάλκινοι αγωγοί. Αυτοί που απαρτίζουν το κύκλωμα ισχύος έχουν μεγαλύτερο πάχος, άρα και διατομή, λόγω της υψηλής τιμής του ρεύματος που τους διαρρέει. Τα στοιχεία στο κύκλωμα ελέγχου του IGBT της πλακέτας συμβολίζονται με κόκκινο χρώμα, ενώ με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η ψύκτρα του IGBT, της διόδου ελεύθερης διέλευσης και του snubber. Ο σχεδιασμός της πλακέτας πραγματοποιήθηκε με στόχο την ανταπόκρισή της στις διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, στην εργονομία της και στην

ασφάλεια κατά την εργασία. Η εκτύπωση της πλακέτας πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο Πατρών.

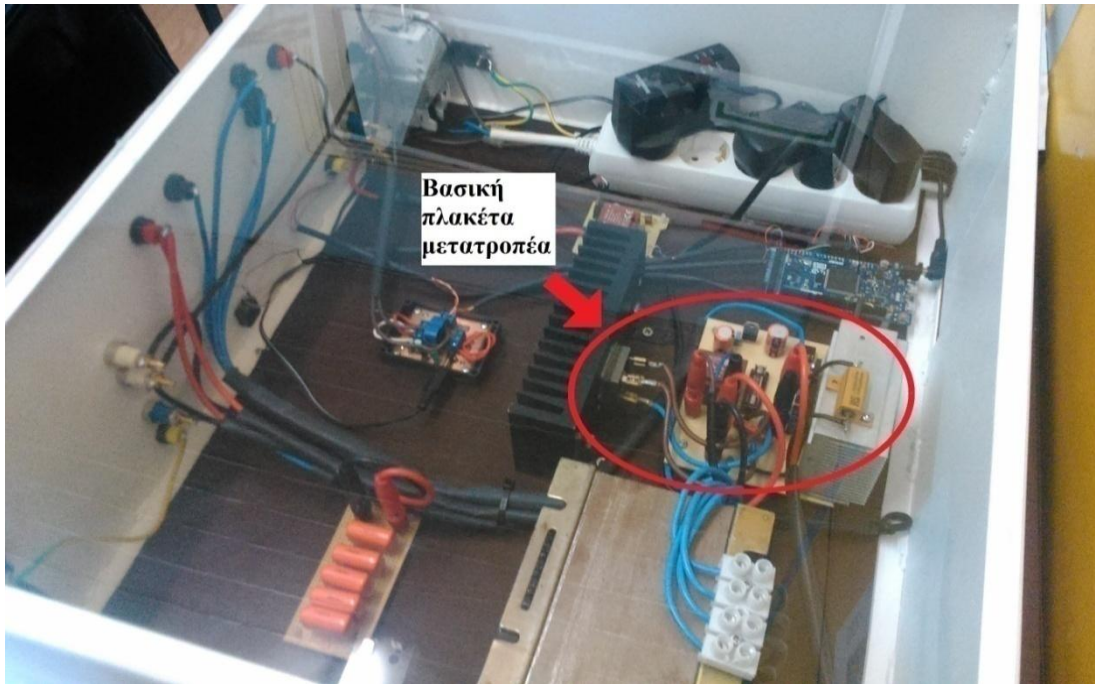


Σχήμα 3.11: Σχέδιο πλακέτας μετατροπέα.

Παρακάτω εμφανίζονται τα διάφορα στάδια κατασκευής της πλακέτας (σχ. 3.12) και η θέση της πλακέτας στην κατασκευή (σχ. 3.13). Η κόλληση των ακροδεκτών έγινε με πολλή προσοχή και με τη συνεχή καθοδήγηση του σχεδίου.



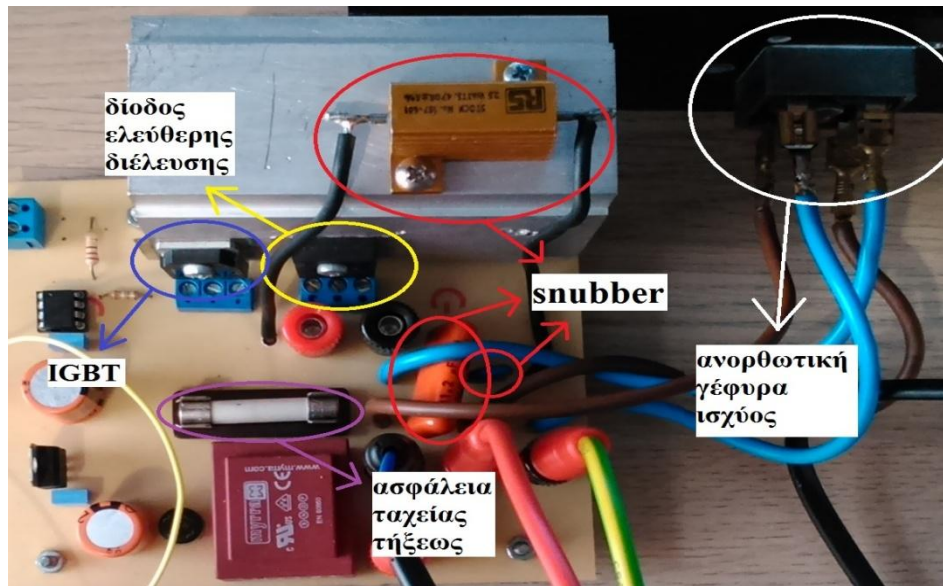
Σχήμα 3.12: Κατασκευή πλακέτας μετατροπέα.



Σχήμα 3.13: Θέση βασικής πλακέτας στον μετατροπέα.

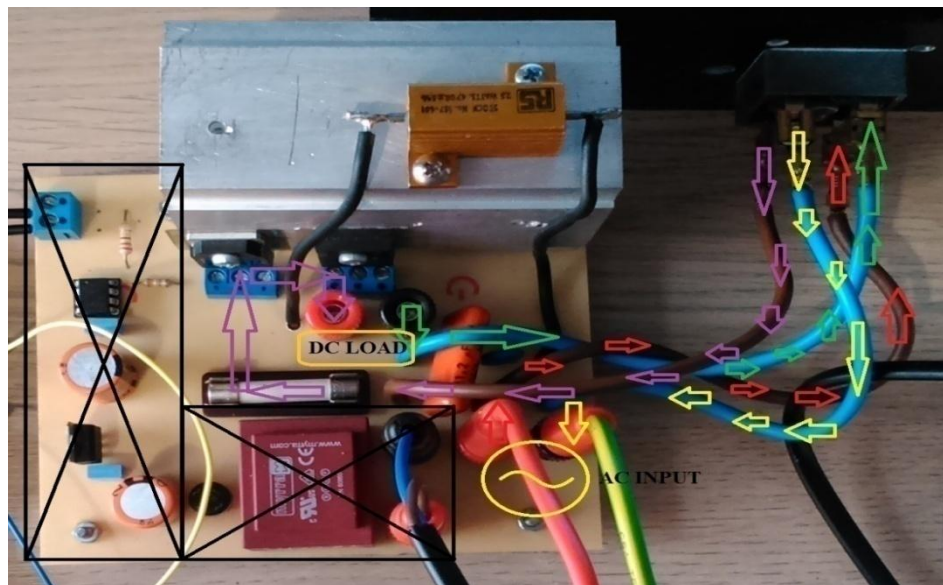
3.3.1. Κύκλωμα ισχύος

Το κύκλωμα ισχύος της πλακέτας είναι η διαδρομή που ακολουθεί το ηλεκτρικό ρεύμα ξεκινώντας από την πηγή, διέρχεται από την πλακέτα και καταλήγει στο φορτίο. Τα βασικά στοιχεία του κυκλώματος αυτού είναι μια ανορθωτική γέφυρα ισχύος, αποτελούμενη από διόδους, και ένα Διπολικό Τρανζίστορ Μονωμένης Πύλης (IGBT). Η γέφυρα τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση και παράγει στην έξοδό της μια συνεχή τάση, όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 2.1.2. Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η πλακέτα του μετατροπέα με τα ημιαγωγικά στοιχεία, την προστασία και το κύκλωμα παλμοδότησης. Το IGBT αποτελεί το διακοπτικό στοιχείο του κυκλώματος και μέσω αυτού πραγματοποιείται ο απαιτούμενος έλεγχος. Το τρανζίστορ ισχύος λειτουργεί ως διακόπτης στο κύκλωμα και επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Σύμφωνα με τους παλμούς που δέχεται, διαμορφώνει την τάση και το ρεύμα εξόδου. Τα δευτερεύοντα στοιχεία του κυκλώματος είναι το snubber, η διάδος ελεύθερης διέλευσης και μια ασφάλεια τήξεως. Το snubber είναι ένας κλάδος του κυκλώματος που συνδέεται παράλληλα με το ημιαγωγικό στοιχείο, αν και η θέση του εξαρτάται από το κύκλωμα του εκάστοτε μετατροπέα. Αποτελείται από έναν αντιστάτη και έναν πυκνωτή. Σκοπός του είναι να περιορίσει τις αιχμές της τάσης στα άκρα του τρανζίστορ και της διόδου κατά την έναυση και τη σβέση του πρώτου. Η διάδος ελεύθερης διέλευσης είναι απαραίτητη, καθώς το φορτίο είναι συνήθως επαγωγικής συμπεριφοράς. Η ασφάλεια είναι τοποθετημένη πριν το IGBT, είναι ταχείας τήξεως και με ονομαστικό ρεύμα τα 6A αποτελεί το μέσο προστασίας του τρανζίστορ και της διόδου ελεύθερης διέλευσης. Η τιμή της ασφάλειας εξαρτάται από τις ονομαστικές τιμές του αισθητήρα ρεύματος και του πηνίου στην είσοδο του μετατροπέα, εξαρτήματα που θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 3.14: Στοιχεία κυκλώματος ισχύος βασικής πλακέτας.

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται με βέλη η ροή του ρεύματος στο κύκλωμα κατά την θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο διαφοροποιείται μόνο το εναλλασσόμενο ρεύμα. Η πολικότητα της συνεχούς τάσης στην έξοδο του μετατροπέα παραμένει σταθερή. Για το εναλλασσόμενο ρεύμα έχει χρησιμοποιηθεί κόκκινο και κίτρινο χρώμα, ενώ για το συνεχές μωβ και πράσινο.

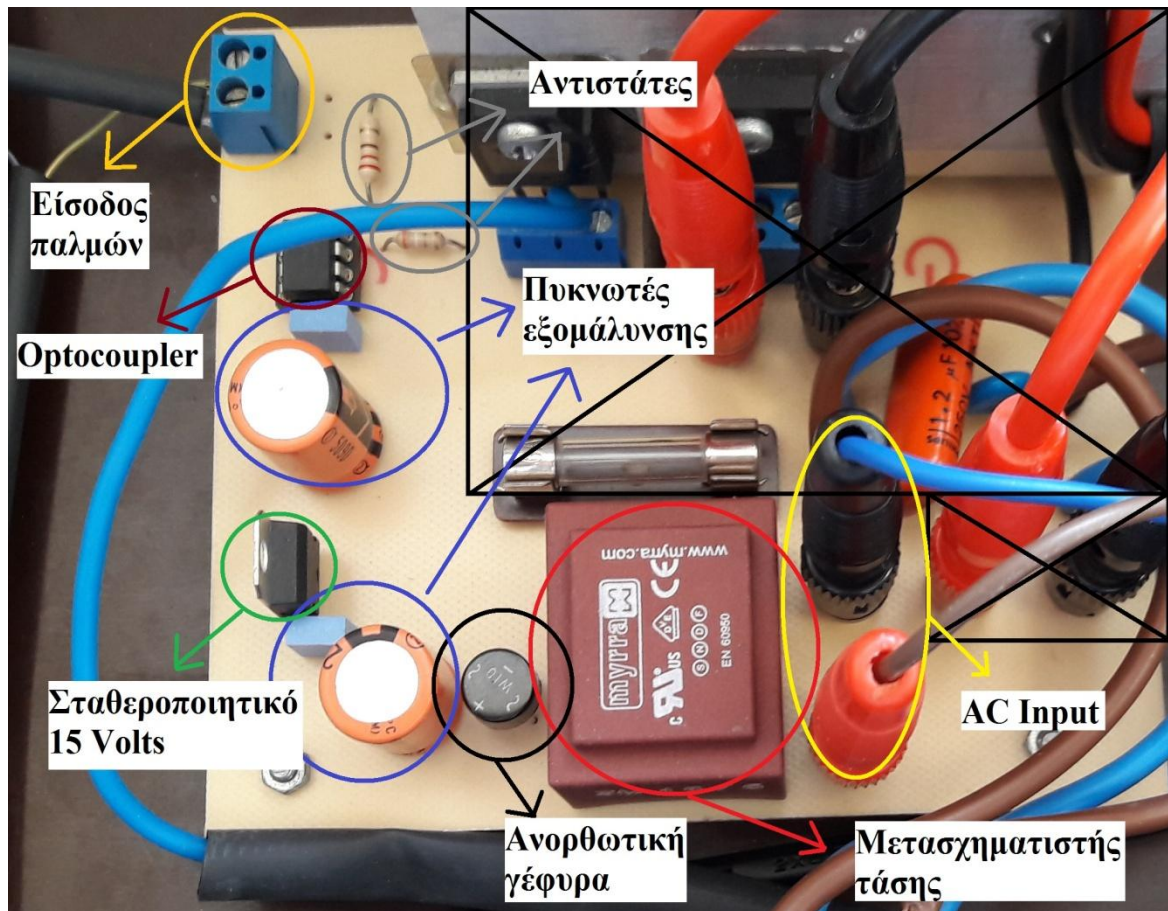


Σχήμα 3.15: Ροή ρεύματος στο κύκλωμα ισχύος για θετική ημιπερίοδο τάσης.

3.3.2. Κύκλωμα παλμοδότησης IGBT

Στη βασική πλακέτα του μετατροπέα συναντάται και το κύκλωμα παλμοδότησης του IGBT. Βασικό στοιχείο του κυκλώματος είναι ένας οπτικός ζεύκτης (optocoupler), δηλαδή ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που περιέχει μια δίοδο εκπομπής φωτός (light emitting diode-LED). Όταν η δίοδος δεχθεί παλμό-τάση στα άκρα της με την ορθή φορά πόλωσης, το ολοκληρωμένο κύκλωμα ενεργοποιείται, μετασχηματίζει τον παλμό στα απαιτούμενα επίπεδα τάσης-ρεύματος και τον οδηγεί στην πύλη του IGBT. Τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος

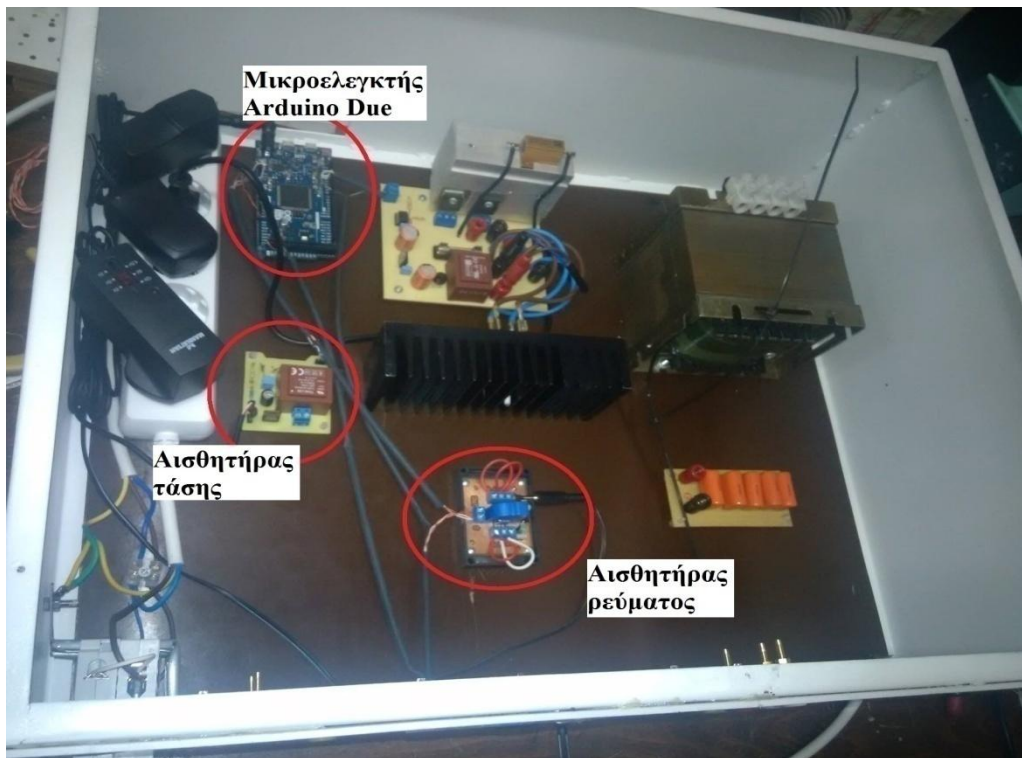
ελέγχου αφορούν την τροφοδοσία του οπτικού ζεύκτη. Συγκεκριμένα, ένας μετασχηματιστής τύπου πλακέτας υποβαθμίζει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου από 230 σε 18 Volts. Στη συνέχεια, μια ανορθωτική γέφυρα ανορθώνει την τάση πλάτους 18 Volts. Ακολουθούν δύο πυκνωτές εξομάλυνσης, ένα σταθεροποιητικό chip 7815 των 15 Volts και 2 ακόμη πυκνωτές, ώστε ο optocoupler να τεθεί σε λειτουργία από την DC τάση των 15 Volts που παράχθηκε, έχοντας την ελάχιστη δυνατή κυμάτωση. Οι δύο αντιστάτες που εμφανίζονται έχουν ως στόχο να περιορίζουν την τιμή του ρεύματος στον οπτικό ζεύκτη και στην πύλη του IGBT για προστασία. Στο σχήμα 3.15 φαίνονται τα προαναφερόμενα εξαρτήματα.



Σχήμα 3.16: Στοιχεία κυκλώματος παλμοδότησης βασικής πλακέτας.

4. ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΑΛΜΩΝ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε η βασική πλακέτα του ηλεκτρονικού μετατροπέα. Η πλακέτα αυτή απαρτίζεται από δύο ξεχωριστά κυκλώματα, τα οποία συνεργάζονται και αλληλεπιδρούν, ώστε να υλοποιηθεί η επιθυμητή λειτουργία του μετατροπέα. Το κύκλωμα παλμοδότησης είναι αυτό το οποίο δέχεται τον παλμό από τον μικροελεγκτή, τον επεξεργάζεται και τον οδηγεί στην πύλη του IGBT. Όμως, για να είναι σε θέση ο μικροελεγκτής να στείλει έναν παλμό στο κύκλωμα παλμοδότησης της βασικής πλακέτας, πρέπει να έχει προγραμματιστεί λαμβάνοντας ταυτόχρονα δεδομένα από το κύκλωμα ισχύος. Δηλαδή, απαιτείται κύκλωμα δειγματοληψίας. Το κύκλωμα αυτό λαμβάνει δεδομένα της τάσης και του ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα, με τα οποία ο μικροελεγκτής δημιουργεί τον κατάλληλο παλμό για τον έλεγχο του διακοπτικού στοιχείου. Το κύκλωμα δειγματοληψίας αποτελείται από δύο αισθητήρες, έναν αισθητήρα τάσης και έναν αισθητήρα ρεύματος. Στο σχήμα 4.1 φαίνονται ο επεξεργαστής και οι αισθητήρες δειγματοληψίας.



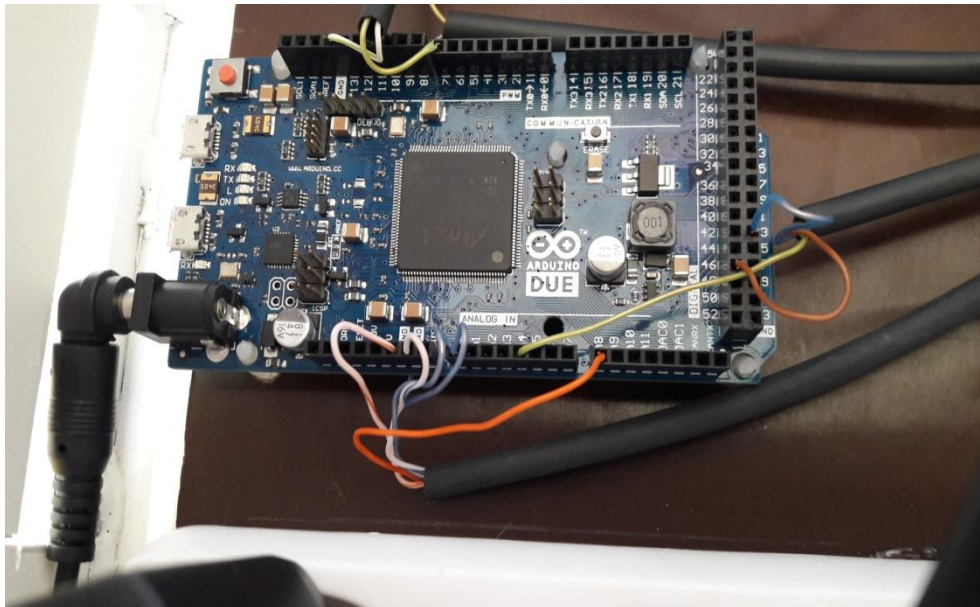
Σχήμα 4.1: Θέση στοιχείων κυκλώματος παραγωγής παλμών στον μετατροπέα.

4.1. Ο μικροελεγκτής Arduino Due

Ο Arduino Due είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα. Περιλαμβάνει έναν μικροεπεξεργαστή και θέσεις εισόδων-εξόδων. Η πλακέτα αυτή έχει προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring. Πρόκειται για τη γλώσσα προγραμματισμού C++ με απλοποιήσεις και αλλαγές μαζί με ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στη C++. Ο μικροεπεξεργαστής της πλακέτας είναι ένας ισχυρός Atmel91 SAM3X8E των 32bit με πυρήνα ARM Cortex-M3 που λειτουργεί στα 3,3V. Ο χρονισμός του βασίζεται σε έναν κρυσταλλικό ταλαντωτή των 84MHz. Ο μικροελεγκτής είναι προγραμματισμένος με ένα bootloader εκ κατασκευής, έτσι ώστε να μη χρειάζεται

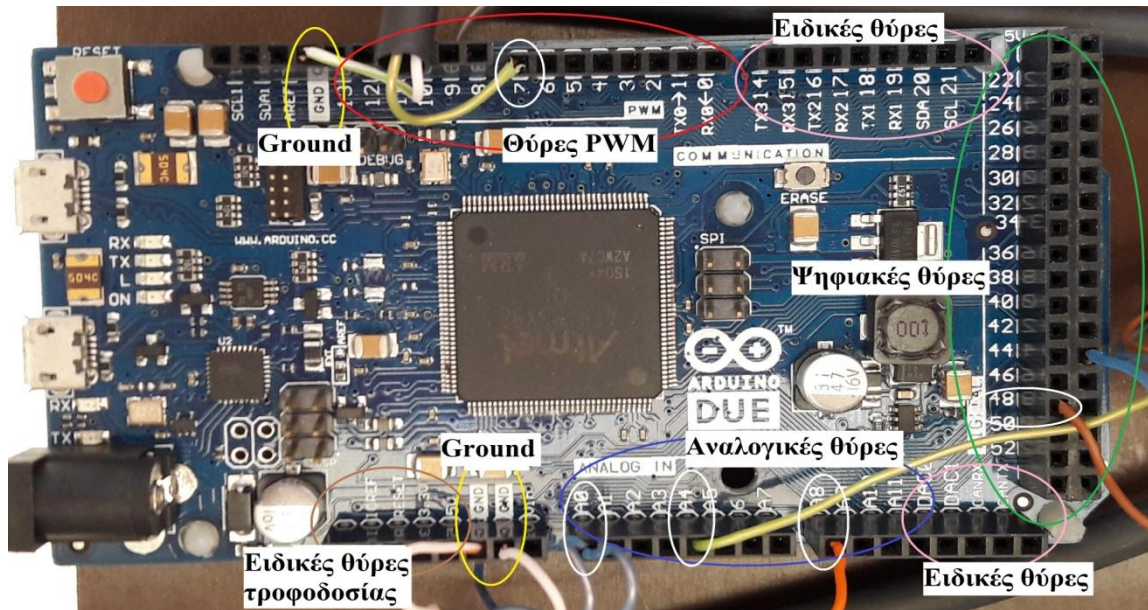
εξωτερικός προγραμματιστής [19]. Παρακάτω εμφανίζονται συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός μικροελεγκτή Arduino Due [19]:

- Τάση λειτουργίας: 3,3V
- Συνιστώμενη τάση εισόδου: 7-12V
- Ελάχιστη- Μέγιστη τάση εισόδου: 6-20V
- Ψηφιακοί ακροδέκτες εισόδου / εξόδου: 54
- Ακροδέκτες εξόδου PWM: 12
- Αναλογικοί ακροδέκτες εισόδου: 12
- Flash Μνήμη: 512 KB
- Ταχύτητα ρολογιού: 84 MHz
- Κουμπί επαναφοράς
- Κουμπί διαγραφής
- Μήκος 101,52 mm
- Πλάτος 53,3 mm
- Βάρος 36 g



Σχήμα 4.2: Μικροελεγκτής Arduino Due.

Στο σχήμα 4.3 εντοπίζονται οι θύρες εισόδου-εξόδου του μικροελεγκτή. Είναι χωρισμένες κατά ομάδες για να παρέχουν λειτουργικότητα και ευκολία. Με λευκό κύκλο έχουν σημειωθεί οι θύρες που χρησιμοποιούνται για τις απαραίτητες συνδέσεις του Arduino με τους αισθητήρες και το κύκλωμα ελέγχου της βασικής πλακέτας του μετατροπέα. Μέσω του προγράμματος για την παλμοδότηση του IGBT θέτονται σε λειτουργία τρεις αναλογικές θύρες, μία για τον αισθητήρα τάσης (pin A0), μία για τον αισθητήρα ρεύματος (pin A8) και μία για την μεσαία λήψη του ποτενσιόμετρου (pin A4), μέσω του οποίου ρυθμίζεται το Duty Cycle των παλμών. Επίσης, για την τροφοδοσία του ποτενσιόμετρου με τάση χρησιμοποιείται μια ψηφιακή θύρα (pin 48). Ακόμα μία ψηφιακή θύρα χρησιμοποιείται για τη λυχνία της σήμανσης πραγματικών παλμών (pin 45). Τέλος, η χρήση μιας θύρας PWM είναι αναγκαία για την εξαγωγή των παλμών (pin 7) στο κύκλωμα παλμοδότησης. Εκτενής αναφορά για τα παραπάνω θα γίνει κατά την ανάλυση του προγράμματος παλμοδότησης στο κεφάλαιο 5.



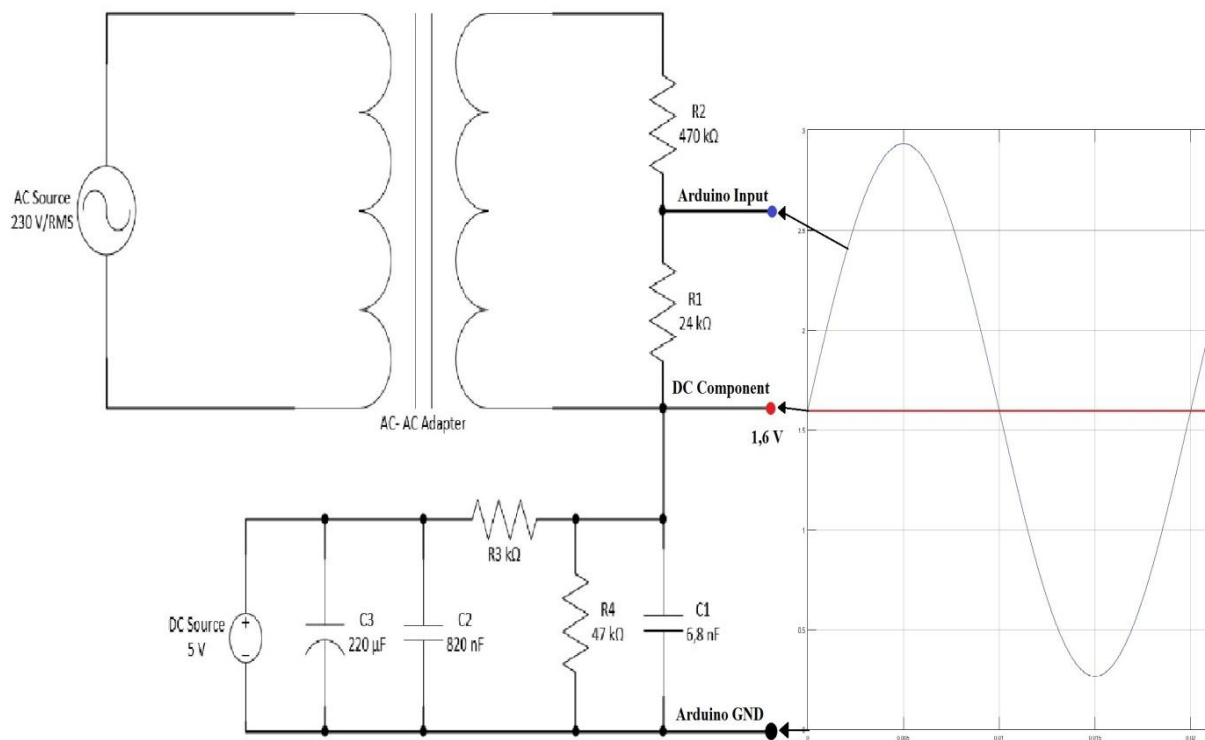
Σχήμα 4.3: Θύρες εισόδων- εξόδων του Arduino Due.

4.2. Ο αισθητήρας τάσης

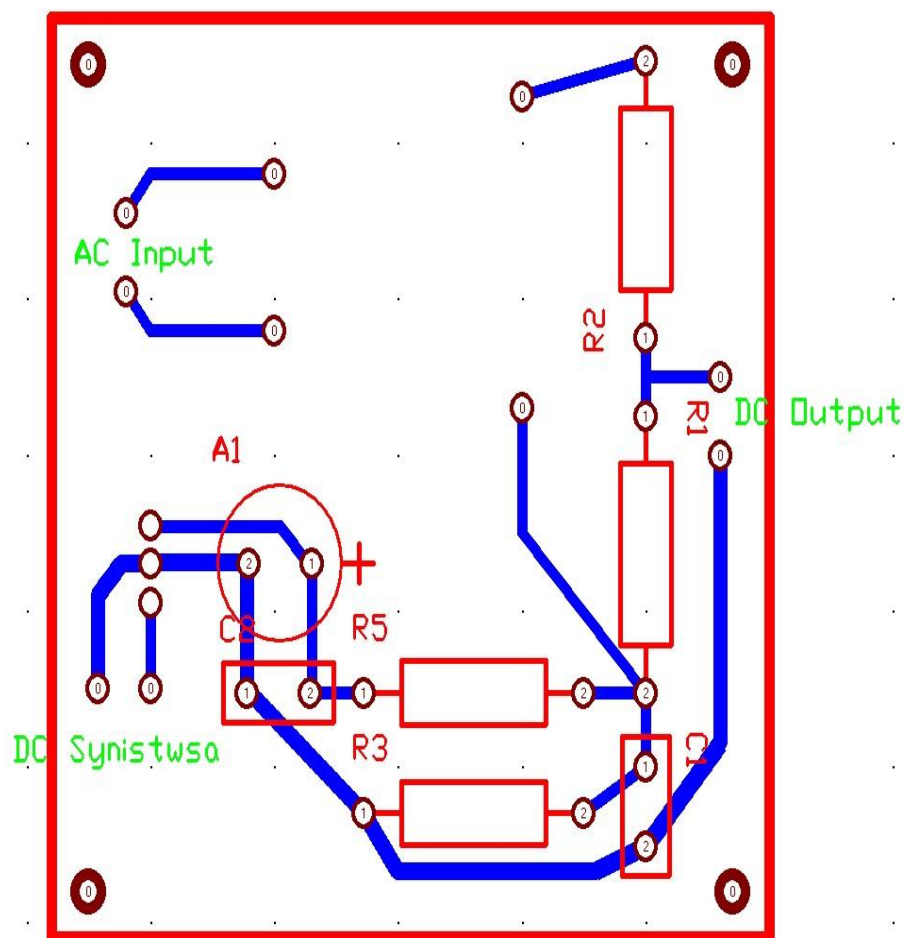
Ο αισθητήρας τάσης είναι μια πλακέτα, που έχει στόχο τη λήψη δεδομένων αναφορικά με την τάση από το κύκλωμα ισχύος και την παροχή τους στον μικροελεγκτή. Η κατασκευή του είναι αρκετά απλή και βασίστηκε στο διάγραμμα λειτουργίας του σχήματος 4.5. Όμως η παρουσία του μικροελεγκτή θέτει μερικές παραμέτρους. Η σημαντικότερη από αυτές, όπως προαναφέρθηκε, είναι η τάση λειτουργίας του, τα 3,3 Volts. Η παράμετρος αυτή είναι καθοριστική στη λειτουργία του αισθητήρα, καθώς μια μεγαλύτερη τιμή τάσης στον Arduino ενδέχεται να τον καταστρέψει. Για τον λόγο αυτόν, τόσο κατά τον σχεδιασμό με θεωρητικούς υπολογισμούς, όσο και κατά την κατασκευή με συνεχείς πρακτικούς ελέγχους, η κατασκευή του αισθητήρα πραγματοποιήθηκε με πολλή προσοχή εστιάζοντας σε κάθε λεπτομέρεια. Ο σχεδιασμός της πλακέτας έγινε με χρήση του Trax Maker 2000 (σχ. 4.6).



Σχήμα 4.4: Αισθητήρας τάσης.

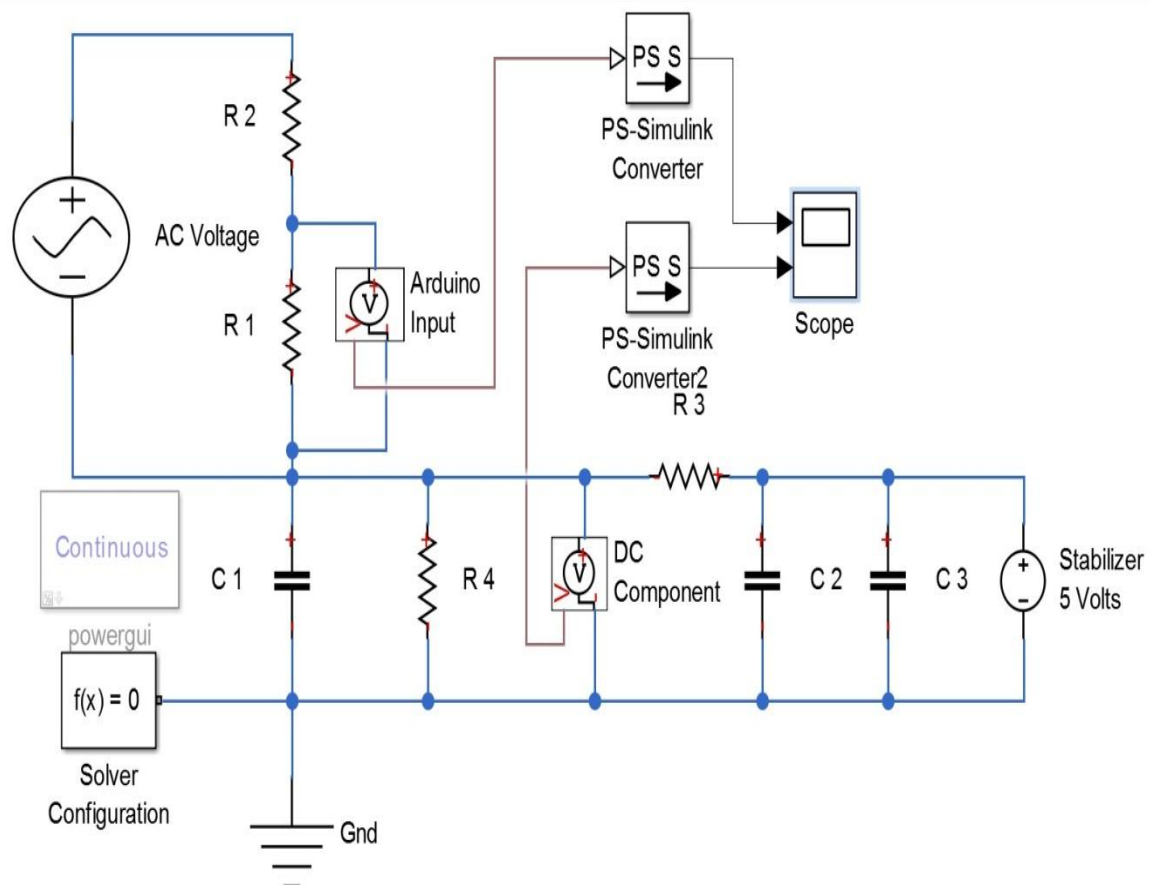


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα λειτουργίας αισθητήρα τάσης.



Σχήμα 4.6: Σχέδιο πλακέτας αισθητήρα τάσης.

Στη συνέχεια της κατασκευής του αισθητήρα τάσης ήταν αναγκαία η επαλήθευση των θεωρητικών τιμών κάθε στοιχείου της πλακέτας. Με τη χρήση του Matlab- Simulink έγινε προσομοίωση του κυκλώματος και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα επιθυμητά, επιλέχθηκαν οι τιμές των αντιστάσεων, των πυκνωτών και των υπόλοιπων στοιχείων για την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας (σχ. 4.7). Η λειτουργία του αισθητήρα μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Το πρώτο είναι ο μετασχηματισμός της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου με χρήση ενός μετασχηματιστή και ενός διαιρέτη τάσης. Ως αποτέλεσμα αυτού, το πλάτος $A=230*\sqrt{2}$ V του δικτύου γίνεται πολύ μικρότερο $A=1.3V$ περίπου. Αν και το πλάτος από κορυφή σε κορυφή ($A_{peak-peak}=2.6V$) είναι εντός των ορίων που θέτει η λειτουργία του μικροελεγκτή, το σήμα είναι εναλλασσόμενο, γεγονός που δεν ικανοποιεί τη δεύτερη σημαντική λειτουργική παράμετρο του Arduino. Για την ικανοποίηση και αυτής της παραμέτρου, στο μετασχηματισμένο πλέον σήμα της τάσης, προστίθεται μια DC συνιστώσα με τιμή 1,6 V. Η λήψη της γίνεται μέσω ενός τροφοδοτικού των 6 V, ενός σταθεροποιητικού των 5V και του κυκλώματος των C1, C2, C3, R3 και R4. Στην έξοδο λαμβάνεται ένα σήμα-αντίγραφο της τάσης του δικτύου με πλάτος $A=1.3$ V και $A_{p-p}= 2.6V$ περίπου, δηλαδή ένα συνεχές μεταβαλλόμενο σήμα.

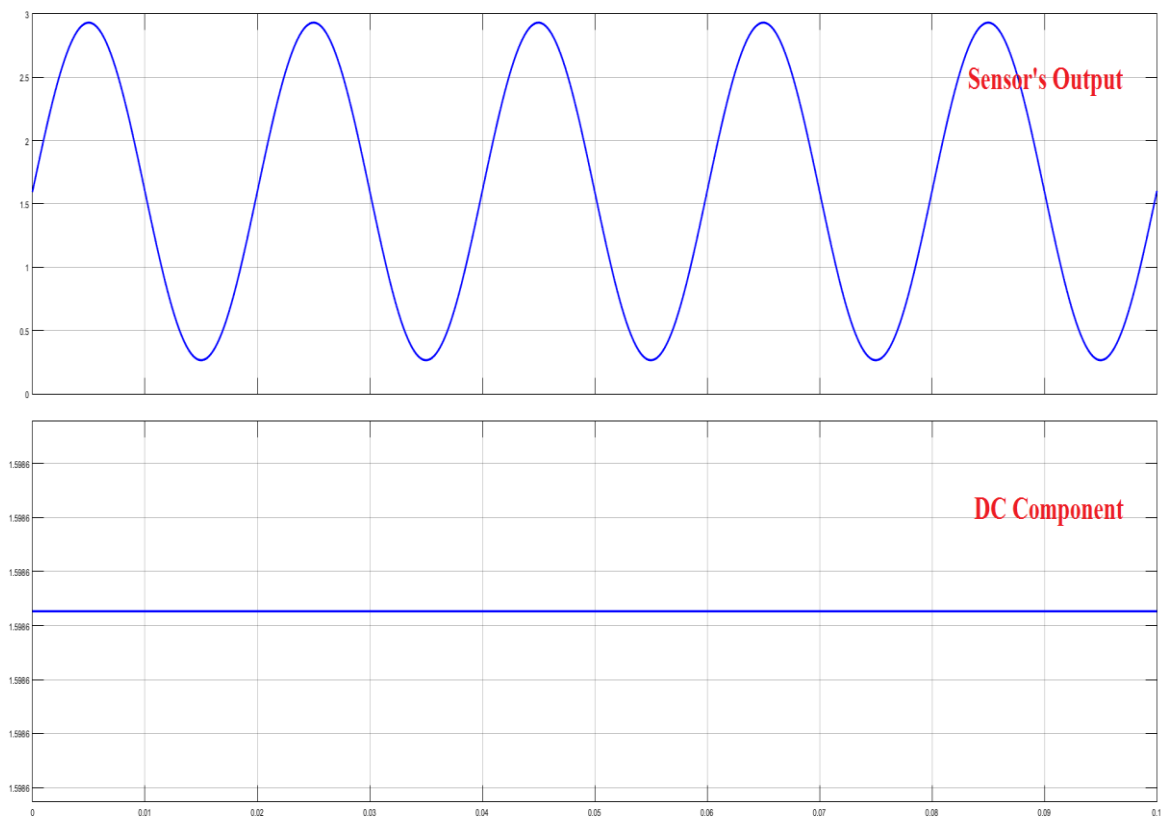


Σχήμα 4.7: Κύκλωμα προσομοίωσης αισθητήρα τάσης στο Matlab- Simulink.

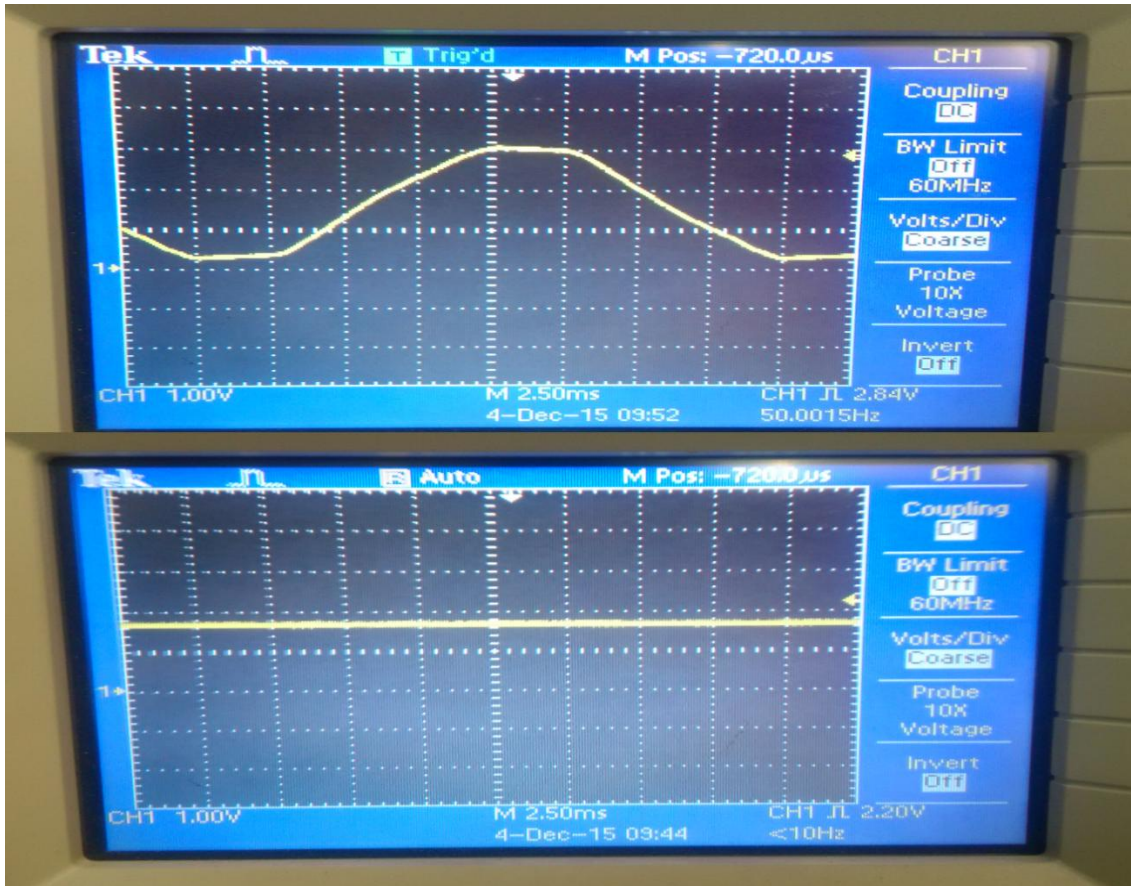


Σχήμα 4.8: Κατασκευή και δοκιμή αισθητήρα τάσης.

Στο σχήμα 4.9 εμφανίζεται το περιεχόμενο του scope του κυκλώματος προσομοίωσης, δηλαδή η έξοδος του αισθητήρα και η DC συνιστώσα. Όπως παρατηρείται, οι δύο παράμετροι που θέτει ο μικροελεγκτής έχουν ικανοποιηθεί. Στο σχήμα 4.10 εμφανίζονται οι ίδιες κυματομορφές με χρήση παλμογράφου κατά τη διάρκεια της τελευταίας δοκιμής-ελέγχου πριν τη σύνδεση μικροελεγκτή και αισθητήρα τάσης.

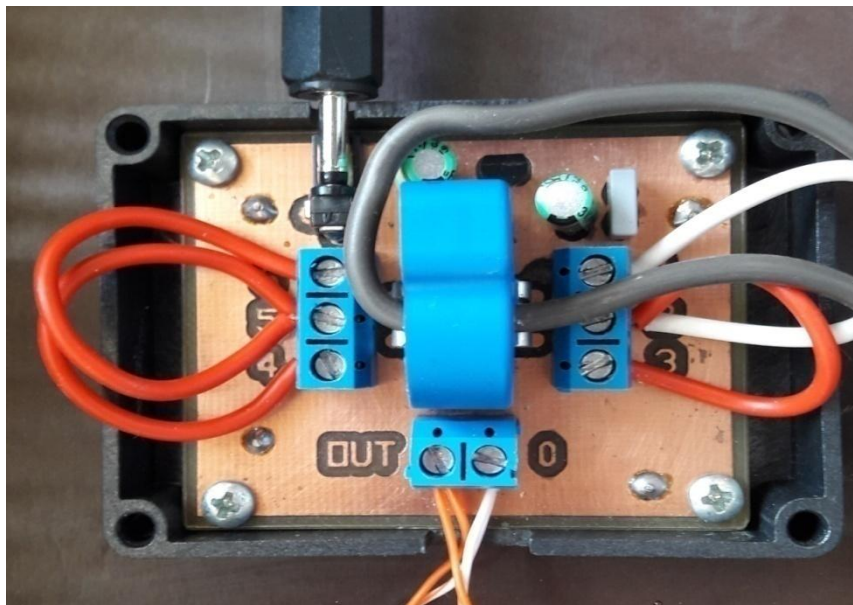


Σχήμα 4.9: Σήμα εξόδου αισθητήρα για 230 V και DC συνιστώσα στο Matlab- Simulink.



Σχήμα 4.10: Σήμα εξόδου αισθητήρα για είσοδο 230 V και DC συνιστώσα σε παλμογράφο.

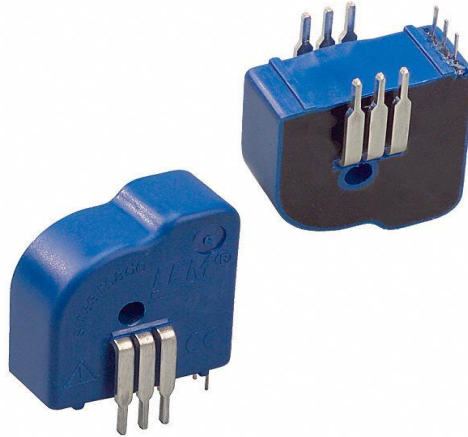
4.3. Ο αισθητήρας ρεύματος



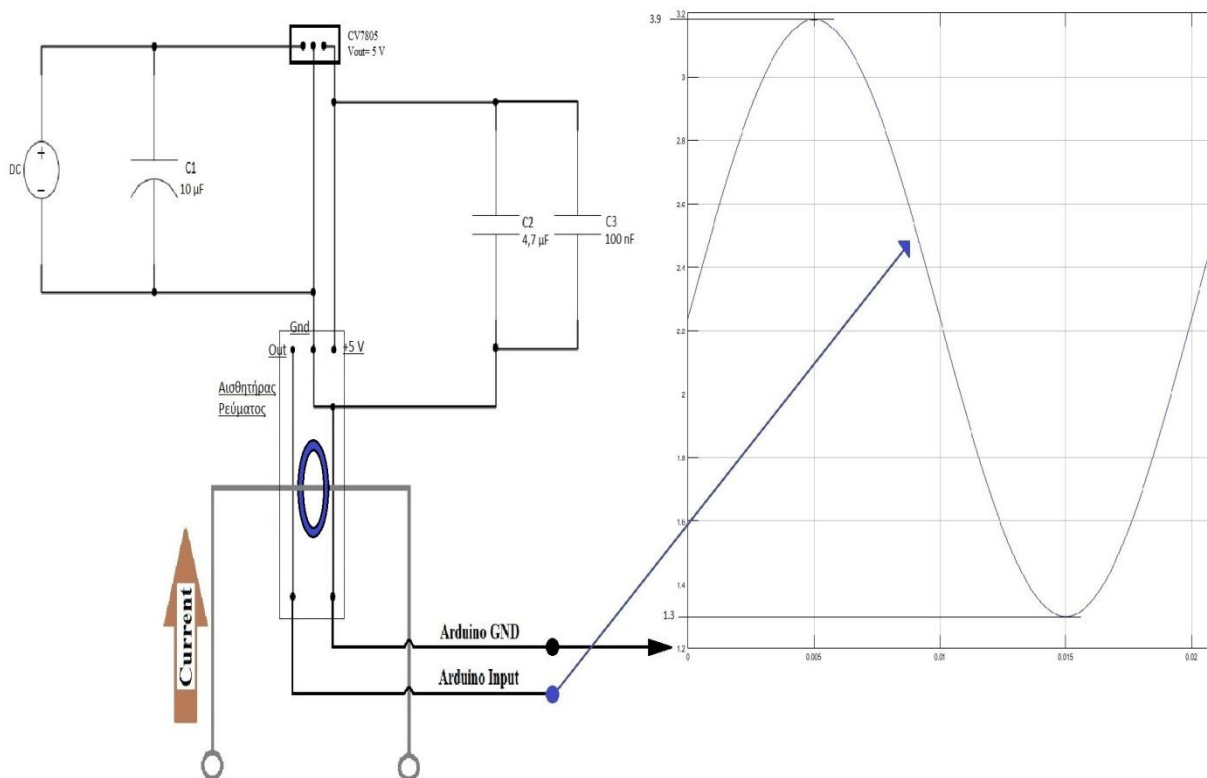
Σχήμα 4.11: Αισθητήρας ρεύματος.

Ο αισθητήρας ρεύματος είναι ένα κύκλωμα πλακέτας με κύριο στόχο την ανάγνωση του ρεύματος στο κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα και την αποστολή του δείγματός του στον μικροελεγκτή. Η λειτουργία του βασίζεται σε έναν αισθητήρα ρεύματος κλειστού βρόχου,

που χρησιμοποιεί το φαινόμενο Hall (σχ. 4.12) και αναλύεται στο διάγραμμα λειτουργίας (σχ. 4.13). Καθώς το ρεύμα του κυκλώματος ισχύος περνά μέσα από τον κλειστό βρόχο, παράγεται ένα σήμα τάσης, που αποτελεί ακριβή αναπαράσταση του ρεύματος. Έπειτα, ο αισθητήρας μετασχηματίζει κατάλληλα το προηγούμενο σήμα για να μπορεί να εισαχθεί στον μικροελεγκτή.

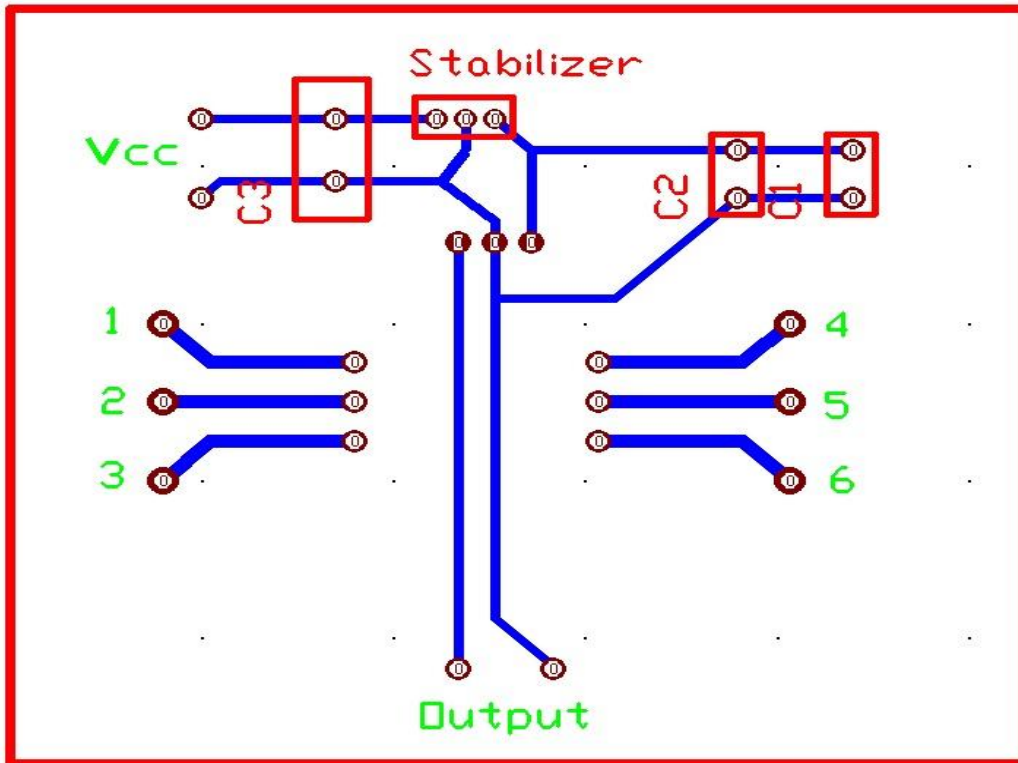


Σχήμα 4.12: Μετατροπέας ρεύματος κλειστού βρόχου επιδράσεως Hall.



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα λειτουργίας αισθητήρα ρεύματος.

Η πλακέτα του αισθητήρα υλοποιήθηκε στο Trax Maker 2000 (σχ. 4.14). Η τάση εισόδου V_{cc} είναι η τάση που απαιτεί ο αισθητήρας για τη λειτουργία του. Οι πυκνωτές σε συνδυασμό με το σταθεροποιητικό chip των 5 Volts προστατεύουν τον αισθητήρα από υπερτάσεις, αιχμές και μεταβολές της V_{cc} που δεν είναι επιθυμητές. Σύμφωνα με το φύλλο οδηγιών (Datasheet)-(σχ. 4.15), το ονομαστικό ρεύμα στον αισθητήρα μπορεί να καθοριστεί με την κατάλληλη σύνδεση των ακροδεκτών (pins 1, 2, 3, 4, 5 και 6) του αισθητήρα.

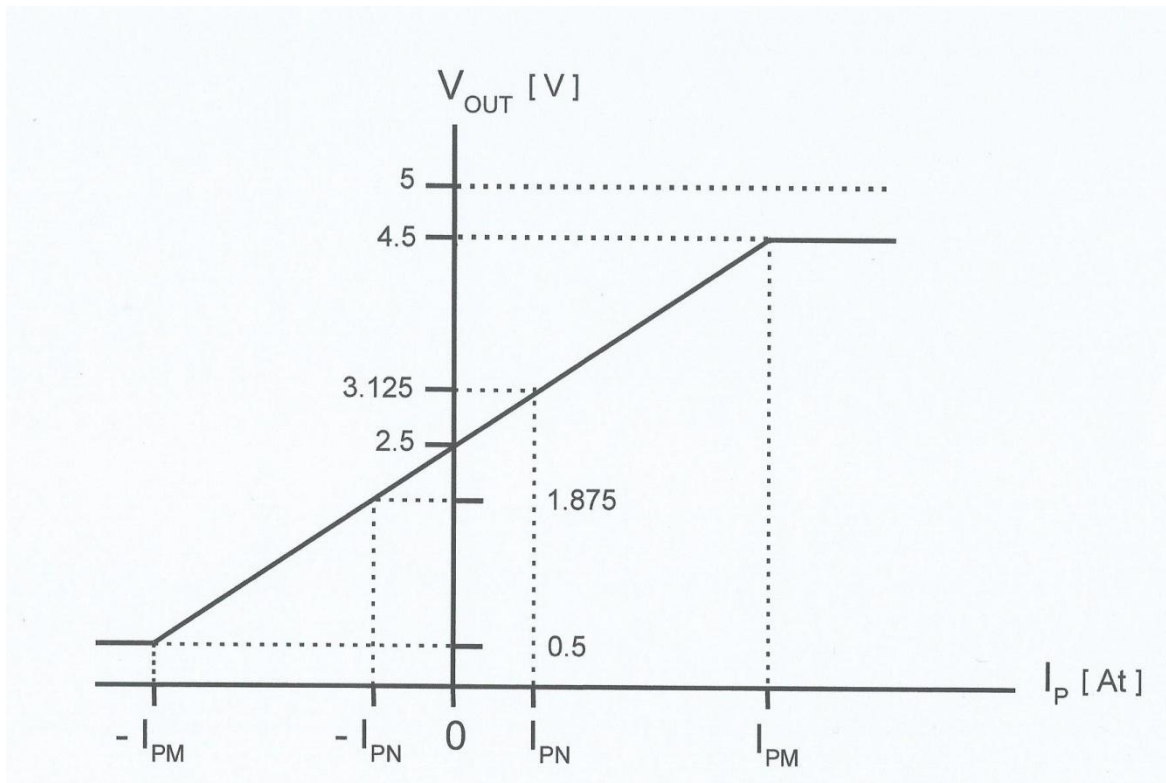


Σχήμα 4.14: Σχέδιο πλακέτας αισθητήρα ρεύματος.

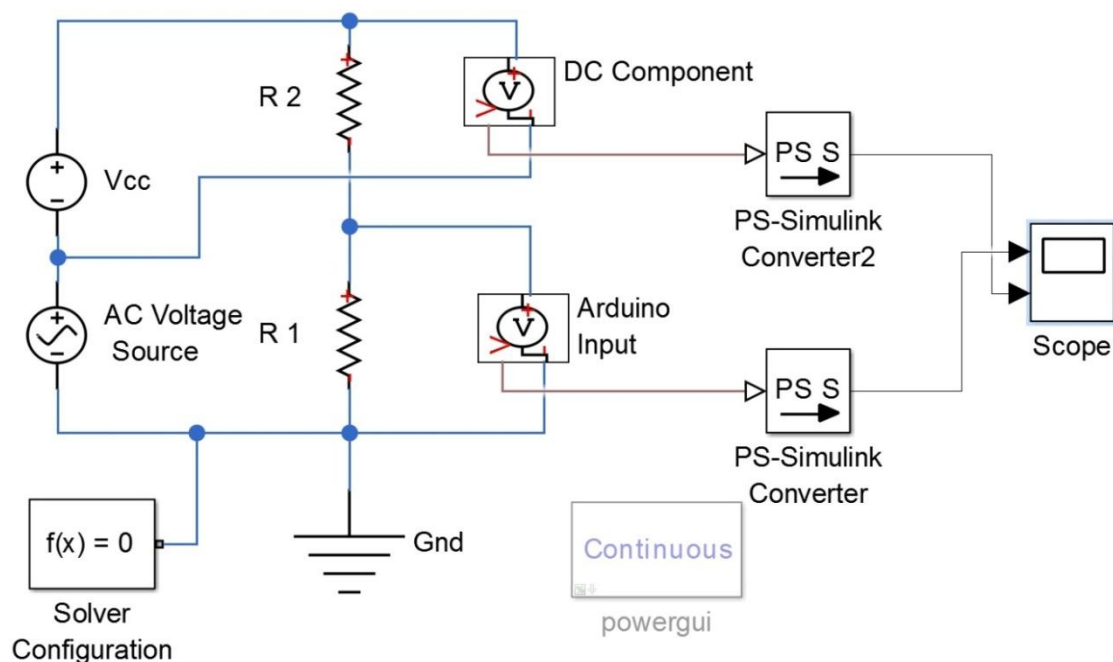
Number of primary turns	Primary nominal current rms I_{N} [A]	Nominal ¹⁾ output voltage V_{OUT} [V]	Primary resistance R_p [mΩ]	Primary insertion inductance L_p [μH]	Recommended connections
1	± 6	2.5 ± 0.625	0.18	0.013	
2	± 3	2.5 ± 0.625	0.81	0.05	
3	± 2	2.5 ± 0.625	1.62	0.12	

Σχήμα 4.15: Πίνακας αντιστοιχίας ονομαστικού ρεύματος και συνδεσμολογίας αισθητήρα ρεύματος [20].

Η αλλαγή της συνδεσμολογίας των ακροδεκτών του αισθητήρα αλλάζει την τιμή των ορίων του ρεύματος που μπορεί να λειτουργήσει. Δεν επηρεάζει όμως τον τρόπο απόκρισής του στο σήμα που δέχεται και το σήμα που παράγει στην έξοδό του. Στο σχήμα 4.16 εμφανίζεται η χαρακτηριστική απόκριση του αισθητήρα Hall. Μελετώντας με προσοχή τη γραφική αυτή και λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που έχουν θέσει ο μικροελεγκτής και το κύκλωμα ισχύος, καθορίζονται οι οριακές τιμές του ρεύματος του αισθητήρα. Αρχικά, το σήμα της τάσης στην έξοδο του αισθητήρα έχει θετικό πρόσημο για κάθε πιθανή στιγμιαία τιμή του ρεύματος στο κύκλωμα. Το γεγονός αυτό ικανοποιεί τον περιορισμό του Arduino Due για συνεχή σήματα στην είσοδό του. Η τάση στην έξοδο για το ονομαστικό ρεύμα είναι 3,125 Volts, δηλαδή τιμή μικρότερη των 3,3Volts του Arduino. Άρα, επιθυμώντας υψηλές δυνατότητες του μετατροπέα σχετικά με το ονομαστικό ρεύμα, επιλέχθηκε η τιμή $I_N = 6A$.



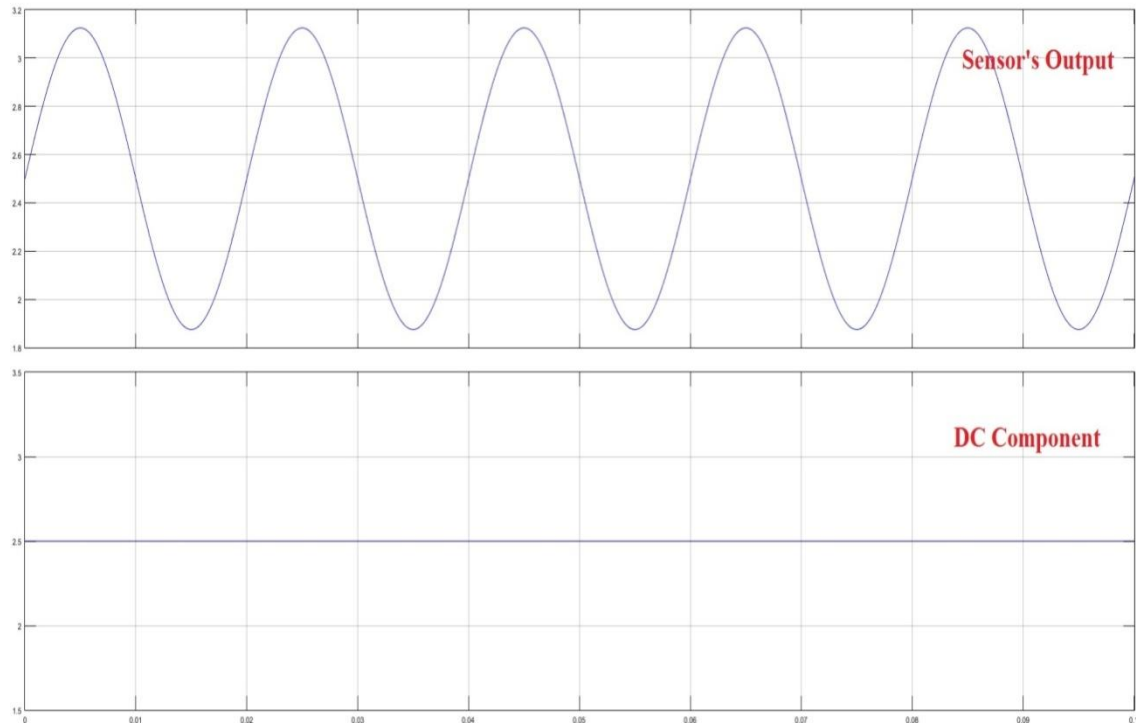
Σχήμα 4.16: Χαρακτηριστική απόκρισης αισθητήρα Hall [20].



Σχήμα 4.17: Κύκλωμα προσομοίωσης αισθητήρα ρεύματος στο Matlab- Simulink.

Με το κύκλωμα προσομοίωσης στο Matlab- Simulink (σχ. 4.17) πραγματοποιήθηκε έλεγχος του θεωρητικού σχηματισμού και λειτουργίας του αισθητήρα ρεύματος. Οι δύο πηγές αναπαριστούν τη λειτουργία του μετατροπέα σύμφωνα με τη χαρακτηριστική απόκρισης. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε με βάση την παραπάνω χαρακτηριστική η τάση στην έξοδο του αισθητήρα Hall για κυματομορφή ρεύματος εισόδου πλάτους 6 A. Οι δύο αντιστάσεις χρησιμεύουν στη λήψη των σημάτων από το scope του κυκλώματος. Στο scope του κυκλώματος εμφανίζονται στο κανάλι 1 η έξοδος του αισθητήρα, δηλαδή το σήμα του

ρεύματος που λαμβάνει ο μικροελεγκτής και στο κανάλι 2 η DC συνιστώσα του μετατροπέα ρεύματος του αισθητήρα (σχ. 4.18). Στο σχήμα 4.19 παρατίθενται τα ίδια σήματα του scope του κυκλώματος προσομοίωσης σε παλμογράφο κατά την τελική δοκιμή του αισθητήρα πριν τη σύνδεσή του σε κάποια είσοδο του μετατροπέα.



Σχήμα 4.18: Σήμα εξόδου αισθητήρα για είσοδο 6 A και DC συνιστώσα στο Matlab-Simulink.



Σχήμα 4.19: Σήμα εξόδου αισθητήρα για είσοδο 6 A και DC συνιστώσα σε παλμογράφο.

5. ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΑΛΜΟΔΟΤΗΣΗΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Η δυνατότητα ελέγχου της τάσης, του ρεύματος και των περαιτέρω ηλεκτρομηχανικών μεγεθών μιας ηλεκτρικής μηχανής αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, διότι βελτιστοποιώντας τη λειτουργία της μπορεί να τελεστεί η όποια εργασία της πιο αποδοτικά και αποτελεσματικά. Αυτή τη δυνατότητα την παρέχουν οι μετατροπείς που διαθέτουν ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία. Αυτά μπορούν να δεχτούν παλμούς που καθορίζουν τον χρόνο αγωγής τους και λειτουργούν ως διακόπτες στο κύκλωμα. Η παραγωγή των παλμών συμβαίνει με διάφορους τρόπους, που ονομάζονται τεχνικές παλμοδότησης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες από τις πιο γνωστές τεχνικές παλμοδότησης. Έπειτα, αναλύεται το πρόγραμμα μέσω του οποίου ο μικροελεγκτής παράγει τους απαραίτητους παλμούς.

5.1. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές παλμοδότησης

Στη βιβλιογραφία συναντάται πληθώρα τεχνικών παλμοδότησης. Αν και καθεμιά έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και έχει επηρεάσει με διαφορετικό τρόπο τη λειτουργία μιας μηχανής, υπάρχουν πολλά κριτήρια κατηγοριοποίησης. Από τα πιο σημαντικά είναι η διακοπτική συχνότητα, δηλαδή η συχνότητα των παλμών (π.χ. συγκριτικά με τη συχνότητα του δικτύου). Συνεπώς, υπάρχουν δύο κατηγορίες τεχνικών, αυτές με διακοπτική συχνότητα ίση με αυτή του δικτύου (π.χ. 50Hz) και με διακοπτική συχνότητα μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου (π.χ. 500 Hz, 1 kHz, 10 kHz, κ.α.). Σε όλες τις τεχνικές παλμοδότησης στόχος είναι ο έλεγχος της διάρκειας αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται έμμεσα κάποιο ηλεκτρομηχανικό μέγεθος.

5.1.1. Τεχνικές παλμοδότησης με διακοπτική συχνότητα ίση με τη συχνότητα του δικτύου

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται τρεις διαφορετικές τεχνικές [17]:

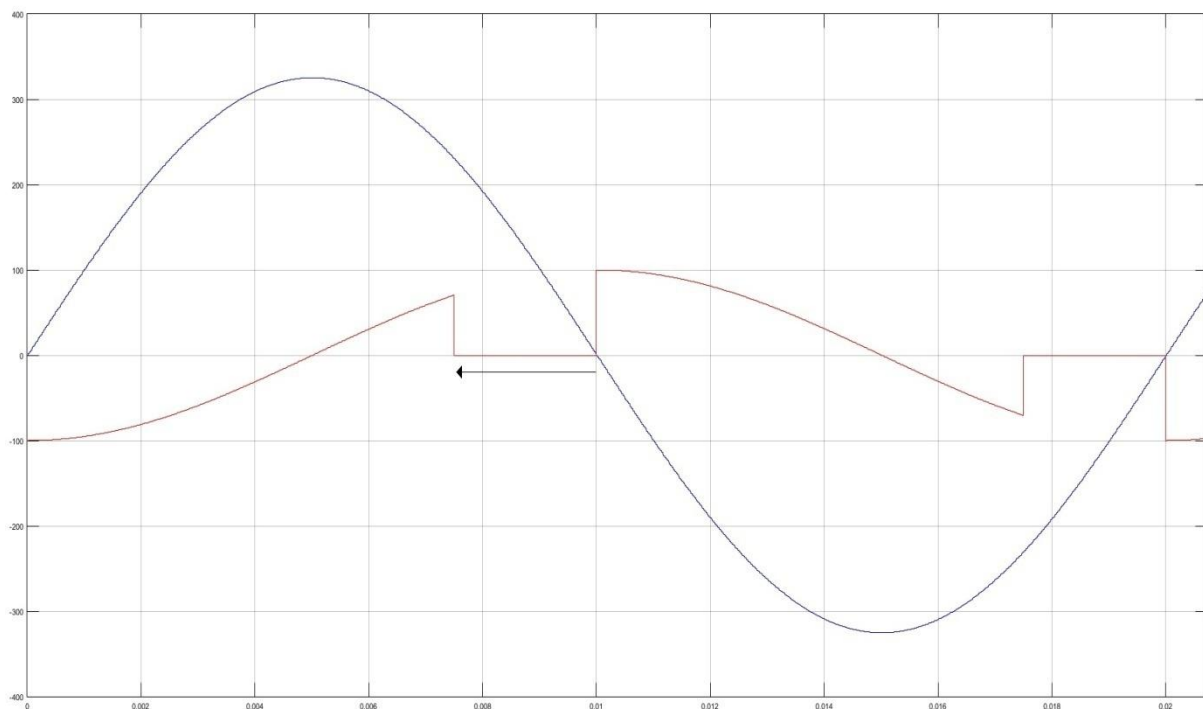
- με γωνία καθυστέρησης α .
- με γωνία προήγησης β .
- με συνδυασμό των δύο παραπάνω τεχνικών.

Η τεχνική παλμοδότησης με γωνία καθυστέρησης α είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική της κατηγορίας της, ειδικά σε μετατροπείς που αποτελούνται από θυρίστορ. Η γωνία καθυστέρησης α είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ο ημιαγωγός δε βρίσκεται σε αγωγή σε σύγκριση με την τάση του δικτύου. Συγκεκριμένα, είναι το διάστημα από την έναρξη μιας περιόδου της τάσης έως τη στιγμή που ο ημιαγωγός αρχίζει να άγει και να διαρρέεται από ρεύμα (σχ. 5.1). Όσο καθυστερεί η έναυση των ημιαγωγικών στοιχείων, τόσο μειώνεται η ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στο φορτίο.



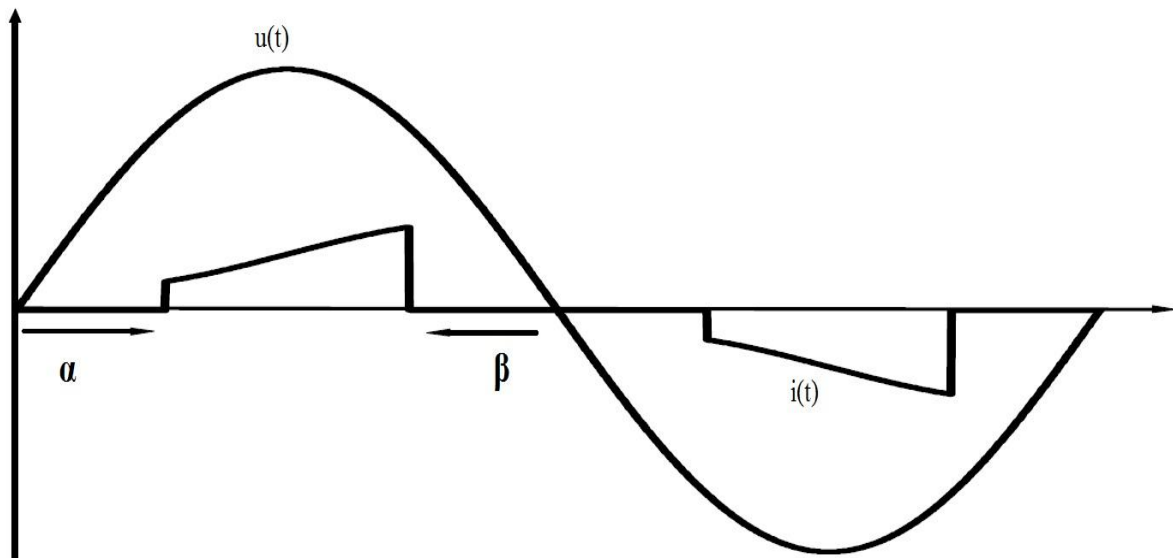
Σχήμα 5.1: Γωνία καθυστέρησης $\alpha = 45^\circ$ σε ωμικό φορτίο.

Παρόμοια με την προηγούμενη τεχνική είναι η τεχνική με γωνία προήγησης β . Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε ημιαγωγούς ελεγχόμενης σβέσης, καθώς αυτοί παύουν να βρίσκονται σε αγωγή και να διαρρέονται από το ρεύμα του κυκλώματος πριν το μηδενισμό της τάσης δικτύου. Άρα, η γωνία β είναι το χρονικό διάστημα από τον μηδενισμό του ρεύματος έως τον μηδενισμό της τάσης δικτύου (σχ. 5.2).



Σχήμα 5.2: Γωνία προήγησης $\beta = 45^\circ$ σε επαγωγικό φορτίο.

Μια ακόμη τεχνική της ίδιας κατηγορίας είναι και ο συνδυασμός των δύο παραπάνω τεχνικών, δηλαδή μέσω της παλμοδότησης να ελέγχεται και η έναυση και η σβέση των ημιαγωγών του μετατροπέα (σχ. 5.3) [17].



Σχήμα 5.3: Συνδυασμός γωνιών καθυστέρησης α και προήγησης β για σύνθετο R-L φορτίο.

Οι τεχνικές παλμοδότησης με διακοπτική συχνότητα ίση με τη συχνότητα του δικτύου, όπως αυτές που προαναφέρθηκαν, μπορούν να υλοποιηθούν εύκολα και παρουσιάζουν σχετικά υψηλό βαθμό απόδοσης λόγω της χαμηλής διακοπτικής συχνότητας. Όμως, ο συντελεστής ισχύος είναι ιδιαίτερα χαμηλός. Αυτό συμβαίνει λόγω της απόκλισης της κυματομορφής του ρεύματος από την ημιτονοειδή, γεγονός που σημαίνει την αύξηση των ανώτερων αρμονικών του ρεύματος, άρα και αύξηση της αέργου ισχύος. Επιπρόσθετα, την αύξηση της αέργου ισχύος ενισχύει και η διαφορά φάσης, που εισάγεται μεταξύ της βασικής αρμονικής του ρεύματος και της τάσης του δικτύου λόγω της μετατόπισης της πρώτης [17].

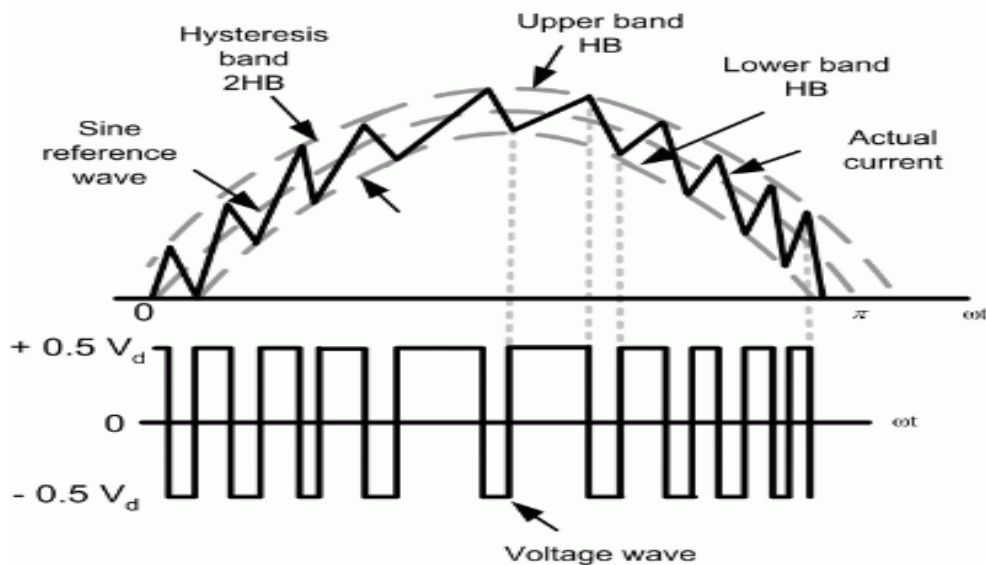
5.1.2. Τεχνικές παλμοδότησης με διακοπτική συχνότητα μεγαλύτερη από τη συχνότητα του δικτύου

Στη δεύτερη κατηγορία τεχνικών παλμοδότησης ανήκουν οι τεχνικές που η συχνότητα των παλμών είναι υψηλότερη από αυτή της τάσης αναφοράς. Κάποιες από τις πιο γνωστές είναι [17]:

- έλεγχος βρόχου υστέρησης ρεύματος (hysteresis current control- HCC).
- απλή διαμόρφωση εύρους παλμών (pulse width modulation- PWM).
- ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (sinusoidal pulse width modulation- sPWM).

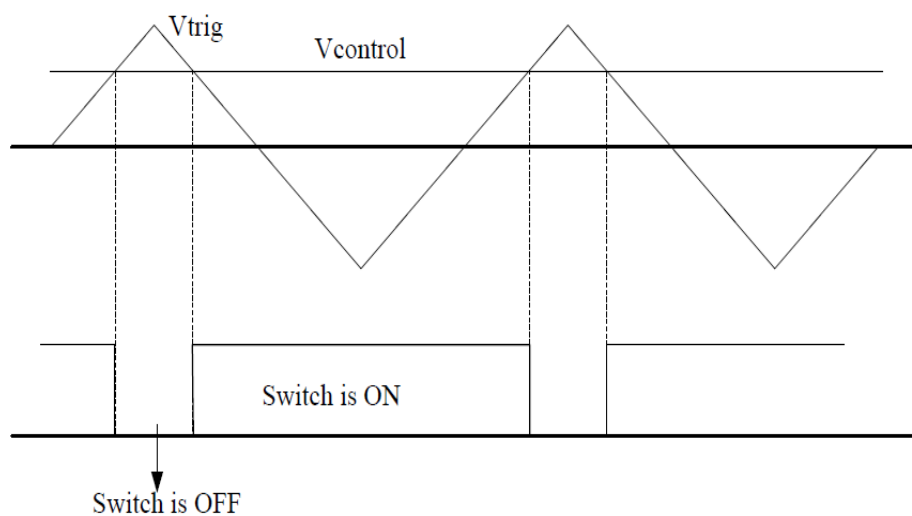
Κατά την τεχνική HCC η παραγωγή παλμών πραγματοποιείται κατά τη σύγκριση του πραγματικού ρεύματος με δύο αναφορές αυτού, οι οποίες καθορίζονται από τον κατασκευαστή και αποτελούν τα όρια μιας ζώνης υστέρησης. Το πραγματικό ρεύμα ακολουθεί συνεχώς την εντολή ρεύματος μέσα στη ζώνη υστέρησης. Με τον τρόπο αυτό παράγονται οι απαιτούμενοι παλμοί για τον έλεγχο των στοιχείων του κυκλώματος (σχ. 5.4). Η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του φορτίου, τα επιλεγμένα όρια και την τιμή του φίλτρου εισόδου. Αυτή η τεχνική έχει ως

πλεονέκτημα τον υψηλό συντελεστή ισχύος που παρουσιάζει, ειδικά όταν τα όρια της ζώνης είναι στενά με αποτέλεσμα η διακοπτική συχνότητα να είναι πολύ υψηλή, αφού περιορίζονται οι ανώτερες αρμονικές. Όμως, η υψηλή διακοπτική συχνότητα οδηγεί σε θερμικές απώλειες στα ημιαγωγικά στοιχεία με αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης [17,21,22].



Σχήμα 5.4: Δημιουργία παλμών με τεχνική HCC.

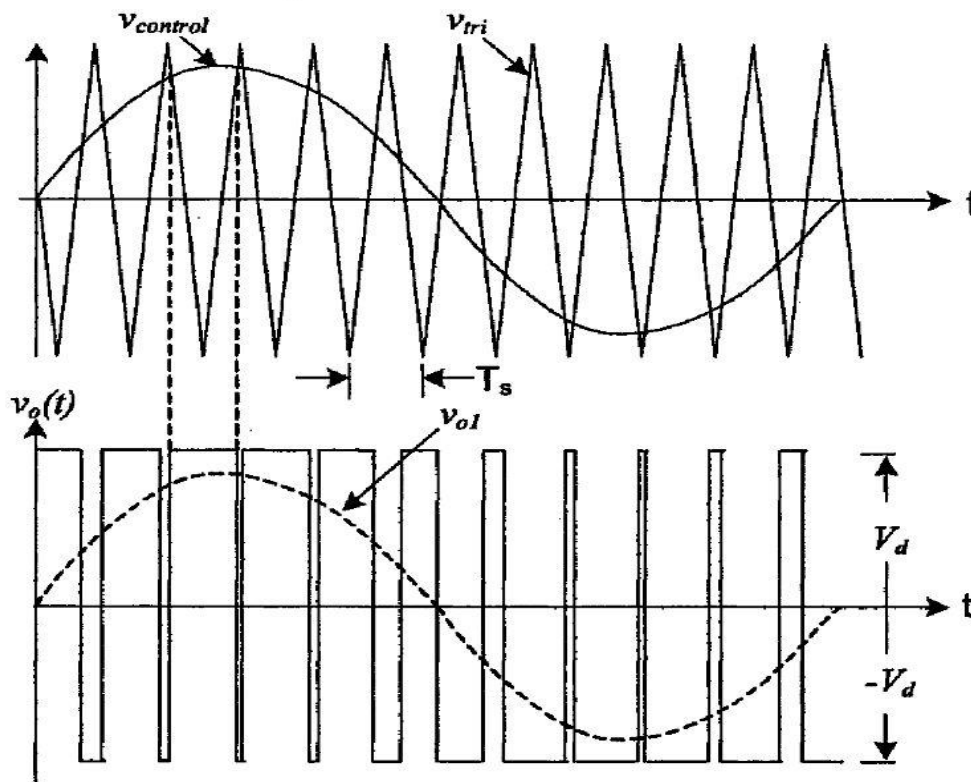
Η PWM είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική παλμοδότησης αυτής της κατηγορίας, γιατί έχει απλή παραγωγή παλμών και σταθερή διακοπτική συχνότητα. Οι παλμοί προκύπτουν από τη σύγκριση μιας τριγωνικής κυματομορφής με ένα σήμα σταθερής τάσης (σχ. 5.5). Όταν η τιμή της συνεχούς τάσης είναι μεγαλύτερη από αυτή της τριγωνικής κυματομορφής, δημιουργείται ένας παλμός. Έτσι, προκύπτει μια παλμοσειρά, στην οποία το εύρος των παλμών είναι σταθερό για όλη την περίοδο της τάσης του δικτύου. Το σταθερό εύρος παλμών και η σταθερή διακοπτική συχνότητα αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα, όμως ο πολύ χαμηλότερος PF που εμφανίζει συγκριτικά με την HCC είναι το βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής. Πρέπει να αναφερθεί πως το πλάτος και η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής και η τιμή της dc τάσης καθορίζονται από τον κατασκευαστή και μπορεί να τα μεταβάλλει προκαλώντας όποια διαφοροποίηση επιθυμεί [17,23].



Σχήμα 5.5: Δημιουργία παλμών με τεχνική PWM.

Η sPWM τεχνική ακολουθεί παρόμοια διαδικασία με την PWM στην παραγωγή των παλμών με μια διαφοροποίηση, όμως. Η σύγκριση της τριγωνικής κυματομορφής πραγματοποιείται με ένα ημίτονο ανάλογο της τάσης του δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος (σχ. 5.6). Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία μιας παλμοσειράς που το εύρος των παλμών μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου της τάσης δικτύου. Από τη βιβλιογραφία φαίνεται ότι από τις προηγούμενες τεχνικές η τεχνική παλμοδότησης sPWM υπερτερεί έναντι των υπολοίπων, αφού εμφανίζει υψηλό βαθμό απόδοσης και υψηλό συντελεστή ισχύος για όλες σχεδόν τις τιμές της ισχύος [17,22,24].

Ομοίως με την PWM, ο κατασκευαστής δύναται να διαφοροποιεί την παραγόμενη παλμοσειρά, μεταβάλλοντας τη συχνότητα και το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής.



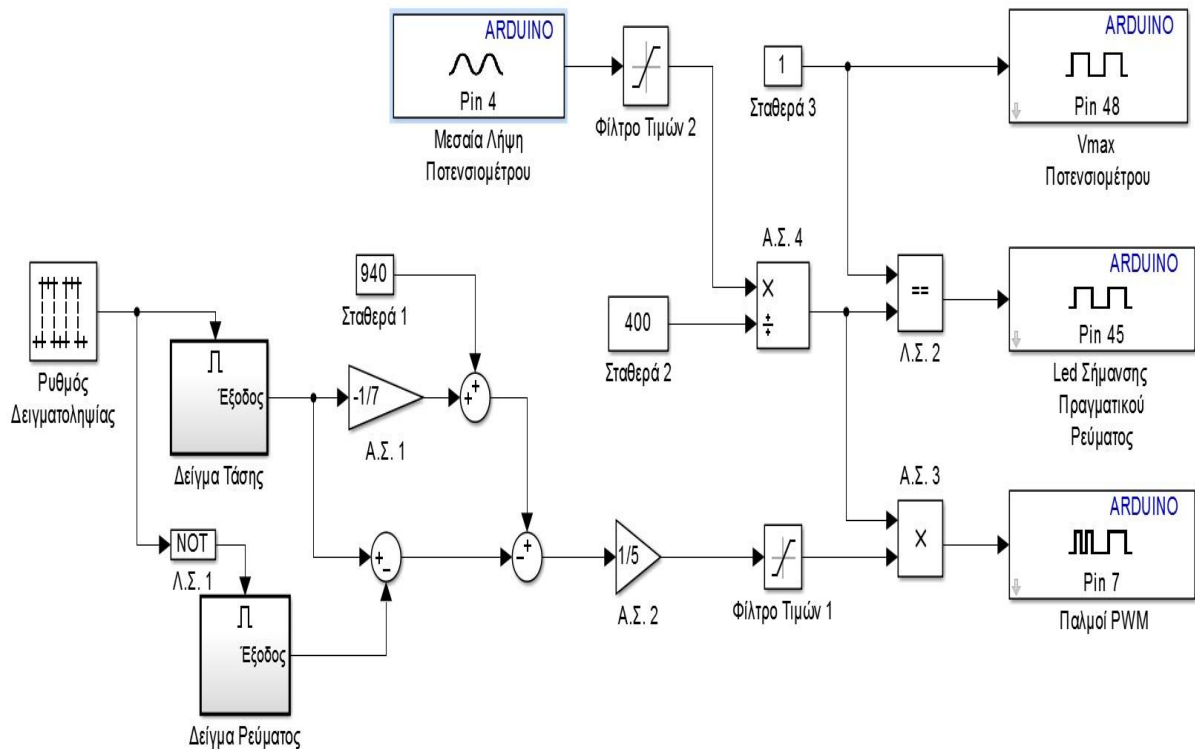
Σχήμα 5.6: Δημιουργία παλμών με την τεχνική sPWM.

5.2. Παλμοδότηση μετατροπέα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός των προαναφερθέντων τεχνικών παλμοδότησης HCC και sPWM. Στόχος αυτής της τεχνικής είναι ο συνδυασμός του δυναμικού χαρακτήρα της HCC και της περιοδικότητας που εμφανίζουν οι παλμοί στην sPWM. Για την υλοποίηση αυτής της τεχνικής παλμοδότησης είναι απαραίτητη η δειγματοληψία της τάσης και του ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα που παρέχεται από τους αισθητήρες που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4. Οι δύο αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα για τον μικροελεγκτή και αυτός τα επεξεργάζεται μέσω του προγράμματος που περιέχει, ώστε να παράγει τους κατάλληλους παλμούς ελέγχου του IGBT. Στις επόμενες ενότητες θα αναλυθεί το πρόγραμμα που χρησιμοποιεί ο Arduino Due για τον έλεγχο του μετατροπέα.

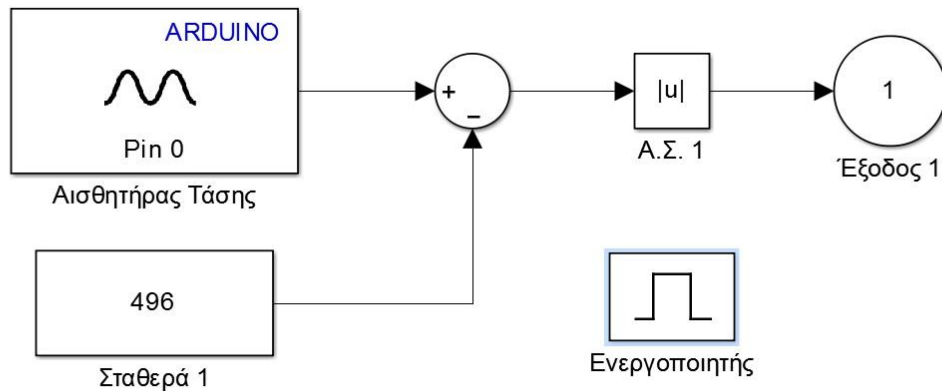
5.2.1. Πρόγραμμα παλμοδότησης

Το πρόγραμμα στον επεξεργαστή έχει υλοποιηθεί με το λογισμικό Matlab/ Simulink (σχ. 5.7). Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του προγράμματος έγινε προσπάθεια, ώστε κάθε επιθυμητή διαδικασία να γίνεται με τον πιο απλό τρόπο για να μην επηρεαστεί η υπολογιστική ισχύς του μικροεπεξεργαστή.



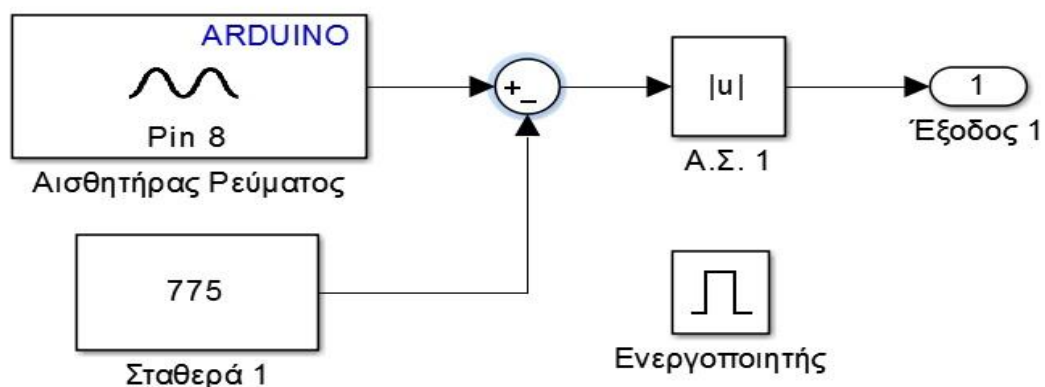
Σχήμα 5.7: Πρόγραμμα παλμοδότησης.

Αρχικά, ο μικροεπεξεργαστής δειγματοληπτει τα σήματα τάσης και ρεύματος που λαμβάνονται από τους αντίστοιχους αισθητήρες. Η διαδικασία της δειγματοληψίας πραγματοποιείται με έναν ρυθμό που καθορίζεται από μια εικονική παλμογεννήτρια εντός του προγράμματος. Αυτή δημιουργεί έναν τετραγωνικό παλμό συχνότητας 25 kHz με τιμές 0 και 1. Με κάθε «1» ενεργοποιείται το υποσύστημα λήψης δείγματος από τον αισθητήρα τάσης (σχ. 5.8), ενώ με κάθε «0», μέσω μιας λογικής πύλης «NOT», ενεργοποιείται η λήψη δείγματος από τον αισθητήρα ρεύματος (σχ. 5.9). Συνεπώς, σε κάθε δευτερόλεπτο λαμβάνονται 25.000 δείγματα τάσης και 25.000 δείγματα ρεύματος. Ο Analog to Digital μετατρέπει τα δείγματα σε bits, σύμφωνα με την προκαθορισμένη αναλογία του μικροελεγκτή Arduino Due. Συγκεκριμένα, τα 3,3 Volts μετατρέπονται σε 1.023 bits ή το 1 bit αντιστοιχεί σε 0,0032 Volt περίπου. Κάθε φορά που ενεργοποιείται ένα από τα δύο υποσυστήματα, από τα σήματα δυαδικής μορφής πλέον που λαμβάνονται, αφαιρούνται οι dc συνιστώσες των αισθητήρων. Από το κεφάλαιο 4 είναι γνωστό ότι η dc συνιστώσα του αισθητήρα τάσης είναι 1,6 Volt και αντιστοιχεί σε 496 bits. Αντίστοιχα του αισθητήρα ρεύματος είναι 2,5 Volts που αντιστοιχούν σε 775 bits. Στη συνέχεια, τα σήματα ανορθώνονται και οδηγούνται εκτός των υποσυστημάτων.



Σχήμα 5.8: Υποσύστημα δειγματοληψίας τάσης.

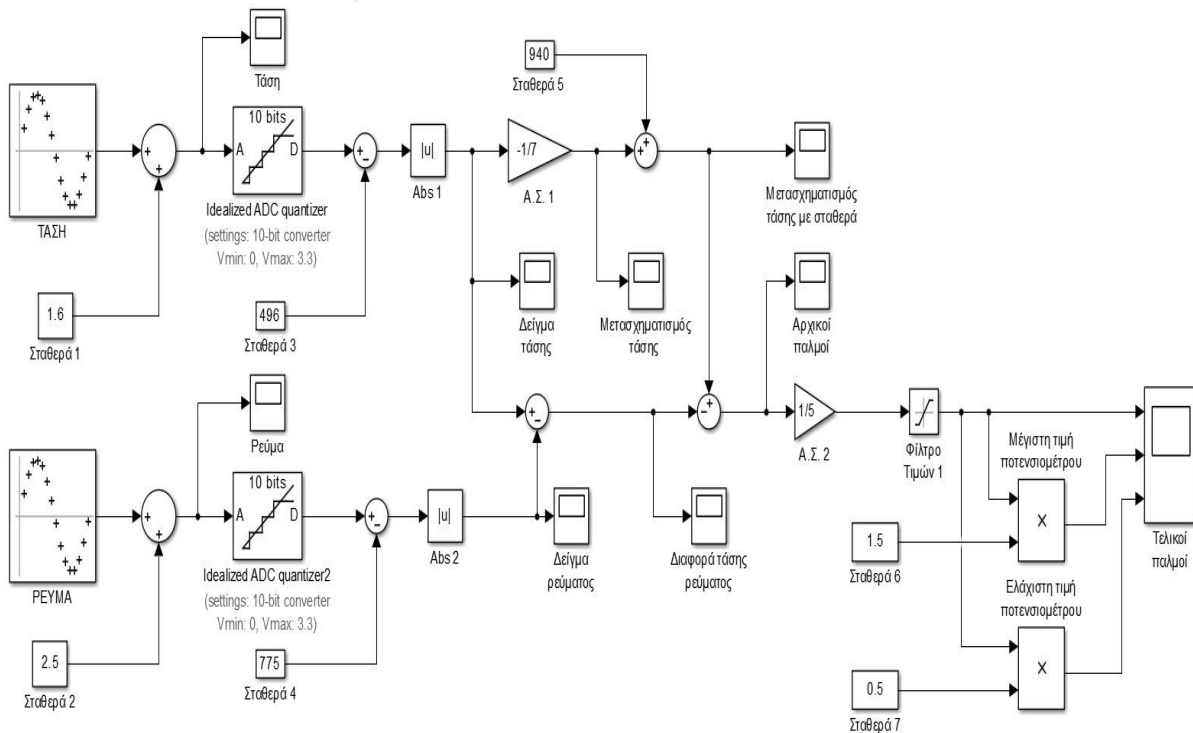
Το σήμα τάσης που εξάγεται από το υποσύστημα χρησιμοποιείται με δύο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο από το δείγμα της τάσης αφαιρείται το δείγμα του ρεύματος με αποτέλεσμα τη διαφορά τάσης-ρεύματος, όπως συμβαίνει και στην HCC. Στον δεύτερο δέχεται τους κατάλληλους μετασχηματισμούς, για να δημιουργηθεί το αντίστοιχο σήμα αναφοράς που υπάρχει στην sPWM, το οποίο θα αποδώσει σταθερή συχνότητα στους παραγόμενους παλμούς. Στη συνέχεια, διαφοροποιείται το επίπεδο τιμών των παλμών που παράχθηκαν για να οδηγηθούν σε μία PWM έξοδο του Arduino. Αυτό είναι αναγκαίο, γιατί η μέγιστη διάρκεια ενός παλμού στις εξόδους PWM του Arduino Due αντιστοιχεί σε 255 bits (100% Duty Cycle). Αντίστοιχα, για 0 bits δεν υπάρχει παλμός και έτσι δεν άγει το ημιαγωγικό στοιχείο. Επιπροσθέτως, για τη δυνατότητα μεταβολής του Duty Cycle έχει τοποθετηθεί ένα ποτενσιόμετρο, το οποίο πολλαπλασιάζει το εύρος των παλμών με τιμές από 0,5 έως 1,5. Τέλος, κάθε φορά που το ποτενσιόμετρο δίνει τιμή 1 ενεργοποιείται ένα LED, για να δηλώσει την αρχική ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle, όπως αυτή προκύπτει από το πρόγραμμα.



Σχήμα 5.9: Υποσύστημα δειγματοληψίας ρεύματος.

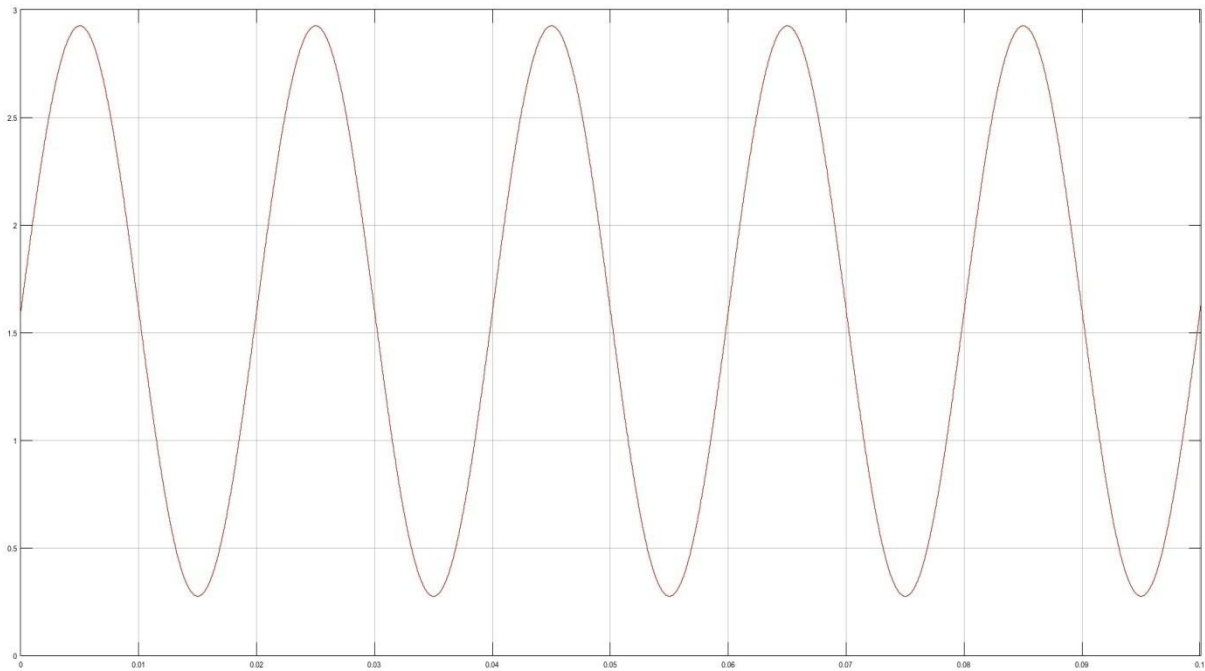
5.2.2. Εξήγηση της παλμοδότησης μέσω προγράμματος προσομοίωσης

Στην προσπάθεια κατανόησης του προγράμματος παλμοδότησης δημιουργήθηκε ένα αντίστοιχο πρόγραμμα με δυνατότητα προσομοίωσης του πρώτου (σχ. 5.10). Για τη λειτουργία του ήταν επιτακτική ανάγκη να αντικατασταθεί κάθε στοιχείο του μικροελεγκτή. Επιπλέον, κάθε σήμα που χρησιμοποιήθηκε ορίστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσομοιάζονται με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια οι τιμές των πραγματικών. Παρακάτω, με τη χρήση scopes, θα αναλυθεί ο τρόπος διαμόρφωσης των αρχικών σημάτων τάσης και ρεύματος, για να σχηματίσουν την τελική παλμοσειρά για τον έλεγχο του μετατροπέα.

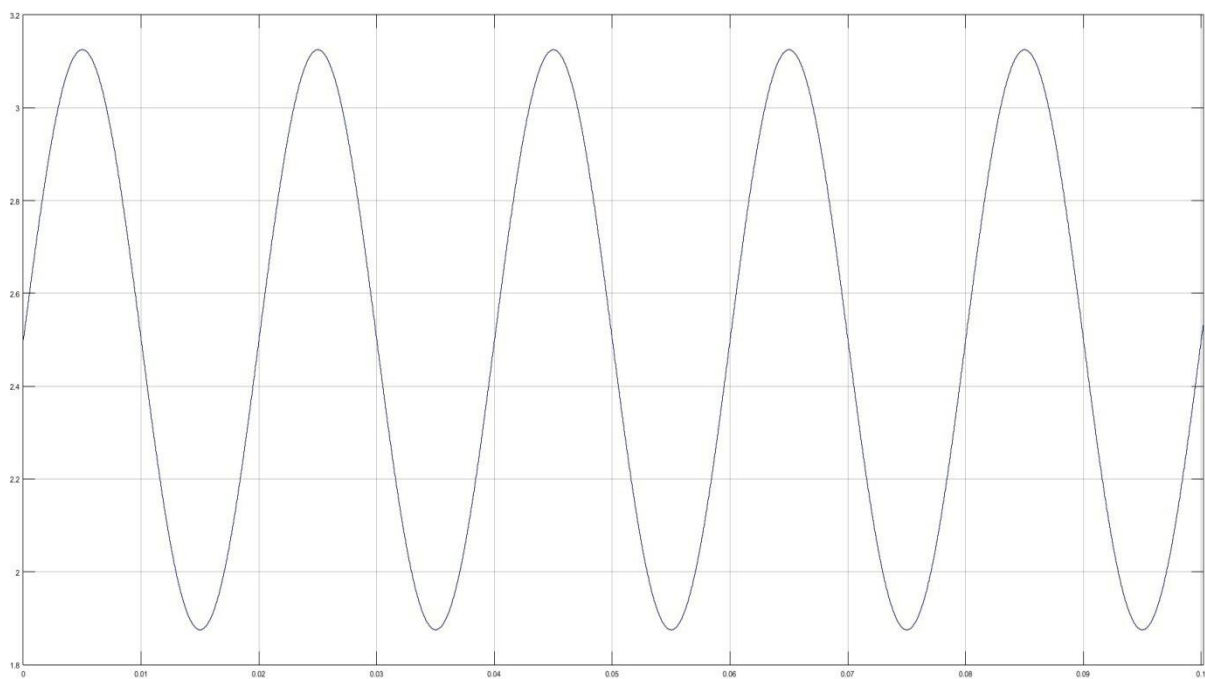


Σχήμα 5.10: Πρόγραμμα προσομοίωσης.

Με βάση τα στοιχεία των αισθητήρων από το κεφάλαιο 4, το σήμα της τάσης έχει πλάτος $A_\tau=1,325$ V και περίοδο $T_\tau=20$ ms. Αντίστοιχα, το σήμα του ρεύματος έχει πλάτος $A_\rho=0,625$ V και περίοδο $T_\rho=20$ ms. Αφού προστεθεί η dc συνιστώσα κάθε σήματος, εμφανίζονται στο σχήμα 5.11 και σχήμα 5.12 αντίστοιχα.

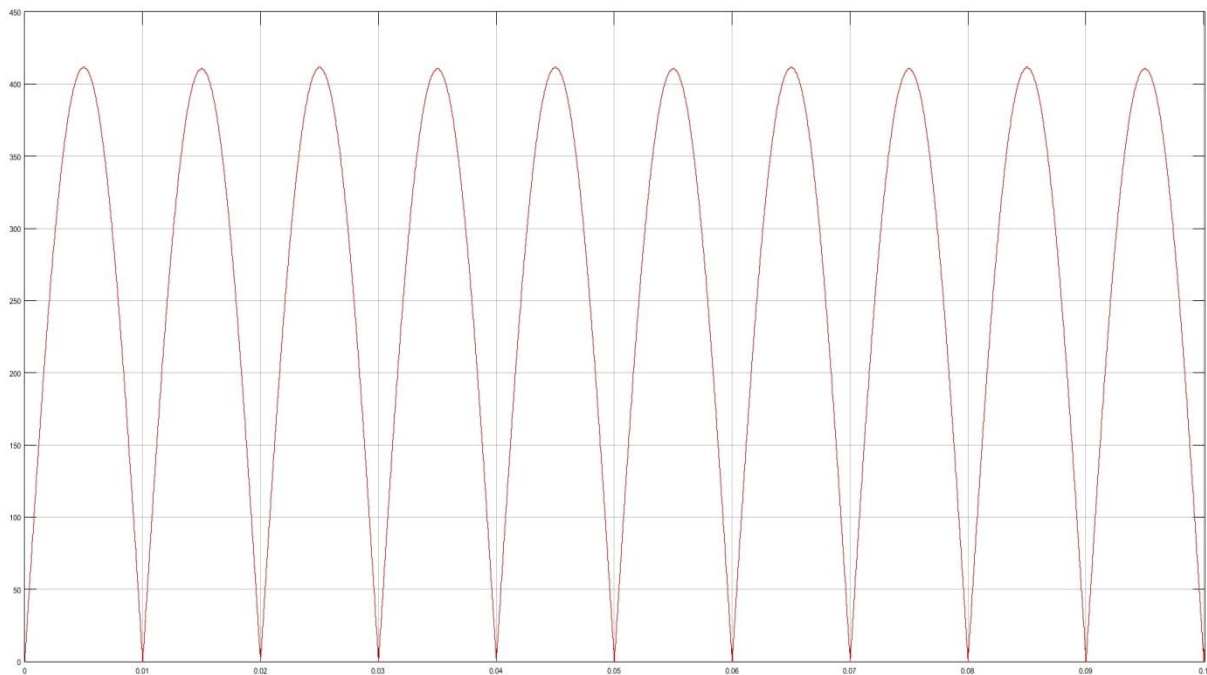


Σχήμα 5.11: Κυματομορφή τάσης.

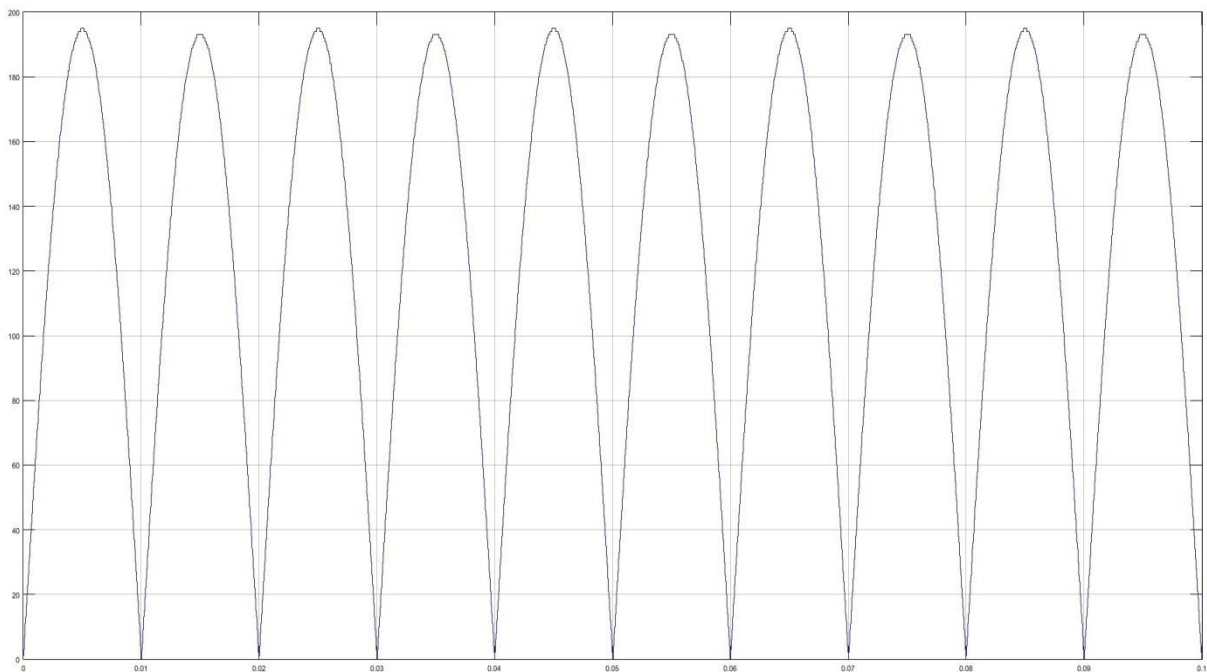


Σχήμα 5.12: Κυματομορφή ρεύματος.

Στη συνέχεια, ένας Analog to Digital μετατροπέας ίδιος με αυτόν του Arduino Due μετασχηματίζει τα σήματα σε ψηφιακά. Από αυτά αφαιρείται η dc συνιστώσα καθενός με την ψηφιακή της τιμή και ανορθώνονται (σχ. 5.13, 5.14).



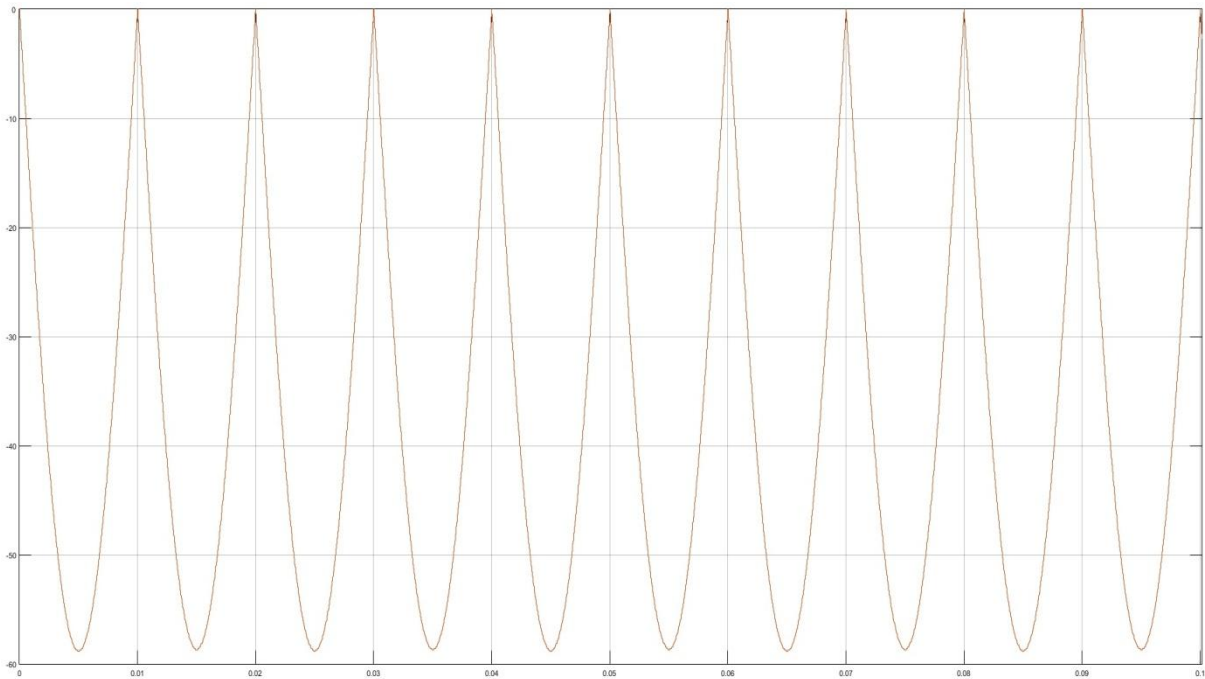
Σχήμα 5.13: Δείγμα τάσης.



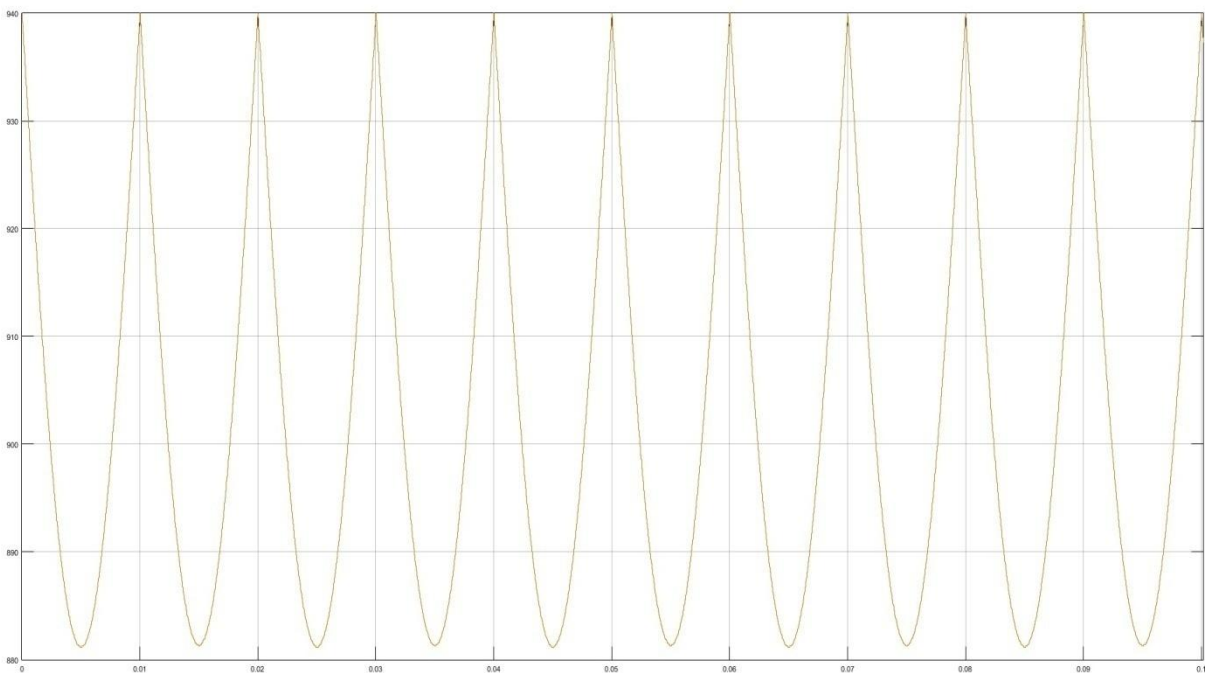
Σχήμα 5.14: Δείγμα ρεύματος.

Για τη δημιουργία του ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς, αντίστοιχο με αυτό της sPWM, το σήμα της τάσης πολλαπλασιάζεται με ένα κέρδος τιμής $-1/7$ (σχ. 5.15). Η αντιστροφή του σήματος που προκαλείται με το αρνητικό κέρδος, αντισταθμίζει την αντιστροφή (not του σήματος εισόδου) που προκαλεί ο οπτικός ζεύκτης (optocoupler) στην βασική πλακέτα. Παράλληλα, ο πολλαπλασιασμός με την τιμή $1/7$ προκαλεί υποβιβασμό των τιμών του σήματος, ώστε το επίπεδο τιμών του να είναι ανάλογο με το επίπεδο τιμών της διαφοράς τάσης-ρεύματος. Στη συνέχεια, στο μετασχηματισμένο σήμα της τάσης προστίθεται μια σταθερά με τιμή 940 bits (σχ. 5.16). Η χρήση της είναι απαραίτητη, διότι λόγω αυτής η σύγκριση μεταξύ του ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς που δημιουργήθηκε και της διαφοράς

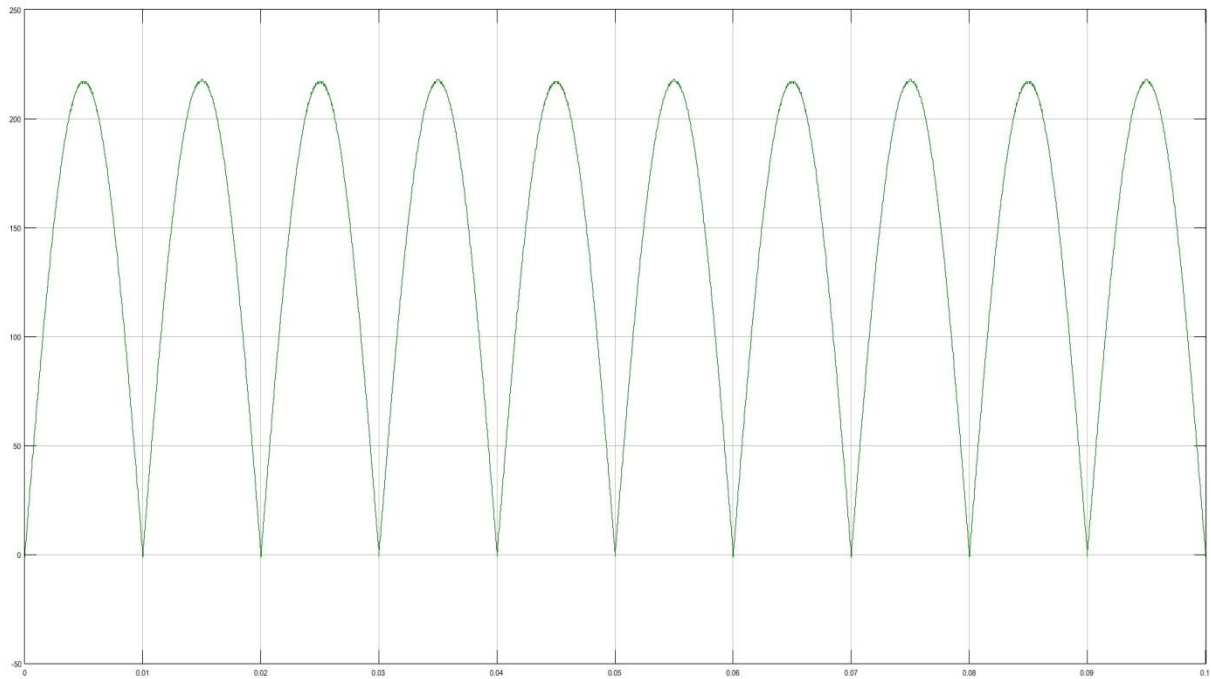
τάσης-ρεύματος (σχ. 5.17) έχει πάντα θετικό αποτέλεσμα. Ακόμη, αποσκοπεί στη μείωση του σφάλματος, που προκύπτει από τον δυναμικό χαρακτήρα της HCC, αφού οι τιμές του σφάλματος θα είναι αμελητέες αναφορικά με τις τιμές των παλμών. Έτσι, αν π.χ. υπάρξει ανακρίβεια στη δειγματοληψία της τάσης ή του ρεύματος δε θα επηρεάσει σημαντικά τη διάρκεια του ενός από τους δέκα μόνο παλμούς που εξάγει η PWM έξοδος του Arduino. Κάποιες από τις τιμές των συντελεστών του προγράμματος επιλέχθηκαν εμπειρικά εκ του αποτελέσματος. Ωστόσο, σε ένα τελικό προϊόν για την παραγωγή του στη βιομηχανία θα απαιτούνταν βελτιστοποίηση αυτών των συντελεστών



Σχήμα 5.15: Μετασχηματισμός σήματος τάσης.

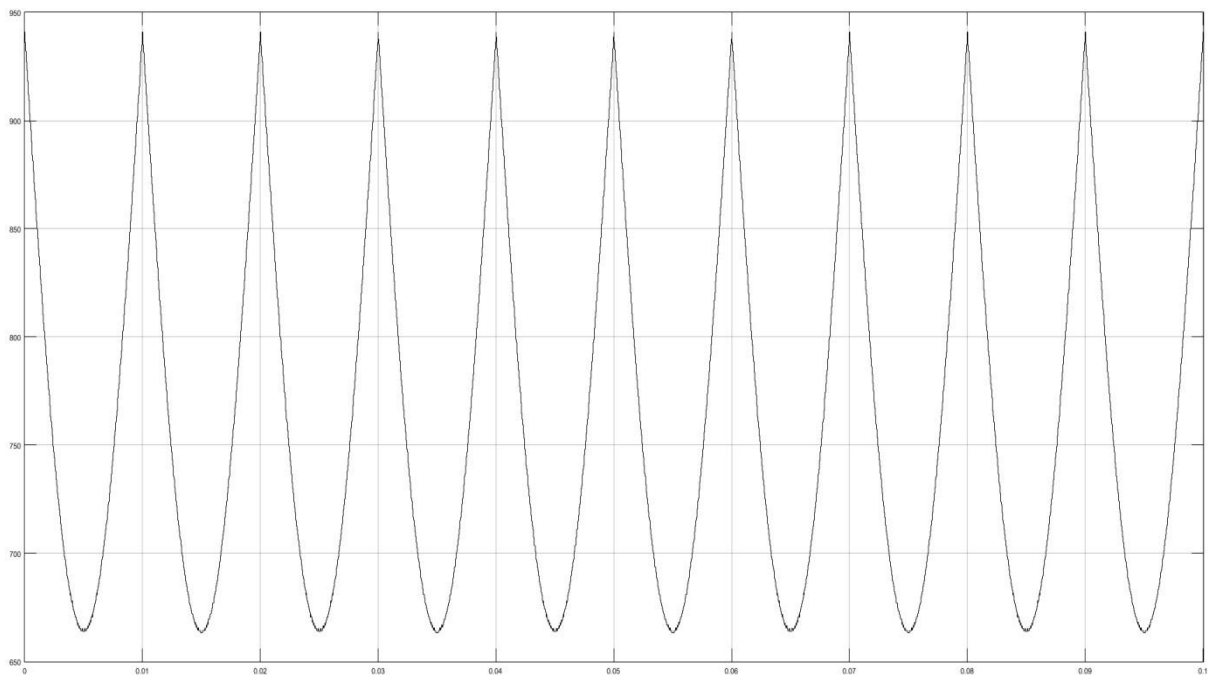


Σχήμα 5.16: Μετασχηματισμός σήματος τάσης με προσθήκη σταθεράς.



Σχήμα 5.17: Διαφορά τάσης και ρεύματος (V-I).

Η διαφορά τάσης και ρεύματος συγκρίνεται με το μετασχηματισμένο σήμα της τάσης και προκύπτουν οι επιθυμητοί παλμοί σε αρχικό στάδιο (σχ. 5.18). Αυτοί πολλαπλασιάζονται με 1/5 για να λάβουν τιμές μικρότερες από 255 bits που απαιτεί η PWM έξοδος του μικροελεγκτή. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται οι τελικοί παλμοί (σχ. 5.19.α). Τέλος, το ποτενσιόμετρο, μέσω του φίλτρου τιμών, μπορεί να πολλαπλασιάζει τη διάρκεια των παλμών από 0,5 έως 1,5, μεταβάλλοντας το Duty Cycle. Στο κύκλωμα προσομοίωσης παρουσιάζονται οι δύο περιπτώσεις των ακραίων τιμών του ποτενσιόμετρου, στις οποίες το Duty Cycle λαμβάνει μέγιστη και ελάχιστη τιμή (σχ. 5.19.β, 5.19.γ).



Σχήμα 5.18: Αρχικό στάδιο παλμών.



Σχήμα 5.19: Πραγματικοί παλμοί (α), Παλμοί για μέγιστο Duty Cycle (β), Παλμοί για ελάχιστο Duty Cycle (γ).

6. ΦΙΛΤΡΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΑΝΩΤΕΡΩΝ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

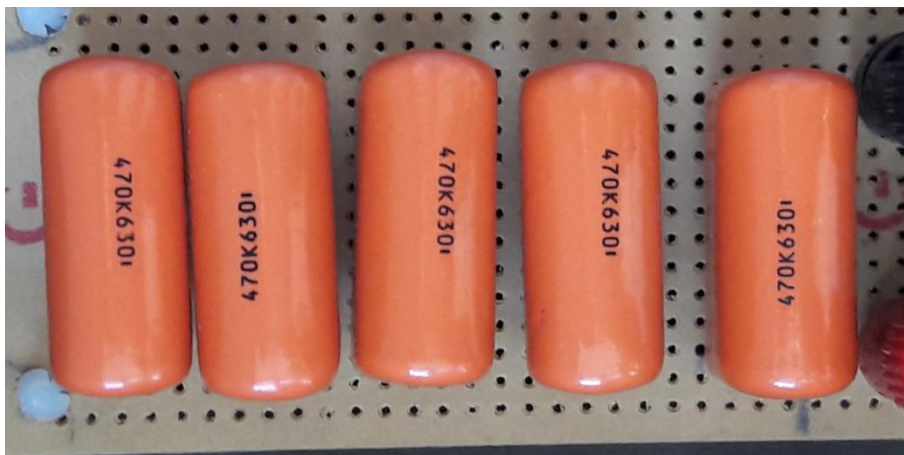
6.1. Φίλτρο μείωσης ανώτερων αρμονικών

Με την ολοκλήρωση του προγράμματος παλμοδότησης είναι δυνατή η λειτουργία του μετατροπέα. Αυτός δέχεται την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου, την ανορθώνει μέσω της γέφυρας διόδων και παρέχει στην έξοδό του συνεχή τάση για την οδήγηση μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος. Η τάση αυτή μπορεί να λαμβάνει διαφορετικές τιμές, ανάλογα με τη λειτουργία της μηχανής, και αυτό οφείλεται στην παρουσία ενός IGBT. Όμως, το πλεονέκτημα της μεταβαλλόμενης συνεχούς τάσης στην έξοδο του μετατροπέα προσδίδει και ένα μειονέκτημα. Συγκεκριμένα, ο τρόπος λειτουργίας του IGBT προκαλεί αύξηση των ανώτερων αρμονικών του ρεύματος και μετατόπιση της βασικής αρμονικής του ως προς την τάση του δικτύου (τάση αναφοράς). Αποτέλεσμα της παρουσίας των αρμονικών αυτών είναι η αύξηση της αέργου ισχύος στο σύστημα. Για τον λόγο αυτόν, στα συστήματα ηλεκτρονικών μετατροπέων συνηθίζεται η παρουσία παθητικού φίλτρου (σχ. 6.1).



Σχήμα 6.1: Θέση παθητικού φίλτρου μείωσης ανώτερων αρμονικών στον μετατροπέα.

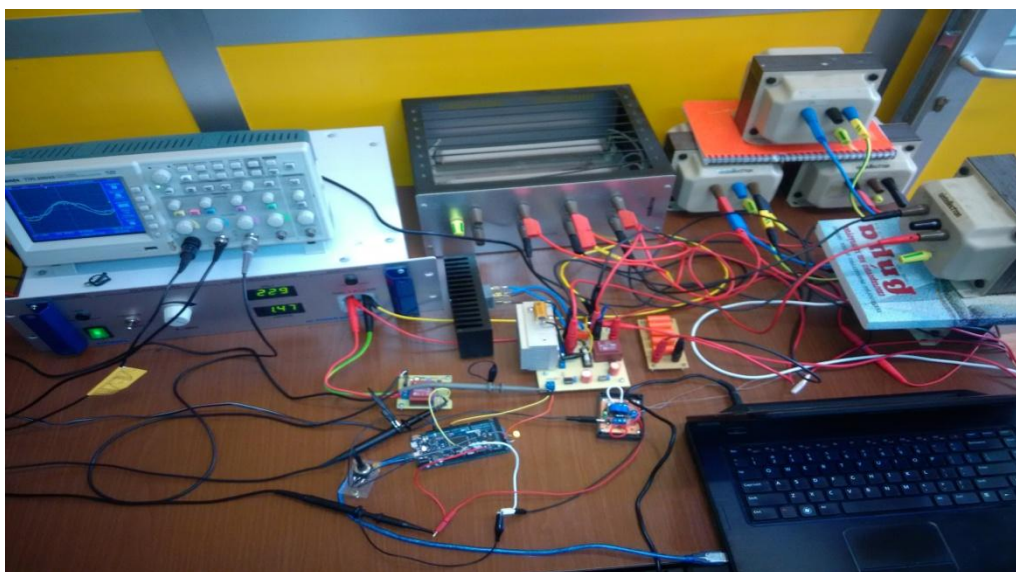
Η τοποθέτηση του φίλτρου αυτού γίνεται στην είσοδο του μετατροπέα. Στόχος είναι η μείωση της αέργου ισχύος με την οποία επιβαρύνει ο μετατροπέας το δίκτυο. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση πηνίου και πυκνωτή και γι' αυτό τέτοιου είδους φίλτρα ονομάζονται φίλτρα L-C. Το πηνίο συνδέεται εν σειρά με το δίκτυο, ενώ ο πυκνωτής συνδέεται παράλληλα σε αυτό. Το πηνίο έχει κατασκευαστεί να αποδίδει 80 mH στα 230V-6A- 50Hz. Για τον πυκνωτή έχουν συνδεθεί παράλληλα 5 διηλεκτρικοί πυκνωτές σταθερής χωρητικότητας από πολυεστέρα (MKT) (σχ. 6.2). Η τιμή του καθενός είναι 470 nF, συνεπώς ο συνολικός πυκνωτής έχει τιμή ίση με $C = 2350 \text{ nF}$ ή $C = 2,35 \text{ }\mu\text{F}$.



Σχήμα 6.2: Πυκνωτές σε παράλληλη σύνδεση για το φίλτρο μείωσης αρμονικών.

6.2. Ολοκλήρωση δομής μετατροπέα

Το πέρας της κατασκευής του φίλτρου εξομάλυνσης αποτελεί και την τελευταία τμηματική κατασκευή του μετατροπέα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ορθής λειτουργίας του συστήματος συνολικά. Επακόλουθο αυτών των θετικών αποτελεσμάτων ήταν η τοποθέτηση κάθε τμήματος του μετατροπέα σε έναν ενιαίο χώρο (κουτί), ώστε να μπορεί να τεθεί σε λειτουργία με ασφάλεια. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε ειδικό μονωτικό υλικό πάνω στο οποίο κατανεμήθηκαν χωροταξικά οι πλακέτες και τα υπόλοιπα εξαρτήματα του μετατροπέα. Το μονωτικό υλικό, έχοντας σταθερά πάνω του τον μετατροπέα, τοποθετήθηκε σε μεταλλικό πλαίσιο-κουτί (σχ. 6.4). Αυτό σχεδιάστηκε με σκοπό να παρέχει πολλαπλές επιλογές σύνδεσης του φίλτρου L-C με το κύκλωμα, καθώς και την άμεση λήψη παλμογραφήματος των εξόδων των αισθητήρων, των παλμών που δέχεται το IGBT και των ακροδεκτών του. Η κατασκευή του έγινε από ειδικό τεχνίτη μεταλλικών κατασκευών, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή εργονομία και κομψότητά του.

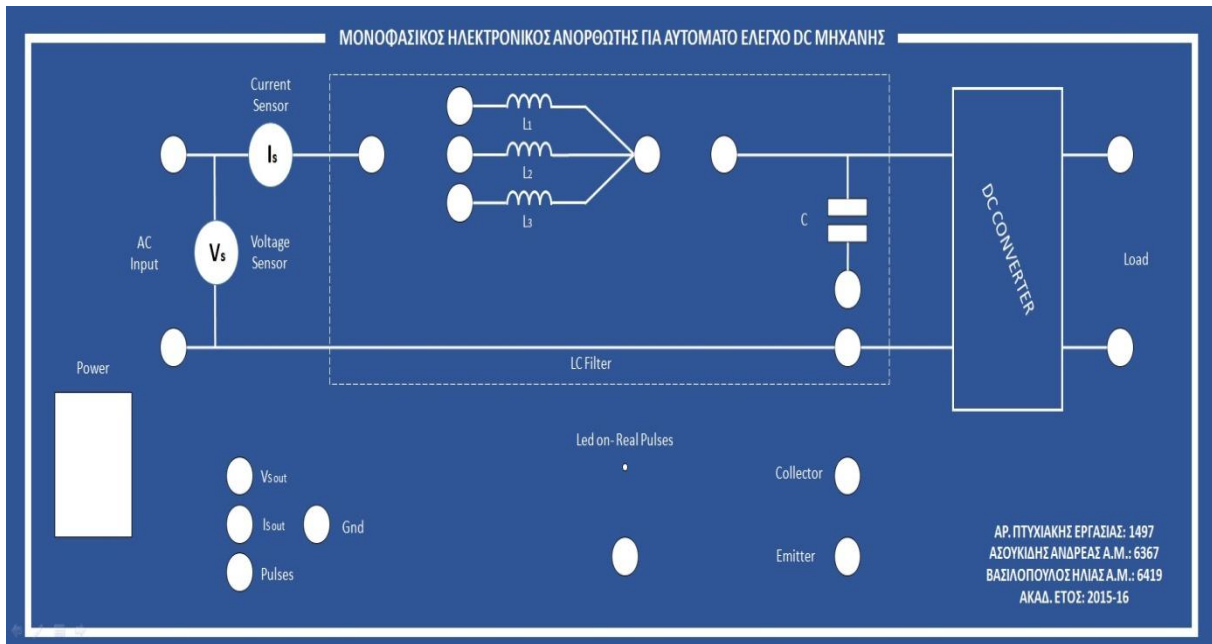


Σχήμα 6.3: Τα τμήματα του μετατροπέα πριν την τοποθέτησή τους στο πλαίσιο-κουτί.

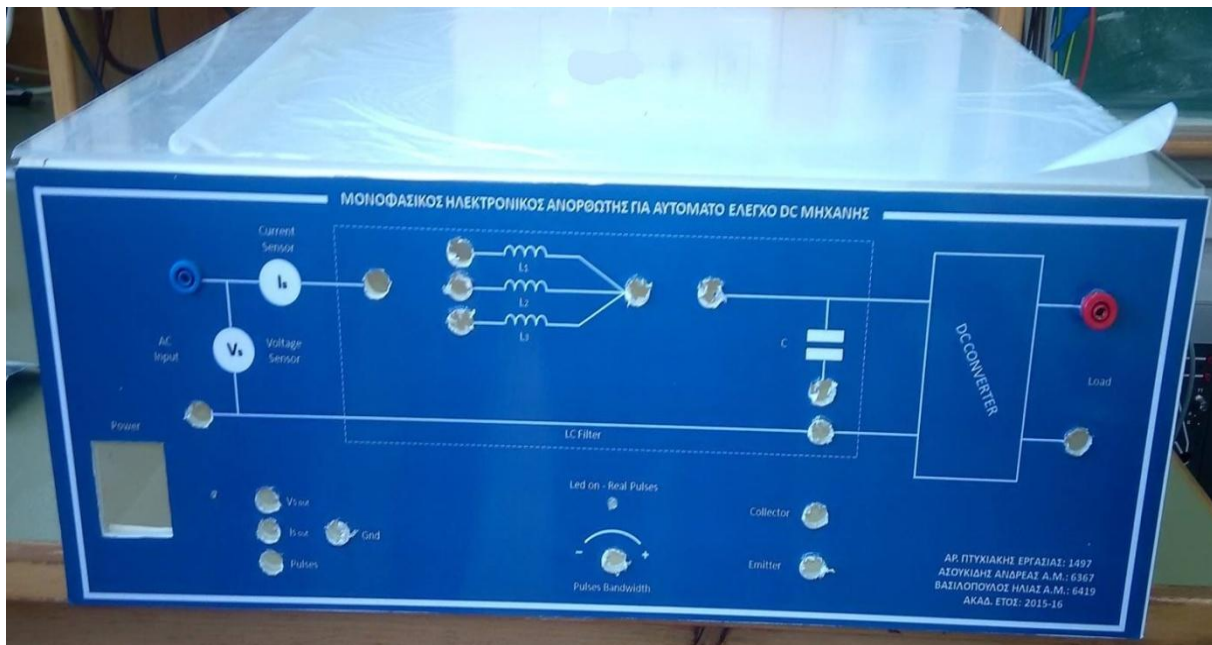


Σχήμα 6.4: Κατανομή τμημάτων του μετατροπέα στο μονωτικό υλικό και στο πλαίσιο-κουτί.

Παράλληλα με την κατασκευή του μεταλλικού πλαισίου, σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του Microsoft-Power Point η πρόσοψη του μετατροπέα (σχ. 6.5, 6.6). Στο επάνω μέρος αυτής αποδίδεται με ακρίβεια το κύκλωμα ισχύος. Στο κάτω μέρος εμφανίζονται οι θύρες για τα παλμογραφήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

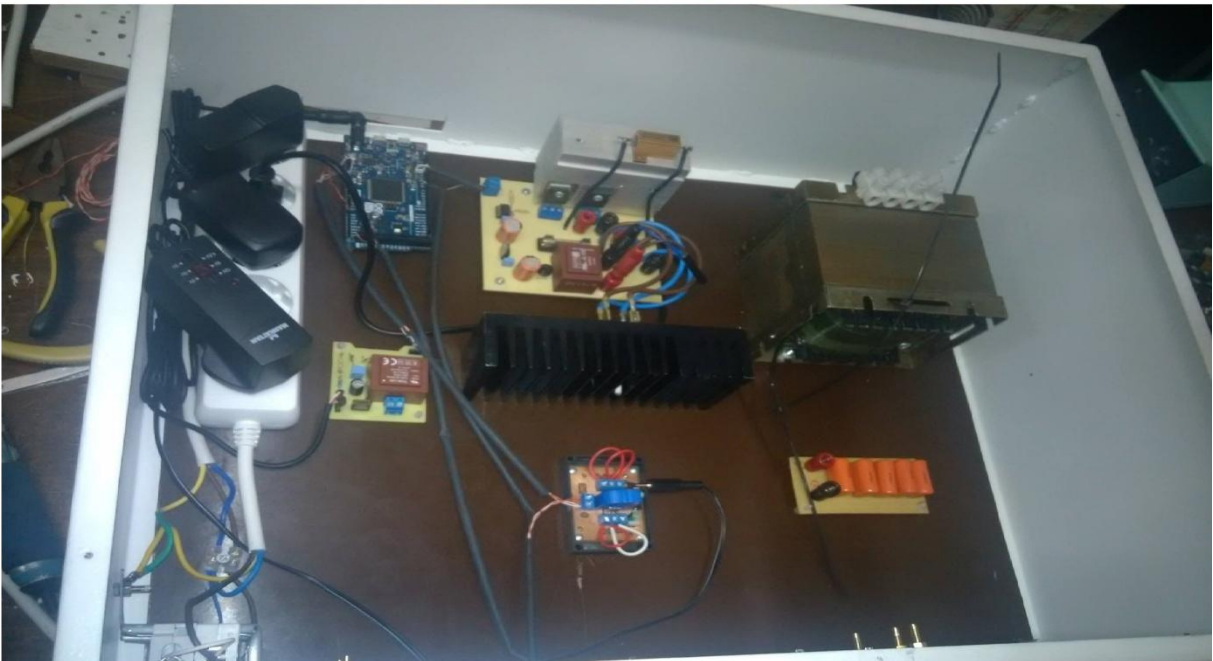
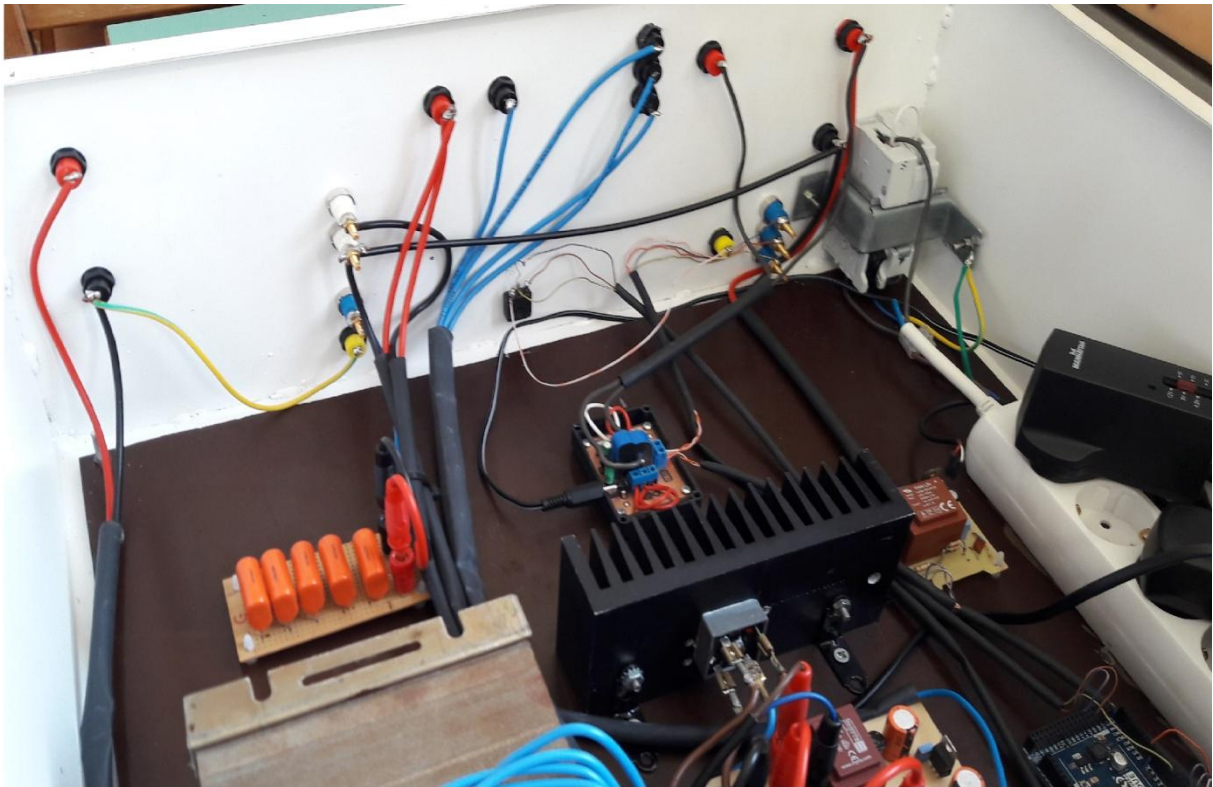


Σχήμα 6.5: Σχέδιο πρόσοψης πτυχιακής εργασίας.



Σχήμα 6.6: Πρόσοψη κατασκευής.

Για την καλωδίωση του κυκλώματος ισχύος τοποθετήθηκε εύκαμπτο καλώδιο τύπου H07V-E με διάμετρο $1,5 \text{ mm}^2$. Για το κύκλωμα παλμοδότησης χρησιμοποιήθηκε καλώδιο συνεστραμμένων ζευγών τύπου UTP (Unshielded Twisted Pair). Τέλος, οι τροφοδοσίες των αισθητήρων, του μικροελεγκτή και του κυκλώματος ελέγχου στη βασική πλακέτα παρέχονται μέσω πολλαπλού ηλεκτροδότη. Για τον έλεγχό τους και την ασφάλεια της κατασκευής έχει τοποθετηθεί μικροαυτόματος διακόπτης τύπου C, ονομαστικής έντασης 10 A.



Σχήμα 6.7: Καλωδίωση και συγκολλήσεις.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

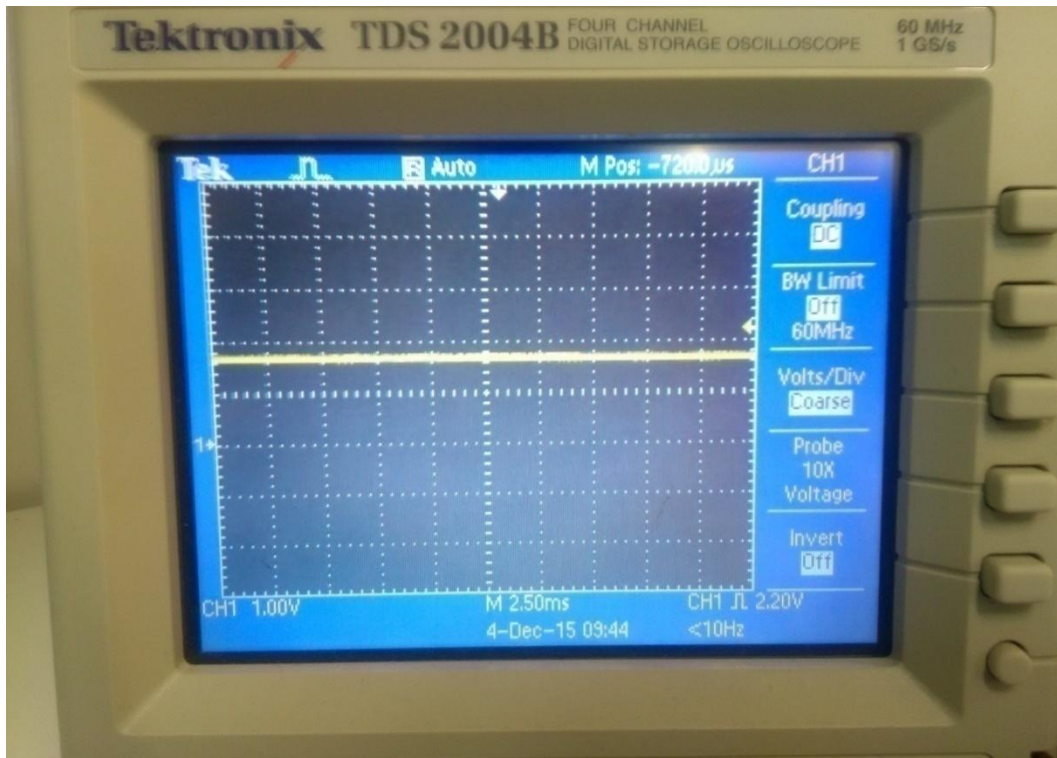
Με την ολοκλήρωση του κατασκευαστικού μέρους της εργασίας πραγματοποιήθηκε μια σειρά από πειραματικές μετρήσεις. Ακολουθούν οι μετρήσεις που καταγράφηκαν και τα παλμογραφήματα που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

7.1. Μετρήσεις και παλμογραφήματα αισθητήρων

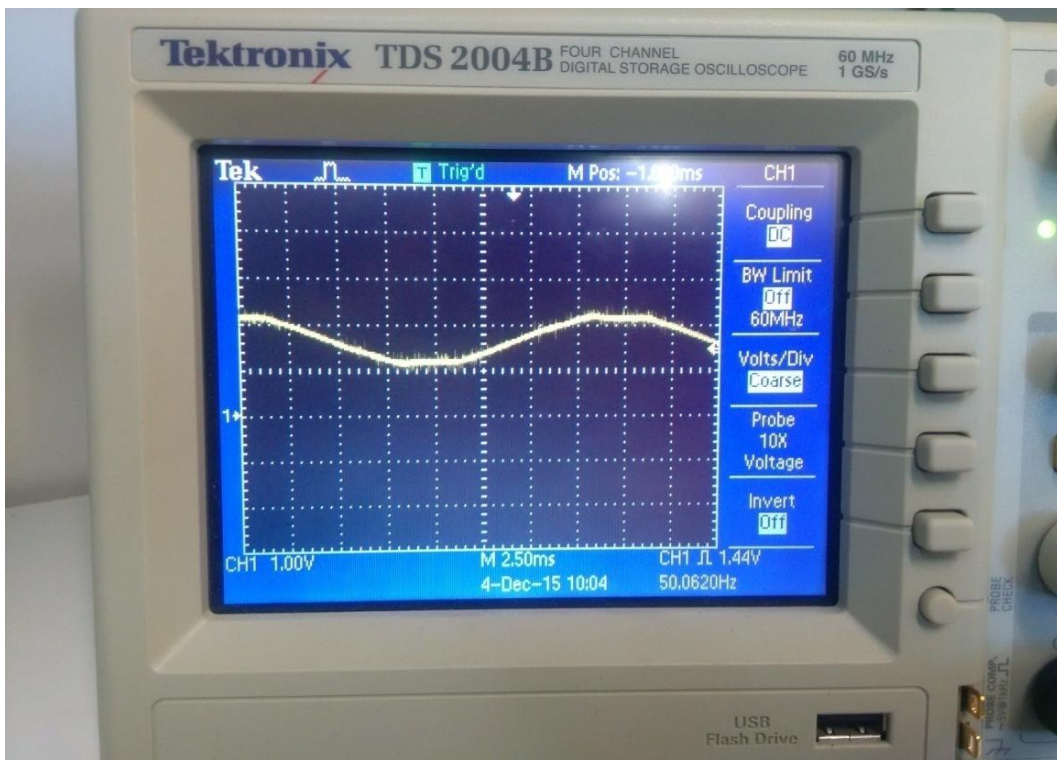
Με την ολοκλήρωση της κατασκευής κάθε αισθητήρα, ήταν απαραίτητη η πραγματοποίηση μετρήσεων. Μέσα από αυτές ελέγχθηκε η ορθή και ασφαλής λειτουργία τους. Παράλληλα, με τη βοήθεια του παλμογράφου επαληθεύτηκαν οι οριακές τιμές των δύο αισθητήρων, η dc συνιστώσα καθενός και λήφθηκαν παλμογραφήματα σχετικά με την απόκρισή τους για διάφορες τιμές τάσης και ρεύματος αντίστοιχα.

7.1.1. Αισθητήρας τάσης

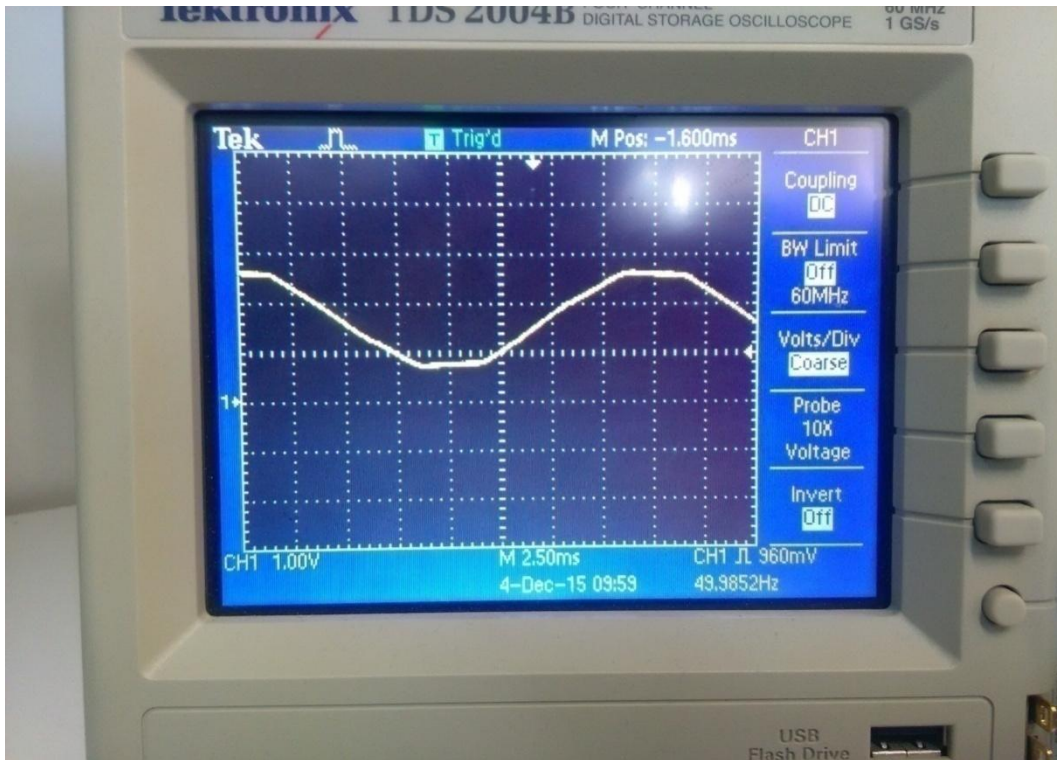
Ο αισθητήρας τάσης είναι μια διάταξη πλακέτας, που κατασκευάστηκε με σκοπό να δειγματοληπτει τη στιγμιαία τιμή της τάσης του δικτύου και να τη στέλνει στον μικροελεγκτή για την παραγωγή των παλμών. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4, η κατασκευή του ήταν απλή, αλλά υπήρχαν παράμετροι που όφειλαν να ικανοποιηθούν. Συγκεκριμένα, η έξοδος του αισθητήρα, δηλαδή το σήμα που δέχεται ο Arduino Due, έπρεπε να είναι συνεχές και να έχει μέγιστη τιμή 3,3 V. Το συνεχές σήμα επιτυγχάνεται με την προσθήκη DC συνιστώσας με τιμή 1,6 V (σχ. 7.1). Στη συνέχεια εξετάστηκε η λειτουργικότητα του αισθητήρα δειγματοληπτώντας την τάση του δικτύου. Η σωστή ανάγνωση της τάσης δικτύου σε όλη την περίοδο της χωρίς σφάλματα είναι εξαιρετικά σημαντική, διότι τυχόν σφάλματα θα μετακυλούσαν στους παλμούς και μετέπειτα σε όλο το σύστημα. Για τον λόγο αυτόν, λήφθηκαν μερικά παλμογραφήματα για ενδιάμεσες τιμές της τάσης (σχ. 7.2, 7.3). Τέλος, λήφθηκε παλμογράφημα απόκρισης του αισθητήρα για τάση δικτύου ίση με 230 V. Η τάση αυτή είναι και η μέγιστη επιθυμητή και γι' αυτό στο σχήμα 7.4 εμφανίζονται και οι οριακές τιμές του αισθητήρα. Η ελάχιστη τιμή είναι 0,1 V και η μέγιστη 3,1 V. Αν και το μέγιστο δυνατό εύρος είναι από 0 έως 3,3 V, η επιλογή ενός μικρότερου εύρους έγινε με σκοπό να προστατευθεί ο μικροελεγκτής.



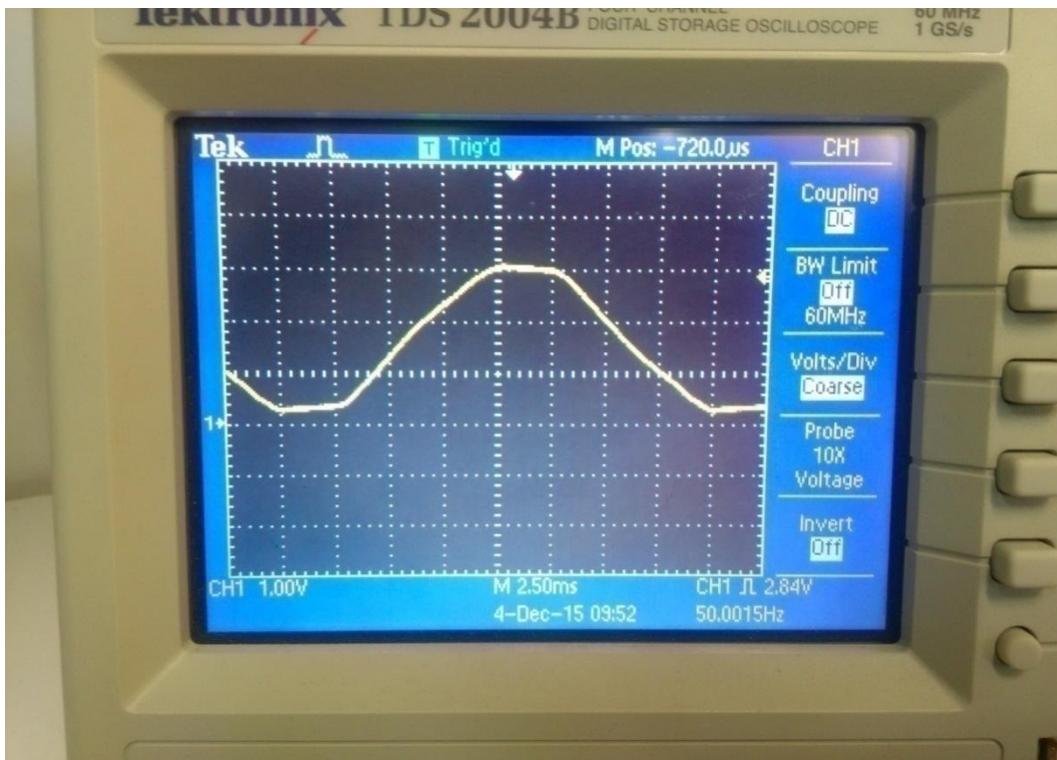
Σχήμα 7.1: Η DC συνιστώσα του αισθητήρα τάσης με τιμή 1.6 V.



Σχήμα 7.2: Λειτουργία αισθητήρα τάσης για τάση δικτύου 80 V.



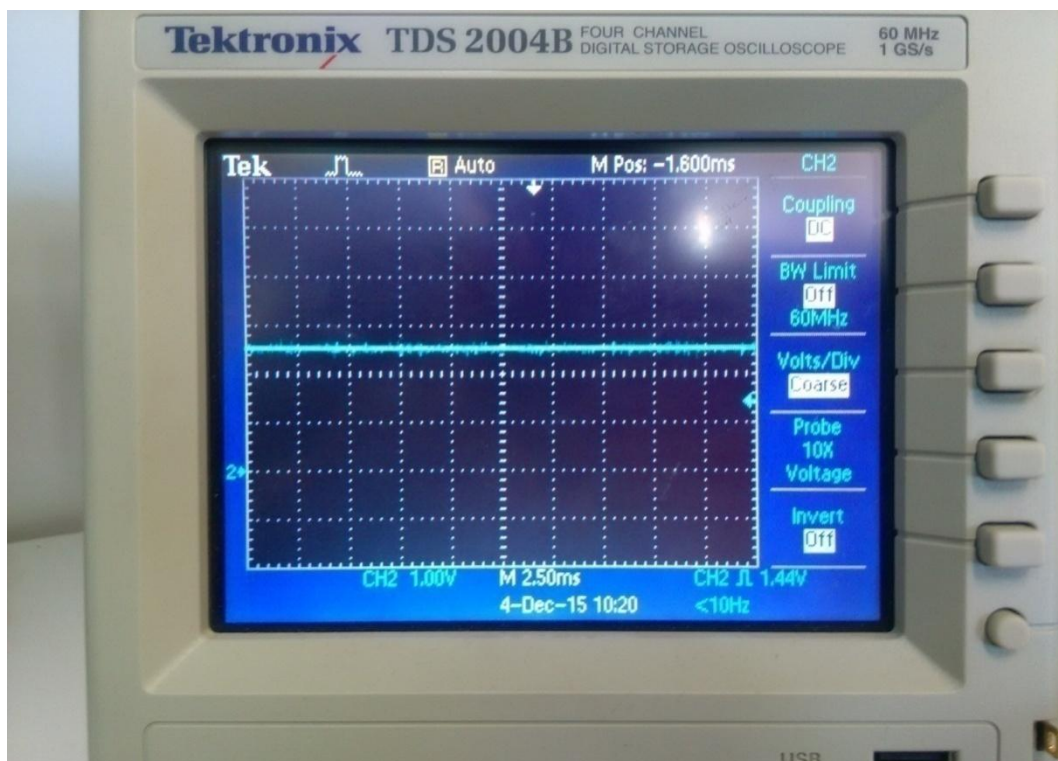
Σχήμα 7.3: Λειτουργία αισθητήρα τάσης για τάση δικτύου 150 V.



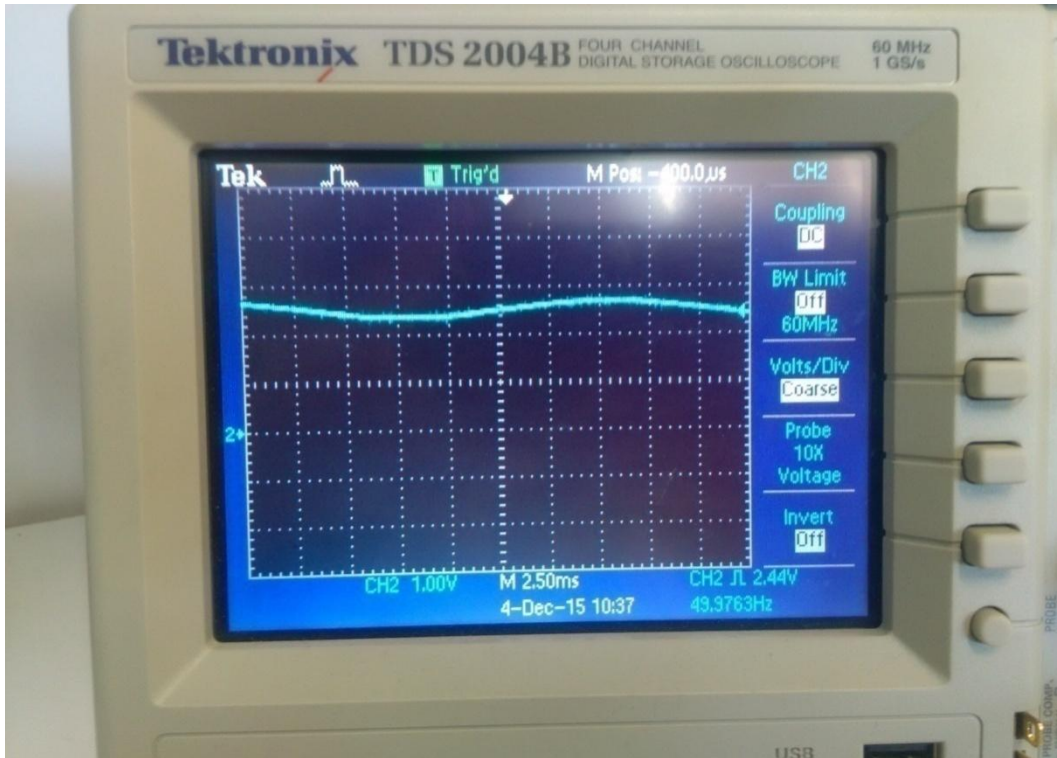
Σχήμα 7.4: Λειτουργία αισθητήρα τάσης για τάση δικτύου 230 V, όπου εμφανίζονται και οι οριακές τιμές που απαιτούνται.

7.1.2. Αισθητήρας ρεύματος

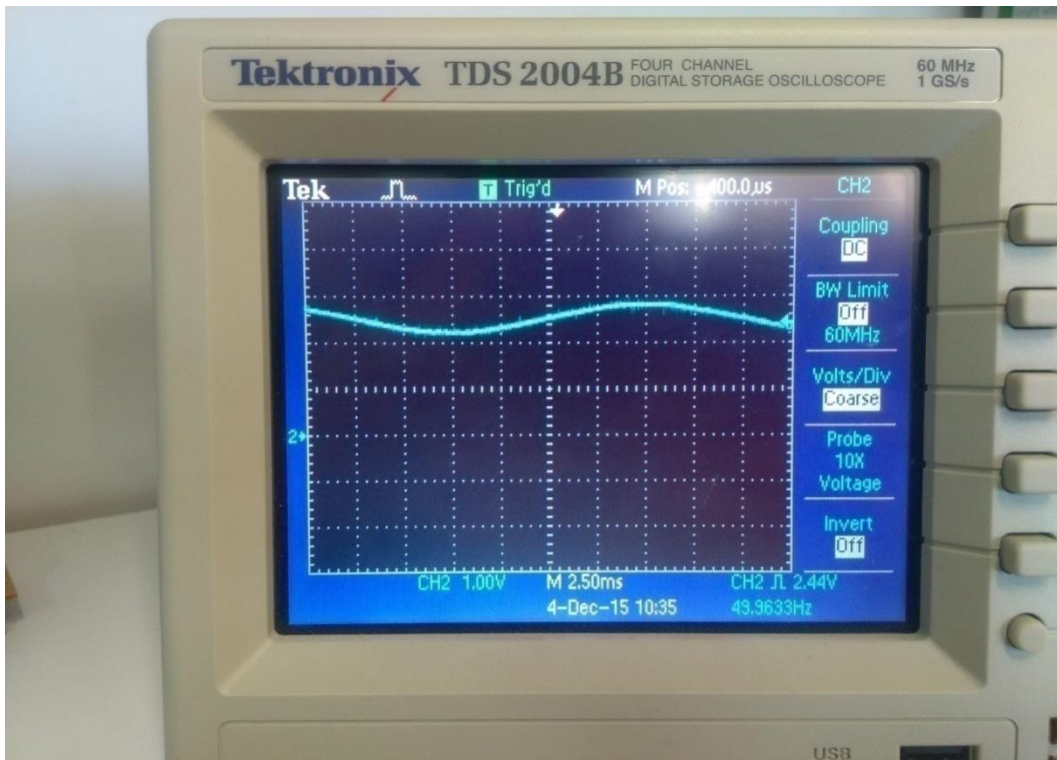
Αντίστοιχα με τον αισθητήρα τάσης, ο αισθητήρας ρεύματος είναι μια πλακέτα για να δειγματοληπτεί το ρεύμα δικτύου. Η λειτουργία του βασίζεται σε έναν αισθητήρα Hall, ο οποίος μετατρέπει σε τάση το ρεύμα που διαπερνά μέσα από τον βρόχο του. Η παραγόμενη τάση οδηγείται στον μικροελεγκτή για την παραγωγή των παλμών. Τα όρια της τάσης που μπορεί να δεχτεί ο A/D του Arduino Due προφανώς πρέπει να ικανοποιούνται και από αυτόν τον αισθητήρα. Με την ανάλυση λειτουργίας του αισθητήρα στο κεφάλαιο 4 διαπιστώθηκε πως η DC συνιστώσα είναι προκαθορισμένη από την κατασκευή του αισθητήρα Hall. Συγκεκριμένα, ο αισθητήρας για τη λειτουργία του απαιτεί συνεχή τάση τιμής 2,5 V. Η τάση αυτή διαδραματίζει και τον ρόλο της απαιτούμενης συνεχούς συνιστώσας (σχ. 7.5). Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με τον αισθητήρα τάσης, λήφθηκαν παλμογραφήματα ενδιάμεσων τιμών ρεύματος για τον έλεγχο της λειτουργίας του αισθητήρα ρεύματος. Τροφοδοτώντας ωμικό φορτίο σταθερής τιμής χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας για την ανάγνωση του ρεύματος στο κύκλωμα. Με την εφαρμογή τάσης 80 V στο φορτίο, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα τιμής 1 A (σχ. 7.6). Για τάση 150 V η τιμή του ρεύματος είναι 1,86 A (σχ. 7.7). Τέλος, με τιμή τάσης 230 V και ρεύματος 2,81 A λαμβάνεται και το εύρος του αισθητήρα που καθορίζεται από τις οριακές τιμές του, οι οποίες είναι 2 V η ελάχιστη και 3 V η μέγιστη (σχ. 7.8).



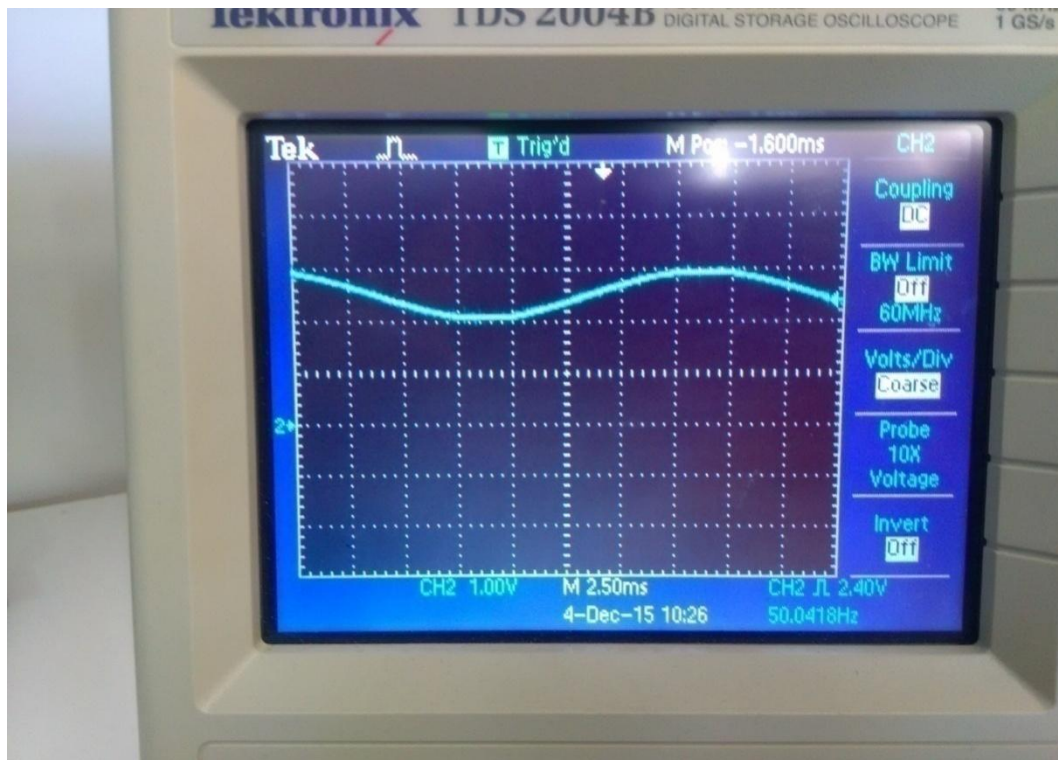
Σχήμα 7.5: Η τάση λειτουργίας του αισθητήρα ρεύματος που αποτελεί και την DC συνιστώσα του με τιμή 2,5 V.



Σχήμα 7.6: Λειτουργία αισθητήρα ρεύματος για τάση 80 V και ρεύμα κυκλώματος 1 A.



Σχήμα 7.7: Λειτουργία αισθητήρα ρεύματος για τάση 150 V και ρεύμα κυκλώματος 1,86 A.



Σχήμα 7.8: Λειτουργία αισθητήρα ρεύματος για τάση 230 V και ρεύμα κυκλώματος 2,81 A.

7.2. Μετρήσεις με πρόγραμμα συνδυασμού τεχνικών HCC και sPWM

Με την ολοκλήρωση του κατασκευαστικού μέρους και έχοντας εξασφαλίσει την ορθή και ασφαλή λειτουργία των αισθητήρων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σχετικά με τη λειτουργία του μετατροπέα. Στόχος ήταν ο έλεγχος της εύρυθμης λειτουργίας όλου του συστήματος. Ως εκ τούτου, στην αρχή των μετρήσεων έγινε χρήση παθητικών φορτίων. Έπειτα, στην έξοδο του μετατροπέα τοποθετήθηκε ως φορτίο ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος, με στόχο τη μελέτη του συντελεστή ισχύος στην πλευρά του δικτύου κατά τη λειτουργία του μετατροπέα. Η λειτουργία του βασίζεται στη δυνατότητα ελέγχου του ημιαγωγικού στοιχείου μέσω παλμών. Για την παραγωγή των παλμών ελέγχου του IGBT χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα που αναλύθηκε στην παράγραφο 5.2, το οποίο συνδυάζει τα θετικά στοιχεία των τεχνικών Ελέγχου Βρόχου Υστέρησης Ρεύματος (Hysteresis Current Control-HCC) και της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης παλμών (sinusoidal Pulse Width Modulation-sPWM). Η λειτουργία του προγράμματος συνοπτικά είναι η ακόλουθη. Αρχικά ο μικροελεγκτής λαμβάνει τα δείγματα από τους αισθητήρες με έναν καθορισμένο ρυθμό (25.000 δείγματα/sec από κάθε αισθητήρα). Από αυτά αφαιρείται ψηφιακά η συνεχής συνιστώσα καθενός και ανορθώνονται. Μετά από την κατάλληλη επεξεργασία, η οποία αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5, λαμβάνονται οι αρχικοί παλμοί. Η παραγωγή τους βασίζεται στη δυναμική διαφορά τάσης-ρεύματος, όπως συμβαίνει στην HCC, και εμφανίζουν περιοδικότητα, όπως στην sPWM. Στη συνέχεια, το αριθμητικό επίπεδο των παλμών σε bits διαμορφώνεται στο απαιτούμενο επίπεδο του μικροελεγκτή, δηλαδή στα 255 bits για 100% Duty Cycle. Τέλος, μέσω του Arduino τροφοδοτείται και ένα ποτενσιόμετρο, του οποίου η μεσαία λήψη έχει εύρος από 0,5 έως 1,5. Το σήμα της μεσαίας λήψης επιστρέφει στον A/D του Arduino και πολλαπλασιάζεται με τους παραγόμενους παλμούς για να μεταβάλει τη διάρκειά τους και έτσι τον λόγο κατάτμησης. Αυτό οδηγεί έμμεσα στη μεταβολή της ισχύος του μετατροπέα. Συνεπώς, κάθε μέτρηση περιλαμβάνει τρεις διαφορετικές καταστάσεις ισχύος σε κάθε φορτίο. Στην κατάσταση Normal οι παλμοί παράγονται σύμφωνα με την τάση

και το ρεύμα του κυκλώματος και δεν τροποποιούνται μέσω του ποτενσιόμετρου. Στις καταστάσεις Minimum και Maximum το εύρος των αρχικών παλμών πολλαπλασιάζεται με το σήμα του ποτενσιόμετρου και επιτρέπουν την αντίστοιχη μεταβολή του Duty Cycle των παλμών του μετατροπέα. Η μεταβολή της ισχύος επηρεάζει τις τιμές της τάσης, του ρεύματος και του συντελεστή ισχύος.

7.2.1. Μετατροπέας με παθητικά φορτία

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με παθητικά φορτία. Αυτές βοήθησαν στην διαπίστωση της εύρυθμης λειτουργίας του μετατροπέα και παρείχαν τη δυνατότητα εύκολου εντοπισμού κάποιου σφάλματος, τόσο στο κύκλωμα, όσο και στο λογισμικό του μικροελεγκτή. Επιπρόσθετα, οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις. Στην πρώτη, δεν υπήρχε φίλτρο μείωσης ανώτερων αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα, ενώ στη δεύτερη χρησιμοποιήθηκε φίλτρο με επαγωγή $L_2 = 80 \text{ mH}$ και πυκνωτή $C = 2,35 \text{ }\mu\text{F}$. Οι μετρήσεις αυτές βοήθησαν σημαντικά στην εύκολη κατανόηση του τρόπου επίδρασης του φορτίου και του φίλτρου μείωσης ανώτερων αρμονικών στο συντελεστή ισχύος.

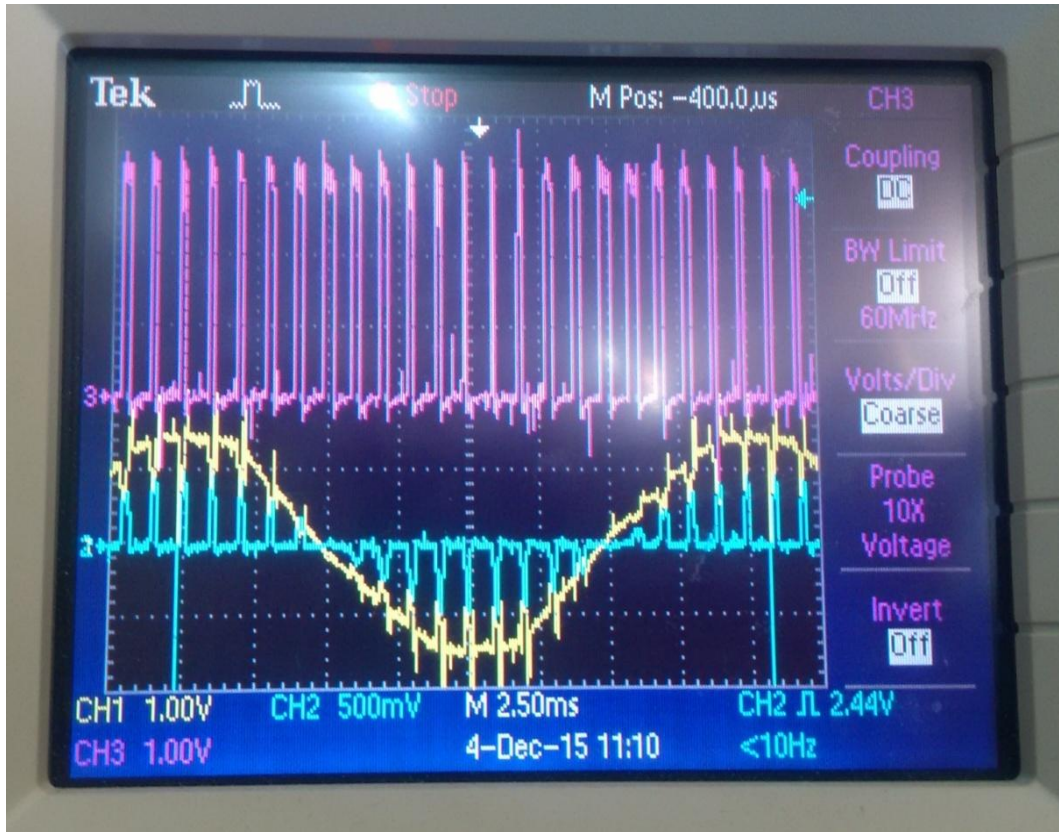
7.2.1.1. Χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών

	Θέση Ποτενσιόμετρου	Πηγή				Φορτίο	
		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)
R ΦΟΡΤΙΟ	Min.	238	0,64	0,48	73	75	0,72
	Norm.	230	0,96	0,5	110	88	0,91
	Max.	224	2,02	0,6	272	95	1,13
		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)
RL ΦΟΡΤΙΟ	Min.	238	0,23	0,45	25	89	0,27
	Norm.	231	0,48	0,48	53	96	0,4
	Max.	225	1,58	0,56	199	99	0,8
		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)

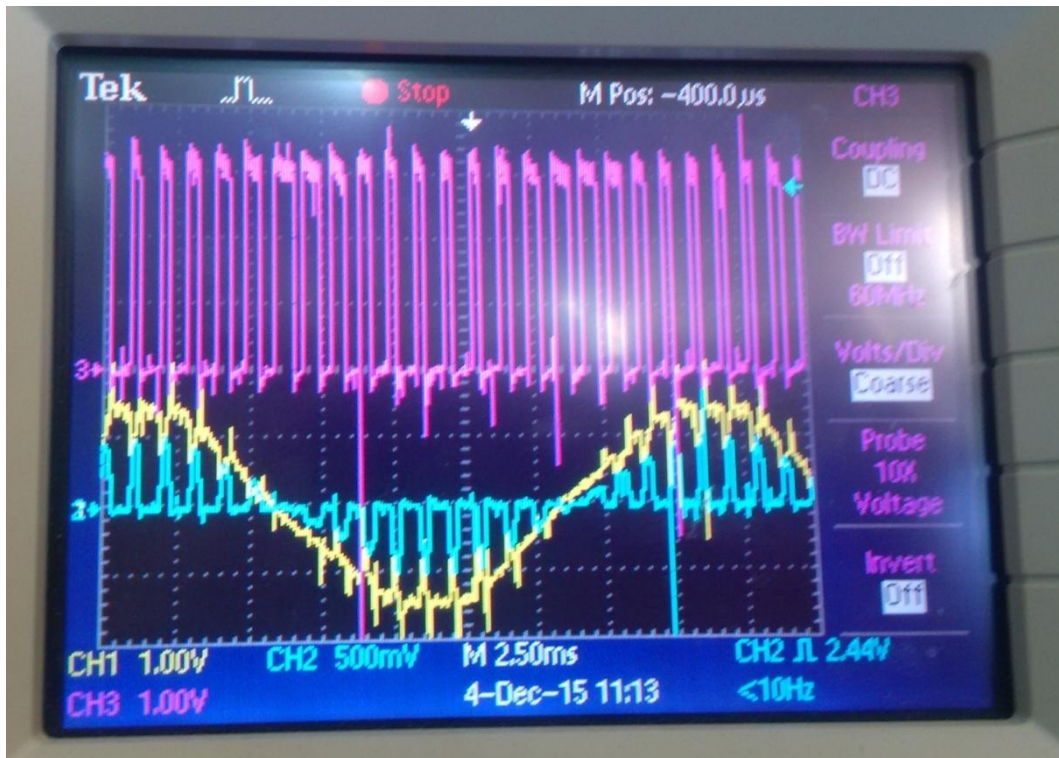
Πίνακας 1: Η τάση, το ρεύμα, ο συντελεστής ισχύος και η ενεργός ισχύς από την πλευρά του δικτύου και η τάση και το ρεύμα φορτίου, για ωμικό και σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

Στα παλμογραφήματα παρουσιάζεται η τάση και το ρεύμα στην είσοδο του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου και οι παλμοί που δέχεται το IGBT. Το καθένα αποτυπώνει τα παραπάνω σήματα για διαφορετική θέση ποτενσιόμετρου, δηλαδή για διαφορετικό λόγο κατάτμησης (Duty Cycle). Στο σχήμα 7.9, που το Duty Cycle των παλμών έχει μειωθεί στο μισό, η κυματομορφή του ρεύματος εισόδου έχει πολλά διαστήματα μηδενικής τιμής και μάλιστα μεγάλης διάρκειας. Στα σχήματα 7.10 και 7.11, η αύξηση του Duty Cycle των

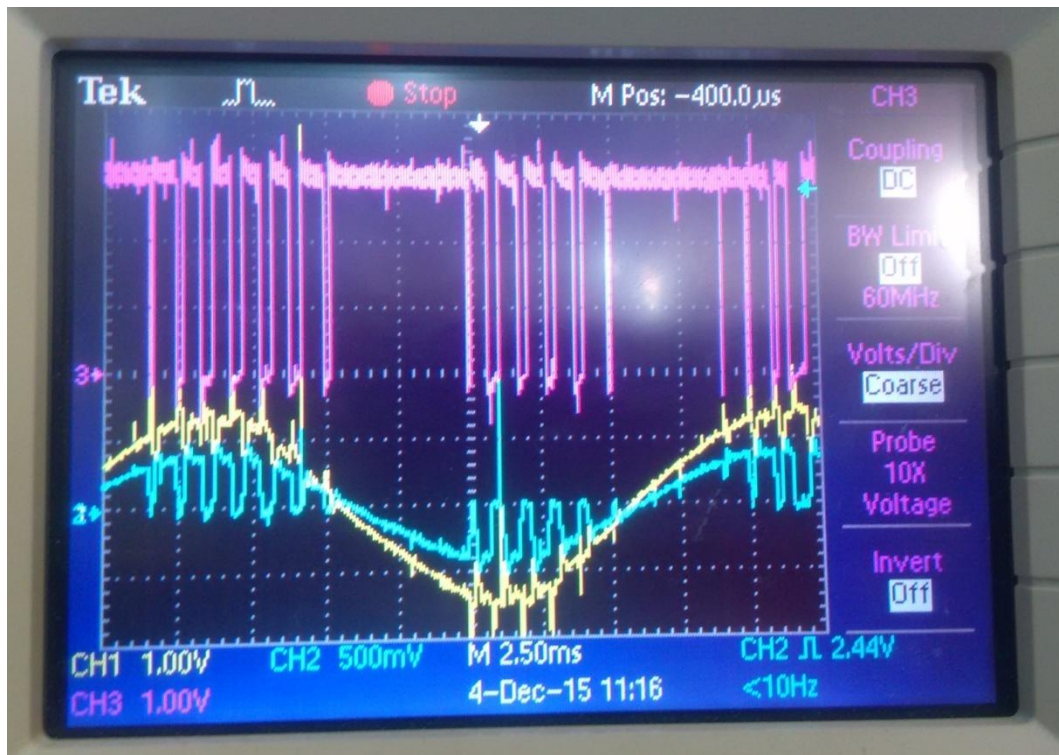
παλμών προκαλεί έντονες διαφοροποιήσεις σχετικά με το σχήμα 7.9, τόσο στην κυματομορφή των παλμών, όσο και στην κυματομορφή του ρεύματος. Συγκεκριμένα, ο λόγος κατάτμησης έχει αυξηθεί σημαντικά, μάλιστα στο σχήμα 7.11 υπάρχουν παλμοί με λόγο κατάτμησης 100%. Ο υψηλός αυτός λόγος κατάτμησης έχει ελαχιστοποιήσει την εμφάνιση μηδενικών διαστημάτων στο ρεύμα. Έτσι, το ρεύμα αποκτά πιο ημιτονοειδή μορφή με ανώτερες αρμονικές μικρότερες σε τιμή και λιγότερες σε αριθμό.



Σχήμα 7.9: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle και για ωμικό φορτίο.



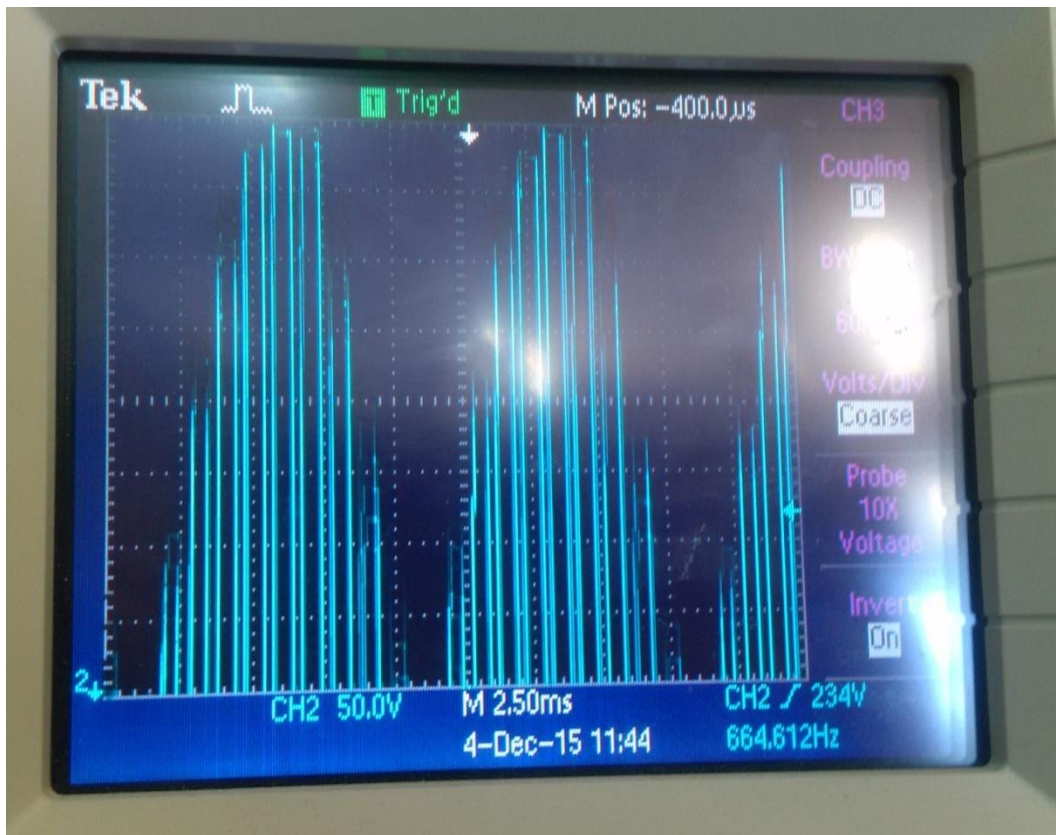
Σχήμα 7.10: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle και για ωμικό φορτίο.



Σχήμα 7.11: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle για ωμικό φορτίο.

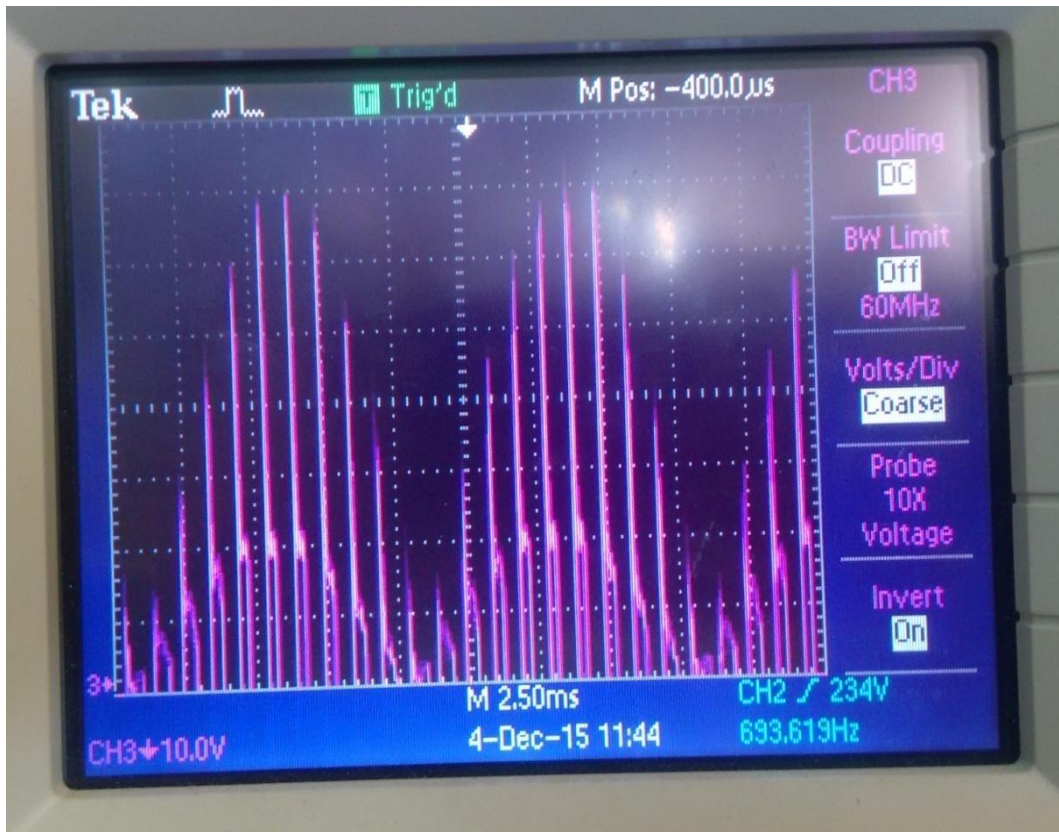
Οι υπερτάσεις λόγω των μεταβάσεων κατάστασης των ημιαγωγών είναι συχνό και μη επιθυμητό φαινόμενο. Για τη μείωση ή και την εξάλειψη αυτών των υπερτάσεων, που είναι επικίνδυνες για τους ημιαγωγούς, χρησιμοποιείται κύκλωμα προστασίας. Το κύκλωμα αυτό

καλείται snubber. Το snubber της εργασίας επιλέχθηκε ύστερα από δοκιμές και αποτελείται από μία μη μεταβαλλόμενη σε υψηλές θερμοκρασίες αντίσταση τιμής 470 Ω και δύο πυκνωτές συνολικής τιμής 1,2 μF. Στο σχήμα 7.12 φαίνεται η τάση ανόδου-καθόδου του IGBT. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να δεχτεί το τρανζίστορ στα άκρα του είναι 800 V, ενώ η τάση που δέχεται μαζί με τις αιχμές είναι περίπου 600 V. Το παλμογράφημα είναι ρυθμισμένο στη μέγιστη δυνατή υποδιαίρεση, τα 50 V/ division, όμως η κυματομορφή ξεπερνά τα όρια της οθόνης του παλμογράφου. Συνεπώς, επιθυμώντας την εστίαση στις αιχμές η αναφορά του σήματος δεν απεικονίζεται.



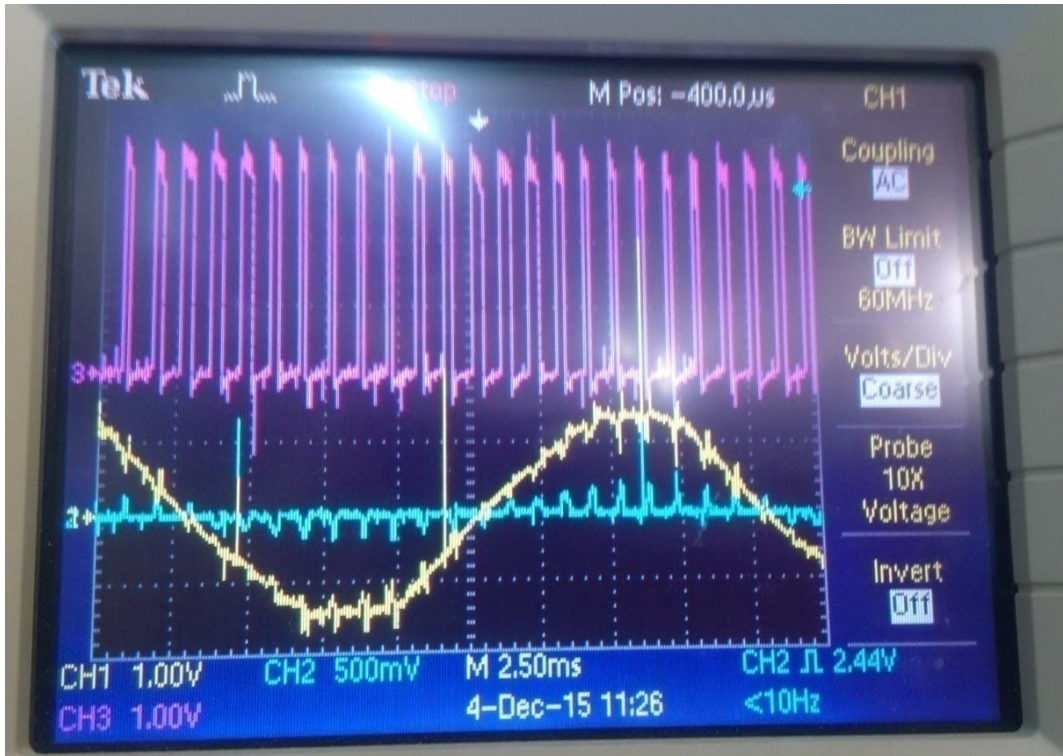
Σχήμα 7.12: Τάση ανόδου-καθόδου του IGBT για ωμικό φορτίο, με εστίαση του παλμογράφου στις αιχμές των υπερτάσεων που εμφανίζονται στα άκρα του τρανζίστορ.

Ομοίως με το IGBT, αιχμές υπερτάσεων εμφανίζει και η διάδος ελεύθερης διέλευσης. Οι τιμές αυτών είναι πολύ πιο μικρές συγκριτικά με του IGBT και φτάνουν λίγο πιο πάνω από τα 70 V (σχ. 7.13) και όπως φαίνεται το snubber προστατεύει και τη διάοδο από τις υπερτάσεις.

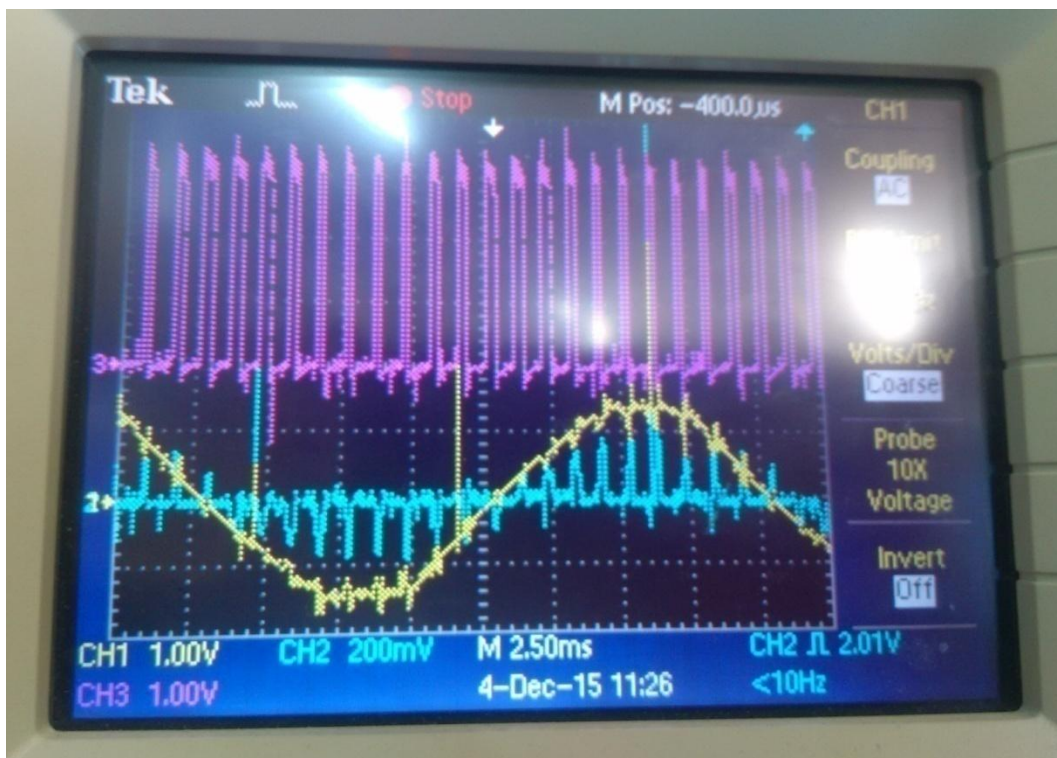


Σχήμα 7.13: Τάση ανόδου-καθόδου διόδου ελεύθερης διέλευσης για έλεγχο υπερτάσεων με ωμικό φορτίο.

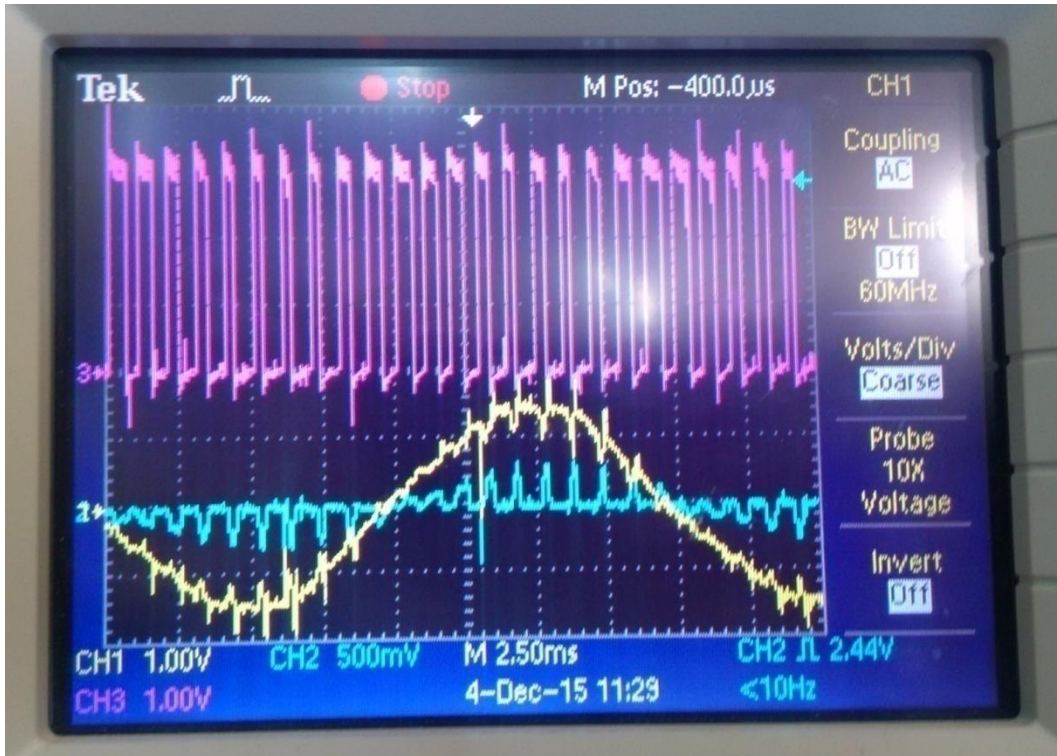
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο. Οι διαφοροποιήσεις με τα προηγούμενα παλμογραφήματα είναι αρκετές. Στο σχήμα 7.14 εμφανίζονται ακόμα μεγαλύτερες περιοχές κενού στο ρεύμα συγκριτικά με το σχήμα 7.9. Η παρουσία της επαγωγής δεν επιτρέπει την απότομη αύξηση του ρεύματος, με αποτέλεσμα το ρεύμα να παρουσιάζει μια χρονική καθυστέρηση σχετικά με πριν, αποκτώντας χαμηλότερη τιμή. Αυτό συνεπάγεται ακόμα μεγαλύτερα διαστήματα μηδενισμού, παρά το γεγονός πως η διάρκεια των παλμών είναι ίδια. Επίσης, η παρουσία της επαγωγής έχει μειώσει τις μικρές αιχμές στην κυματομορφή του ρεύματος κατά την έναυση του IGBT. Τέλος, σημαντική διαφοροποίηση των τριών παρακάτω σχημάτων με αυτά του ωμικού φορτίου είναι η μετατόπιση της βασικής αρμονικής του ρεύματος ως προς την τάση του δικτύου. Ο λόγος αυτής της μετατόπισης είναι η ύπαρξη του επαγωγικού φορτίου.



Σχήμα 7.14: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle και για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο.



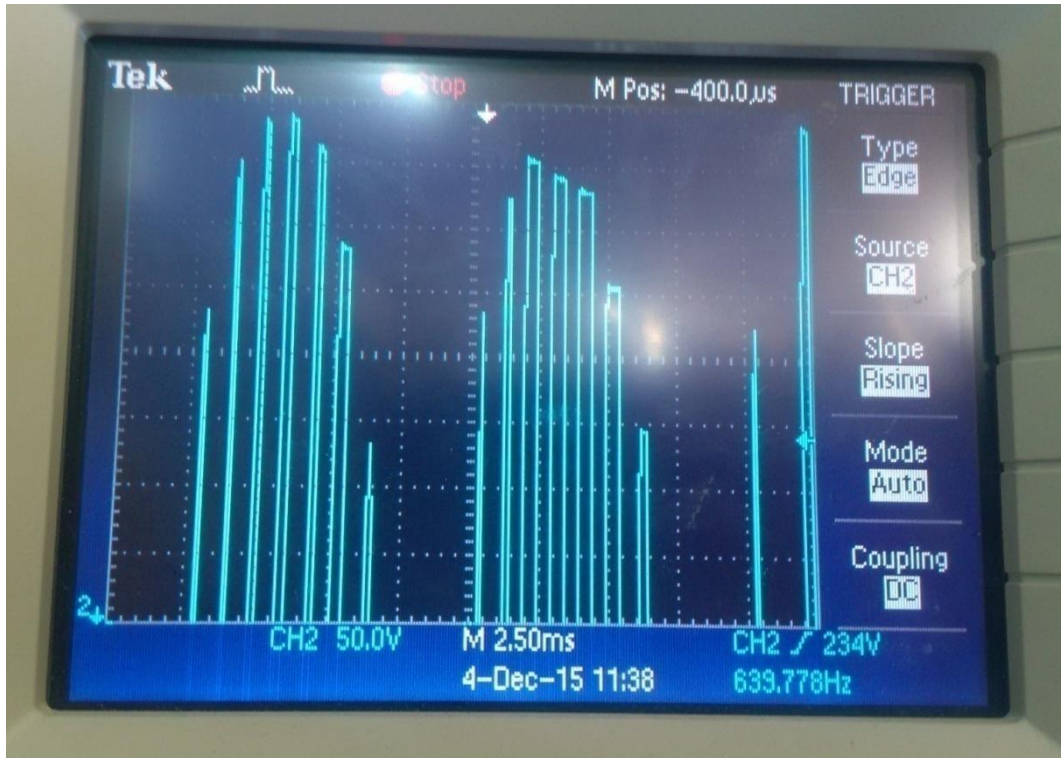
Σχήμα 7.15: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle και για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο με 200 mV/division στο ρεύμα για μεγέθυνση κυματομορφής.



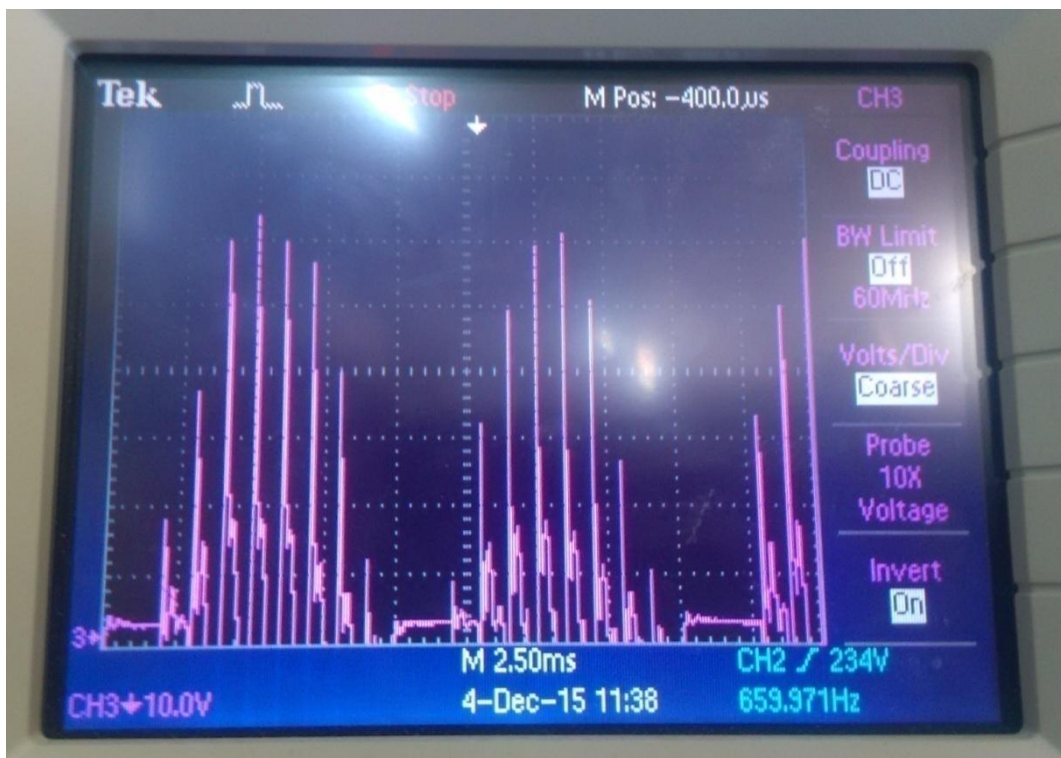
Σχήμα 7.16: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle και για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο.



Σχήμα 7.17: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle και για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο.



Σχήμα 7.18: Τάση ανόδου- καθόδου του IGBT για ωμικό-επαγωγικό φορτίο με εστίαση του παλμογράφου στις αιχμές των υπερτάσεων που εμφανίζονται στα άκρα του τρανζίστορ.



Σχήμα 7.19: Τάση ανόδου- καθόδου διόδου ελεύθερης διέλευσης για έλεγχο υπερτάσεων με ωμικό- επαγωγικό φορτίο.

Στα σχήματα 7.18 και 7.19 οι αιχμές υπερτάσεων στα άκρα των δύο ημιαγωγών έχουν μειωθεί, διότι η ύπαρξη του επαγωγικού φορτίου δεν επιτρέπει τις απότομες μεταβολές του ρεύματος μέσα από την παρασιτική επαγωγή του IGBT.

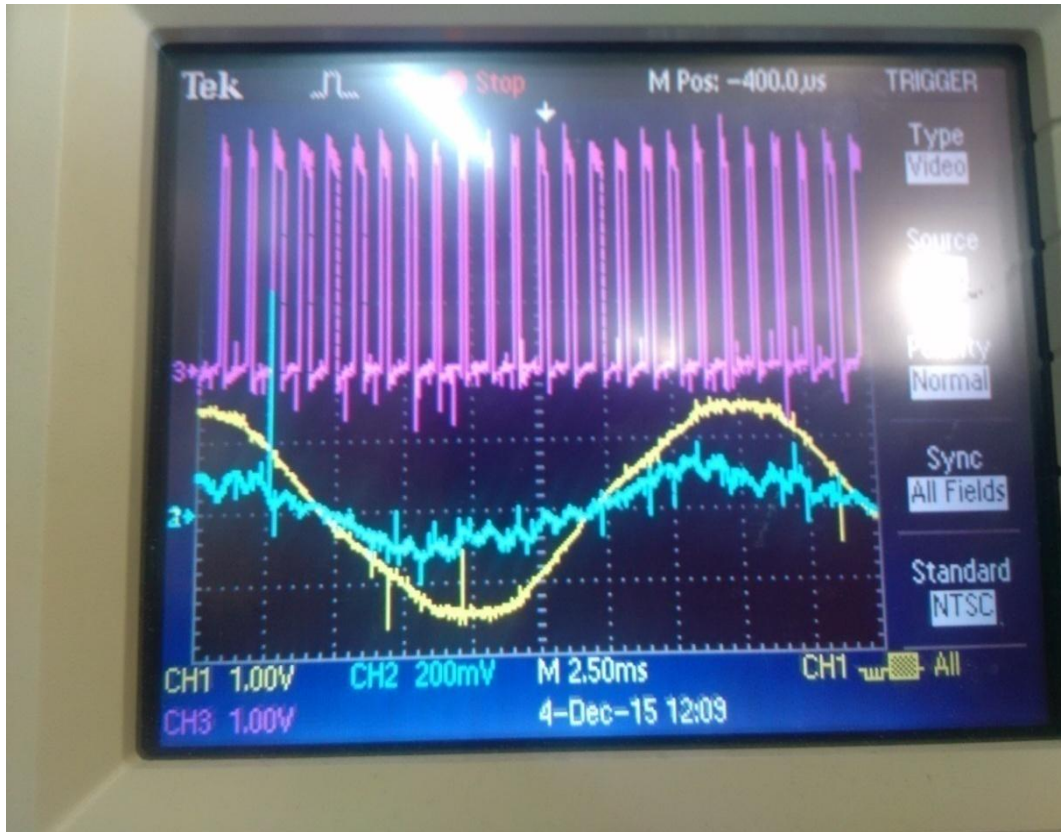
7.2.1.2. Με φίλτρο μείωσης αρμονικών

	Θέση Ποτενσιόμετρου	Πηγή				Φορτίο	
		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)
R ΦΟΡΤΙΟ	Min.	232	0,66	0,6	92	90	0,9
	Norm.	230	1,02	0,87	205	90	1
	Max.	224	2	0,88	394	90	1,15
RL ΦΟΡΤΙΟ		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)
	Min.	233	0,26	0,55	33	95	0,28
	Norm.	230	0,47	0,8	87	104	0,44
	Max.	224	1,58	0,85	301	100	0,8

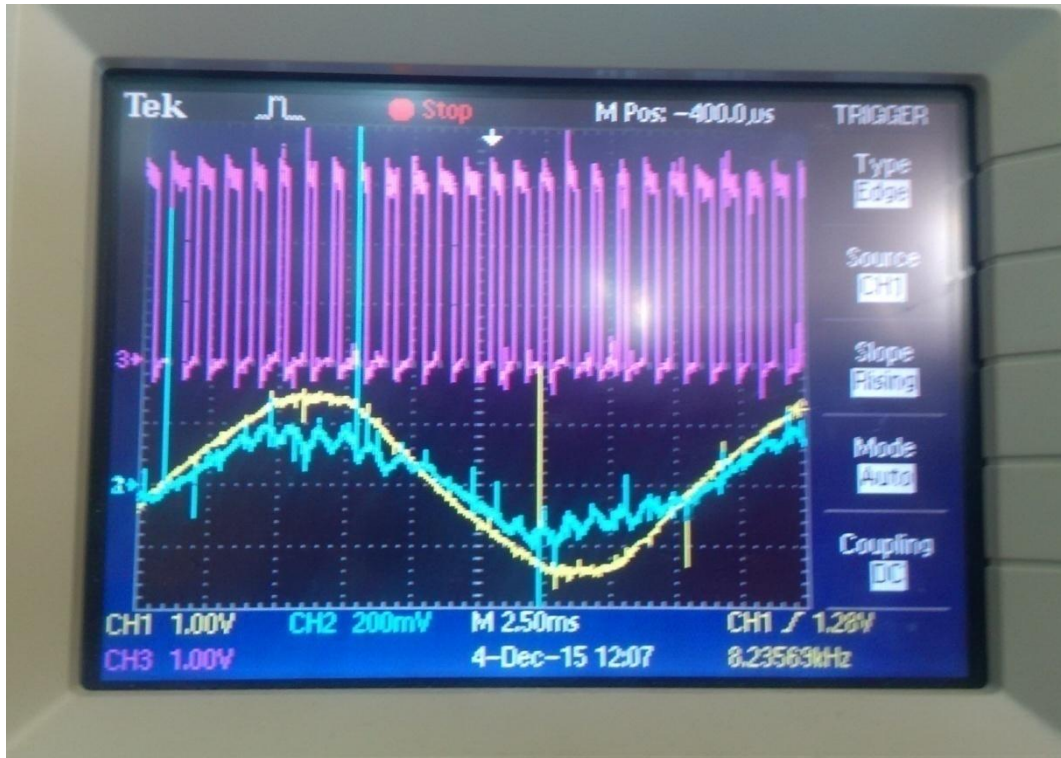
Πίνακας 2: Η τάση, το ρεύμα, ο συντελεστής ισχύος και η ενεργός ισχύς από την πλευρά του δικτύου και η τάση και το ρεύμα φορτίου, για ωμικό και σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο με φίλτρο μείωσης αρμονικών (L=80 mH και C=2,35 μF) στην είσοδο του μετατροπέα.

Με το πέρας των προηγούμενων μετρήσεων τοποθετήθηκε φίλτρο μείωσης ανώτερων αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα. Διατηρώντας τις ίδιες συνθήκες με τις προηγούμενες μετρήσεις, στόχος ήταν ο εντοπισμός και η αποτύπωση της παρουσίας του φίλτρου μέσα από τις διαφοροποιήσεις που προκαλεί στην τάση και στο ρεύμα εισόδου. Με τη σύγκριση των παρακάτω παλμογραφήματων με αυτά της μέτρησης χωρίς φίλτρο είναι εμφανής η βελτίωση που προκαλεί το φίλτρο μείωσης ανώτερων αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα. Η κυματομορφή του ρεύματος εισόδου εμφανίζει μεγάλες διαφορές. Τα χρονικά διαστήματα μηδενισμού του ρεύματος που παρουσιάζονταν στα παλμογραφήματα της προηγούμενης παραγράφου και ιδιαίτερα σε αυτά με χαμηλό λόγο κατάτμησης, δεν υπάρχουν σε κανένα από τα παλμογραφήματα της παραγράφου αυτής. Επιπρόσθετα, στα σχήματα 7.22 και 7.27, που ο βαθμός εργασίας είναι ο μέγιστος, εμφανίζεται ελάχιστη κυμάτωση στο ρεύμα συγκριτικά με τους μικρότερους λόγους κατάτμησης (σχ. 7.20, 7.21, 7.25, 7.26). Επίσης, στις μετρήσεις με επαγωγικό φορτίο παρουσιάζεται μικρότερη κυμάτωση από αυτές με το ωμικό, καθώς αυξάνεται η συνολική επαγωγή που διαδραματίζει ρόλο στο φιλτράρισμα. Οι διαφοροποιήσεις αυτές είναι ενδεικτικές για τη μείωση των ανώτερων αρμονικών που προκαλεί η χρήση του φίλτρου. Συνεπώς, από τα παραπάνω προκύπτει η αναγκαιότητα χρήσης ενός L-C φίλτρου στην είσοδο. Σχετικά με τις υπερτάσεις στα άκρα των ημιαγωγών παρατηρείται ότι στο IGBT έχουν σχεδόν εξαιρεθεί (σχ. 7.23, 7.28), αφού η επαγωγή του φίλτρου με τιμή 80 mH μειώνει τις ακαριαίες μεταβολές του ρεύματος. Στη δίοδο ελεύθερης διέλευσης οι υπερτάσεις στα άκρα της έχουν ελαχιστοποιηθεί στον μέγιστο βαθμό (σχ. 7.24, 7.29). Τέλος, είναι απαραίτητες μερικές παρατηρήσεις σχετικά με τα δύο

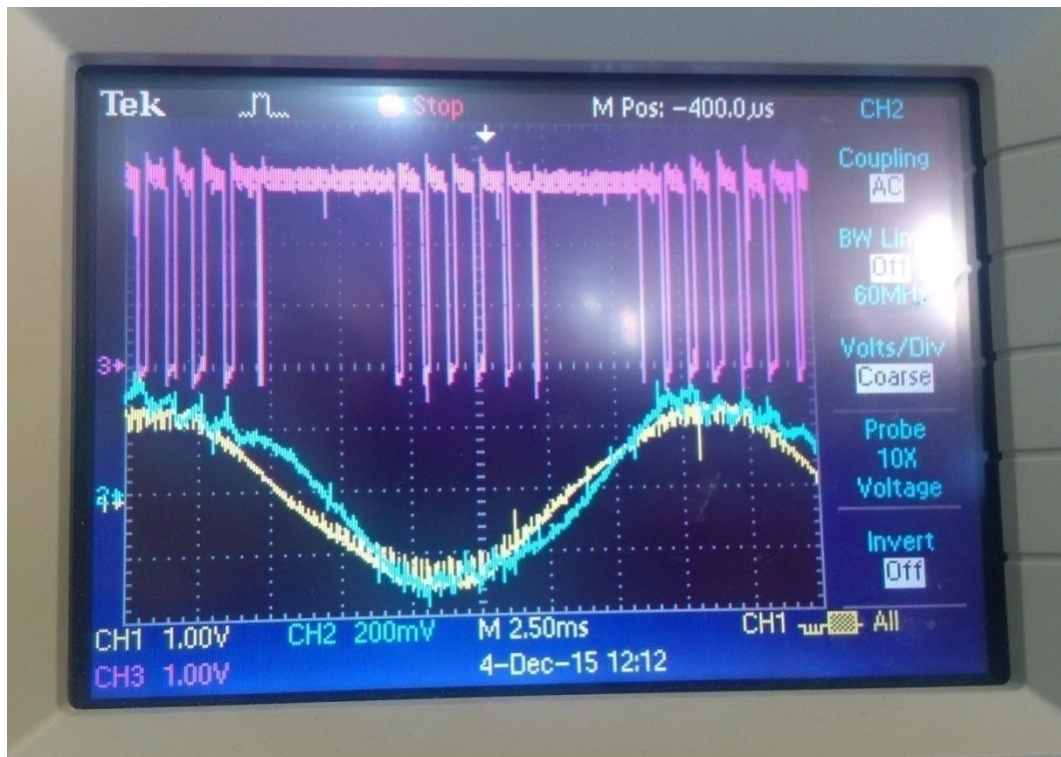
αυτά παλμογραφήματα. Στο σχήμα 7.24, όπου στις αρχικές υποδιαιρέσεις εμφανίζεται μια ομαλή μεταβολή της τάσης μεταξύ ανόδου-καθόδου που οφείλεται στο stop για τη σταθεροποίηση της κυματομορφής (αφού είναι δύσκολος ο συγχρονισμός του παλμογράφου). Στο σχήμα 7.29 παρατηρείται μια παρόμοια μεταβολή που οφείλεται και αυτή στο stop, αλλά εμφανίζεται και μια ομαλή μετάβαση κατά την αγωγή της διόδου, η οποία οφείλεται στην παρουσία της επαγωγής.



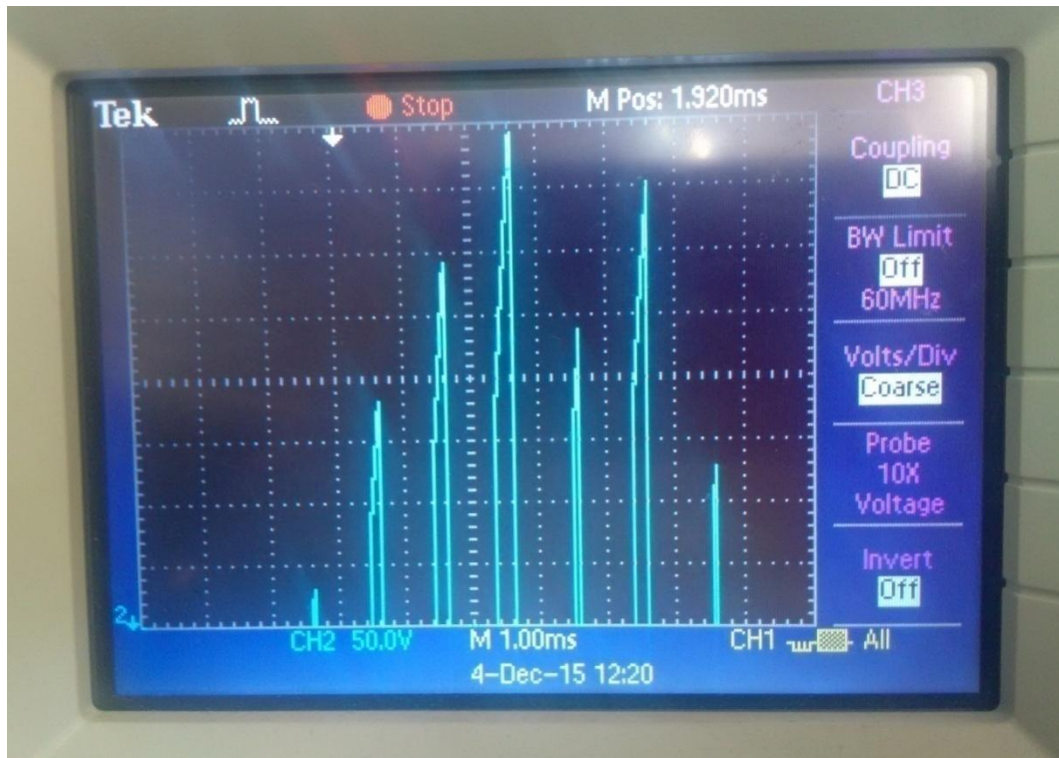
Σχήμα 7.20: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle και για ωμικό φορτίο.



Σχήμα 7.21: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle και για ωμικό φορτίο.



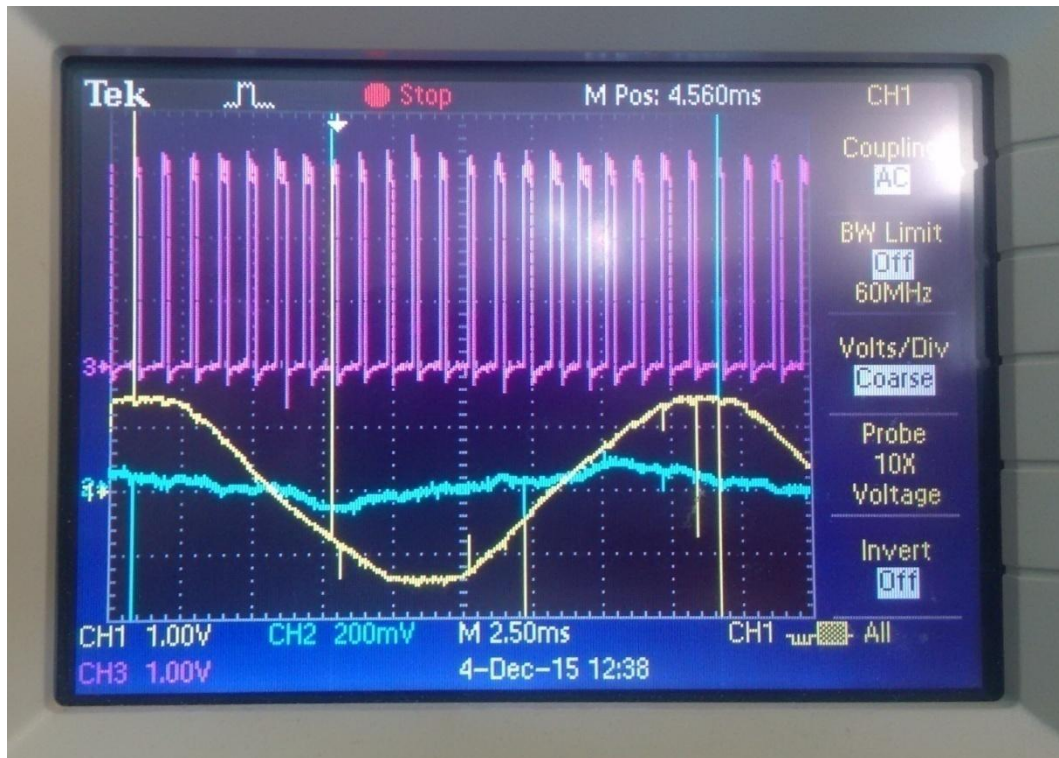
Σχήμα 7.22: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle και για ωμικό φορτίο.



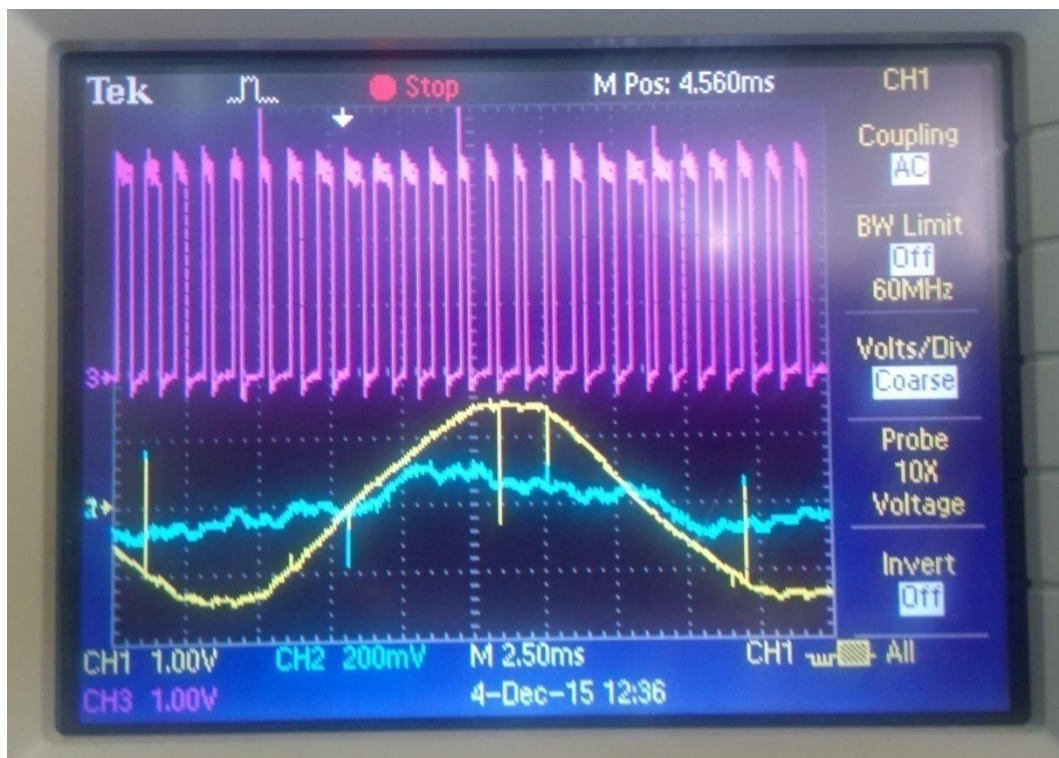
Σχήμα 7.23: Τάση ανόδου-καθόδου του IGBT για ωμικό φορτίο με εστίαση του παλμογράφου στις αιχμές των υπερτάσεων που εμφανίζονται στα άκρα του τρανζίστορ.



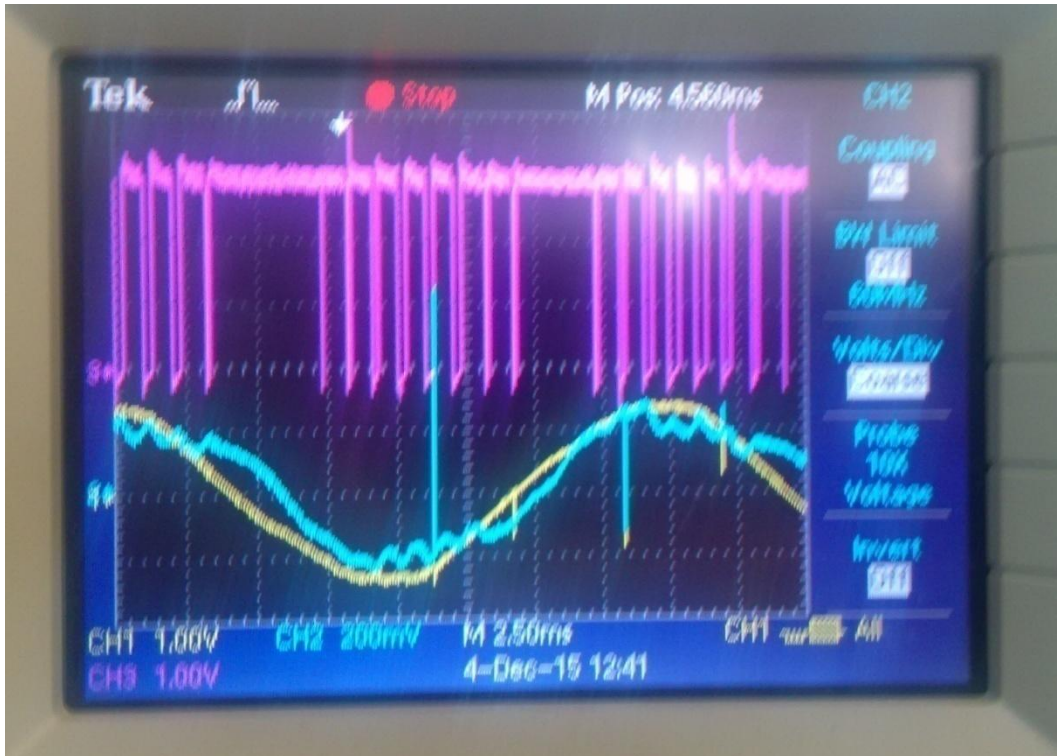
Σχήμα 7.24: Τάση ανόδου-καθόδου διόδου ελεύθερης διέλευσης για έλεγχο υπερτάσεων με ωμικό φορτίο.



Σχήμα 7.25: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle και για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο.



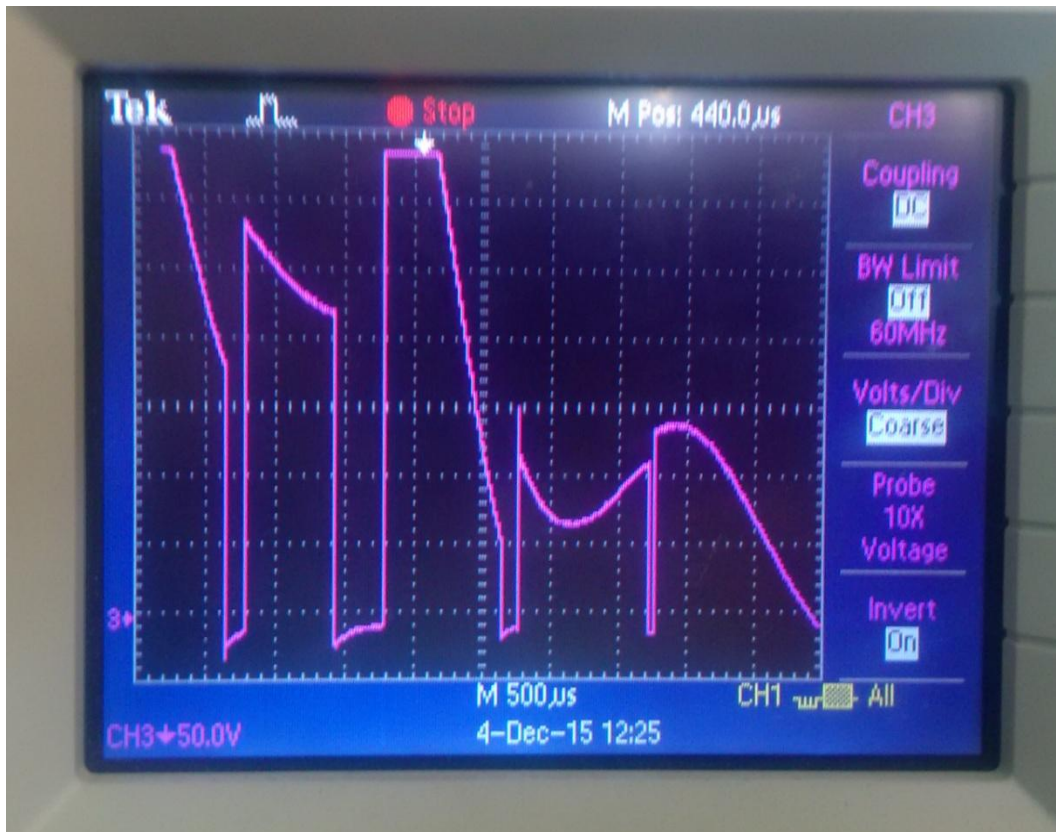
Σχήμα 7.26: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle και για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο.



Σχήμα 7.27: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και οι παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle και για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο.



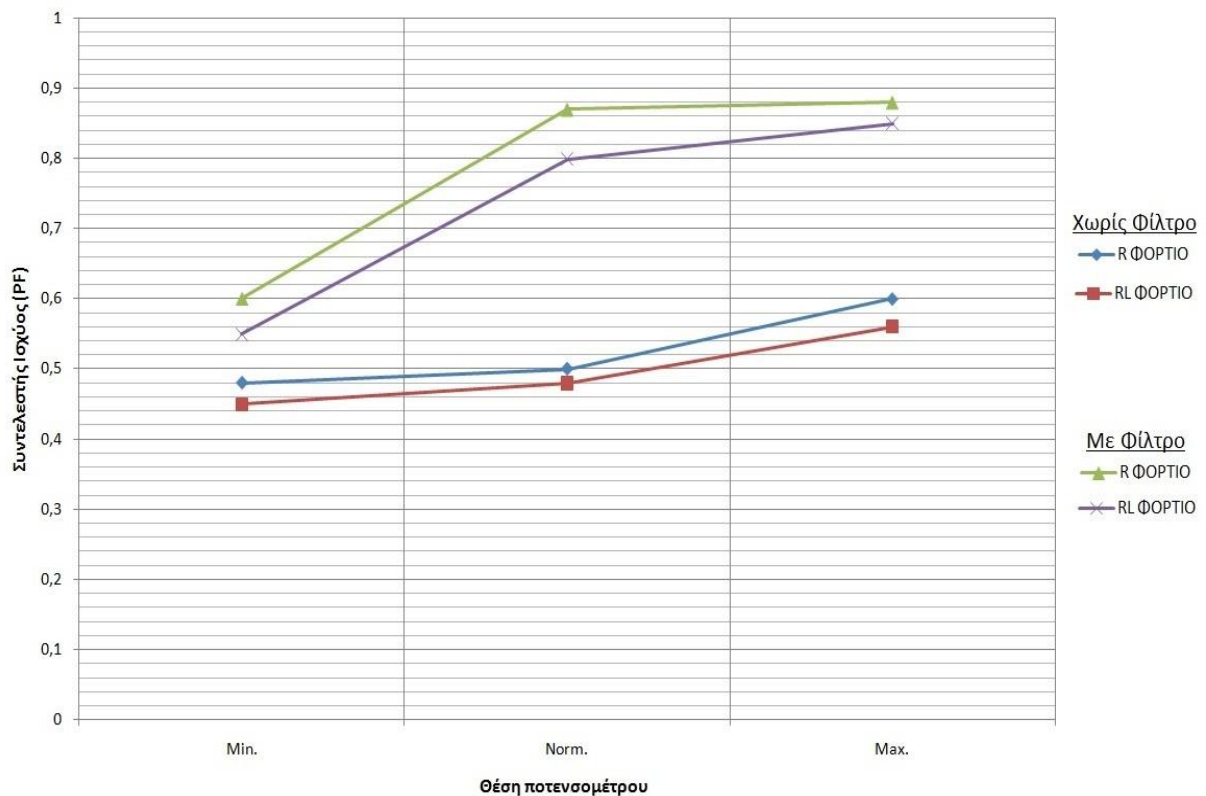
Σχήμα 7.28: Τάση ανόδου- καθόδου του IGBT για σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο με εστίαση του παλμογράφου στις αιχμές των υπερτάσεων που εμφανίζονται στα άκρα του τρανζίστορ.



Σχήμα 7.29: Τάση ανόδου- καθόδου διόδου ελεύθερης διέλευσης για έλεγχο υπερτάσεων με σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων με τα παθητικά φορτία συμπεραίνεται πως η χρήση φίλτρου μείωσης αρμονικών είναι επιτακτική ανάγκη. Ο συντελεστής ισχύος λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για όλες τις μετρήσεις με τη χρήση φίλτρου. Επίσης, η φύση του φορτίου μεταβάλλει τον συντελεστή ισχύος (PF). Συγκεκριμένα, η επαγωγή σε αυτό προκαλεί μετατόπιση της βασικής αρμονικής του ρεύματος ως προς την τάση, με αποτέλεσμα τη μείωση του PF. Ολοκληρώνοντας, ο συντελεστής ισχύος επηρεάζεται και από τον λόγο κατάτμησης, αφού η αύξηση του δεύτερου μειώνει το ποσοστό των ανώτερων αρμονικών που περιέχονται στο ρεύμα και συντελεί στην αύξηση του πρώτου. Η επαλήθευση των παραπάνω συμπερασμάτων γίνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των Πινάκων 3 και 4 (σχ. 7.30). Ο PF στις μετρήσεις με φίλτρο στην είσοδο είναι πολύ πιο υψηλός από αυτές χωρίς το φίλτρο. Τέλος, και στις δύο περιπτώσεις το ωμικό φορτίο παρουσιάζει πιο υψηλό PF, εξαιτίας της μετατόπισης της βασικής αρμονικής του ρεύματος ως προς την τάση δικτύου που προκαλεί η επαγωγή του φορτίου.

Μετρήσεις με παθητικά φορτία



Σχήμα 7.30: Γραφική παράσταση PF για ωμικό και σύνθετο ωμικό-επαγωγικό φορτίο χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών και με χρήση αυτού στην είσοδο του μετατροπέα.

7.2.2. Μετατροπέας με ηλεκτρικές μηχανές

Στη συνέχεια, ως φορτίο στον μετατροπέα τοποθετήθηκε ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος εν κενώ, ο οποίος μετέπειτα φορτίστηκε μηχανικά από μια γεννήτρια που τροφοδοτεί ένα ωμικό φορτίο. Στόχος ήταν η επαλήθευση της λειτουργίας του μετατροπέα με πραγματικό φορτίο. Επιπρόσθετα, η παρατήρηση της μεταβολής του PF στην πλευρά του δικτύου και η μετέπειτα εξαγωγή συμπερασμάτων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των παρακάτω μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν για τρεις διαφορετικές τιμές της επαγωγής του φίλτρου, $L_1=60$ mH, $L_2=80$ mH και $L_3=100$ mH, διατηρώντας τη συνολική τιμή του πυκνωτή σταθερή. Επίσης, πραγματοποιήθηκε και μέτρηση χωρίς φίλτρο μείωσης ανώτερων αρμονικών στην είσοδο. Η διαδικασία πραγματοποίησης των μετρήσεων περιλαμβάνει μεταβολή του λόγου κατάτμησης, με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου, σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις, τον ελάχιστο λόγο κατάτμησης, τον κανονικό -όπως προκύπτει από το πρόγραμμα- και τον μέγιστο.

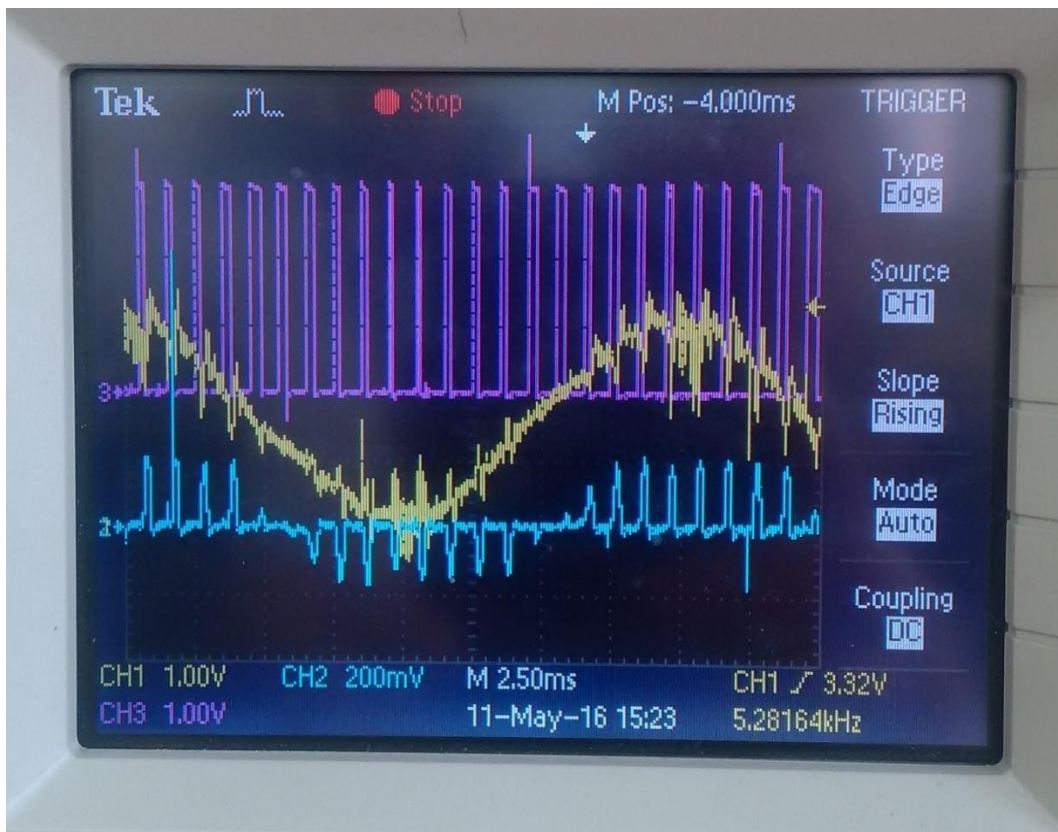
7.2.2.1. Κινητήρας εν κενώ

Τιμή Φίλτρου	Θέση Ποτενσιόμετρου	Πηγή (δίκτυο)				Φορτίο (κινητήρας)	
		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)
Χωρίς Φίλτρο	Min.	231	0,3	0,48	53	63	0,97
	Norm.	230	0,8	0,5	92	103	1,2
	Max.	225	0,7	0,6	95	166	1,37
L ₁ =60 mH	Min.	232	0,34	0,6	47	71,9	0,98
	Norm.	230	0,5	0,85	90	117	1,25
	Max.	226	0,8	0,88	155	167	1,46
L ₂ =80 mH	Min.	233	0,35	0,6	48	71,8	0,99
	Norm.	230	0,5	0,85	97	116,8	1,27
	Max.	227	0,72	0,91	156	169,5	1,45
L ₃ =100 mH	Min.	232	0,35	0,6	49	73,5	0,99
	Norm.	230	0,5	0,85	95	118,5	1,25
	Max.	227	0,77	0,93	155	170	1,4

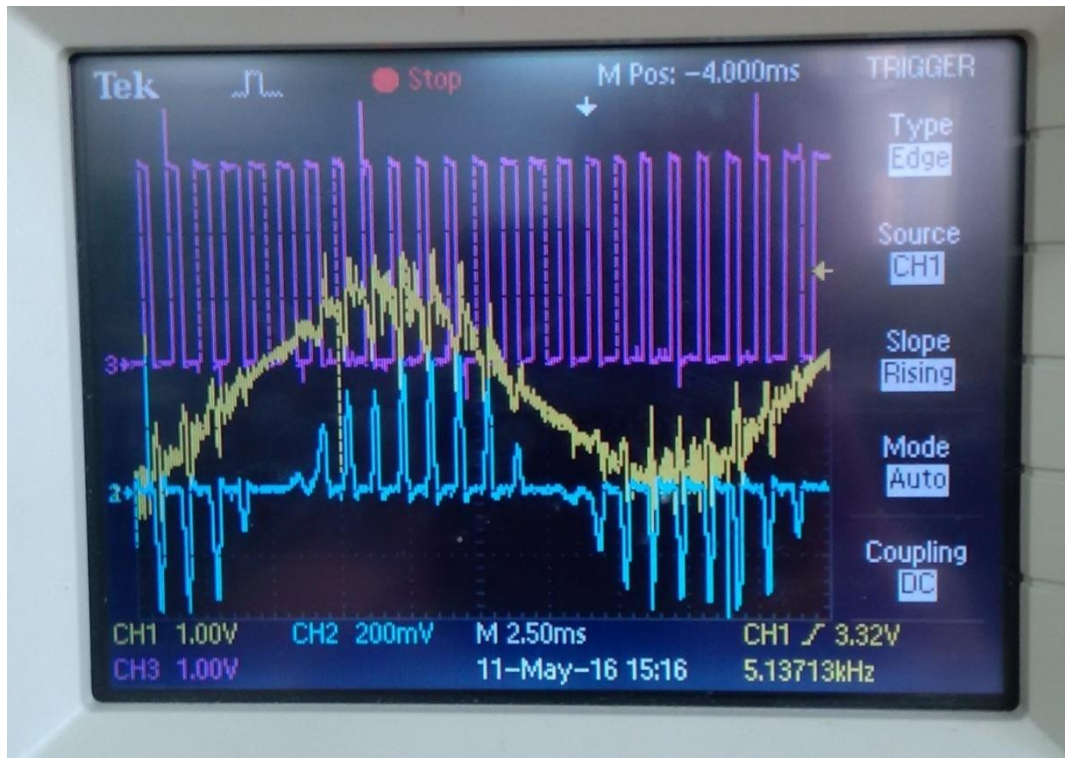
Πίνακας 3: Η τάση, το ρεύμα, ο συντελεστής ισχύος και η ενεργός ισχύς από την πλευρά του δικτύου και η τάση και το ρεύμα φορτίου, για κινητήρα εν κενώ, χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών και για φίλτρο με σταθερό πυκνωτή C=2,35 μF και τιμή επαγωγής L₁=60 mH, L₂=80 mH, L₃=100 mH στην είσοδο του μετατροπέα.

Στα παλμογραφήματα χωρίς το φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα (σχ. 7.31, 7.32, 7.33) παρουσιάζονται περιοχές κενού στο ρεύμα, δηλαδή χρονικά διαστήματα που το ρεύμα στο κύκλωμα ισχύος έχει την τιμή «0». Επίσης παρατηρείται πως με την αύξηση του λόγου κατάτμησης αυξάνεται το ρεύμα, αλλά εμφανίζονται και δύο περιοχές μηδενισμού του ρεύματος μέσα σε μία περίοδο που έχουν μεγάλη χρονική διάρκεια (σχ. 7.32, 7.33). Μάλιστα, στα σημεία εκείνα εμφανίζονται παλμοί μέγιστης διάρκειας (σχ. 7.33). Αυτό οφείλεται στην εσωτερική τάση εξ επαγωγής της μηχανής. Δηλαδή, στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα η DC τάση της μηχανής στην έξοδο της γέφυρας είναι υψηλότερη από την τάση του δικτύου και έτσι δεν υπάρχει ροή ρεύματος. Παρατηρείται, ακόμα, και η μετατόπιση του ρεύματος ως προς την τάση λόγω του επαγωγικού χαρακτήρα του κινητήρα. Η μετατόπιση αυτή διακρίνεται και στα υπόλοιπα παλμογραφήματα της παραγράφου. Με τη χρήση του φίλτρου οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος βελτιώνονται αισθητά. Επίσης, με την αύξηση του λόγου κατάτμησης εμφανίζεται και αύξηση της κυμάτωσης στις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος. Η ταλάντωση που εμφανίζει το ρεύμα προκαλείται από τον πυκνωτή του φίλτρου σε συνδυασμό με τη χαμηλή συχνότητα παλμοδότησης. Συγκεκριμένα, ο πυκνωτής συνεχίζει την ταλάντωση του ρεύματος μεταξύ αυτού και της επαγωγής, με χαμηλότερη συχνότητα από αυτή των παλμών,

ακόμα και μετά τη σβέση του ημιαγωγού. Έτσι, η χαμηλή συχνότητα μεταβολών του ρεύματος και η αύξηση του λόγου κατάτμησης επιτρέπουν την εμφάνιση αυτών των ταλαντώσεων. Αν η παλμοδότηση γινόταν με υψηλότερη συχνότητα, αυτές οι ταλαντώσεις θα εμφανίζονταν σε υψηλότερες συχνότητες και θα είχαν χαμηλότερο εύρος, με αποτέλεσμα τη μείωση της κυμάτωσης και τη βελτίωση της κυματομορφής του ρεύματος. Παράλληλα, στην είσοδο χρησιμοποιείται τροφοδοτικό εναλλασσόμενης τάσης που δεν είναι ιδανική πηγή, με αποτέλεσμα οι μεταβολές του ρεύματος να επιφέρουν μεταβολές και στην τάση. Έτσι, εμφανίζεται κυμάτωση στην τάση δικτύου, η οποία προκαλεί και την εμφάνιση ανώτερων αρμονικών στην κυματομορφή της τάσης. Οι αρμονικές αυτές έχουν ίδια συχνότητα με τις αρμονικές του ρεύματος. Αποτέλεσμα είναι οι ανώτερες αρμονικές του ρεύματος να παράγουν ενεργό ισχύ και έτσι ο PF να είναι υψηλότερος συγκριτικά με μια ιδανική πηγή (με ιδανική πηγή ο PF θα ήταν χαμηλότερος). Τέλος, σε κανένα παλμογράφημα με φίλτρο μείωσης αρμονικών δεν εμφανίζονται παλμοί μέγιστης διάρκειας, όπως στις μετρήσεις με τα παθητικά φορτία. Αυτό σημαίνει πλήρη έλεγχο του επιπέδου του ρεύματος από το κύκλωμα παραγωγής παλμών και από το λογισμικό του μικροελεγκτή.



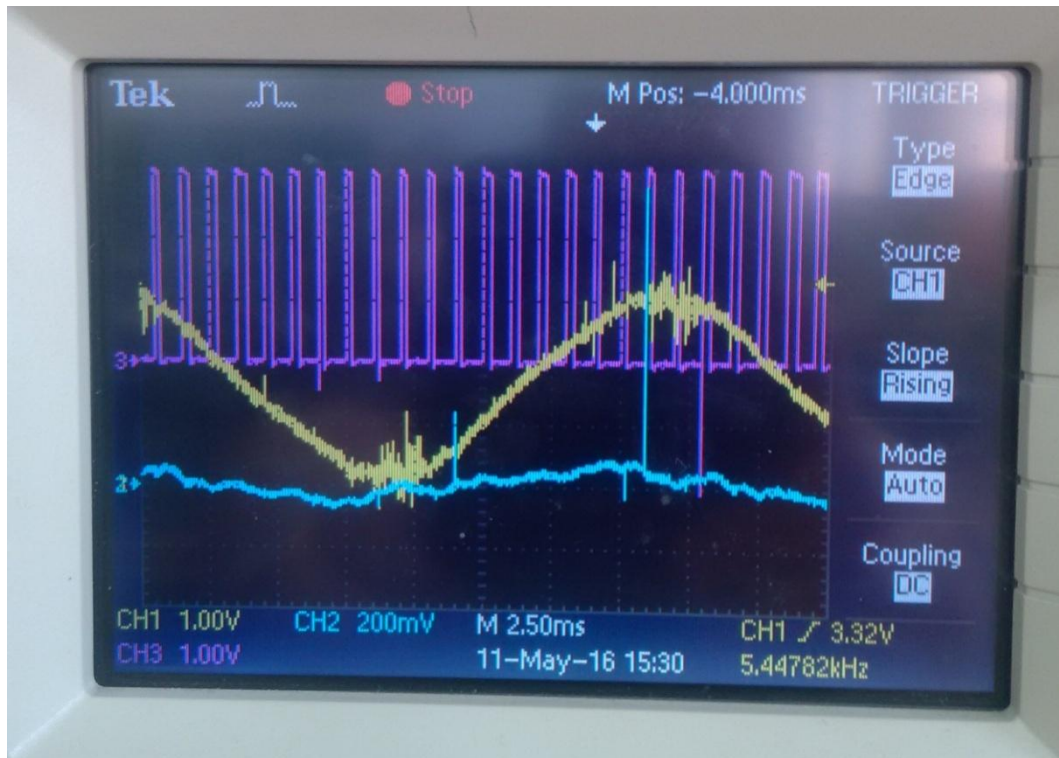
Σχήμα 7.31: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών.



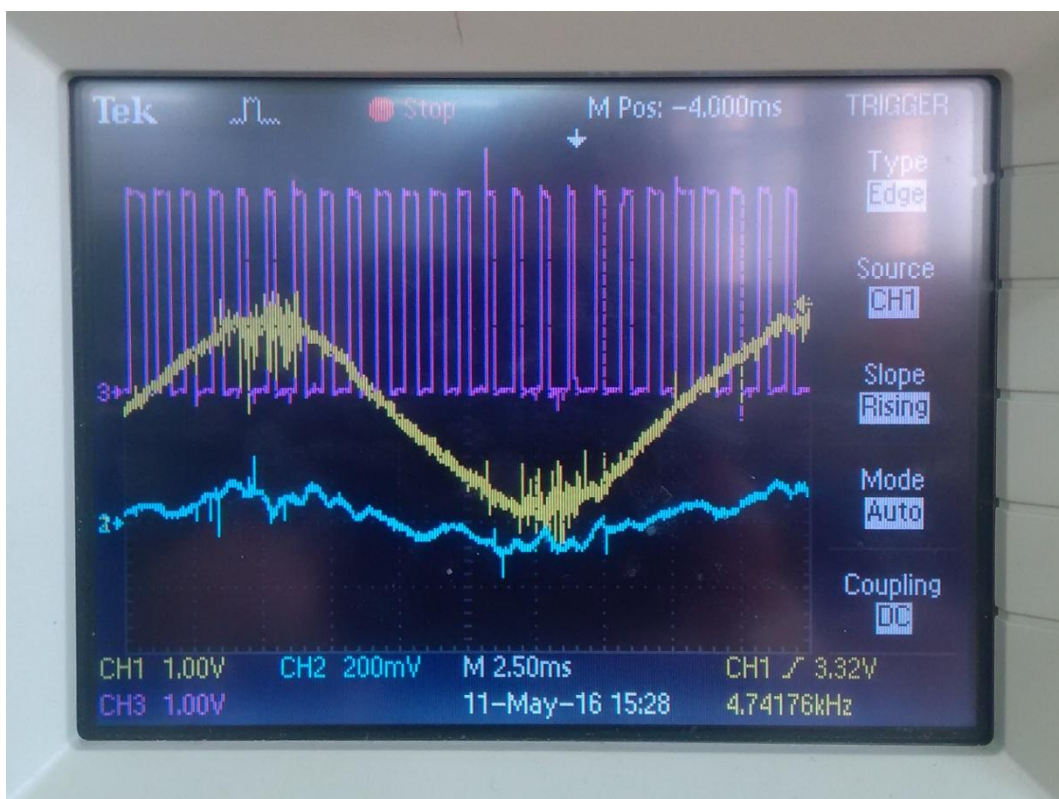
Σχήμα 7.32: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών.



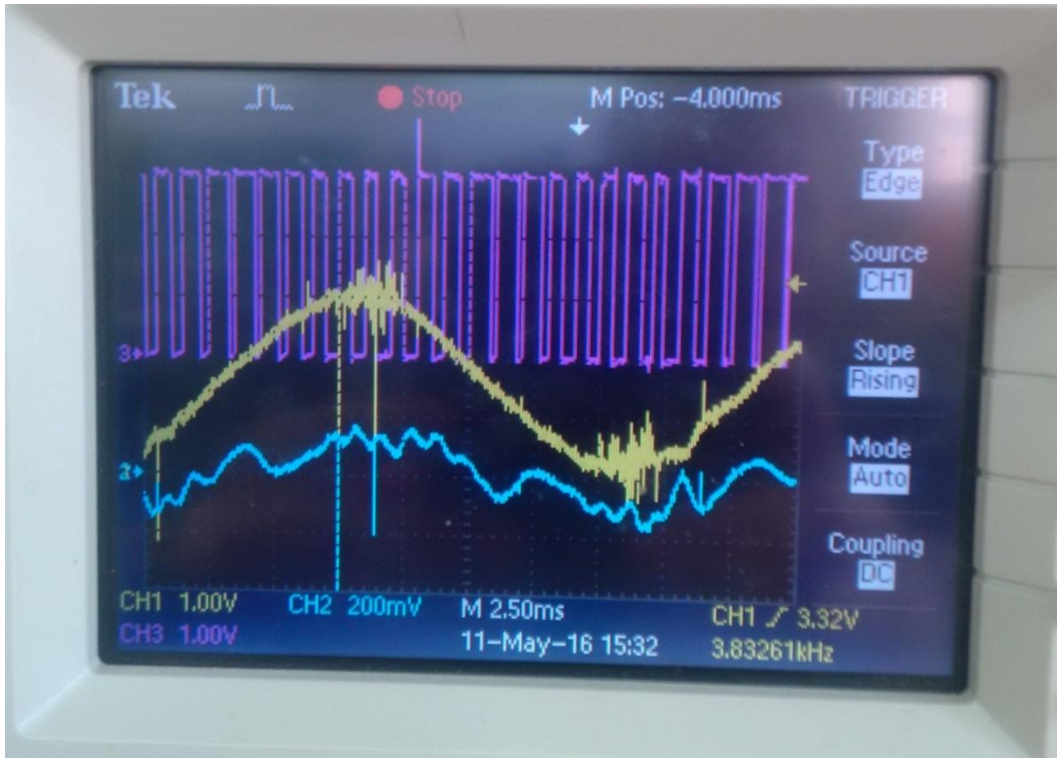
Σχήμα 7.33: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών.



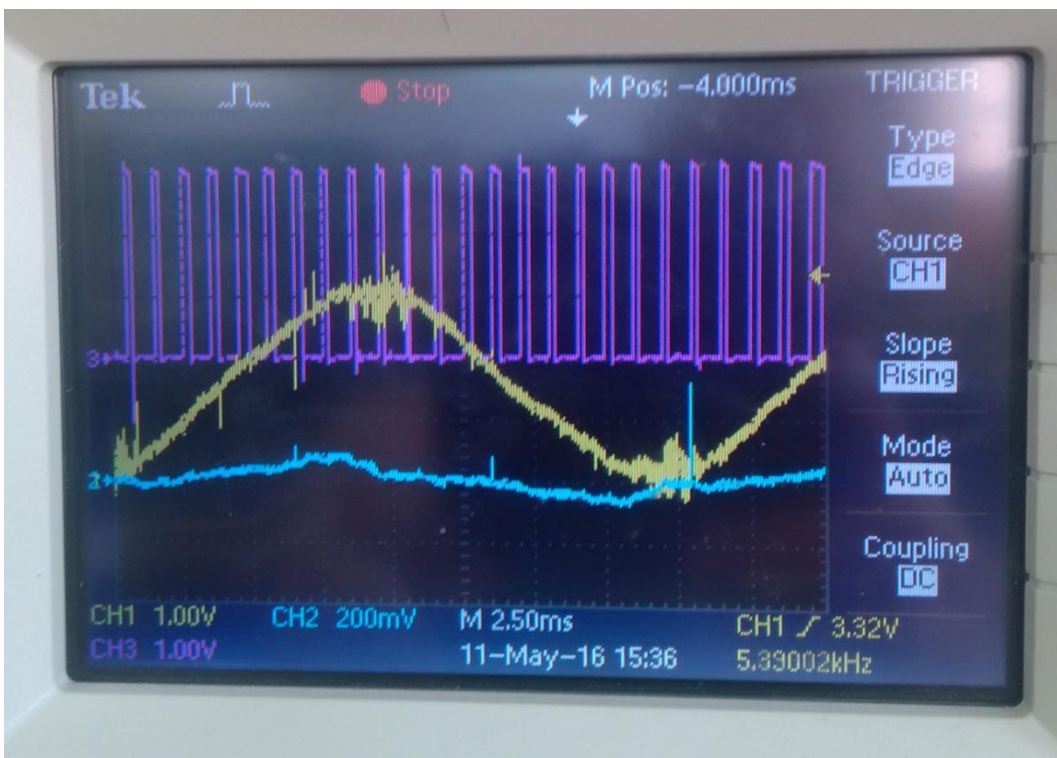
Σχήμα 7.34: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=60$ mH.



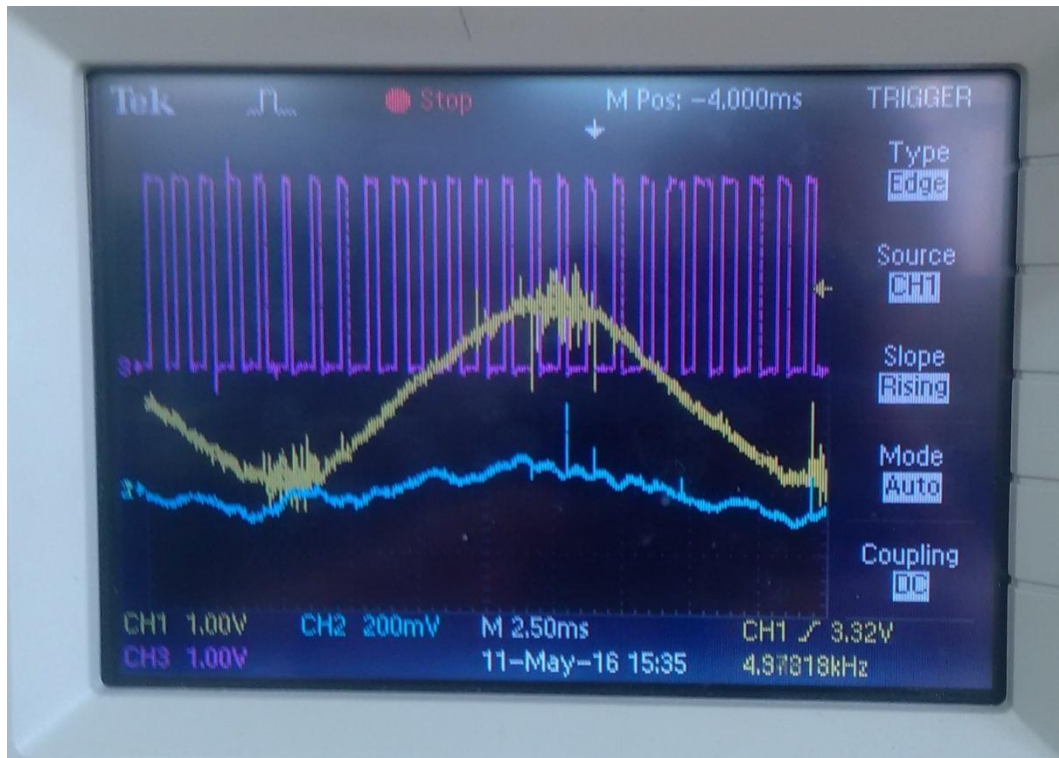
Σχήμα 7.35: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=60$ mH.



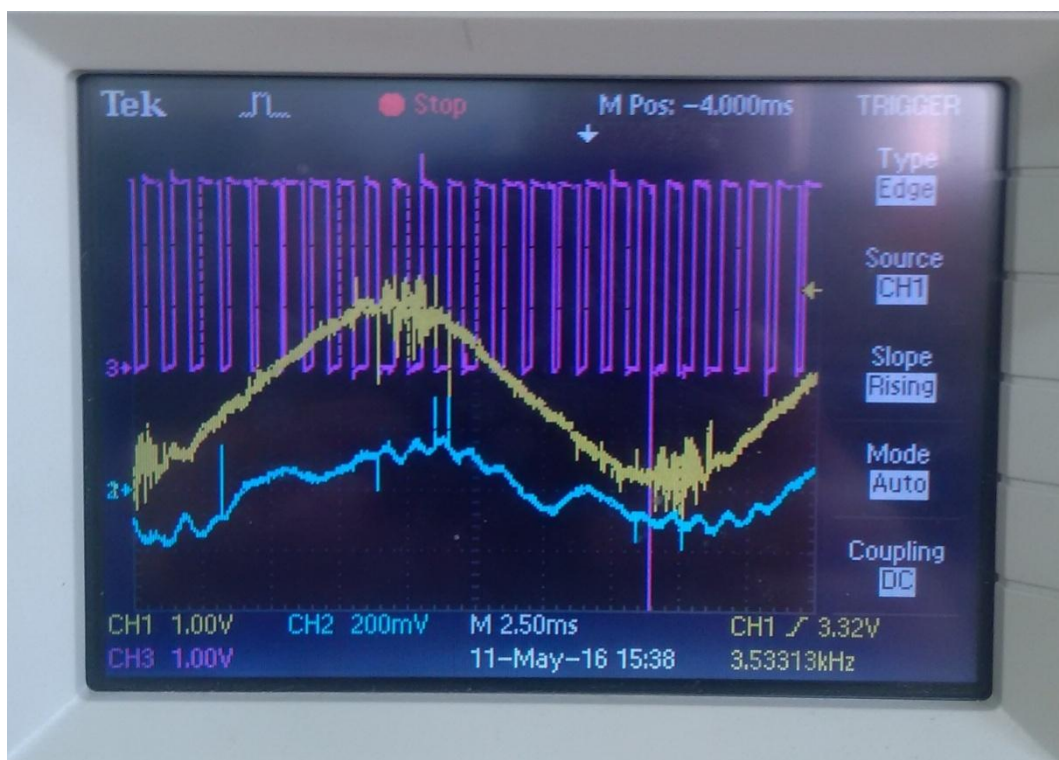
Σχήμα 7.36: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=60$ mH.



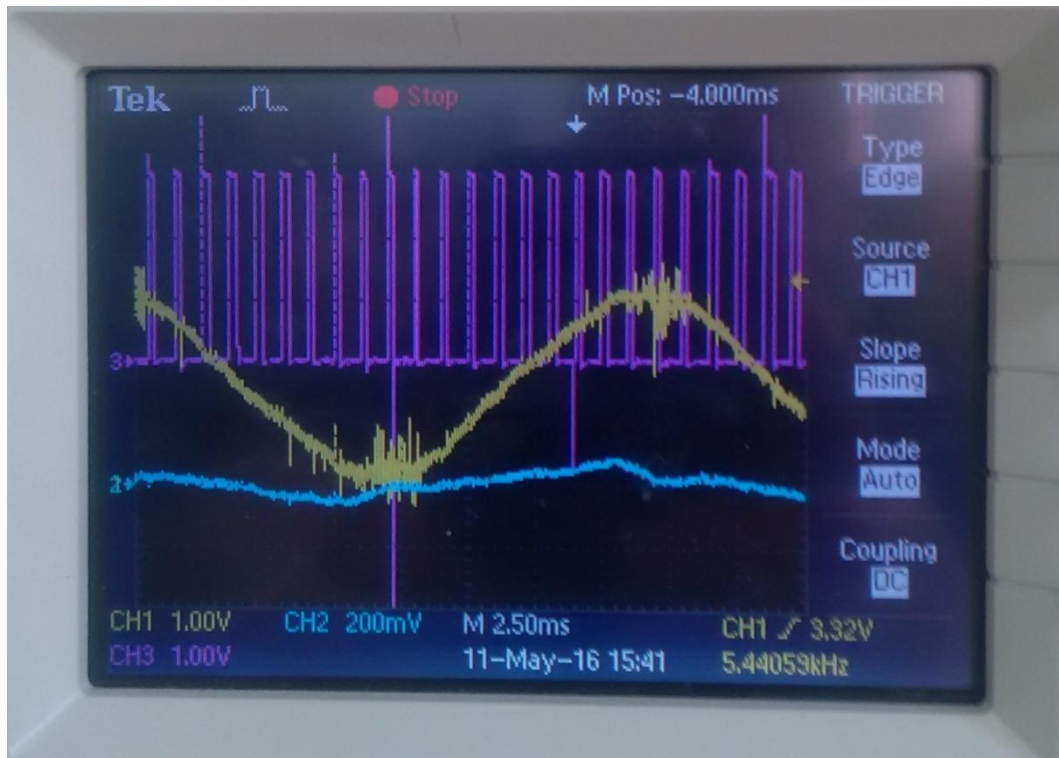
Σχήμα 7.37: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=80$ mH.



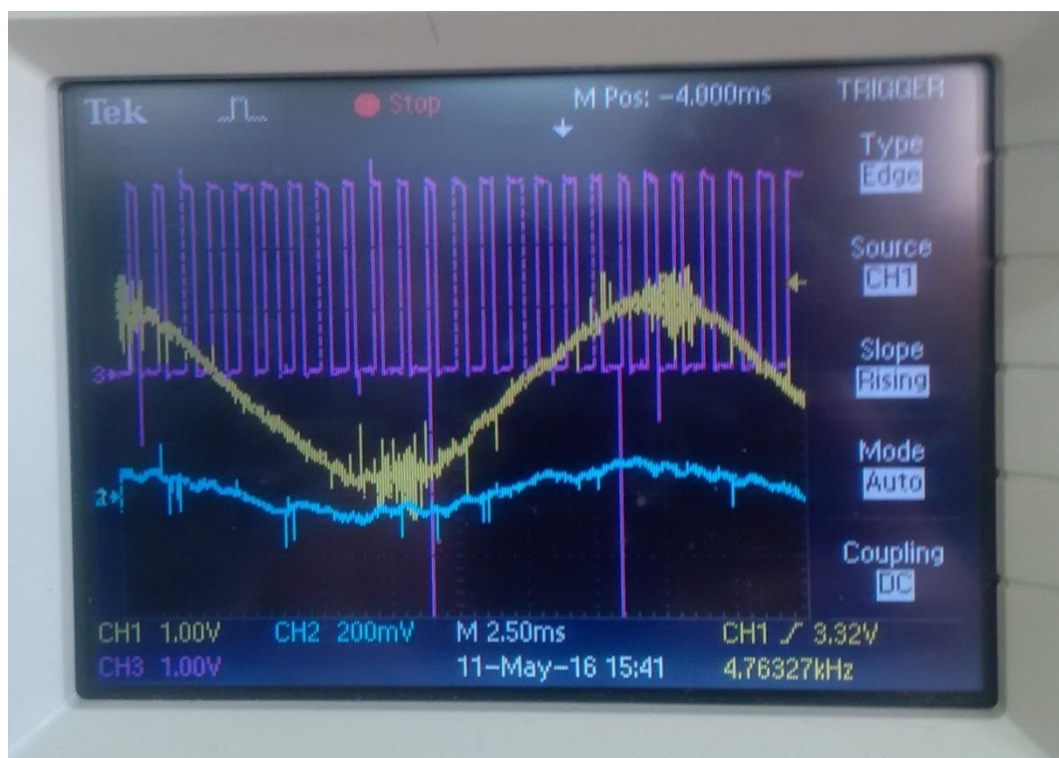
Σχήμα 7.38: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=80$ mH.



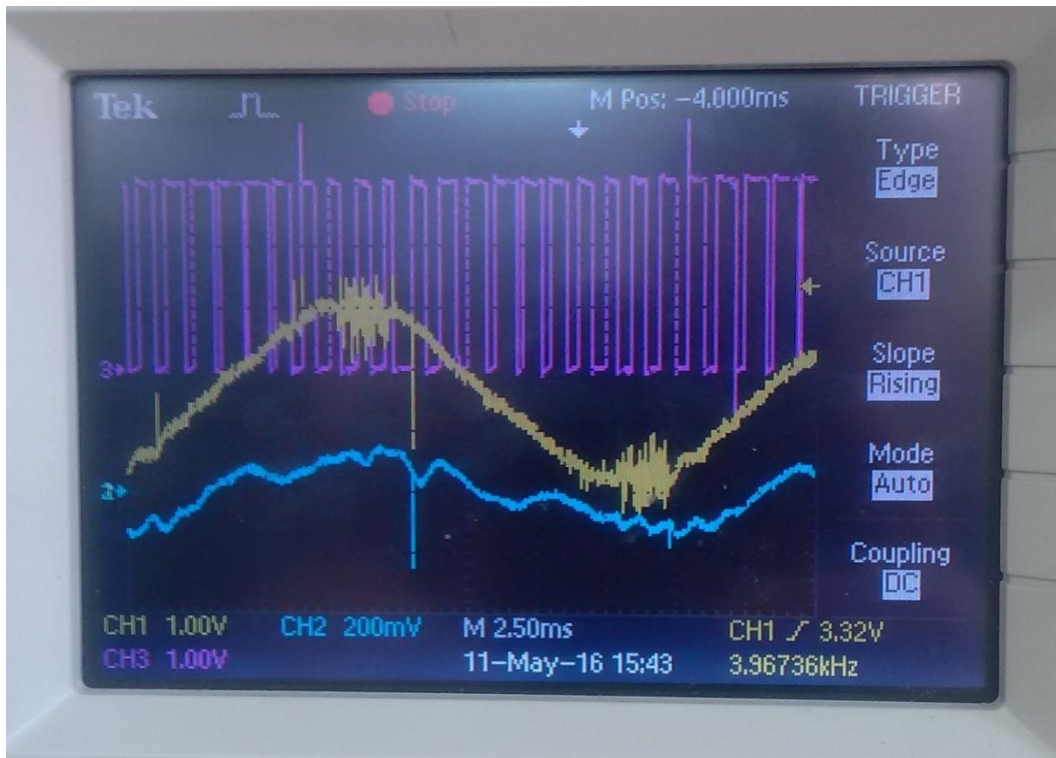
Σχήμα 7.39: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=80$ mH.



Σχήμα 7.40: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=80$ mH.



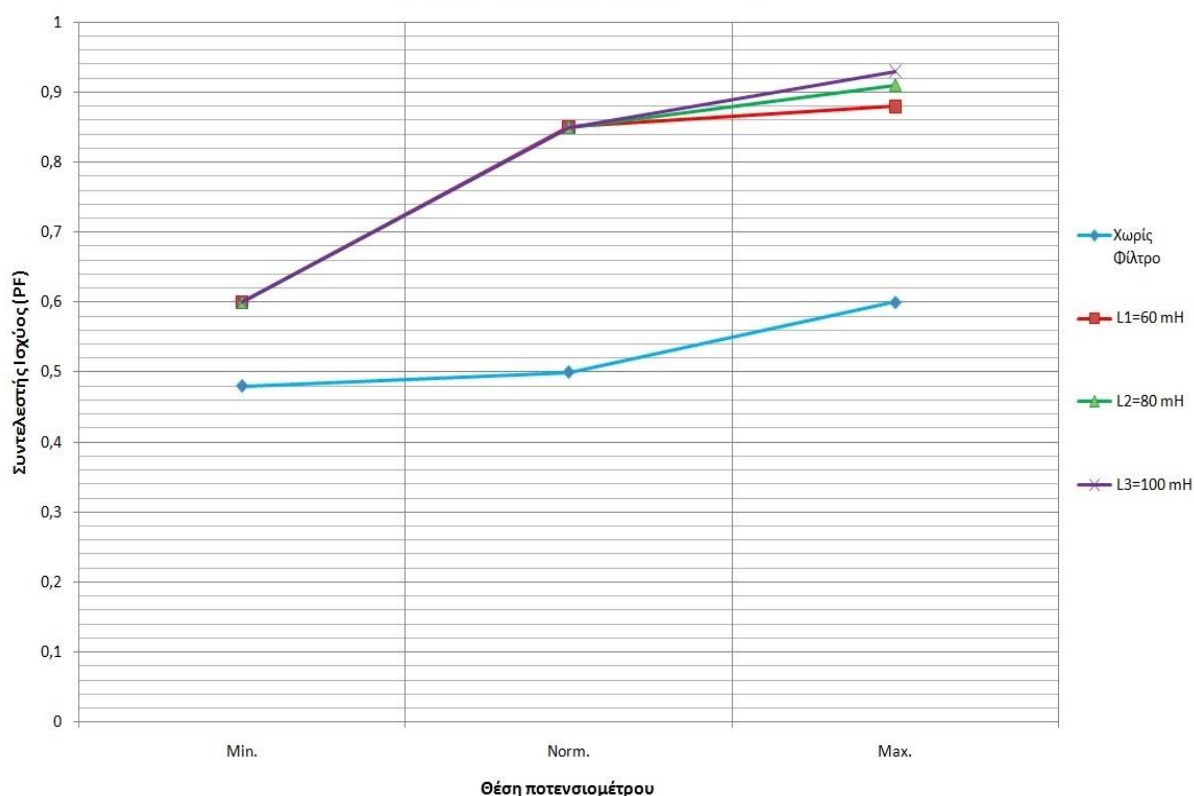
Σχήμα 7.41: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=100$ mH.



Σχήμα 7.42: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle με κινητήρα εν κενώ και επαγωγή φίλτρου $L_1=100$ mH.

Στο σχήμα 7.43 εμφανίζεται η γραφική παράσταση του συντελεστή ισχύος με παράμετρο το Duty Cycle και επιβεβαιώνει τα όσα παρατηρήθηκαν στα παλμογραφήματα προηγουμένως. Η ασυνέχεια του ρεύματος, όταν δεν υπάρχει φίλτρο στην είσοδο, έχει ως αποτέλεσμα έναν πολύ χαμηλό συντελεστή ισχύος, αφού οι ανώτερες αρμονικές του ρεύματος είναι πολλές και έχουν υψηλές τιμές. Αντίθετα, η παρουσία του φίλτρου αποκόβει ένα μεγάλο μέρος αυτών και ο PF λαμβάνει υψηλές τιμές. Μάλιστα, η μέγιστη τιμή του PF χωρίς το φίλτρο είναι και η ελάχιστη για τον PF με το φίλτρο, γεγονός που αποτελεί δείγμα της αναγκαιότητας του φίλτρου, αλλά και της επιτυχημένης κατασκευής του.

Μετρήσεις για κινητήρα εν κενώ



Σχήμα 7.43: Γραφική παράσταση PF για κινητήρα εν κενώ και διαφορετικές τιμές επαγωγής φίλτρου μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

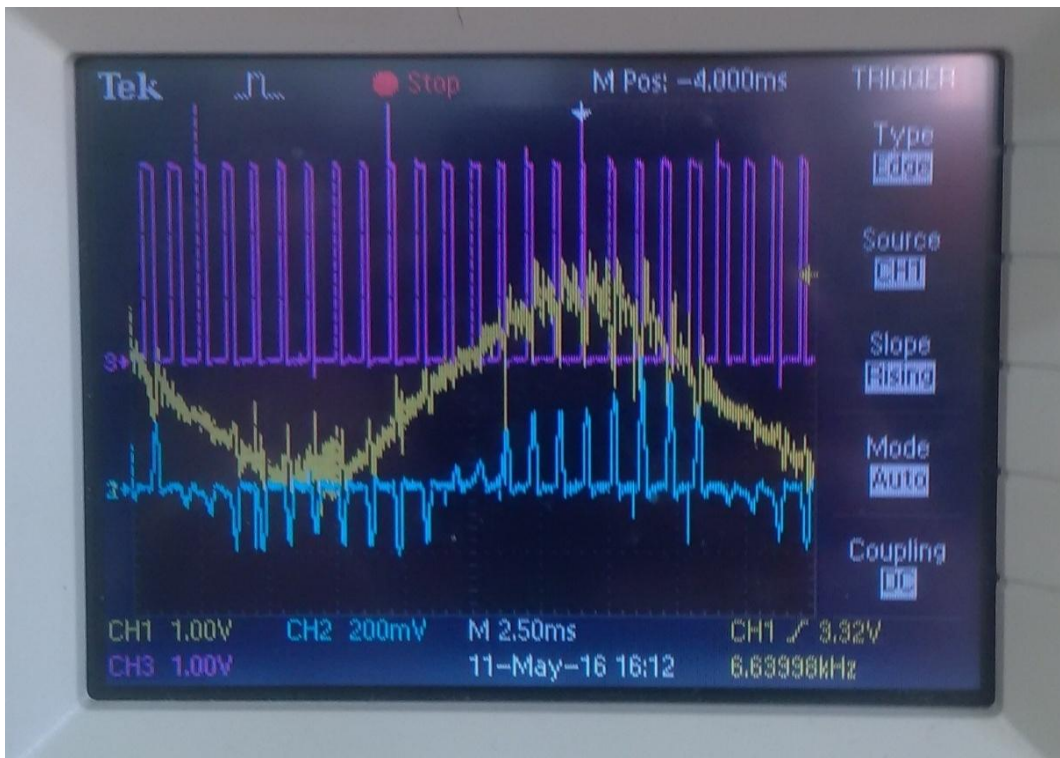
7.2.2.2. Κινητήρας με φορτίο

Τιμή Φίλτρου	Θέση Ποτεν.	Πηγή (δίκτυο)				Φορτίο Μετατροπέα (κινητήρας)		Φορτίο γεννήτριας (R= 100 Ω)	
		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)
Χωρίς Φίλτρο	Min.	233	0,6	0,48	67	50,3	1,3	45,4	0,26
	Norm.	230	1	0,49	115	76	1,65	70,6	0,41
	Max.	221	1,7	0,63	300	134	2,3	129,8	0,78
L ₁ =60 mH	Min.	234	0,4	0,67	69	58,5	1,45	52	0,3
	Norm.	230	0,75	0,88	145	96	1,9	88	0,52
	Max.	216	2	0,87	370	167	2,6	160	0,97
L ₂ =80 mH	Min.	234	0,37	0,68	60	59	1,4	52,7	0,3
	Norm.	230	0,75	0,9	143	96,3	1,9	88,5	0,53
	Max.	217	1,9	0,88	350	165,2	2,54	158	0,95

L₃=100 mH		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)	U (V)	I (A)
	Min.	233	0,38	0,68	66	59,4	1,48	53,5	0,3
	Norm.	230	0,75	0,91	149	96,1	1,92	89,1	0,53
	Max.	217	1,87	0,89	345	161,3	2,5	153	0,92

Πίνακας 4: Η τάση, το ρεύμα, ο συντελεστής ισχύος και η ενεργός ισχύς από την πλευρά του δικτύου και η τάση και το ρεύμα φορτίου, για κινητήρα με φορτίο, χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών και για φίλτρο με σταθερό πυκνωτή C=2,35 μ F και τιμή επαγωγής L₁=60 mH, L₂=80 mH, L₃=100 mH στην είσοδο του μετατροπέα.

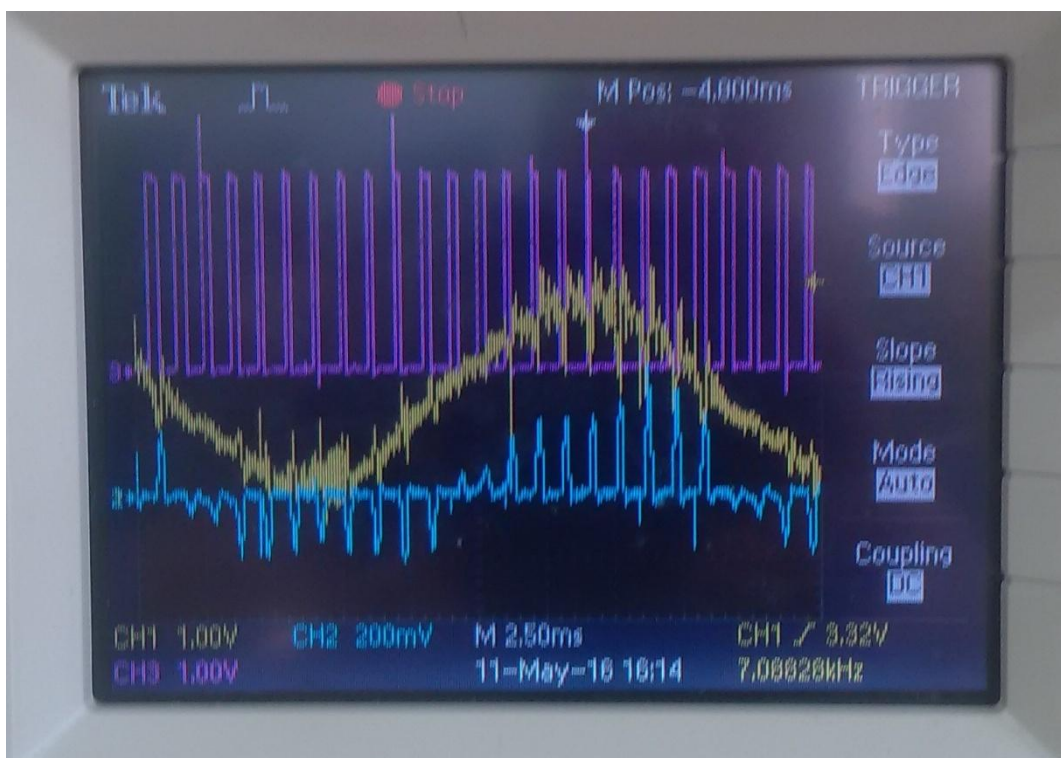
Ομοίως, με τις μετρήσεις του κινητήρα εν κενώ, η απουσία του φίλτρου στην είσοδο προκαλεί ασυνέχεια στην κυματομορφή του ρεύματος. Επίσης, εντοπίζεται ξανά η μετατόπιση της βασικής αρμονικής του ρεύματος ως προς την τάση, λόγω των επαγωγών του κινητήρα. Αυτή η μετατόπιση αυξάνει τις ανώτερες αρμονικές του ρεύματος με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του PF. Επιπρόσθετα, η κυμάτωση των κυματομορφών που εμφανιζόταν στα παλμογραφήματα του κινητήρα εν κενώ, εμφανίζεται και στα παρακάτω παλμογραφήματα, αλλά σε πιο έντονο βαθμό. Η κυμάτωση αυτή οφείλεται στην ταλάντωση του ρεύματος μεταξύ της επαγωγής και του πυκνωτή του φίλτρου με συχνότητα μικρότερη από τη συχνότητα των παλμών. Παράλληλα, η ταλάντωση του ρεύματος προκαλεί παρόμοια κυμάτωση και στην τάση λόγω του τροφοδοτικού στην είσοδο του μετατροπέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενεργούς ισχύος και από τις αρμονικές που εμφανίζονται στην τάση και το ρεύμα, γεγονός που δρα θετικά στον PF αυξάνοντάς τον.



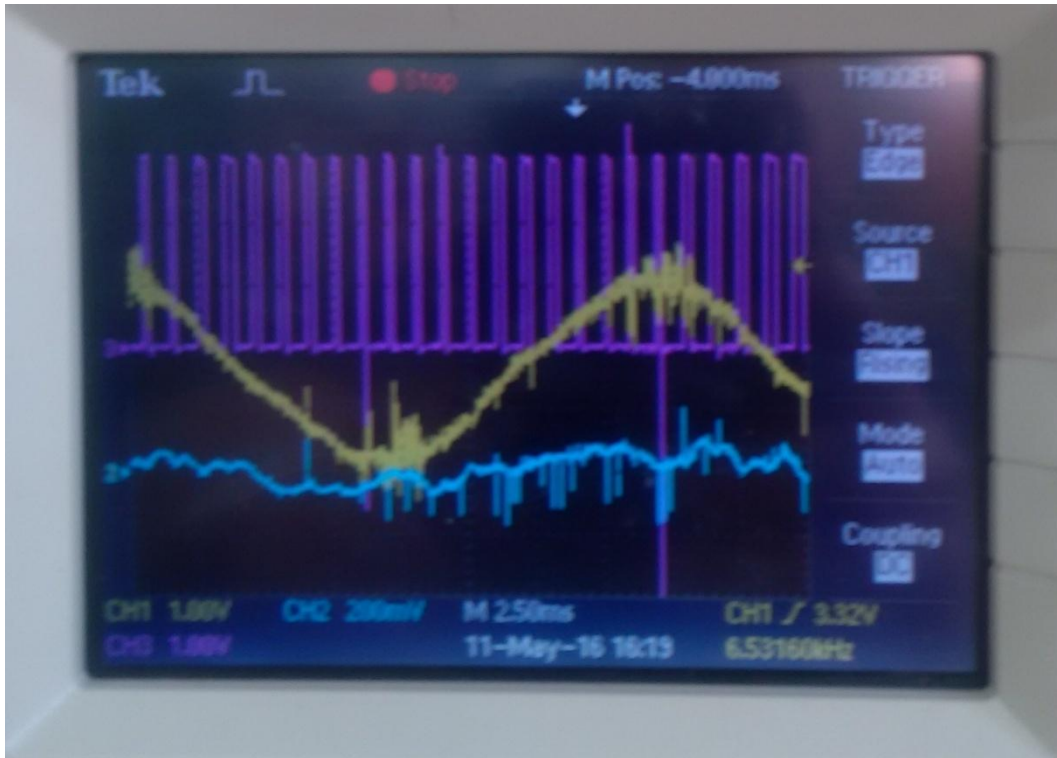
Σχήμα 7.44: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών.



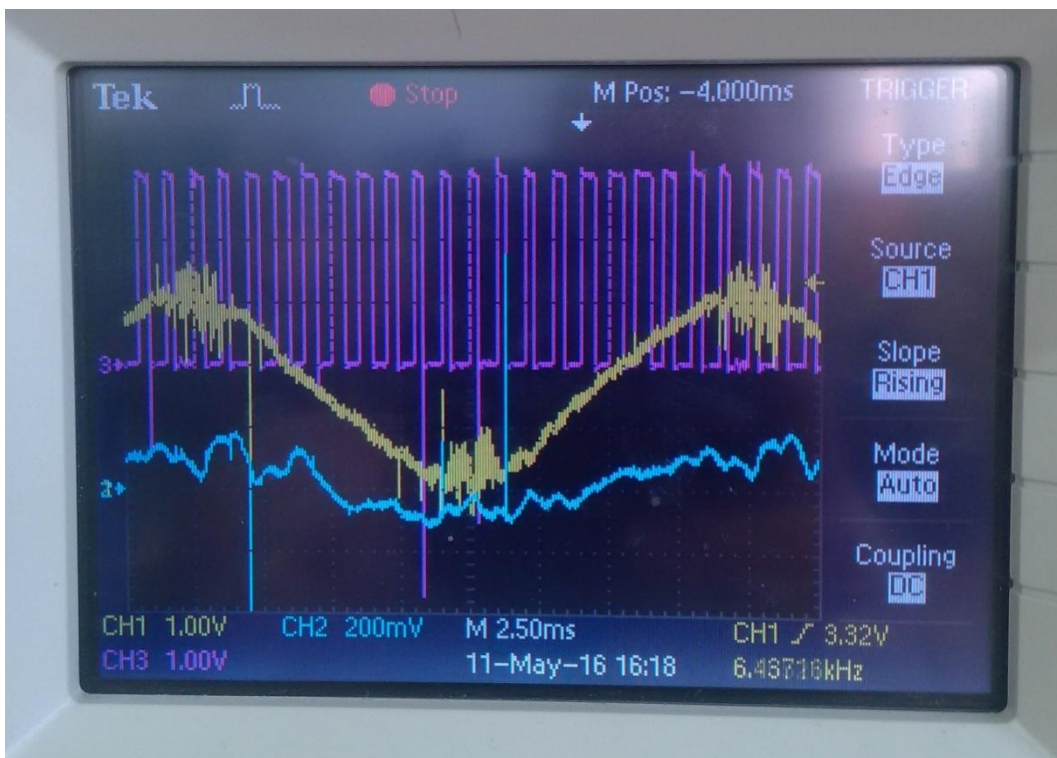
Σχήμα 7.45: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών.



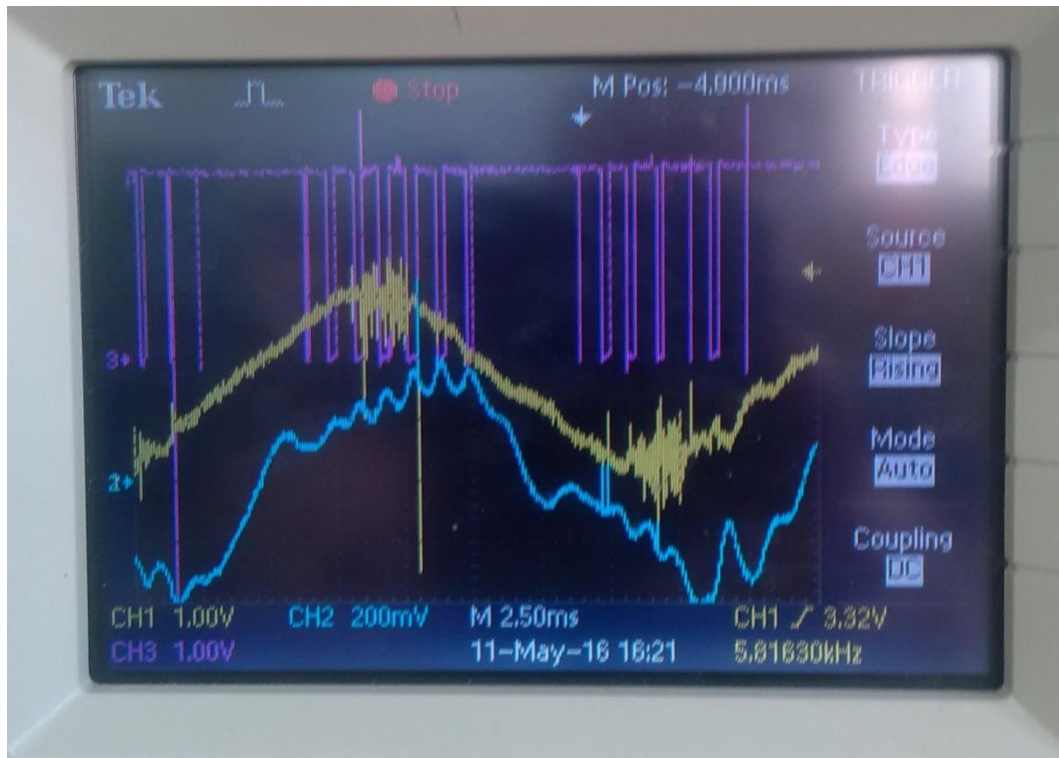
Σχήμα 7.46: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και χωρίς φίλτρο μείωσης αρμονικών.



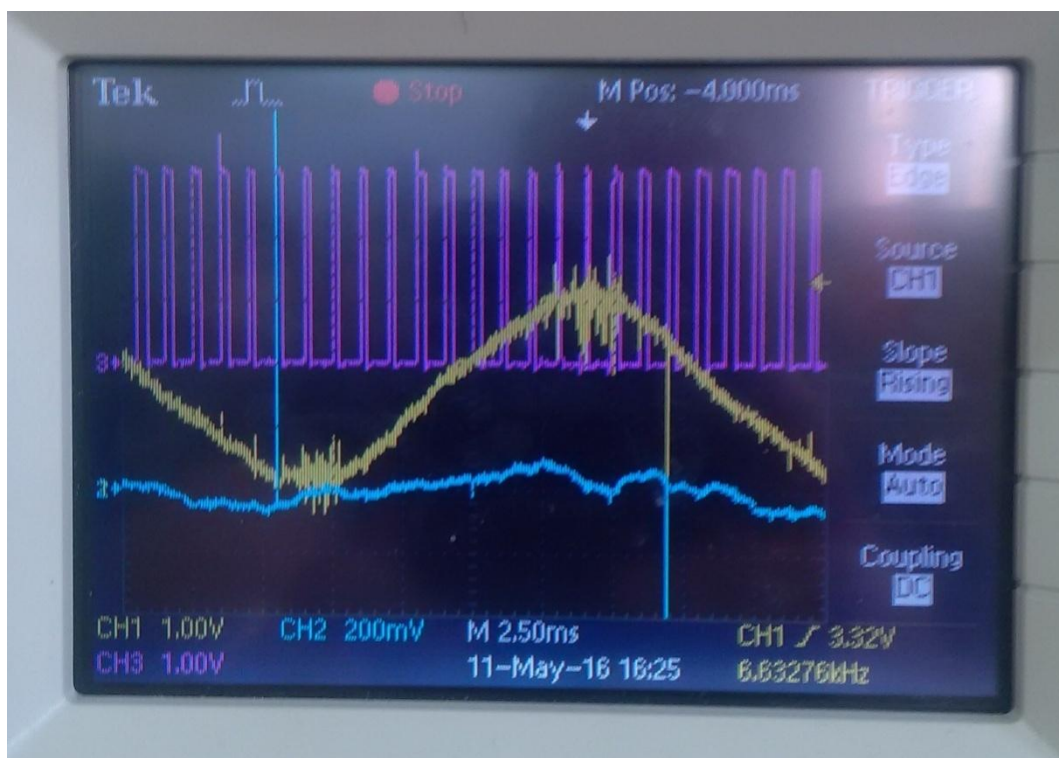
Σχήμα 7.47: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_1=60$ mH.



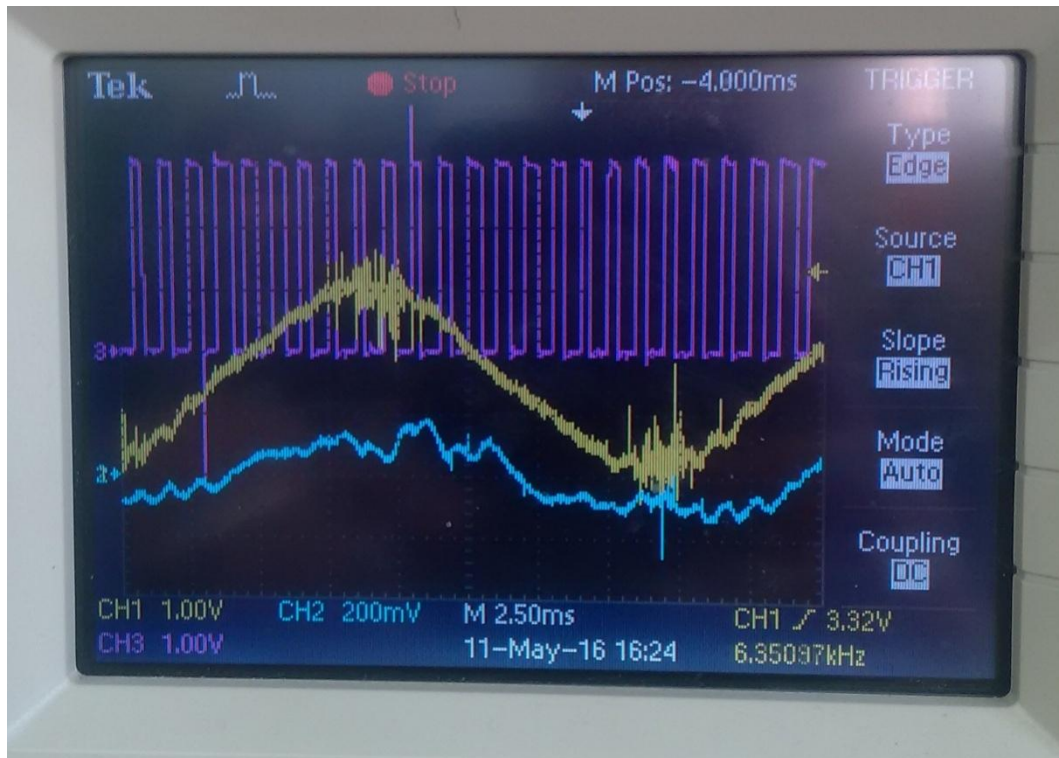
Σχήμα 7.48: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_1=60$ mH.



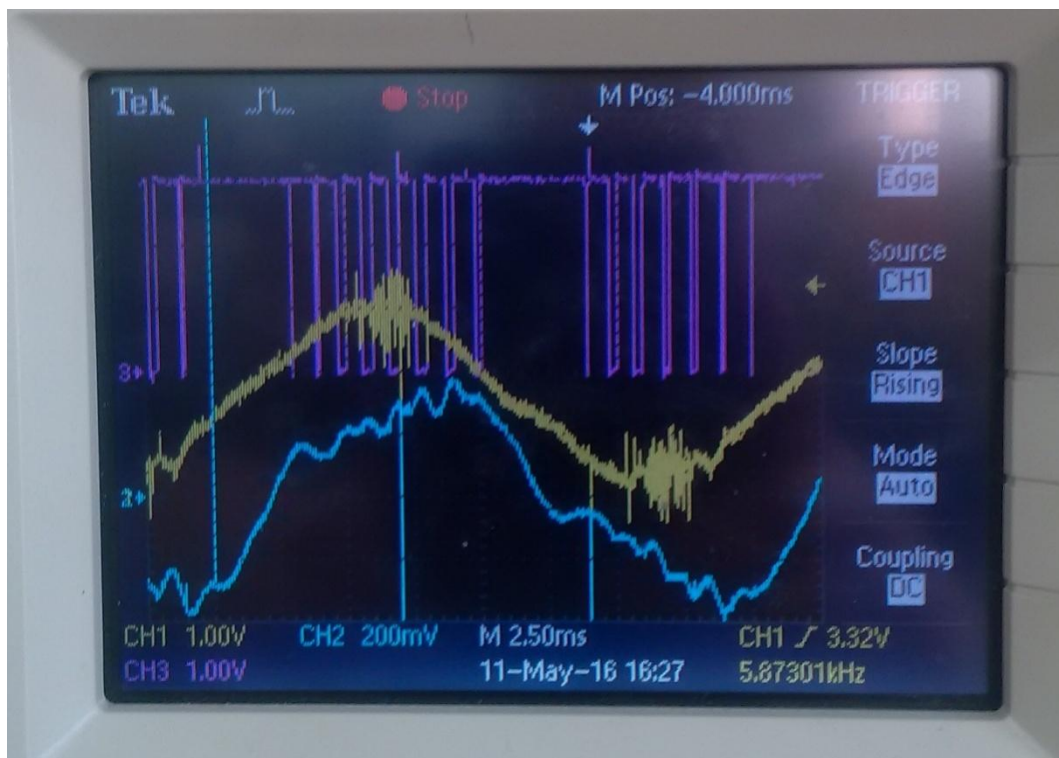
Σχήμα 7.49: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_1=60$ mH.



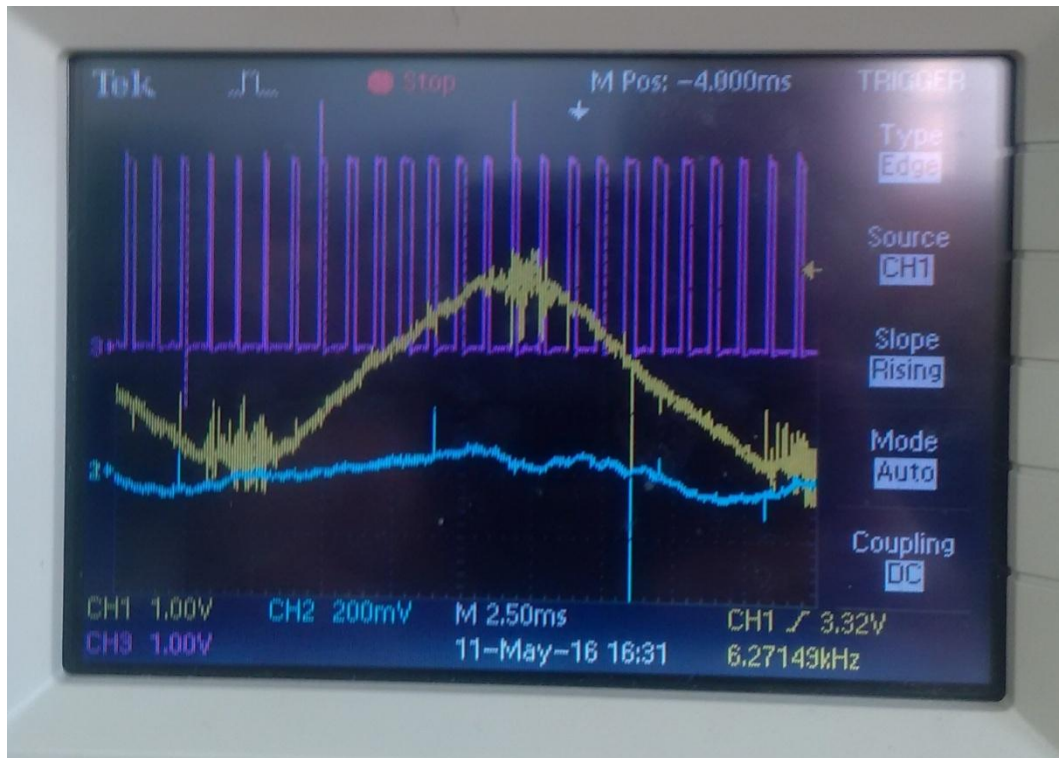
Σχήμα 7.50: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_2=80$ mH.



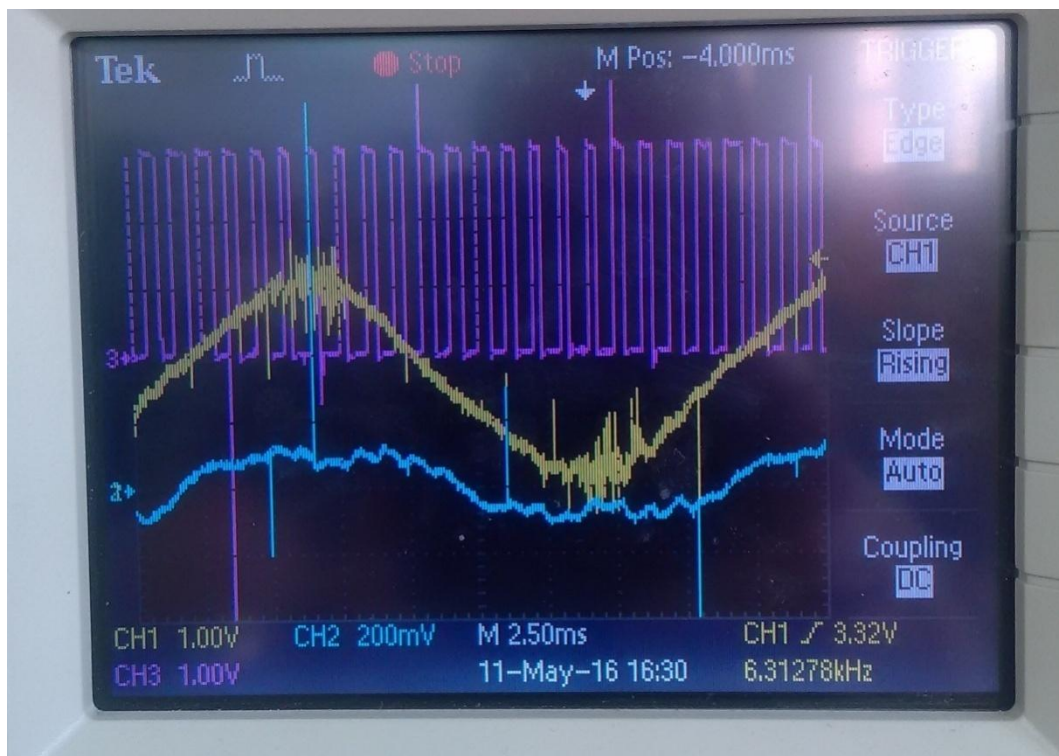
Σχήμα 7.51: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_2=80$ mH.



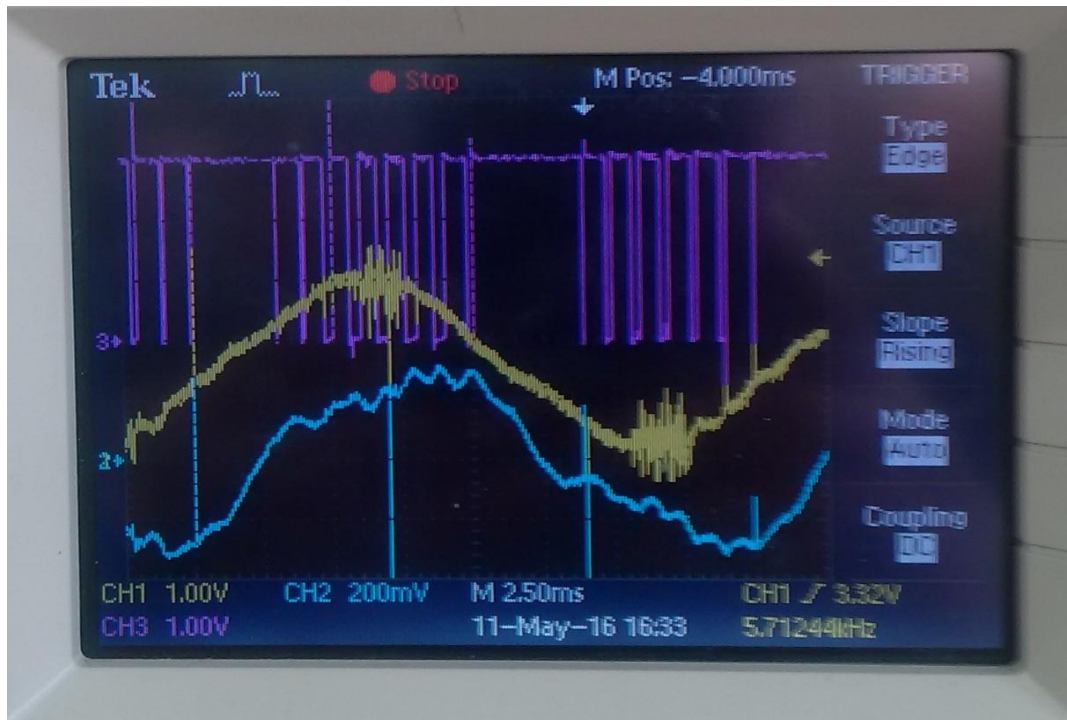
Σχήμα 7.52: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_2=80$ mH.



Σχήμα 7.53: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_3=100$ mH.

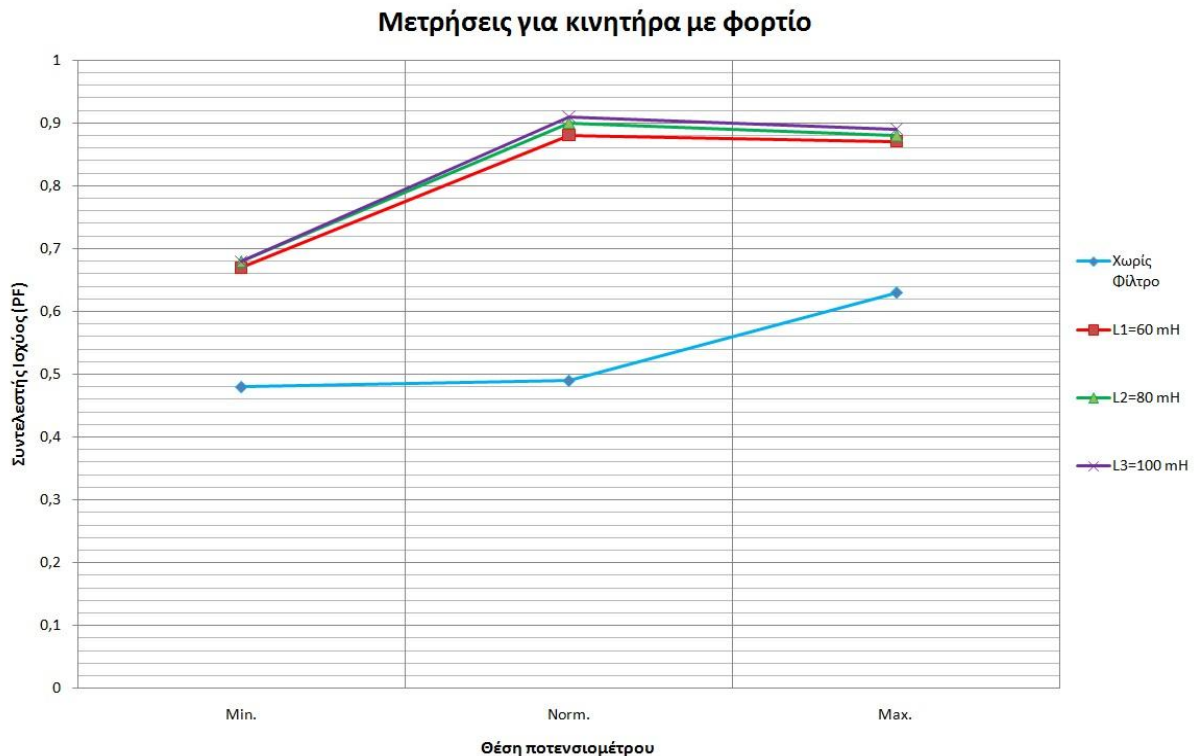


Σχήμα 7.54: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_3=100$ mH.



Σχήμα 7.55: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_3=100$ mH.

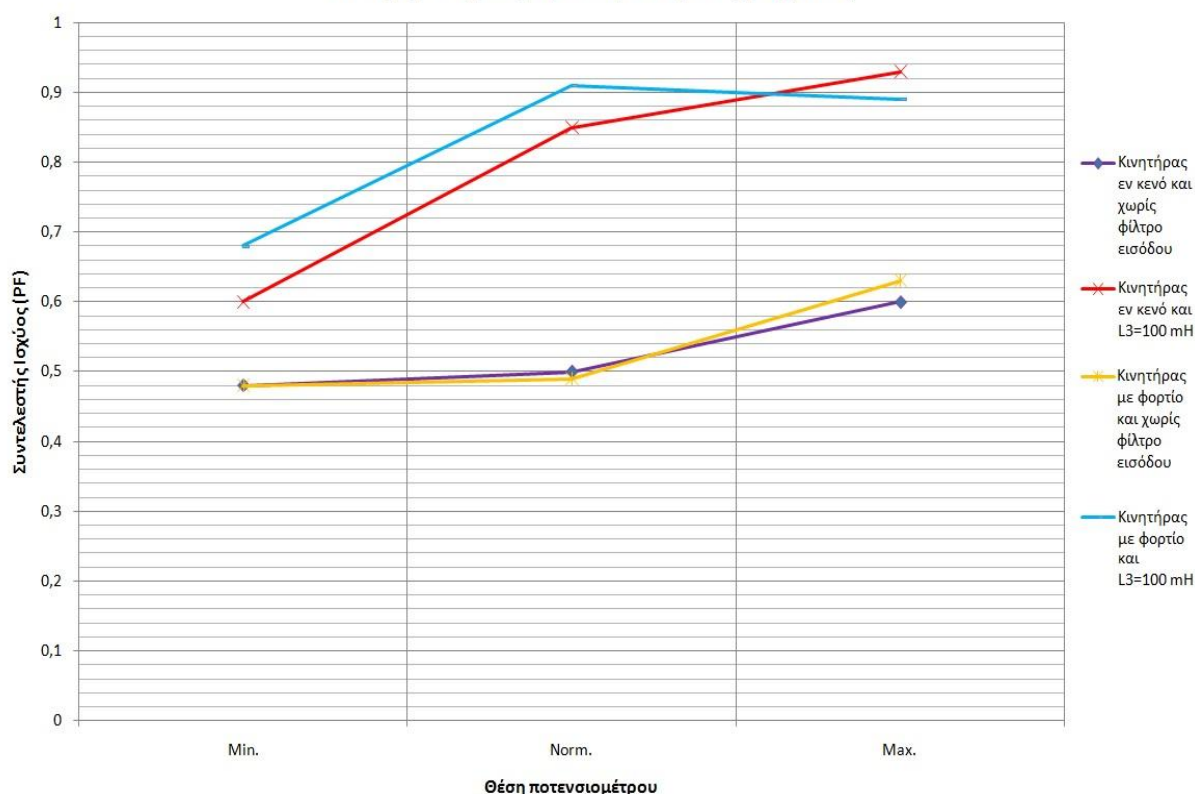
Με τη σύγκριση του συντελεστή ισχύος ποσοτικά, όπως αυτός εμφανίζεται στον Πίνακα 4 (σχ. 7.56), προκύπτει πως η αύξηση της τιμής στην επαγωγή του φίλτρου προκαλεί αύξηση του PF, όπως ακριβώς και στις περιπτώσεις των παθητικών φορτίων (R, R-L) και του κινητήρα χωρίς φορτίο.



Σχήμα 7.56: Γραφική παράσταση PF για κινητήρα με φορτίο και διαφορετικές τιμές επαγωγής φίλτρου μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και χρησιμοποιήσαν ως φορτίο στον μετατροπέα ηλεκτρική μηχανή, οδήγησαν στα παρακάτω συμπεράσματα. Αρχικά, όπως και στις μετρήσεις με τα παθητικά φορτία, η απουσία του φίλτρου στην είσοδο του μετατροπέα επιτρέπει την ασυνέχεια του ρεύματος με τις περιοχές κενού που εμφανίζει η κυματομορφή του. Αυτός είναι και ο λόγος που ο συντελεστής ισχύος σε όλες τις μετρήσεις χωρίς φίλτρο είναι εξαιρετικά χαμηλός. Επίσης, στη μείωση του συντελεστή ισχύος συμβάλλει και η μετατόπιση της βασικής αρμονικής του ρεύματος, αναφορικά με την τάση του δικτύου, που προκαλεί το φορτίο στην έξοδο, όταν είναι επαγωγικού χαρακτήρα, όπως είναι οι ηλεκτρικές μηχανές. Αντίθετα, οι ανώτερες αρμονικές της τάσης λόγω του ρεύματος, παράγουν ενεργό ισχύ και συμβάλλουν στην αύξηση του PF συγκριτικά με την περίπτωση ιδανικού δικτύου. Αυτά προκύπτουν από την παρατήρηση και συσχέτιση των παλμογραφημάτων που παρουσιάστηκαν μέχρι το σημείο αυτό. Τέλος, αξιολογώντας τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι οι τιμές που λαμβάνει ο PF με φίλτρο μείωσης αρμονικών είναι ως και 93% και είναι αρκετά υψηλές, αν λάβουμε υπόψη τη χαμηλή διακοπτική συχνότητα παλμών που μπορεί να παραγάγει ο επεξεργαστής της εργασίας. Η επιλογή του επεξεργαστή έγινε με βάση το χαμηλό κόστος.

Μετρήσεις με φορτίο ηλεκτρικές μηχανές

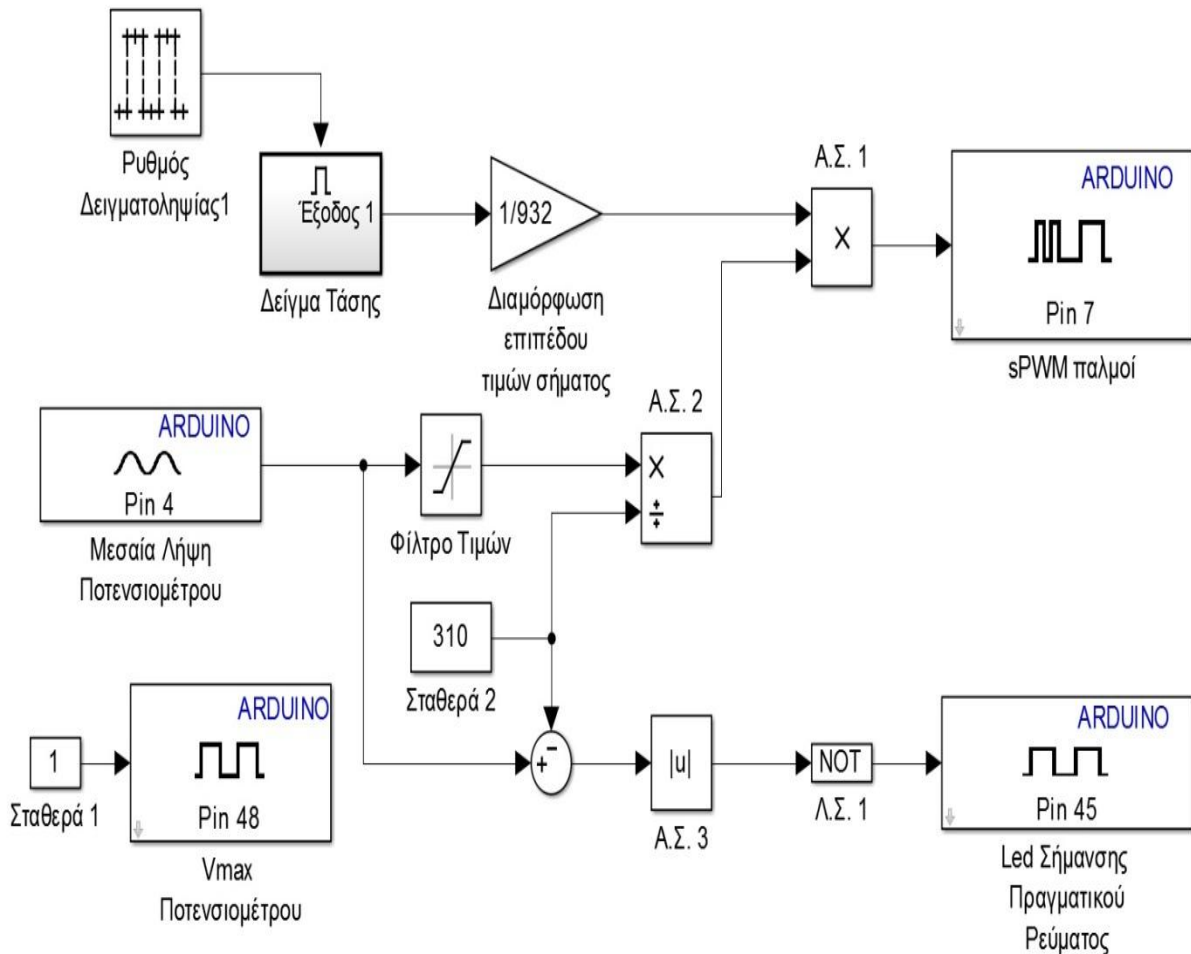


Σχήμα 7.57: Γραφική παράσταση PF για κινητήρα εν κενώ και για κινητήρα με φορτίο.

7.3. Μετρήσεις με τεχνική παλμοδότησης sPWM

Για την αξιολόγηση της χρησιμοποιούμενης μεθόδου παλμοδότησης υλοποιήθηκε και δεύτερη τεχνική παλμοδότησης (σχ. 7.56). Συγκεκριμένα, η παλμοδότηση του IGBT έγινε με τη μέθοδο sPWM. Αυτή η μέθοδος επιλέχθηκε, διότι είναι μια από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες του εμπορίου. Το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε είναι αρκετά απλό και βασίστηκε στη δυνατότητα των PWM εξόδων του Arduino Due, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν παλμούς συχνότητας 1kHz. Συνεπώς, έπειτα από τη δειγματοληψία της τάσης εισόδου μέσω του αισθητήρα, το επίπεδο της τάσης διαμορφώνεται στα επίπεδα που απαιτούν οι PWM έξοδοι του Arduino (0-255) και οδηγείται σε μία PWM έξοδο για να λάβει συχνότητα 1kHz. Αναλυτικότερα, στο υποσύστημα «Δείγμα Τάσης» το εισερχόμενο σήμα της τάσης του δικτύου μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα (0-1023) μέσω του A/D. Ύστερα αφαιρείται από αυτό η DC συνιστώσα και το σήμα ανορθώνεται. Έπειτα, με την έξοδο του από το υποσύστημα, πολλαπλασιάζεται με ένα κέρδος, ώστε το επίπεδο τιμών του σήματος να είναι εντός των οριακών τιμών (0-255 bits) που απαιτούν οι PWM έξοδοι. Παράλληλα, χρησιμοποιείται ένα ποτενσιόμετρο για να μεταβάλλει τον λόγο κατάτμησης της παραγόμενης παλμοσειράς. Η τροφοδοσία του ποτενσιόμετρου γίνεται με τη χρήση μιας ψηφιακής εξόδου του μικροελεγκτή (pin 48), ενώ η μεσαία λήψη του επιστρέφει στον Arduino μέσα από μια αναλογική είσοδο. Ένα φίλτρο τιμών διαμορφώνει τις τιμές, ώστε ο λόγος κατάτμησης να πολλαπλασιάζεται με τιμές από 0,5 έως 1,5. Ανάλογα με την τιμή που λαμβάνει η PWM έξοδος διαμορφώνει και τον παλμό (σχ. 7.58). Η διακοπτική συχνότητα είναι η ίδια με αυτή του προγράμματος των προηγούμενων μετρήσεων. Στις παρακάτω μετρήσεις ο μετατροπέας τροφοδοτεί έναν κινητήρα εν κενώ και στη συνέχεια τον ίδιο

κινητήρα με φορτίο στον άξονά του. Και οι δύο μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την παρουσία φίλτρου μείωσης ανώτερων αρμονικών στην είσοδο και συγκεκριμένα τα στοιχεία του φίλτρου είχαν τιμές $L_2=80$ mH για την επαγωγή και $C=2,35$ μ F για τον πυκνωτή.



Σχήμα 7.58: Πρόγραμμα υλοποίησης παλμών με την τεχνική παλμοδότησης sPWM.

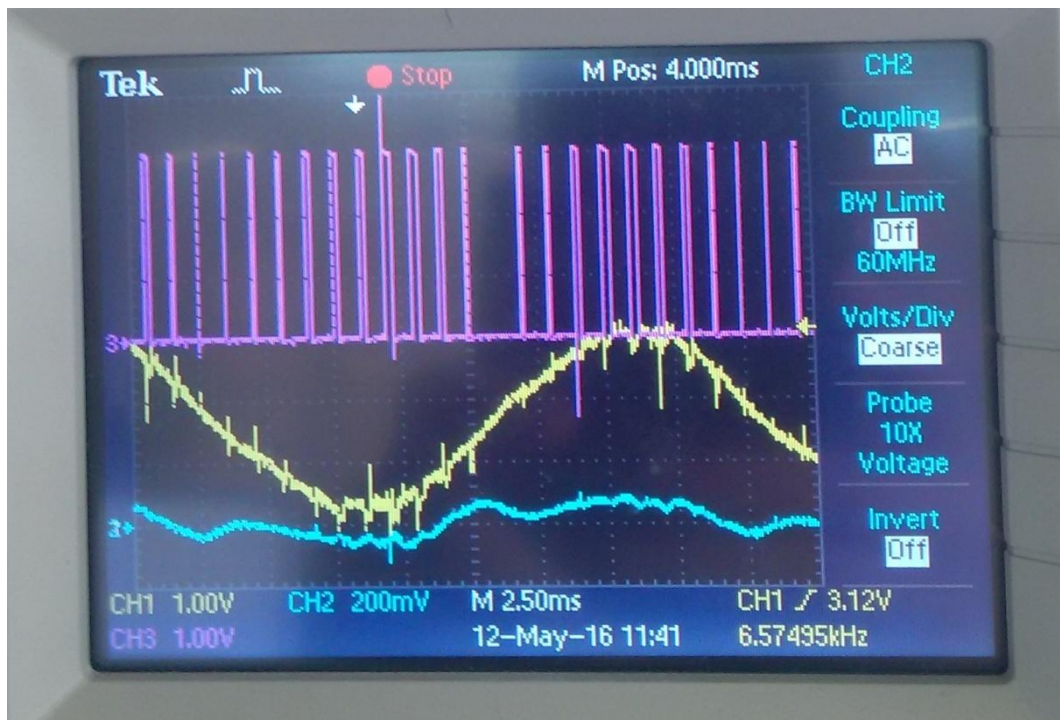
7.3.1. Κινητήρας εν κενώ

Φίλτρο $L_2=80$ mH	Θέση Ποτενσιόμετρου	Πηγή (δίκτυο)				Φορτίο (κινητήρας)	
		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)
	Min.	233	0,34	0,69	52	76,5	0,75
	Norm.	230	0,57	0,8	95	117,8	0,9
	Max.	228	0,83	0,83	143	169,8	0,95

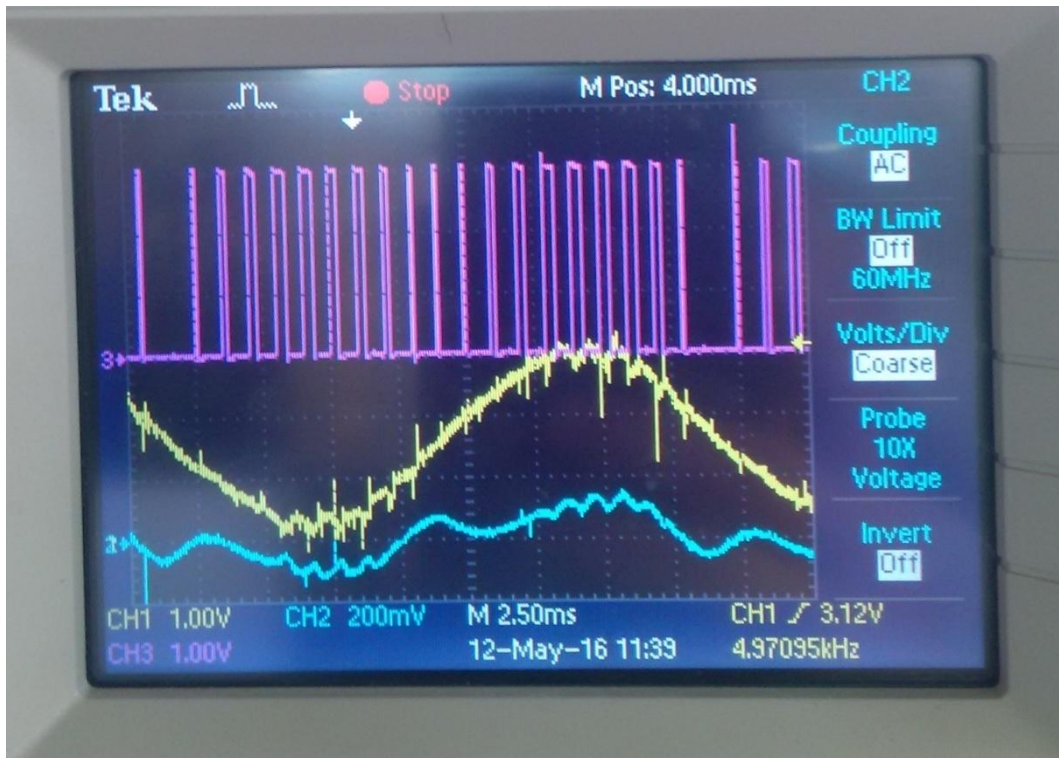
Πίνακας 5: Η τάση, το ρεύμα, ο συντελεστής ισχύος και η ενεργός ισχύς από την πλευρά του δικτύου και η τάση και το ρεύμα φορτίου, για κινητήρα εν κενώ, με sPWM τεχνική παλμοδότησης και για φίλτρο με επαγωγή $L_2=80$ mH και πυκνωτή $C=2,35$ μ F στην είσοδο του μετατροπέα.

Στα παλμογραφήματα που ακολουθούν παρατηρούνται κάποια φαινόμενα που είχαν εντοπιστεί και στα παλμογραφήματα των προηγούμενων μετρήσεων. Συγκεκριμένα, η

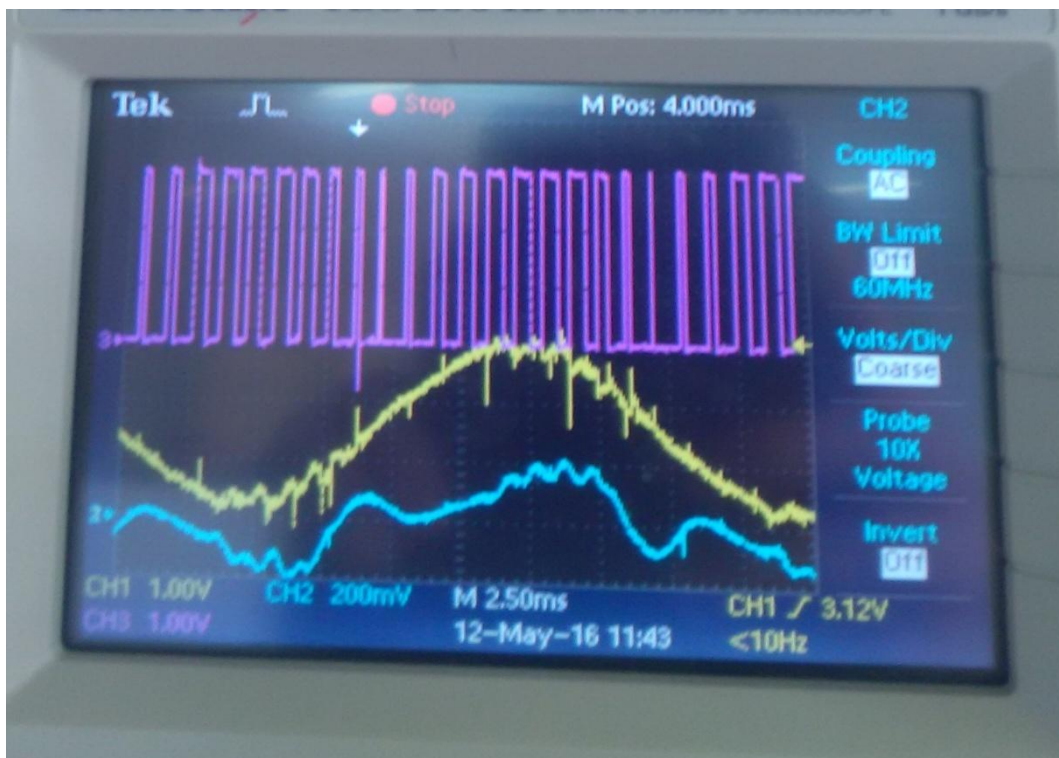
κυματομορφή του ρεύματος εμφανίζει κυμάτωση, η οποία οφείλεται στην ταλάντωση του ρεύματος μεταξύ της επαγωγής και του πυκνωτή, με μικρότερη συχνότητα από αυτή των παλμών. Επίσης, κυμάτωση παρουσιάζεται και στην κυματομορφή της τάσης λόγω του μη ιδανικού εναλλασσόμενου τροφοδοτικού στην είσοδο του μετατροπέα που επιτρέπει στις μεταβολές του ρεύματος να επηρεάζουν την τάση. Βέβαια, οι αρμονικές της τάσης στη μέτρηση αυτή είναι σαφώς λιγότερες, συγκριτικά με την τεχνική HCC-sPWM για το ίδιο φορτίο, αφού η κυμάτωση είναι αρκετά μικρότερη. Αυτό έχει ως συνέπεια την παραγωγή λιγότερης ενεργούς ισχύος από τις ανώτερες αρμονικές και εν συνεχεία τη μείωση του PF, συγκριτικά με την αρχική τεχνική παλμοδότησης των προηγούμενων μετρήσεων. Στη μείωση του PF συμβάλλει και η μετατόπιση της βασικής αρμονικής του ρεύματος ως προς την τάση, αφού ούτε σε αυτή την τεχνική γίνεται κάποια ενέργεια σχετικά με τη μείωση αυτής της μετατόπισης.



Σχήμα 7.59: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle για φορτίο κινητήρα εν κενώ και με επαγωγή φίλτρου $L_2=80$ mH.



Σχήμα 7.60: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle για φορτίο κινητήρα εν κενώ και με επαγωγή φίλτρου $L_2=80$ mH.



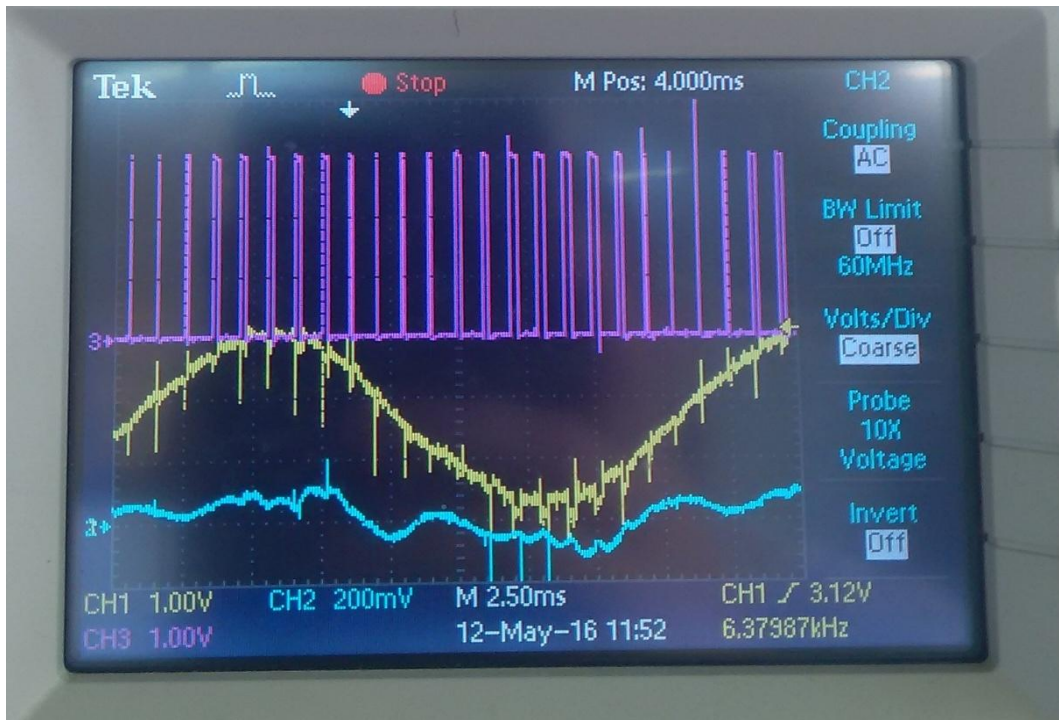
Σχήμα 7.61: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle για φορτίο κινητήρα εν κενώ και με επαγωγή φίλτρου $L_2=80$ mH.

7.3.2. Κινητήρας με φορτίο

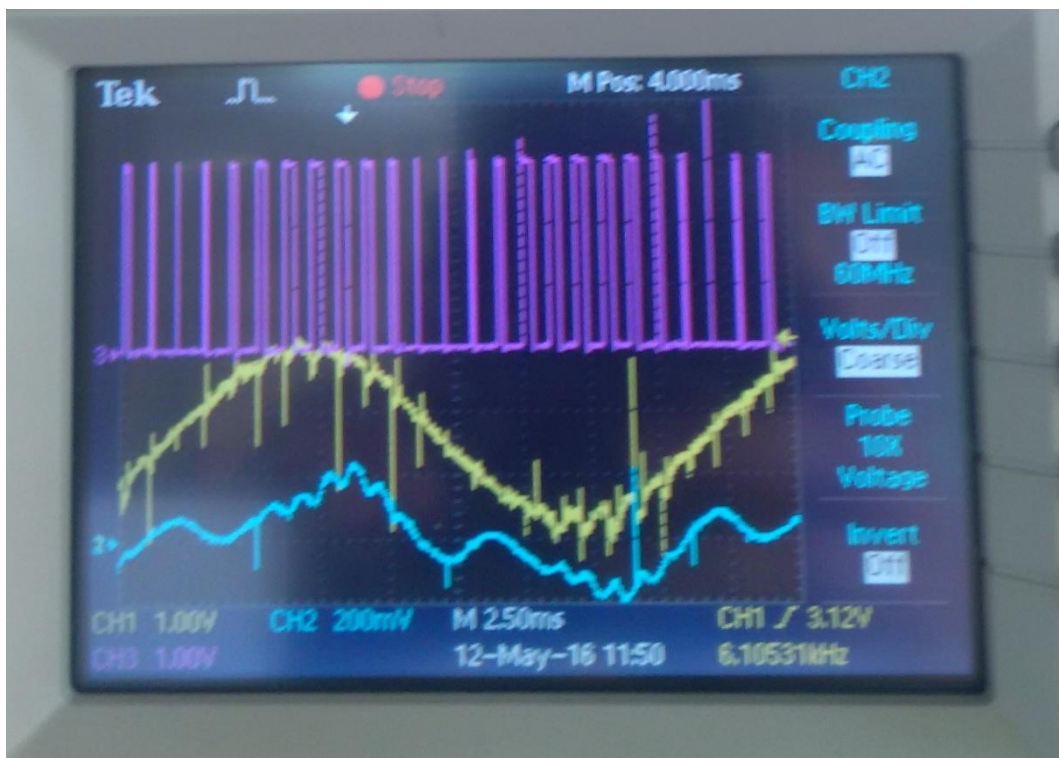
φίλτρο $L_2=80$ mH	Θέση Ποτενσιόμετρου	Πηγή (δίκτυο)				Φορτίο (κινητήρας)	
		U (V)	I (A)	PF	P (W)	U (V)	I (A)
	Min.	233	0,47	0,79	82	62,1	1,37
	Norm.	230	0,88	0,85	151	90,5	1,75
	Max.	218	1,8	0,84	301	138	2,3

Πίνακας 6: Η τάση, το ρεύμα, ο συντελεστής ισχύος και η ενεργός ισχύς από την πλευρά του δικτύου και η τάση και το ρεύμα φορτίου, για κινητήρα με φορτίο, με sPWM τεχνική παλμοδότησης και για φίλτρο με επαγωγή $L_2=80$ mH και πυκνωτή $C=2,35$ μ F στην είσοδο του μετατροπέα.

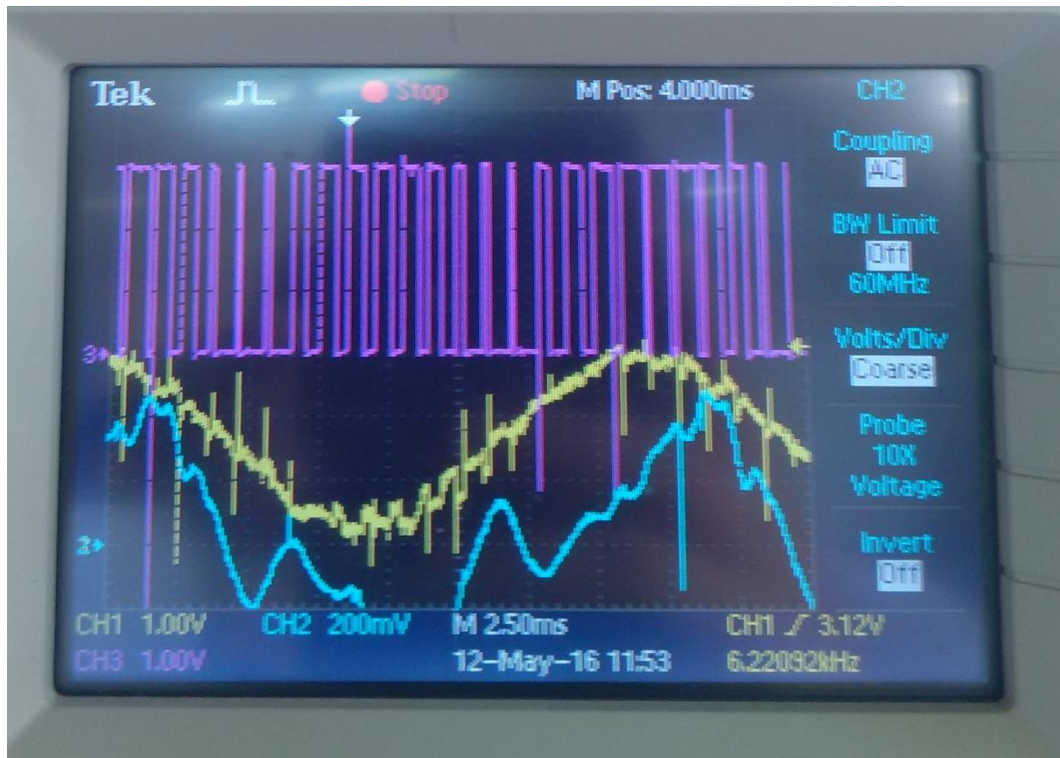
Τα παρακάτω παλμογραφήματα παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με αυτά του κινητήρα εν κενώ σε συνδυασμό με την τεχνική sPWM. Όμως, η διαφορά στην ένταση της κυμάτωσης είναι εμφανής, ειδικά στα παλμογραφήματα με μέγιστο Duty Cycle (σχ. 7.61, 7.64). Αυτή η διαφορά οφείλεται στο φορτίο, αφού ο κινητήρας έχει μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις με φορτίο στον άξονά του. Αυτό σημαίνει και μεγαλύτερη τιμή ρεύματος στο κύκλωμα και μεγαλύτερο ρεύμα που ταλαντεύεται μεταξύ πηνίου και πυκνωτή στο φίλτρο. Άρα, η ενέργεια του φίλτρου είναι υψηλότερη στην περίπτωση αυτή και απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο εκτόνωσης, γεγονός που δημιουργεί την πιο έντονη κυμάτωση. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, με άλλο επεξεργαστή το πρόβλημα αυτό θα μειωνόταν στο ελάχιστο, καθώς θα μπορούσε να αυξηθεί η διακοπτική συχνότητα και έτσι και η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου ανώτερων αρμονικών. Για μια ακόμη φορά πρέπει να σημειωθεί ότι η αυξημένη κυμάτωση του ρεύματος σε συνδυασμό με τις αρμονικές της τάσης συνήθως επιφέρουν βελτίωση στον συντελεστή ισχύος. Αντίθετα, η εμφάνιση περισσότερων ανώτερων αρμονικών στο ρεύμα προκαλεί μείωση του PF. Συνεπώς, για να εντοπιστεί αν η κυμάτωση αυτή ωφελεί ή επιβαρύνει το συντελεστή ισχύος πρέπει να γίνει ανάλυση αρμονικών και μια διαδικασία περαιτέρω εξέτασης χωρίς τροφοδοτικό στην είσοδο. Αυτό δεν έγινε για λόγους ασφαλείας καθώς από την έλλειψη απομόνωσης στην είσοδο ελλοχεύουν κίνδυνοι.



Σχήμα 7.62: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ελάχιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_1=80$ mH.

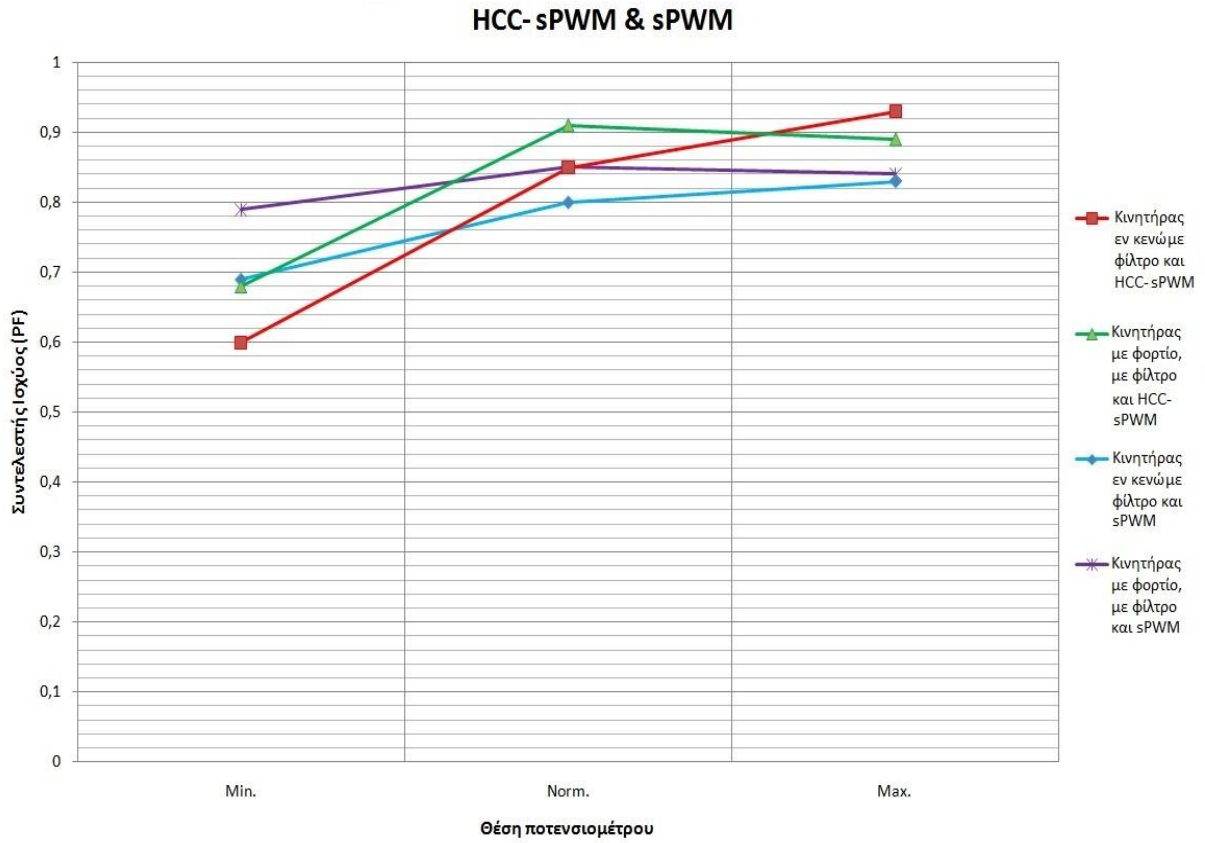


Σχήμα 7.63: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για ενδιάμεση τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_1=80$ mH.



Σχήμα 7.64: Έξοδος αισθητήρα τάσης (κίτρινο), έξοδος αισθητήρα ρεύματος (μπλε) και παλμοί (μωβ) για μέγιστη τιμή του Duty Cycle για κινητήρα με φορτίο και με επαγωγή φίλτρου $L_1=80$ mH.

Στο σχήμα 7.65 παρουσιάζεται ο συντελεστής ισχύος που εμφανίζει ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές τεχνικές παλμοδότησης. Για κάθε τεχνική ο μετατροπέας τροφοδοτούσε έναν κινητήρα εν κενώ και έναν κινητήρα με φορτίο στον άξονά του. Σε κάθε περίπτωση υπήρχε φίλτρο μείωσης αρμονικών στην είσοδο του μετατροπέα με $L=80$ mH και $C=2,35$ μ F. Από αυτή τη σύγκριση προκύπτει ότι για ενδιάμεσες και υψηλές τιμές του Duty Cycle η τεχνική που προτείνεται (συνδυασμός HCC και sPWM) εμφανίζει υψηλότερο συντελεστή ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα. Αντίθετα, για χαμηλό Duty Cycle η τεχνική sPWM υπερτερεί της προτεινόμενης, εμφανίζοντας μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος. Αυτό το γεγονός οφείλεται στη χαμηλή συχνότητα συντονισμού του φίλτρου, αφού η διακοπτική συχνότητα είναι χαμηλή και δεν μπορεί να μεταβληθεί λόγω αδυναμίας του επεξεργαστή. Συνεπώς, η τεχνική παλμοδότησης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, βάσει αποτελεσμάτων, παρουσιάζει υψηλή απόδοση στην προσπάθεια βελτίωσης του συντελεστή ισχύος στην πλευρά του δικτύου και ως γνωστόν από τη βιβλιογραφία, με τη χρήση επεξεργαστή υψηλής διακοπτικής συχνότητας, υπερτερεί έναντι της sPWM [17].



Σχήμα 7.65: Γραφική παράσταση PF για κινητήρα εν κενώ και για κινητήρα με φορτίο με τεχνική παλμοδότησης HCC-sPWM και με τεχνική παλμοδότησης sPWM.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

8.1. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας κατασκευάστηκε μια ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη για την τροφοδοσία παθητικών φορτίων αλλά και ηλεκτρικών μηχανών. Βασικός στόχος της εργασίας ήταν να επιτευχθεί υψηλός συντελεστής ισχύος στην πλευρά του δικτύου εναλλασσόμενης τάσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο από τις επικρατέστερες τεχνικές παλμοδότησης, οι οποίες εφαρμόζονται στα σύγχρονα συστήματα αποτελούμενα από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Αυτές είναι οι τεχνικές sPWM και HCC-PWM. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές παλμοδότησης επιτεύχθηκε ικανοποιητικός συντελεστής ισχύος για διάφορες τιμές τάσης και ισχύος φορτίου όχι όμως σε όλο το φάσμα. Η αιτία αυτού είναι η αδυναμία της PWM αναλογικής εξόδου μικροελεγκτή Arduino να λειτουργήσει σε υψηλή συχνότητα. Κατά τα άλλα ο μετατροπέας λειτουργεί ικανοποιητικά και αξιόπιστα, καθώς σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών δε δημιουργήθηκε κάποιο πρόβλημα από τη λειτουργία του (π.χ. κάποια βλάβη).

Η μελέτη και η κατασκευή του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος έλαβε χώρα από τους συγγραφείς της εργασίας αυτής, τόσο στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Ισχύος του Τ.Ε.Ι. Πάτρας, όσο και στο εργαστήριο Παραγωγής Μεταφοράς και Χρησιμοποίησης Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών. Η εμπειρία που αποκτήθηκε καλύπτει ένα ευρύ φάσμα θεωρητικών γνώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην πράξη, αναφορικά με τα ηλεκτρονικά ισχύος, τους αισθητήρες, τα μικροηλεκτρονικά, τα ηλεκτρονικά, τις ηλεκτρικές μηχανές, την ηλεκτροτεχνία και γενικότερα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

8.2. Μελλοντικές επεκτάσεις

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας υφίστανται περιθώρια για περαιτέρω ενέργειες και παρεμβάσεις, οι οποίες δύναται να επιφέρουν καλύτερα αποτελέσματα σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, που στο σύνολό τους ξεπερνούν τα όρια μιας πτυχιακής εργασίας. Επίσης, οι εργασίες αυτές μπορούν να έχουν προσθετικό χαρακτήρα και να αποσκοπούν στη βελτίωση μιας ανορθωτικής διάταξης. Συνεπώς, με στόχο τη βελτιστοποίηση ή και τη διεξαγωγή πειραμάτων, κάποιος θα μπορούσε στο μέλλον να διαφοροποιήσει συνθήκες, για να επαληθεύσει τους αρχικούς στόχους. Μερικές από τις παραπάνω ενέργειες και παρεμβάσεις είναι:

- Η αύξηση της διακοπτικής συχνότητας για βαθύτερη ενεργειακή μελέτη.
- Η δυναμική μεταβολή της διακοπτικής συχνότητας αναλογικά με τις λειτουργικές απαιτήσεις του φορτίου με χρήση ανατροφοδότησης.
- Διαφοροποίηση τεχνικής παλμοδότησης ή και βελτίωσή της.
- Χρήση του μετατροπέα ως ανορθωτική διάταξη σε ρυθμιστή στροφών ή γενικά στον αυτόματο έλεγχο.
- Βελτιστοποίηση των αισθητήρων όσον αφορά στη δειγματοληψία, την ακρίβεια και την επεξεργασία των σημάτων που παράγουν.
- Μελέτη της επίδρασης διαφορετικών φίλτρων εισόδου στον συντελεστή ισχύος.

Από τα προαναφερθέντα σημαντικότερος παράγοντας βελτίωσης ενός μετατροπέα είναι η επίτευξη υψηλότερης διακοπτικής συχνότητας παλμοδότησης. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί στον μικροελεγκτή της εργασίας, καθώς η συχνότητα του επεξεργαστή είναι αρκετά υψηλή. Όμως, για να γίνει αυτό πρέπει το ρολόι της αναλογικής εξόδου PWM να χρονιστεί σε άλλη συχνότητα από την προεπιλεγμένη. Αυτός είναι και ο προτεινόμενος στόχος μελλοντικής εργασίας.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ηλεκτρική Ισχύς (2015):
http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B9%CF%83%CF%87%CF%8D%CF%82
- [2] Ηλεκτρική Ισχύς και Συντελεστής Ισχύος (2017):
https://en.wikipedia.org/wiki/Power_factor
- [3] Συντελεστής Ισχύος PF (-): http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Parousiasi5_1.pdf
- [4] Stephen J. Chapman, "Ηλεκτρικές Μηχανές", 4^η έκδοση, 2010, εκδόσεις Τζιόλα
- [5] Χαριτάντης Γιάννης, "Ηλεκτρονικά Ι", 2006, εκδόσεις Αράκυνθος
- [6] Μελέτη ημιαγωγών (-): <http://physics.teiath.gr/physics/pdf/H2.pdf>
- [7] Κώστας Ε. Σαββάκης, "Τεχνολογία Υλικών", 3^η έκδοση, 2010, εκδόσεις Ίων
- [8] Επαφές p-n, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διαφάνειες διαλέξεων (2015):
http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D2_Hmiagogoi_2.pdf
- [9] Ι.Σ. Χαλκιάδης, "Δίοδος και κυκλώματα διόδων", Διαφάνειες διαλέξεων, Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας:
http://www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/downloads/theory/03_diodes.pdf
- [10] C. C. Katsidis (ETY-482), "Εισαγωγή στη Μικροηλεκτρονική", Διαφάνειες διαλέξεων, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών - Πανεπιστήμιο Κρήτης:
<https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY482/notes/IV.pdf>
- [11] Mohan, Undeland, Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", 1995, εκδόσεις John Wiley and Sons
- [12] Μάριος Χατζηπροκοπίου, " Ηλεκτρονικά Ισχύος και Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά", 2004, εκδόσεις Μάριος Χατζηπροκοπίου
- [13] Κωνσταντίνος Γεωργάκας, "Τρανζίστορ Ισχύος IGBT", Διαφάνειες διαλέξεων, 2014, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
- [14] Κωνσταντίνος Γεωργάκας, "Γενικά", Διαφάνειες διαλέξεων, 2014, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
- [15] Παντελής Β. Μαλατέστας, "Ηλεκτρική Κίνηση", 3^η έκδοση, 2014, εκδόσεις Τζιόλα
- [16] Γεώργιος Αντωνόπουλος, "Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα- Εργαστηριακές Σημειώσεις", 2010, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
- [17] Κωνσταντίνος Γεωργάκας, "Μελέτη έργου ισχύος και μέθοδοι βελτίωσης συντελεστή ισχύος και βαθμού απόδοσης συστημάτων μετατροπής ενέργειας αποτελούμενα από ηλεκτρονικούς μετατροπείς εξαναγκασμένης μετάβασης", 2009, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας
- [18] Κωνσταντίνος Γεωργάκας, "Τριφασικός Ανορθωτής", Διαφάνειες διαλέξεων, 2014, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
- [19] Arduino Due (2017): <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDue>
- [20] Current transducer LTSR 6-NP, Datasheet, LEM
- [21] Δημήτριος Π. Γυπαράκης, "Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικού μετατροπέα με στόχο τον έλεγχο κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης", 2012 Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [22] Διονύσιος Λουρεντζάτος, "Μελέτη και σχεδιασμός ηλεκτρονικής διακοπτικής κρουστικής γεννήτριας με τη χρήση αντιστροφέα 23 επιπέδων", 2012, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [23] Διονύσιος Βασιλόπουλος, "Σχεδιασμός και ανάλυση κυκλώματος ισχύος και ελέγχου ηλεκτρικού αυτοκινήτου", 2013, Διπλωματική Εργασία, Τ.Ε.Ι. Πειραιά
- [24] Γεώργιος Κιμιωνής "Σχεδίαση φωτοβολταϊκών μετατροπέων DC/AC σε περιβάλλον Matlab/Simulink", 2014, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης