

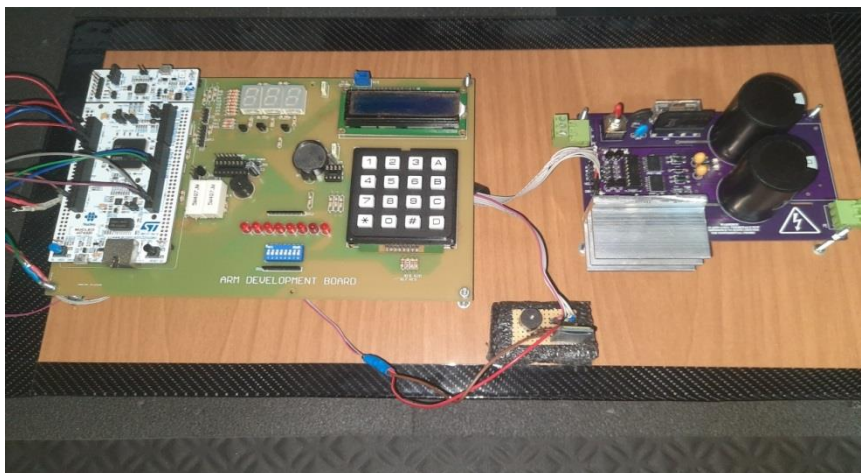
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και κατασκευή μονοφασικού αντιστροφέα
για έλεγχο στροφών μονοφασικού κινητήρα με χρήση
μικροελεγκτή STM32.**



Του φοιτητή
Χρήστου Κεβρεκίδη
Αρ. Μητρώου: 52010M

Άγγελος Γιακουμής
Καθηγητής
Επίκουρος καθηγητής

Τίτλος Δ.Ε.

Μελέτη και κατασκευή μονοφασικού αντιστροφέα για έλεγχο στροφών μονοφασικού κινητήρα με χρήση μικροελεγκτή STM32.

Κωδικός Δ.Ε : 22212

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Χρήστος Κεβρεκίδης
Όνοματεπώνυμο εισηγητή Άγγελος Γιακουμής

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Χρήστου Κεβρεκίδη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Λέξεις κλειδιά.....	5
Περίληψη.....	5
Abstract.....	5
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή-γενικές παραδοχές.....	6
1.1 Γενικά περί ηλεκτρικών κινητήρων.....	6
1.2 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρικών κινητήρων.....	6-7
1.3 Σύγκριση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.....	7-8
1.4 Ιστορική εξέλιξη του ηλεκτροκινητήρα.....	8
1.5 Σύγκριση μονοφασικών-τριφασικών κινητήρων.....	8-9
Κεφάλαιο 2- Εισαγωγή στη τεχνολογία των Inverters.....	10
2.1 Γενικά περί ημιαγωγών.....	10-11
2.2 Είδη, χαρακτηριστικά και διακρίσεις των Inverters.....	11-13
2.3 Εισαγωγή στους VFDs.....	14-15
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης VFD.....	15-16
2.5 Σύγκριση με τους SOFT STARTERS.....	16-17
Κεφάλαιο 3 – Ηλεκτρονικές διατάξεις.....	18
3.1 Τεχνικές ελέγχου ημιτονοειδούς τάσης.....	18-19
3.2 Κυκλωματική-ηλεκτρονική ανάλυση τυπικού VFD.....	19-21
3.2.1 Ανόρθωση τάσης δικτύου.....	21-22
3.2.2 Διακόπτες σε συνδεσμολογία H-BRIDGE.....	22
3.2.3 HIGH-LOW side drive.....	23-24
3.2.4 Διασύνδεση επεξεργαστή MOSFET DRIVERS.....	24-25
3.2.5 Παροχή τροφοδοσίας στα επιμέρους κυκλώματα.....	26-28
3.3 Χαρακτηριστικά παθητικών εξαρτημάτων.....	29-30
Κεφάλαιο 4- Διάταξη ελέγχου.....	31
4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά επεξεργαστή-καθορισμός εισόδων εξόδων.....	31-33
4.2 Γνωριμία με το περιβάλλον του STM32 Cube IDE.....	33-36
4.3 Επεξήγηση κώδικα.....	36-39
4.4 Έλεγχος συχνότητας από εφαρμογή σε συσκευή ANDROID.....	39-41
4.5 παραγωγή παλμών PWM.....	41-48
Κεφάλαιο 5- Προσομοίωση κυκλώματος στο SIMULINK.....	49
5.1 προσομοίωση γέφυρας και SPWM στο SIMULINK.....	49-51
5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	51-53
5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης με το κύκλωμα ανόρθωσης.....	53-58
Κεφάλαιο 6- Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	59
6.1 Δομική πλακέτας ισχύος.....	59
6.2 Παράθεση αποτελεσμάτων επεξεργαστή.....	59-62

Κεφάλαιο 7-Δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε-τρόποι βελτίωσης-συνολικό κόστος.....	63
7.1 Δυσκολίες που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε	63
7.2 Συζήτηση-τρόποι βελτίωσης.....	63-64
7.3 Συνολικό κόστος.....	64-65
7.4 Επίλογος-Συμπεράσματα.....	66
Παράρτημα.....	67
Κώδικες.....	67-74
Φύλλα δεδομένων.....	75
Βιβλιογραφία.....	75-76

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρικός κινητήρας, μονοφασικός αντιστροφάας, συχνότητα, διακόπτης, στάτορας, ρότορας, σύγχρονος, ασύγχρονος, H-BRIDGE, MOSFET, Bootstrap, SPWM, VFD, ανορθωτής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρακάτω διπλωματική εργασία μελετήθηκε και κατασκευάστηκε ένας VFD που αποτελείται από 2 πλακέτες. Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι ο πλήρης έλεγχος ενός μονοφασικού ηλεκτρικού κινητήρα. Η πρώτη πλακέτα αποτελεί το κύκλωμα ισχύος, που εμπεριέχει όλα τα απαραίτητα επιμέρους κυκλώματα για την ορθή λειτουργία του VFD. Η δεύτερη πλακέτα αποτελεί την διάταξη ελέγχου του κυκλώματος ισχύος. Για τον σωστό έλεγχο του κυκλώματος ισχύος αναπτύχθηκε το απαραίτητο λογισμικό με την χρήση του επεξεργαστή STM32H743ZIT6. Αρχικά αναφέρονται κάποιες βασικές πληροφορίες για τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια αναφορά στα είδη και διακρίσεις των inverters όπως και μια σύγκριση με άλλες βιομηχανικές μονάδες ισχύος. Εν συνεχεία στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια εκτενής αναφορά στον τρόπο λειτουργίας των VFDs καθώς και στην ανάλυση των επιμέρους απαιτήτων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Στο κεφάλαιο 4 εξηγείται το κομμάτι του κώδικα που διαμορφώνει τα απαραίτητα σήματα SPWM για τον έλεγχο του κινητήρα. Αφού γίνει στο κεφάλαιο 5 μια προσομοίωση του συνολικού κυκλώματος, στο κεφάλαιο 6 γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων, όπως και η απαραίτητη συζήτηση γύρω από αυτά. Κλείνοντας στο κεφάλαιο 7 προτείνονται διάφοροι τρόποι βελτίωσης μαζί με δυσκολίες που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε.

ABSTRACT

In the following thesis, a VFD consisting of 2 pcbs was studied and implemented. The purpose of this project is the control of the speed of a single-phase induction motor. The first pcb is the power circuit, which contains all the necessary sub-circuits for the proper operation of the VFD. The second pcb is the control unit of the power circuit. For the correct and safe control of the power circuit, the necessary software was developed using the STM32 H743ZIT6 processor. First at chapter 1 some basic information about electric motors is mentioned. In chapter 2 a reference is made to the types and distinctions of inverters as well as a comparison with other industrial power units. Proceeding in chapter 3, an extensive reference is being made to the operation of VFDs as well as to the analysis of the individual necessary electronic circuits. In chapter 4 the code that forms the necessary SPWM signals which control the motor, is explained. A simulation of the overall circuit is done in chapter 5, in chapter 6 the results are listed, as well as the necessary discussion about them and closing in chapter 7, various ways of improving the project are proposed as well as the difficulties we faced.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν μια διάταξη όπου μετατρέπουν την παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική ενέργεια. Για αυτόν τον λόγο οι εφαρμογές τους είναι πάρα πολλές. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες από τις βασικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες.

- Απλές συσκευές νοικοκυριού (πλυντήριο ρούχων)
- Ρομποτικές κατασκευές η και drone
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως ηλεκτρική γεννήτρια στις ανεμογεννήτριες
- Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα
- Βιομηχανία

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες όπως προαναφέρθηκε στη σημερινή εποχή έχουν αρκετά μεγάλη απήχηση στην παραγωγή ενέργειας ανανεώσιμης και μη καθώς εκμεταλλευόμαστε το γεγονός πως ο κινητήρας λειτουργεί και αντίστροφα δηλαδή αν του παρέχουμε κινητική ενέργεια μπορεί να παράξει ηλεκτρική ενέργεια την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείτε στα λιγνιτικά εργοστάσια της ΔΕΗ καθώς και στις ανεμογεννήτριες. Επίσης άλλη σημαντική εφαρμογή είναι η μεγάλη απήχηση τους στον τομέα της βιομηχανίας, βαριάς και μη. Η κινητική ενέργεια του κινητήρα παράγει και μηχανικό έργο το οποίο χρησιμοποιείτε σε περιστροφική κίνηση σε ανυψωτικά μηχανήματα ελίκων κ.α. Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως ηλεκτροκινητήρες χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Στα ηλεκτρικά οχήματα εκμεταλλευόμαστε το γεγονός πως ο κινητήρας δύναται να λειτουργήσει και σαν γεννήτρια και με αυτόν τον τρόπο να επιτύχουμε αντίθετη ροπή στον άξονα και έτσι επιτυγχάνεται το φρενάρισμα του οχήματος. Αυτό ονομάζεται αναγεννητική πέδηση.

1.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Η βασική αρχή που διέπει την λειτουργία των κινητήρων είναι πως η κίνηση οφείλεται στην αλληλεπίδραση φορέων μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του κινητήρα που έχουν την τάση να προσανατολίζονται μεταξύ τους. Οι κινητήρες διακρίνονται ανάλογα με την παροχή τάσης στα άκρα τους σε

- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC current motors)
- Κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC current motors)

Με την σειρά τους οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε **ασύγχρονους** και **σύγχρονους**. Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής είναι ευθέως ανάλογη της τάσης και συχνότητας που εφαρμόζεται στα άκρα του. Οι ασύγχρονοι κινητήρες με την σειρά τους διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς

Ένας τυπικός ηλεκτροκινητήρας αποτελείται από τα εξής συνθετικά μέρη:

- Τον **δρομέα** που αποτελεί το κομμάτι του κινητήρα που περιστρέφεται.
- Τον **στάτη η στάτορα** ο οποίος εμπεριέχει τον δρομέα και αποτελείται από μόνιμους η τεχνητούς μαγνήτες προκειμένου να δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο.

- Τις **ψήκτρες** οι οποίες έρχονται σε επαφή με τον δρομέα παρέχοντας του ρεύμα.
- Το **διάκενο** που είναι το κενό διάστημα μεταξύ στάτη και δρομέα.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται τα βασικά συστατικά μέρη ενός κινητήρα:



Εικόνα 1.1 Στάτορας



Εικόνα 1.2 ρότορας

Κατά την αγορά ενός ηλεκτρικού κινητήρα υπάρχουν κάποια θεμελιώδη χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να γνωρίζουμε και αυτά διέπουν όλους τους ηλεκτροκινητήρες. Αυτά είναι τα εξής

- Η τάση λειτουργίας του σε Volt (DC-AC)
- Συνεχή η εναλλασσόμενη τάση
- Συχνότητα τάσης αν πρόκειται για εναλλασσόμενη τάση
- Ισχύς του κινητήρα σε watt
- Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα η οποία μετριέται σε RPM.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αναγράφονται πάντα στα φύλλα δεδομένων ενός κινητήρα καθώς και ο αριθμός έγκρισης από το υπουργείο βιομηχανίας για εμπορική διάθεση καθώς και διάφορα σύμβολα πιστοποίησης ασφαλούς λειτουργίας.[18]

1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Σε μια απευθείας σύγκριση του ηλεκτροκινητήρα με μια μηχανή εσωτερικής καύσης ο ηλεκτροκινητήρας είναι πολύ πιο ελαφρύς, μικρότερος σε μέγεθος και περισσότερο αποδοτικός σε ισχύ. Επιπλέον οι απώλειες σε θερμική ισχύ είναι πολύ χαμηλότερες σε σχέση με έναν τυπικό βενζινοκινητήρα. Όλα αυτά οφείλονται στην απλή και συμπαγή κατασκευή των ηλεκτροκινητήρων. Επίσης λόγω της συμπαγούς κατασκευής του είναι ανεξάρτητος από οποιαδήποτε περιβαλλοντική κατάσταση και για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται κατά κόρον

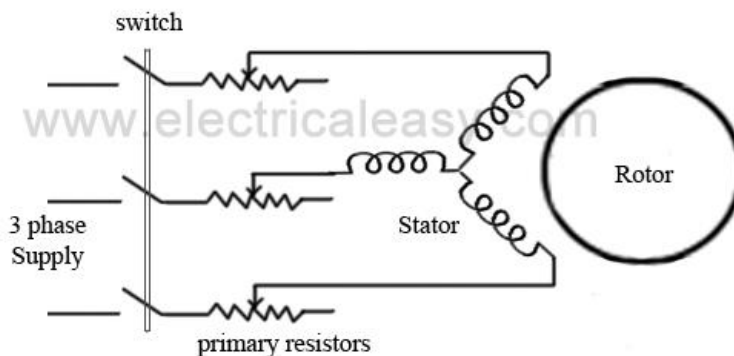
στη βιομηχανία. Το μεγάλο μειονέκτημα των ηλεκτροκινητήρων είναι η συνεχής εξάρτηση του από παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης, λόγω του ότι ο κάθε ηλεκτροκινητήρας αποτελεί ένα επαγωγικό φορτίο, κατά το ρεύμα εκκίνησης του (inrush current) είναι αρκετά μεγάλο και αυτό οφείλεται στον νόμο της επαγωγής του Lenz. Τέλος σε έναν επαγωγικό κινητήρα η ρύθμιση της ταχύτητας του (rpm) είναι δύσκολο να επιτευχτεί.[18]

1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

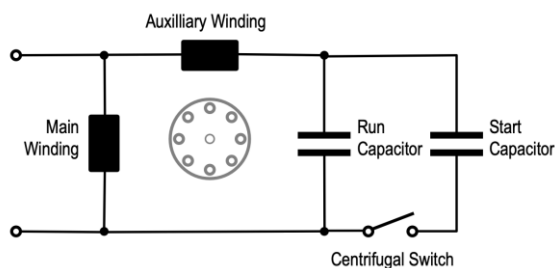
Η ανακάλυψη του ηλεκτρικού κινητήρα ξεκίνησε το 1821 όταν ο Michael Faraday διατύπωσε και εξήγησε την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική τοποθετώντας έναν ρευματοφόρο αγωγό μέσα σε μαγνητικό πεδίο που είχε ως αποτέλεσμα την περιστροφή του αγωγού λόγω της παραγόμενης ροπής από τις αλληλεπιδράσεις των παραγόμενων μαγνητικών πεδίων. Το 1828 ο Ούγγρος εφευρέτης Anyos Jedlik παρουσίασε την πρώτη συσκευή που περιείχε τα τρία βασικά συστατικά στοιχεία των ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος (στάτορα, ρότορα, εναλλάκτη). Τέσσερα χρόνια, το 1832, μετά σχεδιάζεται μια DC ηλεκτρική μηχανή από τον άγγλο επιστήμονα **William Sturgeon**. Αυτή η μηχανή όμως δεν απέδωσε καθώς ήταν πολύ ακριβή. Έτσι το 1866 εφευρέθηκε ο πρώτος ηλεκτροκινητήρας από το επιστήμονα Frank Julian Sprague. Το 1874 κατασκευάστηκε από τον David Salomons μια ηλεκτρική άμαξα αλλά αποσύρθηκε διότι εκείνη την εποχή δεν υπήρχαν συσσωρευτές. Το 1881 παρουσιάστηκε από την εταιρία Jeantaud Electric το πρώτο μοντέλο ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Τέλος το ίδιο έτος κατασκευάστηκε το πρώτο ηλεκτρικό τρίκυκλο από τους William Ayrton και John Perry.[19]

1.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΩΝ- ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Όπως ειπώθηκε και στην παράγραφο 1.2 οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς. Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται ως κατά το πλείστον ο επαγωγικός κινητήρας (**induction motor**), οπότε η σύγκριση θα γίνει με αυτού του τύπου κινητήρα.



Εικόνα 1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού επαγωγικού κινητήρα



Εικόνα 1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού κινητήρα.

Στην εικόνα 1.3 διακρίνεται η δομή ενός τριφασικού κινητήρα ενώ στην εικόνα 1.4 φαίνεται πως είναι συνομολογημένος ένας μονοφασικός κινητήρας. Οι μονοφασικοί κινητήρες χρειάζονται πάντα έναν δυο πυκνωτές προκειμένου να μπορούν να είναι λειτουργικοί. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4 ο ένας πυκνωτής χρησιμοποιείται κατά την εκκίνηση (start capacitor), ενώ ο δεύτερος πυκνωτής ονομάζεται πυκνωτής λειτουργίας και δημιουργεί μια διαφορά φάσης μεταξύ τάσης ρεύματος ίση με 90 μοίρες προκειμένου να δημιουργηθεί περιστροφική κίνηση στο εσωτερικό του κινητήρα. Εξαιτίας της παρουσίας αυτών των πυκνωτών, στους μονοφασικούς κινητήρες δεν είναι εύκολη η ρύθμιση της ταχύτητας τους. Επιπλέον αυτό δεν έχει και κάποιο νόημα καθώς οι μονοφασικοί κινητήρες έχουν αρκετά περιορισμένη ισχύ απόδοσης (μέχρι 1,5 Hp).

Από την αντίθετη πλευρά, στους τριφασικούς κινητήρα όπως είναι ευδιάκριτο και στην εικόνα 1.4 η δομή τους είναι αρκετά απλοϊκή καθώς αποτελούνται μόνο τρία πηνία. Σε αυτήν την περίπτωση η παροχή τους είναι τρεις φάσεις με διαφορά φάσης 120 μοιρών μεταξύ τους. Αυτή η διαφορά 120 μοιρών μεταξύ των φάσεων είναι που προκαλεί και την περιστροφική κίνηση στους τριφασικούς κινητήρες.

Το βασικό κριτήριο σύγκρισης των δυο είδη κινητήρων είναι η απήχηση τους στην βιομηχανία. Είναι γνωστό πως στην βιομηχανία χρησιμοποιείται μόνο τριφασική παροχή άρα συνεπώς οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται για τους διάφορους σκοπούς είναι αποκλειστικά τριφασικοί. Πρώτη και βασική αιτία είναι πως μπορούν να αποδώσουν αρκετά μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με τους μονοφασικούς (πάνω από 4HP). Παράλληλα η διαδικασία του έλεγχου της ταχύτητας τους είναι πιο εύκολη αφού αποτελούνται μόνο από τρία πηνία σε αντίθεση με τους μονοφασικούς που χρειάζονται πυκνωτές προκειμένου να δημιουργηθεί περιστροφική κίνηση. Το μόνο βασικό μειονέκτημα των τριφασικών κινητήρων είναι το υψηλό κόστος αγοράς.[20][21]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ

INVERTERS

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

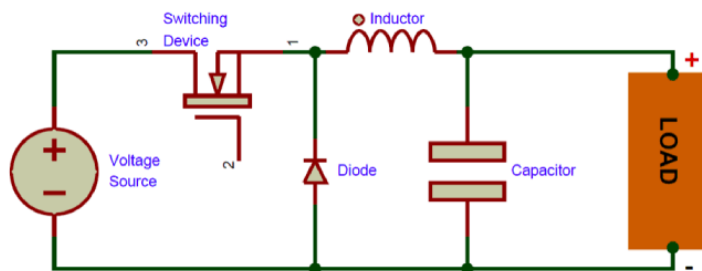
Είναι παγκοσμίως γνωστό και αποδεκτό στην επιστημονική κοινότητα, πως η επιστήμη της ηλεκτρονικής βασίζεται αποκλειστικά στην επιστήμη των ημιαγωγών οι οποίοι συμπεριφέρονται ενίοτε ως αγωγοί και ως μονωτές υπό διαφορετικές συνθήκες. Βάσει αυτής της ιδιότητας, έχουν αναπτυχθεί τα βασικά ημιαγωγά στοιχεία: **δίοδος, τρανζίστορ, Mosfet, IGBT, TRIAC**. Τα παραπάνω στοιχεία όπως αναφέρθηκε συμπεριφέρονται άλλοτε σαν αγωγοί και άλλοτε σαν μονωτές.

Πάνω σε αυτήν την βασική και θεμελιώδη αρχή βασίζεται η λειτουργία πάρα πολλών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ακόμα και συσκευών οικιακής χρήσης. Τα βασικά είδη κυκλωμάτων στα οποία έχουν απήχηση οι ημιαγωγοί, όπως αυτοί που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι τα εξής:

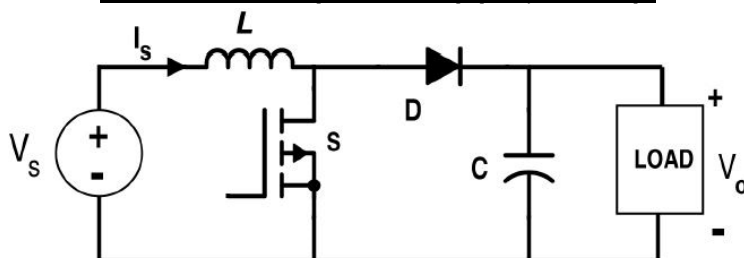
- **Ανορθωτής μισού η πλήρους μήκους κύματος**, που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές (Εμπεριέχεται σχεδόν σε όλες τις ηλεκτρικές συσκευές).
- **Κυκλώματα ρύθμισης ισχύος (DC η AC)**, που μετατρέπουν την συνεχή τάση σε συνεχή και την εναλλασσόμενη τάση σε εναλλασσόμενη τάση. Το μόνο που αλλάζει σε αυτήν την περίπτωση πως αυτά τα κυκλώματα παρέχουν μια τάση χαμηλότερη η υψηλότερη της παρεχόμενης τάσης. Τέτοια κυκλώματα απαρτίζονται από Mosfet η TRIAC για το εναλλασσόμενο ρεύμα.
- **Αντιστροφείς τάσης (inverters)**, που μετατρέπουν την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη.

Τα κυκλώματα των ανορθωτών είναι αρκετά χρήσιμα, καθώς μετατρέπουν όπως αναφέρθηκε, την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, αφού η συνεχή DC τάση είναι απαραίτητη σχεδόν σε όλες τις συσκευές όπως για παράδειγμα, ο υπολογιστής, ο φορτιστής κινητού τηλεφώνου, όπως και σε πολλούς DC κινητήρες που περιέχονται σε διάφορες συσκευές οικιακής χρήσης (φραπεδιέρα, μίξερ).

Οι ρυθμιστές τάσης χρησιμοποιούνται, αποκλειστικά και μόνον όταν επιθυμούμε να παρέχουμε στο φορτίο τάση μικρότερη η μεγαλύτερη από την παρεχόμενη τάση. Αυτό που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη σε αυτά τα κυκλώματα είναι πως η τάση στο φορτίο θα είναι του ίδιου είδους με αυτήν της πηγής. Όσον αναφορά το συνεχές ρεύμα υπάρχουν δυο βασικά και διαδεδομένα κυκλώματα που κάνουν υποβιβασμό και ανύψωση της τάσης αντίστοιχα και ονομάζονται **buck converter** και **boost converter**. Αμφότερα, χρησιμοποιούν τα διακοπτικά στοιχεία **Mosfet** η **IGBTs**.

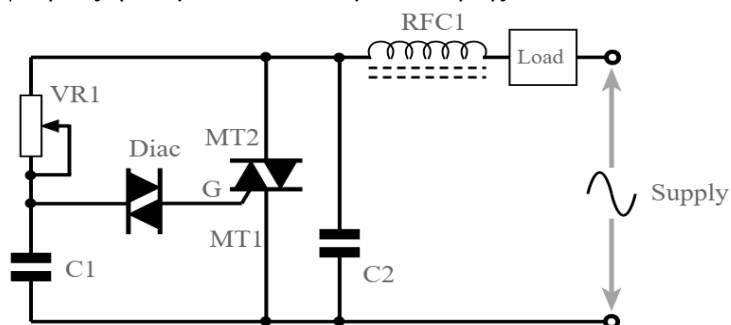


Εικόνα 2.1 Μετατροπείας υποβιβασμού τάσης



Εικόνα 2.2 μετατροπείας ανύψωσης τάσης

Παραπάνω στις εικόνες 2.1-2.2 διακρίνονται τα βασικά κυκλώματα μετατροπής DC τάσης σε DC. Στο εναλλασσόμενο ρεύμα, χρησιμοποιείτε σχεδόν πάντα το TRIAC. Η ρύθμιση της εναλλασσόμενης τάσης βρίσκει εφαρμογή σε εμπορικά dimmer για ρύθμιση φωτεινότητας σε λάμπες πυράκτωσης καθώς και για ρύθμιση της ισχύος σε θερμαντικά στοιχεία (αντίσταση ισχύος) όπως φούρνος η ακόμα και σε σταθμό κόλλησης.



Εικόνα 2.3 Μετατροπείας AC-AC με χρήση TRIAC

Παραπάνω στις εικόνες 2.1-2.3 απεικονίστηκαν τα βασικά κυκλώματα μετατροπής DC σε DC καθώς και από AC σε AC. Στην επόμενη παράγραφο που ακολουθεί θα εξεταστεί η λειτουργία των inverters καθώς και τα είδη, τα χαρακτηριστικά τους και τις διακρίσεις τους ανάλογα με την μορφή της εξόδου. [11][12]

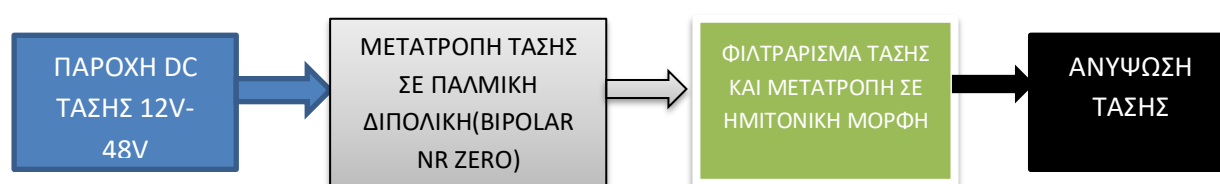
2.2 ΕΙΔΗ, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ ΤΩΝ INVERTERS

Στην παράγραφο 2.1 αναφέρθηκε πως οι ανορθωτές μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση της διόδου η οποία άγει ηλεκτρικό ρεύμα μόνο κατά την θετική περίοδο και έτσι κατά συνέπεια στο φορτίο παρέχεται μόνο θετική τάση και έτσι το ρεύμα ρέει υποχρεωτικά προς μια κατεύθυνση και μόνον. Οι inverters επιτελούν την

ακριβώς αντίθετη διαδικασία, δηλαδή παράγουν εναλλασσόμενη τάση που η συχνότητα μπορεί να είναι προκαθορισμένη ή μεταβλητή, από μια DC τάση παροχής. Τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν την λειτουργία τους είναι τα εξής:

- **Ονομαστική τάση εισόδου(V)**. Πρόκειται για την DC ονομαστική τάση εισόδου του inverter. Συνήθως κυμαίνεται από 12V-48V.
- **Μέγιστη τάση εισόδου(V)**. Ορίζεται ως η μέγιστη τάση που μπορεί να δεχτεί στην είσοδο ο inverter χωρίς να διατρέχει τον κίνδυνο καταστροφής.
- **Ρεύμα λειτουργίας(I)**. Είναι το ρεύμα που καταναλώνεται από τον ίδιο τον inverter σε κατάσταση λειτουργίας.
- **Ονομαστική ισχύς(W)**. Είναι η ισχύ που μπορεί να αποδώσει ο inverter.

Η αρχή λειτουργίας σχεδόν όλων των ειδών των inverters, εξαιρουμένων των VFDs, παρουσιάζεται στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα:



Η εξήγηση του παραπάνω μπλοκ διαγράμματος έχει ως εξής:

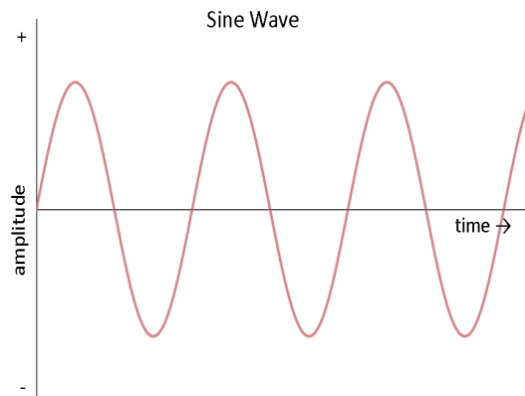
Η DC τάση εισόδου του inverter με την χρήση κατάλληλων διακοπών μετατρέπεται σε παλμική τάση. Η τάση αυτή είναι διπολική που σημαίνει πως είναι θετική και αρνητική (No return Zero). Αυτής της μορφής η τάση πλέον είναι εναλλασσόμενη καθώς η μέση τιμή της είναι μηδέν. Κατόπιν αυτή η τάση με κατάλληλο <<φιλτράρισμα>> μετατρέπεται σε ημιτονική. Τέλος χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματιστή αυτή η χαμηλή, όμως ημιτονοειδής τάση, ανυψώνεται στην στάθμη των 230V, που είναι και η RMS τάση του δικτύου.

Η βασική αρχή διάκρισης των inverters βασίζεται στον τύπο και είδος της τάσης εξόδου του inverter. Έτσι βάσει αυτού του κριτηρίου διακρίνονται οι εξής κατηγορίες αντιστροφών:

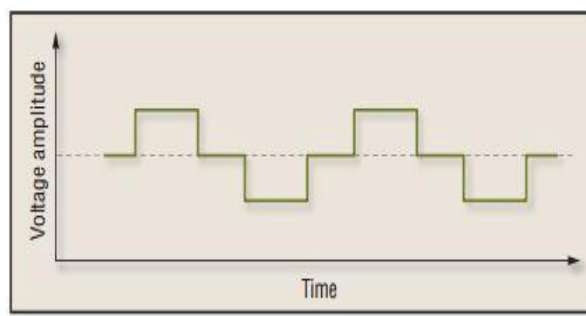
- Inverter καθαρού ημιτόνου προκαθορισμένης συχνότητας(50-60Hz)
- Inverter καθαρού ημιτόνου μεταβλητής συχνότητας η **VFD (Variable frequency driver)**
- Inverter τροποποιημένου ημιτόνου (**modified square wave**).
- Inverter για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το πρώτο καθώς και το τρίτο είδος inverter χρησιμοποιείται αποκλειστικά για ηλεκτρονικές συσκευές καθώς αυτές απαιτούν μια σταθερή συχνότητα στα 50 ή 60 Hz. Για συσκευές όπως τηλεόραση ή προσωπικός υπολογιστής προτιμάται η χρήση inverter καθαρού ημιτόνου. Για ποιο απλές ηλεκτρονικές συσκευές όπως λάμπες Led ή και πυράκτωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και inverter τροποποιημένου ημιτόνου καθώς η ηλεκτρονική δομή τους είναι πιο απλή και δεν απαιτούν πάντα παροχή καθαρού ημιτόνου.

Η δεύτερη κατηγορία ονομάζεται και **κυκλωμετατροπείς** και η βασική τους ιδιότητα είναι η παροχή της τάσης του δικτύου στο φορτίο με ημιτονοειδή μορφή αλλά σε αυτήν την περίπτωση με μεταβλητή συχνότητα. Είναι μια παραλλαγή των κλασικών inverter και ονομάζεται **VFD**. Ανήκει στην κατηγορία των inverter γιατί έχει μια κοινή συνδεσμολογία με τα αλλά δυο είδη όπως θα δούμε και παρακάτω. Αυτού του είδους οι αντιστροφείς προορίζονται αποκλειστικά για κινητήρες και διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς, καθώς υπάρχουν μονοφασικοί και τριφασικοί κινητήρες.

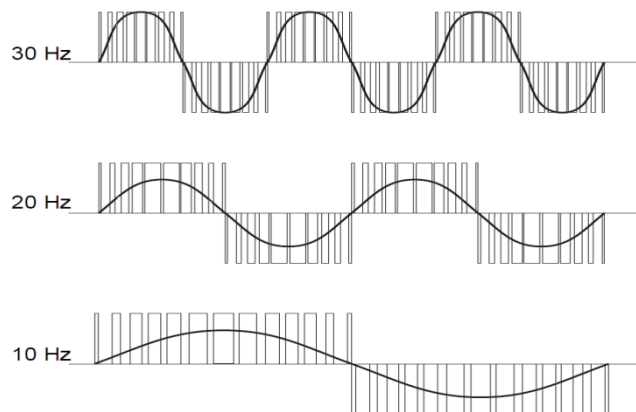


Εικόνα 2.4 τάση εξόδου Pure sine wave inverter



Εικόνα 2.5 τάση εξόδου Modified square wave inverter

Παραπάνω στις εικόνες 2.4-2.5 παρατηρούμε πως αλλάζει η μορφή της τάσης εξόδου ανάλογα με το είδος του inverter. Ας εξεταστεί τώρα και η έξοδος ενός VFD inverter

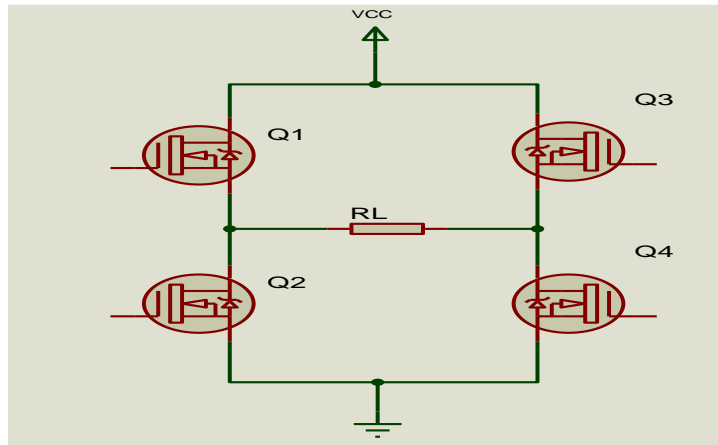


Εικόνα 2.6 Τάση εξόδου VFD

Παραπάνω στην εικόνα 2.6 φαίνεται πως μεταβάλλεται η ημιτονοειδής καμπύλη ανάλογα με την διακύμανση της συχνότητας. Με αυτόν τον τρόπο όπως θα αναφερθεί και στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται ο έλεγχος ταχύτητας σε έναν κινητήρα (μονοφασικό ή τριφασικό). Με άλλα λόγια μπορεί να θεωρηθεί πως ο VFD είναι μια παραλλαγή ενός inverter καθαρού ημιτόνου με βασικές διαφοροποιήσεις.[13]

2.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ VFDs

Όλες οι κατηγορίες inverters που εξετάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο μοιράζονται μια κοινή συνδεσμολογία η οποία αποτελείται από Mosfet η IGBT. Η συνδεσμολογία αυτή ονομάζεται **H-BRIDGE** και παράλληλα με τον κατάλληλο προγραμματισμό παράγεται η εναλλασσόμενη παλμική τάση.



Εικόνα 2.7 H BRIDGE

Στην εικόνα 2.7 φαίνεται η συνδεσμολογία η οποία είναι η βάση για όλων ειδών inverter. Ανάλογα με τον τύπο inverter πρέπει να γίνει ο απαραίτητος προγραμματισμός ενός επεξεργαστή προκειμένου να παραχθούν τα απαραίτητα σήματα τα οποία θα ελέγχουν τους τέσσερις διακόπτες της εικόνας 2.7.

Οι **VFDs** χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην βιομηχανία, καθώς όπως ειπώθηκε προορίζονται αποκλειστικά για κινητήρες. Βασικές χρήσεις ενός VFD είναι σε υδραυλικές πρέσες, σε αντλίες, σε συμπιεστές καθώς και σε έλεγχο ταχύτητας διάφορων ανεμιστήρων. Γενικά, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που απαιτείτε ο έλεγχος της ταχύτητας ενός κινητήρα και όχι κατά την εκκίνηση και την παύση. Αυτό θα γίνει πιο κατανοητό όταν στην παράγραφο 2.5 όπου θα γίνει μια απευθείας σύγκριση με τους **soft starters**, καθώς και αυτές οι διατάξεις αποσκοπούν στον έλεγχο κινητήρα αλλά με τελείως διαφορετικό τρόπο.

Στην Βιομηχανία είναι γνωστό πως χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνο PLC(programmable logic controllers). Οπότε συνεπώς οι σημερινοί VFD υπάρχουν σαν συμπαγής μονάδες PLC. Αυτό γίνεται διότι το PLC σαν μονάδα είναι αρκετά ανθεκτικό σε αντίξοες συνθήκες, όπως τα βιομηχανικά περιβάλλοντα καθώς και ο προγραμματισμός του είναι αρκετά απλοϊκός και εύχρηστος.



Εικόνα 2.8 VFD σαν μονάδα PLC



Εικόνα 2.9 VFD σαν μονάδα PLC

Στις εικόνες 2.8 και 2.9 φαίνεται πως είναι τα VFD που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία σε τυποποιημένη συμπαγή(compact) μορφή. Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα λόγο του ότι χρησιμοποιείτε ως κατά το πλείστον τριφασική παροχή οι περισσότεροι κινητήρες είναι τριφασικοί, οπότε τα περισσότερο VFD της αγοράς προορίζονται για τριφασική παροχή. Αυτό συμβαίνει διότι οι τριφασικοί κινητήρες, έκτος του γεγονότος ότι αποδίδουν περισσότερη ισχύ από τους μονοφασικούς, η συνδεσμολογία και ο έλεγχος της ταχύτητας τους είναι πιο εύκολη. [16]

2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ VFDs

Σε αυτήν την παράγραφο, θα γίνει μια αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι VFDs. Τα βασικά πλεονεκτήματα πάντα όσον αφορά την βιομηχανία είναι τα εξής:

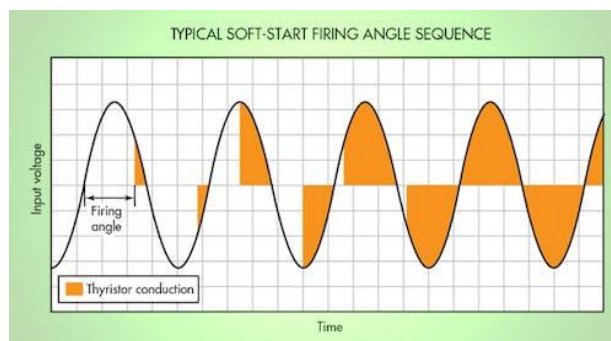
- Εξοικονόμηση Ενέργειας
- Πλήρης έλεγχος ταχύτητας ,επιτάχυνσης (ramp up), εκκίνησης και παύσης
- Υψηλός συντελεστής ισχύος(power factor), καθώς δε παραμορφώνεται το σήμα και η μορφή του ημιτόνου γεγονός που συμβαίνει με τον φασικό έλεγχο.
- Εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση.
- Εύκολος προγραμματισμός με χρήση PLC
- Ύπαρξη ψηφιακών και αναλογικών εισόδων και εξόδων.
- Ευελιξία.

Παραπάνω αναφέρθηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα των VFDs. Παρόλα αυτά υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία θα πρέπει να αναφερθούν.

- Παραγωγή αρμονικής παραμόρφωσης.
- Απαιτεί ειδικό τύπο καλωδίου για την συναρμολόγηση του
- Παρατεταμένη και μακροχρόνια χρήση του, μπορεί να προκαλέσει καταστροφή στα τυλίγματα των πηνίων του κινητήρα.
- Υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης. [7]

2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ SOFT STARTERS

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, αναφερόμενοι στην βιομηχανία και σε PLC και συγκεκριμένα σε κινητήρες, υπάρχει και ένα ακόμα είδος ελέγχου κινητήρων (μονοφασικών και τριφασικών) που είναι σε μορφή PLC και ονομάζεται **soft starter**. Όπως το αναφέρει και η ίδια η ονομασία αυτή η μονάδα έχει ως στόχο την ομαλή επιτάχυνση(ramp up) μέχρι τις πλήρεις στροφές του κινητήρα ενώ η ακριβώς αντίθετη διαδικασία συμβαίνει στους **soft stoppers**. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη όταν το φορτίο είναι αρκετά μεγάλης ισχύος, συνεπώς το ρεύμα εισροής (inrush current) θα είναι αρκετά μεγάλο και ενδεχομένως να προκαλέσει γρήγορη φθορά του κινητήρα αλλά μακροχρόνια βλάβη στις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις της βιομηχανίας. Η διαδικασία αυτή του ομαλού ελέγχου επιτυγχάνεται με την ομαλή και σταδιακή παροχή της τάσης στον κινητήρα προκειμένου να περιοριστεί το μεγάλο ρεύμα. Ο έλεγχος της τάσης γίνεται με TRIAC και η διαδικασία του ελέγχου ονομάζεται **φασικός έλεγχος της ισχύς** (ρύθμιση γωνιάς έναυσης) για το οποίο γίνεται λόγος στο κεφάλαιο 3.



Εικόνα 2.10 Soft starter με φασικό έλεγχο της ισχύος

Οι δυο παραπάνω μονάδες που εξετάστηκαν (VFD, soft starters) αποσκοπούν αμφότερες στον έλεγχο μονοφασικών και τριφασικών κινητήρων. Σαφώς κάθε μονάδα έχει τα πλεονεκτήματα της και τα μειονεκτήματα της. Το βασικό κοινό χαρακτηριστικό, όπως αναφέρθηκε, και των δυο είναι πως η χρήση τους είναι αποκλειστικά για βιομηχανικές εφαρμογές και για αυτό τον λόγο κυκλοφορούν στην αγορά μόνο σε μορφή PLC, καθώς το PLC προορίζεται για βιομηχανικές εγκαταστάσεις λόγω της ανθεκτικότητας και της αξιοπιστίας του.

Ο VFD αποσκοπεί στον έλεγχο της ταχύτητας και των στροφών του κινητήρα κατά την λειτουργία του και όχι κατά την εκκίνηση. Αντίθετα ο soft starter, stopper χρησιμοποιείται για την ομαλή εκκίνηση και την παύση και όχι για έλεγχο ταχύτητας του κινητήρα. Κλείνοντας, θα παραθέσουμε κάποια παραδείγματα όσον αναφορά την βιομηχανία σχετικά με το που

χρησιμοποιούνται VFD και που soft starter. Soft starter θα χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα όταν:

- Σε μια αντλία νερού που τροφοδοτεί όπου η ροή του νερού είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται. Σε αυτήν την περίπτωση ο soft starter είναι απαραίτητη καθώς κρίνεται απαραίτητος ο περιορισμός του ρεύματος εισροής καθώς και η ομαλή εκκίνηση και επιτάχυνση του κινητήρα.
- Όταν σε μια βιομηχανία υπάρχει ράμπα μεταγωγής υλικών η προϊόντων, εκεί αυτό που μας ενδιαφέρει είναι μόνο η εκκίνηση και η παύση και όχι ο έλεγχος της ταχύτητας οπότε ο soft starter θα ήταν η καλύτερη και φθηνότερη.

Αντιθέτως VFD θα χρησιμοποιηθεί όταν:

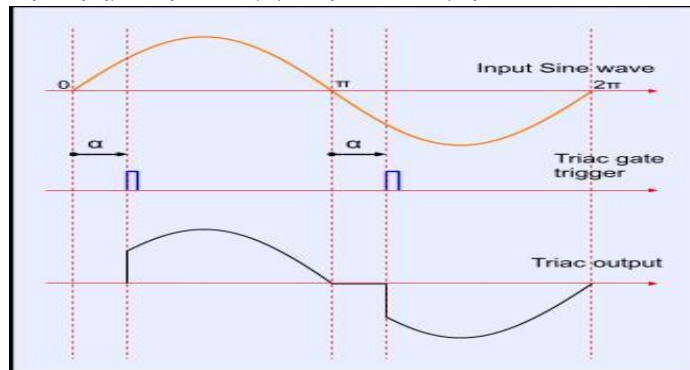
- Επιθυμούμε να ελέγξουμε την ταχύτητα ενός ανεμιστήρα με βάση κάποιες παραμέτρους (θερμοκρασία, υγρασία). Παραδείγματος χάριν, θέτοντας δυο τιμές θερμοκρασίας αναφοράς η ταχύτητα του ανεμιστήρα θα μπορεί να αλλάζει βάσει αυτών των δυο ορίων. [6][15]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

3.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΟΥΣ ΤΑΣΗΣ

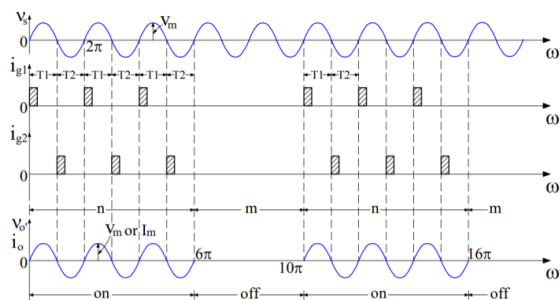
Στους συγχρόνους επαγωγικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος η ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται από δυο παράγοντες: την τάση παροχής καθώς και την συχνότητα σε **Hz** της εναλλασσόμενης τάσης. Η συχνότητα του δικτύου εναλλασσόμενης τάσης στην Ελλάδα είναι **50 Hz** ενώ η RMS τάση είναι **230VAC**. Ο έλεγχος της ημιτονοειδούς τάσης της ΔΕΗ μπορεί να γίνει με δυο τρόπους:

- **Έλεγχος φάσης** (ρύθμιση της γωνίας έναυσης του ημιτόνου) με την χρήση TRIAC. Σε αυτήν την μορφή ελέγχου της τάσης της ΔΕΗ μόνο ένα μέρος της θετικής και αρνητικής κυματομορφής της τάσης εμφανίζεται πάνω στο φορτίο. Αυτό το είδος ελέγχου καθορίζει την απόσταση του παλμού έναυσης στο TRIAC από κάθε μηδενισμό τάσης (Zero cross) και έτσι συνεπώς ένα μέρος της τάσης και από την θετική και αρνητική ημι-περίοδο εμφανίζεται στο φορτίο.



Εικόνα 3.1 Έλεγχος φάσης τάσης ΔΕΗ

- **Έλεγχος ακεραίων περιόδων (Integral cycle control)**. Σε αυτήν την μορφή ελέγχου ένας ακέραιος αριθμός περιόδων εμφανίζεται στο φορτίο ενώ ένας αριθμός περιόδων κόβεται.

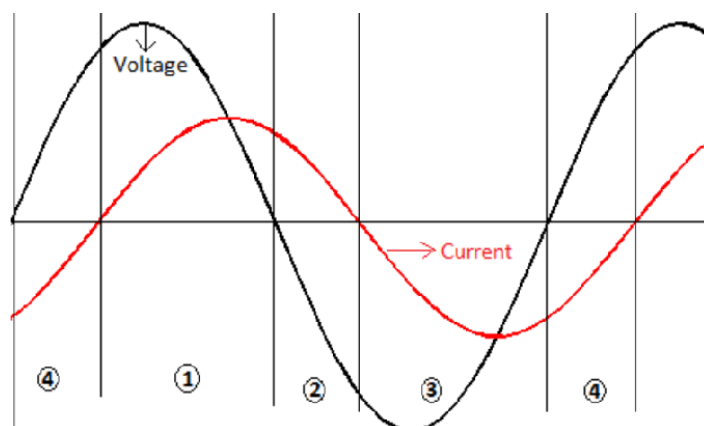


Εικόνα 3.2 Τεχνική ακεραίων περιόδων

Αμφότεροι οι δυο τρόποι ρύθμισης έχουν ως αποτέλεσμα την αυξομείωση της RMS τάσης του δικτύου σε ένα φορτίο. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την ρύθμιση της ισχύς σε ωμικά φορτία (λάμπες, φούρνοι, θερμοστάτες) καθώς η τάση και το ρεύμα είναι συμφασικά.

Στα επαγωγικά φορτία όμως αυτοί οι δυο τρόποι ρύθμισης δεν είναι αποτελεσματικοί καθώς ρυθμίζουν μόνον την RMS τάση του φορτίου. Στην παρακάτω εικόνα θα εξηγήσουμε γιατί

αυτοί οι δυο τρόποι δεν χρησιμοποιούνται ευρέως σε επαγωγικά φορτία και κυρίως σε κινητήρες.



Εικόνα 3.3 Διαφορά φάσης 90 μοίρες στα επαγωγικά φορτία

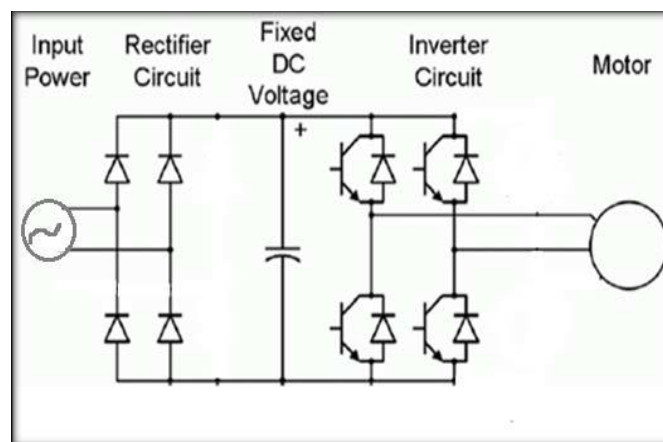
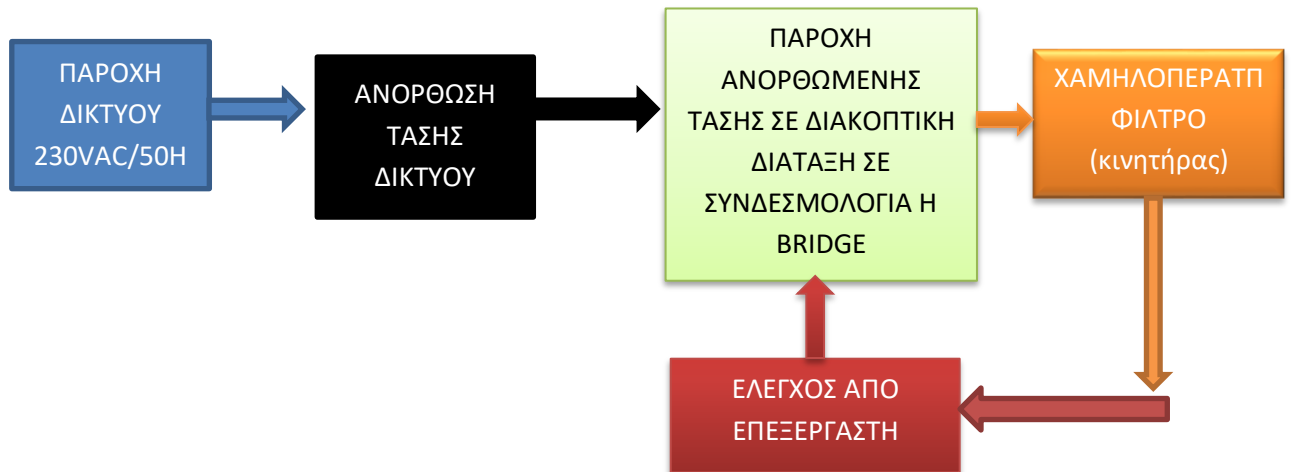
Στην εικόνα 3.3 εξηγείται γιατί δεν μπορεί να επιτευχθεί με έναν έλεγχο τάσης ο έλεγχος των στροφών ενός ηλεκτροκινητήρα. Παρατηρώντας την μαύρη σε σύγκριση με την κόκκινη κυματομορφή παρατηρούμε πως έχουν διαφορά φάσης 90 μοίρες μεταξύ τους. Αυτό σημείο στο σημείο μηδενισμού της τάσης το ρεύμα έχει την μέγιστη τιμή του.

Στους επαγωγικούς κινητήρες και γενικά στους κινητήρες AC η ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται και από την τάση αλλά και από την συχνότητα περιστροφής.

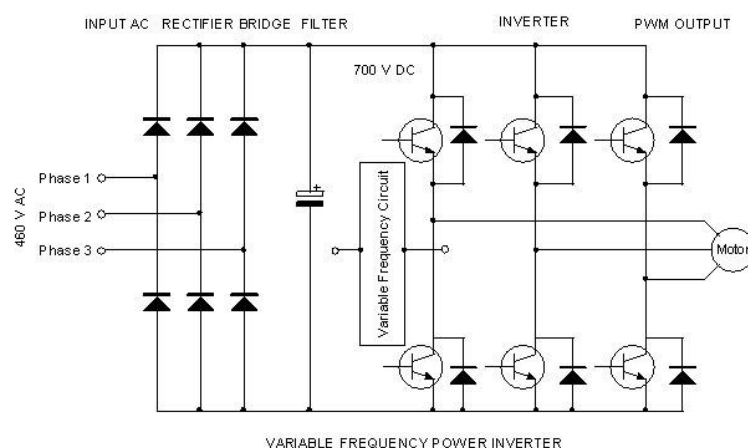
Ελέγχοντας ταυτόχρονα και την τάση και την συχνότητα του κινητήρα, ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα είναι πιο αποτελεσματικός, πιο αποδοτικός και το πιο σημαντικό, περισσότερο ομαλός. Αυτές οι διατάξεις που ελέγχουν ταυτόχρονα και την συχνότητα και την τάση, όπως ειπώθηκε και στην παράγραφο 2.2 ονομάζονται **VFDs**(Variable frequency Drivers). Στην επόμενη παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζεται και αναλύεται εκτενέστερα η κυκλωματική και η ηλεκτρονική δομή τους. [14]

3.2 ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ-ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΥΠΙΚΟΥ VFD

Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει μια εκτενής ηλεκτρονική ανάλυση ενός VFD που θα μεταβάλλει την ταχύτητα περιστροφής ενός μονοφασικού ηλεκτρικού κινητήρα. Να αναφερθεί σε αυτό το σημείο πως η ηλεκτρονική διάταξη που θα αναλυθεί και θα εξηγηθεί στις παρακάτω παραγράφους είναι καθαρά και μόνο για πειραματικό και ερευνητικό σκοπό. Για αυτόν τον λόγο τα φορτία τα οποία θα χρησιμοποιηθούν είναι αρκετά χαμηλής ισχύος (μέχρι 60W). Αυτό γίνεται γιατί το κύκλωμα είναι αρκετά χαμηλό σε ισχύ παρόλο που τροφοδοτείται από το δίκτυο και αφετέρου, διότι ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η κατανόηση της λειτουργίας των VFDs.



Εικόνα 3.4 Κυκλωματική δομή μονοφασικού VFD



Εικόνα 3.5 Κυκλωματική δομή τριφασικού VFD

Στο παραπάνω μπλοκ διάγραμμα είδαμε την δομή ενός VFD και στις εικόνες 3.4-3.5 φαίνεται η ηλεκτρονική και κυκλωματική δομή ενός VFD. Στην εικόνα 3.4 ο VFD προορίζεται για μονοφασική παροχή, ενώ αντιθέτως στην εικόνα 3.5 για τριφασική παροχή. Παρόλα αυτά η δομή και των δυο είναι ακριβώς η ίδια. Στην αρχή, αναφορικά και με το μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας, η τάση του δικτύου ανορθώνεται με την χρήση ενός ανορθωτή γέφυρας και στη

συνέχεια η ανορθωμένη τάση μετατρέπεται σε συνεχή με την βοήθεια ενός πυκνωτή εξομάλυνσης. Η τιμή της συνεχούς τάσης του πυκνωτή είναι αυτή που παρέχεται και στους διακόπτες που ελέγχουν τον κινητήρα. Η τιμή της τάσης είναι:

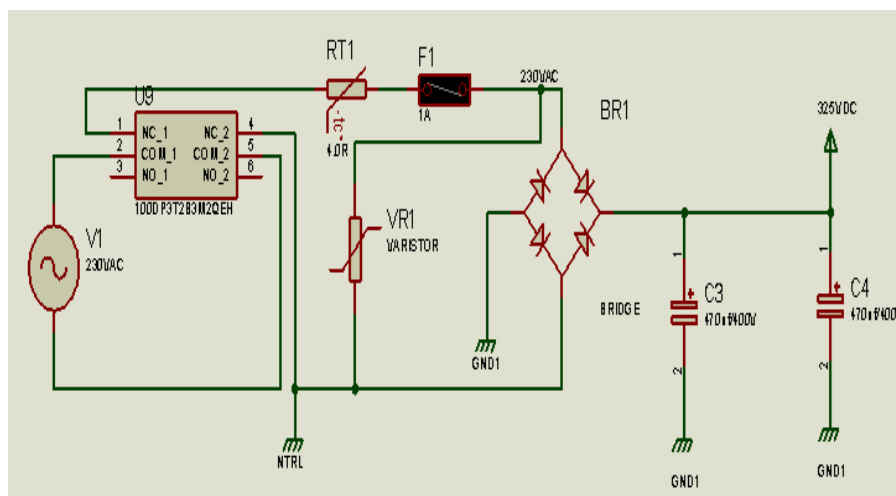
$$V_p = V_{RMS} * 1.4. \quad (3.1)$$

Συγκεκριμένα για το δίκτυο της ΔΕΗ αφού η RMS τάση είναι 230V τότε η τιμή της κορυφής του ημιτόνου και συνεπώς η τάση παροχής στη γέφυρα Η BRIDGE θα είναι ίση με $230 * 1.4 = 325VDC$. Κατόπιν αυτή η τάση μετατρέπεται σε παλμική με θετικό πλάτος και αρνητικό πλάτος αντίστοιχα. Ο έλεγχος καθώς και η παραγωγή των παλμών γίνεται αποκλειστικά από μονάδα επεξεργαστή όπως αναφέρθηκε και στο παραπάνω μπλοκ διάγραμμα. Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει και κύκλωμα ανάδρασης από την γέφυρα προς τον επεξεργαστή. Τέλος στην έξοδο υπάρχει ένα χαμηλοπερατό φίλτρο προκειμένου η παλμική τάση να μετατραπεί σε ημιτονοειδή.

Στις παρακάτω επιμέρους παραγράφους παρατίθεται και αναλύεται το κάθε επιμέρους ηλεκτρονικό κύκλωμα ξεχωριστά με βάση αυτά που ειπώθηκαν στην παράγραφο 3.2.[17][16]

3.2.1 ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρατεθεί το κύκλωμα που μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή και παρέχει την συνεχή αυτή τάση που ισούται με την τιμή της κορυφής της ημιτονοειδούς τάσης στους διακόπτες.

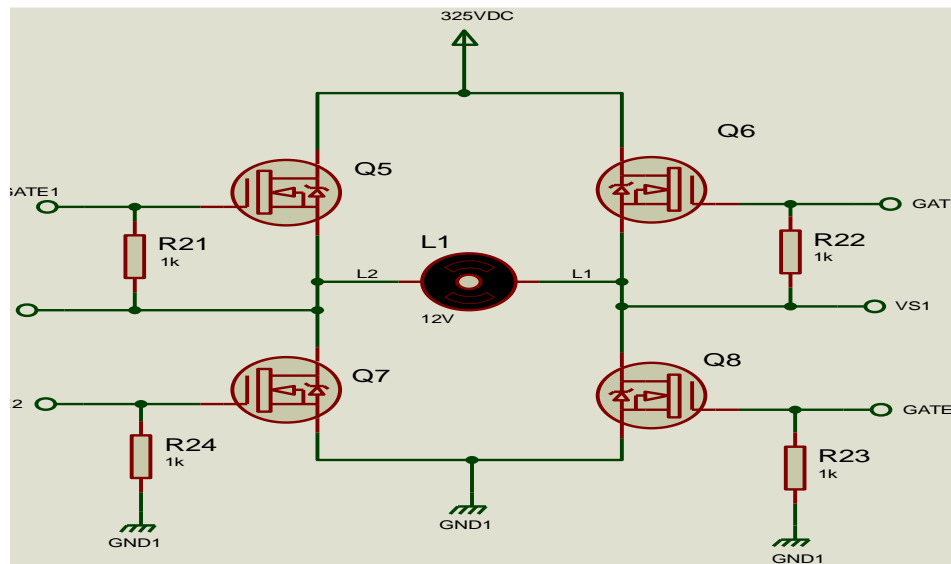


Εικόνα 3.6 Ανορθωτής τάσης δικτύου

Στην παραπάνω εικόνα διακρίνεται το κύκλωμα το οποίο παρέχει την συνεχή απαιτούμενη τάση των **325VDC** στους διακόπτες. Η δομή του καθώς και η λειτουργία του είναι αρκετά απλή. Στην έξοδο του ανορθωτή υπάρχουν μόνο θετικές ημιπερίοδοι της τάσης του δικτύου και με την βοήθεια δυο παράλληλων πυκνωτών εξομάλυνσης που η τιμή τους είναι 470µF/400V ο καθένας δημιουργούν μια συνολική χωρητικότητα στα άκρα του ανορθωτή στα 840µF και έτσι η κυμάτωση που δημιουργείται είναι ελάχιστη και δεν επηρεάζει καθόλου την παραγόμενη DC τάση που δημιουργείτε κατά την φόρτιση και εκφόρτωση των πυκνωτών. Τέλος μετά τον διακόπτη U9 υπάρχει ένα θερμίστορ NTC που η τιμή του είναι 50Ωm και εξυπηρετεί στον περιορισμό του ρεύματος εισροής που δημιουργείται κατά την φόρτιση των πυκνωτών. Επιπλέον υπάρχει σε σειρά μια ασφάλεια 1A για ευνότητες λόγους.

Τέλος παράλληλα με την γέφυρα και μετά από την ασφάλεια υπάρχει ένα βαρίστορ στα 275V το οποίο προστατεύει το υπόλοιπο κύκλωμα από υπερτάσεις του δικτύου. Αν για οποιοδήποτε λόγο η τάση του δικτύου ξεπεράσει αυτή την τιμή τότε το βαρίστορ συμπεριφέρεται σαν βραχυκύκλωμα και αυτό θα έχει ως συνέπεια ένα πολύ μεγάλο ρεύμα να περάσει μέσα από την ασφάλεια με αποτέλεσμα την τήξη της ασφάλειας που με την σειρά του θα προστατέψει όλο το υπόλοιπο κύκλωμα.

3.2.2 ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ H-BRIDGE



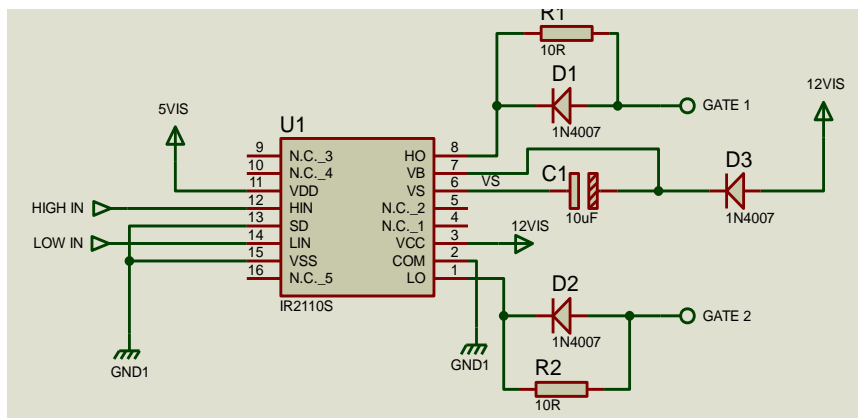
Εικόνα 3.7 H-BRIDGE

Παραπάνω στην εικόνα 3.7 φαίνονται οι διακόπτες σε συνδεσμολογία H-BRIDGE. Οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται όπως φαίνεται και στην εικόνα είναι N-channel Mosfet. Το φορτίο συνδέεται πάντα στην μέση της γέφυρας. Αυτή η τοπολογία, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, χρησιμοποιείται κατά κόρον στους inverters προκειμένου να δημιουργηθεί εναλλασσόμενο ρεύμα στο φορτίο. Η ροή ρεύματος στην γέφυρα γίνεται << χιαστί>>. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου αυτή η τοπολογία μπορεί να χρησιμοποιεί και για έλεγχο DC κινητήρων και συγκεκριμένα για έλεγχο φοράς περιστροφής καθώς υπάρχει δυνατότητα αντιστροφής πολικότητας. Τα Q5 και Q6 αποτελούν την υψηλή πλευρά της γέφυρας (**high side**) ενώ τα Q7 και Q8 την χαμηλή πλευρά (**Low side**). Στην αρχή παρέχονται παλμοί στα **GATE 1** και **GATE 3** και έτσι τα Q5 και Q8 είναι σε κατάσταση αγωγής με μια μικρή πτώση τάσης στα άκρα τους. Έτσι ρέει ρεύμα από την τροφοδοσία στο Q5 στο φορτίο και μέσω του Q8 στην γείωση. Στην επόμενη φάση παρέχονται παλμοί στα **GATE 2** και **GATE 4**. Τώρα αντίστοιχα τα Q6 και Q7 είναι σε κατάσταση αγωγής ενώ τα Q5 και Q8 είναι σε αποκοπή. Έτσι συνεπώς τώρα η ροή ρεύματος γίνεται από την τροφοδοσία μέσω του Q6 στο φορτίο και μέσω του Q7 στη γείωση. Το μόνο πρόβλημα με αυτήν την συνδεσμολογία είναι πως τα Q5, Q6 (**high side**) δεν έχουν αναφορά ως προς την γείωση (floating ground) και έτσι ενώ μπορεί παρέχονται παλμοί στα Q5, Q6 αυτά δεν μπορούν να έρθουν σε αγωγή γιατί η τάση στην πύλη (G) με την τάση στη πηγή (S) είναι ίδιες και συνεπώς δεν ρέει ρεύμα από τα Q5, Q6. Για να μπορούν τα Q5, Q6 να έρθουν σε κατάσταση αγωγής θα πρέπει να ισχύει η εξής συνθήκη:

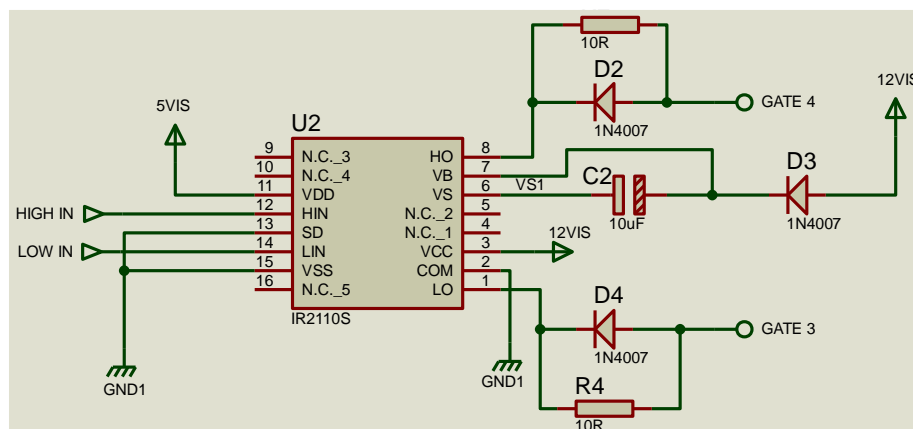
$$V_G > V_S + 15V \quad (3.2)$$

3.2.3 HIGH-LOW SIDE DRIVE

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε το πρόβλημα οδήγησης των δυο διακοπών από την πλευρά της τροφοδοσίας καθώς δεν υπάρχει σταθερή αναφορά στις πηγές(S) των δυο διακοπών της υψηλής πλευράς. Το ζήτημα αυτό ονομάζεται στην αγγλική **floating ground**. Για αυτόν τον λόγο υπάρχουν ειδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα που με κάποια παθητικά εξαρτήματα (πυκνωτές και διόδους) δημιουργούν μια πτώση τάσης μεταξύ πύλης- πηγής μεγαλύτερη από περίπου 10-15 Volt έτσι ώστε να μπορούν με την σειρά η υψηλή πλευρά (high side) να έρθει σε κατάσταση αγωγής όταν παρέχονται παλμοί στις αντίστοιχες πύλες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **Bootstrap**.



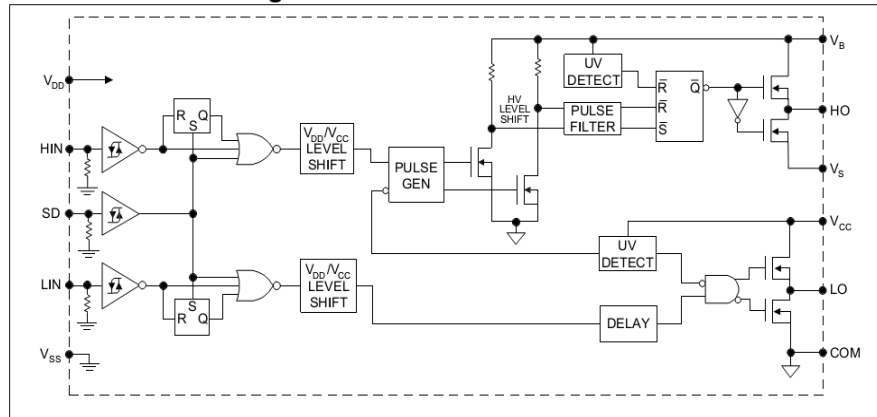
Εικόνα 3.8 LEFT SIDE HIGH-LOW SIDE DRIVE



Εικόνα 3.9 RIGH SIDE HIGH-LOW SIDE DRIVE

Παραπάνω στις εικόνες 3.8-3.9 βλέπουμε τα δυο ολοκληρωμένα κυκλώματα που οδηγούν την υψηλή και χαμηλή πλευρά και από τις δυο πλευρές της γέφυρας. Τα ολοκληρωμένα αυτά έχουν κωδικό **IR2110** και ονομάζονται **HIGH-LOW SIDE DRIVERS** και κυρία χρήση τους είναι η οδήγηση της κάθε πλευράς της γέφυρας ξεχωριστά. Η δημιουργία της επιπλέον τάσης στην πύλη των διακοπών της υψηλής πλευράς επιτυγχάνεται με το δικτύωμα διόδου-πυκνωτή στην ακίδα 6(Vb) του κάθε ολοκληρωμένου. Συγκεκριμένα για την αριστερή πλευρά (εικόνα 2.4) η τάση bootstrap διαμορφώνεται από τον πυκνωτή C2 και την διόδο D3 ενώ αντίστοιχα για την δεξιά πλευρά (εικόνα 2.5) **C2-D3**. Για να γίνει όμως πιο κατανοητή και πιο σαφής η λειτουργία του bootstrap ας γίνει μια αναφορά στο εσωτερικό ηλεκτρονικό μπλοκ διάγραμμα του IR2110.

Functional Block Diagram

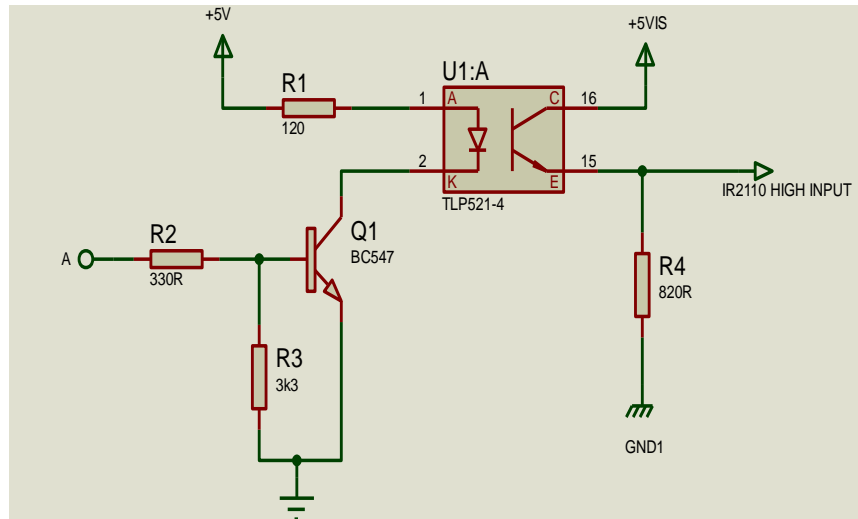


Εικόνα 3.10 Εσωτερικό κύκλωμα IR2110

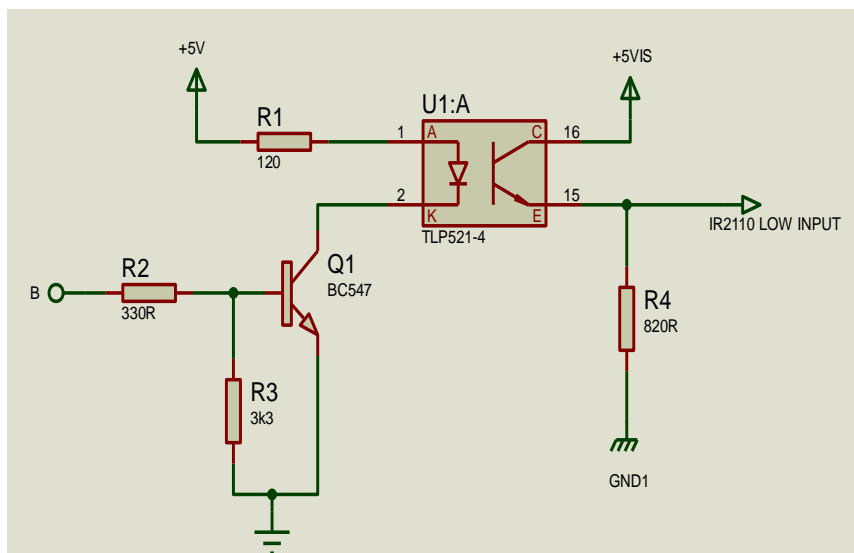
Για την αριστερή πλευρά της γέφυρας τα παθητικά στοιχεία που διαμορφώνουν την τάση bootstrap είναι D3, C2 ενώ για την δεξιά πλευρά αντίστοιχα D3, C1. Αντίστοιχα LIN, HIN είναι οι είσοδοι που ενεργοποιούν την χαμηλή πλευρά και υψηλή πλευρά αντίστοιχα. Όταν LIN βρίσκεται σε κατάσταση high και οι διακόπτες της χαμηλής πλευράς επίσης σε κατάσταση high, τότε οι πυκνωτές C1, C2 φορτίζονται στο επίπεδο τάσης ίση με V_b το οποίο είναι περίπου 0.7V κάτω από το επίπεδο της τροφοδοσίας (12VIS). Όταν τώρα LIN=0, HIN=1 η τάση των πυκνωτών προστίθεται στα πύλη(G) των Mosfet της υψηλής πλευράς. Οι πυκνωτές του bootstrap πρέπει να έχουν μια μεγάλη τιμή προκειμένου να παρέχουν συνεχώς την απαραίτητη τάση στα GATE της υψηλής πλευράς. Συνεπώς για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται πυκνωτές τανταλίου καθώς μπορούν να αλλάζουν αρκετά γρήγορα κατάσταση. Οι αντιστάσεις 100ohm που οδηγούν τα GATE περιορίζουν το μεγάλο ρεύμα των GATE των Mosfet καθώς αυτά έχουν παρασιτικές χωρητικότητες. Τέλος οι δίοδοι παράλληλα σε αυτές τις αντιστάσεις αποφορτίζουν αυτές τις παρασιτικές χωρητικότητες μειώνοντας σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο ενεργοποίησης (turn on time) των Mosfet.

3.2.4 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ- MOSFET DRIVERS

Τα σήματα (παλμοί) που παρέχονται στους drivers που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.3 παράγονται από έναν επεξεργαστή. Η στάθμη των σημάτων του επεξεργαστή είναι +3.3V. Το κύκλωμα με τους διακόπτες καθώς και με την μονάδα οδήγησης της γέφυρας αποτελεί ένα κύκλωμα ισχύος που δουλεύει σε στάθμες τάσης και ρεύματος πολύ πιο υψηλές από αυτές του επεξεργαστή. Για αυτόν τον λόγο καθώς και για άλλους λόγους ασφάλειας του επεξεργαστή κρίνεται αναγκαία η γαλβανική απομόνωση του κυκλώματος ελέγχου (επεξεργαστή) από το κύκλωμα ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση άλλων ολοκληρωμένων που ονομάζονται **οπτό ζευκτές**(photo couplers). Έτσι τώρα το κύκλωμα του επεξεργαστή δεν διατρέχει κανέναν κίνδυνο να καταστραφεί από οποιαδήποτε αστοχία στο κύκλωμα ισχύος. Η μεταφορά του σήματος στο κύκλωμα ισχύος γίνεται με την μορφή υπεριώδους φωτός και όχι με την χρήση ηλεκτρικού σήματος καθώς αυτή είναι η βασική αρχή λειτουργίας των οπτό ζευκτών η αλλιώς απομονοτών. Στις παρακάτω εικόνες παρατίθεται οι συνδεσμολογίες με τους οπτό ζευκτές.



Εικόνα 3.11 Διασύνδεση IR2110 και επεξεργαστή

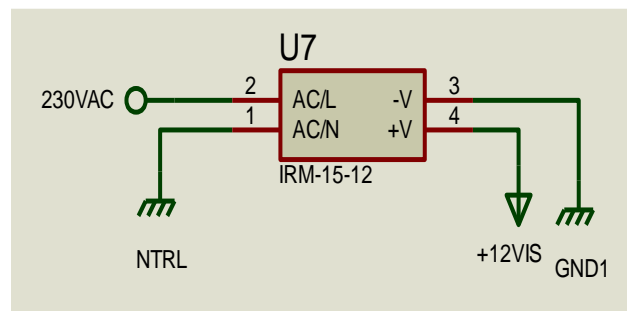


Εικόνα 3.12 Διασύνδεση IR2110 και επεξεργαστή

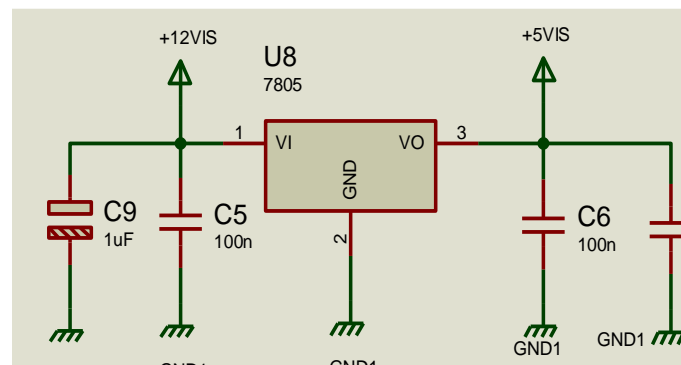
Στις εικόνες 3.11-3.12 παρατηρούμε πως γίνεται η διασύνδεση του κυκλώματος ελέγχου με το κύκλωμα ισχύος. Η δομή και η λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής: Όταν δεν παρέχεται κάποιος παλμός στις Εισόδους A η B ,που είναι συνδεδεμένοι μέσω δυο αντιστάσεων στην βάση ενός τρανζίστορ, το τρανζίστορ Q1 είναι σε αποκοπή και έτσι δε ρέει ρεύμα από την αντίσταση R1 μέσω του εσωτερικού LED του οπτό ζευκτή προς την γείωση. Ως συνέπεια δεν ενεργοποιείται το εσωτερικό τρανζίστορ του TLP521 και ως αποτέλεσμα η έξοδος είναι σε χαμηλό δυναμικό (0V). Αντίθετα όταν εφαρμοστεί υψηλό δυναμικό στο τρανζίστορ Q1 αυτό έρχεται σε κατάσταση κόρου και έτσι ρέει ρεύμα από την αντίσταση R1 μέσω του εσωτερικού LED του TLP521 προς την αριστερή γείωση του κυκλώματος. Το εσωτερικό τρανζίστορ του TLP521 ενεργοποιείται και έτσι στα άκρα της αντίστασης R4 εμφανίζεται υψηλό δυναμικό που με την σειρά του οδηγεί τις εισόδους των IR2110. Οι αντιστάσεις που έχουν τιμή 330Ohm στη βάση των τρανζίστορ αποσκοπούν στον περιορισμό του ρεύματος της βάσης, ενώ οι αντιστάσεις που έχουν τιμή 3.3K χρησιμοποιούνται για προστασία προκειμένου τα τρανζίστορ να μην έρθουν σε κατάσταση αγωγής από τυχαία σήματα θορύβου που δημιουργούνται εξαιτίας παρασιτικών χωρητικοτήτων των τρανζίστορ.

3.2.5 ΠΑΡΟΧΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΣΤΑ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

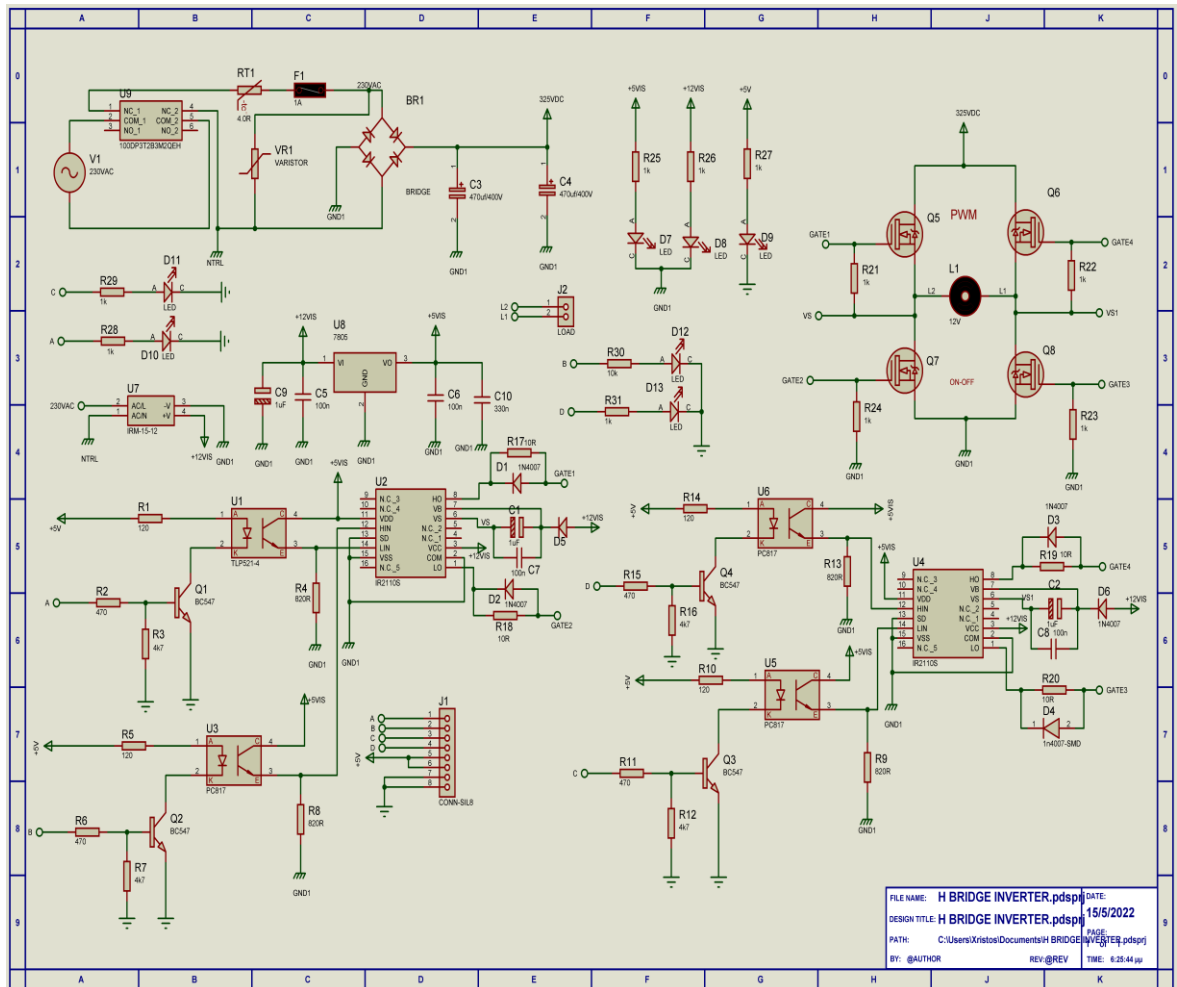
Το κύκλωμα ελέγχου (αριστερή πλευρά photo coupler) τροφοδοτείται από συνεχή τάση +5VDC η οποία προέρχεται από ακίδα στην πλακέτα του επεξεργαστή. Όσον αναφορά το κύκλωμα ισχύος με την γέφυρα απαιτούνται δυο στάθμες τροφοδοσίας οι οποίες πρέπει να είναι τελείως απομονωμένες από αυτή του επεξεργαστή. Αυτές τροφοδοτούν τους IR2110 και είναι +5VDC, +15VDC. Η τάση τροφοδοσίας των +15VDC προέρχεται από ένα τροφοδοτικό πλακέτας ενώ η τάση των +5VDC προέρχεται από έναν γραμμικό σταθεροποιητή που τροφοδοτείται από τα +15VDC όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



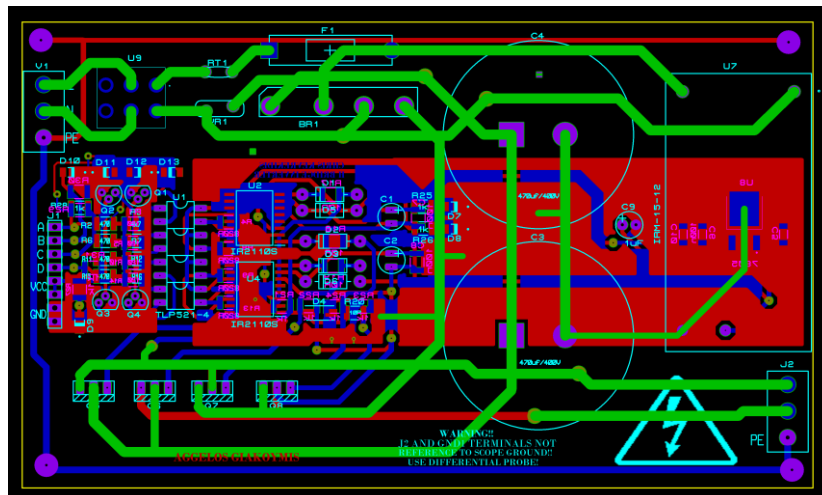
Εικόνα 3.13 Παροχή Τάσης +15VDC



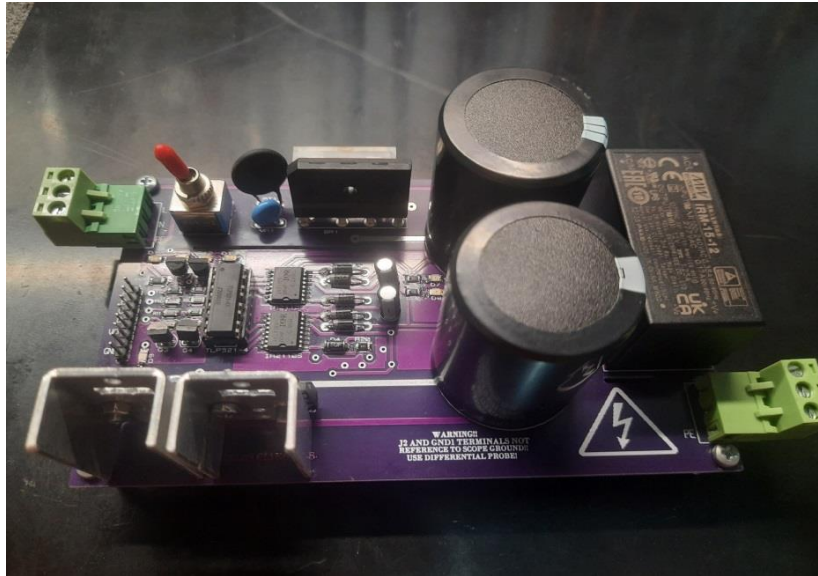
Εικόνα 3.14 Παροχή τάσης +5VDC



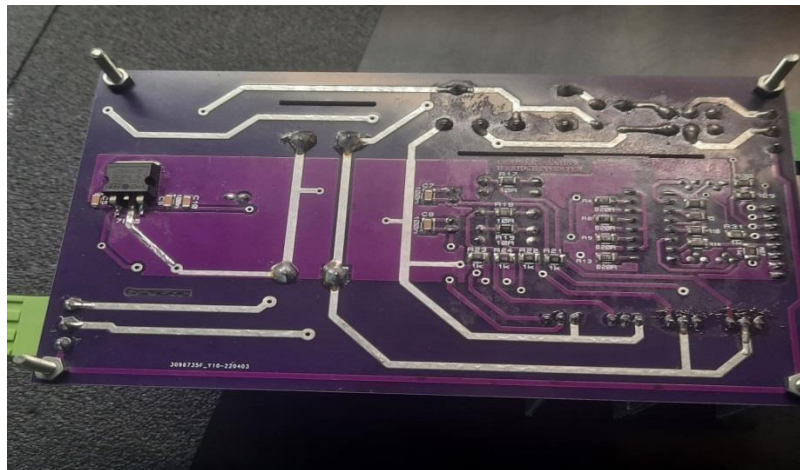
Εικόνα 3.15 Το πλήρες σχέδιο



Εικόνα 3.16. Σχέδιο πλακέτας VFD H BRIDGE στο λογισμικό Proteus 8.10



Εικόνα 3.17 Top layer VFD PCB



Εικόνα 3.18 Bottom Layer VFD PCB

Παραπάνω στις εικόνες 3.16-3.18 διακρίνεται το σχέδιο της πλακέτας στο σχεδιαστικό πακέτο **Proteus 8.10** καθώς και η άνω και κάτω όψη του τυπωμένου κυκλώματος(PCB). Η σχεδίαση έγινε για λόγους ευκολίας και οικονομίας χώρου σε 2 layer και επίσης με SMD εξαρτήματα. Κατά την σχεδίαση τηρήθηκαν όλοι οι απαιτούμενοι κανόνες για τον διαχωρισμό της υψηλής τάσης της γέφυρας από το κύκλωμα ελέγχου. Η απόσταση των δυο μεγάλων ρευματοφόρων αγωγών (φάση και ουδέτερος), που είναι επίσης επικασσιτερωμένοι, είναι μεγαλύτερη από 7 mm προκειμένου να αποφευχθεί οποιοδήποτε arcing λόγω υψηλής τάσης. Όλοι οι αγωγοί που τροφοδοτούν την γέφυρα, καθώς και αυτοί που συνδέονται στο φορτίο φέρουν κασσίτερο στην επιφάνεια τους προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή τους σε αρκετά μεγάλο ρεύμα. Τέλος υπάρχουν μεγάλες ορθογώνιες τρύπες (slot drills) μεταξύ υψηλής τάσης και χαμηλής τάσης προκειμένου να υπάρχει καλύτερη ηλεκτρική μόνωση.

3.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει μια αναφορά στα κριτήρια επιλογής κάποιων παθητικών εξαρτημάτων. Γνωρίζοντας πως η ενεργός τάση του δικτύου είναι ίση με 230V η κορυφή της τάσης θα ισούται με:

$$V_{PEAK} = 1.41 * V_{RMS} \quad (3.1)$$

Αντικαθιστώντας όπου $V_{RMS} = 230V$ υπολογίζουμε πως

$$V_{PEAK} = 325V$$

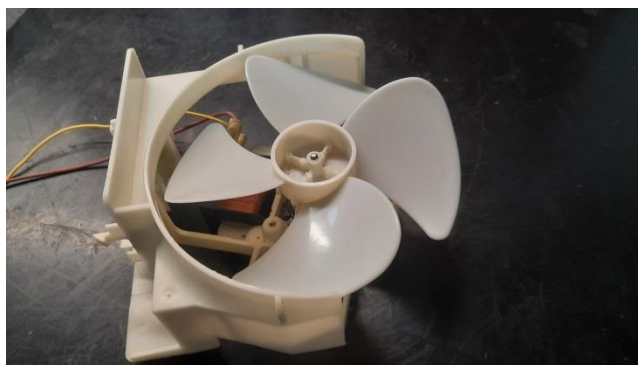
Η μέγιστη τάση των Mosfet και του ανορθωτή ισούται με:

$$V_{MAX} = 2 * V_{PEAK} \quad (3.2)$$

Αντικαθιστώντας όπου $V_{PEAK} = 325V$

$$V_{MAX} = 2 * 325V = 650V$$

Με βάση αυτά τα στοιχεία ο ανορθωτής γέφυρας επιλέγεται στα **600V-15A**.



Εικόνα 3.19 Κινητήρας (ανεμιστήρας 18W)



Εικόνα 3.20 Κινητήρες 50W

Στις φωτογραφίες 3.19-3.20 διακρίνονται οι κινητήρες που θα χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα μετρήθηκε με αμπερόμετρο πως το ρεύμα του άσπρου ανεμιστήρα ισχύος 18W στα 50Hz είναι ίσο με 120mA, ενώ για τους μαύρους ανεμιστήρες το ρεύμα στα 50Hz είναι ίσο με 300mA. Βάσει αυτών των μετρήσεων μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες ισχύος των τρανζίστορ στα 50Hz. Θέτοντας μια μέγιστη αντίσταση αγωγής $R_{DS(ON)} = 80m\Omega$ οι απώλειες σε ισχύ θα ισούται με:

$$P_{\text{LOSS}} = I_{\text{DS}} * R_{\text{DS (ON)}} \quad (3.3)$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα των μετρήσεων στην 3.3 υπολογίζουμε τις απώλειες σε ισχύ και για τους τρεις κινητήρες. Συγκεκριμένα:

$$P_{\text{LOSS (18W)}} = 0.12\text{A} * 0.08\Omega = 0.0096 = 9.6\text{mW}$$

$$P_{\text{LOSS (50W)}} = 0.3 * 0.08\Omega = 0.024 = 24\text{mW}$$

Βάσει των παραπάνω υπολογισμών, το Mosfet που επιλέχθηκε για αυτό τον σκοπό έχει κωδικό **IPA60R099P7XKSA1** της **IFNEON TECNOLOGIES** και έχει μέγιστη τάση διάσπασης (V_{DSBD}) **650 Vrms** και μέγιστο ρεύμα αγωγής (I_{DSMAX}) **31A**. Σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των Mosfet ισχύος είναι πως υπάρχει αντί-παράλληλη δίοδος ελεύθερης ροής ενσωματωμένη. Η παρουσία της κρίνεται αναγκαία καθώς το φορτίο είναι καθαρά επαγωγικό. Η αντίσταση αγωγής του Mosfet ανέρχεται στα 77m Ohm. Η γέφυρα ανόρθωσης επιλέγεται στα 600V, 15A. Όσον αναφορά στο κομμάτι διασύνδεσης επεξεργαστή-κύκλωμα ισχύος χρήζει ιδιαίτερης προσοχής η επιλογή των **opto couplers**. Συγκεκριμένα, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αναφορά τους χρόνους μετάβασης (**RISING-FALLING TIME**). Με άλλα λόγια αυτό που επιθυμούμε στους οπτό- ζεύκτες είναι ο χρόνος ενεργοποίησης του εσωτερικού τρανζίστορ να είναι όσον το δυνατό μικρός έτσι ώστε το σήμα που εισέρχεται στις εισόδους των IR2110 να είναι αναλλοίωτο. Για τον λόγο αυτό επιλέγεται ο TLP521-4 ο οποίος διαθέτει τέσσερα κανάλια καθώς και χρόνο μετάβασης 3us. Τέλος η μέγιστη τάση απομόνωσης ανέρχεται στα 2500V.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΛΕΓΧΟΥ

4.1 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ- ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΙΣΟΔΩΝ ΕΞΟΔΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παράθεση του λογισμικού (software) που υλοποιήθηκε προκειμένου να διεκπεραιωθεί αυτό το έργο. Η διάταξη του κυκλώματος ισχύος δε θα μπορούσε να αποδώσει αν δεν υπήρχε και το απαραίτητο λογισμικό καθώς και ο απαραίτητος επεξεργαστής που θα ελέγχει την συνολική λειτουργία του κυκλώματος ισχύος και συνεπώς του κινητήρα.

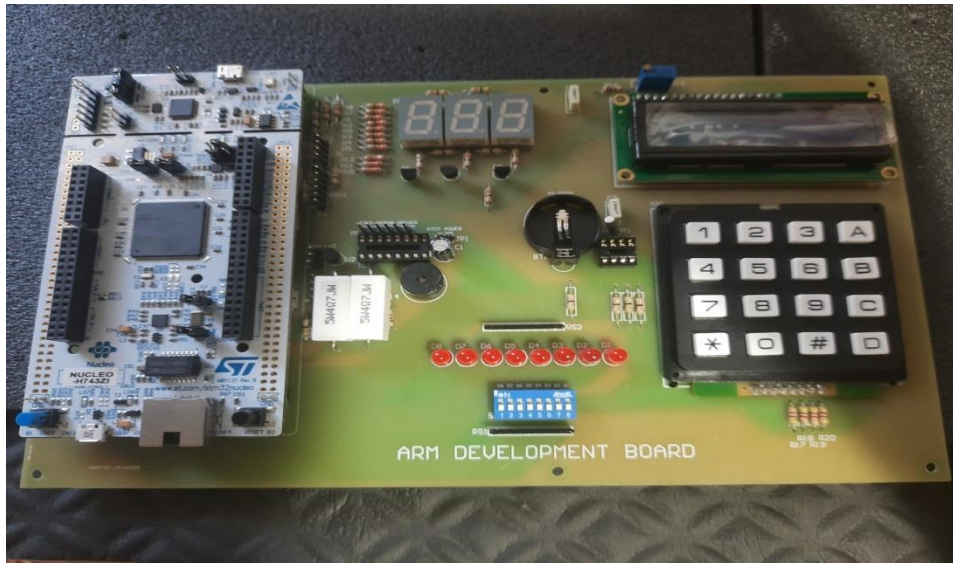
Πιο αναλυτικά η μόνη λειτουργία που επιτελεί ο επεξεργαστής είναι παραγωγή ενός τετραγωνικού παλμού PWM με μεταβλητό κύκλο εργασίας (duty cycle) καθώς και με μεταβλητή συχνότητα γιατί όπως ειπώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ο έλεγχος της ταχύτητας γίνεται με έλεγχο της συχνότητας. Ο έλεγχος θα γίνεται αποκλειστικά και μόνο από τον χρήστη. Για αυτόν τον λόγο σε αυτό το σημείο θα παρατεθεί ξανά το σενάριο αυτής της διπλωματικής εργασίας που αφορά μόνο το κομμάτι του ελεγκτή, γιατί αυτό θα βοηθήσει παρακάτω στον καθορισμό όλων των περιφερειακών που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και των εισόδων εξόδων(GPIO).

Ο χρήστης με την χρήση ενός πληκτρολογίου 4x4 θα μπορεί να ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής. Παράλληλα σε μια οθόνη LCD θα απεικονίζονται η συχνότητα του κινητήρα καθώς αυτή θα αναγράφεται και στους δείκτες 7 τομέων. Ο έλεγχος θα μπορεί να γίνεται παράλληλα με το πληκτρολόγιο με εφαρμογή σε συσκευή android. Έτσι, τα περιφερειακά που θα χρησιμοποιηθούν μαζί με τον επεξεργαστή είναι τα παρακάτω:

- LCD οθόνη 2x16
- KEYPAD 4X4
- Δείκτες 7 τομέων(7 segment display), για απεικόνιση της συχνότητας
- Ενδεικτικά LED (power on)
- Buzzer 5VDC
- HC 05 Bluetooth module για έλεγχο της συχνότητας από εφαρμογή στο κινητό.

Ο επεξεργαστής που θα χρησιμοποιεί είναι ο **STM32H743ZIT6** της ARM του αναπτυξιακού μοντέλου **NUCLEO-H743ZI**. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του επεξεργαστή είναι τα εξής παρακάτω:

- 114 προγραμματιζόμενες ακίδες εισόδου εξόδου(GPIOs)
- Συχνότητα πυρήνα επεξεργαστή ARM στα 400MHZ
- Μνήμη flash στα 2Mbyte
- Μνήμη SRAM στα 1MByte
- Θύρα Ethernet στα 10/ 100 Mbps
- Ενσωματωμένος ST-LINK debugger-programmer
- Ονομαστική τάση λειτουργίας +3.3VDC
- Διασύνδεση I2C, CAN, SPI, UART, USART, USB, LIN



Εικόνα 4.1 Αναπτυξιακή πλακέτα NUCLEO H743ZI

Παραπάνω στην εικόνα 4.1 διακρίνεται η αναπτυξιακή πλακέτα που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της γέφυρας στο κύκλωμα ισχύος. Αριστερά διακρίνεται η αναπτυξιακή πλακέτα (άσπρη πλακέτα) του STM32H743ZIT6 ενώ δεξιά όλα τα περιφερειακά που θα χρησιμοποιηθούν εκτός από το ρολόι πραγματικού χρόνου και την μονάδα οδήγησης βηματικού κινητήρα (άσπρες αντιστάσεις ισχύος).

Στους παρακάτω πίνακες που ακολουθούν θα παρατεθούν όλες οι απαραίτητες ακίδες για κάθε περιφερειακό εξάρτημα που θα χρησιμοποιηθεί από την πλακέτα.

Για την οθόνη LCD 2x16 τα GPIO έχουν ως εξής:

ΑΚΙΔΑ GPIO	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
PF15	GPIO OUTPUT	LCD_RS
PE13	GPIO OUTPUT	LCD_E
PF14	GPIO OUTPUT	LCD_D4
PE11	GPIO OUTPUT	LCD_D5
PE9	GPIO OUTPUT	LCD_D6
PF13	GPIO OUTPUT	LCD_D7

Πίνακας 4.1 Διασύνδεση οθόνης LCD με τον STM32H43

Ομοίως για το πληκτρολόγιο 4x4 ισχύουν τα εξής:

ΑΚΙΔΑ GPIO	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
PF5	OUTPUT	COL_1
PF10	OUTPUT	COL_2
PF12	OUTPUT	COL_3
PD15	OUTPUT	COL_4
PA3	INPUT	ROW_1
PC0	INPUT	ROW_2
PC3	INPUT	ROW_3
PF3	INPUT	ROW_4

Πίνακας 4.2 Διασύνδεση πληκτρολογίου 4X4 με τον STM32

ΑΚΙΔΑ GPIO	ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
PF9	OUTPUT	LED_0
PF8	OUTPUT	LED_1
PF7	OUTPUT	LED_2
PE3	OUTPUT	LED_3
PE6	OUTPUT	LED_4
PE5	OUTPUT	LED_5
PE4	OUTPUT	LED_6
PE2	OUTPUT	LED_7
	OUTPUT	LED_8

Πίνακας 4.3 διασύνδεση leds- STM32

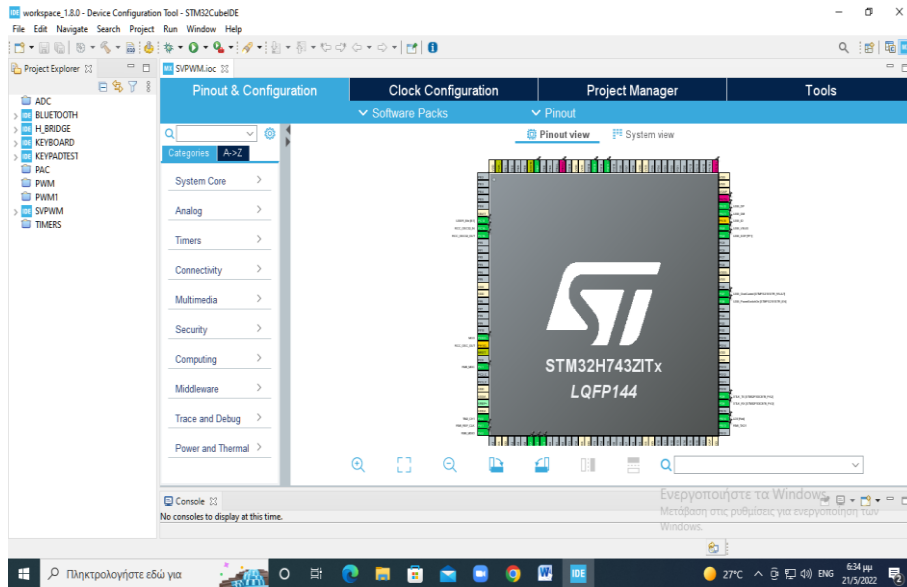
ΑΚΙΔΑ GPIO	ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
PC6	OUTPUT	SEG_A
PB15	OUTPUT	SEG_B
PD6	OUTPUT	SEG_C
PB12	OUTPUT	SEG_D
PA15	OUTPUT	SEG_E
PC7	OUTPUT	SEG_F
PB5	OUTPUT	SEG_G
PD0	OUTPUT	SEG_D.P
PA4	OUTPUT	MON_BJT
PB4	OUTPUT	DEK_BJT
PC2	OUTPUT	EKA_BJT

Πίνακας 4.4 Διασύνδεση 7 SEGMENTS DISPLAYS- STM32

Παραπάνω στους πίνακες 4.1-4.4 φαίνεται πως πρέπει να συνδεθούν τα περιφερειακά που θα χρησιμοποιηθούν στον STM32H43 καθώς και με ποιες ονομασίες θα πρέπει να δηλωθούν στο περιβάλλον του **STM32 Cube IDE** όπως θα αναφερθεί στην επόμενη παράγραφο.

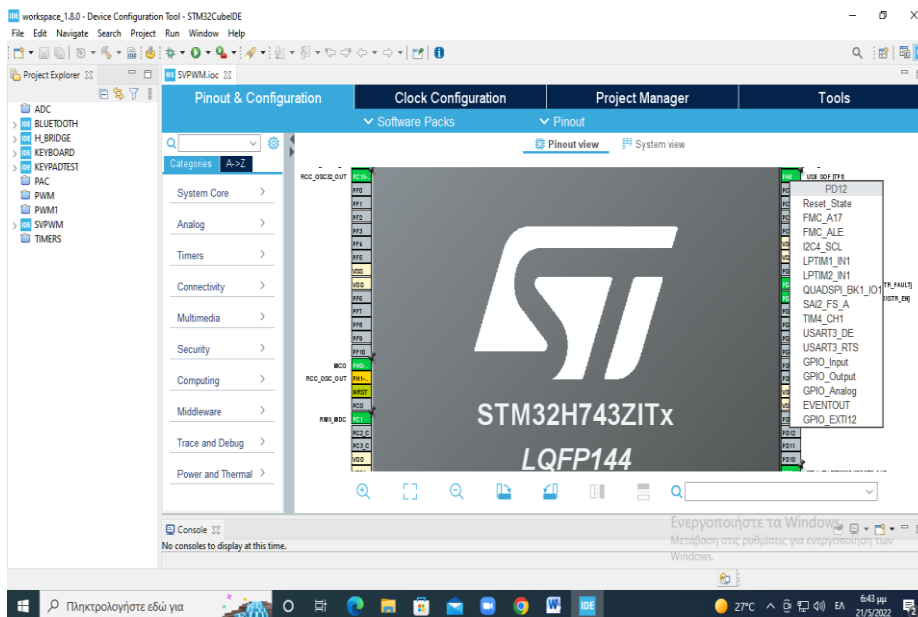
4.2 ΓΝΩΡΙΜΙΑ ΜΕ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ STM32 CUBE IDE

Στη παράγραφο που ακολουθεί θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί το περιβάλλον προγραμματισμού του STM32H743ZIT6. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτού του περιβάλλοντος, όπως θα φανεί και στις παρακάτω εικόνες, είναι πως δεν απαιτείτε η συγγραφή κώδικα για την δήλωση εισόδων κα εξόδων (INPUT-OUTPUT GPIO) καθώς αυτή γίνεται γραφικά με μια απλή επιλογή λειτουργίας κάθε ακίδας. Επιπλέον η επιλογή των διαθέσιμων χρονιστών (TIMERS) ,ο τρόπος λειτουργίας τους και βασικές παράμετροι(**Period register, Prescaler**) γίνονται επιλεκτικά και όχι προγραμματιστικά, γεγονός που είναι πιο εύκολο και ξεκούραστο στο χρήστη.



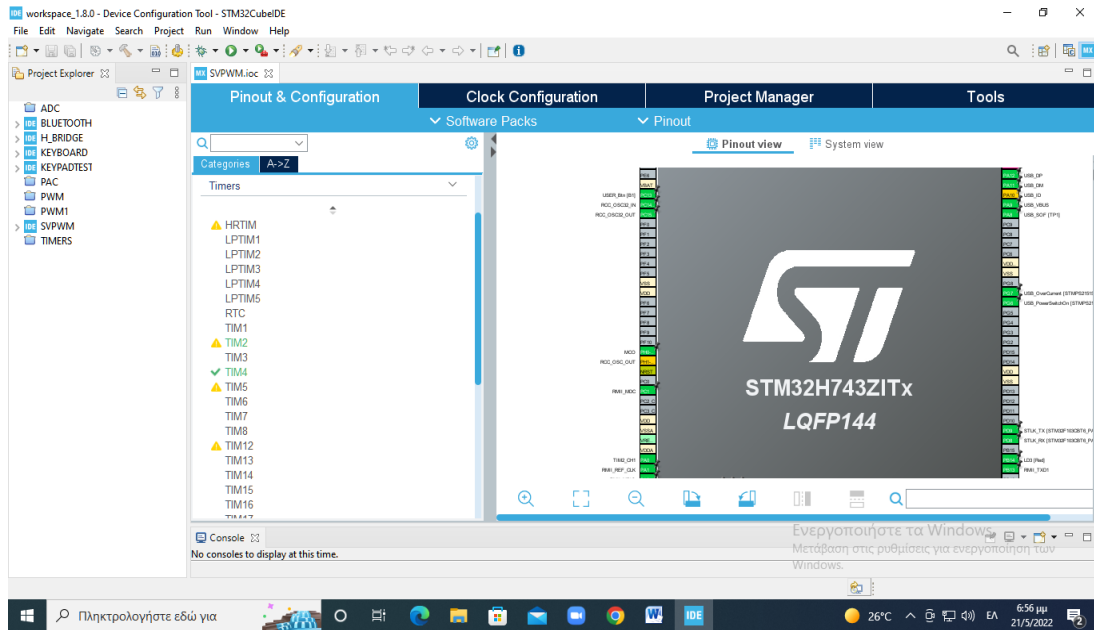
Εικόνα 4.2 IOC αρχείο του STM32 Cube Ide

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε το αρχείο IOC του Cube IDE. Σε αυτή την σελίδα ο χρήστης μπορεί να δηλώσει ποιές ακίδες επιθυμεί να χρησιμοποιήσει εκτός από αυτές που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής για την λειτουργία του.

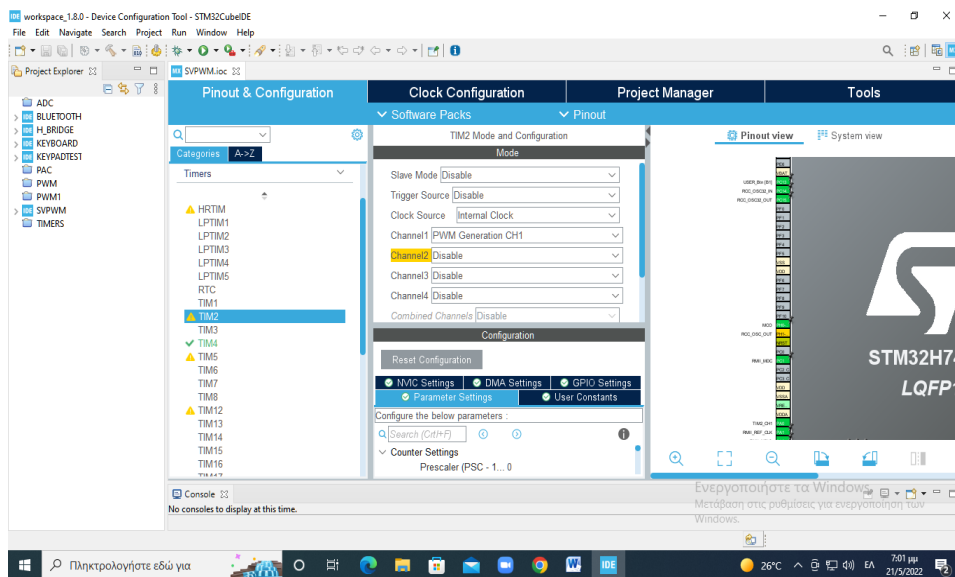


Εικόνα 4.3 Ορισμός λειτουργίας GPIO

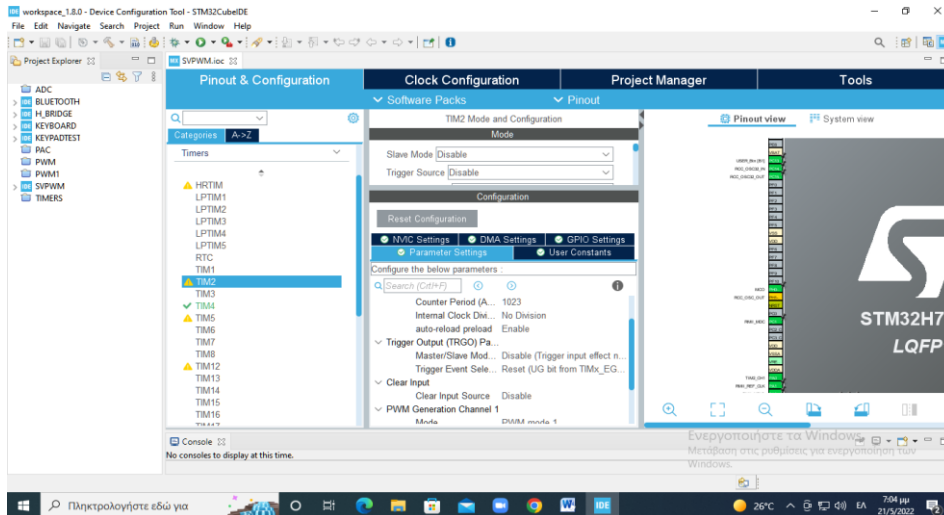
Στην εικόνα 4.3 βλέπουμε πως γίνεται η επιλογή λειτουργίας των διαθέσιμων GPIOs. Όπως ειπώθηκε και πιο πριν δεν απαιτείτε κάποια συγγραφή κώδικα παρά μόνο μια επιλογή ανάλογα με την λειτουργία που επιθυμεί ο χρήστης.



Εικόνα 4.4 Επιλογή και καθορισμός TIMERS



Εικόνα 4.5 Καθορισμός παραμέτρων TIMER

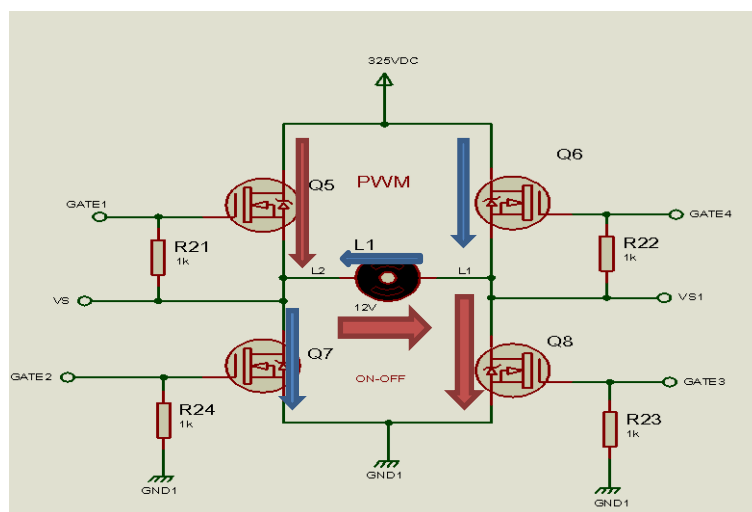


Εικόνα 4.6

Στις εικόνες 4.5-4.6 βλέπουμε πόσο απλά χωρίς τη συγγραφή κώδικα μπορεί ο χρήστης να ρυθμίσει τις παραμέτρους των TIMERS. Σε κάθε **TIMER** ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την πηγή χρονισμού (εσωτερικό ρολόι, εξωτερικά με κύκλωμα RC). Επίσης μπορεί να επιλέξει ποιο κανάλι του timer επιθυμεί να χρησιμοποιήσει καθώς και ποια λειτουργία επιθυμεί να επιτελέσει (**PWM**, **OUTPUT Compare**).

4.3 ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ

Σε αυτή την παράγραφο θα εξηγηθεί η λειτουργία καθώς και η δομή του κώδικα που κληθήκαμε να γράψουμε με σκοπό την υλοποίηση αυτής της εφαρμογής. Το πιο βασικό μέλημα του κώδικα είναι η παραγωγή των σημάτων για τον έλεγχο της γέφυρας Mosfet μέσω των IR2110 drivers. Για αυτόν τον λόγο είναι χρήσιμο να αναφερθεί ξανά η λειτουργία της γέφυρα των Mosfet.



Εικόνα 4.7 Ροή Ρεύματος στην Γέφυρα

Στην εικόνα 4.7 φαίνεται πως γίνεται η ροή ρεύματος με βέλη μέσα από τους διακόπτες και το φορτίο. Πλέον έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε ποιους διακόπτες πρέπει να έρθουν σε κατάσταση αγωγής και ποιους όχι. Ο τρόπος λειτουργίας έχει ως εξής: Όλοι οι διακόπτες δουλεύουν με παλμούς PWM καθώς είναι απαραίτητο η ύπαρξη του νεκρού χρόνου (Dead time) κατά τον οποίο όλοι οι διακόπτες είναι κλειστοί. Αυτό γίνεται προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος βραχυκυκλώματος της υψηλής τάσης των 325VDC προς την γείωση, εάν κατά σφάλμα ανοίξει κάποιος διακόπτης παραπάνω κατά την λειτουργία, από τους τέσσερις της γέφυρας.

Αναφορικά, ακολουθώντας τα κόκκινα βέλη, τα Q5 και Q8 πρέπει να έρθουν σε κατάσταση αγωγής όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι αυτό που πρέπει να γίνει είναι να παρέχουμε ένα σήμα PWM στο GATE1(Q5) και GATE3(Q8) προκειμένου να δημιουργηθεί μια ροή ρεύματος από το Q5 στο φορτίο και μέσω του Q8 στην γείωση. Αντίθετα τώρα, ακολουθώντας τα μπλε βέλη, τα Q6 και Q7 πρέπει να έρθουν σε κατάσταση αγωγής. Τώρα παρέχουμε ένα παλμό PWM στο GATE4(Q6) και GATE2(Q7). Τώρα η ροή ρεύματος θα είναι από τα +325VDC μέσω του Q6 στο φορτίο και μέσω του Q7 στην γείωση. Έτσι εναλλάσσοντας συνεχώς την ροή ρεύματος επιτυγχάνουμε μια παλμική τάση στο φορτίο που η πολικότητα της εναλλάσσεται βάσει της επιλογής της συχνότητας από το πληκτρολόγιο η της εφαρμογής στο κινητό τηλέφωνο.

ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Παρακάτω παρατίθεται εν συντομία ο κώδικας υπό μορφή βημάτων αλγορίθμου

1. Αρχικοποίηση οθόνης LCD
2. Αρχικοποίηση πληκτρολογίου
3. Ενεργοποίηση TIMER 7 για πολυπλεξία των 7 segment
4. Ενεργοποίηση TIMER2(PWM mode) , TIMER4 (DMA) για παράγωγη PWM
5. Έλεγχος συχνότητας από το πληκτρολόγιο, android app

Τα παραπάνω βήματα εκτελούνται από στην **main.c** και εκτελούνται μόνον όταν έχει γίνει ο σωστός καθορισμός των εισόδων εξόδων από το IOC αρχείο. Στον παρακάτω παρατίθεται πια από τα 8 LED θα χρησιμοποιηθούν.

	ΕΞΑΡΤΗΜΑ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ A/A	GPIO
POWER ON	LED	LED_3	PE3
SPEED OVER	LED	LED_5	PE5

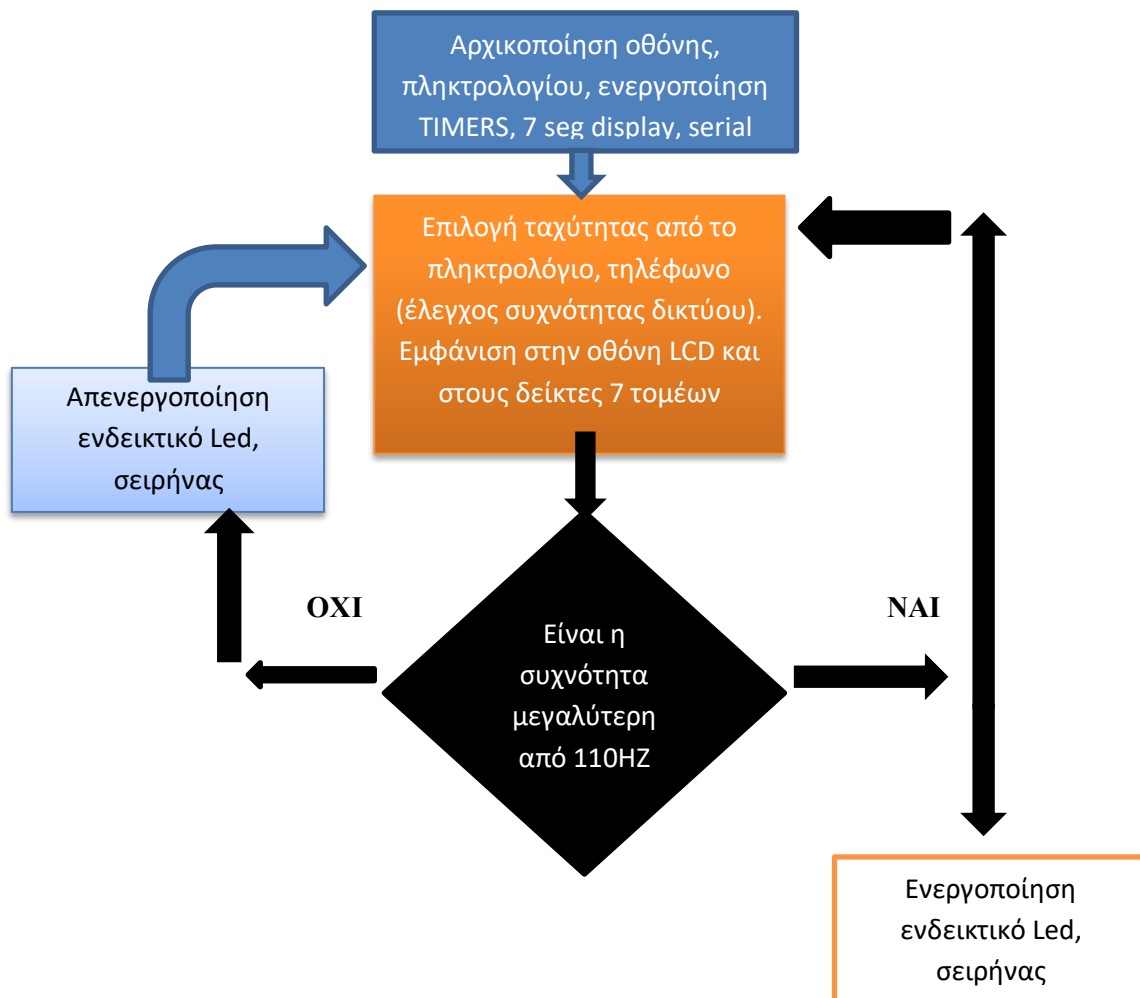
Πίνακας 4.5 Ενδεικτικά LED και BUZZER

Παρομοίως για την μονάδα Bluetooth HC 05 εκτός της τάσης τροφοδοσίας και γείωσης, χρησιμοποιούνται οι δυο παρακάτω ακίδες.

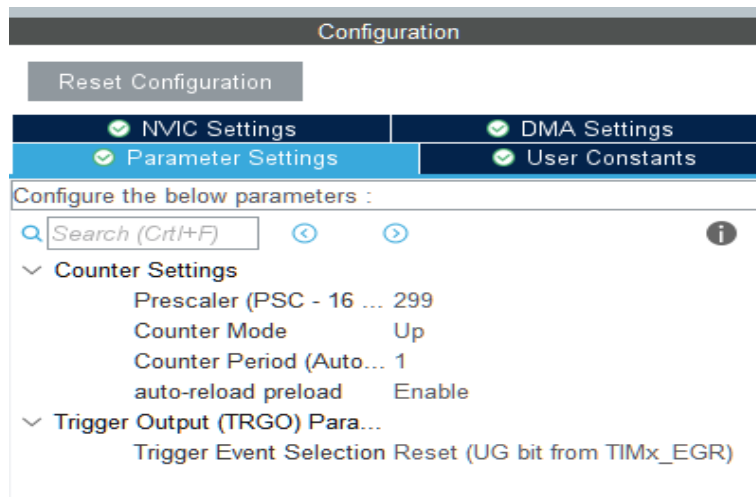
ΑΚΙΔΑ GPIO	ΧΡΗΣΗ
PG8	TX
PG9	RX

Πίνακας 4.6 Διασύνδεση HC-05 stm32

Αφού παρατέθηκε ο κώδικας υπό μορφή αλγορίθμου τώρα θα παρατεθεί και το διάγραμμα ροής του κώδικα προκειμένου να γίνει πιο σαφής και κατανοητός.



Παραπάνω φαίνεται ο κώδικας υπό μορφή διαγράμματος ροής. Αυτό θα βοηθήσει αργότερα στη συγγραφή της main.c. Να αναφερθεί πως για την οθόνη και το πληκτρολόγιο 4x4 το μόνο που χρειάστηκε ήταν μια ενσωμάτωση κάποιων απαραίτητων βιβλιοθηκών προκειμένου τα περιφερειακά αυτά να είναι λειτουργικά. Όσον αφορά τους δείκτες επτά τομέων το αυτό που χρειάστηκε είναι ένας TIMER ο οποίος παρέχει τον απαραίτητο χρονισμό προκειμένου να γίνει η πολυπλεξία που χρειάζονται οι δείκτες και να απεικονίσουν την τιμή της συχνότητας. Παρακάτω στις εικόνες φαίνεται η αρχικοποίηση του TIMER7, καθώς και οι ρυθμίσεις της σειριακής θύρας. Ο κώδικας αυτούσιος παρατίθεται στο παράρτημα καθώς και με άλλα χρήσιμα αρχεία.



Εικόνα 4.8 ρύθμιση TIMER7 για χρονοσμό πολυπλεξίας

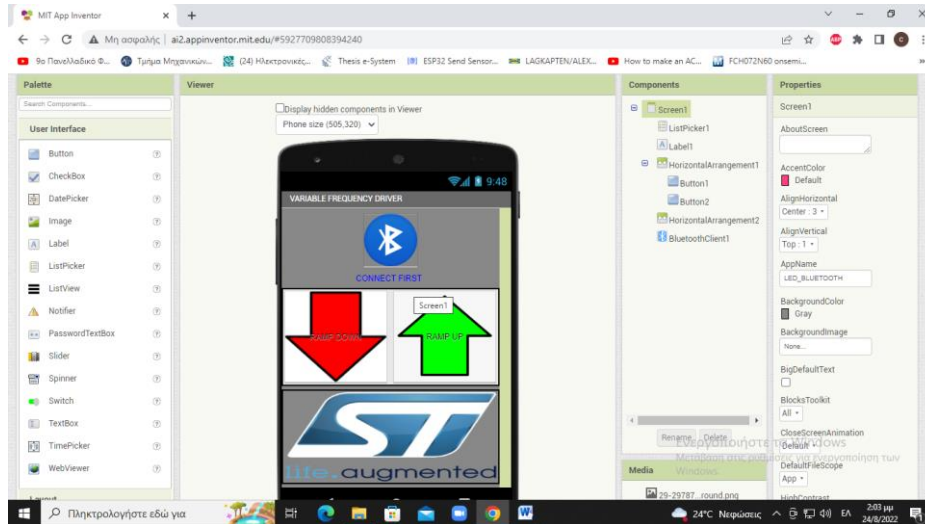


Εικόνα 4.9 Ρύθμιση παραμέτρων σειριακής θύρας

4.4 Έλεγχος συχνότητας από εφαρμογή σε συσκευή ANDROID

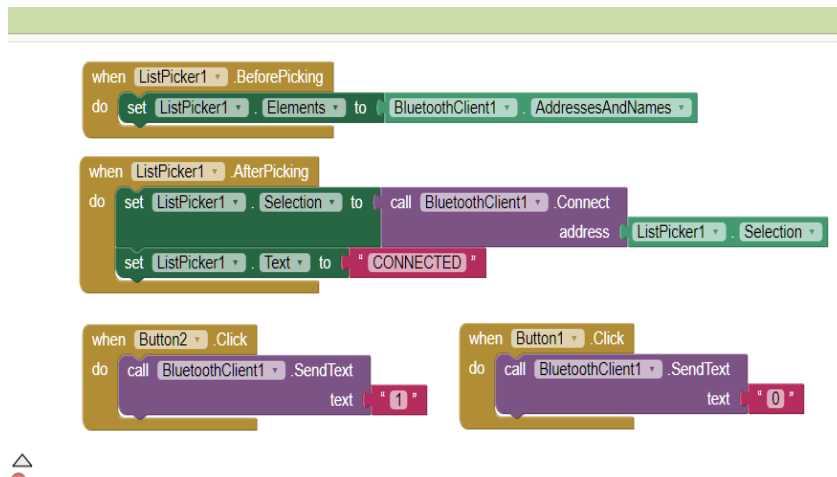
Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του λογισμικού MIT APP INVERTOR. Παράλληλα θα παρατεθεί και θα αναλυθεί σε εικόνες η εφαρμογή η οποία κάνει έλεγχο (αυξομείωση) της συχνότητας του κινητήρα, παράλληλα πάντα με το Keypad της αναπτυξιακής πλακέτας.

Το περιβάλλον MIT APP INVERTOR είναι ένα πολύ ισχυρό και ταυτόχρονα πολύ φιλικό προγραμματιστικό περιβάλλον που προορίζεται κατά κόρον σε προγραμματισμό android συσκευών. Όπως ειπώθηκε είναι πολύ φιλικό προς τον χρήστη διότι δεν απαιτεί την συγγραφή κάποιου κώδικα με τον κλασσικό τρόπο αλλά γραφικά με blocks. Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί πως είναι ένα πρόγραμμα online και μπορεί να ενεργοποιηθεί άνετα από κάποιον browser όπως το Google η το Mozilla. Η μόνη εγκατάσταση που χρειάζεται είναι ο emulator ο οποίος κάνει προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο το πρόγραμμα που έχει γραφεί σε μορφή blocks. Ανοίγοντας τον MIT APP INVERTOR εμφανίζεται το εξής παράθυρο



Εικόνα 4.10 Όψη Σχεδιασμού MIT APP INVERTOR

Σε αυτό το παράθυρο σχεδιάζεται η εικόνα της εφαρμογής όπως επιθυμεί ο χρήστης να εμφανίζεται στο κινητό. Σε αυτή την περίπτωση η εφαρμογή του κινητού περιλαμβάνει δυο κουμπιά που έχουν την μορφή από βέλη και αντιπροσωπεύουν την αύξηση η την μείωση της συχνότητας αντίστοιχα. Ακριβώς επάνω από τα βέλη ελέγχου της συχνότητας διακρίνεται ένα στρόγγυλο μπλε κουμπί. Η χρήση του αποσκοπεί στη διασύνδεση της εφαρμογής με την μονάδα Bluetooth και ως απώτερο σκοπό την μεταφορά δεδομένων στην μονάδα HC-05 κάθε φορά που πατιέται ένα πλήκτρο ελέγχου. Παρακάτω παρατίθεται και επεξηγείτε ο απαραίτητος κώδικας που υλοποιεί την παρούσα εφαρμογή.



Εικόνα 4.11 Παράθυρο συγγραφής κώδικα σε μορφή blocks

Σε αυτό το παράθυρο ο χρήστης μπορεί να γράψει τον κώδικα της εφαρμογής που επιθυμεί να υλοποιήσει σε blocks. Ο κώδικας για την παρούσα εφαρμογή είναι αρκετά απλοϊκός. Πιο αναλυτικά στα δυο πρώτα μπλοκ γίνεται η αρχικοποίηση των παραμέτρων (address, Names) του HC-05 Bluetooth, και κατόπιν εφόσον πατηθεί το μπλε στρόγγυλο πλήκτρο διασύνδεσης εκτελείτε το δεύτερο μπλοκ (.After picking) όπου και γίνεται η διασύνδεση του Bluetooth με την εφαρμογή. Τέλος με το πάτημα των δυο κουμπιών αποστέλλονται χαρακτήρες (0 η 1) ASCII των οποίων η αναγνώριση γίνεται από τον κώδικα που έχει υλοποιηθεί. Με βάση

αυτούς τους χαρακτήρες γίνεται ο έλεγχος της συχνότητας, συνεπώς ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα. Τέλος να αναφέρουμε πως ο έλεγχος γίνεται ταυτόχρονα και από το κινητό και από το ηλεκτρολόγιο της αναπτυξιακής πλακέτας.

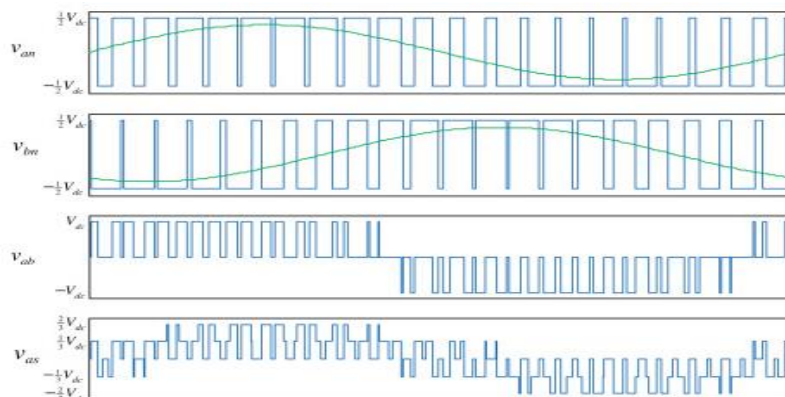


Εικόνα 4.12 μονάδα BLUETOOTH HC 05

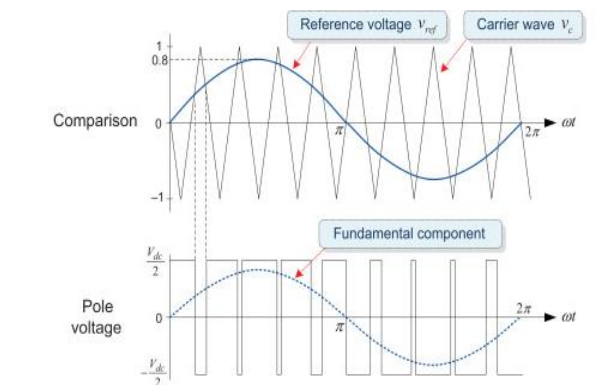
4.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΑΛΜΩΝ PWM

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρατεθεί και θα αναλυθεί η διαδικασία καθώς και ο απαραίτητος προγραμματισμός προκειμένου να μπορεί να διαμορφωθεί το σήμα PWM που θα οδηγήσει τον κινητήρα. Η διαδικασία μοιάζει αρκετά με το κοινό PWM (Pulse width modulation), μόνο που σε αυτή τη περίπτωση είναι λίγο πιο διαφορετική. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **SPWM** (Sinusoidal Pulse width modulation). Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται κατά κόρον στους inverters καθαρού ημιτόνου. Στην παρούσα εφαρμογή αυτή η διαδικασία είναι η βάση προκειμένου να επιτύχουμε στην έξοδο της γέφυρας ένα ημιτονικό σήμα με μεταβλητή συχνότητα, αλλά με ημιτονική μορφή.

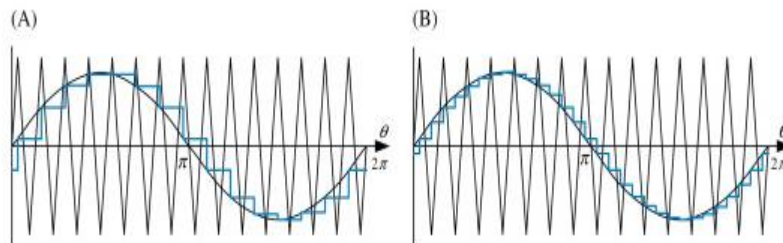
Στην ουσία αυτό που γίνεται στην τεχνική SPWM είναι πως από το zero cross μέχρι τις 90 μοίρες του ημιτόνου παρέχονται παλμοί που ο κύκλος εργασίας αυξάνεται σταδιακά ενώ από τις 90 μοίρες και μετά μειώνεται ο κύκλος εργασίας ξανά μέχρι το επόμενο zero cross. Αν προστεθεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο (RC) στην τότε μπορούμε να παρατηρήσουμε την καμπύλη που σχηματίζεται από την μεταβολή του duty cycle και έχει ημιτονοειδές σχήμα. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται πως γίνεται με την μεταβολή του pwm η διαμόρφωση της ημιτονοειδούς τάσης.



Εικόνα 4.13 SPWM

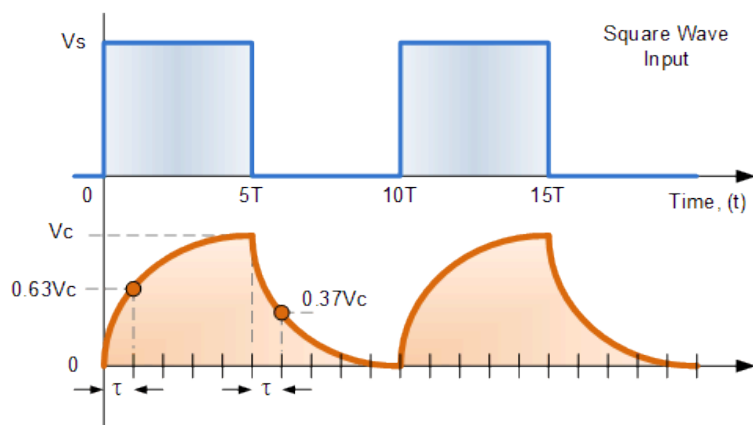


Εικόνα 4.14 Bipolar SPWM



Εικόνα 4.15 SPWM

Με άλλα λόγια αυτό που γίνεται στην διαδικασία SPWM είναι πως με την προσθήκη ενός φίλτρου RC και συγκεκριμένα ,βασιζόμενοι στην φόρτιση και αποφόρτιση του πυκνωτή, είναι πως μεταβάλλοντας το PWM σε συγκεκριμένες διακριτές τιμές μπορούμε να επιτύχουμε με την βοήθεια φόρτισης και αποφόρτισης του πυκνωτή ένα ημιτονοειδές σήμα.

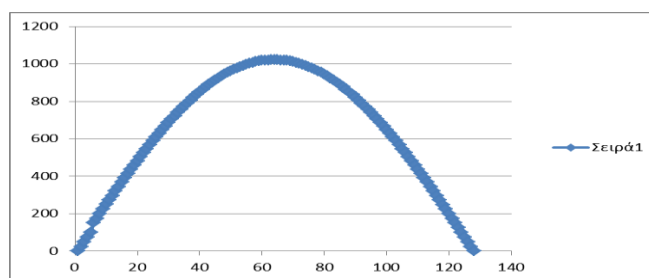


Εικόνα 4.16 απόκριση RC φίλτρου σε παλμική διέγερση στην είσοδο

Στην εικόνα 4.16 παρατηρούμε πως γίνεται ο τετραγωνικός παλμός PWM σε ημιτονοειδή καμπύλη με την βοήθεια της φόρτισης και αποφόρτισης του πυκνωτή. Έτσι μεταβάλλοντας το PWM γρήγορα αυτό που αλλάζει είναι ο χρόνος φόρτισης και αποφόρτισης του πυκνωτή και συνεπώς αυτή είναι η βάση για την λειτουργία του SPWM. Οι τιμές που θα πρέπει να λάβει το PWM δεν είναι τυχαίες και προκύπτουν από μια μαθηματική εξίσωση που συνδέει την κυκλική συχνότητα του ημιτονοειδούς σήματος (50 Hz) και την μέγιστη ανάλυση (βήματα) του PWM(συνήθως 255 η 128). Η μαθηματική εξίσωση αυτή δίνεται παρακάτω:

$$1023 * \text{Sin}(1.40625 * N) \quad (4.1)$$

Όπου N ο αριθμός βημάτων του PWM που στη παρούσα περίπτωση κυμαίνεται από 0 έως 255. Στις εικόνες 3.8-3.10 φαίνεται πως γίνεται με την βοήθεια της μεταβολής του PWM η διαμόρφωση του ημιτονικού σήματος σε <<σκαλοπάτια>>. Με την προσθήκη ενός χαμηλοπερατού φίλτρου όπως αυτό που απεικονίστηκε στην παράγραφο 2 μπορούμε να πετύχουμε ένα καθαρό ημιτόνιο σήμα. Η χρήση του χαμηλοπερατού φίλτρου RC εξαρτάται πάντα από το φορτίο που θέλουμε να τροφοδοτήσουμε. Όταν το φορτίο είναι ωμικό τότε πρέπει να γίνει η μετατροπή των παλμών σε ημιτονικό με την χρήση του φίλτρου. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι επαγωγικό τότε η διαδικασία του φιλτραρίσματος και της ολοκλήρωσης των παλμών γίνεται αυτόματα οπότε δε χρειάζεται η προσθήκη ενός φίλτρου, που σε αυτήν την περίπτωση δε θα ήταν βολικό καθώς τα εξαρτήματα θα ήταν ογκώδη λόγω των υψηλών ρευμάτων και τάσεων αντοχής. Παρακάτω στο γράφημα που ακολουθεί δίνεται ένα παράδειγμα μεταβολής τιμών PWM από 1-255 χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.1.



Εικόνα 4.17 μεταβολή τιμών PWM σε συνάρτηση της εξίσωσης 4.1

Οι τιμές που πρέπει να λάβει το PWM δεν είναι τυχαίες και δηλώνονται στην αρχή του προγράμματος σε έναν πίνακα που ονομάζεται **Look up table** και ακολουθούν την εξίσωση 4.1 με αλλαγές βέβαια αναλόγως και την ανάλυση του PWM που επιθυμούμε να έχουμε. Παραπάνω στην εικόνα 4.12 παρατηρούμε πως με την μεταβολή του PWM από 0 έως 255 και βάσει της συνάρτησης 4.1 γίνεται να πετύχουμε μια ημιτονοειδή καμπύλη. Αλλά όμως στην εικόνα 4.12 απεικονίζεται μόνο μια ημιπεριόδος της ημιτονοειδούς τάσης ενώ απαιτούνται δυο για σχηματιστεί σωστά το ημιτονοειδές σήμα. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται δυο look up tables που φέρουν ίδιες τιμές σε διαφορετικά όμως σημεία του πίνακα.

Όπως αναφέρθηκε σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια μικρή αναφορά στα απαραίτητα σημεία του κώδικα καθώς και μια πιο εκτενή ανάλυση σε αυτά τα σημεία. Έτσι στην παρακάτω εικόνα παρατίθεται οι look up table οι οποίοι παράγουν δυο κατάλληλα spwm σήματα τα οποία διαμορφώνουν το τελικό SPWM σήμα της γέφυρας.

`uint32_t Wave_LUT1 [NS] = {0, 0,0,0,0,125,150,175,`

0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,0,0,0,
 0,0,0,0,0,125,150,175,
 200,225,250,273,296,320,344,368,
 391,414,437,460,482,504,526,547,
 568,589,609,629,649,668,687,705,
 723,740,758,774,790,806,821,836,
 850,864,877,890,902,913,924,935,
 945,954,963,971,979,985,992,998,
 1003,1008,1012,1015,1018,1020,1021,1022,
 1023,1022,1021,1020,1018,1015,1012,1008,
 1003,998,992,985,979,971,963,954,
 945,935,924,913,902,890,877,864,
 850,836,821,806,790,774,756,740,
 723,705,687,668,649,629,609,589,
 568,547,526,504,482,460,437,414,
 391,368,344,320,296,272,248,224,
 199,174,150,125,0,0,0,0,

};

Εικόνα 4.19 Look up table αρνητικής ημιπεριόδου

Οι παραπάνω δυο πίνακες διαμορφώνουν κατάλληλα το σήμα που οδηγεί την γέφυρα των Mosfet. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από την εφαρμογή της εξίσωσης 4.1 για τιμές r_{wm} 0-255. Αμφότεροι οι πίνακες έχουν 32 σειρές από 8 τιμές ο κάθε μια σειρά, οπότε σύνολο 255 τιμές. Αν παρατηρήσουμε πιο προσεκτικά θα δούμε πως οι πρώτες 16 γραμμές είναι μηδενικά στον δεύτερο πίνακα ενώ στο πρώτο πίνακα οι πρώτες 16 είναι τιμές από 0 έως 1023. Αυτό το μοτίβο εξυπηρετεί στην παραγωγή των 2 PWM σημάτων τα οποία όταν το ένα σήμα είναι ενεργό και οδηγεί την μια πλευρά της γέφυρας το άλλο σήμα είναι ανενεργό και εναλλάξ. Η

μέγιστη τιμή στον πίνακα είναι 1023 και αντιστοιχεί στις 90 μοίρες του ημιτόνου. Επιπλέον για N=0,1,2,3,4 κανονικά θα είχαμε στον πίνακα τις τιμές 25,50,75,100. Αυτές όμως είναι μηδενικές και στους δυο πίνακες και αυτό εξυπηρετεί στον νεκρό χρόνο προκειμένου να μην έρθουν σε κατάσταση αγωγής και οι τέσσερις διακόπτες ταυτόχρονα.

Προκειμένου να υπάρχει μια σωστή αναπαράσταση της χαμηλής συχνότητας από το ηλεκτρολόγιο η συχνότητα διαμόρφωσης του PWM θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 15 φορές μεγαλύτερη από την μέγιστη συχνότητα (100Hz). Έτσι θέτοντας **Prescaler=0, Period register=1023, F_{CLOCK}=96000000(96MHz)** η συχνότητα διαμόρφωσης η αλλιώς φέρουσα υπολογίζεται απο την παρακάτω εξίσωση:

$$F_{\text{CARRIER}} = F_{\text{CLOCK}} / (\text{Prescaler}+1) * (\text{Period register}+1) \quad (4.1)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω δεδομένα στην 4.1 η συχνότητα διαμόρφωσης υπολογίζεται ως εξής:

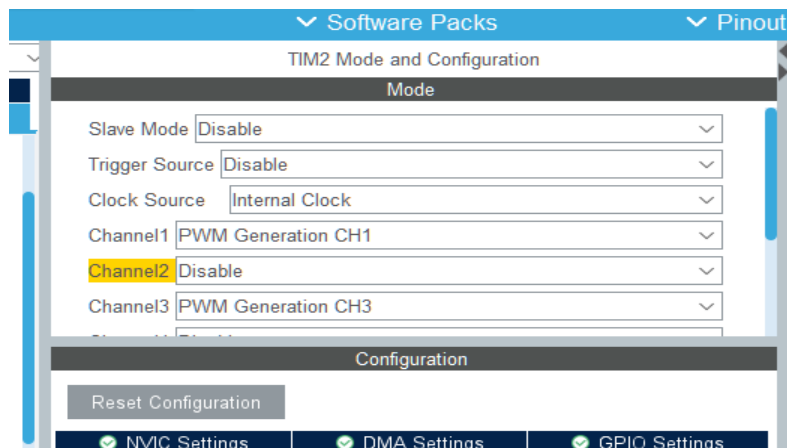
$$F_{\text{CARRIER}} = 96000000 / (0+1) (1023+1)$$

$$F_{\text{CARRIER}} = 96000000/1024$$

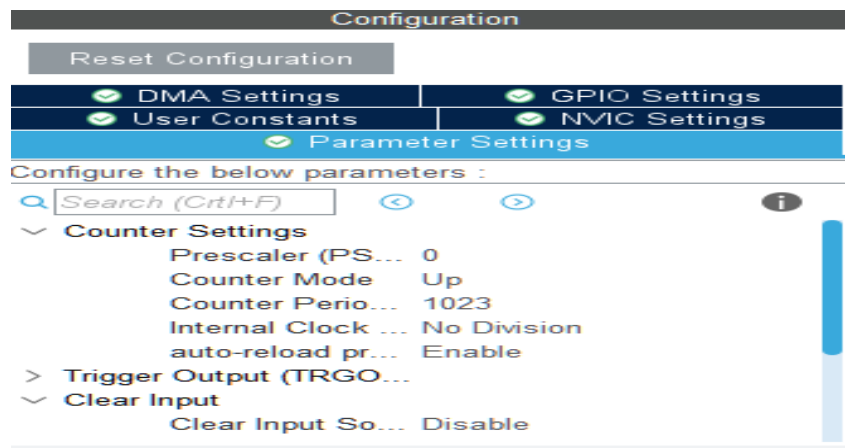
$$F_{\text{CARRIER}} = 93750 \text{ Hz} = 93.75 \text{ KHz}$$

Αυτή η συχνότητα των 93KHz διαμορφώνει την μεταβλητή συχνότητα που επιλέγεται από το ηλεκτρολόγιο. Τέλος αυτή η υψηλή συχνότητα απομακρύνεται με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο RC και επιτρέπεται μόνο η διέλευση της χαμηλής συχνότητας. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι επαγωγικό (όπως σε αυτήν την περίπτωση ο ανεμιστήρας) δεν απαιτείτε η χρήση αυτού του φίλτρου αφού όπως ειπώθηκε και πιο πριν η διαδικασία αυτή εκτελείτε από τον κινητήρα καθ αυτού.

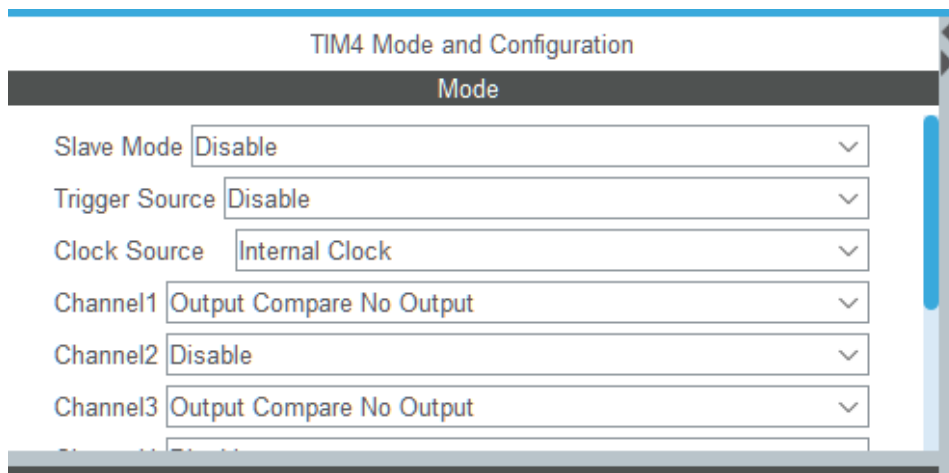
Για την παραγωγή των δυο σημάτων SPWM χρησιμοποιήθηκαν οι TIMER2 και TIMER4 του STM32. Ο timer 2 χρησιμοποιήθηκε σε PWM mode ενώ ο TIMER 4 σε λειτουργία Output Compare DMA. Στις παρακάτω εικόνες παρατίθεται ο καθορισμός των δυο TIMERS. Κλείνοντας πρέπει να αναφερθεί πως όλα τα περιφερειακά των 7 Segment Display καθώς και της σειριακής θύρας λειτουργούν όλα με μέθοδο interrupt (μέθοδος διακοπής κυρίου προγράμματος). Όμως με Interrupt εξυπηρετείτε και οι TIMERS που διαμορφώνουν κατάλληλα το SPWM σήμα. Έτσι είναι μείζονος σημασίας να υπάρχει προτεραιότητα στο interrupt των TIMER2, 4 προκειμένου να μην υπάρχει η παραμικρή αλλοίωση στο σήμα, αφού εξυπηρετούνται πολλά interrupt ταυτόχρονα [2][3][4].



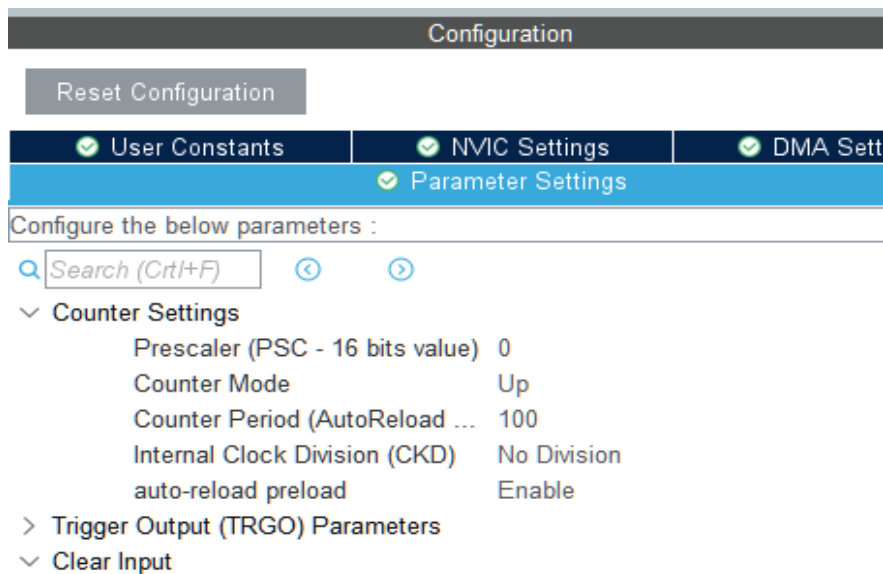
Εικόνα 4.20 Λειτουργία PWM TIMER2



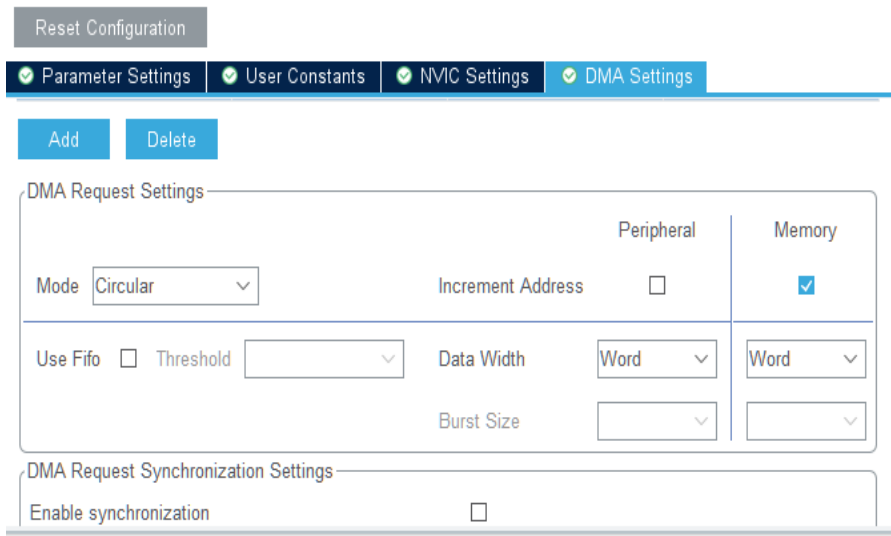
Εικόνα 4.21 Ρυθμίσεις Prescaler, Period register TIMER2



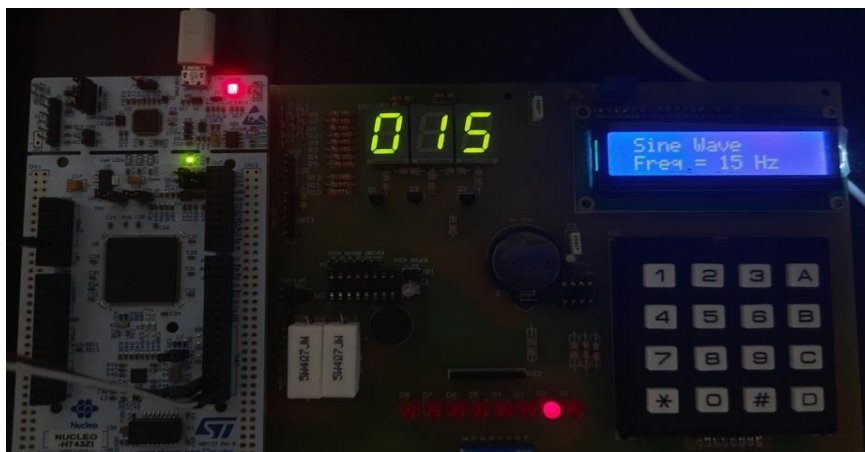
Εικόνα 4.22 λειτουργία TIMER 4



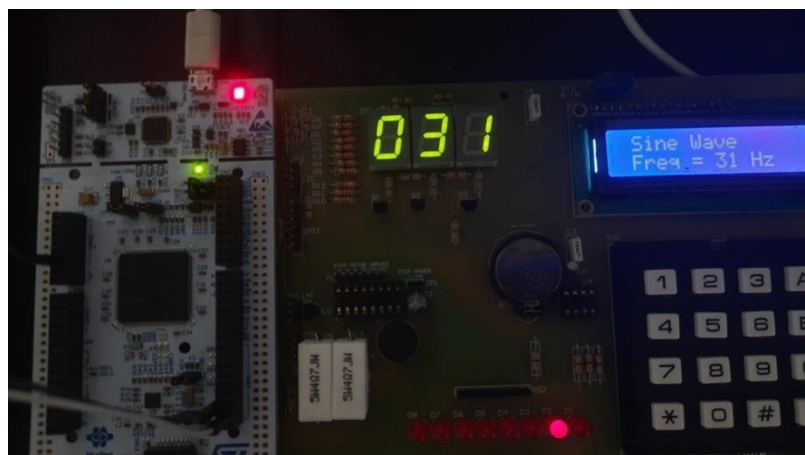
Εικόνα 4.23 TIMER 4 Prescaler, Period register



Εικόνα 4.24 ρυθμίσεις DMA για τον TIMER 4



Εικόνα 4.25 Απεικόνιση τιμών στην LCD οθόνη και 7 segment display



Εικόνα 4.26 Απεικόνιση τιμών στην οθόνη LCD

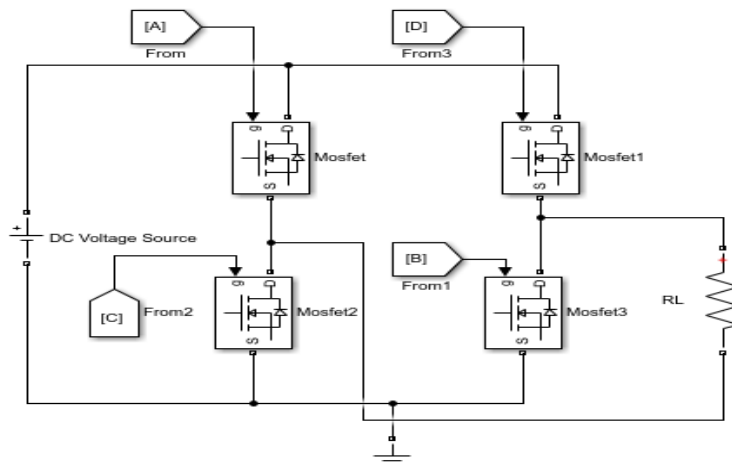
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟ

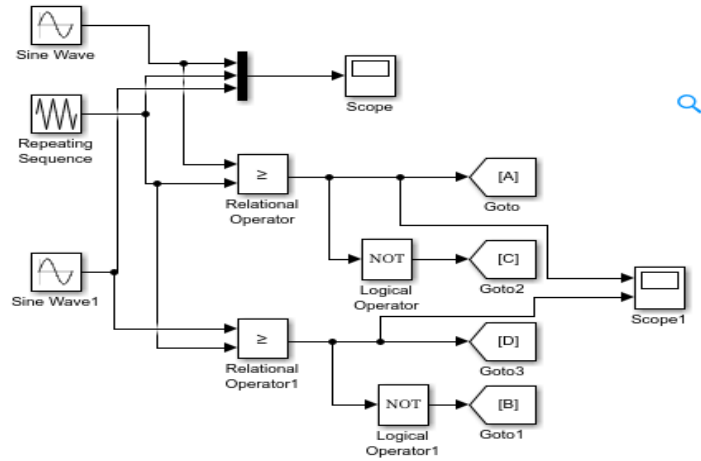
SIMULINK

5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΚΑΙ SPWM ΣΤΟ SIMULINK

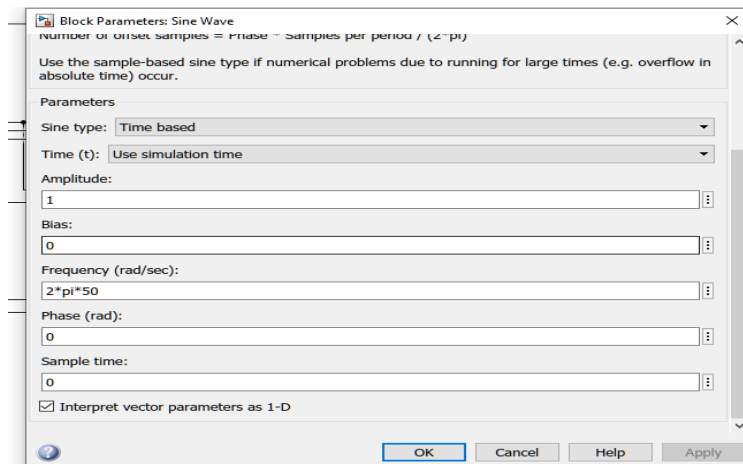
Στην παράγραφο που ακολουθεί θα γίνει μια προσομοίωση του συνολικού κυκλώματος καθώς και παράθεση των αποτελεσμάτων στο λογισμικό SIMULINK του MATLAB. Αυτή η διαδικασία κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να υπάρχει μια σαφής εικόνα των αποτελεσμάτων που θα μετρηθούν καθώς και να αιτιολογηθούν όποιες διαφορές της προσομοίωσης από τις κανονικές μετρήσεις στον παλμογράφο. Στις παρακάτω εικόνες που ακολουθούν φαίνεται το κύκλωμα της γέφυρας καθώς και οι απαραίτητες ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν.



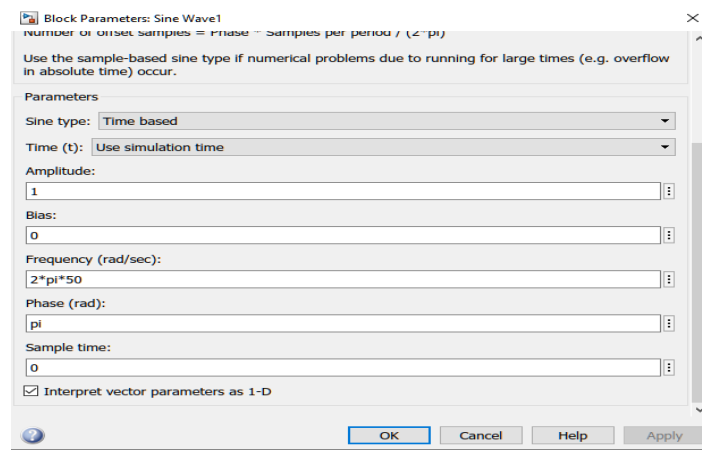
Εικόνα 5.1 κύκλωμα H BRIDGE



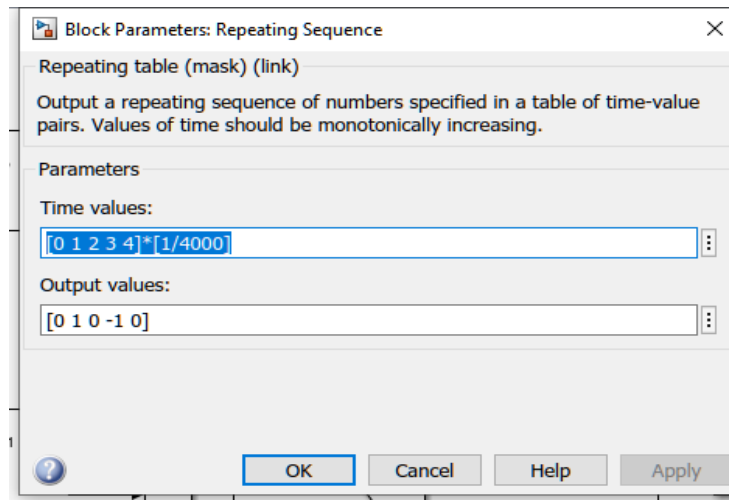
Εικόνα 5.2 παραγωγή BIPOLAR SPWM



Εικόνα 5.3



Εικόνα 5.4

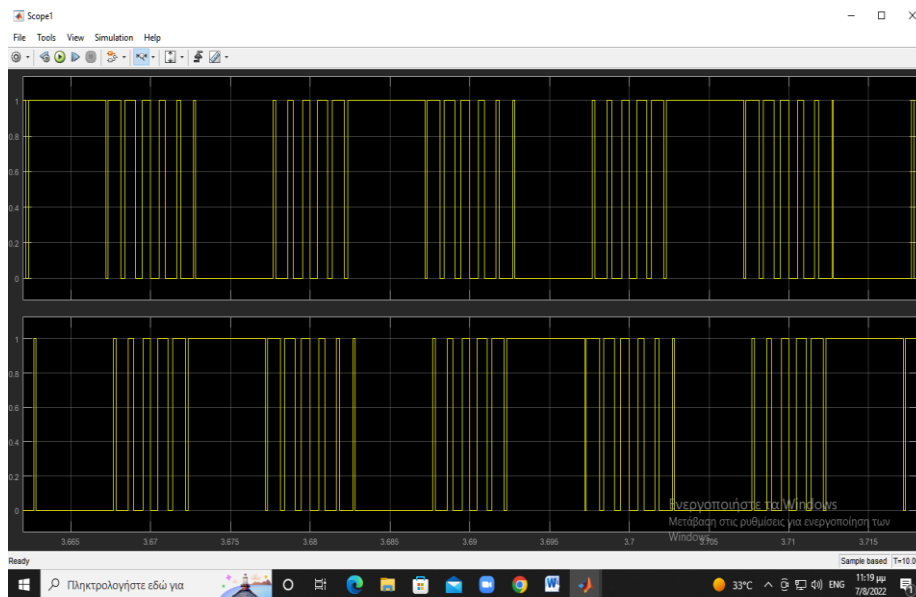


Εικόνα 5.5 ρύθμιση πριονωτής τάσης αναφοράς

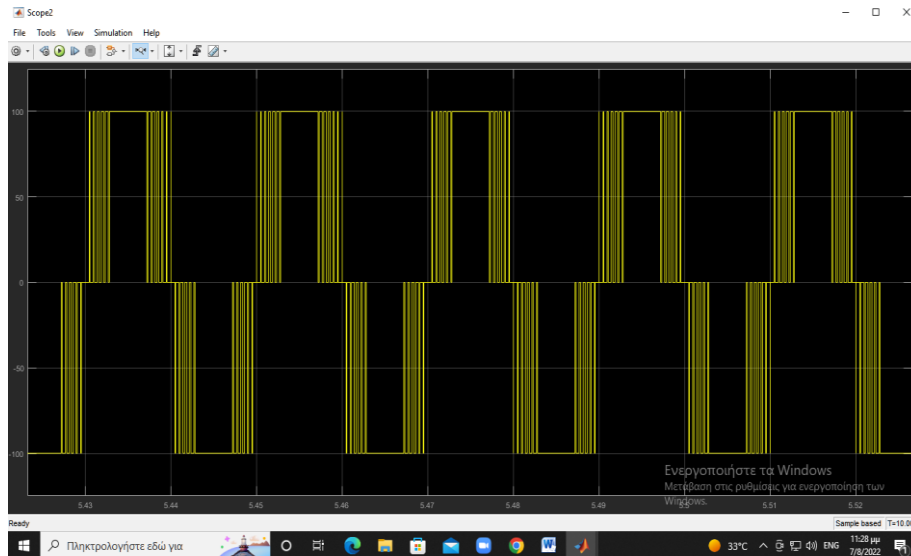
Στις εικόνες 5.3-5.5 φαίνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν στο κύκλωμα της εικόνας 5.2 προκειμένου να εξάγουμε τα απαραίτητα αποτελέσματα που φαίνονται στις εικόνες στο κεφάλαιο 5.2. Όσον αφορά το κύκλωμα της εικόνας 5.1 δεν απαιτείται κάποια συγκεκριμένη ρύθμιση.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

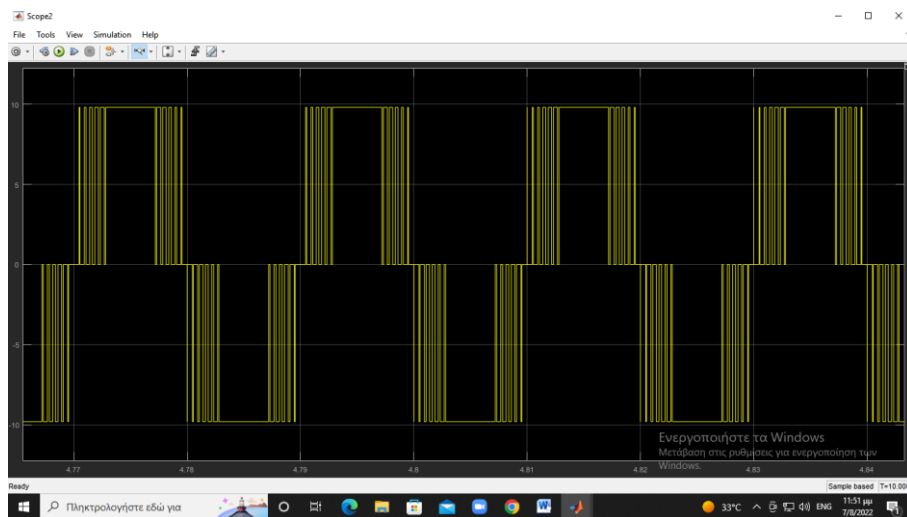
Έχοντας κάνει τις ρυθμίσεις που απεικονίστηκαν στις εικόνες του κεφαλαίου 5.1 παίρνουμε τις εξής κυματομορφές:



Εικόνα 5.6 SPWM σήματα αντιστραμμένης πολικότητας

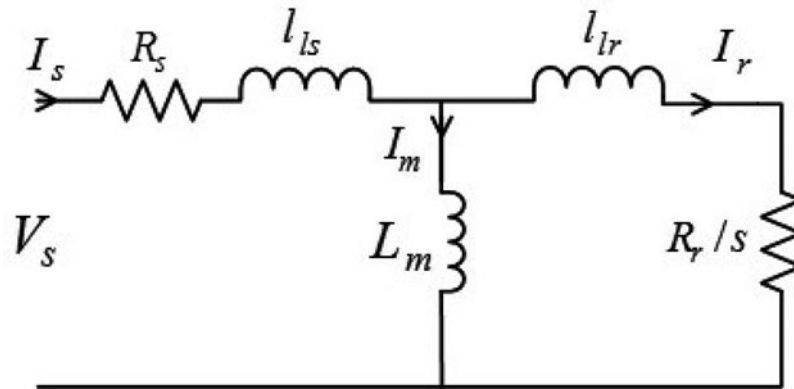


Εικόνα 5.7 Τάση στο φορτίο (αντίσταση) της γέφυρας



Εικόνα 5.8 Ρεύμα φορτίου

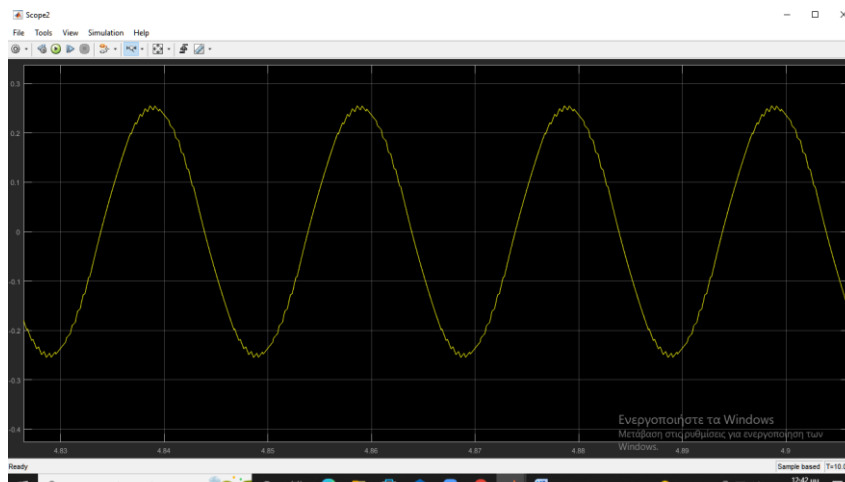
Στην εικόνα 5.6 παρατηρούμε πως μεταβάλλεται το σήμα PWM έτσι όπως ακριβώς αυτό περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, ενώ στις εικόνες 5.7-5.8 παρατηρούμε την έξοδο της γέφυρας, που πλέον το σήμα αυτό είναι ένα AC σήμα καθώς η μέση τιμή του είναι μηδέν. Σε αυτό το σημείο να υπογραμμίσουμε πως το φορτίο είναι καθαρά ωμικό και έχει τιμή 10Ω, ενώ η τάση της πηγής ανέρχεται στα 100V. Αυτό το σήμα πλέον μπορεί να οδηγήσει τον κινητήρα όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο αφού πλέον είναι εναλλασσόμενο. Η μετατροπή αυτής της εναλλαγής των παλμών PWM σε ημιτονικό σήμα θα γίνει αυτόματα από τον κινητήρα καθώς ο ίδιος αποτελεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο RL, όπως ειπώθηκε και πιο μπροστά.



Εικόνα 5.9 Ισοδύναμο κύκλωμα AC κινητήρα

Το κύκλωμα της εικόνας 5.9 αποτελεί το κύκλωμα με βάσει το οποίο σχεδόν σε όλα τα ηλεκτρονικά σχέδια απεικονίζεται ένας AC κινητήρας. Το κύκλωμα αυτό είναι ένα χαμηλοπερατό φίλτρο και η έξοδος του για παλμική ημιτονοειδής είσοδο είναι ημιτονοειδής που αναγκάζει τον κινητήρα να περιστραφεί.

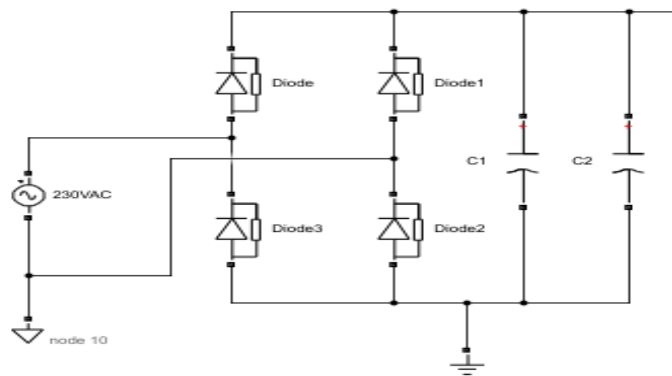
Αλλάζοντας τώρα το φορτίο από ωμικό σε χαμηλοπερατό φίλτρο RL με τιμή ωμική αντίστασης 444Ω, επαγωγικότητα 4 H (ισοδύναμο μοντέλο ενός απλού ανεμιστήρα 230V) η κυματομορφή του ρεύματος της εικόνας 5.8 παίρνει την εξής μορφή.



Εικόνα 5.10 Μετατροπή του ρεύματος σε ημιτονοειδή μορφή σε φίλτρο RL

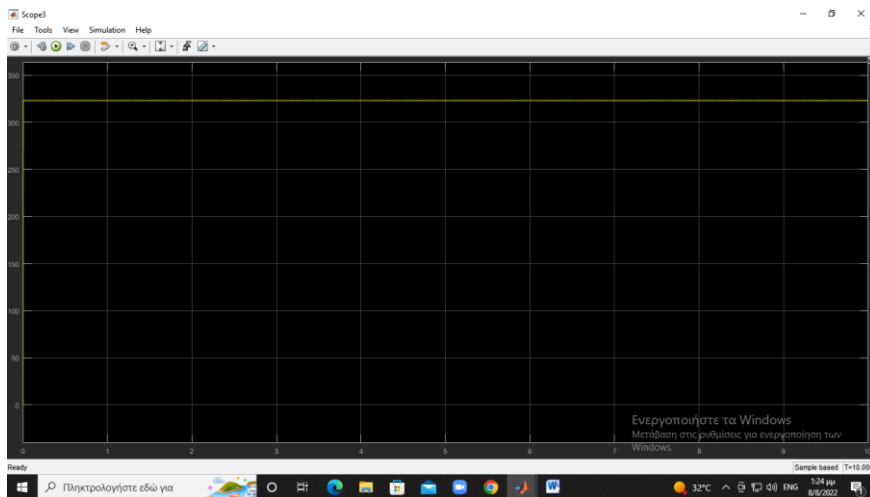
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΝΟΡΘΩΣΗΣ

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο της προσομοίωσης, σε αυτήν την παράγραφο θα παρατεθούν ξανά οι κυματομορφές της παραγράφου 5.2 σε αυτή την περίπτωση, η πηγή συνεχούς τάσης της εικόνας 5.1 με ένα κύκλωμα γέφυρας ανορθωτή με πυκνωτές εξομάλυνσης τάσης καθώς και μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης.

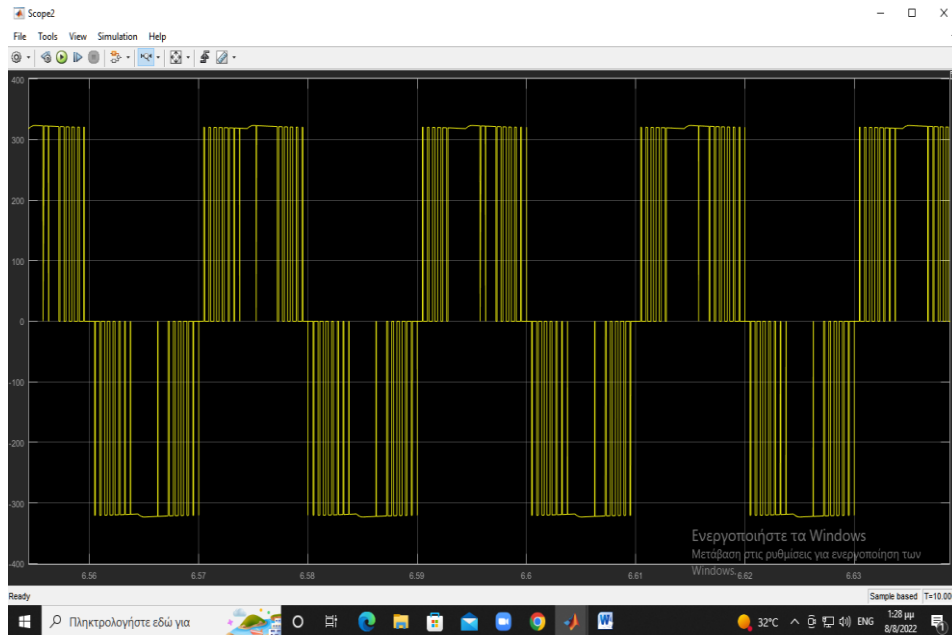


Εικόνα 5.11 Ανορθωτής τάσης δικτύου για παροχή +325VDC στην γέφυρα

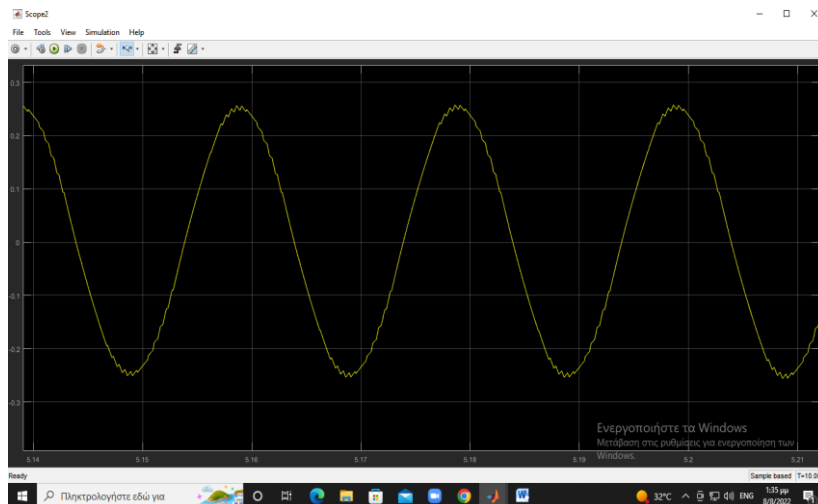
Με την προσθήκη αυτού του κυκλώματος <<τρέχουμε>> πάλι την προσομοίωση και ακολουθούμε τα βήματα της διαδικασίας που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2, και έτσι έχουμε τις παρακάτω κυματομορφές.



Εικόνα 5.12 Τάση στην έξοδο του ανορθωτή

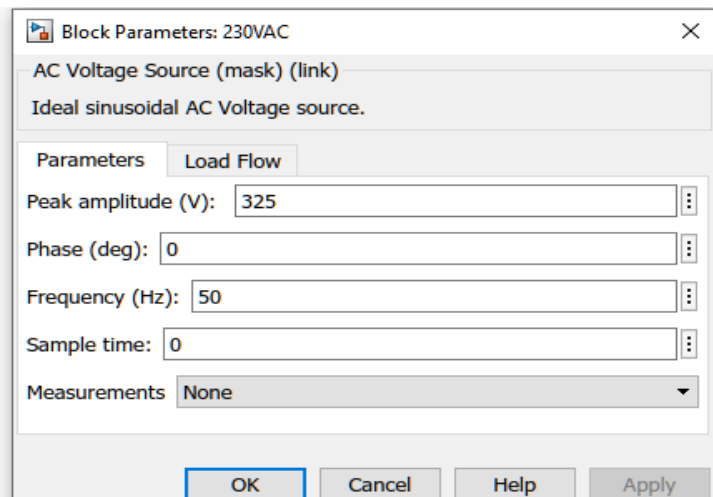


Εικόνα 5.13 Τάση Στην έξοδο της γέφυρας



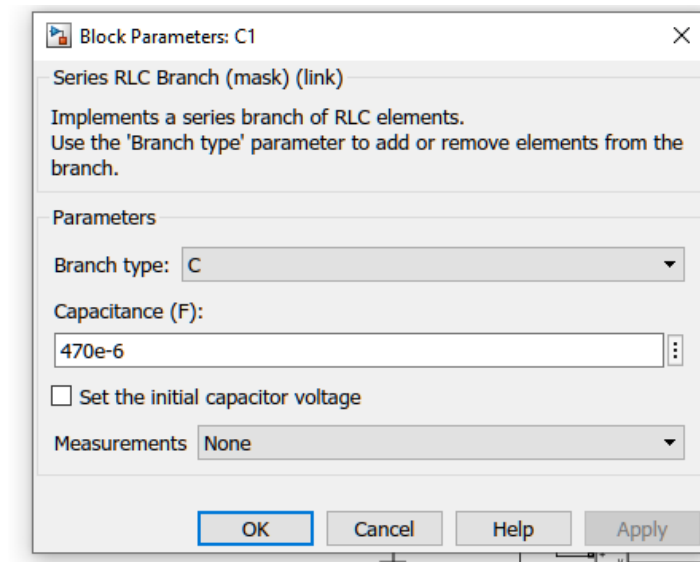
Εικόνα 5.14 Ρεύμα γέφυρας για επαγωγικό φορτίο RL

Παραπάνω στις εικόνες 5.12-5.14 παρατηρήσαμε πως διαφοροποιούνται οι κυματομορφές με την προσθήκη του ανορθωτή. Συγκεκριμένα το μόνο που θα πρέπει να αναφερθεί είναι πως στην εικόνα 5.13 τα σημεία που το PWM έχει την μέγιστη τιμή του δεν είναι τελείως ομαλά καθώς οι πυκνωτές εξομάλυνσης εισάγουν μια κυμάτωση στην συνολική κυματομορφή η οποία είναι ορατή. Για το κύκλωμα του ανορθωτή πρέπει να γίνουν οι παρακάτω ρυθμίσεις:



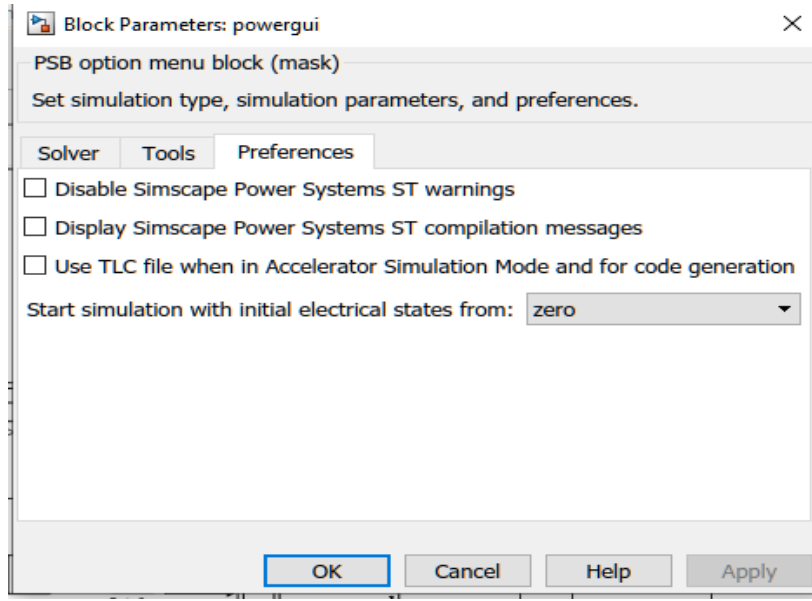
Εικόνα 5.15 Ρυθμίσεις της εναλλασσόμενης τάσης

Οι πυκνωτές εξομάλυνσης αντίστοιχα έχουν τις παρακάτω τιμές:

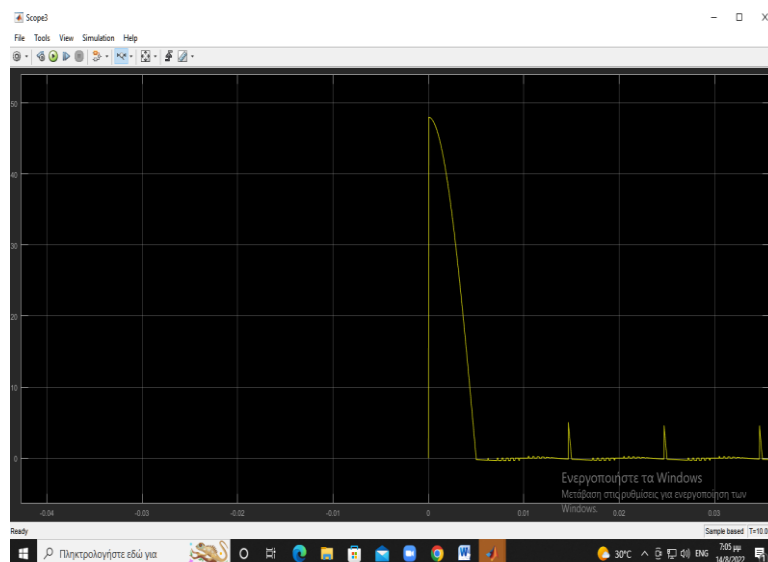


Εικόνα 5.16 καθορισμός χωρητικότητας πυκνωτών εξομάλυνσης

Όσον αναφορά τις διόδους για την γέφυρα ανόρθωσης της εναλλασσόμενης τάσης δεν απαιτείτε κάποια ρύθμιση. Τέλος στο powergui ,που είναι μια βιβλιοθήκη η οποία χρησιμοποιείτε από το ίδιο το MAT LAB και εμπεριέχει όλες τις συναρτήσεις και αλγορίθμους προκειμένου να εξαχθούν τα απαραίτητα προαναφερθέντα γραφήματα.

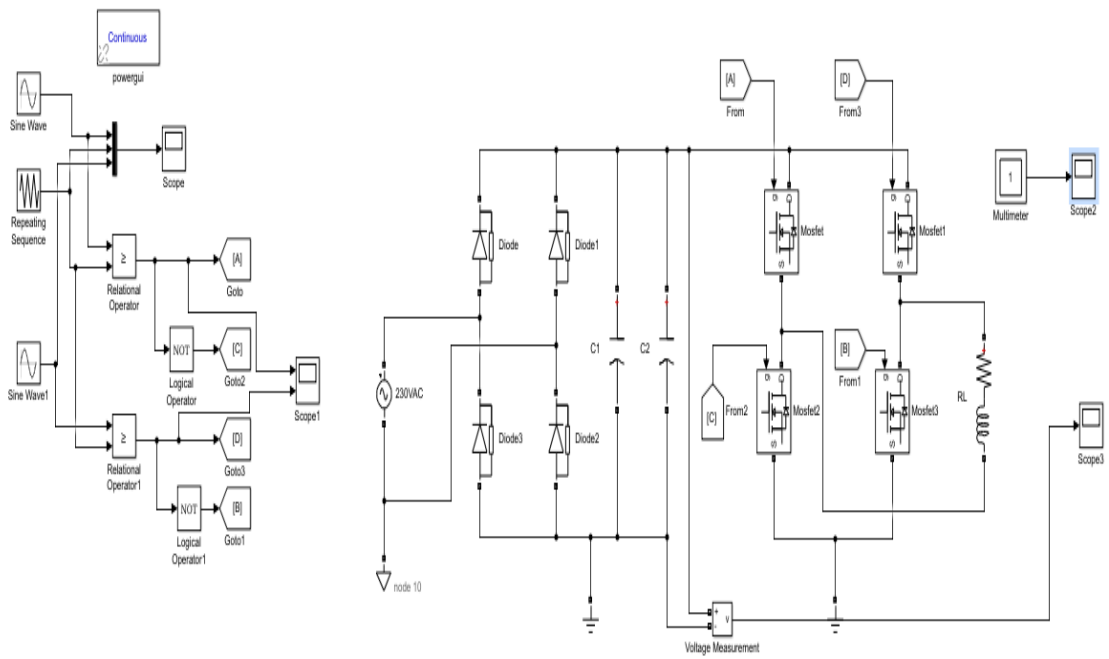


Εικόνα 5.17 Ρυθμίσεις αρχικής κατάστασης παθητικών στοιχείων στα preferences του powergui



Εικόνα 5.18 Αρχικό ρεύμα εισροής πυκνωτών εξομάλυνσης

Στην εικόνα 5.18 παρατηρούμε το στιγμιαίο ρεύμα (current spike) που δημιουργείτε κατά την παροχή της τάσης στους πυκνωτές εξομάλυνσης. Αυτό ονομάζεται μεταβατικό φαινόμενο (φόρτιση πυκνωτή) και εξαιτίας του ότι ο πυκνωτής συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα μέχρι το 63,2% της φόρτισης του χρησιμοποιείτε πάντα μια αντίσταση περιορισμού του ρεύματος φόρτισης. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείτε ένα θερμίστορ NTC.



Εικόνα 5.18 Το πλήρες κύκλωμα στο Simulink Του Mat lab

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1 ΔΟΚΙΜΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

Όπως έχει αναφερθεί η πλακέτα που εμπεριέχει το κύκλωμα ισχύος τροφοδοτείται από το δίκτυο της ΔΕΗ. Περισσότερο βέβαια να αναφερθεί πως σε περίπτωση κάποιας αστοχίας στην πλακέτα μπορεί να προκληθεί μεγάλη ζημιά, αφού η πλακέτα τροφοδοτείται με 230VAC γεγονός που καθιστά την δοκιμή της πλακέτας άκρως επικίνδυνη.

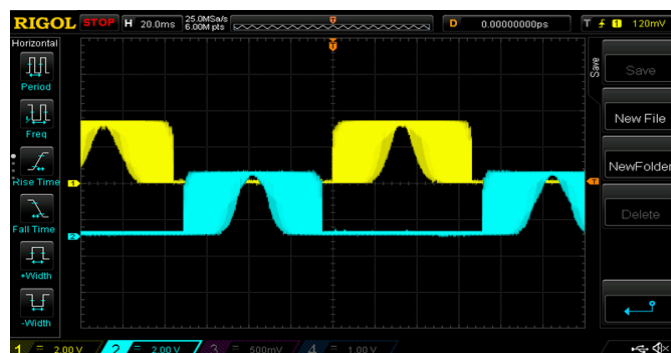
Για αυτόν τον λόγο, αρχικά αφού έγινε η συγκόλληση και συναρμολόγηση των υλικών στην πλακέτα, ελέγχθηκε διεξοδικά για βραχυκυκλώματα. Κατόπιν ως πηγή τροφοδοσίας επιλέχθηκε μια DC τάση από τροφοδοτικό με περιορισμό ρεύματος πάντα σε περίπτωση αστοχίας. Ως φορτίο στην γέφυρα τοποθετήθηκε ένας λαμπτήρας 42V/60W καθώς έτσι η λειτουργία του PWM θα ήταν πιο εύκολα αντιληπτή.

Αφού έγινε ο έλεγχος με το τροφοδοτικό αυτό αντικαταστάθηκε με έναν μετασχηματιστή στα 15VAC προκειμένου να εξεταστεί και η σωστή λειτουργία του κυκλώματος ανόρθωσης και της γέφυρας μαζί. Αφού έγιναν τα παραπάνω ο μετασχηματιστής αντικαταστάθηκε με έναν αυτό-μετασχηματιστή με μεταβλητή τάση εξόδου. Έχοντας τώρα και τα τρία καλώδια της παροχής (φάση, ουδέτερος, γείωση) στο βάριακ, αφού διαπιστώθηκε πως δεν υπάρχουν αστοχίες από κολλήσεις, γεγονός που θα είχε οδηγήσει στο να <<πέσει>> το ρελέ διαφυγής καθώς το βάριακ δε κάνει γαλβανική απομόνωση από το δίκτυο της ΔΕΗ, επαναλήφθηκαν όλα τα βήματα με το PWM από την αρχή όπως ειπώθηκαν.

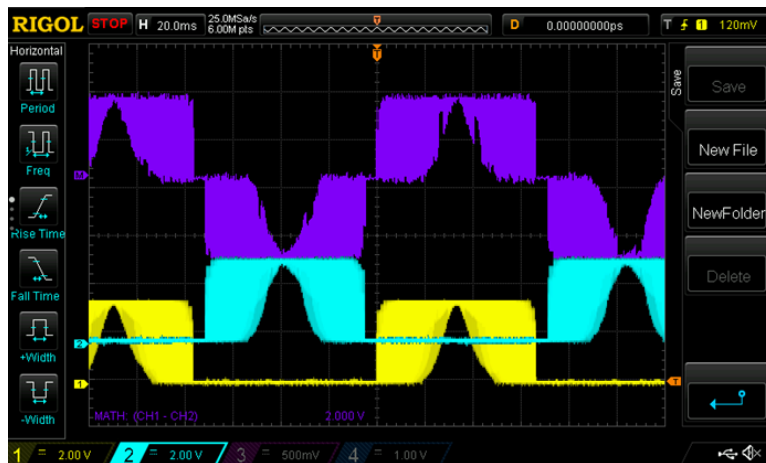
Εν συνεχεία έγινε η δοκιμή του κυκλώματος ισχύος με τον κινητήρα σε προκαθορισμένη συχνότητα των 50hz, που είναι και η συχνότητα της τάσης της ΔΕΗ προκειμένου να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία του συνολικού κυκλώματος και σε τελευταίο στάδιο αυτό υλοποιήθηκε και η μεταβολή της συχνότητας του κινητήρα από 11Hz έως 97Hz με τάση τροφοδοσίας 230VAC.

6.2 ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΠΕΞΕΡΑΣΤΗ

Σε αυτήν την παράγραφο θα παραθέσουμε τις κυματομορφές του παλμογράφου από τις ακίδες **PB10**, **PA0** του επεξεργαστή που είναι η έξοδος PWM του TIMER2. Αυτό θα γίνει για διάφορες τιμές συχνότητας, καθώς και με προσθήκη ενός φίλτρου RC προκειμένου να απεικονιστεί η απαραίτητη ημιτονοειδής καμπύλη.

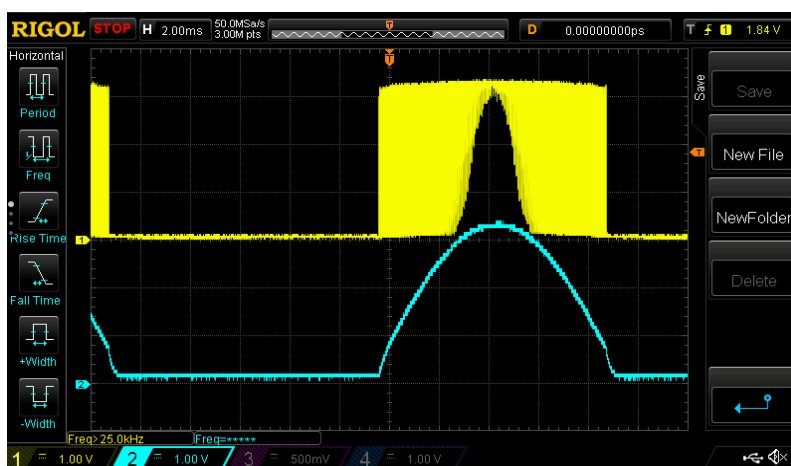


Εικόνα 6.1 Μεταβολή PWM βάσει προκαθορισμένης συχνότητας

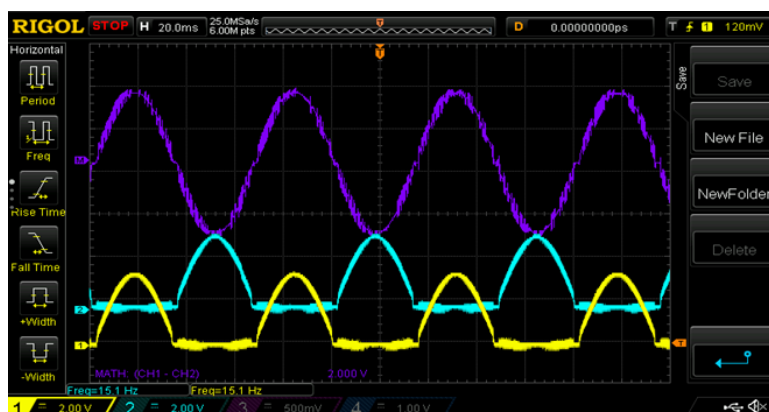


Εικόνα 6.2 Μεταβολή PWM βάσει προκαθορισμένης συχνότητας

Στις εικόνες 6.1-6.2 φαίνεται πως μεταβάλλεται το PWM σήμα βάση των τιμών των δυο Look up tables. Επίσης είναι ευδιάκριτο πως όταν το ένα σήμα είναι high το άλλο είναι low και αντίστροφα. Η μοβ κυματομορφή αντιστοιχεί στην έξοδο της γέφυρας των διακοπών, που με προσθήκη RC φίλτρων μετατρέπεται σε ημιτονική όπως θα δούμε και στις παρακάτω εικόνες.



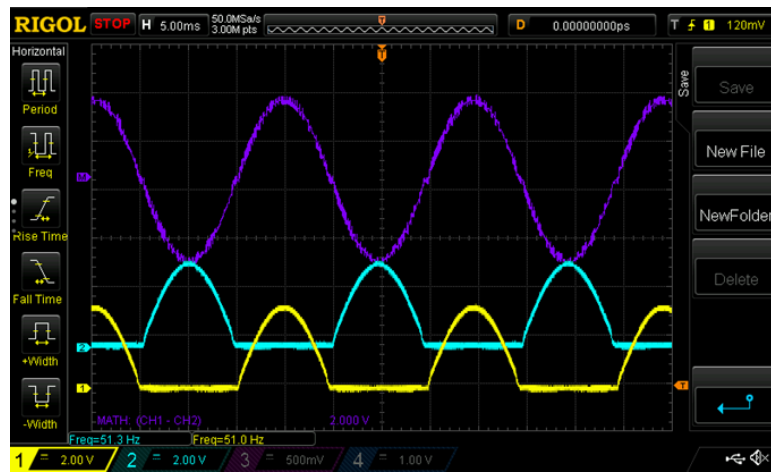
Εικόνα 6.3 Μετατροπή σήματος SPWM σε ημιτονικό



Εικόνα 6.4 Κυματομορφή με προσθήκη φίλτρου RC για συχνότητα 15Hz



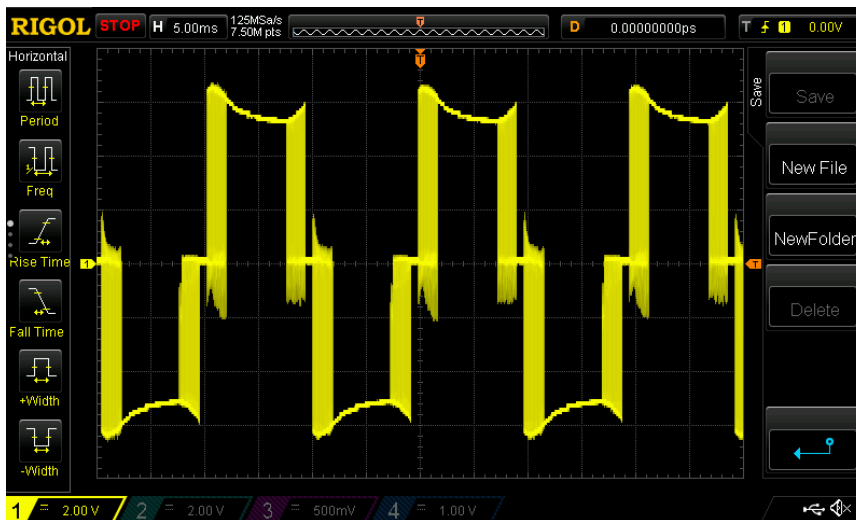
Εικόνα 6.5 Συχνότητα 31Hz



Εικόνα 6.6 συχνότητα 51 Hz

Στις εικόνες 6.3-6.6 παρατηρούμε πως το σήμα PWM των εικόνων 6.1-6.2 μετατρέπεται σε ένα καθαρό ημιτονικό AC σήμα με την προσθήκη ενός χαμηλοπερατού φίλτρου RC(1.5K-100nF), για συχνότητες από 15Hz έως 75Hz και παραπάνω. Πρακτικά όμως, στην πλακέτα ισχύος, όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο 2, το φίλτρο αυτό δεν απαιτείται καθώς η διαδικασία της ολοκλήρωσης και μετατροπής του σήματος σε ημιτονικού εκτελείται από τον κινητήρα καθ' αυτό καθώς αυτός αποτελεί ένα επαγωγικό φορτίο. Στην εικόνα 6.3 γίνεται μια σύγκριση του SPWM σήματος που η συχνότητα διαμόρφωσης ξεπερνά τα 10KHz ενώ στη μπλε κυματομορφή αφού έχει προστεθεί το RC φίλτρο η συχνότητα διαμόρφωσης κόβεται και έτσι εμφανίζεται μόνο η χαμηλή συχνότητα που έχει επιλεγεί από το πληκτρολόγιο. Επιπλέον αναφερόμενοι στην αρχή της παραγράφου και σε μια απευθείας σύγκριση των δυο σημάτων στην κίτρινη κυματομορφή στο σημείο που υπάρχει ένα μεγάλο κενό εκεί το PWM έχει την μέγιστη τιμή του. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί στις 90 μοίρες του ημιτονικού σήματος (κορυφή μπλε κυματομορφής).

Οι δυο ημιανωρθομένες κυματομορφές αντιστοιχούν στους ξεχωριστούς Look up table, ενώ η μοβ κυματομορφή αντιστοιχεί στην κυματομορφή A-B της MATH FUNCTION του παλμογράφου. Η λειτουργία αυτή που επιλέχτηκε στον παλμογράφο προκειμένου να εμφανιστεί το ημιτονικό σήμα από τα δυο ημιανωρθομένα, εκτελείται αυτούσια από την γέφυρα των διακοπών, όπως θα παρατηρήσουμε και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.7 Τάση εξόδου της γέφυρας για δοκιμαστικό ωμικό φορτίο

Παραπάνω στην εικόνα 6.7 παρατηρούμε την τάση εξόδου της γέφυρας και για τα δυο SPWM σήματα. Με μια πρώτη ματιά είναι εμφανές πως το σήμα έχει παραμορφωθεί, ενώ ιδανικά το σήμα θα έπρεπε να έχει την μορφή της εικόνας 6.2 (μωβ κυματομορφή). Αυτό οφείλεται πρώτα στους οπτό συζεύκτες που δημιουργούν μια μικρή καθυστέρηση (2-3μs για τον TLP251) προκειμένου να έρθουν σε κατάσταση αγωγής και αφετέρου στον ίδιο τον IR2110 καθώς στο εσωτερικό του υπάρχουν διάφορα υπό-κυκλώματα καθώς και παθητικά εξαρτήματα ,που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3, προκειμένου να γίνει η απαραίτητη λειτουργία του **BOOTSTAP**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΑΜΕ – ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ - ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

7.1 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΠΟΥ ΚΛΗΘΗΚΑΜΕ ΝΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΟΥΜΕ

Οι δυσκολίες που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε αφορούν κυρίως το κομμάτι του προγραμματισμού του STM32 έτσι ώστε να παραχθούν τα απαραίτητα σήματα μεταβλητής συχνότητας. Συγκεκριμένα η συνολική δυσκολία στον προγραμματισμό του STM32 εντοπίστηκε στο προγραμματισμό των χρονιστών (timers) που διαθέτει προκειμένου να διαμορφωθεί το κατάλληλο σήμα. Όσον αφορά το κομμάτι της πλακέτας ισχύος με την γέφυρα χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, σε χαμηλή τάση με διάφορα φορτία (επαγωγικά και ωμικά) προκειμένου να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία της πριν δουλέψει στην ονομαστική τάση των 230V. Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως η μεγαλύτερη πρόκληση και δυσκολία που αντιμετωπίστηκε ήταν ο υπολογισμός του νεκρού χρόνου των τρανζίστορ. Η δυσκολία αυτή προέκυψε καθώς δεν υπάρχει κάποιος ειδικός κανόνας η μαθηματική εξίσωση που να υπολογίζει τον νεκρό χρόνο. Έτσι ο νεκρός χρόνος υπολογίστηκε με συνεχή πειραματικές μετρήσεις στον παλμογράφο.

7.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΤΡΟΠΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρατεθούν κάποια σενάρια βελτίωσης και αναβάθμισης της παραπάνω παρούσας εργασίας.

ΣΕΝΑΡΙΟ 1°

Όσον αφορά το hardware κομμάτι, μια πρώτη βασική βελτίωση είναι η προσθήκη μιας αντίστασης ισχύος μέτρησης ρεύματος από την γέφυρα προς την γείωση καθώς και ένα κύκλωμα που θα περιλαμβάνει έναν τελεστικό ενισχυτή και έναν γραμμικό οπτό συζεύκτη για γαλβανική απομόνωση. Απώτερος σκοπός αυτού του κυκλώματος είναι η μέτρηση του ρεύματος της γέφυρας. Αυτή η προσθήκη θα λειτουργήσει και ως προστασία στην γέφυρα. Αν για οποιοδήποτε λόγο το ρεύμα της γέφυρας αυξηθεί πάνω από κάποιο προκαθορισμένο όριο που έχει θέσει ο χρήστης τότε αυτόματα θα διακόπτεται η παροχή τάσης στην γέφυρα με την βοήθεια ενός ηλεκτρονόμου.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2°

Στο σύστημα αυτό μπορεί να προστεθεί ένα σύστημα αισθητήρων στον κινητήρα το οποίο θα μετρά συνεχώς τις στροφές(Rpm) και έτσι θα μπορεί συνεχώς να ρυθμίζει την απαραίτητη συχνότητα του σήματος SPWM το οποίο παρέχεται στα MOSFET, βάσει μιας επιθυμητής τιμής στροφών του κινητήρα. Αυτού του είδους ο έλεγχος χρησιμοποιείται κατά κόρον στα ηλεκτρονικά ισχύος καθώς επίσης με αυτόν τον τρόπο, δηλαδή με την ανάδραση από την έξοδο προς την είσοδο, λειτουργούν αρκετές συσκευές ισχύος όπως ο φούρνος η και τα κλιματιστικά. Ο έλεγχος αυτός ονομάζεται PID και αναφέρεται στην ανάδραση από την έξοδο προς την είσοδο.

ΣΕΝΑΡΙΟ 3°

Τέλος η πιο σημαντική βελτίωση στο παρόν σύστημα, είναι η προσθήκη IOT χαρακτηριστικών στην υπάρχουσα κατασκευή. Πιο αναλυτικά μπορεί να προστεθούν ακόμα δυο αισθητήρες για την μέτρηση της θερμοκρασίας και υγρασίας ταυτόχρονα. Αυτό γίνεται γιατί σε κανονικές συνθήκες ο κινητήρας θα βρισκόταν σε κάποιο βιομηχανικό περιβάλλον που σε αυτή την περίπτωση η υγρασία και η θερμοκρασία παίζουν έναν σημαντικό ρόλο στην

απόδοση του κινητήρα. Οι μετρούμενες αυτές τιμές καθώς και η συχνότητα και η στροφές του κινητήρα, θα μεταφέρονται σε ένα cloud η ακόμα και σε προσωπική ιστοσελίδα. Το πιο γνωστό cloud για δεδομένα από αισθητήρες είναι το **thing speak** η το postman. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη ειδικών IOT embedded systems όπως ο ESP32, ESP8266, Raspberry PI. Τέλος για την μεταφορά δεδομένων σε ιστοσελίδα χρειάζεται η συγγραφή ειδικού κώδικα σε γλώσσα **python**. Συνεπώς με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε και μια οπτικοποίηση όλων των παραμέτρων που αφορούν τον κινητήρα (υγρασία, θερμοκρασία, στροφές, ρεύμα), καθώς το ίδιο το cloud του thing speak απεικονίζει τα μετρούμενα μεγέθη υπό μορφή διαγραμμάτων.

7.3 ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Σε αυτή τη παράγραφο θα παραθέσουμε σε πίνακες το κόστος κάθε πλακέτας χωριστά, καθώς και το κόστος του κινητήρα.

ΠΛΑΚΕΤΑ Η BRIDGE

H BRIDGE PCB Components	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΚΟΣΤΟΣ ΣΕ ΕΥΡΩ
IC IR2110 SMD	2	10
TLP 521-4 THT	1	2
10 Ohm SMD 1206	4	0.50
1 K Ohm SMD 1206	4	0.50
330 Ohm SMD 1206	4	0.50
3.3 Kohm SMD 1206	4	0.50
1N4007	5	2.50
1n4007 SMD	1	0.75
IC 7805 SMD	1	1
100nf SMD 1206	6	0.75
22nf /35V talium	2	6
BC547	4	1.5
470uf/ 450V	2	14
SMD LED 1206	6	2
VARISTOR 275VAC	1	2
IPA60R099P7XKSA1	4	25
5 Ohm NTC	1	1.5
600 V/ 10 ^A Rectifier	1	4
SWITCH DOUBLE POLE	1	2
TERMINAL BLOCKS	2	3
PCB POWER SUPPLY	1	6
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ		25
ΣΥΝΟΛΟ		111

Πίνακας 5.1 κόστος υλικών Η BRIDGE PCB

ΠΛΑΚΕΤΑ STM32 NUCLEO

STM32 COMPONENTS	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΚΟΣΤΟΣ ΣΕ ΕΥΡΩ
330 ohm THT 1/4	8	1.5
22k ohm THT 1/4	3	0.45
0 Ohm THT 1/4	20	3
4.7K Ohm 1/4	4	0.6
100 Ohm 1/4	1	0.15
100 Ohm potentiometer	1	0.15
BC547	3	1
DIP SWITCH 8	1	1
RESISTOR PACK 9	2	2.5
LED	8	3.5
100nF	5	2.5
KEYPAD 4x4	1	7.5
LCD 2x16	1	7.5
LM35	1	1.5
7 SEGMENT DISPLAY COMMON CATHODE	3	3.5
MALE HEADERS	3	1.5
FEMALE HEADERS	5	1.5
CR2032 HOLDER	1	1
ULN2003	1	1
DS1302	1	2
XTAL 32.76KHZ	1	1
4.7OHM/5W	2	3
BUZZER	1	1
STM32 H743ZI		25
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΑΚΕΤΑΣ		20
ΣΥΝΟΛΟ		94

Πίνακας 5.2 κόστος υλικών πλακέτας STM32

ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

	ΚΟΣΤΟΣ ΣΕ ΕΥΡΩ
STM32 PCB	94
H BRIDGE PCB	111
Single Phase 1HP Motor	100
Σύνολο	305

Πίνακας 5.3 Τελικό κόστος

Στο παραπάνω κόστος των 305 Ευρώ δεν συνυπολογίζονται τα απαραίτητα μεταφορικά έξοδα.

7.4 ΕΠΙΛΟΓΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παραπάνω διπλωματική εργασία μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ένας inverter που ανήκει στην κατηγορία των VFDs. Η χρήση τέτοιων είδους inverter προορίζεται όπως ειπώθηκε και στην αρχή αποκλειστικά για κινητήρες. Συγκεκριμένα στην αγορά και στην βιομηχανία χρησιμοποιούνται κατά κόρον τριφασικοί κινητήρες οπότε οι βιομηχανικοί VFDs προορίζονται για τριφασικούς κινητήρες. Σε αυτήν την εργασία αρχικά ,αφού πρώτα μελετήθηκε διεξοδικά η δομή των AC κινητήρων και με ποιους τρόπους είναι εφικτή η ρύθμιση και ο έλεγχος των στρόφων τους, έγινε μια μελέτη όσον αναφορά τους VFDs. Πιο αναλυτικά αυτό που ερευνήθηκε είναι για τι είδους κινητήρες (μονοφασικούς η τριφασικούς) υπάρχουν στην αγορά οι βιομηχανικοί VFDs. Εν συνεχεία έγινε μια διεξοδική και εκτενής μελέτη στην φυσική και ηλεκτρονική δομή ενός τυπικού VFD. Κατόπιν αφού έγινε η επιλογή των ημιαγωγών με βάση την μέγιστη τάση και το μέγιστο ρεύμα, κατασκευάστηκαν τα δυο τυπωμένα κυκλώματα, του επεξεργαστή και του κυκλώματος ισχύος της γέφυρας. Τέλος εξήχθησαν τα απαραίτητα αποτελέσματα με τον κινητήρα, αφού πρώτα έγινε ένας εκτεταμένος έλεγχος και των δυο πλακετών για τυχόν αστοχίες στις κολλήσεις.


```

0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,125,150,175,
200,225,250,273,296,320,344,368,
391,414,437,460,482,504,526,547,
568,589,609,629,649,668,687,705,
723,740,758,774,790,806,821,836,
850,864,877,890,902,913,924,935,
945,954,963,971,979,985,992,998,
1003,1008,1012,1015,1018,1020,1021,1022,
1023,1022,1021,1020,1018,1015,1012,1008,
1003,998,992,985,979,971,963,954,
945,935,924,913,902,890,877,864,
850,836,821,806,790,774,756,740,
723,705,687,668,649,629,609,589,
568,547,526,504,482,460,437,414,
391,368,344,320,296,272,248,224,
199,174,150,125,100,0,0,0,0,
};

```

```

uint32_t DestAddress1 = (uint32_t) &(TIM2->CCR1);
uint32_t DestAddress2 = (uint32_t) &(TIM2->CCR3);
uint32_t TIM4_Ticks = TIM4CLK / (NS * F_SIGNAL);

```

```

/* USER CODE BEGIN 2 */

```

```

HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIM_OC_Start(&htim4, TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIM_OC_Start(&htim4, TIM_CHANNEL_3);
HAL_DMA_Start_IT(&hdma_tim4_ch1, (uint32_t)Wave_LUT1, DestAddress1, NS);
__HAL_TIM_ENABLE_DMA(&htim4, TIM_DMA_CC1);
HAL_DMA_Start_IT(&hdma_tim4_ch3, (uint32_t)Wave_LUT2, DestAddress2, NS);
__HAL_TIM_ENABLE_DMA(&htim4, TIM_DMA_CC3);

```

```

/* USER CODE END 2 */

```

Πρόγραμμα 2. Κώδικας SPWM για μεταβλητή συχνότητα, απεικόνιση στην LCD οθόνη, δείκτες 7 τομέων, έλεγχος από keypad, εφαρμογή στο κινητό


```

        0,0,0,0,0,0,0,0,
};
uint32_t Wave_LUT2[NS] = {0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,125,150,175,
        200,225,250,273,296,320,344,368,
        391,414,437,460,482,504,526,547,
        568,589,609,629,649,668,687,705,
        723,740,758,774,790,806,821,836,
        850,864,877,890,902,913,924,935,
        945,954,963,971,979,985,992,998,
        1003,1008,1012,1015,1018,1020,1021,1022,
        1023,1022,1021,1020,1018,1015,1012,1008,
        1003,998,992,985,979,971,963,954,
        945,935,924,913,902,890,877,864,
        850,836,821,806,790,774,756,740,
        723,705,687,668,649,629,609,589,
        568,547,526,504,482,460,437,414,
        391,368,344,320,296,272,248,224,
        199,174,150,125,0,0,0,0,
};

uint32_t DestAddress1 = (uint32_t) &(TIM2->CCR1);
uint32_t DestAddress2 = (uint32_t) &(TIM2->CCR3);
uint32_t TIM4_Ticks;
/* USER CODE END PV */
* Private user code -----*/
/* USER CODE BEGIN 0 */
void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart)
{
    if(huart->Instance == huart6.Instance)
    {
        if(rxData=='1'){
            F_SIGNAL = F_SIGNAL + 2;

```

```

if(F_SIGNAL>=110){
    F_SIGNAL=110;
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, OVER_Pin, GPIO_PIN_SET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOG, BUZZER_Pin, GPIO_PIN_SET);
}
}
if(rxData=='0'){
    F_SIGNAL = F_SIGNAL - 2;
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, OVER_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOG, BUZZER_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    if(F_SIGNAL<6){
        F_SIGNAL=6;
    }
}
rxData=0;
}
}

#define D1_HIGH() HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_SET)
#define D1_LOW() HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_RESET)
#define D2_HIGH() HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_SET)
#define D2_LOW() HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_4, GPIO_PIN_RESET)
#define D3_HIGH() HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_2, GPIO_PIN_SET)
#define D3_LOW() HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_2, GPIO_PIN_RESET)
uint8_t segmentNumber[10] = {
    0x3f, // 0
    0x06, // 1
    0x5b, // 2
    0x4f, // 3
    0x66, // 4
    0x6d, // 5
    0x7d, // 6
    0x07, // 7
    0x7f, // 8
    0x6F // 9
};

void SevenSegment_Update(uint8_t number){
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_6, ((number>>0)&0x01));
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_15, ((number>>1)&0x01));
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_6, ((number>>2)&0x01));
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_12, ((number>>3)&0x01));
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_15, ((number>>4)&0x01));
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, GPIO_PIN_7, ((number>>5)&0x01));
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_5, ((number>>6)&0x01));
    //HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_0, ((number>>6)&0x01));
}

```



```

/* Configure the system clock */
SystemClock_Config();

/* USER CODE BEGIN SysInit */
/* USER CODE END SysInit */

/* Initialize all configured peripherals */

MX_GPIO_Init();
MX_ETH_Init();
MX_USART3_UART_Init();
MX_DMA_Init();
MX_TIM2_Init();
MX_USB_OTG_FS_PCD_Init();
MX_TIM7_Init();
MX_TIM4_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */
HAL_GPIO_WritePin(GPIOF, PWR_Pin, GPIO_PIN_SET);
TM_HD44780_Init(16, 2);
TM_HD44780_Puts(0, 0, "SPWM_VFD DRIVER");
TM_HD44780_Puts(0, 1, "BOOTING...");
HAL_Delay(2000);
for(i=0;i<17;i++){
TM_HD44780_ScrollLeft();
HAL_Delay(400);
}
TM_HD44780_Clear();
HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim7);
void sine(){
HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIM_OC_Start(&htim4, TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIM_OC_Start(&htim4, TIM_CHANNEL_3);
HAL_DMA_Start_IT(&hdma_tim4_ch1, (uint32_t)Wave_LUT1, DestAddress1, NS);
__HAL_TIM_ENABLE_DMA(&htim4, TIM_DMA_CC1);

HAL_DMA_Start_IT(&hdma_tim4_ch3, (uint32_t)Wave_LUT2, DestAddress2, NS);
__HAL_TIM_ENABLE_DMA(&htim4, TIM_DMA_CC3);

do{
    TM_HD44780_Puts(0, 0, " Sine Wave  ");
    TM_HD44780_Puts(0, 1, " Freq = ");
    HAL_UART_Receive_IT(&huart6,&rxData,1);
    tempCharStore=KeypadGetKey();
    if(tempCharStore!=KEYPAD_NO_PRESSED){
        if(tempCharStore=='2'){
            F_SIGNAL = F_SIGNAL + 2;
            if(F_SIGNAL>=110){

```

```

        F_SIGNAL=110;
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, OVER_Pin, GPIO_PIN_SET);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOG, BUZZER_Pin, GPIO_PIN_SET);
    }
    }
    else if (tempCharStore == '5'){
        F_SIGNAL = F_SIGNAL - 2;
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, OVER_Pin, GPIO_PIN_RESET);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOG, BUZZER_Pin,
GPIO_PIN_RESET);
    }
    if(F_SIGNAL<=6){
        F_SIGNAL=6;
    }
    }
    TIM4_Ticks = TIM4CLK / (NS * F_SIGNAL);
    MX_TIM4_Init();
    sprintf(tempBuffer, "%d Hz ", F_SIGNAL); // metatroph se ASCII th
suxnothta
        TM_HD44780_Puts(8, 1, tempBuffer); // tupwnei th suxnothta sthn othonh
    }

    While (tempCharStore!='C');
    TM_HD44780_Puts(0, 0, " "); // katharizei h othonh prin paei sth while(1)
    TM_HD44780_Puts(0, 1, " ");
    }

    while (1) {

        HAL_TIM_PWM_Stop(&htim2, TIM_CHANNEL_1); // stamataei to PWM
        HAL_TIM_OC_Stop(&htim4, TIM_CHANNEL_1); // stamataei ton Timer3
        HAL_DMA_Abort_IT(&hdma_tim4_ch1); // stamataei th metafora mesw
DMA
        HAL_TIM_PWM_Stop(&htim2, TIM_CHANNEL_3); // stamataei to PWM
        HAL_TIM_OC_Stop(&htim4, TIM_CHANNEL_3);
        HAL_DMA_Abort_IT(&hdma_tim4_ch3);
        HAL_Delay(1);
        sine();
    }

```

ΦΥΛΛΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

1. TLP251-4 Datasheet:
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/32437/TOSHIBA/TLP521-4.html>
2. IR2110 Datasheet:
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/82793/IRF/IR2110.html>
3. IPA60R099P6 Datasheet:
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1201922/ISC/IPA60R099P6.html>
4. Nucleo H743ZI Development board datasheet:
<https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-h743zi.html>
5. STM32 H743ZIT6 Datasheet:
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1179095/STMICROELECTRONICS/STM32H743ZIT6.html>

BΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1]. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/single-phase-bridge-inverter>
- [2]. https://www.researchgate.net/publication/342219074_PWM_Inverter_Drive_for_Modified_Single_Phase_Induction_Motors
- [3]. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sinusoidal-pulse-width-modulation>
- [4]. <https://www.watelectronics.com/sine-pulse-width-modulation-s pwm-working/#:~:text=The%20term%20SPWM%20stands%20for,of%20voltage%20per%20half%20cycle.>
- [5]. <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-a-variable-frequency-drive/#:~:text=The%20most%20common%20uses%20of,sophisticated%20types%20of%20motor%20controllers.>
- [6]. <https://realpars.com/vfd-vs-soft-starter/#:~:text=The%20main%20difference%20between%20the,if%20speed%20control%20is%20required.>
- [7]. <https://emcsolutions.com/2021/02/04/vfds-pros-and-cons/>
- [8]. <https://el.sogears.com/products-overview/150-me%3%B0alspennum%3%B3tor>
- [9]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AC%20Induction%20Motor%2000984a.pdf>

- [10].https://www.researchgate.net/publication/317868603_Two-Phase_Inverters_with_Minimum_Switching_Devices
- [11].<https://components101.com/articles/buck-converter-basics-working-design-and-operation>
- [12].https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/thyristor-scr-triac/triac-circuit-design-basics.php
- [13].https://www.researchgate.net/figure/MODIFIED-SINE-WAVE-INVERTERS-ACTUALLY-GENERATE-SQUARE-WAVES-WITH-DEAD-SPOTS-BETWEEN-THE_fig2_280614623
- [14]. <https://electricalbaba.com/integral-cycle-control-of-ac-voltage-controller/>
- [15].<https://www.machinedesign.com/learning-resources/engineering-essentials/article/21833971/soft-starters>
- [16]. <https://www.engineersgarage.com/variable-frequency-drive/>
- [17].https://www.researchgate.net/figure/General-Single-phase-VSI-VFD_fig1_302380469
- [18].https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82_%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82
- [19].<https://www.amperorio.gr/index.php/el/istoria-tou-ilektrikou-aftokinitou/item/318-istoria-tou-ilektrikou-aftokinitou-xekina-apo-tis-arxes-tou-19ou-eona.html>
- [20]. <https://circuitcellar.com/resources/quickbits/single-phase-induction-motors/>
- [21].<https://www.electricaleasy.com/2014/02/starting-of-three-phase-induction-motors.html>
- [22]. ΙΟΡΔΑΝΗΣ Ν.ΚΙΟΣΚΕΡΙΔΗΣ, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [23] ΙΟΡΔΑΝΗΣ ΚΙΟΣΚΕΡΙΔΗΣ, Ηλεκτρονικά ισχύος, Εκδόσεις τζιόλα

