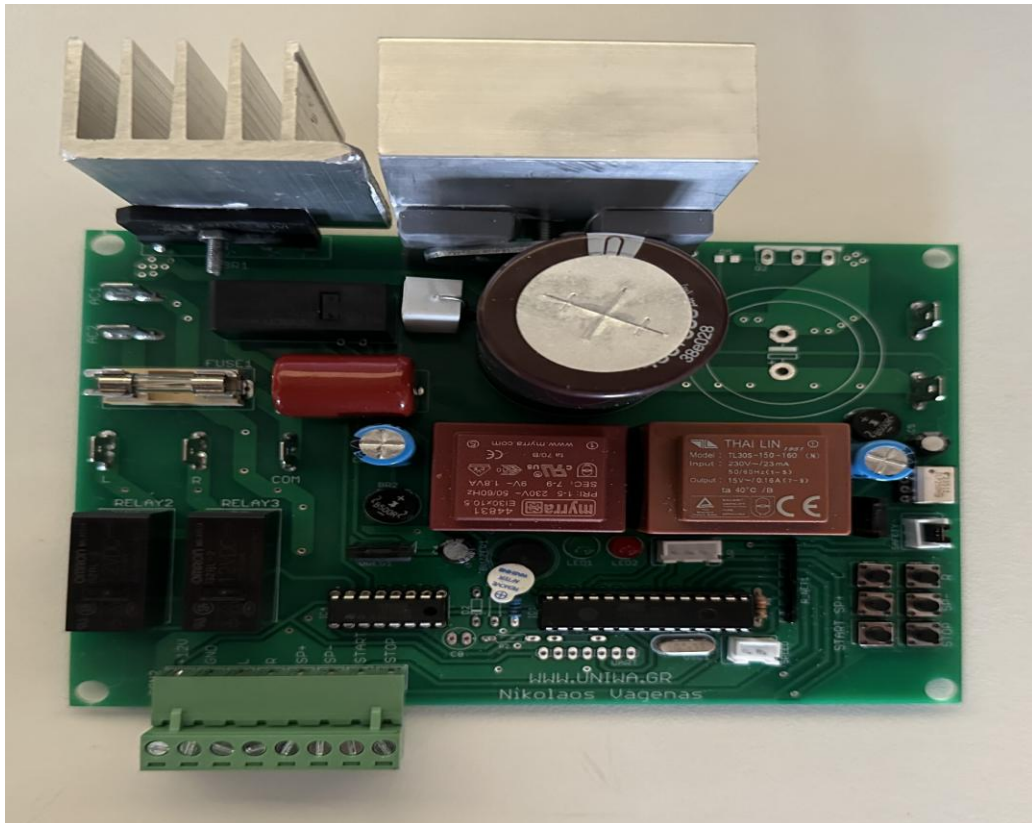




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## Διπλωματική Εργασία

# Μελέτη και κατασκευή διάταξης ελέγχου ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος



**Φοιτητής: Βαγενάς Νικόλαος - Αλέξανδρος**  
**ΑΜ: 51204178**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Καραϊσάς Πέτρος**  
**Αναπληρωτής Καθηγητής**

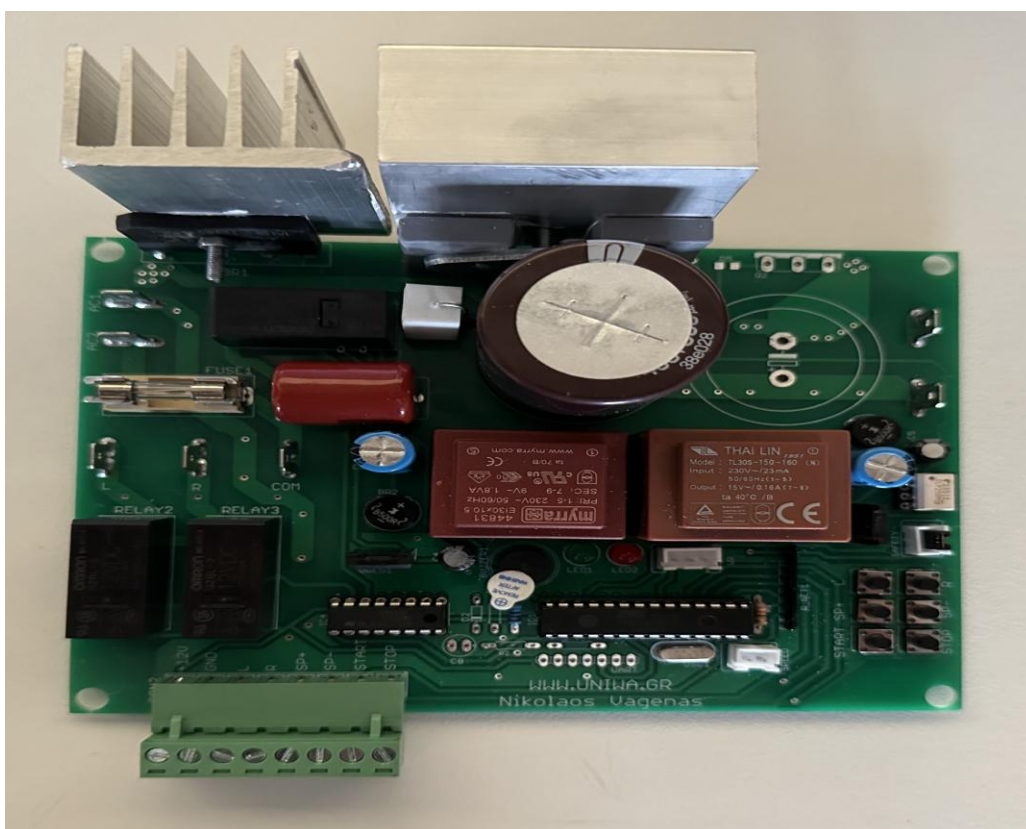
**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Design and implementation of direct current motor controller**



**Student: Vagenas Nikolaos - Alexandros**  
**Registration Number: 51204178**

**Supervisor**

**Karaisas Petros**  
**Professor**

**ATHENS-EGALEO, APRIL 2024**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Καραϊσάς Πέτρος, Αναπληρωτής Καθηγητής	Ιωαννίδης Γεώργιος, Καθηγητής	Συγγερίδου Ολυμπιάδα, Λέκτορας
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Νικόλαος – Αλέξανδρος Βαγενάς,  
Απρίλιος, 2024**

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογράφων Βαγενάς Νικόλαος – Αλέξανδρος του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 51204178 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.»

Ο Δηλών

Βαγενάς Νικόλαος – Αλέξανδρος



*Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στην μνήμη του πατέρα μου ως ένα ευχαριστώ για την υποστήριξη κατά τη διάρκεια της ζωής μου και των σπουδών μου.*

Με το παρόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Καραϊσά Πέτρο, για τη βοήθειά του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, ώστε να αναλάβω το παρόν θέμα.

Επίσης, ευχαριστώ τα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον καθηγητή κ. Ιωαννίδη Γεώργιο και τη Λέκτορα κ. Συγγερίδου Ολυμπιάδα, για τις επισημάνσεις και τις προτάσεις τους.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος, κ. Αυγερινό Αυγέρι, για την πολύτιμη βοήθειά του, στο πρακτικό μέρος της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συγγενείς μου και τους φίλους μου, για την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου και κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Η μελέτη και κατασκευή διατάξεων ελέγχου για ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), αποτελεί ένα θεμελιώδες πεδίο στον τομέα της ηλεκτρομηχανικής και των αυτοματισμών. Η σημασία των ηλεκτροκινητήρων DC στην σύγχρονη τεχνολογία είναι αδιαμφισβήτητη, καθώς αυτοί οι κινητήρες είναι καίριοι για την οδήγηση και τον έλεγχο κίνησης σε πλήθος εφαρμογών, όπως βιομηχανικά κινητήρια συστήματα, ηλεκτρικά οχήματα, συστήματα αυτοματισμού και συσκευές καθημερινής χρήσης. Η δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της ταχύτητας και της ροπής τους, σε συνδυασμό με την υψηλή αποδοτικότητα και αξιοπιστία τους, καθιστούν τους ηλεκτροκινητήρες DC μια δημοφιλή επιλογή για πολλές βιομηχανικές και τεχνολογικές εφαρμογές.

Στη βιομηχανία, οι ηλεκτροκινητήρες DC χρησιμοποιούνται για την κίνηση μηχανημάτων, που απαιτούν ακριβή έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής. Αυτοί οι κινητήρες είναι ιδανικοί για συστήματα όπως ανυψωτικά μηχανήματα, συσκευές μεταφοράς και μηχανές ακριβείας. Η ικανότητά τους να παρέχουν σταθερή ροπή ανεξαρτήτως της ταχύτητας τους, τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή ρύθμιση της ταχύτητας ανεξαρτήτως φορτίου.

Ένα άλλο σημαντικό πεδίο εφαρμογής, είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι ηλεκτροκινητήρες DC χρησιμοποιούνται ευρέως στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Οι κινητήρες αυτοί, επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, βελτιώνοντας την απόδοση και την οικονομία καυσίμου των οχημάτων. Επιπλέον, οι ηλεκτροκινητήρες DC, είναι απαραίτητοι για την παροχή βοηθητικών λειτουργιών στα οχήματα, όπως το σύστημα διεύθυνσης, τα παράθυρα, το σύστημα κλιματισμού, το σύστημα ψύξης και το σύστημα υαλοκαθαριστήρων, μιας και η τυποποιημένη τάση λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος των οχημάτων είναι 12VDC.

Η κατασκευή και ο έλεγχος αυτών των κινητήρων, απαιτεί την κατανόηση βασικών αρχών ηλεκτρομηχανικής, καθώς και την εφαρμογή προχωρημένων τεχνικών ελέγχου και προγραμματισμού. Οι σύγχρονες διατάξεις ελέγχου για ηλεκτροκινητήρες DC χρησιμοποιούν συχνά τεχνολογίες όπως, τα ηλεκτρονικά ισχύος, μικροελεγκτές, και συστήματα αυτοματισμού για την παροχή ακριβούς και αξιόπιστου ελέγχου. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των κινητήρων, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της διάρκειας ζωής τους.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θα εξεταστεί η σχεδίαση και κατασκευή μιας διάταξης ελέγχου για ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Η εργασία θα περιλαμβάνει τη θεωρητική μελέτη των βασικών αρχών λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων DC, την ανάλυση των διαφόρων τεχνικών ελέγχου που χρησιμοποιούνται και την εφαρμογή αυτών των τεχνικών σε πραγματικά συστήματα.

Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή στοχεύει στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης και λειτουργικής διάταξης ελέγχου για ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος, συνεισφέροντας στη βελτίωση της τεχνολογίας και την προώθηση των εφαρμογών της σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας και της τεχνολογίας.

## Λέξεις – κλειδιά

Ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος, Διάταξη ελέγχου, Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), Μικροελεγκτές, Ρύθμιση ταχύτητας, IGBT, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Ελεγκτές μεταβλητής ταχύτητας.

## **Abstract**

The study and construction of control systems for direct current (DC) motors is a fundamental field in electromechanical engineering and automation. The importance of DC motors in modern technology is indisputable, as these motors are crucial for driving and controlling motion in a wide range of applications, such as industrial machinery, electric vehicles, automation systems, and everyday devices. The ability to precisely adjust their speed and torque, combined with their high efficiency and reliability, makes DC motors a popular choice for many industrial and technological applications.

In the industry, DC motors are used to power machinery that requires precise control of speed and torque. These motors are ideal for systems such as lifting equipment, conveyor systems, and precision machines. Their ability to provide constant torque regardless of their speed makes them ideal for applications that require consistent power.

Another significant application area is the automotive industry, where DC motors are widely used in electric and hybrid vehicles. These motors allow for precise control of speed and acceleration, improving vehicle performance and fuel efficiency. Additionally, DC motors are essential for providing auxiliary functions in vehicles, such as power steering and window operations.

The construction and control of these motors require an understanding of fundamental electromechanical principles, as well as the application of advanced control and programming techniques. Modern control systems for DC motors often utilize technologies such as power electronics, microcontrollers, and automation systems to provide precise and reliable control. These technologies allow for the optimization of motor performance, reduction of energy consumption, and extension of motor lifespan.

In this thesis, the design and construction of a control system for a DC motor using the Pulse Width Modulation (PWM) technique will be examined. The study will include a theoretical exploration of the fundamental operating principles of DC motors, an analysis of the various control techniques used, and the application of these techniques to real-world systems.

In summary, this work aims to develop a comprehensive and functional control system for a DC motor, contributing to the advancement of technology and promoting its applications across various sectors of industry and technology.

## **Keywords**

DC Motor, Control System, Pulse Width Modulation - PWM , Microcontrollers, Speed Control, IGBT, Industrial Electronic, Variable Speed Controller



## Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων .....	11
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	14
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>15</b>
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας .....	15
Σκοπός και στόχοι .....	15
Μεθοδολογία.....	15
Δομή	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Αρχή λειτουργίας ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος.....</b>	<b>18</b>
1.1.1 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος .....	19
1.1.2 Καμπύλη μαγνήτισης ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος .....	20
<b>1.2 Ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης.....</b>	<b>21</b>
<b>1.3 Ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς .....</b>	<b>23</b>
<b>1.4 Ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες .....</b>	<b>25</b>
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Τεχνικές ρύθμισης του ρεύματος σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Χρήση μεταβλητής αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Χρήση ρυθμιστή τάσης στο τύλιγμα του δρομέα .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3 Χρήση μετατροπέα DC-DC με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) .....</b>	<b>30</b>
2.3.1 Μετατροπέας DC-DC .....	30
2.3.2 Μετατροπέας DC-DC υποβιβασμού τάσης .....	32
2.3.3 Μετατροπέας DC-DC ανύψωσης τάσης .....	37
2.3.4 Μετατροπέας κλάσης “C” .....	41
2.3.5 Μετατροπέας κλάσης “D” .....	43
2.3.6 Μετατροπέας κλάσης “E” .....	45
2.3.7 Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM.....	46
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Η διάταξη ελέγχου ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) που χρησιμοποιήθηκε.....</b>	<b>49</b>
<b>3.1 Περιγραφή λειτουργίας .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....</b>	<b>49</b>
<b>3.3 Block διάγραμμα .....</b>	<b>50</b>
<b>3.4 Θεωρητικό κύκλωμα .....</b>	<b>51</b>
<b>3.5 Τυπωμένο κύκλωμα .....</b>	<b>53</b>
<b>3.6 Ο μικροελεγκτής ATmega328P .....</b>	<b>58</b>
<b>3.7 Το τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) 30N60 .....</b>	<b>64</b>
<b>3.8 Ο Οπτοζεύκτης (Optocoupler) TLP250 .....</b>	<b>69</b>
<b>3.9 Η γλώσσα προγραμματισμού BASCOM AVR .....</b>	<b>72</b>
3.9.1 Η εντολή Config στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR.....	72
3.9.2 Η εντολή Alias στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR.....	73
3.9.3 Η εντολή Set, Reset & Waitms στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR .....	73
3.9.4 Η εντολή Dim στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR.....	75
3.9.5 Η εντολή Do-Loop στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR.....	75
3.9.6 Η εντολή If-Then-Else στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR .....	76
3.9.7 Η εντολή For στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR.....	77
<b>3.10 Το πρόγραμμα προσομοίωσης του κυκλώματος ισχύος .....</b>	<b>78</b>

<b>3.11</b>	<b>Το πρόγραμμα του μικροελεγκτή.....</b>	<b>82</b>
<b>3.12</b>	<b>Το πρόγραμμα σχεδίασης τυπωμένων κυκλωμάτων EAGLE .....</b>	<b>91</b>
<b>4</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Πειραματικό μέρος .....</b>	<b>97</b>
<b>5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>104</b>
	<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές .....</b>	<b>105</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Η πρώτη ομοιοπολική ηλεκτρογεννήτρια, δίσκος Faraday .....	17
Εικόνα 2 Η απλοποιημένη δομή ενός ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος .....	18
Εικόνα 3 Η τομή του εσωτερικού ενός ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος .....	19
Εικόνα 4 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (Βέννης, 2018).....	19
Εικόνα 5 Καμπύλη μαγνήτισης ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (Δούλος, 2021).....	20
Εικόνα 6 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης (Μαλατέστας, 2015) .....	21
Εικόνα 7 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης (Μαλατέστας, 2015) .....	22
Εικόνα 8 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς (Μαλατέστας, 2015) .....	23
Εικόνα 9 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς (Καραϊσάς Π & Συνεργάτες, 2022) .....	25
Εικόνα 10 Μεταβλητή ρυθμιστική αντίσταση .....	27
Εικόνα 11 Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC .....	31
Εικόνα 12 Τάση εξόδου (Μαλατέστας, 2015).....	31
Εικόνα 13 Μετατροπέας DC-DC υποβιβασμού (Μαλατέστας, 2015).....	32
Εικόνα 14 Ροή του ρεύματος κατά το διάστημα που ο διακόπτης S είναι κλειστός .....	33
Εικόνα 15 Ροή του ρεύματος κατά το διάστημα που ο διακόπτης S είναι ανοιχτός .....	34
Εικόνα 16 Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού κατά το διάστημα συνεχούς αγωγής του ρεύματος (Μαλατέστας, 2015).....	35
Εικόνα 17 Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού κατά το διάστημα ασυνεχούς αγωγής του ρεύματος (Μαλατέστας, 2015).....	36
Εικόνα 18 Μετατροπέας DC-DC ανύψωσης (Μαλατέστας, 2015) .....	37
Εικόνα 19 Ροή του ρεύματος κατά το διάστημα που ο διακόπτης S είναι κλειστός .....	38
Εικόνα 20 Ροή του ρεύματος κατά το διάστημα που ο διακόπτης S είναι ανοιχτός .....	39

Εικόνα 21 Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC ανύψωσης κατά το διάστημα συνεχούς αγωγής του ρεύματος (Μαλατέστας, 2015).....	40
Εικόνα 22 Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC ανύψωσης κατά το διάστημα ασυνεχούς αγωγής του ρεύματος (Μαλατέστας, 2015).....	41
Εικόνα 23 Ο μετατροπέας κλάσης "C" (Μαλατέστας, 2015).....	41
Εικόνα 24 Κυματομορφές τάσης-ρεύματος μετατροπέα κλάσης "C" (Μαλατέστας, 2015) .....	42
Εικόνα 25 Ο μετατροπέας κλάσης "D" (Μαλατέστας, 2015).....	43
Εικόνα 26 Παλμοί έναυσης των διακοπών T1 και T2 για διαφορετικές τιμές του βαθμού χρησιμοποίησης $\alpha$ (Μαλατέστας, 2015).....	44
Εικόνα 27 Κυματομορφές τάσης - ρεύματος του τυλίγματος διέγερσης (Μαλατέστας, 2015).....	45
Εικόνα 28 Ο μετατροπέας κλάσης "E" (Μαλατέστας, 2015) .....	45
Εικόνα 29 Η δομή ενός σήματος PWM .....	47
Εικόνα 30 Η δομή σημάτων PWM με διαφορετικά Duty Cycle (Μαρτίνης, 2013) .....	47
Εικόνα 31 Γραφική απεικόνιση της πλακέτας .....	50
Εικόνα 32 Το Block διάγραμμα της πλακέτας .....	51
Εικόνα 33 Θεωρητικό κύκλωμα .....	52
Εικόνα 34 Τοπογραφικό διάγραμμα τυπωμένης πλακέτας.....	53
Εικόνα 35 Πάνω όψη της τυπωμένης πλακέτας.....	54
Εικόνα 36 Κάτω όψη της τυπωμένης πλακέτας.....	55
Εικόνα 37 Τυπωμένη πλακέτα με γείωση.....	56
Εικόνα 38 Τυπωμένη πλακέτα χωρίς γείωση .....	57
Εικόνα 39 Ο μικροελεγκτής Atmega328P της εταιρείας Microchip Technology .....	58
Εικόνα 40 Διαμόρφωση των PIN του μικροελεγκτή Atmega328P .....	59
Εικόνα 41 Block διάγραμμα αρχιτεκτονικής AVR .....	63
Εικόνα 42 Η μπροστινή και πίσω όψη ενός IGBT .....	64
Εικόνα 43 Η δομή ενός IGBT (Φουρλής, 2018) .....	65
Εικόνα 44 Η μπροστινή και η πίσω όψη του Optocoupler που χρησιμοποιήθηκε .....	69
Εικόνα 45 Το σχέδιο συνδεσμολογίας του Optocoupler .....	70

Εικόνα 46 Περιβάλλον προγράμματος PSIM.....	78
Εικόνα 47 Το κύκλωμα ισχύος που σχεδιάσαμε στο πρόγραμμα προσομοίωσης.....	79
Εικόνα 48 Προσομοίωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος με διακοπτική συχνότητα 2 kHz και duty cycle 25%.....	80
Εικόνα 49 Προσομοίωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος με διακοπτική συχνότητα 2 kHz και duty cycle 55%.....	80
Εικόνα 50 Προσομοίωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος με διακοπτική συχνότητα 9 kHz και duty cycle 25%.....	81
Εικόνα 51 Προσομοίωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος με διακοπτική συχνότητα 9 kHz και duty cycle 55%.....	81
Εικόνα 52 Το Control Panel του προγράμματος Eagle.....	92
Εικόνα 53 Άνοιγμα καινούργιου Project.....	92
Εικόνα 54 Καταχώρηση του ονόματος του Project.....	93
Εικόνα 55 Άνοιγμα της θεωρητικής σχεδίασης του Project.....	93
Εικόνα 56 Άνοιγμα της βιβλιοθήκης υλικών και εξαρτημάτων.....	94
Εικόνα 57 Εμφάνιση των υλικών και εξαρτημάτων που προσθέσαμε στη θεωρητική σχεδίαση του Project.....	94
Εικόνα 58 Άνοιγμα της πρακτικής σχεδίασης του Project.....	95
Εικόνα 59 Τοποθέτηση των υλικών στην πλακέτα και σύνδεση τους.....	95
Εικόνα 60 Εργαστηριακή δοκιμή του συστήματος ελέγχου.....	97
Εικόνα 61 Εργαστηριακή δοκιμή του συστήματος ελέγχου σε DC κινητήρα.....	98
Εικόνα 62 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό φορτίο με duty cycle 16% σε χρόνο 50μs/div.....	99
Εικόνα 63 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό φορτίο με duty cycle 16% σε χρόνο 20μs/div.....	99
Εικόνα 64 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό φορτίο με duty cycle 35% σε χρόνο 50μs/div.....	100
Εικόνα 65 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό φορτίο με duty cycle 35% σε χρόνο 20μs/div.....	100
Εικόνα 66 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό - επαγωγικό φορτίο με duty cycle 4,5% σε χρόνο 50μs/div.....	101

**Εικόνα 67 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό - επαγωγικό φορτίο με duty cycle 4,5% σε χρόνο 20μs/div ..... 102**

**Εικόνα 68 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό - επαγωγικό φορτίο με duty cycle 21% σε χρόνο 20μs/div ..... 102**

### **Αλφαβητικό Ευρετήριο**

IGBT: Insulated-gate bipolar transistor

PWM: Pulse-width modulation

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο έλεγχος των κινητήρων συνεχούς ρεύματος (DC), αποτελεί ένα κρίσιμο τομέα στην ηλεκτρομηχανική, καθώς οι κινητήρες αυτοί βρίσκονται στο επίκεντρο πολλών βιομηχανικών και καθημερινών εφαρμογών. Από τη βιομηχανία και την αυτοκινητοβιομηχανία έως τις οικιακές συσκευές και τα ρομποτικά συστήματα, η ακριβής και αποδοτική λειτουργία των κινητήρων DC είναι ζωτικής σημασίας. Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς και δημοφιλείς τρόπους ελέγχου των κινητήρων αυτών, είναι η τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation - PWM). Η τεχνική PWM επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής ενός κινητήρα DC, μέσω της ρύθμισης της ενεργούς τιμής της τάσης που εφαρμόζεται στον κινητήρα. Αυτή η ρύθμιση επιτυγχάνεται με την εναλλαγή της τάσης σε υψηλή συχνότητα, δημιουργώντας έτσι μια σειρά από παλμούς με μεταβαλλόμενη διάρκεια (εύρος). Ο λόγος του χρόνου που η τάση είναι ενεργή (on) προς τον συνολικό χρόνο ενός κύκλου (on + off) ονομάζεται duty cycle. Με την αλλαγή του duty cycle, μπορούμε να ελέγξουμε την ισχύ που παραδίδεται στον κινητήρα και συνεπώς την ταχύτητα και τη ροπή του.

### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με την μελέτη και κατασκευή μιας διάταξης ελέγχου ηλεκτροκινητήρων DC με την μέθοδο PWM. Η παραπάνω διάταξη αποτελεί πλέον μια από τις βασικές μεθόδους ελέγχου των ηλεκτροκινητήρων DC. Τα ηλεκτρικά οχήματα που βρίσκονται στο επίκεντρο της παγκόσμιας προσπάθειας για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής χρησιμοποιούν για την κίνηση τους ηλεκτροκινητήρες DC, οι οποίοι ελέγχονται με την μέθοδο Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM). Σε αυτό το πλαίσιο, η τεχνολογία των ηλεκτροκινητήρων συνεχούς ρεύματος και οι προηγμένες μέθοδοι ελέγχου τους, όπως η Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM), παίζουν καίριο ρόλο.

### Σκοπός και στόχοι

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή μιας διάταξης ελέγχου ενός ηλεκτροκινητήρα DC με την μέθοδο Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM).

Οι στόχοι της διπλωματικής είναι:

1. Η κατανόηση της δομής των ηλεκτροκινητήρων και η κατανόηση των διαφόρων τρόπων διέγερσης των ηλεκτροκινητήρων DC
2. Η κατανόηση των αντίστοιχων μεθόδων ελέγχου της ταχύτητας των ηλεκτροκινητήρων DC
3. Η κατανόηση τόσο των κρίσιμων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της πλακέτας ελέγχου όσο και των λογισμικών προγραμματισμού και σχεδίασης

### Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για τον σχεδιασμό και την κατασκευή μια διάταξης ελέγχου ενός ηλεκτροκινητήρα DC με την μέθοδο Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM) αναλύεται παρακάτω:

1. Εύρεση της κατάλληλης βιβλιογραφίας για τους ηλεκτροκινητήρες DC και τις μεθόδους ελέγχου των ηλεκτροκινητήρων DC

2. Ανάλυση όλης της παραπάνω βιβλιογραφίας έτσι ώστε να είναι εύκολη η κατανόηση όλων των βασικών αρχών για τους ηλεκτροκινητήρες DC και τις μεθόδους ελέγχων αυτών.
3. Εύρεση και ανάλυση όλων των απαραίτητων προγραμματιστικών και σχεδιαστικών προγραμμάτων για την επιτυχή ολοκλήρωση της διάταξης ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα DC με την μέθοδο Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM)
4. Εύρεση και ανάλυση όλων των απαραίτητων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της διάταξης ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα DC με την μέθοδο Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM)

## Δομή

Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, αναλύεται η βασική δομή των ηλεκτροκινητήρων DC και οι τύποι διέγερσης αυτών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, αναλύθηκαν οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι ελέγχου ηλεκτροκινητήρων DC.

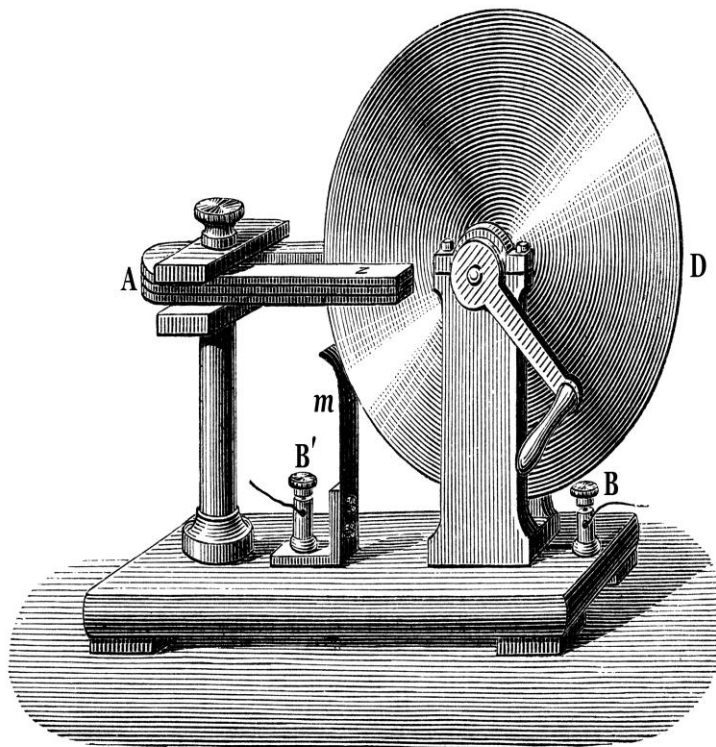
Στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, αναλύθηκαν όλα τα κρίσιμα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της διάταξης ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα DC με την μέθοδο Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM), το πρόγραμμα προσομοίωσης, το πρόγραμμα προγραμματισμού του μικροελεγκτή και το σχεδιαστικό πρόγραμμα της πλακέτας

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος

Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες εφευρέσεις της παγκόσμιας ιστορικής τεχνολογίας. Η πρώτη ηλεκτρική μηχανή, εφευρέθηκε από το Michael Faraday το 1821, η οποία αποτέλεσε τον βασικό άξονα για την εξέλιξη της ηλεκτρομηχανικής τεχνολογίας.



Εικόνα 1 Η πρώτη ομοιοπολική ηλεκτρογεννήτρια, δίσκος Faraday

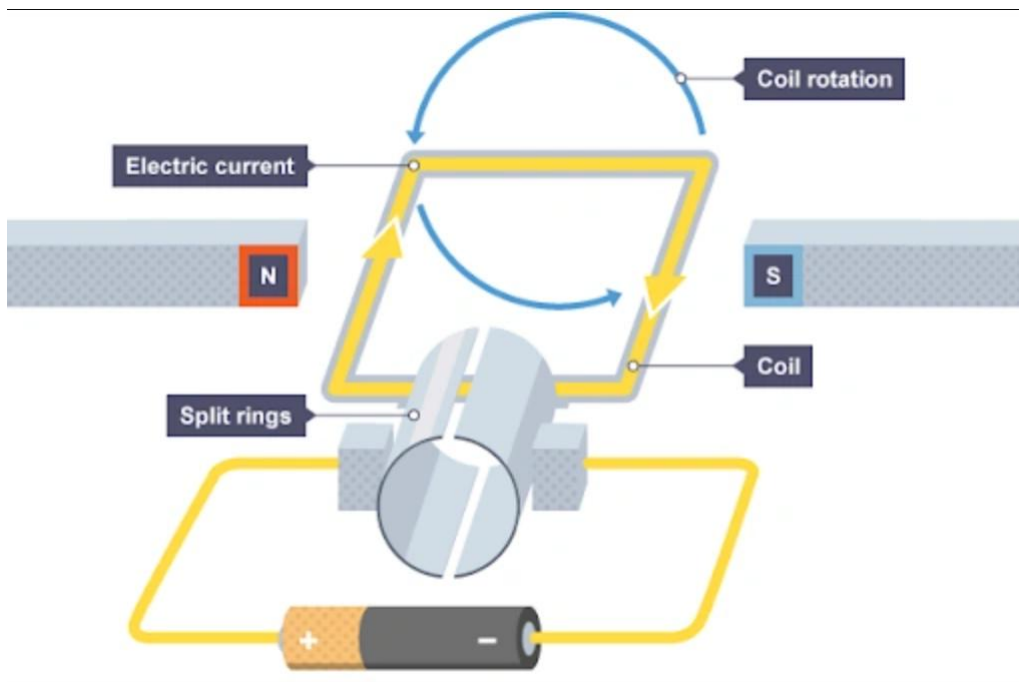
Οι ηλεκτρικές μηχανές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες αναλόγως με τον τρόπο χρήσης της. Οι δύο κατηγορίες είναι οι παρακάτω:

1. Ηλεκτροκινητήρας
2. Ηλεκτρογεννήτρια

Και για τις δύο παραπάνω κατηγορίες, τα μέρη από τα οποία αποτελείται η κάθε ηλεκτρική μηχανή παραμένουν τα ίδια, με την μόνη διαφοροποίηση να εντοπίζεται στον τύπο της πρωτογενούς ενέργειας που αξιοποιούν για την λειτουργία τους.

Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα είναι η αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας (πρωτογενής ενέργεια) για την μετατροπή της σε μηχανική ενέργεια, ενώ αντιθέτως, η αρχή λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας είναι η αξιοποίηση της μηχανικής ενέργειας (πρωτογενής ενέργεια) για την μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια.

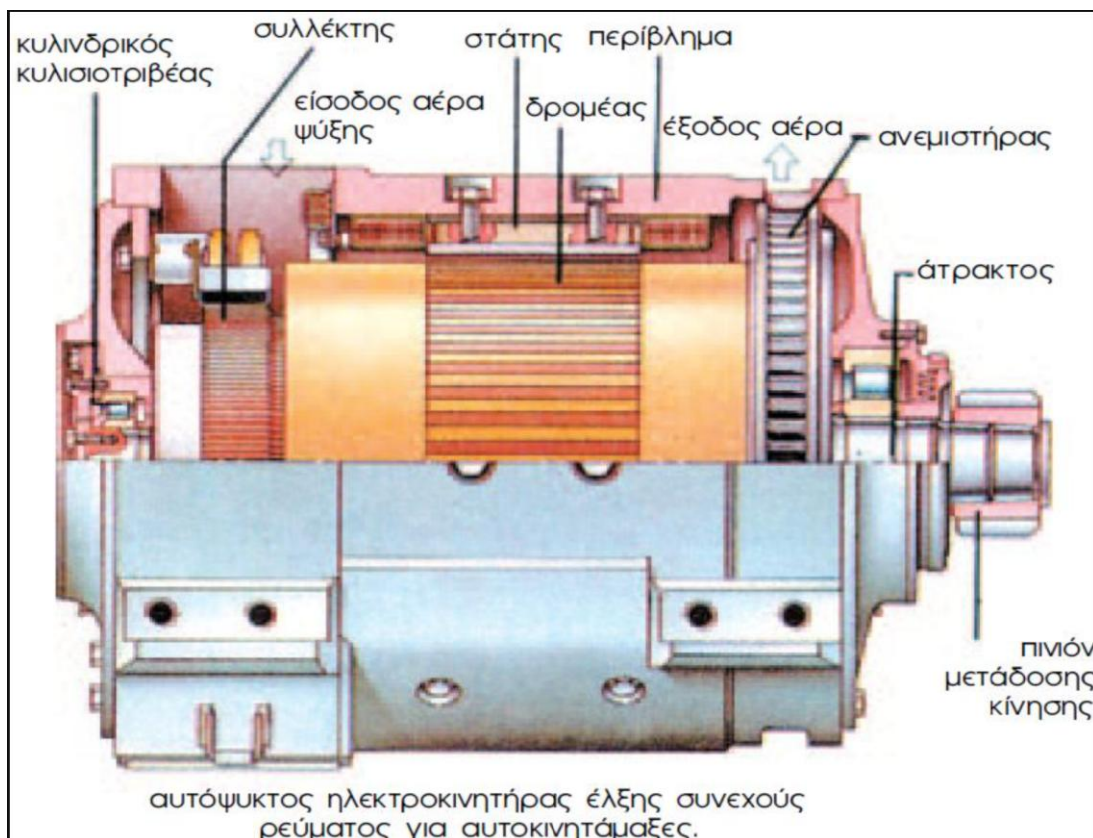
Παρακάτω απεικονίζεται η δομή ενός ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 2 Η απλοποιημένη δομή ενός ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος

### 1.1 Αρχή λειτουργίας ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος

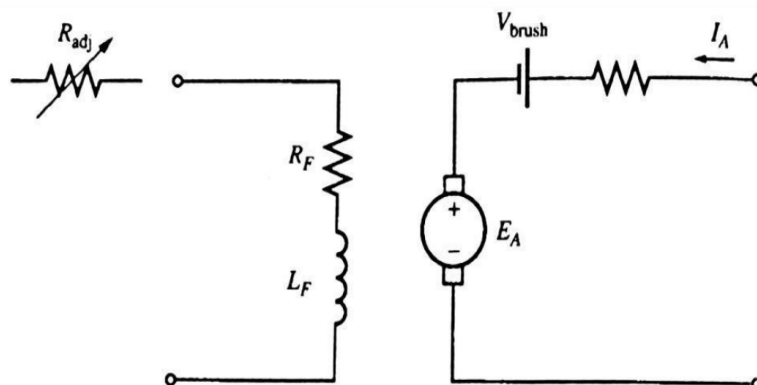
Ένας ηλεκτροκινητήρας αποτελείται από δύο βασικά μέρη, το κινούμενο μέρος που ονομάζεται δρομέας, στο οποίο φιλοξενείται το τύλιγμα τυμπάνου και το σταθερό μέρος που ονομάζεται στάτης, στο οποίο φιλοξενείται το τύλιγμα διέγερσης. Κατά την έναρξη λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα, εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στα πηνία του δρομέα και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτό. Το παραπάνω μαγνητικό πεδίο αλληλοεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τους μαγνήτες που βρίσκονται εντός του στάτη, δημιουργώντας έτσι μια δύναμη η οποία περιστρέφει τον δρομέα. Τα παραπάνω μέρη απεικονίζονται στην εικόνα 3, η οποία είναι μια τομή του εσωτερικού ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 3 Η τομή του εσωτερικού ενός ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος

### 1.1.1 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος

Στην εικόνα 4 απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος.



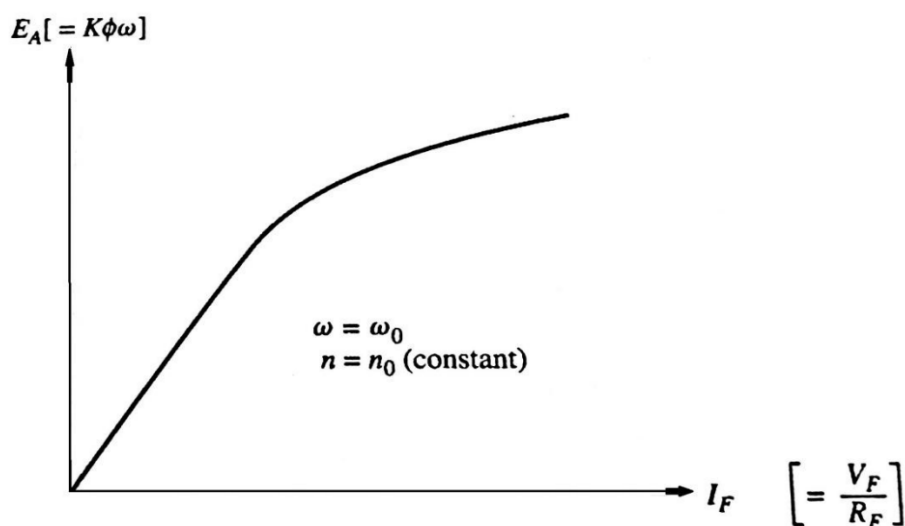
Εικόνα 4 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (Βέννης, 2018)

Ουσιαστικά, το δεξί μέρος του ισοδύναμου κυκλώματος αποτελεί το ισοδύναμο Thevenin του δρομέα, όπου το κύκλωμα οπλισμού απεικονίζεται με την πηγή  $E_A$  και την αντίσταση  $R_A$  ενώ οι ψήκτρες λόγω της πτώσης τάσης απεικονίζονται με μια μικρή πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος  $V_{brush}$ . (Δούλος, 2021)

Στο αριστερό μέρος του ισοδύναμου κυκλώματος απεικονίζει ο στάτης, όπου το τύλιγμα διέγερσης απεικονίζεται με την αυτεπαγωγή  $L_f$  και την αντίσταση  $R_f$ . Η εξωτερική μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιείτε για την ρύθμιση του ρεύματος της διέγερσης απεικονίζεται με την αντίσταση  $R_{adj}$ .

### 1.1.2 Καμπύλη μαγνήτισης ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος

Στην εικόνα 5 απεικονίζεται η καμπύλη μαγνήτισης ενός ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 5 Καμπύλη μαγνήτισης ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (Δούλος, 2021)

Η καμπύλη μαγνήτισης για μια σταθερή ταχύτητα  $\omega_0$  σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, παρουσιάζει την τάση εξ επαγωγής  $E_A$  ως προς το ρεύμα διέγερσης  $I_F$ . Η τάση εξ επαγωγής που παράγεται στο εσωτερικό ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος δίνεται από την παρακάτω σχέση: (Δούλος, 2021)

$$E_A = K\phi\omega \quad (1.1)$$

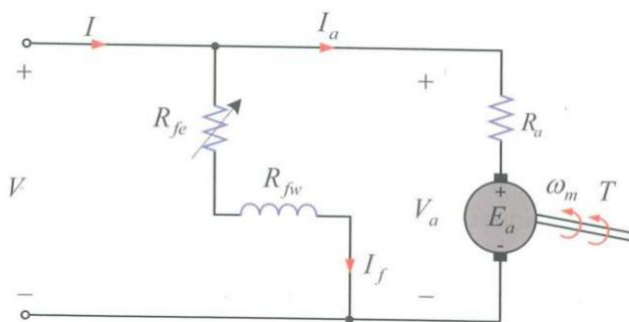
Όπου:

- K: η κατασκευαστική σταθερά του κινητήρα
- $\Phi$ : η μαγνητική ροή σε κάθε πόλο του κινητήρα
- $\omega$ : η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

Με βάση την παραπάνω σχέση είναι εύκολα κατανοητό ότι η τάση εξ επαγωγής  $E_A$  είναι ανάλογη της ροής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κινητήρα  $\Phi$  και της ταχύτητας περιστροφής  $\omega$ .

## 1.2 Ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης

Ένας ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος θεωρείται παράλληλης διέγερσης όταν το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτείται από το κύκλωμα οπλισμού του.



**Εικόνα 6** Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης (Μαλατέστας, 2015)

Από την ανάλυση του παραπάνω ισοδύναμου κυκλώματος προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$I_f = \frac{V_T}{R_{Fe}} \quad (2.2)$$

$$I = I_a + I_f \quad (2.3)$$

Με την εφαρμογή του νόμου των τάσεων Kirchoff για το κύκλωμα του δρομέα, η τάση στα άκρα του ισοδύναμου κυκλώματος παίρνει την εξής μορφή:

$$V_T = E_A + I_a R_a \quad (2.4)$$

Για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, θα πρέπει να αναφερθούμε στην χαρακτηριστική φορτίου. Η χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι ουσιαστικά, η γραφική παράσταση μεταξύ των ποσοτήτων εξόδου της μηχανής η οποία προκύπτει από τις εξισώσεις της επαγόμενης τάσης, της επαγόμενης ροπής και από τον νόμο των τάσεων του Kirchoff. (Δούλος, 2021)

Όπως αναφέραμε παραπάνω με την εφαρμογή του νόμου των τάσεων του Kirchoff προκύπτει η εξίσωση:

$$V_T = E_A + I_a R_a \quad (2.4)$$

Με τον συνδυασμό των εξισώσεων (1.1) και (2.4) προκύπτει ότι:

$$V_T = K\phi\omega + I_a R_a \quad (2.5)$$

Η ροπή του κινητήρα εκφράζεται από την σχέση:

$$\tau_{ind} = K\phi I_a \quad (2.6)$$

Και λύνοντας την εξίσωση (2.6) ως ενός  $I_a$  προκύπτει η σχέση:

$$I_a = \frac{\tau_{ind}}{K\phi} \quad (2.7)$$

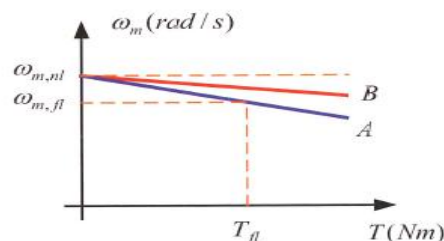
Με τον συνδυασμό των εξισώσεων (2.5) και (2.7) προκύπτει η σχέση:

$$V_T = K\phi\omega + \frac{\tau_{ind}}{K\phi} R_a \quad (2.8)$$

Τέλος εάν λυθεί η εξίσωση (2.8) ως προς την ταχύτητα περιστροφής προκύπτει η σχέση:

$$\omega = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_a}{(K\phi)^2} \tau_{ind} \quad (2.9)$$

Από την εξίσωση (2.9) προκύπτει ότι η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας όπου είναι και η χαρακτηριστική εξόδου ενός κινητήρα, είναι μια ευθεία με αρνητική κλίση. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας, όπου στην περίπτωση που απουσιάζει το τυλίγμα αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων, τότε δημιουργείται μια εξασθένηση στο πεδίο διέγερσης λόγω της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου. Λόγω της εξασθένησης του πεδίου διέγερσης, η μεταβολή των στροφών που απεικονίζεται με την καμπύλη B στο σχήμα 7 είναι μικρότερη σε σχέση με την καμπύλη A.

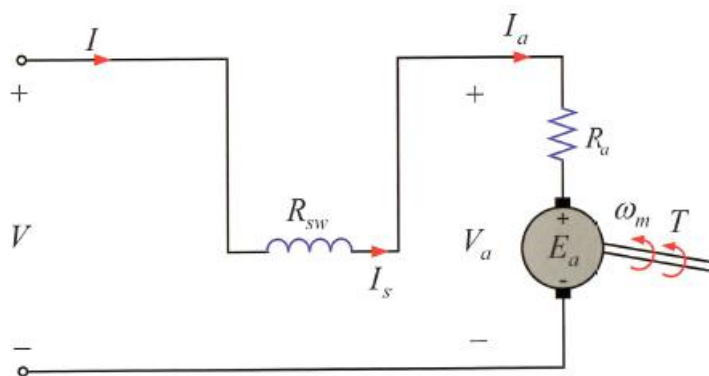


**Εικόνα 7 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης (Μαλατέστας, 2015)**

Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι για να ισχύσει η παραπάνω γραμμική σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της ροπής καθώς το φορτίο μεταβάλλεται, θα πρέπει όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες έκφρασης της εξίσωσης (2.9) να παραμένουν σταθεροί.

### 1.3 Ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς

Ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς θεωρείται ο ηλεκτροκινητήρας, όπου το κύκλωμα διέγερσής του αποτελείται από λίγες σπείρες και είναι συνδεδεμένο σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού του.



**Εικόνα 8** Ισοδύναμο κύκλωμα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς (Μαλατέστας, 2015)

Αναλύοντας το παραπάνω κύκλωμα προκύπτει ότι τόσο το ρεύμα εισόδου, όσο και τα ρεύματα διέγερσης και οπλισμού έχουν την ίδια τιμή. Με βάση το παραπάνω, η εξίσωση των ρευμάτων είναι οι παρακάτω:

$$I_A = I_S = I_L \quad (3.1)$$

Έπειτα εφαρμόζοντας τον νόμο των τάσεων του Kirchoff στο ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για την τάση του ισοδύναμου κυκλώματος:

$$V_T = E_A + I_A (R_A + R_S) \quad (3.2)$$

Για την κατασκευή της χαρακτηριστικής φορτίου ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, θα πρέπει να κατασκευάσουμε την γραφική παράσταση ταχύτητας ως προς την ροπή, που προκύπτει από την ανάλογη σχέση ροπής-ταχύτητας.

Σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, η επαγόμενη ροπή προκύπτει από την σχέση:

$$\tau_{ind} = K\Phi I_a \quad (2.6)$$

Ενώ η μαγνητική ροή στο εσωτερικό μιας μηχανής είναι ανάλογη με το ρεύμα οπλισμού της, προκύπτοντας η παρακάτω σχέση:

$$\Phi = cI_A \quad (3.3)$$

Όπου:

c: ο σταθερός συντελεστής αναλογίας

Με τον συνδυασμό των εξισώσεων (2.6) και (3.3), η επαγόμενη ροπή παίρνει την μορφή:

$$\tau_{ind} = KcI_A^2 \Rightarrow I_A = \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} \quad (3.4)$$

Γενικά ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, είναι η μεγάλη ροπή ανά μονάδα ρεύματος σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος, το οποίο επιβεβαιώνεται και από την παραπάνω σχέση (εξίσωση 3.4). Δηλαδή η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ρεύματος του οπλισμού του.

Αντικαθιστώντας στην σχέση (3.4) τις εξισώσεις (3.3) και (3.2), η τάση του ισοδύναμου κυκλώματος παίρνει την μορφή:

$$V_T = K\Phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} (R_A + R_S) \quad (3.5)$$

Η μαγνητική ροή εντός του εσωτερικού του κινητήρα μπορεί να γραφτεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

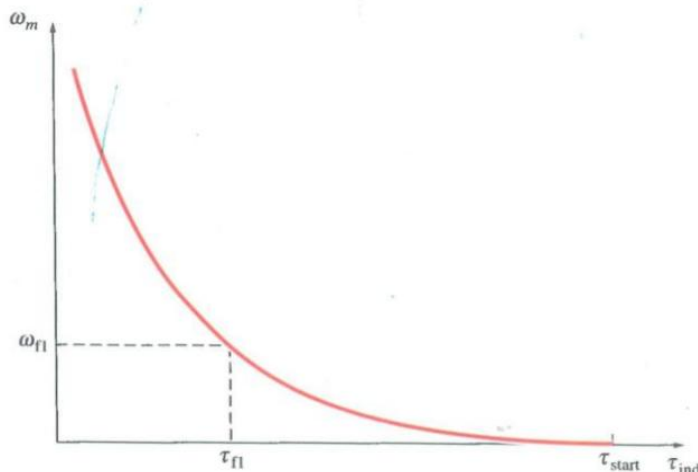
$$\Phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{ind}} \quad (3.6)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (3.5) την εξίσωση (3.6), η σχέση από την οποία προκύπτει η ταχύτητα σε συνάρτηση με την ροπή είναι:

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc} \quad (3.7)$$



Αναλύοντας την εξίσωση (3.7) προκύπτει ότι η ταχύτητα ενός ακόρεστου ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα της ροπής του. Με βάση την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς, η οποία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Εικόνα 9 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς (Καραϊσάς Π & Συνεργάτες, 2022)**

#### 1.4 Ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες

Οι ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες αποτελούνται από κύριους πόλους οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί από μόνιμους μαγνήτες. Ουσιαστικά αυτοί οι ηλεκτροκινητήρες, είναι ίδιοι με τους ηλεκτροκινητήρες παράλληλης διέγερσης αλλά παρουσιάζουν σταθερή μαγνητική ροή. Η κύρια διαφοροποίηση με τους παραπάνω ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος που αναλύσαμε παραπάνω, είναι η μη ύπαρξη τυλίγματος διέγερσης, η απουσία του ρεύματος διέγερσης και οι μηδενικές απώλειες χαλκού από το τυλίγμα διέγερσης. Η απουσία του τυλίγματος διέγερσης παρουσιάζει τόσο κάποια πλεονεκτήματα όσο και κάποια μειονεκτήματα. (Δούλος, 2021)

Τα πλεονεκτήματα των ηλεκτροκινητήρων συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες είναι τα παρακάτω:

1. Μικρό κόστος κατασκευής σε σχέση με τους ηλεκτροκινητήρες που αναλύσαμε παραπάνω λόγω της απουσίας του τυλίγματος διέγερσης
2. Μικρό μέγεθος σε σχέση με τους ηλεκτροκινητήρες που αναλύσαμε παραπάνω λόγω της απουσίας του τυλίγματος διέγερσης

Κάποια από τα μειονεκτήματα των ηλεκτροκινητήρων συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες είναι τα παρακάτω:

1. Λόγω της απουσίας του κυκλώματος διέγερσης, οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες παρουσιάζουν μικρή μαγνητική επαγωγή άρα και μικρή επαγόμενη ροπή  $\tau_{ind}$
2. Στους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες ενέχεται ο κίνδυνος εμφάνισης του φαινομένου απομαγνητισμού λόγω του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από το ρεύμα οπλισμού του  $I_A$ . Εάν αυτό το ρεύμα οπλισμού  $I_A$  γίνει πολύ μεγάλο, υπάρχει πιθανότητα η μαγνητεγερτική δύναμη του οπλισμού να απομαγνητίσει τους πόλους, μειώνοντας μόνιμα ή αντιστρέφοντας το μαγνητικό πεδίο τους.

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Τεχνικές ρύθμισης του ρεύματος σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος

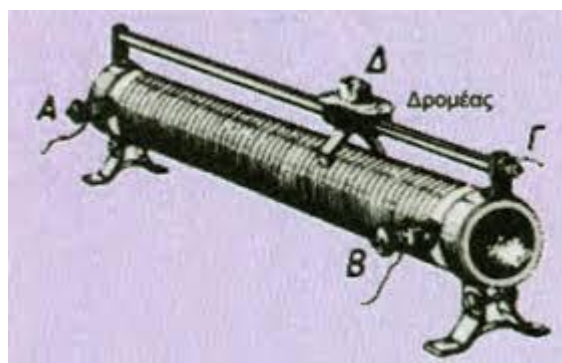
Λόγω της αυξημένης ύπαρξης των μηχανών συνεχούς ρεύματος, προέκυψε η ανάγκη ελέγχου της ταχύτητας αυτών, ώστε η χρησιμοποίησή τους να είναι πιο αποδοτική και να βρίσκουν εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου ο έλεγχος της ταχύτητας των μηχανών είναι απαραίτητος.

Ο έλεγχος της ταχύτητας μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους, με τη κάθε μέθοδο να έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κάποιες από τις μεθόδους αυτές αναφέρονται παρακάτω:

1. Χρήση μεταβλητής αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα (ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, 2005)
2. Χρήση ρυθμιστή τάσης στο τύλιγμα του δρομέα (ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, 2005)
3. Χρήση μετατροπέα DC-DC με την τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)

### 2.1 Χρήση μεταβλητής αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα

Ένας από τους πιο εύκολους και οικονομικούς τρόπους ελέγχου του ρεύματος ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης είναι η χρησιμοποίηση μεταβλητής αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα.



Εικόνα 10 Μεταβλητή ρυθμιστική αντίσταση

Όπως αναφέραμε στα προηγούμενα κεφάλαια και πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 1.2 σελ. 20, αναλύοντας το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, προκύπτει η σχέση 2.2 για την περιγραφή του ρεύματος

$$I_f = \frac{V_T}{R_{Fe}} \quad (2.2)$$

Από την σχέση αυτή, προκύπτει ότι το ρεύμα είναι αντιστρόφως ανάλογο με την αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα και ανάλογο με την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του κυκλώματος. Άρα με την αύξηση της αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα, το ρεύμα διέγερσης μειώνεται με αποτέλεσμα να μειωθεί και η μαγνητική ροή  $\Phi$ . (Δούλος, 2021)

Με την μείωση της μαγνητικής ροής και την ανάλυση της εξίσωσης 1.1 που προκύπτει από την καμπύλη μαγνήτισης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, μειώνεται η τάση εξ' επαγωγής  $E_A$  και αυξάνεται το ρεύμα στο οπλισμό σύμφωνα με την σχέση 2.4. (Δούλος, 2021)

$$E_A = K\phi\omega \quad (1.1)$$

$$V_T = E_A + I_a R_a \quad (2.4)$$

Η ροπή του κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης εκφράζεται όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 1.2 σελ. 21 από την σχέση 2.6.

$$\tau_{ind} = K\Phi I_a \quad (2.6)$$

Αναλύοντας την παραπάνω σχέση προκύπτουν δύο μεγέθη, τα οποία μεταβάλλονται με την μεταβολή της αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα:

1. Το μέγεθος  $\Phi$  που είναι η μαγνητική ροή σε κάθε πόλο του κινητήρα
2. Το μέγεθος  $I_a$  που είναι το ρεύμα στο οπλισμό

Παρότι που η μαγνητική ροή  $\Phi$  μειώνεται σε αντίθεση με το ρεύμα οπλισμού  $I_a$  που αυξάνεται, η παραγόμενη ροπή  $\tau_{ind}$  αυξάνεται λόγω της μεγάλης αύξησης του ρεύματος οπλισμού  $I_a$  σε σχέση με την μαγνητική ροή  $\Phi$ .

Γενικά η παραπάνω τεχνική χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου θέλουμε την αύξηση της ταχύτητας σε σχέση με την ονομαστική ταχύτητα  $\omega$ , γιατί στην περίπτωση που χρησιμοποιήσεις την παραπάνω τεχνική για μικρότερες ταχύτητες σε σχέση με την ονομαστική ταχύτητα  $\omega$ , ενέχει ο κίνδυνος υπερθέρμανσης και καταστροφής του τυλίγματος διέγερσης, λόγω της μεγάλης αύξησης του ρεύματος διέγερσης.

## 2.2 Χρήση ρυθμιστή τάσης στο τύλιγμα του δρομέα

Την ταχύτητα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος μπορούμε να την ρυθμίσουμε με την μεταβολή της τάσης τα άκρα του οπλισμού. Απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία του κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι η μη μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα διέγερσης. Για την μη μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα διέγερσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ρυθμιστής τάσης στα άκρα του τυλίγματος. (ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, 2005)

Κατά την διάρκεια αύξησης της τάσης στα άκρα του οπλισμού χωρίς την μεταβολή της τάσης στα άκρα της διέγερσης, το ρεύμα οπλισμού του κινητήρα  $I_\alpha$  αυξάνεται σύμφωνα με την σχέση 2.4.

$$V_T = E_A + I_\alpha R_\alpha \quad (2.4)$$

Από την αύξηση του ρεύματος οπλισμού και την σχέση που εκφράζει την ροπή του κινητήρα 2.6, προκύπτει ότι το ρεύμα οπλισμού με την ροπή του κινητήρα είναι ανάλογα, άρα η ροπή του κινητήρα αυξάνεται. (ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, 2005)

$$\tau_{ind} = K\Phi I_\alpha \quad (2.6)$$

Κατά την αύξηση της ροπής του κινητήρα, ο κινητήρας αποκτά μια ροπή μεγαλύτερη από αυτή που απαιτεί το φορτίο σύμφωνα με την σχέση 4.1. Η μεγάλη αυτή αύξηση της ροπής οδηγεί στη αύξηση της επαγόμενης τάσης  $E_A$  σύμφωνα με την σχέση 1.1.

$$\tau_{ind} > \tau_{load} \quad (4.1)$$

$$E_A = K\phi\omega \quad (1.1)$$

Το παραπάνω φαινόμενο σε συνδυασμό με την σχέση 2.4 οδηγεί στην μείωση του ρεύματος οπλισμού του κινητήρα  $I_\alpha$ , το οποίο μειώνει την ροπή του κινητήρα μέχρι να ικανοποιηθεί η σχέση 4.2.

$$V_T = E_A + I_\alpha R_\alpha \quad (2.4)$$

$$\tau_{ind} = \tau_{load} \quad (4.2)$$

Η παραπάνω μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος άρα και του ρεύματος, χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου χρειάζεται η λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλότερες ταχύτητες σε σχέση με το ονομαστικό γιατί η τάση στα άκρα του κινητήρα δεν μπορεί να ξεπερνάει την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας. (ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας, 2005)

## 2.3 Χρήση μετατροπέα DC-DC με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)

Ο μετατροπέας DC-DC χρησιμοποιείται για την παροχή ελεγχόμενης συνεχούς τάσης από μια πηγή ορισμένης τιμής συνεχούς τάσης. Οι μετατροπείς αυτοί είναι γνωστοί και με το όνομα Choppers. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο μετατροπέας DC-DC είναι το ισοδύναμο του «μετασχηματιστή» για το συνεχές ρεύμα. Είναι καλό να σημειωθεί πως υπάρχουν και άλλοι τρόποι που μπορούμε να πετύχουμε μετατροπή DC-DC, απλά με τον μετατροπέα DC-DC έχουμε μερικά σοβαρά πλεονεκτήματα:

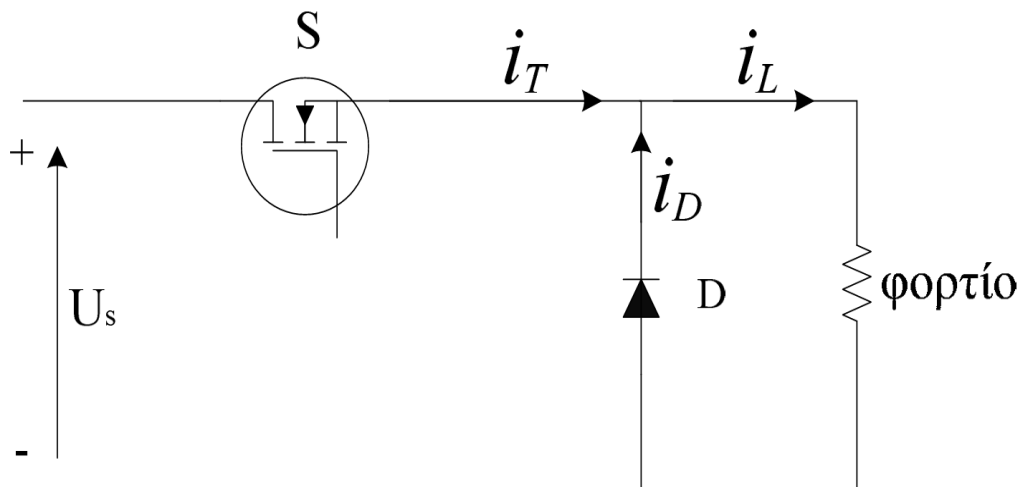
- Μικρότερος όγκος.
- Χαμηλότερο κόστος.
- Υψηλός βαθμός απόδοσης.
- Γρήγορη δυναμική απόκριση.

Οι μετατροπείς DC-DC βρίσκουν πληθώρα χρήσεων σε πολλές εφαρμογές. Ενδεικτικά κάποιες εφαρμογές είναι:

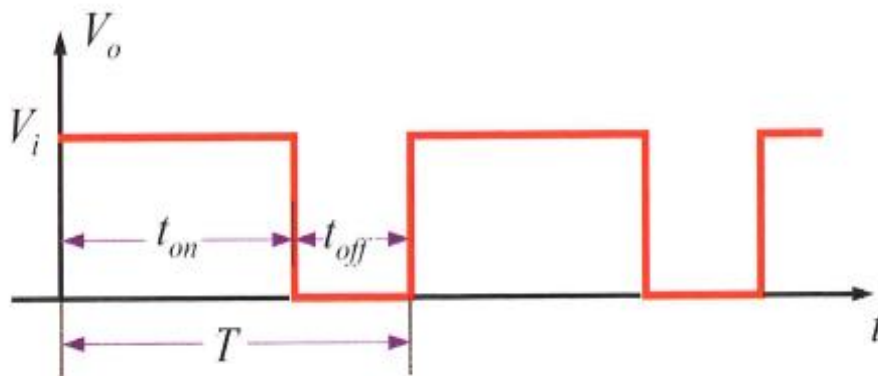
- Χρήση για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και διόρθωση συντελεστή ισχύος.
- Χρήση σε ηλεκτρονικές συσκευές. Οι ενσωματωμένες μπαταρίες των ηλεκτρονικών συσκευών παρέχουν μια συγκεκριμένη τάση στο σύστημα, όμως τα ενσωματωμένα συστήματα ηλεκτρονικών συσκευών λόγω της αναγκαιότητας για την λειτουργία τους σε διαφορετική τάση χρησιμοποιούν μετατροπείς DC-DC για την τροφοδότηση των συγκεκριμένων συστημάτων.
- Χρήση για την ηλεκτρονική τροφοδότηση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.
- Χρήση για την έλεγχο κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

### 2.3.1 Μετατροπέας DC-DC

Ένας μετατροπέας DC-DC είναι ουσιαστικά ένας μετατροπέας, ο οποίος μετατρέπει την συνεχή τάση DC που δέχεται στην είσοδο σε μια άλλη συνεχή τάση διαφορετικών απαιτήσεων σε σχέση με την είσοδο του. Στο σχήμα 11 φαίνεται ένα κύκλωμα μετατροπέα DC-DC ενώ η τάση εξόδου στο σχήμα 12.



Εικόνα 11 Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC



Εικόνα 12 Τάση εξόδου (Μαλατέστας, 2015)

Από το σχήμα 12 μπορούμε να αντιληφθούμε ότι η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου  $V_L$  ενός μετατροπέα DC-DC μπορεί να βρίσκεται μεταξύ του διαστήματος 0 έως  $V_S$ , με το  $V_S$  να είναι η τάση εισόδου του μετατροπέα DC-DC.

Η μέση τάση  $V_L$  εξόδου ενός μετατροπέα DC-DC καθορίζεται ουσιαστικά από δύο παράγοντες, τόσο εάν εφαρμοστούν αθροιστικά όσο και εάν εφαρμοστούν μεμονωμένα. Οι δύο αυτοί παράγοντες αναλύονται παρακάτω:

1. Η συχνότητα  $F$  με βάση την οποία ανοιγοκλείνει ο διακόπτης  $S$ . Η συχνότητα  $F$  προκύπτει από την σχέση 4.3. Η συχνότητα  $F$  είναι ανάλογη με την ενεργό τιμή της τάσης  $V_L$ , άρα όσο αυξάνεται η ενεργός τιμή  $V_L$  αυξάνεται και η συχνότητα  $F$ .

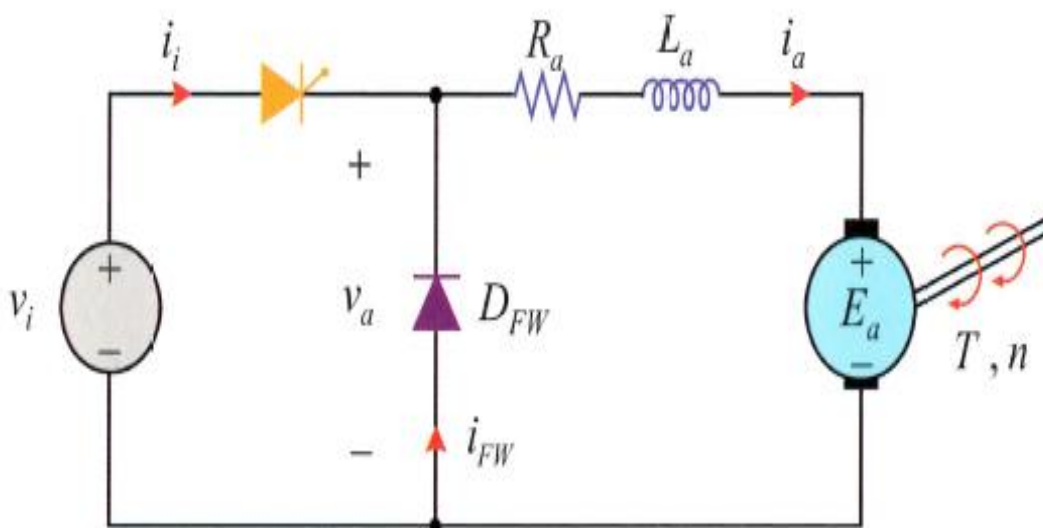
$$F = \frac{1}{T} \quad (4.3)$$

2. Η διάρκεια του χρόνου  $t_{on}$  κατά το οποίο παραμένει κλειστός ο διακόπτης  $S$ . Η διάρκεια του χρόνου  $t_{on}$  είναι ανάλογη με την ενεργό τιμή της τάσης  $V_L$ , άρα όσο αυξάνεται η διάρκεια του χρόνου  $t_{on}$  αυξάνεται και η ενεργός τιμή της τάσης  $V_L$ .

Όπως θα αναλύσουμε παρακάτω υπάρχουν δύο κύρια είδη μετατροπέων DC-DC, ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Step Down Converter) και ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Step Up Converter).

### 2.3.2 Μετατροπέας DC-DC υποβιβασμού τάσης

Ο μετατροπέας DC-DC υποβιβασμού τάσης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου θέλουμε η μέση τιμή της τάσης  $V_L$  να είναι μικρότερη από την τάση εισόδου του μετατροπέα DC-DC. (Mohan, 2015) Στο σχήμα 13 φαίνεται το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού τάσης.



Εικόνα 13 Μετατροπέας DC-DC υποβιβασμού (Μαλατέστας, 2015)

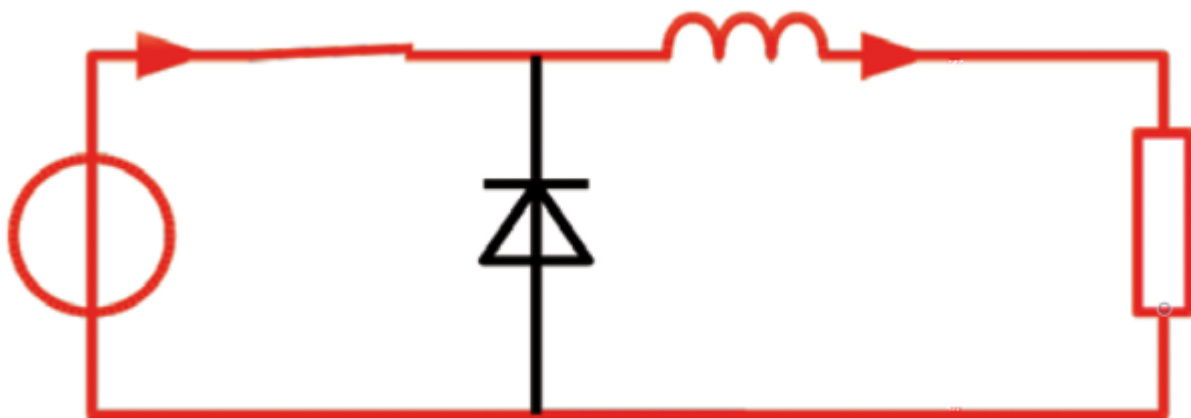


Ουσιαστικά ένας μετατροπέας DC-DC υποβιβασμού αποτελείται συνήθως από τα παρακάτω βασικά υλικά:

- Ένα πηνίο  $L$
- Έναν διακόπτη  $S$
- Μια δίοδο ελευθέρως ροής  $D$
- Ένα φορτίο

Επισημαίνεται ότι το πηνίο  $L$  δεν είναι απαραίτητο για την σωστή λειτουργία του μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού, εάν το φορτίο είναι ένας ηλεκτροκινητήρας (ο οποίος περιλαμβάνει τόσο αντίσταση όσο και επαγωγική αντίδραση).

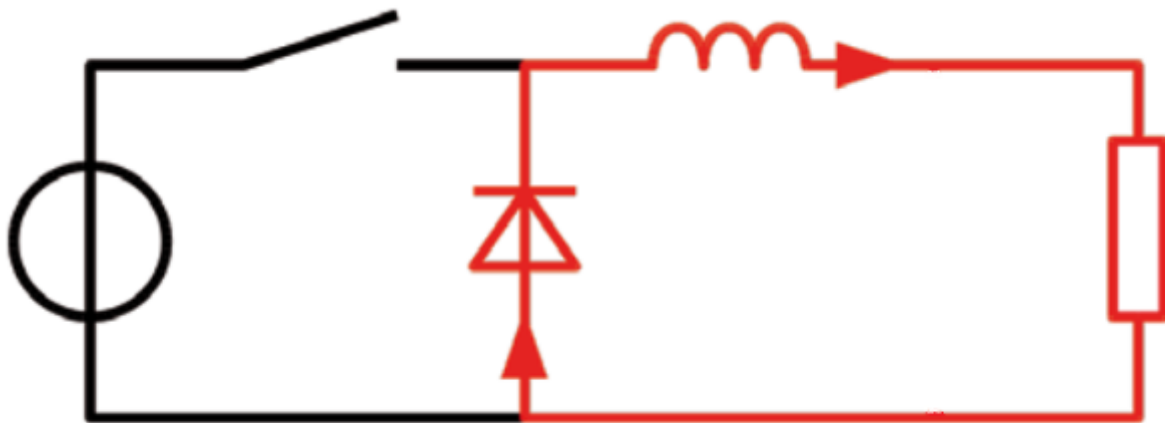
Κατά την λειτουργία του μετατροπέα DC-DC και όταν ο διακόπτης  $S$  είναι κλειστός το σύστημα άγει. Κατά την αγωγή του συστήματος, το σύστημα παρέχει ενέργεια στο φορτίο και στο πηνίο  $L$ . Κατά τη παροχή ενέργειας στο πηνίο, το πηνίο αποθηκεύει αυτή την ενέργεια εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται γύρω από αυτό. Κατά την αύξηση του ρεύματος του πηνίου, το πηνίο προσπαθεί να αντισταθεί σε αυτήν τη μεταβολή και παράγει μια τάση αντίθετη με αυτήν που δέχεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η τάση του φορτίου και να είναι μικρότερη από τη τάση εισόδου. Ο διακόπτης όταν είναι κλειστός, η δίοδος ελευθέρως ροής δεν άγει, λόγω του ότι είναι ανάστροφα πολωμένη με αποτέλεσμα να μην υπάρχει το φαινόμενο βραχυκύκλωσης του κυκλώματος. Η ροή της ενέργειας κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης  $S$  είναι κλειστός και άγει το σύστημα, απεικονίζεται στο σχήμα 14. (Δουδέσης & Μουστάφα, 2018)



**Εικόνα 14 Ροή του ρεύματος κατά το διάστημα που ο διακόπτης  $S$  είναι κλειστός**

Όταν ο διακόπτης  $S$  αλλάξει κατάσταση και από κλειστός γίνει ανοικτός, τότε η ροή ενέργειας η οποία παρέχεται από την πηγή τάσης εισόδου  $V_s$  του μετατροπέα DC-DC σταματάει την διέλευση της μέσα από τον διακόπτη  $S$ . Κατά την διάρκεια που μένει σβηστός ο διακόπτης  $S$ , το σύστημα τροφοδοτείται

με ενέργεια από την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί σε μορφή μαγνητικού πεδίου στο πηνίο L και ο μετατροπέας λειτουργεί σε συνεχή αγωγή του ρεύματος. Ενώ όταν μηδενίζεται το ρεύμα στη περίοδο αποκοπής του διακόπτη, τότε ο μετατροπέας λειτουργεί σε ασυνεχή αγωγή του ρεύματος. (Ζιώγας, 2021)



Εικόνα 15 Ροή του ρεύματος κατά το διάστημα που ο διακόπτης S είναι ανοιχτός

Κατά τη συνεχή αγωγή του ρεύματος, ο διακόπτης βρίσκεται κλειστός για τον παρακάτω χρόνο:

$$t_{on} = D * T_s \quad (4.4)$$

Όπου  $t_{on}$ : Χρόνος αγωγής του ημιαγωγικού διακόπτη  $S_w$

D: Ο βαθμός χρησιμοποίησης του ημιαγωγικού διακόπτη  $S_w$  (Duty Cycle)

$T_s$ : Η περίοδος του κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα

Ο χρόνος όπου ο διακόπτης S βρίσκεται σε σβέση προκύπτει από την σχέση:

$$t_{off} = (1 - D) * T_s \quad (4.5)$$

Κατά το διάστημα που ο διακόπτης παραμένει σβηστός, το ρεύμα της επαγωγής  $I_L$  ρέει μέσω της διόδου ελευθέρως ροής.

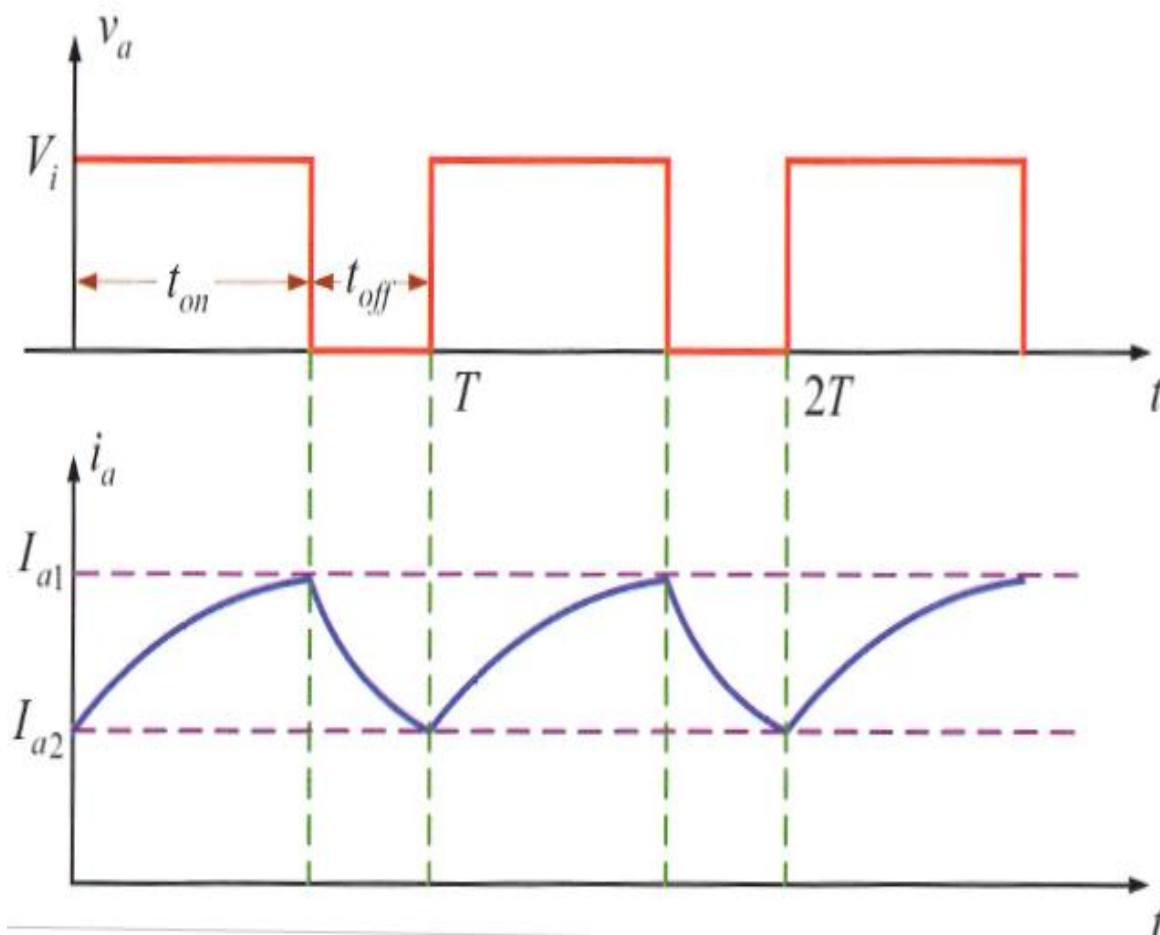
$$(V_{dc} - V_0) * D * T_s = V_0 * (1 - D) * T_s \quad (4.6)$$

Προχωρώντας στις απαραίτητες απαλοيفές η εξίσωση 4.6 παίρνει την μορφή:

$$\frac{V_0}{V_{dc}} = D \quad (4.7)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι ο μετατροπέας DC-DC που χρησιμοποιείται είναι ιδανικός, τότε η ισχύς εισόδου θα είναι ίδια με την ισχύ εξόδου:

$$V_{dc} * I_{dc} = V_0 * I_0 \Rightarrow \frac{V_0}{V_{dc}} = \frac{I_0}{I_{dc}} = D \quad (4.8)$$



**Εικόνα 16** Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού κατά το διάστημα συνεχούς αγωγής του ρεύματος (Μαλατέστας, 2015)

Κατά τη διάρκεια της ασυνεχούς αγωγής του ρεύματος, το ρεύμα του φορτίου  $I_0$  μειώνεται αρκετά και το ρεύμα της επαγωγής γίνεται ασυνεχές. Με βάση τα παραπάνω ισχύει ο τύπος:

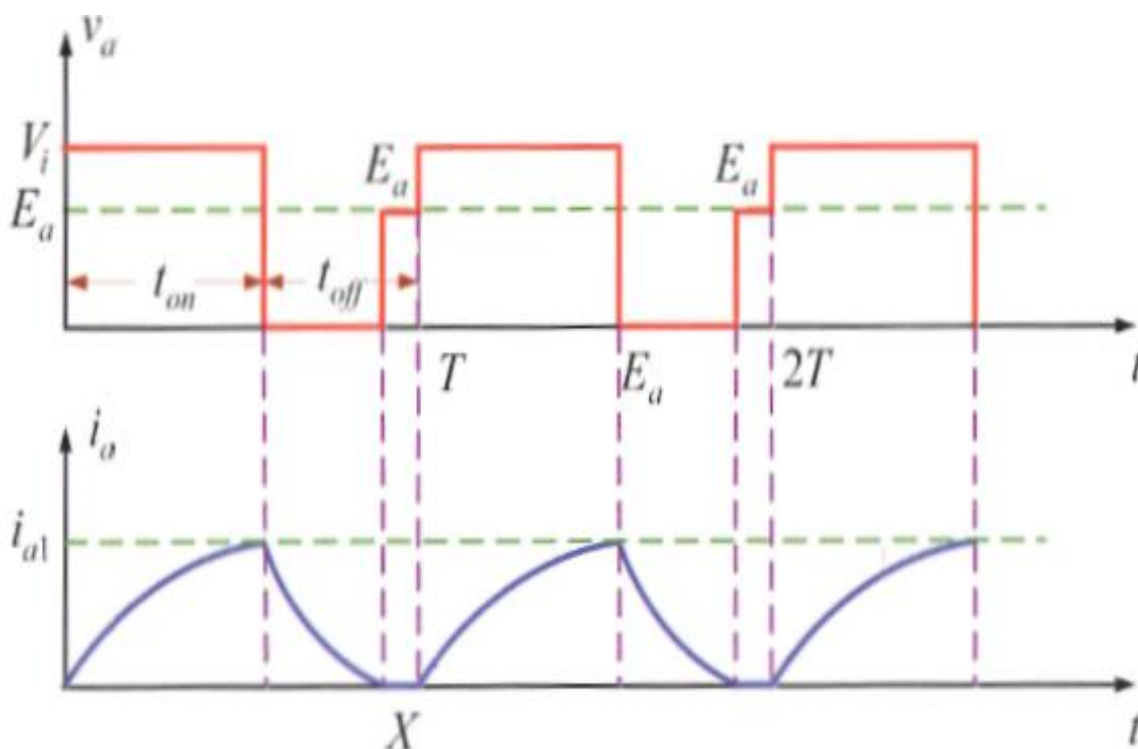
$$((V_{dc} - V_0) * D * T_s) - (V_0 * \delta_1 * T_s) = 0 \quad (4.9)$$

Προχωρώντας στις απαραίτητες απαλοيفές η εξίσωση 4.9 παίρνει την μορφή:

$$\frac{V_0}{V_{dc}} = \frac{D}{D + \delta_1} \quad (4.10)$$

Με την ενεργό τιμή του ρεύματος εξόδου να είναι:

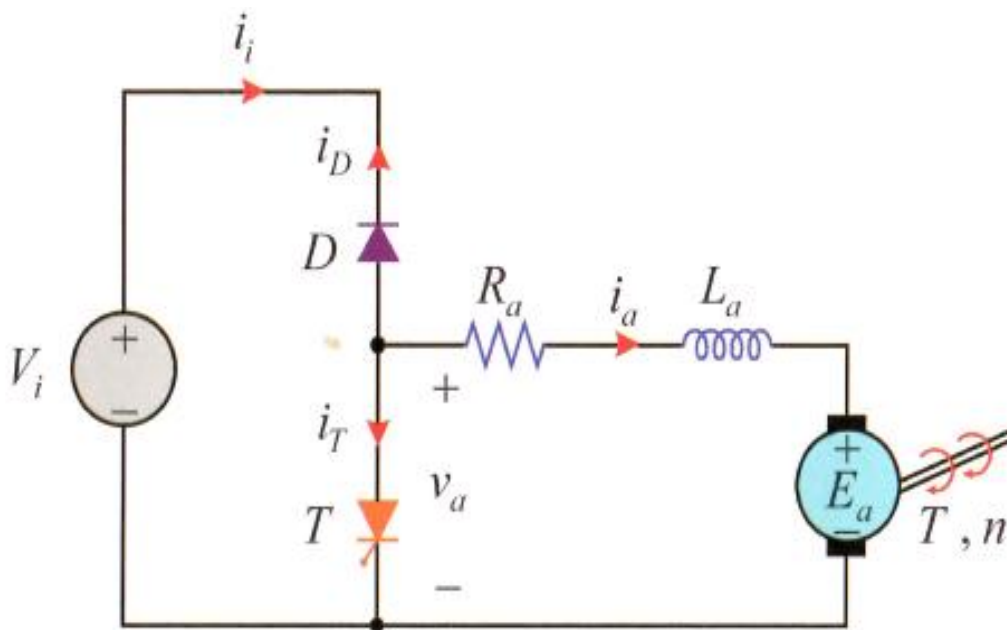
$$I_L = I_0 = \frac{\delta_1 * T_s}{2 * L} * D * V_{dc} \quad (4.11)$$



Εικόνα 17 Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού κατά το διάστημα ασυνεχούς αγωγής του ρεύματος (Μαλατέστας, 2015)

### 2.3.3 Μετατροπέας DC-DC ανύψωσης τάσης

Ο μετατροπέας DC-DC ανύψωσης τάσης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου θέλουμε η ενεργός τιμή της τάσης  $V_L$  να είναι μεγαλύτερη από τη τάση εισόδου του μετατροπέα DC-DC, σε αντίθεση με τον μετατροπέα υποβιβασμού (Ζεκάϊ, 2023). Στο σχήμα 18 φαίνεται το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα DC-DC ανύψωσης τάσης, ο οποίος στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται για την αύξηση της τάσης εξόδου μιας γεννήτριας.



Εικόνα 18 Μετατροπέας DC-DC ανύψωσης (Μαλατέστας, 2015)

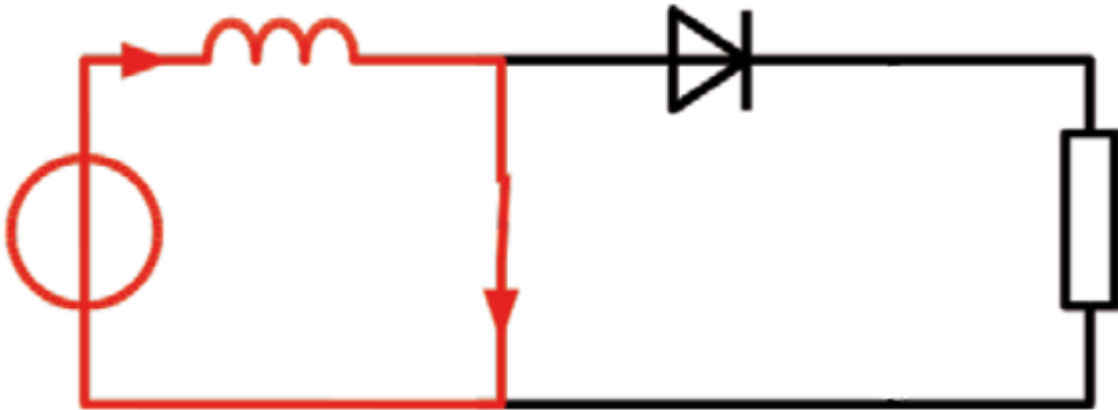
Ουσιαστικά ένας μετατροπέας DC-DC ανύψωσης τάσης αποτελείται συνήθως από τα ίδια ακριβώς υλικά σε σχέση με έναν μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού τάσης:

- Ένα πηνίο  $L$
- Έναν διακόπτη  $T$
- Μια δίοδο ελευθέρως ροής  $D$
- Ένα φορτίο

Η ουσιαστική διαφοροποίηση μεταξύ του μετατροπέα DC-DC ανύψωσης τάσης σε σχέση με τον μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού τάσης δεν παρατηρείται στα υλικά, αλλά στον τρόπο διάταξης αυτών.

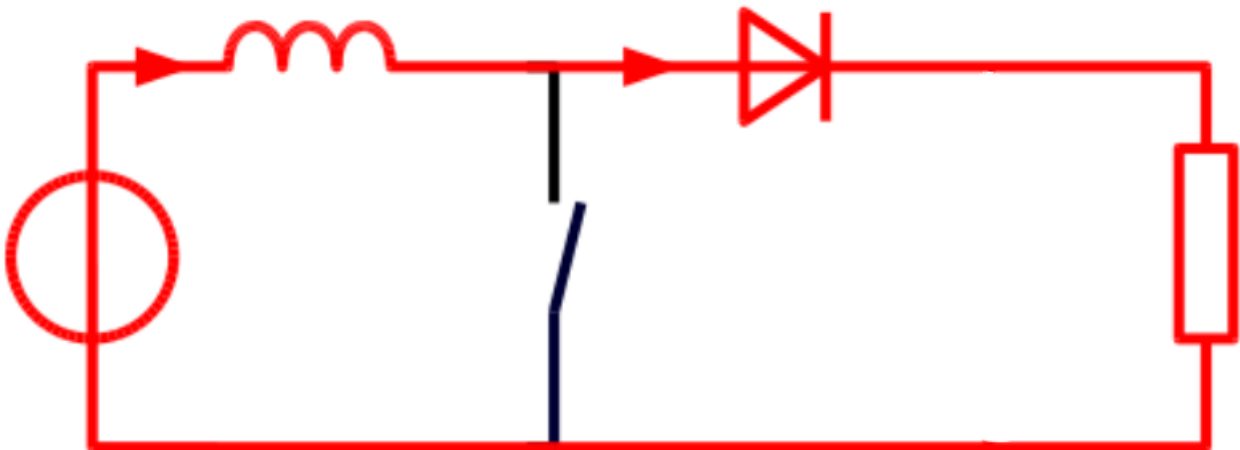
Κατά την λειτουργία του μετατροπέα DC-DC και όταν ο διακόπτης  $T$  είναι κλειστός το σύστημα παρέχει ενέργεια στο πηνίο  $L$ , ίση με αυτή που παρέχεται στο σύστημα από την τάση τροφοδοσίας του μετατροπέα. Κατά την παροχή ενέργειας στο πηνίο, το πηνίο αποθηκεύει αυτή την ενέργεια υπό μορφή

μαγνητικού πεδίου, το οποίο δημιουργείται γύρω από αυτό. Όταν ο διακόπτης T είναι κλειστός, η δίοδος ελευθέρως ροής δεν άγει λόγω το ότι είναι ανάστροφα πολωμένη, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει το φαινόμενο βραχυκύκλωσης του κυκλώματος. Η ροή της ενέργεια στο σύστημα κατά την διάρκεια που ο διακόπτης T είναι κλειστός απεικονίζεται στο σχήμα 19. (Ζιώγας, 2021)



**Εικόνα 19 Ροή του ρεύματος κατά το διάστημα που ο διακόπτης S είναι κλειστός**

Όταν ο διακόπτης T αλλάξει κατάσταση και από κλειστός γίνει ανοικτός, τότε η ροή ενέργειας η οποία προκύπτει από την τάση εισόδου  $V_s$  του μετατροπέα DC-DC σταματάει την διέλευση του μέσα από τον διακόπτη T. Κατά την σβέση του διακόπτη T, το σύστημα τροφοδοτείται με ενέργεια από την πηγή τροφοδοσίας του μετατροπέα DC-DC και την επαγωγική τάση που έχει αποθηκευτεί εσωτερικά του πηνίου L. Όπως και στον μετατροπέα DC-DC υποβιβασμού τάσης υπάρχουν δύο καταστάσεις στις οποίες βρίσκεται το σύστημα, η κατάσταση στην οποία το σύστημα βρίσκεται σε συνεχή αγωγή του ρεύματος και η κατάσταση στην οποία το σύστημα βρίσκεται σε ασυνεχή αγωγή του ρεύματος. (Ζιώγας, 2021)



**Εικόνα 20 Ροή του ρεύματος κατά το διάστημα που ο διακόπτης S είναι ανοιχτός**

Κατά την συνεχή αγωγή του συστήματος, προκύπτει η σχέση:

$$(V_{dc} * D * T_s) + ((V_{dc} - V_0) * (1 - D) * T_s) = 0 \quad (4.12)$$

Προχωρώντας στις απαραίτητες απλοποιήσεις η μορφή της εξίσωσης παίρνει την παρακάτω μορφή:

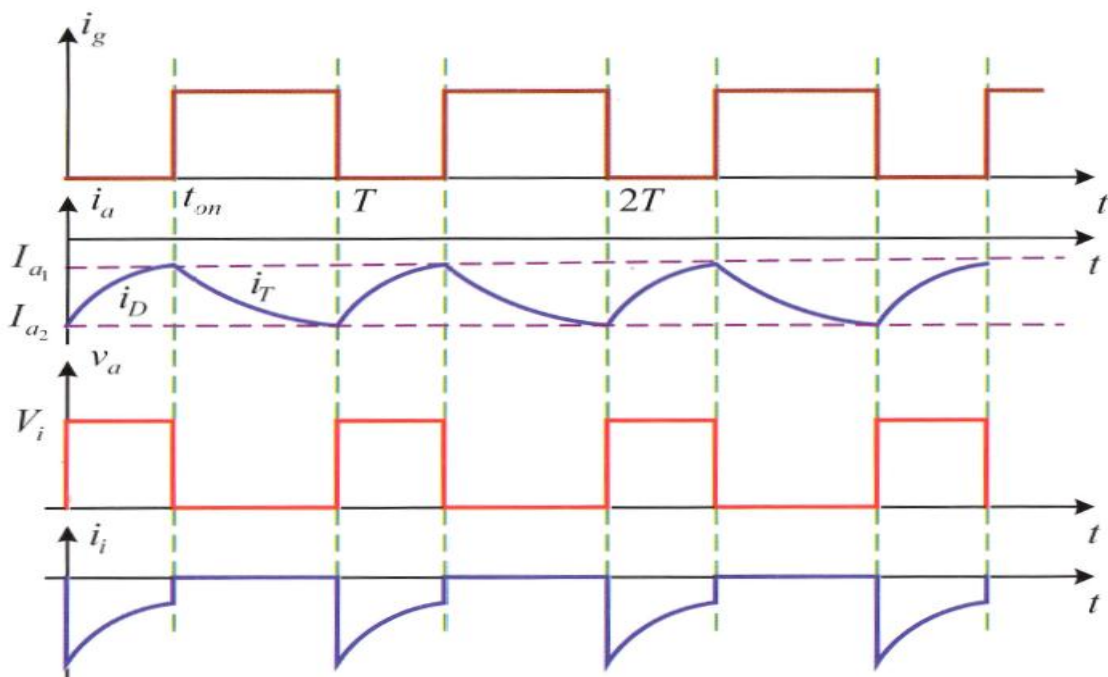
$$\frac{V_0}{V_{dc}} = \frac{1}{1 - D} \quad (4.13)$$

Θεωρώντας ότι ο μετατροπέας είναι ιδανικός με τις απώλειες να είναι μηδενικές, η εξίσωση που προκύπτει είναι:

$$P_{in} = P_{out} \Leftrightarrow$$

$$V_{dc} * I_{dc} = V_0 * I_0 \Leftrightarrow$$

$$\frac{V_0}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_0} = \frac{1}{1 - D} \quad (4.14)$$



**Εικόνα 21** Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC ανύψωσης κατά το διάστημα συνεχούς αγωγής του ρεύματος (Μαλατέστας, 2015)

Κατά την διάρκεια της ασυνεχούς αγωγής του ρεύματος, το ρεύμα  $I_L$  είναι μηδενικό με την εξίσωση που προκύπτει να είναι:

$$(V_{dc} * D * T_s) + ((V_{dc} - V_0) * (\delta_1 * T_s)) = 0 \quad (4.15)$$

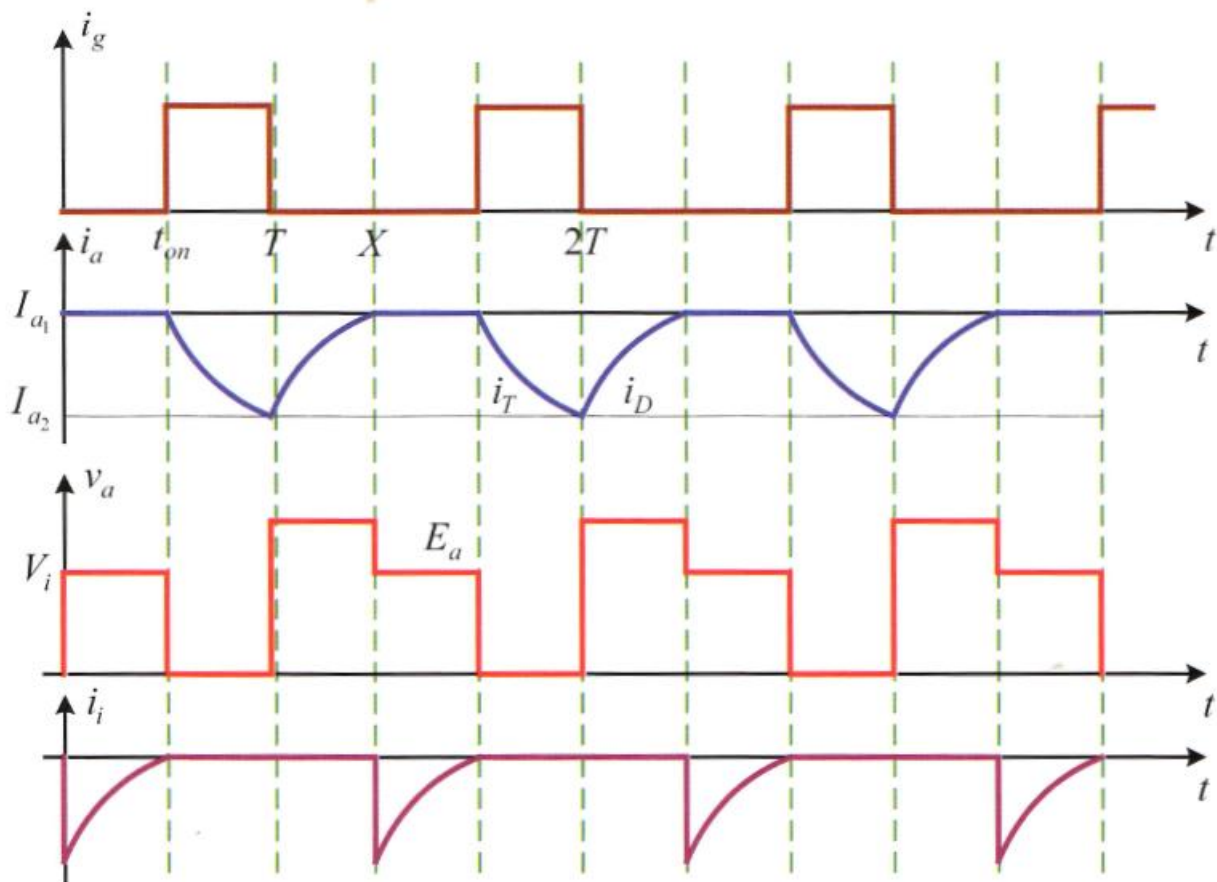
Επίσης προκύπτει ότι:

$$\frac{V_0}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_0} = \frac{D + \delta_1}{\delta_1} \quad (4.16)$$

Με το ρεύμα εισόδου να ισχύει ότι:

$$I_{dc} = I_L = \frac{D + \delta_1}{2} * \frac{V_{dc}}{L} * D * T_s \quad (4.17)$$

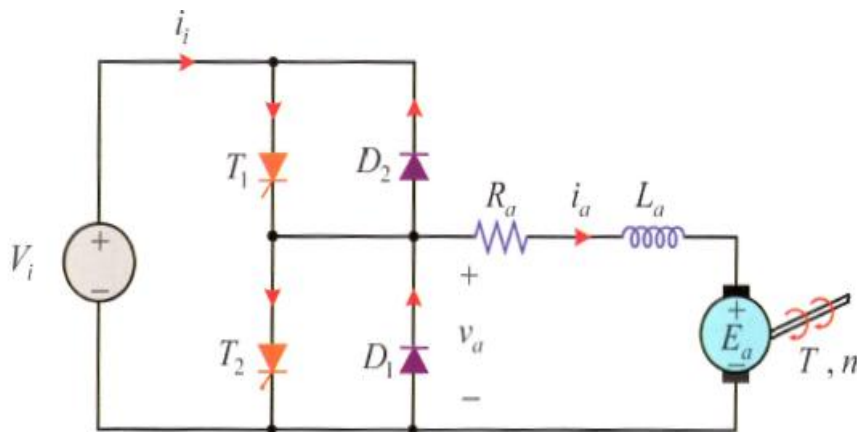




Εικόνα 22 Κυματομορφές μετατροπέα DC-DC ανύψωσης κατά το διάστημα ασυνεχούς αγωγής του ρεύματος (Μαλατέστας, 2015)

### 2.3.4 Μετατροπέας κλάσης “C”

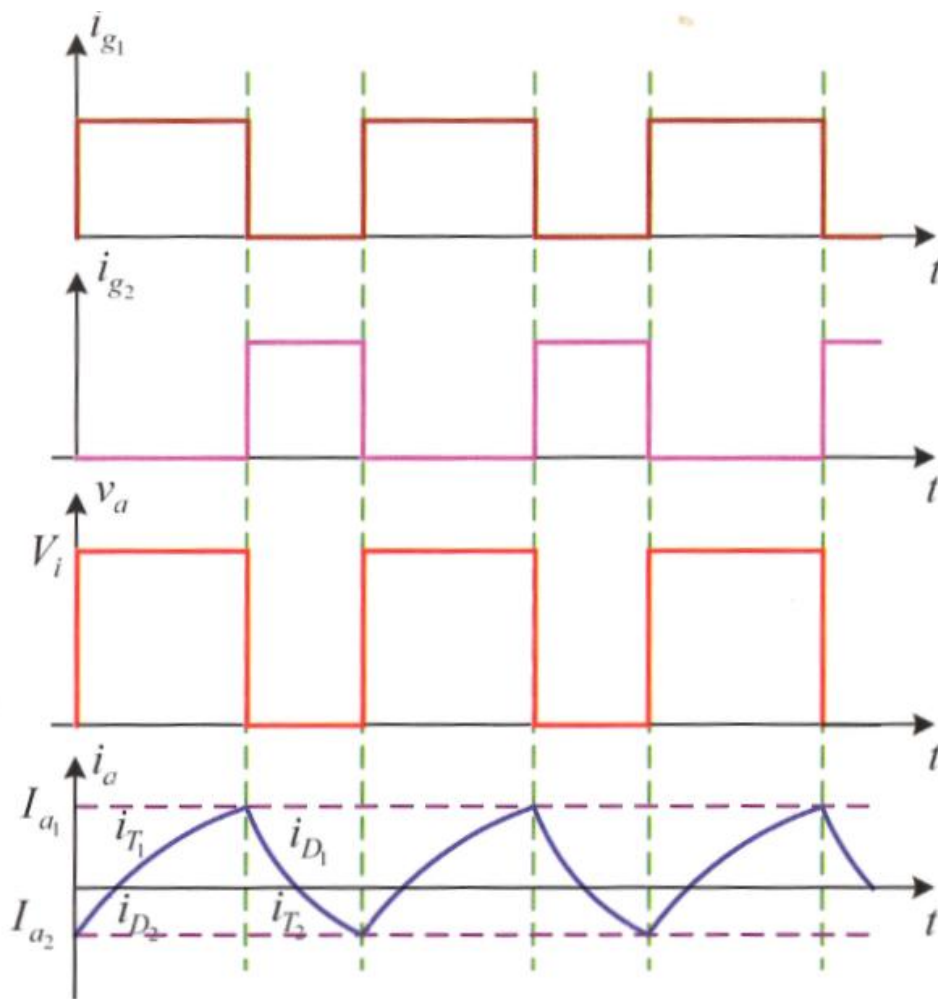
Στις περιπτώσεις όπου η ομαλή μετάβαση από το ένα τεταρτημόριο στο άλλο είναι απαραίτητη, τότε η χρήση του μετατροπέα κλάσης “C” είναι η βέλτιστη δυνατή λύση. (Μαλατέστας, 2015)



Εικόνα 23 Ο μετατροπέας κλάσης "C" (Μαλατέστας, 2015)

Ουσιαστικά ο παραπάνω μετατροπέας είναι ένας συνδυασμός του μετατροπέα ανύψωσης και του μετατροπέα υποβιβασμού. Τα υλικά από τα οποία αποτελείται ο παραπάνω μετατροπέας είναι:

- Ένα πηνίο  $L$
- Δύο διακόπτες  $T_1$  και  $T_2$
- Δύο δίοδοι ελευθέρως ροής  $D_1$  και  $D_2$
- Ένα φορτίο



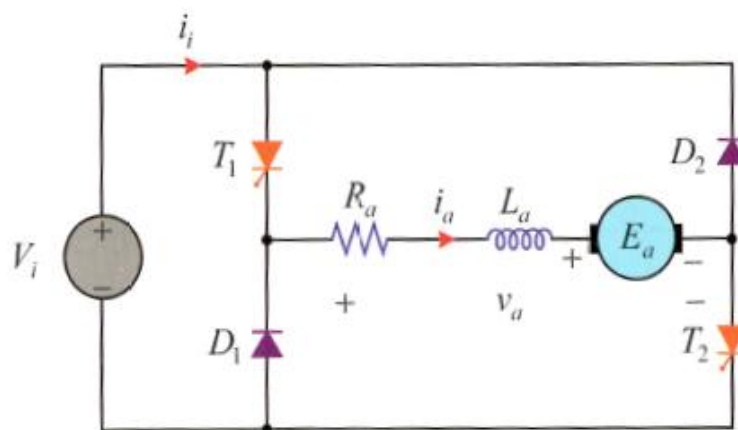
Εικόνα 24 Κυματομορφές τάσης-ρεύματος μετατροπέα κλάσης "C" (Μαλατέστας, 2015)

Αναλύοντας την διάρκεια που άγει ο διακόπτης  $T_1$  και  $D_1$ , ο μετατροπέας δουλεύει στο πρώτο τεταρτημόριο, σαν τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Κατά την διάρκεια αυτή, ο διακόπτης  $T_2$  και  $D_2$  δεν άγουν. Αντίθετα όμως όταν ο μετατροπέας δουλεύει στο δεύτερο τεταρτημόριο, παρατηρούμε ότι ο διακόπτης  $T_1$  και  $D_1$  παύουν να άγουν και αρχίζουν να άγουν ο διακόπτης  $T_2$  και  $D_2$ . Σε αυτό το σημείο ο μετατροπέας δουλεύει σαν μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι

διακόπτες  $T_1$  και  $T_2$  δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να πυροδοτηθούν και να άγουν ταυτόχρονα, γιατί σε αντίθετη περίπτωση θα δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα στην πηγή τάσης εισόδου του μετατροπέα.

### 2.3.5 Μετατροπέας κλάσης “D”

Ο μετατροπέας κλάσης “D” χρησιμεύει στις περιπτώσεις όπου απαιτούνται αρκετά γρήγορες μεταβολές του ρεύματος.

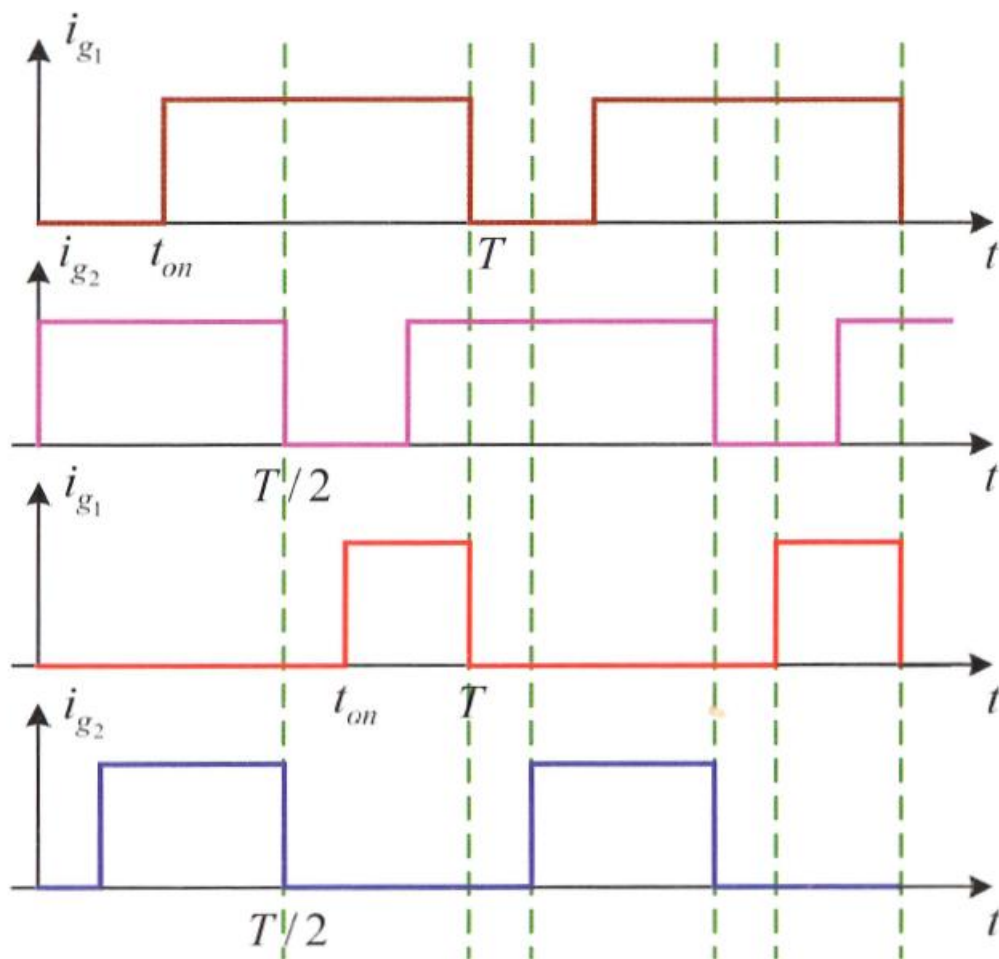


Εικόνα 25 Ο μετατροπέας κλάσης "D" (Μαλατέστας, 2015)

Ουσιαστικά ο μετατροπέας κλάσης “D” αποτελείται συνήθως από τα ίδια ακριβώς υλικά σε σχέση με τον μετατροπέας κλάσης “C”, με την μόνη διαφοροποίηση, να παρατηρείται στον τρόπο σύνδεσης αυτών:

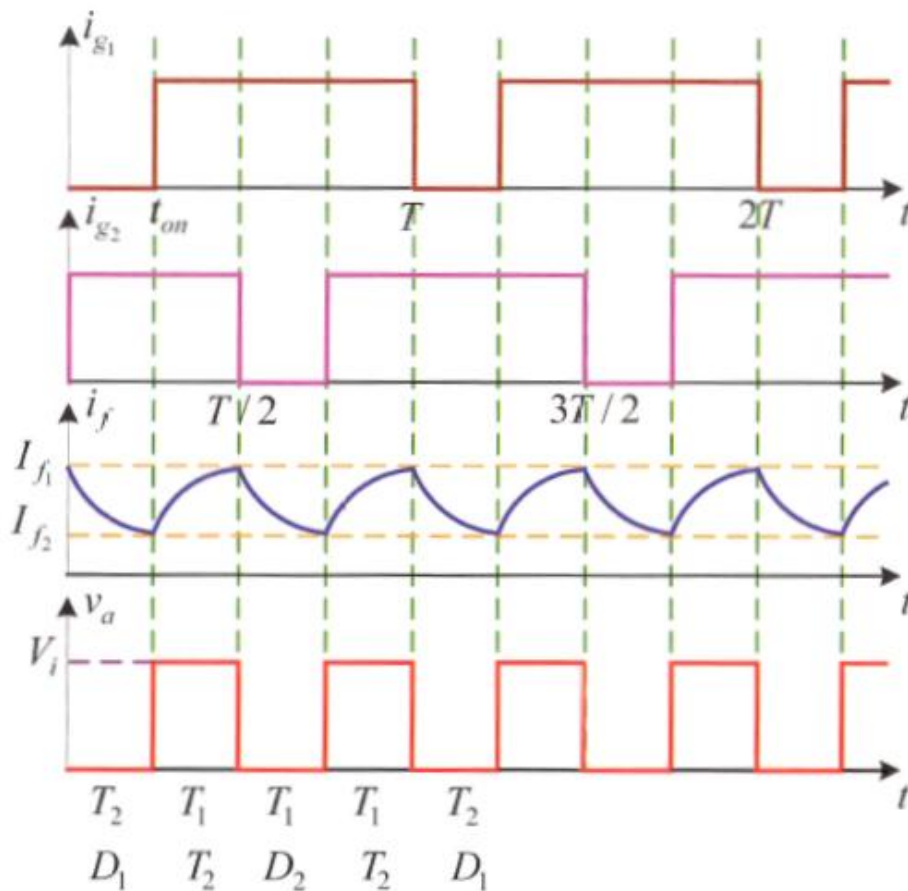
- Ένα πηνίο  $L$
- Δύο διακόπτες  $T_1$  και  $T_2$
- Δύο δίοδοι ελευθέρως ροής  $D_1$  και  $D_2$
- Ένα φορτίο

Ο παραπάνω μετατροπέας χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου θέλουμε να λειτουργήσει η ηλεκτρική μηχανή στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο. Λόγω το ότι η λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο είναι πρακτικά αδύνατη, ο μετατροπέας παρεμβάλλεται στο τύλιγμα διέγερσης και όχι στο τύλιγμα τυμπάνου όπως οι υπόλοιποι μετατροπείς. (Μαλατέστας, 2015)



**Εικόνα 26 Παλμοί έναυσης των διακοπών T1 και T2 για διαφορετικές τιμές του βαθμού χρησιμοποίησης  $\alpha$  (Μαλατέστας, 2015)**

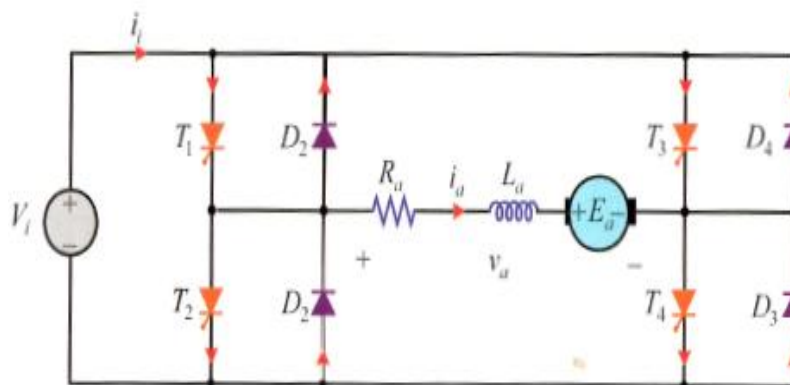
Σε αυτόν τον μετατροπέα, η έναυση των διακοπών T1 και T2 διαφέρουν χρονικά κατά  $T/2$  ( όπου T η περίοδος λειτουργίας του μετατροπέα). Αξίζει να σημειώσουμε ότι η λειτουργία του κάθε διακόπτη επικαλύπτεται από την λειτουργία του άλλου, εξαιτίας της διάρκειας πυροδότησης των διακοπών, που είναι ίδια και για τους δύο διακόπτες. (Μαλατέστας, 2015)



Εικόνα 27 Κυματομορφές τάσης - ρεύματος του τυλίγματος διέγερσης (Μαλατέστας, 2015)

### 2.3.6 Μετατροπέας κλάσης “E”

Ο μετατροπέας κλάσης “E” χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου θέλουμε να πετύχουμε λειτουργία και στα τέσσερα τεταρτημόρια. (Μαλατέστας, 2015)



Εικόνα 28 Ο μετατροπέας κλάσης "E" (Μαλατέστας, 2015)

Ο μετατροπέας κλάσης “E” αποτελείται από τα παρακάτω υλικά:

- Ένα πηνίο L
- Τέσσερις διακόπτες  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  και  $T_4$
- Τέσσερις δίοδοι ελευθέρως ροής  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  και  $D_4$
- Ένα φορτίο

Ο τρόπος λειτουργίας του παραπάνω μετατροπέα καθορίζεται από την λογική ελέγχου των διακοπών. Σε κάθε περίπτωση καθίσταται απαγορευτική η ταυτόχρονη λειτουργία του ζεύγους διακοπών  $T_1$ ,  $T_2$  καθώς και του ζεύγους  $T_3$ ,  $T_4$ , διότι σε αυτήν την περίπτωση θα δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα της πηγής τάσης εισόδου.

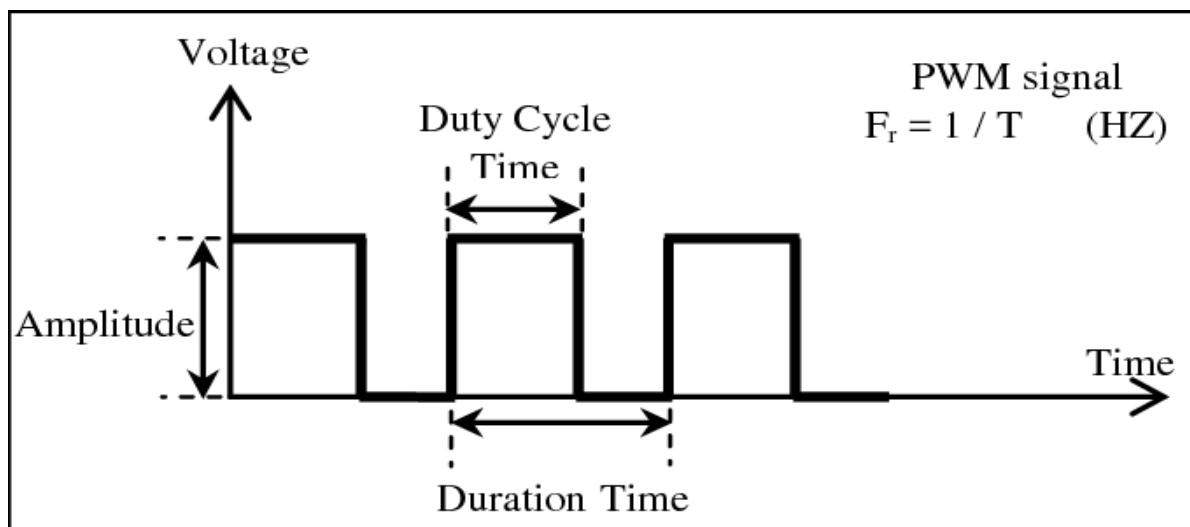
### 2.3.7 Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM

Η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM (**P**ulse **W**idth **M**odulation) αποτελεί την πιο διαδεδομένη, απλοποιημένη, αξιόπιστη και ευέλικτη μέθοδο για έλεγχο διάφορων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εφαρμογών. Η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών βρίσκει εφαρμογή σε μια πληθώρα εφαρμογών στην βιομηχανία. Κάποιες από τις πιο βασικές εφαρμογές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Σε συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (UPS)
- Για έλεγχο ηλεκτροκινητήρων
- Αυτοματοποίηση συστημάτων
- Έλεγχος ηλεκτρικών αυτοκινήτων
- Εφαρμογή σε συστήματα εναλλακτικών πηγών ενέργειας

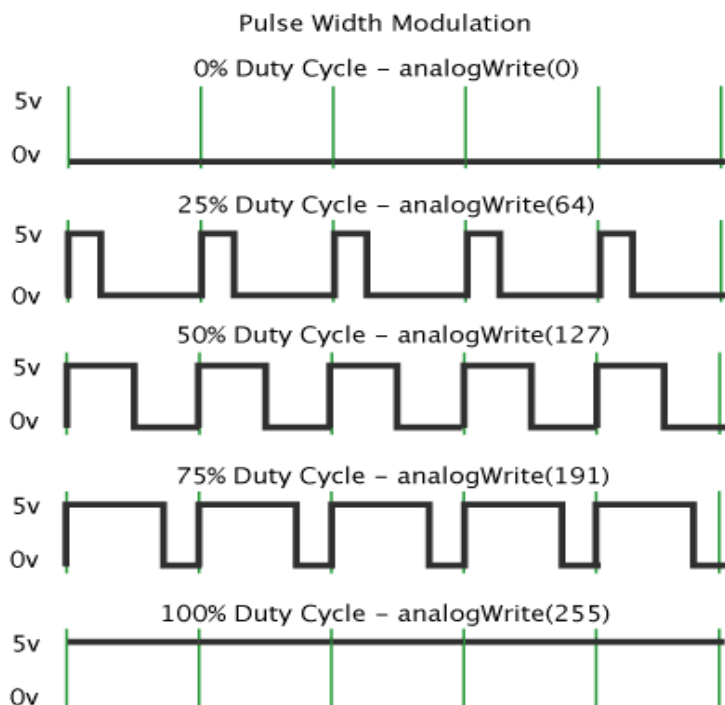
Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM, είναι η χρησιμοποίηση ενός ψηφιακού κυκλώματος για την δημιουργία μεταβλητών αναλογικών σημάτων. Ουσιαστικά η τεχνική PWM είναι η διαδοχική εναλλαγή ενός τετραγωνικού παλμού μεταξύ δύο επιπέδων (συνήθως υψηλό και χαμηλό) με μια συγκεκριμένη συχνότητα, αλλά με μεταβαλλόμενο κύκλο λειτουργίας (duty cycle). Ο κύκλος λειτουργίας, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που το σήμα παραμένει σε υψηλό επίπεδο κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, καθορίζει την ενεργό τιμή της τάσης ή της ισχύος που παρέχεται στο φορτίο. Με την αλλαγή του κύκλου λειτουργίας, μπορεί να ρυθμιστεί η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος εξόδου, παρέχοντας έτσι έναν αποδοτικό τρόπο ελέγχου.

Στον έλεγχο PWM υπάρχουν δύο ειδών χρόνοι, ο χρόνος κατά τον οποίο εφαρμόζεται μια παροχή σε ένα φορτίο και συμβολίζεται με  $t_{on}$  και ο χρόνος κατά τον οποίο δεν εφαρμόζεται η παροχή σε ένα φορτίο και συμβολίζεται με  $t_{off}$ . Στο σχήμα 23 απεικονίζεται ένα δομή ενός σήματος PWM.



**Εικόνα 29 Η δομή ενός σήματος PWM**

Ένα σήμα PWM χαρακτηρίζεται από δύο βασικά στοιχεία. Το πρώτο στοιχείο είναι ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) και από την συχνότητα λειτουργίας. Το Duty Cycle μετριέται σε επί τις εκατό (%) ενώ η συχνότητα λειτουργίας σε Hz. Στο σχήμα 24 απεικονίζεται η δομή σημάτων για διάφορα duty cycle.



**Εικόνα 30 Η δομή σημάτων PWM με διαφορετικά Duty Cycle (Μαρτίνης, 2013)**

Σε ένα σήμα PWM όπως αναφέραμε και παραπάνω μας ενδιαφέρουν δύο στοιχεία, ο κύκλος λειτουργίας και η συχνότητα. Για την εύρεση του κύκλου λειτουργίας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο:

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{T} * 100\% \quad (4.18)$$

Όπου  $t_{on}$ : είναι ο χρόνος για τον οποίο ένα σήμα PWM βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο (δηλαδή το φορτίο τροφοδοτείται με τάση)

T: η περίοδος

Για την εύρεση της περιόδου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο:

$$T = \frac{1}{F} \quad (4.19)$$

Όπου F: είναι η συχνότητα σε Hz



### **3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Η διάταξη ελέγχου ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) που χρησιμοποιήθηκε**

Για τον έλεγχο της ταχύτητας του ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήσαμε ένα μετατροπέα υποβιβασμού DC – DC με την τεχνική διαμόρφωσης των εύρους παλμών (PWM).

#### **3.1 Περιγραφή λειτουργίας**

Για την λειτουργία του συστήματος, το κύκλωμα θα πρέπει να τροφοδοτηθεί από το δίκτυο με τάση 230V. Με την έναρξη τροφοδοσίας του κυκλώματος, η τάση διέρχεται από τον ανορθωτή και μετατρέπεται από εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Έπειτα το σύστημα αρχίζει να φορτίζει τον πυκνωτή του συστήματος. Για την ομαλή και ασφαλή φόρτιση του πυκνωτή χρησιμοποιήθηκε μια αντίσταση και ένας πυκνωτής. Μόλις περάσει ένα χρονικό περιθώριο στο οποίο ο πυκνωτής έχει φορτιστεί επαρκώς, τότε ενεργοποιείται το ρελέ που υπάρχει και βραχυκυκλώνει/απομονώνει το σύστημα ομαλής φόρτισης του πυκνωτή και μας δίνεται η δυνατότητα για έλεγχο και χειρισμό. Έπειτα η τάση όπου διέρχεται από τον πυκνωτή οδηγείται στο ημιαγωγικό υλικό IGBT. Μετά από το IGBT, η τάση οδηγείται στους ακροδέκτες όπου συνδέεται το φορτίο. Παράλληλα με τους ακροδέκτες που συνδέεται το φορτίο, έχει συνδεθεί μια δίοδο ελευθέρως ροής ώστε κατά τη διάρκεια σβέσης του IGBT να μην δημιουργούνται υπερτάσεις που μπορούν να καταστρέψουν το IGBT. Για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή έχει τοποθετηθεί ένα τροφοδοτικό μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης 230V σε συνεχή των 5VDC. Για την ανόρθωση και εξομάλυνση της τάσης εξόδου του μετασχηματιστή, χρησιμοποιήσαμε ένα πλήρη ανορθωτή με πυκνωτή εξομάλυνσης. Η τάση εξόδου του συστήματος ανόρθωσης - εξομάλυνσης, ουσιαστικά είναι  $12,6\text{VDC}$  ( $9\text{VAC} * 1,4 = 12,6 \text{VDC}$ ) σε αντίθεση με τα  $9 \text{VAC}$  που είναι η έξοδος του μετασχηματιστή. Λόγω ότι ο μικροελεγκτής έχει τάση λειτουργίας 5VDC, χρησιμοποιήσαμε ένα ολοκληρωμένο σταθεροποιητή της γενιάς 7805, ώστε η τάση εξόδου των  $12,6\text{VDC}$  του συστήματος εξομάλυνσης να μειωθεί και να σταθεροποιηθεί στα 5VDC. Για την τροφοδοσία της πύλης του IGBT έχει τοποθετηθεί ένα τροφοδοτικό μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης 230V σε συνεχή των 15VDC. Για την ανόρθωση και εξομάλυνση της τάσης εξόδου του μετασχηματιστή, χρησιμοποιήσαμε όπως αναλύσαμε και παραπάνω έναν πλήρη ανορθωτή με πυκνωτή εξομάλυνσης. Η τάση εξόδου του συστήματος ανόρθωσης – εξομάλυνσης, ουσιαστικά είναι 21VDC ( $15\text{VAC} * 1,4 = 21 \text{VDC}$ ) σε αντίθεση με τα  $15 \text{VAC}$  που είναι η έξοδος του μετασχηματιστή. Λόγω ότι η πύλη του IGBT έχει τάση λειτουργίας 15VDC, χρησιμοποιήσαμε ένα ολοκληρωμένο σταθεροποιητή της γενιάς 7815, ώστε η τάση εξόδου των 21VDC του συστήματος ανόρθωσης - εξομάλυνσης να μειωθεί και να σταθεροποιηθεί στα 15VDC. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση μετά το τροφοδοτικό που χρησιμοποιείται για την πύλη του IGBT, διέρχεται πριν από το IGBT από τον Optocoupler για την γαλβανική απομόνωση του συστήματος ελέγχου με το σύστημα ισχύος. Ο Optocoupler ενεργοποιείται από τον μικροελεγκτή με βάση το duty cycle και την συχνότητα λειτουργίας που έχουμε ορίσει.

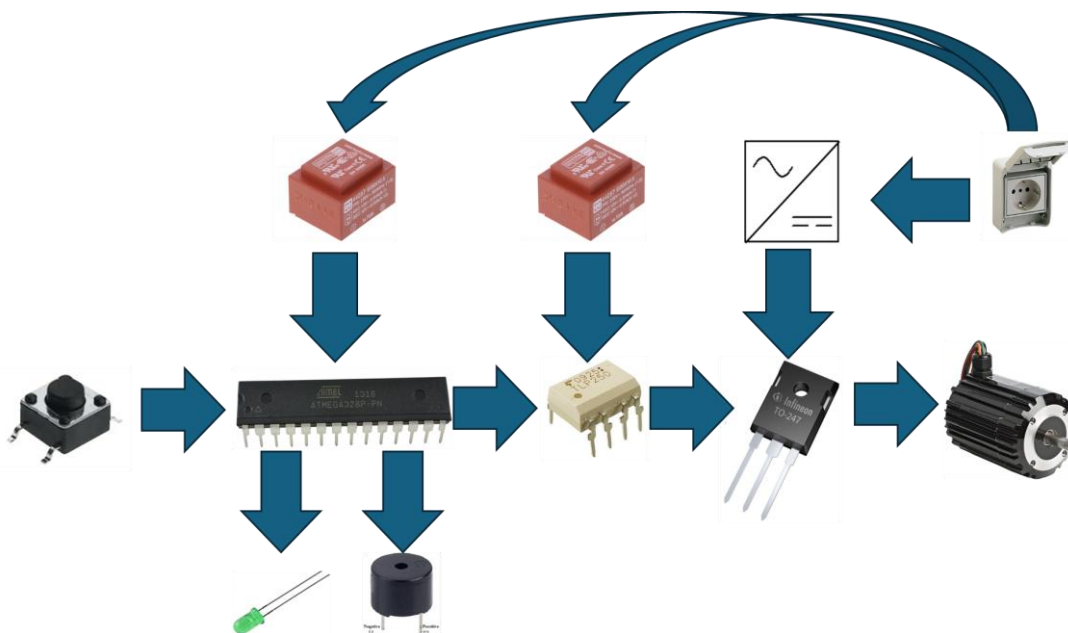
#### **3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά**

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα υποβιβασμού DC-DC που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την διπλωματική εργασία είναι:

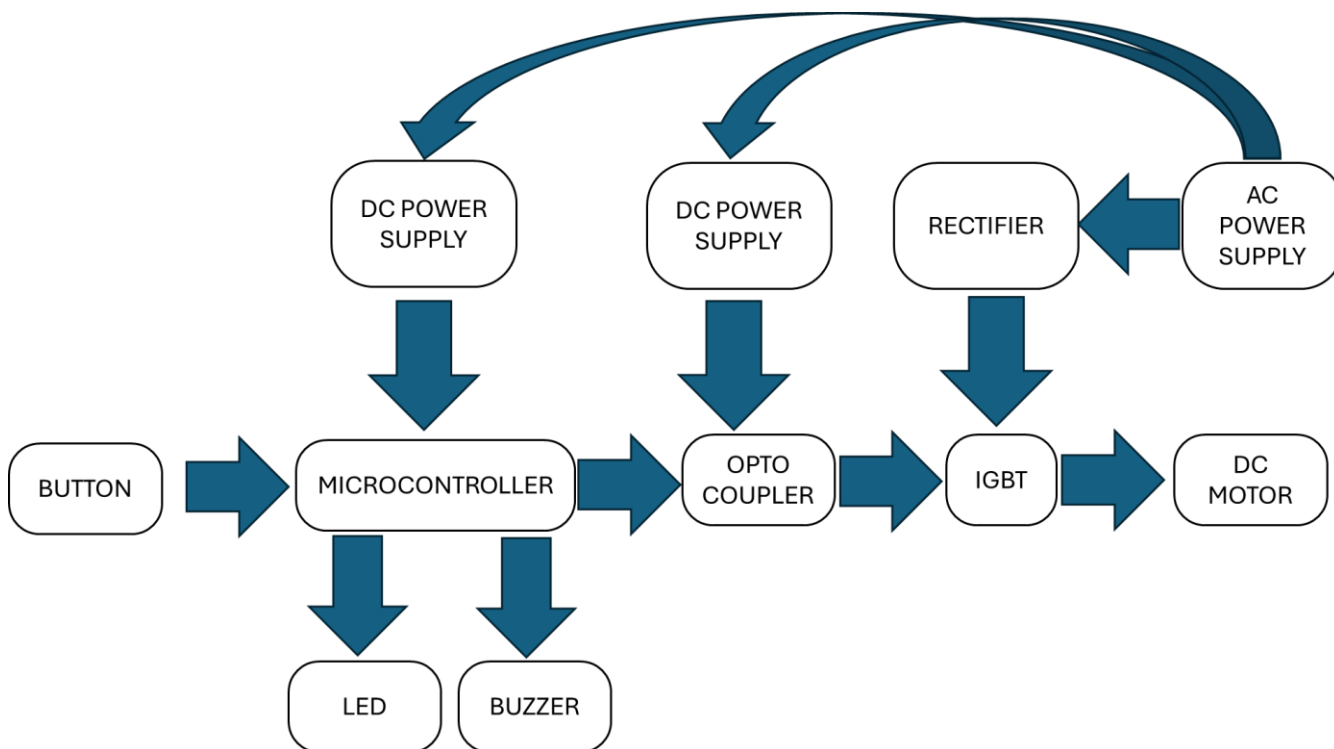
Χαρακτηριστικά	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Τάση τροφοδοσίας	220 ~ 240	V AC
Συχνότητα τροφοδοσίας	50 ~ 60	Hz
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	10	A
Μέγιστη ισχύς εξόδου	2,3	KW
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας ημιαγωγού ισχύος	125	°C
Διακοπτική συχνότητα	9	KHZ
Δυνατότητα ελέγχου της φοράς περιστροφής	Ναι	-
Γαλβανική απομόνωση του κυκλώματος ισχύος από το κύκλωμα ελέγχου με οπτοζεύκτη	2.500	V <sub>RMS</sub>
Διαστάσεις τυπωμένου κυκλώματος	124 x 154	mm

### 3.3 Block διάγραμμα

Η γραφική απεικόνιση και το Block διάγραμμα της πλακέτας που κατασκευάστηκε είναι τα παρακάτω:



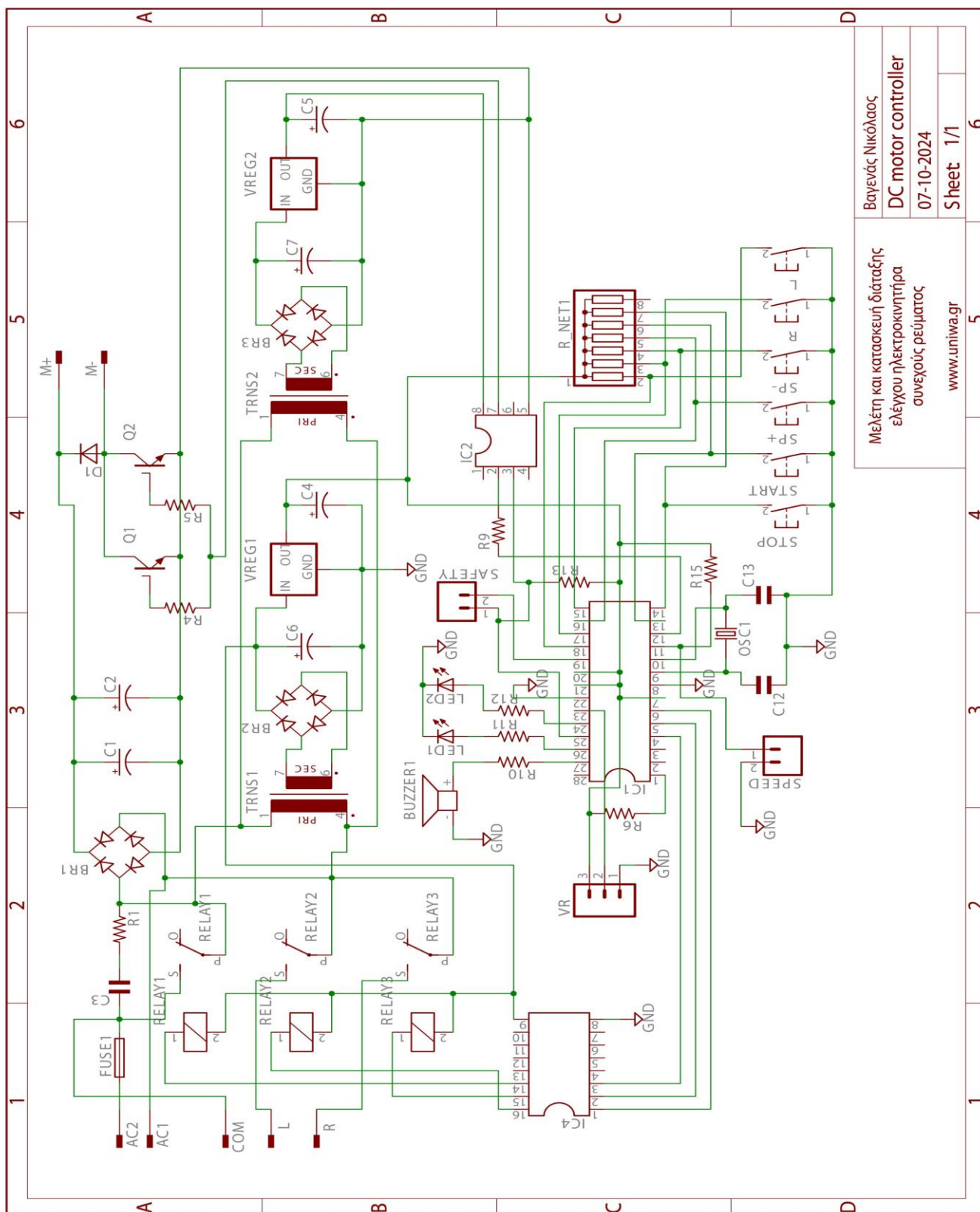
Εικόνα 31 Γραφική απεικόνιση της πλακέτας



Εικόνα 32 Το Block διάγραμμα της πλακέτας

### 3.4 Θεωρητικό κύκλωμα

Παρακάτω απεικονίζεται το θεωρητικό κύκλωμα της διάταξης ελέγχου ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).

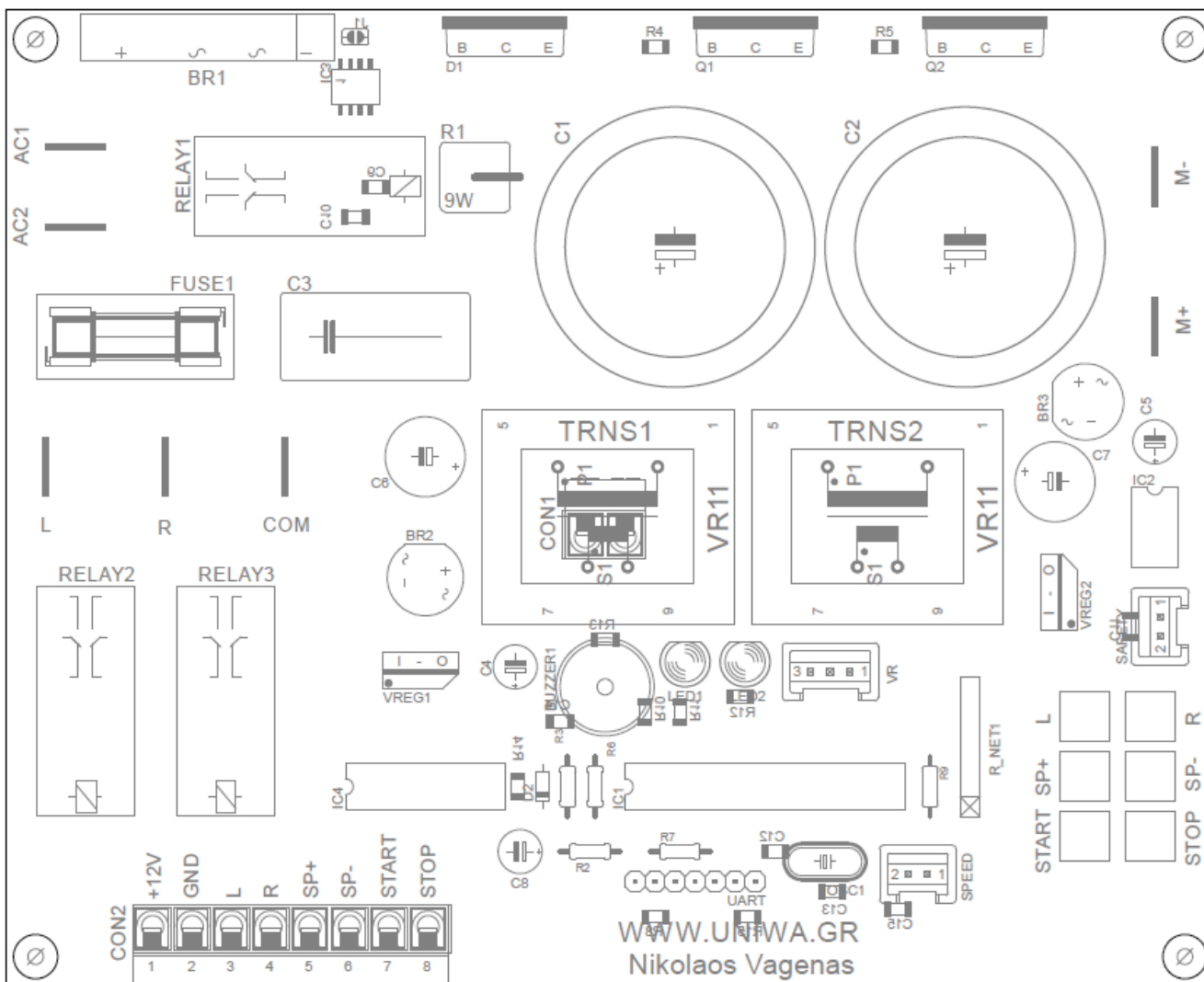


Μελέτη και κατασκευή διάταξης ελέγχου ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος		www.uniwa.gr	
Βαγενάς Νικόλαος		DC motor controller	
07-10-2024		Sheet 1/1	

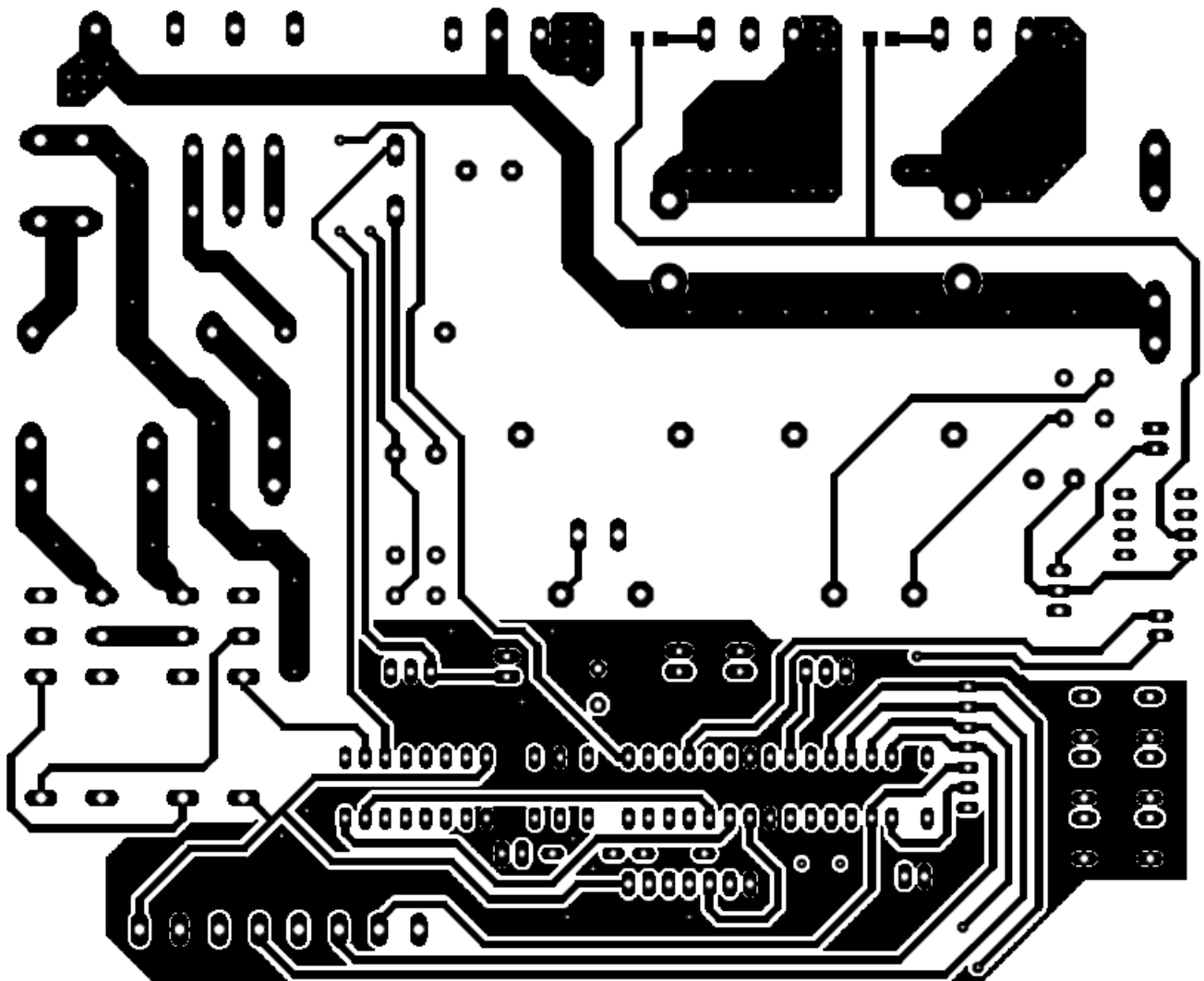
Εικόνα 33 Θεωρητικό κύκλωμα

### 3.5 Τυπωμένο κύκλωμα

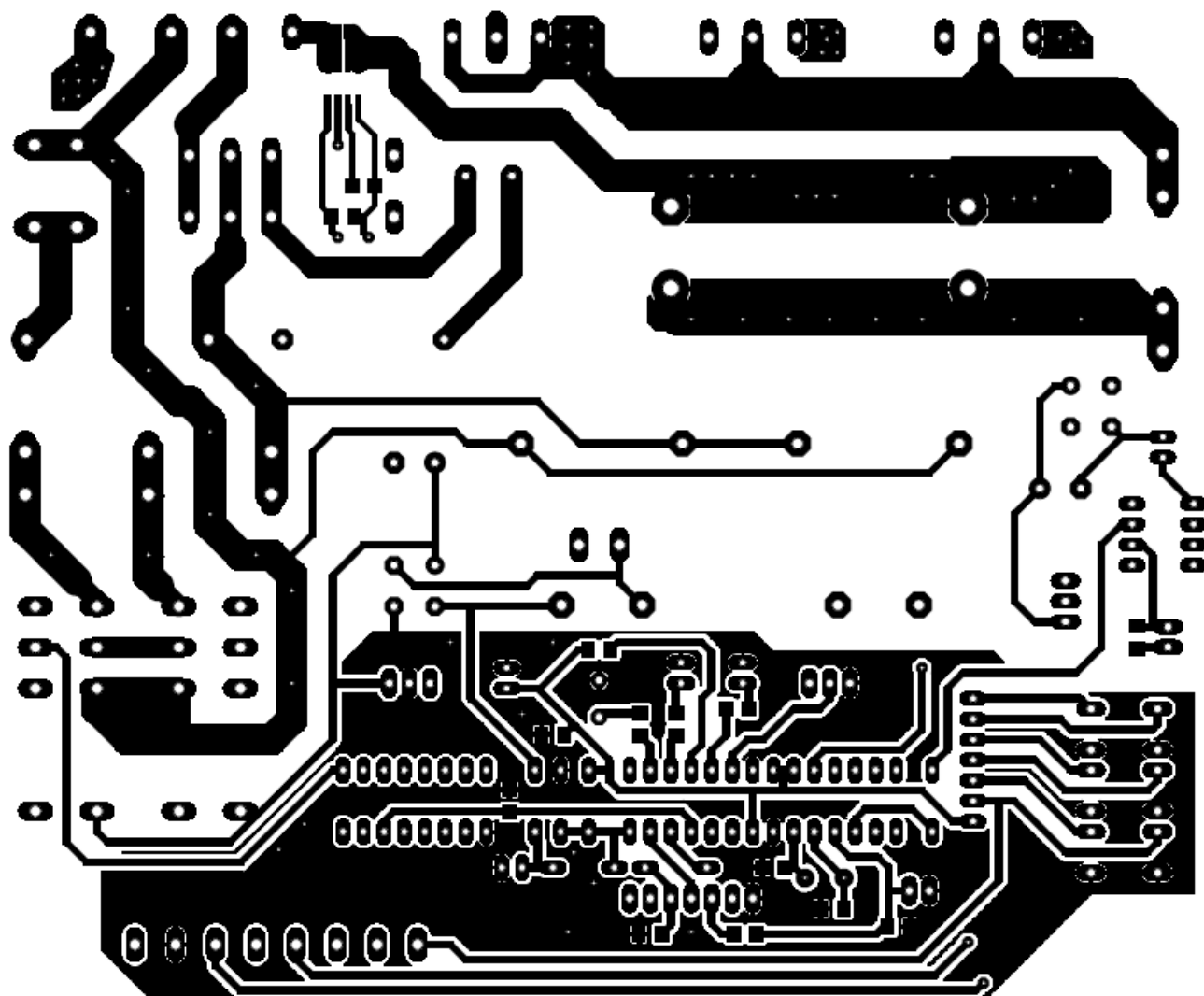
Όπως θα αναλύσουμε και στο υποκεφάλαιο 3.10, το κύκλωμα κατασκευάστηκε με το σχεδιαστικό πρόγραμμα Eagle. Στις παρακάτω φωτογραφίες αποτυπώνονται το τοπογραφικό διάγραμμα της πλακέτας, οι συνδέσεις του πάνω μέρους, οι συνδέσεις του κάτω μέρους, η πλακέτα με και χωρίς την γείωση στο σύστημα ελέγχου όπως μας το εξάγει το πρόγραμμα Eagle.



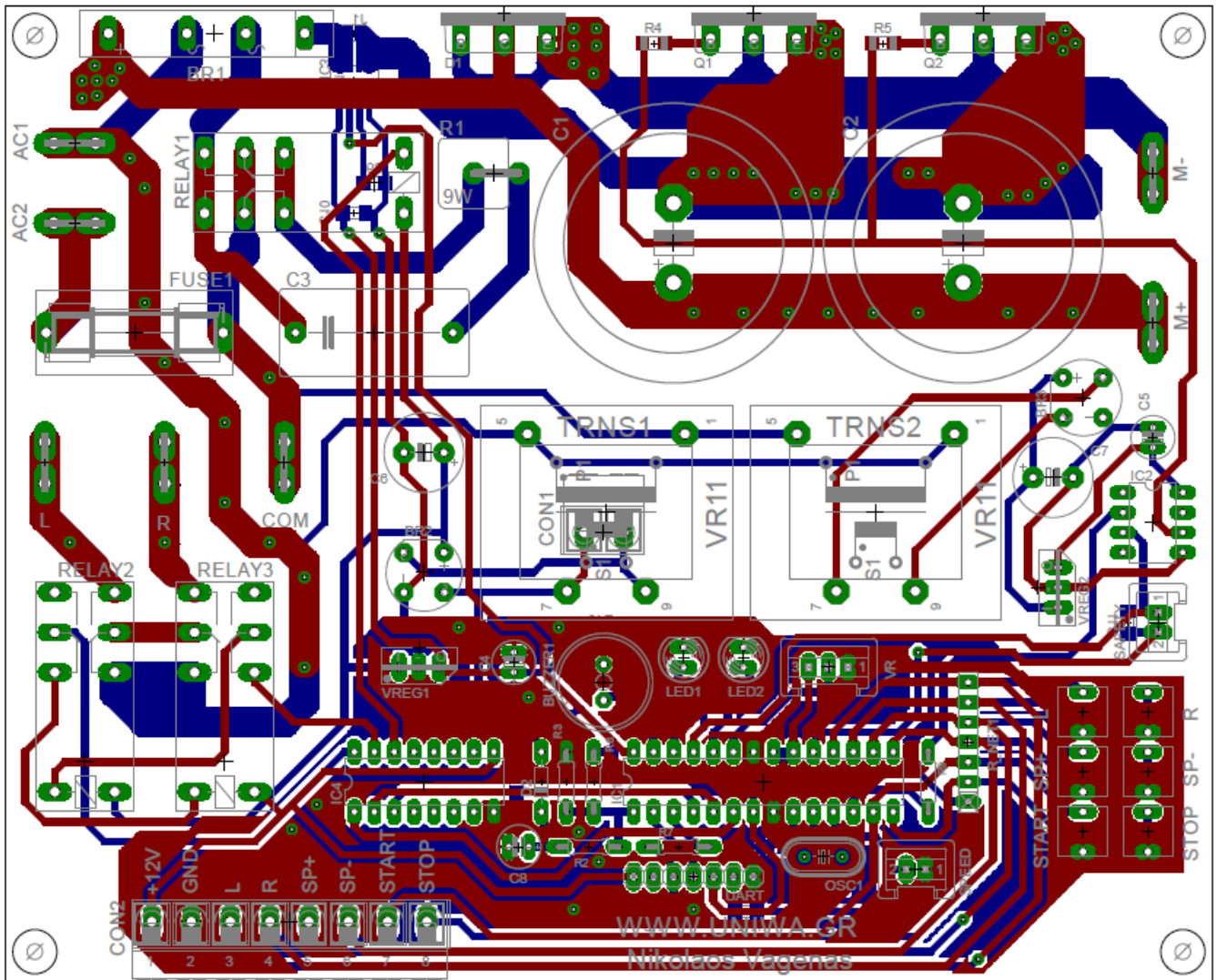
Εικόνα 34 Τοπογραφικό διάγραμμα τυπωμένης πλακέτας



Εικόνα 35 Πάνω όψη της τυπωμένης πλακέτας

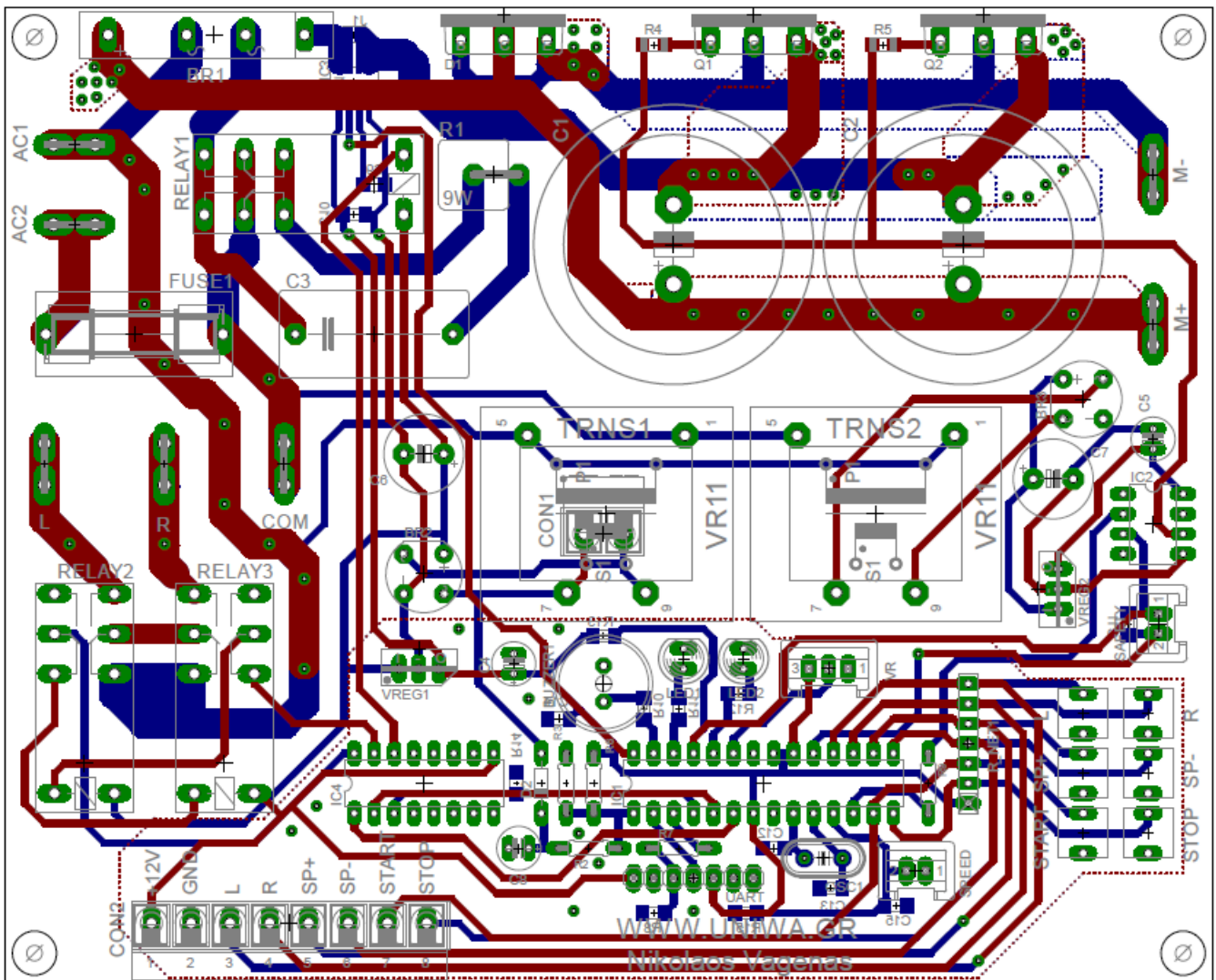


Εικόνα 36 Κάτω όψη της τυπωμένης πλακέτας



Εικόνα 37 Τυπωμένη πλακέτα με γείωση





Εικόνα 38 Τυπωμένη πλακέτα χωρίς γείωση

### 3.6 Ο μικροελεγκτής ATmega328P

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής ATmega328P, της εταιρείας Microchip Technology. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής φημίζεται για την απλότητα του, την αυξημένη δυνατότητα σε πληθώρα εφαρμογών και το χαμηλό κόστος αγοράς του.

Πιο συγκεκριμένα ο μικροελεγκτής ATmega328P είναι ένας μικροελεγκτής της σειράς AVR, που λόγω της αρχιτεκτονικής Reduced Instruction Set Computing (RISC) που χρησιμοποιεί, μπορεί να εκτελέσει πλήθων εντολών, τις περισσότερες από τις οποίες δύναται να εκτελέσει σε ένα κύκλο ρολογιού.

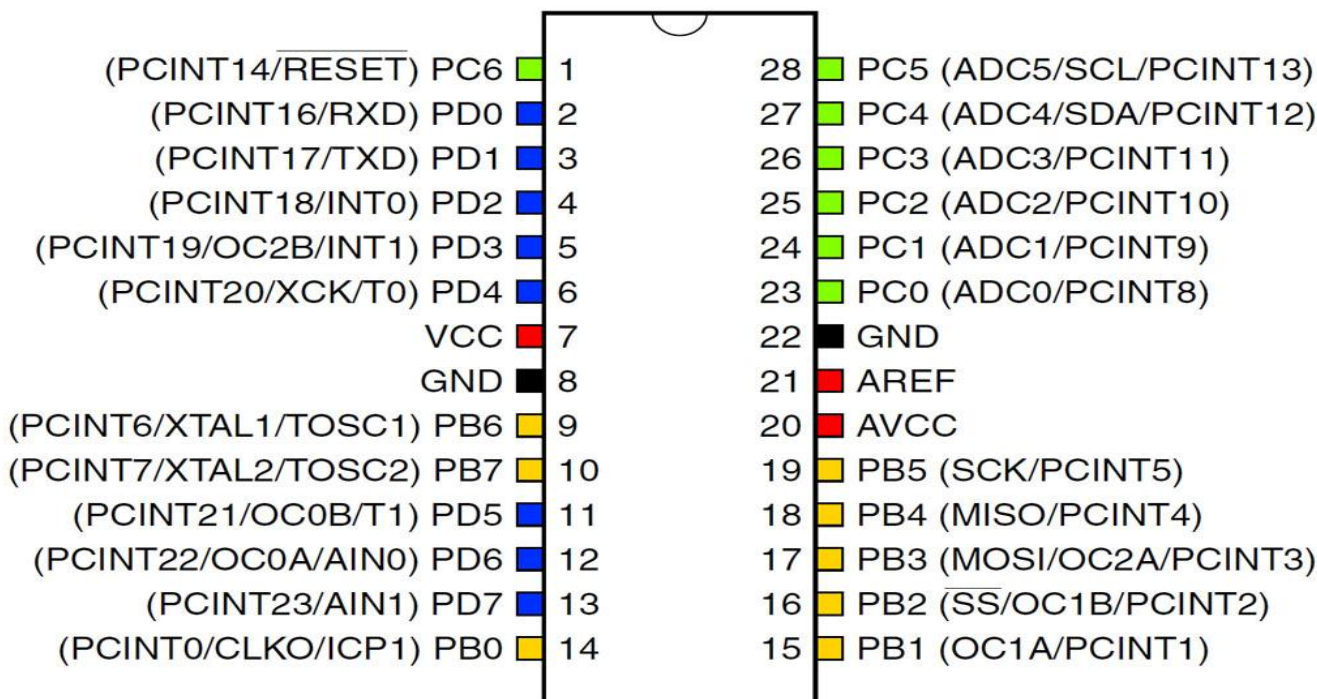


**Εικόνα 39 Ο μικροελεγκτής Atmega328P της εταιρείας Microchip Technology**

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή είναι τα παρακάτω:

- Πυρήνας 8-bit
- 32KB Flash μνήμη για την αποθήκευση του προγράμματος, με δυνατότητα εγγραφής/διαγραφής έως 10.000 κύκλων
- 2KB SRAM για τη δυναμική μνήμη

- 1KB EEPROM για την αποθήκευση δεδομένων που δεν πρέπει να χαθούν όταν σβήσει το σύστημα.
- Χρησιμοποίηση 32x8-bit καταχωρητών εργασίας
- Δυνατότητα κλειδώματος του προγράμματος για να διασφαλιστεί η ασφάλεια του Software
- Εύρος ταχύτητας ρολογιού από 32kHz έως 20MHz
- Εικοσιτρείς ψηφιακές είσοδοι/έξοδοι που διαμορφώνονται αναλόγως το πρόγραμμα με ή χωρίς αντιστάσεις pull-up
- Έξι κανάλια PWM
- Οκτώ αναλογικοί είσοδοι των 10-bit, με αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα (ADC)
- Δύο χρονομετρητές/μετρητές 8-bit με prescaler και συγκριτικούς καταχωρητές
- Ένα χρονομετρητής/μετρητής 16-bit με prescaler, συγκριτικούς καταχωρητές και δυνατότητα καταγραφής εισόδου
- Ενσωματωμένο αναλογικό συγκριτή
- Τάση λειτουργίας από 2.7V έως 5.5V
- Κατανάλωση ρεύματος 1.5mA με τάση τροφοδοσίας 3V και συχνότητα λειτουργίας 4MHz
- Εύρος θερμοκρασίας από -40°C έως +125°C



Εικόνα 40 Διαμόρφωση των PIN του μικροελεγκτή Atmega328P

Ο μικροελεγκτής αποτελείται από διάφορα PIN, που κάποια από αυτά είναι ενοποιημένα σε θύρες. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν τα παρακάτω PIN και θύρες.

- Η τροφοδοσία του μικροελεγκτή γίνεται από το PIN N<sub>ο</sub> 7
- Τα PIN N<sub>ο</sub> 8 και 22 είναι τα PIN της γείωσης.
- Θύρα B, η οποία αποτελείται από αμφίδρομες πόρτες εισόδου/εξόδου των 8-bit με ενσωματωμένες αντιστάσεις pull-up.
- Θύρα C, η οποία αποτελείται από αμφίδρομες πόρτες εισόδου/εξόδου των 7-bit με ενσωματωμένες αντιστάσεις pull-up.
- Θύρα D, η οποία αποτελείται από αμφίδρομες πόρτες εισόδου/εξόδου των 8-bit με ενσωματωμένες αντιστάσεις pull-up.
- Το PIN N<sub>ο</sub> 20, χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του Analog/Digital (A/D) converter.
- Το PIN N<sub>ο</sub> 21, χρησιμοποιείται σαν αναλογική αναφορά για το Analog/Digital (A/D) converter.

Ο μικροελεγκτής επίσης διαθέτει εικοσιτρείς ψηφιακές εισόδους/εξόδους που διαμορφώνονται ανάλογα. Οι εισοδοί/έξοδοι βρίσκονται σε τρεις θύρες, την θύρα B, την θύρα C και την θύρα D.

Στην θύρα B οι ψηφιακές εισοδοί και έξοδοι είναι οι παρακάτω:

- PB0 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 14
- PB1 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 15
- PB2 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 16
- PB3 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 17
- PB4 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 18
- PB5 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 19
- PB6 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 9
- PB7 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 10

Στην θύρα C οι ψηφιακές εισοδοί και έξοδοι είναι οι παρακάτω:

- PC0 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 23
- PC1 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 24
- PC2 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 25
- PC3 που βρίσκεται στο PIN N<sub>ο</sub> 26

- PC4 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 27
- PC5 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 28
- PC6 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 1, και χρησιμοποιείται σαν είσοδο για reset του μικροελεγκτή

Στην θύρα D οι ψηφιακές εισόδους και εξόδους είναι οι παρακάτω:

- PD0 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 2
- PD1 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 3
- PD2 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 4
- PD3 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 5
- PD4 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 6
- PD5 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 11
- PD6 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 12
- PD7 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 13

Από τις παραπάνω εισόδους/εξόδους, αυτές που μπορούν να διαμορφωθούν από την θύρα C σαν αναλογικές εισόδους με την αντίστοιχη παραμετροποίηση είναι οι:

- PC0 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 23
- PC1 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 24
- PC2 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 25
- PC3 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 26
- PC4 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 27
- PC5 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 28
- PC6 που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 1

Επίσης ο μικροελεγκτής έχει έξι κανάλια PWM. Αυτά τα κανάλια βρίσκονται στην θύρα B και D και είναι τα:

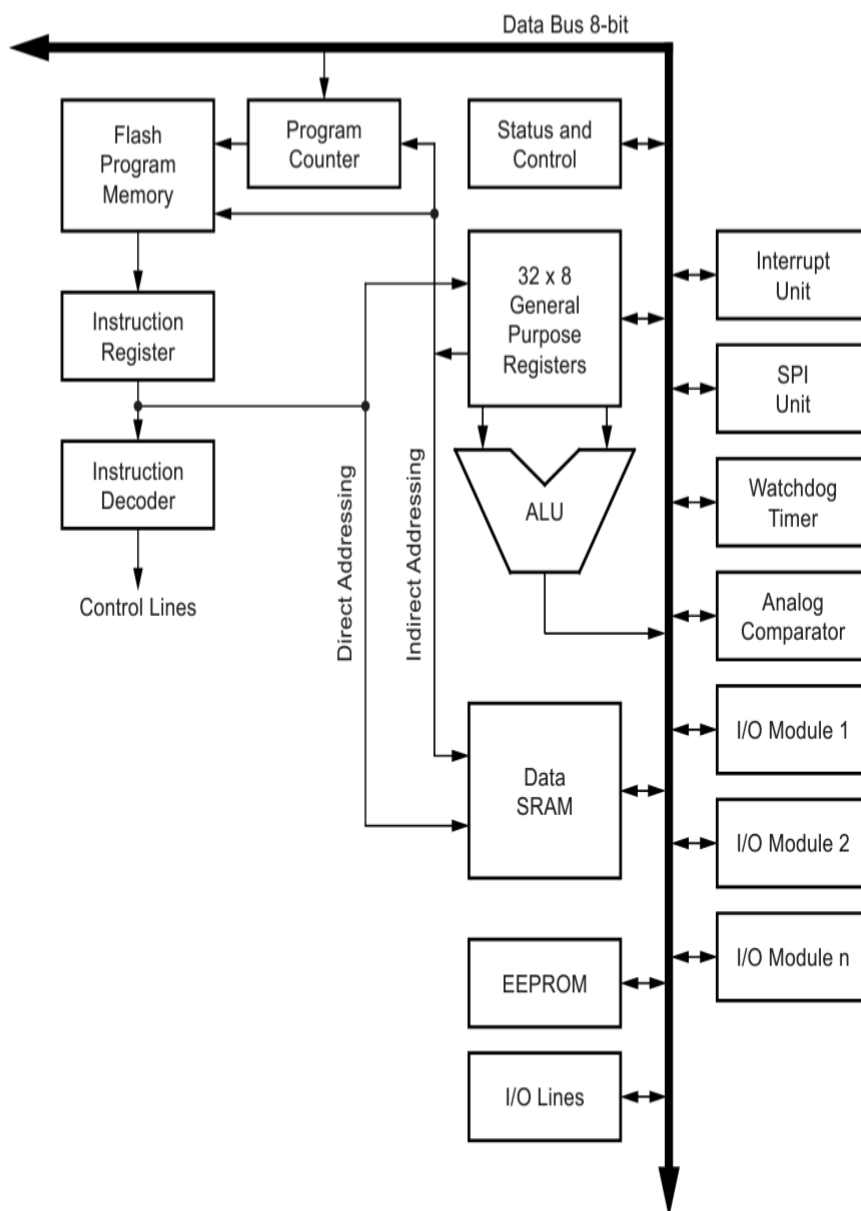
- PD3/OC2B που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 5
- PD5/OC0B που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 11

- PD6/OC0A που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 12
- PB1/OC1A που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 15
- PB2/OC1B που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 16
- PB3/OC2A που βρίσκεται στο PIN N<sub>o</sub> 17

Το κάθε PIN συνδέεται με ξεχωριστό χρονομετρητή/μετρητή σε διαφορετικά κανάλια όπως απεικονίζεται παρακάτω:

Κανάλι μικροελεγκτή	Χρονομετρητής/Μετρητής	Κανάλι N <sub>o</sub>
PB3/OC2A	Counter 2	A
PD3/OC2B	Counter 2	B
PD6/OC0A	Counter 0	A
PD5/OC0B	Counter 0	B
PB1/OC1A	Counter 1	A
PB2/OC1B	Counter 1	B

Όπως αναφέραμε ο μικροελεγκτής Atmega328P χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική του πυρήνα AVR. Η κύρια λειτουργία του πυρήνα της CPU είναι να διασφαλίζει τη σωστή εκτέλεση του προγράμματος. Η CPU πρέπει επομένως να έχει πρόσβαση σε μνήμες, να εκτελεί υπολογισμούς, να ελέγχει περιφερειακά και να χειρίζεται διακόπτες. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση και ο παραλληλισμός, το AVR χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική Harvard – με ξεχωριστές μνήμες και διαύλους για προγράμματα και δεδομένα. Οι εντολές στη μνήμη του προγράμματος εκτελούνται με διοχέτευση ενός επιπέδου. Ενώ εκτελείται μια εντολή, η επόμενη εντολή λαμβάνεται εκ των προτέρων από τη μνήμη του προγράμματος. Αυτή η ιδέα επιτρέπει την εκτέλεση εντολών σε κάθε κύκλο ρολογιού. Η μνήμη του προγράμματος είναι επαναπρογραμματιζόμενη μνήμη flash, εντός του συστήματος. Παρακάτω απεικονίζεται το Block διάγραμμα της αρχιτεκτονικής AVR.



Εικόνα 41 Block διάγραμμα αρχιτεκτονικής AVR

### 3.7 Το τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) 30N60

Στην διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης IGBT 30N60. Τα IGBT είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός μεταξύ των διπολικών τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor ή BJT) και των τρανζίστορ MOSFET (τρανζίστορ μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου ή Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). (Γεωργακόπουλος & Παναγούλια, 2020)



Εικόνα 42 Η μπροστινή και πίσω όψη ενός IGBT

Τα χαρακτηριστικά του IGBT που έχουν προέλθει από τα BJT είναι:



1. Η ικανότητά τους να διαχειρίζονται μεγάλα ρεύματα λόγω της δομής τους με διαχυτικό ρεύμα (current-carrying capability). Το IGBT εκμεταλλεύεται αυτή την ικανότητα επιτρέποντας του να διαχειρίζεται υψηλά ρεύματα συλλέκτη.
2. Η ικανότητα τους να παρουσιάζουν χαμηλή πτώση τάσης όταν βρίσκονται σε αγωγίμη κατάσταση. Το IGBT εκμεταλλεύεται αυτό το χαρακτηριστικό, παρουσιάζοντας χαμηλή πτώση τάσης συλλέκτη-εκπομπού (collector-emitter saturation voltage), γεγονός που μειώνει τις απώλειες ισχύος κατά τη λειτουργία.

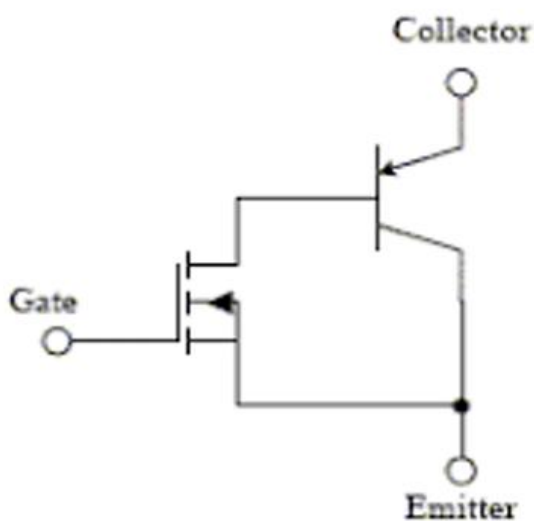
Όπως είπαμε όμως παραπάνω κάποια χαρακτηριστικά των IGBT προέρχονται και από τα MOSFET.

Τα χαρακτηριστικά του IGBT που έχουν προέλθει από τα MOSFET είναι:

1. Η υψηλή αντίσταση εισόδου τους, η οποία καθιστά τον έλεγχο πύλης (gate) πολύ πιο αποδοτική με χαμηλή κατανάλωση ρεύματος. Το IGBT εκμεταλλεύεται αυτό το χαρακτηριστικό, επιτρέποντας τη λειτουργία του με χαμηλά ρεύματα πύλης, κάνοντάς το ευκολότερο στη χρήση για εφαρμογές υψηλής ισχύος. (Φουρλής, 2018)
2. Η δυνατότητα τους για υψηλή ταχύτητα εναλλαγής τους (switching speed). Το IGBT εκμεταλλεύεται αυτή την ιδιότητα παρότι η ταχύτητα εναλλαγής του είναι συνήθως μικρότερη από εκείνη των MOSFETS. Όμως δεν παύει να παραμένει αρκετά υψηλή για πολλές εφαρμογές. (Φουρλής, 2018)

Ένα IGBT αποτελείται από τρεις ακροδέκτες:

1. Τον ακροδέκτη του συλλέκτη (collector)
2. Τον ακροδέκτη του εκπομπού (emitter)
3. Τον ακροδέκτη της πύλης (gate)



Εικόνα 43 Η δομή ενός IGBT (Φουρλής, 2018)

Ένα IGBT λειτουργεί πρακτικά ως διακόπτης ισχύος που ελέγχεται μέσω της πύλης του. Όταν εφαρμόζεται θετική τάση στην πύλη σε σχέση με τον εκπομπό, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο που επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να διαπεράσουν το μονωτικό στρώμα και να δημιουργήσουν ένα κανάλι αγωγιμότητας μεταξύ του συλλέκτη και του εκπομπού. Αυτό επιτρέπει τη ροή ρεύματος από τον συλλέκτη προς τον εκπομπό ενεργοποιώντας το IGBT και επιτρέποντας τη ροή υψηλού ρεύματος μέσω του κυκλώματος. Όταν η τάση πύλης αφαιρεθεί ή γίνει αρνητική, το κανάλι αγωγιμότητας διακόπτεται και η ροή του ρεύματος σταματά, απενεργοποιώντας το IGBT.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του IGBT 30N60 της εταιρείας Infineon.

### Maximum ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector-emitter voltage	$V_{CE}$	600	V
DC collector current $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 100^\circ\text{C}$	$I_C$	41 30	A
Pulsed collector current, $t_p$ limited by $T_{jmax}$	$I_{Cpuls}$	112	
Turn off safe operating area $V_{CE} \leq 600\text{V}$ , $T_j \leq 150^\circ\text{C}$	-	112	
Diode forward current $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 100^\circ\text{C}$	$I_F$	41 30	
Diode pulsed current, $t_p$ limited by $T_{jmax}$	$I_{Fpuls}$	112	
Gate-emitter voltage	$V_{GE}$	$\pm 20$	V
Short circuit withstand time <sup>2</sup> $V_{GE} = 15\text{V}$ , $V_{CC} \leq 600\text{V}$ , $T_j \leq 150^\circ\text{C}$	$t_{SC}$	10	$\mu\text{s}$
Power dissipation $T_C = 25^\circ\text{C}$	$P_{tot}$	250	W
Soldering temperature wavesoldering, 1.6 mm (0.063 in.) from case for 10s	$T_s$	260	$^\circ\text{C}$
Operating junction and storage temperature	$T_j$ , $T_{stg}$	-55...+150	$^\circ\text{C}$

<sup>1</sup> J-STD-020 and JESD-022

<sup>2</sup> Allowed number of short circuits: <1000; time between short circuits: >

## Thermal Resistance

Parameter	Symbol	Conditions	Max. Value	Unit
<b>Characteristic</b>				
IGBT thermal resistance, junction – case	$R_{thJC}$		0.5	KW
Diode thermal resistance, junction – case	$R_{thJCD}$		1	
Thermal resistance, junction – ambient	$R_{thJA}$		40	

Electrical Characteristic, at  $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified

## Static Characteristic

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	Typ.	Max.	
Collector-emitter breakdown voltage	$V_{(BR)CES}$	$V_{GE}=0V, I_C=500\mu A$	600	-	-	V
Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE} = 15V, I_C=30A$ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$	1.7 -	2.1 2.5	2.4 3.0	
Diode forward voltage	$V_F$	$V_{GE}=0V, I_F=30A$ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$	1.2 -	1.4 1.25	1.8 1.65	
Gate-emitter threshold voltage	$V_{GE(th)}$	$I_C=700\mu A, V_{CE}=V_{GE}$	3	4	5	
Zero gate voltage collector current	$I_{CES}$	$V_{CE}=600V, V_{GE}=0V$ $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$	- -	- -	40 3000	$\mu A$
Gate-emitter leakage current	$I_{GES}$	$V_{CE}=0V, V_{GE}=20V$	-	-	100	nA
Transconductance	$g_{fs}$	$V_{CE}=20V, I_C=30A$	-	20	-	S
<b>Dynamic Characteristic</b>						
Input capacitance	$C_{iss}$	$V_{CE}=25V,$	-	1600	1920	pF
Output capacitance	$C_{oss}$	$V_{GE}=0V,$	-	150	180	
Reverse transfer capacitance	$C_{rss}$	$f=1\text{ MHz}$	-	92	110	
Gate charge	$Q_{Gate}$	$V_{CC}=480V, I_C=30A$ $V_{GE}=15V$	-	140	182	nC
Internal emitter inductance measured 5mm (0.197 in.) from case	$L_E$		-	13	-	nH
Short circuit collector current <sup>1)</sup>	$I_{C(SC)}$	$V_{GE}=15V, t_{SC}\leq 10\mu s$ $V_{CC}\leq 600V,$ $T_j\leq 150\text{ }^\circ\text{C}$	-	300	-	A

**Switching Characteristic, Inductive Load, at  $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$**

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	Max.	

**IGBT Characteristic**

Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_{CC}=400\text{ V}$ , $I_C=30\text{ A}$ , $V_{GE}=0/15\text{ V}$ , $R_G=11\Omega$ , $L_\sigma^{(1)}=180\text{ nH}$ , $C_\sigma^{(1)}=900\text{ pF}$ Energy losses include “tail” and diode reverse recovery.	-	44	53	ns
Rise time	$t_r$		-	34	40	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	291	349	
Fall time	$t_f$		-	58	70	mJ
Turn-on energy	$E_{on}$		-	0.64	0.77	
Turn-off energy	$E_{off}$		-	0.65	0.85	
Total switching energy	$E_{ts}$		-	1.29	1.62	

**Anti-Parallel Diode Characteristic**

Diode reverse recovery time	$t_{rr}$	$T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $V_R=200\text{ V}$ , $I_F=30\text{ A}$ , $di_F/dt=200\text{ A}/\mu\text{s}$	-	400	-	ns
	$t_s$		-	32	-	
	$t_F$		-	368	-	
Diode reverse recovery charge	$Q_{rr}$		-	610	-	nC
Diode peak reverse recovery current	$I_{rrm}$		-	5.5	-	A
Diode peak rate of fall of reverse recovery current during $t_b$	$di_{rr}/dt$	-	180	-	$\text{A}/\mu\text{s}$	

**Switching Characteristic, Inductive Load, at  $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$**

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	Max.	

Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$ $V_{CC}=400\text{ V}$ , $I_C=30\text{ A}$ , $V_{GE}=0/15\text{ V}$ , $R_G=11\Omega$ , $L_\sigma^{(1)}=180\text{ nH}$ , $C_\sigma^{(1)}=900\text{ pF}$ Energy losses include “tail” and diode reverse recovery.	-	44	53	ns
Rise time	$t_r$		-	34	40	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	324	389	
Fall time	$t_f$		-	67	80	mJ
Turn-on energy	$E_{on}$		-	0.98	1.18	
Turn-off energy	$E_{off}$		-	0.92	1.19	
Total switching energy	$E_{ts}$		-	1.90	2.38	

**Anti-Parallel Diode Characteristic**

Diode reverse recovery time	$t_{rr}$	$T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$ $V_R=200\text{ V}$ , $I_F=30\text{ A}$ , $di_F/dt=200\text{ A}/\mu\text{s}$	-	520	-	ns
	$t_s$		-	56	-	
	$t_F$		-	464	-	
Diode reverse recovery charge	$Q_{rr}$		-	1740	-	nC
Diode peak reverse recovery current	$I_{rrm}$		-	9.0	-	A
Diode peak rate of fall of reverse recovery current during $t_b$	$di_{rr}/dt$	-	200	-	$\text{A}/\mu\text{s}$	

Leakage inductance  $L_\sigma$  and Stray capacity  $C_\sigma$  due to dynamic test circuit in Figure E.

### 3.8 Ο Οπτοζεύκτης (Optocoupler) TLP250

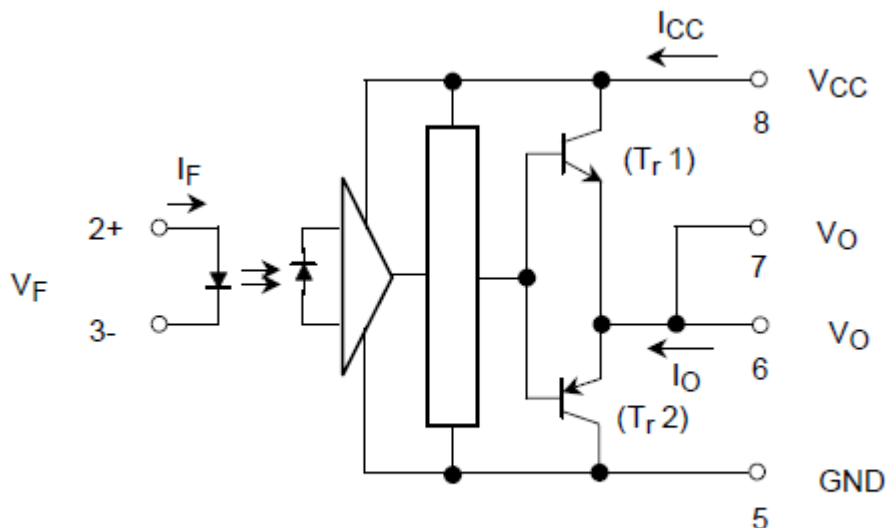
Στην πλακέτα που κατασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκε ο οπτοζεύκτης (Optocoupler) TLP250, ώστε να μπορέσουμε να απομονώσουμε γαλβανικά το κύκλωμα ισχύος της πλακέτας με το κύκλωμα ελέγχου του μικροελεγκτή. Ο Optocoupler ουσιαστικά είναι ένας οπτικός απομονωτής που μας βοηθάει να απομονώνουμε δύο κυκλώματα στα οποία είναι απαραίτητη η μεταφορά ενός σήματος χωρίς όμως να έρθουν σε άμεση ηλεκτρική επαφή. Τα βασικά μέρη ενός Οπτοζεύκτη είναι:

1. Ένα Led, το οποίο όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα εκπέμπει φως.
2. Ένας Φωτοανιχνευτής, ο οποίος όταν ανιχνεύσει το φως που εκπέμπει το Led το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα



**Εικόνα 44 Η μπροστινή και η πίσω όψη του Optocoupler που χρησιμοποιήθηκε**

Παρακάτω απεικονίζεται η διάταξη σύνδεσης του Optocoupler.



**Εικόνα 45 Το σχέδιο συνδεσμολογίας του Optocoupler**

Σύμφωνα με το παραπάνω σχέδιο συνδεσμολογίας, στα Pin 2 και 3 συνδέουμε την εντολή από τον μικροελεγκτή, όπου ουσιαστικά ενεργοποιεί το Led του Optocoupler. Στο Pin 8 συνδέουμε την εξωτερική τροφοδοσία η οποία κατά την ενεργοποίηση του συστήματος θα διέλθει μέσω του Pin 6 (δηλαδή το Pin 6 είναι η έξοδος του συστήματος). Στο Pin 6 συνδέουμε την πύλη του IGBT. Το Pin 5 είναι η γείωση του συστήματος.

Παρακάτω απεικονίζονται κάποια βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του Optocoupler:

### Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Input current, on (Note 7)	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA	
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V	
Supply voltage	$V_{CC}$	15	—	30	20	V
Peak output current	$I_{OPH}/I_{OPL}$	—	—	$\pm 0.5$	A	
Operating temperature	$T_{opr}$	-20	25	70	85	°C

**Electrical Characteristics (Ta = - 20~70°C, unless otherwise specified)**

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Input forward voltage		V <sub>F</sub>	—	I <sub>F</sub> = 10 mA , Ta = 25°C		1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV <sub>F</sub> / ΔTa	—	I <sub>F</sub> = 10 mA	—	2.0	—	mV / °C
Input reverse current		I <sub>R</sub>	—	V <sub>R</sub> = 5V, Ta = 25°C		—	10	μA
Input capacitance		C <sub>T</sub>	—	V = 0 , f = 1MHz , Ta = 25°C	—	45	250	pF
Output current	“H” level	I <sub>OPH</sub>	3	V <sub>CC</sub> = 30V (*1) I <sub>F</sub> = 10 mA V <sub>8-6</sub> = 4V I <sub>F</sub> = 0 V <sub>6-5</sub> = 2.5V	-0.5	-1.5	—	A
	“L” level	I <sub>OPL</sub>	2		0.5	2	—	
Output voltage	“H” level	V <sub>OH</sub>	4	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, I <sub>F</sub> = 5mA	11	12.8	—	V
	“L” level	V <sub>OL</sub>	5	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>F</sub> = 0.8V	—	-14.2	-12.5	
Supply current	“H” level	I <sub>CCH</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 10mA	—	—	11	
	“L” level	I <sub>CCL</sub>	—	V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
				V <sub>CC</sub> = 30V, I <sub>F</sub> = 0mA	—	—	11	
Threshold input current	“Output L→H”	I <sub>FLH</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	“Output H→L”	I <sub>FHL</sub>	—	V <sub>CC1</sub> = +15V, V <sub>EE1</sub> = -15V R <sub>L</sub> = 200Ω, V <sub>O</sub> < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage		V <sub>CC</sub>	—		10	—	35	V
Capacitance (input□output)		C <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 0 , f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input□output)		R <sub>S</sub>	—	V <sub>S</sub> = 500V , Ta = 25°C R.H.≤ 60%	1×10 <sup>12</sup>	10 <sup>14</sup>	—	Ω

### 3.9 Η γλώσσα προγραμματισμού BASCOM AVR

Η Bascom AVR είναι μια γλώσσα προγραμματισμού και ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) που αναπτύχθηκε από την εταιρεία MCS ELECTRONICS. Η Bascom AVR χρησιμεύει στον προγραμματισμό των μικροελεγκτών της σειράς AVR της Atmel βασισόμενη στην γλώσσα προγραμματισμού BASIC λόγω της απλότητάς της και της δυνατότητάς της, για εντολές υψηλού επιπέδου που επιτρέπουν την εύκολη και κατανοητή διαχείριση των περιφερειακών και των πόρων του μικροελεγκτή.

Όπως αναφέρεται παραπάνω, η γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR χρησιμοποιεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE), που αποτελείται από διάφορα εργαλεία με σκοπό την διευκόλυνση του προγραμματισμού και την αποσφαλμάτωση του κώδικα. Περιλαμβάνει έναν επεξεργαστή κειμένου με χαρακτηριστικά όπως χρωματισμό σύνταξης και αυτόματη συμπλήρωση κώδικα, που βοηθούν στην αποφυγή σφαλμάτων και βελτιώνουν την παραγωγικότητα.

Κατά την ολοκλήρωση του κώδικα, το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) δίνει την δυνατότητα για την προσομοίωση του κώδικα ώστε δοκιμαστεί και εάν απαιτείται να τροποποιηθεί, παρέχοντας έτσι μεγάλη ευελιξία στους προγραμματιστές και χαμηλό κόστος ανάπτυξης.

#### 3.9.1 Η εντολή Config στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR

Με την εντολή Config, ο προγραμματιστής μπορεί να διαμορφώσει και να ρυθμίσει διάφορα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή και των περιφερειακών του συστημάτων. Ουσιαστικά με αυτήν την εντολή μπορούμε να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους λειτουργίας των παρακάτω:

1. Θύρες εισόδου και εξόδου
2. Χρονοδιακόπτες
3. Ενσωματωμένες μονάδες του μικροελεγκτή
4. Σειριακές διεπαφές

Η σύνταξη της εντολής Config μπορεί να διαφέρει ανά περίπτωση. Όμως ο γενικός τύπος της είναι:

**CONFIG στοιχείο = τιμή [, στοιχείο = τιμή ...]**

Για παράδειγμα εάν έχουμε έναν μικροελεγκτή, στον οποίο θέλουμε να ορίσουμε ότι όλα τα Pin της θύρας B είναι Output τότε ο κώδικας προγραμματισμού διαμορφώνεται ως εξής:

**CONFIG PORTD = OUTPUT ‘ Ορίζουμε όλες τα Pin της θύρας D ως εξόδους**

Εάν όμως δεν θέλουμε να ορίσουμε όλα τα Pin σαν εξόδους άλλα κάποια από αυτά, τότε ο κώδικας προγραμματισμού μπορεί να διαμορφωθεί ως εξής:



### **CONFIG PORTD.1 = OUTPUT ‘ Ορίζουμε το Port 1 της θύρας D ως έξοδο**

Αξίζει να σημειώσουμε ότι τόσο η σύνταξη της εντολής προγραμματισμού όσο και η διαθεσιμότητα της επιλογής αυτής, μπορεί να διαφέρει ανά μικροελεγκτή ανάλογα με τις δυνατότητες και τις προδιαγραφές του συγκεκριμένου μικροελεγκτή.

### **3.9.2 Η εντολή Alias στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR**

Η αναγνωσιμότητα και η εύκολη κατανόηση ενός κώδικα θεωρούνται ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να διέπουν έναν κώδικα προγραμματισμού. Με την εφαρμογή των παραπάνω ο προγραμματιστής έχει την δυνατότητα για πιο εύκολη συντήρηση, αποφυγή λαθών και πιο γρήγορη και αποτελεσματική τροποποίηση του προγράμματος όταν απαιτηθεί. Για να μπορέσουμε όμως να επιτύχουμε τα παραπάνω, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την εντολή Alias, που μας δίνει την δυνατότητα να ορίζουμε ψευδώνυμα σε συγκεκριμένες θύρες, μεταβλητές και Pin. Ο γενικός τύπος της εντολής αυτής είναι:

#### **παλαιό\_όνομα ALIAS νέο\_όνομα**

Με το παλαιό\_όνομα ορίζουμε το αρχικό όνομα ή αναγνωριστικό που έχει δοθεί σε ένα στοιχείο, όπως μια θύρα ή μεταβλητή ενώ με το νέο\_όνομα ορίζουμε το ψευδώνυμο που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε για το στοιχείο αυτό στο υπόλοιπο του προγράμματος.

Για παράδειγμα εάν θέλουμε να ορίσουμε το PortC.1 και το PortD.6 ως εξόδους και την μια από αυτές τις εξόδους να την ορίσουμε για την ενεργοποίηση του ρελέ 1 και την άλλη έξοδο για την ενεργοποίηση του Πράσινου Led τότε ο συνολικός κώδικας σε συνδυασμό με τις εντολές Config και Alias θα διαμορφωθεί ως εξής:

**CONFIG PORTC.1 = OUTPUT ‘ Ορίζουμε το Port 1 της θύρας C ως έξοδο**

**CONFIG PORTD.6 = OUTPUT ‘ Ορίζουμε το Port 6 της θύρας D ως έξοδο**

**PORTC.1 ALIAS Relay1 ‘Θέτουμε το ψευδώνυμο Relay1 για το Port 1 της θύρας C**

**PORTD.6 ALIAS Greenled ‘Θέτουμε το ψευδώνυμο Greenled για το Port 6 της θύρας D**

### **3.9.3 Η εντολή Set, Reset & Waitms στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR**

Με την εντολή Set και Reset δίνεται η δυνατότητα στον προγραμματιστή να αλλάζει κατάσταση σε ένα ρελέ ή σε ένα Pin εισόδου/εξόδου. Κατά την εφαρμογή της εντολής Set στον κώδικα προγραμματισμού αλλάζουμε την κατάσταση ενός Port σε “υψηλή” κατάσταση, δηλαδή ενεργοποιούμε “ανάβουμε” μια έξοδο που μπορεί να είναι συνδεδεμένο ένα Led. Ο γενικός τύπος της εντολής αυτής είναι:

**SET PORTC.1 ‘Ενεργοποιούμε το Port 1 της θύρας C**

Στην περίπτωση που προηγουμένως έχουμε χρησιμοποιήσει την εντολή Alias και έχουμε ορίσει στην συγκεκριμένη θύρα ένα ψευδώνυμο, τότε ο τύπος της εντολής για το παράδειγμα στο κεφάλαιο 5.2 παίρνει την μορφή:

### **SET Relay1 Ένεργοποιούμε το Port 1 της θύρας C που έχει το ψευδώνυμο Relay1**

Κατά την εφαρμογή της εντολής Reset στον κώδικα προγραμματισμού αλλάζουμε την κατάσταση ενός Port σε “χαμηλή” κατάσταση, δηλαδή απενεργοποιούμε “σβήνουμε” μια έξοδο που μπορεί να είναι συνδεδεμένο ένα Led. Ο γενικός τύπος της εντολής αυτής είναι:

### **RESET PORTD.6 ‘Απενεργοποιούμε το Port 6 της θύρας D**

Στην περίπτωση που προηγουμένως έχουμε χρησιμοποιήσει την εντολή Alias και έχουμε ορίσει στην συγκεκριμένη θύρα ένα ψευδώνυμο, τότε ο τύπος της εντολής για το παράδειγμα στο κεφάλαιο 5.2 παίρνει την μορφή:

### **RESET Greenled ‘Απενεργοποιούμε το Port 6 της θύρας D που έχει το ψευδώνυμο Greenled**

Στην περίπτωση που θέλουμε να καθυστερήσουμε την εκτέλεση μιας εντολής του προγράμματος για έναν καθορισμένο αριθμό χιλιοστών του δευτερολέπτου τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εντολή Waitms. Αυτή η εντολή είναι χρήσιμη όταν χρειάζεται να περιμένουμε για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πριν συνεχίσουμε με την επόμενη ενέργεια ή όταν θέλουμε να δημιουργήσουμε χρονοκαυστήρηση στον κώδικα μας, όπως για το φλας ενός LED ή την αναμονή για μια κατάσταση ενός αισθητήρα. Ο γενικός τύπος της εντολής αυτής είναι:

### **WAITMS χρόνος**

Για παράδειγμα εάν θέλουμε να συνδέσουμε ένα πράσινο Led στο Port 6 της θύρας D, το οποίο θέλουμε να το ανάψουμε για 10 δευτερόλεπτα και μετά να το σβήσουμε, ο κώδικας λαμβάνοντας υπόψιν και όλες τις παραπάνω εντολές παίρνει την εξής μορφή:

### **CONFIG PORTD.6 = OUTPUT ‘ Ορίζουμε το Port 6 της θύρας D ως έξοδο**

### **PORTD.6 ALIAS Greenled ‘Θέτουμε το ψευδώνυμο Greenled για το Port 6 της θύρας D**

### **SET Greenled Ένεργοποιούμε το Port 6 της θύρας D που έχει το ψευδώνυμο Greenled, ουσιαστικά ανάβουμε το Led**

### **WAITMS 10000 ‘Ορίζουμε μια χρονοκαυστήρηση 10 δευτερολέπτων μέχρι να πάει στην επόμενη εντολή**

### **RESET Greenled ‘Απενεργοποιούμε το Port 6 της θύρας D που έχει το ψευδώνυμο Greenled, ουσιαστικά σβήνουμε το Led**

### 3.9.4 Η εντολή Dim στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR

Μια πολύ σημαντική εντολή που μας δίνει την δυνατότητα να διαχειριζόμαστε την μνήμη και να καθορίζουμε τον τύπο δεδομένων της κάθε μεταβλητής είναι η εντολή προγραμματισμού Dim. Με την εντολή αυτή μπορούμε να ορίσουμε το μέγεθος και τον τύπο των μεταβλητών του προγράμματος.

Οι βασικότεροι τύποι δεδομένων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι:

1. Το Byte δηλαδή ένας μικρός ακέραιος αριθμός από το 0 έως το 255
2. Το Integer δηλαδή ένας ακέραιος αριθμός είτε θετικός είτε αρνητικός
3. Το Word δηλαδή διπλής ακρίβειας ακέραιος αριθμός
4. Το String δηλαδή αλφαριθμητική συμβολοσειρά
5. Το Long δηλαδή μεγαλύτερος ακέραιος αριθμός (32 bit)

Ο γενικός τύπος της εντολής αυτής είναι:

**DIM όνομα\_μεταβλητής AS τύπος\_δεδομένων [διάσταση1 [, διάσταση2, ...]]**

Για παράδειγμα εάν θέλουμε να ορίσουμε μια μεταβλητή Z1 σαν έναν μικρό ακέραιο αριθμός από το 0 έως το 255, τότε ο κώδικας παίρνει την εξής μορφή:

**DIM Z1 As Byte**

### 3.9.5 Η εντολή Do-Loop στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR

Ο συνδυασμός των δύο εντολών προγραμματισμού Do και Loop, χρησιμεύει στην δημιουργία ενός βρόχου επανάληψης που εκτελείται μέχρι να ικανοποιηθεί μια συνθήκη ή μέχρι την χρησιμοποίηση μιας εντολής εξόδου από τον βρόχο. Ο γενικός τύπος της εντολής αυτής είναι:

**DO**

‘ Εντολές προς εκτέλεση

**LOOP**

Η εντολή Do-Loop μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους, με την διαφορά σε κάθε περίπτωση να είναι ο τρόπος όπου σταματάει η επαναληψιμότητα των εντολών που βρίσκονται εντός της εντολής Do-Loop. Οι πιο σύνηθες τρόποι για τον έλεγχο της επανάληψης είναι:

1. Απλός Βρόχος (Infinite Loop): Συνεχίζει να επαναλαμβάνεται επ’ άπειρον. Συνήθως την χρησιμοποιούμε με την εντολή EXIT DO για έξοδο από τον βρόχο υπό ορισμένες συνθήκες. Ο τύπος της εντολής αυτής είναι:

**DO**

‘ Κάποιες εντολές

**IF συνθήκη THEN EXIT DO**

2. DO-LOOP-WHILE: Ο βρόχος συνεχίζεται όσο η συνθήκη είναι αληθής (TRUE). Η συνθήκη ελέγχεται στο τέλος του βρόχου, επομένως οι εντολές εκτελούνται τουλάχιστον μία φορά. Ο τύπος της εντολής αυτής είναι:

**DO**

‘ Εντολές προς εκτέλεση

**LOOP WHILE συνθήκη**

3. DO WHILE-LOOP: Ο βρόχος εκτελείται μόνο αν η συνθήκη είναι αληθής στην αρχή. Εάν η συνθήκη είναι ψευδής (FALSE), ο βρόχος δεν εκτελείται καθόλου. Ο τύπος της εντολής αυτής είναι:

**DO WHILE συνθήκη**

‘ Εντολές προς εκτέλεση

**LOOP**

4. DO-LOOP UNTIL: Ο βρόχος συνεχίζεται μέχρι η συνθήκη να γίνει αληθής. Η συνθήκη ελέγχεται στο τέλος του βρόχου. Ο τύπος της εντολής αυτής είναι:

**DO**

‘ Εντολές προς εκτέλεση

**LOOP UNTIL συνθήκη**

5. DO UNTIL-LOOP: Ο βρόχος συνεχίζεται μέχρι η συνθήκη να γίνει ψευδής. Η συνθήκη ελέγχεται στην αρχή του βρόχου. Ο τύπος της εντολής αυτής είναι:

**DO UNTIL συνθήκη**

‘ Εντολές προς εκτέλεση

**LOOP**

### 3.9.6 Η εντολή If-Then-Else στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR

Η εντολή If-Then-Else είναι μια βασική δομή ελέγχου ροής που μας επιτρέπει την εκτέλεση διαφορετικών τμημάτων κώδικα βάσει μιας ή περισσότερων συνθηκών. Αυτή η εντολή μας είναι απαραίτητη για τον προγραμματισμό, καθώς μας επιτρέπει να καθορίζουμε ποιες ενέργειες πρέπει να εκτελεστούν όταν πληρούνται ή δεν πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Ο γενικός τύπος της εντολής αυτής είναι:

**IF συνθήκη THEN**

    ‘εντολές

**ELSE**

    ‘εντολές

**END IF**

Ουσιαστικά η δομή της εντολής αυτής αποτελείται από την συνθήκη που είναι μια λογική έκφραση, που είτε θα είναι ψευδής είτε αληθής. Στην περίπτωση που η συνθήκη είναι αληθής θα εκτελεστεί το κομμάτι των εντολών του προγράμματος που βρίσκεται μετά το Then ενώ εάν είναι ψευδείς εκτελείτε το κομμάτι των εντολών του προγράμματος που βρίσκεται μετά το Else. Η ολοκλήρωση της εντολής If-Then-Else γίνεται με την εντολή End If.

Για παράδειγμα εάν σε ένα κώδικα προγραμματισμού θέλουμε να εκτυπώσουμε ένα μήνυμα ανάλογα με την τιμή της θερμοκρασίας που θα του ορίσουμε, ο κώδικας προγραμματισμού ορίζεται ως εξής:

**DIM Temperature AS INTEGER** ‘ Ορίζουμε ότι θα είναι ένας ακέραιος αριθμός είτε θετικός είτε αρνητικός

**Temperature = 25** ‘ Ορίζουμε την τιμή που θα έχει αυτή η μεταβλητή

**IF Temperature > 30 THEN** ‘ Ορίζουμε την συνθήκη που θα ελέγχει το πρόγραμμα

**PRINT “The temperature is too high!”** ‘ Ορίζουμε τι θα εκτυπώνετε σε περίπτωση που η συνθήκη είναι αληθής

**ELSE**

**PRINT “The temperature is normal.”** ‘ Ορίζουμε τι θα εκτυπώνετε σε περίπτωση που η συνθήκη είναι ψευδείς

**END IF**

### **3.9.7 Η εντολή For στη γλώσσα προγραμματισμού Bascom AVR**

Η εντολή For είναι μια εντολή ελέγχου ροής που την χρησιμοποιούμε για την εκτέλεση μιας σειράς εντολών επανειλημμένα σε ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Ουσιαστικά είναι εντολή επανάληψης βάσης ενός μετρητή ή μιας μεταβλητής με την οποία καθιστούμε την διαδικασία επανάληψης πιο αποδοτική και λιγότερο επιρρεπή σε λάθη σε σύγκριση με τη χρήση της εντολής. Ο γενικός τύπος της εντολής αυτής είναι:

**FOR μεταβλητή = αρχική\_τιμή TO τελική\_τιμή [STEP βήμα]**

‘ Εντολές προς εκτέλεση

**NEXT**

Ουσιαστικά η δομή της εντολής αυτής αποτελείται από μια αρχική τιμή που ορίζουμε στην μεταβλητή και μια τελική τιμή που όταν η μεταβλητή φτάσει σε αυτήν την τιμή σταματάει η εντολή For. Κατά την ολοκλήρωση των εντολών που έχουν καθοριστεί για εκτέλεση μέσα στην εντολή For, τότε η μεταβλητή μεταβάλλεται αναλόγως με το Step που του έχουμε ορίσει. Εάν δεν έχουμε ορίσει κανένα Step, τότε η μεταβλητή μεταβάλλεται σαν προεπιλογή κατά 1.

Για παράδειγμα εάν έχουμε μια μεταβλητή η οποία θέλουμε να μεταβάλλεται κατά το ήμισυ της μεταβλητής που έχουμε ορίσει στην εντολή For, ο κώδικας προγραμματισμού ορίζεται ως εξής:

**DIM Z1 AS INTEGER ‘ Ορίζουμε ότι θα είναι ένας ακέραιος αριθμός είτε θετικός είτε αρνητικός**

**DIM i AS INTEGER ‘ Ορίζουμε ότι θα είναι ένας ακέραιος αριθμός είτε θετικός είτε αρνητικός**

**FOR i = 1 TO 10**

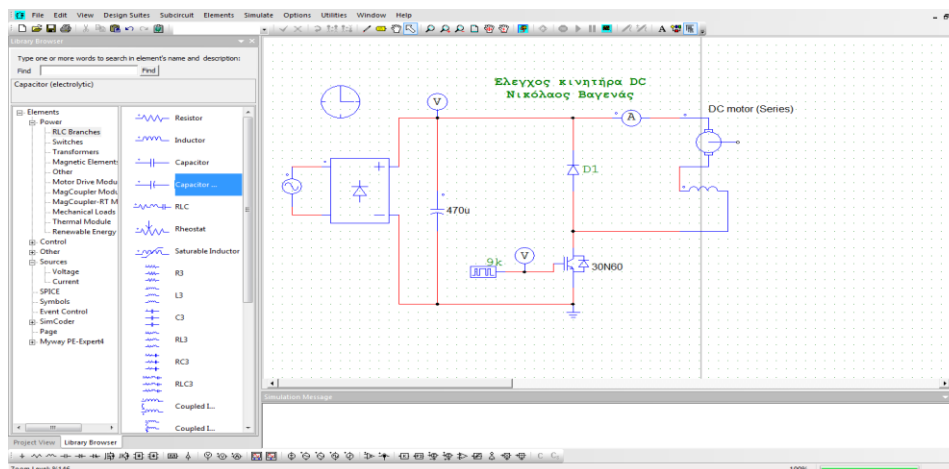
**Z1=Z1+(i/2) ‘ Η μεταβλητή Z1 μεταβάλλεται κατά το ήμισυ της μεταβλητής i**

**PRINT i**

**NEXT**

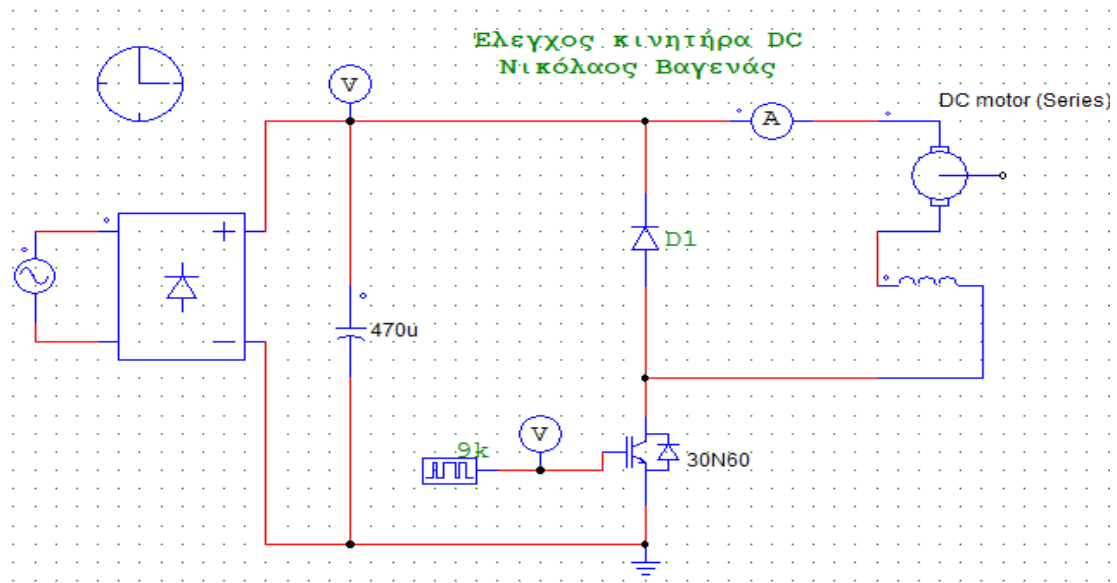
**3.10 Το πρόγραμμα προσομοίωσης του κυκλώματος ισχύος**

Για τη θεωρητική επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα προσομοίωσης PSIM (έκδοση 11.0.3), της εταιρίας Powersim.



**Εικόνα 46 Περιβάλλον προγράμματος PSIM**

Για να είναι δυνατή η προσομοίωση του συστήματος, έπρεπε να σχεδιάσουμε το κύκλωμα ισχύος με όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα και μετρητικά όργανα.

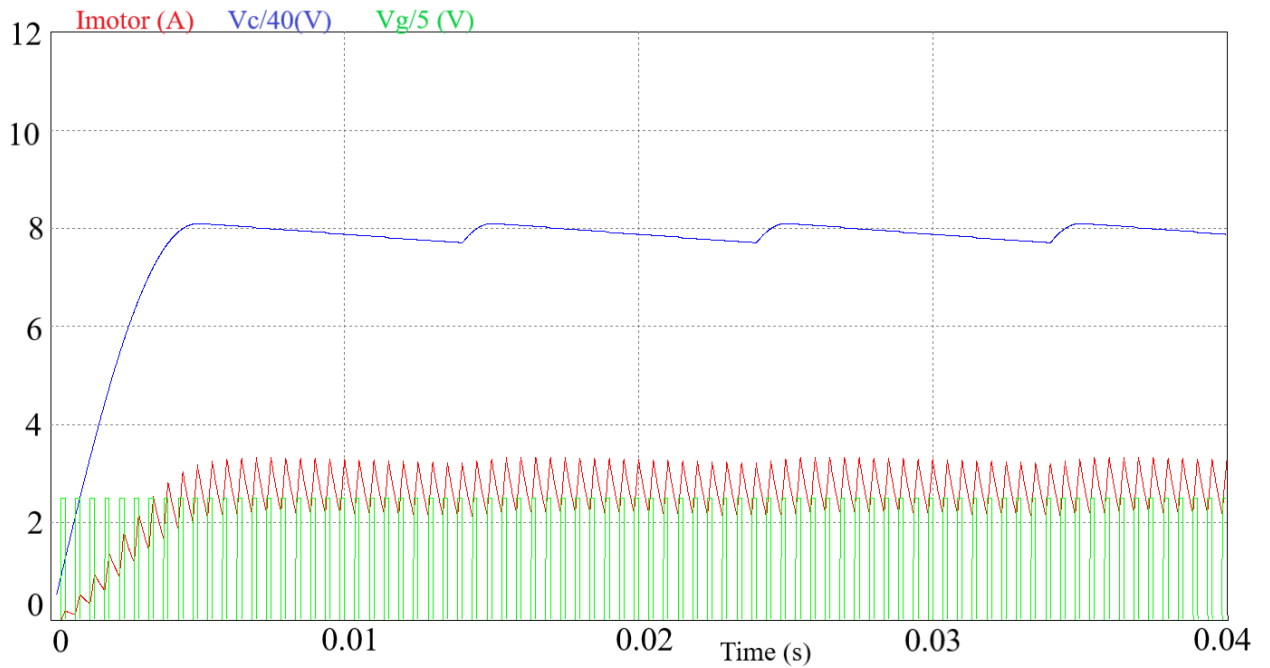


**Εικόνα 47 Το κύκλωμα ισχύος που σχεδιάσαμε στο πρόγραμμα προσομοίωσης**

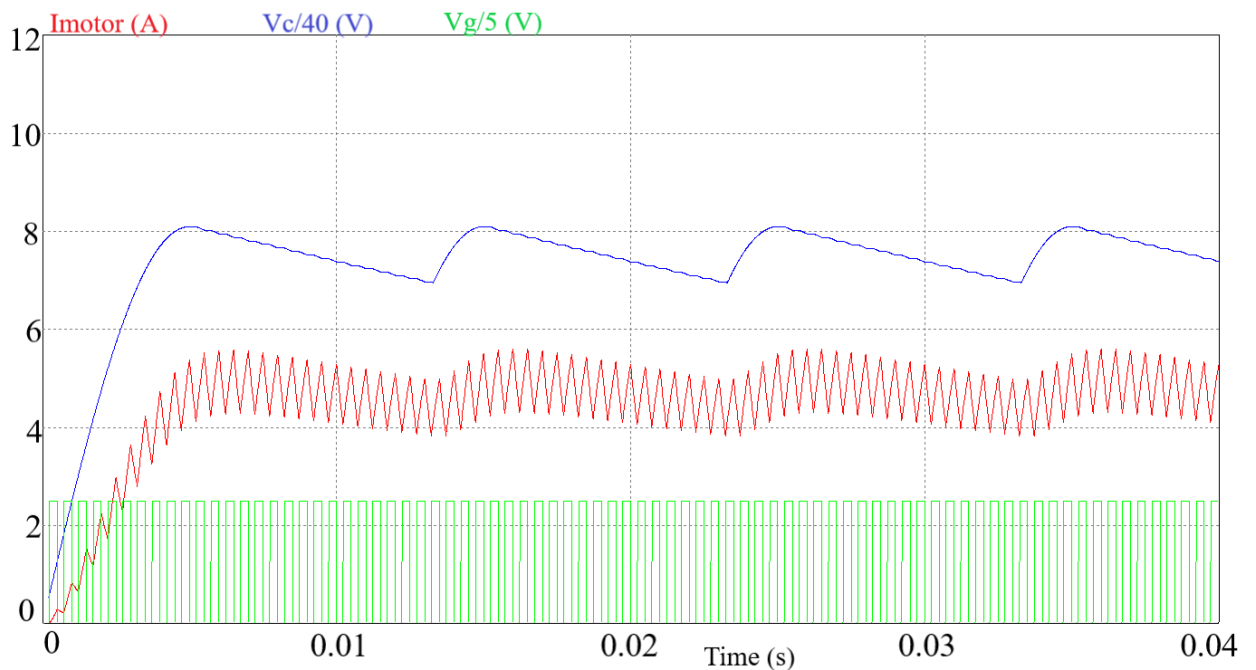
Στην παραπάνω προσομοίωση τα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήσαμε είναι τα παρακάτω:

1. Probe τάσης για την απεικόνιση της τάσης του πυκνωτή εξομάλυνσης
2. Probe τάσης για την απεικόνιση της τάσης της πύλης του IGBT
3. Probe ρεύματος για την απεικόνιση του ρεύματος του κινητήρα

Παρακάτω απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις που εξάγαμε από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις η τάση στα άκρα του πυκνωτή εξομάλυνσης απεικονίζεται με μπλε χρώμα, η τάση στα άκρα της πύλης του IGBT απεικονίζεται με πράσινο χρώμα και το ρεύμα του κινητήρα απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα.

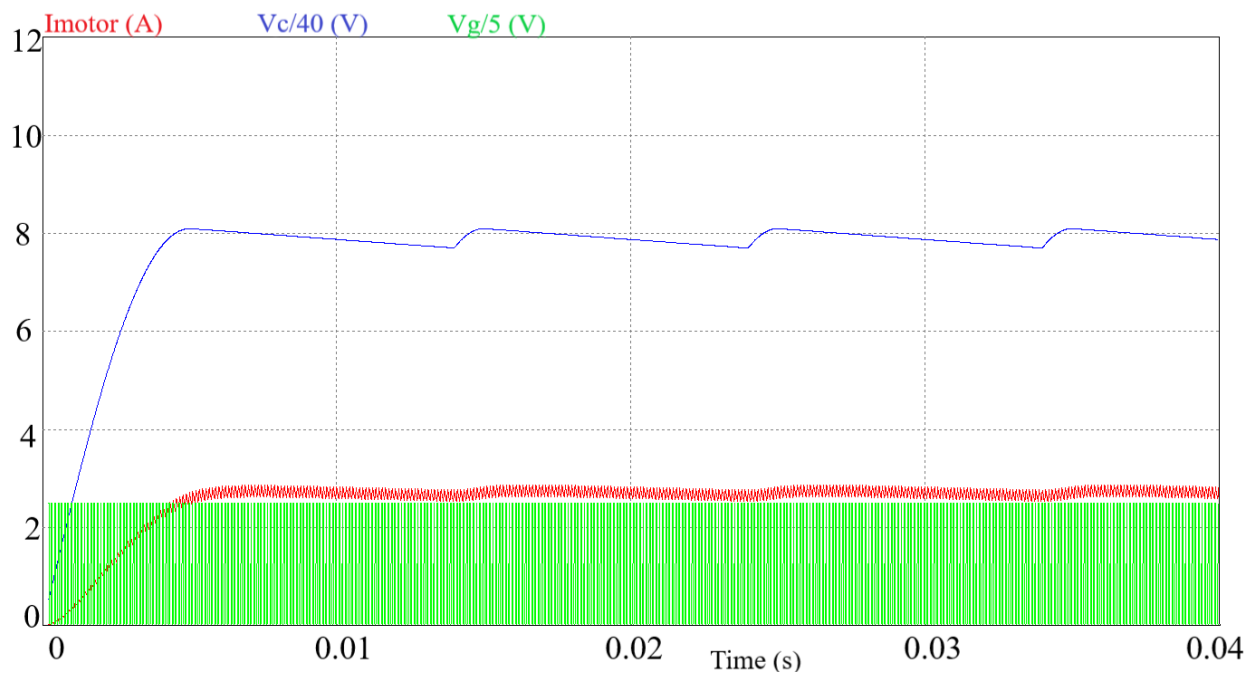


**Εικόνα 48 Προσομοίωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος με διακοπτική συχνότητα 2 kHz και duty cycle 25%**

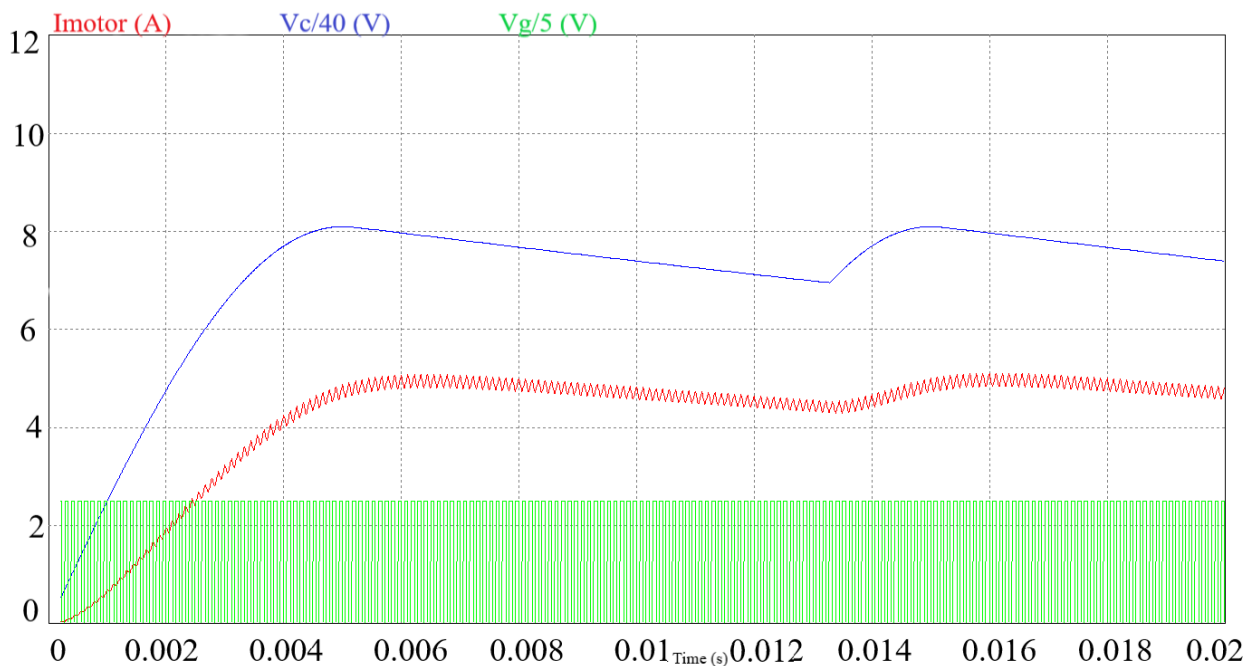


**Εικόνα 49 Προσομοίωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος με διακοπτική συχνότητα 2 kHz και duty cycle 55%**





**Εικόνα 50 Προσομοίωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος με διακοπτική συχνότητα 9 kHz και duty cycle 25%**



**Εικόνα 51 Προσομοίωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος με διακοπτική συχνότητα 9 kHz και duty cycle 55%**

Για να αποφασίσουμε την διακοπτική συχνότητα λειτουργίας του ημιαγωγού ισχύος (IGBT), πραγματοποιήσαμε προσομοίωση με δυο διαφορετικές διακοπτικές συχνότητες (2 kHz και 9 kHz). Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις συμπεραίνουμε ότι για την λειτουργία του συστήματος ελέγχου στην διακοπτική συχνότητα των 9 kHz, το ρεύμα του κινητήρα έχει πολύ μικρότερη

διακύμανση σε σχέση με το ρεύμα του κινητήρα για την λειτουργία του συστήματος ελέγχου στην διακοπτική συχνότητα των 2 kHz, με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερη παραμόρφωση ρεύματος και μικρότερη κυμάτωση ροπής του κινητήρα. Συνεπώς αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε σαν διακοπτική συχνότητα τα 9 kHz.

### 3.11 Το πρόγραμμα του μικροελεγκτή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόγραμμα του μικροελεγκτή.

```
1  $prog &HFC , &HC7 , &HD9 , &HFC                                     'Locked, OSC 18.432MHz, SPI
                                     ENABLED, BOD 4.3V, CLK OUTPUT DISABLED
2
3  $regfile = "m328Pdef.dat"
4  $crystal = 18432000
5  $hwstack = 32
6  $swstack = 8
7  $framesize = 50
8
9
10 Config PORTD.6 = Output : Reset PORTD.6
11 Config PORTD.2 = Output : Reset PORTD.2"
12 Config PORTB.5 = Output : Set PORTB.5
13 Config PORTD.3 = Output
14 Config PORTD.4 = Output
15 Config PORTC.3 = Output
16 Config PORTC.1 = Output
17 Config PORTC.4 = Output
18
19 Config PORTC.2 = Input
20
```

- 21 **Config PORTD.7 = Input**
- 22 **Config PORTB.0 = Input**
- 23 **Config PORTB.2 = Input**
- 24 **Config PORTB.1 = Input**
- 25 **Config PORTB.4 = Input**
- 26 **Config PORTB.3 = Input**
- 27
- 28
- 29 **Relay1 Alias PORTD.2**
- 30 **Relay2 Alias PORTD.3**
- 31 **Relay3 Alias PORTD.4**
- 32 **Greenled Alias PORTC.3**
- 33 **Redled Alias PORTC.1**
- 34 **Buzzer Alias PORTC.4**
- 35 **Opto Alias PORTB.5**
- 36
- 37 **Safety Alias PINC.2**
- 38
- 39 **Bstart Alias PIND.7**
- 40 **Bstop Alias PINB.0**
- 41 **Bspup Alias PINB.2**
- 42 **Bspdown Alias PINB.1**
- 43 **Bleft Alias PINB.4**
- 44 **Bright Alias PINB.3**
- 45
- 46
- 47 **Set Opto**

```
48  Reset Relay1
49  Reset Relay2
50  Reset Relay3
51  Reset Greenled
52  Reset Redled
53  Reset Buzzer
54
55
56  *****
57  '// Initial TIMER0 Fast PWM
58  '// Fast PWM Frequency = fclk / (N * 256), Where N is the Prescaler
59  TCCR0A = &B1000011 ;// Fast PWM 8 Bit, Clear
   OCA0 on Compare Match, Set on TOP
60  TCCR0B = &B0000010 ;// Used 8 Prescaler
61  TCNT0 = 0 ;// Reset TCNT0
62  PWMA = 0
63  'Fc=9KHz
64  *****
65
66  Enable Interrupts
67
68  Config Watchdog = 8192 'config to 8s
69  Start Watchdog 'CONFIG WATCHDOG will disable
   the WD so start it
70  Reset Watchdog
71
72  Dim Z1 As Byte , Z2 As Byte , Z3 As Byte , Z4 As Byte
```

73 **Dim Dc As Byte , Dcmin As Byte , Dcmax As Byte**

74 **Dc = 0 : Dcmin = 5 : Dcmax = 80**

75

76

77 **\*\*\*\*\***

78 **Reset Watchdog**

79 **Waitms 500**

80 **Set Greenled**

81 **Set Redled**

82 **Set Buzzer**

83 **Waitms 1500**

84 **Reset Greenled**

85 **Reset Redled**

86 **Reset Buzzer**

87

88 **Wait 1**

89

90 **For Z1 = 1 To 28**

91 **Set Redled**

92 **Waitms 250**

93 **Reset Redled**

94 **Waitms 250**

95 **Reset Watchdog**

96 **Next**

97

98 **Set Buzzer**

99 **Set Relay1**

```
100 Waitms 100
101 Reset Buzzer
102
103 Reset Relay2
104 Set Relay3
105
106
107 200:
108
109 Z1 = 0
110 Do
111   Incr Z1
112
113   If Z1 > 25 Then
114     Z1 = 0
115     Toggle Greenled
116   End If
117
118   Z2 = Bstart
119   Z3 = Bleft
120   Z4 = Bright
121   Waitms 10
122   If Z2 = 0 AND Bstart = 0 Then Exit Do
123   If Z3 = 0 AND Bleft = 0 Then Exit Do
124   If Z4 = 0 AND Bright = 0 Then Exit Do
125   Waitms 10
126   Reset Watchdog
```

```
127 Loop  
128  
129 Waitms 20  
130  
131 Reset Greenled  
132  
133 Set Buzzer : Waitms 100 : Reset Buzzer  
134  
135 Do  
136   Z1 = Bstart  
137   Z1 = Z1 + Bleft  
138   Z1 = Z1 + Bright  
139  
140   If Z1 >= 3 Then Exit Do  
141   Waitms 10  
142   Reset Watchdog  
143 Loop  
144  
145  
146 If Z3 = 0 Then  
147   Reset Relay3  
148   Set Relay2  
149   Z2 = 0  
150   Z4 = 0  
151   Goto 200  
152 End If  
153
```

```
154 If Z4 = 0 Then  
155 Reset Relay2  
156 Set Relay3  
157 Z2 = 0  
158 Z3 = 0  
159 Goto 200  
160 End If  
161  
162 If Z2 = 0 Then  
163 Dc = Dcmin  
164 Z3 = 0  
165 Z4 = 0  
166 Else  
167 Goto 200  
168  
169 End If  
170  
171  
172 Set Greenled  
173 PWM0A = Dc  
174 Reset Opto  
175  
176 300:  
177  
178 Do  
179 Z1 = Bstop  
180 Z2 = Bspup
```



```
181   Z3 = Bspdown
182   Waitms 10
183   If Z1 = 0 AND Bstop = 0 Then Exit Do
184   If Z2 = 0 AND Bspup = 0 Then Exit Do
185   If Z3 = 0 AND Bspdown = 0 Then Exit Do
186   Waitms 10
187   If Safety = 1 Then Goto 800
188   Reset Watchdog
189 Loop
190
191 Set Buzzer : Waitms 100 : Reset Buzzer
192
193 If Z1 = 0 Then
194   Dc = 0
195   PWM0A = Dc
196   Set Opto
197   Z2 = 0
198   Z3 = 0
199   Reset Greenled
200   Goto 200
201 End If
202
203 If Z2 = 0 Then
204   If Dc < Dcmax Then Dc = Dc + 5
205   If Dc > Dcmax Then Dc = Dcmax
206   PWM0A = Dc
207   Z1 = 0
```

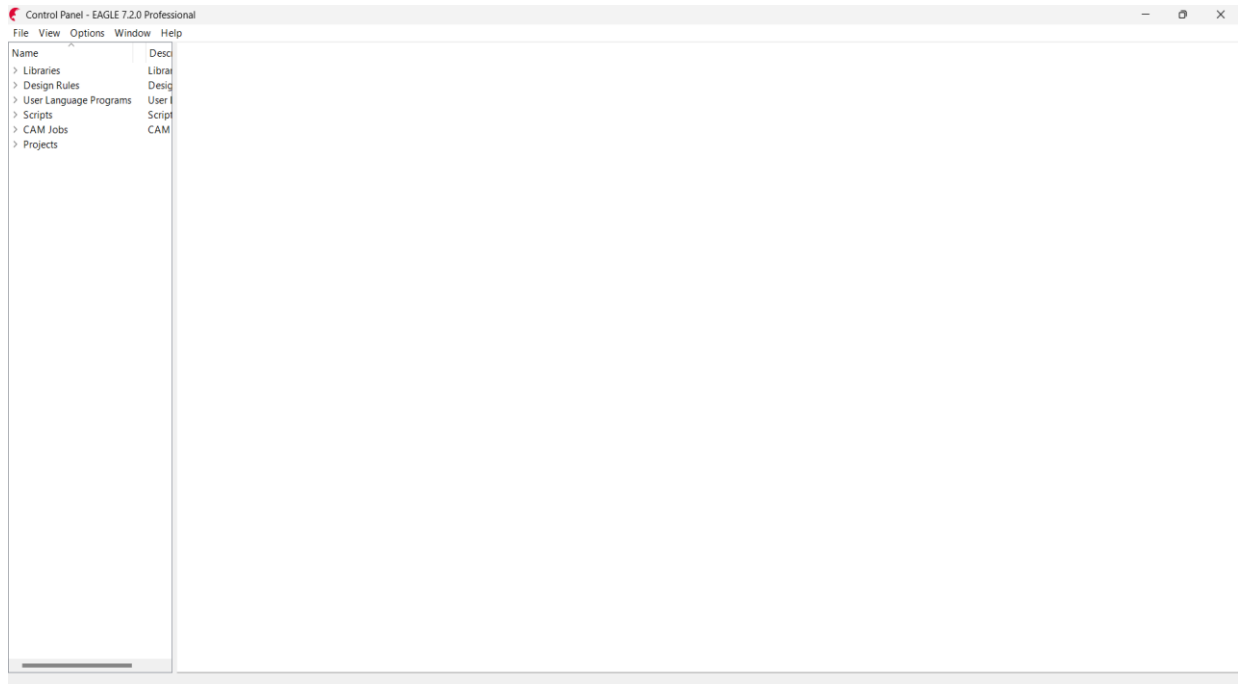
```
208 Z3 = 0
209 Waitms 100
210 Goto 300
211 End If
212
213 If Z3 = 0 Then
214 If Dc > Dcmin Then Dc = Dc - 5
215 If Dc < Dcmin Then Dc = Dcmin
216 PWM0A = Dc
217 Z1 = 0
218 Z2 = 0
219 Waitms 100
220 Goto 300
221 End If
222
223
224
225 800:226
227 PWM0A = 0
228 Set Opto
229 Reset Relay1
230 Reset Relay2
231 Reset Relay3
232 Reset PORTD.6
233
234 Set Buzzer
235 For Z1 = 1 To 6
```

```
236 Set Greenled
237 Set Redled
238 Waitms 500
239 Reset Greenled
240 Reset Redled
241 Waitms 500
242 Reset Watchdog
243 Next
244
245
246 *** Reset ***
247 Config Watchdog = 16
248 Start Watchdog
249 Do : Loop
250 *** Reset ***
251
```

### 3.12 Το πρόγραμμα σχεδίασης τυπωμένων κυκλωμάτων EAGLE

Για τη σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Eagle. Το πρόγραμμα Eagle (Easily Applicable Graphical Layout Editor) είναι ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα για την σχεδίαση πλακετών PCB (Printed Circuit Board). Το πρόγραμμα Eagle αναπτύχθηκε αρχικά από την εταιρεία CadSoft Computer GmbH και στην συνέχεια από την εταιρεία Autodesk.

Κατά την έναρξη του προγράμματος ανοίγει το Control Panel του προγράμματος μέσα από το οποίο έχουμε πρόσβαση στην δημιουργία καινούργιων Project, το άνοιγμα των υπάρχοντων και σε διάφορες άλλες λειτουργίες και ρυθμίσεις.



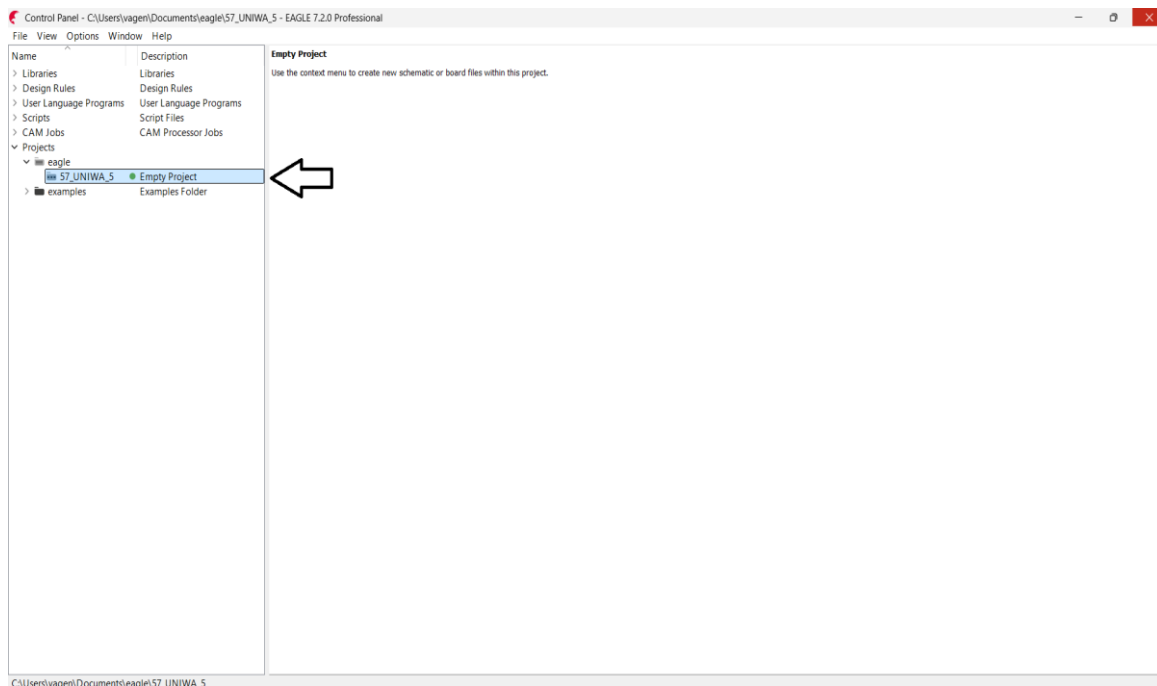
**Εικόνα 52 Το Control Panel του προγράμματος Eagle**

Αφού ανοίξαμε το πρόγραμμα, έπειτα έπρεπε να δημιουργήσουμε ένα καινούργιο Project.



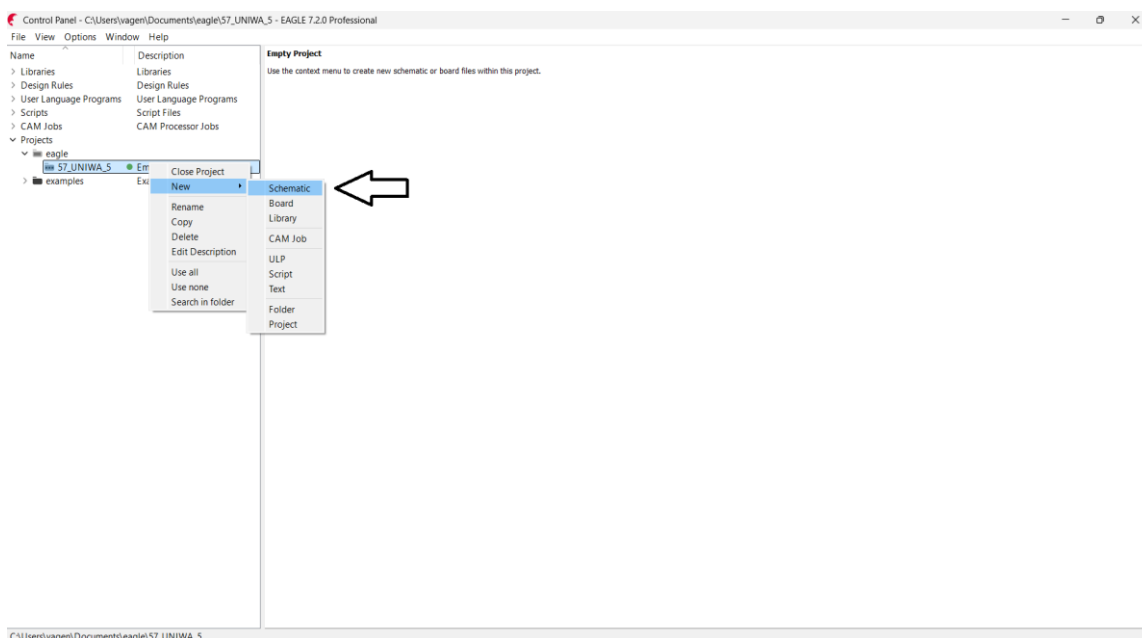
**Εικόνα 53 Άνοιγμα καινούργιου Project**

Έπειτα από την δημιουργία του Project έπρεπε να ονομάσουμε το Project.



**Εικόνα 54 Καταχώρηση του ονόματος του Project**

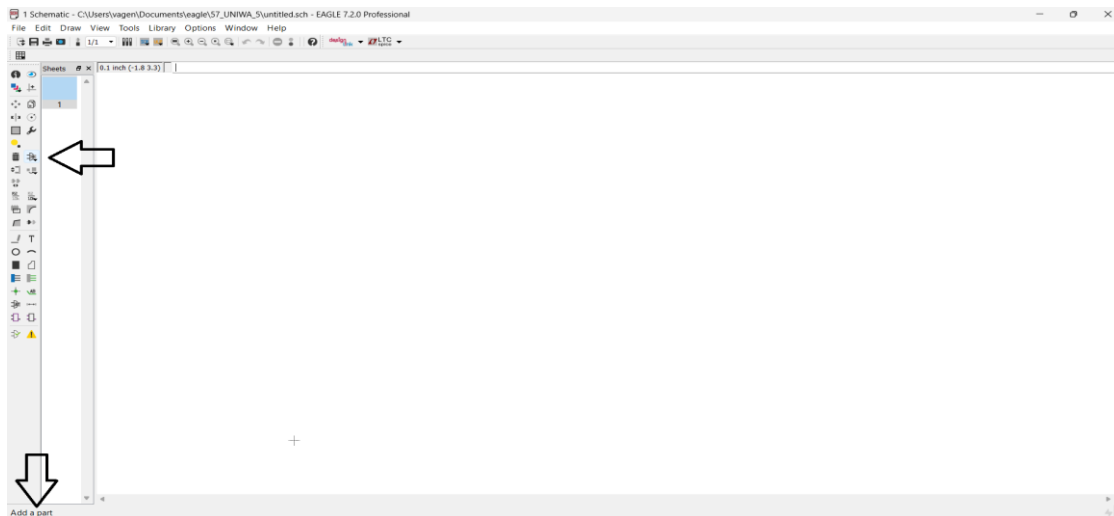
Αφού ολοκληρώσαμε την ονομασία του project έπειτα ανοίξαμε την θεωρητική σχεδίαση του κυκλώματος.



**Εικόνα 55 Άνοιγμα της θεωρητικής σχεδίασης του Project**

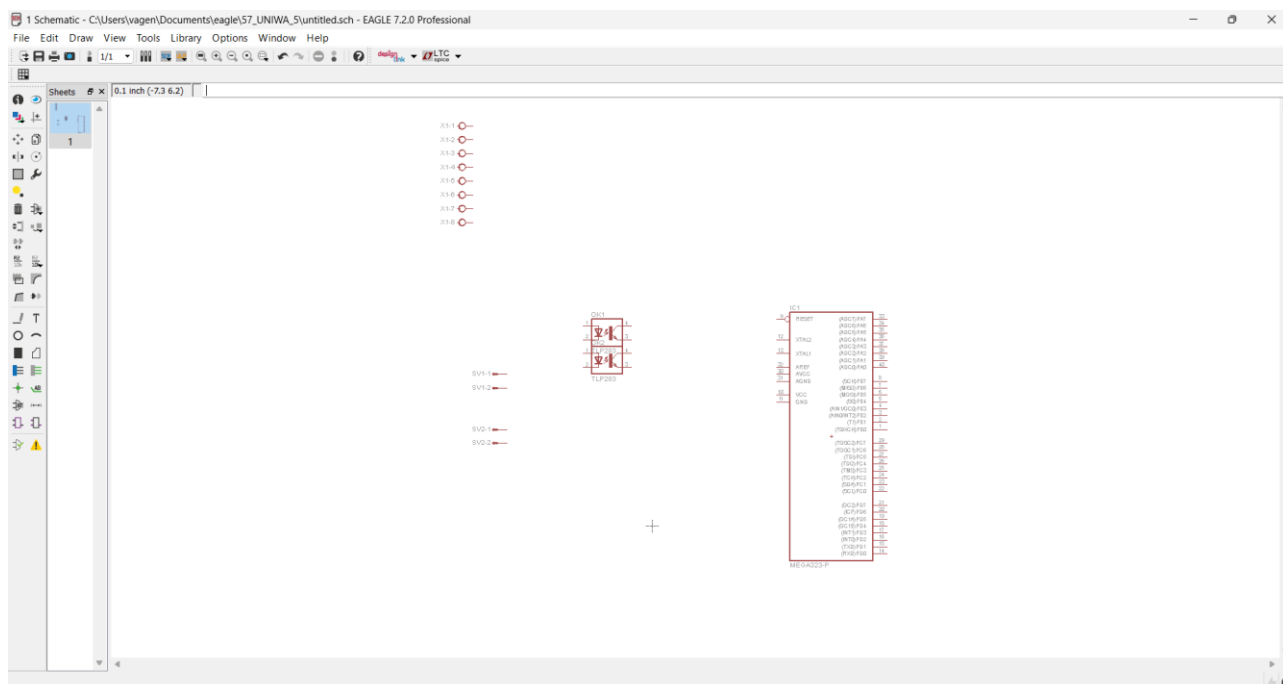
Αφού ανοίξουμε την θεωρητική σχεδίαση του Project μας, έπειτα πρέπει να προσθέσουμε όλα τα υλικά και εξαρτήματα που θα χρησιμοποιήσουμε για την υλοποίηση της πλακέτα μας. Για την

εισαγωγή των παραπάνω πρέπει να πατήσουμε το κουμπί Add πού θα ανοίξει την βιβλιοθήκη ώστε να επιλέξουμε τα υλικά και τα εξαρτήματα που θα χρησιμοποιήσουμε.

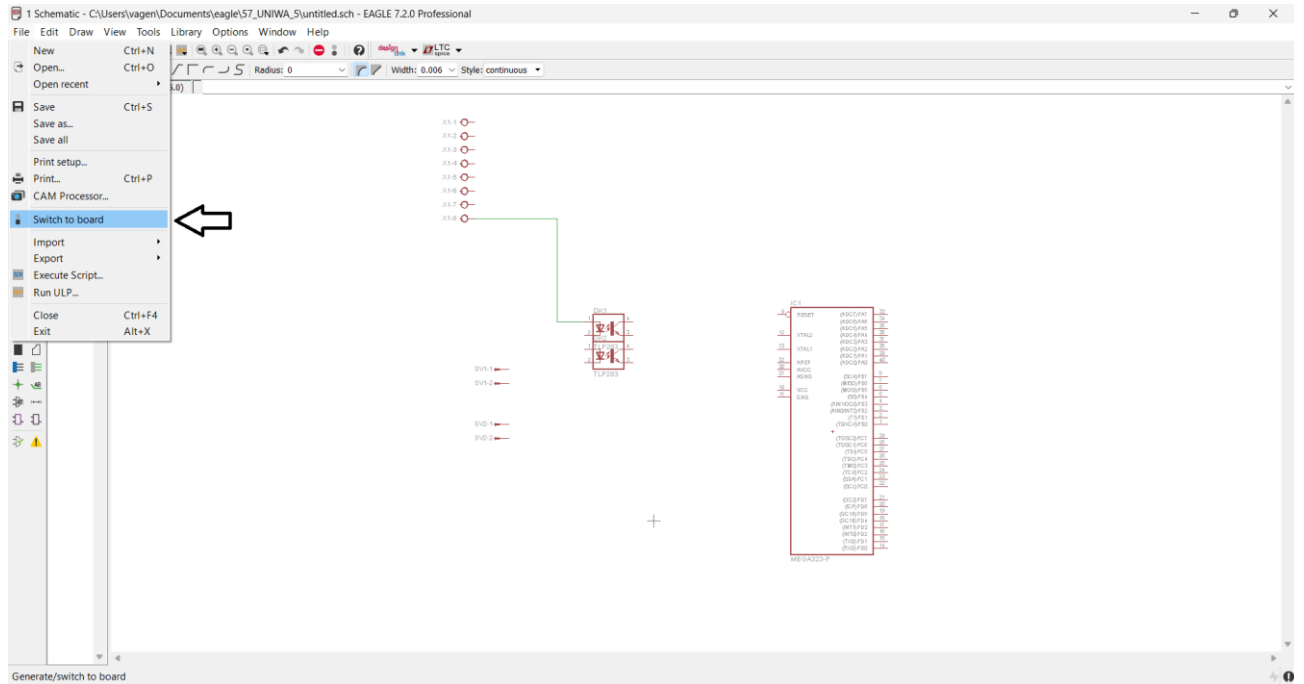


**Εικόνα 56 Άνοιγμα της βιβλιοθήκης υλικών και εξαρτημάτων**

Αφού προσθέσουμε όλα τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε στο πρόγραμμα τότε ανοίγουμε την πρακτική σχεδίαση για την υλοποίηση της πλακέτας.

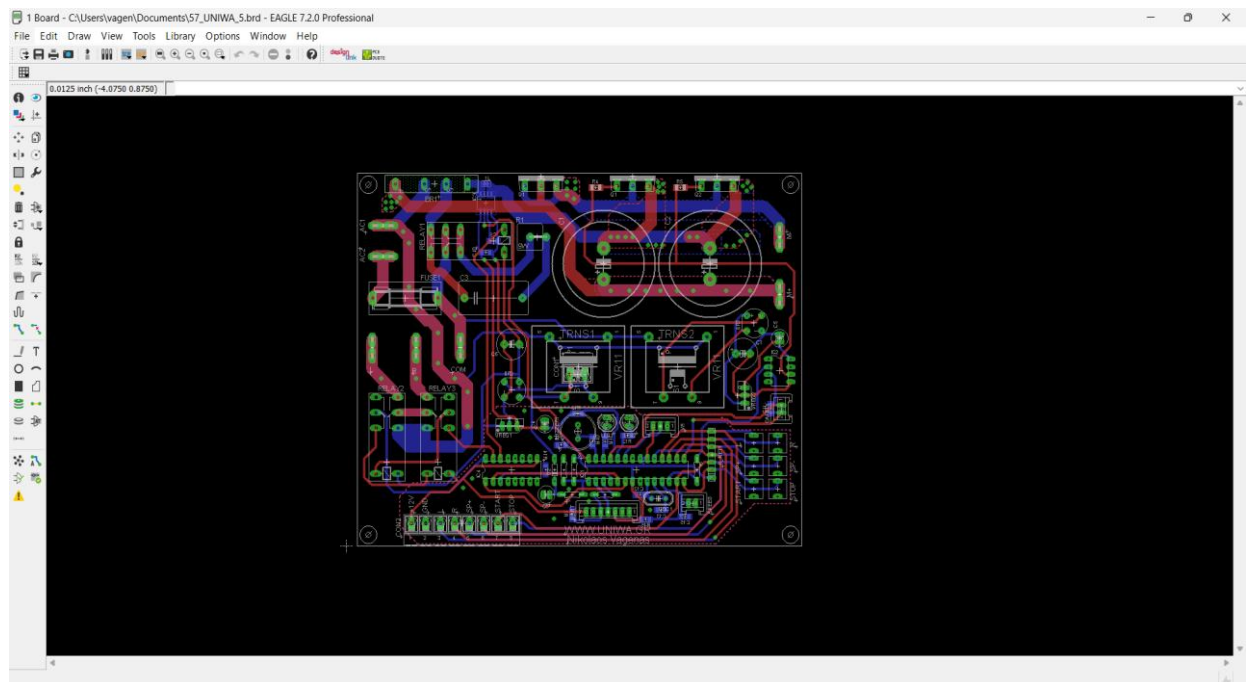


**Εικόνα 57 Εμφάνιση των υλικών και εξαρτημάτων που προσθέσαμε στη θεωρητική σχεδίαση του Project**



**Εικόνα 58** Άνοιγμα της πρακτικής σχεδίασης του Project

Αφού ανοίξουμε την πρακτική σχεδίαση, έπειτα προχωράμε στις μεταξύ τους συνδέσεις των εξαρτημάτων και των υλικών ολοκληρώνοντας έτσι τον σχεδιασμό της πλακέτας.



**Εικόνα 59** Τοποθέτηση των υλικών στην πλακέτα και σύνδεση τους

Αξίζει να σημειώσουμε ότι λόγω του ότι η πλακέτα που χρησιμοποιήσαμε είναι διπλής όψης, έχουμε συνδέσεις και από την πάνω μεριά της πλακέτας και από την κάτω μεριά της πλακέτας. Στην εικόνα 53 οι γραμμές που απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα βρίσκονται στην πάνω μεριά ενώ οι γραμμές που απεικονίζονται με μπλε χρώμα βρίσκονται στην κάτω μεριά.



#### 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Πειραματικό μέρος

Για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του συστήματος ελέγχου του ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος με τη τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών του τμήματος με δύο τύπους φορτίων και διάφορα Duty Cycle. Ο ένας τύπου φορτίου ήταν ωμικό φορτίο (λαμπτήρας πυρακτώσεως) και ο άλλος τύπου φορτίου ήταν ωμικό - επαγωγικό φορτίο (κινητήρας DC).



Εικόνα 60 Εργαστηριακή δοκιμή του συστήματος ελέγχου

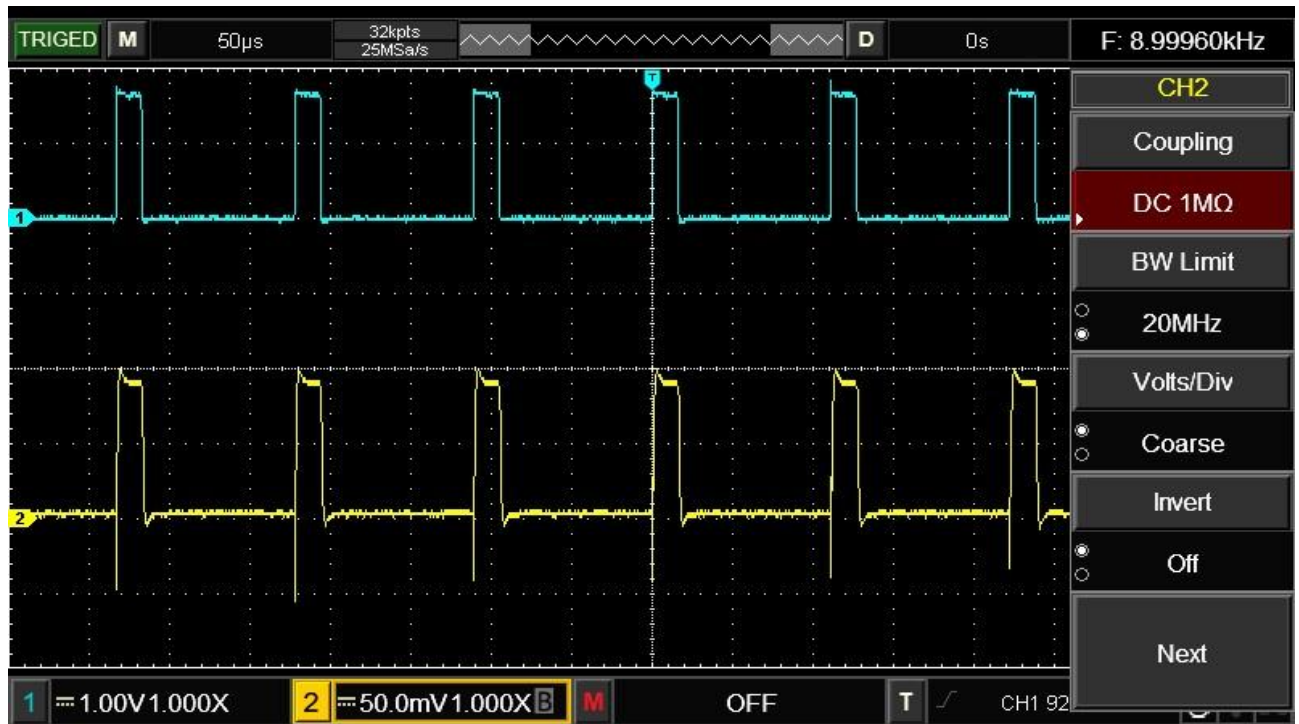


**Εικόνα 61 Εργαστηριακή δοκιμή του συστήματος ελέγχου σε DC κινητήρα**

Οι εργαστηριακές δοκιμές ξεκίνησαν με τον έλεγχο του ωμικού φορτίου. Όπως αναφέραμε παραπάνω το ωμικό φορτίο που χρησιμοποιήσαμε ήταν μια λάμπα πυρακτώσεως. Για την εύκολη κατανόηση και επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του συστήματος ελέγχου, έπρεπε να παρθούν μετρήσεις με τη βοήθεια ενός παλμογράφου για διάφορα Duty Cycle.

Παρακάτω απεικονίζονται οι εικόνες από τον παλμογράφο. Αξίζει να αναφερθεί ότι η γραφική παράσταση μπλέ χρώματος απεικονίζει τη τάση στο φορτίο και η γραφική παράσταση κίτρινου χρώματος απεικονίζει το ρεύμα στο φορτίο.

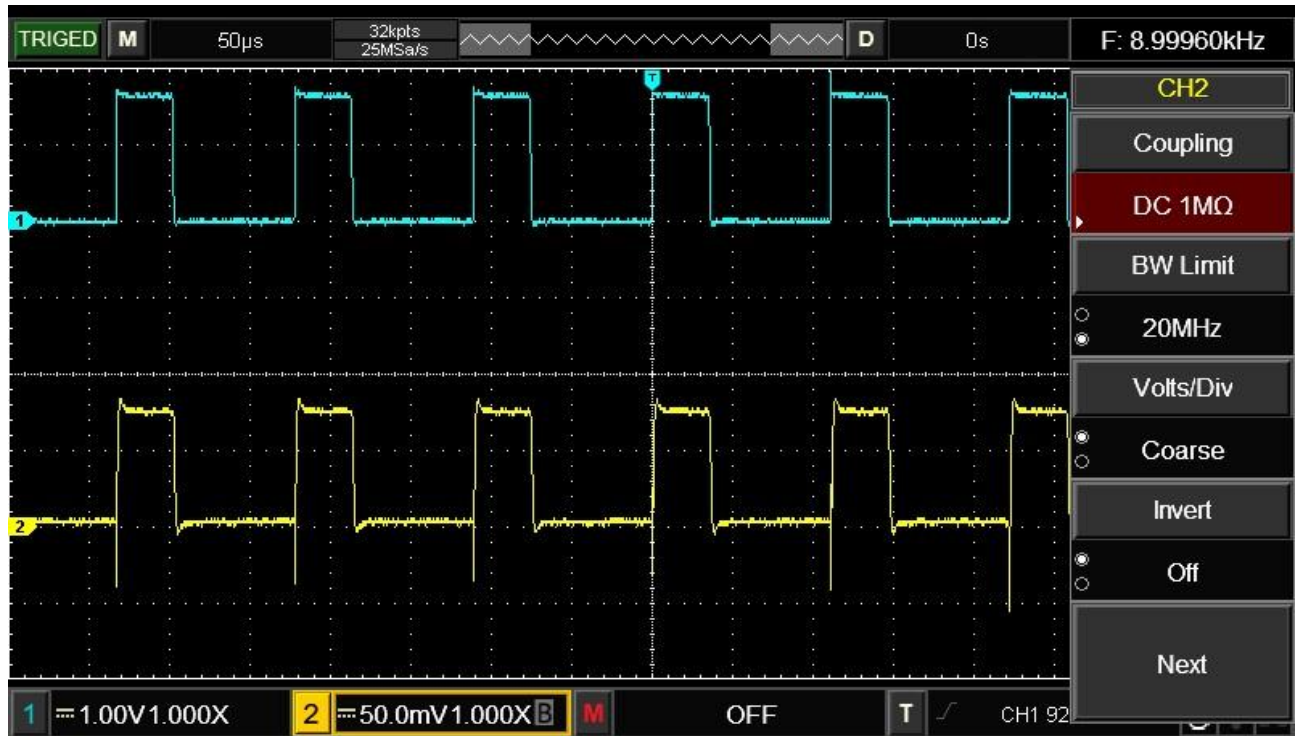
Η τάση λήφθηκε με την χρήση διαφορικού Probe τάσης ενώ το ρεύμα λήφθηκε με την χρήση Probe ρεύματος με αισθητήρα φαινομένου Hall.



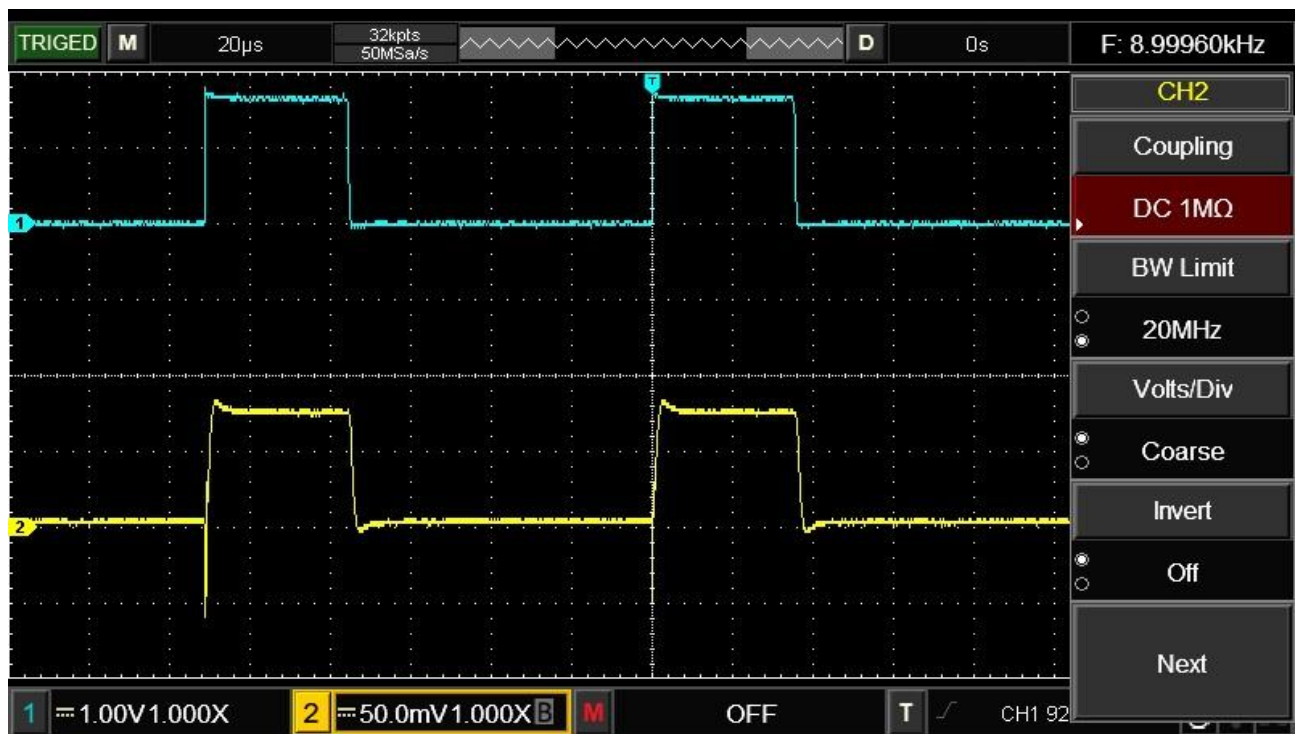
Εικόνα 62 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό φορτίο με duty cycle 16% σε χρόνο 50µs/div



Εικόνα 63 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό φορτίο με duty cycle 16% σε χρόνο 20µs/div



Εικόνα 64 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό φορτίο με duty cycle 35% σε χρόνο 50µs/div



Εικόνα 65 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό φορτίο με duty cycle 35% σε χρόνο 20µs/div

Αναλύοντας τις παραπάνω κυματομορφές από τον παλμογράφο προκύπτουν τα εξής:

Για τις κυματομορφές των εικόνων 9.3 και 9.4 προκύπτει με την χρήση του τύπου 4.18, ότι το Duty Cycle είναι 16%.

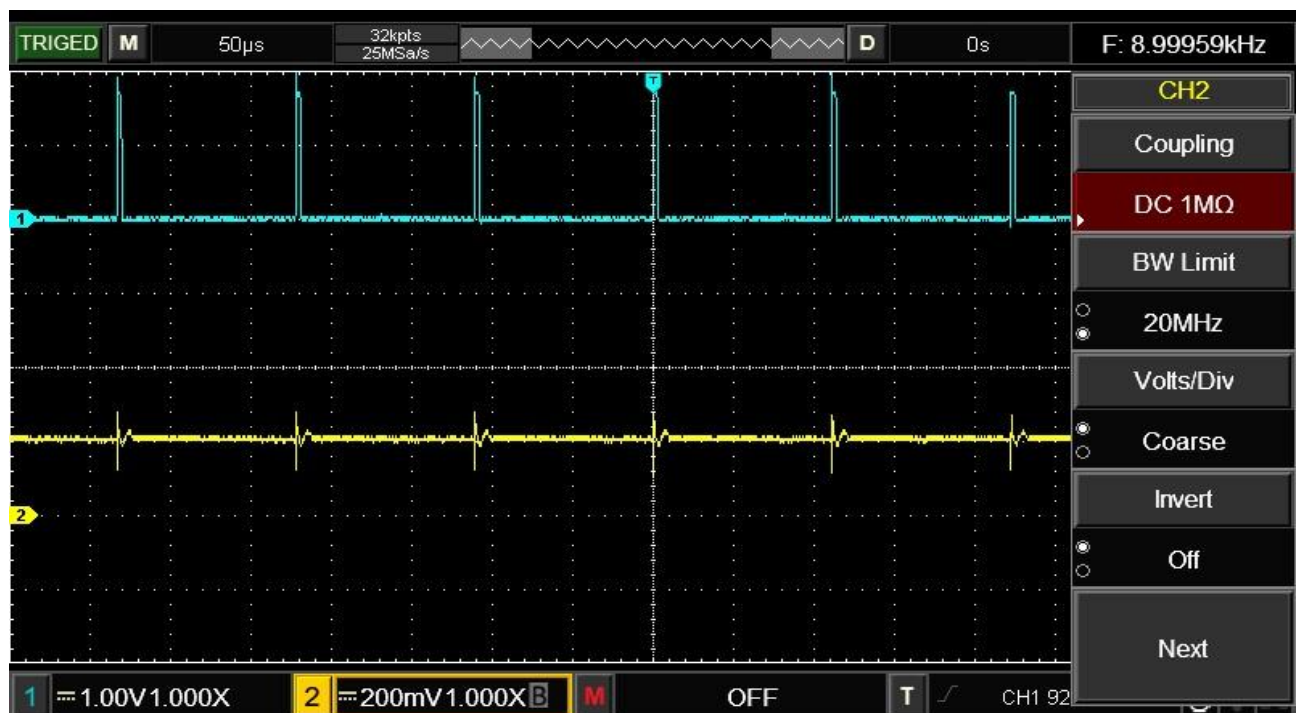
$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{T} * 100\% \quad (4.18)$$

Για τις κυματομορφές των εικόνων 9.5 και 9.6 προκύπτει με την χρήση του τύπου 4.18, ότι το Duty Cycle είναι 35%.

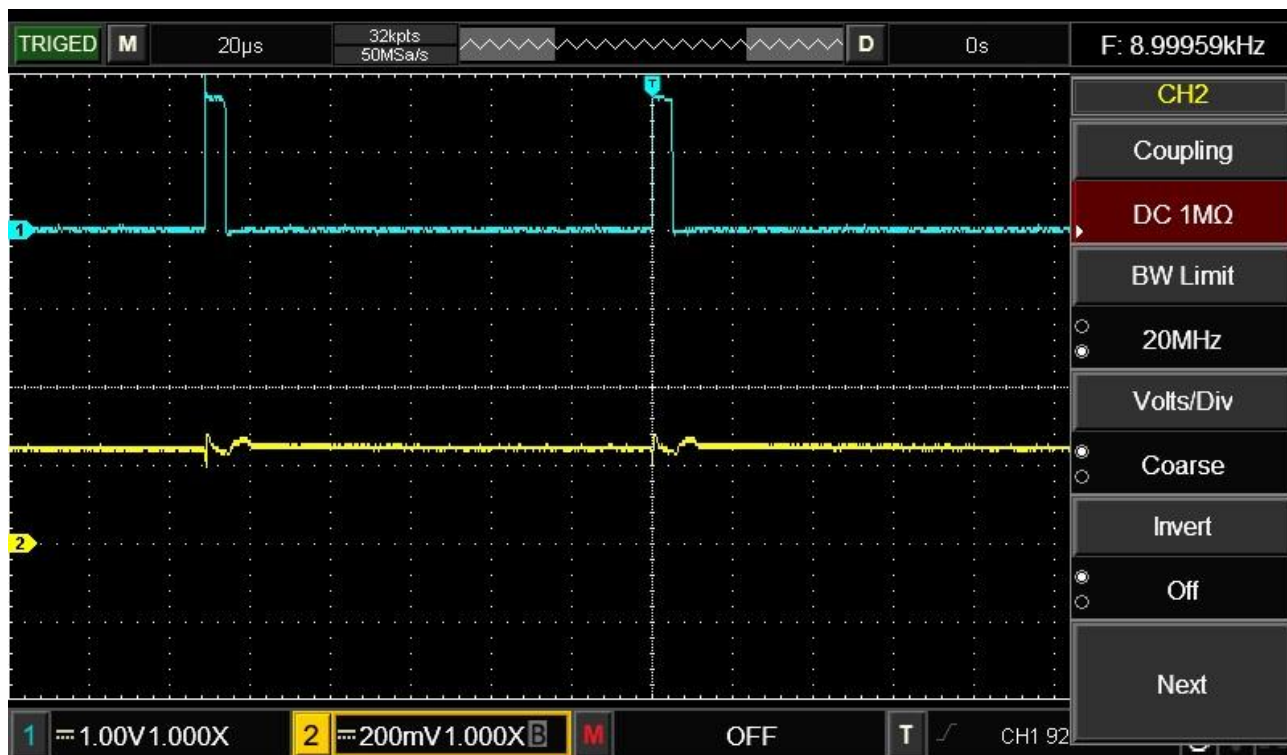
$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{T} * 100\% \quad (4.18)$$

Συγκρίνοντας τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του φορτίου ανεξαρτήτως του Duty Cycle, παρατηρούμε ότι η κυματομορφή του ρεύματος φορτίου είναι όμοια με την κυματομορφή της τάσης του φορτίου λόγω του τύπου του φορτίου που ελέγχουμε (ωμικό). Αξίζει να αναφέρουμε ότι τη χρονική στιγμή που το διακοπτικό υλικό IGBT αρχίζει να άγει, παρατηρούμε στην κυματομορφή του ρεύματος ότι υπάρχει ένα βύθισμα του ρεύματος. Αυτό προέρχεται από θόρυβο που δημιουργείται στο Probe ρεύματος κατά την μετάβαση του ημιαγωγού ισχύος (μεταβατικό φαινόμενο).

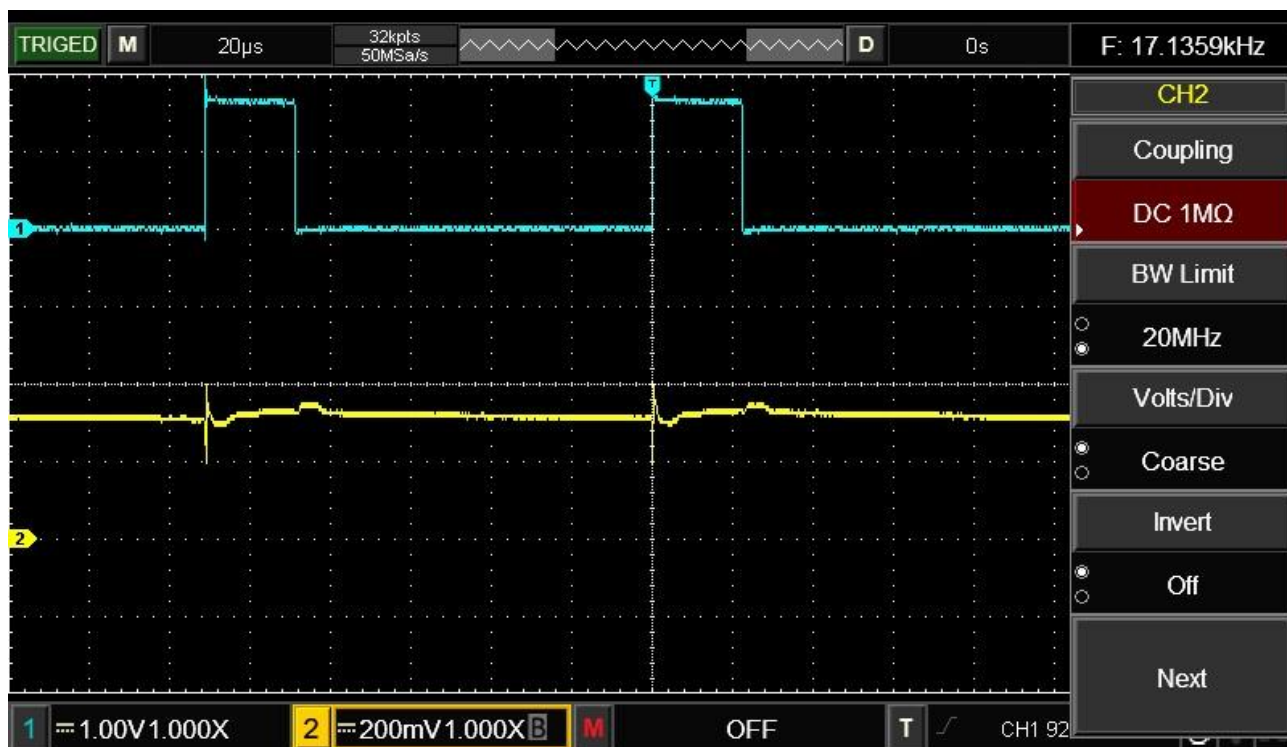
Έπειτα αποσυνδέσαμε από την πλακέτα την τροφοδοσία και αφού “ξεφορτίσαμε” τον πυκνωτή ώστε να μπορούμε να πιάσουμε την πλακέτα με ασφάλεια, συνδέσαμε την πλακέτα σε ένα ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς. Παρακάτω απεικονίζονται οι εικόνες από τον παλμογράφο.



**Εικόνα 66** Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό - επαγωγικό φορτίο με duty cycle 4,5% σε χρόνο 50µs/div



Εικόνα 67 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό - επαγωγικό φορτίο με duty cycle 4,5% σε χρόνο 20µs/div



Εικόνα 68 Απόσπασμα από τον παλμογράφο για ωμικό - επαγωγικό φορτίο με duty cycle 21% σε χρόνο 20µs/div

Αναλύοντας τις παραπάνω κυματομορφές από τον παλμογράφο προκύπτουν τα εξής:

Για τις κυματομορφές των εικόνων 9.7 και 9.8 προκύπτει με την χρήση του τύπου 4.18, ότι το Duty Cycle είναι 4.5%.

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{T} * 100\% \quad (4.18)$$

Για τις κυματομορφές των εικόνων 9.9 προκύπτει με την χρήση του τύπου 4.18, ότι το Duty Cycle είναι 21%.

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{T} * 100\% \quad (4.18)$$

Συγκρίνοντας τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του φορτίου ανεξαρτήτως του Duty Cycle, παρατηρούμε ότι το ρεύμα παραμένει σχεδόν αμετάβλητο σε αντίθεση με τις κυματομορφές που είχαμε με ωμικό φορτίο. Αυτό οφείλεται στον τύπο του φορτίου (ωμικό-επαγωγικό), αφού κατά την σβέση του IGBT ο κινητήρας συνεχίζει να άγει ρεύμα, μέσω της διόδου ελευθέρως ροής, λόγω της αυτεπαγωγής του.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη και κατασκευή διατάξεων ελέγχου για ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) με τη χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) προσφέρει σημαντικές δυνατότητες στον τομέα της ηλεκτρομηχανικής και των αυτοματισμών. Η χρήση της τεχνικής PWM επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση της ταχύτητας και της ροπής των ηλεκτροκινητήρων DC. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου, η σταθερότητα και η ακρίβεια της κίνησης είναι απαραίτητες, όπως στα βιομηχανικά συστήματα αυτοματισμού και τα ηλεκτρικά οχήματα.

Επίσης η συμβολή του στην βιώσιμη ανάπτυξη είναι σημαντική γιατί ενισχύει την αποδοτικότητα των συστημάτων και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο σε τομείς όπως η ηλεκτροκίνηση και οι βιομηχανικές εφαρμογές, όπου η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί προτεραιότητα.

Τέλος η μελέτη και η κατασκευή διατάξεων ελέγχου για ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος με τη χρήση PWM, αποτελεί ένα σημαντικό και επίκαιρο πεδίο έρευνας, με εφαρμογές σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας και της τεχνολογίας. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας συμβάλλουν στην κατανόηση και την περαιτέρω ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών, με σημαντικά οφέλη τόσο σε οικονομικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο.



## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- Καραϊσάς, Π. & Συνεργάτες. (2022). Εργαστηριακές σημειώσεις ηλεκτρικές μηχανές Ι, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών ΠΑΔΑ
- Καραϊσάς, Π. & Συνεργάτες. (2022). Εργαστηριακές σημειώσεις ηλεκτρικές μηχανές ΙΙ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών ΠΑΔΑ
- Ζεκάϊ, Ν. (2023). Ανάλυση και σχεδίαση DC-DC μετατροπέα Forward με γαλβανική απομόνωση [ Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών ΠΑΔΑ ]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Πολυνύ, [https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/4860/ZEKAI\\_212017036.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/4860/ZEKAI_212017036.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ioannidis, G.Ch., Psomopoulos, C.S., Kaminaris, S.D., Pachos, P., Villiotis, H., Tsiolis, S., Malatestas, P. & Vokas, G.A. (2013). ACDC & DCDC Converters for DC Motor Drives. 2013 International Conference on Electronics and Communication Systems. [https://d1wqtxtslxzle7.cloudfront.net/81916905/ECS-12-libre.pdf?1646812551=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAC+DC+and+DC+DC+Converters+for+DC+Motor.pdf&Expires=1725268542&Signature=QyB~b8d6y66cDn4zvnZg8OHqeezJq1tv6GjcaLSYcoxKmdHgHpDzDQd4vZLzg6xd~~PP8aEbHCzeuaZbGT7ROBzhXU12ImIq852Ogo0wyUxmllkA90i1-0xtxetgcF3Ampo~a4ekPndFEO9BwODuHuC~YBCNgx7NW~VfT1yU3WQm5N92E2Ubt d9i7WCpbilhfxrLxYSw8uOi-fWSWY06eMlrgqX1mjUB0a0FRTORcoQfvJRgBdS0AxFpVT3tQ0QZXoVIq9gCWzIa6eA2C-FwF8A7FbZsPpiMjbDBn2fsOYKvRL6RkEJG98WggpJSWIXn6G4DHFF18p6DIpUkCgCPSQ\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxtslxzle7.cloudfront.net/81916905/ECS-12-libre.pdf?1646812551=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAC+DC+and+DC+DC+Converters+for+DC+Motor.pdf&Expires=1725268542&Signature=QyB~b8d6y66cDn4zvnZg8OHqeezJq1tv6GjcaLSYcoxKmdHgHpDzDQd4vZLzg6xd~~PP8aEbHCzeuaZbGT7ROBzhXU12ImIq852Ogo0wyUxmllkA90i1-0xtxetgcF3Ampo~a4ekPndFEO9BwODuHuC~YBCNgx7NW~VfT1yU3WQm5N92E2Ubt d9i7WCpbilhfxrLxYSw8uOi-fWSWY06eMlrgqX1mjUB0a0FRTORcoQfvJRgBdS0AxFpVT3tQ0QZXoVIq9gCWzIa6eA2C-FwF8A7FbZsPpiMjbDBn2fsOYKvRL6RkEJG98WggpJSWIXn6G4DHFF18p6DIpUkCgCPSQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)
- Θεμέλης, Δ. (2015). Ηλεκτρικές Μηχανές. Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα TEI Κεντρικής Μακεδονίας. [http://eclass.opencourses.teicm.gr/ec/lass/modules/document/file.php/TMA112/Hlektrikes\\_Michanes\\_S.R.pdf](http://eclass.opencourses.teicm.gr/ec/lass/modules/document/file.php/TMA112/Hlektrikes_Michanes_S.R.pdf)
- Παπαδόπουλος, Γ. (2023), Συγκριτική Μελέτη Λειτουργικών Συστημάτων Πραγματικού Χρόνου στον Μικροελεγκτή ATmega328p [ Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών ΠΑΔΑ]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Πολυνύ, [https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/4651/Papadopoulos\\_21030.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/4651/Papadopoulos_21030.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Ζιώγας, Α. Β. (2021), Ανάλυση του Split – Pi DC – DC μετατροπέα αμφίδρομης ροής ισχύος, έλεγχος σε λειτουργία ολίσθησης επί επιφανείας και εφαρμογές [ Διπλωματική

εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ].

Ιδρυματικό Αποθετήριο Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Αρτεμης,

[http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/17852/3/Διπλωματική%20Εργασία\\_Τελικό.pdf](http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/17852/3/Διπλωματική%20Εργασία_Τελικό.pdf)

- Φουρλής, Σ. (2018), Υβριδικά Συστήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής [ Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας  
<https://core.ac.uk/download/pdf/161657475.pdf>
- Rajashekara, K. (nd). Διπολικό τρανζίστορ με μόνωση-πύλη (IGBT). Crushtymks.  
<https://crushtymks.com/el/electronics/310-insulated-gate-bipolar-transistor-igbt.html>
- Δούλος, Γ. (2021), Μελέτη κινητήρων συνεχούς ρεύματος [ Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών ΠΑΔΑ ]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Πολυνόη,  
[https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/2534/Doulos\\_48345486.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/2534/Doulos_48345486.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Μαλατέστας, Π. & Τερζή, Μ. (2020), Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας. ΤΖΙΟΛΑ.
- Μαλατέστας, Π. (2015), Ηλεκτρικές Μηχανές. ΤΖΙΟΛΑ.
- Δουδέσης, Δ. & Μουστάφα, Ρ. (2018), Έλεγχος DC κινητήρα μέσω DC/DC μετατροπέα και κατασκευή κυκλώματος ελέγχου μονοφασικής πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας [ Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών ΠΑΔΑ ]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Πολυνόη,  
<http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/4778/%ce%95%ce%9b%ce%95%ce%93%ce%a7%ce%9f%ce%a3%20DC%20%ce%9a%ce%99%ce%9d%ce%97%ce%a4%ce%97%ce%a1%ce%91%20%ce%9c%ce%95%ce%a3%ce%a9%20DCDC%20%ce%9c%ce%95%ce%a4%ce%91%ce%a4%ce%a1%ce%9f%ce%a0%ce%95%ce%91%20%ce%9a%ce%91%ce%99%20%ce%9a%ce%91%ce%a4%ce%91%ce%a3%ce%9a%ce%95%ce%a5%ce%97%20%ce%9a%ce%a5%ce%9a%ce%9b%ce%a9%ce%9c%ce%91%ce%a4%ce%9f%ce%a3%20%ce%95%ce%9b%ce%95%ce%93%ce%a7%ce%9f%ce%a5%20%ce%9c%ce%9f%ce%9d%ce%9f%ce%a6%ce%91%ce%a3%ce%99%ce%9a%ce%97%ce%a3%20%ce%a0%ce%9b%ce%97%ce%a1%ce%9f%ce%a5%ce%a3%20%ce%95%ce%9b%ce%95%ce%93%ce%a7%ce%9f%ce%9c%ce%95%ce%9d%ce%97%ce%a3%20%ce%93%ce%95%ce%a6%ce%a5%ce%a1%ce%91%ce%a3.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Δέδες, Π. & Ευθυμίου, Σ. (2014), Μέθοδοι ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων Σ.Ρ., [ Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολογίας Τ.Ε.Ι Πειραιά ]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Ωκεανίς,

[http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2172/hlg\\_201400936.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2172/hlg_201400936.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Βέννης, Α. (2018), Μελέτη για την κατασκευή κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης. [ Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών ΠΑΔΑ ].  
Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Πολυπόνη,  
<http://oceanis.lib.puas.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/4434/%ce%a0%cf%84%cf%85%cf%87%ce%b9%ce%b1%ce%ba%ce%ae%20%ce%92%ce%ad%ce%bd%ce%bd%ce%b7%cf%82%20%ce%91%ce%b8%ce%b1%ce%bd%ce%ac%cf%83%ce%b9%ce%bf%cf%82.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chapman, S. J. (2019), Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC, (Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ.). ΤΖΙΟΛΑ
- Μανιάς, Σ. Ν. (1988), Ηλεκτρονικά Ισχύος. Συμειών
- Linares-Flores, J. & Sira-Ramirez, H. (2004). DC motor velocity control through a DC-to-DC power converter. 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No.04CH37601) <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1429649/authors#authors>
- Mohan, N., Undeland, T.M. & Robbins, W.P. (2015), Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος, (Ι. Μάργαρης, Επιμ.). ΤΖΙΟΛΑ
- Raza, K., Kamil, M. & Kumar P. (2016), Speed Control of DC Motor by using PWM. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56130027/IJARCCE\\_78-libre.pdf?1521716280=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSpeed Control of DC Motor by using PWM.pdf&Expires=1725267478&Signature=GepRD1blAxXLOKZonxS1N2f4EVO4OOC7a51ZbOYaQu3YhiQrieNMVW9f6XUeC-HObpIrg7GcHWIL59mu-4c4vmS8oYGzofiONJXs4sqj~2MbcpcZGK~6APdqfLBwntS0ZofwoBu4I4uFoPS6AyD1xARJ-sJczscfnPg4SiTPPxIDo82pg-xpIhEd8IACKAA~siFT5wxN61Au77IoCaFZ1ZwgF~kggZ2LJoVN4LuhqQXxanN1lnKzjTPQfMApqaCimURKBj5NpedSN0ezLXMKIGrT-4UE87-pYr8OJv7XGkcJzolFCc3LCgcq0nU2aW3~Ucq6nxTQwy38CKyXLOWgKg &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56130027/IJARCCE_78-libre.pdf?1521716280=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSpeed%20Control%20of%20DC%20Motor%20by%20using%20PWM.pdf&Expires=1725267478&Signature=GepRD1blAxXLOKZonxS1N2f4EVO4OOC7a51ZbOYaQu3YhiQrieNMVW9f6XUeC-HObpIrg7GcHWIL59mu-4c4vmS8oYGzofiONJXs4sqj~2MbcpcZGK~6APdqfLBwntS0ZofwoBu4I4uFoPS6AyD1xARJ-sJczscfnPg4SiTPPxIDo82pg-xpIhEd8IACKAA~siFT5wxN61Au77IoCaFZ1ZwgF~kggZ2LJoVN4LuhqQXxanN1lnKzjTPQfMApqaCimURKBj5NpedSN0ezLXMKIGrT-4UE87-pYr8OJv7XGkcJzolFCc3LCgcq0nU2aW3~Ucq6nxTQwy38CKyXLOWgKg &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)
- José, N., Ramón, S., & Hind, T., Juan. A. & Victor, M. (2016), Simulation, construction, and validation of a DC/DC buck power converter-DC motor system. 2016 International Conference on Electronics, Communications and Computers, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7438562/authors#authors>
- Γεωργακόπουλος, Δ. & Παναγούλια, Γ. (2020), Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος σε Ηλεκτροκίνηση/Ηλεκτρικά Οχήματα, Επαγωγική Θέρμανση, UPS, Α.Π.Ε. και HVDC. [

Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Εκπαιδευτικών Ηλεκτρολογίας ΑΣΠΑΙΤΕ ].

<https://eclass.aspete.gr/modules/document/index.php?course=EHL204&download=/600d5bc24cP2/600d806dv1oZ.pdf>

- Σαρρής, Η. (2020), Μελέτη και Κατασκευή Τριφασικού Αντιστροφέα για τον Έλεγχο Τριφασικού Επαγωγικού Κινητήρα. [ Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών ΠΑΔΑ ]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Πολυνόη, [https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/425/eee\\_48343692.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/425/eee_48343692.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας (2005). Σημειώσεις ηλεκτρικών μηχανών
- Μαλατέστας, Π. (2015), Ηλεκτρική Κίνηση. ΤΖΙΟΛΑ, 2015
- Μαρτίνης, Σ. (2013), Οικιακός αυτοματισμός με χρήση μικροελεγκτή, . [ Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων Πανεπιστήμιο Αιγαίου ]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστήμιο Αιγαίου Hellenicus, [https://www.icsd.aegean.gr/website\\_files/diplomatikes/msc/55660114.PDF](https://www.icsd.aegean.gr/website_files/diplomatikes/msc/55660114.PDF)